



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN**
Vienna University of Technology

DIPLOMARBEIT

Untersuchung des Körperenergieverbrauchs als evidenzbasierter Ansatz zur Unterstützung der Radverkehrsplanung

Betrachtung anhand österreichischer Berufspendlerdaten 1971 - 2001



verfasst von

Clemens Raffler

Matrikelnummer 1027274

Studienrichtung Raumplanung und Raumordnung, Studienkennzahl 066 440

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung
des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs
unter Betreuung von

**Ao.Univ.Prof. Mag.rer.soc.oec. Mag. Dr.rer.soc.oec. Günter Emberger
und Univ. Ass. Dipl. Ing. Tadej Brezina**

Fachbereich für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik E230
der Technischen Universität Wien

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Architektur und Raumplanung

Wien, 12.09.2016

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei meinen Betreuern Günter Emberger und Tadej Brezina bedanken, welche mich inhaltlich sowie auch methodisch wesentlich beim Verfassen der Diplomarbeit unterstützt haben und zu jedem Zeitpunkt ein offenes Ohr für Ideen oder Probleme hatten.

Ein weiterer Dank geht an dieser Stelle auch an John Parkin nach Großbritannien, welcher mir auf Nachfrage seine bereits vergriffenen Publikationen elektronisch zur Verfügung gestellt hat – sie waren eine Bereicherung für die Arbeit! Auch an Roland Hackl möchte ich einen Dank richten, welcher durch Diskussionen wesentlich zur Qualität der Arbeit beitrug.

Ein besonderer Dank richtet sich an Kerstin, welche mich während meines Studiums und der Arbeit sowohl als Kollegin als auch als Freundin mehr als nur begleitet hat. Auch bei Michaela und Ben möchte ich mich für die gemeinsame Studienzeit bedanken – es ist toll, dass wir so gut zusammenhalten! Vielen Dank auch an Juliane und Roman für die erleichternden Gespräche!

Ganz besonders möchte ich mich bei meinen Eltern und meinem Bruder bedanken, welche mich über das Studium hinaus immer tatkräftig unterstützt haben und in allen Höhen und Tiefen immer hinter mir stehen – DANKE EUCH ALLEN!

Kurzfassung

„Radverkehrsanteil in Österreich auf 7 % gesteigert“ – Dieser Titel einer Pressemeldung ist nur einer von wenigen, welche das wachsende Interesse aktueller österreichischer Verkehrspolitik an Investitionen in den Radverkehr hervorheben. Doch wo sind Maßnahmensetzungen sinnvoll? Dieser Frage widmet sich die vorliegende Arbeit und entwickelt anhand der zum Radfahren notwendigen Körperenergie und Pendlerinteraktionsdaten zwischen 1971 und 2001 einen evidenzbasierten Ansatz zur Planungsunterstützung. Der erste Schritt dazu ist die statistische Beschreibung der Datengrundlagen der Ausgangslage für heutige Planungen. In einem zweiten Schritt wird anhand eines rasterbasierten GIS-Modells der energetische Aufwand für die Fortbewegung innerhalb und zwischen Gemeinden berechnet. Der abschließende Schritt prüft mithilfe eines regressionsanalytischen Ansatzes den statistischen Zusammenhang und berechnet ein Investitionspotential als Abweichung zwischen dem energetisch vorhergesagten und dem tatsächlichen Radverkehrsanteil von Gemeinden. Die Arbeit endet mit einer Diskussion der Ergebnisse und gibt einen Ausblick auf die Nutzung der Methode zur evidenzbasierten Planungsunterstützung durch nationale und internationale Planung und Forschung.

Abstract

„The bicycle share has risen to a level of 7 %“ – This headline is just one example that highlights the growing interest of current Austrian transport-policy in the fostering of bicycle traffic. But where is it most expedient to invest into new infrastructure or initiatives? This work seeks to shed light on the question and therefore presents an evidence-based planning-supporting methodology that builds upon body-energy consumption and relies on Austrian census commuter data between 1971 and 2001. The first working step is to provide descriptive information on the interactions of bicycle commuters and inform about the recent developments in bicycle traffic. The second step utilizes a new raster-based GIS-Model to calculate the energetic demand between and inside of Austrian municipalities. The last step is to conduct a regression analysis to check for a statistical relationship between cycle-share and energy consumption. It further allows the calculation of a potential value for investments as the deviation between the energetically predicted cycle-share and the present cycling level. The work concludes with the discussion of results and provides a perspective on the usage of this evidence-based methodology in national and international planning and research.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
1.1	Ausgangslage und Problemstellung	1
1.2	Motivation und Zielsetzung	2
2.	Das Rad als Verkehrsmittel – Grundlagen	5
2.1	Bedeutung des Radverkehrs	5
2.1.1	Historischer Überblick	5
2.1.2	Problemfelder heutiger Mobilität	6
2.1.3	Radverkehr als alternatives Fortbewegungsmittel	8
2.2	Radverkehrsplanung in Österreich.....	9
2.2.1	Maßnahmen und Projekte zur Attraktivierung.....	9
2.2.2	Planungszuständigkeiten	10
2.2.3	Herausforderungen österreichischer Radverkehrsplanung.....	13
3.	Radverkehr in internationaler Forschung und Planung	17
3.1	Wissenschaftsverständnis – Evidence-Based planning	17
3.2	Anwendung in der Radverkehrsplanung	19
3.3	Methodische Schwerpunkte	19
3.3.1	Zeitliche Überblicke zum Radverkehr	20
3.3.2	Modal-Choice Modelle – Einflussfaktoren auf den Radverkehr	21
3.4	Schwerpunktsetzung der vorliegenden Arbeit.....	25
4.	Theoretische Grundlagen und Konzepte	27
4.1	Evolutionstheoretische Betrachtung von Mobilität	27
4.1.1	Struktur und Verhalten.....	28
4.1.2	Empfindungsgesetze zur Messbarmachung von Strukturen.....	28
4.2	Konzepte zur statistischen Modellierung.....	30
4.2.1	Gravitationsmodelle und Widerstandsbewertung	30

5.	Methodische Vorgehensweise	33
5.1	Datengrundlagen	33
5.2	Arbeitsschritte	34
5.3	Räumliche und zeitliche Betrachtungsebenen	36
5.4	Anpassung des Datensatzes.....	37
5.4.1	Zusammenfassung der Verkehrsmodi	37
5.4.2	Berechnung und Aussagekraft des Modal-Splits	38
5.4.3	Ausschluss von O-D-Paaren	39
5.5	Grenzen der Arbeit.....	40
6.	Deskriptive Analyse des Radpendelverkehrs	43
6.1	Deskriptive Analyse des Modal-Splits	43
6.1.1	Zeitliche Entwicklung des Modal Splits nach Stadtregionstypen	43
6.1.2	Räumliche Verteilung des Modal-Split nach Stadtregionen	46
6.2	Deskriptive Analyse des Radverkehrs.....	49
6.2.1	Absolute Entwicklung und Verteilungen des Radverkehrs.....	49
6.2.2	Zeitliche Entwicklung des Radverkehrsanteils nach Stadtregionen	52
6.2.3	Entwicklung der Reiseweiten der Radauspendler	54
6.3	Zusammenfassung	55
7.	Modellierung des Körperenergieverbrauchs	57
7.1	Physikalische Grundlagen des Radfahrens	57
7.1.1	Luftwiderstand	58
7.1.2	Steigungswiderstand	58
7.1.3	Widerstandsdefinition dieser Arbeit.....	59
7.2	Herausforderungen der Widerstandsmodellierung in Österreich	60
7.3	Ein neuer Ansatz: Rasterbasierte Cost-Path Analysis	61
7.4	Neue Konzepte intrazonaler Widerstandsmodellierung.....	64
7.4.1	Circular-Shape Distance Estimates.....	65
7.4.2	Density-Based Scattered Intra-Zonal Distance Estimates	65

7.5	Modellmechanik und Funktionsweise	66
7.5.1	Räumliche Datengrundlagen	66
7.5.2	Ableitung inter- und intrazonaler Quell- und Zielpunkte	67
7.5.3	Anpassung des Pathdistance Algorithmus	69
7.5.4	Automatisierung der Widerstandsermittlung	72
8.	Regressionsmodell und Potentialableitung	73
8.1	Umgang mit Extremwerten	73
8.2	Deskriptive Beschreibung der Modellvariablen	74
8.3	Korrelationsanalyse.....	75
8.4	Kalibration der Gravitationsmodelle	78
8.4.1	Gravitationsmodelle als Regressionsgleichung	78
8.4.2	Linearisierung der Distance-Decay-Fuction	79
8.5	Modellergebnisse.....	80
8.5.1	Modellauswahl und -güte	80
8.5.2	Modellkoeffizienten	83
8.6	Ableitung des Investitionspotentials: Residuenanalyse	85
8.6.1	Residualanalyse auf Stadtregionsebene	86
8.6.2	Investitionspotentialkarte	88
9.	Ergebnisdiskussion und Ausblick	89
9.1	Anwendbarkeit in der österreichischen Radverkehrsplanung	89
9.2	Ähnliche Ansätze aktueller internationaler Forschung	91
9.3	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf	92
9.4	Zusammenfassung.....	93
10.	Verzeichnisse	97
10.1	Quellenverzeichnis	97
10.2	Datenquellen.....	106
10.3	Tabellenverzeichnis.....	106

10.4	Abbildungsverzeichnis	107
11.	Anhang	109
11.1	Variablenoperationalisierung in internationaler Forschung.....	109
11.2	Quellcode des Python Scripts	110
11.3	Tabellarische Auflistung der Radverkehrsentwicklung	115
11.4	Physikalische Zusammenhänge	117
11.5	Häufigkeitstabellen der ausgeschlossenen Fälle	118
11.6	Korrelationsmatrizen	118
11.7	Definitionen der Volkszählung	119

1. Einleitung

1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Als Mittel zur Fortbewegung durch den Raum wird dem Fahrrad – sowohl national als auch international – aktuell immer mehr Bedeutung zugemessen. So sprechen viele Verkehrsplaner und Wissenschaftler die vielfältigen Vorteile des Fahrrades, wie Ressourcenschonung, Gesundheitsförderung, Kosteneffizienz u. v. m. gegenüber motorisierten Fortbewegungsmitteln an (vgl. Meschik, 2008, S. 7 ff; Heinen et al., 2010, S. 59 f; Perschon, 2012, S. 2 ff, Thiemann-Linden, 2004, S. 9). Gleichzeitig wurde in den letzten Jahren mehrfach in den Medien (APA, 2011) und der Planungsfachwelt (VCÖ, 2010, S. 1 f) von einem steigenden Radverkehrsanteil in Österreich berichtet, welcher dem nationalen *Masterplan Radfahren 2015-2025* folgend auf bis zu 13 % gesteigert werden soll.

Tatsächlich bezeugt die Vielzahl an aktuellen Projekten im Bereich der Radverkehrsplanung einen Investitionsschub in diese nachhaltige Mobilitätsform. Beispiele dafür sind regionale Radnetzplanungen, wie das *RADLGrundnetz* des Landes Niederösterreich, großflächige Förderungen von Gemeinden, Vereinen und Betrieben durch den *klimaaktiv mobil Fond* auf Bundesebene, Initiativen wie *Österreich Radelt zur Arbeit*, oder technologische Hilfsmittel welche gezieltes Routing für Radfahrer ermöglichen sollen (s. Kapitel 2).

Trotz der aktuellen Bestrebungen nach mehr Investitionen in die Förderung des Radverkehrs zeigen sich planerische Probleme, welche Lösungen verlangen: Ein Blick auf die kompetenzrechtliche Situation der Radverkehrsplanung in Österreich lässt darauf schließen, dass die derzeitigen Investitionen stark vom politischen Willen lokaler Akteure in den Gemeinden abhängen. Gleichzeitig tritt seit 2007 neben den Radverkehrsstrategien der Länder die Bundesebene über kapitalintensive Förderprogramme in dem Kontext auf; deren Nutzung durch die Gemeinden erfolgt jedoch auf freiwilliger Basis. Die Tatsache, dass die verkehrspolitisch am heterogensten agierende Ebene das letzte Wort bei der Realisierung von Maßnahmen hat, stellt die Radverkehrsplanung in Österreich vor argumentative Herausforderungen. Dies ist insbesondere problematisch, da es in Österreich keinerlei wissenschaftliche Abschätzung gibt, in welchen Gemeinden es aufgrund unterschiedlichster Gegebenheiten sinnvoll ist, in den Radverkehr zu investieren und wo eine Steigerung des Radverkehrs durch hemmende Einflüsse begrenzt ist. Dies

wird in der Literaturrecherche der Arbeit bestätigt: Sowohl die bisherige zeitliche Entwicklung als Basis heutiger Verkehrspolitik als auch die wissenschaftliche Beschreibung und Diskussion von Wirkzusammenhängen hypothetischer Einflüsse als treibende oder hemmende Wirkungen auf die Wahl des Rades als Verkehrsmittel ist auf gesamtstaatlicher Ebene bislang unerforscht. Dieses Defizit hebt Österreich im internationalen Vergleich hervor, da sich in vielen Staaten anhand der getätigten Forschungsarbeit ein deutlicher Trend zum Einsatz solcher grundlegenden Erkenntnisse in Form von faktenbasierter Planung (engl. „Evidence-Based Planning“) erkennen lässt (s. Kapitel 3).

1.2 Motivation und Zielsetzung

Mit dem Wissen um eine spärliche Datenlage und der Absenz von detaillierten wissenschaftlichen Abhandlungen soll mit dieser Arbeit einer der ersten Schritte zu mehr Faktenunterstützung in Radverkehrsplanungsprozessen und der Erklärung der radbezogenen Verkehrsmittelwahl in Österreich getan werden. Besonders im Hinblick auf die heterogene verkehrspolitische Situation in den Gemeinden soll die Argumentation von Investitionen in Radverkehrsförderung erleichtert werden. Kapitel 2.2 beleuchtet die Einbettung des Radverkehrs in das heutige Verkehrssystem und die Planungsstrukturen Österreichs genauer, um die eingangs erläuterte Problemstellung der Arbeit zu schärfen.

Damit die Vorgehensweise der Arbeit auf ein solides wissenschaftliches Fundament gestellt werden kann, bedient sie sich aktueller Ansätze und Methoden der zuvor genannten evidenzbasierten internationalen Forschung, welche durch zeitliche Monitorings sowie das modellhafte Beschreiben des Radverkehrsanteils anhand möglicher, die Verkehrsmittelwahl bestimmende Einflussfaktoren geprägt sind (s. Kapitel 3). Durch die Betrachtung internationaler Forschungslücken im Kontext der Evolutionstheorie in der Verkehrsplanung (s. Kapitel 4) fokussiert die Arbeit inhaltlich auf die Untersuchung des bisher wenig betrachteten körperlichen Energieaufwandes beim Radfahren. Der Körperenergieverbrauch als maßgebliche Größe der evolutionstheoretischen Betrachtung von Verkehrssystemen dient der Arbeit inhaltlich als Bewertungsmaßstab für die Einschätzung der österreichischen Gemeinden nach topographischer Befahrbarkeit.

Methodisch gipfelt dies in einer quantitativen Analyse des Radverkehrs, welche anhand von Pendeldaten der Jahre 1971 bis 2001 für ganz Österreich auf Gemeindeebene durch die Anwendung deskriptiver und multivariater Statistik sowie räumlicher Modellierung im GIS möglich ist (s. Kapitel 5). Der erste analytische Schwerpunkt liegt auf der Erarbeitung

einer zeitlichen Analyse der Radverkehrsentwicklung auf Grundlage der Pendlerdaten. Ziel ist es, einen deskriptiven Überblick zu geben, um im Sinne einer informierten Planung ein besseres Verständnis für die Ausgangslage heutiger Investitionen in den Radverkehr zu schaffen (s. Kapitel 6). Der zweite analytische Teil der Arbeit beschäftigt sich mit der Erstellung eines Regressionsmodells, welches den lokalen Radverkehrsanteil anhand des zur Fortbewegung notwendigen Körperenergieverbrauchs als Maß der Anstrengungsempfindung aus topographischen Gegebenheiten und Fahrweiten annähert (s. Kapitel 7 und 8). Der Hintergrundgedanke ist, einerseits als Beitrag zur internationalen Forschung die Wirkung von Topographie- und Distanzwiderständen auf den Radverkehrsanteil zu untersuchen und andererseits einen mathematischen Rahmen für die Ableitung eines Investitionspotentials zu schaffen. Investitionen und planerische Maßnahmen sollen demnach besonders in jenen Regionen gesetzt werden, in welchen der Radverkehrsanteil aufgrund der topographischen Gegebenheiten Potential zur Steigerung hat.

Gemäß den zuvor gesetzten Zielen wurden folgende Forschungsfragen ausformuliert, deren Ableitung in den einleitenden Kapiteln 2 und 3 genauer erläutert wird:

- *Welche zeitlichen und räumlichen Entwicklungstendenzen und Trends lassen sich als Basis heutiger Verkehrsplanung zwischen den Jahren 1971, 1981, 1991 und 2001 in Bezug auf den Radpendelverkehr feststellen?*
- *Inwiefern zeigen sich die auf den Körperenergieverbrauch eines Radfahrers wirkenden Raumwiderstände Pendeldistanz und Topographie als maßgebliche Einflussfaktoren auf die Wahl des Fahrrades als Pendelverkehrsmittel?*
- *Inwiefern kann Körperenergie als Argumentationshilfe für das gezielte Setzen von Investitionen durch die österreichische Radverkehrsplanung herangezogen werden?*

Insbesondere die zweite Forschungsfrage betrachtet den Radverkehr im Kontext bisheriger evolutionstheoretisch geleiteter Arbeiten. So wird in diesem Teil der Analyse die statistische Hypothese geprüft, ob der funktionale Zusammenhang zwischen den betrachteten Raumwiderständen und dem Radanteil durch die verkehrswissenschaftliche Auslegung von Empfindungsgesetzen beschrieben werden kann.

2. Das Rad als Verkehrsmittel – Grundlagen

Um die Problemstellung der Arbeit in den Kontext der Entwicklung des Verkehrssystems zu stellen, ist ein einführender Überblick zu den Grundlagen des Radverkehrs notwendig. Durch eine kurze Beschreibung der historischen Rahmenbedingungen und der heutigen Herausforderungen durch verkehrliche Probleme wird die Ausgangslage für das große politische Interesse am Radverkehr verständlich gemacht. Damit eng verbunden sind die Eigenschaften des Fahrrades im Vergleich zu anderen Verkehrsmitteln, durch welche es in Planungskreisen, der Politik und Öffentlichkeit als nachhaltiges Fortbewegungsmittel betrachtet wird. Der zweite Teil des Kapitels gibt einen kurzen Überblick über die derzeitigen planerischen Maßnahmen und Projekte der Verkehrsplanung zur Förderung des Radverkehrs in Österreich. Wesentlich für die Realisierung von Maßnahmen zur Attraktivierung ist auch die Kenntnis der in der Einleitung angesprochenen Verteilung der Planungskompetenzen. Das Kapitel endet mit einem Zwischenfazit, welches die wesentliche Problemstellung, der sich die österreichische Radverkehrsplanung gegenüberstellt, zusammenfasst.

2.1 Bedeutung des Radverkehrs

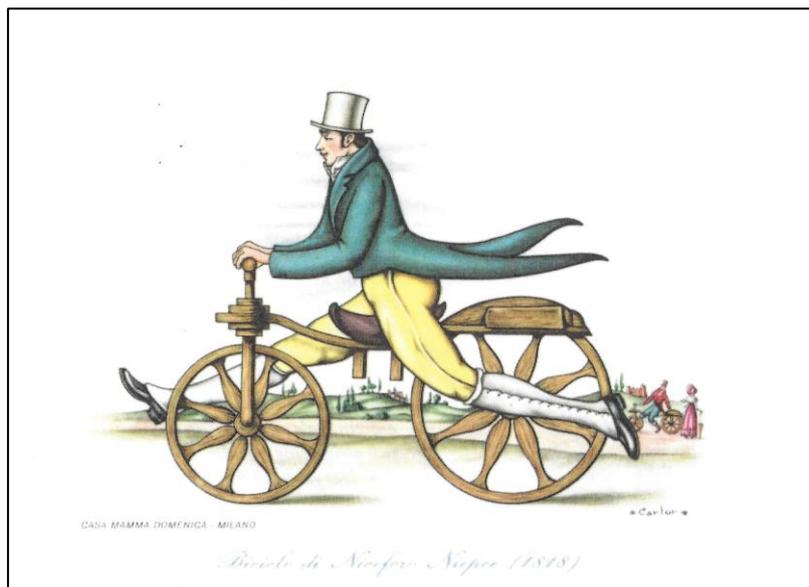
Um die heutige verkehrspolitische Bedeutung des Radfahrens deutlich zu machen, wird in diesem Teilkapitel zuerst die historische Entwicklung dieser Fortbewegungsart umrissen und in den Kontext der Probleme des heutigen Verkehrssystems gestellt.

2.1.1 Historischer Überblick

Angeblich begann alles mit einem Knall! So ist die Erfindung des Fahrrades laut Historikern auf eine Eruption des im Pazifik gelegenen Vulkan Tambora im Jahr 1815 zurückzuführen. Die mit der Eruption – welche derart kraftvoll war, dass sie über einen langen Zeitraum andauerte – einhergehende Veränderung des Weltklimas, brachte das Wirtschafts- und Verkehrssystem des 19. Jahrhunderts ins Wanken. Durch die Aschewolken des Ausbruchs wurde 1816 als das „Jahr ohne Sommer“ (Wich, 2010, S. 9) bezeichnet: Die daraus resultierenden Ernteausfälle und Hungersnöte führten dazu, dass Nutztiere – das damalige Haupttransportmittel – nur mehr eingeschränkt zur Verfügung standen. Aus dieser Not heraus begannen sich Ingenieure und Erfinder mit Konzepten eines durch menschliche Muskelkraft betriebenen Transport- und Verkehrsmittels auseinanderzusetzen.

Die dabei entstandenen Gefährte lieferten, begonnen mit der 1818 von Karl Drais erfundenen zwei-rädrigen Laufmaschine namens „Velociped“ (in Großbritannien auch „Hobby Horse“ genannt) (s. Abbildung 1), über pedalbetriebene Hochräder oder militärisch genutzte Waffenräder, den Grundstein für den modernen Radverkehr (Wich, 2010, S. 8 ff).

Abbildung 1: Italienisches Velociped



Quelle: Wich, 2010, S. 16.

Historisch gesehen erreichte die Nutzung des Fahrrades ab dem Ersten Weltkrieg und in der Zwischenkriegszeit den Höhepunkt der Beliebtheit als Verkehrsmittel (Merki, 2008, S. 50).

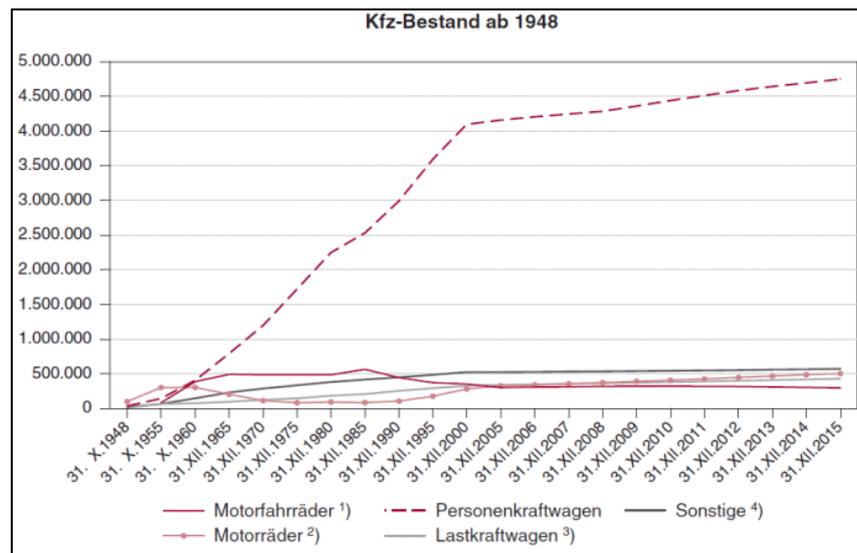
2.1.2 Problemfelder heutiger Mobilität

Seit dieser Blütezeit des Fahrrades ist knapp ein Jahrhundert vergangen. Der technische Fortschritt brachte den Menschen neue Formen der Fortbewegung, wie dem seit dem Ende des Zweiten Weltkrieges in Europa aufstrebenden motorisierten Individualverkehr (MIV), welcher eine Veränderung des Mobilitätsverhaltens einleitete. Das Automobil ermöglichte es dem Menschen nicht nur weiter entfernte Ziele schneller aufzusuchen, sondern entband ihn durch die Zuhilfenahme von fossilen Treibstoffen für den Antrieb weitgehend auch von der Last des Einsatzes von Körperenergie (Merki, 2008, S. 91). Die Popularität des Autos wurde dermaßen groß, dass in verkehrsgeschichtlicher Literatur oftmals davon gesprochen wird, dass das Rad „von den Autos zunehmend und im wörtlichen Sinne an den Rand gedrängt wurde“ (Merki, 2008, S. 50).

Verstärkt wurde der Trend – unterstützt von städtebaulichen Manifesten wie der Charta von Athen – durch planerische Eingriffe, welche das Siedlungs- und Verkehrssystem nach dem Maßstab des Autos gestalteten und die räumliche Trennung von Nutzungen vorsahen (Meyer, 2013, S. 4).

Die mit den neuen Stadtstrukturen und dem wirtschaftlichen Aufschwung erwachsende Massenmotorisierung nach dem zweiten Weltkrieg (Merki, 2008, S. 55 f) ist auch in Österreich zu beobachten (s. Abbildung 2) und stieg bis zur Jahrtausendwende stark an.

Abbildung 2: Entwicklung der Motorisierung in Österreich



Quelle: Statistik Austria, 2016; eigene Darstellung, 2016.

In der Fachliteratur wird

das Auto als Teil des heutigen Verkehrssystems oft unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit mit Bezug auf deren drei Dimensionen einer ökologischen, ökonomischen und sozialen Entwicklung diskutiert. Steubing (1999, S. 26 ff) sowie Perschon (2012, S. 2 ff) nennen in Bezug darauf mehrere Probleme, welche aufgrund des hohen MIV-Aufkommens einer nachhaltigen Entwicklung des Verkehrssystems für nachfolgende Generationen entgegenstehen:

- Umweltverschmutzung und Gesundheitsbelastung durch Abgase, Abrieb und Schall,
- Beitrag zur Klimaerwärmung durch vermehrten Treibhausgasausstoß,
- Verbrauch von nicht erneuerbaren Ressourcen als Treibstoffe,
- überhöhte Kosten beim Infrastruktur- und Siedlungsbau und
- Erhöhung des Unfallrisikos für Teilnehmer des nicht-motorisierten Verkehrs.

Zusätzlich erwartet Perschon (2012, S. 2) aufgrund der wirtschaftlichen Vorbildwirkung der sogenannten Erste-Welt-Staaten, dass der Motorisierungsgrad auch in Dritte-Welt-Ländern weiter steigt, wodurch die globale Dimension der oben angeführten Probleme deutlich wird. Auch in ihrer zeitlichen Dimension erweisen sich die negativen Effekte des MIV nicht als unbekannt: Die Tatsache, dass auf die negative Entwicklung des Verkehrssystems bereits in den siebziger Jahren durch wissenschaftliche Arbeiten wie dem systemdynamischen Weltmodell *World3* (Meadows et al., 2012, S. XI f) hingewiesen wurde, zeigt die Dringlichkeit der Zuwendung und Förderung anderer Fortbewegungsmittel.

2.1.3 Radverkehr als alternatives Fortbewegungsmittel

Vor dem Hintergrund der zuvor geschilderten Schwierigkeiten wird die Nachfrage nach Konzepten, die eine Verlagerung des Verkehrsaufkommens vom MIV auf nicht-motorisierte Verkehrsmittel wie den Radverkehr Ziel haben, immer stärker. Dieser Prozess wird von Politikern als „Mobilitätswende“ (BMLFUW, 2015, S. 3) bezeichnet und in den letzten Jahren auch in der österreichischen Verkehrspolitik mit Nachdruck verfolgt. Der Hauptgrund dafür ist, dass „der Radverkehr [...] in idealer Weise alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit [erfüllt]“ (Meschik, 2008, S. 8): Vergleicht man das Fahrrad mit anderen technischen Verkehrsmitteln wie motorisierten Kraftfahrzeugen oder schienengebundenen Fahrzeugen, so ist die Unabhängigkeit von externen fossilen Energiequellen der wesentlichste Vorteil, welcher durch Fachliteratur hervorgehoben wird (Draeger et al., 1999, S. 236; Merki, 2008, S. 48). Sowohl in der Herstellung (Knoflacher, 1995, S. 182) als auch im Erwerb und Betrieb (Meschik, 2008, S. 9) ist das Fahrrad sehr kostengünstig und ressourcensparend. Dies ist insbesondere im Hinblick auf die Nutzung durch einen Großteil der Bevölkerung sehr zuträglich. Weiters fallen keine Kosten für den Erwerb einer Lenkberechtigung an, wodurch das Fahrrad für sämtliche Bevölkerungs- und Altersschichten der Gesellschaft als Fortbewegungsmittel zugänglich ist und daher schon von klein auf genutzt werden kann.

Im Bereich des nicht-motorisierten Verkehrs ist der unbestrittene Vorteil des Rades gegenüber dem zu Fuß gehen die effizientere Umsetzung der aufgewandten Körperenergie zur Fortbewegung. Der Verbrauch wird durch den Pedalantrieb pro Zeiteinheit um ein Drei- bis Fünffaches verringert (Knoflacher, 2013, S. 56). Dadurch fällt auch der vermehrte Ausstoß von Treibhaus- und anderen Abgasen weg, wie sie durch den MIV verursacht werden. Weiters kann bei geringerem Energieverbrauch, eine weitaus höhere Durchschnittsgeschwindigkeit (~ 10-20 km/h, max. 30 km/h) als beim Fußgänger (~ 5 km/h) erreicht werden (Knoflacher, 1995, S. 186). Dadurch wird trotz Nicht-motorisierung bei konstantem Reisezeitbudget das Zurücklegen weiterer Strecken im Vergleich zum Fußgänger möglich (Knoflacher, 1995, S. 188).

Auch aus Sicht des Staates ist eine Förderung der Radnutzung mit Vorteilen verbunden. Hervorzuheben sind dabei die positiven Effekte auf die Gesundheit des Fahrenden, wodurch Kosten der medizinischen Versorgung gemindert werden (Thiemann-Linden, 2004, S. 33). Einen anderen ökonomischen Vorteil gegenüber herkömmlicher Straßeninfrastruktur stellen auch die geringen Kosten für die Errichtung von Radinfrastruktur dar (Meschik, 2008, S. 9).

2.2 Radverkehrsplanung in Österreich

Dieses Teilkapitel beschreibt die Grundlagen der Radverkehrsplanung in Österreich und soll dem Leser einen Eindruck von den aktuell gesetzten Maßnahmen zur Förderung sowie von den derzeitigen Planungs- und Kompetenzstrukturen geben, um die Problemstellung der Arbeit zu konkretisieren.

2.2.1 Maßnahmen und Projekte zur Attraktivierung

Dieser Abschnitt konkretisiert die Eigenschaften planerischer Handlungsmöglichkeiten zur Attraktivierung des Radverkehrs. Gleichzeitig dient die Beschreibung als Begriffsabgrenzung für den Ausdruck *Planungsmaßnahmen*, wie er im weiteren Verlauf der Arbeit verwendet wird. Planerische Eingriffe können nach Meschik (2008) in folgende zwei Gruppen geteilt werden:

Sanfte Verkehrsmaßnahmen

Unter sanften Maßnahmen, welche auch als *Soft Policies* bezeichnet werden, versteht man Eingriffe, durch welche koordinierend, beratend bzw. motivierend eine Attraktivierung des Radverkehrs erzielt werden soll. Darin eingeschlossen sind bewusstseinsbildende Kampagnen, mit welchen die Bevölkerung im Hinblick auf die Alternativen und Vorteile der Radnutzung im Vergleich zu anderen Verkehrsmitteln sensibilisiert wird (Meschik, 2008, S. 26 f). Ein aktuelles Projekt, welches den Reiz, das Fahrrad zu nutzen, auf eine kompetitive Weise anspricht, ist die Initiative *Österreich Radelt Zur Arbeit*, welche von der *Radlobby Österreich* initiiert wurde. Es sollen Angestellte und Mitarbeiter von Firmen angesprochen werden, welche im Sinne eines Wettstreits mit Teams anderer Firmen um die größte Kilometerleistung beim Zurücklegen des täglichen Arbeitsweges mit dem Fahrrad wetteifern (Radlobby, 2016).

Als weitere sanfte Maßnahme wird die Etablierung von Radverkehrsbeauftragten auf lokaler Ebene der Gemeinden betont. Diese Personen sind Ansprechpartner für sämtliche Fragen, welche den Radverkehr betreffen, und koordinieren somit infrastrukturelle Eingriffe mit übergeordneten Planungsorganen und Förderstellen. Somit erfüllen sie ebenfalls eine bewusstseinsbildende Funktion in der lokalen Bevölkerung (Meschik, 2008, S. 26 ff). Der *Mobilitäts-Lehrgang für Gemeinden*, welcher im Rahmen des Klimabündnisses Österreich veranstaltet wird, ist ein aktuelles Beispiel für die Ausbildung von kommunalen Ansprechpartnern (Klimabündnis Österreich, 2016).

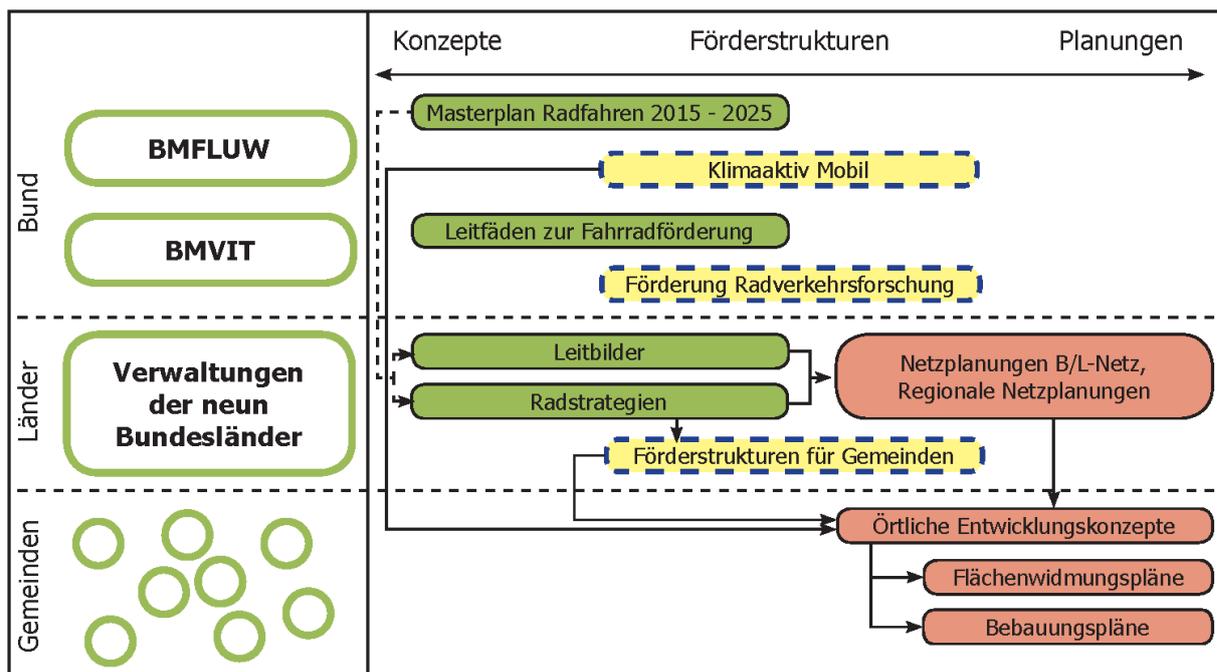
Infrastrukturelle- und netzgestalterische Maßnahmen

Diese Maßnahmen umfassen sämtliche Eingriffe, welche im Rahmen der hoheitlichen Planung in die Straßeninfrastruktur getätigt werden, um Flächen für die Nutzung mit dem Fahrrad zu schaffen. Dies wird vornehmlich von Verkehrsplanern auf Landes- und Gemeindeebene durchgeführt und umfasst die Zuordnung von Radinfrastruktur (Radwege, Mehrzweckstreifen, etc.) nach eigens erstellten Netzentwürfen (Meschik, 2008, S. 37 f) sowie die Planung von Radabstellanlagen (Meschik, 2008, S. 153).

2.2.2 Planungszuständigkeiten

Auf den ersten Blick scheinen die Handlungsmöglichkeiten der Radverkehrsplanung ähnlich geregelt, wie die Kompetenzen zur Raumordnung – jedoch gibt es auch einige Unterschiede. Direkte Möglichkeiten zur verbindlichen, hoheitlichen Planung besitzen nur die Bundesländer und die Gemeinden gemäß der Kompetenzregelung des Artikel 15 und Generalklausel – Artikel 118 – der Bundesverfassung (vgl. Artikel 15 Abs. 1, B-VG; vgl. Artikel 118, B-VG). Die Verlagerung von Planungsbefugnissen im Bereich der Verkehrsplanung wurde 2002 durch die Übergabe der Bundesstraßenverwaltung in den Aufgabenbereich der Länder weiter dezentralisiert (BMVIT, 2016).

Aber auch auf Bundesebene gibt es durchaus relevante Akteure, welche eine Attraktivierung des Radverkehrs lenken können. Abbildung 3 zeigt die wesentlichen Konzepte, Förderstrukturen und Planungsinstrumente hierarchisch nach den Stufen der österreichischen Verwaltung aufgegliedert, welche die Realisierung von radverkehrsfördernden Maßnahmen in Österreich steuern können. Der rechte Teil der Grafik beschreibt die Abhängigkeit und Wechselwirkungen zwischen Konzepten, Förderstrukturen sowie Planungsdokumenten. Die Darstellung wird dabei von links nach rechts hinsichtlich der planerischen Direktheit und Verbindlichkeit für infrastrukturelle Eingriffe gestaffelt. Wesentlich sind die sich ergebenden Abhängigkeiten und Einflussmöglichkeiten zwischen den Instrumenten, welche in Pfeilform dargestellt sind und das Zusammenspiel der unterschiedlichen Planungsebenen sichtbar machen.

Abbildung 3: Planungshierarchie in der Österreichischen Radverkehrsplanung

Quelle: eigene Darstellung, 2016.

Bundesebene

Auf Bundesebene gibt es außerhalb möglicher Änderungen der Straßenverkehrsordnung keine Kompetenz zum direkten Eingriff in die radverkehrsbezogene Planung. Da jedoch „der Radverkehr und Maßnahmen zu dessen Förderung in Wechselwirkung mit wichtigen Interessen des Bundes (Klimaschutz, Gesundheit, Verkehrssicherheit, Luftreinhaltung, Lärm,...) [stehen]“ (BMLFUW, 2006, S. 44) sind die jeweiligen Ministerien als Akteure nicht außer Acht zu lassen.

Das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) sowie das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) agiert vor allem durch die Erstellung von unverbindlichen Konzepten, welche die Stoßrichtung österreichischer Verkehrspolitik hinsichtlich Fahrradförderung vorgeben. Ein wichtiges Dokument ist der *Masterplan Radfahren 2015–2025*: Inhaltlich setzt er das Ziel einer Erhöhung des Radanteils am Gesamtverkehrsaufkommen in Österreich auf 13 % bis zum Jahr 2025 (BMLFUW, 2015, S. 5), was durch Maßnahmen wie Bewusstseinsbildung und enge Kooperation mit den Ländern und Gemeinden bezüglich des Infrastrukturausbaus erreicht werden soll (BMLFUW, 2015, S. 31).

Eines der Instrumente zur direkten Einflussnahme auf Planungen ist die Förderinitiative *klimaaktiv mobil* des BMLFUW. Hierdurch wird es dem Bund möglich, Gelder an Betriebe, Gemeinden und Regionen für Projekte und Beratungen zu vergeben, welche die

Förderung klimafreundlicher Mobilität zum Ziel haben (BMLFUW, 2014). Da dieses Fördermodell die einzige Möglichkeit darstellt, von überörtlicher Ebene Anreize für eine fahrradfreundliche Verkehrspolitik der Gemeinden zu setzen, ist es eines der wirkmächtigsten Instrumente des Bundes. Dies wird durch die bisherige Investitionssumme von rund 934 Millionen Euro (Stand November 2015) unterstrichen, welche durch das *klimaaktiv mobil*-Förderprogramm seit dem Programmstart 2007 zu einem Großteil in die Förderung klimaschonender Mobilität floss (Klima- und Energiefonds, 2015, S. 4).

Weitere Hilfestellungen werden seitens des BMVIT und BMLFUW für Gemeinden in Form von öffentlich zugänglichen Planungsleitfäden publiziert. Diese zielen darauf ab, Gemeinden eine Hilfestellung bei der Konzeption einer radverkehrsfreundlichen kommunalen Verkehrspolitik zu bieten. Beispiele dafür sind Leitfäden wie die Publikation „Kosteneffiziente Maßnahmen zur Förderung des Radverkehrs in Gemeinden“ (vgl. BMVIT, 2013b) bzw. der „Leitfaden Radverkehrsförderung“ (vgl. BMLFUW, 2012).

Das BMVIT stellt auch die Möglichkeit zur Förderung von Forschungsarbeiten durch die Forschungsförderungsgesellschaft (FFG), welche sich mit nachhaltigen Verkehrslösungen beschäftigen.

Landesebene

Die Radverkehrsplanung auf Landesebene ist durch die föderale Gliederung Österreichs in neun Bundesländern äußerst unterschiedlich geregelt. Verschiedene Konzepte und Strategien – von verstärkter Fahrradförderung im touristischen Bereich bis zur Planung von regionalen Radnetzen – dominieren das derzeitige Bild (BMLFUW, 2015, S. 10 ff).

Die Verwaltungen der Bundesländer haben in Österreich die freiwillige Möglichkeit, eigene Leitbilder und Strategien zur Radverkehrsplanung auszuarbeiten. Diese geben direkt den Gestaltungsrahmen für Planungen am Bundes- bzw. Landesstraßennetz oder auch anderer Netze vor, welche die überregionale Vernetzung von Gemeinden zum Inhalt haben (BMVIT, 2016). Auch direkte monetäre Förderungen für den Ausbau von lokalen Gemeinderadnetzen oder Initiativen zur Bewusstseinsbildung sind auf Landesseite vorgesehen (s. Abbildung 3). Da Ziel dieses Kapitels lediglich ein Überblick zur kompetenzrechtlichen Situation ist, wird nicht detailliert auf einzelne Konzepte der Bundesländer eingegangen.

Als Beispiel kann das niederösterreichische *RADLGrundnetz* angeführt werden, welches stückweise als überörtliches Netz für mehrere Regionen Niederösterreichs geplant wird.

Abgeschlossene Planungen bestehen derzeit für die Regionen um Wiener-Neustadt, Schwechat und das Marchfeld – weitere Regionen sollen folgen. Bauliche Infrastruktur darf vom Land nur im Bereich von Bundes- oder Landesstraßen direkt realisiert werden, was dazu führt, dass eine Zusammenarbeit der Landesebene mit den Gemeinden auch in diesem Fall für Errichtung eines lückenlosen Netzes unabdingbar ist. Der Infrastrukturausbau auf lokaler Ebene liegt im eigenen Wirkungsbereich der Gemeinde. Das Land Niederösterreich bewerkstelligt dies im Falle des *RADLGrundnetzes* durch die Bereitstellung von Fördertöpfen, welche für Gemeinden einen Anreiz zur Erstellung eines kommunalen *RADLGrundnetzes* bieten sollen (ENU, 2016).

Gemeindeebene

Wie oben bereits angesprochen liegt die Entscheidung über Investition in Maßnahmen zur Radverkehrsförderung bei den rund 2100 Gemeinden Österreichs, da sie im Rahmen der örtlichen Raumplanung und daher im eigenen Wirkungsbereich der Gemeinde zu realisieren sind. Konkrete Planungen werden daher – falls vorhanden – in den Verkehrskonzepten der örtlichen Entwicklungspläne sichtbar und erreichen in weiterer Folge durch den Beschluss des Gemeinderats im Flächenwidmungs- und Bebauungsplan rechtliche Verbindlichkeit (s. Abbildung 3) (BMVIT, 2016).

2.2.3 Herausforderungen österreichischer Radverkehrsplanung

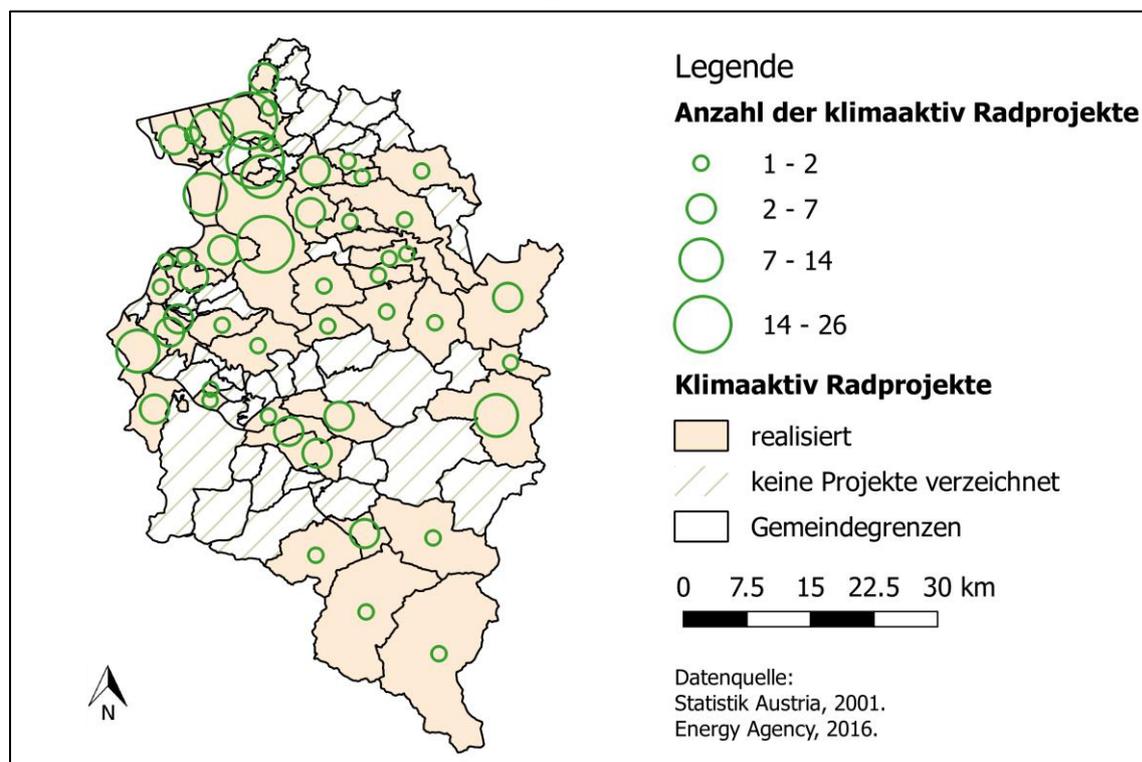
Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass – nicht zuletzt wegen der in Kapitel 2.1.2 beschriebenen Probleme des heutigen Verkehrssystems – im Rahmen der übergeordneten Konzepte und Masterpläne und auch auf lokaler Ebene ein deutliches Streben zum Anheben des Radverkehrsanteils zu bemerken ist. Auch seitens der bereitgestellten Fördergelder sowie der etablierten Projekte und Initiativen im Bereich der sanften und infrastrukturellen Maßnahmen kann dies beobachtet werden (s. Kapitel 2.2.1).

Eine der wesentlichen Problematiken ergibt sich aber aufgrund des rechtlich unverbindlichen Charakters von Konzepten und Förderbestrebungen der beiden überörtlichen Planungsebenen, da diese keinerlei direkte Verpflichtung für Gemeinden zu einer fahrradfreundlichen Verkehrspolitik darstellen. Zusätzlich zeigt sich, dass überörtliche Förderangebote einer äußerst heterogenen Struktur bezüglich der verkehrspolitischen Positionen in den Gemeinden gegenüberstehen, da für viele lokale Entscheidungsträger die Steigerung eines ohnehin kleinen Radverkehrsanteils nur „einen

geringeren Stellenwert als Nachweis für erfolgreiches politisches Wirken“ (Draeger et al., 1999, S. 238) hat.

Dass dieser Aussage von Draeger et al. auch heute noch valide ist, zeigen aktuelle Kommentare von Planern in Protokollen zu Planungsprozessen, wie dem *Gesamtverkehrskonzept für den Großraum Linz 2012* (Sammer et al., 2012, S. 99 f) oder der *Stadtregion Steirischer Zentralraum 2014 +* (Zimmerman, 2014, S. 4). Auch eine Studie des *Kuratoriums für Verkehrssicherheit* zu einem Vergleich zwischen einzelnen Gebietskörperschaften aus Vorarlberg und Niederösterreich bestätigt das Bild eines sehr stark differierenden politischen Willens zur Attraktivierung des Radfahrens in der Gemeindeförderung (Breuss et al., 2010, S. 4). Radverkehr wird in Österreich demnach nicht gezielt dort gefördert, wo eine Steigerung des Radanteils möglich und sinnvoll wäre, sondern ist stark von dem politischen Interesse auf kleinräumiger Ebene abhängig. Abbildung 4 versucht die Problematik anhand von konkreten Daten zur räumlichen Verteilung von Fördermaßnahmen genauer zu visualisieren. Die Karte zeigt die getätigten Radverkehrsfördermaßnahmen durch den Klimaaktiv Fonds in Vorarlberger Gemeinden bis ins Jahr 2016. Die schraffierten Flächen und unterschiedlichen Kartogrammgrößen bestätigen die oben angeführten Aussagen zur Heterogenität bezüglich der Investitionen in den Radverkehr auf lokaler Ebene.

Abbildung 4: Anzahl der realisierten Radprojekte mit Klimaaktiv-Förderung in Vorarlberger Gemeinden



Quelle: Statistik Austria, 2001; Austrian Energy Agency, 2016; eigene Darstellung, 2016.

Daraus leitet diese Arbeit sowohl das Bedürfnis, als auch die Notwendigkeit von argumentativer Unterstützung für die Radverkehrsplanung in Österreich ab, welche bis heute nicht flächendeckend verfügbar ist. Um mögliche Lösungsansätze und neue Herangehensweisen an diese Problemstellung zu finden, wirft das nächste Kapitel einen Blick auf den internationalen Umgang mit Radverkehr in Planung und Forschung.

3. Radverkehr in internationaler Forschung und Planung

Die vorteilhaften Eigenschaften des Radverkehrs im Angesicht der im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Probleme machen Radfahren international zu einem immer beliebteren Forschungsthema. Dies bestätigt die steigende Anzahl an internationalen Publikationen seitens der Verkehrswissenschaften (vgl. Heinen et al, 2010, S. 59 ff). Dieses Kapitel widmet sich der Erstellung eines Überblicks zur planungstheoretischen, inhaltlichen und methodischen Schwerpunktsetzung internationaler Radverkehrsforschung. Dadurch soll einerseits die Ableitung möglicher Handlungsperspektiven für die in Österreich aufgezeigte argumentative Planungsproblematik, andererseits die Identifikation von Forschungslücken ermöglicht werden.

3.1 Wissenschaftsverständnis – Evidence-Based planning

Betrachtet man die Herkunft aktueller internationale Studien, so fällt die Dominanz von Forschungsarbeiten aus Großbritannien (vgl. Goodman, 2013; Parkin, 2003; Parkin et al., 2007; Parkin et al. 2008; Wardman et al., 2007) und den Benelux Staaten auf (vgl. Heinen et al., 2010; Rietveld et al., 2004; Vandenbulcke et al., 2008). Demnach sind das Wissenschaftsverständnis und die daraus resultierende Herangehensweise an Radverkehrsforschung durch die Planungskulturen dieser Länder stark geprägt.

Die markanteste Eigenschaft, welche sich durch die gesamte akademische Literatur zieht, ist die immer enger verschmelzende Betrachtung von Planungsinhalten und datenbasierten Ergebnissen wissenschaftlicher Untersuchungen zum Zwecke des Erreichens von überörtlichen bzw. nationalen Planungszielen zur Steigerung des lokalen Radverkehrsanteils. Planungstheoretische Literatur bezeichnet das zunehmende Zusammenfließen von wissenschaftlichen Erkenntnissen und Planungsinhalten als Aufschwung des *Evidence-Based planning* (Faludi et al., 2006a, S. 71 f), welches dem angelsächsischen Raum entspringt und im deutschsprachigen Raum der Planungswissenschaften bisher wenig diskutiert wurde. Der Ansatz wird seit den 90er Jahren verstärkt in Großbritannien im Kontext von räumlichen Planungen angewandt (Davoudi, 2006, S. 14). Die genaue Bedeutung des Begriffs bezieht sich auf den Einsatz von wissenschaftlichen Erkenntnissen (*Evidence*) als argumentatives bzw. diskursives Mittel in Planungsprozessen (*Planning/Policy Making*). Dabei werden zwei grundlegende Modelle unterschieden:

- **Instrumental Model:**

Das Instrumental Model geht von einem „linearen Verhältnis zwischen Planung und wissenschaftlichen Fakten [Anm.: eigene Übersetzung]“ (Davoudi, 2006, S. 15) aus, wobei wissenschaftliche Ergebnisse („*Evidence*“) einerseits aufgrund von politischen Inhalten („*policies*“) erforderlich und angefragt werden („*Expert on tap*“), andererseits können auch die wissenschaftlichen Erkenntnisse zu neuen politischen Haltungen führen („*Expert on top*“) (Davoudi, 2006, S. 15).

- **Enlightenment Model:**

Im Gegensatz zum Instrumental Model hat das Enlightenment Model nicht die „Produktion von wortkräftigen Planungsaussagen [Anm.: eigene Übersetzung]“ (Davoudi, 2006, S. 16) zum Ziel, sondern soll viel mehr den Planungsprozess selbst durch Informationen bereichern. Demnach steht weniger das aktive Problemlösen, als vielmehr das Befruchten der öffentlichen Debatte mit diskursiv genutzten Forschungsergebnissen zu einem Planungsthema im Vordergrund (Davoudi, 2006, S. 16).

Neben den erwarteten Vorteilen für die Planung, wird an dem Ansatz jedoch auch Kritik geübt. So betonen andere Autoren in diesem Kontext die Notwendigkeit von prozessbegleitender Kommunikation und Diskussion zwischen den Planungsakteuren: Diese muss zum Inhalt der Planung und den dazu eingebrachten wissenschaftlichen Fakten selbst geführt werden. Es folgt der Ruf nach einer reflektierten Verwendung der *Evidence*, da diese nie eine selbst-evidente Basis für Planungen darstellen darf (Faludi et al., 2006b, S. 9). Diese Notwendigkeit wird in planungstheoretischer Literatur aus dem Spannungsfeld zwischen technokratischem Planungsverständnis der sechziger Jahre – „survey-before-plan“ (Faludi et al., 2006b, S. 4) – und dem aktuellen „argumentative turn“ (Faludi et al., 2006b, S. 4) der Planungswissenschaften abgeleitet. Da die Auswirkungen der ersteren Bewegung in der Planungsgeschichte durch die Top-Down Beziehung zwischen Planer und Beteiligten – ein passendes Bild ist der „Städtebauer‘ in der Dirigentenrolle“ (Albers, 2006, S. 48) – weitgehend bekannt sind, muss an dieser Stelle die Bedeutung der kommunikativen Einbettung der Erkenntnisse zur Schaffung interaktiver Planungsprozesse nochmals hervorgehoben werden.

3.2 Anwendung in der Radverkehrsplanung

Bezogen auf Radverkehrsplanungen betonen britische Papers das große Potential von evidenzbasierten Planungsprozessen. Der Einsatz von wissenschaftlichen Erkenntnissen als diskursives und argumentatives Element von Radverkehrsplanungsprozessen zeigt sich seit Beginn des Jahrtausends als ein immanenter Begriff in diesem Forschungsgebiet (vgl. Parkin, 2003, S. 300; Parkin et al., 2007, S. 68; Heinen et al., 2010, S. 59 ff). Das folgende Zitat von Heinen et al. gibt das dabei im Vordergrund stehende Zusammenspiel von Wissenschaft und dem planerischen Erreichen von verkehrspolitischen Zielen sehr deutlich wieder:

„In order to be able to develop sound policies that encourage cycling, it is essential that we understand what determines bicycle use.“ (Heinen et al., 2010, S. 60)

Macdonald spricht aus der britischen Perspektive im Kontext einer informierten Planung auch das in Österreich auftretende Problem der heterogenen lokalen Verkehrspolitik an, welchem durch Faktenunterstützung im Planungsprozess begegnet werden kann: Entscheidungsträger bevorzugen – trotz Bekanntheit der positiven Wirkungen des Fahrradfahrens auf Gesundheit, Energieverbrauch, Umweltschutz und Klima – Investitionen in infrastrukturelle Vorhaben für andere Verkehrsmodi oder investieren dort, wo eine Förderung wenig Effekt hat. Wissenschaftliche Evidenz kann dem entgegenwirken, da mit ihr ein argumentatives und diskussionsförderndes Instrument geschaffen wird, welches Fehlentscheidungen in der Verkehrsplanung vorbeugt und verkehrspolitische Willensbildung unterstützt (Macdonald, 2008, S. 1 f).

3.3 Methodische Schwerpunkte

Methodisch stützen sich derzeitige Forschungsarbeiten stark auf die Nutzung von quantitativen Methoden, welche Interaktionsdaten im Lichte planerischer Zielsetzungen hinsichtlich ihrer zeitlichen Veränderung untersuchen oder statistische Modelle erstellen, um die relative Wirkung von Einflussfaktoren auf die Wahl des Rades als Verkehrsmittel zu untersuchen (Parkin et al., 2007, S. 68 ff). Macdonald gibt den Vorteil, welchen man sich aus dieser Vorgehensweise verspricht, durch das Zitat eines britischen Radverkehrsplaners wieder:

„As transport planners we’re[...] being absolutely bombarded with all this helpful advice and information. But it’s how we can actually make best use of that to help us to achieve our aims. If you’re telling us that you’ve got statistical evidence that will tell us that it will encourage [...] so many thousands more people to walk or to cycle [...] then it might have a bit more weight. (Transport planner; NICE focus group)“. (Macdonald, 2008, S. 2)

In weiterer Folge werden zeitliche Analysen und Wirkungsmodelle aus der internationalen Literatur beleuchtet, um einen Anhaltspunkt für die derzeit angewandten Methoden und den Forschungsstand in evidenzbasierten Radverkehrsplanungen zu geben. Der Überblick zu den Studien und Untersuchungen stellt keinen Anspruch auf Vollständigkeit; vielmehr werden bestehende Literatur-Reviews und aktuelle Forschungsarbeiten beispielhaft genutzt, um inhaltliche und methodische Schwerpunkte in Bezug auf großräumige Untersuchungen herauszuarbeiten.

3.3.1 Zeitliche Überblicke zum Radverkehr

Zeitliche Überblicke zur Entwicklung des Radverkehrs dienen dazu, die Wirksamkeit von getätigten Maßnahmen bzw. das Erreichen planerischer Ziele zur Verschiebung des Modal-Splits zu untersuchen. Sie bilden gleichzeitig eine Wissensbasis zur Koordination von Neuplanungen (Parkin, 2003, S. 300). Genau diesem Zweck widmet sich der statistische Überblick von Parkin (2003), welcher sich der deskriptiven Darstellung der Entwicklung des Radverkehrsanteils in Großbritannien im letzten Drittel des 20. Jahrhunderts widmet. Als Datenquellen nutzt die Studie Pendlerverkehrsdaten aus den britischen Volkszählungen der vergangenen Jahrzehnte (bis 1981), welche mittels deskriptiver Statistik (Darstellung der einfachen prozentuellen Steigerung und Minderung des Radverkehrsanteils am gesamten Pendlerverkehrsaufkommen) auf Bezirksebene tabellarisch aufbereitet werden (Parkin, 2003, S. 299 ff).

Goodman (2013) führt die Analysen von Parkin für die Periode zwischen den Volkszählungen 2001 und 2011 weiter und vertieft die Betrachtung in Bezug auf einen britischen Disparitätsindex. Dieser kombiniert die Eigenschaften von Gemeinden hinsichtlich Einkommen, Beschäftigung, Ausbildung, Gesundheit u. v. m. zu einem Ranking in Form einer Gemeindeklassifikation. Die Ergebnisse lassen in weiterer Folge Rückschlüsse auf die Verteilung der Verkehrsmittelwahl in Großbritannien nach sozioökonomischen Kriterien zu (Goodman, 2013, S. 1 ff).

3.3.2 Modal-Choice Modelle – Einflussfaktoren auf den Radverkehr

Wie bereits durch das Zitat von Heinen et al. (2010) in Kapitel 3.2 zum Ausdruck gebracht wurde, liegt ein weiterer Schwerpunkt der Radverkehrsforschung auf der statistischen Prüfung von Einflussfaktoren auf den Anteil des Radverkehrs am Gesamtverkehrsaufkommen. Das Ziel ist dabei, möglichst klare Aussagen über die Einflussnahme von örtlichen Gegebenheiten bzw. anderen Faktoren auf die Verkehrsmittelwahl treffen zu können und in weiterer Folge Entscheidungsträger beim Setzen von zielgerichteten, auf die lokale Situation bezogenen Fördermaßnahmen für den Radverkehr zu unterstützen.

Forschungsdesigns

Parkin et al. (2007) teilen Studien zu diesem Schwerpunkt in die Gruppen der **aggregierten** und **disaggregierten Modelle**. Bei ersteren wird in der Regel eine statistische Zusammenhangsprüfung zwischen Indikatoren zur Radnutzung (Radverkehrsanteil aus Volkszählungen bzw. anderen Zählraten) und hypothetischen Einflussfaktoren vorgenommen, welche als räumliche, umweltbezogene und soziale Eigenschaften nach meist administrativen Einheiten aggregiert quantifiziert werden. Ein typisches Ziel dieser Studien ist, herauszufinden, welche hypothetischen Einflussfaktoren das Potential zur Radnutzung in welchem Ausmaß steigern oder senken. Als Ergebnis werden anhand der lokalen Gegebenheiten des Untersuchungsraumes und dem gebildeten statistischen Modell Rückschlüsse auf das Wirkpotential von Maßnahmen zur Radverkehrsförderung möglich. Disaggregierte Modelle hingegen fokussieren auf die Erklärung der Verkehrsmittelwahl durch das individuelle Verhalten, welches an Einzelpersonen beobachtet (*revealed-preference*) oder von den Personen erfragt wurde (*stated-preference*). Sie werden häufig zur Untersuchung der Routenwahl von Radfahrern genutzt, da das Verhalten direkt beobachtet oder über hypothetische Fragen („Auf welcher Strecke würden sie das Fahrrad nutzen, wenn...“) erhoben wird (Parkin et al., 2007, S. 70 f). Auf disaggregierte Modelle wird im weiteren Lauf dieser Arbeit nicht weiter eingegangen, da sie nicht dem weiteren Forschungsdesign entsprechen.

Methodische Vorgehensweise

Auf methodischer Seite kommen unterschiedliche Formen von Regressionsanalysen zur Anwendung. Dabei wird ein mathematischer Term formuliert, welcher eine abhängige Variable – oftmals der Radverkehrsanteil innerhalb einer administrativen Einheit – durch mehrere unabhängige Variablen (Einflussfaktoren) erklärt, für welche statistische Abhängigkeiten hypothetisch erwartet werden. Dies wird durch das Einpassen einer

Modellfunktion mithilfe von unterschiedlichen statistischen Verfahren – beispielsweise der Methode der Ordinary-Least-Squares (OLS) oder Maximum-Likelihood-Estimation (MLE) – durchgeführt (vgl. Vandenbulcke et al., 2008, S. 12; Parkin et al., 2008, S. 100). Eine wichtige Rolle für die Auswertung der Modelle spielen die Parameter der Modellvariablen, welche die Richtung des Einflusses (positiv oder negativ) sowie dessen Stärke im Verhältnis zu den anderen Variablen wiedergeben (vgl. Field, 2009, S. 197 ff). Sie stellen einen der wesentlichen Informationsgehalte für die Weiterverwendung des Modells im Planungskontext dar, weil durch einen Vergleich der lokalen Voraussetzungen für den Radverkehr mit dem Modell erkennbar wird, welche fördernden Einflüsse mithilfe von Planungsbeschlüssen verstärkt und welche hemmenden Einflüsse in der Neuplanung beseitigt werden sollten.

Betrachtete Einflussfaktoren

Die meisten statistischen Modelle gehen von einem Bündel an Einflussfaktoren aus unterschiedlichen Bereichen aus, welche die Fahrradnutzung bestimmen. Heinen et al. (2010) geben in ihrer Literaturrecherche einen detaillierten Überblick zu den aktuellen Ergebnissen und inhaltlichen Schwerpunkten von Modal-Choice-Models, welche in diesem Abschnitt besprochen werden. Als Beispiele werden Untersuchungen durch Parkin et al. (2008), welcher Einflussfaktoren für Großbritannien betrachtet, Vandenbulcke et al. (2008) in Belgien, Rietveld et al. (2004) in den Niederlanden herangezogen. Als Datengrundlage zur Berechnung des Radverkehrsanteils verwenden die Studien entweder die Pendlerinteraktionsdaten der jeweiligen nationalen Volkszählungen (Parkin et al., 2008, S. 97, Vandenbulcke et al., 2008, S. 8) bzw. nationale Verkehrserhebungen (Rietveld et al., 2004, S. 536). Heinen et al. teilen mögliche Einflüsse auf die Nutzung des Rades als Fortbewegungsmittel grob in fünf Gruppen. Der Anhang listet analog dazu die Operationalisierung von Variablen durch die Beispielmodelle nach diesen Gruppen (s. Anhang 11.1).

Gebaute Umgebung

Die Idee hinter der Untersuchung dieser Einflussfaktoren ist, herauszufinden, welche planerisch beeinflussbaren Faktoren positiven Einfluss auf den Radverkehrsanteil nehmen. Der Forschungsfokus liegt hier oftmals auf der Untersuchung der zurückzulegenden Distanz in Siedlungsräumen, welche bei größerer Ausprägung die Radnutzung senkt. Die Hypothese hinter den Untersuchungen ist jene, dass das Layout des Straßennetzes, die städtebauliche Dichte bzw. der Nutzungsmix die Rahmenbedingungen für die zurückzulegenden Distanzen darstellen. Je direkter das Straßennetz, je dichter und durchmischer ein Gebiet ist, desto kürzer sind die Distanzen für Radfahrer. Distanz wird in vielen Studien als stark

beschränkender Einflussfaktor beobachtet. Alle weiteren erweisen sich hinsichtlich ihrer Wirkung oft unterschiedlich oder können nicht signifikant nachgewiesen werden. Untersucht wird auch das Vorhandensein bzw. die Qualität der örtlichen Radinfrastruktur, da angenommen werden muss, dass diese separaten Verkehrsflächen die Sicherheit von Radfahrern durch die Trennung bei hohem MIV-Aufkommen steigert (Heinen et al., 2010, S. 63). Die von den Beispielstudien verwendeten erklärenden Variablen geben Informationen bezogen auf Radweglängen, Abstellanlagen und die lückenlose Führung des Radwegenetzes wieder, wobei diese oft aus den Regressionsmodellen ausgeschlossen werden müssen, da sie zu stark mit anderen erklärenden Variablen korrelieren (Rietveld et al., 2004, S. 546 ff). Insgesamt zeigen viele Forschungsergebnisse, dass Radinfrastruktur von Menschen als positiv bewertet wird – die genauen Wirkungszusammenhänge auf den Radverkehrsanteil sind jedoch nicht restlos geklärt (Heinen et al. 2010, S. 63 ff).

Naturräumliche Gegebenheiten:

Zu naturräumlichen Faktoren zählen topographische und klimatische Bedingungen, wobei erstere „nur äußerst selten von Mode-Choice-Studien einbezogen werden [Anm.: eigene Übersetzung]“ (Heinen et al., 2010, S. 67). Dennoch ist die Wirkung topographischer Einflüsse nicht zu unterschätzen, da das Fahrrad mit Muskelkraft betrieben werden muss. Weil von planerischer Seite oftmals die fehlende Beeinflussbarkeit dieser Faktoren kritisiert wird (Parkin et al, 2007, S. 76), ist die Operationalisierung von topographischen Gegebenheiten in Modal-Choice-Modellen oftmals sehr einfach gehalten. Die Modelle von Parkin et al. (2008), Rietveld et al. (2004) und Vandenbulke et al. (2008) betrachten zwar Variablen zu dem Einflussfaktor, doch beziehen sich diese nur auf die allgemeine Topographie der untersuchten administrativen Einheiten statt auf mögliche Routen (s. Anhang 11.1). Sämtliche Studien zeigen, dass Steigungen und schlechtes Wetter vom Radfahren abhalten und damit zu den maßgeblich beeinflussenden Rahmenbedingungen gezählt werden müssen. Dennoch weist die simple Operationalisierung auf weiteren Forschungsbedarf – insbesondere im alpinen Bereich – hin, da selbst in diesen Regionen Rad gefahren wird (Bohrmann et al., 2012, S. 2).

Sozioökonomische Faktoren:

Der Schwerpunkt bei der sozioökonomischen Analyse liegt auf der Wirkung von demographischen und ökonomischen Eigenschaften bezüglich Geschlechter- und Altersverteilung, Einkommen, Beschäftigungsstatus, Haushaltsstrukturen u. v. m. Die einzelnen Einflussfaktoren werden in den Beispielmotellen oftmals aufgrund der unterschiedlichen Datenlage verschieden operationalisiert (s. Anhang 11.1). Gleichzeitig zeigt

sich im internationalen Vergleich der Forschungsergebnisse, dass die Wirkung einzelner Variablen – vermutlich aufgrund kultureller Differenzen – deutlich unterschiedlich ausfallen kann. Heinen et al. empfehlen eine Abkehr von vertiefenden Untersuchungen durch großmaßstäbige Modal-Choice-Modells, da die unterschiedlichen Forschungsaussagen darauf hinweisen, dass die wesentlichen beeinflussenden Faktoren in anderen, dem Radfahrer als Individuum zuzuschreibenden Bereichen, zu suchen sind (Heinen et al., 2010, S. 71).

Psychologische Faktoren:

Eine besonders wenig erforschte Gruppe an Einflüssen stellen die psychologischen Faktoren dar. Man geht davon aus, dass vor allem die Einstellungen, Gewohnheiten und soziale Normen, welche vom Umfeld der jeweiligen Person geprägt sind, auf dessen Verkehrsmittelwahl einwirken. Als Beispiel nennen Heinen et al. den negativen Zusammenhang zwischen dem Streben nach dem Besitz eines Autos und dem Willen, mit dem Fahrrad in die Arbeit zu pendeln. In den Modellen von Parkin et al. (2008) und Rietveld et al. (2004) wird dieser Umstand durch den Motorisierungsgrad in den Untersuchungseinheiten abgebildet. Andere Einflüsse könnten aus sozialen Normen, dem ökologischen Bewusstsein oder Gewohnheiten von Einzelpersonen erwachsen (Heinen et al., 2010, S. 71 ff). Da diese Einflussfaktoren jedoch in hohem Maße vom Individuum abhängen und qualitativ besser abzubilden sind, stellen sie meist keinen Teil von quantitativen statistischen Modellen mit großem räumlichem Fokus.

Aspekte des Sicherheitsempfindens:

Das Sicherheitsempfinden im Straßenverkehr beeinflusst die Wahl des Rades als Fortbewegungsmittel deutlich. So wurde in Untersuchungen zur Routenwahl von Radfahrern festgestellt, dass Gefahrenstrecken eher wiedererkannt werden und im Bewusstsein präsent sind, als ruhige, ungefährliche Streckenabschnitte, von welchen keine direkte Gefahr ausgeht. Dies führt dazu, dass Menschen bei geringerem Sicherheitsgefühl von der Nutzung eines Fahrrades abkehren (Heinen et al., 2010, S. 74).

3.4 Schwerpunktsetzung der vorliegenden Arbeit

Wie dieses Kapitel bisher zeigt, wurde in der internationalen Radverkehrsforschung die Gestaltung von Planungsprozessen im Sinne des Evidence-Based-planning in den letzten Jahrzehnten immer gefragter. Die methodischen Ansätze, welche sich anhand internationaler Radverkehrsplanung und Forschung identifizieren lassen, sucht man in Österreich jedoch vergeblich. So ist dem Autor bis heute weder eine Studie zur großflächigen statistischen Erklärung des Radverkehrsanteils, noch ein detaillierter zeitlicher Überblick zur Radverkehrsentwicklung als Grundlage heutiger Planungen bekannt. Dennoch stellt der zuvor beschriebene Ansatz des Evidence-Based-plannings – insbesondere in Form des Enlightenment-Modells – einen vielversprechenden Rahmen für die Lösung der argumentativen Problematik hinsichtlich der heterogenen lokalen Verkehrspolitik dar. Nicht zuletzt, um die Entscheidungsfindungsprozesse der Planungsakteure zu erleichtern, sondern auch, um einen ersten Schritt zur bisher unerforschten statistischen Erklärung des Radverkehrsanteils in Österreich zu setzen, strebt diese Arbeit nach einer Vertiefung der bereits getätigten internationalen Forschung im Bereich bestehender Forschungslücken.

Der inhaltliche Fokus von vorangegangenen Mode-Choice-Modells ist anhand der Beispielstudien nicht klar festzulegen und liegt vornehmlich auf der allgemeinen Erklärung von Radverkehr und dem Prüfen von Zusammenhängen zwischen unterschiedlichsten Einflussfaktoren. Dies führt zu einer oftmals nur einfachen Operationalisierung von Einflussfaktoren. Als diesbezüglich vernachlässigt erwiesen sich in der Literaturrecherche die unveränderlichen und beschränkenden Faktoren, welche die körperliche Anstrengung erhöhen und dadurch die Nutzung des Fahrrades augenscheinlich negativ beeinflussen (Parkin et al., 2007, S. 71). Die Autoren Goodman (2013, S. 9), Heinen et al. (2010, S. 67), Loidl (2014) und Bohrmann et al. (2012, S. 2) betonen diesbezüglich, dass eine detailliertere Untersuchung der Wirkung von Steigung als topographischer Widerstand erstrebenswert wäre, was auf die Notwendigkeit zur Konkretisierung und Erweiterung bestehender Forschung hinweist. Hinzu kommt, dass sich die wissenschaftliche Diskussion derzeit stark auf westeuropäische Staaten sowie die USA beschränkt (Heinen et al., 2010, S. 82), und Österreich sich daher als alpin geprägter Untersuchungsraum besonders gut für eine Erweiterung der Erkenntnisse bezüglich topographischer Einflüsse eignet.

Die Konzentration der bereits genannten Forschungsfragen auf dieses Thema bringt dabei nicht nur hinsichtlich der methodisch detaillierteren Beschreibung von Topographie einen Beitrag zu internationaler Forschung, sondern kann auch im Kontext der eingangs diskutierten Problemstellung angewandt werden: Die Idee ist – obwohl topographische

Widerstände für die Radverkehrsplanung eine unveränderliche Gegebenheit sind und daher als unbeeinflussbar gelten – die grundlegende Eignung von Räumen im Sinne der Befahrbarkeit mit dem Fahrrad modellhaft zu beschreiben. Parkin et al. (2007, S. 76) meinen diesbezüglich, dass topographische Gegebenheiten eine „obere bzw. untere Grenze für das quantitative Radverkehrsaufkommen [Anm. eigene Übersetzung]“ bilden. Diese Vermutung führte in weiterer Folge zu der Idee aus den räumlichen Voraussetzungen für Radverkehr ein quantitatives Maß für die Abschätzung der Sinnhaftigkeit bzw. Begrenztheit der Wirkungen von planerischen Maßnahmen abzuleiten. Die entscheidende Frage lautet im Unterschied zu bisherigen Modellen nicht, mit welchen Maßnahmen Voraussetzungen für den Radverkehr verändert werden sollen, sondern inwiefern eine Steigerung des Radverkehrsanteils im Kontext der lokalen topographischen Gegebenheiten möglich ist.

4. Theoretische Grundlagen und Konzepte

Dieses Kapitel erläutert die wesentlichen theoretischen Grundlagen, auf der die eingangs gestellten Annahmen und Hypothesen gründen. Die Schwerpunkte liegen dabei auf der Darlegung der evolutionstheoretischen Sicht von Verkehrsprozessen und den dahinterstehenden Gesetzmäßigkeiten, welche den in der Forschungsfrage angesprochenen Körperenergieverbrauch ins Zentrum verkehrlicher Interaktionen stellen. Da die Anstrengung beim Radfahren maßgeblich durch Distanz und Topographie bestimmt wird, erweitert und konkretisiert die Evolutionstheorie damit den im Vorkapitel erläuterten Fokus der Arbeit. Ergänzt wird der theoretische Ansatz um die Erklärung von Konzepten der Verkehrswissenschaft bzw. Geographie, welche die gemeinsame Betrachtung von Widerständen und Interaktionsdaten als Basis haben und im methodischen Teil der Arbeit zur statistischen Modellierung des Radverkehrsanteils verwendet werden können.

4.1 Evolutionstheoretische Betrachtung von Mobilität

Die Evolutionstheorie in der Verkehrswissenschaft sieht den am Verkehr teilnehmenden Menschen als ein durch evolutionäre Prozesse geformtes Wesen. Der dabei als unumstößlich geltende Mechanismus, welchem auch das menschliche Verhalten folgt, ist das Streben nach einer Minimierung des Energieaufwands für alle lebenswichtigen Abläufe (Frey et al., 2014, S. 5).

Für den Bereich der Verkehrsplanung wurde dieser theoretische Zugang erstmals von Knoflacher durch die systemtheoretische Betrachtung des evolutionären Schichtenbaus (vgl. Riedl, 1985) operationalisiert. Dieser teilt den Aufbau der Welt nach Schichten ein, welche der Evolution folgend aufeinander gründen und wechselseitig in Interaktion stehen. Die unterste und älteste evolutionäre Basis wird durch die kleinsten Bestandteile des Lebens, die Atome und Moleküle, gebildet. Auf diesen bauen – über lange Zeiträume entwickelt – weitere Schichten wie Zellen, Organe, Individuen, bis hin zu den evolutionär jüngsten Schichten, soziale Gruppen, Gesellschaftssysteme und Kulturen (Knoflacher, 2012, S. 54). Die besondere Stellung alter evolutionärer Schichten im Vergleich zu jüngeren wird von Knoflacher für die Verkehrsplanung betont, da Änderungen im mobilitätsbezogenen Körperenergieverbrauch direkte Veränderungen in den aufbauenden Schichten (beispielsweise der Gesellschaft) zur Folge haben (Knoflacher, 2007, S. 132 ff).

Aus der dargelegten Funktionsweise dieses theoretischen Modells kann abgeleitet werden, dass das Prinzip der Minimierung des Energieverbrauchs bei der Fortbewegung von den tiefsten und ältesten Evolutionsschichten (Moleküle, Zellstruktur, etc.) ausgeht. Es ist

aufgrund dieser tiefen Verwurzelung als maßgebliche biologische Grenze für das Verhalten von Menschen wirksam und daher eine fix bindende Grundlage für das Agieren von Individuen in höheren und evolutionär jüngeren Schichten, auf denen auch das Verkehrssystem aufbaut (Knoflacher, 2007, S. 106).

4.1.1 Struktur und Verhalten

Die offensichtliche Stärke des Rückwirkens biologischer Grenzen des Menschen bis auf die obersten evolutionären Schichten begründet die Theorie darin, dass diese im langen Zeitraum der bisherigen Evolution durch die umgebende natürliche Struktur des Lebensumfeldes geformt wurden. Der Begriff Struktur bezieht sich hierbei nicht nur auf das natürliche, sondern im heutigen Verkehrswesen vielmehr auf das gebaute Lebensumfeld, in dem wir leben und agieren (Knoflacher, 2007, S. 114 ff). Dies ist einer der wesentlichsten Aspekte für die Nutzung dieses theoretischen Ansatzes für die Verkehrsplanung, da – dem Mechanismus des Lernens von der Umgebung folgend – die Beeinflussung menschlichen Verhaltens möglich wird, indem man die ihn umgebenden Strukturen durch planerische Eingriffe verändert. Knoflacher bezeichnet dies treffend mit folgendem Zitat:

„Das Verhalten ist immer Ergebnis von Strukturen. Strukturen bedingen daher das Verhalten“
(Knoflacher, 2007, S. 46)

Insbesondere für die Untersuchung der Verkehrsmittelwahl im Hinblick auf topographische Streckeneigenschaften, welche als gegebene Struktur auf den Verkehrsteilnehmer wirken, scheint dieser Ansatz gut geeignet. Das nächste Kapitel beschreibt das hierzu gehörende mathematische Grundgerüst, über welches Verhalten an Strukturen messbar gemacht werden kann.

4.1.2 Empfindungsgesetze zur Messbarmachung von Strukturen

Da der Mensch laut Evolutionstheorie einem immerwährenden Lernprozess gegenüber den Strukturen der Umwelt unterworfen ist, schließt Knoflacher daraus, dass der Zusammenhang zwischen umgebender Struktur und dem daraus resultierenden Verhalten über Wahrnehmungsgesetze operationalisierbar sein muss. Er bezieht sich dabei auf eine erweiterte Auslegung des Weber-Fechnerschen Empfindungsgesetzes, welches von Strukturen ausgehende Reize in einen logarithmischen Zusammenhang mit positiven oder negativen Empfindungen beim Menschen stellt (Knoflacher, 2007, S. 114 f). Strukturen sind von den menschlichen Sinnen durch Reize als positive oder negative Empfindungen wahrnehmbar und beeinflussen damit direkt das Verhalten (Knoflacher, 2007, S. 117). Neuere Ansätze erweitern den Bereich der Empfindungsgesetze in mathematischer Hinsicht

und berücksichtigen durch die Verwendung einer Potenzfunktion auch Reize, welche außerhalb der menschlichen Wahrnehmungsgrenze liegen (Knoflacher, 2007, S. 177 f).

Planerische Veränderungen der uns umgebenden räumlichen Strukturen sind demnach direkt über die Empfindungen des Menschen messbar, wobei diese von Knoflacher durch Körperenergie operationalisiert werden (Knoflacher, 1987, S. 61 f; Knoflacher, 2007, S. 28 f). Diese Vorgehensweise legt den Grundstein für die in dieser Arbeit vorgenommene Analyse des Körperenergieverbrauchs auf die Radnutzung: Der Reiz einer Struktur auf das Rad zu steigen wird durch das negative Empfinden körperlicher Anstrengung beim Befahren der Struktur über Empfindungsgesetze direkt bewertbar. Die Umformung des Weber-Fechnerschen Empfindungsgesetzes zur negativen Exponentialfunktion lässt diesen Ausdruck auch mathematisch zu (Knoflacher, 2007, S. 115). Der Fokus auf physischen Körperenergieverbrauch als Rahmen für die Untersuchung topographischer Widerstände und zur Erklärung der Radnutzung wird mit dem Wissen über die Wirkung des Effizienzprinzips im Verkehrswesen durch die Theorie bestätigt. Daher zieht die Arbeit in Bezug auf den durch Muskelkraft betriebenen Radverkehr den Schluss, dass sich der körpereigene Energieverbrauch als ein sehr starker Einflussfaktor für die Nutzung des Rades als Verkehrsmittel zeigen muss, welcher das Potential bzw. den Reiz der Befahrbarkeit eines Raumes einschränkt.

4.2 Konzepte zur statistischen Modellierung

Im Unterschied zu bisherigen Modal-Choice-Modellen fokussieren die erklärenden Variablen der hier vorgeschlagenen Untersuchung stark auf räumlichen Widerständen, weshalb diese Tatsache in der Konzeption des statistischen Modells berücksichtigt werden sollte. Es liegt daher nahe, einen Bezug zu geographischen und verkehrswissenschaftlichen Konzepten aufzubauen, deren zentrale Funktionsweise auf der Bewertung von Widerständen und der Erklärung von Verkehrsströmen aufbauen. Da der unterstellte Zusammenhang durch regressionsanalytische Methoden modellierbar sein sollte, bietet sich der Ansatz der Gravitationsmodelle an. Dieser wird hier in seinen theoretischen Grundzügen beschrieben bevor er in Kapitel 8 praktisch angewandt wird.

4.2.1 Gravitationsmodelle und Widerstandsbewertung

Die grundlegende Funktionsweise von Gravitationsmodellen baut auf der Abstraktion von verkehrlichen Interaktionen in Form von Strömen auf, welche ihren Ursprung an Quellorten haben und an Zielorten enden (Rodrigue et al., 2008, S. 166 ff). Als Quellen und Ziele werden Siedlungen bzw. sogenannte Verkehrszonen herangezogen, welchen anhand ihrer lokalen sozioökonomischen Eigenschaften unterschiedliches gravitatives Potential zugeschrieben werden kann (Attraktivität als Arbeitsort oder Größe der Stadt). Das letztendliche Ziel der Anwendung von Gravitationsmodellen ist die Modellierung des Interaktionsstroms zwischen Quell- und Zielorten, was durch die mathematische Kombination der gravitativen Potentiale und des zu überwindenden räumlichen Widerstandes anhand von Distanzverfallsfunktionen (Distance-Decay-Functions) möglich wird (Rodrigue et al., 2008, S. 166 ff). In der Literatur wird die Modellgleichung meist in folgender allgemeinen Form dargestellt:

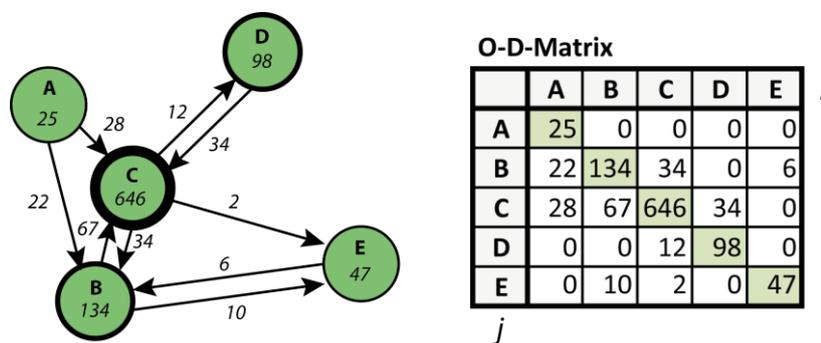
$$I_{ij} = k \frac{P_i P_j}{f(W_{ij})}$$

wobei I_{ij} für die Interaktionen eines Verkehrsstromes zwischen der Quellzone i und Zielzone j , k für eine zu kalibrierende Modellkonstante, P_i und P_j im einfachsten Fall für die Bevölkerung der betrachteten Gemeinden und $f(W_{ij})$ für die Widerstandsfunktion steht (Rodrigue et al., 2008, S. 167 f). Die Sammlung der modellierten Interaktionsstärken von Quell-Ziel Beziehungen entspricht im Wesentlichen der Datenstruktur, in welcher viele verkehrsbezogene Datensätze erhoben werden: Sie können als Quell-Ziel-Matrize – in weiterer Folge als Origin-Destination-Matrix (O-D-Matrix) bezeichnet – realisiert werden. Abbildung 5 veranschaulicht die Abstraktion von Quell- und Zielzonen (grüne Kreise) sowie

den Interaktionsströmen. Das Gravitationspotential wird über die Konturstärke der Orte visualisiert, die Länge der Pfeile gibt den Raumwiderstand zwischen den Quellen und Zielen wieder. Das Verkehrsaufkommen ist zwischen den Siedlungen angeschrieben und zum besseren Verständnis in einer schematischen O-D-Matrix erfasst. Bei Zonengleichheit bezieht sich die Verkehrsstärke auf intrazonale Interaktionen, welche auch als Binnenverkehr bezeichnet werden können. Sie bilden die Diagonale der O-D-Matrix und sind grün gekennzeichnet (Rodrigue et al., 2006, S. 165 f).

Da viele Studien die Tendenz beobachten, dass Interaktionen mit zunehmendem

Abbildung 5: Schematische Darstellung einer O-D-Matrix als Grundlage eines Gravitationsmodells



Quelle: Rodrigue et al., 2006, S. 165; eigene Darstellung, 2016.

Raumwiderstand überlinear abnehmen, wird dieser mathematisch durch nichtlineare Distance-Decay-Functions errechnet (vgl. Iacono et al., 2008, S. 1 ff; Martinez et al., 2012, S. 87 ff; Chen, 2015, S. 1 ff). Die hierfür in Verwendung befindlichen Konzepte sind einerseits die Kombination des Gravitationsmodells mit einer negativen Exponentialfunktion

$$I_{ij} = kP_iP_j e^{-\beta W_{ij}}$$

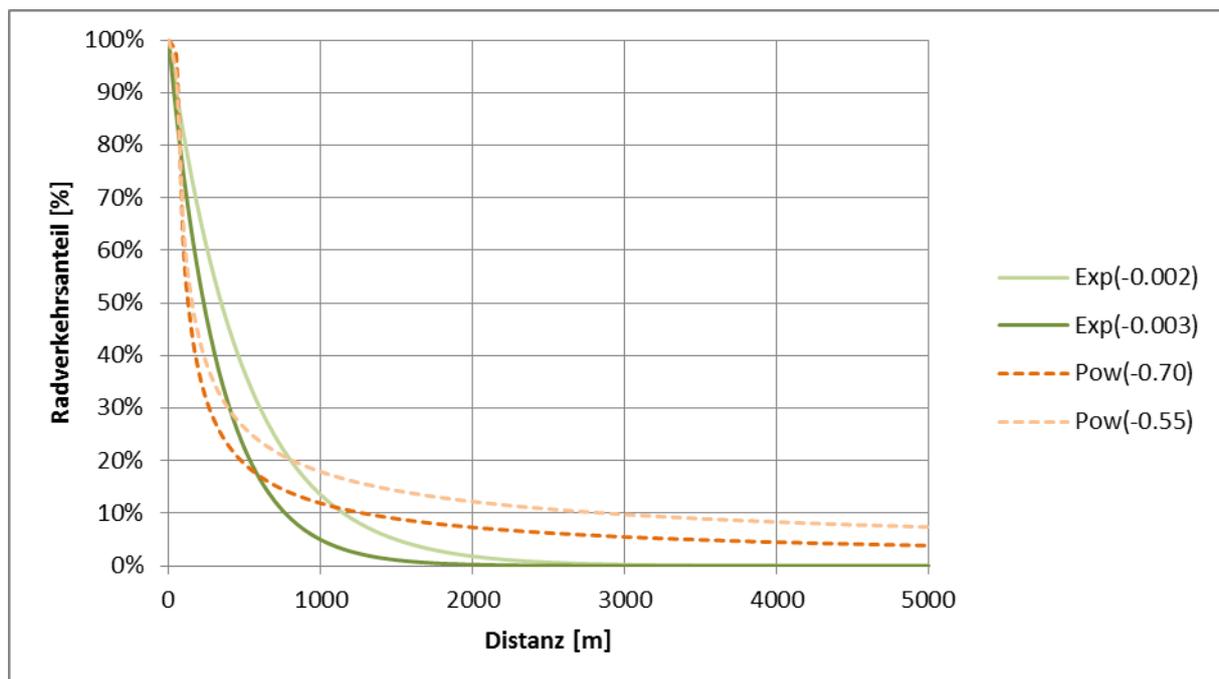
bzw. einer negativen Potenzfunktion,

$$I_{ij} = kP_iP_j W_{ij}^{-\beta}$$

wobei der Parameter β die Stärke der Interaktionsabnahme anhand des Widerstands bestimmt. Die Form der Funktionen ist in Abbildung 6 mit unterschiedlichen Parametern visualisiert. An dieser Stelle muss – wie Knoflacher bereits 1987 betonte – auf die starke Ähnlichkeit der Widerstandsfunktionen mit den evolutionstheoretisch verwendeten Empfindungsgesetzen hingewiesen werden (Knoflacher, 1987, S. 62). Da Distance-Decay-Functions nichts anderes als eine Bewertung des Widerstandsempfindens durchführen, scheinen sie eine geeignete konzeptionelle Grundlage für die vorgeschlagene Zusammenhangsprüfung zwischen dem Reiz zur Fahrradnutzung und dem Widerstandsempfinden darzustellen.

Da die Parameter des Gravitationsmodells stark von den betrachteten Interaktionen, Quell- und Zieleigenschaften und der Widerstandsbewertung abhängen, muss das Modell vor der Verwendung anhand von Interaktionsdaten kalibriert werden. Hierfür stehen regressionsanalytische Verfahren zur Verfügung (Taylor, 1975, S. 8 ff), welche sich einerseits für die angestrebte statistische Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Radverkehrsanteil und Körperenergieverbrauch eignen und andererseits die Prüfung von Empfindungsgesetzen als statistische Hypothese zulassen (s. Kapitel 8).

Abbildung 6: Vergleich von Exponential- und Potenzfunktion als Distance-Decay-Functions mit unterschiedlichen Parametern



Quelle: eigene Darstellung, 2016.

5. Methodische Vorgehensweise

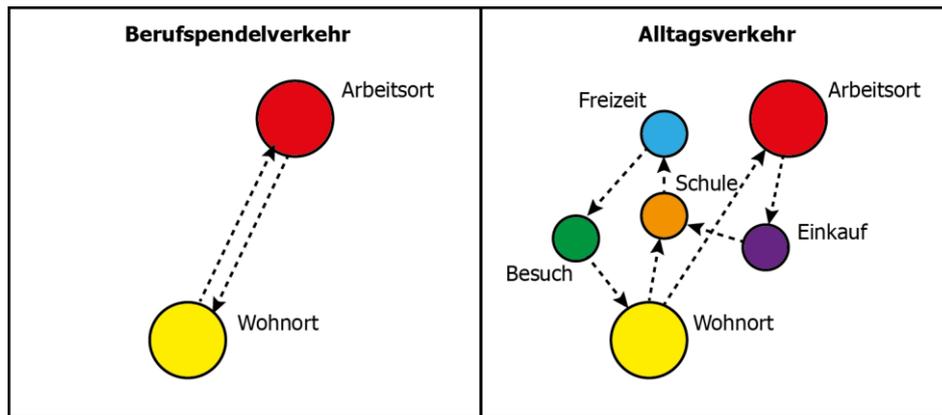
Dieses Kapitel vermittelt einen Überblick zur methodischen Vorgehensweise und der Anordnung der Arbeitsschritte, welche für die Beantwortung der eingangs gestellten Forschungsfragen notwendig sind. Zuerst wird die Datengrundlage hinsichtlich ihrer Eigenschaften beschrieben, danach werden die methodischen Werkzeuge im Kontext der Arbeitsschritte erläutert. Das Kapitel schließt mit der Aufbereitung der Datengrundlage für die nachfolgenden Analysen.

5.1 Datengrundlagen

Sämtliche Analysen dieser Arbeit gründen auf Daten zu Pendlerinteraktionen der Volkszählungen 1971, 1981, 1999 und 2001, welche rund 3 Mio. (1971) bis 3,4 Mio. (2001) Personen in Österreich auflistet. Realisiert ist der Datensatz als multidimensionale O-D-Matrix, welche im relationalen Datenmodell vorliegt und das Konzept der bereits beschriebenen Matrizen um die Dimensionen der Zeit und Verkehrsmittelwahl erweitert. Die räumliche Bezugsebene sind 2381 österreichische Gemeinden zum Gebietsstand 2001. Die in den vorangegangenen Erhebungsperioden gesammelten Informationen wurden durch die Statistik Austria aufgrund der zahlreichen Gemeindegemeinschaften seit 1971 (vgl. Statistik Austria, 2015, S. 1 ff) auf den letzten Gebietsstand umkodiert (Statistik Austria, 2005, S. 23). Der Aufbau der Pendlerdaten folgt einer ähnlichen Struktur, wie sie die Datengrundlagen der in Kapitel 3.3.2 beschriebenen aggregierten Mode-Choice Modelle aufweisen, und betrachten Radfahrer daher nicht einzeln sondern in Form von Stromgrößen. Ein wesentlicher Unterschied ist jedoch, dass sich Interaktionen nicht solitär auf administrative Einheiten beziehen, sondern auch die Pendelverflechtungen zwischen Gemeinden in Form von O-D-Paaren abgebildet sind. Die genauen Definitionen des Begriffs *Pendler* nach der österreichischen Volkszählung können dem Anhang entnommen werden (s. Anhang 11.7).

Hinsichtlich des Wegezwecks „Pendeln“ ist die Eignung des Datensatz zur Modellierung des Radverkehrs als ambivalent zu betrachten: Auf der einen Seite werden Verkehrsbeziehungen des Alltagsverkehrs nicht durch die Daten beschrieben. Dies ist aus Sicht der Radverkehrsforschung als negativ zu betrachten, weil davon auszugehen ist, dass der Freizeitverkehr an diesem Modus einen wesentlichen Anteil hält (BMVIT, 2013c, S. 39). Auf der anderen Seite ist die Zweckbindung von Vorteil, da der Weg zur Arbeit – im Gegensatz zum Alltagsverkehr – in der Regel keine komplexen Wegeketten umfasst sondern sehr direkt abläuft (s. Abbildung 7) und keine Umwege bzw. Lustbarkeitsfahrten enthält. Dies lässt die

Abbildung 7: Komplexität von Wegezwecken im Vergleich



Quelle: nach Lanzendorf, 2001 in

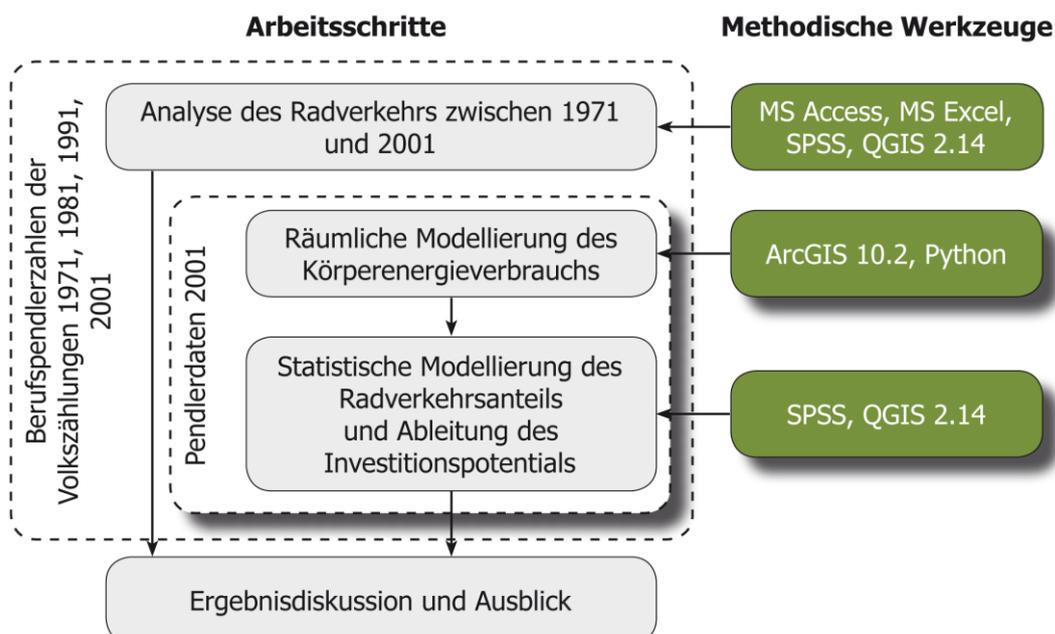
Thiemann-Linden et al., 2004, S. 17; eigene Darstellung, 2016.

Annahme zu, dass Pendler den kürzesten Weg zwischen Wohn- und Arbeitsort wählen, wodurch modellhafte Betrachtungen des Radverkehrs einfacher werden.

5.2 Arbeitsschritte

Aufbauend auf den theoretischen und datentechnischen Grundlagen der Vorkapitel wird die methodische Vorgehensweise detaillierter besprochen. Die Analyseschritte zur Beantwortung der eingangs gestellten Forschungsfragen lässt sich grob in vier Abschnitte einteilen (s. Abbildung 8):

Abbildung 8: Methodische Vorgehensweise



Quelle: eigene Darstellung, 2016.

Schritt 1

Der erste Schritt umfasst eine deskriptive Analyse der Pendlerdaten, welche analog zu den Arbeiten Parkins (2003) und Goodmans (2013) einen Überblick und eine statistische Grundlage für heutige Verkehrspolitik liefert. Es wird zuerst die zeitliche Entwicklung aller Verkehrsmodi auf Ebene von Stadtregionen abgehandelt (s. Kapitel 6), danach werden die räumliche und zeitliche Verteilung sowie Entwicklungstendenzen des Radverkehrs auf Stadtregionsebene in absoluten und relativen Zahlen betrachtet. Auch die Entwicklung der euklidischen Reiseweiten von Radauspendlern wird untersucht. Als Werkzeug wird zunächst MS Access als Datenbanksystem für die Verwaltung der relational gespeicherten Pendlerdaten, aber auch MS Excel und die Statistik Software SPSS für die zeitliche und deskriptive Auswertung verwendet. Die kartographischen Darstellungen werden mit dem Open Source Geoinformationssystem (GIS) QGIS produziert.

Schritt 2

Der zweite Schritt der Arbeit befasst sich mit den Konzepten zur räumlichen Modellierung des Körperenergieverbrauchs beim Radfahren, welcher für Ströme zwischen sowie innerhalb von Gemeinden berechnet wird und wesentlich für die Kalibration der Distance-Decay-Function des Gravitationsmodells ist. Als methodisches Werkzeug dient die Geoinformationssoftware ArcGIS, welche die notwendigen Algorithmen für eine neue, rasterzellenbasierte Analysemethode bereitstellt. Zur Automatisierung der Rechenschritte wird ein Python-Script verwendet.

Schritt 3

Der dritte Arbeitsschritt beschäftigt sich mit der statistischen Zusammenhangsprüfung zwischen den ermittelten Maßen für Anstrengung und dem Anteil der Radfahrer am Gesamtverkehrsaufkommen, welche nach Aus- und Binnenpendlern getrennt betrachtet werden. Zu Beginn wird eine Korrelationsanalyse durchgeführt, welche prüft, inwiefern ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen den Variablen erwartet werden kann. Danach folgt die Ableitung und Auswahl zweier multipler Regressionsmodelle aus den Konzepten der Gravitationsgesetze. Deren Kalibration und die dazu notwendigen mathematischen Transformationen werden ebenfalls erläutert. Der Arbeitsschritt wird mit der Diskussion der Modellergebnisse im Kontext einer für die Planung nutzbaren Potentialabschätzung beendet. Als Werkzeug wird SPSS verwendet.

5.3 Räumliche und zeitliche Betrachtungsebenen

Zeitliche Abgrenzung

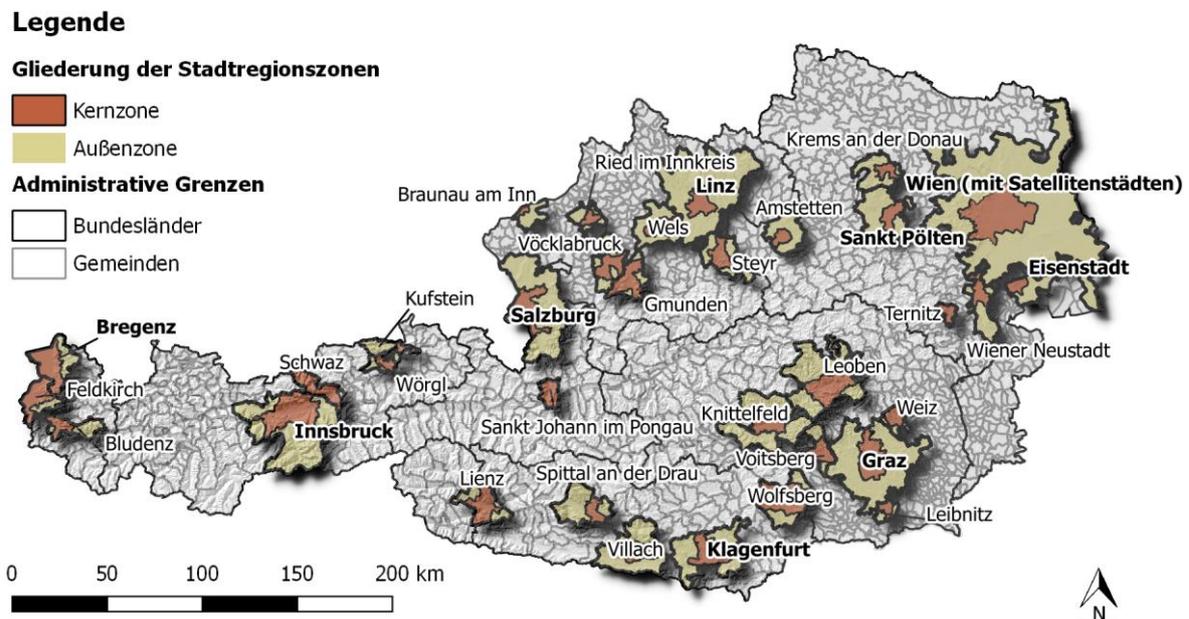
Die Datengrundlage lässt aufgrund der Informationen aus den vier Erhebungsperioden einerseits einen umfangreichen Überblick zur zeitlichen Entwicklung zu, dennoch werden nicht sämtliche Erhebungen in allen Analyseschritten betrachtet (s. Abbildung 8). Nach dem ersten Arbeitsschritt werden lediglich die aktuellsten Pendlerinteraktionen aus dem Jahr 2001 für die Widerstandsmodellierung und multivariate Analyse herangezogen, da sich besonders die räumliche Modellierung für einen größeren Datensatz als komplex und zeitintensiv herausstellt. Die Modellergebnisse können im vierten Arbeitsschritt wieder im Kontext der deskriptiven Übersicht aus dem ersten Arbeitsschritt gestellt werden.

Räumliche Abgrenzung

Eine ähnliche Begrenzung wie auf zeitlicher Ebene wird auch in räumlicher Hinsicht vorgenommen: Die statistische Beschreibung der Modal-Split- und Radverkehrsentwicklung, welche anhand der vier zeitlichen Informationsschichten und anderen Verkehrsmitteln ohnehin mehrere Dimensionen untersucht, wird zur besseren Abstraktion und leichteren Fassbarkeit nicht auf O-D-Niveau durchgeführt, sondern bezieht sich auf Stadtregionen. Dabei handelt es sich um eine räumliche Klassifikation von Gemeinden, welche durch die Kombination von sozioökonomischen Daten wie Bevölkerungs- und Beschäftigtendichte sowie anderen Informationen durch die Statistik Austria erstellt wurde (Statistik Austria, 2016) (s. Abbildung 9). Sie dient zur Abgrenzung von städtischen Zonen (Kernzone), suburbanen Gebieten (Außenzone) und ruralen Räumen.

Da sich die statistische Überprüfung im dritten Arbeitsschritt den hohen Detailgrad des Datensatzes zunutze machen soll, ist die hier gewählte räumliche Bezugsebene die Gemeinde- bzw. O-D-Ebene. Die Modellergebnisse werden im letzten Teil der Arbeit – erneut zur leichteren Abstraktion – auf Stadtregionesebene zusammengefasst, präsentiert und diskutiert.

Abbildung 9: Stadtregionen in Österreich – Gliederung nach Kern-, Außen- und ruralen Zonen



Quelle: Statistik Austria, 2016; eigene Darstellung, 2016.

5.4 Anpassung des Datensatzes

Um die Pendlerströme sinnvoll untersuchen zu können und die Nachvollziehbarkeit der Analysen zu gewährleisten, mussten am vorliegenden Datensatz einige Veränderungen vorgenommen werden, welche dieses Kapitel beschreibt. Es geht dabei um die Handhabung der gespeicherten Verkehrsmodi, die Definition von statistischen Kriterien für Abschätzung der Aussagekraft des lokalen Modal-Splits und den daraus resultierenden Ausschluss von O-D-Strömen aus der Analyse.

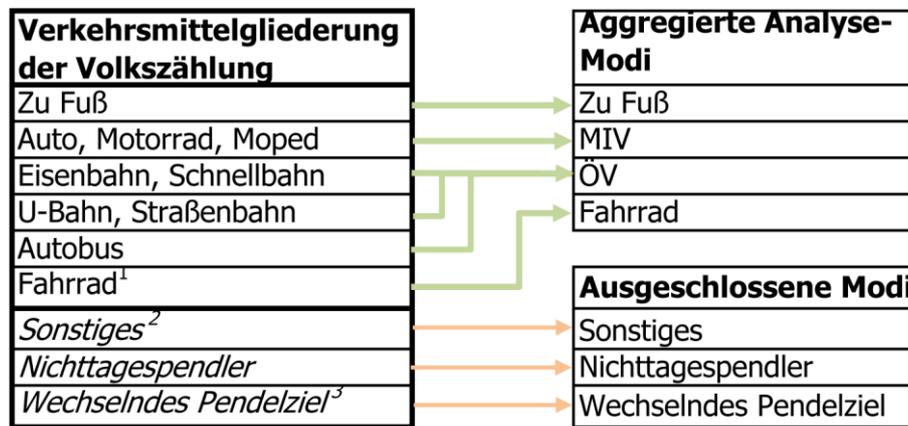
5.4.1 Zusammenfassung der Verkehrsmodi

Die O-D-Matrix gliedert die Interaktionen der Pendler nach bis zu neun unterschiedlichen Pendelmodi (s. Abbildung 10). Das Schlüsselkriterium zur Zuordnung der Pendler in diese Kategorien gemäß den Fragebögen der Volkszählungen ist, mit welchem Verkehrsmittel die längste Strecke des Weges zur Arbeit zurückgelegt wurde (Statistik Austria, 2005, S. 12). Multimodalität wird demnach nicht abgebildet.

Ein Anpassungsbedarf der Daten für die weiterführende Analyse wird im Hinblick auf die Vielschichtigkeit der Klassifikation notwendig, um unnötige Komplexität nachfolgender Analysen zu vermeiden. Während die Pendelmodi *Zu Fuß* und *Auto, Motorrad, Moped* in den äquivalenten Kategorien *Zu Fuß* und *MIV* übernommen werden konnten, wurden die Modi

Eisenbahn, Schnellbahn, U-Bahn, Straßenbahn sowie *Autobus* zur Vereinfachung in die Kategorie *ÖV* zusammengefasst (s. Abbildung 10). Als problematisch erweist sich jedoch die indifferente Vorgehensweise der einzelnen Erhebungen im Bereich des Radverkehrs, aber

Abbildung 10: Anpassung der Verkehrsmittelgliederung in der vorliegenden Arbeit



¹ 1971 und 1981 als "Fahrrad und sonstiges Verkehrsmittel" erhoben

² 1971 und 1981 nicht besetzt

³ Umfasste 1971 Verkehrsmittel unbekannt; 81, 91 nicht besetzt.

Quelle: Statistik Austria, 2005; eigene Darstellung, 2016.

auch andere Modi müssen ausgeschlossen werden: 1971 sowie 1981 fielen in die Kategorie Fahrrad auch sonstige Verkehrsmittel, welche erst ab 1991 als eigene Verkehrsmittel erhoben wurden (s. Tabelle 1). Daraus folgte, dass der Modus *Sonstiges* aufgrund der niedrigen Fallzahlen ausgeschlossen wird. Diese Unschärfe wird aufgrund der geringen Anteile der Kategorie *Sonstiges* in den Jahren 1991 und 2001 als minimal eingeschätzt und in den weiteren Analysen hingenommen. *Nichttagespendler* sind per definitionem nur unregelmäßig am Verkehrsgeschehen beteiligt, außerdem kann ihnen bei diesen Fahrten kein konkretes Verkehrsmittel zugeordnet werden. Gleiches trifft die Kategorie *wechselndes Pendelziel*, da weder ein konkretes Fortbewegungsmittel, noch fixer Zielort festgestellt werden können. Beide Modi werden daher von der Analyse ausgeschlossen (s. Abbildung 10). Aufgrund fehlender Verortbarkeit werden Pendelwege ins Ausland nicht berücksichtigt.

5.4.2 Berechnung und Aussagekraft des Modal-Splits

Da die Berechnung des Modal-Splits in den Verkehrswissenschaften nicht einheitlich definiert ist, wird er in dieser Arbeit analog zu Matulin et al. (2009, S. 2) als „Verhältnis zwischen verschiedenen Transportmodi am Gesamtverkehrsaufkommen zwischen Quell- und Zielort [Anm.: eigene Übersetzung]“ verstanden.

Wesentlich für die Berechnung des Modal-Splits ist jedoch das Gesamtverkehrsaufkommen, auf welches die Ströme der Verkehrsmittel bezogen werden. Da es sich bei den vorliegenden Daten um Vollerhebungen handelt, welche Interaktionen auf Gemeinde- bzw. O-D-Ebene listet, finden sich neben großen auch sehr kleine Ströme mit beispielsweise zwei Pendlern Gesamtverkehrsaufkommen – einer davon nutzt das Rad als Verkehrsmittel. Dies würde rein rechnerisch einen Radverkehrsanteil von 50 % auf der Verbindung ergeben. Angesichts der geringen Grundgesamtheit, auf die man sich bezieht, besitzt dieser Radverkehrsanteil im Vergleich zu anderen O-D-Paaren mit einem höheren Gesamtverkehrsaufkommen keine Aussagekraft. Dies zeigt, dass aus der O-D-Matrix – trotz des immensen Detailgrades – zuerst jene Ströme identifiziert werden müssen, welche aussagekräftige Modal-Split Werte liefern. Anhand der Grundgesamtheit von rund 3,2 Mio. Pendlern wurde daher ein minimales Aus- und Binnenpendelgesamtverkehrsaufkommen auf Gemeindeebene als Stichprobengröße mit einem Konfidenzintervall von 5 % und einem Unsicherheitsbereich von 10 % ermittelt. Die Vorgehensweise orientiert sich dabei an bekannten Verfahren, welche die notwendige Größe einer Stichprobe berechnen, damit diese die Grundgesamtheit gut widerspiegelt (vgl. SurveyMonkey, 2016). Es ergibt sich für jeden betrachteten Strom eine minimale Grundgesamtheit von 96, also rund 100 Pendlern als Gesamtverkehrsaufkommen, um Ströme mittels Modal-Split miteinander sinnvoll vergleichen zu können.

5.4.3 Ausschluss von O-D-Paaren

Ein anderes Problem ergibt sich aus den unterschiedlichen Maßstabsebenen, auf denen der Pendeldatensatz einerseits deskriptiv analysiert, andererseits als Modellgrundlage verwendet wird. Auf lokaler Ebene muss auf ein ausreichend großes Gesamtverkehrsaufkommen zur Wahrung der Aussagekraft geachtet werden, auf höheren räumlichen Betrachtungsebenen hingegen könnte diese Überprüfung aufgrund der möglichen Aggregation der wenigen Interaktionen zu einem großen Strom vernachlässigt werden. Da die Widerstandsmodellierung und das Regressionsmodell die Schätzung von Radanteilen

Tabelle 1: Überblick zur Datengrundlage und den ausgeschlossenen Modi

	Ges. Pendelverkehrs- aufkommen (N)¹	Ant. Sonstige	Ant. Nichttagespendler	Ant. Wechselndes Pendelziel
1971	3039693 Pendler	-	5.08%	3.94%
1981	3197418 Pendler	-	6.66%	-
1991	3323222 Pendler	0.28%	6.87%	-
2001	3419851 Pendler	0.11%	4.47%	0.54%

¹ Pendelverkehrsströme ins Ausland ausgeschlossen

Quelle: Statistik Austria, 2005; eigene Darstellung, 2016.

zwischen und in Gemeinden anstreben, müssen O-D-Paare mit geringer Aussagekraft auf der kleineren Ebene auch für die großmaßstäbige Analyse des Radverkehrs gefiltert werden, um die Vergleichbarkeit der Analyse- und Modellergebnisse bei Aggregation auf einer höheren Betrachtungsebene im letzten Arbeitsschritt zu wahren.

In Bezug auf den Radpendelverkehr scheint die Filterung der O-D-Matrix unproblematisch, wie anhand der Interaktionsdaten des Jahres 2001 gezeigt werden kann: Obwohl sich bei Auspendlern in ganz Österreich die Anzahl der O-D-Paare durch den Ausschluss um 64 % von 5436 auf 1933 Fälle, und bei den Binnenpendlern um 18 % von 2020 auf 1652 Gemeinden reduziert, sind nur rund 5,6 % aller Radpendler dieser Erhebungsperiode vom Ausschluss betroffen. Ein Grund für die große Zahl an ausgeschlossenen Fällen ist, dass die Verteilung der Radpendler auf die Ströme stark rechtsschief ist und keiner Normalverteilung entspricht (Schiefe: 7,88; Standardfehler: 0,33). Diese Tatsache beobachten auch Lovelace et al. (2015, S. 6) in dem aktuellen Pendel datensatz des Britischen Census: Es gibt überproportional viele O-D-Paare, welche von wenigen Radfahrern befahren werden, und dafür eine geringe Anzahl an stark befahrenen Strömen, welche den größten Teil der Radauspendler fassen. Diese Verteilung kann in jeder Erhebungsperiode des österreichischen Datensatzes beobachtet werden.

Anders wird bei der Analyse der allgemeinen Modal-Split Entwicklung auf großmaßstäbiger Ebene (s. Kapitel 6.1) verfahren: Da die Filterung, bezogen auf die Ströme aller Verkehrsmittel, rund 30 % aller Pendler in allen Modi ausschließen würde, wird das Kriterium bei dieser Analyse nicht angewandt, um keine verzerrte Darstellung der einzelnen Verkehrsmodi wiederzugeben.

5.5 Grenzen der Arbeit

Leider ist die vorgeschlagene Analyse hinsichtlich der Datenverfügbarkeit sowohl auf Seiten der Interaktionsdaten (Radverkehrsanteil auf O-D-Paaren), als auch in Bezug auf mögliche weitere erklärende Variablen, wie sie in bestehenden Modal-Choice Modellen untersucht werden, stark eingeschränkt: Als aktuellste Datenquelle für Interaktionsinformationen, welche auf O-D-Ebene nach Verkehrsmittel getrennt sind, existieren nur mehr die Pendlerstatistiken der Volkszählungen zwischen 1971 und 2001. Aktuellere Informationen sind aufgrund der Umstellung der Volkszählung auf das Format der Registerzählung seit dem letzten Vollerhebungsjahr 2001 (Statistik Austria, 2005, S. 5) nur durch Mobilitätserhebungen einzelner Bundesländer (Beispielsweise Oberösterreich 2012 oder Vorarlberg 2013) verfügbar. Diese unterscheiden sich sehr stark in der Erhebungsmethodik

und sind nicht als Vollerhebung, sondern im Format von stichprobenbasierten Befragungen verfügbar (vgl. Herry, 2016; vgl. BMVIT, 2013a). Diese Tatsache schränkt die Aussagekraft der Analyseergebnisse hinsichtlich der Vergleichbarkeit mit dem Stand des heutigen Radverkehrs ein, was aufgrund der schlechten Datenlage hingenommen werden muss. Allerdings haben die veralteten Daten keinen Einfluss auf die Konzeption der in dieser Arbeit neu vorgestellten räumlichen und statistischen Modellierungsmethoden, welche eins zu eins wieder auf einen neueren Datensatz anwendbar sind. Hinzu kommt, dass die Tatsache der Unveränderlichkeit des Hauptuntersuchungsgegenstandes Topographie der Untersuchung der älteren Datengrundlage aus 2001 entgegenkommt: Da dieser Einflussfaktor über die Zeit immer die gleiche Ausprägung aufweist, ist zu erwarten, dass er als starres Maß auch zum heutigen Datum ähnlich wirkt.

Auf Seiten der unabhängigen, erklärenden Variablen wäre es erstrebenswert, ebenfalls mehr Einflussfaktoren als Variablen operationalisieren zu können, um die Vorhersagekraft des statistischen Modells zu steigern. Jedoch ist von einer ähnlich prekären Datenlage wie bei den Interaktionsdaten auszugehen: Es liegen für diese Arbeit keinerlei Daten zu sozioökonomischen Informationen auf Gemeindeebene im Betrachtungszeitraum vor, welche daher nicht betrachtet werden können. Noch schlimmer wirkt die Situation bezüglich der Wirkungsabschätzung von Radinfrastrukturen in Gemeinden: Obwohl seit Jänner 2016 die österreichische Graphenintegrationsplattform (GIP) die gesamte Straßeninfrastruktur als Geodatensatz mit detaillierten Informationen zu den einzelnen Strecken als Open-Data zur Verfügung stellt, ist erst ein kleiner Bruchteil der bestehenden Radwege eingetragen: Die zum Download angebotene Tabelle BikeHike.txt ist nach einer ersten Datensichtung hinsichtlich vieler Attribute nicht befüllt (teilweise 100 % aller 1.368.130 österreichischen Straßenkanten). Hinzu kommt, dass dieser Datensatz nur den derzeitigen Radwegebestand (Stand 2016) wiedergibt – was hinsichtlich der Zeitreihendaten nicht sinnvoll anmutet.

6. Deskriptive Analyse des Radpendelverkehrs

Dieses Kapitel beschreibt die zeitliche und räumliche Analyse des Radpendelverkehrs seit 1971. Der Beginn des Kapitels beinhaltet die Beschreibung der Modal-Split Entwicklung auf gesamtösterreichischer Ebene. Der zweite Teil des Kapitels fokussiert auf den Radverkehr und gibt einen Überblick zu den absoluten und relativen räumlichen und zeitlichen Verteilungen des Radverkehrs in Österreich. Damit liefert dieser Teil der Arbeit die Erkenntnisse zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage.

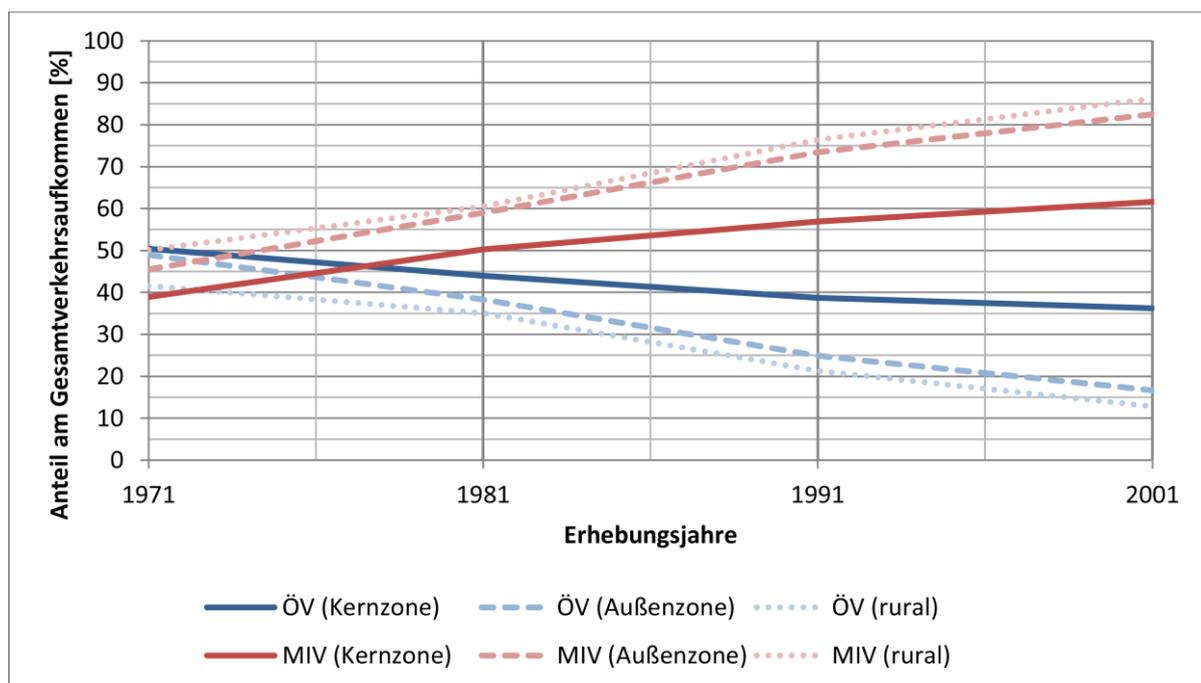
6.1 Deskriptive Analyse des Modal-Splits

6.1.1 Zeitliche Entwicklung des Modal Splits nach Stadtregionstypen

Die nachfolgenden deskriptiven Statistiken wurden für Gemeindeauspendler und Binnenpendler getrennt erstellt und zeigen die zeitliche Entwicklung des Modal-Splits nach Stadtregionstypen. Die Zusammenfassung nach Typen erfolgt über den Wohnort des Pendlers, was bedeutet, dass Auspendler aus Gemeinden des gleichen Stadtregionstyps pro Modus aggregiert werden – gleiches gilt für die Betrachtung der Binnenpendler.

Wie aus für den Auspendlerverkehr in Abbildung 11 und Abbildung 12 zu erkennen ist, bestätigen sich die eingangs genannten Entwicklungen zugunsten des MIV auch in den Pendlerdaten. Während der MIV 1971 noch zwischen 40 und 50 % Verkehrsanteil liegt und

Abbildung 11: Entwicklung der Auspendlerverkehrsmodi ÖV und MIV zwischen 1971 und 2001 nach Stadtregionstypen

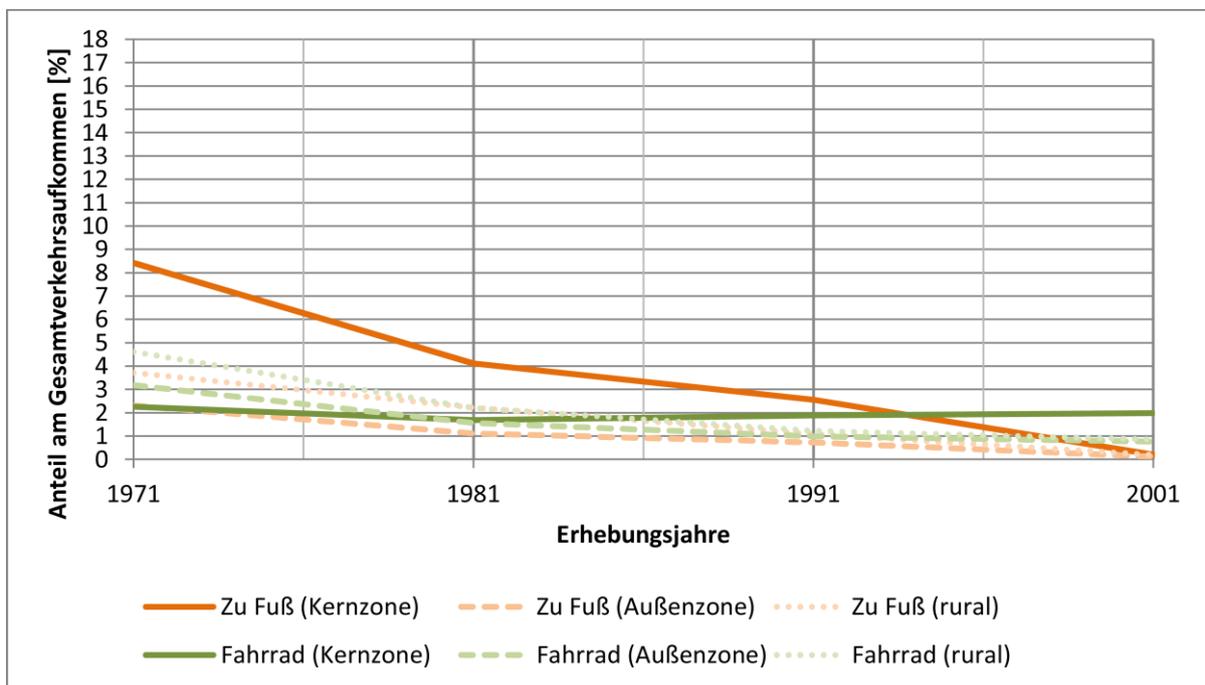


Quelle: Statistik Austria, 2005; eigene Darstellung, 2016.

in Kern- (KZ) und Außenzonen (AZ) nach dem ÖV als zweitmeist genutztes Pendelverkehrsmittel gilt, steigt die Nutzung dieses Modus während der nachfolgenden Erhebungsperioden auf bis zu 85 % in ruralen Gebieten (RU).

Analog dazu sinkt die ÖV-Nutzung auf dem Land stärker (RU, 2001 ~ 13 %) als in den städtisch geprägten Gebieten (KZ, 2001 ~ 36 %). Gänzlich anders zeigt sich die Entwicklung bei den nicht-motorisierten Modi, welche beim Auspendlerverkehr generell unter 10 % liegen und daher in einem eigenen Diagramm mit skaliertem Y-Achse behandelt werden (s. Abbildung 12): Während der Fußgängerverkehr 1971 in Kernzonen noch einen Anteil von über 8,5 % aufwies, sank dieser bis 2001 auf ein verschwindend geringes Minimum von rund 0,02 %. Eine andere Tendenz zeigt sich hingegen beim Radverkehr, welcher in Kernzonen zwischen 1971 und 1981 fiel, aber seither ein leichtes Wachstum aufweist (KZ, 2001 ~ 2 %). Anders verhält es sich in den Außenzonen und ruralen Gebieten, wo der Radverkehr 1971 einen höheren Anteil als in urbanen Gebieten aufweist (AZ, 1971 ~ 3 %, RU, 1971 ~ 4,5 %).

Abbildung 12: Entwicklung der nichtmotorisierten Auspendlerverkehrsmodi zwischen 1971 und 2001 nach Stadtregionstypen

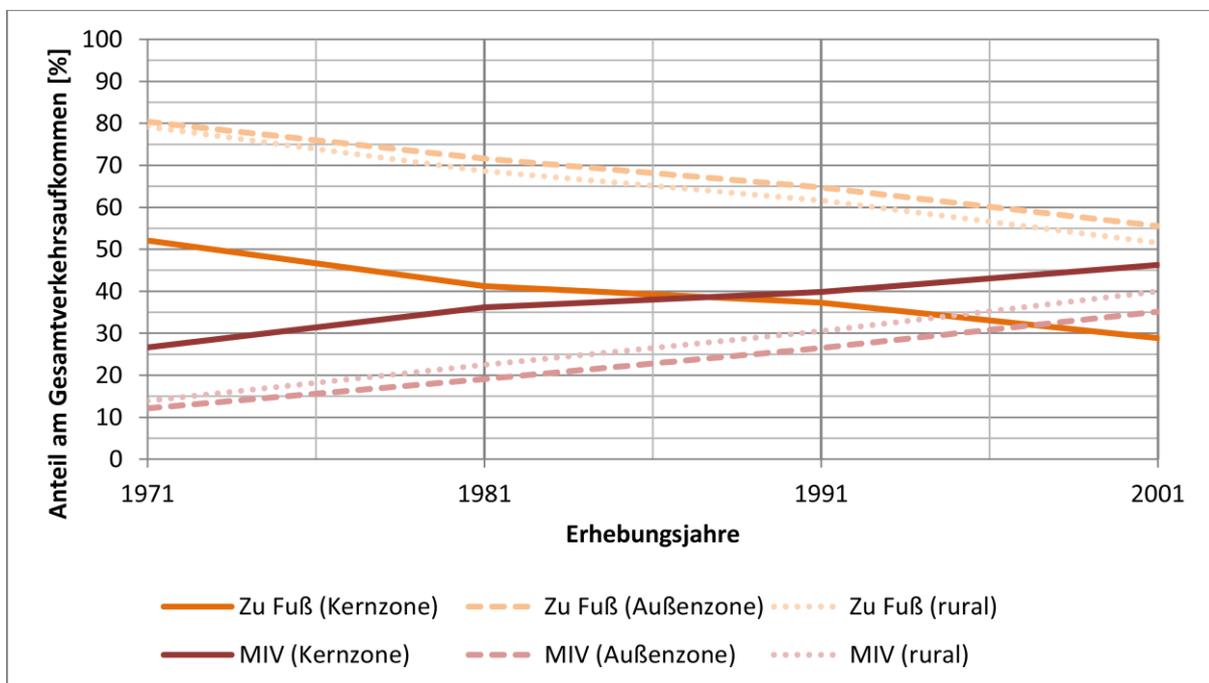


Quelle: Statistik Austria, 2005; eigene Darstellung, 2016.

Binnenpendler

Bei den Wegen zur Arbeit innerhalb der klassifizierten Gemeinden zeigt sich die Dominanz der motorisierten Modi nicht so eindeutig ausgeprägt wie dies bei den Auspendlern der Fall ist, da Wege innerhalb von Gemeinden tendenziell kürzer sind (s. Abbildung 13): Bis ins Jahr 2001 zeigt sich der Fußgängerverkehr am Land und in Außenzonen als Hauptverkehrsmittel – wenn auch mit fallender Tendenz (AZ, 2001 ~ 55 %; RU, 2001 ~ 50 %). In Kernzonen ist der Fußgängerverkehr generell schwächer ausgeprägt als am Land, dafür zeigt Abbildung 14 eine klar erhöhte ÖV Nutzung in Städten, welcher augenscheinlich die Zahl der Fußgänger begrenzt.

Abbildung 13: Entwicklung der Binnenpendlerverkehrsmodi Zu Fuß und MIV zwischen 1971 und 2001 nach Stadtregionstypen

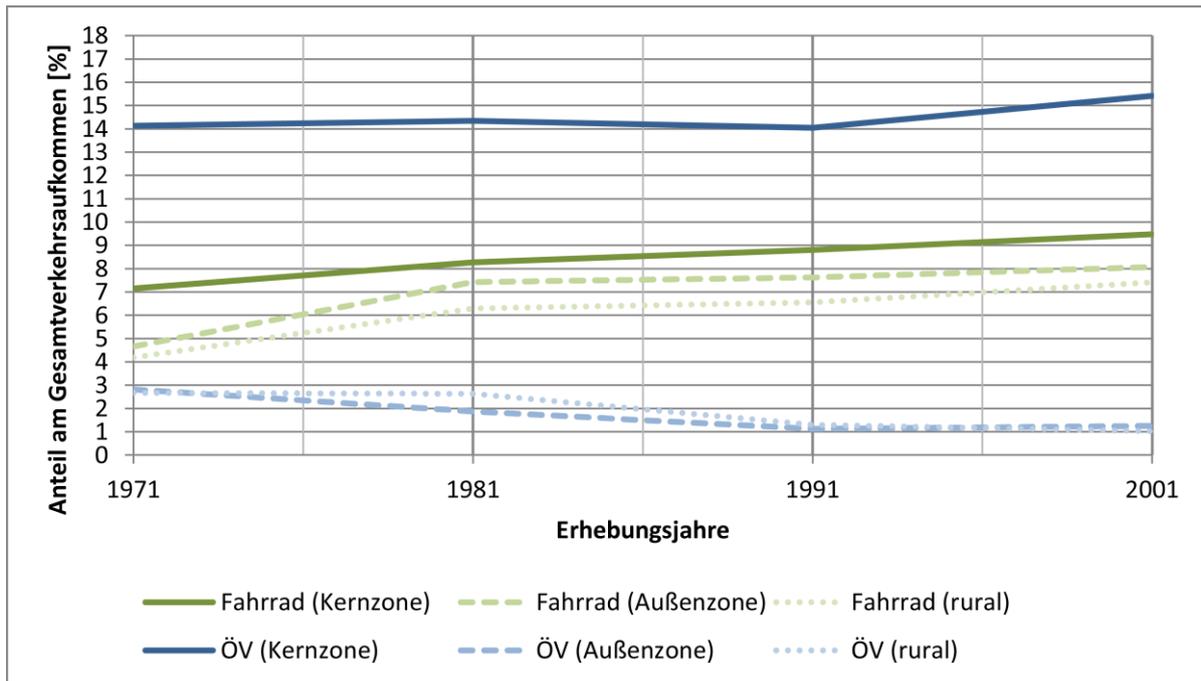


Quelle: Statistik Austria, 2005; eigene Darstellung, 2016.

Auch die Binnenpendlerstatistik weist auf den gleichen Trend wie die Auspendlerdiagramme bezüglich der steigenden Entwicklung des MIV hin – wenn auch der Fußgängerverkehr als dominierendes Verkehrsmittel erst ein wenig später (1981 bis 1991) und nur in Kernzonen überholt wurde als bei den Auspendlern. Insgesamt zeigt sich bezüglich des MIV (AZ, 1971 ~ 10 %; AZ, 2001 ~ 35 %) und Fußverkehr (AZ, 1971 ~ 80 %; AZ, 2001 ~ 55 %) eine perfekte, für jeden Modus jeweils inverse Entwicklung.

Deutlich unter 20 % liegen innerhalb der Gemeinden die Modi ÖV und Fahrrad, wobei der öffentliche Verkehr in den ländlichen Gebieten eine stark untergeordnete Rolle spielt (AZ, 2001 ~ 2 %). Beim Radverkehr lässt sich jedoch ein deutlicher Trend zum Wachstum feststellen (KZ, 1971 ~ 7 %; KZ, 2001 ~ 9,5 %) – der höchste Zuwachs gelang zwischen 1971 und 1981 in ruralen Räumen und Außenzonen, seither flacht der Zuwachs leicht ab.

Abbildung 14: Entwicklung der Binnenpendlerverkehrsmodi Fahrrad und ÖV zwischen 1971 und 2001 nach Stadtregionstypen



Quelle: Statistik Austria, 2005; eigene Darstellung, 2016.

6.1.2 Räumliche Verteilung des Modal-Split nach Stadtregionen

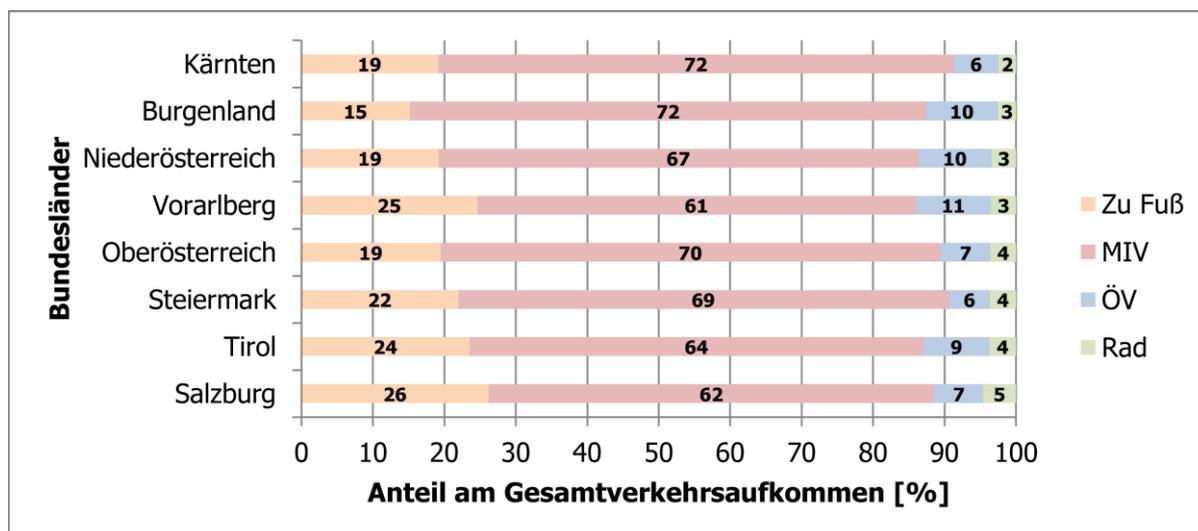
Die kartographische Darstellung der Modal-Split-Verteilung nach Stadtregionen (s. Abbildung 16) zeigt Modal-Split Werte des Jahres 2001 nach Stadtregionen. Aus- und Binnenpendler werden am Wohnort zusammengefasst. Das gesamte Pendelverkehrsaufkommen verteilt sich – bezogen auf die Bevölkerung – räumlich ungleich: Der höchste Anteil pendelnder Erwerbstätiger an der Gesamtbevölkerung kann in den Stadtregionen der Landeshauptstädte beobachtet werden. Ländliche Regionen, wie die Mur-Mürz-Furche, weisen einen niedrigen Anteil an Pendlern auf.

Es zeigt sich klar das starke Wachstum des MIV in jeder räumlichen Einheit – die österreichweite durchschnittliche Wachstumsrate in Stadtregionen zwischen 1971 und 2001 beträgt rund 37,5 %. Die höchsten MIV-Anteile weisen Wolfsberg (78 %) und Gmunden (76 %), den niedrigsten Anteil weist Wien mit Satellitenstädten (49 %) auf. Der

Fußgängerverkehr zeigt über die Jahrzehnte hinweg einen klaren sinkenden Trend (durchschnittlich -30.5 %). Den höchsten Anteil besitzen 2001 die alpin geprägten Stadtregionen St. Johann im Pongau (24 %) und Kufstein (22 %). Die geringsten Anteile konzentrieren sich in Ostösterreich: Ternitz (9 %), Wien (10 %) und Wiener Neustadt (10 %). Die Landeshauptstädte weisen wie erwartet den höchsten ÖV Anteil auf, da dieser dort in attraktiver Weise betrieben werden kann (Wien: 37 %, Innsbruck: 21 %) – in den Stadtregionen Krems und Ternitz steigt die Zunahme an Wegen mit dem ÖV im Durchschnitt um 1 bis 2 % im Betrachtungszeitraum.

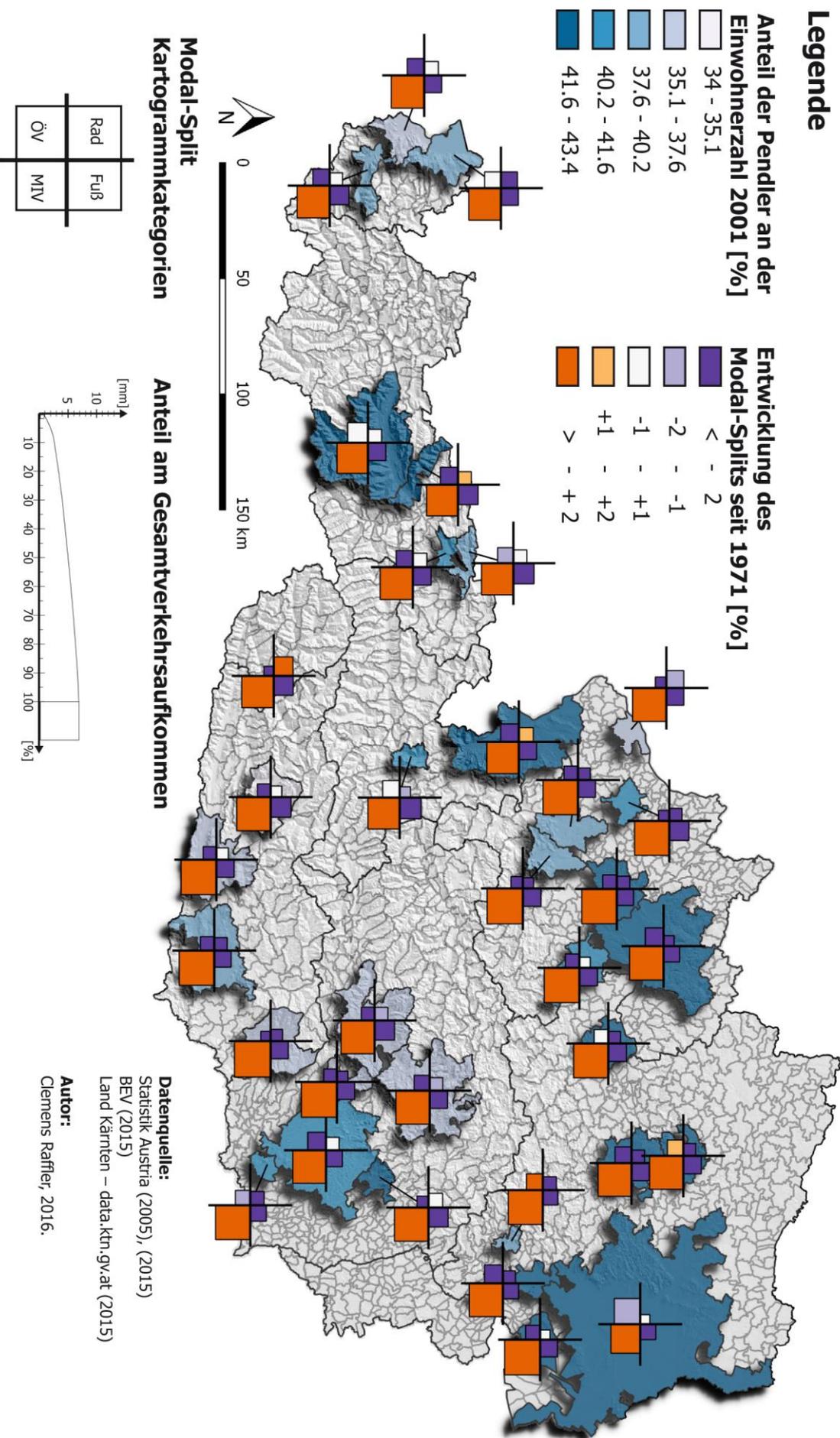
Als Ergänzung zu dem auf Stadtregionen fokussierten Blick, zeigt Abbildung 15 den Modal-Split ruraler Gemeinden in der letzten Erhebungsperiode gegliedert nach Bundesländern, da dieser nicht in der kartographischen Darstellung miteingeschlossen ist. Aus- und Binnenpendler sind – wie zuvor beschrieben – am Wohnort zusammengefasst. Es zeigt sich ein ähnliches Bild wie in den Stadtregionen: dominierender MIV, geringe ÖV- und Radanteile, der Fußgängerverkehr überproportional hoch mit einem Anteil von rund 20 % Anteil.

Abbildung 15: Modal Split des ruralen Raumes nach Bundesländern im Jahr 2001



Quelle: Statistik Austria, 2005; eigene Darstellung, 2016.

Abbildung 16: Räumliche Verteilung des Modal-Splits nach Stadtregionen



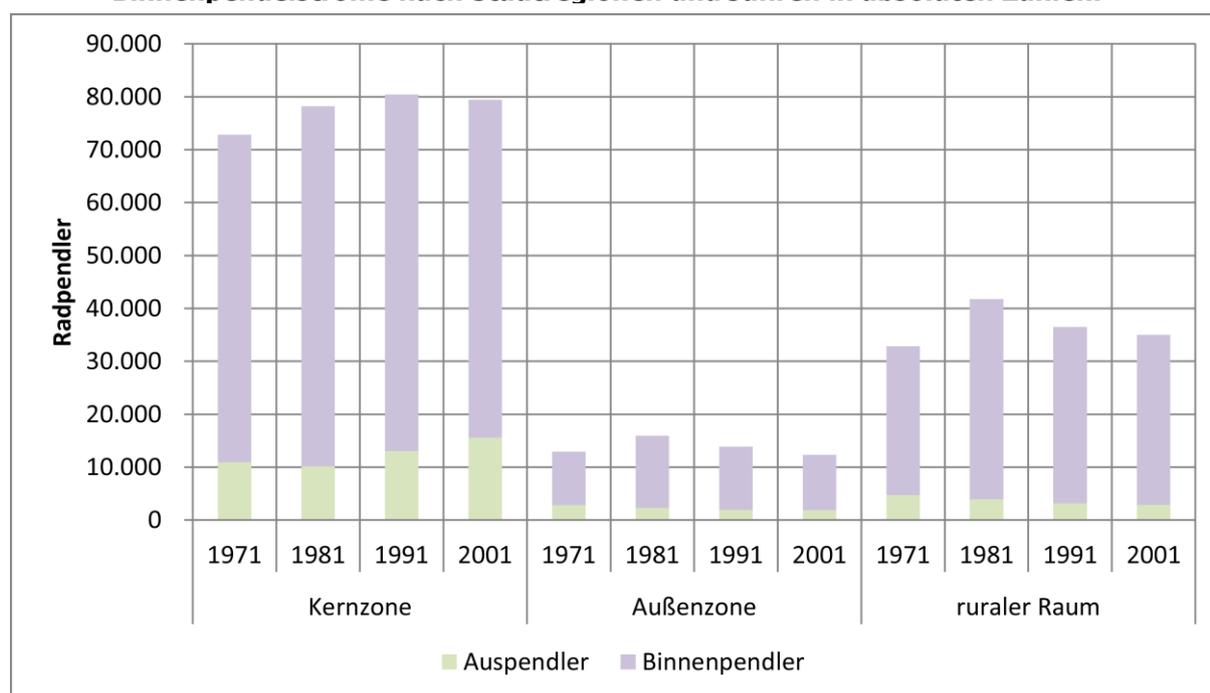
6.2 Deskriptive Analyse des Radverkehrs

Dieser Abschnitt der deskriptiven Analyse widmet sich dem Radverkehr, welcher zuerst in absoluten Zahlen in seiner Verteilung auf Stadtregionstypen, Binnen- und Auspendelströme aber auch räumlich verglichen wird.

6.2.1 Absolute Entwicklung und Verteilungen des Radverkehrs

Um eine Einschätzung der Gewichtigkeit von Binnen- bzw. Auspendelströmen in Bezug auf den Radverkehr geben zu können, zeigt Abbildung 17 die Verteilung der Radfahrer nach Stadtregionen und Jahren in absoluten Zahlen. Hier fällt auf, dass Auspendelströme im Verkehrsaufkommen wesentlich niedriger besetzt sind als die Ströme innerhalb von Gemeinden. Gleichzeitig kann ein deutlicher Unterschied in der Fahrradnutzung nach Gebietstypen festgestellt werden: Städtische Außenzonen liegen absolut gesehen stark hinter dem Radverkehrsaufkommen von urbanen Kernzonen. Selbst in ruralen Gemeinden wird mehr Rad gefahren. Ein Grund dafür könnte die Eigenschaft von suburbanen Gebieten als

Abbildung 17: Vergleich der Verteilung von Radfahrern auf Aus- und Binnenpendelströme nach Stadtregionen und Jahren in absoluten Zahlen.



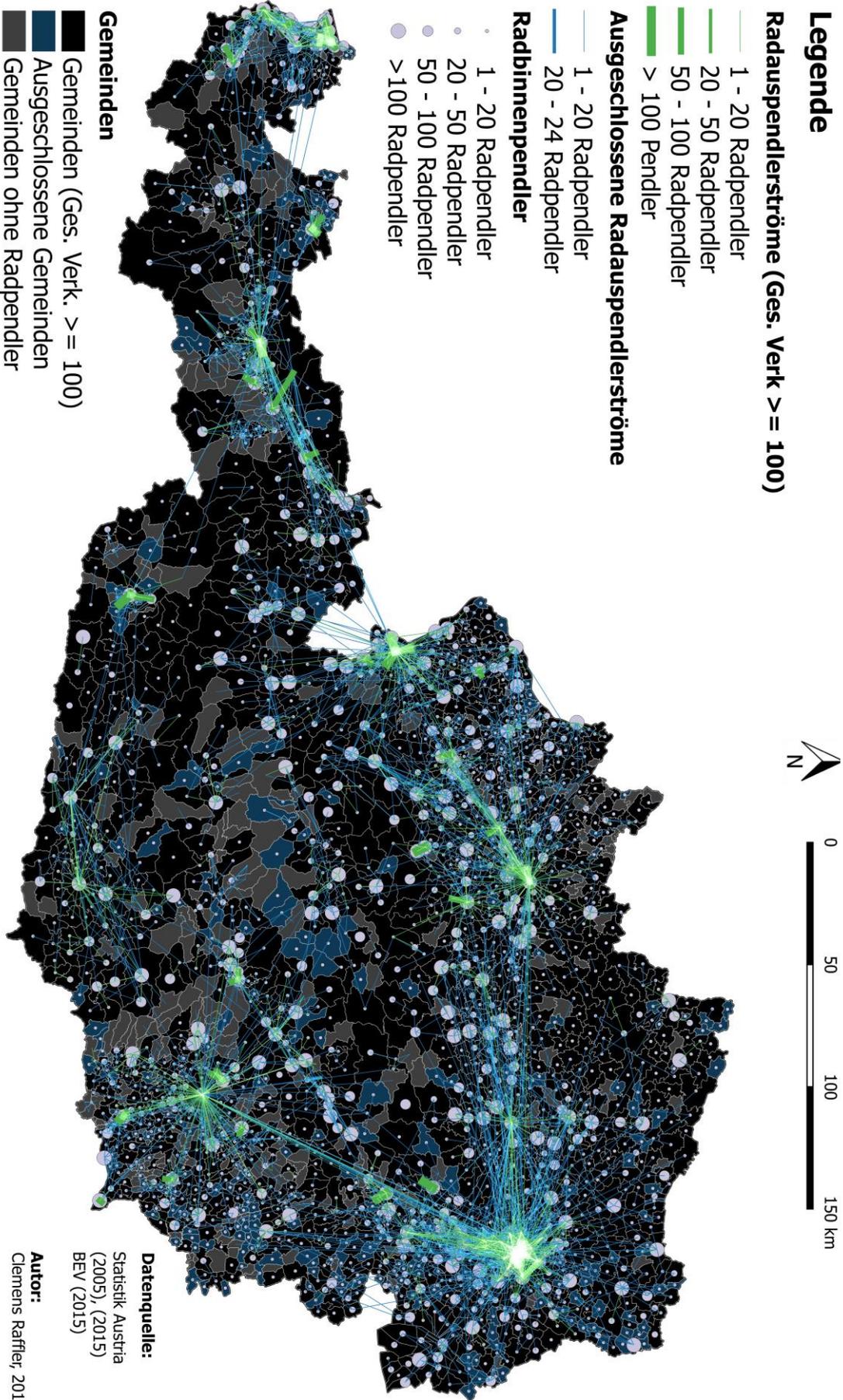
Quelle: Statistik Austria, 2005; eigene Darstellung, 2016.

dezentrale und nahe an hochrangigen Infrastrukturen des MIV gelegenen Siedlungen sein (VCÖ, 2007, S. 15), welche Pendler stärker ans Auto als Verkehrsmittel binden. Als interessant erweist es sich auch, dass die Auspendlerströme aus Kernzonen seit 1971 stetig an Radfahrern dazugewinnen – ein Grund dafür könnte die Einbeziehung der Fahrten zwischen den Wiener Bezirken sein, welche sehr stark besetzt sind (s. Abbildung 18).

In absoluten Zahlen steigt die Radnutzung in Kernzonen seit 1971, in Außenzonen steigen die Pendelinteraktionen bis 1981, danach setzt ein sinkender Trend – sowohl bei Binnen- als auch Auspendlern ein. Die Tatsache, dass der Radverkehr über alle Erhebungsperioden hinweg zu einem Großteil als Binnenverkehr abgewickelt wird, zeigt in einer ersten Annäherung die Distanzsensibilität dieses Fortbewegungsmittels, da Strecken innerhalb von Gemeinden tendenziell kürzer sind, als über die Gemeindegrenzen hinweg. Dieses Ergebnis geht Hand in Hand mit den Forschungsergebnissen von Bhatta und Larsen (2011, S. 10), welche feststellen, dass intrazonale Interaktionen besonders im nicht-motorisierten Verkehr eine große Rolle spielen.

Zur Visualisierung der Datenstruktur einer O-D-Matrix und den – in Bezug auf Fallzahlen – enorm wirkenden Ausschluss von Datensätzen auf O-D- und Gemeindeebene, wurde für die Erhebungsperiode 2001 eine Karte erstellt (s. Abbildung 18). Auspendlerströme wurden anhand der Luftliniendistanz zwischen Gemeindecentroiden (geometrische Schwerpunkte des Gemeindegrenznetzwerks) verortet. Die Interaktionen konzentrieren sich sowohl bei den inter- als auch intrazonalen Pendlern analog zu Abbildung 17 stark in den urbanen Gebieten der Landeshauptstädte und Tallagen (Bsp.: Rheintal, Inntal, Mürztal, Murtal). Geringe Aus- und Binnenradpendlerzahlen weisen hingegen die Gemeinden in hügeligen Landschaften wie dem niederösterreichischen Waldviertel oder dem steirischen Hügelland auf. Aus der Legende lässt sich erkennen, dass das maximale Aufkommen an Radfahrern auf einem ausgeschlossenen O-D-Paar bei lediglich 24 Radpendlern liegt, was durch die in Kapitel 5.4.3 angesprochene rechtsschiefe Häufigkeitsverteilung der Variable zum Ausdruck gebracht wird. Nicht einbezogene Binnenpendlerströme fallen in zwei Kategorien: Entweder es gibt keinen Radpendler in der Gemeinde, oder das Gesamtverkehrsaufkommen als Bezugsgröße des Radanteils ist zu niedrig. Die ausgeschlossenen Gemeinden sind vor allem in hochalpinen Regionen anzutreffen; gleichzeitig gibt es kaum Auspendlerströme, welche über Gebirgszüge führen. Dies ist eine erste Bestätigung der Annahme der Arbeit: Räume, welche nur mit großem Körperenergieaufwand befahren werden können, erweisen sich als unattraktiv für Radfahrer. Ebenfalls interessant ist, dass sich Radpendlerströme mit ungewöhnlich langen Pendelbeziehungen wie z. B. zwischen Wien und Linz oder Graz (> 200 km) finden. Diese Artefakte treten nicht nur in österreichischen Daten, sondern auch in der britischen Volkszählung auf. Es wird vermutet, dass sich diese Fälle auf Angaben von Personen zurückführen lassen, welche eine Teilstrecke ihres Pendelweges mit dem Fahrrad zurücklegen und nicht entsprechend der Fragen der Volkszählungen geantwortet haben (Rae, 2014).

Abbildung 18: Räumliche Verteilung der Radpendlerinteraktionen nach Binnen- und Auspendelverkehr in Absolutzahlen



Kapitel 6.2.3 betrachtet die Reisweitenverteilung der Radpendler genauer und versucht eine Einschätzung darüber zu ziehen, ab welcher Weglänge auf ein unwahrscheinliches Fahrverhalten geschlossen werden muss. Ein Großteil der langen O-D-Paare wurde ohnehin durch den Ausschluss nicht in die Berechnungen einbezogen.

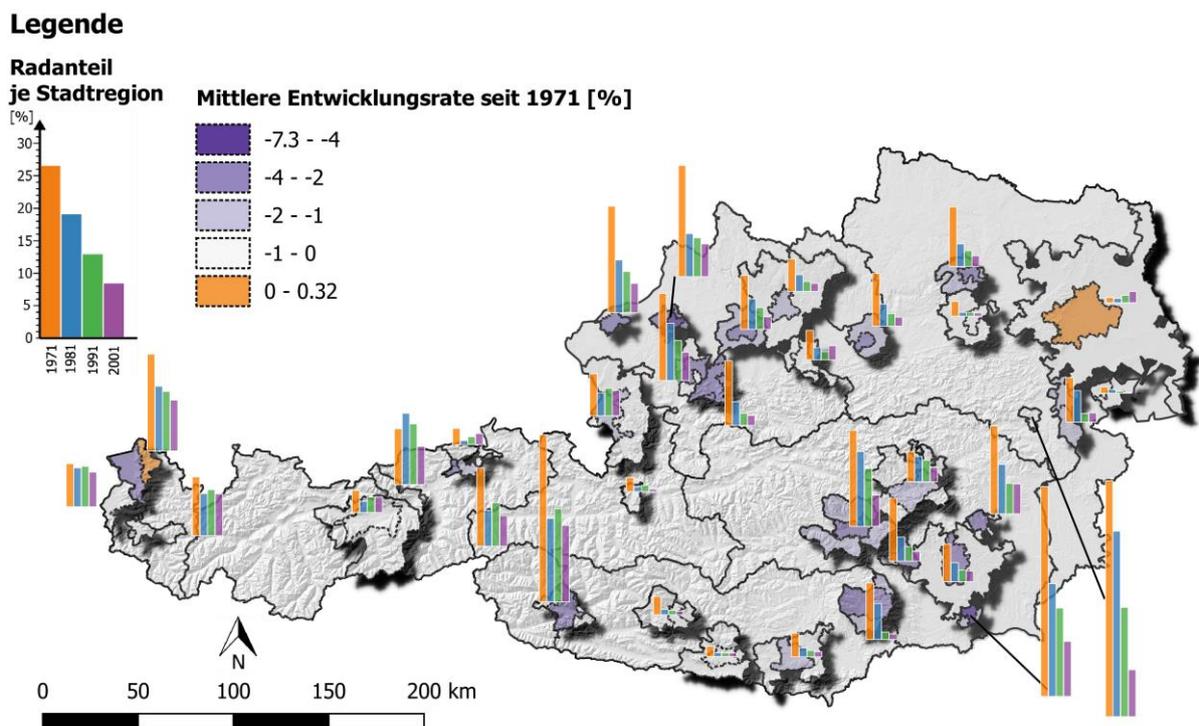
6.2.2 Zeitliche Entwicklung des Radverkehrsanteils nach Stadtregionen

Um die Wahl des Rades als Verkehrsmittel besser darstellen zu können, beschäftigt sich dieses Unterkapitel mit der zeitlichen Analyse des Radverkehrs als Anteil des Gesamtverkehrsaufkommens. Zur besseren Verständlichkeit wurden die ausgewählten Relationen des Datensatzes über Stadtregionen sowie die darin enthaltene Klassifikation nach städtischen, suburbanen und ländlichen Gemeinden aggregiert dargestellt. Sämtliche Wachstums und Schrumpfungsraten beziehen sich auf die prozentuelle Änderung des Radverkehrsanteils im Jahr 1971.

Entwicklung der Auspendlerströme

Der Radanteil der Auspendelrelationen zeigt sich in jeder österreichischen Stadtregion mit der Ausnahme des Wiener Zentralraums als rückläufig (s. Abbildung 19) und bestätigt die oben getroffene Annahme, dass besonders Ströme zwischen Wiener Bezirken für den

Abbildung 19: Zeitliche Entwicklung des Radverkehrsanteils auf interzonalen Relationen nach Stadtregionen und Stadtregionstypen seit 1971



Quelle: Statistik Austria, 2005; eigene Darstellung, 2016.

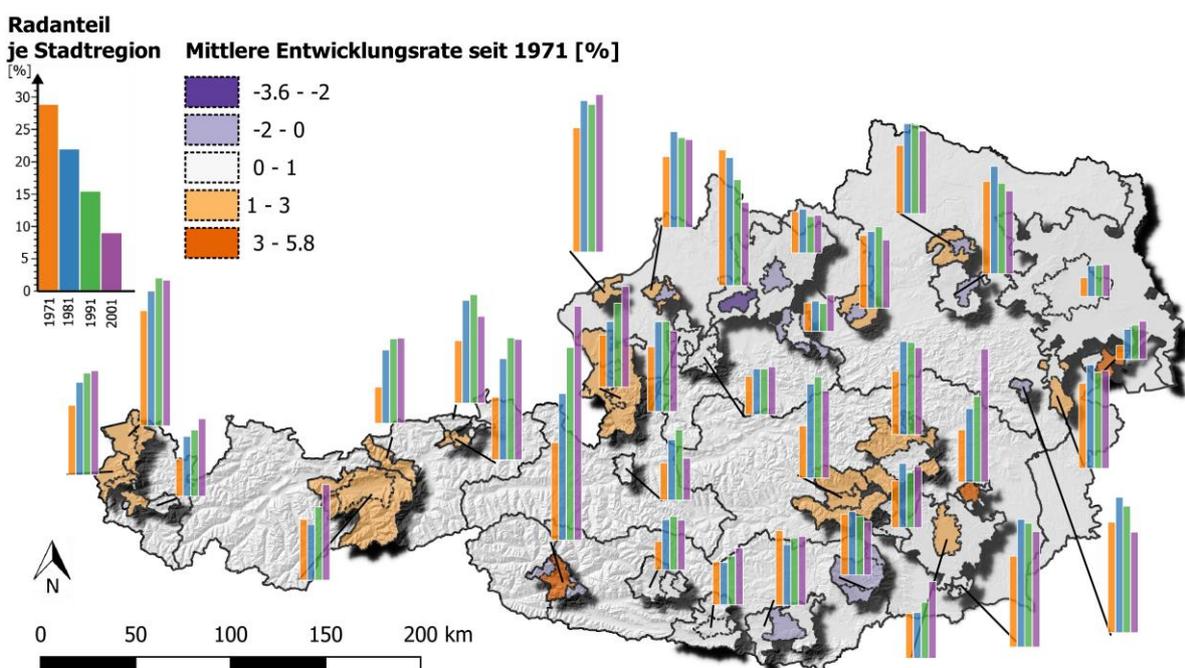
absoluten Anstieg der Radauspendler in Kernzonen verantwortlich sind. Oberösterreichische und steirische Stadtregionen wie Braunau, Ried im Innkreis und Leibnitz haben seit 1971 mehr als die Hälfte des Radanteils verloren und sind im Schnitt um 22 % seit 1971 gefallen. Die beiden stärksten im Anteil geschrumpften Regionen sind Ternitz in Niederösterreich (1971 ~ 31 %, 2001 ~ 6 %) Lienz in Osttirol (1971 ~ 22 %, 2001 ~ 10,7 %) und Leibnitz (1971 ~ 28 %, 2001 ~ 7 %). Gleichzeitig weisen jene drei Stadtregionen 2001 noch immer die größten Radauspendleranteile in Österreich auf. Mit Ausnahme des Wiener Agglomerationsraumes sowie den Stadtregionen in Westösterreich fallen die Radanteilswerte stärker in den Kern- als in den Außenzonen. Auf einem konstant niedrigen Niveau bleiben über die Erhebungsperioden hinweg das Burgenland und Niederösterreich. Eine genaue Aufschlüsselung der auf das Jahr 1971 bezogenen Wachstums- und Schrumpfungsraten liefern die Tabellen im Anhang (s. Anhang 11.3).

Entwicklung der Binnenpendlerströme

Gänzlich anders als bei den Auspendlern wächst der Radverkehrsanteil bei den intrazonalen Pendlern seit 1971 in fast allen Stadtregionen stetig (s. Abbildung 20). Ausnahmen sind Kernzonen in niederösterreichischen, oberösterreichischen und kärntner Stadtregionen wie St. Pölten, Krems, Linz, Wels, Ried im Innkreis sowie Wolfsberg und Klagenfurt. Der Wiener Agglomerationsraum

Abbildung 20: Zeitliche Entwicklung des Radverkehrsanteils auf intrazonalen Relationen nach Stadtregionen und Stadtregionstypen seit 1971

Legende



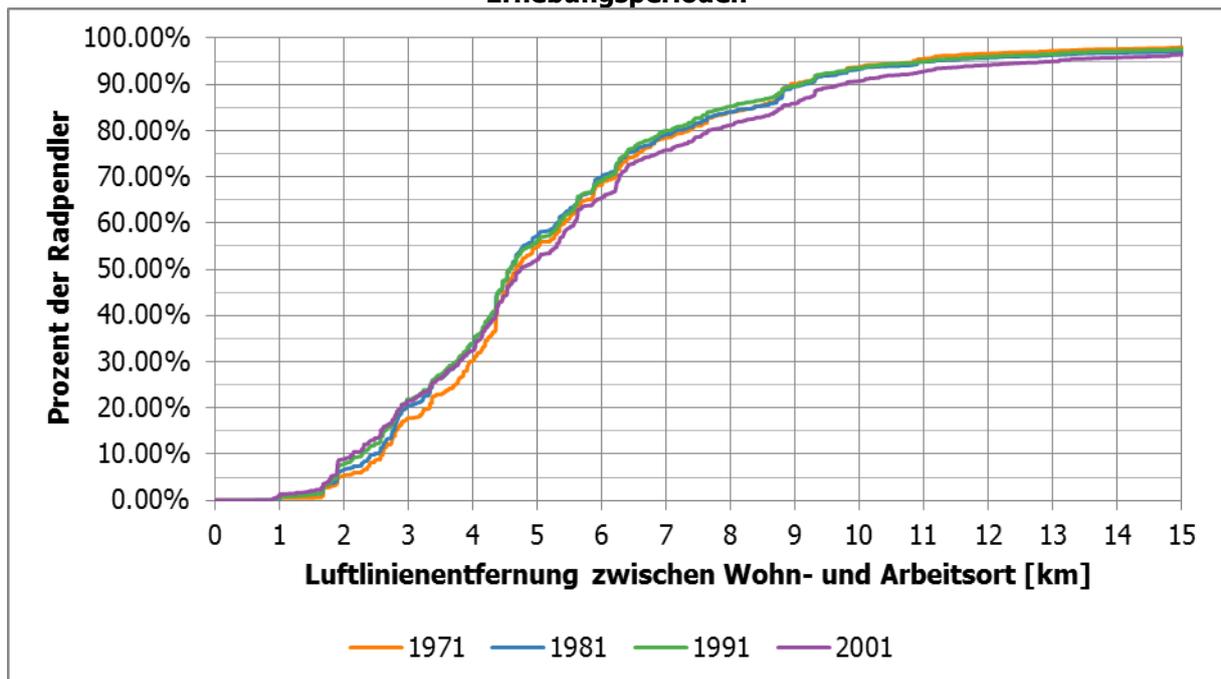
Quelle: Statistik Austria, 2005; eigene Darstellung, 2016.

Zentralraum stagniert ebenso wie viele der Kärntner Stadtregionen Spittal an der Drau, Villach und Klagenfurt. Im Westen Österreichs sowie in der Steiermark kann im Schnitt ein Anstieg von 1 bis 3 % im Radverkehrsanteil pro Erhebungsperiode verzeichnet werden, besonders stark ist er in Weiz (+11 %) und Lienz (+18 %). Die Stadtregionen mit dem höchsten intrazonalen Radverkehrsanteil sind wie auch schon zuvor in Westösterreich anzutreffen: Lienz (1971 ~ 13 %, 2001 ~ 30 %), Bregenz (1971 ~ 16 %, 2001 ~ 20 %). Auch für die Binnenpendler sind die jeweiligen Wachstumsraten in Tabellenform im Anhang abgedruckt (s. Anhang 11.3).

6.2.3 Entwicklung der Reiseweiten der Radauspendler

Um einen ersten Eindruck von der Verteilung der Reiseweiten in den vier Erhebungsperioden zu erhalten wird hier die einfache euklidische Distanz der in Abbildung 21 dargestellten Auspendlerströme als relative Summenhäufigkeitskurve über die Anzahl der Radpendler kumuliert. Es zeigt sich klar die oben angesprochene Distanzsensibilität des Fahrradfahrers: Innerhalb einer Distanz von 3 km bewegen sich bereits rund 20 % aller Radfahrer, Ströme innerhalb von 4,5 km fahren rund 50 % aller Radfahrer. Länger als 10 km fahren nur mehr rund 7 % aller Radpendler. Zu berücksichtigen ist weiters, dass Pendelverkehr neben einer Anreise zum Arbeitsort auch eine Rückreise zum Wohnort impliziert, weshalb die hier angeschriebenen Entfernungswerte für einen Tagespendler zu verdoppeln sind. Es resultiert

Abbildung 21: Kumulative relative Summenhäufigkeit der interzonalen Radpendler, bezogen auf die einfache euklidische Distanz zwischen Wohn- und Arbeitsort für alle Erhebungsperioden



Quelle: Statistik Austria, 2005; eigene Darstellung, 2016.

eine obere maximale Pendeldistanz von 30 km, welche täglich gefahren wird, was die bisherigen Ergebnisse internationaler Studien bezüglich der Distanzsensibilität von Radfahrern bestätigt (vgl. Heinen et al., 2010, S. 61 ff).

Die Unterschiede der Erhebungsperioden sind nur bei genauerem Hinsehen auszumachen: Es besteht die Tendenz, dass in den früheren Volkszählungen auf den Strecken mit bis zu 4,5 km Länge eine größere Distanz gefahren wurde. Anders verhält es sich bei den längeren Strecken, auf welchen 2001 weiter gefahren wurde. Die Unterschiede sind jedoch kleiner als ein halber Kilometer.

6.3 Zusammenfassung

Als Zusammenfassung und Beantwortung der ersten Forschungsfrage kann folgendes festgehalten werden:

- Der Radverkehr spielt im Vergleich zu anderen Pendelmodi bis in das Jahr 2001 eine eher untergeordnete Rolle und entwickelt sich räumlich unterschiedlich. Motorisierte Verkehrsmittel dominieren im gesamten Zeitraum auch in ihrer Entwicklungstendenz. Interzonal liegt der Radpendelverkehr im Jahr 2001 über dem Fußgängerverkehr, welcher gegen Null sinkt. Im Binnenpendlerverkehr der städtischen Außenzonen und ruraler Gebiete liegt die Radverkehrsnutzung klar über der des ÖV.
- Intrazonale Verkehrsströme machen im Vergleich zu interzonalen Pendelflüssen auf dem Rad eindeutig den größten Anteil am Radverkehr aus (KZ, 2001 ~ 80 %) und weisen einen Wachstumstrend in den meisten Stadtregionen auf (KZ, 1971 ~ 7 %, KZ, 2001 ~ 10 %). Anders verhält es sich bei den Auspendlerströmen: Die größten Schrumpfungsraten treten zwischen 1971 und 1981 auf, danach verkleinert sich die Abnahme, bleibt jedoch bis 2001 präsent.
- Hinsichtlich der Entwicklung der Pendeldistanzen kann eine zeitliche Konstanz attestiert werden – es konnten nur kleinere Abweichungen der einzelnen Summenkurven ausgemacht werden. Über die Hälfte des Radverkehrs wird demnach innerhalb einer Distanz von 10 km abgewickelt, 80 % aller Radpendler fahren eine kürzere Strecke als 14 km.
- Insgesamt zeigt sich eine eindeutig positive Entwicklungstendenz, auf der heutige verkehrspolitische Maßnahmen aufbauen, wobei der Radverkehr zusehends innerhalb der einzelnen Gemeinden als intrazonaler Verkehr steigt.

7. Modellierung des Körperenergieverbrauchs

Das Schätzen des Körperenergieverbrauchs beim Radfahren ist eine der zentralen Aufgaben für die Beantwortung der zweiten und dritten Forschungsfrage, da die ihn bestimmenden Variablen die Hauptprädiktoren in der regressionsanalytischen Kalibration des Gravitationsmodells darstellen. Um diese Variablen operationalisieren zu können betrachtet dieses Kapitel zuerst die physikalischen Kräfte, welche auf einen Radfahrer wirken und formalisiert diese mathematisch. Im Anschluss werden der in dieser Arbeit vorgeschlagene neue methodische Ansatz zur Widerstandsmodellierung und die räumliche Ableitung der für die Modellierung benötigten Quell- und Zielpunkte im Lichte von geographischen Informationssystemen beschrieben. Das Kapitel endet mit einer schematischen Erklärung zur Vorgehensweise bei der automatisierten Modellierung der Raumwiderstände für alle Gemeinden Österreichs.

7.1 Physikalische Grundlagen des Radfahrens

Um die physische Anstrengung, welcher ein Radfahrer bei der Fortbewegung durch den Raum ausgesetzt ist, in ein für statistische Modelle geeignetes quantitatives Maß überführen zu können, muss auf Wissen aus der Physik, Mechanik und medizinischen Wissenschaften zurückgegriffen werden. Die Basis bilden Formeln, welche die an Probanden gemessene Arbeit W mit den wirkenden physikalischen Kräften F entgegen der Fortbewegung in Relation setzen (vgl. Martin et al., 1998, S. 276 ff).

Die Nutzung eines Fahrrades wird durch das Umsetzen von Nahrung – gemessen als Brennwert in Kalorien – in Bewegungsenergie möglich. Mit der daraus gewonnenen Energie W kann die lenkende Person das Fahrrad und sich selbst gegen Widerstände F bewegen (Wilson et al., 2004, S. 37). Wilson et al. (2004, S. 123) fassen den energetischen Aufwand zur Fortbewegung auf dem Fahrrad an einem beliebigen Punkt einer Strecke durch die Summe des dort wirkenden Luftwiderstands (F_A) sowie des Steigungswiderstandes (F_S) zusammen:

$$F_{total} = F_A + F_S$$

Daneben sind noch andere Widerstandswerte wie Rollwiderstand (F_R) und Prellwiderstand (F_P – beispielsweise beim Einfahren in Mulden) wirksam. Sie sind jedoch nur schwer operationalisierbar und beim Rollwiderstand auch stark vom jeweiligen Reifentyp des Fahrrades abhängig (Wilson et al., 2004, S. 130 ff) und liegen daher weit außerhalb des möglichen Betrachtungsrahmens dieser Arbeit. Sie werden daher im weiteren Verlauf des Kapitels nicht formal definiert. Sollte näherer Erklärungsbedarf gegeben sein, so führt der

Anhang eine genauere Darstellung der physikalischen Grundlagen und mathematischen Zusammenhänge bezüglich Arbeit, Kraft, Leistung und Nahrungsbrennwert an (s. Anhang 11.4).

7.1.1 Luftwiderstand

Die beim Luftwiderstand (F_A) einwirkenden Größen sind von der Geschwindigkeit des Radfahrers abhängig. Sie beziehen sich einerseits auf das Volumen der Luft, welches vor einem Radfahrer in Bewegung gesetzt werden muss, andererseits auf die Friktionswirkung der durchfahrenen Luft an Kleidung, dem Fahrrad und der Person selbst (Wilson et al., 2004, S. 125). Verstärkt wird dieser Widerstand durch das Vorhandensein von Gegenwind und einer erhöhten Fahrgeschwindigkeit. Daher variiert der Luftwiderstand sehr stark in Abhängigkeit von der täglichen Wetterlage. Mathematisch wird der Zusammenhang folgendermaßen ausgedrückt:

$$F_A = K_A(V + V_w)^2$$

wobei K_A einen auf das Rad und dessen Fahrer bezogenen Luftwiderstandsfaktor (zwischen 0,1 bei einer kleinen und 0,3 bei einer großen Person), V die Geschwindigkeit des Radfahrers und V_w die Geschwindigkeit des Gegenwindes darstellt (Wilson et al., 2004, S. 136).

7.1.2 Steigungswiderstand

Der „Steigungswiderstand wird [auf einer hügeligen Strecke] zum Hauptfaktor der Widerstände, welche gegen den Radfahrer wirken [Anm.: eigene Übersetzung]“ (Wilson et al., 2004, S. 127 f). Er ist maßgeblich von der Topographie des durchfahrenen Gebietes abhängig und bezieht sich auf den Steigungswinkel der einzelnen Streckenabschnitte. Die folgende Formel

$$F_S = mg \sin(\alpha)$$

gibt den Hubwiderstand F_S durch das Produkt der Masse des Radfahrers (Masse des Fahrrades und Fahrer) m mit der Gravitationskonstante g und dem Sinus des Steigungswinkels α an. Die Sinusfunktion kann auch aufgrund ihrer nur geringfügigen Auswirkungen bei kleineren Steigungen ($< 20^\circ$) vernachlässigt werden und der absolute Höhenunterschied entlang eines Streckenabschnittes betrachtet werden

$$\Delta h = \tan(\alpha) d$$

welcher sich nach trigonometrischen Regeln aus dem Produkt des Tangens des Steigungswinkels mit der Distanz d des zurückgelegten Abschnittes berechnen lässt. Knoflacher (1995, S. 185) wendet in diesem Zusammenhang eine ähnliche Formel an.

7.1.3 Widerstandsdefinition dieser Arbeit

Aus Ermangelung an Daten zum Wetter, welche für diese Arbeit nicht verfügbar waren, und der Tatsache, dass der Luftwiderstand ohnehin stark von der Fahrgeschwindigkeit von Einzelpersonen abhängig ist, kann dieser nur als konstante Größe in die Berechnung einfließen und wird daher vernachlässigt. Dies führt zu einer geringfügig vereinfachten Betrachtung des Körperenergieverbrauchs: Da Topographie im Verlauf einer Strecke fortlaufend variiert, muss diese in Teilabschnitte zerlegt werden, auf welchen der Energieaufwand W_t wirkt. Dieser ist für die Überwindung des Widerstandes auf einem Teilabschnitt t der Gesamtstrecke vom Quellort i zum Zielort j nötig und ergibt sich durch das Produkt des Steigungswiderstandes F_S mit der Länge d des jeweiligen Streckenabschnittes (Jaros et al., 2011, S. 60 ff):

$$W_t = [mg \sin(\alpha)]d$$

Dem Konzept der Gravitationsmodelle aus Kapitel 4.2.1 folgend sind die unterschiedlichen Widerstände W_t entlang einer Strecke in Summe als eine Komponente des Raumwiderstands W_{ij} zu verstehen. Der auf den Teilabschnitten zwischen den Gemeinden i und j bzw. in der Gemeinde i variierende Energieaufwand W_t muss daher aufsummiert werden, um den gesamten Körperenergieverbrauch ermitteln zu können:

$$W_{ij} = \sum_{t=0}^n W_t$$

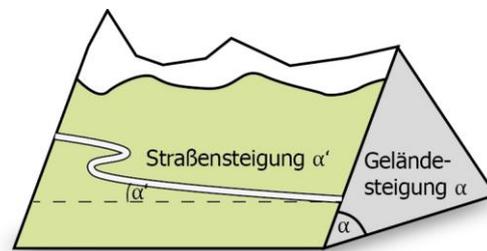
Die Durchführung dieser Berechnungen für sämtliche O-D-Paare des Interaktionsdatensatzes wird anhand der nächsten Kapitel beschrieben.

7.2 Herausforderungen der Widerstandsmodellierung in Österreich

Unpassende Operationalisierung von Steigung

Wie bereits im Überblick zu Mode-Choice Models hingewiesen wurde, öffnet sich durch das Fehlen einer detaillierteren Modellierung topographischer Widerstände eine internationale Forschungslücke: Die meisten Indikatoren beschränken sich derzeit auf die Wiedergabe von lokaler Topographie, welche nicht auf Strecken bezogen ist (s. Kapitel 3.3.2). So messen Parkin et al. (2008) Steigungen beispielsweise als Anteil der mehr als 3 % geneigten 1 km-Rasterzellen in den Untersuchungsbezirken (s. Anhang 11.1). Diese Herangehensweise ist in alpinen Ländern wie Österreich nicht anwendbar: Gemeinden, deren Siedlungen in Tallagen, umgeben mit hohen Gebirgszügen liegen, würden in ihrer Topographie deutlich überschätzt werden, da der Pendelverkehr in aller Regel in der Talsohle und auf dem lokal vorhandenen Straßennetz stattfindet.

Abbildung 22: Unterschied zwischen Gelände- und Straßensteigung entlang einer Bergkette



Quelle: eigene Darstellung, 2016.

Zusätzlich misst der Ansatz von Parkin et al – wie auch jener von Vandenbulcke et al. (2008, S. 10) – Steigung oft nur über die Hangneigung α eines Geländes, welche besonders in alpinen Räumen stark von der Neigung α' der darauf gebauten Straße abweichen kann (s. Abbildung 22). Gleiches gilt für die Berechnung von topographischen Variablen für interzonale Pendelströme: Obwohl beispielsweise eine erste Annäherung der Entfernung auf Luftlinienebene möglich ist (s. Kapitel 6.2.3), so gilt dies nicht für den Höhenunterschied oder Steigungen. Eine Erhebung dieser Kennzahlen über Luftlinien in alpinen Räumen liefert keine aussagekräftigen Werte, welche zugleich stark verzerrt sind, da Luftlinien Talformen nicht berücksichtigen und quer durch Gebirgsmassive schneiden. Sie sind damit vollkommen ungeeignet für die Ermittlung interzonaler Topographiewiderstände. Diesen Problemen wird durch die Vorstellung und Verwendung einer rasterbasierten Methode entgegnet, welche den Steigungswinkel α' entlang der Teilabschnitte einer Straße ermittelt.

Vereinfachte Betrachtung der Quell-Ziel Beziehungen

Da für diese Arbeit die Datengrundlage eines aggregierten Mode-Choice Models vorliegt, können die genauen Widerstände auf den einzelnen Wegen der Radpendler nicht gemessen werden. Statt der Adresspunkte des Wohn- und Arbeitsorts sind lediglich die Gemeinden als Quell- und Zielorte gespeichert. Kordi et al. (2012, S. 147) weist in diesem Zusammenhang

auf die Schwierigkeit hin, dass für die Pendelströme nur durchschnittliche Widerstandsmaße zwischen den Centroiden von Gemeinden ermittelt werden können. Aufgrund der Direktheit von Pendelwegen (s. Kapitel 5.1) wird immer davon ausgegangen, dass der Erwerbstätige den Weg des geringsten Widerstandes wählt. Noch problematischer erweist sich das Fehlen von Quell-Ziel-Referenzen innerhalb der Gemeinde: Die Tatsache, dass die Pendeldistanz für Binnenpendler in einem solchen Fall gleich Null gesetzt werden muss, lösen manche Studien, indem sie diese intrazonalen Verkehrsströme gänzlich von der Analyse ausschließen (Plaza et al., 2015, S. 3). Dies wäre für die vorliegende Betrachtung ein inakzeptabler Schritt, wenn man die in Kapitel 6.2.1 gezeigte Verteilung der Radpendler auf Aus- und Binnenpendlerströme bedenkt. Es ist daher Ziel, ein methodisches Gerüst zu entwickeln, welches die oben genannte rasterbasierte Modellierungsmethode für die Ermittlung von sowohl inter- als auch intrazonalen Widerständen ermöglicht.

7.3 Ein neuer Ansatz: Rasterbasierte Cost-Path Analysis

Eine in der Widerstandsmodellierung bisher wenig betrachtete Datenstruktur geographischer Informationssysteme ist die Rasteroberfläche. Bisher lag der Schwerpunkt in der Verkehrsplanung auf der Anwendung von vektorbasierten Ansätzen (vgl. Stigell et al., 2011, S. 563 ff; vgl. Fischer, 2003, S. 3 ff). Diese eignen sich vor allem zur Messung der euklidischen oder gerouteten Distanz über Straßengraphen im Knoten-Kanten System (vgl. de Lange, 2013, S. 372 ff). An ihre Grenzen stößt die Verwendung dieser diskret abgrenzbaren Objektstrukturen jedoch, wenn kontinuierliche räumliche Phänomene in die Widerstandsberechnung einfließen sollen. Zu diesen zählen unter anderem die Topographie oder das Klima eines Gebietes (vgl. de Lange, 2013, S. 366), deren räumliche Ausprägung als Zahlenwert in einer Rasterzelle gespeichert werden kann: Eine zunehmende Zellauflösung steigert den Detailgrad der Abbildung des jeweiligen räumlichen Phänomens, da es an jeder Stelle im Raum eine andere Wertausprägung aufweist. Dementsprechend ist es nicht direkt möglich, diese räumlichen Eigenschaften auf diskrete Objekte wie Kanten eines Straßengraphen zu übertragen.

Um topographische Eigenschaften trotzdem in hohem Detailgrad in die Modellierung einfließen lassen zu können, verwendet diese Arbeit Rasterdaten als begehbare Oberflächen, einem Schachbrett gleichend. Diese Methode wird als *Kostenpfadanalyse* (Engl.: *Cost-Path Analysis*) bezeichnet. Mit ihr kann der kleinste zu überwindende Raumwiderstand zwischen einer Quelle und allen Zellen der mit Kostenwerten gewichteten Rasteroberfläche sowie der zugehörige Weg des geringsten Raumwiderstandes ermittelt werden (Collischonn et al. 2000, S. 398).

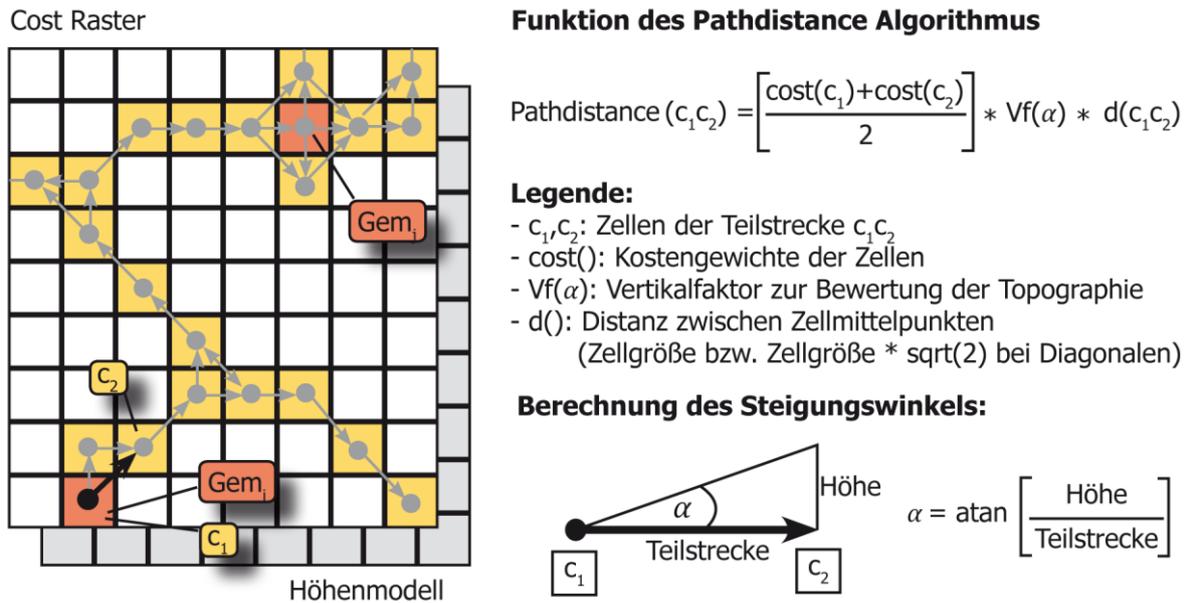
Die bisherige Anwendung dieser Methode liegt hauptsächlich im Bereich der Archäologie und der geographischen Modellierung. Die Cost-Path Analysis hat hier den Vorteil, dass sie nicht explizit an Wegenetze gebunden ist, deren Lage prähistorischen Studien oft nicht bekannt ist, sondern direkt auf die räumlichen Gegebenheiten zugreifen kann. Aber auch im Ingenieurwesen beim Bau von Straßen- oder Ver- und Entsorgungsinfrastruktur kommt die Methode zur Anwendung, wie Collischonn et al. (2000, S. 397 ff) in ihrer Arbeit zur Trassierung von Straßen und Kanälen zeigen. Da Wood et al. (2006, S. 1) die Methode bereits für die Ermittlung des Körperenergieverbrauchs bei Fußgängern im Kontext einer Forschungsarbeit zu prähistorischen Wanderungsrouten nutzen, wendet diese Arbeit sie nun für den Radverkehr an.

Funktionsweise der Cost-Path Analysis

In der einfachsten Anwendungsform bezieht sich die Cost-Path Analysis auf eine mit Kostenwerten gewichtete Rasteroberfläche, den Cost-Raster. Die den Zellen zugewiesenen Werte stehen für ein Maß der Friktion, welche beim Durchschreiten einer Zelle wirksam wird. Es können unterschiedliche Werte mit realem oder fiktivem Charakter (Bsp.: Kosten € pro Meter oder städtische Ästhetik der Zelle als Wert zwischen 0 und 100) gewählt werden. Ist einer Zelle kein Wert zugewiesen, gilt sie als nicht betretbar und wird von der Modellierung ausgeschlossen (ESRI, 2016b). Die Bestimmung des Widerstandes für die Bewegung zwischen den Rasterzellen ist nach der Logik eines Netzwerks aus Knoten und Kanten zwischen allen acht kostengewichteten Zellnachbarn möglich (s. Abbildung 23, links).

Der hier verwendete Algorithmus, ist die Pathdistance Funktion des Desktop-Geoinformationssystems ArcGIS 10.2.2, welche das Konzept der Cost-Path Analysis um vertikale und horizontale Einflussfaktoren erweitert. Dadurch wird die Integration weiterer Rasterdaten zu topographischen Gegebenheiten und horizontal wirkenden Kräften wie Wind in die Bewegungsmodellierung möglich (ESRI, 2016b). Abbildung 23 zeigt auf der rechten Seite die vereinfachte mathematische Formel für die Kostenberechnung zwischen zwei Rasterzellen. Die Horizontalfaktoren wurden zur Vereinfachung nicht miteinbezogen, da klimatische Einflüsse aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit nicht betrachtet werden.

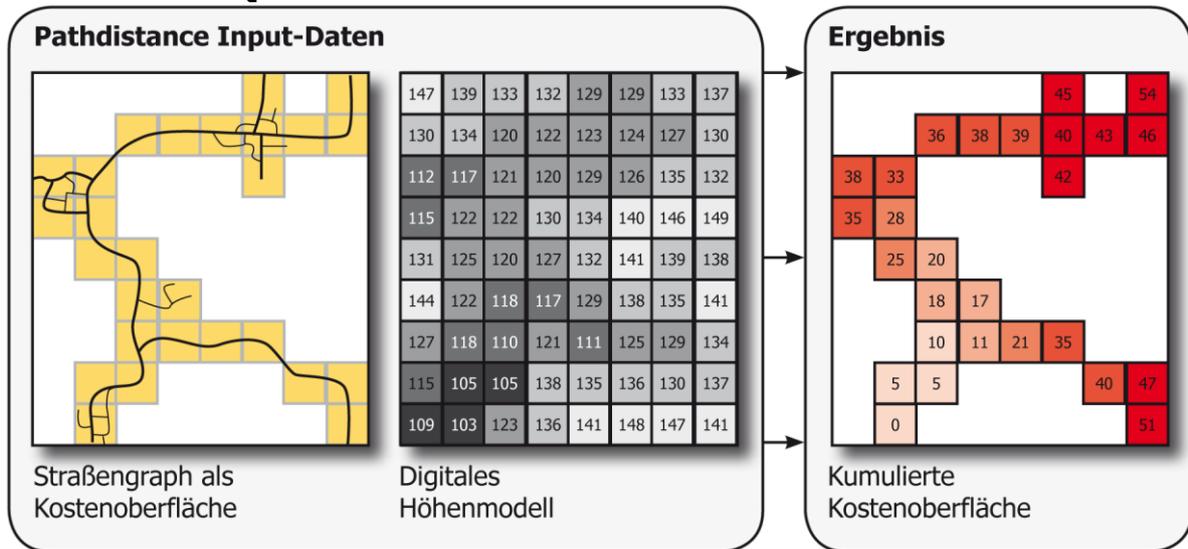
Abbildung 23: Schematische Funktionsweise der Cost-Path Analyse nach dem ArcGIS Algorithmus Pathdistance().



Quelle: ESRI, 2016a; eigene Darstellung, 2016.

Die Kosten zwischen zwei Rasterzellen (=Teilabschnitt der Gesamtstrecke) errechnen sich dabei aus dem Produkt der Kostenwerte, welche jeweils zwischen den Mittelpunkten der Zellen zur Hälfte wirksam werden, dem Vertikalfaktor und der Distanz zwischen den beiden betrachteten Zellen (abhängig von Zellgröße sowie direkter oder diagonaler Nachbarschaftsbeziehung). Eine wesentliche Rolle bei der Modellierung kommt dem Vertikalfaktor zu, da dieser topographische Gegebenheiten anhand eines Höhenmodells und dem trigonometrisch ableitbaren Steigungs- bzw. Gefällewinkel zwischen Rasterzellen mittels beliebig wählbaren mathematischen Funktionen bewertbar macht (ESRI, 2016a). Dies eröffnet die Möglichkeit zur Anwendung der in Kapitel 7.1.3 definierten physikalischen Formeln bei der Berechnung des Körperenergieverbrauchs. Das Ergebnis der Pathdistance-Funktion ist die Berechnung der kumulativen Gesamtkosten, welche auf den Teilabschnitten des Weges des geringsten Widerstandes von jeder beliebigen befüllten Zelle des Kostenrasters zu einer Quellzelle anfallen (s. Abbildung 24).

Abbildung 24: Beispiel für die Berechnung topographischer Kosten (absoluter bidirektionaler Höhenunterschied) zwischen einer Quellzelle und sämtlichen anderen Zellen des Rasters.



Quelle: ESRI, 2016a; eigene Darstellung, 2016.

Vor- und Nachteile

Die Cost-Path Analysis hat gegenüber bisherigen Vorgehensweisen internationaler Studien den Vorteil, dass nicht die Neigung einer Rasterzelle an sich, sondern eine wegbezogene topographische Bewertung zwischen Zellen vorgenommen wird. Damit treten die geschilderten Probleme der Luftlinienanalyse hinsichtlich topographischer Widerstände in den Hintergrund. Weiters unterliegt die Methode keinen Beschränkungen hinsichtlich der maßstäblichen Betrachtung: Bei feinerer Rasterauflösung wäre auch eine kleinräumige Analyse von beispielsweise Siedlungsteilen möglich. Weiters kann im Vergleich zur vektorbasierten Netzwerkanalyse – bei Vorliegen der Daten – auch Wind direkt mitbewertet werden. Ein Nachteil ist, dass keine automatisierte Berechnung für mehrere O-D-Beziehungen im Sinne einer Kürzesten-Wege-Matrix gleichzeitig möglich ist, weshalb bei einem großen Interaktionsdatensatz Kenntnisse zur iterativen Anwendung des Algorithmus notwendig werden.

7.4 Neue Konzepte intrazonaler Widerstandsmodellierung

Da nun das methodische Handwerkszeug zur Widerstandsmodellierung bereitliegt, wendet sich dieses Kapitel neuen Zugängen zur Ableitung von Verkehrsquellen und -zielen, welche als Informationsgrundlage für die Modellierung intrazonaler Widerstände gebraucht werden. Obwohl Pendelströme zwischen Verkehrszonen mithilfe der Centroiden dieser Gebiete berechnet werden können, ist dies für Binnenpendler aufgrund der oft dispersen Verteilung der Quellen und Ziele auf dem Gemeindegebiet nicht der Fall.

7.4.1 Circular-Shape Distance Estimates

Bisherige Gedankenmodelle zur Ableitung intrazonaler Widerstandsmaße aus der Literatur beziehen sich auf sogenannte *Circular-Shape Distance Estimates* (Kordi et al., 2012, S. 148 f). Sie gehen von einer gleichmäßigen Verteilung der Bevölkerung innerhalb der Gemeindegrenzen und kreisförmigen Verkehrszonen aus. Als Beispiel wird hier ein Distanzmaß von Batty (1976) angeführt

$$d_{ii} = \frac{r_i}{\sqrt{2}}$$

welches auf der Annahme basiert, dass die mittlere Reisedistanz d_{ii} in einer administrativen das Ergebnis aus der Division des Radius r_i der betrachteten Gemeinde durch die Quadratwurzel der Zahl zwei ist. Kordi et al. (2012, S. 149) merkt diesbezüglich als problematisch an, dass sich weder die Bevölkerung einer Gemeinde innerhalb der Zone gleichmäßig verteilt, noch, dass der Gemeindegrenzzug kreisrund ist. Weiters wird durch die Annahme einer mittleren Reisedistanz nur die Reiseweite innerhalb einer Gemeinde abgeschätzt und kein Einbezug der Topographie ermöglicht.

7.4.2 Density-Based Scattered Intra-Zonal Distance Estimates

Aufgrund der Unzulänglichkeiten der *Circular-Shape Distance Estimates*, wendet sich die Arbeit dem neuen Gedankenmodell der *Density-Based Scattered Distance Estimates* zu, welches von Kordi et al. (2012, S. 149) vorgeschlagen wurde. Die Idee hinter der Herangehensweise ist im ersten Schritt die räumliche Verteilung („*scattering*“) von Quell- und Zielpunkten innerhalb eines Gemeindepolygons aus einem Bevölkerungsdichteraster abzuleiten, da Kordi et al. davon ausgehen, dass intrazonale Interaktionen hauptsächlich zwischen bewohnten Gemeindeteilen stattfinden. Im zweiten Schritt können Widerstandsmaße zwischen sämtlichen identifizierten Punkten modelliert und anhand der Bevölkerungswerte der Rasterzellen gewichtet gemittelt werden. Das Ergebnis ist ein nach der lokal verteilten Bevölkerung gewichtetes und gemitteltetes Widerstandsmaß für eine Gemeinde, welches ein deutlich realistischeres Abbild intrazonaler Raumwiderstände zulässt (Kordi et al., 2012, S. 151). Die Wahl zwischen der Modellierungsmethode – ob euklidische oder geroutete Distanz auf einem Vektor-Graphen oder rasterbasierte Kostendistanzmodellierung – hängt somit nur mehr von der jeweiligen Fragestellung ab, da sie zwischen den abgeleiteten intrazonalen Quellen und Zielen des Verkehrs wie auch im Rahmen der interzonalen Widerstandsmodellierung zwischen Centroiden der Gemeinden angewandt werden können.

7.5 Modellmechanik und Funktionsweise

Der letzte Teil dieses Kapitels stellt den Entwurf und die Funktionsweise des räumlichen Modells vor, welches mithilfe von GIS-Software und der Skriptsprache Python automatisiert Variablen zur Messung körperlichen Anstrengung für inter- und intrazonale Pendelströme berechnet. Beschrieben wird die Datengrundlage, deren Verfeinerung für die intrazonale Betrachtung sowie die Anpassung des oben vorgestellten Pathdistance Algorithmus zur Modellierung des Körperenergieverbrauchs nach Wilson et al. (s. Kapitel 7.1.3).

7.5.1 Räumliche Datengrundlagen

Um den Körperenergieverbrauch zwischen und in den Gemeinden berechnen zu können, werden folgende Datenschichten benötigt:

Datengrundlagen inter- und intrazonaler Modellierung

- **Administrative Grenzen:**

Die österreichischen Gemeindegrenzen bilden die geographische Referenz der O-D-Matrize und stellen die Verkehrszonen dar, welche Aus- und Binnenpendler abgrenzen. Ihre Centroiden stellen die Quellen und Ziele des Auspendlermodells dar. Zugleich beinhalten sie Daten zur Bevölkerung der Gemeinde im Jahr 2001.

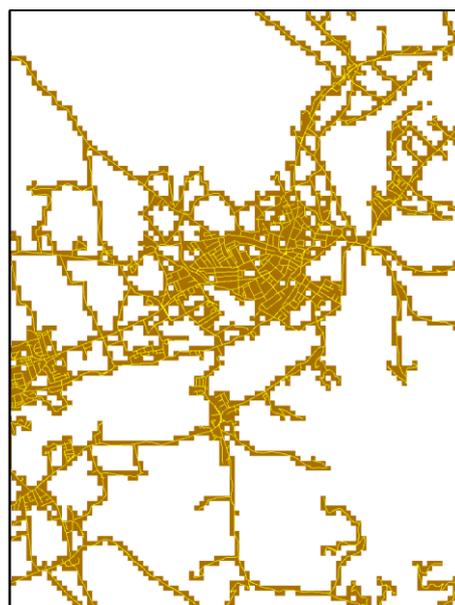
- **Bevölkerungsrasterdaten (1 km):**

Für eine vorteilhaftere Positionierung des interzonal genutzten Gemeindecenroiden für die Modellierung von Auspendlerbeziehungen, werden Bevölkerungsrasterdaten des Jahres 2011 des Eurostat mit einer Auflösung von 1 km verwendet. Aufgrund der zu niedrigen Auflösung eignen sich diese nur zur Positionierung von Quell-Zielpunkten der Binnenpendler.

- **Straßengraph:**

Als Kostenoberfläche verwendet die Arbeit einen Straßengraphen der OpenStreetMap, welcher in einer Auflösung von 100 m gerastert wird (s. Abbildung 25). Er beinhaltet das gesamte österreichische Straßennetz von Autobahnen bis Privatstraßen für das Jahr 2015 und bildet den Bewegungsraum der Kostenpfadanalyse. Damit er für die Zwecke des Radverkehrs verwendet werden

Abbildung 25: Gerasterter Straßengraph



Quelle: OpenStreetMap, 2015;
eigene Darstellung, 2016.

kann, wurde das hochrangige Straßennetz (Autobahnen und Schnellstraßen) von der Umwandlung in einen Kostenraster ausgeschlossen.

- **Digitales Höhenmodell (100 m):**

Die topographischen Informationen liefert ein digitales Höhenmodell, welches die Seehöhe jeder Rasterzelle abspeichert. Es kann über den Open-Data-Auftritt des Landes Kärnten in einer 10-m-Auflösung bezogen werden, die Zellgröße wurde nachträglich auf jene des Straßenrasters angeglichen, um eine korrekte Berechnung der Vertikalfaktoren zu ermöglichen.

Datengrundlagen intrazonaler Modellierung

- **Regionalstatistischer Raster (250 m):**

Der regionalstatistische Raster beinhaltet keinerlei Werte und wird in einer Auflösung von 250 m x 250 m von der Statistik Austria zur Verfügung gestellt. Er wird für die Ermittlung der intrazonalen Quellen und Ziele benötigt.

- **Adress- und Gebäudedaten:**

Die Adresspunkte von Wohngebäuden des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen (BEV) bilden die Position von Einzelgebäuden als Punktrepräsentation ab. Sie dienen in Kombination mit dem regionalstatistischen Raster zur Identifikation von Siedlungsteilen innerhalb von Gemeinden und sind daher ebenfalls Grundlage des intrazonalen Dichterasters.

7.5.2 Ableitung inter- und intrazonaler Quell- und Zielpunkte

Interzonale Quell- und Zielpunkte

Um die Positionierung der interzonalen Quell- und Zielpunkte im Vergleich zum einfachen Centroiden qualitativ zu verbessern, wurde die am stärksten bevölkerte 1-km-Rasterzelle des Eurostat Bevölkerungsrasters einer Gemeinde herangezogen. Sämtliche Widerstände der Auspendler O-D-Paare leiten sich aus diesen Punktpositionen ab.

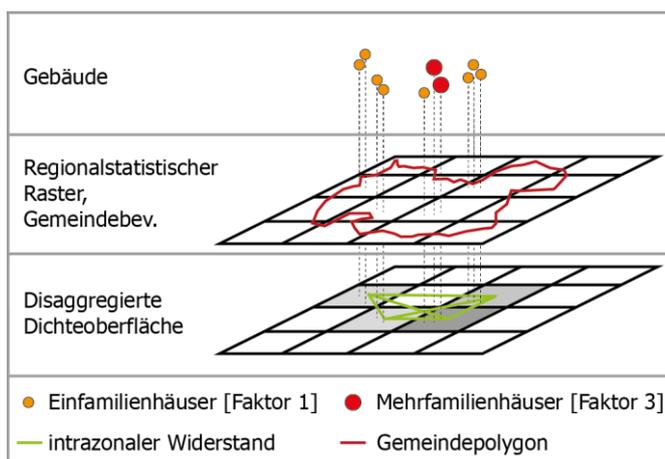
Intrazonale Quell- und Zielpunkte

Für die intrazonale Modellierung nach der Vorgehensweise der Density-Based Scattered Distance Estimates muss zuerst ein geeigneter Dichteraster erstellt werden, welcher für die Extraktion von Quell- und Zielpunkten genutzt werden kann. Da sich der Bevölkerungsraster mit 1 km Auflösung als zu grob für die Identifikation von Siedlungsteilen in kleinen Gemeindepolygonen herausstellte, musste ein höher aufgelöster Raster errechnet werden. Einen gangbaren Ansatz dafür liefert Loidl (2015), welcher die Disaggregation von in Polygonzügen gespeicherten Bevölkerungsinformationen anhand von Gebäudedaten der

OpenStreetMap vorschlägt, um ein genaueres Abbild der räumlichen Verteilung von Bevölkerung zu erlangen. Der Gedanke dahinter ist, die Gemeindebevölkerung in Rasterzellen nach Bebauungsgrad zuzuordnen.

Abbildung 26 zeigt schematisch das Vorgehen bei der Disaggregation: Es werden sämtliche Gebäude in jeder Rasterzelle sowie in der gesamten Gemeinde gezählt um den Anteil der Gebäude in der jeweiligen Rasterzelle

Abbildung 26: Disaggregation der Gemeindebevölkerung anhand von Adressdaten.

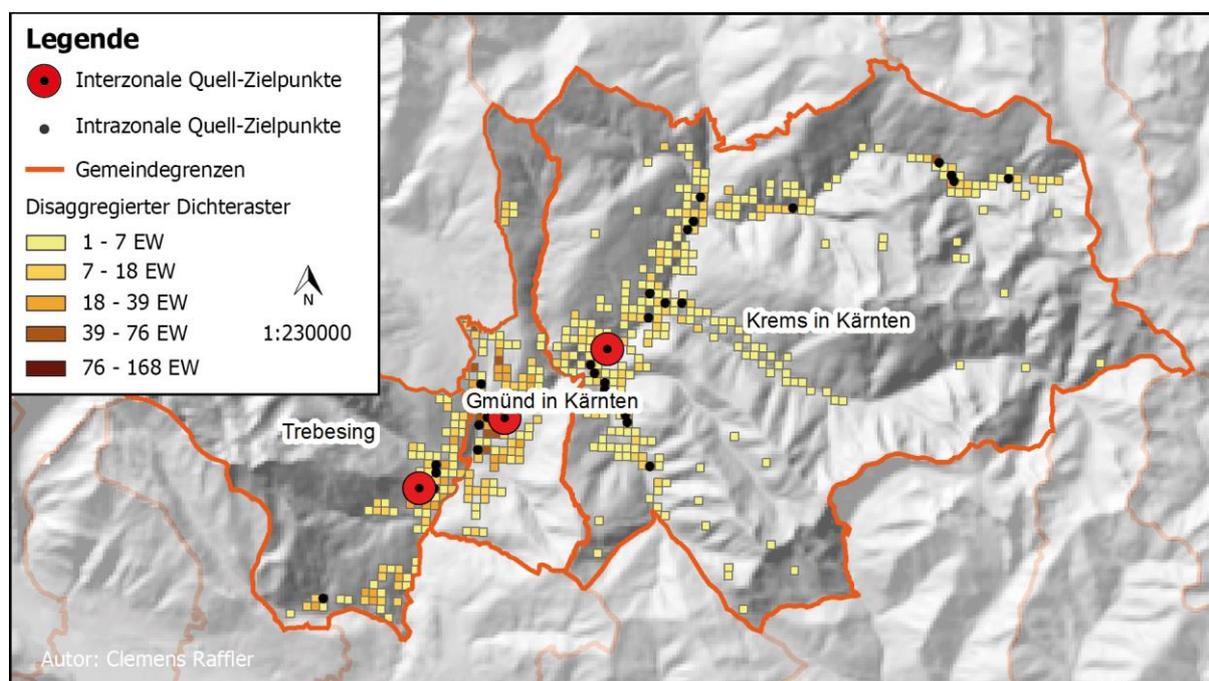


Quelle: Loidl, 2015; eigene Darstellung, 2016.

pro Gemeinde bestimmen zu können und anschließend durch eine Multiplikation die Gemeindebevölkerung anteilhaft auf die Rasterzellen aufzuteilen. Im Unterschied zu Loidl (2015) wurden nicht Gebäude der OpenStreetMap, sondern die Adressdaten von Wohngebäuden des BEV aus dem Jahr 2015 verwendet. Die Modellierung der Bevölkerungsverteilung pro Adresspunkt wurde ebenfalls verfeinert. Die Disaggregation gewichtet Einfamilienhäuser niedriger (Faktor 1) als Gebäude mit mehreren Wohnungen (Faktor 3), wodurch sich eine realistischere Dichteoberfläche ergibt: In mehrgeschossigen Gebäuden wohnen tendenziell mehr Menschen als in Einfamilienhäusern.

Kordi et al. (2012, S. 149) schlagen für die Ermittlung des intrazonalen Widerstandes vor, Raumwiderstand zwischen allen bestehenden Zellen des Dichterasters zu modellieren, was beim Einbezug aller bebauten 250-m-Rasterzellen im österreichischen Staatsgebiet zu einem immensen Rechenaufwand führen würde. Aus diesem Grund wurden die intrazonalen Quell-Zielpunkte auf jene größten Rasterzellen beschränkt, welche einen relativen kumulativen Bevölkerungsanteil von 35 % aufweisen, da davon auszugehen ist, dass sich diese Zellen mit hoher Dichte gut zur Repräsentation von Siedlungskernen eignen, zwischen welchen gependelt wird. Abbildung 27 verdeutlicht die Problematik der ungleich verteilten Bevölkerung in alpinen Gemeinden nochmals anhand dreier Kärntner Gemeinden. Gleichzeitig wird die räumliche Anordnung der inter- und intrazonalen Quell- und Zielpunkte sichtbar, welche sich stark in den Talsohlen sammeln.

Abbildung 27: Ableitung von Quell- und Zielpunkten aus einem Dichteraster anhand dreier Beispielgemeinden



Quelle: BEV, 2015; Statistik Austria, 2005, 2015; OGD-Kärnten, 2015; eigene Darstellung, 2016.

7.5.3 Anpassung des Pathdistance Algorithmus

Um die Methode der Cost-Path Analysis für die Modellierung des Körperenergieverbrauchs in und zwischen inter- und intrazonalen Quellen und Zielen nutzen zu können, musste die Nutzung des Pathdistance Algorithmus geringfügig verändert werden. Da die Widerstandsformel

$$W_t = [mg \sin(\alpha)]d$$

einer Teilstrecke W_t den Widerstand zwischen zwei Zellen bewertet und im Wesentlichen den letzten beiden Elementen der Pathdistance-Formel entspricht (Vertikalfaktor multipliziert mit Distanz einer Teilstrecke) (s. Abbildung 23), kann der Algorithmus durch das Weglassen der Zellkosten die Widerstandsmodellierung nach Wilson et al. (2004) durchführen. Abbildung 28 zeigt die Vorgehensweise anhand eines Beispiels, welches zur besseren Veranschaulichung auf den Zellen c_1 und c_2 der Abbildung 23 und Abbildung 24 basiert: Durch das Setzen sämtlicher Kostenwerte in dem Raster-Straßengraphen auf den Wert 1 beeinflussen diese den topographisch abgeleiteten Ergebniswert für eine Teilstrecke nicht mehr. Die Vertikalfaktoren können durch unterschiedliche mathematische Formeln gebildet werden und somit zur Berechnung des Steigungswiderstands, des absoluten Höhenunterschieds oder beim Setzen auf den Wert 1 zur Ermittlung der Routingdistanz genutzt werden. Zu beachten ist, dass der Unterschied zwischen den Vertikalfaktoren des Hubwiderstandes (Sinusfunktion)

und der absoluten Steigung (Tangensfunktion) zwischen zwei Zellen im Bereich zwischen 0 und 20° Steigung beinahe nicht auszumachen ist, weshalb sie – wie in Kapitel 7.1.2 angesprochen – ein äußerst ähnliches Maß für die steigungsbezogene Anstrengung bilden. Die Raumwiderstände werden gemäß der getroffenen Spezifikationen auf den Kanten zwischen den 100-m-Straßenrasterzellen anhand des Steigungswinkels berechnet, mit der Länge der Kante multipliziert und anschließend über den Weg des geringsten Widerstandes zwischen Quell- und Zielpunkten aufsummiert. Der endgültige Widerstandswert einer O-D-Verbindung kann an dem Zielpunkt aus dem kumulativen Raster ausgelesen werden.

Insgesamt werden drei verschiedene Widerstandsmaße modelliert: Einerseits der Distanzwiderstand (***geroutete Distanz***), andererseits zwei topographische Widerstände: der minimal aufzuwendende ***Hubwiderstand*** sowie der minimale ***absolute Höhenunterschied***.

Abbildung 28: Beispiel zur Berechnung des Körperenergieverbrauchs nach Wilson et al. (2004)

Aufgabe:

Ermittlung der energetischen Kosten entlang einer Teilstrecke c_1c_2 für einen Radfahrer mit 85 kg Masse. Die Zellauflösung ist 100 m, der Höhenunterschied zwischen c_1 und c_2 beträgt 5 m

Schritt 1:

Vereinfachung des Algorithmus

Kostengewichte der Straßenzellen auf 1 setzen, damit sie nicht in das Ergebnis einfließen.

→ Setze $\text{cost}(c_1)$ und $\text{cost}(c_2) = 1$

$$\text{Pathdistance}(c_1c_2) = 1 * \text{Vf}(c_1c_2) * d(c_1c_2)$$

Schritt 2:

Berechnung unterschiedlicher Vertikalfaktoren zur Bewertung der Topographie

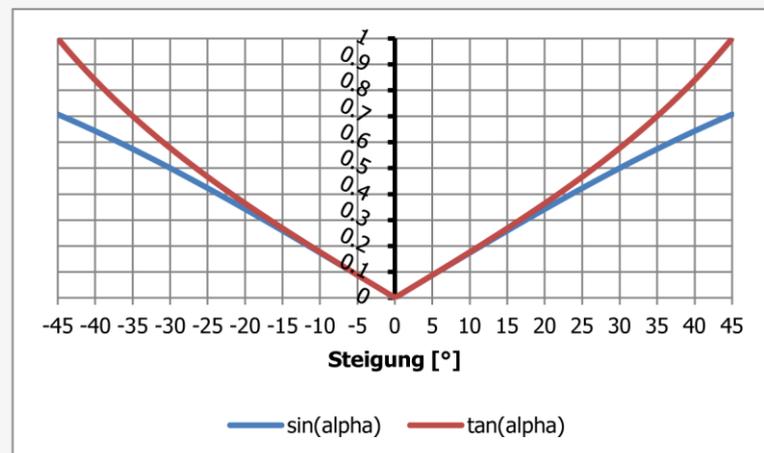
$$\text{Vf}_{\text{Hubwiderstand[N]}}(\alpha) = mg * \sin(\alpha)$$

$$\text{Vf}_{\text{Steigung[\%]}}(\alpha) = \tan(\alpha)$$

$$\text{Vf}_{\text{Routingdistanz}} = 1$$

Wenn eine Teilstrecke zwischen zwei Zellen ein Gefälle aufweist, so wird dieses als Steigung bewertet. Die Überlegung dahinter ist, dass ein Pendler jenes Gefälle am Weg zur Arbeit, beim Rückweg nach Hause als Steigung wahrnimmt (s. links).

Werte der Vertikalfaktoren in Bezug auf Steigung



Ergebnisse laut Beispiel:

$$\text{Vf}_{\text{Hubwiderstand}}(\alpha) = 29,45 \text{ N}$$

$$\text{Vf}_{\text{Steigung[\%]}}(\alpha) = 3,5 \%$$

$$\text{Vf}_{\text{Routingdistanz}} = 1$$

Schritt 3:

Iterative Berechnung für alle Zellen des kumulativen Kostenrasters

Ermittlung des minimalen energetischen Kostenaufwandes zwischen sämtlichen Nachbarzellen durch Multiplikation der jeweiligen Vertikalfaktoren mit den Längen der Streckenabschnitte zu den Nachbarzellen.

Dieser Schritt wird für jede Zelle mit $\text{cost}(1)$ ausgeführt, leere Zellen ohne Straßeninfrastruktur werden ausgeschlossen. Als Ergebnis kann für jede Zelle der minimale kumulative Energieaufwand von der Quellzelle bis zur jeweiligen Ziel-Zelle berechnet werden (s. Abbildung 24).

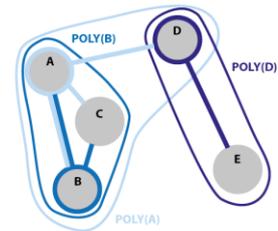
Quelle: eigene Darstellung, 2016.

7.5.4 Automatisierung der Widerstandsermittlung

Da Widerstände für sämtliche O-D-Beziehungen des Pendlerdatensatzes berechnet werden müssen und der Pathdistance Algorithmus kumulative Kostenoberflächen nicht für mehrere Startpunkte gleichzeitig errechnen kann, musste ein Python-Script erstellt werden, welches für jede Wohngemeinde mit Auspendlern und jede Gemeinde mit Radbinnenpendlern die inter- und intrazonalen Widerstände in einer verschachtelten Schleife berechnet. Für Auspendlerströme einer Wohngemeinde (interzonaler Quellpunkt) berechnet das Script einen kumulativen Kostenraster zu sämtlichen in der O-D-Matrix verzeichneten Arbeitsgemeinden, welche von der Wohngemeinde angefahren werden. Die diesen O-D-Paaren zuordenbaren Widerstände werden an den Zielpunkten aus dem Raster ausgelesen. Dies wird in einer FOR-Schleife für jede Wohngemeinde mit Radauspendlern wiederholt und in einer Datenbank abgespeichert. Um die Performanz des Scripts zu erhöhen, wurde der Untersuchungsbereich der Pathdistance Funktion auf den Raum zwischen der Wohngemeinde und den

Abbildung 29: Begrenzung des Untersuchungsbereichs nach Quellgemeinde

Wohngem. i	Arbeitsgem. j	Begrenzungspolygon	W_{ij}	Extraktionspunkte
A	B	POLY(A)	Pathdistance(A)	B
A	C			C
A	D			D
B	A	POLY(B)	Pathdistance(B)	A
B	C			C
D	E	POLY(D)	Pathdistance(D)	E



Quelle: eigene Darstellung, 2016.

zugeordneten Arbeitsgemeinden mithilfe eines begrenzenden Polygons zugeschnitten. Ohne diese Begrenzung würde der Algorithmus in jedem Schleifendurchlauf einen kumulativen Kostenraster auf dem gesamten österreichischen Staatsgebiet errechnen, was sich bei einer Rechenzeit von 12 Minuten pro Raster und 2381 Quellgemeinden als zu lang erweist. Abbildung 29 visualisiert die Abgrenzung für die Beispielmunicipalitäten A, B, C, D, E: Statt die Pathdistance Funktion für jedes der sechs O-D-Paare aufzurufen, muss sie nur dreimal anhand der interzonalen Quellpunkte der Wohngemeinden genutzt werden, da sämtliche Widerstände zwischen diesen Gemeinden und den Positionen der Zielgemeindecentren aus dem kumulativen Raster extrahiert werden können (Extraktionspunkte). Gleiches geschieht bei den Binnenpendlern: Nach räumlicher Begrenzung auf das Gemeindepolygon, werden für jeden intrazonalen Quellpunkt kumulative Kostenraster berechnet, die Widerstände an den intrazonalen Zielpunkten ausgelesen und zum Schluss für jede Gemeinde mit den jeweiligen Bevölkerungsgewichten der Start- und Zielzellen gewichtet gemittelt. Der Anhang enthält den Quellcode zum Modell (s. Anhang 11.2).

8. Regressionsmodell und Potentialableitung

Dieses Kapitel beschreibt den dritten Arbeitsschritt, welcher den Radverkehrsanteil der Erhebungsperiode 2001 auf O-D-Ebene mittels der regressionsanalytischen Kalibration von Gravitationsmodellen abschätzt. Zu Beginn wird zur besseren Nachvollziehbarkeit der Ausschluss von auftretenden Extremwerten der O-D-Paare in der Zusammenschau mit den ermittelten räumlichen Widerstandsmaßen erläutert. Danach wird in einer dem Regressionsmodell vorgelagerten Korrelationsanalyse geprüft, ob statistisch signifikante Zusammenhänge zwischen den Variablen bestehen, wobei sämtliche Analysen nach inter- und intrazonalen Pendelströmen getrennt durchgeführt werden. Der Grund dafür ist die unterschiedliche Modellierungsmethodik, mit welcher die Widerstandsmaße berechnet wurden. Nach der Beschreibung der Linearisierung der Gravitationsmodellformeln als Grundlage für die Anwendung als multiples lineares Regressionsmodell folgen die Modellergebnisse, die Prüfung der statistischen Hypothese und der Diskussion zur Abschätzung als Investitionspotential.

8.1 Umgang mit Extremwerten

Ein Problem, welches bei der Betrachtung der Modellvariablen auffällt, ist, dass trotz der bereits in Kapitel 5.4.3 festgelegten Minimalbegrenzung des Gesamtverkehrsaufkommens pro Strom auf 100 Personen eine erstaunlich hohe Anzahl an O-D-Paaren vorhanden ist, welche im Vergleich zu Relationen mit ähnlichen modellierten Topographie- und Distanzwiderständen stark im Radverkehrsanteil abweichen. Dies wurde im ersten Durchlauf der Korrelationsanalyse festgestellt, woraufhin die Einzelfälle nochmals auf extreme Ausprägungen einzelner Variablen untersucht wurden: Es zeigt sich, dass ausreißende O-D-Paare oft nur auf einige wenige Radpendler auflisten (Einzelfälle oder weniger als zehn Radfahrer). Sie werden von der statistischen Modellierung ausgeschlossen, da sie sich – im Vergleich zu anderen O-D-Paaren – wegen ihrer geringen absoluten Größe nicht zur Wiedergabe des Radverkehrsanteils eignen und keinen durchschnittlichen Radverkehr widerspiegeln. Andere O-D-Paare wurden aufgrund von extremen Ausprägungen der Widerstände des Streckenverlaufs von der Modellierung ausgeschlossen, da die auf diesen Strecken verkehrenden einzelnen Radfahrer kein durchschnittliches Fahrverhalten wiedergeben.

Das Vorhandensein solcher ausreißenden Fälle in einem Datensatz der Volkszählung lässt sich dennoch erklären: Da der Energieoutput beim Radfahren von Mensch zu Mensch aufgrund der körperlichen Eigenschaften sehr unterschiedlich ausfallen kann

(Wilson et al., 2004, S. 37), sind auch diese sehr trainierten Radpendler von der Vollerhebung erfasst. Es ist jedoch nicht Ziel des Modells, die Leistung sportlicher Radfahrer, sondern der durchschnittlich pendelnden Bevölkerung wiederzugeben, weshalb die O-D-Paare mit großem Residualwert geprüft und gegebenenfalls aus dem Modell entfernt wurden. Anhang 11.5 listet eine Häufigkeitstabelle über die Verteilung der absoluten Radpendlerzahlen auf die ausgeschlossenen Auspendler- und Binnenpendlerströme. Aus ihr wird ersichtlich, dass die meisten ausgeschlossenen O-D-Paare nur sehr wenige Radpendler beinhalten, einige wenige mit größeren Radpendlerzahlen wurden aufgrund der extremen Widerstandswerte ausgeschlossen.

8.2 Deskriptive Beschreibung der Modellvariablen

Um dem Leser ein Bild von der statistischen Verteilung und Ausprägung der Modellvariablen geben zu können, wurden diese anhand von Maximal- und Minimal- sowie Mittelwerten, Standardabweichung und Verteilungsschiefe analysiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Deskriptive Statistik der Modellvariablen

Interzonale Variablen	N	Min.	Max.	MW.	StAbw.	Schiefe		Kurtosis	
						Stat.	Std. Err.	Stat.	Std. Err.
Radverkehrsanteil	1328	0.00	0.39	0.03	0.04	3.28	0.07	14.86	0.13
Routingdistanz [m]		424.26	18258.07	6243.46	3484.18	0.69	0.07	-0.06	0.13
Hubwiderstand [J]		2159.00	221243.00	54406.00	42653.00	1.38	0.07	1.78	0.13
Höhenunterschied [m]		2.59	265.43	65.33	51.14	1.38	0.07	1.78	0.13
Intrazonale Variablen	N	Min.	Max.	MW.	StAbw.	Stat.	Std. Err.	Stat.	Std. Err.
Radverkehrsanteil	1421	0.01	0.41	0.08	0.06	1.43	0.07	2.31	0.13
Routingdistanz [m]		271.54	5853.82	1477.89	897.86	1.17	0.07	1.46	0.13
Hubwiderstand [J]		517.01	158016.95	29855.59	28630.36	1.58	0.07	2.42	0.13
Höhenunterschied [m]		0.77	203.34	40.06	37.55	1.53	0.07	2.21	0.13

Quelle: eigene Darstellung, 2016.

Die Grundgesamtheit, auf die sich die multivariate Analyse bezieht, liegt in einer Größenordnung von rund 1328 bis 1421 O-D-Paaren, wobei die Fallzahl für Auspendelrelationen um bis zu sechs Fälle variiert. Der Grund dafür sind fehlende Widerstandswerte, welche im Arbeitsschritt der räumlichen Modellierung aufgrund von außergewöhnlichen Grenzverläufen (Großes Deutsches Eck) nicht ermittelt werden konnten. Die Fälle werden in weiterer Folge listenweise ausgeschlossen, was aufgrund der ohnehin großen Fallzahl keine wesentlichen Auswirkungen auf die Analyseergebnisse hat.

Der Radverkehrsanteil variiert zwischen sehr kleinen Werten von rund 0.1 % und vereinzelt rund 40 % (Auspendler-Mittel ~ 3%, Binnenpendler-Mittel ~ 8%). Der Mittelwert der Routingdistanz zwischen Gemeinden ist – wie zu erwarten – größer (6,2 km) als die

gewichtete mittlere Distanz innerhalb von Gemeinden (1,4 km), gleiches gilt für den topographischen Höhenunterschied (interzonal ~ 65 m, intrazonal ~ 40 m). Der Hubwiderstand wird an dieser Stelle aufgrund seiner wenig intuitiven Einheit in Kilojoule nicht genauer diskutiert. Er ähnelt in seiner relativen Ausprägung sehr stark dem absoluten Höhenunterschied (s. Kapitel 7.5.3).

Was bei sämtlichen Variablen auffällt, ist, dass der Wert der Verteilungsschiefe bei allen Variablen – egal ob inter- oder intrazonal – auf eine rechtsschiefe Wertverteilung hinweist. Besonders hohe Werte treten beim Radverkehrsanteil und topographischen Variablen auf. Um diese Abweichung von einer Normalverteilung für alle Variablen nochmals zu Testen wurde der Kolmogorov-Smirnov Test in Verbindung mit Q-Q Plots durchgeführt. Die Teststatistik bestätigt aufgrund ihrer Signifikanz, dass sich sämtliche Variablen signifikant von einer Normalverteilung unterscheiden (Field, 2009, S. 144). Daraus entsteht die Implikation, dass parametrische statistische Verfahren, welche bei Untersuchungen von normalverteilten Daten ausgehen, nicht mit den Modellvariablen verwendet werden dürfen (Field, 2009, S. 163).

8.3 Korrelationsanalyse

Um die hypothetische Abhängigkeit des Radverkehrsanteils von den modellierten Widerstandsmaßen in einem ersten Schritt untersuchen zu können, wurde eine Korrelationsanalyse zwischen der abhängigen Radverkehrsanteilsvariable und den unabhängigen Widerstandsvariablen durchgeführt. Die Statistik wird für inter- und intrazonale Pendler getrennt berechnet und testet die Variablen des Radverkehrsanteils, geroutete Distanz, Hubwiderstand und absoluter Höhenunterschied auf O-D-Ebene hinsichtlich eines einfachen statistischen Zusammenhangs (vgl. Field, 2009, S. 167 ff).

Da keine der Variablen normalverteilt ist, musste auf eine Anwendung des *Pearson* Korrelationskoeffizienten verzichtet werden, stattdessen wurde der nicht-parametrische Koeffizient *Spearman-Rho* für die erste Abschätzung eines möglichen Zusammenhangs genutzt (Field, 2009, S. 177 ff). Tabelle 3 listet die Koeffizienten in Bezug auf den inter- und

Tabelle 3: Ausgewählte Spearman-Rho Korrelationen der Modellvariablen

	Routingdistanz	Hubwiderstand	Höhenunterschied
Interzonaler Radanteil	-,742**	-,605**	-,605**
Intrazonaler Radanteil	-,375**	-,737**	-,744**

N (interzonal) = 1322, N (intrazonal) = 1421

** Korrelation ist signifikant auf einem Niveau von 0.01 (1-Tailed)

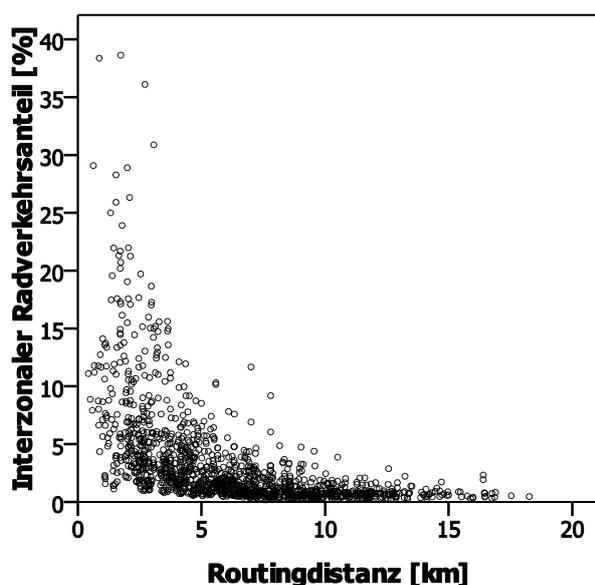
Quelle: eigene Darstellung, 2016.

intrazonalen Radanteil, die Korrelationen zwischen sämtlichen Variablen können im Anhang 11.6 eingesehen werden.

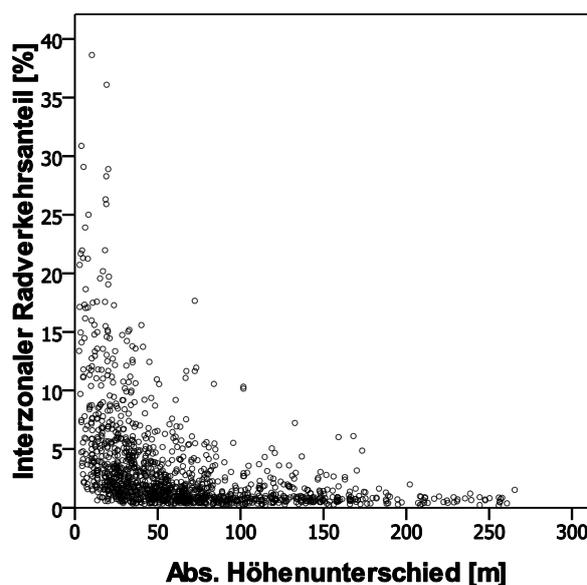
Korrelationen des Auspendelradverkehrs

Sämtliche Korrelationen scheinen als hoch signifikant auf und zeigen – wie erwartet – einen deutlich negativen Zusammenhang der Widerstandsvariablen mit dem Radverkehrsanteil. Für Auspendler kann aus den dimensionslosen Werten, welche zwischen -1 und +1 liegen (vgl. Field, 2009, S. 170), folgendes geschlossen werden: Je größer der räumliche Widerstand zwischen zwei Gemeinden beim Radfahren, desto geringer ist der Radanteil auf dem O-D-Paar. Für interzonale Pendelbeziehungen scheinen sowohl Distanz- als auch topographische Widerstände als starke Korrelation ($R < -0,5$) auf, wobei die Entfernung zwischen zwei Gemeinden geringfügig stärker korreliert ist, als die topographiebezogenen Variablen. Hubwiderstand und Höhenunterschied weisen den gleichen Wert im Koeffizienten auf, was auf die bereits beschriebene Ähnlichkeit der Kennwerte zurückzuführen ist. Dies zeigt auch die im Anhang enthaltene Korrelationsmatrix, welche alle Variablen auskreuzt: Hubwiderstand und absoluter Höhenunterschied weisen eine perfekten positiven Korrelation von 1 auf. In Abbildung 30 wurde der Zusammenhang zwischen den Variablen graphisch dargestellt, indem der interzonale Radverkehrsanteil gegen die Widerstandsmaße Routingdistanz und absoluter Höhenunterschied in einem Streupunktendiagramm aufgetragen wurden. Aus den Diagrammen wird sofort die von Distance-Decay-Functions angenommene überlineare Abnahme der Interaktionsdichte auf dem Fahrrad deutlich (s. Kapitel 4.2.1).

Abbildung 30: Radanteil der Auspendelströme in Abhängigkeit zur Routingdistanz und dem absoluten Höhenunterschied.



Quelle: eigene Darstellung, 2016.



Quelle: eigene Darstellung, 2016.

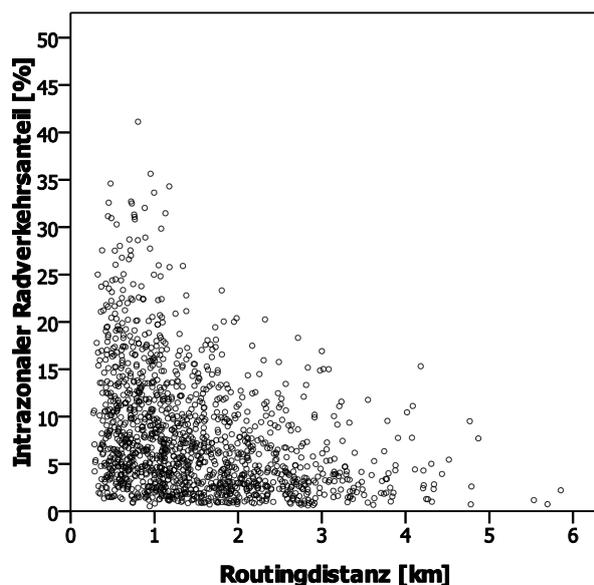
Innerhalb einer Distanz von fünf Kilometern variiert der Radverkehrsanteil pro O-D-Paar noch sehr stark zwischen Punkthäufungen bei rund 3 bis 5 % und höheren Radanteilen von bis zu 15 %. Ab einer Entfernung von über fünf Kilometern einfacher Pendeldistanz wird – bis auf wenige Ausnahmen – kein höherer Radanteil als 5 % erzielt, die Interaktionsdichte nimmt ab hier stetig ab. Ähnlich verhält es sich bei den topographischen Widerständen: Ab einem zu überwindenden Höhenunterschied von über 50 Metern werden die Interaktionsströme mit über 5 % Radanteil rar und beschränken sich auf einige wenige Ausreißer, welche dennoch ein größeres Rauschen im Vergleich zum Distanzwiderstand aufweisen.

Korrelationen des Binnenpendelradverkehrs

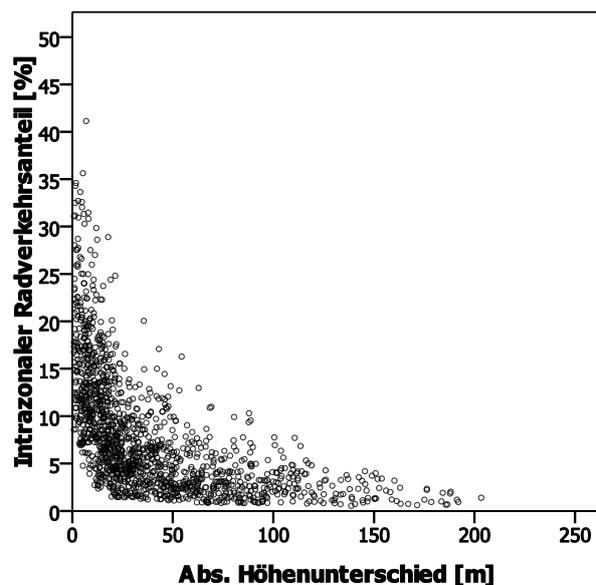
Auch bei intrazonalen Pendelbeziehungen wirken die Widerstandsvariablen negativ, wobei hier anders als bei Auspendlern die topographischen Variablen weitaus stärker korrelieren, als die mittlere gewichtete Distanz in einer Gemeinde. Diese erweist sich nur als mittel bis schwach korrelierend mit dem Radverkehrsanteil. Dies wird aus Abbildung 31 ersichtlich: Der Distanzwiderstand weist einen viel weniger klaren Zusammenhang auf als der intrazonale Höhenunterschied, welcher deutlicher dem Verlauf von Distance-Decay-Functions folgt.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass sich die in Kapitel 3.4 identifizierten Annahmen der Literatur zur quantitativ beschränkenden Wirkung von Topographie und Distanz auf den Radverkehrsanteil, in den Ergebnissen der Korrelationsanalyse bestätigen. Daher wird

Abbildung 31: Radanteil der Binnenpendlerströme in Abhängigkeit zur Routingdistanz und dem absoluten Höhenunterschied.



Quelle: eigene Darstellung, 2016.



Quelle: eigene Darstellung, 2016.

erwartet, dass sich die Variablen gut zu einer weiteren Verwendung in der Vorhersage des Radverkehrsanteils eignen.

8.4 Kalibration der Gravitationsmodelle

Um den Reiz, mit dem Fahrrad zur Arbeit zu pendeln – ausgedrückt als die Größe des Radanteils – durch ein statistisches Modell nach dem Vorbild von Gravitationsmodellen vorhersagen zu können, müssen Änderungen an den mathematischen Grundgerüsten und den Modellvariablen vorgenommen werden. Taylor (1975, S. 3ff) stellt eine hierfür geeignete Vorgehensweise vor, welcher dieser Abschnitt folgt.

8.4.1 Gravitationsmodelle als Regressionsgleichung

Zu Beginn müssen die Formeln der in Kapitel 4.2.1 vorgestellten Gravitationsmodelle erweitert werden, um als multiples Regressionsmodell mittels der Methode der OLS kalibriert werden zu können. Der Grund für die Anwendung multipler Regression ist, dass mehrere Variablen (die gravitativen Potentiale der Quell- und Zielorte, hier angenommen durch die Gemeindebevölkerung, sowie die Distanz- und Topographiewiderstände) gleichzeitig in der Modellformel enthalten sein müssen. Ein multiples lineares Regressionsmodell nimmt in der Regel folgende Form an:

$$Y = (b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n) + \varepsilon$$

Y gibt dabei die abhängige Variable (Radverkehrsanteil) wieder, X_n steht für die unabhängigen Variablen (Gravitationspotentiale, Körperenergieverbrauch), b_0 bzw. b_n sind die Modellkonstante und Modellkoeffizienten sowie ε als das Modellresiduum (Field, 2009, S. 210). Taylor (1975, S. 11) schlägt zur Angleichung der allgemeinen Gravitationsmodellformel an ein Regressionsmodell folgende Erweiterung vor:

$$I_{ij} = b_0 \frac{P_i^{b_1} P_j^{b_2}}{f(W_{ij}^{b_3})}$$

Im Vergleich zu den in Kapitel 4.2.1 gezeigten Formeln ersetzt Taylor die Modellkonstante k , den Exponenten des Distanzverfalls β und erweitert die gravitativen Potentiale um die zu kalibrierenden Exponenten b , welche den Modellkoeffizienten der multiplen Regressionsgleichung entsprechen. Als Distanzverfallsfunktionen können weiterhin Exponentialfunktion oder Potenzfunktion angewandt werden.

8.4.2 Linearisierung der Distance-Decay-Funktion

Da die Distance-Decay-Functions der Gravitationsmodelle als *nichtlineare Funktionen* realisiert sind und das verwendete Softwarepaket SPSS multiple Regressionen in der einfachen Bedienung nur als *lineares Regressionsmodell* zulässt, muss eine mathematische Linearisierung der oben angeführten Formel vorgenommen werden. Taylor wendet hierfür das Konzept der „Distance Transformation“ (Taylor, 1975, S. 23) von Variablen an, welche beide Seiten der Gleichung logarithmiert und je nach Typ der Distance-Decay-Funktion entweder Variablen oder Koeffizienten der Modellgleichung verändert. Gravitationsmodelle mit einer Exponentialfunktion werden nach Taylor (1975, S. 23f) über die Koeffizienten des Modells verändert und werden als *Single-Log Exponential Model* bezeichnet, da nur die abhängige und keine Widerstandsvariable logarithmiert wird:

$$\ln(Y_{ij}) = b_0 + b_1 \ln(P_i) + b_2 \ln(P_j) + \ln(b_3) \text{dist}_{ij} + \ln(b_4) \text{topo}_{ij}$$

Wenn das Modell eine Potenzfunktion als Distance-Decay-Funktion nutzt, dann werden alle Variablen vollständig logarithmiert. Sie sind auch als *Double-Log Pareto Models* bekannt:

$$\ln(Y_{ij}) = b_0 + b_1 \ln(P_i) + b_2 \ln(P_j) + b_3 \ln(\text{dist}_{ij}) + b_4 \ln(\text{topo}_{ij})$$

Die genaue mathematische Abhandlung zur Umformung kann Taylor (1975, S. 11ff) entnommen werden. Die Variablen beider Modellformeln sind aus den Beschreibungen des Vorkapitels bekannt, hinzu kommt der Körperenergieverbrauch aus den Widerstandsvariablen dist_{ij} für die Routingdistanz und topo_{ij} für einen der beiden topographischen Widerstände. Da für Binnenpendelbeziehungen keine gravitativen Potentiale vorliegen, muss die Modellformel der intrazonalen Radpendelströme auf eine Modellgleichung mit Widerstandsvariablen reduziert werden. Abbildung 32 zeigt die vier für

Abbildung 32: Verwendete Regressionsmodellgleichungen nach Pendelstromtypen

Interzonale Ströme	Single-Log Exponential Model - Exponentialfunktion $\ln(Y_{ij}) = b_0 + b_1 \ln(P_i) + b_2 \ln(P_j) + \ln(b_3) \text{dist}_{ij} + \ln(b_4) \text{topo}_{ij}$
	Double-Log Pareto Model - Potenzfunktion $\ln(Y_{ij}) = b_0 + b_1 \ln(P_i) + b_2 \ln(P_j) + b_3 \ln(\text{dist}_{ij}) + b_4 \ln(\text{topo}_{ij})$
Intrazonale Ströme	Single-Log Exponential Model - Exponentialfunktion $\ln(Y_{ij}) = b_0 + \ln(b_1) \text{dist}_{ij} + \ln(b_2) \text{topo}_{ij}$
	Double-Log Pareto Model - Potenzfunktion $\ln(Y_{ij}) = b_0 + b_1 \ln(\text{dist}_{ij}) + b_2 \ln(\text{topo}_{ij})$

Quelle: eigene Darstellung, 2016.

die Analysen verwendeten Modellformeln zum besseren Verständnis nochmals nach Aus- und Binnenpendlerströmen getrennt.

8.5 Modellergebnisse

Dieser Abschnitt fokussiert auf die Wiedergabe der Modellergebnisse, wobei in einem ersten Schritt jene Distance-Decay-Functions gemäß ihrer Eignung zur Abbildung des Radverkehrsanteils ausgewählt und die Annahmen einer Regressionsanalyse geprüft werden (Multikollinearität, Heteroskedasdität, Normalverteilung der Residuen, Annahme eines linearen Funktionsverlaufs). Die beiden ausgewählten Modelle werden im Anschluss im Hinblick auf ihre Modellparameter genauer beschrieben.

8.5.1 Modellauswahl und -güte

Tabelle 4 fasst die Güte der Modelle hinsichtlich des multiplen Korrelationskoeffizienten R , dem Bestimmtheitsmaß R^2 , Standardfehler des Modells sowie F-Statistik mit Signifikanzwerten zusammen und hebt die Modelle, welche größere Erklärungskraft haben, hervor.

Tabelle 4: Prädiktive Qualität der vier Modellfunktionen

	Distance-Decay Funktion	R	R^2	Std. Fehler	F-Statistik	Sig.
Interzonales Modell	Exponentialfunktion	0.77	0.60	0.66	485.46	0.00
	Potenzfunktion	0.80	0.63	0.63	569.10	0.00
Intrazonales Modell	Exponentialfunktion	0.68	0.46	0.63	610.40	0.00
	Potenzfunktion	0.73	0.53	0.58	811.75	0.00

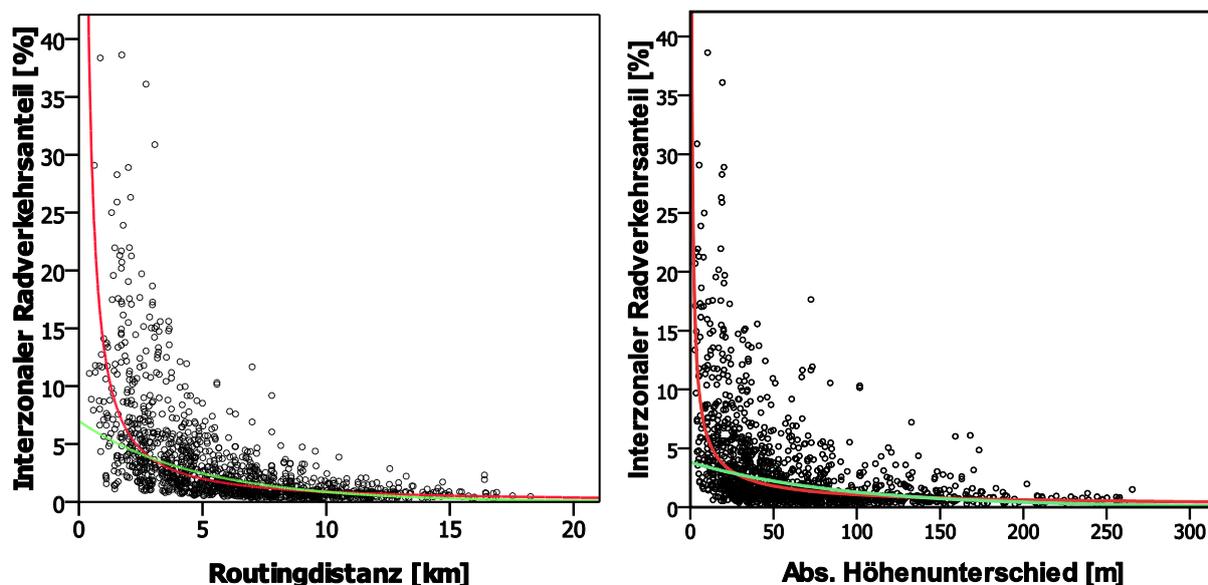
Quelle: eigene Darstellung, 2016.

Die F-Statistik zeigt dabei, dass die Modelle die abhängige Variable signifikant besser beschreiben, als ein einfacher Mittelwert (Field, 2009, S. 236). Im Vergleich der verwendeten Typen an Distanzbewertungsfunktionen weist die Potenzfunktion sowohl im inter- als auch intrazonalen Bereich bessere Werte im Bestimmtheitsmaß auf als die Exponentialfunktion, weshalb sie den Radverkehrsanteil mathematisch besser annähert (interzonal: $R^2_{\text{exp}} = 0.60$, $R^2_{\text{pot}} = 0.63$, intrazonal: $R^2_{\text{exp}} = 0.46$, $R^2_{\text{pot}} = 0.53$) und aus diesem Grund für sämtliche weitere Berechnungsschritte ausgewählt wird. Als positiv erweist sich weiters, dass alle statistischen Annahmen für die Gültigkeit der Funktionen gegeben sind: Es konnte keine extreme Multikollinearität zwischen den erklärenden Variablen, sowie keine Autokorrelation, Heteroskedasdität oder schiefe Residualwertverteilungen festgestellt werden (Field, 2009, S. 220 f).

Diskussion der Arbeitshypothese

Der Unterschied zwischen den Funktionstypen ist hinsichtlich der Hypothese, ob der Zusammenhang zwischen räumlicher Struktur und Verhalten durch Wahrnehmungsgesetze beschrieben werden kann, interessant. Die dem umgeformten Weber-Fechnerschen Gesetz entsprechende Exponentialfunktion modelliert den Radverkehrsanteil nicht zur Gänze. Es ist anzunehmen, dass der Grund für das schlechtere Abschneiden in der Definition des Weber-Fechnerschen Gesetzes selbst liegt: Es setzt nur für menschliche Sinne wahrnehmbare Reize mit Empfindungen in Relation und gilt daher „nur für den mittleren Bereich der physikalischen Realität [...], aber nicht für das gesamte Spektrum der messbaren Einflüsse“ (Knoflacher, 2007, S. 177). Diese Aussage wird durch den Kurvenfit in Abbildung 33 bestätigt: im Bereich kurzer Distanzen und kleiner Höhenunterschiede, welche vom Menschen nur schwer wahrgenommen werden können, stellt die Exponentialfunktion keinen Zusammenhang zu den Interaktionsdaten mehr her. Insgesamt nähert daher die Potenzfunktion in ihrer linearisierten Form die Verteilung des Radverkehrsanteils besser an, da sie „für den gesamten Bereich physikalischer Reize [gilt]“ (Knoflacher, 2007, S. 177). Zusätzlich ist Zahl der O-D-Paare, welche ein enorm hohen Radverkehrsanteil aufweisen, nur gering, sodass die Exponentialfunktion im Vergleich mit Potenzfunktion immer noch einen Großteil der Punktwolke erfolgreich erklärt (vgl. geringe Unterschiede im R^2 , s. Tabelle 4).

Abbildung 33: Funktionaler Zusammenhang zwischen interzonalem Radanteil und Routingdistanz sowie interzonalem Radanteil und absolutem Höhenunterschied



Quelle: eigene Darstellung, 2016.

Quelle: eigene Darstellung, 2016.

Eingepasste Modellfunktionen

— Exponentialfunktion — Potenzfunktion

Aus diesen Gründen wird die theoretische Annahme bestätigt, dass auch der Radverkehr anhand des Wirkens der räumlichen Struktur durch Empfindungsgesetze beschrieben werden kann.

Interpretation der Modellgüte

Die Fähigkeit der geschätzten Modelle zur Vorhersage des Radverkehrsanteils ist aufgrund des in einer mittleren Höhe ausgeprägten Bestimmtheitsmaßes mit Einschränkungen in der Schätzgenauigkeit gegeben. Für Auspendler konnte die Modellfunktion einen geringfügig besseren Fit erzielen ($R^2 = 0.633$), als für Binnenpendler ($R^2 = 0.534$). Die Varianz des interzonalen Radverkehrsanteils wird dementsprechend um rund 10% besser erklärt. Es ist anzunehmen, dass der Grund dafür in den Ungenauigkeiten der Modellierungsmethode für intrazonale Widerstände liegt sowie, dass das interzonale Modell um die Information der gravitativen Potentiale am Wohn- und Arbeitsort erweitert ist.

Im Vergleich zu anderen Forschungsarbeiten, welche das Konzept der Distance-Decay-Functions zur Vorhersage von Pendelstromgrößen nutzen, zeigt sich der Koeffizient des R^2 als ähnlich hoch (vgl. Halás et al., 2014, S. 107 ff). Gleichzeitig bedeutet die Höhe des R^2 , dass rund 37 % bzw. 47 % der Varianz des Aus- und Binnenpendlerradanteils durch andere Einflussfaktoren bestimmt sind, deren Wirkung die Modelle aufgrund der fehlenden Daten nicht erklärt werden können. Dass die Erklärungskraft der Modelle beschränkt ist, wirkt insbesondere dann plausibel, wenn man sich den Umkehrschluss aus dem Modellergebnis vor Augen hält: Würde der Körperenergieverbrauch die Wahl des Rades als Verkehrsmittel zu einem noch viel größeren Anteil oder gar zur Gänze erklären (Bsp.: $R^2 = 0.9$), müsste daraus geschlossen werden, dass die Verkehrsplanung keinerlei Einflussmöglichkeiten auf die Veränderung des Radverkehrsanteils haben würde, da die Quantität des Radverkehrs nur durch die Distanz zwischen Siedlungen und die Form der Landschaft bestimmt wäre.

Im Hinblick auf die zweite Forschungsfrage und der evolutionstheoretisch begründeten Annahme, der Körperenergieverbrauch sei ein maßgeblicher Einflussfaktor auf die Wahl des Rades als Verkehrsmittel, kann aus der Modellgüte geschlossen werden, dass Pendeldistanz und Hubwiderstand mehr als die Hälfte der Varianz des Radverkehrsanteils erklären und daher einen sehr starken Einfluss zeigen. Der Zusammenhang ist sowohl für Binnenpendler als auch Auspendler statistisch signifikant.

8.5.2 Modellkoeffizienten

Um die Schätzung des Radverkehrsanteils mit den Modellgleichungen durchführen zu können, listet Tabelle 5 und Tabelle 6 die Koeffizienten der Double-Log Pareto Regressionsfunktion für Auspendler- und Binnenpendlerrelationen auf. Sämtliche Koeffizienten erweisen sich als hoch signifikant.

Tabelle 5: Koeffizienten des Auspendlermodells

		Koeffizienten		Std. Fehler	Standardisierte Koeffizienten
Interzonales Modell	Konstante	b_0	6.617506	0.27	-*
	Bev. Wohngem.	b_1	-0.072743	0.02	-0.095*
	Bev. Arbeitsgem.	b_2	-0.156635	0.02	-0.162*
	Routingdistanz	b_3	-0.826582	0.04	-0.509*
	Abs. Höhenunterschied	b_4	-0.419015	0.03	-0.345*

*Anmerkung: Double-Log Pareto Model $R^2 = 0.633$, $p < 0.001$

Quelle: eigene Darstellung, 2016.

Tabelle 6: Koeffizienten des Binnenpendlermodells

		Koeffizienten		Std. Fehler	Standardisierte Koeffizienten
Intrazonales Modell	Konstante	b_0	-2.109785	0.20	-*
	Routingdistanz	b_1	0.186059	0.03	0.133*
	Abs. Höhenunterschied	b_2	-0.641653	0.02	-0.807*

*Anmerkung: Double-Log Pareto Model, $R^2 = 0.534$, $p < 0.001$

Quelle: eigene Darstellung, 2016.

Gemeinsam mit den Modellformeln können sie zur Simulation des anhand des Körperenergieverbrauchs ableitbaren Radverkehrsanteils auf einer Strecke bzw. in einer Gemeinde herangezogen werden. Durch das Einsetzen von selbst gewählten Widerstandswerten für die unabhängigen Variablen kann aus der jeweiligen Gleichung der simulierte, aus Bewegungswiderständen abgeleitete (logarithmierte) Radverkehrsanteil gewonnen werden. Für Ströme über Gemeindegrenzen hinaus lautet die Formel zur Abschätzung

$$\ln(Y_{ij}) = 6.617 - 0.072 \ln(P_i) - 0.156 \ln(P_j) - 0.826 \ln(\text{dist}_{ij}) - 0.419 \ln(\text{topo}_{ij})$$

Für den Binnenpendlerradanteil muss folgende Formel verwendet werden:

$$\ln(Y_{ii}) = -2.109 + 0.186 \ln(\text{dist}_{ii}) - 0.641 \ln(\text{topo}_{ii})$$

Um den nicht-logarithmierten, relativen Radverkehrsanteil zu erhalten, muss das Ergebnis der Gleichung nur mehr mithilfe der Exponentialfunktion zurücktransformiert werden.

Wirkung der raumwiderstandsbezogenen Modellkoeffizienten

Betrachtet man beide Widerstandsvariablen (Distanz und Höhenunterschied) im Vergleich der Modelle, so fällt eine interessante Gegensätzlichkeit in ihrer Wirkmächtigkeit auf, welche in bisherigen Forschungsarbeiten noch nicht beobachtet oder beschrieben wurde: Topographischer Widerstand wirkt innerhalb einer Gemeinde viel stärker als Widerstand als bei Radfahrten über die Gemeindegrenze hinaus. Dies kann damit erklärt werden, dass Pendeldistanzen innerhalb einer Gemeinde weitaus kürzer sind, als bei Fahrten über die Gemeindegrenze hinaus und ein großer Höhenunterschied auf kurzen Strecken aufgrund der resultierenden Steilheit weitaus schwieriger mit dem Rad zu bezwingen ist als auf einer längeren Strecke. Diesem Gedankengang entsprechend wirkt auch der Distanzwiderstand zwischen zwei Gemeinden stärker negativ als der interzonale Höhenunterschied ($\beta_{dist} = -0.509$; $\beta_{topo} = -0.345$).

Ein paradox anmutendes Bild zeichnet jedoch der Regressionskoeffizient des intrazonalen Distanzwiderstandes: Die mittlere nach Bevölkerung gewichtete Reisedistanz innerhalb einer Gemeinde wirkt bei Einpassung der linearisierten Regressionsgleichung durch OLS positiv auf den Radverkehrsanteil. Der Einfluss zeigt sich in der Größe des standardisierten Beta-Koeffizienten im Vergleich zum topographischen Widerstand zwar nur als sehr gering ($\beta_{dist} = 0.133$; $\beta_{topo} = -0.807$), dennoch bewertet die Regressionsfunktion Distanz innerhalb einer Gemeinde als radverkehrsfördernd. Die unerwartete Wirkung der Variable könnte in den Einschränkungen durch die Erhebungsmethode als *Density-Based Scattered Distance Estimate* begründet liegen, welche in einem Siedlungspolygon mittlere Distanzmaße generiert. Das Streupunktdiagramm der Korrelationsanalyse lässt zumindest im Augenmaß darauf schließen, dass ein ähnlicher negativer, aber schwacher überlinearer Zusammenhang vorliegt. Durch die Minimierung der Abstände zur linearisierten Funktionsgleichung bestätigt sich dies jedoch nicht. Um die Methode zur räumlichen Modellierung abzusichern, wurde der Zusammenhang auch nochmals mit den in Kapitel 7.4.1 erwähnten ungenaueren *Circular-Shaped Distance Estimates* berechnet, welche jedoch ebenfalls ein ähnliches Ergebnis lieferten. Die Arbeit geht aus diesem Grund davon aus, dass der Reiz das Fahrrad intrazonal als Pendelverkehrsmittel zu nutzen mit zunehmender Distanz ansteigt, weil sich dessen Verwendung für den Fahrer erst ab einer gewissen Weglänge attraktiv erweist, da kürzere Strecken bevorzugt in anderen Modi (beispielsweise zu Fuß) zurückgelegt werden („Für Einkäufe beim Bäcker um die Ecke setze ich mich nicht extra auf das Fahrrad, sondern gehe zu Fuß“).

Mit einer Betrachtung der Modellkoeffizienten kann auch der zweite Aspekt der zweiten Forschungsfrage, nach der Wirkmächtigkeit und Erklärungskraft der einzelnen, den Körperenergieverbrauch bestimmenden Einflussfaktoren, beantwortet werden: Wie auch in internationalen Studien, welche dieses Feld bisher mit simpler operationalisierten Variablen erforscht haben, zeigt sich die starke negative Wirkung von topographischer Höheunterschiede auf den Radverkehrsanteil. Sowohl für Aus- und Binnenradpendler wirkt Hubwiderstand bzw. Höhenunterschied als hemmend und schränkt die Radnutzung bei hohen Widerstandswerten überlinear ein.

8.6 Ableitung des Investitionspotentials: Residuenanalyse

Dieser abschließende Abschnitt des Regressionskapitels beschreibt zur Beantwortung der dritten Forschungsfrage, inwiefern sich aus den Modellergebnissen und dem Wissen über die quantitativ und signifikant nachgewiesene Wirkung von räumlichen Strukturen ein Investitionspotential ableiten lässt.

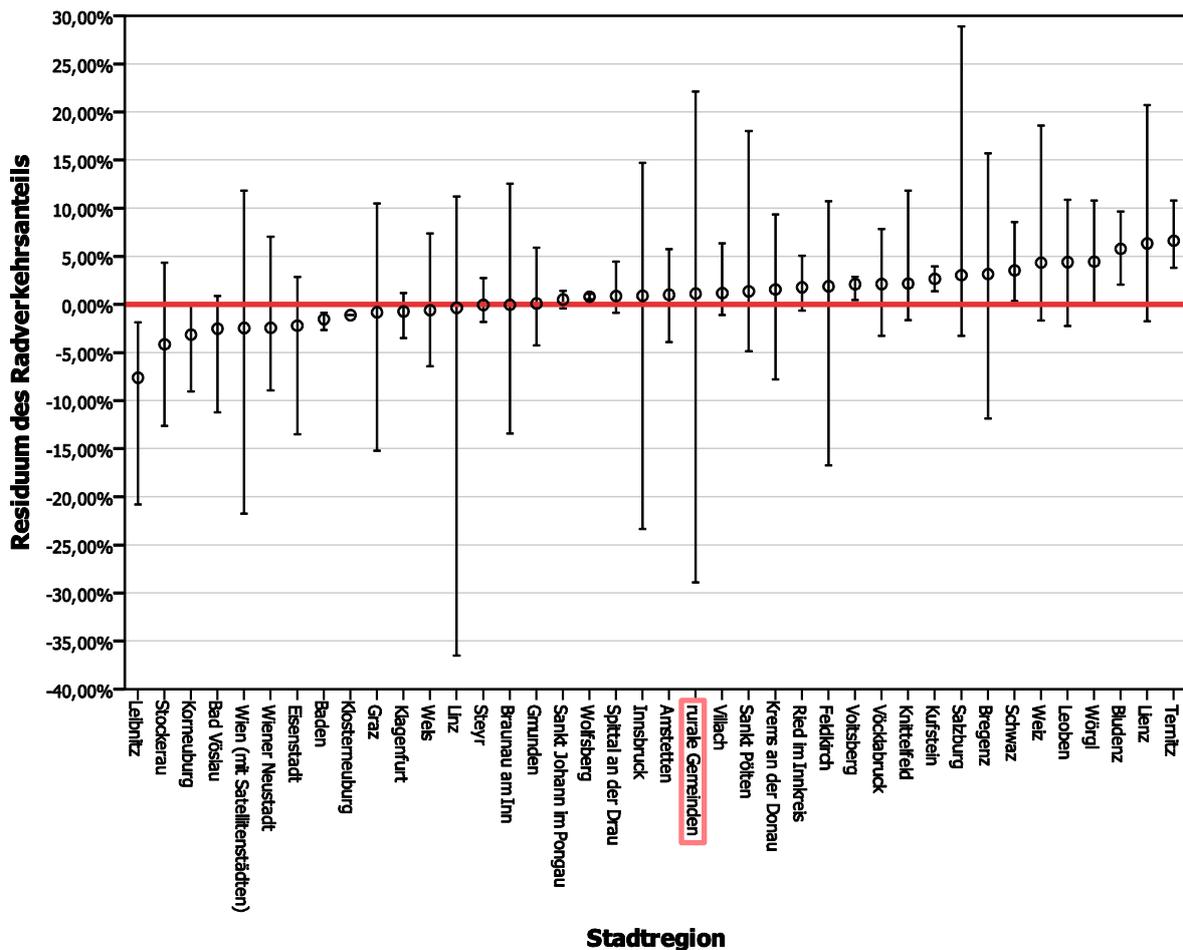
Die Idee zur Beantwortung der Frage ist, jenen Teil der Varianz des Radverkehrsanteils zu betrachten, welcher sich nicht durch den Körperenergieverbrauch erklären lässt. Wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben wurde, bestätigt internationale Forschung, dass der Radverkehr von unterschiedlichsten Faktoren bestimmt ist, welche den Radverkehrsanteil steigern oder hemmen. Daher existieren Gemeinden in denen die Radnutzung – rein hypothetisch – aufgrund der fehlenden Radinfrastruktur (Radwege, Abstellplätze, usw.), einem hohen Aufkommen des motorisierten Verkehrs oder der ablehnenden Haltung der Bevölkerung gegenüber dem nicht-motorisierten Verkehrsmitteln geringer ist, als in Abhängigkeit vom Körperenergieverbrauch im Vergleich zu anderen Gemeinden möglich wäre. Auf der anderen Seite gibt es auch Gemeinden, in welchen man der Radnutzung grundsätzlich positiv gegenüber eingestellt ist und diese daher einen höheren Radverkehrsanteil als Gemeinden ähnlichen Raumwiderstands aufweisen. All diese positiven und negativen Faktoren schlagen sich im Residuum – relative Abweichung des erhobenen zum aus Raumwiderstand vorhergesagten Radverkehrsanteil – der Modellfunktion nieder. Da davon ausgegangen werden kann, dass radverkehrsfördernde Maßnahmen – seien es sanfte Maßnahmen zur Bewusstseinsbildung in der Bevölkerung oder infrastrukturelle Maßnahmen zur Schaffung sicherer Voraussetzungen für den Radverkehr – immer die Steigerung der Radnutzung zum Ziel haben, so lässt sich ableiten, dass Investitionen besonders in jenen Gemeinden sinnvoll sind, welche in ihrem Radverkehrsanteil weit unterhalb des aus körperlicher Anstrengung abgeleiteten Radverkehrsanteils liegen. Dies sind Gemeinden, in denen aus

unterschiedlichsten Gründen weniger Rad gefahren wird, als dies im Vergleich zum gesamtösterreichischen Schnitt der Fall ist.

Umgelegt auf die Begriffe der Regressionsanalyse bedeutet dies, dass O-D-Paare mit einem negativen Residualwert (geschätzter Radverkehrsanteil liegt über dem aktuellen) im Hinblick auf Befahrbarkeit das meiste Potential für eine Steigerung des Radverkehrsanteils haben – ergo Investitionen auf diesen Strecken am sinnvollsten sind. Aus welchen Gründen der Radverkehrsanteil unter dem Modellschnitt liegt ist dabei für die alleinige Ableitung des Investitionspotentials nicht relevant. Unterstützt wird die Argumentation der Maßnahmensetzung in unterschätzten O-D-Paaren durch den theoretischen Hintergrund: Verändert man die Strukturen bzw. Voraussetzungen für den Radverkehr zum positiven, so orientiert sich auch der Mensch in seinem Verhalten daran – der Radverkehrsanteil gleicht sich somit jenem an, welcher bei gleicher Anstrengung im österreichweiten Schnitt in anderen Gemeinden problemlos erzielt werden kann.

8.6.1 Residualanalyse auf Stadtregionsebene

Die Betrachtung der Residualwerte ist insbesondere für das Modell der Binnenpendler interessant, da hier aufgrund des geringeren Bestimmtheitsmaßes mehr Gemeinden vom national möglichen Radverkehrsanteil abweichen. Um das in Österreich ableitbare Investitionspotential schnell verständlich zu visualisieren, wurden die Modellresiduen des Binnenpendlermodells in Abbildung 34 aufgrund der hohen Fallzahl nicht nach einzelnen Gemeinden sondern nach Stadtregionen zusammengefasst. Die Anordnung der Balken entspricht der aufsteigenden Sortierung des mittleren Modellresiduums der zur Region zugehörigen Gemeinden, welches als Punkt im Diagrammbalken visualisiert ist (Gemittelte Abweichung des Modal-Splits einer Stadtregion vom modellierten Radverkehrsanteil). Das obere und untere Ende des Diagrammbalkens gibt jeweils den maximal und minimal von der Modellfunktion abweichenden Radverkehrsanteil der Gemeinden einer Stadtregion an. Stadtregionen, deren mittlere Modellabweichung nahe der roten Line liegt, liegen gut im Modellschnitt, was bedeutet, dass der Radverkehrsanteil im Durchschnitt bei dem nach Körperenergieaufwand zu erwartenden Radverkehrsanteil liegt. Weist eine Stadtregion eine negative mittlere Abweichung auf, so werden die Gemeinden der Region durch das Modell unterschätzt – es zeigt sich Potential zur Investition in Höhe der Abweichung im Radverkehrsanteil. Die Balken des rechten Bereichs liegen über der Modellfunktion – die Gemeinden haben daher im Schnitt einen höheren Radverkehrsanteil, als durch die Funktion anhand des Körperenergieverbrauchs berechnet (sie werden im erhobenen Radverkehrsanteil unterschätzt).

Abbildung 34: Mittlerer residueller Binnenradverkehrsanteil nach Stadtregionen

Quelle: eigene Darstellung, 2016.

Als besonders stark unterschätzt erweisen sich die Stadtregionen im Wiener Umland sowie Leibnitz im steirischen Hügelland. Das mittlere Potential zur Steigerung des Radverkehrsanteils liegt hier zwischen sieben und zwei Prozentpunkten. Im Modellschnitt, aber mit großen Ausreißern behaftet, liegen die als rural klassifizierten Gemeinden. Sie haben am meisten Fälle und variieren daher sehr stark bezüglich ihres Investitionspotentials. Die großen Ausschläge der Balken in den Stadtregionen Linz, Amstetten, Salzburg und Linz weisen darauf hin, dass sich die Lage der Gemeinden zur Modellfunktion sehr heterogen verteilt: es gibt Gemeinden, welche in diesen Regionen stark überschätzt sowie andere, welche stark unterschätzt werden (großer Ausschlag der minimalen und maximalen Modellabweichung).

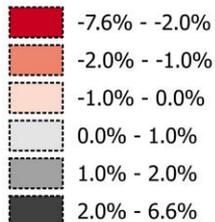
8.6.2 Investitionspotentialkarte

Abbildung 35 verdeutlicht die räumliche Verteilung der Modellresiduen als kartographische Darstellung. Rot eingefärbte Stadtregionen weisen das größte Investitionspotential auf, graue und schwärzlich gefärbte Regionen liegen über dem Modellschnitt und stehen in Bezug auf die Befahrbarkeit und gemessenem Radanteil bereits besser da. Stadtregionen in westlichen Bundesländern haben im Schnitt einen höheren Radverkehrsanteil in ihren Gemeinden, als von dem Modell anhand der Raumwiderstände geschätzt wurde. Hingegen zeigt sich der Osten Österreichs nach diesem Ansatz – wie auch im Diagramm – als besonders förderungswürdig: Der mittlere Spielraum zur Anhebung des Radverkehrsanteils auf Höhe der Modellfunktion liegt bei zwei bis drei Prozentpunkten. Die Regionen im Linzer Zentralraum, rund um Graz und Klagenfurt weisen ein geringfügig kleineres mittleres Potential von einem Prozent auf. Die Quantität der Potentiale zeigt sich dabei aufgrund der Mittelung bei der Aggregation über die Stadtregionen als so gering. Auf Gemeindeebene können – auch in Regionen die über dem modellierten Radverkehrsanteil liegen – teils viel größere Potenziale erzielt werden (s. Minimal- und Maximalwerte), welche für eine bessere Übersichtlichkeit nicht hier präsentiert werden können.

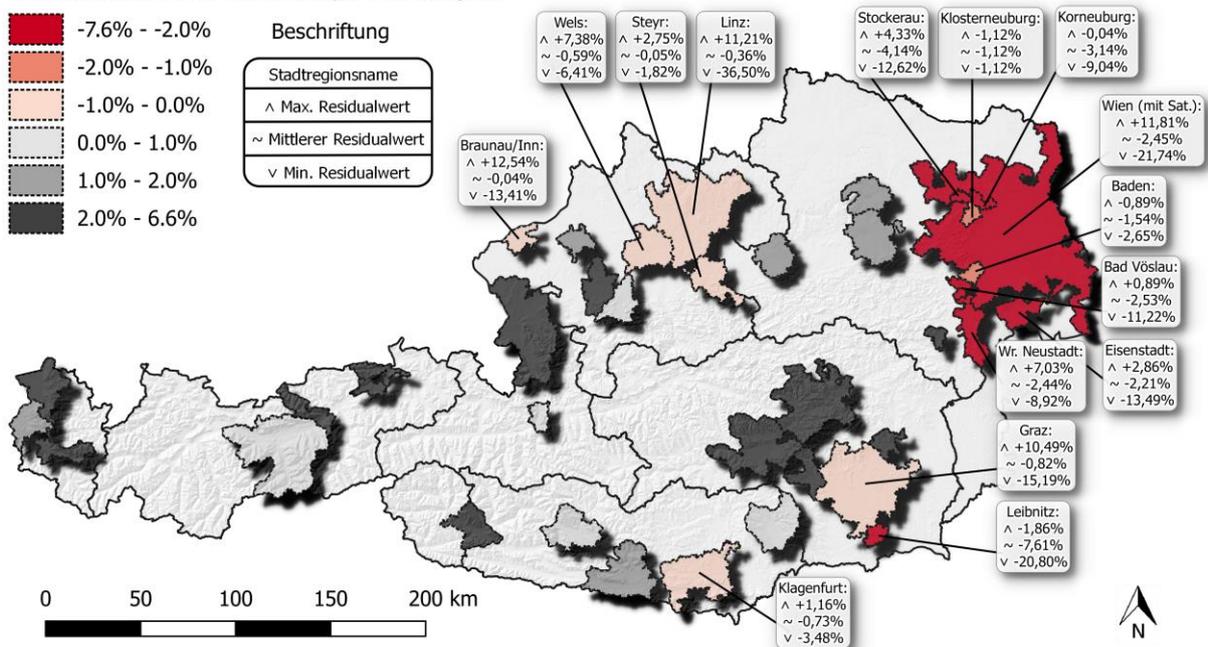
Abbildung 35: Räumliche Verteilung der Abweichung des erhobenen Radverkehrsanteils vom modellierten.

Legende

Mittlere intrazonale Residuen pro Stadtregion



Beschriftung	
Stadtregionsname	
^ Max. Residualwert	
~ Mittlerer Residualwert	
v Min. Residualwert	



Quelle: eigene Darstellung, 2016.

9. Ergebnisdiskussion und Ausblick

Dieses Kapitel fasst die Ergebnisse der vorangegangenen Ausarbeitungen nochmals abschließend vor dem Hintergrund der Problemstellung und eingangs erläuterten Zielsetzung zusammen und diskutiert diese.

9.1 Anwendbarkeit in der österreichischen Radverkehrsplanung

Die Verwendung des Körperenergieverbrauchs als Maß für Anstrengung beim Radfahren kann sowohl in Form des Aus- als auch Binnenpendlermodells in unterschiedlicher Weise vor allem auf überörtlicher Ebene für die Unterstützung der Radverkehrsplanung genutzt werden. Dieser Abschnitt zählt Anwendungsfälle als Beispiele auf:

Reihung von Fördervorhaben in der Radverkehrsplanung

Das vorangegangene Kapitel hat anhand der statistischen Abhängigkeit des Radverkehrs vom Körperenergieverbrauch zeigen können, dass die topographie- und distanzbezogenen Voraussetzungen einer Gemeinde dazu genutzt werden können, um Gemeinden und Strecken nach der Differenz zwischen tatsächlichem und energetisch möglichem Radverkehrsanteil im Sinne eines Investitionspotentials zu reihen. Dies ist insbesondere für überörtliche Fonds, wie den *klimaaktiv mobil* Fond des Umweltministeriums oder die Fördersysteme auf Ebene der Bundesländer interessant, welche Fördermaßnahmen gezielt dort setzen können, wo der Radverkehrsanteil aufgrund der bestehenden topographischen und distanzbezogenen Gegebenheiten Potential zur Steigerung hat. Als einer der größten Vorteile stellt sich in diesem Zusammenhang die inhaltlich intuitive Thematik der körperlichen Anstrengung als Maßstab heraus. Dieser hält die Priorisierung von Maßnahmen in verkehrspolitischen Diskussionen auf sämtlichen Ebenen der österreichischen Verkehrsplanung leicht verständlich und bildet nach dem Vorbild des Evidence-Based-Planning eine wesentliche argumentative Stütze in der zielgerichteten Verteilung von Geldern an Gemeinden.

Diskussionswürdig ist in diesem Zusammenhang jedoch der Bezug dieses energetisch möglichen Radverkehrsanteils auf die Interaktionsdaten des Jahres 2001. Da davon auszugehen ist, dass sich der Radverkehrsanteil seit 2001 in den Gemeinden unterschiedlich entwickelt hat, so würde diese Veränderung bei erneuter Schätzung auch den Wert des erwartbaren Radverkehrsanteils beeinflussen, da sich die Funktionskurve über die OLS-Methode berechnet. Diese Unschärfe tritt aber unter den theoretisch und nun auch statistisch gesicherten Ergebnissen der Wirkmächtigkeit von Topographie und Distanz in den Hintergrund, da klar ist, dass der Körperenergieverbrauch eine maßgebliche und

unveränderliche Grenze des Menschen für die Radnutzung ist. Eine weitere Bestätigung dieser Aussage findet sich in den Ergebnissen der in Kapitel 6.2.3 durchgeführten Analyse der Weglängen, welche über die vier Erhebungsperioden kaum variieren und damit zumindest für den Raumwiderstand Distanz eine zeitliche Konstanz des Körperenergieverbrauchs zu erkennen ist.

Zusätzlich ist die Reihung der Gemeinden nach energetischer Förderwürdigkeit mit Vorsicht zu genießen, da die lokalen Voraussetzungen für den Radverkehr aus anderen Gründen, wie einem hohen MIV-Aufkommen oder negativer Einstellung der Bevölkerung gegenüber dem Fahrrad erwachsen können. Maßnahmen zum Anheben des Radverkehrsanteils müssen daher immer auf die lokal auftretenden Bedingungen und Problemstellungen abgestimmt sein. Nur weil eine Gemeinde gut zu befahren ist, heißt dies nicht, dass eine Förderung für infrastrukturelle Maßnahmen sinnvoll ist – es könnten sanfte Maßnahmen besser wirken bzw. umgekehrt.

Trotzdem sind die Modellfunktionen auch noch für die heutige Planung ein erster Anhaltspunkt, um die Förderungswürdigkeit von Gemeinden anhand des Opportunitätsmaßes einschätzen zu können. So ist es beispielsweise möglich die Gemeinden, welche in der aktuellen oberösterreichischen Mobilitätshebung aus dem Jahr 2012 erhoben wurden – einem Bundesland, welches im Jahr 2001 in vielen Stadtregionen eindeutiges Förderpotential aufweist (s. Abbildung 35) – mit den Modellergebnissen in ihrer Entwicklung eingeschätzt werden.

Unterstützung der Wunschliniennetzplanung auf regionaler Ebene

Ein weiterer Anwendungsfall ist die Unterstützung der Planung bei der Bewertung von regionalen Wunschliniennetzen, welche in der Regel als vorgelagerte Untersuchung beim Entwurf von regionalen Radnetzen durchgeführt wird. Dabei werden von der lokalen Bevölkerung gewünschte Quell-Ziel-Beziehungen in Form von Wunschlinien mit den lokalen Planungsakteuren besprochen und in Form von Luftlinien verortet (Thiemann-Linden et al., 2016, S. 13). In diesem Fall kann das interzonale Modell bereits beim Entwurf des Wunschliniennetzes als Planungsunterstützung zur Anwendung kommen und ist insbesondere aufgrund des überlinear wirkenden Raumwiderstandes interessant, welcher nicht so leicht nachzuvollziehen ist, wie klassische linear abnehmende Zusammenhänge.

Pro Wunschverbindung muss demnach nur mehr die Distanz und der zu überwindende Höhenunterschied erhoben werden, um eine erste Modellierung des Radverkehrsanteils vorzunehmen und die Eignung im Kontext der Befahrbarkeit diskursiv abschätzen zu können.

Diese statistisch belegte Diskussionsgrundlage kann gemeinsam mit politischen Entscheidungsträgern oder bei Veranstaltungen mit der Bevölkerung verwendet werden, um im Sinne des in Kapitel 3.1 vorgestellten Enlightenment Models, Netzentwürfe hinsichtlich der physischen Befahrbarkeit zu verbessern.

9.2 Ähnliche Ansätze aktueller internationaler Forschung

Eine Bestätigung der Vorgehensweise bei der Ableitung des residuenbezogenen Investitionspotentials erbringt ein Forschungsteam aus Großbritannien, welches eine ähnliche Idee während des Entstehungsprozesses der vorliegenden Arbeit publizierte. Lovalace et al. (2015, S. 1 ff) stellen in ihrem Paper zum *Propensity to Cycle Tool* (PCT) einen Prototyp eines web-basierten Werkzeugs zur Planungsunterstützung vor, welches ein Investitionspotential anhand einer ähnlichen regressionsanalytischen Bewertung von pendlerbezogenen Radverkehrsanteils nach Kriterien der Befahrbarkeit und der Bildung von Szenarien vornimmt.

Das Investitionspotential ist inhaltlich geringfügig anders konzipiert und basiert nicht direkt auf einer Bewertung von Radverkehrsanteilen in ihrer relativen Lage zur Modellfunktion: So wird beispielsweise in dem Szenario zur Erfüllung des nationalen britischen Radverkehrsplans (nationale Verdoppelung der Radinteraktionen) angenommen, dass sich die Absolutzahl der Radfahrer aller O-D-Paare in Abhängigkeit ihrer Befahrbarkeit erhöht. Modelliert wird dies durch die Addition des aktuell erhobenen Radverkehrsaufkommens mit dem in Abhängigkeit zur Befahrbarkeit, über den Radverkehrsanteil modellierten Aufkommen (Verdoppelung auf O-D-Ebene). Als Konsequenz steigen die Radpendlerzahlen in O-D-Paaren, welche aufgrund ihrer Befahrbarkeit überschätzt wurden, überdurchschnittlich, unterschätzte Paare steigen unterdurchschnittlich. Im Gegensatz zu dem in dieser Arbeit vorgestellten Ansatz wird demnach angenommen, dass das Radverkehrsaufkommen auf allen O-D-Paaren gesteigert werden kann und bezieht sich nicht auf die relative Abweichung des realen Radverkehrsanteils vom modellierten.

Gravierende methodische Unterschiede zwischen dem PCT und der vorliegenden Arbeit treten – wie auch in bisherigen Modellen zur Vorhersage des Radverkehrsanteils – hinsichtlich der Operationalisierung der Variablen zur Beschreibung der Befahrbarkeit und der Konzeption des Regressionsmodells auf: Das vom PCT verwendete Maß der Befahrbarkeit fokussiert nur indirekt auf den Körperenergieverbrauch und wird nicht nach dem Ansatz des Gravitationsmodells berechnet, sondern bezieht sich nur auf das Konzept von Distance-Decay-Functions. Als topographische Variable wird – im Gegensatz zur Distanzvariablen,

welche sich ebenfalls auf die geroutete Distanz bezieht – nur die mittlere Reliefsteigung der Quell- und Zielzonen verwendet. Wie in Kapitel 7.2 besprochen wurde, erweisen sich solche allgemeinen topographischen Maße insbesondere im österreichischen Kontext als ungeeignet, da sie die eigentlichen Charakteristika der lokalen Topographie verzerrt bewerten. Aus diesem Grund könnte die hier vorgestellte Vorgehensweise der Cost-Path Analysis eine methodische Erweiterung des PCTs hinsichtlich der von Lovelace et al. (2015, S. 16 ff) vorgeschlagenen internationalen Anwendung darstellen. Im Sinne der gegenseitigen Befruchtung von Forschungsergebnissen kann im Gegenzug die Idee der Simulation einer Verdoppelung des Radverkehrsaufkommens auch mit den in Österreich vorliegenden Modellergebnissen durchgeführt werden. Im Kontext heutiger Radverkehrsplanung kann damit überprüft werden, inwiefern das simulierte Ziel einer Verdoppelung des Radverkehrs in den Gemeinden bereits erreicht wurde, was Aufschluss auf den Entwicklungsstand gibt.

Insgesamt muss festgehalten werden, dass der zeitgleiche und voneinander unabhängige Fokus auf das Thema der Befahrbarkeit für die Nutzung zur Planungsunterstützung die Brisanz und Bedeutung für die Radverkehrsplanung hervorstreicht.

9.3 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Die Tatsache, dass die vorgestellten Modelle rund 40 % der Varianz des Radverkehrsanteils unerklärt lassen, wirft weitere Fragen zur Funktionsweise des Radverkehrs in Österreich auf. So konnte der Radverkehrsanteil bisher durch Topographie und Distanzwiderstände beschrieben werden. Welche sozioökonomischen oder infrastrukturellen Faktoren die Wahl des Rades als Verkehrsmittel beeinflussen, ist immer noch nicht erklärt und gibt – trotz der ernüchternden Datenlage – Anlass für weitere Forschung.

Insbesondere in Bezug auf die Untersuchung der Wirkung von Radinfrastruktur in Österreich ergeben sich jedoch in naher Zukunft Handlungsmöglichkeiten zu einer Vertiefung: Da die Daten der bereits in Kapitel 5.5 genannten österreichischen Graphenintegrationsplattform (GIP), seit Anfang des Jahres 2016 als offene Daten zur Verfügung stehen und kontinuierlich um Informationen zur Radverkehrsinfrastruktur erweitert werden, bietet sich ein positiver Ausblick in Richtung einer genaueren Untersuchung der Wirkung infrastruktureller Maßnahmen im Radverkehr.

Ein weiterer interessanter Ansatz, die Forschung im Themenfeld der Verkehrsmittelwahl zu bereichern, wäre eine Charakterisierung von Gemeinden oder Auspendelbeziehungen, welche in dieser Arbeit stark von dem energetischen Modell unterschätzt wurden. Dem theoretischen Rahmen der Arbeit folgend, müssten genau dort die jeweiligen lokalen

Gegebenheiten auf positive Einflüsse (gesellschaftliche Haltungen, Qualität der Infrastruktur, niedriger Motorisierungsgrad, Fehlen von hochwertigem ÖV usw.) schließen lassen.

Als problematisch muss an dieser Stelle jedoch nochmals die Situation seitens der Verfügbarkeit von Informationen zum Radverkehr hervorgehoben werden. Wie aus den Ausführungen des vorangegangenen Abschnittes hervorgeht, wirkt das Fehlen von aktuellen flächendeckenden Interaktionsdaten äußerst limitierend bezüglich des Strebens nach mehr evidenzbasierten Ergebnissen in der Radverkehrsplanung.

9.4 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Diplomarbeit war es, einerseits einen evidenzbasierten Ansatz für die Unterstützung der österreichischen Radverkehrsplanung nach dem Vorbild internationaler Forschung zu schaffen und gleichzeitig einen Beitrag zur Beseitigung international auftretender Forschungslücken und methodischer Mängeln zu leisten. Dies geschah vor dem Hintergrund, dem in Österreich steigenden Interesse an sanften und infrastrukturellen Maßnahmen zur Förderung des Radverkehrs einen wissenschaftlich fundierten Rahmen zu geben, damit Investitionen nicht nur auf Grundlage des politischen Willens, sondern auch gezielt dort gesetzt werden, wo es sinnvoll ist.

Da man als Radfahrer Muskelkraft zur Fortbewegung benötigt, wurde das Konzept der Körperenergie zur Untersuchung von pendlerbezogenen Interaktionsdaten genutzt, welche für die Erhebungsperioden 1971 bis 2001 zur Verfügung standen. Für die Wahl dieses Fokus sprachen auf der einen Seite die identifizierten, internationalen Forschungslücken, welche diesen von Topographie und Distanz abhängenden Faktor bisher nicht detailliert oder im Kontext alpiner Landschaftsformen betrachtet haben. Der andere Grund war die Vermutung, dass das evolutionstheoretisch gegebene Streben des Menschen nach energetischer Effizienz bei der Fortbewegung einen großen Erklärungswert bei der Nutzung des Fahrrades spielen muss.

Als Grundlage zur Beschreibung der Ausgangssituation des heutigen Radverkehrs wurden Pendlerdaten der Volkszählungen 1971 bis 2001 im ersten Arbeitsschritt einer deskriptiven statistischen Analyse unterzogen, welche auf Ebene von Stadtregionen durchgeführt wurde. Die Ergebnisse zeigten, dass der Radverkehr im Vergleich zu anderen Verkehrsmodi über die Zeit eine untergeordnete Rolle spielt und je nach Stadtregionstyp rund zwei bis neun Prozent erreicht. Die Entwicklungstendenz ist im stärker ausgeprägten Binnenpendelverkehr eine eindeutig steigende, wohingegen sie beim Auspendelverkehr stark sinkend ist. Im Rückblick

kann von einer positiven Ausgangslage für die an 2001 anschließende bisherige Radverkehrsplanung gesprochen werden.

Um die Wirkung des Körperenergieverbrauchs auf den Radverkehrsanteil auf Gemeindeebene untersuchen zu können, mussten topographische und distanzbezogene Raumwiderstände zwischen und innerhalb von Gemeinden mithilfe geographischer Informationssysteme angenommen werden, wobei das methodische Konzept den Ansprüchen zur sinnvollen Widerstandsmodellierung im alpinen Kontext und der schwer ermittelbaren intrazonalen Widerstände gerecht werden musste. Die in diesem Kontext angewandte rasterbasierte Analysemethode der Cost-Path Analysis bildet dabei aufgrund ihres Detailgrades und der Konzeption, Informationen sowohl aus Rastergraphen als auch einem digitalen Höhenmodell extrahieren zu können, ein geeignetes methodisches Werkzeug, um Distanz-, Hub- und Höhenwiderstand für einen Radfahrer zu berechnen. In Kombination mit dem Konzept der Density-Based Scattered Distance Estimates zur Ermittlung intrazonaler Widerstände formt die Cost-Path Funktion einen vorteilhaften und bisher nicht angewandten methodischen Rahmen für Interaktionsdaten auf Quell-Ziel-Ebene, weshalb dieser Teil der Arbeit den wesentlichen Beitrag zur internationalen Forschung darstellt.

Die der räumlichen Modellierung nachfolgende statistische Zusammenhangsprüfung des Radverkehrsanteils mit dem Körperenergieverbrauch, welche nach dem Konzept von Gravitationsmodellen durchgeführt wurde, bestätigt die evolutionstheoretischen Annahmen, dass räumliche Strukturen maßgeblich die Radnutzung beeinflussen und zeigen, dass der Körperenergieverbrauch in einem überlinearen Zusammenhang einer Potenzfunktion wirkt. So erklärt die energetische Anstrengung rund die Hälfte der Varianz des Radverkehrs und zeigt sich als deutliche Beschränkung seiner quantitativen Ausprägung.

Als Konsequenz der begrenzten Erklärungsmacht der Modelle konnte ein Potential für Planungsmaßnahmen und Investitionen in die Radverkehrsförderung abgeleitet werden, welches sich auf die negative Abweichung des lokal erhobenen Radverkehrsanteils auf den energetisch möglichen Anteil bezieht. Demnach ergeben Investitionen dort den meisten Sinn, wo der reale Radverkehrsanteil niedriger ist, als er im Gesamtschnitt energetisch erreichbar wäre. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die förderwürdigsten Regionen vor allem in den östlichen Bundesländern konzentrieren, welche den potentiell möglichen Radverkehrsanteil noch nicht erreicht haben, obwohl sie sich aufgrund ihrer topographischen Flachheit besonders gut zum Radfahren eignen.

Im Hinblick auf die Zielsetzung der Arbeit kann festgehalten werden, dass es gelungen ist, einen für die Radverkehrsplanung argumentativ nutzbaren und evidenzbasierten Ansatz zu schaffen, um das Setzen von Maßnahmen gezielt dort durchführen zu können, wo es aufgrund der Befahrbarkeit Potential zur Steigerung gibt. Als wesentlicher Vorteil zeigt sich der intuitive Zugang des Investitionspotentials, welcher aufgrund des anstrengungsbezogenen Charakters leicht verständlich ist und gut verständlich in Diskussionen mit lokalen Entscheidungsträgern oder der Bevölkerung eingesetzt werden kann. Zusätzlich zu der Möglichkeit der Unterstützung der österreichischen Radverkehrsplanung und dem Schließen von internationalen Forschungslücken durch methodische Konkretisierung, liefern die Untersuchungen dieser Arbeit einen wesentlichen ersten Beitrag zur Erklärung des Radverkehrsanteils in Österreich welcher zukünftig noch detaillierter beleuchtet werden sollte, denn:

„In order to be able to develop sound policies that encourage cycling, it is essential that we understand what determines bicycle use.“ - Heinen et al., 2010, S. 60

10. Verzeichnisse

10.1 Quellenverzeichnis

Albers, G. (2006): Zur Entwicklung des Planungsverständnisses: Kontinuität und Wandel. In: Selle, K. (Hrsg.) (2006): Zur räumlichen Entwicklung beitragen. Dortmund: Dorothea Rohn Verlag.

APA – Austria Presseagentur (2011): Berlakovich: Radverkehrsanteil in Österreich auf 7 % gesteigert. Wien: www.ots.at/presseaussendung/OTS_20110401_OTS0210/berlakovich-radverkehrsanteil-in-oesterreich-auf-7-gesteigert-anhaenge (20.11.2015)

Batty, M. (1976): Urban Modeling: Algorithms, Calibrations, Predictions. London: Cambridge University Press.

Bhatta, B., Larsen, O. (2011): Are intrazonal trips ignorable? ScienceDirect, Transport policy, Vol. 18: www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967070X10000533 (12.12.2015), S. 13 - 22.

BMLFUW – Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft (2006): Masterplan Radfahren – Strategie zur Förderung des Radverkehrs. Wien: www.klimaaktiv.at/dms/klimaaktiv/mobilitaet/radfahren/masterplanradfahren/Masterplan-Radverkehr-des-BMLFUW_small/Masterplan%20Radverkehr%20des%20BMLFUW_small.pdf (05.05.2016)

BMLFUW – Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft (2012): Leitfaden Radverkehrsförderung. Wien: www.klimaaktiv.at/dms/klimaaktiv/publikationen/mobilitaet/radfahren/lfradverkehr/ka_m__Leitfaden_radverkehrsfoederung_2014.pdf?1=1 (05.05.2016)

BMLFUW – Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft (2014): Was ist klimaaktiv mobil. Wien: www.klimaaktiv.at/mobilitaet/verkehr.html (06.06.2016).

Untersuchung des Körperenergieverbrauchs als evidenzbasierter Ansatz zur Unterstützung der Radverkehrsplanung

BMLFUW - Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft (2015): Masterplan Radfahren 2015 – 2025. Wien: www.bmlfuw.gv.at/dam/jcr:9829acb0-0928-401a-ae82-3a67aff817fd/43_MP_Radfahren_de.pdf (14.03.2016).

BMVIT – Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (2013a): Die Untersuchung „Österreich unterwegs“. Wien: www.oesterreich-unterwegs.at/index.php/hintergrund-der-studie (14.03.2016)

BMVIT – Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (2013b): Kosteneffiziente Maßnahmen zur Förderung des Radverkehrs in Gemeinden. Wien: www.bmvit.gv.at/service/publikationen/verkehr/fuss_radverkehr/downloads/radverkehrsfoerderung.pdf (05.05.2016)

BMVIT – Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (2013c): Radverkehr in Zahlen. Wien: www.bmvit.gv.at/service/publikationen/verkehr/fuss_radverkehr/downloads/ri_z201503.pdf (06.06.2016)

BMVIT – Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (2016): Positionsbestimmung und Verantwortungsbereiche. Wien: www.bmvit.gv.at/verkehr/ohnemotor/position.html (06.06.2016)

Bohrmann, N., Thiemann-Linden, J. (2012): Fahrradnutzung im Städtevergleich. In: Difu - Deutsches Institut für Urbanistik (Hrsg.) (2012): Forschung Radverkehr International. Berlin: www.nationaler-radverkehrsplan.de/sites/default/files/forschung_radverkehr/for_a-07.pdf (23.10.2015).

Breuss, J., Bürstmayr, M., et al.(2010): Einflussfaktoren auf den Radverkehrsanteil am Beispiel der Gemeinden Mäder, Pfaffstätten, Purkersdorf und Wolfurt. St. Pölten: images.umweltberatung.at/htm/radverkehrsstudie-zusammenfassung-mobilitaet.pdf (05.05.2016).

B-VG – Bundesverfassungsgesetz: BGBl. Nr. 1/1930 idF 194/1999.

Chen, Y. (2015): The Distance-Decay Function of Geographical Gravity Model: Power Law or Exponential Law? Peking: arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1503/1503.02915.pdf (23.06.2016).

Collischonn, W., Pilar, J. (2000): A direction dependent least cost path algorithm for roads and canals. Taylor & Francis, International Journal of Geographical Information Science, Vol. 14: citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.631.4969&rep=rep1&type=pdf (16.01.2016), S. 397 – 406.

Davoudi, S. (2006): Evidence-Based Planning. Taylor & Francis, disP – The Planning Review Volume 42, S. 14 – 24.

de Lange, N. (2013): Geoinformatik in Theorie und Praxis. Heidelberg: Springer-Verlag.

Draeger, W., Klewe, H. (1999): Das Fahrrad – mehr als nur eine Herausforderung. In: Buchwald, K., Engelhardt, W. (Hrsg.) (1999): Umweltschutz – Grundlagen und Praxis. Bonn: Economica Verlag.

ENU – Energie- & Umweltagentur Nideösterreich (2016): Prozessschritte im RADLgrundnetz. St. Pölten: www.radland.at/angebot/fuer-gemeinden/radlgrundnetz/prozessschritte-im-radlgrundnetz (06.06.2016)

ESRI (2016a): How the path distance tools work. Redlands: resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/index.html#/How_the_path_distance_tools_work/009z00000027000000/ (30.01.2016)

ESRI (2016b): Understandig how path distance analysis works. Redlands: resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/index.html#/Understanding_path_distance_analysis/009z00000022000000/ (30.01.2016).

Faludi, A., Waterhout, B. (2006a): Debating Evidence-Based Planning. Taylor & Francis, disP – The Planning Review, Vol. 42, S. 71 – 72.

Faludi, A., Waterhout, B. (2006b): Introducing Evidence-Based Planning. Taylor & Francis, disP – The Planning Review, Vol. 42, S. 4 – 13.

Field, A. (2009): Discovering statistics using SPSS. London: SAGE Publications.

Fischer, M. (2003): GIS and Network Analysis. In: Hensher, D., et al. (Hrsg.) (2003): Handbook 5 Transport Geography and Spatial Systems. Pergamon: www.csun.edu/~dlb10399/Docs/Geog406_Spring10/Readings/NetworkAnalysis_Fischer_2003.pdf (27.07.2016), S. 2 – 16.

Frey, H., Schopf, M., Winder, M. (2014): Energieeffiziente neue Mobilität in Wien. Wien: www.nachhaltigkeit.wienerstadtwerke.at/fileadmin/user_upload/Downloadbereich/2014/WST_W_Studie_Energie_Verkehr_Endbericht_2014_06_30.pdf (30.03.2016).

Goodman, A. (2013): Walking, Cycling and Driving to Work in the English and Welsh 2011 Census: Trends, Socio-Economic Patterning and Relevance to Travel Behaviour in General. PLoS one, Vol. 8: journals.plos.org/plosone/article/asset?id=10.1371%2Fjournal.pone.0071790.PDF (10.10.2015), S. 1 – 11.

Halás, M., Klapka, P., Kladivo, P. (2014): Distance-decay functions for daily travel-to-work flows. Elsevier, Journal of Transport Geography, Vol. 35. S. 107 – 119.

Heinen, E., Van Wee, B., et al. (2010): Commuting by Bicycle: An Overview of Literature. Taylor & Francis, Transport Reviews, Vol. 30: www.tandfonline.com/doi/citedby/10.1080/01441640903187001 (30.11.2015), S. 59 – 96.

Herry, M. (2016): Mobilitätsforschung und Verkehrserhebung. Wien: www.herry.at/index.php/mobilitaetsforschung-a-verkehrserhebung (14.03.2016)

Iacono, M., Krizek, K, El-Geneidy, A. (2008): Access to Destinations: How close is Close Enough? Estimating Accurate Distance Decay Functions for Multiple Modes and Different Purposes. Minneapolis: www.lrrb.org/media/reports/200811.pdf (26.06.2016).

Jaros, A., Nussbaumer, A, Nussbaumer, P (2011): Physik Compact. Wien: ÖBV.

Klima- und Energiefonds (2015): Jahresprogramm 2015 des Klima- und Energiefonds. Wien: www.klimafonds.gv.at/assets/Uploads/Jahresprogramme/Jahresprogramm-2015Stand-Nov.-2015.pdf (11.06.2016).

Klimabündnis Österreich (2016): Mobilitäts-Lehrgang für Gemeinden. Wien: www.klimabuendnis.at/gemeinden-mobilitaet/mobilitaetslehrgang_oesterreich (04.07.2016).

Knoflacher, H. (1987): Verkehrsplanung für den Menschen – Band 1: Grundstrukturen. Wien: Wirtschaftsverlag Dr. Anton Orac.

Knoflacher, H. (1995): Fußgeher- und Fahrradverkehr – Planungsprinzipien. Wien: Böhlau Verlag Wien – Köln – Weimar.

Knoflacher, H. (2007): Grundlagen der Verkehrs- und Siedlungsplanung: Siedlungsplanung. Wien: Böhlau Verlag Wien – Köln – Weimar.

Knoflacher, H. (2012): Grundlagen der Verkehrs- und Siedlungsplanung: Siedlungsplanung. Wien: Böhlau Verlag Wien – Köln – Weimar.

Knoflacher, H. (2013): Zurück zur Mobilität. Wien: Ueberreuter.

Kordi, M., Kaiser, C., Fotheringham, S. (2012): A possible solution for the centroid-to-centroid and intra-zonal trip length problems. In: Gensel J., Josselin, D., Vandebroucke, D. (Hrsg.) (2012): Multidisciplinary Research on Geographical Information in Europe and Beyond. Avignon: agile-online.org/Conference_Paper/CDs/agile_2012/proceedings/papers/Paper_Kordi_A_possible_solution_for_the_centroid-to-centroid_and_intra-zonal_trip_length_problems_2012.pdf (13.12.2015), S. 147 – 152.

Lanzendorf, M (2001): Freizeitmobilität - unterwegs in Sachen sozial-ökologischer Mobilitätsforschung. Materialien zur Fremdenverkehrsgeographie, Universität Trier. Trier 2001.

Loidl, M. (2014): Slope-sensitive bicycle routing. Salzburg: gicycle.wordpress.com/2014/06/12/slope-and-routing/ (24.11.2015)

Loidl, M. (2015): Using OSM building footprints to disaggregate OGD census data. Salzburg: gicycle.wordpress.com/2015/08/17/using-osm-building-footprints-to-disaggregate-ogd-census-data/ (24.03.2016).

Lovelace, R., Goodman A., et al. (2015): The Propensity to Cycle Tool. An open source online system for sustainable transport planning. Leeds: arxiv.org/pdf/1509.04425v1.pdf (24.05.2016)

Macdonald, B. (2008): Planning for Cycling – Report to Cycling England. Cambridge: www.webarchive.nationalarchives.gov.uk/20110407094607/http://www.dft.gov.uk/cyclingengland/site/wp-content/uploads/2009/03/planning-for-cycling-report-10-3-09.pdf (21.06.2016)

Martin, J. C., Milliken, D. L., Cobb, J. E., et al. (1998): Validation of a Mathematical Model for Road Cycling Power. In: Grabiner, M. (Hrsg.): Journal of Applied Biomechanics, Vol. 14: www.wisil.recumbents.com/wisil/MartinDocs/Validation%20of%20a%20mathematical%20model%20for%20road%20cycling.pdf (06.06.2016), S. 276 – 291.

Martinez, M., Viegas, J. (2012): A new approach for modelling distance-decay functions for accessibility assessment in transport studies. Elsevier, Journal of Transport Geography, Vol. 26, S. 87 – 96.

Matulin, M, Bošnjak, I., Šimunović, L. (2009): Different approaches to the Modal Split calculation in urban areas. Zagreb: bib.irb.hr/datoteka/414598.Matulin20Bosnjak20Simunovic.pdf (20.06.2016).

Meadows, D., Randers, J., et al. (2012): Grenzen des Wachstums, Das 30-Jahre-Update. Stuttgart: Hirzel Verlag.

Merki, C. (2008): Verkehrsgeschichte und Mobilität. Stuttgart: Eugen Ulmer Verlag.

Meschik, M. (2008): Planungshandbuch Radverkehr. Wien: Springer Wien, New York.

Meyer, J. (2013): Nachhaltige Stadt- und Verkehrsplanung: Grundlagen und Lösungsvorschläge. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag.

Parkin, J. (2003): Comparisons of cycle use for the journey to work from the '81, '91 and 2001 censuses. Traffic engineering and control, Vol. 44, No 8, S. 299 – 302.

Parkin, J., Ryley, T., et al. (2007): Barriers to cycling: an exploration of quantitative analyses. In: Horton et al. (Hrsg.): Cycling and Society. Hampshire: sacredartichoke.com/latarsha/Nonfiction%201700%20Sorted%20Ebooks%20Pack%20PHC/0754648443.Ashgate.Cycling.and.Society.Sep.2007.pdf#page=84 (15.10.2015), S. 66 – 82.

Parkin, J., Wardman, M., Page, M. (2008): Estimation of the determinants of bicycle mode share for the journey to work using census data. Springer Science, Transportation, Vol. 35: link.springer.com/article/10.1007/s11116-007-9137-5 (15.10.2015), S. 93 – 109.

Perschon, J. (2012): Nachhaltige Mobilität – Handlungsempfehlungen für eine zukunftsfähige Verkehrsgestaltung. In: Stiftung Entwicklung und Frieden (Hrsg.) (2012): Policy Paper 36. S. 2 – 11. Bonn: sef-bonn.org/fileadmin/Die_SEF/Publikationen/Policy_Paper/pp_36_de.pdf (30.03.2016).

Plaza, C., da Silva, A. (2015): Intrazonal trip distances: An estimation approach and application to a case study. São Paulo: docs.trb.org/prp/15-0383.pdf (13.12.2015).

Radlobby (2016): Österreich Radelt Zur Arbeit. Wien: www.radeltzurarbeit.at (04.07.2016).

Rae, E. (2014): Flow Mapping with QGIS. O.n.b.: www.undertheraedar.com/2014/10/flow-mapping-with-qgis.html (23.11.2015).

Riedl, R. (1985): Die Spaltung des Weltbildes. Biologische Grundlagen des Erklärens und Verstehens. Berlin: Verlag Paul Parey.

Rietveld, P., Daniel, V. (2004): Determinants of bicycle use: do municipal policies matter? Elsevier, Transportation Research Part A 38, S. 531 - 550.

Rodrigue, J., Comtois, C., Slak, B. (2006): The Geography of Transport Systems. Oxon: Routledge.

Sammer et al. (2012): Gesamtverkehrskonzept für den Großraum Linz – Bestandsanalyse 2009/2010. Linz: www2.land-oberoesterreich.gv.at/internetltgbeilagen/Beilage%20611/2012%20-%20Subbeilage%201.pdf?id=1148&n=611&j=2012 (04.04.2016).

Statistik Austria (2005): Standard-Dokumentation Metainformationen (Definitionen, Erläuterungen, Methoden, Qualität) zur Volkszählung 2001. Wien: www.statistik.at/web_de/dokumentationen/menschen_und_gesellschaft/Bevoelkerung/index.html (07.03.2016).

Statistik Austria (2015): Gemeindeänderungen ab 1945 (Vereinigungen, Teilungen, Namens- u. Statusänderungen). Wien: statistik.at/web_de/klassifikationen/regionale_gliederungen/gemeinden/index.html (07.03.2016).

Statistik Austria (2016): Stadtregionen. Wien: www.statistik.at/web_de/klassifikationen/regionale_gliederungen/stadtregionen/index.html (07.06.2016)

Steubing, L. (1999): Belastungen von Boden, Pflanze, Tier und Mensch durch den Straßenverkehr. In: Buchwald, K., Engelhardt, W. (Hrsg.) (1999): Umweltschutz – Grundlagen und Praxis. Bonn: Economica Verlag.

Stigell, E., Schantz, P. (2011): Methods for determining route distances in active commuting – Theory validity and reproducibility. Elsevier, Journal of Transport Geography, Vol. 19, S. 563 – 574.

SurveyMonkey (2016): Berechnen der Anzahl der benötigten Befragten. Palo Alto: help.surveymonkey.com/articles/de/kb/How-many-respondents-do-I-need (10.08.2016).

Taylor, P. (1975): Distance Decay in spatial interactions. Norwich: alexsingleton.files.wordpress.com/2014/09/2-distance-decay-in-spatial-interactions.pdf (20.11.2016).

Thiemann-Linden, J. Gwiasda, P., et al. (2004): Radverkehr in der Praxis – Erfahrungen und Beispiele aus dem In- und Ausland. In: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.) (2004): direkt – Verbesserung der Verkehrsverhältnisse in den Gemeinden. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag.

Vandenbulcke, G., Dujardin, C. Thomas, I. (2008): Cycling to work: Modelling spatial variations within Belgium. Löwen: www.researchgate.net/profile/Isabelle_Thomas2/publication/266287826_Cycling_to_work_Modelling_spatial_variations_within_Belgium/links/553513520cf2df9ea6a4e4c6.pdf (03.11.2015).

VCÖ (2007): Einfluss der Raumordnung auf die Verkehrsentwicklung. Wien: VCÖ-Schriftenreihe „Mobilität mit Zukunft“ 3/2007.

VCÖ (2010): In Österreich steigen immer mehr auf das Fahrrad um. In: VCÖ (Hrsg.) (2010): Verkehr aktuell 6/2010. Wien: www.mbi-munderfing.at/bilder/vcoe_factsheet_radfahren_forcieren.pdf (03.07.2016)

Wardman, M., Tight, M., Page, M. (2007): Factors influencing the propensity to cycle to work. Elsevier, Transportation Research Part A 41, S. 339 – 350.

Wich, F. (2010): Das große Buch vom Fahrrad – Eine Rückschau. Halle: Projekte-Verlag Cornelius.

Wilson, D., Padapopulos, J. (2004): Bicycling Science. Cambridge: The MIT Press.

Wood, B., Wood, Z. (2006): Energetically optimal travel across Terrain: Visualizations and a New Metric of Geographic Distance with Anthropological Applications. In: Erbacher, R., et al. (Hrsg.) (2006): Visualization and Data Analysis. Boston: users.csc.calpoly.edu/~zwood/research/pubs/bwoodSPIE06.pdf (15.01.2016), S. 1 – 7.

Zimmerman, K. (2014): Stadtregion Steirischer Zentralraum 2014+ - AG 2 Verkehr und Umwelt, Auszug aus dem Ergebnisprotokoll der 2. Arbeitsgruppensitzung. Stattegg: www.zentralraum-stmk.at/fileadmin/user_upload/_imported/fileadmin/user_upload/Stadtregion_14/Protokoll_AG_2__4-12-2014_Versand.pdf (05.05.2016)

10.2 Datenquellen

Austrian Energy Agency (2016): Klimaaktiv Radprojekte in Vorarlberg. Wien.

Eurostat (2015): Bevölkerungsraster – 1 km. Luxemburg: ec.europa.eu/eurostat/de/web/gisco/geodata/reference-data/population-distribution-demography

Land Kärnten (2015): Digitales Höhenmodell. Klagenfurt: www.data.ktn.gv.at.

OpenStreetMap (2015): Straßengraph Österreich. © OpenStreetMap-Mitwirkende: www.openstreetmap.org/copyright.

Statistik Austria (2001): Pendlerdaten 1971 – 2001. Wien.

Statistik Austria (2015a): Regionalstatistische Rastereinheiten - 250m. Wien: www.data.gv.at/katalog/dataset/ca996648-ed34-3dcd-a99f-68619f680241.

Statistik Austria (2015b): Stadtregionen in Österreich. Wien.

WIGeoGIS (2004): Gemeindegrenzen von Österreich. Wien.

10.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick zur Datengrundlage und den ausgeschlossenen Modi.....	39
Tabelle 2: Deskriptive Statistik der Modellvariablen	74
Tabelle 3: Ausgewählte Spearman-Rho Korrelationen der Modellvariablen.....	75
Tabelle 4: Prädiktive Qualität der vier Modellfunktionen	80
Tabelle 5: Koeffizienten des Auspendlermodells	83
Tabelle 6: Koeffizienten des Binnenpendlermodells.....	83
Tabelle 7: Variablenoperationalisierung in den Beispiel-Modal-Choice Models.....	109
Tabelle 8: Entwicklung der Radauspendlerströme nach Stadtregionen.....	115
Tabelle 9: Entwicklung der Radbinnenpendlerströme nach Stadtregionen.....	116
Tabelle 10: Häufigkeitstabelle der ausgeschlossenen Fälle der multivariaten Analyse.....	118
Tabelle 11: Korrelationsmatrize aller Modellvariablen.....	118

10.4 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Italienisches Velociped	6
Abbildung 2: Entwicklung der Motorisierung in Österreich	7
Abbildung 3: Planungshierarchie in der Österreichischen Radverkehrsplanung	11
Abbildung 4: Anzahl der realisierten Radprojekte mit Klimaaktiv-Förderung in Vorarlberger Gemeinden	14
Abbildung 5: Schematische Darstellung einer O-D-Matrix als Grundlage eines Gravitationsmodells	31
Abbildung 6: Vergleich von Exponential- und Potenzfunktion als Distance-Decay-Functions mit unterschiedlichen Parametern	32
Abbildung 7: Komplexität von Wegezwecken im Vergleich	34
Abbildung 8: Methodische Vorgehensweise	34
Abbildung 9: Stadtregionen in Österreich – Gliederung nach Kern-, Außen- und ruralen Zonen	37
Abbildung 10: Anpassung der Verkehrsmittelgliederung in der vorliegenden Arbeit	38
Abbildung 11: Entwicklung der Auspendlerverkehrsmodi ÖV und MIV zwischen 1971 und 2001 nach Stadtregionstypen	43
Abbildung 12: Entwicklung der nichtmotorisierten Auspendlerverkehrsmodi zwischen 1971 und 2001 nach Stadtregionstypen	44
Abbildung 13: Entwicklung der Binnenpendlerverkehrsmodi Zu Fuß und MIV zwischen 1971 und 2001 nach Stadtregionstypen	45
Abbildung 14: Entwicklung der Binnenpendlerverkehrsmodi Fahrrad und ÖV zwischen 1971 und 2001 nach Stadtregionstypen	46
Abbildung 15: Modal Split des ruralen Raumes nach Bundesländern im Jahr 2001	47
Abbildung 16: Räumliche Verteilung des Modal-Splits nach Stadtregionen	48
Abbildung 17: Vergleich der Verteilung von Radfahrern auf Aus- und Binnenpendelströme nach Stadtregionen und Jahren in absoluten Zahlen	49
Abbildung 18: Räumliche Verteilung der Radpendlerinteraktionen nach Binnen- und Auspendelverkehr in Absolutzahlen	51
Abbildung 19: Zeitliche Entwicklung des Radverkehrsanteils auf interzonalen Relationen nach Stadtregionen und Stadtregionstypen seit 1971	52
Abbildung 20: Zeitliche Entwicklung des Radverkehrsanteils auf intrazonalen Relationen nach Stadtregionen und Stadtregionstypen seit 1971	53

Abbildung 21: Kumulative relative Summenhäufigkeit der interzonalen Radpendler, bezogen auf die einfache euklidische Distanz zwischen Wohn- und Arbeitsort für alle Erhebungsperioden.....	54
Abbildung 22: Unterschied zwischen Gelände- und Straßensteigung entlang einer Bergkette	60
Abbildung 23: Schematische Funktionsweise der Cost-Path Analyse nach dem ArcGIS Algorithmus Pathdistance().	63
Abbildung 24: Beispiel für die Berechnung topographischer Kosten (absoluter bidirektionaler Höhenunterschied) zwischen einer Quellzelle und sämtlichen anderen Zellen des Rasters. .	64
Abbildung 25: Gerasterter Straßengraph	66
Abbildung 26: Disaggregation der Gemeindebevölkerung anhand von Adressdaten.....	68
Abbildung 27: Ableitung von Quell- und Zielpunkten aus einem Dichterraster anhand dreier Beispielgemeinden.....	69
Abbildung 28: Beispiel zur Berechnung des Körperenergieverbrauchs nach Wilson et al. (2004).....	71
Abbildung 29: Begrenzung des Untersuchungsbereichs nach Quellgemeinde	72
Abbildung 30: Radanteil der Auspendelströme in Abhängigkeit zur Routingdistanz und dem absoluten Höhenunterschied.	76
Abbildung 31: Radanteil der Binnenpendlerströme in Abhängigkeit zur Routingdistanz und dem absoluten Höhenunterschied.	77
Abbildung 32: Verwendete Regressionsmodellgleichungen nach Pendelstromtypen	79
Abbildung 33: Funktionaler Zusammenhang zwischen interzonalem Radanteil und Routingdistanz sowie interzonalem Radanteil und absolutem Höhenunterschied	81
Abbildung 34: Mittlerer residualer Binnenradverkehrsanteil nach Stadtregionen	87
Abbildung 35: Räumliche Verteilung der Abweichung des erhobenen Radverkehrsanteils vom modellierten.....	88

11. Anhang

11.1 Variablenoperationalisierung in internationaler Forschung

Tabelle 7: Variablenoperationalisierung in den Beispiel-Modal-Choice Models

	<i>Parkin et al., 2008, S. 98</i>		<i>Rietveld et al., 2004, S. 547f</i>		<i>Vandenbulke et al., 2008, S. 14</i>	
	Variable	Operationalisierung	Variable	Operationalisierung	Variable	Operationalisierung
Gebaute Umgebung						
Fahrdistanz	x	Fahrten nach Pendeldistanzklassen		-	x	Pendeldistanz
Siedlungsindikatoren	x	Bevölkerungsdichte		-	*	Bevölkerungsdichte
Radinfrastruktur	*	Anteil der Radwege am Straßennetz	*	Anteil der Radwege am Straßennetz	x	Radwegszufriedenheit
Naturräumliche Gegebenheiten						
Topographie	x	Anteil der mehr als 3% geneigten 1km Rasterzellen	x	Dimensionsloser Index zur Bewertung der Hügeligkeit	x	Mittlere Hängeigung des Gemeindestraßennetzes
Klima	x	Mittlere Temperatur, Windgeschwindigkeit, Sonnenstunden	x	Mittlere Temperatur, Windgeschwindigkeit, Regentage		-
Sozioökonomische Faktoren						
Geschlechterstruktur	x	Anteil der Männer				-
Altersstruktur	x	Anteil der Beschäftigten nach Altersklassen	x	Anteil der Bevölkerung unter 25 Jahren	x	Anteil der Bevölkerung zwischen 45 und 54 Jahren
Bildung		-	x	Präsenz einer höheren Schule	x	Anteil der Bevölkerung nach Bildungsgraden
Einkommensstruktur	x	Einkommensindex (British deprivation Index)	*	Grad des veräußerbaren Eigentums		-
Psychologische Faktoren						
Autobesitz	x	Anzahl der Autos pro Pendler	x	Autobesitz pro Kopf		-
Sicherheitsempfinden						
Unfallrisiko		-	x	Sicherheitsempfinden am Fahrrad	x	Unfallrisiko
	x	Operationalisiert und als Prädiktor genutzt				
	*	Operationalisiert, aber aus Modell entfernt				

Quelle: Parkin et al., 2008, S. 98; Rietveld et al., 2008, S. 547 f; Vandenbulke et al., 2008, S. 14;

eigene Darstellung

11.2 Quellcode des Python Scripts

Dieser Teil des Anhangs beinhaltet den Quellcode des gesamten Python-Scripts, welches die automatisierte Modellierung der Widerstandsmaße für sämtliche Paare der relationalen O-D-Pendelmatrix berechnet:

```
001 #-----
002 # Name:          PathdistanceRouter.py
003 # Zweck:         Modellierung des Körperenergieaufwandes beim Radfahren
004 #               fuer saemtliche Paare einer relationalen O-D-Matrix
005 #
006 # Author:        Clemens Raffler
007 #
008 # Created:       15.02.2016
009 # Copyright:     (c) Clemens Raffler 2016
010 # Licence:       <your licence>
011 #-----
012
013 #Import der ArcGIS-Python API und Systemschnittstelle
014 import arcpy, os
015 from arcpy.sa import *
016
017 #Aktivieren der Spatial Analyst Erweiterung
018 arcpy.CheckOutExtension("Spatial")
019
020 """Variablenzuweisung"""
021 #Geodatenbank mit Grundlagendaten
022 database = "C:/GIS_WORKBENCH/.../script_pendler_pathdistance.gdb"
023
024 #Textdatei mit Werten der jeweiligen Vertikalfaktorfunktion
025 #fuer alle 0.25° Winkel zwischen 15° Gefaelle und 15° Steigung.
026 vf_table = arcpy.sa.VfTable("C:/GIS_WORKBENCH/.../vf_delta_h.txt")
027
028 #Environmentvariablen für ArcGIS zuweisen
029 arcpy.env.workspace = database
030 arcpy.env.overwriteOutput = True
031
032 #Bezeichnungen der Datensaeetze in der Geodatenbank
033 dhm = "#"                #Hoehenmodell
034 strgraph = "#"          #Strassenraster
035 source_points = "#"     #Quellpunkte
036 destination_points = "#" #Zielpunkte
037 result_schema = "#"     #Vorlage fuer Ergebnistabelle
038 RasterClipperPolygons = "#" #Polygone zur Analysebegrenzung
039 relate_table = "#"     #Relationen der O-D-Matrix
040
041
042 """Funktionsdefinition"""
043 #Diese Funktion verschiebt die Geodaten in den Arbeitsspeicher
044 #des PCs, um hoehere Performance zu erreichen.
045 def moveGeodataToMemory():
046     wipe_in_memory()
047     fcList = arcpy.ListFeatureClasses()
048     rList = arcpy.ListRasters()
049     tList = arcpy.ListTables()
050
051     for fc in fcList:
052         print "adding feature class" + fc
053         memory_path = os.path.join("in_memory",fc)
```

```

054         arcpy.CopyFeatures_management(fc,memory_path)
055
056     print "Feature-Classes copied to memory"
057
058     for r in rList:
059         print "adding raster " + r
060         memory_path = os.path.join("in_memory",r)
061         arcpy.CopyRaster_management(r,memory_path)
062
063     print "Rasters copied to memory"
064
065     for t in tList:
066         print"adding tables " + t
067         memory_path = os.path.join("in_memory",t)
068         arcpy.CopyRows_management(t,memory_path)
069     print "Tables copied to memory"
070
071 #Funktion zum Leeren des Arbeitsspeichers
072 def wipe_in_memory():
073     arcpy.Delete_management("in_memory")
074
075 #Funktion zum automatischen Setzen aller ArcGIS Environments
076 def setupEnvironments():
077     arcpy.env.workspace = "in_memory"
078     buglist = arcpy.ListDatasets('*', 'ALL')
079     for dset in buglist:
080         print dset
081     print "Workspace is set to memory"
082     arcpy.env.overwriteOutput = True
083     arcpy.env.cellSize = dhm
084     print "cellsize is set"
085
086 #Funktion zum automatisierten Erstellen einer SQL-Abfrage:
087 def buildWhereClauseFromList(table, field, valueList):
088     fieldDelimited = arcpy.AddFieldDelimiters(\
089         arcpy.Describe(table).path,\
090         field\
091     )
092     whereClause = "%s IN(%s)" % (\
093         field, ', '.join(map(str, valueList))\
094     )
095     return whereClause
096
097 #Funktion zur Ausfuehrung der oben definierten SQL Abfrage.
098 #-->Selektiere alle Arbeitsgemeinden, welche von einer Wohngemeinde
099 #-->aus angesteuert werden.
100 def selectRelatedRecords(relation_table,\
101     source_gem,\
102     wohngem_field,\
103     arbeitsgem_field,\
104     destination_field):
105     arbeitsgem_ids = set(\
106         [row[0] for row in\
107         arcpy.da.SearchCursor(\
108             relation_table,\
109             [arbeitsgem_field],\
110             "Wohngemeinde = "+str(source_gem)\
111         )\
112     ]\
113     )
114     whereClause = buildWhereClauseFromList(\

```

Untersuchung des Körperenergieverbrauchs als evidenzbasierter Ansatz zur Unterstützung der Radverkehrsplanung

```
115         relation_table,\
116         destination_field,\
117         arbeitsgem_ids\
118     )
119     return whereClause
120
121     """Beginn der Anwendung"""
122
123     #Bewege alle Geodaten in den Arbeitsspeicher
124     print "moving data to memory"
125     moveGeodataToMemory()
126     #Setze alle Environments
127     print "setting environments"
128     setupEnvironments()
129
130     #Erzeuge Datensätze zum Speichern der Ergebnisse
131     print "Creating Feature Class for Results"
132     result_ftclass = arcpy.CreateFeatureclass_management(
133         "in_memory",\
134         "results_energy",\
135         "POINT",\
136         result_schema\
137     )
138
139     #Erstelle Cursor zum iterieren ueber alle begrenzenden Polygone
140     RasterClipperCursor = arcpy.da.SearchCursor(
141         RasterClipperPolygons,\
142         ["SHAPE@", "Wohngemeinde"]\
143     )
144
145     i = 0
146     j = 0
147
148     #Für jedes begrenzendes Polygon führe aus...
149     for polygon in RasterClipperCursor:
150
151         #Schleifennummer
152         print "Loop " + str(i)
153
154         #QuellgemeindeID
155         quellgem_ID = int(polygon[1])
156
157         #begrenze die Analyse für die vorliegende Gemeinde mittels Clip
158         costRaster = arcpy.Clip_management(\
159             strgraph,\
160             "#",\
161             "costRaster",\
162             polygon[0],\
163             "",\
164             "ClippingGeometry"\
165         )
166         verticalRaster = arcpy.Clip_management(\
167             dhm,\
168             "#",\
169             "verticalRaster",\
170             polygon[0],\
171             "",\
172             "ClippingGeometry"\
173         )
174
175     #Reset Extend
```

```

176     arcpy.env.extent = arcpy.sa.Raster(costRaster).extent
177
178 #bilde SQL-Clause fuer die Abfrage aller zur Wohngemeinde
179 #zugehoerigen Arbeitsgemeinden
180     whereClause = selectRelatedRecords(\
181         relate_table,\
182         polygon[1],\
183         "Wohngemeinde",\
184         "Arbeitsgemeinde",\
185         "GEMEINDE_I"\
186     )
187
188 #Frage die Zielpunkte der O-D-Paare als eigenen Layer ab
189     sample_points = arcpy.MakeFeatureLayer_management(\
190         source_points,\
191         "sampling_points",\
192         whereClause\
193     )
194
195 #Selektiere alle Quellpunkte der aktuellen Wohngemeinde
196     sourcepointCursor = arcpy.da.SearchCursor(\
197         source_points,\
198         ["SHAPE@", "mod_bev"],\
199         "GEMEINDE_I =" + str(polygon[1])\
200     )
201
202 #Weise den Zielpunkten die Quellgemeinde ID fuer die Identifikation
203 # der Widerstandsmasse zu.
204     arcpy.CalculateField_management(\
205         sample_points,\
206         "vonGemID",\
207         polygon[1],\
208         "PYTHON_9.3"\
209     )
210
211 #für jeden Quellpunkt der Wohngemeinde fuehre aus...
212     for sourcepoint in sourcepointCursor:
213         #Subschleifenzaehler
214         j = j + 1
215         print "subschleife " + str(j)
216         #Fuege Bevölkerungswerte der Quellzelle
217         #an die Ergebnistabelle an.
218         arcpy.CalculateField_management(\
219             sample_points,\
220             "sourcebev",\
221             int(sourcepoint[1]),\
222             "PYTHON_9.3"\
223         )
224         #Berechne den kumulativen Kostenraster gemaeß Funktionsinput
225         #von der Quellzelle der Wohngemeinde aus.
226         EnergyCostRaster = arcpy.sa.PathDistance(\
227             sourcepoint[0],\
228             costRaster,\
229             verticalRaster,\
230             "#",\
231             "#",\
232             verticalRaster,\
233             vf_table\
234         )
235
236     #Extrahiere die Widerstandswerte an den Zielpunkten

```

Untersuchung des Körperenergieverbrauchs als evidenzbasierter Ansatz zur Unterstützung der Radverkehrsplanung

```
237     sampledEnergy = ExtractValuesToPoints(\
238         sample_points,\
239         EnergyCostRaster,\
240         "points_to_merge",\
241         "#",\
242         "#"\
243     )
244
245     #Fuege die errechneten Widerstaende an die Ergebnistabelle an
246     arcpy.Append_management(\
247         sampledEnergy,\
248         result_ftclass\
249     )
250
251     #Kehre zu vollem Extent zurueck
252     arcpy.env.extent = arcpy.sa.Raster(strgraph).extent
253     #Zaehle den Gemeindeschleifenzaehler hoch
254     i = i + 1
255
256     #Nach Berechnung aller Widerstaende fuer saemtliche O-D-Paare,
257     #kopiere die Ergebnistabelle aus dem Arbeitsspeicher
258     #auf die Festplatte.
259     arcpy.CopyFeatures_management(\
260         result_ftclass,\
261         database+"/results_routingdist_bevmodel_250m"\
262     )
```

11.3 Tabellarische Auflistung der Radverkehrsentwicklung

Die hier gelisteten Tabellen entsprechen den Attributtabelle der Karten in Kapitel 6.2. Die Radverkehrsanteile zwischen 1971 und 1981 können anhand der bereitgestellten Informationen zum Radverkehrsanteil 2001 und den Änderungsraten abgeleitet werden.

Tabelle 8: Entwicklung der Radauspendlerströme nach Stadtregionen

SR Name	RV Anteil 2001	Ges. Verk. 2001	Entw. Rate 71-81	Entw. Rate 81-91	Entw. Rate 91-01	Entw. Rate 71-01	Mittlere Entw. Rate	StAbw. Entw. Rate	Mittlere Abs. Anzahl
Wien	1.51%	529375	-0.17%	0.46%	0.49%	0.79%	0.26%	0.30%	493226
Kufstein	1.53%	2093	-1.65%	0.51%	0.45%	-0.68%	-0.23%	1.00%	865
Eisenstadt	0.15%	3352	-0.34%	-0.25%	-0.12%	-0.71%	-0.24%	0.09%	2329
Innsbruck	2.10%	34875	-1.46%	0.58%	0.02%	-0.86%	-0.29%	0.86%	22472
Villach	0.50%	11223	-0.82%	-0.08%	0.03%	-0.87%	-0.29%	0.38%	6367
Feldkirch	4.60%	13716	-0.56%	0.22%	-0.79%	-1.13%	-0.38%	0.43%	7490
St. Johann im Pongau	0.36%	2235	-1.20%	0.21%	-0.53%	-1.52%	-0.51%	0.57%	965
St. Pölten	0.45%	9046	-1.44%	-0.02%	-0.07%	-1.53%	-0.51%	0.66%	5624
Spittal an der Drau	0.48%	3565	-1.71%	-0.13%	-0.15%	-1.98%	-0.66%	0.74%	2360
Steyr	1.91%	9658	-2.31%	-0.51%	0.78%	-2.04%	-0.68%	1.27%	6098
Leoben	1.91%	13924	-0.63%	-0.54%	-0.95%	-2.12%	-0.71%	0.18%	10707
Salzburg	3.39%	44563	-2.53%	0.61%	-0.28%	-2.21%	-0.74%	1.32%	25558
Bludenz	5.57%	3572	-2.22%	0.52%	-0.54%	-2.24%	-0.75%	1.13%	2280
Schwaz	5.08%	3091	2.02%	-1.37%	-3.00%	-2.35%	-0.78%	2.09%	1901
Klagenfurt	0.68%	15254	-1.96%	-0.35%	-0.17%	-2.48%	-0.83%	0.81%	9840
Linz	1.07%	70890	-2.10%	-0.87%	-0.29%	-3.26%	-1.09%	0.75%	46713
Graz	1.42%	48993	-2.48%	-0.94%	-0.15%	-3.57%	-1.19%	0.97%	29684
Wiener Neustadt	1.27%	7981	-1.76%	-3.02%	0.11%	-4.67%	-1.56%	1.28%	5060
Wels	1.70%	16381	-3.11%	-1.14%	-1.21%	-5.46%	-1.82%	0.91%	10737
Amstetten	1.20%	5260	-4.03%	-1.29%	-0.49%	-5.81%	-1.94%	1.52%	3286
Bregenz	6.74%	24003	-4.24%	-0.71%	-1.14%	-6.09%	-2.03%	1.57%	13055
Wörgl	4.05%	3510	-5.63%	1.04%	-1.77%	-6.36%	-2.12%	2.73%	2016
Krems an der Donau	1.41%	5546	-4.89%	-0.88%	-0.71%	-6.48%	-2.16%	1.93%	3612
Wolfsberg	0.75%	4684	-2.74%	-3.79%	-0.23%	-6.77%	-2.26%	1.49%	2118
Voitsberg	1.28%	5139	-5.11%	-1.27%	-0.67%	-7.05%	-2.35%	1.97%	3775
Gmunden	1.35%	6308	-5.41%	-1.52%	-0.31%	-7.23%	-2.41%	2.17%	4253
Weiz	3.98%	3642	-5.12%	-2.54%	-0.07%	-7.72%	-2.57%	2.06%	2317
Vöcklabruck	3.76%	8001	-3.94%	-2.30%	-1.55%	-7.78%	-2.59%	1.00%	6190
Knittelfeld	4.15%	7341	-2.79%	-2.27%	-3.51%	-8.58%	-2.86%	0.51%	5360
Braunau am Inn	3.89%	1800	-7.11%	-1.54%	-1.59%	-10.23%	-3.41%	2.62%	1182
Ried im Innkreis	4.36%	2727	-9.03%	-0.54%	-0.82%	-10.39%	-3.46%	3.94%	1985
Lienz	10.17%	2537	-11.05%	1.26%	-2.18%	-11.97%	-3.99%	5.18%	1488
Leibnitz	7.30%	3344	-12.86%	-3.23%	-4.45%	-20.54%	-6.85%	4.28%	2270
Ternitz	6.22%	2879	-6.71%	-10.09%	-8.26%	-25.06%	-8.35%	1.38%	2702

Quelle: Statistik Austria, 2005; eigene Darstellung, 2016.

Tabelle 9: Entwicklung der Radbinnenpendlerströme nach Stadtregionen

SR Name	RV Anteil 2001	Ges. Verk. 2001	Entw. Rate 71-81	Entw. Rate 81-91	Entw. Rate 91-01	Entw. Rate 71-01	Mittlere Entw. Rate	StAbw. Entw. Rate	Mittlere Abs. Anzahl
Lienz	31.96%	3967	6.68%	6.29%	5.62%	18.59%	6.20%	0.44%	4761
Weiz	18.22%	3387	2.87%	1.67%	6.47%	11.01%	3.67%	2.04%	4303
Wörgl	16.47%	3650	5.26%	2.83%	-0.22%	7.88%	2.63%	2.24%	4068
Schwaz	11.64%	3256	5.10%	1.53%	0.06%	6.68%	2.23%	2.12%	3932
Salzburg	13.78%	71496	1.85%	2.52%	2.28%	6.65%	2.22%	0.28%	78842
Bludenz	10.59%	4477	3.07%	0.88%	1.52%	5.48%	1.83%	0.92%	5709
Innsbruck	13.11%	49202	-0.71%	2.41%	3.07%	4.78%	1.59%	1.65%	56206
Knittelfeld	11.90%	9372	5.71%	0.98%	-1.96%	4.73%	1.58%	3.16%	13838
Feldkirch	14.29%	15351	3.11%	1.29%	0.32%	4.72%	1.57%	1.16%	19121
Braunau am Inn	21.53%	5824	3.72%	-0.53%	1.35%	4.54%	1.51%	1.74%	7038
Graz	10.52%	91907	0.13%	1.38%	2.85%	4.36%	1.45%	1.11%	114624
Bregenz	19.90%	29845	2.70%	1.79%	-0.34%	4.15%	1.38%	1.27%	36736
Leibnitz	15.82%	2364	5.05%	-0.52%	-1.13%	3.40%	1.13%	2.78%	3332
Eisenstadt	5.24%	4332	2.26%	0.56%	0.53%	3.35%	1.12%	0.81%	5581
Kufstein	11.86%	4418	5.50%	0.79%	-2.99%	3.30%	1.10%	3.48%	4891
Leoben	11.87%	18057	4.08%	-0.13%	-0.75%	3.20%	1.07%	2.14%	28399
Spittal an der Drau	6.85%	6189	2.96%	0.42%	-0.46%	2.92%	0.97%	1.45%	7289
Ried im Innkreis	12.05%	4217	3.42%	-0.82%	-0.26%	2.34%	0.78%	1.88%	6012
Vöcklabruck	11.03%	7703	3.41%	0.04%	-1.28%	2.17%	0.72%	1.97%	11051
Voitsberg	8.38%	4189	2.43%	-1.28%	0.83%	1.97%	0.66%	1.52%	6747
Krems an der Donau	11.29%	8176	2.96%	-0.12%	-0.87%	1.96%	0.65%	1.66%	10391
Villach	7.77%	20871	-0.08%	0.91%	1.09%	1.91%	0.64%	0.52%	23149
Wien	4.41%	202882	1.59%	0.10%	0.10%	1.79%	0.60%	0.70%	267845
Wiener Neustadt	13.34%	11636	2.54%	-1.04%	0.18%	1.68%	0.56%	1.49%	14582
Gmunden	6.54%	7447	0.99%	0.03%	0.25%	1.26%	0.42%	0.41%	9118
Steyr	4.99%	14879	0.27%	-0.35%	1.16%	1.08%	0.36%	0.62%	18231
St. Johann im Pongau	5.75%	4625	3.22%	1.35%	-3.89%	0.67%	0.22%	3.01%	4862
Linz	5.16%	85314	0.35%	-1.01%	0.16%	-0.50%	-0.17%	0.60%	111990
Amstetten	9.33%	9344	0.56%	0.66%	-1.82%	-0.60%	-0.20%	1.14%	10323
Klagenfurt	9.41%	35746	-1.92%	0.91%	0.20%	-0.81%	-0.27%	1.20%	39825
Wolfsberg	7.32%	9031	0.40%	-0.67%	-0.73%	-0.99%	-0.33%	0.52%	10488
St. Pölten	11.34%	19553	2.02%	-2.30%	-1.05%	-1.34%	-0.45%	1.82%	23673
Ternitz	13.76%	2303	3.39%	-1.19%	-3.54%	-1.35%	-0.45%	2.88%	4211
Wels	11.39%	23398	-1.06%	-3.00%	-3.13%	-7.19%	-2.40%	0.94%	26554

Quelle: Statistik Austria, 2005; eigene Darstellung, 2016.

11.4 Physikalische Zusammenhänge

Da Körperenergieverbrauch durch physikalische Größen beschrieben werden kann, werden hier die grundlegenden physikalischen Zusammenhänge erklärt (Jaros et al, 2011, S. 60ff):

- Arbeit W [J]:

Arbeit wird in der Physik über die Einheit Joule identifiziert und ist ein grundlegendes Maß für Energie. Wenn diese in Relation mit Distanz d gesetzt wird, ist daraus die zur Überwindung notwendige Kraft F in Newton, in Relation zu einer Zeitspanne t gesetzt, die physikalische Leistung P in Watt ableitbar.

$$W = F * d$$

bzw.

$$W = P * t$$

- Kraft F [N]:

Newton ist die physikalisch Einheit für Kraft, welche zur Bewegung von Masse über eine Distanz d notwendig ist und steht daher folgendermaßen im Zusammenhang mit Arbeitsenergie W :

$$F = \frac{W}{d}$$

- Leistung P [W]:

Watt setzt als Einheit für Leistung die aufgewandte Energie W in Relation zur Zeit t , was den Aufwand einer Tätigkeit über einen Zeitraum beschreibbar macht:

$$P = \frac{W}{t}$$

- Brennwert [kcal]:

Die Einheit Kilokalorie entstammt aus den Ernährungswissenschaften und entspricht der Arbeitsenergie, welche benötigt wird um die Temperatur von einem Kilogramm Wasser um 1°Celsius zu erwärmen. Physikalisch gesehen ist eine Kilokalorie daher einem Energieaufwand von 4186,8 Joule oder 4,186 Kilojoule gleichzusetzen. Wilson et al (2004, S. 153) geht davon aus, dass die Aufnahme von einer Kilokalorie an Nahrung, aufgrund des geringen Effizienzgrades bei der chemischen Umsetzung im Körper, in einem Kilojoule an verfügbarer Energie resultiert.

11.5 Häufigkeitstabellen der ausgeschlossenen Fälle

Tabelle 10: Häufigkeitstabelle der ausgeschlossenen Fälle der multivariaten Analyse

Auspendler 2001			Binnenpendler 2001		
Anz. interzonale Radpendler	Häufigkeit	Kum. Prozent	Anz. Intrazonale Radpendler	Häufigkeit	Kum. Prozent
1	125	42.7%	1	114	36.7%
2	50	59.7%	2	48	52.1%
3	29	69.6%	3	24	59.8%
4	20	76.5%	4	20	66.2%
5	14	81.2%	5	12	70.1%
6	12	85.3%	6	7	72.3%
7	11	89.1%	7	6	74.3%
8	6	91.1%	8	13	78.5%
9	4	92.5%	9	5	80.1%
10	5	94.2%	10	9	83.0%
11	5	95.9%	11	9	85.9%
12	2	96.6%	12	6	87.8%
13	1	96.9%	13	2	88.4%
14	2	97.6%	15	1	88.7%
19	1	98.0%	18	1	89.1%
>19	6	100.0%	>18	34	100.0%
n	293		n	311	

Quelle: eigene Darstellung, 2016.

11.6 Korrelationsmatrizen

Tabelle 11: Korrelationsmatrize aller Modellvariablen.

Interzonale Variablen	Radanteil	Routingdistanz	Hubwiderstand	Höhenunterschied
Radanteil	1.000	-,742**	-,605**	-,605**
Routingdistanz	-,742**	1.000	,585**	,585**
Hubwiderstand	-,605**	,585**	1.000	1,000**
Höhenunterschied	-,605**	,585**	1,000**	1.000
Intrazonale Variablen	Radanteil	Routingdistanz	Hubwiderstand	Höhenunterschied
Radanteil	1.000	-,375**	-,737**	-,744**
Routingdistanz	-,375**	1.000	,670**	,650**
Hubwiderstand	-,737**	,670**	1.000	,998**
Höhenunterschied	-,744**	,650**	,998**	1.000

N (interzonal) = 1322, N (intrazonal) = 1421

** Korrelation ist signifikant auf einem Niveau von 0.01 (1-Tailed)

Quelle: eigene Darstellung, 2016.

11.7 Definitionen der Volkszählung

Definitionen gemäß der Volkszählung

Seit 1971 liegen diese Daten in maschinenlesbarem Format vor und folgen dabei konkreten Definitionen in Bezug auf den Begrifflichkeit des Pendlers:

- **Pendlerinnen und Pendler** sind Teil der Erwerbstätigen Bevölkerung (Personen ab 15 Jahren, welche mindestens eine Wochenstunde lang einer bezahlten Tätigkeit nachgeht) und „täglich oder auch in größeren zeitlichen Abständen einen Weg zwischen Wohnung und Arbeitsstätte zurücklegen müssen“ (Statistik Austria, 2005, S. 11). Wenn die Arbeitsstätte eines Erwerbstätigen auf dessen Wohngrundstück liegt, so wird dieser als **Nichtpendler** geführt. Der Begriff Pendeln impliziert dabei, dass die zurückgelegte Strecke sowohl Hin- als auch Rückweg beinhaltet.
- **Aus- bzw. Einpendler** bezeichnen Erwerbstätige, „deren Wohn- und Arbeitsort in verschiedenen Gemeinden liegt“ (Statistik Austria, 2005, S. 12). Aus dem Betrachtungswinkel der Wohngemeinde sind sie Auspendler, in der Arbeitsgemeinde stellen sie Einpendler dar. Sie werden im Laufe der Arbeit auch als interzonale Pendler behandelt, da sie sich zwischen Verkehrszonen bewegen.
- **Binnenpendler** bewegen sich zwischen ihrem Arbeitsort innerhalb der Wohngemeinde und ihrer Wohnadresse (Statistik Austria, 2005, S. 12). Wenn der Erwerbstätige hingegen an seiner Wohnadresse auch arbeitet, so wird er hingegen – wie in Punkt 1 angeführt – als Nichtpendler in der Statistik geführt. Binnenpendler werden weiters auch als Intrazonale Pendler bezeichnet, da sie sich innerhalb von Verkehrszonen (Gemeinden) bewegen.

Zusätzlich zu den oben angeführten Definitionen muss der Unterschied zwischen Tages- und Nichttagespendlern hervorgehoben werden. Nichttagespendler kehren per Definitionem nicht täglich an den Wohnort zurück, sondern tun dies in unterschiedlichen Zeitabständen.

