

# SCHRIFTENREIHE ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT

*Analyse*

*Dezember 2017*

## Pfadabhängigkeiten in der Energiewende

Das Beispiel Mobilität

Manfred Fishedick | Armin Grunwald (Hrsg.)

Energiesysteme der Zukunft ist ein Projekt von:  
Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina  
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften  
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften

## Impressum

### Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Manfred Fishedick  
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH  
Döppersberg 19  
42103 Wuppertal  
manfred.fishedick@wupperinst.org

Prof. Dr. Armin Grunwald  
Karlsruher Institut für Technologie  
Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)  
Postfach 3640 | 76021 Karlsruhe  
armin.grunwald@kit.edu

### Autoren

Dr. habil. Weert Canzler  
WZB

Dr. Christian Dieckhoff  
NOW

Prof. Dr.-Ing. Manfred Fishedick  
Wuppertal Institut

Prof. Dr. Armin Grunwald  
KIT

Prof. Dr. Gertrude Hirsch Hadorn  
ETH Zürich

Peter Kasten  
Öko-Institut

Prof. Dr. Till Requate  
CAU Kiel

Dr.-Ing. Martin Robinius  
FZJ

Prof. Dr.-Ing. Daniela Thrän  
DBFZ

Dr. Dirk Vetter  
acatech

Prof. Dr. Jan-Peter Voß  
TU Berlin

### Reihenherausgeber

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V. (Federführung)  
Geschäftsstelle München, Karolinenplatz 4, 80333 München | [www.acatech.de](http://www.acatech.de)

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V.  
– Nationale Akademie der Wissenschaften –  
Jägerberg 1, 06108 Halle (Saale) | [www.leopoldina.org](http://www.leopoldina.org)

Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e. V.  
Geschwister-Scholl-Straße 2, 55131 Mainz | [www.akademienunion.de](http://www.akademienunion.de)

### Empfohlene Zitierweise

Fishedick/Grunwald: *Pfadabhängigkeiten in der Energiewende: Das Beispiel Mobilität* (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2017.

### Redaktion/Koordination

Julika Witte, acatech

### Wissenschaftliche Koordination

Dr. Dirk Vetter, acatech

### Produktionskoordinatorin

Marie-Christin Höhne, acatech

### Gestaltung und Satz

Atelier Hauer und Dörfler GmbH, Berlin

### Druck

Königsdruck, Berlin

ISBN: 978-3-9817048-8-4

### Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie, detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Gedruckt auf säurefreiem Papier | Printed in EC

### Das Akademienprojekt

Das Akademienprojekt „Energiesysteme der Zukunft“ erarbeitet Stellungnahmen und Analysen zur Gestaltung der Energiewende. Stellungnahmen enthalten Handlungsoptionen für die Transformation des Energiesystems und werden nach externer Begutachtung vom Kuratorium des Akademienprojekts verabschiedet. Analysen sind Ergebnisberichte von Arbeitsgruppen. Die inhaltliche Verantwortung für Analysen liegt bei den Autoren. Sofern eine Analyse Bewertungen enthält, geben diese die persönliche Meinung der Autoren wieder.



Leopoldina  
Nationale Akademie  
der Wissenschaften

acatech  
DEUTSCHE AKADEMIE DER  
TECHNIKWISSENSCHAFTEN

UNION  
DER DEUTSCHEN AKADEMIE  
DER WISSENSCHAFTEN





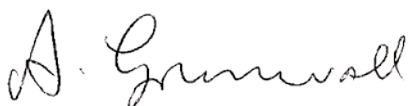
## Vorwort

Um den Stadtverkehr klima- und umweltfreundlicher zu machen, haben Bund und Automobilindustrie im Sommer 2017 eine Finanzspritze für Kommunen beschlossen. Bis zu eine Milliarde Euro wollen sie über den Fonds „Nachhaltige Mobilität für die Stadt“ für saubere Luft in Orten mit besonders hohen Feinstaubbelastungen bereitstellen. Städte und Regionen können damit zum Beispiel ihre lokalen Flotten auf umweltfreundliche Antriebe umstellen, die Infrastruktur für klimafreundlichen Individualverkehr erweitern oder den öffentlichen Nah- und Radverkehr ausbauen.

Diese Chance birgt gleichzeitig neue Herausforderungen für Kommunen. Sie müssen sich zeitnah für konkrete Umwelt- und Klimaschutzmaßnahmen entscheiden, ohne alle langfristigen Folgen angemessen einschätzen zu können. Dabei ist unklar, ob sie getroffene Entscheidungen – etwa für Antriebstechnologien oder Verkehrssysteme – später problemlos wieder ändern können, wenn sich andere als vorteilhafter erweisen.

Entscheidungssituationen wie diese beschreiben typische Pfadabhängigkeiten. Sie entstehen, wenn einmal eingeschlagene Wege nur schwer wieder verlassen werden können. Kommunale Entscheider stehen daher vor einem Dilemma: Wollen sie sich jetzt schon auf eine Technologie festlegen oder lieber alle Optionen so lange wie möglich offenhalten und erst später die effizienteste Lösung auswählen? Um Pfadabhängigkeiten frühzeitig erkennen, mögliche Alternativen abwägen und reflektierte Entscheidungen treffen zu können, benötigen sie richtungsweisende Entscheidungshilfen. Die vorliegende Analyse des Akademienprojekts „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS) beleuchtet am Beispiel der Mobilität, welche Strategien bei der Entscheidungsfindung helfen können, um mit Pfadabhängigkeiten adäquat umzugehen.

Pfadabhängigkeiten treten nicht nur bei der Gestaltung des Mobilitätssystems auf. Sie begegnen Entscheidungsträgern aus Politik und Wirtschaft an verschiedensten Stellen, wenn sie den Weg für das Energiesystem der Zukunft ebnen wollen – zum Beispiel bei der Sektorkopplung oder dem Netzausbau. Die ESYS-Arbeitsgruppe empfiehlt daher, Pfadabhängigkeiten zukünftig als wesentliches Kriterium in politischen Entscheidungsprozessen zu berücksichtigen. Dadurch öffnet sich die Energiewende dem gesellschaftlichen Diskurs über die Frage, wie wir künftig leben wollen.



*Prof. Dr. Armin Grunwald*



*Prof. Dr.-Ing. Manfred Fishedick*

# Inhalt

Abkürzungen .....	7
Zusammenfassung.....	8
1 Einleitung .....	11
2 Pfadabhängigkeit: Annäherung an einen soziotechnischen Begriff.....	13
2.1 Pfadabhängigkeiten und Entscheidungen.....	13
2.2 Vier Dimensionen von Abhängigkeiten .....	16
2.3 Strategien zum Umgang mit Pfadabhängigkeiten.....	17
3 Pfadabhängigkeiten im Energie- und Verkehrssystem .....	23
3.1 Wechselseitige Abhängigkeiten im Energiesystem.....	23
3.2 Beispiel: Urbane Mobilität.....	25
3.2.1 Status quo: Die autogerechte Stadt .....	25
3.2.2 Treiber der zukünftigen Entwicklung.....	27
3.2.3 Der Zukunftspfad „Elektrifizierung der Antriebe“ .....	29
3.2.4 Der Zukunftspfad „Stärkung des gemeinschaftlichen Verkehrs“ .....	32
3.3 Beispiel: Güterverkehr.....	35
3.3.1 Status quo: Die Lkw-basierte Logistik.....	36
3.3.2 Treiber der zukünftigen Entwicklung.....	37
3.3.3 Der Zukunftspfad „Alternative Energieträger“ .....	38
3.3.4 Der Zukunftspfad „Verlagerung von Transportwegen“ .....	42
4 Wie gehen Kommunen mit Pfadabhängigkeiten um? Das Beispiel Flottenumbau.....	45
4.1 Sofortige Flottenumstellung.....	46
4.2 Erfahrungswerte sammeln .....	47
5 Fazit .....	49
Literatur .....	52
Das Akademienprojekt .....	61

## Abkürzungen

AFID	Alternative Fuels Infrastructure Directive, Richtlinie über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe
BEV	Battery Electric Vehicle, Batterieelektrisches Fahrzeug
CNG	Compressed Natural Gas, komprimiertes Erdgas
CH <sub>4</sub>	Methan
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
EnEV	Energieeinsparverordnung
ETS	Emission Trading System, Emissionshandelssystem
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle, Brennstoffzellenfahrzeug
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
Lkw	Lastkraftwagen
LNG	Liquefied Natural Gas, verflüssigtes Erdgas
MKS	Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie
NSR	Nationaler Strategierahmen über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
Pkw	Personenkraftwagen
PtG	Power-to-Gas
PtL	Power-to-Liquid
RED	Renewable Energy Directive (Richtlinie 2009/28/EG)

## Zusammenfassung

Energiepolitische Entscheidungen haben in der Regel einen langen Wirkungshorizont. Dies liegt an den Erneuerungszyklen, die im Fahrzeugbereich zwischen zehn und zwanzig, bei Infrastrukturen, Kraftwerken und Gebäuden sogar zwischen zwanzig und fünfzig Jahre betragen. Mit diesen Wirkungshorizonten sind auch hohe Investitionssummen verbunden. Daraus können sogenannte Pfadabhängigkeiten entstehen: Frühere Entscheidungen erweisen sich als resistent gegenüber Veränderungen und können schwer wieder rückgängig gemacht werden. Diese Umstände führen dazu, dass das Energiesystem nicht automatisch an neue Entwicklungen angepasst werden kann. Ein Beispiel: Heute fällt es schwer, das seit Jahrzehnten etablierte, auf fossilen Brennstoffen basierende Verkehrssystem klimafreundlicher und nachhaltiger zu gestalten – unter anderem weil Diesel und Benzin aufgrund der zugehörigen Infrastruktur nicht ohne Weiteres durch neue, umweltfreundliche Kraftstoffe ersetzt werden können.

Diese Analyse will dafür sensibilisieren, Pfadabhängigkeiten bei der Umgestaltung des Energiesystems stärker und frühzeitig in der Entscheidungsfindung zu berücksichtigen. Dazu werden zunächst historische und zukünftige Abhängigkeiten qualitativ untersucht. Diese Auswertung bezieht technologische, wirtschaftliche, politische und soziale Zusammenhänge mit ein. Diese vier Dimensionen dienen als Raster, um Pfadabhängigkeiten zu erkennen, zu klassifizieren und in den soziotechnischen Kontext einzuordnen.

Pfadabhängigkeiten entstehen durch Hürden, die den Umstieg auf eine andere Option erschweren oder verhindern. Diese Hürden können entstehen, wenn Investitionen bei einer Systemveränderung verloren zu gehen drohen (versunkene Kosten). Auch Kostenvorteile durch Massenproduktion (Skaleneffekte) oder eine hohe Nutzerzahl (Netzwerkeffekte) verleihen dem etablierten System einen Vorteil gegenüber seinen Alternativen.

Wie aber soll mit den Abhängigkeiten umgegangen werden, wenn sie einmal erkannt wurden? Können bestimmte Pfadabhängigkeiten eher in Kauf genommen werden als andere? Und wie lässt sich dies in Bezug auf die notwendige Transformation des Energiesystems entscheiden? Die Entscheidungstheorie gibt hierfür eine Hilfestellung: Sie zeigt übergreifende Strategien auf und differenziert dabei, ob sofort oder später gehandelt werden muss und ob Entscheidungen für die Zukunft eindeutig getroffen oder offengehalten werden können. Während die Lösung der durch den Klimawandel verursachten Probleme Maßnahmen jetzt erfordert (Sofortiges Entscheiden), schränken heutige Entscheidungen die Flexibilität des zukünftigen Handelns ein. Immer schneller werdende technologische Entwicklungen und gesellschaftliche Veränderungen machen das Energiesystem außerdem dynamischer. Dies spricht dafür, Entscheidungen zu einem späteren Zeitpunkt und/oder ergebnisoffener zu treffen (anpassungsfähige Strategien). Dadurch entsteht ein (scheinbares) Dilemma zwischen schnellem Handeln einerseits und dem Wunsch nach größtmöglicher Flexibilität andererseits.



Wie Pfadabhängigkeiten entstehen und bewältigt werden können, untersucht die vorliegende Analyse am Beispiel des Mobilitätssektors. Zur erfolgreichen Gestaltung der Energiewende muss dieser Sektor deutlich umwelt- und klimafreundlicher gestaltet werden. Momentan verursacht der Verkehr fast ein Fünftel der CO<sub>2</sub>-Emissionen Deutschlands. Seit 1990 hat dieser Sektor nicht zur Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen beigetragen. Er ist deshalb ein besonders geeignetes Beispiel, um Pfadabhängigkeiten und Entscheidungsstrategien aufzuzeigen. Denn Städte und Kommunen müssen sich künftig entscheiden, ob sie zum Beispiel alternative Antriebssysteme einführen oder den gemeinschaftlichen Verkehr stärken wollen. Auch der Güterverkehr kann auf verschiedene Arten nachhaltiger gestaltet werden: Beispielsweise können hier alternative Antriebe in verschiedenster Form genutzt werden, etwa die direkte Elektrifizierung über Lkw-Oberleitungen oder synthetische strombasierte Flüssigkraftstoffe (Power-to-Fuels). Eine weitere Möglichkeit bestünde darin, den Verkehr auf Schiene und Wasser zu verlagern. Die konkrete Bewertung und Auswahl der verschiedenen Maßnahmen wird in dieser Arbeit nicht im Detail thematisiert. Vielmehr geht es schwerpunktmäßig darum, jede der genannten Optionen, aber auch mögliche Kombinationen hinsichtlich ihrer Pfadabhängigkeiten zu untersuchen.

Die Analyse verdeutlicht, dass zunächst bestehende Pfadabhängigkeiten überwunden werden müssen, um die Mobilität nachhaltig zu verändern. Dies zeigt sich auch an historischen Entwicklungen, die zu einer autogerechten Stadt oder einem primär Lkw-basierten Güterverkehr geführt haben. Entscheidungsträgerinnen und -träger können zur Überwindung dieser „alten Pfadabhängigkeiten“ zum Beispiel emissionsarme Antriebe fördern, den gemeinschaftlichen Verkehr stärken oder den Güterverkehr verlagern. Die Überwindung alter klimaschädlicher

Pfadabhängigkeiten führt jedoch mitunter zu neuen Abhängigkeiten: So kann unter günstigen Voraussetzungen die Elektrifizierung des Verkehrssystems einerseits CO<sub>2</sub>-Emissionen senken und andererseits Lärm und gesundheitsschädliche Schadstoffe reduzieren. Für einen substantiellen Minderungsbeitrag ist es notwendig, dass zum einen die erneuerbaren Energien massiv ausgebaut werden und zum anderen eine Verbesserung der CO<sub>2</sub>-Bilanz bei der Batterieproduktion erzielt wird. Ein klimafreundlicher Güterverkehr bedingt möglicherweise den Aufbau neuer Infrastruktursysteme (zum Beispiel Oberleitungssysteme, LNG-Tankstellen, Power-to-Fuels-Strukturen) sowie eine europäisch abgestimmte Lösung.

Entscheidungsbedarf für die Umgestaltung des Mobilitätssystems gibt es auch auf der kommunalen Ebene. Die vorliegende Analyse stellt lokalen Entscheidern vor diesem Hintergrund konkrete und praxisrelevante Informationen bereit, wie kommunale Flotten, zum Beispiel Fahrzeuge des öffentlichen Nahverkehrs, klimafreundlich umgebaut werden können. Entscheiden sie sich für eine sofortige Flottenumstellung, schaffen sie auf der einen Seite Planungssicherheit und eine möglichst unmittelbare Verbesserung für Klima und Umwelt. Auf der anderen Seite wissen sie nicht, ob sich die von ihnen gewählte Technologie langfristig als die wirtschaftlichste Lösung erweisen wird. Vor allem kleine Kommunen können daher gut beraten sein, zunächst die Erfahrungswerte anderer Städte sowie technische Neuerungen abzuwarten, laufen dadurch aber auch Gefahr, zu spät gegen die eigenen Umwelt- und Klimaprobleme vorzugehen. Entscheider müssen also immer die Risiken und Chancen für die Wahl einer Technologie abwägen und überlegen, wann der richtige Zeitpunkt für ihre Beschlüsse und Umsetzungen ist.

Die Analyse soll für das Phänomen der Pfadabhängigkeiten sensibilisieren.

Fest steht aber: Pfadabhängigkeiten sind nur ein Kriterium für die Auswahl von Mobilitätsoptionen – sie haben jedoch großen Einfluss auf die Ausgestaltung des Energiesystems. Angesichts dieser Tragweite gilt es, Pfadabhängigkeiten zukünftig stärker und frühzeitiger zu berücksichtigen als bisher. Hier schließen sich weitere Fragen an: Brauchen wir neue Frühwarnsysteme, um Pfadabhängigkeiten rechtzeitig identifizieren und gegebenenfalls verhindern zu können? Wie könnten solche Systeme aussehen? Und wollen die Akteure Entscheidungen bewusst treffen und dadurch auch Pfadabhängigkeiten in Kauf nehmen? Eine breite gesellschaftliche Debatte über die Wirkungen langfristiger Entscheidungen anzustoßen ist hier ebenso denkbar wie ein Expertengremium einzusetzen, das auf zukünftige Pfadabhängigkeiten frühzeitig hinweist und die Vor- und Nachteile für eine ausgewogene Entscheidungsfindung aufbereitet. Auch zu diesen Fragen will die Analyse einen Beitrag leisten und die Diskussion darüber fördern.

# 1 Einleitung

Welche Entwicklungspfade sind für das künftige Energiesystem denkbar? Welche Wege sollen tatsächlich eingeschlagen werden? Mit diesen Fragen müssen sich unterschiedliche Akteure der Energiewende auseinandersetzen. Beim Umbau des Mobilitätssystems ist das Problem besonders virulent: Im Gegensatz zu den anderen Sektoren müssen die zentralen Weichen für einen nachhaltigen Verkehr erst noch gestellt werden – und zwar bald. Um die Klimaschutzziele zu erreichen, müssen die Treibhausgasemissionen in Deutschland bis 2050 gegenüber 1990 um 80 bis 95 Prozent zurückgehen.<sup>1</sup> Während die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Wärme- und Stromsektor seit 1990 rückläufig sind, steigen sie im Verkehrsbereich weiter an. Der Handlungsdruck ist also hoch.

Aus heutiger Sicht sind viele verschiedene Optionen möglich, um den Verkehr umwelt- und klimafreundlicher zu gestalten: Die Alternativen reichen von mit Wasserstoff betriebenen Brennstoffzellenfahrzeugen über batterieelektrische Antriebe bis hin zu Hybridmotoren oder synthetischen Kraftstoffen. Wofür sollen sich Kommunen bei dieser Angebotspalette entscheiden? Und welche Kriterien helfen ihnen dabei abzuwägen, bereits jetzt ihre Flotten umzustellen oder sich erst später festzulegen? Die vorliegende Analyse diskutiert diese Frage am Beispiel der Mobilität.<sup>2</sup>

Bislang fallen bei den genannten Entscheidungen vor allem die Kosten einer bestimmten Technologie oder Umwelt- und Klimaschutzwirkungen ins Gewicht. Allerdings spielen Pfadabhängigkeiten als ein übergreifendes Kriterium eine ebenso wichtige Rolle. Sie bezeichnen die Schwierigkeit, einmal eingeschlagene Wege wieder zu verlassen, zum Beispiel weil die Infrastruktur nicht umgerüstet werden kann oder weil Bürgerinnen und Bürger ihre Verhaltensweisen nur ungern ändern. Pfadabhängigkeiten schränken also die Möglichkeiten ein, ein System im Laufe der Zeit weiterzuentwickeln. Beispielsweise können die Folgen der autogerechten Stadt heute nur schwer bewältigt werden, weil Investitionen und Verhaltensweisen nur mit hohem Aufwand verändert werden können. Das verhindert zügige Lösungen für eine nachhaltige urbane Mobilität.

Aus diesem Grund lohnt es sich zu untersuchen, ob und inwiefern Akteure des Energiesystems wie Wirtschaft, Privathaushalte, Kommunen oder der Staat heutzutage alte Pfadabhängigkeiten festigen oder neue schaffen. Dabei greift die Strategie zu kurz, einfach alle Entscheidungen zu vermeiden oder hinauszuzögern. Denn der Klimawandel und die starke Luftverschmutzung lassen es nicht zu, dass Entscheidungen gar nicht getroffen werden.

In einem komplexen soziotechnischen System wie dem der Mobilität ist unser Wissen über Pfadabhängigkeiten mit vielen Unsicherheiten behaftet. So lassen sich Wechselwirkungen zwischen ökonomischen Instrumenten, klima-

<sup>1</sup> Bundesregierung 2010.

<sup>2</sup> Mobilität beschreibt die Möglichkeit beziehungsweise Fähigkeit des Menschen, sich von A nach B zu bewegen. Verkehr hingegen bezeichnet Instrumente zur Umsetzung von Mobilität und umfasst unter anderem Fahrzeuge, Infrastrukturen und Verkehrsregeln (vgl. Becker et al. 1999).

schädlichen Emissionen, regulatorischen Mitteln und gesellschaftlicher Akzeptanz nur schwer voraussagen. Ob sich ein einmal eingeschlagener Weg als richtig oder falsch erweist, zeigt sich außerdem erst deutlich später. Die in dieser Arbeit untersuchten Entscheidungen zum Umbau des Energie- und Mobilitätssystems werden nach technologischen, ökonomischen, politischen und gesellschaftlichen Kriterien untersucht.

Diese Analyse illustriert Pfadabhängigkeiten in zwei Bereichen, in denen verschiedene Technologien bereits heute denkbar sind und grundlegende Entscheidungen unmittelbar bevorstehen: urbane Mobilität und Güterverkehr. Dazu stellt die vorliegende Arbeit zunächst notwendige Begriffsdefinitionen und entscheidungstheoretische Hintergründe vor. Darauf aufbauend legt

sie dar, wie die Verantwortlichen mit den identifizierten Pfadabhängigkeiten umgehen können.

Mit dieser soziotechnischen Betrachtung richtet sich die Analyse an Kommunen und politische Entscheidungsträgerinnen und -träger wie auch Akteure aus Wissenschaft und Wirtschaft, die das Mobilitätssystem umgestalten. Sie will ihnen Strategien und Hilfestellungen an die Hand geben, damit sie Pfadabhängigkeiten frühzeitig identifizieren und ihre Entscheidungen daraufhin überprüfen und abwägen können. Dazu erfolgt abschließend auch ein Ausblick auf ähnliche Anwendungsfälle in der Energiewende, etwa bei der Planung neuer Stromtrassen oder bei der energetischen Sanierung des Gebäudebestandes.

## 2 Pfadabhängigkeit: Annäherung an einen soziotechnischen Begriff

Die Entwicklung eines einmal eingeschlagenen Weges wird durch vorherige Entscheidungen beeinflusst. Sie begünstigen manche und benachteiligen andere Wege. Oft schließen sie auch einige aus oder legen die Zukunft auf andere Pfade fest. Das ist ein grundsätzlicher Aspekt unseres täglichen Handelns und Entscheidens. Gerade in der Politik, wo Entscheidungen nicht für Einzelne, sondern für die ganze Gesellschaft getroffen werden, gilt es zu beachten, dass man sich mit der Entscheidung für eine Option automatisch gegen viele andere ausspricht.<sup>3</sup> Diese Abwägungen sind Bestandteil der Entscheidungstheorie und zeigen die große Bedeutung von Pfadabhängigkeiten in politischen Prozessen.

### 2.1 Pfadabhängigkeiten und Entscheidungen

Politische Entscheidungen haben oft eine sehr lange Wirkungsdauer. Dies gilt insbesondere für Transformationsprozesse, also grundlegende Veränderungen von Systemen wie dem Energiesystem. So liegt die durchschnittliche Lebensdauer der Personenkraftwagen (Pkw) von der Konstruktion bis zur Entsorgung bei etwa 18 Jahren. Das Durchschnittsalter der Anfang 2017 auf deutschen Straßen zugelassenen Pkw beträgt etwa die Hälfte (9,3 Jahre).<sup>4</sup> Bei Infrastrukturen, Kraftwerken und Gebäuden liegt die jeweilige Wirkungsdauer sogar zwischen zwanzig und fünfzig Jahren.<sup>5</sup>

In der Regel gibt es viele verschiedene Möglichkeiten, wie sich ein System künftig entwickeln kann. Diese werden im Folgenden als „Entwicklungspfade“ oder kurz „Pfade“ bezeichnet. Sind bestimmte Entwicklungspfade einmal eingeschlagen, ist es oft schwer, diese später wieder zu verlassen. Das muss nicht automatisch zu Problemen führen; oft entstehen diese aber, weil unerwartete Folgen auftreten, die den eingeschlagenen Weg erschweren, den man aber nicht mehr ändern kann. Dieses Phänomen wird in der Wissenschaft mit unterschiedlichen Begriffen beschrieben.<sup>6</sup> Die vorliegende Analyse verwendet die Bezeichnung „Pfadabhängigkeit“, ein verbreitetes Erklärungskonzept für sich selbst reproduzierende Strukturen in der ökonomischen, sozialwissenschaftlichen und historischen Forschung, das zudem die Problematik gut verbildlicht.<sup>7</sup> Abbildung 1 zeigt, wie sich der Handlungsspielraum der zur Verfügung stehenden Optionen im Laufe eines Entscheidungsprozess einengt. Pfadabhängigkeiten entstehen, wenn sich am Ende des Prozesses nur noch ein Pfad herauskristallisiert und keine weiteren Pfade beschränkt werden.

<sup>3</sup> Luhmann 1971.

<sup>4</sup> Kraftfahrt-Bundesamt 2017, Statista 2014.

<sup>5</sup> Vgl. Ausfelder et al. 2017. Laut § 10 der Energieeinsparverordnung (EnEV) entsteht in der Regel die Pflicht zum Austausch des Heizkessels nach dreißig Jahren. Vgl. EnEV 2015.

<sup>6</sup> So erklärt das Konzept „Momentum“ in Anlehnung an seine physikalische Bedeutung des Impulses, wieso die Entwicklung großer technologischer Systeme schwer zu steuern ist (Hughes 1987). Der Begriff „technologische Paradigmen“ betont diejenigen Optionen, die soziotechnische Entwicklungen stabilisieren. Die Richtung dieser Entwicklungen wird als „Trajectories“ bezeichnet (Dosi 1982). Der Ausdruck „Lock-In“ beschreibt Technologiepfade, deren Nutzung trotz womöglich besserer Alternativen nur schwer zu verändern ist (Arthur 1989). Er ist sehr verbreitet und wird weitgehend synonym mit „Pfadabhängigkeit“ verwendet (vgl. Unruh 2000). Einen detaillierten Überblick geben Meyer/Schubert 2007.

<sup>7</sup> Beyer 2005, S. 6. Zur Bedeutung einer historischen Ausgangssituation für zukünftige Entwicklungen siehe Bassanini/Dosi 2001.

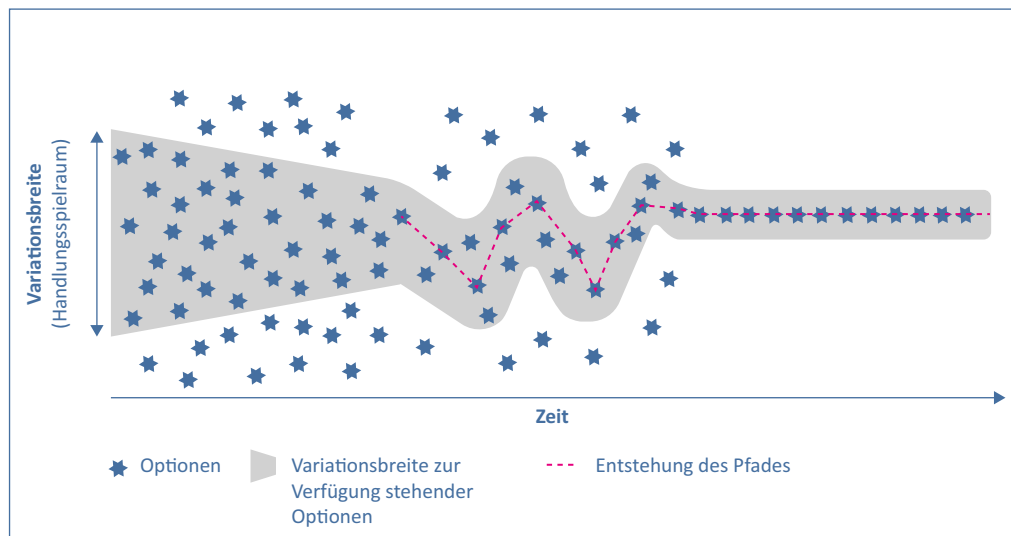


Abbildung 1: Entstehung von Pfadabhängigkeiten. Grafik in Anlehnung an Sydow et al 2009, S. 692.

Das Konzept der Pfadabhängigkeiten wurde in den 1980er Jahren von Paul David und Brian Arthur eingeführt. David veranschaulichte es am Beispiel der in den USA üblichen QWERTY-Tastatur. Bei der Konzeption von Schreibmaschinen half die QWERTY-Anordnung, mechanische Mängel auszugleichen: Die häufigsten Buchstabenpaare im Englischen wurden weit voneinander entfernt platziert, damit sich ihre Hebel nicht ineinander verhaken konnten. Die QWERTY-Anordnung verlangt jedoch viele unnötige Bewegungen und belastet insbesondere kleinere, schwächere Finger stärker. Da sich jedoch genügend Menschen an diese Anordnung gewöhnt hatten, wurde sie auch für Computer übernommen. Damit entwickelte sich die heute gebräuchliche Computertastatur gegenüber den Alternativen zum Standard.<sup>8</sup>

Ökonomen haben untersucht, wodurch heutzutage bestimmte Pfade verfestigt werden. Eines ihrer Ergebnisse: Je verbreiteter eine Technologie, desto größer die Produktionsmenge und Nutzerzahl und desto höher die Skalenerträge („Increasing Returns to Scale“). Außerdem können für die Verbreitung einer Technologie auch Rückkopplungseffekte wie die Bindung bestimmter Produkte an ein System

förderlich sein. Hat eine Technologie in der Markteinführung solche Startvorteile gegenüber den Alternativen, kann sie sich als dominante Anwendung durchsetzen.<sup>9</sup> So lassen sich einige Beispiele von Pfadabhängigkeiten auflisten:<sup>10</sup>

- **Skaleneffekte der Produktion** („Economies of Scale“): Bei hohen Investitions- oder Fixkosten sinkt der Preis eines Produktes mit der Anzahl der produzierten Einheiten – etwa weil hohe Investitionen in Produktionsanlagen auf viele Einheiten umgelegt werden oder weil die Produktion durch Erfahrungswerte effizienter gestaltet wird. Der sinkende Preis steigert die Attraktivität eines Produktes und damit seine Verbreitung. Das Ergebnis sind standardisierte Massenprodukte wie benzinbetriebene Autos.<sup>11</sup>

9 Arthur 1989, S. 118. Für eine Übersicht dieser Überlegungen siehe Arthur 1994.

10 Die Literaturlage zu Mechanismen für Pfadabhängigkeiten ist unübersichtlich, eine für die Zwecke der Analyse dienliche Systematisierung liegt nicht vor. Die hier dargestellten Mechanismen wurden deshalb aus unterschiedlichen Quellen zusammengeführt. Eine systematische Betrachtung prominent diskutierter Mechanismen liefert Beyer 2010 unter anderem unter Einschluss der Arbeiten von Arthur 1988, David 1985, North 1990 und Pierson 2000. Jedoch handelt es sich dabei um eine theoriegeleitete Systematisierung, die in erster Linie der Widerlegung der These gewidmet ist, Pfadabhängigkeiten könnten – einmal etabliert – nicht mehr verändert werden. Einen weiteren Versuch der Systematisierung liefern Klitkou et al. 2015.

11 Arthur 1988.

8 David 1985.

- **Versunkene Kosten** („Sunk Costs“): Bei hohen Investitions- oder Fixkosten ist der Anreiz groß, an der einmal gewählten Option festzuhalten. Damit beugt man der Gefahr vor, die getätigten Investitionen abschreiben zu müssen, bevor sie sich amortisiert haben.<sup>12</sup> Unter versunkene Kosten fallen zum Beispiel Planungs- oder Genehmigungskosten für Energieanlagen.
- **Lerneffekte**: Je häufiger eine Technologie genutzt wird, desto bekannter und anpassungsfähiger ist sie. Das steigert ihre Attraktivität und den Absatz („Learning by Using“).<sup>13</sup> Eine steigende Produktionsmenge begünstigt das Lernen im Unternehmen, was wiederum eine effizientere Produktion und damit sinkende Preise erlaubt („Learning by Doing“).<sup>14</sup> Die Entwicklung der Laufbandindustrie ist ein Beispiel für Lerneffekte aus der Produktion.
- **Netzwerkeffekte**: Je mehr Personen eine Technologie anwenden, desto größer wird der Anreiz für andere, sie ebenfalls nutzen zu wollen. Ein klassisches Beispiel für solche direkten Netzwerkeffekte ist das (Mobil-) Telefon: Seine Brauchbarkeit steigt mit der Nutzerzahl. Indirekte Netzwerkeffekte liegen vor, wenn steigende Nutzerzahlen die Brauchbarkeit einer zweiten, komplementären Technologie erhöhen und diese wiederum die Verbreitung der ersten Technologie steigert. Aktuell sind diese Effekte bei App-Diensten der sozialen Medien beobachtbar, die nur auf neuen Smartphones funktionieren. Solche Apps steigern somit indirekt den Absatz von Smartphones.<sup>15</sup>
- **Bekanntheit**: Je bekannter ein Produkt ist, desto verbreiteter ist das Wissen über seine Eigenschaften und desto wahrscheinlicher ist, dass es auch neue Nutzerinnen und Nutzer verwenden werden.<sup>16</sup> So fördern Kenntnisse über die Funktionsweise von Autos deren Verbreitung.
- **Erwartungen**: Menschen orientieren sich bei ihrem Denken und Handeln in der Regel an Erwartungen. Erfüllen sich diese, können auch hierdurch Pfadabhängigkeiten entstehen.<sup>17</sup> So führt eine steigende Marktdurchdringung einer Technologie häufig zu der Erwartung, dass diese langfristig anhält.<sup>18</sup> Prognosen, die von einem stark wachsenden Personenverkehr ausgehen, können dadurch zum Beispiel den motorisierten Individualverkehr fördern.

Die jüngere Forschung untersucht die unterschiedlichen Entwicklungen, die Pfadabhängigkeiten begünstigen.<sup>19</sup> Denn Pfadabhängigkeiten entstehen einerseits aufgrund bestimmter vergangener Entwicklungen und Entscheidungen, andererseits durch bewusste Handlungen relevanter Akteure.<sup>20</sup> Ein strategisches Handeln kann dazu beitragen, Pfadabhängigkeiten frühzeitig zu erkennen und zu vermeiden oder abzuschwächen.

<sup>12</sup> Siehe „Large Set-Up or Fixed Costs“ in Arthur 1994, S. 112, wie dargestellt von Pierson 2000, S. 254.

<sup>13</sup> Rosenberg 1982, S. 122.

<sup>14</sup> Arrow 1962.

<sup>15</sup> Arthur 1988, S. 291, hier aufgeführt unter der ebenfalls gebräuchlichen Bezeichnung „Network Externalities“. Siehe Yu et al. 2016 zu indirekten Netzwerkeffekten.

<sup>16</sup> Dieses Phänomen wird auch als „Information Diffusion“ (Geroski 2000) oder „Informational Increasing Returns“ (Arthur 1988) verstanden.

<sup>17</sup> Borup et al. 2006; Upham et al. 2013, S. 14.

<sup>18</sup> Arthur 1994, S. 112, wie dargestellt von Pierson 2000, S. 254.

<sup>19</sup> Geels 2002.

<sup>20</sup> Hierauf machen Meyer/Schubert (2007) aufmerksam, und sie entwerfen ein Modell für die Konstituierung von Pfaden.

## 2.2 Vier Dimensionen von Abhängigkeiten

Wie bereits dargestellt spielen Pfadabhängigkeiten insbesondere bei der Planung von Großprojekten mit jahrzehntelanger Nutzungsdauer eine wichtige Rolle: Entscheidungen müssen trotz hoher Unsicherheit über deren wirtschaftliche und gesellschaftliche Folgen getroffen werden. Dies gilt vor allem für das Energie- und Mobilitätssystem mit seinen langfristig angelegten, starren Infrastrukturen.

Durch die Verknüpfung von Technologien mit Menschen in einer bestimmten Struktur kann das Mobilitätssystem als ein *soziotechnisches System* begriffen werden. Der Zusatz *sozio* wird dabei sehr breit gefasst, um zu kennzeichnen, dass diese Systeme nicht allein aus Technologien wie Stromleitungen oder Autos bestehen, sondern sich gleichermaßen auch in gesellschaftlichen Strukturen wie Institutionen, Märkten und Verhaltensroutinen niederschlagen. Dabei bedingen sich technologische und soziale Strukturen gegenseitig: Effiziente Verkehrsträger und Kraftstoffinfrastrukturen sind ebenso Teil des Mobilitätssystems wie Investmentbanken, die Mittel für Investitionen in neue Technologien zur Verfügung stellen. Das System würde weder ohne Tankstellen oder Ladesäulen noch ohne die Finanzierung durch Banken funktionieren. Der Wandel des Mobilitätssystems findet daher an der Schnittstelle zwischen Technik, Industrie, Märkten, Politik, Kultur und Zivilgesellschaft statt.<sup>21</sup> In Anlehnung an die Kategorien aus den „Science and Technology Studies“<sup>22</sup> werden in dieser Analyse vier miteinander verschränkte Dimensionen unterschieden, um Entwicklungspfade im Mobilitätssystem zu beschreiben:

- **Technologie:** Für die zukünftige Gestaltung des Mobilitätssystems sind die verwendeten Technologien, also Fahrzeuge, Antriebssysteme oder Infrastrukturen, von zentraler Bedeutung. Im Falle einer Wasserstoffwirtschaft sind dies zum Beispiel Brennstoffzellenfahrzeuge, Betankungsanlagen und spezielle Ladesysteme. Für die Erfassung zukünftiger Entwicklungspfade müssen auch neue Schwerpunkte der Forschung und Entwicklung berücksichtigt werden.
- **Markt:** Wenn sich Technologien am Markt etablieren sollen und entsprechende Infrastrukturen aufgesetzt sind, verändern sich auch die dahinter liegenden Produktionsprozesse und die beteiligten Akteure. So tauchen beispielsweise in etablierten Märkten wie der Autoindustrie neue Unternehmen auf, die neue Technologien vermarkten.
- **Nutzerverhalten:** Verkehrsteilnehmende nutzen öffentliche oder kommerzielle Mobilitätsdienstleistungen und -infrastrukturen. Hierdurch entstehen Verhaltensmuster, die sich langfristig etablieren. Beispielsweise erfordern die meisten Carsharing-Dienste die Nutzung von Smartphones. Auch weitere Dienstleistungsangebote werden künftig die Nutzerpräferenzen verändern.
- **Governance:** Die Steuerung und Regulierung des Mobilitätssystems erfolgt vor allem in Form von Gesetzen und Normen. Neben Bundes- und Landesregierungen sowie Kommunen beteiligen sich daran auch Behörden, die Normen einführen oder deren Einhaltung überwachen. Neben der Regulierung kann sie flexible Multi-Akteurs-Partnerschaften beinhalten, die jenseits des Bundes auch auf lokaler wie auch transnationaler Ebene stattfinden. All diese Lenkungsformen

<sup>21</sup> Für detaillierte und insbesondere auch empirische Analysen des soziotechnischen Mobilitätssystems sei auf Nykvist/Whitmarsh 2008 sowie auf Geels et al. 2012 verwiesen.

<sup>22</sup> Die „Science and Technology Studies“ beschäftigen sich mit dem Zusammenspiel von Wissenschaft, Technik und gesellschaftlicher Ordnung. Hieraus leiten sich die Forschungsfelder der Technik-, Wirtschafts-, Sozial- und Politikwissenschaften ab. Vgl. Beck et al. 2012.



werden unter den Begriff Governance gefasst.<sup>23</sup> Sie kann die Einführung und Nutzung von Technologien direkt oder indirekt begünstigen.

Die unterschiedlichen Dimensionen zeigen, dass eine Vielzahl von Akteuren über die Umgestaltung des Mobilitätssystems entscheidet. Wie lassen sich Pfadabhängigkeiten in diese Entscheidungssituationen einordnen? Die Analyse bezieht sich auf Situationen, in denen einerseits *unter Unsicherheit* entschieden werden muss und andererseits zum Teil zeitlich *weitreichende Wirkungen* erwartet werden. Der gängigen entscheidungstheoretischen Einteilung folgend werden dabei insbesondere Situationen betrachtet, in denen nicht oder nicht hinreichend bekannt ist, welche Auswirkungen Entscheidungen langfristig haben. In diesen Situationen kennen die Entscheidungsträgerinnen und -träger also nur mögliche Folgen, die nicht exakt quantifiziert werden können. Damit ist die Analyse konzeptionell

theoretisch in der nicht-probabilistischen Entscheidungstheorie verortet, die aktuell insbesondere in der Klimaökonomik an Bedeutung gewinnt.<sup>24</sup> Auch bei der Transformation des Mobilitätssystems liegen häufig unsichere Einflussfaktoren vor. So ist heute nicht absehbar, wie sich das Mobilitätsverhalten der Nutzerinnen und Nutzer oder die zukünftige Mobilitätsnachfrage entwickeln werden.

### 2.3 Strategien zum Umgang mit Pfadabhängigkeiten

Strategien können Entscheidungsträgerinnen und -träger dabei unterstützen, selbst unter unsicheren Bedingungen fundierte Entscheidungen zu treffen. Sie strukturieren den Entscheidungsprozess und helfen, mit Unsicherheiten bei der Entscheidungsfindung umzugehen.<sup>25</sup>

<sup>24</sup> Vgl. zur Unterscheidung Heal/Millner 2014 und Hirsch/Hadorn 2016. Eine praktische Einführung in die klassische Entscheidungstheorie geben Eisenführ et al. 2010. Dieckhoff et al. 2014 bieten eine Einführung in Szenarien und erläutern unter anderem, welchen Typ von Aussage Szenarien treffen.

<sup>25</sup> Vgl. Hirsch Hadorn et al. 2015, S. 111.

<sup>23</sup> Vgl. Benz 2006.

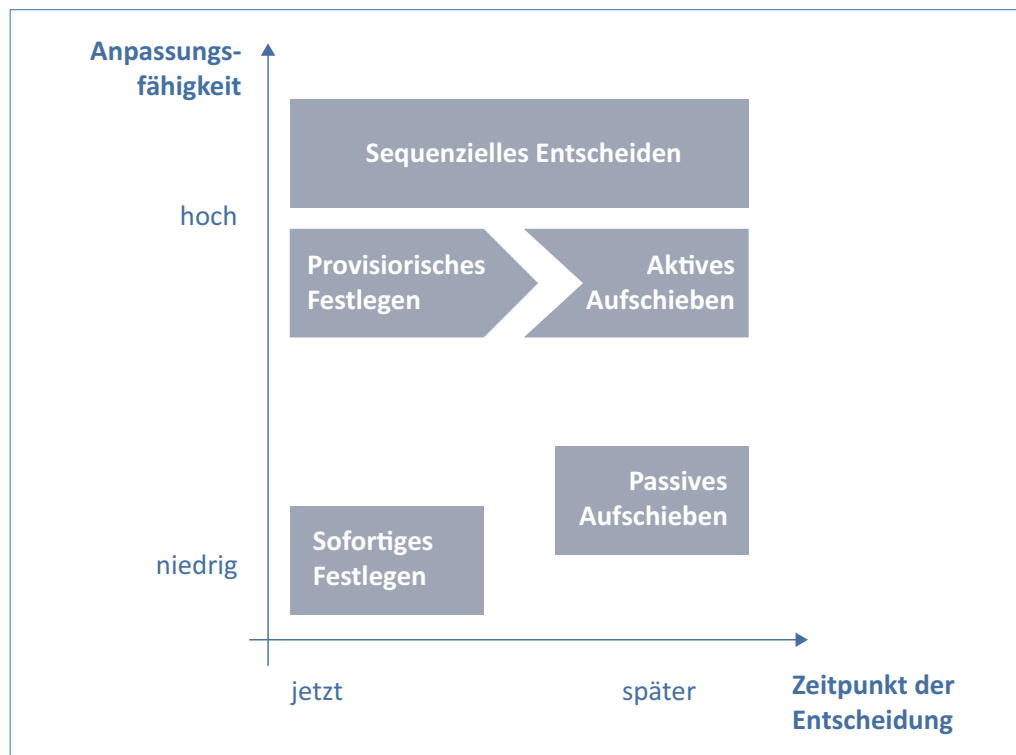
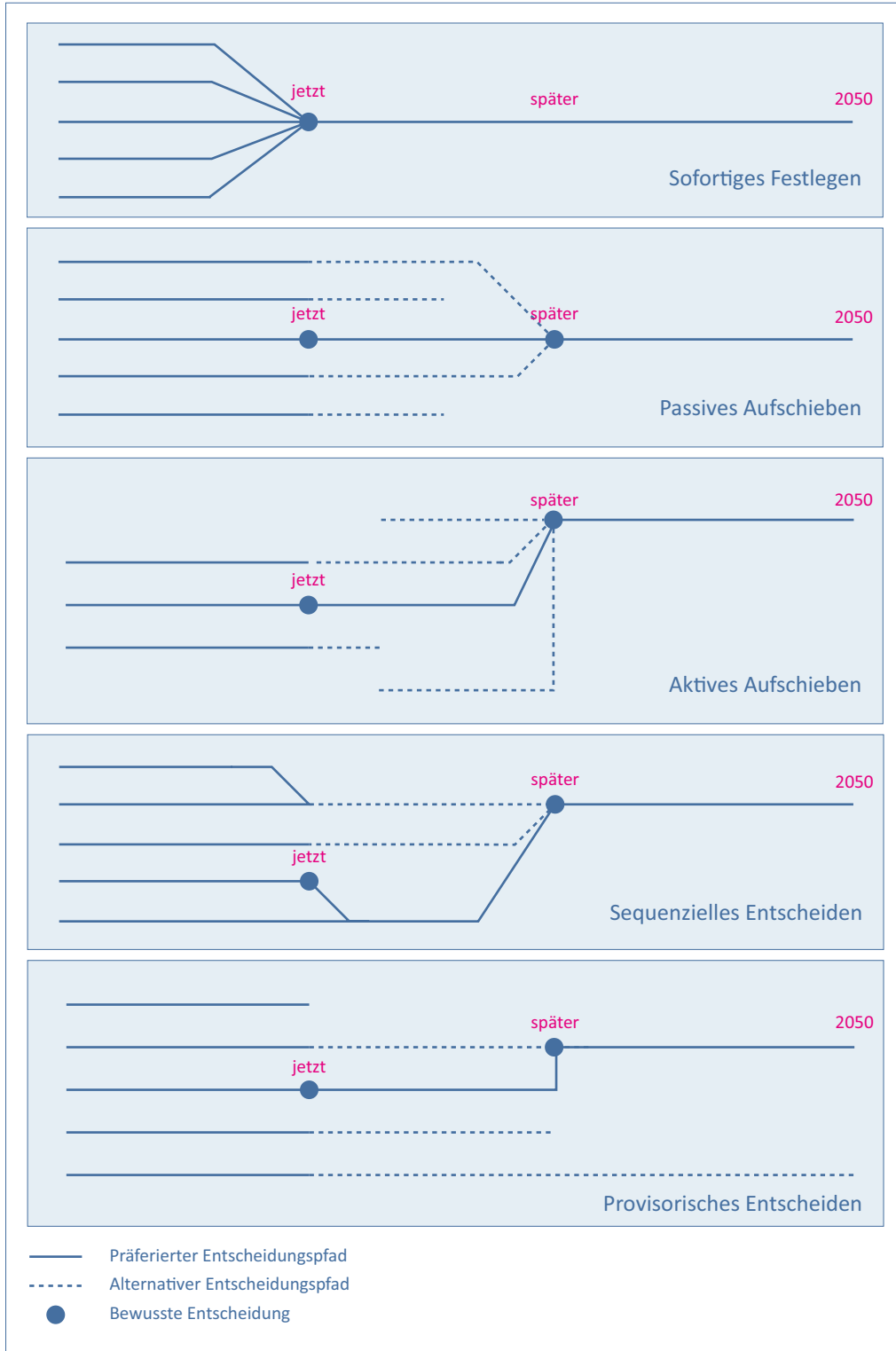


Abbildung 2: Entscheidungsstrategien. Eigene Darstellung in Anlehnung an Hirsch Hadorn 2016 und Hirsch Hadorn et al. 2015.



**Abbildung 3: Struktur der Entscheidungsstrategien.** Analog zu Abbildung 2 werden die Entscheidungen **jetzt** oder **später** gefällt. Durchgezogene Linien zeigen den präferierten Entwicklungspfad. Gestrichelte Linien bilden alternative Entwicklungspfade ab. Diese Unterscheidung wird erst nach dem Entscheidungszeitpunkt **jetzt** relevant: Ab dann gibt es immer eine Präferenz und meistens mehrere Alternativen. Eigene Darstellung.

Die erste Stellschraube, den Prozess bis zum Entschluss zu gestalten, ist der **Entscheidungszeitpunkt**: Soll trotz der Unsicherheiten *jetzt* eine Wahl der Handlungsoptionen getroffen oder soll sie auf einen *späteren* Zeitpunkt verschoben werden? Ein zweiter Aspekt betrifft die Frage, ob die Entscheidungen **anpassungsfähig** an neue Erkenntnisse sind: Sind sie definitiv, oder bieten sie die Möglichkeit für Veränderungen? Vor allem wenn Entscheidungen in die Zukunft verlagert werden, bedarf es unterschiedlicher anpassungsfähiger Strategien. In Abbildung 2 sind grundlegende Entscheidungsstrategien abhängig von der Anpassungsfähigkeit und dem Zeitpunkt der Entscheidung in einem Koordinatensystem verortet.

Nachfolgend werden die Strategien erläutert und illustriert (vgl. Abbildung 3).

**Sofortiges Festlegen:** In dieser Strategie wird die definitive Entscheidung darüber, welche Option gewählt wird, so schnell wie möglich getroffen. Danach können weder neue Forschungs- und Testergebnisse noch neue Erkenntnisse aus Stakeholder-Gesprächen berücksichtigt werden, da der Entscheidungsprozess abgeschlossen ist.<sup>26</sup> Bei dieser Strategie werden Pfadabhängigkeiten bewusst in Kauf genommen, eine hohe Anpassungsfähigkeit wird nicht als Ziel berücksichtigt. Es zählt die rasche Umsetzung.

**Passives Aufschieben:** Eine gegenläufige Strategie besteht darin, die Entscheidung auf einen späteren Zeitpunkt zu verschieben. Dabei ist wichtig, dass ein Zeitpunkt für die spätere Entscheidung festgelegt wird. Beim passiven Aufschieben werden keine Informationen recherchiert, um Entscheidungen besser treffen zu können. Diese Strategie verspricht da-

her keine schnelle Wirksamkeit und eignet sich nur bedingt, um mit Pfadabhängigkeiten umzugehen.<sup>27</sup>

Daneben gibt es anpassungsfähige Strategien, die dank ihrer Struktur systematisch darauf angelegt, dass Entscheidungen bei Bedarf gezielt verändert werden können, um neue Erkenntnisse und veränderte Bedingungen zu berücksichtigen. Es lassen sich drei anpassungsfähige Strategien unterscheiden:

**Aktives Aufschieben:** Die Entscheidung wird auf einen späteren Zeitpunkt verschoben – bis dahin werden aber zusätzliche Maßnahmen ergriffen, um die Information über die Entscheidungssituation zu verbessern. Beispielsweise könnten die Folgen und Nebenfolgen einer Entscheidung genauer untersucht und öffentlich diskutiert werden. Diese Strategie führt bis zum Entscheidungszeitpunkt nicht zu neuen Pfadabhängigkeiten. Stattdessen wird der bisherige Pfad ohne sofortige Veränderung fortgesetzt. Moratorien sind ein typisches Beispiel für diese Strategie.<sup>28</sup>

**Sequenzielles Entscheiden:** Die Entscheidung wird in Teilentscheidungen zerlegt, die nacheinander durchlaufen werden. Im Laufe des Prozesses lernen Entscheider aus den bisherigen Erfahrungen und Teilentscheidungen. Dadurch beinhaltet diese Strategie auch Elemente des aktiven Aufschiebens und des provisorischen Entscheidens.<sup>29</sup> Eine Gefahr beim sequenziellen Entscheiden ist, dass das übergeordnete Ziel

<sup>26</sup> Für diese Strategie ist auch die Bezeichnung „Closure“ üblich. Für nähere Erläuterungen auch zur Frage, wann sie eingesetzt werden kann, siehe Hirsch Hadorn 2016, S. 220.

<sup>27</sup> Vgl. Hirsch Hadorn 2016, S. 221 ff. Van Hoek et al. 2001 geben einen Überblick über den Einsatz von Strategien des Aufschiebens in der Industrie, um dort den Produktionsprozess auf die Nachfrage abzustimmen.

<sup>28</sup> Für weiterführende Literatur siehe die Hinweise zum passiven Aufschieben.

<sup>29</sup> Für diese Form des Entscheidens ist eine Vielzahl von Bezeichnungen üblich, so etwa „Dynamic Choice“ (vgl. McClennen 1990). Für einen Überblick siehe Hirsch Hadorn 2016, S. 229 ff. Voß et al. 2006, S. 431 ff. beschreiben diese Strategie als „Sequential Opening and Closing“. Deren Variante „Exploring Experiments“ entspricht in der hier gewählten Systematik einem stark provisorischen Entscheiden.

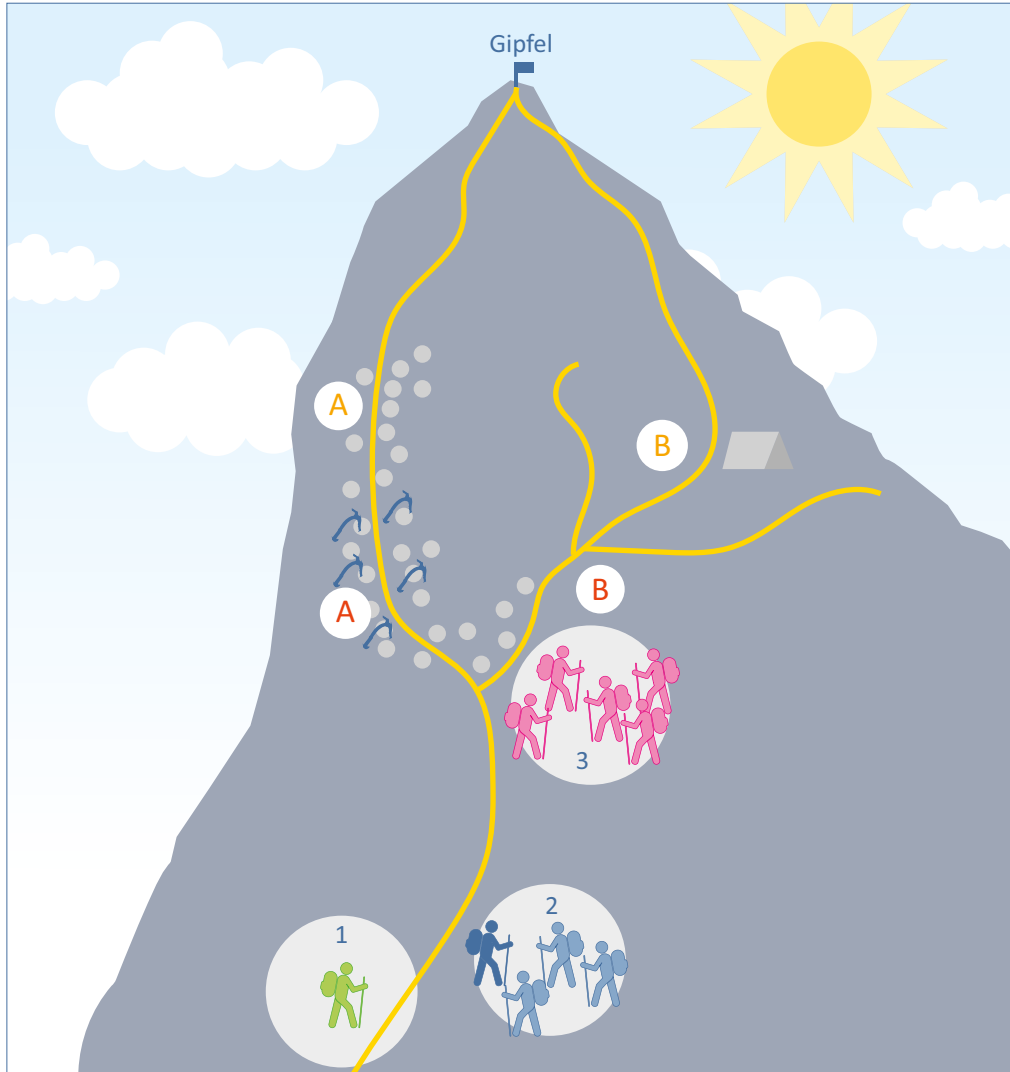


Abbildung 4: Illustration von Pfadabhängigkeiten anhand der Bergsteiger-Problematik. Eigene Darstellung.

verfehlt wird, wenn dieses in den Teilentscheidungen nicht ausreichend berücksichtigt wird.<sup>30</sup> Die Strategie setzt zudem voraus, dass das Entscheidungsproblem überhaupt in Teilentscheidungen zerlegt werden kann.

**Provisorisches Festlegen:** Eine vorläufige Entscheidung für eine Option wird schnellstmöglich getroffen. Wenn eine Kurskorrektur nötig wird, so kann die ausgewählte Maßnahme geändert oder zurückgenommen werden. Informationen über die Entscheidungssituation werden kontinuierlich aktualisiert und mit neuen Entwicklungen abgeglichen. Provisorisches Festlegen setzt jedoch voraus, dass die zur Wahl stehenden Optionen eine sol-

che Anpassung auch erlauben. Geeignet sind etwa Realexperimente und -labore. Häufig wird diese Strategie in Kombination mit sequenziellem Entscheiden eingesetzt.<sup>31</sup>

Die hier vorgestellten Strategien sind idealtypisch. Sie stellen Bausteine dar, mit deren Hilfe komplexe Strategien für den realen Einsatz entworfen werden können. Nicht jede Realsituation lässt sich eindeutig auf eine der hier vorgestellten Strategien zurückzuführen sind. Wie können

<sup>31</sup> Diese Strategie wird auch als „Semi-Closure“ bezeichnet, vgl. Hirsch Hadorn 2016, S. 224 ff. Sie wird andernorts auch als „periodisches“ (recurrent), „rekursives“ (recursive), „iteratives“ (iterative) oder „wiederholtes“ (repeatedly) Entscheiden beschrieben. Ihr Einsatz ist im adaptiven Management (vgl. Gregory et al. 2006) und in der adaptiven Governance (vgl. Folke et al. 2005) üblich.

<sup>30</sup> Edvardsson Björnberg 2016.

### Das Bergsteigerbild

Pfadabhängigkeiten lassen sich plastisch am Beispiel eines Bergsteigers illustrieren, der einen ihm unbekanntem Berg zum ersten Mal erklimmen will (vgl. Abbildung 4). Das Ziel ist der Gipfel, nicht eine bestimmte Route. Der Bergsteiger hat unvollständige Informationen über die Beschaffenheit des Berges und die möglichen Routen auf dem Weg zum Ziel. Zudem können sich im Laufe der Wanderung die Bedingungen ändern, beispielsweise durch Wetterumschwünge.

Kommt der Bergsteiger (1) an eine Weggabelung, muss er sich entscheiden, ob er den linken (Route A) oder den rechten Weg (Route B) einschlägt. Nehmen wir an, der Bergsteiger wählt die Route A in der Hoffnung, dieser Weg sei leichter. Jedoch irrt er sich. Die Route bleibt extrem mühsam. An einem bestimmten Punkt weiß er jedoch – den Gipfel bereits vor Augen –, dass eine Umkehr und der Wechsel auf Route B ihn noch mehr Kräfte kosten würde. Der Bergsteiger hat sich somit in eine Pfadabhängigkeit begeben: Die Abwägung von Kosten und Nutzen veranlassen ihn, auf dem einmal eingeschlagenen Pfad zu bleiben. Die Mühen des Aufstiegs bis zu diesem Punkt sind nicht mehr rückgängig zu machen („irreversibel“); in ökonomischer Sprache sind sie versunkene Kosten („**Sunk Costs**“).

Man kann das Beispiel auf eine Gruppe von Bergsteigern (2) ausweiten, die am Scheideweg angelangt. Die Gruppe beschließt, Route A einzuschlagen. Ein erfahrener Bergsteiger der Gruppe ist jedoch überzeugt, Route B sei die bessere Wahl. Allerdings kann er die Gruppe nicht überzeugen. Da beide Routen gefährlich sind und es sicherer ist, wenn die Gruppe zusammenbleibt, folgt der erfahrene Bergsteiger der Gruppe entlang der Route A. Er unterliegt einem **direkten Netzwerkeffekt**, weil ihm die Gruppengröße Sicherheit bietet und den Ausschlag für seine Entscheidung gibt.

Ein drittes Szenario: Schon viele andere Wandernde (3) haben den Berg über Route A bestiegen; das wird an den zahlreichen nutzbaren Haken in den Felswänden sichtbar. Dennoch scheint Route B die leichtere Strecke zu sein. Von den Vorteilen der Haken überzeugt, wählt die Bergsteiger-Gruppe Route A. Die Gruppe unterliegt in diesem Fall **indirekten Netzwerkeffekten**, denn durch die vielen Haken ist Route A leichter zu bewältigen.

Auch die Entscheidungsstrategien lassen sich anhand dieses Bildes verdeutlichen: Der Bergsteiger kann an der Weggabelung Informationen von anderen Bergsteigern einholen, die ihm entgegenkommen (3). Berücksichtigt er diese Informationen nicht, hat er seine Entscheidung bereits endgültig getroffen. Hat er klare Sicht, so kann er sich sofort für eine Route entscheiden (**Sofortiges Festlegen**). Bei eingeschränkter Sicht gibt es verschiedene Möglichkeiten: Der Bergsteiger kann abwarten, bis sich die Bedingungen – zum Beispiel nach abziehendem Nebel – bessern (**Passives Aufschieben**). Er kann sich für eine der Routen entscheiden, diese erkunden und an jeder Abzweigung eine neue Route auswählen oder wieder zur Gabelung zurückkehren (**Sequenzielles Entscheiden**). Ist ihm eine Route zumindest grob bekannt, kann er sie gezielt bis zu einer besseren Stelle für ein Abwarten oder Übernachten bewältigen, um anschließend den weiteren Aufstieg zu planen (**Provisorisches Entscheiden**).

Entscheidungsträgerinnen und -träger trotzdem herausfinden, welche Strategie wann die richtige ist?

Die nachfolgenden Leitfragen geben eine Orientierung darüber, welche Überlegungen im Vorfeld eines Entscheidungsprozesses zu beachten sind:<sup>32</sup>

1. Welcher Art sind die Unsicherheiten, und wie groß ist ihr Ausmaß?
2. Ist es möglich, die Entscheidungssituation zu verbessern?
3. Wie hoch ist der Handlungsdruck? Gibt es einen Zusatznutzen, der schnelle Entscheidungen begünstigt? Welche Kosten treten auf, wenn nicht sofort entschieden wird?
4. Ist die Durchführung des Entscheidungsprozesses über die Zeit gewährleistet?

Die Wahl der richtigen Strategie im Umgang mit potenziellen Pfadabhängigkeiten erfordert vor diesem Hintergrund eine sorgsame Prüfung und Abwägung entlang der genannten Kriterien in den Entscheidungssituationen. Ob und welche Zielkonflikte auftreten, entscheidet sich im Einzelfall. Dies soll am Beispiel des Mobilitätssektors veranschaulicht werden.

---

<sup>32</sup> Die Leitfragen stammen aus der entsprechenden Literatur zum Umgang mit Unsicherheiten bei Entscheidungen und beruhen auf Hirsch Hadorn 2016, S. 234 ff. Sie wurden ebenfalls auf dem 5. Dialog der Humboldt-Viadrina Governance Platform aufgebracht, in dem Zwischenergebnisse der Arbeitsgruppe vorgestellt und mit Akteurinnen und Akteuren aus Wirtschaft, Politik und Zivilgesellschaft diskutiert wurden. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit richtet diese Auflistung das Augenmerk auf kritische Aspekte von Entscheidungssituationen.

### 3 Pfadabhängigkeiten im Energie- und Verkehrssystem

Pfadabhängigkeiten können an ganz unterschiedlichen Stellen im Energiesystem auftreten, zum Beispiel bei der Energiebereitstellung in Kraftwerken, der Energieverteilung in Strom- und Gasnetzen und in den Endenergiesektoren Privathaushalt, Industrie und Verkehr. Dieses Kapitel skizziert Pfadabhängigkeiten im Energiesystem und wendet diese exemplarisch auf den Umbau des Verkehrssektors an.

#### 3.1 Wechselseitige Abhängigkeiten im Energiesystem

Der Umbau der Energieversorgung muss stärker sektorenübergreifend gedacht werden. Bisherige Maßnahmen zur Umsetzung der Energiewende konzentrieren sich derzeit vor allem auf das Stromsystem („Stromwende“). Während erneuerbare Energien seit Jahren kontinuierlich ausgebaut werden und mittlerweile zu über dreißig Prozent zur Stromerzeugung Deutschlands beitragen<sup>33</sup>, wird die Energie noch nicht effizient genug eingesetzt. So sind die Treibhausgasemissionen zwar von 1990 bis 2015 um 27 Prozent gesunken.<sup>34</sup> Die im Energiekonzept der Bundesregierung vorgegebene Zielmarke der Minderung von vierzig Prozent bis 2020 gegenüber 1990 wird aber aller Voraussicht nach deutlich verfehlt. Im Gegensatz zu den Ausbauzielen bei den erneuerbaren Energien scheinen auch die Effizienzziele der Bundesregierung – Senkung des Primärenergieverbrauchs bis 2020 um zwanzig Prozent und des Stromverbrauchs um zehn Prozent – nicht mehr erreichbar.<sup>35</sup>

Das Denken in einzelnen Sektoren zeigt sich auch in der Wahl der Instrumente: Oft gelten diese nur für sehr spezifische Teilbereiche des Energiesystems.<sup>36</sup> Beispiele hierfür sind das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), das den Ausbau erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung vorantreiben soll, sowie die Energieeinsparverordnung (EnEV), die den zulässigen Energiebedarf von beheizten oder klimatisierten Gebäuden begrenzt. Aktuelle Bestrebungen, bestehende Gesetze und Verordnungen im Sinne eines systemischen Ansatzes zusammenzuführen – etwa die Zusammenlegung von EnEV und Erneuerbare-Energien-Wärme-gesetz (EEWärmeG) –, waren bis dato erfolglos.

Ein ganzheitlicher sektorenübergreifender Ansatz unter Einschluss des Gebäudebereiches („Wärmewende“) und des Verkehrs („Verkehrswende“) wird erst seit Kurzem stärker angestrebt.<sup>37</sup> Der Klimaschutzplan 2050 schreibt erstmals sektorspezifische Minderungsziele fest.<sup>38</sup> Eine sektorübergreifende Optimierung findet aber auch hier nicht statt. Zudem existiert eine Reihe von kommunalen und föderalen Klimaschutzstrategien, die bisher nicht aufeinander abgestimmt sind. Diese Hürden führen dazu, dass insbesondere das Ziel, weniger Treibhausgas zu emittieren, aus heutiger Sicht voraussichtlich verfehlt wird.<sup>39</sup> Mit dem Energiewende-Pfad wird nur ein Teil seiner Einzelziele erreicht.

<sup>33</sup> AGEB 2017.

<sup>34</sup> UBA 2017-1.

<sup>35</sup> BMUB 2016-1; Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“ 2016, Z-4 f.

<sup>36</sup> Vgl. unter anderem Gawel 2014.

<sup>37</sup> BMWi 2016, S. 99 ff.

<sup>38</sup> BMUB 2016-2.

<sup>39</sup> BMWi 2016, S. 59.

Stattdessen gilt es, übergreifende Maßnahmen mit einem stärkeren globalen Bezug zu entwickeln. Würde der Verkehrssektor etwa in das Emissionshandelssystem einbezogen oder eine sektorübergreifende CO<sub>2</sub>-Steuer eingeführt, könnten dadurch die gesamten Treibhausgasemissionen des EU-weiten Verkehrs erfasst werden. Ein sektorenübergreifendes europäisches Emissionshandelssystem (ETS) würde als marktwirtschaftliches Instrument eine maximale Menge an Emissionen festsetzen, diese schrittweise reduzieren und den Handel mit Rechten zum Ausstoß von Treibhausgasen regeln: Je weniger Emissionen eine Anlage verursacht, desto weniger Emissionsrechte müssen für diese erstanden werden. Je nach Preis der Emissionsrechte und der Erwartungshaltung für die Entwicklung der Zertifikatepreise lohnen sich Investitionen in emissionsmindernde Maßnahmen. Aktuell wird nicht nur darüber diskutiert, wie ein erweitertes ETS auszugestaltet ist, sondern auch darüber, welche systemischen Voraussetzungen dafür benötigt werden.<sup>40</sup>

Trotzdem muss sich diese Analyse auf die Untersuchung von Pfadabhängigkeiten in einem Bereich beschränken. Der Mobilitätsbereich eignet sich in besonderer Weise, weil Entscheidungen im Verkehrssektor auf Basis vieler Unbekannter gefällt werden müssen. Außerdem besteht ein wachsender Handlungsdruck, rasch Maßnahmen umzusetzen. Schließlich ist der Verkehrssektor für etwa ein Fünftel der CO<sub>2</sub>-Emissionen Deutschlands verantwortlich, die Emissionen sind in den letzten 25 Jahren sogar leicht gestiegen. Deshalb sollen in diesem Bereich laut Klimaschutzplan der Bundesregierung bis 2030 rund 40 bis 42 Prozent an Treibhausgasemissionen im Verhältnis zu 1990 eingespart werden.<sup>41</sup> Hinzu kommen weitere Problemlagen im Verkehrsbereich wie

die in zahlreichen Städten regelmäßig vorkommende Überschreitung der Emissionsgrenzwerte von Luftschadstoffen, insbesondere Staub und Stickoxide.<sup>42</sup> Indes sind die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten gerade im Verkehrssektor hoch.<sup>43</sup> Dies spricht dafür, die Sektoren stärker zu koppeln und die Emissionen zunächst in anderen Sektoren zu reduzieren. Hieran zeigt sich das Dilemma zwischen dem Druck, jetzt handeln zu müssen, und dem Wunsch, abwarten zu wollen, bis weitere Erkenntnisse zu den Auswirkungen vorliegen.

Die aktuellen politischen Strategien im Verkehrsbereich scheinen auf dieses Dilemma zu reagieren. Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS) der Bundesregierung gibt einen Überblick über derzeit eingesetzte und in der Entwicklung befindliche Verkehrsträger, Antriebskonzepte sowie Energie- und Kraftstoffoptionen.<sup>44</sup> Sie ist explizit als „lernende Strategie“ konzipiert, um Annahmen und Ziele im Angesicht künftiger Entwicklungen zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen. Die MKS lässt sich also als anpassungsfähige Strategie einordnen. Ferner hat das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur den „Nationalen Strategierahmen über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe“ (NSR)<sup>45</sup> erstellt, der die nationale Umsetzung der EU-Richtlinie zum Aufbau von Infrastrukturen für alternative Kraftstoffe (AFID-Richtlinie)<sup>46</sup> darstellt. Auch im NSR sind deutlich anpassungsfähige Elemente enthalten. So wird beispielsweise der Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur nach 2020 abhängig vom Fahrzeughochlauf gestaltet. Beiden Dokumenten gemein

<sup>42</sup> Auch in Bezug auf die Luftschadstoffemissionen gibt es ambitionierte Minderungsziele. Die Emission kleiner Feinstaubpartikel (Durchmesser < 2,5 Mikrometer) soll gemäß der Novellierung des sogenannten Göteborg-Protokolls bis 2020 um 26 Prozent gegenüber 2005 verringert werden (UNECE 2012). Etwa sechzig Prozent weniger Stickoxide sollen die Luft belasten (EC 2005).

<sup>43</sup> UBA 2013.

<sup>44</sup> BMVBS 2013.

<sup>45</sup> BMVI 2016.

<sup>46</sup> Richtlinie 2014/94/EU.

<sup>40</sup> acatech/Leopoldina/Akademienunion 2015-1.

<sup>41</sup> BMUB 2016-2.



sind die Ausbauziele für Ladesäulen, Wasserstoff- sowie Erdgastankstellen.

In der Gesamtschau zeigt sich, dass trotz verschiedener klimaschützender Einzelmaßnahmen der vergangenen Jahre nach wie vor keine Durchbrüche für einen nachhaltigen Verkehr erzielt werden konnten. Eine Vielzahl neuer Konzepte wird politisch diskutiert. Aufgrund der hohen Investitionen und langen Wirkungshorizonte gilt es, die zur Verfügung stehenden Instrumente hinsichtlich ihrer Pfadabhängigkeiten zu überprüfen. Eine weitere Herausforderung besteht darin, ungewollte Pfadabhängigkeiten insbesondere bei Übergangstechnologien zu vermeiden.<sup>47</sup>

### 3.2 Beispiel: Urbane Mobilität

Zur Mobilität in urbanen Gebieten werden in dieser Analyse die individuelle Autonutzung, der öffentliche Nahverkehr (Busse, Bahnen etc.) sowie die nicht-motorisierte Fortbewegung innerhalb deutscher Klein- und Großstädte (Fuß- und Radwege etc.) gezählt. Pfadabhängigkeiten entstehen vor allem beim Aufbau einer städtischen Infrastruktur. So prägt beispielsweise das Ende des 19. Jahrhunderts angelegte Liniennetz in Berlin den Nahverkehr bis heute. Es bestimmt, wie sich Menschen fortbewegen und wo sie wohnen wollen. Wie schwer es ist, solche Abhängigkeiten zu überwinden, zeigt ein Blick in die Vergangenheit. Dabei wird deutlich, dass die urbane Mobilität neben der Verkehrs- und Transportfunktion auch stadtplanerische, soziale, technische und nicht zuletzt ökonomische und politische Facetten beinhaltet.

#### 3.2.1 Status quo: Die autogerechte Stadt

In den meisten deutschen Städten dominieren private Autos mit Verbrennungsmotoren und dieselbetriebene Nutzfahrzeuge den Verkehrsalltag. Der dichte Verkehr und der Mangel an Parkplätzen verursachen Staus und verstärken die Feinstaub- und Stickoxidbelastungen in der Luft, sodass die Grenzwerte in vielen Städten immer häufiger überschritten werden.<sup>48</sup>

Die urbane **Wirtschaft** konnte sich durch diese Motorisierung jedoch weiterentwickeln, etwa indem Versorgungswege leichter bewältigt werden konnten. Insbesondere in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde das eigene Auto zum Symbol ökonomischer Prosperität und individuellen gesellschaftlichen Erfolgs.<sup>49</sup> Dies ging einher mit geringen Preisen für fossile Kraftstoffe. Selbst in der Hochpreisphase für Öl und Gas im letzten Jahrzehnt konnten sich innovative umweltfreundliche Antriebe nicht durchsetzen.<sup>50</sup> Ein auf erneuerbaren Energien basierendes Verkehrssystem könnte sich momentan kaum behaupten, da die Vorteile erst mit dem Grad der Umstellung zunehmen und eng mit den Netzwerkeffekten korrelieren.

Auch die **Verkehrspolitik** verfestigte diesen stark durch Technologieentwicklung und Nutzungspraktiken geprägten Weg: Mit dem kulturellen und wirtschaftlichen Siegeszug des privaten Automobils ging eine Umgestaltung der Stadt einher, die unter dem Leitbild der „autogerechten Stadt“ stand. Das konzeptionelle Rückgrat bildete die 1933 von Stadtplanern und Architekten entworfene „Charta von Athen“, in der nicht nur die Trennung der Funktionsbereiche Wohnen, Arbeiten, Freizeit und Einkaufen in der Stadt, sondern auch ihre Verknüpfung

<sup>47</sup> So ist beispielsweise der Einsatz von Liquefied Natural Gas (LNG) im Güterverkehr auf Basis von Erdgas oder Biomethan für eine gewisse Übergangszeit denkbar, der verbreitete Einsatz der Technologie erfordert jedoch unter anderem eine flächendeckende Ausdehnung von LNG-Tankstellen und eine umfangreiche Umrüstung für LKW.

<sup>48</sup> UBA 2017-2. Die Landesregierung Baden-Württemberg plant ab 2018 Fahrverbote für die meisten Diesel-Autos (Regierungspräsidium Stuttgart 2017).

<sup>49</sup> Gartman 2004.

<sup>50</sup> Blanchard/Gali 2007.

durch Autostraßen definiert wurde. Ein hierarchisch abgestuftes Netz von breiten Haupt- bis ruhigen Wohnstraßen sollte alle Teile der Stadt erreichbar machen. Darauf basierend wurden die meisten modernen Städte nach einem ähnlichen Prinzip gestaltet: Einrichtung großzügiger Schnellstraßen, Straßenerschließung aller Wohn-, Arbeits- und Freizeitareale und eine verpflichtende Einrichtung von Parkflächen durch Stellplatzverordnungen sowie freies Parken auf öffentlichem Straßenland. Diese über Jahrzehnte konsequent verfolgte Stadtentwicklung hat ihre Spuren in der Struktur und im Bild vieler Städte hinterlassen: Die umfassende Straßenerschließung ersetzt enge Altstadtquartiere und nahräumliche Versorgungsstrukturen.<sup>51</sup> Auch die 2005 ausgetragene Eigenheimzulage war ein Politikinstrument, das eine automobilbasierte Suburbanisierung begünstigte.<sup>52</sup>

Die **Steuerungs- und Regelungsstrukturen** im Verkehr sind seit Jahrzehnten auf das private Automobil ausgerichtet. Die indirekte Subventionierung des Privatfahrzeugs zeigt sich an vielen Stellen: von Stellplatzaufgaben bei Neubauprojekten über die steuerliche Abzugsfähigkeit von beruflichen Fahrten mit dem eigenen Pkw bis hin zum Dienstwagenwesen.<sup>53</sup> Die Verkehrsinfrastrukturpolitik in den Kommunen konzentrierte sich darauf, den Autoverkehr zu fördern. So wurden in vielen deutschen Städten öffentliche Verkehrsmittel zugunsten des Straßenverkehrs umgelenkt, statt Zebrastreifen wurden teure Fußgängerunterführungen eingerichtet.

Die Dominanz des Privatautos spiegelt sich auch im **Verhalten** wider. Bei der Verkehrsnutzung folgen Bürgerinnen und Bürger in der Regel ihren Gewohnheiten;

sie wollen nicht weiter über die gewählten Verkehrsmittel nachdenken.<sup>54</sup> Das private Auto entspricht diesem Muster und macht es dadurch Alternativen schwer.

Daraus folgt: Um gemeinschaftliche Verkehrsangebote wie Sharing-Dienste oder automatisiertes Fahren entwickeln zu können, müssen auch mentale Pfadabhängigkeiten überwunden werden. Durch die effizientere Nutzung von Verkehrsinfrastrukturen kann die zukünftige Verkehrsauslastung unter den derzeitigen Wachstumsprognosen bleiben.<sup>55</sup> Gerade das automatisierte Fahren ermöglicht nicht nur neue Fahrzeugvarianten, sondern auch Nutzungsinnovationen wie den individualisierten öffentlichen Verkehr oder die Kombination von Personen- und Güterverkehr.<sup>56</sup>

Trotz vieler Förderprojekte wie der Initiative der Bundesregierung „Schaukasten Elektromobilität“ konnten sich postfossile Verkehrskonzepte bisher nicht etablieren. Die Debatte um die E-Mobilität wiederum zielt vor allem darauf ab, den konventionellen Verbrennungsmotor durch strombasierte Antriebe zu ersetzen. Auch dieses Konzept orientiert sich also am Leitbild des Privatfahrzeugs. Die geringe Reichweite der Batterien schreckt viele Bürgerinnen und Bürger jedoch von Elektroautos ab, auch wenn die durchschnittliche Tagesfahrleistung bei Weitem nicht an die maximale Fahrleistung mit einer Batterieleistung heranreicht. Weitere Hürden sind die zu geringe Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur sowie der höhere Kaufpreis.<sup>57</sup> Dabei bietet die Elektrifizierung des Verkehrs viel Innovationspotenzial, das bisher nicht hinreichend genutzt werden konnte.

<sup>54</sup> Vgl. Schönduwe et al. 2012.

<sup>55</sup> Das BMVI geht für das Jahr 2030 von einer Zunahme des Personenverkehrs um 13 Prozent (Personenkilometer) und des Güterverkehrs um 38 Prozent (Tonnenkilometer) gegenüber 2010 aus (BMVI 2014-1).

<sup>56</sup> Dazu ausführlicher: InnoZ 2017.

<sup>57</sup> Vgl. NPE 2015.

<sup>51</sup> Vgl. Kutter 2016.

<sup>52</sup> Vgl. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung 2002 sowie diverse Beiträge in Harlander 2001.

<sup>53</sup> Vgl. Klenke 1995 und Hascher 2011.

### 3.2.2 Treiber der zukünftigen Entwicklung

Das Erbe einer Politik der autogerechten Stadtentwicklung wirkt bis heute in den kommunalen Entwicklungskonzepten nach. Gleichzeitig verändert sich die urbane Mobilität, bedingt durch technische und gesellschaftliche Trends. Doch auch der **Klimawandel** treibt diese Veränderung voran: Gemeinsam mit zahlreichen weiteren Staaten strebt Deutschland an, CO<sub>2</sub>-Emissionen und die Luftschadstoffbelastung zu reduzieren. Die Emissionsgrenzwerte (Stickoxide, Feinstaub etc.) werden weltweit immer stärker verschärft, sodass sie künftig höchstens von solchen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren zu erreichen sind, die mit gasförmigen oder synthetischen flüssigen Kraftstoffen betrieben werden.<sup>58</sup> Immer mehr Kommunen verabschieden lokale Klimaschutzpläne. So haben beispielsweise Helsinki, Oslo, aber auch Mailand und Paris angekündigt, spätestens ab 2025 nur noch emissionsfreie Pkw in die Stadt lassen zu wollen. In Stuttgart, aber auch in vielen weiteren deutschen Städten könnten durch die Klagen der Deutschen Umwelthilfe Fahrverbote für Dieselautos durchgesetzt werden, um die Grenzwerte einzuhalten. Die Stadt Berlin verpflichtet sich, bis 2050 im Verkehrsbereich zwei Drittel der CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber 1990 einzusparen.<sup>59</sup> Aufgrund der hohen Luftverschmutzung vor allem in asiatischen Großstädten werden dortige Standards für die Luftqualität zu einem bedeutenden Treiber für den Wandel. Dadurch ist bereits jetzt China zu einem wichtigen Absatzmarkt für schadstoffarme Fortbewegungsmittel wie Elektroautos geworden. Auch die restriktive Verkehrspolitik in Singapur zielt auf eine Verringerung des Autoverkehrs ab, um die Luftqualität zu verbessern.

Alternative Ansätze im Verkehr werden außerdem stark von der **Digitalisierung** vorangetrieben. Globale Un-

ternehmen wie Google oder Tesla drängen mit neuen Geschäftsmodellen in die Verkehrsmärkte. Gleichzeitig ist ein Boom an verkehrsbezogenen Apps zu beobachten. Die Potenziale dieser Anwendungen liegen für städtische Verkehrsteilnehmerinnen und -teilnehmer in erster Linie darin, dass ihnen optimale Verbindungen mit verschiedenen Verkehrsmitteln angezeigt werden und sie die eigene Mobilität dadurch flexibler gestalten können.

Im Ergebnis führt die durch die Digitalisierung verstärkte Flexibilität zu differenzierten Mobilitätsmustern. Verkehrsteilnehmerinnen und -teilnehmer werden spontaner und entwickeln sich zu Prosumentinnen und Prosumenten<sup>60</sup>: Anstatt nur am Verkehr teilzunehmen, können sie digital unterstützte Fahrdienste wie Carsharing oder Public Bikes sowohl nutzen als auch anbieten. Auch im Güter- und Lieferverkehr können sich solche Fahrlösungen bewähren, weil die Sendungsgrößen tendenziell kleiner werden. Dies ermöglicht in Zukunft auch individuelle Logistiklösungen.<sup>61</sup> Als Folge ist eine zusätzliche Differenzierung des Lieferverkehrs auf Angebots- und Nachfrageseite zu erwarten.<sup>62</sup>

Die Vernetzung von Fahrzeugen untereinander ermöglicht einen weiteren Trend: das **autonome Fahren**. Immer mehr Fahrzeugfunktionen werden automatisiert, und die Systeme zum Lenken und Bremsen werden immer eigenständiger. Die Einführung automatisierter Fahrzeuge wird sowohl auf internationaler Ebene als auch in Deutschland vorangetrieben. So hat die Bundesregierung 2017 ein Gesetz auf den Weg gebracht, das automatisiertes Fahren fördern soll.<sup>63</sup>

<sup>58</sup> Siehe ICCT 2016.

<sup>59</sup> Senat von Berlin 2016.

<sup>60</sup> „Prosument“ vereint die Worte „Produzent“ und „Konsument“. Es bezeichnet Menschen, die ein bestimmtes Gut (zum Beispiel Produkte oder Dienste) sowohl anbieten als auch nutzen.

<sup>61</sup> BVL 2017-1.

<sup>62</sup> Vgl. Dennis/Urry 2009.

<sup>63</sup> Bundesregierung 2017.

Während die Automatisierung von Fahrzeugen mit Tempomaten und Notbremsassistenten bereits erfolgt, ist die Vernetzung der Fahrzeuge untereinander (Vehicle-to-Vehicle-Communication) und mit der Infrastruktur (Vehicle-to-Infrastructure-Communication) ein vergleichsweise neuer Trend. Erst diese **Vernetzung** erlaubt es, dass autonome Fahrzeuge Fahrten bündeln und sich mehrere Personen auf der gleichen Route ein Fahrzeug teilen können („Ridesharing“). Die Vernetzung von Fahrzeugen untereinander und innerhalb der Verkehrsinfrastruktur ermöglicht darüber hinaus einen aufeinander abgestimmten Straßenverkehr. Autonome Shuttles des öffentlichen Verkehrs können so vor allem im urbanen Raum die Fahrzeugdichte verringern und Freiräume für nicht mehr genutzte Parkflächen schaffen.<sup>64</sup> Dadurch bietet das autonome Fahren die Chance, den gemeinschaftlichen Verkehr durch individuelle, flexible Zusatzangebote zu ergänzen. Um ein Mehr an Fahrleistung und Fahrzeugen durch privat genutztes autonomes Fahren zu verhindern, muss es jedoch in bestehende Mobilitätsdienstleistungen integriert werden.<sup>65</sup> Bei der Diskussion um die Vorteile automatisierter Fahrzeuge wird häufig auch eine Reduktion der Umweltbelastungen durch optimierte Routenplanung beziehungsweise ein zentrales Verkehrsleitsystem thematisiert. Neben Zweifeln am Datenschutz oder an Unfallrisiken bleibt unklar, ob die Verkehrsflussoptimierung zusätzlich zu einem höheren Aufkommen führen kann und inwieweit ein staatliches Managementsystem in die Verkehrssteuerung eingreifen darf.

Alle genannten Trends treiben den Wandel der urbanen Mobilität voran und lassen sich mit weiteren Fahrangeboten wie der Elektromobilität verbinden. Denn moderne Fahrzeuge mit direktem und indirektem Elektroantrieb stoßen erheblich

weniger Treibhausgase aus als herkömmliche Autos mit Verbrennungsmotoren.<sup>66</sup> Jedoch leisten sie nur dann einen nachhaltigen Beitrag zum Klimaschutz, wenn sie mit Strom aus erneuerbaren Energien betrieben werden. Gleiches gilt für Wasserstoff, der derzeit vor allem noch aus fossilen Quellen gewonnen wird. Durch intelligentes Lademanagement kann der Strom- und Verkehrssektor jedoch flexibler gestaltet werden und die schwankende Einspeisung aus Wind- und Sonnenenergie ausgleichen. So werden Elektrofahrzeuge künftig zu Kurzzeitspeichern. Ein intelligentes Lademanagement für Elektroautos setzt nicht nur auf die Nachtstunden, sondern versucht, durch Laden während der Arbeitszeit die Sonnenstunden des Tages zu nutzen.<sup>67</sup> Damit könnte der Verkehrssektor mittelfristig zur Stabilisierung des Energiesystems beitragen.

Die Digitalisierung begünstigt auch die Entwicklung des **intermodalen Verkehrs**, das heißt die übergreifende Nutzung verschiedener Verkehrsträger und -mittel auf einer bestimmten Strecke. Moderne Intermodalität integriert Mobilitätsdienstleistungen, die für die Nutzerinnen und Nutzer aus einem Guss sind und weitgehend auf elektrischen Antrieben beruhen: von der elektrisch betriebenen Fernbahn über die Tram, U- oder S-Bahn und das Elektrofahrrad bis hin zum E-Auto. Voraussetzung für den intermodalen Verkehr sind niedrige Transaktionskosten beim Wechsel der Verkehrsmittel. Neben veränderten Finanzierungsstrukturen sind auch neue Wettbewerbs- und Geschäftsmodelle notwendig, um eine „intermodale Passung“ zu erreichen.<sup>68</sup>

In vielen Städten sind gemeinschaftlich genutzte Autos und Fahrräder

<sup>64</sup> Lemmer 2016.

<sup>65</sup> Agora Verkehrswende 2017, S. 44 f.

<sup>66</sup> Der Begriff schließt sowohl die direkte Elektrifizierung über batteriebetriebene Fahrzeuge (BEV) wie auch die indirekte Elektrifizierung bei Brennstoffzellen-Fahrzeugen (FCEV) ein.

<sup>67</sup> Vgl. acatech/Leopoldina/Akademienunion 2015-2.

<sup>68</sup> Vgl. Shaheen et al. 2016.

bereits heute zum selbstverständlichen Teil des öffentlichen Verkehrsangebotes geworden. Sie erlauben Tür-zu-Tür-Verbindungen und können damit einen Nachteil der öffentlichen Verkehrsmittel gegenüber dem privat genutzten Auto ausgleichen: die „erste und letzte Meile“ eines Weges ohne langen Fußmarsch zurückzulegen. Dadurch entsteht eine zunehmende **Konvergenz von privatem und öffentlichem Verkehr**. Hintergrund sind zum einen technische Entwicklungen wie die Elektrifizierung der Antriebe und die Digitalisierung von Verkehrsabläufen, in denen die Unterscheidung zwischen der Nutzung öffentlicher und privater Fahrzeuge kaum eine Rolle spielt.<sup>69</sup> Zum anderen verändert sich auch die Einstellung vieler Stadtbewohnerinnen und -bewohner: Das eigene Auto verliert an Bedeutung, die Verkehrsnutzung wird flexibler und pragmatischer.<sup>70</sup>

Besonders in europäischen Städten erlebt auch der **Rad- und Fußverkehr** eine Renaissance.<sup>71</sup> Viele – vor allem große – Städte wie Wien, Paris, London, Kopenhagen und Amsterdam investieren in die Fahrradinfrastruktur und bauen Fahrradwege, Abstellanlagen und Radschnellwege. Zusätzlich wird der Trend zum Fahrradfahren durch den Pedelec-Boom verstärkt, denn mit Elektrorädern sind auch längere Strecken einfacher zu bewältigen. Ebenso werden Lastenfahräder immer häufiger für Kurier-, Express- und Paketdienste sowie im Einzelhandel eingesetzt und konkurrieren im Stadtverkehr mit dem Auto.<sup>72</sup>

Die Verdichtung städtischer Räume und die gute Erreichbarkeit alltäglicher

Ziele in der Stadt begünstigen außerdem den **Fußverkehr**. Umgekehrt profitiert dieser davon, dass der städtische Raum weniger Platz für Autofahrbahnen und Parkflächen vorsieht. Durch das steigende Gesundheitsbewusstsein werden Zufußgehen, Laufen und Fahrradfahren Bestandteile des urbanen Lebens.<sup>73</sup>

Ausgehend von den potenziellen Treibern für die zukünftige Entwicklung des Verkehrs lassen sich verschiedene Bausteine einer klimaverträglichen urbanen Mobilität identifizieren. Nachfolgend sollen beispielhaft zwei mögliche Zukunftspfade anhand der vorgestellten Dimensionen Technologie, Markt, Nutzerverhalten und Governance analysiert werden.

### 3.2.3 Der Zukunftspfad „Elektrifizierung der Antriebe“

Durch eine Elektrifizierung der Antriebssysteme können bestehende Pfadabhängigkeiten überwunden werden, aber auch neue entstehen.

**Technologie:** Um den Verkehr klimafreundlicher zu gestalten, bietet die Elektrifizierung großes Potenzial.<sup>74</sup> Zwei Varianten des elektrischen Antriebs sind nach dem derzeitigen Stand der Technik nutzungsreif: Fahrzeuge mit batterieelektrischer Antriebstechnik (Battery Electric Vehicle, BEV) und solche mit Wasserstoff-Brennstoffzellentechnik (Fuel Cell Electric Vehicles, FCEV). Auch wenn die Elektrifizierung derzeit häufig mit dem batterieelektrischen Antrieb auf Basis von Lithium-Ionen-Akkumulatoren (direkte Elektrifizierung) gleichgesetzt wird, umfasst sie in dem hier zugrunde liegenden Verständnis auch die indirekte Elektrifizierung wie die Wasserstoff-Brennstoffzellentechnologien. Denn zur Wasserstoffproduktion wird mittels der Elektrolyse auch möglichst erneuerbar erzeugter

69 Vgl. Canzler/Knie 2016.

70 Vgl. Beckmann et al. 2006; Schönduwe et al. 2012; Deffner et al. 2014.

71 Der Radverkehrsanteil an allen zurückgelegten Wegen beträgt etwa zehn Prozent (BMVBS 2012).

72 Nach der Post/DHL setzen nunmehr auch die Konkurrenten von DPD, GLS, Hermes und UPS Lastenräder ein. In einigen Städten laufen Förderprogramme, um örtliche Einzelhändler und Handwerksbetriebe zum Einsatz von Lasten-Pedelecs zu bewegen.

73 Vgl. Gerike et al. 2016.

74 Öko-Institut et al. 2016-1; Öko-Institut/Fraunhofer ISI 2015.

Strom verwendet.<sup>75</sup> Je stärker der Verkehr elektrifiziert wird, desto abhängiger wird die Mobilität jedoch vom Stromsystem und von der Verfügbarkeit erneuerbaren Stroms.

Als Alternative zu fossilen Kraftstoffen werden heutzutage Biodiesel und Bioethanol beigemischt. Es ist anzunehmen, dass sie in denjenigen Segmenten zum festen Bestandteil eines emissionsarmen Verkehrssystems werden, die nicht elektrifiziert werden, zum Beispiel im Schwerlastverkehr.<sup>76</sup> Aufgrund von Nutzungskonkurrenzen mit landwirtschaftlichen Flächen können sie künftig jedoch nicht im großen Maßstab genutzt werden. Zusätzlich können auch strombasierte flüssige oder gasförmige Kraftstoffe im Verkehr eingesetzt werden. Diese sogenannten synthetischen Kraftstoffe basieren auf Verfahren wie Power-to-Liquid (PtL) und Power-to-Gas (PtG). Dabei wird Strom aus erneuerbaren Energien mittels Wasserelektrolyse und eines Syntheseprozesses genutzt, um flüssige oder gasförmige Kraftstoffe herzustellen. Die bestehende Infrastruktur an Tankstellen und Verbrennungsmotoren kann dadurch weiter genutzt werden; die Motoren müssten nur geringfügig umgerüstet werden. Durch die Umwandlungsprozesse wird jedoch viel Energie für die Produktion benötigt. Die Herstellung ist teuer, und es liegen nur unzureichende Erfahrungen aus den wenigen Pilotprojekten vor.<sup>77</sup> Daher bietet die Umstellung auf elektrische Antriebe eine zentrale Möglichkeit, den Anteil erneuerbarer Energien im Verkehrsbereich zu erhöhen, wenn regenerativ erzeugter Strom zum Einsatz kommt.

Die Elektrifizierung der Antriebe geht mit dem Aufbau einer Ladeinfrastruktur einher, die hohe Investitionen

und auch eine Umwidmung privater und öffentlicher Flächen für deren Aufbau erfordert. Hierdurch können neue Pfadabhängigkeiten entstehen. Dies gilt auch für den notwendigen Ausbau von Erzeugungsanlagen für erneuerbaren Strom, die für die Abdeckung der zusätzlichen Stromnachfrage erforderlich sind. Mittel- und langfristige werden voraussichtlich sowohl die batteriebetriebenen Elektroautos als auch die Brennstoffzellenfahrzeuge eine wichtige Rolle im Verkehr spielen. Sie eignen sich für verschiedene Verkehrsegmente. Batterieelektrische Antriebe kommen vor allem für den Stadtverkehr infrage, weil die direkte Stromnutzung in Batteriefahrzeugen Effizienz- und Kostenvorteile bietet.<sup>78</sup>

**Markt:** Bis Ende Mai 2017 wurden in Deutschland etwa 95.000 Elektrofahrzeuge zugelassen, davon etwa 46.000 rein batterieelektrisch betriebene Pkw.<sup>79</sup> Für 2016 wurde damit die bisherige Prognose zum Markthochlauf der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) erfüllt. Das von der Bundesregierung ausgegebene Ziel von einer Million Elektrofahrzeugen bis 2020 wird unter Berücksichtigung der gegenwärtigen Zulassungszahlen allerdings voraussichtlich verfehlt. Um das Ziel zu erreichen, müssen laut NPE-Hochlaufmodell im Jahr 2017 monatlich 10.000 Elektrofahrzeuge zugelassen werden. Das Angebot an verfügbaren Fahrzeugen in Deutschland liegt derzeit bei 33 Modellen deutscher und etwa 25 Modellen ausländischer Hersteller, soll jedoch in den nächsten Jahren um zusätzliche neue Modelle aller deutschen Hersteller erweitert werden. Bis 2020 soll die Produktpalette auf insgesamt 100 Modelle in allen Fahrzeugsegmenten erweitert werden. Bisher ließen die kleinen Produktionsvolumina der hiesigen Autoindustrie kaum die Realisierung von Skaleneffekten für den deutschen Markt zu.

<sup>75</sup> Die Herstellung von Wasserstoff aus Erdgas (Dampfreformierung) wird an dieser Stelle nicht betrachtet.

<sup>76</sup> Siehe unter anderem Agora Verkehrswende 2017, S. 54 ff.

<sup>77</sup> Vgl. acatech/Leopoldina/Akademienunion 2017-2; DECHEMA 2017.

<sup>78</sup> Öko-Institut 2016-1.

<sup>79</sup> Kraftfahrt-Bundesamt 2017.

Der Umbau des Verkehrssektors und die Elektrifizierung der Fahrzeuge sind auch aus industriepolitischer Sicht bedeutsam. Die Fahrzeugindustrie muss dadurch nicht nur ihr Produktangebot, sondern auch ihre Produktions- und Zuliefererstrukturen verändern. Dabei sind teilweise erhebliche Auswirkungen auf die Zahl der Arbeitsplätze und die Tätigkeitsprofile zu erwarten. Elektrische Antriebe sind gegenüber Verbrennungsmotoren und Getrieben in der Produktion weniger arbeitsintensiv. Das hat große Veränderungen für eine Branche, in der allein in der Produktion des Antriebsstranges rund 250.000 Menschen Beschäftigung finden, zur Folge.<sup>80</sup> Es wird darauf ankommen, diesen Wandel schrittweise umzusetzen, strukturpolitisch zu flankieren und sozial abzufedern. In der Automobilfertigung ist daher ein Strukturwandel zu erwarten, der die regionale Wertschöpfung gefährdet. Aus der Umstellung auf elektrifizierte Antriebe können sich allerdings auch Wertschöpfungsgewinne in Form von unternehmerischen Gewinnen, Einkommen von Angestellten und Steuereinnahmen sowie Arbeitsplatzeffekten ergeben.<sup>81</sup>

**Nutzerverhalten:** Die noch geringen Zulassungszahlen bei den batterieelektrischen Fahrzeugen und das bisher kleine Angebot an wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellenfahrzeugen lassen bis dato kaum konkrete Aussagen zu Nutzungsmustern zu. Da die durchschnittlich im Personenverkehr zurückgelegten Wege knapp zwölf Kilometer betragen<sup>82</sup>, sind batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge in diesem Segment sinnvoll. Je nach zurückzulegender Wegstrecke könnten auch Brennstoffzellenfahrzeuge geeignet sein. Bei Lkw und Fernbussen kommen die Vorteile von Energieträgern mit einer höheren Energiedichte, also synthetischen

strombasierten Flüssigkraftstoffen, zum Tragen. Weitere Alternativen sind wasserstoffbetriebene Fahrzeuge und Oberleitungen für die Stromversorgung. Statt einer vermeintlichen Konkurrenz zwischen den verschiedenen postfossilen Antriebsvarianten ist also eher davon auszugehen, dass verschiedene technische Konzepte in unterschiedlichen Situationen Verwendung finden. Damit können wiederum Abhängigkeiten bei der Energiebereitstellung entstehen.<sup>83</sup> Das gilt auch für die jeweilige Einbindung der Konzepte in das Energiesystem. Als Speicher und Flexibilitätsoption können sie unterschiedliche Rollen einnehmen: Während Batterien für eine kurzfristige Balance im Stromnetz sorgen und zudem durch gesteuertes Laden kurzzeitige Stromüberproduktionen auffangen können, lässt sich Energie durch Power-to-X-Verfahren auch über mehrere Wochen speichern. Schließlich sind Methan und Wasserstoff sowie flüssige synthetische Kraftstoffe langfristig speicherbare Medien.<sup>84</sup>

Die Nutzung öffentlicher Fahrzeuge ist an moderne, digitale Informations- und Kommunikationstechnologien geknüpft. Viele Angebote wie Carsharing oder Public Bikes sind bereits heute digital via Smartphone und App buchbar. Dadurch entsteht eine hohe Abhängigkeit von digitalen Plattformen und Endgeräten, wodurch sich Exklusionseffekte und damit neue Pfadabhängigkeiten bilden können: die Abhängigkeit von einem funktionierenden Datenübertragungssystem, die Gewährleistung des Datenschutzes oder Technikkompetenzen, die insbesondere ältere Menschen auszuschließen drohen. Sowohl die Ausstattung mit ei-

<sup>80</sup> Vgl. Agora Verkehrswende 2017, S. 86. Auch die Gewerkschaften bereiten sich auf den Strukturwandel vor, siehe auch IG Metall 2015.

<sup>81</sup> NPE 2016.

<sup>82</sup> Statistisches Bundesamt 2013.

<sup>83</sup> Das ist allerdings derzeit nur generell zu beantworten.

Hier liegt ein offensichtlicher Forschungsbedarf vor. Bisher gibt es lediglich die Berechnungen des Öko-Instituts zu den notwendigen Ausbaugrößen für erneuerbare Energien, die auf verschiedene Pfade zur Dekarbonisierung des Verkehrs führen (siehe Öko-Institut 2016-2).

<sup>84</sup> Beim heutigen Anteil der EE-Stromerzeugung werden sie noch nicht benötigt; derzeit wird damit gerechnet, dass Speicher und Flexibilitätsoptionen wie Batterien aus der Elektromobilität und Power-to-X-Anlagen mittelfristig ab etwa 2030 gebraucht werden (vgl. Öko-Institut 2014; Fraunhofer IWES 2015).

nem Endgerät als auch die Fähigkeit, es bedienen zu können, erschweren die Nutzung.

**Governance:** Trotz einer Reihe von Maßnahmen wie Vorgaben zur Effizienzsteigerung bei den Antrieben, Emissionsgrenzwerten und Geschwindigkeitsbegrenzungen im Verkehr sind die Emissionen bislang noch nicht zurückgegangen. Dies liegt in erster Linie am gestiegenen Gesamtverkehrsaufkommen. Fachleute prognostizieren, dass ohne eine energiepolitische Neuausrichtung das Klimaziel der Bundesregierung, bis 2020 die CO<sub>2</sub>-Emissionen um vierzig Prozent gegenüber 1990 zu reduzieren, nicht erreicht wird.<sup>85</sup> Für die Elektrifizierung der Antriebe gibt es verschiedene Instrumente, die von energiepolitischen Akteuren beurteilt und abgewogen werden müssen.

Ein wichtiger Ansatz besteht darin, emissionsarme Technologien zu fördern, etwa Elektrofahrzeuge gegenüber konventionellen Pkw besserzustellen. Sektorübergreifende Instrumente wie die Einbindung des Verkehrs in das ETS oder die Einführung einer CO<sub>2</sub>-Steuer könnten dazu beitragen. Derartige Instrumente können sicherstellen, dass ein zunehmender elektrischer Anteil im Verkehr im Sinne der angestrebten Sektorkopplung „systemdienlich“ gestaltet wird.<sup>86</sup> Auch die Überarbeitung der Erneuerbare-Energien-Richtlinie kann die Elektrifizierung im Verkehr vorantreiben. Sie sieht bis 2020 einen EU-weiten Anteil der erneuerbaren Energien an der verbrauchten Gesamtenergie im Verkehrssektor von mindestens zehn Prozent vor.

Hinzu kommen mögliche sektor- und technologiespezifische Maßnahmen, die ebenfalls auf eine Verschiebung bestimmter Preis- und Nutzungsverhältnisse abzielen. Dazu zählen unter anderem Instrumente wie eine CO<sub>2</sub>-Grenzwertset-

zung, die Formulierung von Quoten für emissionsarme Fahrzeugtypen<sup>87</sup>, Kaufanreize und Steuererleichterungen<sup>88</sup> sowie verbindliche Zulassungsverbote für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren, wie sie jüngst in einer Stellungnahme des Bundesrates an die EU für das Jahr 2030 formuliert wurden.<sup>89</sup> Kommunen können die Nutzung von Elektrofahrzeugen durch den Flottenumbau, die Förderung von E-Autos und das Parkraummanagement vorantreiben (vgl. Kapitel 4).

Die Konzentration auf den Pfad der Elektromobilität hätte jedoch finanzielle Auswirkungen: Die hohen Mineralölsteuereinnahmen aus dem Verkehrssektor würden Schritt für Schritt wegfallen – dies ist ein Beispiel für eine bestehende Pfadabhängigkeit, die zu Widerständen und Verzögerungseffekten führen kann. Solche Einnahmeausfälle könnten grundsätzlich durch die Einführung einer allgemeinen sektorübergreifenden CO<sub>2</sub>-Steuer oder durch Einnahmen aus dem Zertifikatehandel kompensiert werden. Dies erfordert aber gegenüber dem heutigen Besteuerungsprinzip einen Systemwechsel.

### 3.2.4 Der Zukunftspfad „Stärkung des gemeinschaftlichen Verkehrs“

Die Stärkung des gemeinschaftlichen Verkehrs kann ebenfalls einen bedeutenden Beitrag zum Klimaschutz leisten, doch auch hier drohen Pfadabhängigkeiten in den verschiedenen Dimensionen.

**Technologie:** Der gemeinschaftliche Verkehr umfasst neben dem klassischen Bus- und Bahnbetrieb ebenso verschiede-

<sup>87</sup> Bei der Quotenregelung wird in- und ausländischen Fahrzeugherstellern vorgeschrieben, einen bestimmten Anteil ihrer Fahrzeuge mit Elektro- oder Hybridantrieb auszustatten. Wird die Quote nicht erreicht, müssen Hersteller nach einem System ähnlich dem Emissionshandel Zertifikate zukaufen. Es handelt sich um ein stark ordnungspolitisches Instrument. Die chinesische Regierung hat für 2018 eine Zero-Emission-Quote bei Neuzulassungen angekündigt.

<sup>88</sup> Norwegen hat viele Neuzulassungen von E-Fahrzeugen unter anderem durch Investitionszuschüsse in Form von Steuererleichterungen erreicht.

<sup>89</sup> Bundesrat 2016.

<sup>85</sup> BMUB 2016-3.

<sup>86</sup> acatech/Leopoldina/Akademienunion 2017-1.



ne Varianten der Sharing Economy. Zur Stärkung dieses Verkehrszweiges dienen die Konsolidierung und Ausweitung des ÖPNV, vor allem durch verbesserte S- und Regionalbahnverbindungen, neue Straßenbahnen, Beschleunigung von Bussen durch eigene Spuren und Ampelvorrangschaltungen sowie zusätzliche Carsharing-Angebote und Public Bike Services. Insbesondere die Ausweitung des ÖPNV ist in der Regel fixkostenintensiv. Sie verändert außerdem das Stadtbild, beispielsweise indem neue Strecken ausgebaut werden, und kann so neue Pfadabhängigkeiten schaffen.

**Markt:** Neue Anbieter gestalten die Integration von ÖPNV und zusätzlichen Auto- und Fahrradleihangeboten mit. Stadtbewohnerinnen und Stadtbewohner profitieren davon, denn nun können sie auch die „letzte Meile“ in vielen Wegeketten ohne eigenes Auto bewältigen.<sup>90</sup> Hinzu kommen Ridesharing-Plattformen, die damit werben, Fahrgäste unkompliziert und kostengünstig mit Mietwagen oder Privatfahrzeugen mitzunehmen. In den wachsenden Ridesharing-Markt drängen derzeit sowohl globale Unternehmen (Uber, Gett etc.) als auch lokale Start-ups (allygator shuttle, CleverShuttle, flinc etc.). Momentan ist noch nicht absehbar, ob sich diese Geschäftsmodelle bewähren werden.

**Nutzerverhalten:** Erste ÖPNV-Unternehmen bieten multimodale Angebote, also Transportleistungen in Bussen, Bahnen und Carsharing, an.<sup>91</sup> Zwar sind die Sharing-Angebote immer noch ein Nischenphänomen in Großstädten – nur 3,2 Prozent aller Personen mit Führerschein nutzen Carsharing. Allerdings stiegen die Zuwachsraten an Fahrberechtigten 2016 um insgesamt 36 Prozent. Bei den stationsunabhängigen Fahrzeugen von Anbietern wie car2go, DriveNow oder MultiCity

stieg die Zahl der Nutzerinnen und Nutzer sogar um fast 52 Prozent.<sup>92</sup> Zusätzlichen Schub erhalten die Sharing-Angebote durch Smartphone-Apps, die sowohl Verkehrsinformationen in Echtzeit bereitstellen als auch für Reservierungen und Buchungen genutzt werden können.<sup>93</sup> In der nächsten Stufe ermöglichen diese Apps ein elektronisches Ticketing. Eine Erweiterung zu „individuellen Mobilitätshelfern“, die auch persönliche Präferenzen in die angezeigte Verkehrsmittelwahl miteinfließen lassen, ist absehbar.<sup>94</sup> Ein indirekter Netzwerkeffekt kann durch die Verknüpfung von Angeboten des gemeinschaftlichen Verkehrs und der Erschließung über die notwendige Nutzung digitaler Medien (zum Beispiel Smartphones) entstehen. Mit einem integrierten intermodalen Verkehrsangebot können auch direkte Netzwerkeffekte erzielt werden, die im bisherigen fahrplan- und haltestellengebundenen ÖPNV nicht zu erreichen waren. Ausmaß und Wirkung dieser Effekte sind bislang noch nicht zu beziffern.

Perspektivisch können auch autonom fahrende Fahrzeuge sowohl dem ÖPNV als auch den Sharing-Diensten weitere Vorteile bescheren.<sup>95</sup> Autonom fahrende Kleinbusse können beispielsweise den ÖPNV zu Tagesrandzeiten oder in schwächer besiedelten Stadtlagen flexibilisieren, weil sie einen „Transport on Demand“ ermöglichen. Carsharing könnte noch attraktiver werden, wenn die gemieteten autonomen Fahrzeuge die Kundin beziehungsweise den Kunden abholen und eigenständig ans Ziel bringen – oder nach einer aktiven Kundenfahrt zumindest selbstständig parken.

**Governance:** Eine rechtssichere Grundlage muss für öffentlich und autonom fahrende Fahrzeuge – sowohl als Carsha-

<sup>90</sup> Vgl. Rode et al. 2014.

<sup>91</sup> Hier sind beispielsweise die Stadtwerke Osnabrück, üstra Hannover und die Stuttgarter Verkehrsbetriebe zu nennen.

<sup>92</sup> Bundesverband Carsharing 2017.

<sup>93</sup> Zu den disruptiven Wirkungen der Digitalisierung im Verkehr siehe InnoZ 2017.

<sup>94</sup> Schelewsky 2013.

<sup>95</sup> Vgl. OECD/International Transport Forum 2015.

Dimension	Alte Pfadabhängigkeiten	Überwindung der alten Pfadabhängigkeiten	Neue Pfadabhängigkeiten
<b>Technologie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dominanz der Verbrennungsmotoren</li> <li>• Autogerechte Infrastrukturen in der Stadt</li> </ul>	Emissionsarme Antriebe (Batterien, H <sub>2</sub> ); wegen Nutzungskonkurrenzen kaum biogene Kraftstoffe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Starker EE-Ausbau</li> <li>• Erneutes Umschwenken auf neue emissionsarme Technologien schwer vermittelbar</li> </ul>
		Ausbau des ÖPNV-Angebotes (Vorrang durch verbessertes Verkehrssystem)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausbau der Infrastruktur für ÖPNV</li> <li>• Umgestaltung der Stadt (zum Beispiel dauerhafte Flächenumwidmung, Rückbau von Straßen)</li> </ul>
		Sektorkopplung: Verkehr wird elektrifiziert: Elektroautos als Kurzzeitspeicher dienen Netzstabilität	Sektorkopplung: Verkehr wird abhängig von Stromversorgung
<b>Markt</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausrichtung der Fahrzeughersteller auf Verbrennungsmotoren</li> <li>• Flächendeckende Infrastruktur für die Nutzung konventioneller Pkw mit Verbrennungsmotoren</li> </ul>	Aufbau eines Industriestandortes für E-Fahrzeuge	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Änderung der Produktions- und Zuliefererstrukturen</li> <li>• Veränderte Tätigkeitsprofile der Angestellten; Umwidmung und Verringerung der Arbeitsplätze</li> </ul>
		Änderung des Produktangebots: Stärkung des Dienstleistungssektors	Schwächung der Produktion
		Stärkung der Sharing Economy (Carsharing, Public Bike Services)	Höhere Abhängigkeit von weiteren Nutzerinnen und Nutzern
<b>Nutzerverhalten</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fokus auf Individualverkehr</li> <li>• Auto als Symbol des Wohlstands, zumeist besseres Image als ÖPNV</li> </ul>	Vereinfachte Planung durch Apps und elektronisches Ticketing	Exklusionseffekte durch hohe Abhängigkeit von Digitalisierung
		Intermodale Passung: verschiedene Verkehrsträger stärker aufeinander abstimmen	Trennung der verschiedenen Nutzungsbereiche (Batterien für Pkw, H <sub>2</sub> beziehungsweise Oberleitungen für Lkw und Fernbusse) erhöht Abhängigkeit von einer Antriebsart
<b>Governance</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trennung von Funktionsbereichen (Wohnen, Arbeiten, Freizeit, Einkaufen) und Verbindung durch Autostraßen („Charta von Athen“)</li> <li>• Freies Parken auf öffentlichen Straßen, Stellplatzaufgaben bei Neubaulprojekten</li> <li>• Dienstwagenprivileg</li> <li>• Eigenheimzulage</li> </ul>	Nationale und internationale Instrumente: Emissionshandel, CO <sub>2</sub> -Steuer, CO <sub>2</sub> -Grenzwertsetzung, Kaufanreize, Elektroauto-Quoten, Verbote für Verbrennungsmotoren, Privilegien für Carsharing etc.	<i>Unterschiedlich je nach Instrument</i>
		Kommunale Instrumente: Flottenumbau, Parkraumbewirtschaftung, Flexibilisierung des ÖPNV durch autonom fahrende Fahrzeuge etc.	Dauerhafte Umwidmung privater und öffentlicher Flächen
		Stärkere Selbstverwaltungsrolle der Kommunen	Umschichtung der Einnahmequellen (zum Beispiel Mineralölsteuer)

**Tabelle 1:** Alte und mögliche neue Pfadabhängigkeiten in der urbanen Mobilität

ring-Fahrzeuge als auch als Kleinbusse – erst noch geschaffen werden. Dies betrifft unter anderem das bisher übliche freie Parken im öffentlichen Raum. Wenn man den Grundsatz umkehrt und Ausnahmen von der Bezahlpflicht für die Nutzung des öffentlichen Raumes begründet, kann dies den öffentlichen Verkehr im Allgemeinen und Sharing-Dienste sowie das autonome Fahren im Besonderen fördern.

Tabelle 1 fasst die beschriebenen Abhängigkeiten aus den beiden Zukunftspfaden zusammen und beschreibt mögliche Elemente, um diese Pfadabhängigkeiten zu überwinden. Dadurch können jedoch neue Abhängigkeiten entstehen.

### 3.3 Beispiel: Güterverkehr

Pfadabhängigkeiten spielen auch im Güterverkehr eine wichtige Rolle. Abhängig von der Wegstrecke wird zwischen städtischem, interregionalem, internationalem und interkontinentalem Güterverkehr unterschieden, wofür entsprechende Transportmittel (Lkw, Eisenbahn, Container- und Binnenschiff, Flugzeug) zum Einsatz kommen.<sup>96</sup> Im Folgenden liegt der Fokus auf dem interregionalen Warentransport auf Straße, Schiene und Wasser innerhalb Deutschlands.

Der interregionale Güterverkehr weist im Vergleich zum Personenverkehr in der Stadt drei Unterschiede auf: Die Transportfahrzeuge sind größer, legen längere Strecken zurück und passieren häufiger Ländergrenzen.<sup>97</sup> Der Güterverkehr ist auf lange, ununterbrochene Transportfahrten ausgerichtet. Die Fahrten finden typischerweise zwischen Verteilzentren in urbanen Randgebieten statt.

Diese fungieren als Bindeglied zwischen dem Fernverkehr und der Feinverteilung in die Städte. All dies hat Konsequenzen für die benötigte Infrastruktur und die Antriebstechnologien. So erfordern die Antriebe von Transportfahrzeugen im Güterverkehr eine vergleichsweise hohe Energiedichte. Zudem sind die Transportfahrzeuge auf ein flächendeckendes Versorgungsnetz mit Kraftstoffen (zum Beispiel Tankstellen) oder auf eine permanente Stromversorgung (zum Beispiel durch Oberleitungen) angewiesen. Dieses Logistiksystem ist mit dem Personenverkehr zu harmonisieren, da Personen- und Güterverkehr vielfach dieselbe Infrastruktur nutzen.<sup>98</sup>

Der Güterverkehr verursacht in den letzten Jahren immer mehr CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehrssektor. Im Jahr 2015 war der Güterverkehr für einen jährlichen Ausstoß von fast 54 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> verantwortlich, was etwa einem Drittel der Emissionen im gesamten Verkehrssektor entspricht.<sup>99</sup> Vor allem auf Straße und Schiene wird der Güterverkehr in Deutschland künftig weiter zunehmen. In seiner aktuellen Verkehrsverflechtungsprognose geht das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur für das Jahr 2030 von einem Wachstum von 39 Prozent auf der Straße, 43 Prozent auf der Schiene und 23 Prozent in der Binnenschifffahrt gegenüber 2010 aus. Das prognostizierte Wachstum des Verkehrsaufwandes im Personenverkehr fällt mit insgesamt zwölf Prozent dagegen etwas moderater aus.<sup>100</sup> Mit der weiter steigenden Transportnachfrage wird die Bedeutung des Güterverkehrs für den Klimaschutz zukünftig also zunehmen.

<sup>96</sup> Die Form des Güterverkehrs kann auch je nach Dienstleister variieren: Erfolgt der Transport eines Transportgefäßes mit zwei oder mehr Verkehrsträgern, so spricht man vom kombinierten Verkehr. Der Transport von einzelnen Stückgütern in Nabe-Speiche-Systemen wird Stückgutverkehr genannt. Bleibt der Transport von der Warenentgegennahme bis zur Auslieferung in einer Hand, so befindet man sich im Feld der Kontraktlogistik (vgl. Aberle 2009).

<sup>97</sup> Vgl. beispielsweise UBA 2012.

<sup>98</sup> acatech 2012.

<sup>99</sup> Auskunft des Umweltbundesamtes nach Berechnungen des Programms „Tremod 5.63“ zu Emissionsdaten. Diese Daten sind nach dem „Absatzprinzip“ (Verkehr mit in Deutschland getankten Kraftstoffen) zusammengestellt. Sie beinhalten nicht die Emissionen zur Erzeugung der Energieträger Kraftstoffe und Strom.

<sup>100</sup> BMVI 2014-2. Der Luft- und Schienenverkehr tragen mit einem Plus von 65 beziehungsweise 19 Prozent einen überproportionalen Anteil dazu bei.

Trotzdem konzentriert sich die politische und gesellschaftliche Diskussion oft auf den Personenverkehr.

### 3.3.1 Status quo: Die Lkw-basierte Logistik

Die beschriebenen Anforderungen an den Güterverkehr, insbesondere die Verbindung zwischen Verteilzentren, wurden in den letzten Jahrzehnten vor allem durch den Straßengüterverkehr erfüllt. Der sogenannten Lkw-basierten Logistik gingen verschiedene **technische** Entwicklungen voraus: Die Entwicklung von leistungsstarken Verbrennungsmotoren wie auch die Erfindung motorbetriebener Kühlanlagen und normierter Verpackungs- und Transporteinheiten (Container) schufen in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts die Voraussetzungen für ein modernes, globales Verkehrssystem. Sie ermöglichten den kostengünstigen Transport von Gütern in die gesamte Welt.<sup>101</sup>

Die Lkw-basierte Logistik rechnet sich auch **wirtschaftlich**. Durch die Verbreitung von flächenweiten Lieferungen aus der ganzen Welt wuchs auch der Wohlstand vieler Menschen. Weil die klimaschädlichen Wirkungen des Güterverkehrs bisher nur geringfügig eingepreist wurden, fallen die Transportkosten in der Gesamtschau kaum ins Gewicht. Nicht zuletzt dadurch wurde der Straßengüterverkehr über Lkw für Spediteure profitabel. Der Abbau von Handelsgrenzen und Zollsystemen durch Organisationen wie die Welthandelsorganisation und die Europäische Gemeinschaft (Schengener Abkommen von 1990) machte den Straßengüterverkehr kosteneffizient und international wettbewerbsfähig. Durch eine zunehmend präzise Organisation der Just-in-Time-Produktion konnten die Kosten Ende des 20. Jahrhunderts weiter gesenkt werden. Dagegen verhinderten hohe Investitionshemmnisse Innovationen im Schienengüterverkehr.<sup>102</sup> Der in-

ternationale Transport von Rohmaterialien, Zwischen- und Endprodukten und die Weiterverteilung mithilfe von Lkw ist für viele Konsumgüter wie Kleidung und Elektroartikel seitdem Normalität. Dadurch ist eine starke Pfadabhängigkeit von der Lkw-basierten Logistik und den damit verbundenen Infrastrukturen entstanden.

Diese Entwicklung wurde durch entsprechende **politische** Rahmenbedingungen und Regularien weiter verfestigt. Für dieses auf fossilen Kraftstoffen basierende Verkehrssystem wurde eine eigenständige Zuliefererindustrie erschaffen, mit dem Straßenbau eine eigene Industriesparte für die Infrastruktur entwickelt und ein Versorgungssystem mit Tankstellen aufgebaut. So sind die Märkte der Stückguttransporte und der Kontraktlogistik sehr stark auf den Straßengüterverkehr ausgerichtet.<sup>103</sup> Auch das **Nutzerverhalten** hat sich dieser Entwicklung angepasst: Konsumentinnen und Konsumenten erwarten, täglich frische Waren aus fernen Regionen beziehen zu können. Dadurch wurde der Lebensmittelhandel zu einem globalen Wachstumsmarkt.<sup>104</sup>

Die skizzierten Entwicklungen führten in der Vergangenheit zu einem Wachstum im Transportverkehr. Zwischen 1990 und 2010 stieg die Beförderungsleistung von 398 auf 665 Tonnenkilometer, insbesondere auf der Straße und in der Luft gab es hohe Zuwachsraten.<sup>105</sup> Insgesamt wurden im Jahr 2016 4,6 Milliarden Tonnen Güter durch Deutschland bewegt – im vierten Jahr in Folge ein Rekordwert. Der Straßenverkehr machte mit 3,6 Milliarden Tonnen mehr als drei Viertel des gesamten Güterverkehrs aus, während die Beförderungsmengen auf Schiene und Wasser rückläufig waren.<sup>106</sup> Bisherige Effizienzgewinne, beispielsweise mithilfe

101 BVL 2017-2; Bernhofen et al. 2013.

102 Müller et al. 2016.

103 Müller et al. 2016.

104 Unruh 2000; Hamzaoui-Essoussi/Zahaf 2012.

105 Statistisches Bundesamt 2016.

106 Statistisches Bundesamt 2017.

von sparsameren Motoren, wurden durch eine höhere Transportnachfrage und die zunehmende Motorisierung im Verkehrssektor (über-)kompensiert.<sup>107</sup>

Als Beitrag zum Klimaschutz müssen die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Zukunft deutlich sinken – auch im Güterverkehr. Durch die Vermeidung von Verkehr, die Verlagerung des straßenbasierten Güterverkehrs auf Wasser und Schiene sowie optimierte Verkehrsabläufe und effiziente Antriebstechnologien könnte der Mobilitätssektor umwelt- und klimafreundlicher werden.<sup>108</sup> Da Pfadabhängigkeiten durch Verkehrsvermeidung kaum abzuschätzen sind, konzentriert sich diese Analyse auf die Verlagerung des Verkehrs sowie auf die Verbesserung mittels alternativer Energieträger. Nach einer Übersicht über zentrale Treiber des Güterverkehrs wird dies an ausgewählten Beispielen diskutiert.

### 3.3.2 Treiber der zukünftigen Entwicklung

Der Güterverkehr ist schon heute durch unterschiedliche Treiber gekennzeichnet, die seine künftige Entwicklung maßgeblich prägen könnten. Zum einen ist hier die technische Vernetzung zu nennen: Ingenieurinnen und Ingenieure forschen an nachhaltigen Antriebssystemen, Mathematikerinnen und Mathematiker feilen an Logarithmen für effiziente und flexible Lieferketten. 3D-Drucker werden entwickelt und können die Produktionsstrukturen von Gütern sowie den damit korrespondierenden Gütertransport grundlegend verändern. Auch eine intelligente Verkehrssteuerung kann eingesetzt werden, um Staus und damit Emissionen zu reduzieren. Hinzu kommt, dass der Umweltschutz als Unternehmensstrategie immer mehr an Bedeutung gewinnt und gesetzliche Vorgaben zur Senkung der Emissionen eingeführt werden.<sup>109</sup>

Diese Treiber haben das Potenzial, die komplette Transportlogistik umweltgerechter und ressourcenschonender zu machen: Die Luftemissionen könnten sinken, Wasser und Boden wären freier von Schadstoffen, es gäbe weniger Lärm, und es würden weniger Flächen für den Straßenverkehr verbraucht – sofern die entsprechenden Rahmenbedingungen geschaffen werden.

Auf der anderen Seite sind Trends zu beobachten, die hohe Wachstumsprognosen für den Güterverkehr begründen: Die zunehmende globale Arbeitsteilung ermöglicht eine stärkere Verflechtung von Produktionsprozessen, selbst über große Distanzen hinweg. Die Reduzierung von Fertigungstiefen setzt mehr Transport von Bauteilen und -gruppen voraus. Letztlich führt auch die Nachfrage nach flexiblen Lieferungen von Privatkundinnen und -kunden und in der Just-In-Time-Produktion zu kleinteiligeren Sendungen und damit zum Einsatz von kleineren Fahrzeugen mit geringeren Auslastungen.<sup>110</sup> Durch die zunehmende Verbreitung des Onlinehandels bestellen Privatpersonen und Unternehmen geringere Mengen. Dadurch steigen die zurückgelegten Transportwege und Lieferfrequenzen im Vergleich zum Zulieferverkehr des stationären Handels.<sup>111</sup>

Im Vergleich zur urbanen Mobilität scheint sich der Güterverkehr langsamer zu wandeln. Innovationen aus dem Personenverkehr werden oft mit starker Zeitverzögerung auf den Güterverkehr übertragen. Wie steigende Treibhausgasemissionen und fehlende Effizienzgewinne zeigen, greifen die Treiber hin zu einer „grünen Logistik“ bislang kaum, da die klimaschützenden Maßnahmen in diesem Bereich bislang nicht ausreichend umgesetzt wurden.

107 Frondel et al. 2009.

108 BMVI 2014-3; GIZ 2014; UBA 2016-1; UBA 2016-2; Perschon 2012.

109 HOLM/Fraunhofer IML 2016.

110 Vgl. Linssen/Hennings 2016. Für den überregionalen Verkehr wird allerdings auch parallel an der Zulassung größerer Lang-LKW gearbeitet (BMVI 2017).

111 Vgl. IHK Mittleres Ruhrgebiet 2016.

Aus heutiger Sicht gibt es verschiedene Möglichkeiten, einen substanziellen Klimaschutzbeitrag im Güterverkehr zu leisten. Dies kann nur durch internationale Kooperationen gelöst werden. Mit der verstärkten Nutzung alternativer Energieträger und Antriebssysteme sowie der Verlagerung von Transportwegen werden nachfolgend zwei Zukunftspfade beispielhaft betrachtet und auf Pfadabhängigkeiten analysiert.

### 3.3.3 Der Zukunftspfad „Alternative Energieträger“

Um den Güterverkehr nachhaltiger zu gestalten, müssen neben der Verkehrsverlagerung und Vermeidung auch effiziente, CO<sub>2</sub>-arme Energieträger eingesetzt werden. Während die Alternativen für klimafreundliche Energieträger in der Schifffahrt und im Flugverkehr begrenzt sind, stehen im Straßengüterverkehr bereits heute verschiedene Technologien zur Verfügung<sup>112</sup>:

#### Elektrische Antriebssysteme

- mit *direkter Elektrifizierung* in batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) beziehungsweise mittels Oberleitungs-Lkw
- mit *indirekter Elektrifizierung* in mit Wasserstoff betriebenen Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV)

#### Verbrennungsmotoren

- mit *gasförmigen Kraftstoffen* auf Basis von fossilen oder biogenen Rohstoffen und Strom (Liquefied Natural Gas, LNG; Compressed Natural Gas, CNG; Biomethan; Power-to-Gas)
- mit *flüssigen Kraftstoffen* aus der Synthetisierung von Biomasse (Bio-to-Liquid) beziehungsweise mittels Elektrolyse (Power-to-Liquid)

<sup>112</sup> Da außer in Nischenanwendungen keine netzgebundene Energieversorgung möglich ist, sind für diese Anwendungen Energieträger mit hoher Energiedichte erforderlich. Somit schränken sich die Optionen in der Schifffahrt auf flüssige Kohlenwasserstoffe und verflüssigtes Methan (gegebenenfalls auch flüssiger Wasserstoff) ein. Im Flugverkehr werden neben flüssigen Kohlenwasserstoffen kaum weitere realistische Optionen gesehen (vgl. UBA 2015; DLR et al. 2015).

Diese Antriebsmöglichkeiten können technisch unterschiedlich umgesetzt werden:

Eine **direkte Elektrifizierung** des Güterverkehrs kann über Batteriesysteme oder über die Stromzufuhr via Oberleitungen vollzogen werden. Besonders mithilfe des Oberleitungsstroms kann der Güterverkehr im Ferntransport klimafreundlich gestaltet werden, sofern dafür erneuerbarer Strom genutzt wird.<sup>113</sup> Die netzgebundene Elektrifizierung des Güterfernverkehrs entlang von Autobahnen ist beispielsweise eine energieeffiziente Möglichkeit, Gütertransport zukünftig zu organisieren.<sup>114</sup> Bei Oberleitungssystemen stößt die Stromversorgung in Tunneln und an Brücken jedoch an ihre Grenzen. Diese Hürden können durch Hybridanwendungen bewältigt werden, zum Beispiel über sogenannte Range-Extender-Systeme, die mittels eines zusätzlichen Antriebs (Verbrennungsmotor, Batterie, Brennstoffzelle) unabhängig vom Strom funktionieren und somit die Fahrzeugreichweite erhöhen.<sup>115</sup> Ein Betrieb von Oberleitungs-Lkw wird daher vor allem auf viel befahrenen Fernstraßen wirtschaftlich. Ab 2018 sollen stromnetzgebundene Fern-Lkw auf zwei Autobahnen getestet werden.<sup>116</sup>

Bei der **indirekten Elektrifizierung** wandeln Brennstoffzellenfahrzeuge Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser und Strom um, der per Batterie den Elektromotor antreibt.<sup>117</sup> Aufgrund ihrer begrenzten Energiedichte eignen sich Brennstoffzellenfahrzeuge absehbar jedoch nur für kleinere Güterverkehrsfahrzeuge. Erste Prototypen werden momentan hergestellt und getestet.<sup>118</sup> Für einen breiten Einsatz im Fernver-

<sup>113</sup> UBA 2015.

<sup>114</sup> Öko-Institut 2016-1.

<sup>115</sup> BMVI/BMUB 2016.

<sup>116</sup> BMUB 2017.

<sup>117</sup> Grundsätzlich können Brennstoffzellenfahrzeuge auch mit anderen Kraftstoffen betrieben werden (zum Beispiel Erdgas oder Methanol). In diesen Fällen werden allerdings weitere chemische Konversionsschritte an Bord notwendig.

<sup>118</sup> Toyota stellte im Mai 2017 einen schweren LKW mit Brennstoffzellenantrieb vor, der 36 Tonnen Gesamtgewicht transportieren kann.

kehr bedarf es jedoch höherer Reichweiten und einer gut ausgebauten Tankstelleninfrastruktur.<sup>119</sup>

Auch der **gasbasierte Antrieb** über Verbrennungsmotoren ist eine Option für den Gütertransport. Wird dafür Erdgas mit Bio-Anteilen eingesetzt, so ist der Klimaschutzeffekt auch wegen der Umwandlungsverluste durch die Verflüssigung begrenzt und wird auf 0 bis 25 Prozent gegenüber einem dieselbetriebenen Lkw geschätzt.<sup>120</sup> Während sich CNG eher für den Verteilverkehr eignet, wird insbesondere LNG als alternativer Kraftstoff für schwere Lastwagen verwendet. Dabei wird das Erdgas stark heruntergekühlt und verflüssigt. Die CNG-Technologie kann auf eine vorhandene Infrastruktur von knapp 1.000 Erdgastankstellen in Deutschland aufbauen.<sup>121</sup>

Unter den alternativen Antriebsarten dominieren im derzeitigen Bestand Flüssig- und Erdgasfahrzeuge.<sup>122</sup> Bis 2020 sollen bundesweit vier Prozent des Energieverbrauchs im Verkehrssektor durch Erdgas gedeckt werden.<sup>123</sup> Derzeit sind in Deutschland rund 100.000 erdgasbetriebene Fahrzeuge – davon etwa 2.000 schwere Nutzfahrzeuge – sowie weltweit 77 LNG-getriebene Schiffe im Einsatz.<sup>124</sup> Mehr als 900 CNG-Tankstellen versorgen über 16.000 Erdgasbusse.<sup>125</sup> Ein erstes Netz von LNG-Tankstellen befindet sich sowohl für Lkw als auch für Schiffe im Aufbau.<sup>126</sup>

LNG erreicht eine viel höhere volumetrische Energiedichte als gasförmiges Erdgas. Für den Fernverkehr ist die Option wegen ihrer hohen Reichweite attraktiv. Allerdings ist der Wirkungsgrad noch

deutlich geringer als beim Dieselmotor.<sup>127</sup> Auch die Mehrkosten pro Fahrzeug sind für LNG-betriebene Lkw derzeit 30.000 bis 40.000 Euro höher als für Dieselfahrzeuge.<sup>128</sup> Möglich ist auch die Substitution von Erdgas durch strombasiertes oder biobasiertes Methan (PtG beziehungsweise aufbereitetes Biogas und Biomethan), wodurch die Klimagasemissionen weiter gesenkt werden.

Beim Einsatz **synthetischer Flüssigkraftstoffe** aus erneuerbar erzeugtem Strom oder biogenen Rest- und Abfallstoffen können Verbrennungsmotoren nahezu klimaneutral betrieben werden. Mithilfe der Elektrolyse wird Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff umgewandelt. Durch Zugabe von CO oder CO<sub>2</sub> wird der Wasserstoff zum Kraftstoff. Hierfür stehen verschiedene Produktsynthesen zur Verfügung (zum Beispiel Fischer-Tropsch, Methanol-to-Fuel). Bei der Kraftstoffherstellung wird für dieses Verfahren im Wesentlichen genauso viel CO<sub>2</sub> verwendet, wie später bei der Verbrennung freigesetzt wird, wenn der Strom erneuerbaren Ursprungs ist. Diese Verfahren bezeichnet man häufig auch als Power-to-Liquid-Verfahren. Die Bandbreite reicht je nach Verfahren von Methanol bis zu synthetischem Benzin, Diesel oder Kerosin. Biomassebasierte Kraftstoffe nutzen biogene Gase (CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> etc.) sowie gegebenenfalls Strom als Ausgangsstoffe. Die Syntheseverfahren (Fischer-Tropsch, Methanol-to-Fuel etc.) werden seit vielen Jahren unter anderem für den Einsatz biogener Rest- und Abfallstoffe weiterentwickelt.<sup>129</sup> Hier kann teilweise auf Bausteine der bestehenden Infrastruktur (Tankstellen, Raffinerien etc.) zurückgegriffen werden. Jedoch ist das Potenzial an nachhaltiger Biomasse begrenzt. Allen Verfahren liegt bislang noch eine deutlich teurere Herstellung zugrunde als bei Benzin oder Diesel, aber auch als bei Biomethan.

119 Shell/Wuppertal-Institut 2017.

120 Shell/DLR 2010.

121 Vgl. Erdgas.info 2017.

122 Statistisches Bundesamt 2013.

123 BMWi et al. 2015.

124 BMVI 2016, S. 11 ff.

125 BMVI 2016, S. 17; DENA 2016.

126 BMVI 2016, S. 20 f.

127 Ludwig-Bölkow-Systemtechnik 2016.

128 Köppel et al. 2017.

129 Müller-Langer et al. 2014.

Strombasierte Kraftstoffe können das Energiesystem stark beeinflussen. Ihre Herstellung kann bei entsprechender Flexibilität zu einer zeitlichen Entkopplung des Angebots an erneuerbaren Energien und deren Nutzung beitragen. Je nach Produkt können die heutigen Infrastrukturen, bestehend aus Verbrennungsmotoren, Tankstellen, Transportfahrzeugen, Erdgasnetzen und -speichern, weiter genutzt werden – oder aber sie erfordern neue Versorgungsstrukturen, etwa für den Transport und die Verteilung von Wasserstoff. Die bestehenden Erdgassysteme dürfen maximal fünf Volumenprozent Wasserstoff aufnehmen<sup>130</sup>, sie eignen sich jedoch sogar bis zu einem Maximalwert von zehn Volumenprozent.<sup>131</sup> Diese Variante kann einen Übergangspfad zu einer reinen Wasserstoffinfrastruktur darstellen. Für diese Variante sind große Mengen an möglichst grünem Strom notwendig.<sup>132</sup> Der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur kann ähnlich der Erdgasinfrastruktur weitere Anwendungen umfassen, zum Beispiel in der Chemieindustrie.<sup>133</sup>

Je nach gewählter Option können ausgeprägte Pfadabhängigkeiten entstehen – vor allem wenn neue Infrastrukturen (Wasserstoff) aufgebaut und die erneuerbaren Energien national sowie international erheblich ausgebaut werden müssen, um ausreichend Grünstrom bereitstellen zu können. Im Folgenden werden mögliche Pfadabhängigkeiten für alle hier betrachteten alternativen Energieträger für den Güterverkehr entlang der vier Dimensionen aufgezeigt.

**Technologie:** Die Umstellung auf alternative Energieträger und neue Kraftstoffe erfordert erhebliche Investitionen in Technologien (vor allem Fahrzeuge und deren Antriebssysteme) und Infrastrukturen (vor allem Betankungsinfrastruktur sowie Transport- und Verteilnetzstrukturen für bisher nicht etablierte Energieträger und Kraftstoffe). Die technischen Innovationen zielen vor allem darauf ab, den Wirkungsgrad der neuen Kraftstoffe und Antriebe zu erhöhen und die Kosten durch Serienanfertigung zu senken. Von zentraler Bedeutung ist dabei, dass sich alternative Antriebe in der Anwendung und Markteinführung nicht gegenseitig ausschließen, sondern sich sogar ergänzen können.<sup>134</sup> Müssen jedoch ganz neue Infrastrukturen aufgebaut werden, sind potenzielle Konkurrenzbeziehungen und Pfadabhängigkeiten zu beachten. Dies gilt zum Beispiel für die Elektrifizierung zentraler Fernstraßen (Oberleitungs-Lkw).

**Markt:** Die Umstellung auf neue Antriebe beziehungsweise Energieträger kann je nach Pfad veränderte Produktions- und Wertschöpfungsprozesse sowie neue Hersteller zur Folge haben. Die geringsten Änderungen treten auf, wenn Verbrennungsmotoren auch im Straßengüterverkehr weiterhin das zentrale Antriebssystem darstellen. Veränderungen würden dabei vor allem in der Bereitstellung neuer Kraftstoffe und deren regionaler Verteilung auftreten. Tiefgreifende Veränderungen in den Produktionsstrukturen und der damit verbundenen Vorleistungskette sind vor allem bei neuen Antriebskonzepten wie der Brennstoffzelle und netzgebundenen elektrischen Antrieben zu erwarten.

Wie in Kapitel 2 dargestellt, ist für die Markteinführung neuer Technologien zudem die Kostendegression durch Skalen-

<sup>130</sup> DVGW 2011.

<sup>131</sup> DVGW 2013, S. 24.

<sup>132</sup> Im Renewability III-Projekt wird unter Annahme eines vollständig CO<sub>2</sub>-neutralen Verkehrssektors ein Szenario mit starker Stromnutzung mit einem Szenario auf PtL-Basis verglichen. Dabei erhöht sich der erneuerbare Strombedarf 2050 von 2.000 Petajoule (direkte Stromnutzung) auf 3.300 Petajoule (PtL), was in der Größenordnung der heutigen Bruttostromerzeugung Deutschlands liegt (Renewability III 2016). Zur Kostenanalyse einer Wasserstoff-Infrastruktur siehe Robinius 2015, S. 255.

<sup>133</sup> Shell/Wuppertal Institut 2017; Otto et al. 2017, S. 451.

<sup>134</sup> Interview mit Prof. Dr. Martin Winter (BINE Informationsdienst 2017).



effekte entscheidend.<sup>135</sup> Weil es Schnittstellen zum Personenverkehr gibt, kann die Kostenentwicklung im Güterverkehr nicht losgelöst von der internationalen Marktentwicklung und anderen Anwendungssektoren betrachtet werden.<sup>136</sup>

Mit der stärker werdenden Verknüpfung zwischen den Sektoren (Sektorkopplung) entstehen für den Stromsektor zukünftig neue Geschäftsmodelle und Systemeffekte. Wird aus Wind- und Sonnenkraft deutlich mehr erneuerbare Energie erzeugt als heute und in das Stromsystem eingespeist, braucht es Langzeitspeicher, die das Energieangebot ausgleichen. Strombasierte Kraftstoffe könnten beispielsweise in den Fahrzeugen Strom speichern, wind- und sonnenarme Phasen überbrücken und damit auch das Stromsystem stabilisieren.

**Nutzerverhalten:** Um Flüssigkraftstoffe zu nutzen, muss nur die Kraftstoffherstellung und gegebenenfalls -aufbereitung geändert werden. Die übrige Logistik wird weitergenutzt. Alle anderen Anwendungen wären gerade in einer Umstellungsphase mit Restriktionen bei den Betankungssystemen, beim Fahrzeugeinsatz und je nach Fahrzeugkonzept auch mit reduzierten Reichweiten verbunden. Zumindest beim Übergang würde damit ein erhöhter Organisationsaufwand im Güterverkehr anfallen.<sup>137</sup> Eine Umstellung der Nutzungspraktiken würde in jedem Fall notwendig, denn die Reichweite von konventionellen Treibstoffen ist im Durchschnitt deutlich größer als diejenige der meisten regenerativen Antriebssysteme.

**Governance:** Angesichts begrenzter öffentlicher Budgets und vor allem internationaler Handelsbeziehungen müssen die Pfadabhängigkeiten der jeweiligen Antriebssysteme frühzeitig identifiziert

werden. Dies gilt beispielsweise, wenn der Aufbau neuer Infrastrukturen staatlich unterstützt oder die Entwicklung von Antriebssystemen gefördert werden soll. Aufgrund des grenzüberschreitenden Charakters des Güterverkehrs ist der Aufbau veränderter Antriebe und damit verbundener Produktionsstrukturen von Kraftstoffen aus europäischer und globaler Perspektive zu betrachten. Nationale Pfadabhängigkeiten können sich hierdurch noch einmal substanziell international ausbreiten (Multiplikatoreffekt). Umso wichtiger wird hier ein international abgestimmtes Vorgehen. Denn falls Strom oder Kraftstoffe importiert werden müssten, können neben wirtschaftlichen auch neue geopolitische Risiken entstehen, die es gegenüber den aktuellen Bezugsquellen von fossil basierten Kraftstoffen (wie die Organization of the Petroleum Exporting Countries, kurz OPEC, oder Russland) abzuwägen gilt.<sup>138</sup> Bereits heute muss Deutschland Stoffe wie Steinkohle, Uran, Erdgas und Mineralöl zu neunzig bis hundert Prozent importieren.<sup>139</sup> Für den Bezug von Kraftstoffen sollten daher langfristige Verträge mit den Lieferländern geschlossen werden.<sup>140</sup>

Für alle skizzierten Varianten gilt, dass künftig erhebliche Investitionen vor allem in die Antriebe und deren Verteilinfrastruktur sowie in neue Kapazitäten der Energieträgerherstellung erforderlich wären. Auch die Akteursstrukturen würden sich in den meisten Varianten verändern.

<sup>135</sup> Eine „Kostendegression“ tritt auf, wenn durch zunehmende Produktion die Stückkosten eines Produktes sinken.

<sup>136</sup> Vgl. Shell/Wuppertal Institut 2017.

<sup>137</sup> BMVBS 2013.

<sup>138</sup> Im Fall der Biokraftstoffe, vgl. DBFZ 2016.

<sup>139</sup> UBA 2017-3.

<sup>140</sup> acatech/Leopoldina/Akademienunion 2017-2.

### 3.3.4 Der Zukunftspfad „Verlagerung von Transportwegen“

Die Verlagerung der Transportwege zielt darauf ab, große Teile des Transports von der Straße auf Schiene und Wasserstraßen umzustellen. Dies wird durch Kapazitätssteigerungen im Schienennetz und den Ausbau von Verteilzentren zur Förderung des kombinierten Verkehrs möglich. In manchen Güterbereichen kann der Anteil von Binnenschiff und Bahn bei der Verteilung des Transportaufkommens verdoppelt werden.<sup>141</sup> Allerdings kann der Bahngüterverkehr auf der Schiene basierend auf der heutigen Infrastruktur nicht im gleichen Maße die Flächen bedienen und eine flexible Lieferung garantieren. Für die Verlagerung des straßenbasierten Güterverkehrs müssen Schienennetz, Wasserstraßen sowie die zugehörige Infrastruktur deutlich aus- und umgebaut werden.<sup>142</sup> Der Güterverkehr würde dadurch multimodaler, und die Autobahnen wären weniger stark ausgelastet. Der Vorteil dieses Umbaus: Die Klima- und Umweltemissionen wären im verlagerten Gütertransport deutlich niedriger als im Gütertransport auf der Straße.<sup>143</sup>

Mit ambitionierten Maßnahmen kann der Anteil des Schienengüterverkehrs an der gesamten Transportleistung bis 2030 von 18 auf 23 Prozent gesteigert werden. Dadurch könnten die Emissionen des gesamten Gütertransports um 17 Prozent gegenüber 2010 gesenkt werden.<sup>144</sup> Die Verkehrsverlagerung auf die Schiene ist auch in weiteren Klimaschutzszenarien als wesentliche Maßnahme im Güterverkehr vorgesehen, wie die Renewbility III-Studie zeigt. Diese gehen ebenfalls von einem wachsenden Anteil des Schienengüterverkehrs zwischen 20 und 23 Prozent aus.<sup>145</sup> Wie diese Verlagerung genau um-

zusetzen ist, ist bislang noch nicht geklärt. Jedoch können verschiedene Maßnahmen die Transportleistung steigern, ohne das Schienennetz auszubauen. Mit einer Optimierung der Leit- und Sicherungstechnik, der Elektrifizierung von Bypass-Strecken und der Wiedereinrichtung von Nebengleisen können in Deutschland bis zu 72 Milliarden Tonnenkilometer zusätzlich erschlossen werden.<sup>146</sup> Durch den gezielten Netzausbau können weitere 48 Milliarden Tonnenkilometer Verkehrsleistung bis zur absoluten Kapazitätsgrenze erreicht werden.<sup>147</sup> Um die Verlagerung erfolgreich bewerkstelligen zu können, braucht es außerdem bundesweit verteilte Umschlagsanlagen und ein effizienteres Schienenverkehrssystem.<sup>148</sup>

Die Verlagerung kann als zusätzlicher Innovationstreiber für den Schienenverkehr wirken. So kann der Wettbewerb auf der Schiene durch die Trennung von Infrastruktur und Betrieb gestärkt werden. Außerdem können innovative Transportstrukturen (Sharing-Systeme, Kurzzüge etc.) zum Einsatz kommen. Neu zu bewerten wären der Vorrang für den Personenverkehr auf der Schiene sowie die breitere Trennung der Trassen für Personen- und Güterverkehr.

Ferner kann der Güterverkehr per Schiff weiter ausgebaut werden, allerdings in weitaus geringerem Maße als beim Bahnverkehr. Das Umweltbundesamt schätzt, dass sich der Anteil der Binnenschifffahrt am gesamten Güteraufkommen von heute 6,2 Prozent auf 6,5 Prozent bis 2030 entwickeln wird. Das Einsparpotenzial bis 2030 fällt mit vier Prozent gering aus.<sup>149</sup> Binnenschiffe haben allein durch ihre infrastrukturellen Rahmenbedingungen eine Limitierung, denn nicht auf allen Flüssen und Kanälen können

141 Öko-Institut 2014.

142 UBA 2010.

143 UBA 2016-1, S. 120 und 134.

144 UBA 2016-1.

145 Renewbility III 2016, S. 159.

146 Transportleistung des Schienengüterverkehrs 2016 in Deutschland: 116 Milliarden Tonnenkilometer.

147 UBA 2010; Statista 2017.

148 Renewbility III 2016.

149 UBA 2016-1.

Schiffe fahren. Das Potenzial der Binnenschifffahrt ist sowohl bezüglich der Güter (eher Massengüter als spezielle On-Demand-Produkte) als auch der Zuverlässigkeit (Hoch- und Flachwasser, Wetterbedingungen, Havarien etc.) begrenzt. Rund achtzig Prozent des Güterverkehrs in der Binnenschifffahrt werden derzeit auf dem Rhein abgewickelt.<sup>150</sup>

Der Verkehr auf Schiene und Wasser ist bedeutend klimafreundlicher als der Straßengüterverkehr, wenn die Züge mit grünem Strom und die Schiffe mit klimaschonenden Kraftstoffen angetrieben werden. Ähnlich wie im Entwicklungspfad „Alternative Energieträger“ (siehe Kapitel 3.3.3) ist aber auch hier ein Zweitsystem für die letzte Verteilungsstufe notwendig.

Der **kombinierte Verkehr**, also das intermodale Zusammenspiel von Straßen-, Schienen- und Güterverkehr, bietet die Möglichkeit, die starken Belastungen der Straßeninfrastrukturen zu minimieren. Dies erfordert den Ausbau von Umschlagzentren und erhöht somit vorerst die Transportkosten. Für den Güterfernverkehr bietet das dichte Straßennetz gute Anschlussmöglichkeiten an das Schienennetz, sofern zukünftig die Stilllegung von Bahnnetzanschlüssen gestoppt, die Schienenverkehrsknoten und -strecken ausgebaut und die Förderung des kombinierten Verkehrs verstärkt werden.

Ebenso kann der kombinierte Verkehr von den beschriebenen Optimierungsmaßnahmen im Stadtverkehr profitieren, wenn anbieteroffene Umschlagplätze stärker in der Städteplanung berücksichtigt werden. Anbieteroffen bedeutet hier, dass sie unabhängig vom Logistikdienstleister genutzt werden können, um innerstädtische Lieferungen zu bündeln.

Durch die Verkehrsverlagerung ergeben sich verschiedene Pfadabhängigkeiten, die folgendermaßen zusammengefasst werden können.<sup>151</sup>

**Technologie:** Beim Aufbau neuer Infrastrukturen ist aus ökologischen Gründen ein schonender Umgang mit den benötigten Ressourcen anzustreben und ökonomisch geboten. Um neue Infrastrukturen bauen zu können, werden Rohstoffe wie Eisen, Kupfer und Aluminium benötigt. Bei einem starken Ausbau können Ressourcenengpässe und somit Abhängigkeiten entstehen. Wenn die Straßeninfrastrukturen ab 2030 nicht erweitert werden, können jedoch allein über die eingesparten Materialien und Materialvorleistungen bis 2050 jährlich rund 0,8 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> eingespart werden.<sup>152</sup>

**Markt:** Um die Verkehrsinfrastruktur auszubauen und zu modernisieren, sind hohe Investitionen nötig, etwa in intelligente Leitsysteme und den Ausbau verschiedener Verkehrsnetze. Da Innovationen im Schienengüterverkehr meist nach mehreren Jahrzehnten flächendeckend zum Einsatz kommen und ihre Effekte erst bei einer Umrüstung der gesamten Flotte spürbar werden, steigen sowohl die Investitionsleistungen als auch die Vorlaufzeiten. Das heißt, es müssen hohe wirtschaftliche Pfadabhängigkeiten in Kauf genommen werden.<sup>153</sup> Um dies abzuwenden, sollten die Anwendungen vorher sorgfältig getestet werden. Denn Innovationen im Schienengüterverkehr entfalten sich in wachstumsfähigen Nischenanwendungen besser als in Massengutmärkten oder im kombinierten Verkehr.<sup>154</sup>

<sup>151</sup> Zum Nutzerverhalten konnten keine Bewertungen vorgenommen werden.

<sup>152</sup> Vgl. den bislang noch unveröffentlichten Abschlussbericht des Forschungsprojekts RELIS (UBA 2017-4).

<sup>153</sup> Müller et al. 2016.

<sup>154</sup> Müller et al. 2016.

**Governance:** Aus heutiger Sicht stellen vor allem multimodale Verkehrssysteme, die die Vorteile von Straße und Schiene kombinieren, ein für die Verkehrsverlagerung vielversprechendes Segment dar. Fast die halbe Verkehrsleistung entsteht durch Gütertransporte über Entfernungen von mehr als 300 Kilometern. Diese sind prinzipiell dazu geeignet, über weite Strecken auf der Schiene abgewickelt zu werden und den Lkw nur als Zubringer zur Schiene zu nutzen (multimodaler Gütertransport).<sup>155</sup>

Die Förderung des kombinierten Verkehrs erfordert jedoch neuartige politische Maßnahmen, die langfristig wirken müssen. Solche Maßnahmen können auf kombinierte Technologielösungen zwischen Straße und Schiene hinwirken.

Tabelle 2 liefert eine Übersicht über alte und mögliche neue Pfadabhängigkeiten im Güterverkehr und zeigt auf, wie alte Abhängigkeiten überwunden werden könnten.

155 Renewbility III 2016.

Dimension	Alte Pfadabhängigkeiten	Überwindung der alten Pfadabhängigkeiten	Neue Pfadabhängigkeiten
<b>Technologie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Präferenz für den Straßengüterverkehr</li> <li>• Dominanz von Verbrennungsmotoren</li> </ul>	Emissionsarme Antriebe im Straßengüterverkehr (Oberleitungen, Brennstoffzellen, gasförmige Kraftstoffe, synthetische Kraftstoffe/BioFuels)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Starker EE-Ausbau, insbesondere entlang viel genutzter Verkehrswege (zum Beispiel Autobahnen)</li> <li>• Umbau (E-Mobilität, Biokraftstoffe) beziehungsweise Neubau (H<sub>2</sub>) der Infrastruktur</li> <li>• Neuausrichtung der Fahrzeugindustrie (neue Anbieter etc.)</li> </ul>
		Verlagerung auf Schiene und Wasser	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausbau des Schienennetzes und der Wasserstraßen sowie der dazugehörigen Energieversorgung</li> <li>• Beschränkung der Binnenschifffahrt durch Gütermenge und Zuverlässigkeit der Transportwege</li> </ul>
		Innovationen im Bahngüterverkehr (Sharing-Systeme, Kurzzüge etc.); Unterstützung für autonome Frachtfahrzeuge	Bei Schiff- und Bahntransport wird ein Zusatzsystem für die Verteilung zum Endkunden weiterhin benötigt (regenerative Kraftstoffe)
<b>Markt</b>	Logistiksystem ist auf Straßengüterverkehr ausgerichtet, zum Beispiel durch den Bau von Logistikzentren in der Peripherie	Markt für neue Antriebe, neue Kapazitäten der Energieträgerherstellung und deren Verteilinfrastruktur entwickeln	Hohe Startinvestitionen in Infrastruktur und Fahrzeugentwicklung
		Klimafreundliche, alternative Kraftstoffe	Teurere Kraftstoffe durch aufwendigere Herstellung der klimafreundlichen Alternativen
<b>Nutzerverhalten</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe Nachfrage nach Gütern; steigende Transportvolumina</li> <li>• Hoher Transportbedarf für kleinere Chargen und kürzere Strecken</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anpassung an veränderte Infrastruktur (zum Beispiel kürzere Reichweiten)</li> <li>• Multimodale Logistiksysteme</li> </ul>	Restriktives Betankungssystem und reduzierte Reichweiten (während der Umstellung)
<b>Governance</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Begünstigung des Straßentransports</li> <li>• Normierung: Verpackungs- und Transporteinheiten (Container etc.)</li> </ul>	Kurzfristige Instrumente: Geschwindigkeitsbegrenzungen, Einfahrverbote in Innenstädten etc.	Starke Regulationen und Kontrollmechanismen notwendig
		Mittel- und langfristige Instrumente: Begrenzung von Fahrzeugzulassungen, Investitionszuschüsse, Emissionshandel, CO <sub>2</sub> -Steuer	Starke Regulationen und Kontrollmechanismen notwendig
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anpassung von Rahmenbedingungen (zum Beispiel Energiewirtschaftsgesetz); Umsetzung der RED</li> <li>• Internationalisierung durch Abbau von Handelsgrenzen und Zollsystemen</li> </ul>	Ausbau transnationaler Infrastrukturen

Tabelle 2: Alte und mögliche neue Pfadabhängigkeiten im Güterverkehr

## 4 Wie gehen Kommunen mit Pfadabhängigkeiten um? Das Beispiel Flottenumbau

Vor dem Hintergrund der dargestellten Pfadabhängigkeiten und Strategien veranschaulicht dieses Kapitel, wie Kommunen mit Pfadabhängigkeiten umgehen können. Denn die städtischen Mobilitätssysteme der Zukunft sollen nicht nur klimafreundlich, sondern beispielsweise auch bezahlbar, geräuscharm oder für alle zugänglich sein, um den Anspruch an eine lebenswerte Stadt zu erfüllen. Dazu können Maßnahmen wie die Parkraumbewirtschaftung, Verbesserung des ÖPNV-Angebots oder die Stärkung des Fuß- und Radverkehrs beitragen. Eine weitere wichtige Rolle spielen städtische Flotten. Bezüglich des Entscheidungszeitpunktes sind jeweilige Vor- und Nachteile gegeneinander abzuwägen. Am Beispiel des kommunalen Flottenumbaus soll der Konflikt zwischen dem sofortigen Festlegen der Vorgehensweise und dem Aufschieben der Entscheidung aufgezeigt werden.

Viele Städte haben mit Luftverschmutzung, Lärmbelästigung und verstopften Straßen zu kämpfen. Mehrere deutsche Städte sind wegen der Überschreitung von Grenzwerten aufgefordert, ihre Stickstoff- und Feinstaubbelastung zeitnah zu senken. Die Deutsche Umwelthilfe hat gegen 16 Städte Klage eingereicht, das Urteil des Stuttgarter Verwaltungsgerichts vom Juli 2017 macht den Weg frei für dortige Diesel-Fahrverbote ab 2018. Die Europäische Kommission hat Deutschland wegen der Nichteinhaltung von Rechtsvorschriften zur Luftqua-

lität in Städten ermahnt.<sup>156</sup> Dadurch steigt der Handlungsdruck für Kommunen, gegen die Stickstoff- und Feinstaubbelastung vorzugehen. Allerdings sind viele Kommunen durch enge Budgets in ihrem Handlungsspielraum beschränkt. Welche Maßnahmen stehen ihnen zur Verfügung, um nachhaltige Effekte zu erzielen?

Ob sich eine Technologie flächendeckend durchsetzt, wird meist zunächst auf internationaler und erst dann auf nationaler und regionaler Ebene entschieden. Dies wird durch klimapolitische Instrumente wie CO<sub>2</sub>-Grenzwerte, eine CO<sub>2</sub>-Bepreisung oder Quotenregelungen gesteuert, die vor allem den Privatverkehr beeinflussen. Denn der motorisierte Individualverkehr trägt mit 79 Prozent zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen im Personenverkehr bei.<sup>157</sup>

Jedoch stehen auch den Kommunen wirkungsvolle Instrumente zur Verfügung, um lokale Emissionen zu reduzieren. Dazu zählen sofortige Maßnahmen wie eine Parkraumbewirtschaftung, Geschwindigkeitsbegrenzungen oder Fahrverbote für schadstoffreiche Dieselfahrzeuge sowie mittelfristig wirksame Schritte wie die Umstellung der städtischen Fuhrparks auf klimafreundliche Fahrzeuge. Auch langfristige Maßnahmen wie eine verkehrsvermeidende Siedlungsentwicklung sind wichtig und zum Erfahrungsaustausch zwischen den Kommunen sinnvoll. Kommunen können diese und weitere Instrumente nutzen, um den Um-

<sup>156</sup> EC 2014. Die zugrunde liegende Richtlinie zur Luftqualität stammt aus dem Jahr 2008 (Richtlinie 2008/50/EG).

<sup>157</sup> Statistisches Bundesamt 2013.

bau der urbanen Mobilität voranzutreiben.<sup>158</sup> Dabei müssen manche Entscheidungen aufgrund der langen Vorlaufzeiten einzelner Maßnahmen bereits jetzt auf den Weg gebracht werden. Für die vorliegende Fragestellung ist also nicht der Zeitpunkt der Umsetzung ausschlaggebend, sondern vielmehr der Zeitpunkt der Entscheidung und das hiermit verbundene Maß der Festlegung.

Insbesondere bei der Integration lokaler Infrastrukturen in überregionale Systeme sind finanzielle, aber auch organisatorische Schwierigkeiten zu erwarten, etwa durch den Umbau von Betriebshöfen oder neu benötigtes Wissen zur Reparatur von Elektromotoren. Generell besteht damit die Gefahr, dass kurzfristig – angetrieben durch den aktuellen Handlungsdruck – ein naheliegender beziehungsweise einfacher Pfad eingeschlagen wird, obwohl sich mittelfristig bessere Optionen ergeben könnten. Ein Beispiel ist die Implementierung einer Erdgasmobilität: Dieser Pfad ist zunächst relativ günstig und einfach umsetzbar, verbessert den Klimaschutz aber nur bedingt.

Vereinfacht dargestellt haben Kommunen die Möglichkeit, Entscheidungen zeitnah zu treffen und sich damit schon jetzt auf einen Pfad festzulegen – unter Umständen aber mit der Folge, später nur schwer Anpassungen vornehmen zu können. Oder die Kommunen wenden anpassungsfähige Strategien an, mit denen heutige Entscheidungen später nachjustiert werden können. Diese Maßnahmen sind jedoch unter Umständen weniger wirkungsvoll. Was dieses Dilemma praktisch bedeutet, wird für beide Strategien am Beispiel des Flottenumbaus dargestellt.

#### 4.1 Sofortige Flottenumstellung

Kommunen können ihre Flotten auf unterschiedlichen Wegen umrüsten. So können sie als Eigentümer urbaner Flotten (insbesondere Fahrzeuge des ÖPNV, aber auch Versorgungs-, Entsorgungs- und Rettungswagen) selbst über die Antriebe ihrer Fahrzeuge und den Ausbau der notwendigen Infrastruktur entscheiden. Wenn sich Kommunen darauf festlegen, ihre Flotten sofort auf umweltfreundliche Antriebe umzustellen, schließen sie damit die Möglichkeit aus, Erfahrungswerte zu dieser oder anderen Technologien in ihre Entscheidung miteinzubeziehen. Die Umsetzung kann sofort oder stufenweise erfolgen, wie im Fall der Berliner E-Bus-Linie 204 oder der Hamburger Brennstoffzellenbusse. Auch hier können Kommunen als Initiatoren für eine Umstellung privater Flotten wirken, indem sie gemeinsam mit privaten Flottenbetreibern lokale Betreibergemeinschaften für Infrastrukturen ins Leben rufen.<sup>159</sup>

Allerdings lag die Anzahl der zurückgelegten Wege mit öffentlichen Verkehrsmitteln im Jahr 2012 nur bei gut zwölf Prozent,<sup>160</sup> während mit dem motorisierten Individualverkehr 54 Prozent der Strecken bewältigt wurden. Daher können Kommunen zeitnah Rahmenbedingungen setzen, um emissionsarme Antriebe und Kraftstoffe gegenüber konventionellen Motoren zu begünstigen. Sie könnten etwa für Autos mit Verbrennungsmotor in bestimmten Stadtbereichen Zufahrtsbeschränkungen auflegen oder Gebühren erheben, die Nutzung öffentlicher Flächen wie Lieferzonen und Parkplätze beschränken und gezielt Lade- oder Betankungsanlagen für neue Technologien errichten. Zur Unterstützung solcher kommunalen Aktivitäten schlägt

<sup>158</sup> Einen Überblick über die kurz- und langfristigen Maßnahmen für Kommunen fasst das Umweltbundesamt zusammen (UBA 2017-5). Eine weitere Studie gibt konkrete Empfehlungen für kommunale Gesetzesänderungen zum Thema Geschwindigkeitsbegrenzungen im städtischen Bereich (UBA 2016-3).

<sup>159</sup> Vgl. Masterplan 100 % Klimaschutz Osnabrück (Stadt Osnabrück 2014).

<sup>160</sup> KIT 2015, S. 34.

die Nationale Plattform Elektromobilität Sonderabschreibungen für (Flotten-) Fahrzeuge mit Elektroantrieb vor.<sup>161</sup>

Stellen Kommunen ihre Flotte auf ein alternatives Antriebssystem um, legen sie sich meist nicht nur auf eine spezifische Technologie, sondern auch auf entsprechende Infrastrukturen fest. Aufgrund der hohen Investitionskosten haben solche Entscheidungen gravierende Auswirkungen. Gleichzeitig sind sie durch Sachzwänge, wie enge Budgets, in ihrer Entscheidungsfreiheit eingeschränkt. Auch die lokalen Verwaltungen sind wichtige Akteure, um konkrete Änderungen umzusetzen. Das oberste Gut von Verwaltungen ist dabei, Rechtssicherheit zu schaffen.<sup>162</sup>

Die Strategie des sofortigen Festlegens hat den Vorteil, schnell einen unmittelbaren Beitrag zum Klimaschutz leisten zu können. Sie schafft außerdem Planungssicherheit für private Investoren wie auch für die Kommune selbst. Die Kommune begünstigt damit einen bestimmten Pfad proaktiv. Allerdings werden mit der Strategie des sofortigen Festlegens spezielle Pfadabhängigkeiten in Kauf genommen. Im Fall des Flottenumbaus wäre dies die relativ große Investition in neue Fahrzeuge, die anschließend nur schwer wieder rückgängig zu machen wäre – die Kommune geht hier ein finanzielles Risiko ein.

Die Strategie des sofortigen Festlegens impliziert die Schließung des Entscheidungsprozesses. Um eine breite Unterstützung zu gewährleisten, ist eine transparente, möglichst unabhängige Überprüfung des eingeschlagenen Pfades wichtig. Daher sollten die Kommunen mit anderen Städten kooperieren, wenn sie sich für eine Technologie entscheiden wollen. Denkbar sind Verkehrspartnerschaften oder gemeinsame Pilotprojekte, um sich über Best-Practice-Beispiele auszutauschen.

## 4.2 Erfahrungswerte sammeln

Wenn sich eine Kommune nicht sofort auf eine Antriebsart für ihre Flotte festlegen will, kann sie sich für anpassungsfähige Strategien entscheiden. Dies ist möglich, weil die Lade- beziehungsweise Betankungsinfrastrukturen für Flotten im Gegensatz zum Individualverkehr nicht unbedingt flächendeckend installiert werden müssen. Vielmehr können sie punktuell auf Betriebshöfen oder an Knotenpunkten aufgebaut werden. Auch hier ist der Zeitpunkt, zu dem Rahmenbedingungen – wie die Begünstigung emissionsarmer Fahrzeuge – festgelegt werden, eine mögliche Stellschraube. Diese kann etwa genutzt werden, um im Sinne eines „aktiven Aufschiebens“ mit einer kommunalen Entscheidung abzuwarten, bis eine nationale Regelung getroffen ist oder Kostenminderungen der Technologien spürbar sind. In Deutschland ermöglicht beispielsweise das Elektromobilitätsgesetz den Kommunen, elektrisch betriebenen Fahrzeugen im öffentlichen Verkehr Sonderrechte einzuräumen. Dazu zählen Privilegierungen im Straßenverkehr, zum Beispiel beim Parken oder bei der Nutzung von Busspuren.

Darüber hinaus gibt es drei weitere Ansatzpunkte für anpassungsfähige Strategien:

**Erstens** können Betreiber ihre Flotten sukzessive umstellen, es besteht daher die Möglichkeit des sequenziellen Entscheidens. Die Kommune kann nach jedem Entwicklungsschritt neu entscheiden: nachdem ein Technologiepfad allgemein bewertet wurde, die Auswirkungen auf die Kommune simuliert wurden oder ein Testbetrieb durchgeführt wurde. Dies erfordert eine wiederkehrende und unabhängige Überprüfung sowie eine transparente Kommunikation. **Zweitens** ist es möglich, dass die Kommune gezielt die Erprobung unterschiedlicher Antriebstechniken im Stadtgebiet fördert, sofern das Gebiet hinreichend groß und die finanziellen Ressourcen vorhanden sind. **Drittens** können regional unabhängige Flotten mit verschiedenen Antriebstechniken ausgerüs-

<sup>161</sup> NPE 2014.

<sup>162</sup> HUMBOLDT-VIADRINA Governance Platform 2017.

tet werden. So können verschiedene Städte bewusst auf unterschiedliche Antriebstechniken im ÖPNV setzen und ihre Erfahrungen untereinander austauschen. Diese Strategie wird bereits praktiziert. So testet die Stadt Hamburg Brennstoffzellenbusse, während Berlin eine Elektrobuslinie ins Leben gerufen hat.<sup>163</sup> Auch in Regensburg und auf Sylt fahren bereits Elektrobusse. Berlin, Hamburg und Köln wollen sich darüber austauschen, wie sie bei der Beschaffung von weiteren Elektrobussen zusammenarbeiten können.<sup>164</sup> Der wechselseitige Lerneffekt könnte eine Hilfestellung für kleinere Kommunen sein: Haben sie nicht genügend Ressourcen für eigene Pilotprojekte und Probetriebe, könnten sie die Entscheidung für eine der Antriebsalternativen aktiv aufschieben, indem sie zunächst abwarten und das in den größeren Kommunen generierte Wissen nutzen.

Der Austausch von Erfahrung und Wissen ist für die Verbreitung alternativer Antriebe essenziell. Kommunen können dies gezielt unterstützen, indem sie für ihre Stadt oder Gemeinde einen solchen Erfahrungsaustausch unterschiedlicher Akteure organisieren und anregen. Dies hilft dabei, Handlungsalternativen nach ihrer Wirkung zu priorisieren und Aktivitäten zu forcieren, die besonders auf den Klimaschutz Wert legen. Darüber hinaus können sich Kommunen national oder international mit anderen Kommunen vernetzen. Derzeit wird angestrebt, das EU-Programm der europäischen Umwelthauptstadt stärker hierfür zu nutzen, indem sich zunächst die ausgezeichneten Umwelthauptstädte untereinander vernetzen, dann aber eine sukzessive Öffnung für andere Städte erfolgt.<sup>165</sup>

Anpassungsfähige Strategien haben den Vorteil, dass einmal getroffene Entscheidungen nachjustiert werden können.

Entscheidend für ihren Erfolg ist aber, dass ein systematisches Lernen möglich ist. Damit kommt der Koordination eine zentrale Rolle zu: Kooperationen müssen sinnvoll gesteuert werden. Zudem können neben den anpassungsfähigen Strategien bei der Antriebsauswahl bereits festgelegte Klimaschutzmaßnahmen wie die Parkraumbewirtschaftung oder die Förderung von ÖPNV und Fahrradverkehr eingesetzt werden.

Nachteilig kann bei anpassungsfähigen Strategien die verzögerte und gegebenenfalls auch verminderte Wirkung der Maßnahmen sein. Diese Gefahr besteht besonders beim aktiven Aufschieben, da die positiven Effekte erst später wirksam werden können. Zudem drohen Verfahren aufgrund nicht eingehaltener Vorschriften zur Luftqualität. Sollte eine Kommune also Entscheidungen über Rahmenbedingungen oder die Umstellung der eigenen Flotten aufschieben wollen, muss sie bewusst die damit einhergehenden Risiken abwägen. Auch haben anpassungsfähige Strategien oft den Nachteil, dass sie parallele Pfade lange offenhalten und sich dadurch Doppelstrukturen bilden können, was die Kosten in die Höhe treibt.

Durch lokale Rahmenbedingungen können Kommunen direkt auf den lokalen Verkehr einwirken. Um jedoch den außerstädtischen Verkehr zu beeinflussen und die Integration mit dem urbanen Verkehr sicherzustellen, sind überregional abgestimmte Rahmenbedingungen unabdingbar. Auch staatliche Fördermaßnahmen können das Investitionsrisiko für Kommunen erheblich senken. Für beide Maßnahmen ist eine enge Abstimmung mit dem Bund nötig.

163 Hochbahn 2014; BVG 2015.

164 Hamburger Hochbahn 2017.

165 Für weitere Informationen zum Programm siehe EC 2017.



## 5 Fazit

In dieser Analyse wurde die grundsätzliche Problematik von Pfadabhängigkeiten im Energiesystem beleuchtet. Das Mobilitätssystem stand dabei beispielhaft im Mittelpunkt. Pfadabhängigkeiten lassen sich gut am Beispiel Infrastruktur veranschaulichen: Durch Entscheidungen im Verkehrsbereich werden künftige Entwicklungen maßgeblich und langfristig festgelegt. Einmal errichtet, können Infrastrukturen den Handlungsspielraum von Wirtschaft, Politik und der Verbraucherseite zum Teil für Jahrzehnte einschränken. Dabei geht es nicht nur um technische Pfadabhängigkeiten – sie können auch politischer, ökonomischer und sozialer Natur sein. Die Ausgangsdiagnose dieser Analyse war, dass dieser Sachverhalt in aktuellen Debatten über die Energiewende nicht systematisch berücksichtigt wird.

Diese Analyse will nicht die Botschaft vermitteln, man müsse Pfadabhängigkeiten grundsätzlich vermeiden; das wäre in der Praxis auch gar nicht möglich. Unterstellt man einen starken Handlungsdruck und ist die Entscheidung mit hohen Zusatzkosten verbunden, wäre aber auch das Offenhalten aller verfügbaren Optionen nicht sinnvoll. Eine reflektierte Entscheidungsvorbereitung und -findung gebietet vor diesem Hintergrund, sich frühzeitig mit den mit bestimmten Optionen verbundenen Pfadabhängigkeiten zu befassen, damit die Entwicklung nicht blind in sie hineinführt. Jede Festlegung auf einen bestimmten Pfad ist mit der Herausforderung verbunden, sich an neues Wissen oder neue gesellschaftliche Präferenzen hinreichend anzupassen.

Es gibt verschiedene Ursachen und Wirkmechanismen, die Pfadabhängigkeiten begünstigen können, etwa versunkene Kosten, Netzwerkeffekte, Skaleneffekte oder sich selbst stabilisierende Erwartungsmuster („Pfadabhängigkeit in den Köpfen“). Diese frühzeitig zu erkennen, wird in einem komplexen soziotechnischen System wie dem Energie- und Mobilitätssektor zur Herausforderung: Entscheidungen müssen stets unter unsicheren Bedingungen getroffen werden. Die Frage nach „klugem Handeln“ angesichts von Pfadabhängigkeiten zeigt, dass es zwischen dem sofortigen Festlegen und dem Offenhalten auf unbestimmte Zeit zahlreiche Zwischenlösungen gibt, die eine Möglichkeit zur Risikominderung darstellen. Die entscheidende Frage ist, wann was festgelegt werden muss und welches Wissen vorliegen sollte, damit eine informierte und reflektierte Entscheidung darüber überhaupt möglich ist. Das Gegenteil wäre Blindflug.

Bezogen auf die Herausforderungen im Mobilitätssystem identifiziert die Analyse mögliche neue Pfadabhängigkeiten in der urbanen Mobilität und im Güterverkehr. Beide Bereiche sind stark durch Abhängigkeiten aus der Vergangenheit geprägt: Die heute vielerorts vorherrschende autogerechte Stadt und die primär Lkw-basierte Logistik sind auf zentrale Entwicklungen und Entscheidungen in den 1950er und 60er Jahren zurückzuführen. Sie erschweren jedoch den Aufbau klimaverträglicher Mobilitätsstrukturen. Zur Überwindung dieser „alten Pfadabhängigkeiten“ können emissionsarme Antriebe gefördert, der gemeinschaftliche Verkehr gestärkt oder der Güterverkehr

verlagert werden. Dies bringt jedoch mitunter neue Abhängigkeiten mit sich: Die Elektrifizierung des Verkehrssystems impliziert beispielsweise, dass erneuerbare Energien massiv ausgebaut und dafür genügend geeignete Flächen bereitgestellt werden müssen. Ein klimafreundlicher Güterverkehr setzt möglicherweise den Aufbau neuer Infrastrukturen wie Oberleitungssysteme, LNG-Tankstellen oder Power-to-Fuels-Strukturen voraus. Zusätzlich müssen solche Veränderungen innerhalb Europas abgestimmt werden.

Am Beispiel des Flottenumbaus von Kommunen werden die Entscheidungsstrategien besonders deutlich: Stellen Städte und Gemeinden ihre Flotten sofort auf umweltfreundliche Antriebe um, können sie einen unmittelbaren Beitrag zum Klimaschutz und zur Verbesserung der Luftqualität leisten. Jedoch gehen sie dadurch möglicherweise ein hohes finanzielles Risiko ein. Auch regional unterschiedliche Antriebstechnologien könnten die Folge sein, wenn jede Kommune ihren eigenen Weg geht. Sie haben auf der anderen Seite die Möglichkeit, später oder auch sequenziell zu entscheiden, etwa zunächst Pilot- und Demonstrationsprojekte umzusetzen und in Kooperation mit anderen Kommunen Erfahrungswerte zu sammeln. Dies senkt womöglich die Anschaffungskosten, erhöht jedoch Tag für Tag den Handlungsdruck, um gegen die drängenden Klima- und Umweltprobleme vorzugehen.

Die vorliegende Analyse möchte die Diskussion über die Relevanz von Pfadabhängigkeiten und ihre Rolle in Entscheidungsprozessen der Energiewende anstoßen und voranbringen, kann diese Debatte aber keineswegs abschließen. Um die in dieser Arbeit entwickelten Ideen fortzuführen, sollten daher weitere systematische Analysen zu Infrastrukturentscheidungen im Energie- und Mobilitätssystem erstellt werden. Tiefergehende Betrachtungen sind auch zu den

Themenbereichen erforderlich, die hier nur ansatzweise untersucht werden konnten. Auf dieser Basis sollte weitere Forschung zur „reflexiven Governance“<sup>166</sup> die Umsetzung der Energiewende begleiten. Die Bedeutung von Pfadabhängigkeiten zu erkennen und die Fragen nach einem klugen Umgang mit ihnen zu stellen, sollte ein wesentlicher Bestandteil politischer Entscheidungsprozesse werden. Im Kontext der Energiewende spielen Pfadabhängigkeiten etwa auch im Zuge der stärkeren Vernetzung der Sektoren eine elementare Rolle. Dies geschieht etwa, wenn einerseits ein stark elektrifizierter Verkehr den Ausbau der erneuerbaren Energien erfordert und andererseits diesen vom Stromsektor abhängig macht. Darüber hinaus bietet es sich an, die hier begonnene Analyse auch auf andere gesellschaftliche Transformationsprozesse jenseits der Energiewende zu beziehen.

Die frühzeitige und transparente Beschäftigung mit möglichen Pfadabhängigkeiten hat auch immer eine partizipative und demokratietheoretische Seite. Denn unerkannte oder nicht offen thematisierte Pfadabhängigkeiten führen immer wieder zu Sachzwängen, denen sich eine demokratische Öffentlichkeit ausgesetzt sieht. Vor diesem Hintergrund bedarf es einer Art Frühwarnsystem für Pfadabhängigkeiten und eines Transfers komplexer Entscheidungsprozesse für den gesellschaftlichen Diskurs. Dabei könnte es sich um eine Einrichtung handeln, die den expliziten Auftrag hat, die öffentliche Aufmerksamkeit für entstehende Risiken der Pfadabhängigkeit zu schaffen und die Governance kritisch zu begleiten. Auch eigens eingerichtete Vereine nach dem Muster der Verbraucherschutzverbände oder stärker expertenbasierte Kommissionen nach dem Vorbild eines Kartellamtes sind denkbar.

<sup>166</sup> „Reflexive Governance“ wird notwendig, sobald ein Markt- oder Demokratiever sagen diagnostiziert wird. Kommissionen oder Interessenverbände sind Institutionen, die dem entgegenwirken können (vgl. Voß et al. 2006).

Es liegt im Interesse demokratischer Gesellschaften, Gestaltungsräume möglichst offen zu halten – und wo sie aus guten Gründen geschlossen werden, zum Beispiel bei neuen Infrastrukturen im Bereich der urbanen Mobilität oder des Güterverkehrs, sollte dies in gesellschaftlichem Einvernehmen und mit hoher Transparenz erfolgen. Das bewusste Eingehen von Pfadabhängigkeiten sollte daher grundsätzlich ein öffentliches Thema sein und durch partizipative Mechanismen begleitet werden.

## Literatur

### Aberle 2009

Aberle, G.: *Transportwirtschaft: Einzelwirtschaftliche und gesamtwirtschaftliche Grundlagen*, München: De Gruyter Oldenbourg Wissenschaftsverlag 2009.

### acatech 2012

acatech (Hrsg.): *Menschen und Güter bewegen. Integrative Entwicklung von Mobilität und Logistik für mehr Lebensqualität und Wohlstand*, Heidelberg: Springer-Verlag 2012.

### acatech/Leopoldina/Akademienunion 2015-1

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V./Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V./Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e. V. (Hrsg.): *Die Energiewende europäisch integrieren. Neue Gestaltungsmöglichkeiten für die gemeinsame Energie- und Klimapolitik* (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), 2015.

### acatech/Leopoldina/Akademienunion 2015-2

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V./Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V./Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e. V. (Hrsg.): *Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050. Stabilität im Zeitalter der erneuerbaren Energien* (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), 2015.

### acatech/Leopoldina/Akademienunion 2017-1

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V./Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V./Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e. V. (Hrsg.): *»Sektorkopplung«. – Optionen für die nächste Phase der Energiewende* (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), 2017.

### acatech/Leopoldina/Akademienunion 2017-2

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V./Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V./Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e. V. (Hrsg.): *Rohstoffe für die Energiewende. Wege zu einer sicheren und nachhaltigen Versorgung* (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), 2017.

### AGEB 2017

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen: *Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland 1990–2016*, Berlin 2017.

### Agora Verkehrswende 2017

Agora Verkehrswende: *Mit der Verkehrswende die Mobilität von morgen sichern. 12 Thesen zur Verkehrswende*, Berlin 2017.

### Arrow 1962

Arrow, K. J.: „The Economic Implications of Learning by Doing“. In: *The Review of Economic Studies*, 29, 1962, S. 155–173.

### Arthur 1988

Arthur, W. B.: „Competing Technologies: An Overview“. In: Dosi, G. (Hrsg.): *Technical Change and Economic Theory*, London: Pinter 1988, S. 590–608.

### Arthur 1989

Arthur, W. B.: „Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-In by Historical Events“. In: *The Economic Journal*, 99, 1989, S. 116.

### Arthur 1994

Arthur, W. B.: *Increasing Returns and Path Dependence in the Economy*, Ann Arbor: University of Michigan Press 1994.

### Ausfelder et al. 2017

Ausfelder, F./Drake, F.-D./Erlach, B./Fischedick, M./Henning, H.-M./Kost, C./Münch, W./Pittel, K./Rehtanz, C./Sauer, J./Schätzler, K./Stephanos, C./Themann, M./Umbach, E./Wagemann, K./Wagner, H.-J./Wagner, U.: *„Sektorkopplung“ – Untersuchungen und Überlegungen zur Optimierung eines integrierten Energiesystems* (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), 2017.

### Bassanini/Dosi 2001

Bassanini, A. P./Dosi, G.: „When and How Human Will Can Twist the Arms of Clio: An Essay on Path Dependence in a World of Irreversibilities“. In: Garud, R./Karnøe, P. (Hrsg.): *Path Dependence and Creation*, Mahwah, NJ: Psychology Press 2001, S. 41–68.

### Beck et al. 2012

Beck, S./Niewöhner, J./Sørensen, E.: *Science and Technology Studies: Eine sozialanthropologische Einführung*, Bielefeld: Transkript 2012.

### Becker et al. 1999

Becker, U./Gerike, R./Völlings, A.: *Gesellschaftliche Ziele von und für Verkehr*, Heft 1 der Schriftenreihe des Instituts für Verkehr und Umwelt e. V. (DIVU), Dresden: 1999.

### Beckmann et al. 2006

Beckmann, K. J./Chlond, B./Kuhnimhof, T./von der Ruhren, S./Zumkeller, D.: „Multimodale Verkehrsmittelnutzer im Alltagsverkehr. Zukunftsperspektive für den ÖV?“. In: *Internationales Verkehrswesen*, 58: 4, 2006, S. 138–145.

### Benz 2006

Benz, A.: *Politik im Mehrebenensystem*, Wiesbaden: Verlag für Sozialwissenschaften 2006.

### Bernhofen et al. 2013

Bernhofen, D. M./El-Sahli, Z./Kneller, R.: „Estimating the Effects of the Container Revolution on World Trade“. In: *Center for Economic Studies and the Ifo Institute*, Working Paper 4136, 2013.

**Beyer 2005**

Beyer, J.: „Pfadabhängigkeit ist nicht gleich Pfadabhängigkeit! Wider den impliziten Konservatismus eines gängigen Konzepts“. In: *Zeitschrift für Soziologie*, 34, 2005, S. 5–21.

**Beyer 2010**

Beyer, J.: „The Same or Not the Same – On the Variety of Mechanisms of Path Dependence“. In: *International Journal of Social Science*, 5: 1, 2010, 1–11.

**BINE Informationsdienst 2017**

BINE Informationsdienst: Eine Millionen E-Autos sind machbar – Interview mit Prof. Dr. Martin Winter, 14.03.2017. URL: <http://www.bine.info/nc/newsuebersicht/news/eine-millionen-e-autos-sind-bis-2025-machbar.pdf> [Stand: 08.06.2017].

**Blanchard/Gali 2007**

Blanchard, O. J./Gali J.: „The Macroeconomic Effects of Oil Shocks: Why Are the 2000's so Different from the 1970's?“. In: *National Bureau of Economic Research, Working Paper 13368*, 2007, S. 2–77. URL: <http://www.nber.org/papers/w13368.pdf> [Stand: 22.06.2017].

**BMUB 2016-1**

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Projektionsbericht der Bundesregierung 2015. Zusammenfassung der Ergebnisse, 2016. URL: [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/projektionsbericht\\_2015\\_zusammenfassung\\_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/projektionsbericht_2015_zusammenfassung_bf.pdf) [Stand: 22.06.2017].

**BMUB 2016-2**

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung, 2016. URL: [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan\\_2050\\_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf) [Stand: 22.06.2017].

**BMUB 2016-3**

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Klimaschutzbericht 2016. Zum Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 der Bundesregierung, 2016. URL: [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pools/Broschueren/klimaschutzbericht\\_2016\\_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Broschueren/klimaschutzbericht_2016_bf.pdf) [Stand: 22.06.2017].

**BMUB 2017**

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Feldversuche Oberleitungs-LKW in Hessen und Schleswig-Holstein, 2017. URL: [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Verkehr/feldversuche\\_o\\_lkw\\_bf.PDF](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Verkehr/feldversuche_o_lkw_bf.PDF) [Stand: 08.06.2017].

**BMVBS 2012**

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): Nationaler Radverkehrsplan 2020. Den Radverkehr gemeinsam entwickeln, Berlin 2012.

**BMVBS 2013**

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS). Energie auf neuen Wegen, 2013. URL: [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/mks-strategie-final.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/mks-strategie-final.pdf?__blob=publicationFile) [Stand: 22.06.2017].

**BMVI 2014-1**

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI): Verkehrsprognose 2030, 2014. URL: [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/verkehrsprognose-2030-praesentation.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/verkehrsprognose-2030-praesentation.pdf?__blob=publicationFile) [Stand: 22.06.2017].

**BMVI 2014-2**

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI): Verkehrsverflechtungsprognose 2030. Zusammenfassung der Ergebnisse, 2014. URL: [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/verkehrsverflechtungsprognose-2030-zusammenfassung-los-3.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/verkehrsverflechtungsprognose-2030-zusammenfassung-los-3.pdf?__blob=publicationFile) [Stand: 22.06.2017].

**BMVI 2014-3**

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI): Aktuelles. Mobilität. URL: <http://www.bmvi.de/DE/Themen/Mobilitaet/Mobilitaets-Kraftstoffstrategie/Aktuelles/aktuelles.html> [Stand: 02.06.2017].

**BMVI 2016**

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI): Nationaler Strategierahmen über den Ausbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe. Als Teil der Umsetzung der Richtlinie 2014/94/EU, 2016. URL: [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/mks-nationaler-strategierahmen-afid.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/mks-nationaler-strategierahmen-afid.pdf?__blob=publicationFile) [Stand: 22.06.2017].

**BMVI 2017**

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI): Lang-Lkw fahren dauerhaft auf geeigneten Strecken. Überführung des Feldversuchs in den streckenbezogenen Regelbetrieb (Artikel 2017). URL: <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/LA/moegliche-fahrzeuge-und-fahrzeugkombinationen-mit-ueberlaenge.html> [Stand: 02.06.2017].

**BMVI/BMUB 2016**

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)/Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (Hrsg.): Statusbericht 2015/16 Hybrid- und Elektrobus-Projekte in Deutschland, 2016. URL: [https://www.now-gmbh.de/content/7-service/4-publicationen/1-begleitforschung/now\\_abschlussbericht\\_bus\\_web.pdf](https://www.now-gmbh.de/content/7-service/4-publicationen/1-begleitforschung/now_abschlussbericht_bus_web.pdf) [Stand: 15.06.2017].

**BMWi 2016**

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): Die Energie der Zukunft. Berichtsjahr 2015. (Fünfter Monitoring-Bericht zur Energiewende), 2016. URL: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fuenfter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=24](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fuenfter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft.pdf?__blob=publicationFile&v=24) [Stand: 22.06.2017].

**BMWi et al. 2015**

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)/  
Verband der Automobilindustrie/Industriegewerkschaft  
Metall (IG Metall): Branchendialog mit der Fahrzeu-  
gindustrie. Gemeinsame Erklärung der Beteiligten am  
Spitzengespräch am 1. Dezember 2015, 2015. URL:  
[https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/  
branchendialog-mit-der-fahrzeugindustrie-gemein-  
same-erklaerung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/branchendialog-mit-der-fahrzeugindustrie-gemeinsame-erklaerung.pdf?__blob=publicationFile&v=4)  
[Stand: 08.06.2017].

**Borup et al. 2006**

Borup, M./Brown, N./Konrad, K./van Lente, H.: „The  
Sociology of Expectations in Science and Technology“.  
In: *Technology Analysis & Strategic Management*, 18,  
2006, S. 285–298.

**Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung 2002**

Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung: *Bericht zur  
Inanspruchnahme der Eigenheimzulage in den Jahren  
1996–2000*, Bonn 2002.

**Bundesrat 2016**

Bundesrat: *Beschluss über die Mitteilung der Kommission  
an das Europäische Parlament, den Rat, den Euro-  
päischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den  
Ausschuss der Regionen: Eine europäische Strategie für  
emissionsarme Mobilität*, Drs. 387/16 vom 23.09.2016,  
Köln: Bundesanzeiger Verlag GmbH 2016.

**Bundesregierung 2010**

Bundesregierung: Energiekonzept für eine umweltschonende,  
zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung,  
2010. URL: [https://www.bundesregierung.de/Content/  
Archiv/DE/Archiv17/\\_Anlagen/2012/02/energiekon-  
zept-final.pdf;jsessionid=5D8E76D7A0EE255A0C1D-  
66292BA08A53.s2t1?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.bundesregierung.de/Content/Archiv/DE/Archiv17/_Anlagen/2012/02/energiekonzept-final.pdf;jsessionid=5D8E76D7A0EE255A0C1D-66292BA08A53.s2t1?__blob=publicationFile&v=5)  
[Stand: 16.06.2017].

**Bundesregierung 2017**

Bundesregierung: Entwurf eines Gesetzes zur Änderung  
des Straßenverkehrsgesetzes, 2017. URL: [http://dip21.  
bundestag.de/dip21/btd/18/113/1811300.pdf](http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/18/113/1811300.pdf) [Stand:  
20.06.2017].

**Bundesverband Binnenschifffahrt 2016**

Bundesverband Binnenschifffahrt: Das System Wasserstraße,  
2016. URL: [http://binnenschiff.de/content/wasserstrasse/  
/](http://binnenschiff.de/content/wasserstrasse/) [Stand: 08.06.2017].

**Bundesverband Carsharing 2017**

Bundesverband Carsharing: Datenblatt Carsharing in  
Deutschland, 2016. URL: [https://carsharing.de/sites/  
default/files/uploads/datenblatt\\_carsharing\\_in\\_  
deutschland\\_stand\\_01.01.2017.pdf](https://carsharing.de/sites/default/files/uploads/datenblatt_carsharing_in_deutschland_stand_01.01.2017.pdf) [Stand: 15.06.2017].

**BVG 2015**

Berliner Verkehrsbetriebe (BVG): Der E-Bus Berlin auf der  
Linie 204. Berlins erste vollelektrische Buslinie mit  
Induktionstechnologie – leise, kabellos geladen und  
abgasfrei, 2015. URL: [http://www.bvg.de/images/con-  
tent/meldungen/2015/150707\\_E-BusFAQ.PDF](http://www.bvg.de/images/content/meldungen/2015/150707_E-BusFAQ.PDF) [Stand:  
08.06.2017].

**BVL 2017-1**

Bundesvereinigung Logistik (BVL): *Digitalisierung in der  
Logistik. Antworten auf Fragen aus der Unternehmens-  
spraxis*, Bremen 2017.

**BVL 2017-2**

Bundesvereinigung Logistik (BVL): Trends und Strategien in  
der Logistik und Supply Chain Management – Chancen  
der digitalen Transformation, 2008. URL: [https://www.  
horvath-partners.com/fileadmin/horvath-partners.  
com/assets/05\\_Media\\_Center/PDFs/deutsch/170321\\_  
BVL-Studie\\_Logistiktrends.pdf](https://www.horvath-partners.com/fileadmin/horvath-partners.com/assets/05_Media_Center/PDFs/deutsch/170321_BVL-Studie_Logistiktrends.pdf) [Stand: 22.06.2017].

**Canzler/Knie 2016**

Canzler, W./Knie, A.: *Die digitale Mobilitätsrevolution: vom  
Ende des Verkehrs, wie wir ihn kannten*, München:  
oekom Verlag 2016.

**David 1985**

David, Paul A.: „Clio and the Economics of QWERTY“.  
In: *The American Economic Review*, 75, 1985, S. 332–337.

**DBFZ 2016**

Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ): *Monitoring  
Biotkraftstoffsektor*, 3. Auflage, Leipzig 2016.

**DECHEMA 2017**

DECHEMA – Gesellschaft für Chemische Technik und Bio-  
technologie e. V.: *E-Fuels – Mehr als eine Option*, White  
Paper, Frankfurt a. M. 2017.

**Deffner et al. 2014**

Deffner, J./Heffter, T./Götz, K.: „Multioptionalität auf  
dem Vormarsch? Veränderte Mobilitätswünsche und  
technische Innovationen als neue Potenziale für einen  
multimodalen Öffentlichen Verkehr“. In: O. Schwedes  
(Hrsg.): *Öffentliche Mobilität. Perspektiven für eine  
nachhaltige Verkehrsentwicklung*. Wiesbaden: Springer  
VS 2014, S. 201–227.

**DENA 2016**

Deutsche Energieagentur (DENA): Nachhaltige Mobilität mit  
Erdgas und Biomethan: Marktentwicklung 2015/2016.  
4. Fortschrittsbericht, 2016. URL: [https://shop.dena.  
de/fileadmin/denashop/media/Downloads\\_Dateien/  
verkehr/9150\\_Broschuere\\_Nachhaltige\\_Mobili-  
taet\\_mit\\_Erdgas\\_und\\_Biomethan\\_Marktentwick-  
lung\\_2015-2016.pdf](https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/verkehr/9150_Broschuere_Nachhaltige_Mobilitaet_mit_Erdgas_und_Biomethan_Marktentwicklung_2015-2016.pdf) [Stand: 22.06.2017].

**Dennis/Urry 2009**

Dennis, K./Urry, J.: *After the Car*, Cambridge: Polity 2009.

**DLR et al. 2015**

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)/  
Institut für Verkehrsforschung/Institut für Energie-  
und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IFEU)/  
Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST)/Deut-  
sches Biomasseforschungszentrum GmbH (DBFZ):  
Erneuerbare Energien im Verkehr. Potenziale und  
Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer  
Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträ-  
ger, 2015. URL: [http://www.lbst.de/download/2015/  
mks-kurzstudie-ee-im-verkehr.pdf](http://www.lbst.de/download/2015/mks-kurzstudie-ee-im-verkehr.pdf) [Stand: 22.06.2017].

**Dieckhoff et al. 2014**

Dieckhoff, C./Appelrath, H. J./Fischedick, M./Grunwald, A./  
Höfler, F./Mayer, C./Weimer-Jehle, W.: *Zur Interpre-  
tation von Energieszenarien* (Schriftenreihe Energiesys-  
teme der Zukunft), 2014.

**Dosi 1982**

Dosi, G.: „Technological Paradigms and Technological Trajectories“. In: *Research Policy*, 11, 1982, S. 147–162.

**DVGW 2011**

Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW): Technische Regel – Arbeitsblatt. DVGW G 262 (A) – Nutzung von Gasen aus regenerativen Quellen in der öffentlichen Gasversorgung. Bonn: Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH 2011.

**DVGW 2013**

Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW): Management Summary: Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz, Bonn 2013. URL: [https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/forschung/berichte/g1\\_07\\_10.pdf](https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/forschung/berichte/g1_07_10.pdf) [Stand: 22.06.2017].

**EC 2005**

Europäische Kommission (EC): Thematische Strategie zur Luftreinhaltung – Mitteilung der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament vom 21. September 2005 (KOM(2005) 446 – nicht im Amtsblatt veröffentlicht). URL: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=LEGISSUM:l28159> [Stand: 12.05.2017].

**EC 2014**

Europäische Kommission (EC): Luftverschmutzung: Kommission mahnt Deutschland wegen Feinstaubbelastung in Leipzig und Stuttgart, 26.11.2014. URL: [https://ec.europa.eu/germany/news/luftverschmutzung-kommission-mahnt-deutschland-wegen-feinstaubbelastung-leipzig-und-stuttgart\\_de](https://ec.europa.eu/germany/news/luftverschmutzung-kommission-mahnt-deutschland-wegen-feinstaubbelastung-leipzig-und-stuttgart_de) [Stand: 15.09.2017].

**EC 2017**

Europäische Kommission (EC): Benefits of ECLA, 2017. URL: <http://ec.europa.eu/environment/europeangreencapital/europeangreenleaf/egl-benefits/> [Stand: 01.08.2017].

**Edvardsson Björnberg 2016**

Edvardsson Björnberg, K.: „Setting and revising goals“. In: Hansson, S. O./Hirsch Hadorn, G. (Hrsg.): *The Argumentative Turn in Policy Analysis. Reasoning about Uncertainty*, Cham: Springer 2016, S. 171–188.

**Eisenführ et al. 2010**

Eisenführ, F./Weber, M./Langer, T.: *Rational Decision Making*, Berlin: Springer-Verlag 2010.

**EnEV 2015**

Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparenden Anlagentechnik bei Gebäuden, Energiesparverordnung(EnEV) vom 24. Juli 2007: BGBl. I S. 1519; zuletzt geändert durch Artikel 3 der Verordnung vom 24. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1789). URL: [http://www.gesetze-im-internet.de/enev\\_2007/EnEV.pdf](http://www.gesetze-im-internet.de/enev_2007/EnEV.pdf) [Stand: 22.06.2017].

**Erdgas.info 2017**

Erdgas.info: CNG oder LPG?, 2017. URL: <https://www.erdgas.info/erdgas-mobil/vergleich-cng-lpg/> [Stand: 08.06.2017].

**Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“ 2016**

Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“: Stellungnahme zum fünften Monitoring-Bericht der Bundesregierung für das Berichtsjahr 2015, 2016. URL: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/V/fuenfter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft-stellungnahme.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=7](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/V/fuenfter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft-stellungnahme.pdf?__blob=publicationFile&v=7) [Stand: 22.06.2017].

**Folke et al. 2005**

Folke, C./Hahn, T./Olsson, P./Norberg, J.: „Adaptive Governance of Social-Ecological Systems“. In: *Annual Review of Environment and Resources*, 30, 2005, S. 441–473.

**Fraunhofer IWES 2015**

Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (Fraunhofer IWES): Interaktion. EE-Strom, Wärme und Verkehr. Endbericht, 2015. URL: [https://www.energiesystemtechnik.iwes.fraunhofer.de/content/dam/iwes-neu/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Veroeffentlichungen/2015/Interaktion\\_EEStrom\\_Waerme\\_Verkehr\\_Endbericht.pdf](https://www.energiesystemtechnik.iwes.fraunhofer.de/content/dam/iwes-neu/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Veroeffentlichungen/2015/Interaktion_EEStrom_Waerme_Verkehr_Endbericht.pdf) [Stand: 22.06.2017].

**Frondel et al. 2009**

Frondel, M./Peters, J./Vance, C.: „Fuel Efficiency and Automobile Travel in Germany: The Rebound Effect“. In: Herring, H./Sorell, S./Elliot, D. (Hrsg.): *Energy Efficiency and Sustainable Consumption – The Rebound Effect*, New York: Palgrave Macmillan 2009, S. 47–66.

**Gartman 2004**

Gartman, D.: „Three Ages of the Automobile. The Cultural Logics of the Car“. In: *Theory, Culture and Society*, 21: 4/4, 2004, S. 169–195.

**Gawel et al. 2014**

Gawel, E./Lehmann, P./Korte, K./Strunz, S./Bovet, J./Köck, W./Massier, P./Löschel, A./Schober, D./Ohlhorst, D./Tews, K./Schreurs, M./Reeg, M./Wassermann, S.: „Die Zukunft der Energiewende in Deutschland“. In: *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 64: 4, 2014, S. 37–44. URL: [http://www.et-energie-online.de/Portals/0/PDF/zukunftsfragen\\_2014\\_04\\_gawel.pdf](http://www.et-energie-online.de/Portals/0/PDF/zukunftsfragen_2014_04_gawel.pdf) [Stand: 22.06.2017].

**Geels 2002**

Geels, F. W.: „Technological Transitions as Evolutionary Reconfiguration Processes: A Multi-Level Perspective and a Case-Study“. In: *Research Policy*, 31, 2002, S. 1257–1274.

**Geels et al. 2012**

Geels, F. W./Kemp, R./Dudley, G./Lyons, G. (Hrsg.): *Automobility in Transition? A Socio-technical Analysis of Sustainable Transport*, London: Routledge 2012.

**Gerike et al. 2016**

Gerike, R./de Nazelle, A./Nieuwenhuijsen, M./Panis, L. I./Anaya, E./Avila-Palencia, I./Boschetti, F./Brand, C./Cole-Hunter, T./Dons, E./Erisson, U./Gaupp-Berghausen, M./Kahlmeier, S./Laermans, M./Mueller, N./Orjuela, J. P./Racioppi, F./Raser, E./Rojas-Rueda, D./Schweizer, C./Standaert, A./Uhlmann, T./Wegener, S./Götschi, T.: „Physical Activity through Sustainable Transport Approaches (PASTA): A Study Protocol for a Multicentre Project“. In: *BMJ Open*, 6, 2016, S. 1–11.

**Geroski 2000**

Geroski, P. A.: „Models of Technology Diffusion“. In: *Research Policy*, 29, 2000, S. 603–625.

**GIZ 2014**

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ): *Sustainable Urban Transport: Avoid-Shift-Improve (A-S-I)*, Eschborn 2014.

**Gregory et al. 2006**

Gregory, R./Ohlson, D./Arvai, J.: „Deconstructing Adaptive Management: Criteria for Applications to Environmental Management“. In: *Ecological Applications: A Publication of the Ecological Society of America*, 16: 6, 2006, S. 2411–2425.

**Hamzaoui-Essoussi/Zahaf 2012**

Hamzaoui-Essoussi, L./Zahaf, M.: „The Organic Food Market: Opportunities and Challenges“. In: Reed, M. (Hrsg.): *Organic Food and Agriculture – New Trends and Developments in Social Sciences*, Rijeka 2012, S. 64–88.

**Hansson/Hirsch Hadorn 2016**

Hansson, S. O./Hirsch Hadorn, G.: „Introducing the Argumentative Turn in Policy Analysis“. In: Hansson, S. O./Hirsch Hadorn, G. (Hrsg.): *The Argumentative Turn in Policy Analysis. Reasoning about Uncertainty*, Cham: Springer-Verlag 2016, S. 11–35.

**Harlander 2001**

Harlander, Tilman (Hrsg.): *Villa und Eigenheim. Suburbaner Städtebau in Deutschland*, Ludwigsburg: DVA 2001.

**Hascher 2011**

Hascher, Michael: „Verkehrspolitik in der historischen Rückschau“. In: Schwedes, O. (Hrsg.): *Verkehrspolitik. Eine interdisziplinäre Einführung*, Wiesbaden: VS Verlag 2011.

**Heal/Millner 2014**

Heal, G./Millner, A.: „Uncertainty and Decision Making in Climate Change Economics“. In: *Review of Environmental Economics and Policy*, 8: 1, 2014, S. 120–137.

**Hirsch Hadorn 2016**

Hirsch Hadorn, G.: „Temporal Strategies for Decision-making“. In: Hansson, S. O./Hirsch Hadorn, G. (Hrsg.): *The Argumentative Turn in Policy Analysis. Reasoning about Uncertainty*, Cham: Springer-Verlag 2016, S. 217–242.

**Hirsch Hadorn et al. 2015**

Hirsch Hadorn, G./Brun, G./Soliva, C./Stenke, A./Peter, T.: „Decision strategies for policy decisions under uncertainties: The case of mitigation measures addressing methane emissions from ruminants“. In: *Environmental Science & Policy*, 52, 2015, S. 110–119.

**Hochbahn 2014**

Hochbahn Blog: Der Brennstoffzellenhybridbus: Zukunft in Hamburg (Artikel vom 12.12.2014). URL: <http://dialog.hochbahn.de/bus-in-zukunft/brennstoffzellenhybridbus-in-hamburg/> [Stand: 08.06.2017].

**Hochbahn 2017**

Hamburger Hochbahn AG: Nachhaltige Mobilität für Kunden und Umwelt. Presse-Information vom 19.06.2017. URL: [https://www.hochbahn.de/hochbahn/wcm/connect/de/1413de8a-3350-4cee-94bb-1d634b9359da/~6728950.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=ROOTWORKSPACE.Z18\\_JH81JCoLo5M1oAEB6TSP43oA1-1413de8a-3350-4cee-94bb-1d634b9359da-1P4PAoB](https://www.hochbahn.de/hochbahn/wcm/connect/de/1413de8a-3350-4cee-94bb-1d634b9359da/~6728950.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=ROOTWORKSPACE.Z18_JH81JCoLo5M1oAEB6TSP43oA1-1413de8a-3350-4cee-94bb-1d634b9359da-1P4PAoB) [Stand: 01.08.2017].

**HOLM/Fraunhofer IML 2016**

House of Logistics & Mobility (HOLM) GmbH/Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML: *Logistik und Mobilität in Hessen 2035. Ein Zukunftsbild*, Dortmund 2016.

**Hughes 1987**

Hughes, T. P.: „The evolution of large technological systems“. In: Bijker, W. E./Hughes, T. P./Pinch, T. J. (Hrsg.): *The social construction of technological systems*, Cambridge, MA: MIT Press, 1987, S. 51–82.

**HUMBOLDT-VIADRINA Governance Platform 2017**

HUMBOLDT-VIADRINA Governance Platform: *Weichenstellungen für die urbane Mobilität – Wie treffen wir die richtigen Entscheidungen?* Bericht ETR/01-2017 zum Dialog vom 12.01.2017, Berlin 2017.

**ICCT 2016**

The International Council on Clean Transportation (ICCT): 2020–2030 CO<sub>2</sub> standards for new cars and light-commercial vehicles in the European Union. Briefing, 2016. URL: [http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT\\_EU-CO2-stds\\_2020-30\\_brief\\_nov2016.pdf](http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_EU-CO2-stds_2020-30_brief_nov2016.pdf) [Stand: 22.06.2017].

**IG Metall 2015**

Industriegewerkschaft Metall (IG Metall): Strukturwandel in der Automobilindustrie gemeinsam bewältigen, 2015. URL: [https://www.igmetall.de/docs\\_2015\\_6\\_017\\_Kommunique\\_Zuliefererkonferenz\\_\\_6e0546727a00ddf6bd611bd2d9703dd12a7c49a8.pdf](https://www.igmetall.de/docs_2015_6_017_Kommunique_Zuliefererkonferenz__6e0546727a00ddf6bd611bd2d9703dd12a7c49a8.pdf) [Stand: 08.06.2017].

**IHK Mittleres Ruhrgebiet 2016**

Industrie- und Handelskammer Mittleres Ruhrgebiet: *Auswirkungen des eCommerce auf die Verkehrsströme innerstädtischer Einzelhandelsstandorte am Beispiel der Stadt Bochum*, Bochum 2016.

**InnoZ 2017**

Innovationszentrum für Mobilität und gesellschaftlichen Wandel (InnoZ): *Zukunftsfenster in eine disruptive Mobilität. Teil 1: Mobilität in einer vernetzten Welt*, Berlin 2013.

**KIT 2015**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT): Deutsches Mobilitätspanel (MOP) – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen. Bericht 2013/2014: Alltagsmobilität und Fahrleistung, 2015. URL: [https://www.ifv.kit.edu/downloads/Bericht\\_MOP\\_13\\_14.pdf](https://www.ifv.kit.edu/downloads/Bericht_MOP_13_14.pdf) [Stand: 22.06.2017].



**Klenke 1995**

Klenke, D.: Freier Stau für freie Bürger: *Die Geschichte der bundesdeutschen Verkehrspolitik, 1949–1994*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1995.

**Klitkou et al. 2015**

Klitkou, A./Bolwig, S./Hansen, T./Wessberg, N.: „The Role of Lock-in Mechanisms in Transition Processes. The Case of Energy for Road Transport“. In: *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 16, 2015, S. 22–37.

**Köppel et al. 2017**

Köppel, W./Ruf, J./Graf, F./Burmeister, F./Mozgovoy, A./Albus, R./Erler, R./Schuhmann, E./Henel, M.: „LNG im Schwerlastverkehr – eine Alternative!“. In: *energie | wasser-praxis*, 5, 2017, S. 48–54.

**Kraftfahrt-Bundesamt 2017**

Kraftfahrt-Bundesamt: Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes am 1. Januar 2017, 2017. URL: [https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/b\\_jahresbilanz.html](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/b_jahresbilanz.html) [Stand: 09.06.2017].

**Kutter 2016**

Kutter, E.: „Siedlungsstruktur und Verkehr: Zum Verständnis von Sachzwängen und individueller Erreichbarkeit in Stadtregionen“. In: Schwedes, O./Canzler, W./Knie, A. (Hrsg.): *Handbuch Verkehrspolitik*, Wiesbaden: Springer VS 2016, S. 211–236.

**Lemmer 2016**

Lemmer, K. (Hrsg.): *Neue autoMobilität. Automatisierter Straßenverkehr der Zukunft* (acatech STUDIE), München: Herbert Utz Verlag 2016.

**Linssen/Hennings 2016**

Linssen, J./Hennings, W.: „Systemanalytische Untersuchung der Auswirkungen einer Elektrifizierung des Wirtschaftsverkehrs“, In: *STE Preprint*, 16, Forschungszentrum Jülich, Institut für Energie- und Klimaforschung – Systemforschung und Technologische Entwicklung 2016.

**Ludwig-Bölkow-Systemtechnik 2016**

Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH: Vergleich von CNG und LNG zum Einsatz in Lkw im Fernverkehr. Eine Expertise für die Open Grid Europe GmbH. Abschlussbericht, 2016. URL: [http://www.lbst.de/ressourcen/docs2016/1605\\_CNG\\_LNG\\_Endbericht\\_public.pdf](http://www.lbst.de/ressourcen/docs2016/1605_CNG_LNG_Endbericht_public.pdf) [Stand: 22.06.2017].

**Luhmann 1971**

Luhmann, N.: „Politische Planung“. In: Luhmann, N.: *Politische Planung. Aufsätze zur Soziologie von Politik und Verwaltung*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 1971, S. 66–89.

**Meyer/Schubert 2007**

Meyer, U./Schubert, C.: „Integrating Path Dependency and Path Creation in a general understanding of Path Constitution. The Role of Agency and Institutions in the Stabilisation of Technological Innovations“. In: *Science, Technology & Innovation Studies*, 3, 2007, S. 23–44.

**McClennen 1990**

McClennen, E. F.: *Rationality and Dynamic Choice: Foundational Explorations*, Cambridge, MA: Cambridge University Press 1990.

**Müller et al. 2016**

Müller, S./Liedtke, G./Lobig, A.: „Innovationshemmnisse, Innovationstreiber und Perspektive für die Zukunft des Güterverkehrs“. In: *ETR*, 12, 2016, S. 46–50. URL: [http://elib.dlr.de/109942/1/46\\_51\\_Mueller\\_ua.pdf](http://elib.dlr.de/109942/1/46_51_Mueller_ua.pdf) [Stand: 22.06.2017].

**Müller-Langer et al. 2014**

Müller-Langer, F./Majer, S./O’Keeffe, S.: „Benchmarking Biofuels – a Comparison of Technical, Economic and Environmental Indicators“. In: *Energy, Sustainability and Society*, 4: 20, 2014, S. 1–14.

**North 1990**

North, D. C.: *Institutions, Institutional Change and Economic Performance*, Cambridge: Cambridge University Press 1990.

**NPE 2014**

Nationale Plattform Elektromobilität (NPE): Fortschrittsbericht 2014 – Bilanz der Marktvorbereitung, 2014. URL: [https://www.bmbf.de/files/NPE\\_Fortschrittsbericht\\_2014\\_barrierefrei.pdf](https://www.bmbf.de/files/NPE_Fortschrittsbericht_2014_barrierefrei.pdf) [Stand: 22.06.2017].

**NPE 2015**

Nationale Plattform Elektromobilität (NPE): Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland – Statusbericht und Handlungsempfehlungen 2015, 2015. URL: [http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/fileadmin/user\\_upload/Redaktion/NPE\\_AG3\\_Statusbericht\\_LIS\\_2015\\_barr\\_bf.pdf](http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/NPE_AG3_Statusbericht_LIS_2015_barr_bf.pdf) [Stand: 22.06.2017].

**NPE 2016**

Nationale Plattform Elektromobilität (NPE): Arbeitsplatzeffekte einer umfassenden Förderung der Elektromobilität in Deutschland (AG 6 – Rahmenbedingungen), 2016. URL: [http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/fileadmin/user\\_upload/Redaktion/Arbeitsplatzeffekte\\_NPE\\_AG6\\_2016\\_bf.pdf](http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/Arbeitsplatzeffekte_NPE_AG6_2016_bf.pdf) [Stand: 22.06.2017].

**Nykvist/Whitmarsh 2008**

Nykvist, B./Whitmarsh, L.: „A multi-level Analysis of Sustainable Mobility Transitions. Niche Development in the UK and Sweden“. In: *Technological Forecasting and Social Change*, 75, 2008, S. 1373–1387.

**OECD/International Transport Forum 2015**

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)/International Transport Forum: Urban Mobility System Upgrade. How shared self-driving cars could change city traffic, 2015. URL: <http://www.oecd-ilibrary.org/docserver/download/5jlwvzd-k29g5-en.pdf?expires=1498128719&id=id&accname=guest&checksum=AC2CC0C68A9801B6A31A42A4B-8246FB7> [Stand: 22.06.2017].

**Öko-Institut 2014**

Öko-Institut: eMobil 2050. Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz, 2014. URL: <https://www.oeko.de/oeko-doc/2114/2014-670-de.pdf> [Stand: 22.06.2017].

**Öko-Institut 2016-1**

Öko-Institut (Hrsg.): Renewability III. Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors, 2016. URL: [https://www.ifeu.de/verkehrsumwelt/pdf/Renewability\\_III\\_Abschlussbroschuere.pdf](https://www.ifeu.de/verkehrsumwelt/pdf/Renewability_III_Abschlussbroschuere.pdf) [Stand: 15.06.2017].

**Öko-Institut 2016-2**

Öko-Institut: Electric mobility in Europe – Future impact on the emissions and the energy systems. Final report of task 2- Assessing the status of the electrification of road transport passenger vehicles and the potential future implications for the environment and European energy system, 2016. URL: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Assessing-the-status-of-electrification-of-the-road-transport-passenger-vehicles.pdf> [Stand: 22.06.2017].

**Öko-Institut/Fraunhofer ISI 2015**

Öko-Institut/Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung: Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2015. URL: <https://www.oeko.de/oekodoc/2441/2015-598-de.pdf> [Stand: 09.06.2017].

**Otto et al. 2017**

Otto, A./Robinius, M./Grube, T./Schiebahn, S./Praktiknjo, A./Stolten, D.: „Power-to-Steel: Reducing CO<sub>2</sub> through the Integration of Renewable Energy and Hydrogen into the German Steel Industry“. In: *Energies*, 10: 4, 2017, S. 451–471. URL: [www.mdpi.com/1996-1073/10/4/451/pdf](http://www.mdpi.com/1996-1073/10/4/451/pdf) [Stand: 22.06.2017].

**Perschon 2012**

Perschon, J.: *Nachhaltige Mobilität. Handlungsempfehlungen für eine zukunftsfähige Verkehrsgestaltung*, Bonn: Stiftung Entwicklung und Frieden 2012. URL: [http://www.sef-bonn.org/fileadmin/Die\\_SEF/Publikationen/Policy\\_Paper/pp\\_36\\_de.pdf](http://www.sef-bonn.org/fileadmin/Die_SEF/Publikationen/Policy_Paper/pp_36_de.pdf) [Stand: 22.06.2017].

**Pierson 2000**

Pierson, P.: „Increasing Returns, Path Dependence, and the Study of Politics“. In: *American Political Science Review*, 94, 2000, S. 251–267. URL: <http://www.la.utexas.edu/users/cheny/core/Course%20Materials/Pierson-Wk4APSR2000/o.pdf> [Stand: 22.06.2017].

**Regierungspräsidium Stuttgart 2017**

Regierungspräsidium Stuttgart: *Luftreinhalteplan für den Regierungsbezirk Stuttgart. Teilplan Landeshauptstadt Stuttgart. 3. Fortschreibung des Luftreinhalteplanes zur Minderung der PM<sub>10</sub>- und NO<sub>2</sub>-Belastungen*, Stuttgart 2017.

**Richtlinie 2008/50/EG**

Europäischen Union: Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa (RL 2008/50/EG). Amtsblatt der Europäischen Union (Abl.) Nr. L 152/1 vom 11.06.2008.

**Richtlinie 2014/94/EU**

Europäischen Union: *Richtlinie 2014/94/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Oktober 2014 über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (RL 2014/94/EU)*. Amtsblatt der Europäischen Union (Abl.) Nr. L 307/1 vom 28.10.2014.

**Rode et al. 2014**

Rode, P./Floater, G./Thomopoulos, N./Docherty, J./Schwinger, P./Mahendra, A./Fang, W.: „Accessibility in Cities: Transport and Urban Form“. In: *NCE Cities Paper 03. LSE Cities. London School of Economics and Political Science*, 2014, S. 1–61.

**Robinius 2015**

Robinius, M.: „Strom- und Gasmärktedesign zur Versorgung des deutschen Straßenverkehrs mit Wasserstoff“ (Dissertation RWTH Aachen University). In: *Schriften des Forschungszentrums Jülich: Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment*, 300, 2015. URL: <https://publications.rwth-aachen.de/record/565873/files/565873.pdf> [Stand: 22.06.2017].

**Rosenberg 1982**

Rosenberg, N.: *Inside the Black Box: Technology and Economic*, Cambridge: Cambridge University Press 1982.

**Schelewsky 2013**

Schelewsky, M.: „Die eierlegende Wollmilch-App – Nutzeranforderungen an mobile Informations- und Buchungssysteme für öffentliche und intermodale Verkehrsangebote und Stand der technischen Entwicklung“. In: Keuper, F./Hamidian, K./Verwaayen, E./Kalinowski, T./Krajo, C. (Hrsg.): *Digitalisierung und Innovation*, Wiesbaden: Springer/Gabler, 2013, S. 299–324.

**Schönduwe et al. 2012**

Schönduwe, R./Bock, B./Deibel, I.: „Alles wie immer, nur irgendwie anders? Trends und Thesen zu veränderten Mobilitätsmustern junger Menschen“. In: *InnoZ-Bau-stein*, 10, 2012.

**Senat von Berlin 2016**

Senat von Berlin – Ausschuss für Stadtentwicklung und Umwelt: *Berliner Energie- und Klimaschutzprogramm 2030 (BEK 2030) – Umsetzungszeitraum 2016–2020. Vorlage zur Beschlussfassung*, Drucksache 17/2987, Fassung vom 07.06.2016.

**Shaheen et al. 2016**

Shaheen, S. A./Chan, N. D./Gaynor, T.: „Casual Carpooling in the Francisco Bay Area: Understanding User Characteristics, Behaviors, and Motivations“. In: *Transport Policy*, 51, 2016, S. 165–173.

**Shell/Wuppertal Institut 2017**

Shell Deutschland/Wuppertal Institut: Shell Wasserstoff-Studie. Energie der Zukunft? Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H<sub>2</sub>, 2017. URL: [http://www.shell.de/medien/shell-publikationen/shell-hydrogen-study/\\_jcr\\_content/par/toptasks\\_370b.stream/1489059270371/3b3513150a5aa809612026308e78b02122c05c928d-42506984dae157bb6523fb/shell-wasserstoff-studie.pdf](http://www.shell.de/medien/shell-publikationen/shell-hydrogen-study/_jcr_content/par/toptasks_370b.stream/1489059270371/3b3513150a5aa809612026308e78b02122c05c928d-42506984dae157bb6523fb/shell-wasserstoff-studie.pdf) [Stand: 22.06.2017].

**Shell/DLR 2010**

Shell Deutschland/Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR): Shell-Lkw-Studie. Fakten, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr bis 2030, 2010. URL: [http://www.dlr.de/Portaldaten/1/Resources/portal\\_news/newsarchiv2010\\_3/Shell\\_Lkw\\_Studie\\_FIN\\_17042010.pdf](http://www.dlr.de/Portaldaten/1/Resources/portal_news/newsarchiv2010_3/Shell_Lkw_Studie_FIN_17042010.pdf) [Stand: 22.06.2017].

**Stadt Osnabrück 2014**

Stadt Osnabrück: Masterplan 100% Klimaschutz Osnabrück, 2014. URL: [https://www.osnabrueck.de/fileadmin/user\\_upload/Daten\\_Fakten\\_Gutachten\\_Masterplan\\_100\\_Klimaschutz\\_P005462053\\_.pdf](https://www.osnabrueck.de/fileadmin/user_upload/Daten_Fakten_Gutachten_Masterplan_100_Klimaschutz_P005462053_.pdf) [Stand: 08.06.2017].

**Statista 2014**

Statista: Typische Lebensdauer von Autos in Deutschland nach Automarken, 2014. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/316498/umfrage/lebensdauer-von-autos-deutschland/> [Stand: 08.06.2017].

**Statista 2017**

Statista: Transportleistung von Eisenbahnen im Güterverkehr in Deutschland von 2002 bis 2017 (in Milliarden Tonnenkilometern), 2017. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2975/umfrage/transportleistung-der-eisenbahnen-im-gueterverkehr-in-deutschland/> [Stand: 08.06.2017].

**Statistisches Bundesamt 2013**

Statistisches Bundesamt: Verkehr auf einen Blick, 2013. URL: [https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/TransportVerkehr/Querschnitt/Broschuer-eVerkehrBlick0080006139004.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/TransportVerkehr/Querschnitt/Broschuer-eVerkehrBlick0080006139004.pdf?__blob=publicationFile) [Stand: 08.06.2017].

**Statistisches Bundesamt 2016**

Statistisches Bundesamt: Statistisches Jahrbuch 2016, Wiesbaden 2016.

**Statistisches Bundesamt 2017**

Statistisches Bundesamt: Güterverkehr 2016: Neuer Höchststand beim Transportaufkommen, Pressemitteilung Nr. 057 vom 17.02.2017. URL: [https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2017/02/PD17\\_057\\_463.html](https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2017/02/PD17_057_463.html) [Stand: 02.06.2017].

**Sydow et al. 2009**

Sydow, J./Schreyögg, G./Koch, J. „Organizational path dependence: Opening the black box“. In: *Academy of Management Review*, 34, 2009, S. 689–709.

**UBA 2010**

Umweltbundesamt (UBA): Schienennetz 2025/2030. Ausbaukonzeption für einen leistungsfähigen Schienengüterverkehr in Deutschland (42/2010), 2010. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4005.pdf> [Stand: 22.06.2017].

**UBA 2012**

Umweltbundesamt (UBA): Daten zum Verkehr. Ausgabe 2012, 2012. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4364.pdf> [Stand: 22.06.2017].

**UBA 2013**

Umweltbundesamt (UBA): Schätzungen der Umweltkosten in den Bereichen Energie und Verkehr. Empfehlungen des Umweltbundesamtes, 2013. URL: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/hgp\\_umweltkosten\\_o.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/hgp_umweltkosten_o.pdf) [Stand: 22.06.2017].

**UBA 2015**

Umweltbundesamt (UBA): Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050: Eine verkehrsträgerübergreifende Bewertung (30/2015), 2015. URL: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_30\\_2015\\_postfossile\\_energieversorgungsoptionen.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_30_2015_postfossile_energieversorgungsoptionen.pdf) [Stand: 22.06.2017].

**UBA 2016-1**

Umweltbundesamt (UBA): Finanzierung einer nachhaltigen Güterverkehrsinfrastruktur. Anforderungen und Rahmenbedingungen für eine zukunftsorientierte Entwicklung des Güterverkehrs – eine systematische Analyse auf der Grundlage eines Ländervergleichs (53/2016), 2016. URL: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/texte\\_53\\_2016\\_finan-zierung\\_einer\\_nachhaltigen\\_gueterverkehrsinfrastruktur\\_aktualisiert.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/texte_53_2016_finan-zierung_einer_nachhaltigen_gueterverkehrsinfrastruktur_aktualisiert.pdf) [Stand: 22.06.2017].

**UBA 2016-2**

Umweltbundesamt (UBA): Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050 (56/2016), 2016. URL: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/texte\\_56\\_2016\\_klimaschutzbeitrag\\_des\\_verkehr\\_2050\\_getagged.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/texte_56_2016_klimaschutzbeitrag_des_verkehr_2050_getagged.pdf) [Stand: 22.06.2017].

**UBA 2016-3**

Umweltbundesamt (UBA): Lärm- und Klimaschutz durch Tempo 30: Stärkung der Entscheidungskompetenzen der Kommunen (30/2016), 2016. URL: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_30\\_2016\\_kurz\\_laerm\\_und\\_klimaschutz\\_durch\\_tempo\\_30\\_o.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_30_2016_kurz_laerm_und_klimaschutz_durch_tempo_30_o.pdf) [Stand: 22.06.2017].

**UBA 2017-1**

Umweltbundesamt (UBA): Treibhausgas-Emissionen in Deutschland, 2017. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klimawandel/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#textpart-1> [Stand: 12.05.2017].

**UBA 2017-2**

Umweltbundesamt (UBA): *Luftqualität 2016. Vorläufige Auswertung*, Dessau-Roßlau 2017.

**UBA 2017-3**

Umweltbundesamt (UBA): Primärenergiegewinnung und -importe, 2017. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie-als-ressource/primaerenergiegewinnung-importe> [Stand: 08.06.2017].

**UBA 2017-4**

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.): *Ressourcenleichte zukunftsfähige Infrastrukturen – umweltschonend, robust, demografiefest*, Dessau-Roßlau, i. E. 2017.

**UBA 2017-5**

Umweltbundesamt (UBA): Die Stadt für Morgen, 2017. URL: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/die\\_stadt\\_fuer\\_morgen\\_umweltschonend\\_mobil.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/die_stadt_fuer_morgen_umweltschonend_mobil.pdf) [Stand: 08.06.2017].

**UNECE 2012**

The United Nations Economic Commission for Europe (UNECE): *Decision 2012/2 Amendment of the Text of and Annexes II to IX to the 1999 Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone and the Addition of New Annexes X and XI (ECE/EB.AIR/111/Add.1)*, Genf 2012.

**Unruh 2000**

Unruh, G. C.: „Understanding Carbon Lock-in“. In: *Energy Policy*, 28, 2000, S. 817–830.

**Upham et al. 2013**

Upham, P./Kivimaa, P./Virkamäki, V.: „Path Dependence and Technological Expectations in Transport Policy. The Case of Finland and the UK“. In: *Journal of Transport Geography*, 32, 2013, S. 12–22.

**van Hoek et al. 2001**

van Hoek, R./Harrison, A./ Christopher, M.: „Measuring Agile Capabilities in the Supply Chain“. In: *International Journal of Operations & Production Management*, 21: 1/2 2001, S. 126–148.

**Voß et al. 2006**

Voß, J.-P./Kemp, R./Bauknecht, D.: „Reflexive governance: A view on an emerging path“. In: Voß, J.-P./Bauknecht, D./Kemp, R. (Hrsg.): *Reflexive governance for sustainable development*. Edward Elgar: Cheltenham 2006, S. 419–438.

**Yu et al. 2016**

Yu, Z./Li, S./Tong, L.: „Market Dynamics and Indirect Network Effects in Electric Vehicle Diffusion“. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 47, 2016, S. 336–356.

## Das Akademienprojekt

Mit der Initiative „Energiesysteme der Zukunft“ geben acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften Impulse für eine faktenbasierte Debatte über Herausforderungen und Chancen der Energiewende in Deutschland. In interdisziplinären Arbeitsgruppen erarbeiten rund 100 Expertinnen und Experten Handlungsoptionen für den Weg zu einer umweltverträglichen, sicheren und bezahlbaren und Energieversorgung.

### Die Arbeitsgruppe „Pfadabhängigkeiten“

Um Pfadabhängigkeiten in der Mobilität zu untersuchen, bündelte die Arbeitsgruppe das Wissen aus den Fachgebieten Ökonomie, Technikwissenschaften, Wissenschaftsgeschichte, Soziologie und Politologie. Zu Beginn der Arbeitsphase sammelte sie zudem die Expertise weiterer Mobilitätsfachleute in einem Workshop ein. Mit ihnen diskutierte sie unter anderem, welche Mobilitätstechnologien zu welchen Pfadabhängigkeiten führen und wie Entscheidungsträger mit den Konsequenzen umgehen können. Beim Energie-Trialog „Weichenstellungen für die urbane Mobilität“ tauschten sich Stakeholder aus Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft zu den Zwischenergebnissen der Arbeitsgruppe aus. Auch diese Erkenntnisse flossen in die vorliegende Analyse ein.

Prof. Dr.-Ing. Manfred Fishedick (Leitung)	Wuppertal Institut
Prof. Dr. Armin Grunwald (Leitung)	KIT
Dr. habil Weert Canzler	WZB
Prof. Dr. Gertrude Hirsch Hadorn	ETH Zürich
Peter Kasten	Öko-Institut
Prof. Dr. Till Requate	CAU Kiel
Dr.-Ing. Martin Robinius	FZJ
Prof. Dr.-Ing. Daniela Thrän	DBFZ
Prof. Dr. Jan-Peter Voß	TU Berlin

### Wissenschaftliche Referenten

Dr. Christian Dieckhoff	NOW
Dr. Dirk Vetter	acatech

## Institutionen und Gremien

### Beteiligte Institutionen

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Federführung)

---

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina

---

Union der deutschen Akademien der Wissenschaften

---

### Direktorium

Das Direktorium leitet die Projektarbeit und vertritt das Projekt nach außen.

---

Prof. Dr. Dirk Uwe Sauer (Vorsitzender)	RWTH Aachen
---	-------------

---

Prof. Dr. Christoph M. Schmidt (Stellvertreter)	RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung
---	---

---

Prof. Dr. Carl Friedrich Gethmann	Universität Siegen
-----------------------------------	--------------------

---

Prof. Dr. Karen Pittel	ifo Institut
------------------------	--------------

---

Prof. Dr. Eberhard Umbach	acatech Präsidium
---------------------------	-------------------

---

### Kuratorium

Das Kuratorium verantwortet die strategische Ausrichtung der Projektarbeit.

---

Prof. Dr. Reinhard F. Hüttl (Vorsitzender)	acatech Vizepräsident
--	-----------------------

---

Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath	acatech Präsident
-----------------------------	-------------------

---

Prof. Dr. Jörg Hacker	Präsident Leopoldina
-----------------------	----------------------

---

Prof. Dr. Dr. Hanns Hatt	Präsident Union der deutschen Akademien der Wissenschaften
--------------------------	--

---

Prof. Dr. Bärbel Friedrich	Altpräsidialmitglied Leopoldina
----------------------------	---------------------------------

---

Prof. Dr. Jürgen Gausemeier	Mitglied acatech Präsidium (bis Juli 2017)
-----------------------------	--

---

Prof. Dr. Martin Grötschel	Präsident Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften
----------------------------	---

---

Prof. Dr. Andreas Löschel	Universität Münster, Vorsitzender der Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“
---------------------------	---

---

Dr. Georg Schütte (Gast)	Staatssekretär BMBF
--------------------------	---------------------

---

Rainer Baake (Gast)	Staatssekretär BMWi
---------------------	---------------------

---

**Projektkoordination**

Dr. Ulrich Glotzbach

Leiter der Geschäftsstelle, acatech

---

**Rahmendaten****Projektlaufzeit**03/2016 bis 02/2019

---

**Finanzierung**Das Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (Förderkennzeichen EDZ 2016) gefördert.

---

GEFÖRDERT VOM

**Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung**

**Geschäftsstelle:**

Dr. Ulrich Glotzbach

Leiter der Geschäftsstelle Energiesysteme der Zukunft

Markgrafenstraße 22, 10117 Berlin

Tel.: +49 (0)30 206 79 57 - 0

E-Mail: [glotzbach@acatech.de](mailto:glotzbach@acatech.de)

**Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft**

ISBN: 978-3-9817048-8-4