

Marlon Philipp, Fabian Adelt

**OPTIONEN DER POLITISCHEN REGULIERUNG
DES PERSONENVERKEHRS**

ERGEBNISSE EINER SIMULATIONSTUDIE

Soziologisches Arbeitspapier Nr. 53/2018

Herausgeber

Prof. em. Dr. H. Hirsch-Kreinsen

Prof. Dr. J. Weyer

JProf. Dr. M. Wilkesmann

OPTIONEN DER POLITISCHEN REGULIERUNG DES PERSONENVERKEHRS

ERGEBNISSE EINER SIMULATIONSSTUDIE

Marlon Philipp, Fabian Adelt

**Soziologisches Arbeitspapier Nr. 53
(März 2018)**

TU Dortmund

ISSN 1612-5355

Herausgeber

Prof. em. Dr. Hartmut Hirsch-Kreinsen
vormals Lehrstuhl Wirtschafts- und Industriesoziologie
Hartmut.Hirsch-Kreinsen@tu-dortmund.de
www.wiwi.tu-dortmund.de/wiso/de/fakultaet/ehemalige/hirsch-kreinsen/index.html

Prof. Dr. Johannes Weyer
Fachgebiet Techniksoziologie
johannes.weyer@tu-dortmund.de
www.wiwi.tu-dortmund.de/wiwi/ts

JProf. Dr. Maximiliane Wilkesmann
Vertretung Lehrstuhl Wirtschafts- und Industriesoziologie
Maximiliane.Wilkesmann@tu-dortmund.de
www.wiwi.tu-dortmund.de/wiwi/is

Technische Universität Dortmund
Fakultät Wirtschaftswissenschaften
D-44221 Dortmund

Ansprechpartnerin:

Britta Tusk, e-mail: is.wiwi@tu-dortmund.de

Die Soziologischen Arbeitspapiere erscheinen in loser Folge. Mit ihnen werden Aufsätze (oft als Preprint), sowie Projektberichte und Vorträge publiziert. Die Arbeitspapiere sind daher nicht unbedingt endgültig abgeschlossene wissenschaftliche Beiträge. Sie unterliegen jedoch in jedem Fall einem internen Verfahren der Qualitätskontrolle. Die Reihe hat das Ziel, der Fachöffentlichkeit soziologische Arbeiten aus der Fakultät Wirtschaftswissenschaften der Technischen Universität Dortmund vorzustellen. Anregungen und kritische Kommentare sind nicht nur willkommen, sondern ausdrücklich erwünscht.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Theoretischer Bezug	2
2.1	Die Multi-Level Perspective.....	2
2.1.1	Das soziotechnische Regime.....	2
2.1.2	Die soziotechnischen Nischen.....	3
2.1.3	Die soziotechnische Landscape.....	4
2.1.4	Der soziotechnische Wandel.....	4
2.2	Beschreibung der Verkehrspolitik.....	5
3	Mehrebenen-Modellierung des deutschen Personenverkehrs	7
3.1	Die Genese des heutigen Regimes.....	7
3.2	Das Regime des Personenverkehrs in Deutschland.....	8
3.2.1	Auto.....	8
3.2.2	Fahrrad	9
3.2.3	ÖPNV	10
3.3	Die Landscape	10
3.4	Nischenentwicklungen.....	12
3.4.1	Elektrisierung des Verkehrs	12
3.4.2	Sharing-Angebote	13
3.5	Entwicklung des deutschen Personenverkehrs	14
4	Politische Eingriffsmöglichkeiten in den Personenverkehr	16
4.1	Who governs?.....	16
4.2	How to govern?	17
4.3	What to govern?.....	18
4.3.1	Fahrrad	19
4.3.2	Auto.....	20
4.3.3	ÖPNV	21
5	Agentenbasierte Simulation des Personenverkehrs.....	23
5.1	SimCo	23
5.1.1	Der Aufbau von SimCo.....	23
5.1.2	Das Szenario.....	25
5.2	Implementierung der verkehrspolitischen Eingriffe.....	28
5.2.1	Experiment 1: Komfortsteigerung Fahrrad	28
5.2.2	Experiment 2: Erhöhung der Anzahl von Bike-only-Straßen	28
5.2.3	Experiment 3: Verteuerung des Autos	29
5.2.4	Experiment 4: Verlangsamung des Autos	29
5.2.5	Experiment 5: Reduzierung der Kosten des ÖPNV	29
5.3	Auswertung der Experimente	30
5.3.1	Auswertung Experiment 1: Komfortsteigerung des Fahrrads	31
5.3.2	Auswertung Experiment 3: Verteuerung des Autos.....	35
5.3.3	Auswertung Experiment 4: Verlangsamung des Autos	40
5.4	Vergleich und Diskussion.....	44
5.4.1	Vergleich.....	44
5.4.2	Diskussion.....	46

6	Fazit und Ausblick.....	50
7	Anhang.....	I
8	Literaturverzeichnis	V
9	Abbildungsverzeichnis.....	XV
10	Tabellenverzeichnis	XVII

Vorwort

Seit der Simulator SimCo am Fachgebiet Techniksoziologie operationell läuft, ist eine Reihe von Experimenten zu unterschiedlichen Themenstellungen durchgeführt worden. „SimCo“ steht für „Simulation of the Governance of Complex Systems“ – ein agentenbasiertes Simulations-Framework, mit Hilfe dessen wir das Geschehen im Straßenverkehr abbilden und vor allem die Vielzahl von Einzelentscheidungen unterschiedlichster Akteure berücksichtigen können. Zudem erlaubt SimCo, die Wirkungen unterschiedlicher Eingriffe in komplexe Systeme zu studieren.

Fabian Adelt hat SimCo im Rahmen seines Dissertationsprojekts entwickelt und technisch implementiert. Gemeinsam mit Sebastian Hoffmann hat er Experimente zum Wandel des Regimes der Automobilität durchgeführt, deren Ergebnisse mittlerweile im „Journal of Artificial Societies and Social Simulation“ veröffentlicht wurden.

Aus einer Reihe von Bachelorarbeiten, die im Jahr 2017 durchgeführt wurden, sticht insbesondere die Arbeit von Marlon Philipp hervor, deren Konzeption und Ergebnisse wir hiermit einer breiteren Öffentlichkeit bekannt machen wollen. Marlon hat sich mit Optionen einer nachhaltigen Transformation des Verkehrssystems befasst und Simulations-Experimente durchgeführt, die zu teilweise überraschenden Ergebnissen geführt haben. So erweist sich etwa ein kostenloser öffentlicher Nahverkehr – zumindest in unserem Modell – als nahezu wirkungsloses Instrument im Vergleich zu anderen Maßnahmen wie etwa der Einführung von Tempolimits oder der Verteuerung des Automobils.

Simulationsexperimente mit dem Simulator SimCo eröffnen uns die Option, Zukunftsszenarien durchzuspielen und so die Debatten über Strategien einer nachhaltigen Transformation des Verkehrssystems mit unseren experimentell erzielten Ergebnissen zu bereichern.

Dortmund, im März 2018

Johannes Weyer

Abstract

Dieses Arbeitspapier beschäftigt sich mit politischen Steuerungsmöglichkeiten zur Begünstigung eines nachhaltigeren Personenverkehrs. Hierfür wird zunächst theoretisch die Entwicklung und der aktuelle soziotechnische Stand des Personenverkehrs anhand der Multi-Level Perspective nach Geels veranschaulicht und gezeigt, dass eine Elektrifizierung und Digitalisierung des Verkehrs in der Zukunft durchaus plausibel ist, aber nicht zwangsläufig mit Nachhaltigkeitsgewinnen einhergeht. Daher ist, um einen nachhaltigen Personenverkehr zu schaffen, vielmehr eine weitergehende politische Steuerung von Nöten, um den dominierenden motorisierten Individualverkehr einzuschränken. Aus diesem Grund wird die politische Dimension des Personenverkehrs mittels eines Konzepts von Hillmann beschrieben und fünf Eingriffsmöglichkeiten identifiziert, welche von unterschiedlichen deutschen Akteuren gefordert werden um einen nachhaltigen Entwicklung des Personenverkehrs zu unterstützen. Diese Hypothesen werden im zweiten Teil des Arbeitspapiers in die in NetLogo programmierte agentenbasierte Simulation SimCo überführt und empirisch auf ihre Wirksamkeit im Hinblick auf gesellschaftlichen Nutzen, Emissionen und Straßenauslastung überprüft. Es stellt sich heraus, dass sowohl eine Komforterhöhung des Fahrrads, als auch eine Kostenerhöhung des Autos oder die Einführung einer Tempo-30-Zone valide Eingriffe sind um einen nachhaltigen Straßenverkehr zu begünstigen, wobei sie sich in ihrer Wirkungseffizienz durchaus unterscheiden. Eine Kostenreduzierung des ÖPNV oder der Ausbau des Fahrradstraßennetzes haben hingegen keine Auswirkungen. Weitergehende Ergebnisse zeigen unter anderem, dass für Parameter wie den wahrgenommenen Komfort Grenzwerte bestehen, bei deren Erreichen ganze Bevölkerungsgruppen ihr Verhalten ändern. Schließlich kann aus den Simulationsergebnissen gefolgert werden, dass eine moderate Erhöhung der Kosten des Autos einen Nutzenanstieg für die Gesamtbevölkerung bedeutet.

Abstract

This paper is focusing on the possibilities to foster a sustainable person transport in Germany. Therefore it first theoretically analyses the evolution and current state of personal transport based on the “multi-level perspective” concept by Geels. It is shown that the ongoing electrification and digitalization is not necessarily leading towards a sustainable future. Thus, political steering is essential to reduce the use of motorized individual transport. Hence, this paper uses a concept by Hillman to describe the governance dimension of the personal transport and identifies five main hypotheses by different political actors of the German landscape to achieve a more sustainable transport. These hypotheses then get empirically tested by using an agent-based simulation called SimCo, implemented using NetLogo. Results are evaluated in the light of possible social benefits, emissions and street utilization. Results include that raising the comfort of the bicycle, as well as raising the operation cost of cars and lower in-town speed limits are valid ways to achieve sustainable transport. Whereas lowering the cost of public transport or raising the number of bicycle streets had no impact on sustainability. Further results include that real thresholds exist, which lead to changes in behavior of whole agent type groups and that a moderate raise in costs of cars leads to a raise in benefit for every agent.

1 Einleitung

Die Existenz des fortschreitenden, durch den Menschen verursachten Klimawandels ist in der Forschung (vgl. Anderegg et al. 2010: 12107) ebenso wie in der Politik und der europäischen Bevölkerung (vgl. Eurobarometer 2014: 5) unumstritten. Sowohl auf internationaler, europäischer, nationaler und regionaler Ebene wurden Ziele für eine Verlangsamung des Klimawandels durch eine Reduzierung von Treibhausgasen festgesetzt. Deutschland ist hierbei auf dem Weg, seine sich selbst auferlegten Ziele zu erfüllen. Der Transportsektor wird diesen Anforderungen im Gegensatz zum kumulierten Gesamtergebnis nicht gerecht, da er weit hinter den geforderten Emissionsreduzierungen zurückbleibt. Trotzdem ist er mit 20 % des gesamten CO₂ Ausstoßes Deutschlands (vgl. Reutter & Reutter 2016: 77) ein nicht zu vernachlässigender Faktor für die weitere nachhaltige Entwicklung Deutschlands und erfordert daher eine genauere Betrachtung.

Der Transportsektor setzt sich zusammen aus einem komplexen Verbund diverser privater und öffentlicher Akteure und ist bereits seit 2004 Gegenstand der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie. Im Zuge des voranschreitenden Wandels werden Mobilitätskonzepte der Regierung ebenso wie Empfehlungen und Forderungen von Nichtregierungsorganisationen veröffentlicht (vgl. ADAC 2016; ADFC 2013), um den Transportsektor in zukünftige, nachhaltige Szenarien zu steuern. In der Wissenschaft findet sich eine Vielzahl von Fallbeispielen, welche sowohl den Bereich „Sustainable Transport“ (vgl. Nykvist & Nilsson 2015; Geels 2012), als auch die diversen technischen und organisatorischen Möglichkeiten zur Umsetzung einer nachhaltigen Zukunft beschreiben. Allerdings bieten die klassischen empirischen Ansätze neben den theoretischen Arbeiten nur Einblicke in das Handeln einzelner Individuen zu einem bestimmten Zeitpunkt. Das komplexe Wechselspiel der Akteure bleibt größtenteils unbeachtet (vgl. Gilbert 2007a: 119).

Daher soll in diesem Arbeitspapier die Frage beantwortet werden, wie die soziotechnische Entwicklung des Personenverkehrs verläuft, welche Optionen zur Regulierung des Personenverkehrs hin zu einer nachhaltigeren Zukunft bestehen und was die empirisch bestimmten Konsequenzen der formulierten Eingriffe sind.

Hierfür wird zunächst theoretisch die aktuelle soziotechnische Entwicklung des Personenverkehrs anhand der Multi-Level Perspective (vgl. Geels 2002) dargestellt (Kapitel 3). Im Anschluss werden unter Rückgriff auf ein Konzept von Hillman et al. (2011) wichtige Akteure der Verkehrspolitik vorgestellt und deren empfohlene politische Eingriffsmöglichkeiten für einen nachhaltigeren Personenverkehr zu Hypothesen kondensiert (Kapitel 4.3). Nachfolgend wird im empirischen Teil der Arbeit das Simulationsframework SimCo vorgestellt (Kapitel 5.1) und die zuvor formulierten Hypothesen in SimCo-Szenarien umgewandelt (Kapitel 5.2). Final werden die durchgeführten Experimente ausgewertet und miteinander verglichen und sowohl wissenschaftliche als auch realpolitische Konsequenzen gezogen.

2 Theoretischer Bezug

Der theoretische Teil dieser Arbeit beruht auf dem Konzept der Multi-Level Perspective nach Geels (2002), wobei die politischen Eingriffsmöglichkeiten anhand eines auf drei Fragen basierenden Konzeptes von Hillmann genauer erläutert werden.

2.1 Die Multi-Level Perspective

Die Multi-Level Perspective (MLP) ist ein von Frank W. Geels 2002 vorgestelltes und später in der Zusammenarbeit unter anderem mit Johan Schot 2007 weiter entwickeltes Modell zur Beschreibung soziotechnischen Wandels. Geels unterteilt das Modell in drei heuristische Konzeptionen, welche sich im Zeitverlauf verändern und gegenseitig beeinflussen: Das soziotechnische Regime, die soziotechnische Landscape und die soziotechnischen Nischen. Das Zusammenspiel der drei Ebenen, welches durch den Zeitpunkt und die Art der Interaktion beeinflusst wird, kann einen Regimewechsel hervorrufen (vgl. ebd.: 399).

2.1.1 Das soziotechnische Regime

Das soziotechnische Regime basiert auf dem von Nelson und Winter eingeführten Begriff des technischen Regimes, welches technische Entwicklung und Innovation, abseits einer exklusiv wirtschaftlichen Grundlage, erklärt. Vielmehr entsteht das technische Regime durch das Teilen von kognitiven Routinen, Überzeugungen und Daumenregeln unter beteiligten Akteuren wie beispielsweise Ingenieuren (vgl. Nelson & Winter 1977: 56). Geels (2007: 400) erweitert dieses Modell, indem neben der technischen und wirtschaftlichen Dimension auch politische und soziologische Aspekte in die Regimebildung miteinbezogen werden. So beinhaltet das soziotechnische Regime neben dem technischen Subsystem auch ein soziokulturelles, ein politisches, ein wissenschaftliches und ein wirtschaftliches Subregime (vgl. Abbildung 1). Weiterhin definiert Geels das Regime als eine „deep structure“ (vgl. Geels 2002: 1260), also als ein fest verankertes Konstrukt, welches Stabilität für die beteiligten Akteure schafft. Wandel findet in soziotechnischen Regime daher

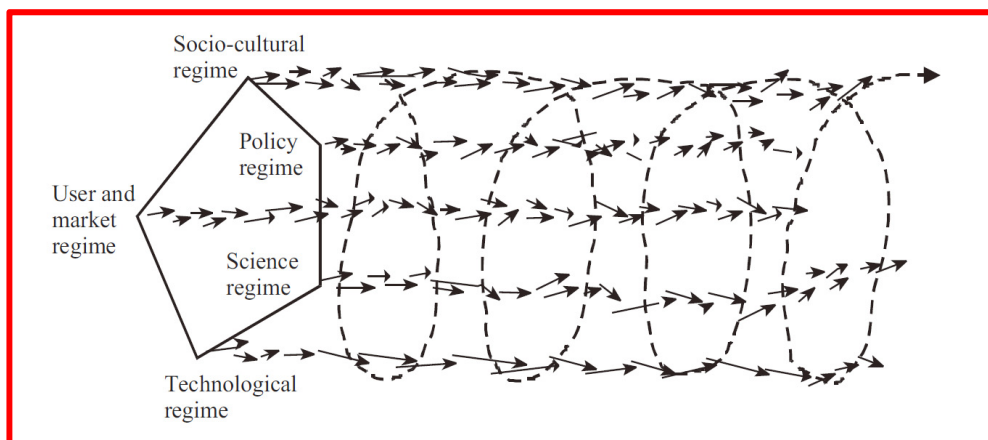


Abbildung 1: Inkrementeller Wandel des soziotechnischen Regimes (in Anlehnung an Geels 2011: 27)

nur inkrementell, d. h. in kleinen Anpassungsschritten statt, in Abbildung 1 durch die kleinen, in die gleiche Richtung weisenden Pfeile symbolisiert. Dies liegt unter anderem an einem „Lock-in“-Effekt (hervorgerufen bspw. durch steigende Skalenerträge, Einigung auf Industriestandards oder bereits getätigte Investitionen), der abrupte Veränderungen verhindert, da eine radikale Änderung einen übermäßig großen Aufwand bedeuten würde. Der inkrementelle Wandel geschieht durch die „duality of structure“ (vgl. Geels 2011: 27): Akteure sind durch Regeln gelenkt, aber erschaffen ebenso stetig neue Regeln, an die sie auch selbst gebunden sind (vgl. ebd.).

2.1.2 Die soziotechnischen Nischen

Die soziotechnischen Nischen bezeichnet Geels als „incubation rooms“ (vgl. Geels & Schot 2007: 400), also als „Brutkästen“, da sie einen vor dem bestehenden Regime geschützten Raum bieten, in welchem sich radikale Innovationen und Ideen entwickeln können. Sie sind daher die Grundlage für einen möglichen Regimewechsel, da die Nischen bei entsprechendem Erfolg das soziotechnische Regime ersetzen oder verändern können. Der „incubation room“ ist notwendig, da die Nischen meist aufgrund mangelnder technischer oder wirtschaftlicher Ausgereiftheit durch eine niedrige Performanz gekennzeichnet sind. Typische Beispiele für Nischen sind Produktentwicklungslabore oder Start-Ups. Unterstützung können die Nischen von dem bestehenden Regime erfahren, falls die Akteure des Regimes Erfolgsaussichten für die soziotechnische Nische sehen und sie beispielsweise durch Investitionen finanzieren. Die drei wichtigsten Prozesse, die in der Nischenentwicklung ablaufen, sind: Die Findung der Vision bzw. des Projektziels, der Aufbau eines unterstützenden Akteurnetzwerkes und ein genereller Lernprozess der Nischenakteure, der viele Facetten umschließt (Organisation, Politik, Technik). Der Lernprozess hilft der Nische in dem entsprechenden Sektor sicher zu agieren. Nischen nehmen Schwung auf, wenn sich ein dominantes Design herausbildet, das Akteurnetzwerk wächst und die Nische eine größere Akzeptanz erfährt (vgl. Geels 2011: 27–28; Geels 2002: 1260). Zumeist existiert eine Vielzahl von sich gleichzeitig entwickelnden Nischen (vgl. Abbildung 2), welche unterschiedliche Ansätze verfolgen. Einige Nischen haben keinen Erfolg, andere Nischen rekombinieren ihre Lösungsansätze, wodurch sich final ein dominantes Design herausbilden kann.

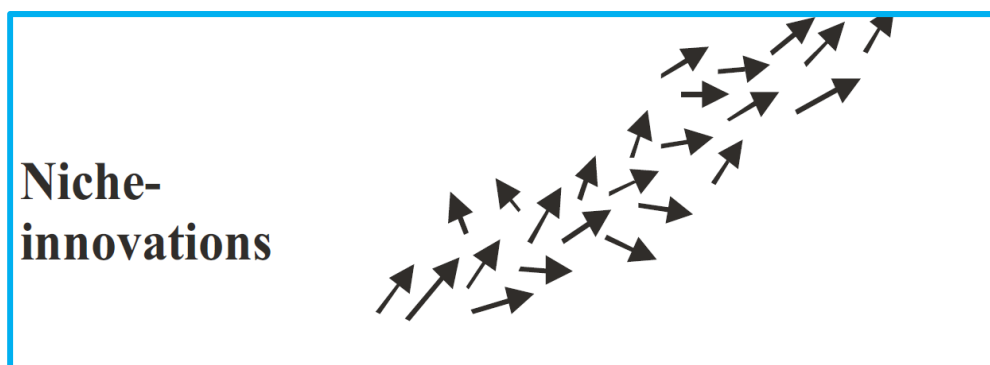


Abbildung 2: Nischeninnovationen (in Anlehnung an Geels 2011: 28)

2.1.3 Die soziotechnische Landscape

Die Landscape ist im Gegensatz zum Regime und den Nischen, welche auf der Mikroperspektive angesiedelt sind, der umfassende gesellschaftliche Kontext. Daher beeinflusst die Landscape sowohl die Regime- als auch die Nischenentwicklung und übt bei einer Veränderung einen Anpassungsdruck auf diese aus. Die Landscape selbst ist in der kurzen Frist nicht durch Regime oder Nischen beeinflussbar. Somit kann sie unter anderem Aspekte wie den demographischen Wandel, politische Ideologien und soziale Werte sowie Umweltentwicklungen (vgl. Geels 2002: 1260) umfassen. Zumeist verändert sich die Landscape nur sehr träge (z. B. Ausbildung eines gesellschaftlichen Umweltbewusstseins), trotzdem kann auch schnellerer Wandel in der Landscape, bedingt durch Krisen (z. B. Ölpreissteigerungen, GAUs, Kriege), stattfinden (vgl. Geels 2011: 28–29).

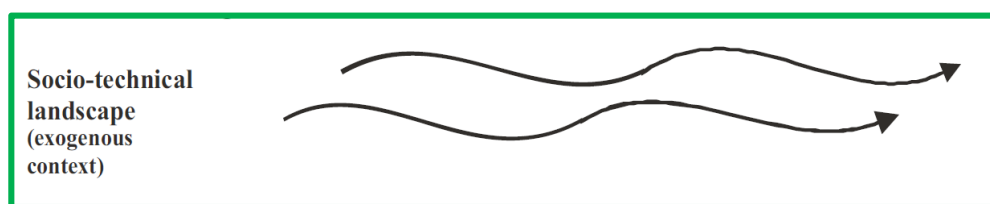


Abbildung 3: Soziotechnische Landscape (in Anlehnung an Geels 2011: 28)

2.1.4 Der soziotechnische Wandel

Schematisch läuft eine Systemtransition, also ein Wechsel von einem soziotechnischen Regime zu einem neuen soziotechnischen Regime, wie folgt ab (siehe Abbildung 4, vgl. Philipp 2016: 6):

1. Es existiert ein Regime aus stabilen Akteurskonstellationen und Verhaltensregeln. Das Regime kann sich daher nur marginal verändern und wird von Geels (2011: 28) als „dynamically stable“ bezeichnet.
2. Parallel zum Regime entwickeln sich Nischeninnovationen, welche sowohl durch die Landscape (z. B. wechselnde Ideologien) als auch durch das bestehende Regime (z. B. durch Finanzierungen) beeinflusst und geleitet werden.
3. Durch eine sich verändernde Landscape kann Druck auf das bestehende Regime entstehen, da es sich selbst nicht schnell genug (Trägheit) oder gar nicht an die Veränderung anpassen kann. Nischen können sich schneller an die Veränderungen in der Landscape anpassen und dynamisch entsprechende Lösungen entwickeln.
4. Durch den Druck auf das Regime kann sich ein „Window of Opportunity“ (vgl. Geels & Schot 2007: 400) bilden, also ein Zeitpunkt der Schwäche eines Regimes, in welchem eine wirtschaftlich effiziente Nische, in der bereits ein dominantes Design und ein festes Akteurnetzwerk entwickelt wurde, das bestehende Regime ablösen kann.
5. Die Nische stabilisiert sich und es entsteht ein neues Regime mit eigenen gefestigten Akteurs- und Regelkonstellationen, welches sich langfristig auch verändernd auf die Landscape auswirken kann.

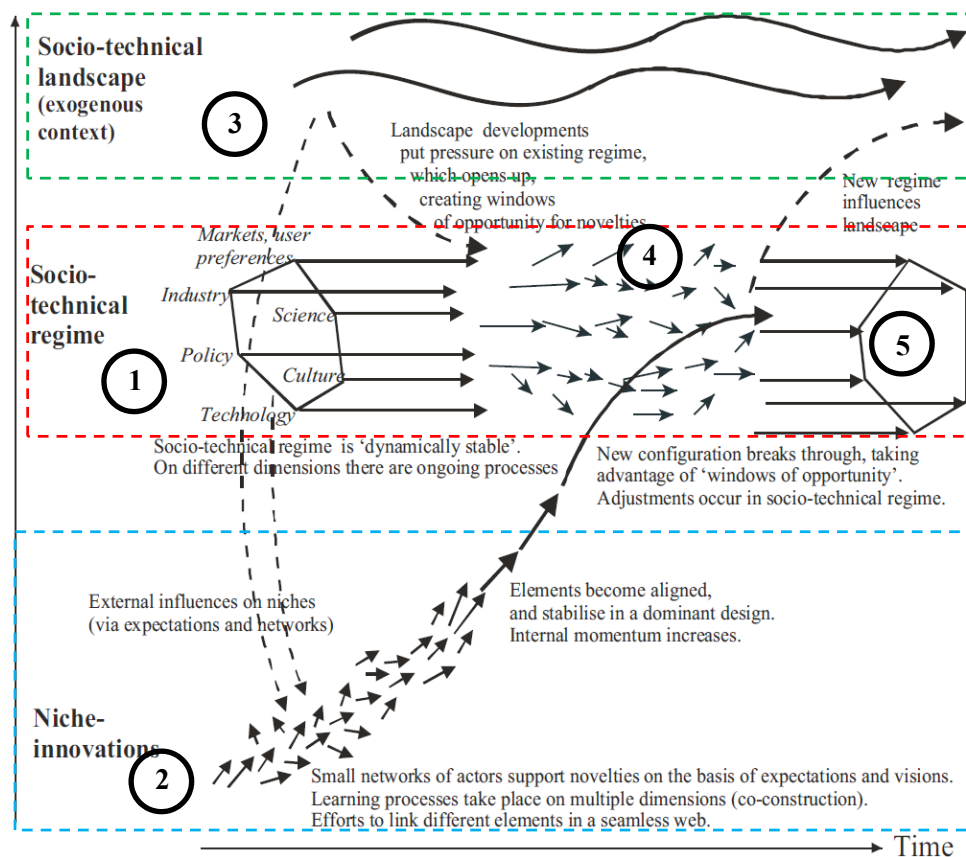


Abbildung 4: Zusammenspiel der drei Ebenen der Multi-Level Perspective (in Anlehnung an Geels 2011: 28)

2.2 Beschreibung der Verkehrspolitik

Um die verkehrspolitischen Akteure und deren mögliche Eingriffe zu beschreiben, greift diese Arbeit auf ein von Hillman et al. (2011) entwickeltes Schema, bestehend aus drei Kernfragen, zurück. Dieses ist hilfreich, da politische Interaktionen im Laufe der Zeit komplexer geworden sind und nicht mehr alleine vom Staat ausgehen. Vielmehr ist die heutige Politik ein Zusammenspiel zwischen privaten und öffentlichen Akteuren. Die drei Kernfragen sind daher eine Umformulierung der drei Dimensionen Policy, Politics, Polity von Governance (vgl. ebd.: 409) und sind wie folgt definiert:

Who governs?

„Who governs?“ (deutsch: „Wer regiert?“) fragt zum einen nach der Art des Akteurs, ob er Vertreter des privaten Sektors oder des öffentlichen Sektors ist bzw. eine Kombination der beiden. Zum anderen umschließt die Frage „Who governs“ auch die Wirkungsebene des Akteurs, also ob es sich um einen lokalen, nationalen oder internationalen Akteur handelt.

How to govern?

„How to govern?“ (deutsch: „Wie wird regiert?“) fragt nach der Art des politischen Eingriffs. Hillman et al. unterscheiden hierbei vier Eingriffsmechanismen: 1. *regulativ* durch das hierarchische Setzen von festen Grenzen, 2. *marktkonform* durch

Ändern von marktwirtschaftlichen Anreizen, 3. *kognitiv* durch Forschungsanreize und das Aufbauen von Akteurnetzwerken und 4. *normativ* durch das Beeinflussen von Werten und Normen der Akteure. Weiterhin unterscheiden Hillmann et al. nach der Wirkungsart: Handelt es sich um einen Market Pull, also eine Steigerung der Nachfrage, oder um einen Technology Push, also um die aktive Unterstützung eines Projektes.

What to govern?

Die Frage „What to govern?“ (deutsch: „Was wird regiert?“) befasst sich mit dem Steuerungsziel und soll realpolitisch eine Antwort darauf geben, inwiefern ein spezieller Eingriff eine explizite Technologie oder einen Sektor beeinflusst bzw. beeinflussen soll (z. B. Stärkung der Marktposition, Beeinflussung der Wissensentwicklung und Forschungsrichtung). Zudem behandelt diese Frage die Stärke der Eingriffe im Hinblick auf die jeweiligen Sektoren oder Technologien.

3 Mehrebenen-Modellierung des deutschen Personenverkehrs

Da sich der Personenverkehr international deutlich unterscheidet (vgl. Kenworthy & Laube 1996: 303–304), wird in dieser Arbeit hauptsächlich der deutsche Personenverkehr betrachtet. Dementsprechend bezieht sich das im empirischen Teil vorgestellte Simulationsszenario auf eine mittelgroße, deutsche Stadt (Adelt et al. 2018: 19). In diesem Kapitel wird zunächst das heutige Regime des Personenverkehrs und seine historische Entwicklung dargestellt. Anschließend werden die Nischen- und Landscape-Entwicklungen aufgezeigt.

3.1 Die Genese des heutigen Regimes

Der heutige Personenverkehr hat seinen Ursprung in den frühen Handelsbeziehungen zwischen einzelnen Dörfern. (vgl. Reinhardt 2015: 18–20). Der erste Wagen mit Rädern wurde ungefähr 3400 v. Chr. erfunden. Darauf aufbauend wurde der Vorläufer der heutigen Schiene eingeführt: Grobe Spurrinnen, getrieben in Schotter- und Steinstraßen, um unwegsames Gelände auch für den Wagen zu erschließen. Im Römerreich entwickelten sich erste Mietwagenangebote und mit dem *Cursus Publicus* eine erste, fest etablierte Infrastruktur, welche den Transport von Menschen, Informationen und Gütern ermöglichte (ebd.: 69). Um 1500 wurde in Deutschland die erste Post eingeführt. So entstand auch das erste öffentliche Linienverkehrsmittel, ein Postwagen mit acht Sitzplätzen (vgl. ebd.: 102). Durch die Erfindung der Dampfmaschine konnten das erste Automobil (1796) und der erste Dampfbus (1804) sowie Dampf-Omnibus (1827) (vgl. ebd.: 134) entstehen. Im Gegensatz zum dampfbetriebenen Pendant wurde die gegen Ende des 19. Jahrhunderts eingeführte elektrische Straßenbahn durch die Unterstützung der Zeitungen und der Elektrizitätslobby von der Bevölkerung ohne viel Kritik akzeptiert (Schmucki 2012: 1064). Später (ab 1910), gewann sie durch günstigere Preise als Lifestyle-Transportmittel zunehmend an Bedeutung (vgl. ebd.: 1070–1076). Parallel verlief auch die Entwicklung des Fahrrads, welches mittels des Montierens von Pedalen an ein Laufrad 1861 entstand. Aufgrund sinkender Preise ab dem Jahre 1900 wurde es von der Arbeiterschaft als Transportmittel erschlossen. Das Auto mit Verbrennungsmotor, welches in den 20er Jahren schon in den USA am Fließband gefertigt wurde, hatte in Deutschland zunächst wenig Bedeutung, da zum einen die Straßen nicht dem Automobilverkehr entsprechend ausgebaut waren und zum anderen die Autos selbst, aufgrund von kleinen Stückzahlen, teuer waren (vgl. Meyer 2016: 87). Nach dem 2. Weltkrieg entsprach das Fahrrad nicht mehr dem Zeitgeist und wurde vom Auto verdrängt. Erst in Folge der 68er Revolution rückte das Fahrrad wieder in das Bewusstsein der Bevölkerung. Dies machte sich durch den Ausbau der Fahrradinfrastruktur ab 1970 bemerkbar. Unter den Folgen des 2. Weltkriegs litt ebenso die Bahn, welche ihre Monopolstellung in Europa verlor, da das Schienennetz stark beschädigt war und effektivere motorisierte Alternativen in Form von Bussen und Autos entstanden. Am meisten profitierte hiervon das Automobil, welches 1962 bereits in 27 % der Haushalte als das „Vehikel einer Wohlstandsgesellschaft“ (Hermann 2016: 69) stand, da es Individualität mit Autonomie verband. (vgl. ebd.: 55–76).

3.2 Das Regime des Personenverkehrs in Deutschland

Der heutige Personenverkehr ist nach wie vor stark durch den Verbrennungsmotor und das darauf basierende Automobil geprägt, welches eine hohe Individualmobilität ermöglicht. In Deutschland existieren 668 Kraftfahrzeuge pro 1000 Einwohner und 54,7 % der Wege werden mit dem Auto zurückgelegt, welches damit mit Abstand das meistgenutzte Verkehrsmittel ist. Weit abgeschlagen dahinter liegen Fußwege (21,5 %), Fahrradwege (11,8 %) und ÖV-Wege¹ (11,7 %) (vgl. Abbildung 5). Trotzdem hat seit 1991 auch die Nutzung nachhaltiger Verkehrsmittel wie des Fahrrads (vgl. BMVI 2014: 13) oder des öffentlichen Straßenpersonenverkehrs und der Eisenbahn (vgl. BMVI 2016) in großen Teilen Deutschlands leicht zugenommen, wie die Zahlen des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) belegen. Dies führte allerdings nicht zu einem Rückgang der Kraftfahrzeugnutzung, da diese ebenso konstant steigt. Vielmehr wächst die jährliche Anzahl an zurückgelegten Personenkilometern stetig an (vgl. ebd.).

Modal Split des Verkehrsaufkommens



Abbildung 5: Modal Split des Verkehrsaufkommens (in Anlehnung an Deutsches Mobilitätspanel 2016: 39)

3.2.1 Auto

Bedingt durch die steigende Anzahl der mit dem Auto zurückgelegten Personenkilometer verwundert es nicht, dass der motorisierte Verkehr immer mehr Fläche in Deutschland einnimmt und gleichzeitig auch mehr Energie verbraucht. Die Menge der dadurch verursachten Luftschadstoffe ist hingegen stark zurückgegangen (vgl. Umweltbundesamt 2017b). Eine Ausnahme bilden die Treibhausgase, welche sich in den letzten 25 Jahren stabil auf einem hohen Niveau bewegen (vgl. Gössling & Metzler 2017: 426). In den Jahren 1985 bis 2005 wurde Nachhaltigkeit bei der technologischen Entwicklung nicht bedacht. Vielmehr wurden Autos größer und leistungsstärker, wobei das dominante Design des Autos unverändert blieb. Für den Nutzer ergaben sich daraus ein erhöhter Komfort und eine erhöhte Reisegeschwindigkeit. Erst ab dem Jahre 2006 lässt sich eine Veränderung in der technischen Entwicklung empirisch belegen: Das Prinzip von gleichbleibendem Komfort und Geschwindigkeit bei geringerem Energieaufwand ersetzte das Prinzip der steigen-

¹ ÖV-Wege beinhalten, im Gegensatz zu denen des bekannteren ÖPNV, alle mit öffentlichen Verkehrsmitteln zurückgelegten Strecken.

den Motorkraft und Annehmlichkeit bei konstanter Energieaufnahme. So konnte ein Großteil der Effizienzsteigerungen seit 1985 in den Jahren 2006 bis 2015 erreicht werden, welche allerdings nicht ausreichend sind, um die EU Vorgaben für das Jahr 2021 zu erreichen (vgl. Hu & Chen 2016: 145–147). Zusätzlich problematisch ist das von Gössling & Metzler (2017: 420) identifizierte starke Wachstum des Absatzes von SUVs in Deutschland. Zwar ist der Anteil von SUVs an allen verkauften Autos noch verhältnismäßig gering, dennoch verzeichnet eben jene Fahrzeugkategorie die größten prozentualen Wachstumszahlen.

Gestützt wird der Verbrennungsmotor von einem ausgedehnten Infrastrukturnetz, welches 2016 aus 14.531 Tankstellen (vgl. MWV 2017) und annähernd 13.000 Autobahnkilometern (vgl. Statistisches Bundesamt 2016b) bestand. Zusätzlich ist die Automobilindustrie der bedeutendste Wirtschaftssektor Deutschlands mit einem Umsatz von 407 Milliarden Euro im Jahr 2015 (vgl. Statistisches Bundesamt & VCI 2016) und ist zum Teil im Besitz der öffentlichen Hand: Das Bundesland Niedersachsen hält Anteile in Höhe von 20 % am VW-Konzern und kann mit dem damit einhergehenden Stimmrecht im Unternehmen Entscheidungen blockieren (vgl. Wenzel 2013). Daher verwundert es nicht, dass eine starke Lobby auf der EU-Ebene besteht, welche – unter anderem durch mediale Fehlinformation – die Gesetzgebung im Sinne des Automobils beeinflusst hat (vgl. Douglas et al. 2011: 162) Gössling & Cohen (2014: 204).

3.2.2 Fahrrad

Das Fahrrad (hier stellvertretend auch für andere, alternative muskelbetriebene Fortbewegungsmittel) ist eine zügige und fast CO₂-neutrale Fortbewegungsform für die Kurz- und Mittelstrecke. Einziger die Produktion oder Wartung der Fahrräder verursacht einen marginalen Schadstoffausstoß. Nichtsdestotrotz werden Fahrräder meist als emissionslos angenommen (vgl. VCD e.V. 2017). Seit dem Einsetzen des motorisierten Individualverkehrs belegt das Fahrrad nur eine unbedeutende Rolle im Regime des Personenverkehrs, obwohl sich die Technologie des Fahrrads bereits in der Vergangenheit bewährt hat. Das dominante Design hat sich seit dem Ende des 19. Jahrhunderts mit dem Aufkommen des Safety-Fahrrads nur wenig geändert (vgl. Volti 2005: 681). Heute ist das Fahrrad ein verhältnismäßig wenig genutztes Verkehrsmittel, welches aber einen vom Auto unabhängigen, nachhaltigen Individualverkehr ermöglicht.

Das Fahrrad bietet viele Vorteile gegenüber anderen Verkehrsträgern, auch über den nicht existenten Emissionsausstoß hinaus. Durch die Nutzung von Fahrrädern und dem damit verbundenen geringeren Platzbedarf auf den Straßen kann eine Staubbildung verhindert werden. Hierdurch werden Investitionen in neue, teure Straßenstrukturen verhindert. Weiterhin bietet die Nutzung von Fahrrädern auch gesundheitliche Vorteile: Es lassen sich bei täglicher Fahrradnutzung eine niedrigere Sterberate und geringere Fettleibigkeit nachweisen (vgl. Meschik 2012: 496). Zwar ist die Wahrscheinlichkeit schwer zu verunglücken beim Fahren mit dem Fahrrad deutlich erhöht gegenüber einer Fahrt mit dem Auto (vgl. Frauenhofer ISI 2013: 175), aber die Verkehrssicherheit wächst mit einer steigenden Anzahl an Fahrradfahrern, da sich die Autofahrer besser in die Situation des Fahrradfahrers hineinversetzen können (vgl. Meschik 2012: 496).

Auch wirtschaftlich betrachtet zeitigt die Förderung des Fahrradfahrens insgesamt einen positiven Effekt: So kam eine in Neuseeland durchgeführte Studie zu dem Schluss, dass die gesundheitlichen Vorteile des Fahrradfahrens die Kosten von möglichen Unfällen im Straßenverkehr aufwiegen (vgl. Lindsay, Macmillan & Woodward 2011: 54) und eine für Wien durchgeführte Cost-Benefit-Analyse sieht das Fahrrad als finanziellen Sieger gegenüber dem Auto, da es einen Überschuss an externen Kosten von 0,81 Euro pro Kilometer produziert, im Gegensatz zu den 0,04 Euro pro Kilometer Verlust durch das Auto (vgl. Meschik 2012: 499). Die deutsche Fahrradwirtschaft verzeichnet einen seit 2006 stark steigenden Umsatz mit einem Wachstum von 9 % für das Jahr 2014 und 12 % für das Jahr 2015 gegenüber den jeweiligen Vorjahren, denn die Deutschen sind bereit mehr Geld für Fahrräder auszugeben (vgl. CONEBI 2016: 40–43).

3.2.3 ÖPNV

Der öffentliche Personennahverkehr ist ebenso wie das Fahrrad ein wenig genutztes Verkehrsmittel (11,7 %, vgl. Abbildung 5). Trotzdem weist der zugbasierte Personenverkehr auf längeren Distanzen durchschnittlich eine bis zu viermal höhere Effizienz und einen deutlich geringeren CO₂-Ausstoß auf als das Auto (vgl. Bonnafous & Raux 2016: 297). Auch der ÖPNV in Deutschland ist deutlich effizienter als das Auto: Der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen geht von einem um 46 % verringerten Energieverbrauch aus (vgl. VDV 2017). Da die Züge des ÖPNV größtenteils per Strom betrieben werden, sind weitere Emissionsreduzierungen im Rahmen der Energiewende wahrscheinlich. Doch auch Busse sind deutlich effizienter als Autos und können dazu deutlich flexibler als Züge eingesetzt werden (vgl. Chapman 2007: 363). Technologische Innovationen in Form von hybrid oder rein elektrisch betriebenen Bussen können zu weiteren Effizienzsteigerungen führen (vgl. Lajunen 2014: 14). Angeboten wird der ÖPNV von Verkehrsunternehmen, welche sich auf die Ausschreibungen von Besteller-Organisationen bewerben. Diese definieren im Auftrag der Bundesländer (Schienenpersonennahverkehr) oder Kommunen (öffentlicher straßengebundener Personennahverkehr) die benötigte ÖPNV-Kapazität, um die Mobilität für die Bürger sicherzustellen (vgl. DB Regio o. J.).

3.3 Die Landscape

Die Landscape ist geprägt von einem essentiellen Umdenken in den Bereichen Umweltbewusstsein, Nachhaltigkeit und Ressourcennutzung. Ausdruck erster Überlegungen zu einer möglichen Ressourcenknappheit ist die Peak Oil Theory, welche 1956 von M. King Hubbert vorgestellt wurde und voraussagte, dass die Ölproduktion in den USA ab den 1970er Jahren konstant sinken würde. Zu jener Zeit ein unvorstellbarer Gedanke, welcher sich jedoch später bewahrheitete, als das leicht förderbare Öl bereits extrahiert worden war und die Förderung folgender Reserven immer kostspieliger wurde (vgl. Young 2015: 85–87). Ähnliche Überlegungen existieren auch für eine weltweite Peak-Oil-Theory, in welcher die globale Ölproduktion im frühen 21. Jahrhundert ihren Höhepunkt finden soll (vgl. Bardi 2009: 323–326). Ebenso wie 1956 reicht die öffentliche Wahrnehmung von Unkenntnis über Unglaube bis hin zu Verständnis. Problematisch ist, dass die Knappheitsprobleme meist von kurzzeitig wichtigeren politischen Themen wie Kriegen

oder Terror überschattet werden und daher nicht ausreichend Beachtung finden (vgl. ebd.). Dies spiegelt sich auch in den Umfragen des Umweltbundesamtes (vgl. Umweltbundesamt 2015: 18–21) wider. So war 2014 der Umweltschutz nur das fünfthöchste Problem der Befragten und lag damit im Mittelfeld. Besonders junge Menschen sehen den Umweltschutz jedoch als wichtig an, wobei Ungewissheit herrscht, wie ein effektiver Umweltschutz aussehen kann. Zusätzlich ist für 30 % der Deutschen eine intakte Natur und Umwelt Bestandteil des „guten Lebens“. Ein Grund für diese nur durchschnittlich wahrgenommene Wichtigkeit mag darin liegen, dass das Umweltbewusstsein im Konflikt mit der „immer ungehinderter zum Durchbruch kommende[n] Sehnsucht nach einer möglichst rasch von statten gehenden Überwindung vom Raum und Zeit“ (vgl. Hermann 2016: 74) steht. Heute ist dieser Konflikt beispielsweise sichtbar in der stark steigenden Nutzung von Flugzeugen als Transportmittel, welche zwar schnell sind, aber auch deutlich mehr Schadstoffe ausstoßen (vgl. Chapman 2007: 361–363) als unkomfortablere Alternativen wie Roller, Autos und Züge. Problematisch ist ebenso, dass der Klimawandel, nach einer in den USA durchgeführten Studie, nur in geringem Ausmaß in der Gesellschaft thematisiert wird. Dies liege an der fehlenden Diskussionsbereitschaft von Individuen, welche an die diesbezüglichen wissenschaftlichen Erkenntnisse glauben. Klimawandelbestreiter werden von ihnen daher lieber ignoriert als konfrontiert (vgl. Geiger & Swim 2016: 88).

Trotz einer nur zweitrangigen Wahrnehmung der Umwelt in der Bevölkerung hat sich die „deutsche Energiewende“ des Stromsektors entwickelt, welche vorsieht, dass 35 % (80 %) des erzeugten Stroms bis zum Jahre 2020 (2050) aus erneuerbaren Energien gewonnen werden. Diese Pläne sollen bei gleichzeitiger Abschaltung aller Atomreaktoren bis 2022 und einer geplanten Reduzierung der Treibhausgasemissionen um bis zu 95 % im Jahr 2050 realisiert werden. (vgl. Fischer et al. 2016: 1580). Die Energiewende ist daher das technische Rückgrat, welches einen nachhaltigeren, auf Strom basierenden Personenverkehr ermöglicht.

Weiterhin hat sich die Computertechnologie rapide entwickelt und ermöglicht ein sog. „Internet of Things“ (vgl. Gubbi et al. 2013: 1646). Dieses stützt sich auf die Sammlung und den netzwerkartigen Austausch von Daten, was einerseits auf einheitlichen Standards basiert und andererseits Gegenständen die Interaktion mit der realen Welt ermöglicht. Der nächste Schritt, die autonome Kommunikation unter Gegenständen, wird bereits im Personenverkehr erprobt. Dies äußert sich beispielsweise in (teil-)autonom fahrenden Autos und ÖPNV-Fahrplänen, die Verspätungen in Echtzeit anzeigen. Außerdem wird durch die neue Technologie eine Share-Kultur ermöglicht. Diese geht einher mit dem Verlust der vorherrschenden Statussymbolik des Autos hin zu einer möglichst effizienten Nutzung von Ressourcen, welche eine nur geringe zeitliche Auslastung von Autos verhindern soll. Das Auto diene als Statussymbol, da es Individualismus in der Bewegung versprach. Durch überfüllte Straßen in den Städten und die damit verbundenen Staus hat es diesen Status aber besonders bei den jüngeren Menschen eingebüßt (vgl. Canzler & Knie 2016: 56–60). Aufgrund zunehmender technischer Kommunikationsmöglichkeiten, bspw. in Form von digitalen Konferenzen oder Virtual Reality, existieren theoretische Alternativen zu der verkehrssteigernden ortsgebundenen Kommunikation. Allerdings werden diese Möglichkeiten in Europa nicht ausgeschöpft. Studien zeigen, dass Telearbeiter aufgrund einer höheren Vernetzung mehr Dienstreisen

absolvieren, wodurch eine konstante Steigerung der zurückgelegten Wege bei Telearbeitern insgesamt beobachtbar ist (vgl. Fuchs 2008: 292–294). Trotzdem befähigt der erleichterte, globale Informationsaustausch auch die einzelnen Menschen sich zu organisieren und nachhaltige Projekte umzusetzen. Ein Beispiel hierfür ist PurpleAir (vgl. PurpleAir 2017), ein Netzwerk aus Luftqualitätsmessgeräten, welches basierend auf einer Weltkarte die gemessenen Emissionen in Echtzeit visualisiert. Das Netzwerk kann dynamisch erweitert werden, indem Nutzer eine mit dem Internet verbundene Messstation für 260 Dollar erwerben.

3.4 Nischenentwicklungen

Technologisch haben sich insbesondere zwei neue Nischen in Deutschland entwickelt: Zum einen die zunehmende Elektrifizierung des Verkehrs, zum anderen die digitale Vernetzung der seit langem bestehenden Technologien Fahrrad und Auto, welche eine Sharing-Kultur ermöglicht.

3.4.1 Elektrisierung des Verkehrs

Die Elektrisierung des Autos ist keine Neuerung. Frühe elektrische Varianten des Autos in den 70er Jahren unterlagen technisch allerdings dem Konkurrenten mit Verbrennungsmotor. Trotz politischer Anstrengung konnte sich das E-Auto auch 1990 nicht durchsetzen (vgl. Orsato et al. 2012: 206). Gründe hierfür sind unter anderem: Eine geringe Reichweite, langsame Ladegeschwindigkeiten und ein hoher Anschaffungspreis (vgl. ebd.: 209). Tesla beseitigte die genannten Defizite und baute ein Auto das besser als die bestehenden „Verbrenner“ (sofortiges Drehmoment, lautlos etc.) ist (vgl. Hardman, Shiu & Steinberger-Wilckens 2015: 1628). Auch das von Nutzern bemängelte Problem fehlender Ladeinfrastruktur (vgl. Dütschke et al. 2012: 31) geht Tesla mit dem Ausbau eines eigenen Netzes von „Super-Chargern“ an, welche das Auto unter optimalen Bedingungen in 40 Minuten zu 80 % laden können. Derzeit existieren 57 „Super-Charger“ in Deutschland (vgl. Tesla 2017), und auch die deutschen Autohersteller wollen im Zuge eines Joint Ventures „eine beachtliche Zahl an Ladestationen errichten“ (vgl. Daimler 2016).

Umwelttechnisch können E-Autos dazu beitragen, die Emissionen aus den Ballungsräumen fern zu halten, da der benötigte Strom außerhalb der Ballungsräume produziert werden kann. E-Autos haben mit dem aktuellen Energiemix in Europa das Potential, einen um 10–24 % geringeren „Beitrag“ zum Klimawandel zu leisten, als dies herkömmliche Verbrenner tun (Hawkins et al. 2013: 61). Diese Schätzung ist jedoch kritisch zu betrachten, da das Nutzungsverhalten für E-Autos – ähnlich wie in der Vergangenheit für Autos mit Verbrennungsmotor – mit günstigeren Energiepreise ansteigen könnte (Gössling & Metzler 2017: 426). Ferner belasten E-Autos die Umwelt stärker durch toxische Stoffe (welche in der Produktion anfallen) und finden in Deutschland derzeit wenig Beachtung von Seiten der Konsumenten. Nur 0,3 % der Neuzulassungen im Jahr 2016 waren E-Autos (vgl. Kraftfahrt-Bundesamt 2017). Zuletzt kündigten weitere Autohersteller wie Volvo (vgl. Wenzel 2017) eine Elektrifizierung ihres Produktportfolios an.

Ebenso interessant für die Elektrisierung des Straßenverkehrs sind komplett neue, leicht, elektrisch betriebene Fortbewegungsmittel wie Pedelecs, elektrische Longboards oder selbststabilisierende einachsige Fahrzeuge (Segway, Hoverboard). Diese ermöglichen kurze Strecken schnell und individuell zurückzulegen und schaffen dadurch eine bessere Verbindung zwischen öffentlichen Verkehrsmitteln. Pedelecs sind hierbei das am weitesten verbreitete Verkehrsmittel. In Deutschland sind die jährlichen Absatzzahlen von E-Bikes konstant steigend und umfassen derzeit 15 % aller Fahrradverkäufe (vgl. ZIV 2017). Abgesehen vom Pedelec limitieren Gesetze die Nutzung von unkonventionellen elektrischen Fahrzeugen. So wurde erst im Jahr 2009 die Mobilitätshilfeverordnung (vgl. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz 2009) erlassen, welche ausschließlich die Nutzung von Segways im Straßenverkehr behandelt. Andere elektrische Fahrzeuge wie beispielsweise das elektrische Longboard „Boosted Board“ (vgl. Boosted 2017) können hingegen nicht legal betrieben werden (vgl. Arag 2017). Dabei sind gerade Konzepte wie das „Boosted Board“ interessant, da es einen neuartigen Individualverkehr mit Geschwindigkeiten bis zu 35km/h ermöglicht, nur 7kg wiegt und so im öffentlichen Personennahverkehr leicht mitnehmbar ist (vgl. Boosted 2017).

3.4.2 Sharing-Angebote

Die grundlegende Technologie, also die Technologie des Verkehrsmittels(Auto bzw. Fahrrad), ändert sich beim Sharing-Angebot nicht. Vielmehr besteht die Neuerung darin, dass mittels der neuartigen, technischen Konnektivitätsmöglichkeiten im Rahmen des *Internet of Things* und der smarten Vernetzung ein für den Nutzer bezahlbares und nützliches Verkehrsmittelangebot geschaffen wird, wodurch die für das Auto typischen langen Standzeiten des Individualbesitzes (vgl. Firnkorn & Müller 2012: 276) umgangen werden können.

Bikesharing

Erste Versuche der Umsetzung eines Bikesharing-Angebotes, also dem Teilen bzw. dem Vermieten von Fahrrädern, existierten bereits seit 1960, litten aber zumeist unter dem häufigen Diebstahl der Fahrräder. Erst ab Mitte der 90er Jahre war die Technik weit genug fortgeschritten, dass die Anonymität des Nutzers unterbunden werden konnte, um so die Anzahl von Diebstählen zu reduzieren und den erfolgreichen Betrieb von Bikesharing-Angeboten zu ermöglichen. Im Zuge dieser Neuerung entwickelten sich zahlreiche Angebote, hauptsächlich in großen europäischen Städten, welche den Anteil an Fahrradfahrern dort erheblich steigerten (vgl. De-Maio 2009: 42–43). Trotzdem existierten 2010 nur 1000 nutzbare Fahrräder in Bikesharing-Stationen in Deutschland (vgl. raumkom 2011: 6), wobei ein starkes Wachstum beim führenden deutschen Anbieter Nextbike sichtbar ist (vgl. nextbike 2015).

Carsharing

Auch das Carsharing kann helfen, die Transport- und Nachhaltigkeitsprobleme in Städten zu lösen. So geben 13 % der deutschen Carsharing-Nutzer ihr eigenes Auto auf (vgl. Loose, Mohr & Nobis 2006: 366); neuere Studien in den Niederlanden belegen 30 % weniger Autobesitz unter den Nutzern und auch der Autobesitz bei

jungen Menschen verliert an Wichtigkeit (vgl. Belk 2014: 1597). Zusätzlich fahren Carsharing-Nutzer weniger Kilometer und stoßen dadurch im Vergleich zu „klassischen“ Autobesitzern 13-18 % weniger CO₂ pro Jahr aus (vgl. Nijland & van Meerkerk 2017: 89). Es existieren zwei Arten des Carsharings: stationsbasiert und stationsunabhängig. Bei letzterem werden die gemieteten Autos nicht an festen Stationen zurückgegeben, sondern können vielmehr an beliebigen Punkten zurückgelassen werden. Das nächste verfügbare Auto wird dann ad-hoc per Smartphone lokalisiert (vgl. Herrmann, Schulte & Voß 2014: 152). Im Sinne der Umweltverträglichkeit führen beide Arten des Carsharings zu einem vergleichbar reduzierten Emissionsausstoß (vgl. Firnkorn & Müller 2011: 1526). Nichtsdestotrotz kommt eine agentenbasierte Simulation für Berlin zu dem Ergebnis, dass stationsungebundene Sharing-Angebote nicht nur mit dem Auto, sondern auch mit ÖPNV und Fahrrad konkurrieren (vgl. Ciari, Bock & Balmer 2014: 46) und daher die Gefahr besteht, auch nachhaltige Verkehrsmittel zu verdrängen.

3.5 Entwicklung des deutschen Personenverkehrs

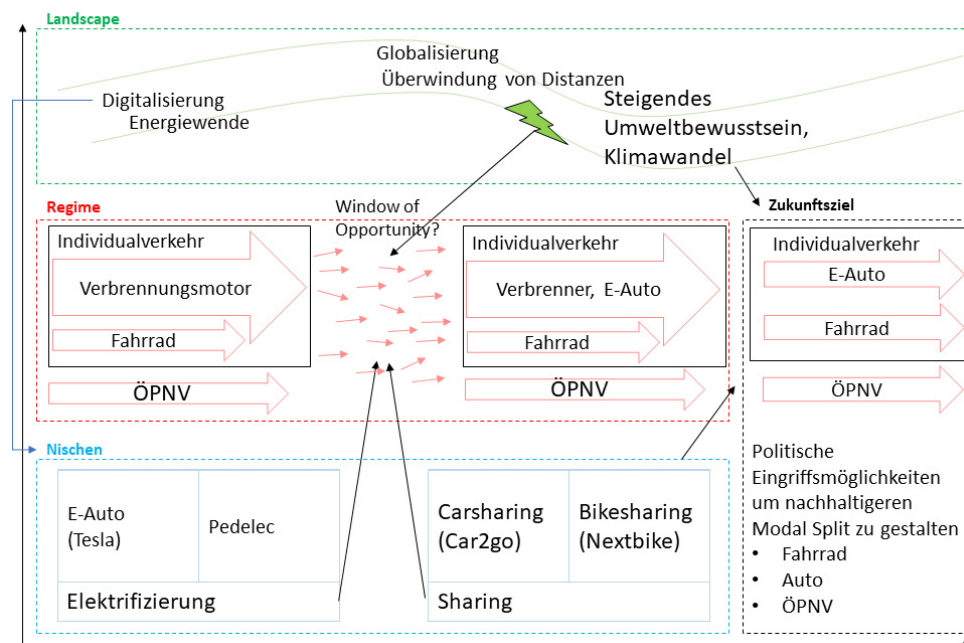


Abbildung 6: Entwicklung des deutschen Personenverkehrs anhand der Multi-Level Perspektive und notwendiges Zukunftsziel (vergrößerte Darstellung im Anhang: Abbildung 28).

Das ursprüngliche Regime des Personenverkehrs basiert auf dem verbrennungsmotorgestützten Individualverkehr (vgl. Abbildung 6). Gestützt wird das Regime durch eine große wirtschaftliche Abhängigkeit Deutschlands von der Automobilindustrie. Das Fahrrad und der ÖPNV spielen mit einem zusammen knapp 20%igen Anteil am Modal Mix nur eine untergeordnete Rolle. Große technische Innovationen blieben aus und so existieren die unterschiedlichen Verkehrsmittel seit langer Zeit größtenteils unverändert nebeneinander. Die Digitalisierung und die vermehrte Nutzung von smarten Systemen ermöglichen die technische Entwicklung neuartiger Mobilitätskonzepte. Das bereits seit längerem existierende Konzept des stationsgebundenen Carsharings konnte weiterentwickelt werden und durch das beliebtere stationsungebundene Carsharing ergänzt werden. Gleichzeitig entwickelt sich ein wachsendes Netz von Bikeshaaring-Stationen in den deutschen Ballungsräumen.

Das steigende Umweltbewusstsein im Rahmen des Klimawandels übt Druck auf das bestehende Regime aus. In diesem Zug wird mit der politisch beschlossenen Energiewende ein „sauberer“ Verkehr, basierend auf elektrischer Energie, überhaupt erst ermöglicht. Tesla prägte die Nischenentwicklung als erstes Unternehmen, welches erfolgreich Elektroautos produzieren und verkaufen konnte. Obwohl die meisten großen Autohersteller zunächst nur sehr langsam E-Autos in ihr Angebot nehmen, plant Volvo, ein bedeutender Hersteller des bestehenden Regimes, in naher Zukunft einen Kurswechsel hin zur E-Mobilität. Trotzdem ist aktuell nur ein Bruchteil der gekauften Autos in Deutschland mit einem Elektromotor ausgestattet und ein radikaler Technologiewechsel findet nicht statt, ebenso wenig wie eine Änderung des Nutzungsverhaltens, wodurch Emissionen nicht in einem bedeutenden Ausmaß reduziert werden können.

Der Klimawandel wird gesellschaftlich nur wenig diskutiert und von kurzfristigen politischen Ereignissen überschattet. Zusätzlich steht das schnelle Überwinden von Distanzen in einer globalisierten Welt oft im Konflikt mit der Umweltverträglichkeit, wodurch der Druck der Landscape hin zu einem Regimewechsel gering ist. Es besteht ein schwaches *Window of Opportunity*, das aber keine radikale Veränderung bewirkt. Vielmehr findet eine allmähliche Anpassung des Regimes an den strombetriebenen Motor statt. Da die E-Autos – wenn überhaupt – nur in einem begrenzten Umfang dazu beitragen die Emissionen zu senken, hilft ein reines Umschwenken auf die Elektromobilität nicht. Um einen nachhaltigen Personenverkehr in der Zukunft zu schaffen, muss vielmehr die Nutzung des Autos reduziert (vgl. Banister 2008: 73–75) und so ein Verkehr geschaffen werden, in welchem beispielsweise das Fahrrad vermehrt für den Individualverkehr genutzt wird. Zusätzlich bieten Angebote des ÖPNV eine deutlich umweltfreundlichere Fortbewegung für die Langstrecke. Die angesprochenen, aus den Nischen (Bikesharing, Carsharing, Pedelecs) entstehenden Technologien, können helfen, eben dies zu erreichen. Um die notwendige Anpassung zu initiieren und zu beschleunigen sind daher effektive verkehrspolitische Eingriffe erforderlich.

4 Politische Eingriffsmöglichkeiten in den Personenverkehr

Der Personenverkehr wird von einer Vielzahl an Institutionen beeinflusst, welche auf unterschiedlichen Ebenen agieren (Kapitel 4.1) und unterschiedliche Einflussmöglichkeiten besitzen (Kapitel 4.2). Aus den unterschiedlichen Zielen ihres Handelns (Kapitel 4.3) werden die empirisch zu überprüfenden Hypothesen abgeleitet und in der agentenbasierten Simulation SimCo modelliert und überprüft.

4.1 Who governs?

Um einen ersten Überblick über die Gesamtheit der verkehrspolitischen Akteurslandschaft zu schaffen, werden im Folgenden die wichtigsten Akteure nach vier geographischen Maßstabsebenen und in zwei Arten unterteilt. Hierbei kann zum einen zwischen einer regionalen, einer nationalen, einer europäischen und einer internationalen Ebene und zum anderen zwischen Akteuren aus dem privaten und dem öffentlichen Sektor unterschieden werden (vgl. Abbildung 7).

Auf der nationalen Ebene ist das BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) eine entscheidende Instanz des öffentlichen Sektors. Das BMVI arbeitet dem Bundesverkehrsminister (Alexander Dobrindt) zu, welcher legislativ wirksame Verordnungen erlassen kann. Hierbei wirken auch andere Ministerien und dahinterstehende Behörden wie das Finanzministerium oder das Umweltbundesamt maßgeblich auf den Entscheidungsprozess ein (vgl. Fichert & Grandjot 2016: 139). *Ausschließlich* verantwortlich ist das BMVI für die Luftfahrt und die Eisenbahn. Bundfernstraßen und die Genehmigungsverfahren von Flughäfen hingegen werden von den Ländern für den Bund regional verwaltet. Landesstraßen sowie der ÖPNV und die Schifffahrt unterliegen der alleinigen Entscheidung der Landesministerien. Eine Koordination der Entscheidungen zwischen den Ländern wird über die Verkehrsministerkonferenz realisiert. Hinzu kommen mögliche Direktabstimmungen auf kommunaler Ebene durch die Bevölkerung (vgl. ebd.: 140).

Auf der europäischen Ebene ist die Generaldirektion Mobilität und Verkehr (DG MOVE) hauptverantwortlich für die Regelung des europäischen Binnenverkehrs und funktioniert ähnlich dem BMVI, da es ebenso mit anderen europäischen Generaldirektionen im Austausch steht. Auch dem EuGH wird oft eine entscheidende Funktion attestiert, da er zwar auf der Grundlage von Gesetzen Entscheidungen fällt, durch die notwendige Interpretation der Gesetze aber Auslegungsspielräume entstehen (vgl. ebd.: 146). Zusätzlich haben sich verkehrsmittelspezifische Agenturen sowie europäische Organisationen wie die Europäische Verkehrsministerkonferenz (CEMT) gebildet, deren Empfehlungen bis auf wenige Ausnahmen keine gesetzliche Bindung haben. Im Rahmen der Einbeziehung von Nicht-EU-Ländern hat sich hieraus das ITF, das internationale Transportforum gebildet (vgl. ITF 2017).

International sind hingegen nur die See- und Luftfahrt über die Institutionen der UNO, ICAO (International Civil Aviation Organization) und IMO (International Maritime Organization) gesetzlich geregelt, d. h. der übrige Verkehr ist international unreguliert. Es existieren dennoch viele international tätige Akteure, wie die OECD mit 35 Mitgliedsstaaten oder diverse NGOs (Nichtregierungsorganisationen), wie Greenpeace oder WWF, als Vertreter des privaten Sektors.

Weitere Vertreter des privaten Sektors wirken auch auf nationaler oder regionaler Ebene. Der Verband Verkehrswirtschaft und Logistik Nordrhein-Westfalen e. V. (VVWL) agiert auf regionaler Ebene als wirtschaftliche Lobbyorganisation für Logistikunternehmen, wohingegen der allgemeine Deutsche Automobil- bzw. Fahrrad-Club (ADAC, ADFC) auf nationaler Ebene im Interesse der Auto- bzw. Fahrradfahrer agieren.

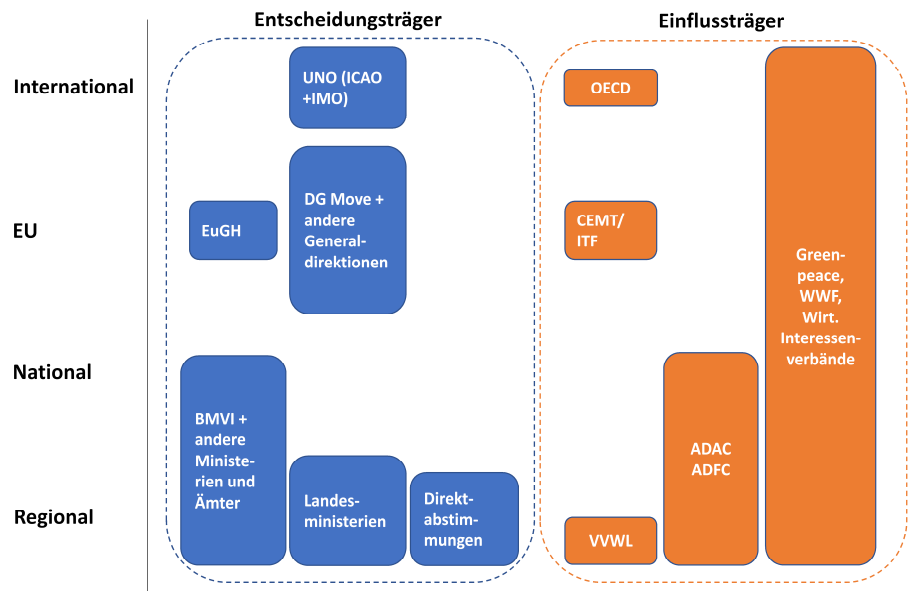


Abbildung 7: Akteure der Verkehrspolitik und die Art ihres Einflusses (Eigene Darstellung, in Anlehnung an Fichert & Grandjot 2016: 138–147)

4.2 How to govern?

Grundsätzlich können die Akteure der Verkehrspolitik in Entscheidungsträger und Einflusssträger eingeteilt werden (vgl. Fichert & Grandjot 2016: 138). Entscheidungsträger besitzen einen direkten Einfluss bzw. ein Mitbestimmungsrecht, wohingegen Einflusssträger auf die Entscheidungsträger einwirken können, um deren Verhalten nach ihren Vorstellungen zu beeinflussen. So lassen sich Teile der UNO, die Generaldirektion Mobilität und Verkehr, sowie das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur den Entscheidungsträgern zuordnen, OECD, NGOs und Interessenverbände hingegen den Einflusssträgern (vgl. Abbildung 7). Da die diversen Akteure unterschiedlichste Eingriffsmöglichkeiten besitzen, wird exemplarisch einerseits das BMVI als gesetzgebende Institution des öffentlichen Sektors dargestellt. Andererseits wird der Einfluss von NGOs auf die gesetzgebenden Institutionen und die öffentliche Meinung am Beispiel des ADFC beschrieben, um das Wirken eines Einflusssträgers zu beschreiben.

BMVI

Durch die zu Verfügung stehenden Haushaltsmittel (24,6 Mrd. Euro im Jahr 2016) vollzieht das BMVI vielseitige politische Eingriffe in Bereichen der Mobilität und der Digitalisierung. Teil des Bereiches Mobilität ist der Straßenverkehr. Mögliche Tätigkeitsfelder des Ministeriums sind etwa Investitionen in neuartige, den Verkehr

beeinflussende Technologien (Technology Push): Etwa 100 Millionen Euro fließen bis 2020 in das Projekt Mfund, welches innovative Ideen im Bereich der Mobilität 4.0 unterstützt. Die Projekte decken unterschiedlichste Themenfelder und Transportmittel ab. Zu den weiteren Aufgaben des BMVI gehören allerdings auch die Kommunikation und die Beeinflussung der Öffentlichkeit durch die Stabsstelle Presse- und Kommunikation. In diesem Rahmen fand im April 2017 beispielsweise der fünfte nationale Radverkehrskongress statt (vgl. BMVI 2017a). Allgemeine strategische Konzepte, wie die aktuell diskutierte PKW-Maut, werden von der Abteilung Grundsatzangelegenheiten entwickelt. Darüber hat das BMVI auch das „Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie“ beschlossen, welches nachhaltige Lösungen unabhängig von fossilen Kraftstoffen fördern soll (vgl. BMVI 2017b).

NGOs

NGOs sind Einflussträger, weil sie private Institutionen sind, also keine gesetzgebende Macht innehaben. Ihre Eingriffsmöglichkeiten in die Verkehrspolitik bestehen aus diesem Grund hauptsächlich aus dem Kreieren von Netzwerken und einer Beeinflussung der Werte und Normen der Bevölkerung. Zusätzlich greifen Entscheidungsträger vermehrt auf das spezifische Fachwissen von NGOs zurück, da so der Informationsbeschaffungsprozess kostengünstig an Experten ausgelagert werden kann. Dabei sind sich die Entscheidungsträger bewusst, dass die Empfehlungen der NGOs von subjektiven Werten geprägt sind. (vgl. Tallberg et al. 2015: 21).

Der Allgemeine Deutsche Fahrrad-Club ist ein typischer Vertreter der NGOs und spielt eine zentrale Rolle für die Entwicklung des Personenverkehrs auf der nationalen Ebene. Der ADFC initiierte diverse Kampagnen, wie den Fahrradklima-Test (ADFC 2016), um die öffentliche Meinung in Erfahrung zu bringen und zu beeinflussen. Auch kooperiert der ADFC mit anderen Organisationen auf diversen Ebenen. So ist der ADFC Mitglied im Europäischen Radfahrerverband ECF und kann somit auch Einfluss auf die europäische Politik ausüben. Zusätzlich ist der ADFC NRW Teil der KlimaExpo.NRW, einem von der Landesregierung initiierten Projekt zur Steigerung der Wahrnehmung des Fahrrads als nachhaltiges Transportmittel (ADFC NRW 2017). Des Weiteren kooperiert der ADFC auch mit wirtschaftlichen Unternehmen, wie dem bereits angesprochenen Sharing-Anbieter Nextbike, um eine allgegenwärtige Mobilität für seine Mitglieder zu garantieren (ADFC 2014).

4.3 What to govern?

Um einen nachhaltigeren Personenverkehr herbeizuführen und das nicht nachhaltige Regime des Individualverkehrs, welches sich auf den Verbrennungsmotor stützt, abzuschaffen, entwickeln und veröffentlichen unterschiedliche politische Akteure in Deutschland Eingriffsmöglichkeiten, die auf den bereits vorgestellten, bestehenden technologischen Optionen basieren. Aus diesen Eingriffsmöglichkeiten werden die empirisch zu überprüfenden Hypothesen abgeleitet.

4.3.1 Fahrrad

Um sowohl die gesundheitlichen, finanziellen als auch umweltentlastenden Vorteile zu erlangen, fordern diverse Akteure der Verkehrspolitik eine Steigerung der Attraktivität und Nutzung des Fahrradverkehrs. Mögliche Eingriffsbereiche sind diesbezüglich sowohl die öffentliche Wahrnehmung des Fahrrads, die das Fahrrad unterstützende Infrastruktur und technologische Neuerungen.

Generell soll die erhöhte Fahrradnutzung durch eine totale Priorisierung von Fahrradfahrern und Fußgängern im Straßenverkehr geschehen (vgl. Greenpeace e.V. 2016: 11). Im Speziellen soll einerseits der Ausbau des Radnetzes und spezieller Radschnellwege (vgl. ADFC 2013: 18) zu einer erhöhten Fahrradnutzung führen. Ähnliche Überlegungen umfassen das Umwandeln von wenig benutzten Autostraßen in Fahrradstraßen, da hierdurch die Straßen sicherer und komfortabler werden: Durch den Wegfall des Autos besteht nicht nur eine geringe Unfallgefahr, sondern es wird den Fahrradfahrern auch ermöglicht nebeneinander zu fahren (vgl. ADFC & SRL 2011: 1–2). Ein erstes Projekt dieser Art ist der RS1, der *Radschnellweg Ruhr*, welcher eine geplante Länge von 101 Kilometern hat und Hamm mit Duisburg verbinden soll. Damit ist er einer von sieben in NRW geplanten Radschnellwegen, welche wie Autostraßen gereinigt und instandgehalten werden und seit 2016 rechtlich einer regulären Landesstraße gleichgestellt sind (vgl. Regionalverband Ruhr 2017). Des Weiteren helfen die sich entwickelnden Bikesharing-Angebote (vgl. ADFC 2015) neue Zielgruppen für das Fahrrad zu erschließen, um im Zusammenspiel mit dem ÖPNV-Netz Unternehmensstandorte autofrei an den Verkehr anzubinden und so die Attraktivität des Fahrrads zu steigern.

Andererseits sollen Komfort- und Attraktivitätssteigerungen des Fahrrads durch neu zu schaffende, sichere Fahrradabstellplätze (vgl. Ministerium für Verkehr und Infrastruktur 2015: 26; Winslott Hiselius & Svensson 2017: 823), beispielsweise in der Nähe des öffentlichen Nahverkehrs, geschaffen werden. Die Abstellplätze schützen gegen Fahrraddiebstahl und widrige Witterungsverhältnisse. Der ADFC fordert zudem eine bessere Kommunikation der Vorteile des Fahrrads, um die Attraktivität des Fahrrads in der Bevölkerung zu erhöhen (vgl. ADFC 2013: 13). Gausemeier et al. (2015: 205–207) entwickeln unterschiedliche Zukunftsszenarien für Berlin und zeigen angepasste Fahrradtypen, welche die Attraktivität des Fahrrads durch Transportaufsätze und zusätzliche Personensitze weiter steigern könnten. Weiterhin schlagen Gausemeier et al. auch den Bau von Selbst-Reparatur-Werkstätten für eine kostengünstige Wartung der Fahrräder vor.

Die Unterstützung von Pedelecs als konsequente Weiterentwicklung des Fahrrads durch die verkehrspolitischen Akteure, kann ebenso zu einer Attraktivitätssteigerung beitragen, da sie einerseits eine autoungebundene Mobilität für jüngere und ältere Menschen ermöglicht und gleichzeitig die potenzielle Reichweite und Geschwindigkeit des Radfahrens erhöht. Darüber hinaus ist deutlich weniger Kraft notwendig um das Ziel zu erreichen, was beispielsweise ein verschwitztes Ankommen im Büro verhindert und so den Komfort deutlich steigert (vgl. Rudolph 2014: 462; Schleinitz et al. 2017: 290). Auch das Umweltbundesamt (vgl. Umweltbundesamt 2014) beschreibt die Pedelecs als „das schnellste Fortbewegungsmittel im Stadtverkehr“ für Distanzen unter zehn Kilometern. Winslott Hiselius & Svens-

son (2017: 823) weisen ebenso daraufhin, dass Pedelecs das Potenzial haben einen nachhaltigeren Straßenverkehr zu gestalten, aber dabei nicht das klassische Fahrrad verdrängen sollten, da dieses deutlich besser für die Gesundheit und die Umwelt ist.

Das Fahrrad ist das umweltfreundlichste Verkehrsmittel, da es abgesehen von der Produktion keine Emissionen verursacht. Die identifizierten politischen Eingriffsmöglichkeiten zur Steigerung der Fahrradnutzung zielen darauf ab, den Komfort des Fahrrads als auch die angebotene Infrastruktur zu verbessern und dies zu kommunizieren.

Die empirisch im Rahmen der Simulationsexperimente auf ihre Wirksamkeit zu überprüfenden Hypothesen lauten daher:

H1: Eine Steigerung des Komforts des Fahrrads wird bewirkt durch Infrastrukturmaßnahmen, das erhöhte Aufkommen von Pedelecs und eine verbesserte Kommunikation. Dies erhöht die Nutzung des Fahrrads und führt zu einer Reduzierung der Umweltbelastung.

H2: Ein Ausbau des Fahrradnetzes in Form von Fahrradschnellstraßen und der Umwandlung von bestehenden Straßen in Fahrradstraßen führt zu einer besseren Verfügbarkeit und Anbindung an das Verkehrsnetz. Dies führt zu einer erhöhten Nutzung des Fahrrads.

4.3.2 Auto

Bedingt durch die Energiewende ergibt sich in der Zukunft die Möglichkeit einer deutlich nachhaltigeren Energiegewinnung. Dies kann helfen „lebenswerte Städte“ (vgl. Erhard et al. 2014: 63) zu schaffen, also schadstoffarme und leise Städte. In diesem Sinne fordert ein Verbändekonzept, unter anderem bestehend aus WWF, NABU und VCD, emissionsfreie Innenstädte bis zum Jahre 2030 zu realisieren (vgl. ebd.). Um dies zu begünstigen soll zunächst eine innerstädtische Senkung des Tempolimits auf 30 km/h umgesetzt werden, was insbesondere den Automobilverkehr betrifft. Unterstützt wird dieser Vorschlag von staatlicher Seite durch das Umweltbundesamt (vgl. Umweltbundesamt 2017a: 18). Des Weiteren werden fest formulierte Ziele gefordert, welche einen langfristigen Planungshorizont für die Bundesverkehrswegeplanung ermöglicht. (vgl. Erhard et al. 2014: 65). Auch für die Autobahnen wird die Implementierung einer Geschwindigkeitsbegrenzung von diversen NGOs gefordert. Hauptgründe sind neben dem ingenieurstechnisch bewiesenen Minderverbrauch an Benzin (und dem damit einhergehenden geringeren CO₂-Ausstoß) auch eine Steigerung der Verkehrssicherheit und eine Stressminderung (vgl. VCD 2008: 6). Aus diesem Grund stellte Greenpeace 2007 eigenmächtig 120 km/h Schilder auf der A 92 auf (vgl. Greenpeace e.V. 2007). Wissenschaftlich konnten CO₂-Ausstoßverminderungen durch Geschwindigkeitsbegrenzungen nur im niedrigen einstelligen Prozentbereich festgestellt werden. So kam eine Studie basierend auf dem eingeführten Tempolimit von 55 mph (88 km/h) in den USA im Zuge der Ölkrise von 1974 zu einem niedrig einstelligem Ergebnis, ebenso wie eine neuere Studie aus Spanien, bei welcher das Tempolimit von 120 km/h auf 110 km/h gesenkt wurde (vgl. Blomquist 1984: 38; Asensio, Gómez-Lobo & Matas 2014: 34). Für Deutschland ermittelte das Umweltbundesamt, mangels aktuellerer

Studien, auf Grundlage von Studienergebnissen aus dem Jahre 1996, eine mögliche CO₂-Einsparung von 9 % bei einer Geschwindigkeitsbegrenzung auf 120 km/h (vgl. Umweltbundesamt 2012).

Weiterhin sollten auch die Umweltkosten internalisiert werden, also die in der Umwelt anfallenden Kosten in den Kauf- oder Kraftstoffpreis integriert werden (Gössling & Metzler 2017: 427). Dazu schlagen die Verbände eine Maut, basierend auf der Fahrleistung und dem CO₂-Ausstoß vor (vgl. Erhard et al. 2014: 7). Zusätzlich soll auch die Energiesteuer, welche die Mineralölsteuer 2006 ersetzte, angehoben und so der Unterhaltungspreis des Verbrennungsmotors weiter erhöht werden (vgl. ebd.: 67). Unterstützt wird eine Erhöhung der Steuer, welche es seit 2003 nicht mehr gab, von der Partei Die Grünen (vgl. Schwarzer 2015) und von Peter Meyer, Präsident des ADAC bis 2014 (vgl. FAZ 2013). Auch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) erwägt in seinem zuletzt vorgestelltem Diskussionspapier (vgl. 2016: 22) dynamisch ansteigende Steuersätze, welche die Preisschwankungen der Rohstoffpreise für Energieträger ausgleichen sollen. So bleibt bei Senkung der Kosten für Benzin der Preis an der Tankstelle konstant, die Steuereinnahmen wachsen jedoch. Durch diesen marktkonformen Eingriff können die Kosten entsprechend dem Verursacherprinzip zugewiesen werden und die Steuereinnahmen für Investitionen im Bereich der Energieeffizienz benutzt werden.

Zusammenfassend ergeben sich daher zwei das Auto betreffende politische Eingriffe: Die Marktposition des Autos soll durch einen Eingriff in die maximal erlaubte Geschwindigkeit und die Kostenstruktur geschwächt werden. Durch niedrigere Geschwindigkeiten und eine verursachergerechte Erhöhung der Betriebskosten soll ein nachhaltigerer Personenverkehr begünstigt werden. Hieraus ergeben sich die folgenden zwei empirisch zu überprüfenden Hypothesen H3 und H4:

H3: Eine Erhöhung des Preises für Kraftstoff führt zu einer geringeren Nutzung des Autos und zu einer höheren Nutzung der nachhaltigeren Alternativen. Gleiches gilt für die Einführung einer Distanz- und CO₂-abhängigen Maut.

H4: Eine Einführung einer stadtweit geltenden Tempo-30-Zone mit der Ausnahme von großen Hauptverkehrsstraßen führt zu einer geringeren Nutzung des Autos und somit auch zu CO₂-Einsparungen.

4.3.3 ÖPNV

Ein Mittel zur möglichen Nutzensteigerung des öffentlichen Nahverkehrs ist die Kostensenkung bis hin zum kompletten Entfallen der Gebühren. Das Konzept des kostenlosen Nahverkehrs wird bereits seit vielen Jahren diskutiert. So kam Baum (1973: 12–17) zu dem Schluss, dass eine Senkung der Preise für den öffentlichen Nahverkehr keine klare Auswirkung auf die Nutzung desselben hat, sondern dies vielmehr durch Komfortsteigerungen zu erreichen wäre. Die Kostensteigerung einer derartigen Verkehrspolitik bringe zudem hohe Mehrkosten für die Städte und durch den fehlenden Zwang, Gewinne zu erwirtschaften, würde der ÖPNV potentiell ineffizient betrieben werden.

Trotzdem wurde in vielen Städten eine Form des kostenlosen öffentlichen Nahverkehrs umgesetzt, darunter auch in Großstädten wie Melbourne, in welcher das Bahnfahren in der Innenstadt kostenlos ist, aber längere Distanzen weiterhin kostenpflichtig sind (vgl. Public Transport Victoria 2017). Auch in europäischen Städten wie Brüssel gab es Experimente zur Wirksamkeit des kostenlosen Nahverkehrs. Hierfür wurde eine wiedererstattbare Jahreskarte für das Brüsseler Verkehrsnetz an flämische Studenten ausgegeben. Unter den Begünstigten war eine gestiegene Nutzung der öffentlichen Verkehrsmittel zu verzeichnen. Allerdings sind auch 21 % der Studenten Wege gefahren, welche sie zuvor zu Fuß zurückgelegt haben (vgl. Witte et al. 2006: 677–688). Auch im aktuellen wissenschaftlichen Diskurs herrscht diesbezüglich keine Einigkeit. Fearnley (2013: 85) resümiert, dass ein kostenlos angebotener Nahverkehr zu keiner bzw. nur zu einer sehr geringfügig gesteigerten Nutzung führt. Vielmehr sei es nötig die Autonutzung direkt anzusprechen. Cools, Fabbro & Bellemans (2016: 106) hingegen belegen, dass die Nutzung der öffentlichen Verkehrsmittel stark zunimmt, wenn diese umsonst angeboten werden. Abseits des wissenschaftlichen Diskurses fordert der Landesverband NRW von Bündnis90/die Grünen ein NRW-weit geltendes, vergünstigtes Ticket für zwei Euro, um die Tarifstrukturen zu vereinfachen und einen günstigen ÖPNV für jeden anbieten zu können (vgl. Grüne NRW 2017). Die Linke NRW fordert Ähnliches, allerdings mit der Perspektive auf „völlig fahrscheinlose Nutzung“ (vgl. Die Linke NRW 2017).

Der Effekt einer Preisreduzierung ist wissenschaftlich nicht eindeutig geklärt, wird aber trotzdem von deutschen Parteien gefordert um einen nachhaltigeren Personenverkehr zu bewirken. Um diese Annahme empirisch zu überprüfen lautet die zu testende Hypothese wie folgt:

H5: Eine starke Vergünstigung, bzw. Kostenbefreiung des öffentlichen Personen-nahverkehrs führt zu einer erhöhten Nutzung desselben und somit auch zu einer CO₂-Reduzierung.

Um die formulierten fünf Hypothesen zu überprüfen, werden diese nun in fünf Szenarien übersetzt und in Kapitel 5 simulativ überprüft.

5 Agentenbasierte Simulation des Personenverkehrs

Computersimulationen sind erst relativ spät von den Sozialwissenschaften als empirische Form der Erkenntnisgewinnung in Betracht gezogen worden. Sie bieten im Gegensatz zu den klassischen Herangehensweisen, bestehend aus Modell und Theorie, die Möglichkeit sowohl dynamische als auch real nicht durchführbare Experimente zu realisieren. Ebenso bieten agentenbasierte Simulationen den Vorteil, dass sie eine Veränderung auf der Makroebene eines Systems aus Veränderungen der Mikroebene darstellen bzw. begründen können. Dies ist besonders wichtig für die Darstellung von soziotechnischen Systemen, da diese das Resultat eines dynamischen Prozesses sind, in welchem einzelne, voneinander unabhängige Akteure Entscheidungen in Echtzeit treffen. Daher ergänzen Simulationen das empirische Methoden-Repertoire des Wissenschaftlers, welcher zuvor hauptsächlich das Verhalten einzelner (mittels qualitativ erhobener Daten) oder das Verhalten vieler Akteure (anhand quantitativ erhobener Daten) analysierte. Diese Daten ermöglichen aber keine Beobachtung der Interaktionen der Akteure, und die Beschreibung von Strukturen und Funktionen ist nur unter großem finanziellem Aufwand möglich. (vgl. Gilbert 2007b: 1–11).

In einer agentenbasierten Simulation sind die Agenten Softwarekonstrukte, welche in einer virtuellen Umgebung agieren und sich durch ihre individuellen Handlungen definieren. Sie sind unabhängig in ihrer Entscheidungsfindung und können sich an wechselnde Umstände anpassen (vgl. Abar et al. 2017: 14). Durch das autonome Handeln der einzelnen Akteure und ihre Interaktionen untereinander ergeben sich dynamische Entwicklungen, welche von der Simulationsumgebung in Form von Daten ausgegeben werden und so die Analyse von kompletten Systembewegungen (bspw. technisch, sozial oder die Veränderung über Zeit) ermöglichen (vgl. Dijkema, Lukszo & Weijnen 2013: 5).

5.1 SimCo²

SimCo – „Simulation of the Governance of complex Systems“ – ist in der Simulationsumgebung NetLogo geschrieben, welche frei unter einer GPL-Lizenz zur Verfügung steht. NetLogo wird auch in der Forschung für die Simulation von mittleren bis großen Simulationen der Sozial- und Naturwissenschaften vorgeschlagen (vgl. Abar et al. 2017: 25).

5.1.1 Der Aufbau von SimCo

Das wissenschaftliche Ziel des Simulationsframeworks SimCo ist die empirische Untersuchung der Möglichkeiten des Risikomanagements komplexer soziotechnischer Systeme ebenso wie die Untersuchung einer geplanten Systemtransformation (vgl. Adelt et al. 2018: 1; Adelt & Hoffmann 2017). Diese Arbeit greift auf den Ansatz der Systemtransformation zurück und untersucht, inwiefern statische Eingriffe den Personenverkehr nachhaltiger gestalten können.

² Aktuelle Informationen zu SimCo finden sich unter simco.wiwi.tu-dortmund.de, der Softwarecode ist verfügbar unter www.comses.net/codebases/5924.

Agenten

Agenten sind in SimCo die Verkehrsteilnehmer. Sie treffen ihre Entscheidung basierend auf dem größten subjektiv wahrgenommenen Nutzen (SEU) einer Handlungsalternative.

$$SEU(A_i) = \sum_{j=1}^n p_{ij} * U(O)_j$$

Variable	Bedeutung
SEU (A_i)	Der größte, subjektiv wahrgenommene Nutzen einer Handlungsalternative (A)
U	Bewertung
O	Erwartetes Ergebnis
p	Wahrscheinlichkeit
n	Anzahl Optionen

Tabelle 1: Variablen der SEU-Formel (in Anlehnung an Konidari & Mavrakis 2007; zit. n. Adelt et al. 2018: 13)

Dieser ergibt sich aus der Summe der Wertschätzung aller erwarteten Ergebnisse, multipliziert mit der erwarteten Eintrittswahrscheinlichkeit des jeweiligen Ergebnisses (vgl. Esser 1999; Konidari & Mavrakis 2007). Da sich die Agenten aber nicht immer zwangsläufig rational für die beste Alternative entscheiden, solange die nächstbeste Alternative nicht deutlich schlechter ist, beinhaltet die Simulation auch einen Fuzzy-Faktor, der dies abbilden soll.

Agenten besitzen Variablen, welche ihre Eigenschaften definieren. Dazu gehören: Der *Ort*, an welchem sie sich befinden und die *noch zu besuchenden Orte* ihrer täglichen Ablaufroutine. Weiter gehören dazu die *vorhandene* und die *derzeit benutzte Technologie*. Die *individuelle Grundeinstellung* sowie *Limits*, welche sich sowohl auf das verfügbare Geld oder die Weitsicht, also die Voraussicht der Konsequenzen ihres Handelns, beziehen. Außerdem umfassen die Variablen die *Auswirkung der Handlungen der Agenten* und ein *Gedächtnis*, welches besuchte Netzwerkstrukturen und die Ergebnisse der SEU Berechnungen enthält (vgl. Tabelle 8 des Anhanges).

Netzwerk

Das Netzwerk besteht sowohl aus Knoten (Nodes) und Kanten (Edges). Nodes sind bestimmte Punkte einer urbanen Umgebung, von denen es drei Arten gibt: Home-Nodes, in welchem der Agent seine Ablaufroutine startet und beendet, Task-Nodes, welche der Agent abarbeitet und Standard-Nodes, welche keinen bestimmten Zweck erfüllen aber zur Verbindung von Edges dienen. Edges sind die Straßen des Netzwerkes, sie verbinden die Nodes und ermöglichen so eine Fortbewegung der Agenten zwischen den Nodes in einer bestimmten Zeit. Es existieren Edges, die ausschließlich durch einzelne Verkehrsmittel genutzt werden dürfen (Auto, öffentlicher Nahverkehr, und Fahrrad), aber auch kleine und große „shared-edges“ welche mit allen Fortbewegungs-Technologien benutzt werden können und sich in ihrer Kapazität bzw. Geschwindigkeit unterscheiden können.

Sowohl Edges als auch Nodes besitzen sie definierende, veränderliche Variablen. Die Variable *Nutzungsrecht* definiert, welche Fortbewegungs-Technologie die Straße befahren darf. Die Variable *Grenzwert* beschreibt die maximalen Grenzwerte für unterschiedliche Dimensionen wie die maximale zulässige Luftverschmutzung, die maximale physische Kapazität oder die maximale Lebenszeit der Struktur. Die Variable *Auswirkung* beschreibt, wie sich ein Besuch der Struktur auswirkt

und kann sowohl finanzielle Auswirkungen, als auch Auswirkungen auf die Umwelt beinhalten. Die *Identität* beschreibt, um welche Art von Node/Edge es sich handelt. Die Variable *Summe aller Auswirkungen* kumuliert alle positiven und negativen Auswirkungen – verursacht durch die Agenten bzw. deren Aktionen. Zusätzlich haben sowohl Edges als auch Nodes eine Variable *Gedächtnis*, welche die vorherigen Zustände speichert. Edges haben im Gegensatz zu Nodes noch eine weitere Variable, die die *Längenangabe* enthält, welche definiert, wieviel Zeit die Agenten bei Nutzung der unterschiedlichen Technologien für die Fahrt auf einer Edge benötigen.

Technologie

Technologien ermöglichen es den Akteuren sich in dem Netzwerk zu bewegen. Es existieren der öffentliche Personennahverkehr, das Auto und das Fahrrad. Die definierenden Variablen der Technologie sind die folgenden: *Die Lebensdauer*, also die Zeit, wie lange die Technologie nutzbar ist, bis sie ersetzt werden muss, der *Kaufpreis* und ein „*Technologiefaktor*“. Letzterer erlaubt es, die Eigenschaften der Technologie zu bestimmen: Betriebskosten, Größe, externe Effekte (die Auswirkung auf das Netzwerk) und die Geschwindigkeit.

Operateure

Das Ziel von SimCo besteht darin, die Auswirkung von politischen Eingriffen in ein komplexes System zu untersuchen. Der Operator tätigt eben jene Eingriffe: Er kann alle Variablen des Netzwerkes und der Technologien ändern, um dadurch – indirekt – das Verhalten der Agenten zu beeinflussen. Dies kann zum einen in Form einer gerichteten Steuerung geschehen, um damit bestimmte Ziele zu erreichen, wie zum Beispiel die erhöhte Nutzung nachhaltiger Verkehrstechnologien, oder auch als Krisenmanagement zur Verhinderung bestimmter Systemzustände (z. B. Stau). Hierfür kann der Operator auf Sensoren zurückgreifen, welche die Daten wiedergeben, die das System in Echtzeit beschreiben und mittels dieser Daten auch Eingriffe vornehmen. Zusätzlich bietet SimCo auch eine Implementierung einer automatischen Regulierung des Verkehrs in Form einer Soft Control (Anreize) und einer Hard Control (Verbote/Sperrungen), welche aber nicht in diesem Arbeitspapier behandelt werden (Adelt & Hoffmann 2017).

5.1.2 Das Szenario

Die individuelle Grundeinstellung der Agenten sowie die empfundenen Eigenschaften der Technologien des verwendeten Szenarios basieren auf einer von Teigelkamp (2015; zit. n. Adelt et al. 2018: 18–21), durchgeführten Studie. In der Studie wurden quantitativ fünf Akteurstypen (Pragmatic, Eco, Indifferent, Saver und Convenient) identifiziert, welche sich durch unterschiedlich starke Präferenzen in den Bereichen günstige, schnelle, umweltbewusste und komfortable Fortbewegung (Cheap, Fast, Eco-Friendly, Comfortable) definieren (siehe Tabelle 7 im Anhang). So legt zum Beispiel ein umweltbewusster Akteur nur wenig Wert auf Geschwindigkeit und Komfort, aber viel Wert auf Umweltverträglichkeit. Der „Saver“, legt hingegen gesteigerten Wert auf einen kostengünstigen Fortbewegung, der auch vergleichsweise unkomfortabel sein darf. Zusätzlich diente die Studie dazu,

den Technologiefaktor durch die subjektiv wahrgenommenen Geschwindigkeiten, die Kosten, die Umweltverträglichkeit und den Komfort der einzelnen Verkehrsträger zu bestimmen. Das schnellste, komfortabelste und teuerste Verkehrsmittel ist demnach das Auto, wohingegen das Fahrrad zwar langsamer als das Auto, aber schneller als die öffentlichen Verkehrsmittel ist und am wenigsten die Umwelt belastet (siehe Tabelle 6 des Anhangs).

Das Netzwerk soll in etwa eine mittelgroße deutsche Stadt simulieren. Die 6000 Agenten können daher auf 1311 Edges zurückgreifen, welche hauptsächlich aus kleinen Straßen bestehen und mittels aller verfügbaren Technologien genutzt werden können (Shared Small, 75 %). Zusätzlich existieren mit nur geringeren Anteilen von jeweils ungefähr 8 % große Straßen, welche von unterschiedlichen Technologien nutzbar sind und Straßen, die jeweils nur von dem Auto oder den öffentlichen Verkehrsmitteln benutzt werden können. Nur durch das Fahrrad nutzbare Wege bilden die Ausnahme mit einem prozentualen Anteil von 0,2 % der Strecken (vgl. Tabelle 2). Die Edges besitzen, der Realität in Deutschland entsprechend, nur ein physisches Kapazitätslimit. Emissionen können in beliebigem Ausmaß ausgestoßen werden. Abbildung 8 zeigt das entstehende Netzwerk, die gelben Punkte sind hierbei die Nodes und die grünen Linien die verbindenden Edges. Beides sind Versionen eines strukturell äquivalenten Netzwerkes, wobei die linke Grafik eine um den Faktor 10 herunterskalierte Version zeigt. Wird nun ein neues Experiment gestartet, werden zunächst die Nodes und Edges geladen. Anschließend werden die Agenten zufällig auf eben diese aufgeteilt. Die Agenten erhalten ihre Aufgabenlisten (tasks) und die für sie verfügbaren Technologien. Um den nächsten Knoten (Node) zu erreichen, werten sie mit der SEU-Formel die für sie beste Alternative aus. Einflussfaktoren hierbei sind die eigenen Präferenzen, das benutzte Transportmittel und dynamische Daten wie die aktuelle Verkehrslage, sowie die Länge der Straßen. Falls die finanziellen Ressourcen nicht ausreichen, scheidet der Akteur aus der Simulation aus und wird als zufällige Kopie eines noch bestehenden Agenten neu in die Simulation eingefügt. Dieser Mechanismus hilft, Wandel im Sinne von Umdenken bzw. eines gesamtgesellschaftlichen Lernfortschrittes darzustellen, welcher auf diese Weise leichter zu implementieren ist als ein individuelles Lernen der einzelnen Akteure. Sollte der nun erreichte Knoten nicht das finale Ziel sein, wiederholt sich der Prozess bis das Ziel erreicht wurde, hier kann der Agent nun seinen Verdienst beziehen und seine getanen Schritte auswerten und speichern. Sollte ein Verkehrsmittel aufgrund der ablaufenden Lebensdauer nicht mehr nutz-

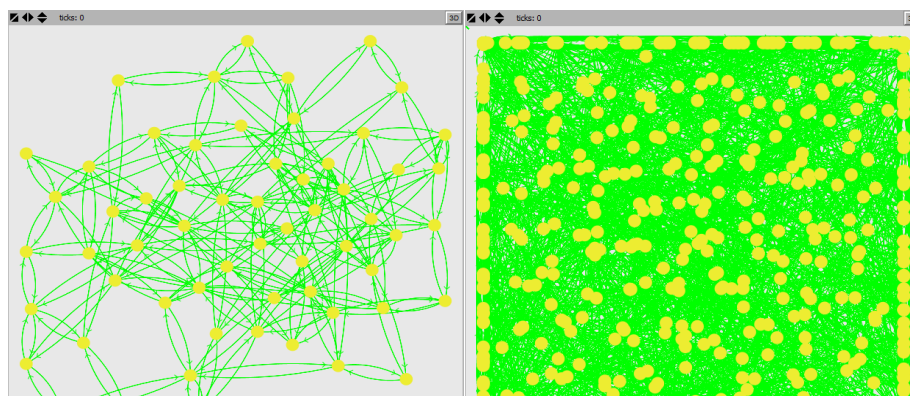


Abbildung 8: DiscGo-realistic-large-complete Netzwerk: Links 10 %; Rechts 100 %

bar sein, wird zu 80 % die gleiche Technologie erneut gekauft und zu 20 % sich für eine neue, zufällige Alternative entschieden (vgl. Adelt et al. 2018: 14–16).

Für die Auswertung wird in dem Szenario zwischen einer kurzen und einer langen Frist unterschieden, die kurze Frist simuliert Tage, die lange Frist Monate, bestehend aus 144 bzw. $144 \cdot 30 = 4320$ Ticks, wobei allen Experimenten ein Zeitraum von 8000 Ticks zugrunde liegt. Der Fuzzy-Faktor in dem Szenario beträgt 0,9. Dies bedeutet, dass der Agent eine zufällige Alternative auswählt die mindestens einen 90%igen Nutzen im Vergleich zu der bestmöglichen Alternative ergibt. Durch das Erreichen eines Task-Nodes verdienen die Agenten vier Geldeinheiten (Payoff-task). In der kurzen Frist versuchen die Agenten nicht mehr als 50 Geldeinheiten auszugeben (soft-limit money), wobei ein finanzieller Spielraum besteht (financial-cushion). Erst in der langen Frist existiert ein Limit von -900 Geldeinheiten, welches beim Überschreiten zu einem Ausscheiden des Agenten führt.

Tabelle 2: DiscGo realistic large Setup (in Anlehnung an Adelt et al. 2018: 23)

		N	Anteil (%)
Akteurtyp	pragmatic	1000	16.67 %
	eco	600	10 %
	indifferent	1800	30 %
	saver	600	10 %
	convenient	2000	33,33 %
		6000	100 %
Edges	shared Big	110	8,4 %
	shared Small	984	75,1 %
	car Only	104	7,9 %
	bike Only	3	0,2
	pt Only	110	8,4 %
		1311	100 %
Nodes	home Node	204	34 %
	task Node	236	39 %
	standard Node	160	27 %
		600	100 %
Parameter	payoff-task	4	
	soft-limit-money	-50	
	strong-limit money	-900	
	financial-cushion	3	
	fuzzy factor	0,9	
	ticks	8000	

5.2 Implementierung der verkehrspolitischen Eingriffe

Für die Implementierung der verkehrspolitischen Eingriffe dient das zuvor beschriebene Szenario einer deutschen Großstadt als Grundlage. Durch eine Änderung der Szenarioparameter, basierend auf den zuvor verfassten Hypothesen (vgl. Kap. 4.3), werden fünf Experimente entwickelt. Jedes Experiment wird zwanzig Mal durchgeführt, wobei sich die vorab festgelegten Saatwerte für den Zufallsgenerator bei jedem der zwanzig Durchläufe unterscheiden. Jedes Experiment nutzt die gleichen 20 (unterschiedlichen) Zufallsverteilungen, wodurch etwaige Unterschiede in der Entwicklung der Experimente aufgrund der unterschiedlichen Agentenplatzierung identifiziert bzw. ausgeschlossen werden können. Die Experimente wurden zunächst lokal in einem kleinen Netzwerk getestet und dann anschließend auf LiDO, dem Linux-HPC-Cluster an der TU Dortmund (vgl. ITMC 2017) durchgeführt, da dieser aufgrund seiner höheren Rechenkapazität geringere Experimentlaufzeiten ermöglicht.

5.2.1 Experiment 1: Komfortsteigerung Fahrrad

H1: Eine Steigerung des Komforts des Fahrrads wird bewirkt durch Infrastrukturmaßnahmen, das erhöhte Aufkommen von Pedelecs und eine verbesserte Kommunikation. Dies erhöht die Nutzung des Fahrrads und führt zu einer Reduzierung der Umweltbelastung.

Für die Umsetzung der ersten Hypothese wurde wie für die weiteren Experimente ein statischer Eingriff vorgenommen. Um die steigende wahrgenommene Attraktivität des Radfahrens zu simulieren wurde schrittweise der Komfortwert des Technologiefaktors des Fahrrads erhöht, da dieser auf einer subjektiven Einschätzung des Verkehrsmittels beruht. Es wurden zehn unterschiedliche Komfoteinstellungen von 100 % bis 200 % getestet und ausgewertet.

5.2.2 Experiment 2: Erhöhung der Anzahl von Bike-only-Straßen

H2: Ein Ausbau des Fahrradnetzes in Form von Fahrradschnellstraßen und der Umwandlung von bestehenden Straßen in Fahrradstraßen führt zu einer besseren Verfügbarkeit und Anbindung an das Verkehrsnetz. Dies führt zu einer erhöhten Nutzung des Fahrrads.

Für die Umsetzung von Hypothese 2 wurde das Verkehrsnetz mittels des SimCo-eigenen Netzwerkgenerators angepasst. Da das einfache Hinzufügen von Fahrradstraßen das bestehende Node-Edge-Verhältnis ändern würde, wurden für dieses Experiment „Car-only“-Edges durch „Bike-only“-Edges ersetzt. Dies ist insofern sinnvoll, da somit ein Ausbau des Fahrradnetzes simuliert wird, und außerdem die Idee der Umwandlung von ehemaligen Autostraßen in Fahrradstraßen abgedeckt wird. Zunächst wurde in den Experimenten eine Erhöhung der Fahrradstraßen um bis zu 18 Stück getestet. Die Ergebnisse zeigten allerdings keine große Veränderung. Daher wurden in einem zweiten Experimentdurchlauf zusätzlich zum Grundscenario, welches drei Fahrradstraßen besitzt, sechs weitere Verkehrsnetze generiert, welche 7, 11, 15, 19, 23 oder 27 Fahrradstraßen und entsprechend weni-

ger Autostraßen besitzt. Somit wird im Maximum die Anzahl der Fahrradstraßen um das Neunfache erhöht und die Anzahl der Autostraßen um 23 % gesenkt.

5.2.3 Experiment 3: Verteuerung des Autos

H3: Eine Erhöhung des Preises für Kraftstoff führt zu einer geringeren Nutzung des Autos und zu einer höheren Nutzung der nachhaltigeren Alternativen. Gleiches gilt für die Einführung einer Distanz- und CO₂-abhängigen Maut.

Um die steigenden Kosten bei einer Kraftstoffpreiserhöhung oder einer Maut zu simulieren, wurden die wahrgenommenen Kosten des Autos (Money) erhöht. Es wurden zunächst zehn Werte getestet, beginnend bei 100 % hin zum 6-fachen des Ursprungspreises. Da die Agentenverteilung aber ab dem 2-fachen des Preises sehr unstabil wurde und eine Großzahl der Agenten ausstarb, wurde eine zweite Versuchsreihe mit zehn Werten zwischen 100 % und 200 % des Ursprungswertes durchgeführt.

5.2.4 Experiment 4: Verlangsamung des Autos

H4: Die Einführung einer stadtweit geltenden Tempo-30-Zone mit der Ausnahme von großen Hauptverkehrsstraßen führt zu einer geringeren Nutzung des Autos und somit auch zu CO₂ Einsparungen.

In dem verwendeten Szenario existieren zusätzlich zu den nur von einer Technologie nutzbaren Edges auch Straßen, die von Auto, Fahrrad und den öffentlichen Verkehrsmitteln genutzt werden können. Eine stadtweite Tempo-30-Zone (statt der üblichen 50 km/h) wird in diesem Experiment durch eine Reduktion der Geschwindigkeit des Autos auf den „shared-small“ Edges erreicht. Hierdurch bleiben die Hauptverkehrswege des Autos unangetastet, aber auf den kleinen Straßen wird das Auto unattraktiver, da die Fortbewegung mit dem Auto an Geschwindigkeit einbüßt. Um die Geschwindigkeitsreduktion zu simulieren wurden fünf Durchläufe zusätzlich zum Grundszenario durchgeführt, in welchem die Geschwindigkeit des Autos auf besagten Straßen um bis zu 50 % gesenkt wurde. Dabei wurde bewusst die Überprüfung einer bis zu 100%igen Reduzierung ausgelassen, da dies einem Verbot des Autos in den Städten gleichkommen würde und somit nicht die Idee einer geschwindigkeitsreduzierten Zone widerspiegeln würde. Vielmehr wird durch die Geschwindigkeitsreduzierung u. a. die Einführung von Tempo-30-Zonen im Stadtbereich (40%ige Reduktion) simuliert.

5.2.5 Experiment 5: Reduzierung der Kosten des ÖPNV

H5: Eine starke Vergünstigung, bzw. Kostenbefreiung des öffentlichen Personennahverkehrs führt zu einer erhöhten Nutzung desselben und somit auch zu einer CO₂-Reduzierung.

Für das fünfte Experiment wurde ähnlich wie für das Auto in Experiment 3 der Technologiefaktor beeinflusst. Allerdings wurde der Wert in der Dimension Money (Experiment-Variable „PT-Money“) für dieses Experiment nicht erhöht, sondern vielmehr in zehnpromzentigen Schritten bis zur Kostenlosigkeit verringert. So erge-

ben sich zehn Durchläufe mit schrittweise sinkenden Kosten, um jeweils 10 % für den öffentlichen Nahverkehr, beginnend bei 100 %.

Tabelle 3: Zusammenfassung der Experimente und Eingriffe

Hypothese	Ort des Eingriffs	Ursprünglicher Wert	Eingriff
H1	Komfort Fahrrad	1	1,1; 1,2; 1,3; ... 2
H2	Bike-Only-Edges	3	7; 11; 15; 19; 23, 27;
H3	Car-Money	1	1,5; 2; 2,5; 3,5, ... 6
H4	Speed Car auf Shared-Small-Edge	1	1,1; 1,2; 1,3 ;1,4 ;1,5
H5	PT-Money	1	0,9; 0,8; 0,7; ... 0

5.3 Auswertung der Experimente

Die Auswertungsdateien enthalten die durchschnittliche Anzahl der Agententypen sowie die durchschnittliche prozentuale Nutzung der Verkehrsträger (insgesamt und aufgeschlüsselt nach Agententypen) und den durchschnittlichen SEU-Wert. Hinzu kommt das arithmetische Mittel für die Auslastungen der Edges in der jeweils kurzen und langen Frist nach Emissionen und Kapazität. Weitere Messwerte umfassen die maximale Auslastung der Edges (nach Emissionen und Kapazität) sowie die finale Verteilung der verschiedenen Agententypen und die Anzahl der ausgeschiedenen und feststeckenden Agenten³.

Im folgendem werden das zweite und das fünfte Experiment nur kurz betrachtet, da sie keine (nachhaltige) Veränderung des Straßenverkehrs herbeiführten.

Experiment 2: Erhöhung der Anzahl von Bike-only-Straßen

Die getestete maximale Erhöhung der Anzahl von Bike-only-Straßen auf bis zu 27 hat nur eine minimale Emissionsreduzierung (0,3 Prozentpunkte) bewirkt. Ebenso wie die Verkehrsmittelnutzung (vgl. Abbildung 9) ist der SEU-Wert leicht schwankend. Dies ist der zufälligen Verteilung der Fahrradstraßen bei der Netzgenerierung geschuldet. Trotzdem bleibt die Verkehrsmittelnutzung, mit einer leichten Tendenz hin zu einer niedrigeren Auto- und höheren Fahrradnutzung, stabil, obwohl die Anzahl der Fahrradstraßen um das Neunfache gesteigert wurde. In Anbetracht der prozentual drastischen Steigerung der Fahrradstraßen ist der erzielte Effekt aber vernachlässigbar klein.

³Zur besseren Übersicht wurden zusätzlich Grafiken, sowohl unter der Verwendung von Bash-Skripten, als auch mittels IBM SPSS Statistics 24 (vgl. IBM 2017) für die Experimente aus den CSV-Dateien generiert.

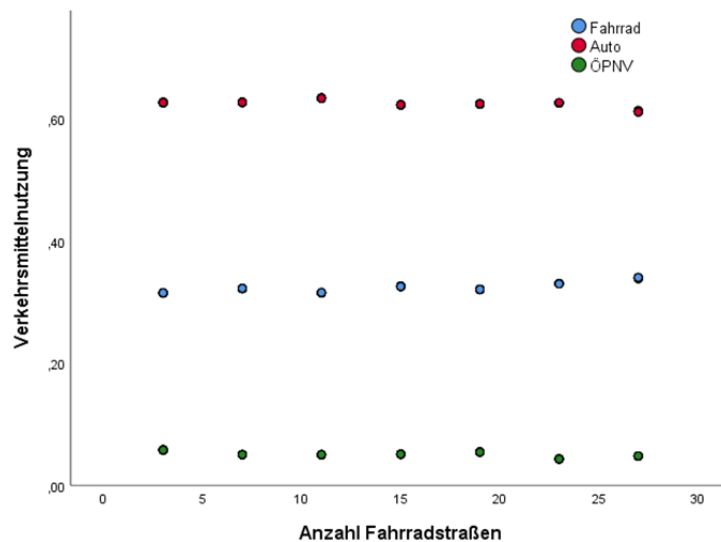


Abbildung 9: Verkehrsmittelnutzung bei Substituierung von Autostraßen durch Fahrradstraßen

Experiment 5: Reduzierung der Kosten des ÖPNV

Die Reduzierung der Kosten des ÖPNV hatte hingegen gar keinen Einfluss auf den Modal Split (vgl. Abbildung 10), die Emissionen und den SEU-Wert der beteiligten Akteure. Daraus folgt, dass die Kosten des Nahverkehrs keinen Einfluss auf das Verhalten der Agenten haben und somit andere Faktoren wie Geschwindigkeit oder Komfort einen größeren Stellenwert bei der Entscheidung der Agenten besitzen müssen.

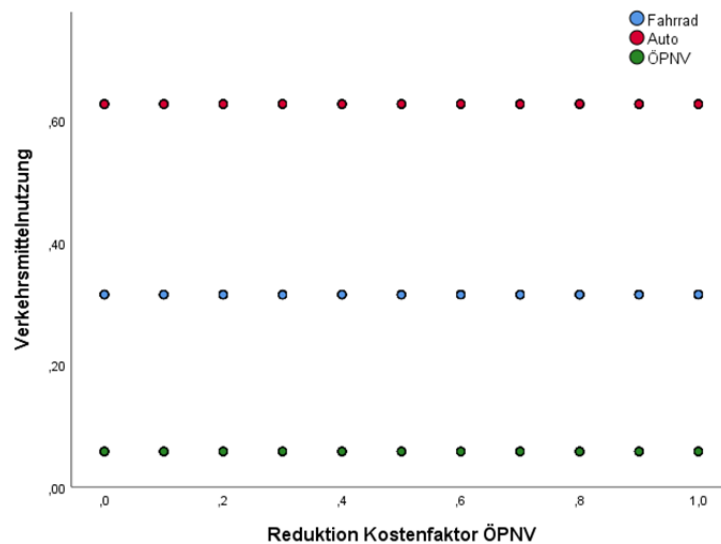


Abbildung 10: Reduktion Kostenfaktor ÖPNV (Experiment 5)

5.3.1 Auswertung Experiment 1: Komforterhöhung des Fahrrads

Durch die schrittweise Erhöhung des Komforts der Fahrradnutzung ist eine eindeutige Veränderung der Verkehrsmittelnutzung des Autos und des Fahrrads hin zur Nachhaltigkeit zu verzeichnen.

Verkehrsmittelnutzung

Durch die Erhöhung des Fahrradkomforts um 0,1 (10 %) stieg die Fahrradnutzung drastisch von 32 % auf 49 % an. Die Autonutzung erfährt hingegen einen Rückgang um 17 Prozentpunkte (von 63 % auf 46 %) und sinkt somit genauso stark wie die Fahrradnutzung steigt (vgl. Abbildung 11). Weitere Erhöhungen des Komforts des Fahrrads bewirkten nur minimale Nutzungsveränderungen: Eine Komfortsteigerung auf 190 % ergab eine 49%ige Nutzung des Fahrrads und somit nur eine Steigerung um %einen Prozentpunkt gegenüber einer 110%igen Komfortsteigerung. Ein weiterer entscheidender Einschnitt tritt bei einer Komfortsteigerung auf 200 % ein. Hier führt die Erhöhung zu einer 54%igen Fahrradnutzung und somit zu einer Steigerung um weitere 5 Prozentpunkte gegenüber der 1,9-fachen Steigerung. Ebenso wie bei der Steigerung um 110 % ersetzt das Fahrradfahren das Autofahren, da die Autonutzung gleichsam um 5 Prozentpunkte abnimmt. Während aller Durchläufe mit unterschiedlichen Komfortwerten für das Fahrrad blieb die ÖPNV-Nutzung unverändert bei 6 %.

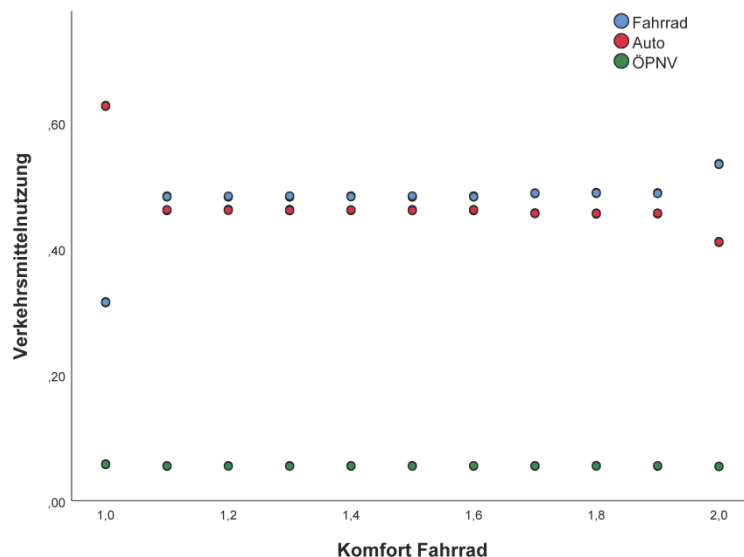


Abbildung 11: Durchschnittliche Verkehrsmittelnutzung bei Komforterhöhungen des Fahrrads (H1)

Ausgelöst werden diese beiden sprunghaften Veränderungen durch die individuellen Entscheidungen der Akteure. Der starke Anstieg der Fahrradnutzung infolge einer Erhöhung des Komforts auf 110 % des Basiswertes lässt sich dadurch erklären, dass Agenten, welche ein komfortables Verkehrsmittel bevorzugen (vgl. Abbildung 12), ein zuvor genutztes Auto durch das Fahrrad substituieren. Andere Agententypen bleiben von der Komfortsteigerung des Fahrrads unbeeinflusst. Bei der Erhöhung des Komforts auf 200 % des Basiswertes findet nur bei den umweltbewussten Agenten eine Veränderung der Verkehrsmittelnutzung statt. Sie ersetzen das Auto komplett durch das Fahrrad.

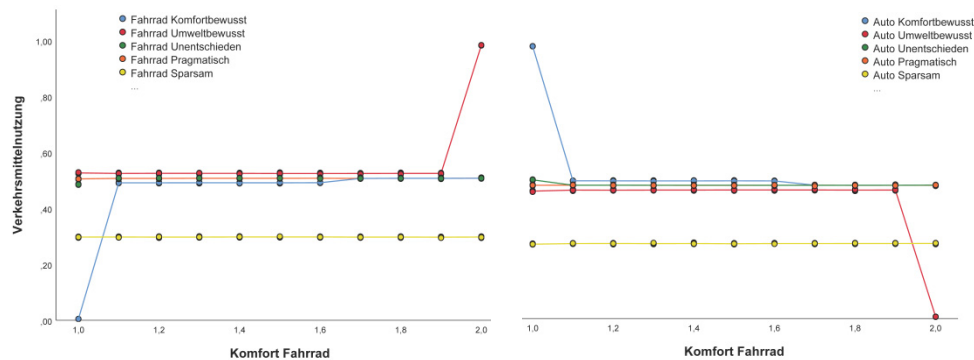


Abbildung 12: Durchschnittliche Verkehrsmittelnutzung des Autos und Fahrrads nach Agententyp bei einer Erhöhung des Fahrradkomforts (H1)

Die Betrachtung der Verkehrsmittelentwicklung innerhalb der Experimentdurchläufe über die Zeit zeigt, dass sich die durch Komfortsteigerungen bewirkte Veränderung schnell und stabil auswirkt. Der Effekt tritt sofort ein und die Schwankungen in der Verkehrsmittelnutzung bei 1,1-fachem Komfort entsprechen in etwa denen der Verkehrsmittelnutzung ohne Eingriff (vgl. Abbildung 13)

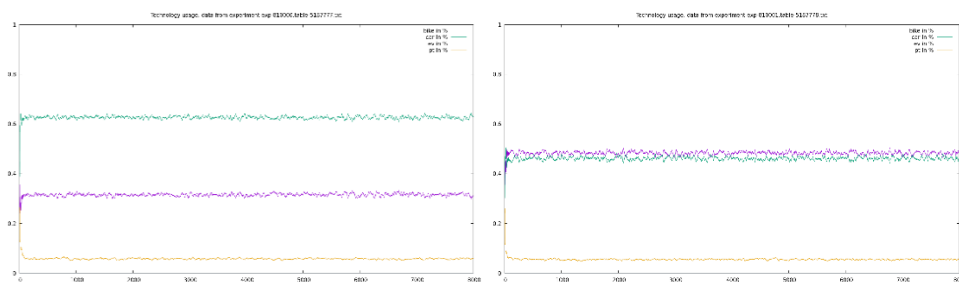


Abbildung 13: Entwicklung der Verkehrsmittelnutzung: Links: Kein Eingriff; Rechts 1,1 Komfort (H1)

SEU-Wert und Edge-Auslastung

Der SEU-Wert steigt für alle Agententypen mit Ausnahme der Komfort präferierenden Agenten bei der Erhöhung des Fahrradkomforts um 10 % (vgl. Abbildung 14). Weitere Erhöhungen lassen den SEU-Wert aller Agenten weiter steigen. Ein Sprung des SEU-Wertes von 15,1 auf 15,9 der umweltbewussten Agenten ist bei einer Steigerung des Komforts um 200 % zu beobachten, bedingt durch das Umschwenken auf die Fahrradnutzung.

Zusätzlich sind die Ergebnisse des Experiments sowohl unter sozialen als auch unter Nachhaltigkeitsaspekten positiv verlaufen. Die Akteurtypenzusammensetzung blieb über alle Eingriffe konstant bei der Ursprungsverteilung, wenige Akteure blieben aufgrund fehlender Mittel oder evtl. Sackgassen stecken. Schließlich ist die Anzahl der ausgeschiedenen Agenten vernachlässigbar gering und stabilisiert sich mit steigendem Komfort des Fahrrads (40 ausgeschiedene komfortbewusste Agenten bei 100 % und 10 ausgeschiedene bei 110 %) Die erhöhte Fahrradnutzung bei den zwei kritischen Werten führt auch zu Emissionsverringerungen auf den Edges. So konnte die kurzfristige Umweltbelastung um vier Prozentpunkte gesenkt

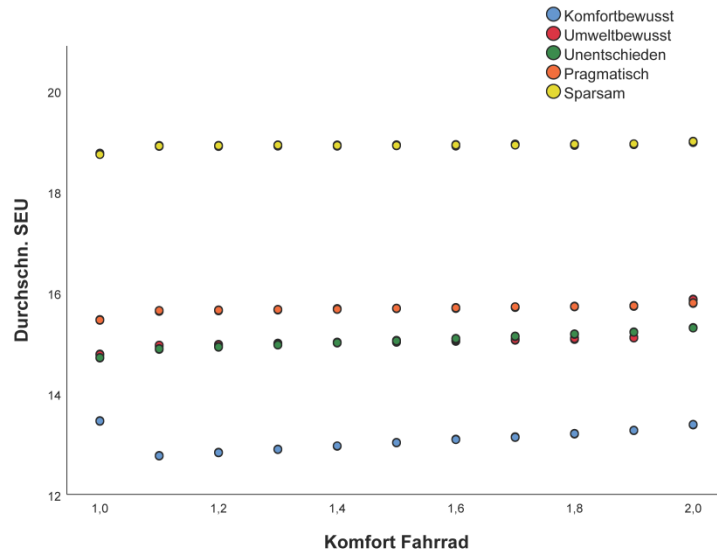


Abbildung 14: Durchschnittliche SEU Entwicklung der unterschiedlichen Agententypen bei einer Erhöhung des Fahrradkomforts (H1)

werden (von 18 % auf 14 %) und die langfristige Umweltbelastung um sechs Prozentpunkte (von 33 % auf 27 %). Auch die durchschnittliche Kapazitätsbelastung sank um vier Prozentpunkte (von 22 % auf 18 %) bei der Erhöhung des Komforts um 10 %. Weitere, kleinere Kapazitätsentlastungen sind bei der Erhöhung des Komforts um das Doppelte zu beobachten (vgl. Tabelle 4).

Messwert	Bike Comfort		
	1	1,1	2,0
Durchschn. Auslastung Edges (in %)			
Emissionen kurze Frist	0,180	0,143	0,132
Emissionen lange Frist	0,334	0,266	0,264
Kapazität kurze Frist	0,216	0,184	0,174
SEU nach Agententyp (absolut)			
Pragmatisch	15,46	15,64	15,80
Umweltbewusst	14,78	14,95	15,86
Unentschieden	14,71	14,88	15,31
Sparsam	18,75	18,91	18,99
Komfortbewusst	13,46	12,77	13,38

Tabelle 4: Edge-Auslastungen und SEU (H1)

Hypothesenauswertung

Hieraus ergibt sich, dass die Hypothese

H1: Eine Steigerung des Komforts des Fahrrads wird bewirkt durch Infrastrukturmaßnahmen, das erhöhte Aufkommen von Pedelecs und eine verbesserte Kommunikation. Dies erhöht die Nutzung des Fahrrads und führt zu einer Reduzierung der Umweltbelastung.

empirisch belegt werden konnte. Eine Steigerung des Komforts des Fahrrads führte zu einer erhöhten Fahrradnutzung. Besonders die initiale Erhöhung um 10 % hatte signifikante Auswirkungen, da dies offenbar ein Schwellenwert für die bequemen Agenten ist, welche mit einer Anzahl von 2000 Agenten einen Großteil der insgesamt 6000 Agenten darstellen. Um weitere Reduzierungen der Umweltbelastung zu erzielen ist ein größerer Eingriff (200 % Komfort) nötig. Für die Realität bedeuten die Ergebnisse, dass es evtl. einen Schwellenwert gibt, für welchen die Nutzung des Fahrrads komfortabel genug ist um das Auto zu ersetzen. Mögliche Komfortsteigerungen führen zu einem negativen Nutzen der komfortbewussten Nutzer, welcher aber durch weitere Fahrradkomfortsteigerungen ausgeglichen werden kann. Zusätzlich führt die erhöhte Fahrradnutzung auch zu einer reduzierten durchschnittlichen Auslastung der Edges, was wiederum dabei helfen kann Staus in der Realität zu reduzieren.

5.3.2 Auswertung Experiment 3: Verteuerung des Autos

Entsprechend der Beschreibung in Kap. 5.2.3 wurden zwei Durchläufe des Experiments durchgeführt. Im ersten Durchlauf wurden die Kosten für das Auto extrem erhöht (bis auf das Sechsfache). Da dies zu einer starken Populationsveränderung führte, werden im Folgenden hauptsächlich die Experimente des 2. Durchlaufs (eine maximale Erhöhung der Kosten auf 200 % des Ursprungswertes) beschrieben.

Starke Kostensteigerung

Die Steigerung der Kosten auf 600 % des ursprünglichen Wertes für die Technologie Auto ergab gravierende Veränderungen in der Zusammensetzung der Agentenpopulation (vgl. Abbildung 15). Bereits unter der Annahme, dass das Auto die doppelten Kosten verursacht, kann der komfortbewusste Agententyp nicht überleben, da er bereits bei einer Erhöhung der Kosten um 30 % nahezu und ab einer Erhöhung um 60 % komplett ausstirbt. Bei den dreifachen Kosten sterben die pragmatischen und die gleichgültigen Agententypen ebenso.

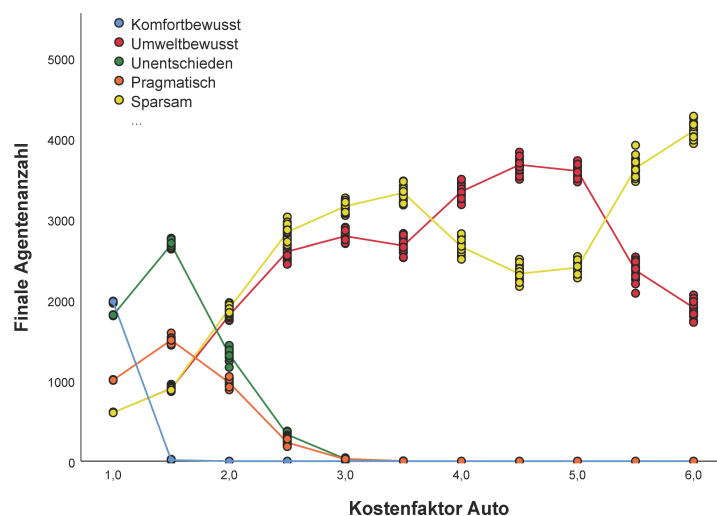


Abbildung 15: Finale Agentenanzahl bei einer starken Erhöhung der Kosten des Autos (H3)

Die verbliebenen umweltbewussten und sparsamen Agenten können sich durchsetzen und bleiben bestehen, sind aber starken Varianzen bei unterschiedlichen Zufallsverteilungen ausgesetzt, was durch die abweichende Y-Achsen-Verteilung der Einzelmesswerte deutlich wird. Die Kapazitätsauslastung und der Emissionsausstoß auf den Straßen sinken stetig mit den steigenden Kosten für die Nutzung des Autos. Die stärkste Emissionsabnahme findet bei der vierfachen Erhöhung statt. In diesem Intervall fallen die durchschnittlichen kurzfristigen Emissionen um 13 Prozentpunkte, mit steigender Eingriffstiefe sinken sie nur noch in einem schwächeren Ausmaß.

Schwache Kostensteigerung: Verkehrsmittelnutzung

Eine schwache Kostensteigerung des Autos bewirkt eine Reduzierung der Nutzung des Autos, während gleichzeitig die Nutzung des Fahrrads als Verkehrsmittel ansteigt. Bei verdoppelten Kosten für die Nutzung des Autos verzeichnet das Fahrrad mit 46 % zum ersten Mal einen höheren Anteil am Modal Mix als das Auto (45 %). Ohne Eingriff liegt die Nutzung des Fahrrads bei 32 % und die des Autos bei 63 %. Die ÖPNV-Nutzung steigt mit den steigenden Kosten des Autos geringfügig von 5 % auf 9 % (vgl. Abbildung 16).

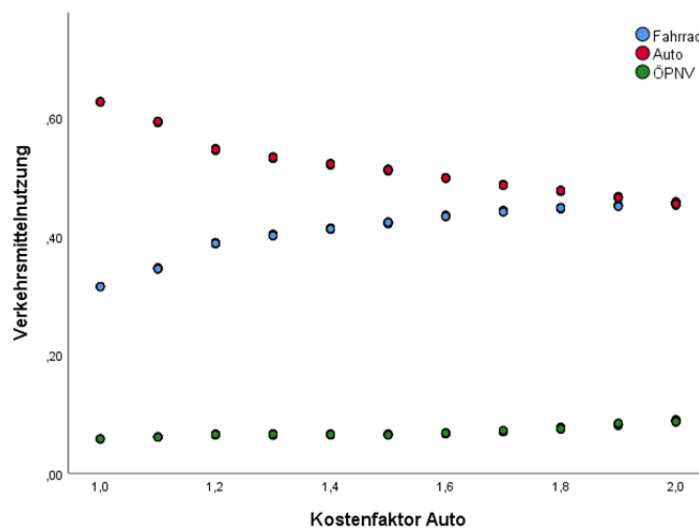


Abbildung 16: Durchschnittliche Verkehrsmittelnutzung bei Steigerung der Kosten des Autos (H3)

Eine Betrachtung der Verkehrsmittelnutzung im Zeitverlauf zeigt, dass durch höhere Kosten einerseits der Wechsel des Verkehrsmittels früher eintritt (Kosten: 1,2, Eintritt bei 3.500 Ticks; Kosten: 1,5, Eintritt bei 2.500 Ticks). Andererseits nähern sich Fahrrad- und Autonutzung weiter an. Gleichzeitig kommt es zu größeren Schwankungen in der Verkehrsmittelnutzung, welche hauptsächlich durch die Schwankungen der Verkehrsmittelwahl des komfortbewussten Agenten bewirkt werden (vgl. Abbildung 17).

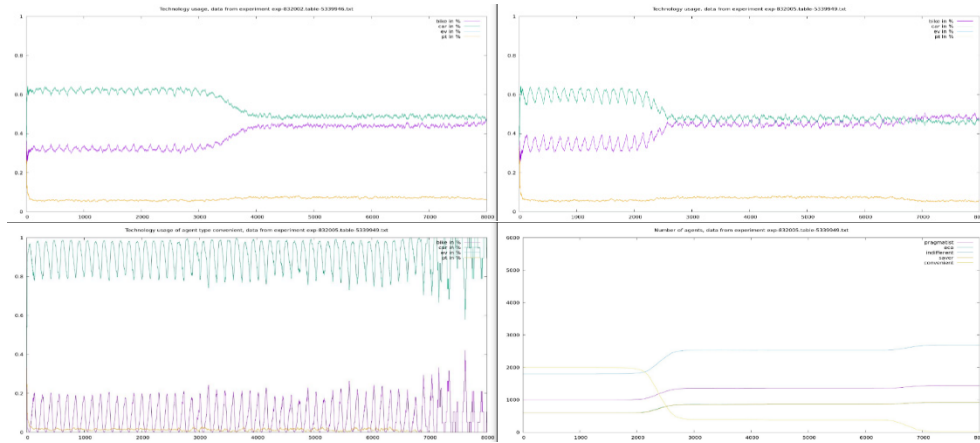


Abbildung 17: Verkehrsmittelnutzung bei 20 % Kostensteigerung (oben links); Verkehrsmittelnutzung bei einer 50%igen Kostensteigerung (oben rechts), Verkehrsmittelnutzung komfortbewusster Agenten (unten links), und Agententypenanzahl (unten rechts) bei einer Kostensteigerung um 50 % (H3). Vergrößerte Darstellung im Anhang: Abbildung 29

Durch das Aussterben der komfortbewussten Agenten übersteigt die Fahrradnutzung die Autonutzung. Besonders die umweltbewussten und komfortbewussten Agenten (vgl. Abbildung 18) reagieren auf die Veränderung der Kosten. So steigt die Nutzung des Fahrrads durch die komfortbewussten Agenten bereits ab einer Erhöhung der Kosten für das Auto um 10 % an, wohingegen die umweltbewussten Agenten das Fahrrad erst ab einer Erhöhung auf 140 % deutlich vermehrt nutzen. Die indifferenten Agenten nutzen das Fahrrad nur marginal mehr (ein Prozentpunkt Zuwachs bei der 2-fachen Kostensteigerung gegenüber der Ausgangslage), wohingegen die Pragmatisten ihr Nutzungsverhalten gar nicht ändern. Ein korrespondierendes Nutzungsverhalten ist für die Nutzung des Autos zu beobachten. So nutzen die komfortbewussten Agenten ab der ersten Kostenerhöhung das Auto weniger, wohingegen das Fahrrad erst ab einer 1,4-fachen Kostenerhöhung von den umweltbewussten Nutzern vermehrt genutzt wird.

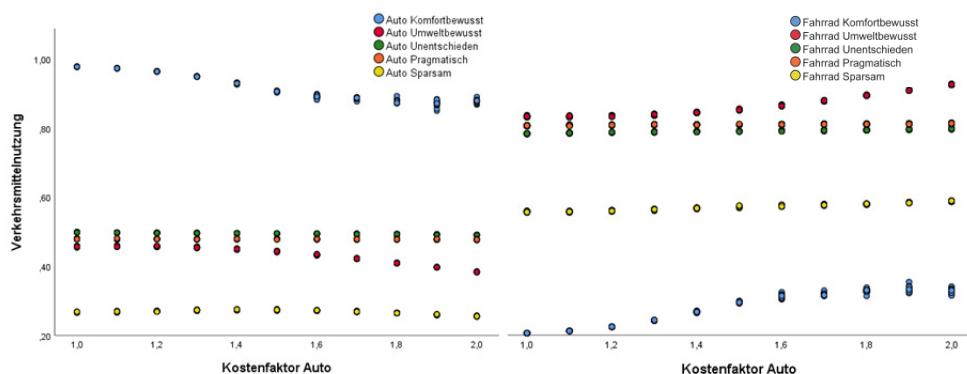


Abbildung 18: Durchschnittliche Verkehrsmittelnutzung des Autos (links) und Fahrrads (rechts) nach Agententyp bei Steigerung der Kosten des Autos (H3)

Schwache Kostensteigerung: SEU-Wert und Edge-Auslastung

Die Auslastung der Straßen fällt parallel zur Erhöhung der Kosten des Autos. Besonders bis zu einer Steigerung der Kosten um das 1,2-Fache sinken die Emissionen in kurzer als auch langer Frist im Verhältnis stark. Gleiches gilt für die durchschnittliche Kapazitätsauslastung der Straßen (vgl. Abbildung 19). So können die kurzfristig ausgestoßenen Emissionen in diesem Intervall von 18 % auf 16 %, die langfristigen Emissionen von 33 % auf 31 % und die Kapazitätsauslastung von 22 % auf 20 % verringert werden.

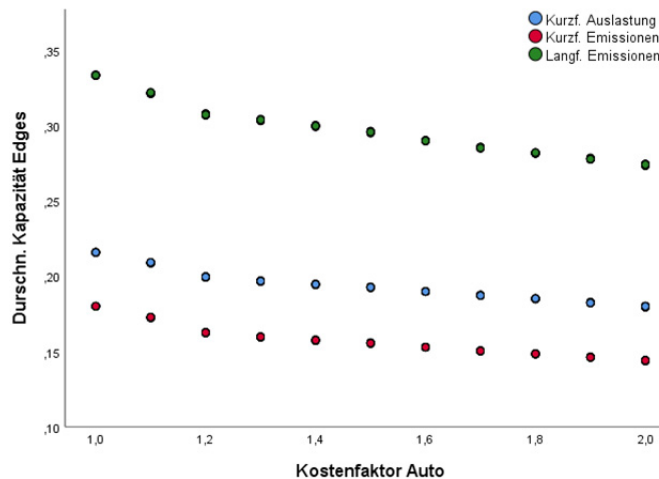


Abbildung 19: Durchschnittliche Kapazität der Edges bei einer Steigerung der Kosten des Autos (H3)

Ab einer Steigerung der Kosten um 30 Prozentpunkte sinken die Auslastungen weiter, aber weniger stark, daher werden um das Intervall von 1,3 bis 2,0 nur weitere Reduktionen in Höhe von zwei Prozentpunkten (kurzfristige Emissionen) vier Prozentpunkten (langfristige Emissionen) und zwei Prozentpunkten (Kapazitätsauslastung) erreicht.

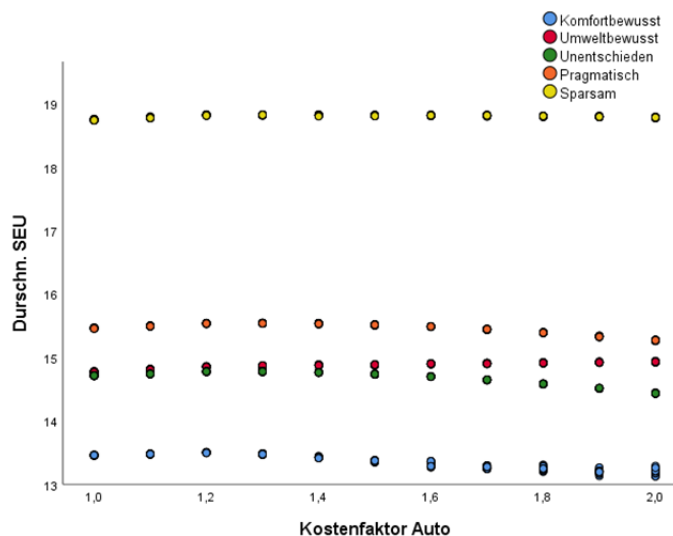


Abbildung 20: Durchschnittlicher SEU bei einer Steigerung der Kosten des Autos (H3)

Die maximale durchschnittliche Kapazitätsauslastung der Straßen, also die im Zeitverlauf schlechteste Gesamtsituation im Netzwerk, bleibt für jeden Testwert unverändert bei 25 %, wohingegen sowohl der maximal gemessene Emissionswert als auch der Durchschnitt der maximal gemessenen Werte der Edges in einem einzelnen Tick, mit steigendem Eingriff in das System sinkt.

Die SEU-Werte aller Agenten steigen bis zu einer Erhöhung der Kosten auf 120 % des ursprünglichen Wertes. Ab dort sinkt der SEU der komfortbewussten Agenten konstant, wohingegen die SEU-Werte aller anderen Agenten noch bis zu einem Wert von 1,4 steigen (umweltbewusste, pragmatische und unentschiedene Agenten) bzw. konstant bleiben (sparsame Agenten). Ab dort sinken die SEU-Werte aller Agenten mit Ausnahme des SEU-Wertes der umweltbewussten Agenten, welcher konstant ansteigt und sich so von 14,78 auf 14,98 steigern kann sowie des SEU-Wertes der sparsamen Agenten, welcher weiterhin konstant bei 18,82 bleibt. Daher profitieren alle Agenten von einer kleinen Erhöhung der Kosten (1,2), weitere Erhöhungen schaden hauptsächlich den komfortbewussten Agenten und führen maximal zu kleinen Nutzenzugewinnen für die anderen Agententypen (vgl. Abbildung 20).

Hypothesenauswertung

Die schwache Kostensteigerung der Betriebskosten des Autos bewirkt eine erhöhte Nutzung des Fahrrads und eine Reduzierung der Emissionen. Getragen wird die Entwicklung hauptsächlich von der geänderten Verkehrsmittelwahl der umweltbewussten und komfortbewussten Agenten. Letztere sterben ab einer Erhöhung des Preises auf 150 % aus. Trotzdem führen weitere Erhöhungen des Preises auch zu einer weiter steigenden Fahrradnutzung und zu weiter fallenden Emissionen. Somit lässt sich die Hypothese 3

H3: Eine Erhöhung des Preises für Kraftstoff führt zu einer geringeren Nutzung des Autos und zu einer höheren Nutzung der nachhaltigeren Alternativen. Gleiches gilt für die Einführung einer Distanz- und CO₂-abhängigen Maut.

empirisch bestätigen. Bei einer Umsetzung in der Realität ist allerdings fraglich, ob die Verkehrsteilnehmer stark angehobene Kosten unterstützen bzw. gutheißen würden. Trotzdem kann durch eine leichte Erhöhung der Kosten, beispielsweise durch eine Erhöhung der Energie-/Ökosteuer, eine gesamtgesellschaftliche Nutzensteigerung erzielt werden, da jeder einzelne Verkehrsteilnehmer von der Maßnahme profitiert. Um die Erhöhung der Kosten zu rechtfertigen, wäre eine Informationskampagne über die positiven Folgen sinnvoll, welche Akzeptanz in der Bevölkerung schaffen könnte. Ein positiver Nebeneffekt ist, dass zusätzliche Kosten für die Verkehrsteilnehmer Mehreinnahmen für den Staat sind, welche dieser weiter investieren kann, zum Beispiel in eine verbesserte Fahrradinfrastruktur. Zuletzt hat das Experiment auch gezeigt, dass höhere Eingriffstiefen einen schnelleren Wandel bewirken.

5.3.3 Auswertung Experiment 4: Verlangsamung des Autos

Eine Verlangsamung des Autos um 10 % auf kleinen Straßen, welche von allen Verkehrsmitteln genutzt werden können, führt zu einer Stabilisierung Agentenpopulation. Dies wird durch die finale Anzahl von überlebenden komfortbewussten Agenten am Ende eines Experimentdurchlaufs belegt, welche von 1974 auf 1999 steigt und sich daher an den Wert aus dem Basisexperiment ohne steuernde Eingriffe annähert. Weitere Verlangsamungen um den Faktor 1,2–1,4 haben keinen Effekt auf die Agentenverteilung. Erst eine Verlangsamung um den Faktor 1,5 führt zu einer geringeren finalen Anzahl an komfortbewussten Agenten (1937), wohingegen alle anderen Agententypen leichte Zuwächse verzeichnen.

Verkehrsmittelnutzung

Die initiale Verlangsamung um 10 % führt zu einer um neun Prozentpunkte erhöhten Fahrradnutzung von 41 % und zu einer um neun Prozentpunkte reduzierten Automobilnutzung von 54 % (vgl. Abbildung 21). Eine weitere Verlangsamung des Autos führt hingegen nicht zu einer weiter reduzierten Nutzung des Autos, sondern zu einem leichten Anstieg der Autonutzung und einer Reduktion der Fahrradnutzung.

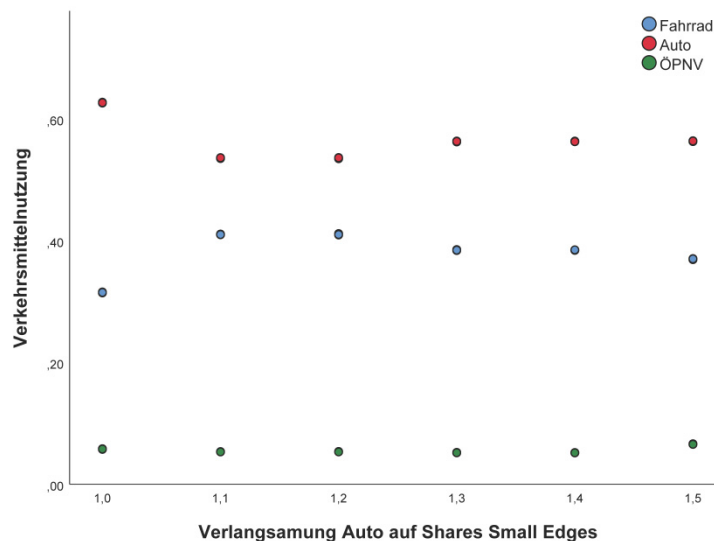


Abbildung 21: Durchschnittliche Verkehrsmittelnutzung bei einer Verlangsamung des Autos auf small Edges (H4)

Der öffentliche Personennahverkehr bleibt unverändert bei einem Anteil von 6 % am Verkehrsaufkommen mit einem leichten Anstieg um einen Prozentpunkt bei einer Verlangsamung der Autos um 50 %. Sowohl der umweltbewusste, der pragmatische und der unentschiedene Agententyp verringern ihre Nutzung des Fahrrads, während sie die Nutzung des Autos mit steigender Geschwindigkeitsreduzierung erhöhen. Dies wird begleitet von einer Nutzungssteigerung um 34 Prozentpunkte des Fahrrads durch die komfortbevorzugenden Agenten, ausgelöst durch die 10%ige Reduzierung des Tempos.

Bei einer 50%igen Geschwindigkeitsreduktion reagieren die sparsamen Agenten (vgl. Abbildung 22), mit einer stark erhöhten Nutzung von ÖPNV (56 %) und Fahrrad (39 %), welche dafür sorgt, dass in der aggregierten Verkehrsmittelnutzung das Fahrrad seine vorherigen Anteile beibehält, aber die Nutzung des ÖPNV ansteigt.

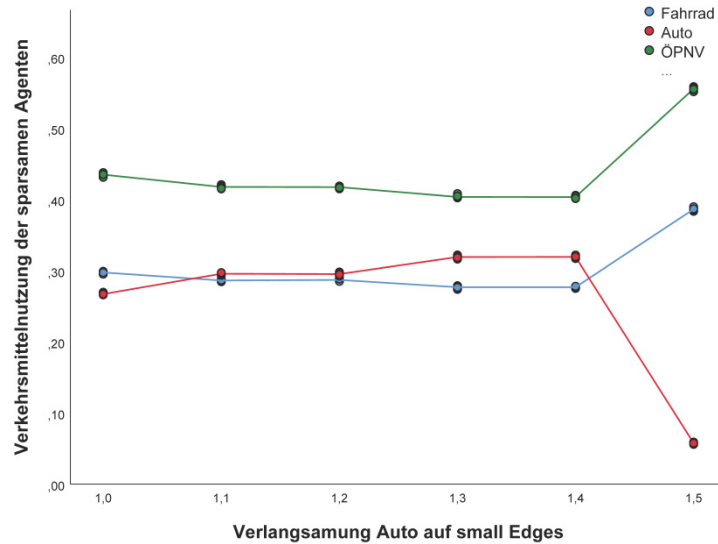


Abbildung 22: Durchschnittliche Verkehrsmittelnutzung der sparsamen Agenten bei einer Verlangsamung des Autos auf small Edges (H4)

Interessant ist, dass die Verkehrsmittelwahl nicht zeitabhängig ist: Das veränderte Nutzungsverhalten der Agenten tritt sehr schnell ein und verändert sich über die komplette Zeitspanne von 8000 Ticks nicht mehr. Als Beispiel dient hier die Verkehrsmittelwahl des sparsamen Agententyps: Er verändert zwar seine Verkehrsmittelwahl in Folge unterschiedlicher Eingriffstiefen, aber die zu Beginn getroffene Verkehrsmittelnutzung verändert sich nicht mehr im Laufe der Zeit. (vgl. Abbildung 23).

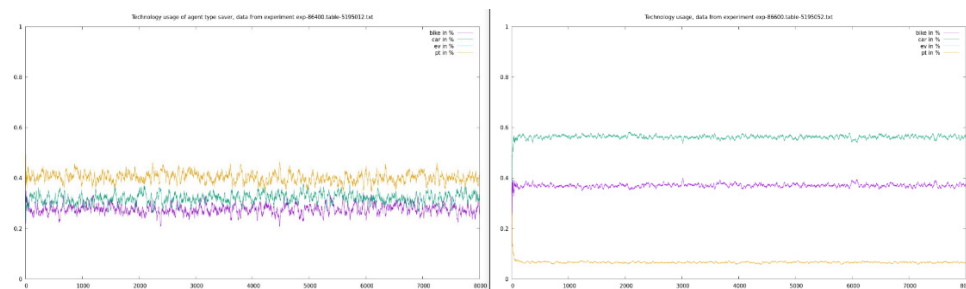


Abbildung 23: Verkehrsmittelnutzung des sparsamen Agententyps bei einer Eingriffstiefe von 1,3 (links) und 1,5 (rechts) (H4)

SEU-Wert und Edge-Auslastung

Trotz des steigenden Autoanteils, eintretend bei einer Verlangsamung um einen Wert größer als das 1,2-Fache, fallen die durchschnittlichen Emissionen sowohl in kurzer als auch langer Sicht konstant (vgl. Abbildung 24). Hierbei ist die initiale Verlangsamung um 10 % der Wert, der die größte Emissionssenkung bringt: Eine

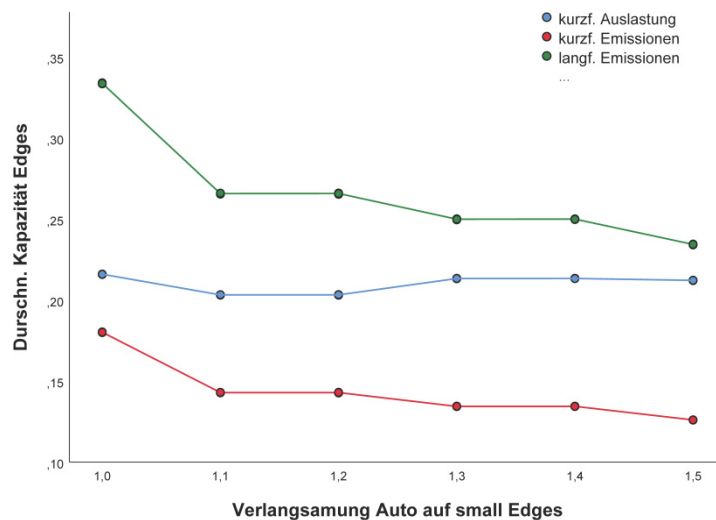


Abbildung 24: Durchschnittliche Kapazität Edges bei einer Verlangsamung des Autos auf small Edges (H4)

Veränderung um vier bzw. sechs Prozentpunkte im kurzen bzw. langen Zeitraum. Ebenso sinkt die Auslastung der Edges um zwei Prozentpunkte, um aber bei Erhöhung des Einflussfaktors wieder um einen Prozentpunkt zu steigen. Bemerkenswert ist, dass in dem Bereich 1,2–1,3 sowohl die Fahrradnutzung abnimmt als auch die Autonutzung zunimmt, aber trotzdem weniger Emissionen verursacht werden. Dies liegt daran, dass Autos länger brauchen um eine Strecke zurückzulegen, wobei sich die verursachten Emissionen im Szenario hingegen nicht ändern, da sie streckenbasiert errechnet werden. Somit wird die gleiche Menge Emissionen über einem längeren Zeitraum verursacht, was eine Senkung der durchschnittlichen Emissionen bedeutet. Auch die zuvor beschriebene zunehmende Autonutzung kann hierdurch erklärt werden: Weil die gleichen Strecken langsamer gefahren werden, verbringen die Agenten mehr Zeit im Auto.

Der durchschnittliche SEU-Wert der Agenten steigt für die sparsamen, die pragmatischen, die umweltbewussten und die unentschiedenen Agenten bei einer 0,1-fachen Verlangsamung an, eine weitere Erhöhung des Faktors führt zu einem geringen SEU-Wert Senkung. Der SEU-Wert der komfortbewussten Agenten hingegen fällt kontinuierlich, mit dem größten Rückgang bei der ersten Verlangsamung um 10 %. Sparsame Agenten profitieren von der Verlangsamung um 50 %, da der SEU-Wert deutlich steigt, wohingegen alle anderen SEU-Werte weiter fallen (vgl. Tabelle 5). Die erzielten Steigerungen können allerdings in keinem Durchlauf die die Senkungen ausgleichen und so ist der SEU-Wert konstant fallend, was einen gesamtgesellschaftlichen Nutzenverlust bedeutet.

Tabelle 5: Auslastung Edges und SEU (H4)

Messwert	Faktor Verlangsamung Auto auf small Edges		
	1	1,1	1,5
Durchschn. Auslastung Edges			
Emissionen kurze Frist	0,180	0,143	0,126
Emissionen lange Frist	0,334	0,266	0,234
Kapazität kurze Frist	0,216	0,203	0,212
SEU			
Pragmatist	15,46	15,50	15,13
Eco	14,78	14,80	14,59
Indifferent	14,71	14,76	14,52
Saver	18,75	18,77	18,95
Convenient	13,46	12,82	12,31
Addierter SEU	80,16	76,65	75,50

Hypothesenauswertung

Eine Reduzierung der Geschwindigkeit des Autos auf kleinen Straßen, welche durch alle Verkehrsmittel genutzt werden können, führt zu geringeren Emissionen. Die Verringerung der Emissionen wird hauptsächlich durch die komfortbevorzugenden Agenten getragen, welche einen geringen Nutzen erfahren (SEU), während alle anderen Agententypen zunächst leicht profitieren, mit höherer Eingriffstiefe aber ebenso einen niedrigen SEU-Wert im Vergleich zum Referenzszenario verzeichnen. Die durch die starke Verlangsamung des Autos (1,5) bewirkte veränderte Agentenverteilung, welche bedeutet, dass einige komfortbewusste Agenten sterben, kann als gesellschaftlicher Anpassungsprozess interpretiert werden (siehe Kapitel 5.4.2), welcher ebenso zu geringeren Emissionen führt. Der durchgehend fallende kumulierte Nutzen, besonders bei der Umsetzung von stärkeren Geschwindigkeitsreduzierungen, könnte den Einsatz des Steuerungsinstrumentes in der Realität jedoch erschweren.

Zusammenfassend kann die Hypothese H4

H4: Die Einführung einer stadtweit geltenden Tempo-30-Zone mit der Ausnahme von großen Hauptverkehrsstraßen führt zu einer geringeren Nutzung des Autos und somit auch zu CO₂ Einsparungen.

mit den durchgeführten Experimenten bestätigt werden, wobei akzeptiert werden muss, dass der Nutzen der Agenten sinkt.

5.4 Vergleich und Diskussion

Im Folgenden werden die wirksamen Experimente 1, 3 und 4 zur Nachhaltigkeitssteigerung des Personenverkehrs miteinander verglichen und anschließend diskutiert.

5.4.1 Vergleich

Wie aus den zuvor dargestellten Einzelergebnissen sichtbar wurde, haben die Experimente zu den Hypothesen H1, H3 und H4 einen tiefergehenden Eingriff in den Modal Split bewirkt, wohingegen die Experimente basierend auf Hypothese 2 und Hypothese 5 nur sehr geringe bzw. keine Auswirkungen auf das simulierte Verkehrssystem gezeigt haben. Im Folgenden werden daher nun die wichtigsten Ergebnisse der Experimente miteinander verglichen.

Emissionen

Da sich die durchschnittlichen Emissionen nur in ihrer Höhe, aber nicht im Verhältnis zueinander unterscheiden, werden im Folgenden nur die kurzfristigen durchschnittlichen Emissionen miteinander verglichen (vgl. Abbildung 25), die ermittelten Relationen gelten analog für den langfristigen Emissionsausstoß.

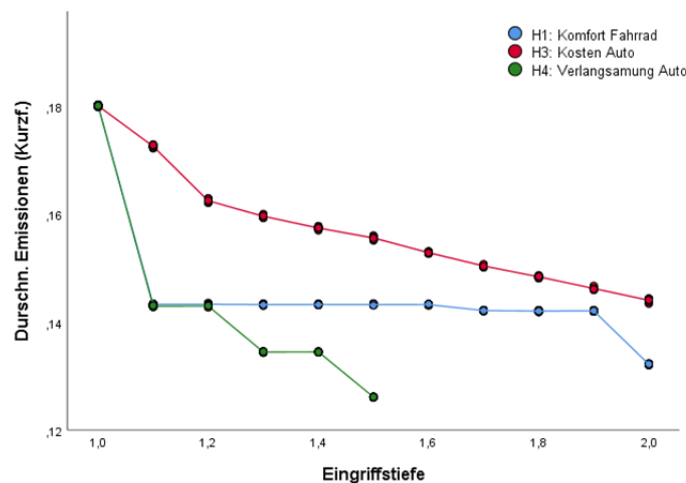


Abbildung 25: Vergleich der Emissionen (H1, H3, H4)

Im Vergleich haben die Verlangsamung des Autos und die Steigerung des Komforts des Fahrrads jeweils einen annähernd gleichen Effekt auf die ausgestoßenen Emissionen. Bei beiden Eingriffsarten führt eine initiale Veränderung um 10 % zu einer starken Reduktion der Nutzung des Autos. Eine weitere Erhöhung der Eingriffstiefe um 10 Prozentpunkte auf dann 120 % des Ursprungswertes führt zu keiner relevanten Veränderung des Emissionsausstoßes. Eine weitere Erhöhung der Eingriffstiefe hat bei der Komfortsteigerung des Fahrrads im Gegensatz zu der Geschwindigkeitsverringerung auf kleinen Straßen keine Auswirkungen bis zu einer Steigerung des Komforts auf 200 %. Hier hingegen haben weitere Verlangsamungen des Autos durchaus weitere emissionsenkende Auswirkungen, wobei ab einer Erhöhung um das 1,5-Fache erste leichte Populationsveränderungen auftreten (vgl. Kap. 5.3.3).

Im Gegensatz dazu besteht zwischen der Erhöhung der Kosten und den ausgestoßenen Emissionen ein nahezu linearer Zusammenhang, welcher bei einer Erhöhung der Kosten auf 200 % annähernd den gleichen Effekt hat wie die Reduktion der Geschwindigkeit des Autos oder die Steigerung des Komforts des Fahrrads um 10 %. Hieraus resultiert, dass die Technologie Auto im Vergleich deutlich teurer gemacht werden muss, um die gleichen Emissionseinsparungen wie bei den anderen Eingriffsarten zu erzielen. Im Umkehrschluss sind bereits kleine Geschwindigkeitsreduzierungen für den Autoverkehr oder leichte Komfortsteigerungen des Fahrrads effektive Mittel zur Emissionsreduzierung.

Kapazität

Die durchschnittliche physische Auslastung der Straßen sinkt bei der Erhöhung der Kosten des Autos annähernd linear. Die Erhöhung des Fahrradkomforts im Rahmen des ersten Experiments sowie die Verlangsamung des Autos im vierten Experiment bewirken – analog zu den ausgestoßenen Emissionen – eine sprunghafte Verringerung der Auslastung. Allerdings sinkt die Auslastung für die Komfortsteigerung des Fahrrads im Vergleich annähernd um das 2,5-Fache gegenüber einer durchgesetzten Geschwindigkeitsreduzierung – und somit deutlich stärker (vgl. Abbildung 26). Auch ist die Kapazitätseinsparung durch die Komfortsteigerung des Fahrrads deutlich größer als die Einsparung, welche durch eine Erhöhung der Kosten des Autos erreicht werden konnte:

Die Komforterhöhung bei einer Eingriffstiefe von 10 % ist um das Fünffache effektiver, als die Kosten des Autos zu erhöhen. Bei einer Eingriffstiefe von 190 % hingegen treffen sich die beiden Kurven bei einer Auslastung von 18,2 %, da die Auslastung mit höheren Preisen für das Auto weiter sinkt. Eine Komforterhöhung des Fahrrads um weitere 10 % auf 200 % wirkt zusätzlich kapazitätsreduzierend. Die Kapazität bei einer Geschwindigkeitsänderung auf den kleinen Straßen erfährt für die ersten 10 % eine Auslastungsverringerung. Allerdings führt die Reduzierung der Geschwindigkeit um mehr als das 1,2-Fache zu einer höheren Auslastung, welche bewirkt, dass das Experiment zur Hypothese H4 die Straßen deutlich weniger effektiv entlastet als die anderen beiden Experimente. Dies steht im Kontrast zu dem zuvor besprochenen Emissionsausstoß, welcher für das 4. Experiment am stärksten fällt.

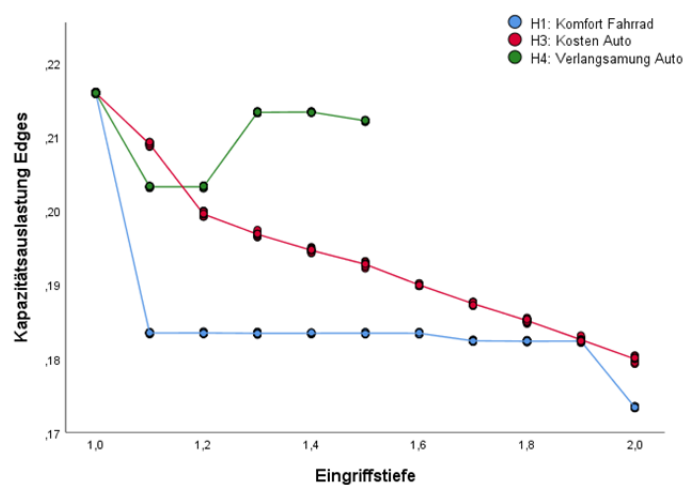


Abbildung 26: Vergleich der Kapazität (H1, H3, H4)

SEU

Der addierte SEU-Wert, also die kumulierten SEU-Werte der einzelnen Agententypen, stellt den gesamtgesellschaftlichen Nutzen eines Eingriffs dar (vgl. Abbildung 27). Für das erste Experiment sind die addierten SEU-Werte konstant mit der Eingriffstiefe steigend. Dies war zu erwarten, da ein Verkehrsmittel verbessert wird, ohne die anderen Verkehrsmittel abzuwerten. Trotzdem sinkt der SEU-Wert der komfortbewussten Agenten auch hier, was aber durch den Anstieg der SEU-Werte der übrigen Agententypen aufgefangen werden konnte (vgl. Abschnitt 5.3.1). Deutlich überraschender ist, dass eine Erhöhung der Kosten des Autos bis zu einem Wert von 120 % des Basiswertes ebenfalls eine Erhöhung des SEU-Wertes bewirkt, welche höher ausfällt, als die SEU-Wert-Steigerung durch die Erhöhung des Fahrradkomforts. Dies bedeutet für die Realität, dass durch Steuern der gesamtgesellschaftliche Nutzen gesteigert werden kann und das in einem höheren Maße, als durch Investitionen, die den Fahrradkomfort steigern.

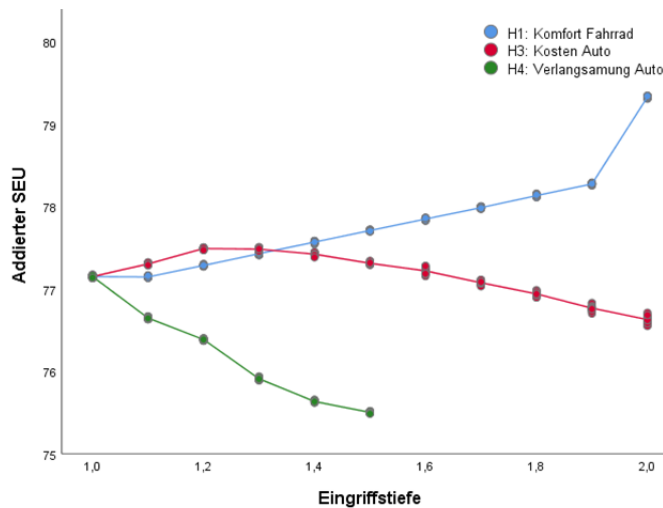


Abbildung 27: Vergleich des addierten SEUs (H1, H3, H4)

Zusätzlich zu den Nutzensteigerungen können die anfallenden Steuern vom Staat verwendet werden, um weitere nachhaltige Projekte zu unterstützen. Die reduzierte Geschwindigkeit hingegen bewirkt zwar konstant fallende Emissionen, senkt aber auch den addierten SEU-Wert sehr stark im Vergleich zu der Erhöhung der Kosten des Autos.

5.4.2 Diskussion

Ziel der Experimente war es, mittels des agentenbasierten Simulationsframeworks SimCo statische Eingriffe in den Personenverkehr empirisch auf ihre Wirkung zu untersuchen, um auf diese Weise nachhaltigkeitsfördernde Eingriffe zu identifizieren. Die in den Hypothesen H1, H3 und H4 gemachten Annahmen konnten durch die Versuchsreihe empirisch belegt und im Hinblick auf ihre Wirksamkeit verglichen werden.

Realpolitische Konsequenzen

Aufgrund der oben dargestellten Versuchsergebnisse sind sowohl die Steigerung der Kosten des Autos sowie die Komforterhöhung des Fahrrads und die Reduzie-

rung der Geschwindigkeit des Autos auf gemischt genutzten Straßen effektive Eingriffsmöglichkeiten, um die verkehrsbedingten Emissionen zu reduzieren. Sie sollten daher auch in der Realität zunächst mit einer geringen Eingriffstiefe implementiert werden, da hierdurch im schlimmsten Fall nur geringe Nachteile für die Verkehrsteilnehmer entstehen können.

Für die realpolitische Umsetzung sind allerdings verschiedene Bedingungsfaktoren bei der Umsetzung zu bedenken. So verursacht die Komfortsteigerung des Fahrrads eine unbestimmte Höhe an Kosten für den Staat, wohingegen Eingriffe in die Kostenstruktur und Geschwindigkeitsregelungen des Autoverkehrs leichter zu implementieren sind, aber potentiell den Unmut der betroffenen Akteure auf sich ziehen und daher das Durchsetzen der jeweiligen Maßnahme in der Realität für den politischen Akteur erschwert werden kann. Da oft nur Erhöhungen bis zu einem bestimmten Grenzwert zu effizienten nachhaltigen Verbesserungen für den Personenverkehr führen und bei Überschreitung auch negative soziale Konsequenzen verursacht werden können, ist die Kenntnis der Grenzwerte erforderlich. Diese können in der Realität aber nur schwer zu bestimmen sein und erfordern weitergehende empirische Forschung.

Die Nichtbestätigung der Hypothesen H2 und H5 zeigt, dass eine Reduzierung der Kosten des ÖPNV keinen Vorteil bringt und somit nur zu erhöhten Staatsausgaben führen würde. Gleiches gilt für den Ausbau des Fahrradstraßennetzes, der empirisch nur eine marginale Auswirkung auf die Fahrradnutzung hat, da bereits genug Straßen, welche von dem Fahrrad genutzt werden können, zur Verfügung stehen. Somit sind diese beiden Eingriffe in den Personenverkehr wenig sinnvoll.

Wissenschaftliche Konsequenzen

Durch die Nutzung einer agentenbasierten Simulation konnten im Rahmen dieser Arbeit die möglichen Konsequenzen der beschriebenen politischen Eingriffe empirisch überprüft werden, ohne dabei auf qualitative oder quantitative Umfragen zurückgreifen zu müssen. Da jeder Eingriff mit den gleichen zwanzig unterschiedlichen Agentenverteilungen und dem jeweils gleichen Netzwerk ausgeführt wurde (Ausnahme: Experiment 2), konnte gewährleistet werden, dass die Reliabilität der Ergebnisse gegeben ist. Die durchgeführten Experimente spiegeln vollständig unterschiedliche Eingriffsformen wieder (Eingriff in Komfort, Kosten, Straßennetz), so dass die hier präsentierten Ergebnisse einen ersten Überblick über den möglichen Effekt statischer Eingriffe in den Personenverkehr bieten. Aus diesem Grund können sie Grundlage für weiterführende Experimente mit dem Simulationsframework SimCo sein, welche spezifischer ein Themengebiet thematisieren. Schwerpunkt weiterer Forschung könnte daher sein, wie sich Geschwindigkeitsreduzierungen auf anderen Straßentypen auswirken oder welche Effekte eine generell gesteigerte Straßenanzahl haben kann. Zusätzlich zur Komfortsteigerung des Fahrrads könnten auch Komfortsteigerungen des ÖPNV oder Komfortreduzierungen des Autos empirisch getestet werden, um so auch die allgemeine Effektivität der Eingriffsarten miteinander vergleichen zu können. Von wissenschaftlicher Relevanz für die zukünftige Forschung ist ebenso der Effekt der Kombination der dargestellten Experimente. Auf diese Weise könnten etwaige Synergiepotenziale aufgedeckt werden; beispielsweise durch eine gleichzeitige Erhöhung der Kosten und eine Verringerung der erlaubten Geschwindigkeit des Autos.

Obwohl die statischen Eingriffe der Experimente 1, 3 und 4 den durchschnittlichen Emissionsausstoß auf den Edges reduzieren und somit insgesamt in einer makroskopischen Sicht zu einer erhöhten Nachhaltigkeit beitragen, trifft dies auf die Betrachtung des Emissionsausstoßes auf einzelnen Straßen nicht zu. Der maximal gemessene Emissionsausstoß auf hoch belasteten Edges erreicht bis zu 240 % der legislativ festgelegten, was sich in der Realität durch Smog auf einzelnen, häufig frequentierten Straßen äußern kann. Die statischen Eingriffe haben hierauf keine verbessernde Wirkung, woraus sich ein Bedarf an weiterer Forschung im Bereich einer Regulierung, basierend auf in Echtzeit erhobenen Auslastungsdaten, ergibt. Erste Erkenntnisse hierfür wurden bereits von Adelt et al. (2018) und Adelt & Hoffmann (2017) gesammelt.

Kritik

Die Ergebnisse der durchgeführten Experimente bieten auch Anlass zur kritischen Diskussion, wie zum Beispiel die starken Sprünge im Nutzungsverhalten, exemplarisch zu sehen bei der erhöhten Nutzung des Fahrrads, welche sich aus einer 10%igen Komfortsteigerung ergibt. Einerseits könnte ein möglicher Grund hierfür die Beschaffenheit des Simulators sein, beispielsweise die „geringe“ Anzahl an unterschiedlichen Akteurstypen, welche die Wirklichkeit nur begrenzt widerspiegelt: So führt das Erreichen eines Schwellenwertes zu einem drastischen Umschwenken aller Akteure eines Typs, was bei fünf Akteurstypen bereits einem Fünftel der kompletten Population entsprechen kann. Andererseits könnten diese Grenzwerte auch in der Realität existieren, was weiter geprüft werden muss (vgl. Urry 2016; Gowdy 2008). Weitere Veränderungen beeinflussen nun nicht mehr die Wahl des Verkehrsmittels, sondern nur noch den Nutzen der Entscheidung (SEU). Dies ist insofern unrealistisch, als sich das Nutzungsverhalten in der Realität eher fließend verändert und 17%ige Sprünge (vgl. 5.3.1) im Nutzungsverhalten in der Realität nicht vorkommen (vgl. BMVI 2016). Zur Verbesserung der Simulation wäre es daher sinnvoll, eine größere Anzahl an unterschiedlichen Akteuren zu implementieren, beispielsweise durch das Erstellen einer Datenbank in welcher die individuelle Wertung von befragten Probanden gespeichert wird, welche im Anschluss als eigenständige Agenten in das Szenario importiert werden, aber anhand fester Kriterien in Akteursgruppen gegliedert werden müssten. Dies könnte auch dazu beitragen, die Verkehrsmittelwahl der Agenten aufzulockern, da z. B. der ÖPNV fast keine Veränderung in den durchgeführten Experimenten erfährt und nahezu ausschließlich von dem sparsamen Agenten benutzt wird. Vielmehr substituieren sich in den Experimenten hauptsächlich die Nutzung des Fahrrads und des Automobils.

Diskussionsbedarf besteht auch bei der Interpretation des Ausscheidens von Agenten in dem Modell. Der Mechanismus des Modells soll ein gesamtgesellschaftliches Lernen in die Simulation implementieren, da die individuelle Anpassung einzelner Agenten schwer zu programmieren ist. Das Ausmaß der Populationsänderung hat jedoch eine Auswirkung auf die Interpretation: Kleine Populationsveränderungen können als Anpassung bzw. Lerneffekt angesehen werden, große Veränderungen hingegen, welche beispielsweise das Ausscheiden eines ganzen Agententyps verursachen, sind mit einer deutlich negativeren Konnotation versehen. In der Realität würden politische Eingriffe, welche das Leben eines Großteils der Bevöl-

kerung schwer beeinträchtigen, wahrscheinlich auf großen Protest treffen und so nur schwer umsetzbar sein. Daher wäre es wünschenswert, einen Schwellwert der Populationsveränderung, bis zu welchem es sich noch um eine Anpassung der Agenten handelt zu finden.

Anspruchsvoll ist auch die Umsetzung von realpolitischen Hypothesen in SimCo-Experimente. Eine Erhöhung der Anzahl der Fahrradstraßen (H2) kann als mehr als nur ein Eingriff in die Netzstruktur gedeutet werden und bietet daher Interpretationsspielraum. So kann eine Erhöhung der exklusiv von Fahrrädern genutzten Wege auch als Komfortsteigerung angesehen werden und würde somit auch die in H1 formulierten Effekte produzieren. Daraus resultiert, dass die Umwandlung von Hypothesen in Experimente der subjektiven Willkür der forschenden Person unterliegt.

6 Fazit und Ausblick

Der menschenverursachte Klimawandel schreitet nahezu unsichtbar für den uninteressierten Betrachter voran, hat aber in der langen Frist gravierende Auswirkungen auf Mensch und Natur. Dieses Arbeitspapier hat sich daher dem deutschen, bodengebundenen Personenverkehr angenommen, welcher nach aktuellem Stand die von der deutschen Regierung auferlegten Nachhaltigkeitsziele nicht erfüllen kann.

Unter Rückgriff auf die Multi-Level Perspective wurde die aktuelle soziotechnische Konfiguration des Personenverkehrs dargestellt. Diese beinhaltet, basierend auf der Elektrifizierung des Verkehrs, Sharingangeboten und bereits bestehender Technik wie dem Fahrrad oder dem ÖPNV, bereits die technische Grundlage, um einen nachhaltigen Wandel zu durchlaufen. Aufgrund mangelnder empfundener Notwendigkeit hat bis jetzt jedoch kein drastischer Wandel stattgefunden. Daher wurde eine Zukunftsvision, basierend auf einer erhöhten Nutzung des Fahrrads und des ÖPNV zum Nachteil des motorisierten Individualverkehrs, formuliert. Hierfür wurden relevante verkehrspolitische Akteure und die von ihnen beworbenen verkehrspolitischen Eingriffe für einen nachhaltigeren Personenverkehr präsentiert.

Aus diesen Vorschlägen wurden Hypothesen entwickelt, welche empirisch mittels des agentenbasierten Simulationsframeworks SimCo untersucht wurden. Es konnte belegt werden, dass eine Erhöhung der Kosten des Autos, eine Verlangsamung des Autos auf kleinen, geteilten Straßen und die Komfortsteigerung des Fahrrads zu einem nachhaltigeren Personenverkehr beitragen können. Eine Vergünstigung des ÖPNV und ein Ausbau bzw. eine Umwandlung von Automobilstraßen in Fahrradstraßen hat nur einen geringen nachhaltigkeitssteigernden Einfluss auf den Personenverkehr.

Dieses Arbeitspapier konzentrierte sich auf den Bodenverkehr. Weitergehende Forschung sollte den Flugverkehr mit einschließen, der in Deutschland seit 2004 stark anwächst (vgl. Statistisches Bundesamt 2016a). Gleiches gilt für den, durch Subventionen stark gewachsenen, europäischen Flugnahverkehr, welcher Gefahr läuft in der Zukunft einer der Hauptverursacher von Emissionen zu sein (vgl. Graham & Shaw 2008: 1449), weil er die negativen Auswirkungen auf die Umwelt (z. B. mittels einer Kerosinsteuer) nicht internalisiert (vgl. Chapman 2007: 361). Schließlich ist auch das generelle Energienutzungsverhalten der Menschen entscheidend, um den Herausforderungen des Klimawandels zu begegnen. Die Haushalte der USA sind beispielsweise für 38 % der gesamten nationalen Emissionen verantwortlich (vgl. Gardner & Stern 2008: 12). Doch obwohl viele Menschen positiv gegenüber einem nachhaltigen Lebensstil eingestellt sind, existiert ein Unterschied zwischen der Einstellung und dem tatsächlichen Handeln. Somit entsteht ein erheblicher Forschungsbedarf im Bereich des Konsums (vgl. Prothero et al. 2011: 32) wie auch in anderen Disziplinen, da nahezu jede Aktivität des Menschen, gleich in welchem Sektor oder Land, zum Ausstoß von Treibhausgasen führt und daher umwelttechnische Verbesserungspotentiale in allen Bereichen identifiziert und erschlossen werden müssen, um die Folgen des Klimawandels möglichst gering zu halten.

7 Anhang

Tabelle 6: Bewertung von unterschiedlichen Technologien bezüglich der Erreichung bestimmter Ziele (Skala von 0 bis 10; N=506) (in Anlehnung an Adelt et al. 2018: 22)

Technology	Preferences			
	Fast	Cheap	Eco-friendly	Comfortable
Public transport	3.15	4.85	6.28	3.67
Bike	4.06	8.94	9.32	3.30
Car (fossil-fuelled)	6.08	3.00	1.96	6.72
Electric vehicle	7.80	6.08	7.64	7.78

Tabelle 7: Präferenzen der Akteurstypen (Durchschnittliche Werte, Skala von 0 bis 10) (in Anlehnung an Teigelkamp 2015.; zit. nach Weyer et al. 2017: 21)

Akteur Typ	Preferences				N	Anteil
	Cheap	Fast	Eco-Friendly	Comfortable		
Pragmatic	3.7	6.8	2.4	1.2	1000	16.67 %
Eco	4.4	2.0	7.6	1.9	600	10 %
Indifferent	4.0	4.6	2.8	4.2	1800	30 %
Penny Pincher	9.0	4.7	3.7	0.7	600	10 %
Convenient	0.6	6.4	0.2	6.8	2000	33,33 %
					6000	100 %

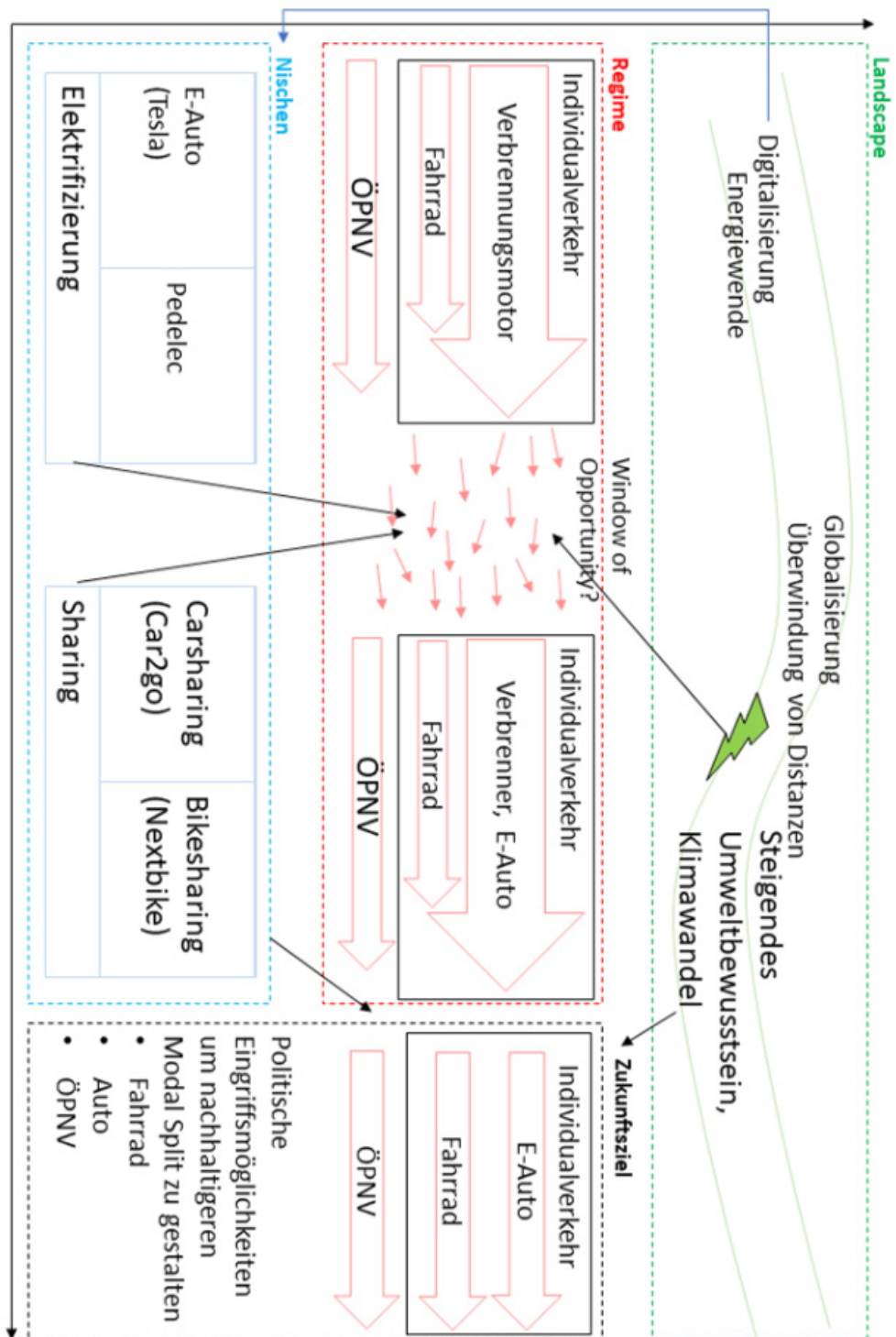


Abbildung 28: Wandel des Personenverkehrs (vergrößert)

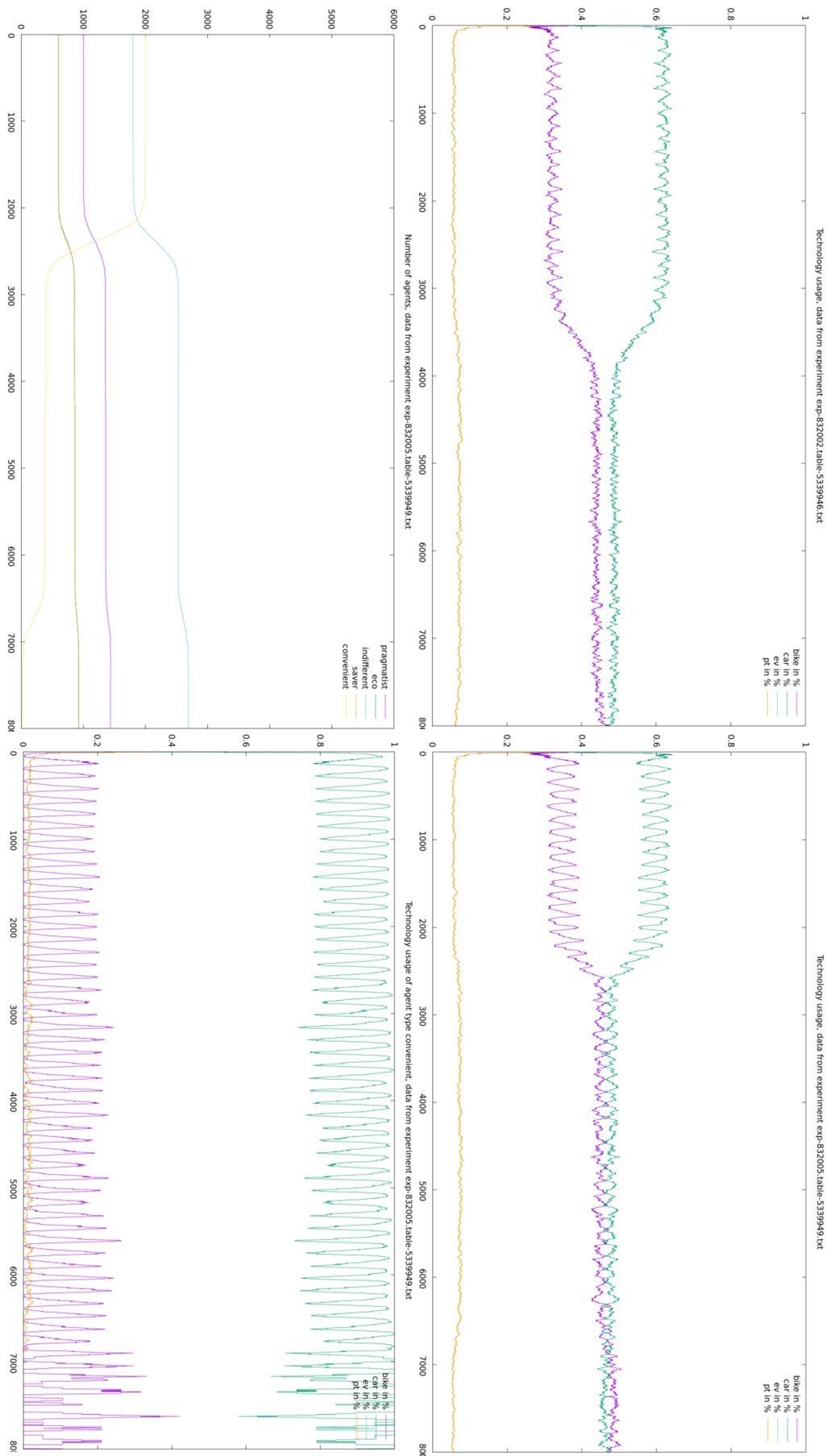


Abbildung 29: Verkehrsmittelnutzung bei 20 % Kostensteigerung (oben links); Verkehrsmittelnutzung bei einer 50%igen Kostensteigerung (oben rechts), Verkehrsmittelnutzung komfortbewusster Agenten (unten links), und Agententypenanzahl (unten rechts) bei einer Kostensteigerung um 50 % (H3)

Tabelle 8: Attribute der SimCo Simulation

Typ	Attribute	Beschreibung
Agenten	Entscheidungsfindung	Auswahl des größten subjektiven Nutzens einer Handlungsalternative, Fuzzy-Faktor
	Ort	Der aktuelle Ort im Netzwerk
	Zu besuchende Orte	Liste der noch zu besuchenden Orte
	Vorhandene Technologie	Sich im Besitz befindliche Technologien
	Benutzte Technologie	Tatsächlich genutzte Technologie
	Individuelle Grundeinstellung	Beeinflusst Entscheidungsfindung.
	Limits	In Form von Geld oder Planungsweitsicht
	Auswirkung der Handlung	Speicherung der Gewinne und Verluste der Handlungen (Emissionen und Geld)
Netzwerk (Nodes/ Edges)	Gedächtnis	Speicher für die Ergebnisse der SEU-Berechnung und der besuchten Nodes und Edges
	Nutzungsrecht	Technologierestriktionen
	Grenzwert	Maximal tolerierbare Grenzwerte (Lebenszeit, Verschmutzung, Kapazität)
	Auswirkung	Gewinne/Verluste durch die Nutzung (Zeit/Geld)
	Identität	Beschreibt die Art der Edge / des Nodes
	Summe der Auswirkungen	Kumulierte Auswirkungen aus dem Handeln aller Akteure
Technologie	Längenangabe (nur Edges)	Beschreibt die benötigte Zeit welche zum Durchqueren benötigt wird.
	Lebensdauer	Die Nutzungsdauer bevor eine Neuanschaffung nötig ist
	Kaufpreis Technologiefaktor	Die Kosten einer Neuanschaffung Betriebskosten, Größe, externe Effekte, Geschwindigkeit
Operator	Beobachtung	Anhand von Sensoren die alle aktuellen Daten des Systems wiedergeben.
	Steuerung	Durch direkte oder indirekte Eingriffe (statisch oder durch automatisierte Algorithmen)

8 Literaturverzeichnis

- Abar, S, Theodoropoulos, GK, Lemarinier, P & O'Hare, GMP 2017, 'Agent Based Modeling and Simulation tools. A review of the state-of-art software', *Computer Science Review*, vol. 24, pp. 13–33.
- ADAC 2016, *Handlungsfelder einer nachhaltigen städtischen Mobilität*. Available from: https://www.adac.de/_mmm/pdf/fi_handlungsfelder_nachhaltige_mobilitaet_bro_0316_257894.pdf [15 April 2017].
- Adelt, F & Hoffmann, S 2017, 'Der Simulator „SimCo“ als Tool der TA', *TATuP Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis*, vol. 26, no. 3, p. 37. Available from: <http://www.tatup.de/?journal=tatup&page=issue&op=view&path%5B%5D=4&path%5B%5D=ISSN%202199-9201%2026-3> [01 February 2018].
- Adelt, F, Weyer, J, Hoffmann, S & Ihrig, A 2018, 'Simulation of the Governance of Complex Systems (SimCo): Basic Concepts and Experiments on Urban Transportation', *Journal of Artificial Societies and Social Simulation (JASSS)*, vol 21, issue 2, pp. 1–30. Available from <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/21/2/2.html>.
- ADFC 2013, Wir bewegen was! Das Verkehrspolitische Program des ADFC. Available from: http://www.adfc.de/misc/filePush.php?mimeType=application/pdf&fullPath=http://www.adfc.de/files/2/110/116/Das_verkehrspolitische_Programm_des_ADFC.pdf [15 April 2017].
- ADFC 2014, *Neue ADFC-Kooperationen mit DB Rent und Nextbike*. Available from: <https://www.adfc.de/presse/pressemitteilungen/archiv-1-halbjahr-2014/neue-mitgliedervorteile-bei-db-und-nextbike> [28 July 2017].
- ADFC 2015, *ADFC: Bike-Sharing bringt neue Zielgruppen aufs Rad*, eWerk, Webdesign CMS und Shopsysteme aus Bremen. Available from: <http://www.adfc.de/presse/pressemitteilungen/adfc-bike-sharing-bringt-neue-zielgruppen-aufs-rad> [14 July 2017].
- ADFC 2016, *FAHRRADKLIMA-TEST 2016*. Available from: <http://www.fahrradklima-test.de/> [28 July 2017].
- ADFC & SRL 2011, *Fahrradstraßen. ADFC Position*. Available from: http://www.adfc.de/misc/filePush.php?mimeType=application/pdf&fullPath=http://www.adfc.de/files/2/110/111/pos_fahrradstrassen_201112.pdf [08 June 2017].
- ADFC NRW 2017, *ADFC Kooperation mit KlimaExpo.NRW*. Available from: <https://www.adfc-nrw.de/kreisverbaende/kv-rheinberg-oberberg/aktuelles/aktuelles/article/adfc-kooperation-mit-klimaexponrw.html> [28 July 2017].
- Anderegg, WRL, Prall, JW, Harold, J & Schneider, SH 2010, 'Expert credibility in climate change', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 107, no. 27, pp. 12107–12109. Available from: <http://www.pnas.org/content/107/27/12107.full>.

- Arag 2017, *Wo dürfen Segways, Skateboards und Elektro-Skateboards fahren?* Available from: <https://www.arag.de/service/infos-und-news/rechtstipps-und-gerichtsurteile/auto-und-verkehr/3128/> [04 June 2017].
- Asensio, J, Gómez-Lobo, A & Matas, A 2014, 'How effective are policies to reduce gasoline consumption? Evaluating a set of measures in Spain', *Energy Economics*, vol. 42, pp. 34–42.
- Banister, D 2008, 'The sustainable mobility paradigm', *Transport Policy*, vol. 15, no. 2, pp. 73–80.
- Bardi, U 2009, 'Peak oil. The four stages of a new idea', *Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 323–326.
- Baum, HJ 1973, 'Free Public Transport', *Journal of Transport Economics and Policy*, vol. 7, no. 1, pp. 3–19.
- Belk, R 2014, 'You are what you can access. Sharing and collaborative consumption online', *Journal of Business Research*, vol. 67, no. 8, pp. 1595–1600.
- Blomquist, G 1984, 'The 55 m.p.h speed limit and gasoline consumption', *Resources and Energy*, vol. 6, no. 1, pp. 21–39.
- BMVI 2014, *Radverkehr in Deutschland. Zahlen, Daten, Fakten.* Available from: http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/K/radverkehr-in-zahlen.pdf?__blob=publicationFile [19 June 2017].
- BMVI 2016, *Anteile der Verkehrsträger am motorisierten Personenverkehrsaufwand.* Available from: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/fahrleistungen-verkehrsaufwand-modal-split#textpart-4> [23 May 2017].
- BMVI 2017a, *Deutschlands Radverkehr boomt.* Available from: <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Dossier/Radverkehr/radverkehr.html> [20 July 2017].
- BMVI 2017b, *Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie (NIP).* Available from: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/nationales-innovationsprogramm-wasserstoff-und-brennstoffzellentechnologie-nip.html> [20 July 2017].
- BMWi 2016, *Grünbuch Energieeffizienz. Diskussionspapier des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.* Available from: https://www.gruenbuch-energieeffizienz.de/fileadmin/redaktion/Energieeffizienz/bmwi_bro_gru_%CC%88nbuch_energieeffizienz_web_bf.pdf [17 July 2017].
- Bonnaïfous, A & Raux, C 2016, 'Transport Energy and Emissions: Rail', *Handbook of Transport and the Environment*, pp. 293–307.
- Boosted 2017, *2nd Gen Boosted Board.* Available from: <https://shop.boostedboards.com/products/board-reservation> [05 June 2017].

- Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz 2009, *Verordnung über die Teilnahme elektronischer Mobilitätshilfen am Verkehr (Mobilitätshilfenverordnung - MobHV)*. Available from: <https://www.gesetze-im-internet.de/mobhv/BJNR209710009.html> [05 June 2017].
- Canzler, W & Knie, A 2016, 'Mobility in the age of digital modernity. Why the private car is losing its significance, intermodal transport is winning and why digitalisation is the key', *Applied Mobilities*, vol. 1, no. 1, pp. 56–67.
- Chapman, L 2007, 'Transport and climate change. A review', *Journal of Transport Geography*, vol. 15, no. 5, pp. 354–367.
- Ciari, F, Bock, B & Balmer, M 2014, 'Modeling Station-Based and Free-Floating Carsharing Demand', *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2416, pp. 37–47.
- CONEBI 2016, *EUROPEAN BICYCLE MARKET. 2016 EDITION*, Brüssel. Available from: <http://www.conebi.eu/wp-content/uploads/2016/09/European-Bicycle-Industry-and-Market-Profile-2016-with-2015-data-.pdf> [24 July 2017].
- Cools, M, Fabbro, Y & Bellemans, T 2016, 'Free public transport. A socio-cognitive analysis', *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 86, pp. 96–107.
- Daimler 2016, *BMW Group, Daimler AG, Ford Motor Company und der Volkswagen Konzern mit Porsche und Audi planen Joint Venture für ultraschnelles Hochleistungs-ladenetz an wichtigen Verkehrsachsen in Europa*. Available from: <http://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/BMW-Group-Daimler-AG-Ford-Motor-Company-und-der-Volkswagen-Konzern-mit-Porsche-und-Audi-planen-Joint-Venture-fuer-ultraschnelles-Hochleistungsladenetz-an-wichtigen-Verkehrsachsen-in-Europa.xhtml?oid=14866747> [05 June 2017].
- DB Regio o. J., *Wie der Nahverkehr in Deutschland organisiert ist*. Available from: https://www.dbregio.de/db_regio/view/wir/nahverkehr-deutschland.shtml [20 July 2017].
- DeMaio, P 2009, 'Bike-sharing. History, Impacts, Models of Provision, and Future', *Journal of Public Transportation*, vol. 12, no. 4, pp. 41–56.
- Die Linke NRW 2017, *8. Verkehr: Fahrscheinlos mit Bus und Bahn das Klima schützen*. Available from: http://wahl2017.dielinke-nrw.de/programm/inhalt/iii_die_wirtschaft_ist_fuer_die_menschen_da/8_verkehr_fahrscheinlos_mit_bus_und_bahn_das_klima_schuetzen/ [17 July 2017].
- Dijkema, GPJ, Lukszo, Z & Weijnen, MPC 2013, 'Introduction' in *Agent-based modelling of socio-technical systems*, eds KH van Dam, I Nikolic & Z Lukszo, Springer, Dordrecht, pp. 1–12.
- Douglas, MJ, Watkins, SJ, Gorman, DR & Higgins, M 2011, 'Are cars the new tobacco?', *Journal of public health (Oxford, England)*, vol. 33, no. 2, pp. 160–169.
- Dütschke, E, Schneider, U, Sauer, A, Wietschel, M, Hoffmann, J & Domke, S 2012, *Roadmap zur Kundenakzeptanz: Zentrale Ergebnisse der sozialwissenschaftlichen Be-*

gleitforschung in den Modellregionen PDF Logo. Available from: <https://www.econstor.eu/handle/10419/55266> [05 June 2017].

Erhard, J, Reh, W, Treber, M, Oeliger, D, Rieger, D & Müller-Görnert, M 2014, *Verbaendekonzept Klimafreundlicher Verkehr 2014. Weichenstellung bis 2050*. Available from: <https://www.vcd.org/themen/klimafreundliche-mobilitaet/konzept-klimafreundlicher-verkehr/> [04 August 2017].

Esser, H 1999, *Situationslogik und Handeln*, Campus-Verl., Frankfurt/Main.

Eurobarometer 2014, *Special Eurobarometer 409. Climate Change Report*. Available from: http://ec.europa.eu/commfrontoffice/publicopinion/archives/ebs/ebs_409_en.pdf [11 May 2017].

FAZ 2013, *Pkw-Maut: ADAC fordert höhere Energiesteuer statt Maut*, Frankfurter Allgemeine Zeitung GmbH. Available from: <http://www.faz.net/aktuell/politik/inland/pkw-maut-adac-fordert-hoehere-energiesteuer-statt-maut-12728083.html> [17 July 2017].

Fearnley, N 2013, 'Free Fares Policies. Impact on Public Transport Mode Share and Other Transport Policy Goals', *International Journal of Transportation*, vol. 1, no. 1, pp. 75–90.

Fichert, F & Grandjot, H-H 2016, 'Akteure, Ziele und Instrumente in der Verkehrspolitik' in *Handbuch Verkehrspolitik*, eds O Schwedes, W Canzler & A Knie, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, s.l.

Firkorn, J & Müller, M 2011, 'What will be the environmental effects of new free-floating car-sharing systems? The case of car2go in Ulm', *Ecological Economics*, vol. 70, no. 8, pp. 1519–1528.

Firkorn, J & Müller, M 2012, 'Selling Mobility instead of Cars. New Business Strategies of Automakers and the Impact on Private Vehicle Holding', *Business Strategy and the Environment*, vol. 21, no. 4, pp. 264–280.

Fischer, W, Hake, J-F, Kuckshinrichs, W, Schröder, T & Venghaus, S 2016, 'German energy policy and the way to sustainability. Five controversial issues in the debate on the “Energiewende”', *Energy*, vol. 115, pp. 1580–1591.

Frauenhofer ISI 2013, *Wirtschaftliche Aspekte nichttechnischer Maßnahmen zur Emissionsminderung im Verkehr. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI*. Available from: http://www.isi-projekt.de/wissprojekt-wAssets/docs/ntm-downloads/projektberichte/UBA-2013_Nichttechnische-Massnahmen.pdf [15 April 2017].

Fuchs, C 2008, 'The implications of new information and communication technologies for sustainability', *Environment, Development and Sustainability*, vol. 10, no. 3, pp. 291–309.

Gardner, GT & Stern, PC 2008, 'The Short List. The Most Effective Actions U.S. Households Can Take to Curb Climate Change', *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, vol. 50, no. 5, pp. 12–25.

- Gausemeier, P, Seidel, J, Riedelsheimer, T & Seliger, G 2015, 'Pathways for Sustainable Technology Development – The Case of Bicycle Mobility in Berlin', *Procedia CIRP*, vol. 26, pp. 202–207.
- Geels, FW 2002, 'Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes. A multi-level perspective and a case-study', *Research Policy*, vol. 31, 8-9, pp. 1257–1274.
- Geels, FW 2011, 'The multi-level perspective on sustainability transitions. Responses to seven criticisms', *Environmental Innovation and Societal Transitions*, vol. 1, no. 1, pp. 24–40.
- Geels, FW (ed.) 2012, *Automobility in transition? A socio-technical analysis of sustainable transport*, Routledge, New York. Available from: <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy1208/2011030241-b.html>.
- Geels, FW & Schot, J 2007, 'Typology of sociotechnical transition pathways', *Research Policy*, vol. 36, no. 3, pp. 399–417.
- Geiger, N & Swim, JK 2016, 'Climate of silence. Pluralistic ignorance as a barrier to climate change discussion', *Journal of Environmental Psychology*, vol. 47, pp. 79–90.
- Gilbert, N 2007a, 'Computational Social Science: Agent-based social simulation' in *Agent-based modelling and simulation in the social and human sciences*, ed D Phan, Bardwell Press, Oxford, pp. 115–134. Available from: <http://epubs.surrey.ac.uk/1610/> [05 April 2017].
- Gilbert, N 2007b, *Computational Social Science: Agent-based social simulation*. Available from: <http://epubs.surrey.ac.uk/1610/1/fulltext.pdf> [07 June 2017].
- Gössling, S & Cohen, S 2014, 'Why sustainable transport policies will fail. EU climate policy in the light of transport taboos', *Journal of Transport Geography*, vol. 39, pp. 197–207.
- Gössling, S & Metzler, D 2017, 'Germany's climate policy. Facing an automobile dilemma', *Energy Policy*, vol. 105, pp. 418–428.
- Gowdy, JM 2008, 'Behavioral economics and climate change policy', *Journal of Economic Behavior & Organization*, vol. 68, 3-4, pp. 632–644.
- Graham, B & Shaw, J 2008, 'Low-cost airlines in Europe. Reconciling liberalization and sustainability', *Geoforum*, vol. 39, no. 3, pp. 1439–1451.
- Greenpeace e.V. 2007, *TEMPOLIMIT AUF DER A92*. Available from: <https://www.greenpeace.de/themen/klimawandel/klimaschutz/tempolimit-auf-der-a92> [22 May 2017].
- Greenpeace e.V. 2016, *Im kern gesund*. Available from: http://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/im_kern_gesund_s_0182_1_0.pdf [15 April 2017].

- Grüne NRW 2017, *Für 2 Euro durch ganz NRW*. Available from: <https://gruene-nrw.de/aktuelles/2euroticket/> [17 July 2017].
- Gubbi, J, Buyya, R, Marusic, S & Palaniswami, M 2013, 'Internet of Things (IoT). A vision, architectural elements, and future directions', *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660.
- Hardman, S, Shiu, E & Steinberger-Wilckens, R 2015, 'Changing the fate of Fuel Cell Vehicles. Can lessons be learnt from Tesla Motors?', *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 4, pp. 1625–1638.
- Hawkins, TR, Singh, B, Majeau-Bettez, G & Strømman, AH 2013, 'Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles', *Journal of Industrial Ecology*, vol. 17, no. 1, pp. 53–64.
- Hermann, G 2016, 'Verkehrspolitik als Verkehrsgeschichte' in *Handbuch Verkehrspolitik*, eds O Schwedes, W Canzler & A Knie, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, s.l., pp. 55–76.
- Herrmann, S, Schulte, F & Voß, S 2014, 'Increasing Acceptance of Free-Floating Car Sharing Systems Using Smart Relocation Strategies. A Survey Based Study of car2go Hamburg' in *Computational Logistics: 5th International Conference, ICCL 2014, Valparaiso, Chile, September 24-26, 2014. Proceedings*, eds RG González-Ramírez, F Schulte, S Voß & JA Ceroni Díaz, Springer International Publishing, Cham, pp. 151–162.
- Hillman, K, Nilsson, M, Rickne, A & Magnusson, T 2011, 'Fostering sustainable technologies. A framework for analysing the governance of innovation systems', *Science and Public Policy*, vol. 38, no. 5, pp. 403–415.
- Hu, K & Chen, Y 2016, 'Technological growth of fuel efficiency in european automobile market 1975? 2015', *Energy Policy*, vol. 98, pp. 142–148.
- IBM 2017, *IBM SPSS-Software*. Available from: <https://www.ibm.com/analytics/de/de/technology/spss/> [24 July 2017].
- ITF 2017, *About ITF*. Available from: <https://www.itf-oecd.org/about-itf> [14 July 2017].
- ITMC 2017, *LiDO*. Available from: <https://www.itmc.tu-dortmund.de/cms/de/dienste/hochleistungsrechnen/lido/index.html> [04 July 2017].
- Kenworthy, JR & Laube, FB 1996, 'Automobile dependence in cities. An international comparison of urban transport and land use patterns with implications for sustainability', *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 16, 4-6, pp. 279–308.
- Konidari, P & Mavrakakis, D 2007, 'A multi-criteria evaluation method for climate change mitigation policy instruments', *Energy Policy*, vol. 35, no. 12, pp. 6235–6257.
- Kraftfahrt-Bundesamt 2017, *Jahresbilanz der Neuzulassungen 2016*. Available from: http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/n_jahresbilanz.html;jsessionid=FCE1B22C14C7370EED291421FC1F7C19.live11292?nn=644522 [23 June 2017].

- Lajunen, A 2014, 'Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses', *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 38, pp. 1–15.
- Lindsay, G, Macmillan, A & Woodward, A 2011, 'Moving urban trips from cars to bicycles: impact on health and emissions', *Australian and New Zealand journal of public health*, vol. 35, no. 1, pp. 54–60.
- Loose, W, Mohr, M & Nobis, C 2006, 'Assessment of the Future Development of Car Sharing in Germany and Related Opportunities', *Transport Reviews*, vol. 26, no. 3, pp. 365–382.
- Meschik, M 2012, 'Reshaping City Traffic Towards Sustainability Why Transport Policy should Favor the Bicycle Instead of Car Traffic', *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 48, pp. 495–504.
- Meyer, B 2016, 'Zur historischen Genese der Verkehrsträger' in *Handbuch Verkehrspolitik*, eds O Schwedes, W Canzler & A Knie, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, s.l., pp. 77–95.
- Ministerium für Verkehr und Infrastruktur 2015, *Nachhaltige Mobilität - Für Alle*. Available from: http://www.neue-mobilitaet-bw.de/fileadmin/4_Publikationen/Broschuere_Nachhaltige_Mobilitaet_fuer_alle.PDF [15 April 2017].
- MWV 2017, *Anzahl der Tankstellen in Deutschland von 1950 bis 2016*. Zitiert nach de.statista.com. Available from: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2621/umfrage/anzahl-der-tankstellen-in-deutschland-zeitreihe/> [21 June 2014].
- Nelson, RR & Winter, SG 1977, 'In search of useful theory of innovation', *Research Policy*, vol. 6, no. 1, pp. 36–76.
- nextbike 2015, *Die nextbike-Saison 2014 in Zahlen*. Available from: <http://www.metropolradruhr.de/de/news/2014-in-zahlen/> [02 June 2017].
- Nijland, H & van Meerkerk, J 2017, 'Mobility and environmental impacts of car sharing in the Netherlands', *Environmental Innovation and Societal Transitions*, vol. 23, pp. 84–91.
- Nykqvist, B & Nilsson, M 2015, 'The EV paradox – A multilevel study of why Stockholm is not a leader in electric vehicles', *Environmental Innovation and Societal Transitions*, vol. 14, pp. 26–44.
- Orsato, RJ, Dijk, M, Kemp, R & Yarime, M 2012, 'The Electrification of Automobility. The Bumpy Ride of Electric Vehicles Towards Regime Transition' in *Automobility in transition? A socio-technical analysis of sustainable transport*, ed FW Geels, Routledge, New York, pp. 206–227.
- Philipp, M 2016, *Die Beschreibung des technischen Wandels der Fernsehindustrie anhand des Models der Multi-Level Perspective*. Seminararbeit, Dortmund.

- Public Transport Victoria 2017, *Zones*. Available from: <https://www.ptv.vic.gov.au/tickets/fares/zones#FTZ> [12 May 2017].
- PurpleAir 2017, *PurpleAir: Air Quality Monitoring*. Available from: <https://www.purpleair.com/> [07 July 2017].
- raumkom 2011, *Statusanalyse Fahrradverleihsysteme. Potenziale und Zukunft kommunaler und regionaler Fahrradverleihsysteme in Deutschland*. Available from: [file:///C:/Users/Marlon %20Laptop/Downloads/fvs_broschuere_web.pdf](file:///C:/Users/Marlon%20Laptop/Downloads/fvs_broschuere_web.pdf) [02 June 2017].
- Regionalverband Ruhr 2017, *Planen*, Citkomm services GmbH. Available from: <http://www.rs1.ruhr/radschnellweg-ruhr-rs1/planen.html> [14 July 2017].
- Reinhardt, W 2015, *Geschichte des Öffentlichen Personenverkehrs von den Anfängen bis 2014. Mobilität in Deutschland mit Eisenbahn, U-Bahn, Straßenbahn und Bus*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-06628-4>.
- Reutter, O & Reutter, U 2016, 'Climate Protection in Urban Transport—Six Scenario Studies in Germany. More Climate Protection, Fewer Carbon Dioxide Emissions, Less Car Traffic', *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, vol. 4, no. 2.
- Rudolph, F 2014, 'Promotion of Pedelects as a Means to Foster Low-carbon Mobility. Scenarios for the German City of Wuppertal', *Transportation Research Procedia*, vol. 4, pp. 461–471.
- Schleinitz, K, Petzoldt, T, Franke-Bartholdt, L, Krems, J & Gehlert, T 2017, 'The German Naturalistic Cycling Study – Comparing cycling speed of riders of different e-bikes and conventional bicycles', *Safety Science*, vol. 92, pp. 290–297.
- Schmucki, B 2012, 'The Machine in the City', *Journal of Urban History*, vol. 38, no. 6, pp. 1060–1093.
- Schwarzer, CM 2015, *Energiesteuer: Grüne brechen das Energiepreis-Tabu*. Available from: <http://www.zeit.de/mobilitaet/2015-02/energiesteuer-diesel-gruene-klima> [17 July 2017].
- Statistisches Bundesamt 2016a, *Anzahl der beförderten Personen im Luftverkehr in den Jahren 2004 bis 2016 in Deutschland (Passagiere in 1.000)*. zitiert nach de.statista.com. Available from: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/12552/umfrage/befoerderte-personen-im-luftverkehr/>. [08 July 2017].
- Statistisches Bundesamt 2016b, *Gesamtlänge der Autobahnen in Deutschland von 1995 bis 2016 (in Kilometern)*. zitiert nach de.statista.com. Available from: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2972/umfrage/entwicklung-der-gesamtlaeenge-des-autobahnnetzes/> [22 July 2017].
- Statistisches Bundesamt & VCI 2016, *Umsätze der wichtigsten Industriebranchen in Deutschland in den Jahren von 2013 bis 2015 (in Milliarden Euro)*. zitiert nach de.statista.com. Available from:

<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/241480/umfrage/umsaetze-der-wichtigsten-industriebranchen-in-deutschland/> [11 July 2017].

Tallberg, J, Dellmuth, LM, Agné, H & Duit, A 2015, 'NGO Influence in International Organizations. Information, Access and Exchange', *British Journal of Political Science*, vol. 55, pp. 1–26.

Teigelkamp, T 2015, *Verkehrsmittelwahl als Thema der soziologischen Handlungstheorie. Eine empirische Studie*. Bachelorarbeit, Dortmund.

Tesla 2017, *Supercharger*. Available from: https://www.tesla.com/de_DE/supercharger [05 June 2017].

Umweltbundesamt 2012, *Tempolimit*. Available from: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/verkehrsplanung/tempolimit#textpart-1> [17 July 2017].

Umweltbundesamt 2014, *Pedelecs sind umweltfreundliche Alternativen im Stadtverkehr*. Available from: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/pedelecs-sind-umweltfreundliche-alternativen-im> [15 May 2017].

Umweltbundesamt 2015, *Umweltbewusstsein in Deutschland 2014. Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage*. Available from: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/umweltbewusstsein_in_deutschland_2014.pdf [06 June 2017].

Umweltbundesamt 2017a, *Die Stadt für Morgen. Umweltschonend mobil – lärmarm – grün – kompakt – durchmischt*. Available from: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/die_stadt_fuer_morgen_umweltschonend_mobil.pdf [17 July 2017].

Umweltbundesamt 2017b, *Umweltbelastungen durch Verkehr*. Available from: <https://www.umweltbundesamt.de/umweltbelastungen-durch-verkehr#textpart-1> [19 June 2017].

Urry, J 2016, 'The 'System' of Automobility', *Theory, Culture & Society*, vol. 21, 4-5, pp. 25–39.

VCD 2008, *Tempolimit für Klimaschutz und Verkehrssicherheit. VCD Position*. Available from: https://www.vcd.org/fileadmin/user_upload/Redaktion/Publikationsdatenbank/Verkehrssicherheit/VCD_Position_Tempolimit_Autobahnen_2008.pdf [22 May 2017].

VCD e.V. 2017, *Verkehrsmittel im Vergleich. Intelligent Mobil*. Available from: <https://www.vcd.org/themen/klimafreundliche-mobilitaet/verkehrsmittel-im-vergleich/> [12 May 2017].

VDV 2017, *Statistik Personenverkehr - Verband Deutscher Verkehrsunternehmen - VDV*. Available from: <https://www.vdv.de/statistik-personenverkehr.aspx> [20 July 2017].

Volti, R 2005, 'Bicycle. The History (review)', *Technology and Culture*, vol. 46, no. 3, pp. 680–681.

- Wenzel, F-T 2013, *Volkswagen: Der Staat bleibt stark*, Frankfurter Rundschau. Available from: <http://www.fr.de/wirtschaft/volkswagen-der-staat-bleibt-stark-a-699540> [13 July 2017].
- Wenzel, F-T 2017, *Elektroautos: Volvo baut bald nur noch Autos mit Elektromotor*, Frankfurter Rundschau. Available from: <http://www.fr.de/wirtschaft/elektroautos-volvo-baut-bald-nur-noch-autos-mit-elektromotor-a-1308477> [10 July 2017].
- Winslott Hiselius, L & Svensson, Å 2017, 'E-bike use in Sweden – CO2 effects due to modal change and municipal promotion strategies', *Journal of Cleaner Production*, vol. 141, pp. 818–824.
- Witte, A de, Macharis, C, Lannoy, P, Polain, C, Steenberghen, T & van de Walle, S 2006, 'The impact of “free” public transport. The case of Brussels', *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 40, no. 8, pp. 671–689.
- Young, N 2015, *Environmental sociology for the twenty-first century*, Oxford University Press, Don Mills, Ontario.
- ZIV 2017, *Verteilung des Fahrrad-Absatzes in Deutschland im Jahr 2016 nach Modellgruppen*. Zitiert nach de.statista.com. Available from: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/6062/umfrage/anteil-der-fahrradmodelle-in-deutschland/> [05 June 2017].

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Inkrementeller Wandel des soziotechnischen Regimes (in Anlehnung an Geels 2011: 27)	2
Abbildung 2: Nischeninnovationen (in Anlehnung an Geels 2011: 28)	3
Abbildung 3: Soziotechnische Landscape (in Anlehnung an Geels 2011: 28)	4
Abbildung 4: Zusammenspiel der drei Ebenen der Multi-Level Perspective (in Anlehnung an Geels 2011: 28).....	5
Abbildung 5: Modal Split des Verkehrsaufkommens (in Anlehnung an Deutsches Mobilitätspanel 2016: 39).....	8
Abbildung 6: Entwicklung des deutschen Personenverkehrs anhand der Multi-Level Perspective und notwendiges Zukunftsziel (vergrößerte Darstellung im Anhang: Abbildung 28).	14
Abbildung 7: Akteure der Verkehrspolitik und die Art ihres Einflusses (Eigene Darstellung, in Anlehnung an Fichert & Grandjot 2016: 138–147)	17
Abbildung 8: DiscGo-realistic-large-complete Netzwerk: Links 10 %; Rechts 100 %	26
Abbildung 9: Verkehrsmittelnutzung bei Substituierung von Autostraßen durch Fahrradstraßen.....	31
Abbildung 10: Reduktion Kostenfaktor ÖPNV (Experiment 5).....	31
Abbildung 11: Durchschnittliche Verkehrsmittelnutzung bei Komforterhöhungen des Fahrrads (H1).....	32
Abbildung 12:Durchschnittliche Verkehrsmittelnutzung des Autos und Fahrrads nach Agententyp bei einer Erhöhung des Fahrradkomforts (H1)	33
Abbildung 13: Entwicklung der Verkehrsmittelnutzung: Links: Kein Eingriff; Rechts 1,1 Komfort (H1)	33
Abbildung 14:Durchschnittliche SEU Entwicklung der unterschiedlichen Agententypen bei einer Erhöhung des Fahrradkomforts (H1).....	34
Abbildung 15: Finale Agentenanzahl bei einer starken Erhöhung der Kosten des Autos (H3)	35
Abbildung 16: Durchschnittliche Verkehrsmittelnutzung bei Steigerung der Kosten des Autos (H3)	36

Abbildung 17: Verkehrsmittelnutzung bei 20 % Kostensteigerung (oben links); Verkehrsmittelnutzung bei einer 50%igen Kostensteigerung (oben rechts), Verkehrsmittelnutzung komfortbewusster Agenten (unten links), und Agententypenanzahl (unten rechts) bei einer Kostensteigerung um 50 % (H3). Vergrößerte Darstellung im Anhang: Abbildung 29.....	37
Abbildung 18: Durchschnittliche Verkehrsmittelnutzung des Autos (links) und Fahrrads (rechts) nach Agententyp bei Steigerung der Kosten des Autos (H3)	37
Abbildung 19: Durchschnittliche Kapazität der Edges bei einer Steigerung der Kosten des Autos (H3).....	38
Abbildung 20: Durchschnittlicher SEU bei einer Steigerung der Kosten des Autos (H3).....	38
Abbildung 21: Durchschnittliche Verkehrsmittelnutzung bei einer Verlangsamung des Autos auf small Edges (H4).....	40
Abbildung 22: Durchschnittliche Verkehrsmittelnutzung der sparsamen Agenten bei einer Verlangsamung des Autos auf small Edges (H4).....	41
Abbildung 23: Verkehrsmittelnutzung des sparsamen Agententyps bei einer Eingriffstiefe von 1,3 (links) und 1,5 (rechts) (H4)	41
Abbildung 24: Durchschnittliche Kapazität Edges bei einer Verlangsamung des Autos auf small Edges (H4).....	42
Abbildung 25: Vergleich der Emissionen (H1, H3, H4).....	44
Abbildung 26: Vergleich der Kapazität (H1, H3, H4)	45
Abbildung 27: Vergleich des addierten SEUs (H1, H3, H4)	46
Abbildung 28: Wandel des Personenverkehrs (vergrößert)	II
Abbildung 29: Verkehrsmittelnutzung bei 20 % Kostensteigerung (oben links); Verkehrsmittelnutzung bei einer 50%igen Kostensteigerung (oben rechts), Verkehrsmittelnutzung komfortbewusster Agenten (unten links), und Agententypenanzahl (unten rechts) bei einer Kostensteigerung um 50 % (H3)	III

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Variablen der SEU-Formel (in Anlehnung an Konidari & Mavrakis 2007; zit. n. Adelt et al. 2018: 13)	24
Tabelle 2: DiscGo realistic large Setup (in Anlehnung an ebd.: 23).....	27
Tabelle 3: Zusammenfassung der Experimente und Eingriffe.....	30
Tabelle 4: Edge-Auslastungen und SEU (H1)	34
Tabelle 5: Auslastung Edges und SEU (H4).....	43
Tabelle 6: Bewertung von unterschiedlichen Technologien bezüglich der Erreichung bestimmter Ziele (Skala von 0 bis 10; N=506) (in Anlehnung an Adelt et al. 2018: 22)	I
Tabelle 7: Präferenzen der Akteurstypen (Durchschnittliche Werte, Skala von 0 bis 10) (in Anlehnung an Teigelkamp 2015.; zit. nach Weyer et al. 2017: 21)	I
Tabelle 8: Attribute der SimCo Simulation	IV

Seit 2009 erschienene Soziologische Arbeitspapiere

Früher erschienene Arbeitspapiere sind auf der folgenden Website zu finden:
https://www.wiwi.tu-dortmund.de/wiwi/ts/de/forschung/veroeff/soz_arbeitspapiere/index.html

- | | |
|--------|--|
| 1/2003 | Hartmut Hirsch-Kreinsen, David Jacobsen, Staffan Laestadius, Keith Smith
Low-Tech Industries and the Knowledge Economy: State of the Art and Research Challenges
(August 2003) |
| 2/2004 | Hartmut Hirsch-Kreinsen
“Low-Technology”: Ein innovationspolitisch vergessener Sektor
(Februar 2004) |
| 3/2004 | Johannes Weyer
Innovationen fördern – aber wie? Zur Rolle des Staates in der Innovationspolitik
(März 2004) |
| 4/2004 | Konstanze Senge
Der Fall Wal-Mart: Institutionelle Grenzen ökonomischer Globalisierung
(Juli 2004) |
| 5/2004 | Tabea Bromberg
New Forms of Company Co-operation and Effects on Industrial Relations
(Juli 2004) |
| 6/2004 | Gerd Bender
Innovation in Low-tech – Considerations based on a few case studies in eleven European countries
(September 2004) |
| 7/2004 | Johannes Weyer
Creating Order in Hybrid Systems. Reflexions on the Interaction of Man and Smart Machines
(Oktober 2004) |
| 8/2004 | Hartmut Hirsch-Kreinsen
Koordination und Rationalität
(Oktober 2004) |
| 9/2005 | Jörg Abel
Vom Kollektiv zum Individuum? Zum Verhältnis von Selbstvertretung und kollektiver Interessenvertretung in Neue Medien-Unternehmen
(Juli 2005) |

- 10/2005 Johannes Weyer
Die Raumfahrtspolitik des Bundesforschungsministeriums
(Oktober 2005)
- 11/2005 Horst Steg
Transnationalisierung nationaler Innovationssysteme
(Dezember 2005)
- 12/2006 Tobias Haertel
UsersAward: Ein Beitrag zur optimalen Gestaltung von Mensch-
Maschine-Systemen in der Logistik
(Februar 2006)
- 13/2006 Doris Blutner, Stephan Cramer, Tobias Haertel
Der Mensch in der Logistik: Planer, Operateur und Problemlöser
(März 2006)
- 14/2006 Johannes Weyer
Die Zukunft des Autos – das Auto der Zukunft. Wird der Computer
den Menschen ersetzen?
(März 2006)
- 15/2006 Simone Reineke
Boundary Spanner als Promotoren des Wissensmanagementprozesses
(Juli 2006)
- 16/2006 Johannes Weyer
Die Kooperation menschlicher Akteure und nicht-menschlicher Agen-
ten. Ansatzpunkte einer Soziologie hybrider Systeme
(Juli 2006)
- 17/2006 Jörg Abel/Sebastian Campagna/Hartmut Hirsch-Kreinsen (Hg.)
Skalierbare Organisation - Überlegungen zum Ausgleich von Auf-
tragsschwankungen
(August 2006)
- 18/2007 Tabea Bromberg
Engineering-Dienstleistungen in der Automobilindustrie: Verbreitung,
Kooperationsformen und arbeitspolitische Konsequenzen
(Mai 2007)
- 19/2007 Hartmut Hirsch-Kreinsen
Lohnarbeit
(September 2007)
- 20/2008 Katrin Hahn
Der Lissabon-Prozess: Das Innovationskonzept und die Auswirkungen
auf die Politikgestaltung (März 2008)
- 21/2008 Anja J. Lorenz/ Johannes Weyer (Hg.)
Fahrerassistenzsysteme und intelligente Verkehrssteuerung. Soziolo-
gische Analysen hoch automatisierter Verkehrssysteme
(Juni 2008)

- 22/2008 Hartmut Hirsch-Kreinsen
Innovationspolitik: Die Hightech-Obsession
(August 2008)
- 23/2008 Hartmut Hirsch-Kreinsen
Multinationale Unternehmen
(September 2008)
- 24/2009 Jörg Abel/ Hartmut Hirsch-Kreinsen/ Peter Ittermann
Einfacharbeit in der Industrie. Status quo und Entwicklungsperspektiven
(Mai 2009)
- 25/2009 Robin D. Fink
Attributionsprozesse in hybriden Systemen. Experimentelle Untersuchung des Zusammenspiels von Mensch und autonomer Technik
(Juli 2009)
- 26/2009 Hartmut Hirsch-Kreinsen
Innovative Arbeitspolitik im Maschinenbau?
(September 2009)
- 27/2010 Hartmut Hirsch-Kreinsen
Technological Innovation and Finance
(Oktober 2010)
- 28/2010 Robin D. Fink, Tobias Liboschik
Bots - Nicht-menschliche Mitglieder der Wikipedia-Gemeinschaft
(Dezember 2010)
- 29/2011 Jörg Abel, Peter Ittermann, Hartmut Hirsch-Kreinsen
Einfacharbeit in der Ernährungsindustrie
(Februar 2011)
- 30/2012 Jörg Abel, Peter Ittermann, Hartmut Hirsch-Kreinsen
Einfacharbeit in der Gummi- und Kunststoffindustrie
(Januar 2012)
- 31/2012 Peter Ittermann, Jörg Abel, Hartmut Hirsch-Kreinsen
Einfacharbeit in der Metallbearbeitung
(Februar 2012)
- 32/2013 Lehrstuhl Wirtschafts- und Industriesoziologie, Lehrstuhl Arbeits- und Produktionssysteme
Wandel von Industriearbeit. Herausforderungen und Folgen neuer Produktionssysteme in der Industrie
(März 2013)
- 33/2013 Fabian Lücke, Johannes Weyer, Robin D. Fink
Steuerung komplexer Systeme. Ergebnisse einer soziologischen Simulationsstudie
(April 2013)

- 34/2013 Marco Hellmann, Sarah Rempe, Jan Schlüter Die Katastrophe der Deepwater Horizon (Oktober 2013)
- 35/2013 Johannes Weyer
Experimentelle Soziologie. Der Beitrag der Computersimulation zur Weiterentwicklung der soziologischen Theorie (Oktober 2013)
- 36/2013 Johannes Weyer, Fabian Adelt, Robin D. Fink
Steuerung komplexer Systeme. Ein Mehrebenen-Modell von Governance (Oktober 2013)
- 37/2013 Hartmut Hirsch-Kreinsen
A sample multi-level model of governance of socio-technical systems (November 2013)
- 38/2014 Hartmut Hirsch-Kreinsen
Wandel von Produktionsarbeit – „Industrie 4.0“ (Januar 2014)
- 39/2014 Hartmut Hirsch-Kreinsen, Katrin Hahn
Financialization of Innovation – the Case of the German Industrial Innovation System (August 2014)
- 40/2014 Katrin Hahn
Innovationsfinanzierung im Spannungsfeld von Risiko und Unsicherheit: Bremsen die gegenwärtigen Finanzmarktbedingungen unternehmerische Innovationen? (Oktober 2014)
- 41/2015 Daniel Ruppel
Hindernisse und Herausforderungen bei der Implementierung von Ganzheitlichen Produktionssystemen (Januar 2015)
- 42/2015 Johannes Weyer, Fabian Adelt, Sebastian Hoffmann
Governance of complex systems. A multi-level model (Juni 2015)
- 43/2015 Hartmut Hirsch-Kreinsen
Digitalisierung von Arbeit: Folgen, Grenzen und Perspektiven (Oktober 2015)
- 44/2015 Johannes Weyer, Sebastian Hoffmann, Jessica Longen
Achieving sustainable mobility. The discontinuation of socio-technical regimes (November 2015)
- 45/2015 Johannes Weyer
Can Pilots Still Fly – Role Distribution and Hybrid Interaction in advanced automated Aircraft (November 2015)

- 46/2016 Hartmut Hirsch-Kreinsen
Industrie 4.0 als Technologieversprechen
(Juni 2016)
- 47/2016 Peter Ittermann, Jonathan Niehaus, Hartmut Hirsch-Kreinsen, Johannes Dregger, Michael ten Hompel:
Social Manufacturing and Logistics. Gestaltung von Arbeit in der digitalen Produktion und Logistik
(Oktober 2016)
- 48/2016 Hartmut Hirsch-Kreinsen
"Industry 4.0" as Promising Technology: Emergence, Semantics and Ambivalent Character
(Oktober 2016)
- 49/2017 Maximilian Schulz, Maximiliane Wilkesmann
Einstellung und Bewertung betrieblicher Interessenvertretung von außertariflich und leitenden Angestellten
(April 2017)
- 50/2017 Peter Ittermann, Martin Eisenmann
Hybride Dienstleistungen und Wandel der Arbeit. Herausforderungen und Perspektiven in der Logistik
(November 2017)
- 51/2017 Stephanie Rüscher, Maximiliane Wilkesmann, Maik Lachmann
Kirchliche Krankenhäuser im strategischen Wandel - Studienergebnisse zur Strategieauswahl und -implementierung in christlichen Krankenhäusern
(November 2017)
- 52/2018 Hartmut Hirsch-Kreinsen
Arbeit 4.0: Pfadabhängigkeit statt Disruption
(März 2018)