



Technologieneutralität im Kontext der Verkehrswende

Kritische Beleuchtung eines Postulats



Impressum

Technologieneutralität im Kontext der Verkehrswende

Kritische Beleuchtung eines Postulats

ERSTELLT IM AUFTRAG VON

Agora Verkehrswende

Anna-Louisa-Karsch-Str. 2 | 10178 Berlin

T +49 (0)30 700 14 35-000

F +49 (0)30 700 14 35-129

www.agora-verkehrswende.de

info@agora-verkehrswende.de

DANKSAGUNG

Die Autoren danken Herrn Prof. Dr. Thorsten Beckers ganz herzlich für wertvolle Denkanstöße und Diskussionsbeiträge, die in die Überlegungen für diese Studie eingeflossen sind. Zudem möchten wir Henning Nolzen und Felix Spathelf für ihre tatkräftige Unterstützung im Rahmen dieses Projekts ganz herzlich danken.

PROJEKTLEITUNG

Dr. Carl-Friedrich Elmer

carl-friedrich.elmer@agora-verkehrswende.de

DURCHFÜHRUNG

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH

www.ifeu.de

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ

www.ufz.de

Autoren:

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung –

UFZ, Leipzig: Jun.-Prof. Dr. Paul Lehmann (Leitung),

Klaas Korte, Prof. Dr. Erik Gawel

Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu),

Heidelberg: Julius Jöhrens, Udo Lambrecht

Satz: Juliane Franz, Agora Verkehrswende

Titelbild: stock.adobe.com/zapp2photo



Unter diesem QR-Code steht diese
Publikation als PDF zum Download
zur Verfügung.

Version: 1.0

Veröffentlichung: Januar 2020

33-2020-DE

Bitte zitieren als:

Agora Verkehrswende (2020): *Technologieneutralität
im Kontext der Verkehrswende. Kritische Beleuchtung
eines Postulats.*

Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser,

mit der vorliegenden Studie nehmen wir Sie mit auf eine Reise in die akademische Welt. Die Forderung nach Technologieneutralität hat in der jüngeren Vergangenheit für lebhaft und kontroverse Debatten gesorgt. Dabei wurden Technologieneutralität und Technologieoffenheit oftmals synonym verwendet; zuweilen werden die Begriffe auch benutzt, um an dem bestehenden System festzuhalten. Dieser Mangel an begrifflicher Schärfe hat die Debatte über die Verkehrswende in Mitleidenschaft gezogen: Schlagworte traten an die Stelle von Argumenten.

Zu der Studie haben wir uns mit der Absicht entschlossen, konzeptionelle Klarheit zu schaffen. Über die grundsätzliche Klärung hinaus möchten wir aber auch für eine zentrale politische Gestaltungsaufgabe den wissenschaftlichen Unterbau liefern: Mit welcher Regulierung kann der notwendige Umstieg vom Verbrennungsmotor mit fossilen Kraftstoff hin zu klimaverträglichen Antrieben und Kraftstoffen in volkswirtschaftlich effizienter Weise gelingen?

Uns ist bewusst, dass die vorliegende Studie keine leichte Kost ist. Wir halten sie dennoch für wichtig, weil eine Versachlichung der Diskussion und eine solide Grundlage Voraussetzung für zielführende Politik ist. Und die ist jetzt, wo die Verkehrswende Fahrt aufnehmen muss, dringender denn je.

Christian Hochfeld

für das Team von Agora Verkehrswende
Berlin, 22. Januar 2020

Zentrale Ergebnisse aus Sicht von Agora Verkehrswende

- 1** Technologieoffenheit ist Voraussetzung für eine klimapolitisch erfolgreiche und kosteneffiziente Verkehrswende. Dies bedeutet, dass der notwendige Umstieg auf neue Antriebe und Energieträger auf Basis eines unverzerrten, alle volkswirtschaftlichen Kosten und Nutzen berücksichtigenden Wettbewerbs der verschiedenen Technologien stattfindet.
- 2** Technologieoffenheit bedeutet nicht Technologieneutralität der Regulierung. Technologie-neutrale Regulierung verzichtet auf jegliche Diskriminierung zwischen den verfügbaren technologischen Alternativen. Dies führt allerdings nur dann zu Technologieoffenheit, wenn diese unter ansonsten unverzerrten Bedingungen konkurrieren. In der Praxis verlangt die Überwindung von Pfadabhängigkeiten im Straßenverkehr hingegen auch technologiespezifische Regulierung, um Technologieoffenheit zu gewährleisten.
- 3** Klimaschädliche Technologien zurückdrängen, um neuen klimaverträglichen Technologien Platz zu schaffen: Pfadabhängigkeiten und nicht eingepreiste externe Kosten verzerren den Technologiewettbewerb zugunsten des Systems aus Verbrennungsmotor und fossilem Kraftstoff. Zentraler – weitgehend technologieneutraler – Ansatzpunkt zur Korrektur dieser Verzerrung und Unterstützung des Marktaustritts („Exnovationspolitik“) ist eine wirksame CO₂-Bepreisung. Ergänzende Instrumente sind eine stärker CO₂-orientierte, möglichst nah am Fahrzeugkauf ansetzende Kfz-Steuer oder auch strikte CO₂-Flottengrenzwerte.
- 4** Die Infrastruktur für neue Antriebe technologiespezifisch fördern: Neue Antriebe benötigen eine hinreichend dichte und nutzerfreundliche Energieversorgungsinfrastruktur, um Akzeptanz zu finden. Deren privatwirtschaftliche Bereitstellung wiederum ist erst bei Erreichen hoher Nutzerzahlen profitabel. Durch eine bedarfsorientierte temporäre Förderung des Infrastrukturaufbaus und die Schaffung regulativer Rahmenbedingungen für eine einfache Nutzung sollte der Staat hierzu beitragen.
- 5** Neuen Technologien zur Wettbewerbsfähigkeit verhelfen: Um verbleibende Hindernisse zu adressieren, können zielgenaue und zeitlich befristete Förderprogramme den Markteintritt und -hochlauf innovativer Technologien unterstützen. Die Förderung sollte deren jeweiligen Entwicklungsstand und erwartbaren Beitrag zur klimapolitischen Zielerreichung berücksichtigen. Zudem ist dabei eine Finanzierung aus dem Verkehrssektor selbst anzustreben, beispielsweise im Rahmen eines Bonus-Malus-Systems.
- 6** Investitionssicherheit schaffen durch ein langfristig politisch verbindliches Bekenntnis zur Verkehrswende und ein ambitioniertes Maßnahmenprogramm: Wirksame politische Selbstbindung erfordert die Festlegung und glaubhafte Durchsetzung expliziter Sektorziele. Zudem sollte der Staat durch passgenaue öffentliche Investitionen, ein breites und zielorientiertes Instrumentenbündel zur verlässlichen Erreichung des Sektorziels die Unumkehrbarkeit der Verkehrswende signalisieren sowie einen möglichst weitreichenden politischen Konsens anstreben.

Inhalt

Vorwort	3
Zentrale Ergebnisse	4
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	8
1 Executive Summary	9
2 Einleitung	11
2.1 Hintergrund	11
2.2 Fragestellung und Abgrenzung	13
2.3 Aufbau der Studie	13
3 Definition und ökonomische Bewertung von Technologieneutralität und -spezifität	15
3.1 Regulierung der Technologienutzung privater Akteure als Staatsaufgabe	15
3.2 Begriffliche Abgrenzung von Technologiespezifität, Technologieneutralität und Technologieoffenheit	18
3.3 Technologieneutralität und Effizienz	20
3.3.1 Effiziente Technologiepolitik bei unvollständiger Information	20
3.3.2 Theoretische Effizienz technologieneutraler Regulierung	20
3.3.3 Voraussetzungen für die Effizienz technologieneutraler Regulierung	24
3.4 Ökonomische Parameter zur Entscheidung über die technologiepolitische Ausgestaltung der Regulierung	25
3.4.1 Die Rolle zentralen Wissens	26
3.4.2 Grad der Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes im Status quo ante	26
3.4.3 Weitere Regulierungsziele neben der Dekarbonisierung	28
3.4.4 Zur Begründung technologiespezifischer Regulierung	28
3.5 Erfahrungen mit dem Einsatz technologiespezifischer Regulierung	29
3.5.1 Förderung erneuerbarer Energien	29
3.5.2 Atomausstieg	33
3.5.3 Transrapid	35
3.6 Zwischenfazit: Zum Zusammenhang von Technologieneutralität und Technologieoffenheit	37
3.7 Thesen zum theoretischen Konzept der Technologieneutralität	38
4 Indikation für Technologieneutralität und -spezifität im Straßenverkehr	43
4.1 Überblick und Zweck der Untersuchung	43
4.2 Übersicht der Technologieoptionen	43
4.3 Entscheidungsfelder im motorisierten Straßenverkehr	46
4.4 Technologieauswahl für die Analysen dieser Studie	48

4.5 Methodisches Vorgehen bei der Technologieanalyse	53
4.5.1 Zweck und Methodik	53
4.5.2 Analyisierte Technologieeigenschaften	54
4.6 Ergebnisse der Technologieanalyse	60
4.6.1 Ergebnisse in der Kategorie „Rolle des zentralen Wissens“	60
4.6.2 Ergebnisse in der Kategorie „Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes im Status quo ante“	64
4.6.3 Ergebnisse in der Kategorie „weitere Regulierungsziele neben der Dekarbonisierung“	78
4.6.4 Übersicht der Ergebnisse der Technologiecharakterisierung	79
4.7 Implikationen der Technologieanalyse für die grundsätzliche Ausgestaltung einer Dekarbonisierungspolitik im motorisierten Straßenverkehr	84
4.7.1 Indikation von Technologiespezifität im motorisierten Straßenverkehr	84
4.7.2 Notwendigkeit von Technologiepluralität bei der effizienten Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs	88
4.7.3 Unsicherheit über den effizienten Technologiemix	89
4.7.4 Ansatzpunkte für eine Dekarbonisierungspolitik im motorisierten Straßenverkehr	91
4.8 Thesen zur grundsätzlichen Sinnhaftigkeit von Technologieneutralität und Technologiespezifität im motorisierten Straßenverkehr (Indikation)	93
5 Ausgestaltung der Instrumente zur Dekarbonisierung des Straßenverkehrs	97
5.1 Überblick über das Kapitel	97
5.2 Klassifikation verkehrspolitischer Instrumente zur Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs	97
5.3 Kriterien für die Bewertung der verkehrspolitischen Instrumentenoptionen	101
5.4 Bewertung verkehrspolitischer Instrumente entlang von Ansatzpunkten für die Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs	102
5.4.1 Exnovation	103
5.4.2 Komplementäre Infrastruktur	113
5.4.3 Innovation	118
5.4.4 Suffizienz	125
5.4.5 Glaubwürdige politische Selbstbindung („Commitment“)	128
5.4.6 Fazit	130
5.5 Thesen zur Ausgestaltung der Dekarbonisierungsinstrumente im motorisierten Straßenverkehr	135
6 Schlussbetrachtung	136
7 Literaturverzeichnis	144

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1:	Das Entscheidungsfeld mit seinen Charakteristika	17
Abbildung 2:	Technologieoffenheit bei marktlicher und hierarchischer Technologiewahl	18
Abbildung 3:	Dimensionen der Technologieneutralität am Beispiel der Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs	19
Abbildung 4:	Wohlfahrtsverlust einer technologiespezifischen Regulierung	23
Abbildung 5:	Technologieneutralität und Technologieoffenheit	37
Abbildung 6:	Antriebstechnologien für den Straßenverkehr	44
Abbildung 7:	Technologien der Energiebereitstellung für den Straßenverkehr	45
Abbildung 8:	Zusammenfassung der Technologieauswahl für die vorliegende Studie	50
Abbildung 9:	Nutzungspfade für Biomasse im energetischen Vergleich	52
Abbildung 10:	Profillinien in der Gesamtschau	86–87
Abbildung 11:	Zusammenfassung wesentlicher Erkenntnisse bezüglich der Technologien in den einzelnen Entscheidungsfeldern	90
Abbildung 12:	Klassifikation von Regulierungsinstrumenten für die Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs	100
Abbildung 13:	Ansatzpunkte einer Instrumentierung von Dekarbonisierungspolitik für den Straßenverkehr	102
Abbildung 14:	Verortung der Exnovationsregulierung im Technologiebaum	103
Abbildung 15:	Verortung der Regulierung komplementärer Infrastruktur im Technologiebaum	114
Abbildung 16:	Verortung der Innovationsregulierung im Technologiebaum	119
Abbildung 17:	Verortung der Regulierung zu Verkehrsverlagerung und -verringerung im Technologiebaum	126
Abbildung 18:	Verortung der glaubwürdigen politischen Selbstbindung im Technologiebaum	129
Tabelle 1:	Technologiereife der verschiedenen Antriebs- und Kraftstofftechnologien	49
Tabelle 2:	Zuordnung der Technologien zu den Entscheidungsfeldern	53
Tabelle 3:	Übersicht der analysierten Technologieeigenschaften	58–59
Tabelle 4:	Synthese der Ergebnisse der Technologieanalyse	82–84
Tabelle 5:	Klassifikationsansätze für Regulierungsinstrumente	98
Tabelle 6:	Instrumentenoptionen im Ansatzpunkt "Marktaustritt fossiler Energieträger"	104
Tabelle 7:	Instrumentenoptionen im Ansatzpunkt "Komplementäre Infrastruktur"	113
Tabelle 8:	Instrumentenoptionen im Ansatzpunkt "Innovation"	120
Tabelle 9:	Verlagerung und Verringerung des motorisierten Straßenverkehrs	127
Tabelle 10:	Instrumentenoptionen im Ansatzpunkt "Glaubwürdige politische Selbstbindung"	130

Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current (Wechselstrom)
AFID	Alternative Fuels Infrastructure Directive
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BEV	Battery Electric Vehicle (batterieelektrisches Fahrzeug, ohne Verbrennungsmotor)
CNG	Compressed Natural Gas (komprimiertes Erdgas)
DC	Direct Current (Gleichstrom)
ERS	Electric Road System
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle (Brennstoffzellenfahrzeug)
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle (Verbrennungsfahrzeug)
Kfz	Kraftfahrzeug
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
Lkw	Lastkraftwagen
LNG	Liquified Natural Gas (verflüssigtes Erdgas)
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carriers
LPG	Liquefied Petroleum Gas (Autogas)
MIV	Motorisierter Individualverkehr
NPE	Nationale Plattform Elektromobilität
OEM	Original Equipment Manufacturer (im Kontext dieser Studie sind dies die Fahrzeughersteller)
OH-Lkw	Oberleitungs-Hybrid-Lkw (Hybridantrieb aus Elektro- und Dieselantrieb)
O-Lkw/O-BEV	Oberleitungs-Lkw (Elektroantrieb, kein Verbrennungsmotor)
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Plug-in-Hybridfahrzeug)
Pkw	Personenkraftwagen
PtG	Power-to-Gas
PtL	Power-to-Liquid
PtX	Power-to-X (Sammelbezeichnung für aus elektrischem Strom erzeugte chemische Grundstoffe und Kraftstoffe)
TCO	Total Cost of Ownership (Gesamtkosten für den Fahrzeugbetreiber)
THG	Treibhausgase
TRL	Technology Readiness Level (technologischer Reifegrad)

1 | Executive Summary

In its climate protection plan 2050 the German federal government plans to reduce the greenhouse gas emissions from the transport sector by 40 to 42 percent by 2030 as compared to the basis year of 1990. Reaching this goal will require a substantial decarbonisation of road transport. An important pillar of this decarbonisation is a transition towards low- (or zero-) emission drives and fuels.

There is disagreement among decision-makers about the regulatory framework necessary to meet the 2030 targets. The economic idea of technology neutrality is one of the major issues in this debate. Technology neutrality means that regulation by climate policy ideally should intervene at the level of the actual regulation target (in this study: the reduction of overall greenhouse gas emissions in the transport sector) while not discriminating explicitly between different abatement technologies. Thus, according to the argument, in the long run technology-neutral regulation would result in a cost-efficient decarbonisation of the entire transport sector. The strength of a technology-neutral approach would consist in its ability to activate decentralised knowledge on costs and benefits, which otherwise would hardly be available to the regulator restraining him from appropriately differentiating between technologies and sectors. The main objective of this study was to scrutinise this argument. The focus of the analysis was on motorised private transport (i.e. cars) and road freight transport (local as well as long-distance freight transport) – we will call this in short ‘motorised road transport’.

Technology neutrality should strictly be distinguished from technology openness of the decision field (incl. the features of the relevant actors, technologies, markets and regulations). Technology openness is deemed to be fulfilled if and when the choice between the technological alternatives is made on an otherwise (i.e. apart from climate protection) undistorted decision field. The decision field is regarded as being undistorted if and when the (private or governmental) decision-makers decide in awareness and under consideration of all economic costs and benefits. In this case, technology choices will provide for cost-effective attainment of climate mitigation targets.

De facto, as a result of miscellaneous market imperfections, imperfect policies and path dependencies the technology choices in the field of motorised road transport are typically distorted. Precisely under such framework

conditions technology-neutral regulation fails to generate technology openness. On the contrary, technology-specific interventions are necessary to efficiently correct the existing distortions. Therefore, there is an economic rationale for technology-specific regulation if and to the extent that the decision field found is not (yet) technology-open.

The economic rationale for technology-specific regulation is also strengthened by the fact that it might be assumed that it is largely known today which technologies will play an essential role in the individual decision fields in motorised road transport in order to achieve the 2030 emission targets. In the short to medium term, battery-electric drives will play a central role in the decision field of “motorised private transport”. The use of hydrogen in fuel cells and synthetic fuels in combustion engines will only be niche technologies, at least until 2030. In the decision field of “local freight transport” (distribution range up to 150 km), battery-electric vehicles can be expected to penetrate the market in the medium term even under the current market and regulatory conditions. In contrast, hybrid solutions – such as combinations of overhead lines, battery and fuel cell drives – will probably have to be used in the decision field of “long-distance freight transport”.

However, technology-specific regulation – while being able to regulate efficiently in theory (when designed perfectly) – faces the risk of inefficient design in practice. This may be due to, for example, knowledge deficits in detail or political-economic distortions. Thus, in addition to the question of whether technology-specific regulation is warranted, the challenge arises as to how technology specificity should adequately respond to the existent distortions in the decision field. Moreover, a minimum level of competitive technology choice typically remains important, even if a basic rationale for technology-specific interventions exists. For example, it may not be economically sensible to specify in regulation which alternative battery technologies should be used for battery-electric drives. Overall, it therefore might apply: As much technology neutrality as possible, as much technology specificity as necessary.

Five main pillars for the instrumentation of a decarbonisation policy for road transport become apparent: (1) market exit of fossil technologies (exnovation),

(2) erection of complementary infrastructure for new low-emission technologies, (3) development, production and market penetration of new low-emission technologies (innovation), (4) shifting and reduction of motorised road transport and (5) overall a long-term and credible political self-commitment with regard to the decarbonisation of road transport. An effective and efficient mix of instruments for the decarbonisation of road transport must look at and consider these main starting points in conjunction. For this purpose, a combination of rather technology-neutral instruments (e.g., for exnovation and shifting and reduction of motorised road transport) and rather technology-specific instruments (e.g., for innovation and infrastructure) seems a suitable approach.

Against the backdrop of the climate political urgency and the long-term character of investments in road transport, clear political choices must now be made in order to immediately initiate the decarbonisation of the transport sector and to make clear for all stakeholders that it is irreversible. In principle it can be said that in doing so it is better to have a "second best" decarbonisation policy for road transport than to forego a clear political positioning.

2 | Einleitung

2.1 Hintergrund

Das im Dezember 2019 verabschiedete Bundes-Klimaschutzgesetz weist allen Sektoren maximal zulässige jährliche Treibhausgas-Emissionsmengen für den Zeitraum bis 2030 zu. Für den Verkehrssektor wurde für das Jahr 2030 ein Emissionswert von 95 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalenten festgesetzt (Anlage 2, KSG). Gegenüber den Emissionen des Jahres 2017 in Höhe von prognostizierten ca. 162 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten¹ bedeutet dies eine Reduktion um 67 Millionen Tonnen beziehungsweise um etwa 41 Prozent. Zur Erreichung dieses Ziels kommen unterschiedliche Maßnahmen in Betracht. Neben einer grundsätzlichen Reduktion der Verkehrsleistung sowie intermodalen Verlagerungen (etwa von der Straße auf die Schiene oder vom motorisierten Individualverkehr zum öffentlichen Personenverkehr), also einer Mobilitätswende, kann insbesondere auch eine Transformation hin zu emissionsärmeren Fahrzeugen und Antriebstechnologien einen Beitrag zur Erreichung dieser Ziele leisten (Energiewende im Verkehr durch Technologiesubstitution).² Dem Einsatz emissionsärmerer Antriebe wird ein großes Potenzial zur Erreichung der gesetzten Klimaschutzziele zugesprochen.³ Hierbei kommen unterschiedliche Antriebstechnologien und Kraftstoffe in Betracht. Im Bereich des straßengebundenen Personen- und Güterverkehrs können nach derzeitigem Wissensstand sowohl weitere Effizienzsteigerungen bei Verbrennungsmotoren sowie die Substitution fossiler Kraftstoffe durch biogene oder synthetische Kraftstoffe auf Basis erneuerbarer Energien als auch elektrische Antriebe, die durch Batterien oder Brennstoffzellen gespeist werden, Treibhausgasemissionsreduktionen im Bereich des Antriebs ermöglichen.⁴

Die Erreichung der politisch gesetzten Reduktionsziele macht ein regulatorisches Eingreifen des Staates notwendig. Zur Stimulierung einer Technologiewahl, die eine Reduktion von Treibhausgasemissionen ermöglicht, kann der Regulierer einerseits gezielt einzelne Technologieoptionen fördern beziehungsweise gezielt einzelne Technologien sanktionieren oder ausschließen. Andererseits kann er Regulierungsinstrumente anwen-

den, die generell die Nutzung von Technologieoptionen mit geringeren Treibhausgasemissionen anreizen, ohne dabei spezifisch einzelne Technologien zu fördern oder zu sanktionieren beziehungsweise auszuschließen. Die Vorteilhaftigkeit technologieneutraler oder technologiespezifischer Regulierungsansätze zur Erreichung eines gesetzten Politikziels wird in den Wirtschaftswissenschaften kontrovers diskutiert. Während das einfache Lehrbuchmodell der neoklassischen Ökonomik grundsätzlich einer technologieneutralen Regulierung eine höhere Effizienz attestiert, zeigen realitätsnähere ökonomische Ansätze auf, dass der Effizienzvorteil einer technologieneutralen oder technologiespezifischen Regulierung von verschiedenen Faktoren im betrachteten Sektor abhängig ist.

Vor dem Hintergrund dieser allgemeinen wissenschaftlichen Diskussion ist eine politische Debatte über die Sinnhaftigkeit technologieneutraler Ansätze für die Dekarbonisierung des Straßenverkehrs entbrannt (vgl. Box). Wissenschaftlich ist die Debatte um den geeigneten Regulierungsansatz für den Straßenverkehrssektor bislang nur in Ansätzen geführt worden.⁵ Eine systematische Analyse der technologischen und institutionellen Rahmenbedingungen im Verkehrssektor, die zur Beurteilung der Eignung einer technologieneutralen oder technologiespezifischen Regulierung für die Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs notwendig erscheint, hat nach Kenntnis der Autoren bislang noch nicht stattgefunden.

1 BMU (2019).

2 Agora Verkehrswende (2017), S. 13 ff.

3 UBA (2016a), S. 201 ff.

4 SRU (2017), S. 80 ff.

5 Etwa bei Kemfert et al. (2017); Fox et al. (2017).

Öffentlicher Diskurs zu Technologieoffenheit, Technologie-neutralität und Technologiespezifität im Straßenverkehr

Unterschiedliche Positionen zeigen sich deutlich in den Stellungnahmen aus der **Politik**. So spricht sich **Bundesverkehrsminister Andreas Scheuer** für einen technologieoffenen Ansatz in der Verkehrspolitik aus: „Wir müssen breit bleiben.“ Als Begründung führt er an, dass momentan noch unklar ist, welches Antriebskonzept in zehn Jahren das beste sei.⁷ Unterstützung erhält er dabei von Carsten Linnemann, dem Vorsitzenden der **CDU-Mittelstandsvereinigung**: Der Staat müsse „alternative Antriebe technologie-neutral fördern“.⁸ In die gleiche Richtung zielt auch **FDP-Chef Christian Lindner**: „Wir brauchen mehr Technologieoffenheit.“⁹ Und auch **Die Linke**¹⁰ und die **AfD** sprechen sich gegen die gezielte Subvention einzelner Technologien, wie die Elektromobilität, aus. So fordert die AfD, dass „der faire Wettbewerb am freien Markt“ die Technologiewahl regeln solle.¹¹

Das **Bundesumweltministerium** hingegen plädiert klar für Elektromobilität. Begründet wird diese Haltung damit, dass die Potenziale alternativer Antriebe, zum Beispiel der Antrieb mit Biomethan, schwer abzuschätzen seien.¹² Auch der niedersächsische **SPD-Ministerpräsident Stephan Weil** hält es für absehbare Zeit für richtig, voll auf E-Mobilität zu setzen.¹³ Ebenso sehen die **Grünen** den „Umstieg auf eine energieeffiziente Elektromobilität“ als Schlüssel für die Verkehrswende.¹⁴

Ähnlich uneins zeigt sich die **Automobilindustrie** selbst. **Volkswagen-Chef Herbert Diess** forderte Anfang des Jahres 2019, dass der Staat nun massiv den Kauf von Elektroautos fördern solle, der Elektroantrieb habe das Rennen gewonnen.¹⁵ Dafür hat er viel Widerspruch aus der Branche selbst geerntet. Der **Verband der Automobilindustrie** argumentiert: „Die Mobilitätswende wird langfristig nur erfolgreich sein, wenn sich die besten und dem Bedarf entsprechenden Lösungen im technologie-neutralen Wettbewerb durchsetzen.“¹⁶ **BMW** betont: „Technologieoffenheit ist für die zukünftige Mobilität entscheidend.“¹⁷ Für diese Positionen gibt es auch branchenübergreifend Unterstützung, etwa durch den **Arbeitgeberverband Gesamtmetall**¹⁸ oder Unternehmen aus der Mineralölindustrie.¹⁹ Letztere betonen insbesondere die mögliche Bedeutung synthetischer Kraftstoffe neben der Elektromobilität.

ADAC-Vizepräsident für Verkehr Ulrich Klaus Becker spricht sich ebenfalls gegen die Förderung einzelner Technologien aus: „Es wird nicht nur eine bestimmte Antriebstechnologie der Zukunft geben. Wir plädieren ganz klar für einen technologieoffenen Ansatz.“²⁰ Hingegen votieren viele **Umweltverbände** – etwa der **BUND**²¹ und **Greenpeace**²² – klar für einen Fokus auf Elektromobilität.

6 Handelsblatt (2019a).

7 Mittelstands- und Wirtschaftsunion (2016).

8 Tagesspiegel (2019a).

9 Die Linke (o. J.).

10 AfD (2019), S. 85.

11 Der Spiegel (2019a), S. 97.

12 Der Spiegel (2019b), S. 61.

13 Bündnis 90/Die Grünen (2019), S. 26.

14 Der Spiegel (2019c), S. 62.

15 VDA (2019).

16 FAZ (2019).

17 Tagesspiegel (2019b).

18 Handelsblatt (2019b).

19 ADAC (2018a).

20 BUND (2019).

21 Greenpeace (2019).

2.2 Fragestellung und Abgrenzung

Vor dem Hintergrund der in Abschnitt 1.1 dargestellten Herausforderung widmet sich die vorliegende Studie der Frage, welcher Ansatz der Regulierung zur Erreichung der Dekarbonisierungsziele im Verkehrssektor gewählt werden sollte. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Frage, ob und inwieweit die Regulierung unter ökonomischen Gesichtspunkten technologieneutral beziehungsweise technologiespezifisch ausgestaltet werden sollte. Die Analysen dieser Studie fokussieren sich mit dem Pkw- und Straßengüterverkehr auf den Ausschnitt des Verkehrssektors, der einen Großteil der Kohlendioxidemissionen im Verkehrssektor verursacht (der Anteil des Straßenverkehrs an den gesamten CO₂-Emissionen des Verkehrssektors betrug 2016 in Deutschland rund 96 Prozent²²). Zur sprachlichen Vereinfachung wird für die gesammelte Bezeichnung von Pkw-Verkehr und Straßengüterverkehr im weiteren Verlauf der Studie der Begriff des motorisierten Straßenverkehrs genutzt, wissend, dass dieser üblicherweise weitere Bereiche umfasst. Betrachtet wird im Rahmen dieser Studie zudem nur jener Teil der Regulierung, der maßgeblich Einfluss auf die Wahl der Antriebstechnologien im motorisierten Straßenverkehr nimmt. Minderungen des Treibhausgasausstoßes im Verkehrssektor können daneben auch durch Änderungen des Nutzungsverhaltens der Technologien erzielt werden, etwa durch eine generelle Reduktion der Verkehrsleistung oder die Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel anstelle des motorisierten Individualverkehrs.²³ Die Regulierung des Nutzungsverhaltens steht jedoch nicht im Zentrum der Betrachtungen dieser Studie. Gleichwohl können Regulierungsinstrumente, die auf die Auswahl der Antriebstechnologie zielen, gleichzeitig Auswirkungen auf das Nutzungsverhalten der Akteure zeitigen und sollten daher bei der Ausgestaltung der Regulierung mitberücksichtigt werden.

Zur Beantwortung der Frage nach der geeigneten Ausgestaltung der Regulierung hat die Analyse dieser Studie einen dreistufigen Aufbau:

1. In einem ersten Schritt wird untersucht, ob und unter welchen Bedingungen die ökonomische Theorie Begründungen für die Anwendung einer technologie-

neutralen oder einer technologiespezifischen Regulierung liefert (Kapitel 2).

2. Darauf aufbauend wird analysiert, welche Bedingungen im Bereich der Antriebstechnologien für den motorisierten Straßenverkehr vorliegen und inwieweit sich hieraus eine grundsätzliche Indikation für technologiespezifische Regulierung im motorisierten Straßenverkehr ableiten lässt (Kapitel 3).
3. Sodann wird in einem letzten Schritt in einem multikriteriellen Bewertungsrahmen untersucht, welche technologiepolitische Ausgestaltung der Regulierung für die angestrebte Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs geeignet erscheint (Kapitel 4).

2.3 Aufbau der Studie

Der Aufbau dieser Studie folgt grundsätzlich dem in Abschnitt 1.2 aufgezeigten Dreischritt der Analyse. In einem ersten konzeptionellen Teil (Schritt 1 – theoretische Begründung für Technologiespezifität) erläutert Kapitel 2 zunächst, wie die zentralen Begriffe der Technologieneutralität und Technologiespezifität im Rahmen dieser Studie verstanden werden (Abschnitt 2.2), zeigt am Lehrbuchmodell den grundsätzlichen theoretischen Zusammenhang zwischen Technologieneutralität und Effizienz auf (Abschnitt 2.3) und stellt dar, welche ökonomischen Parameter des Entscheidungsfeldes über die Vorteilhaftigkeit technologieneutraler oder technologiespezifischer Regulierung bestimmen (Abschnitt 2.4). In Abschnitt 2.5 werden anhand der Fallbeispiele der Förderung erneuerbarer Energien, des Atomausstiegs und des Transrapid exemplarisch Erfahrungen mit technologiespezifischer Regulierung in der politischen Praxis dargelegt und Gründe für ihren Erfolg oder ihr Scheitern herausgearbeitet. Abschließend wird auf den Zusammenhang zwischen Technologieoffenheit und Technologieneutralität eingegangen (Abschnitt 2.6) und die Ergebnisse der theoretischen Konzeptualisierung von Technologieneutralität, -spezifität und -offenheit werden thesenförmig zusammengefasst (Abschnitt 2.7).

Der zweite Schritt der Untersuchung des motorisierten Straßenverkehrs hinsichtlich der notwendigen Voraussetzungen (Indikation) für technologiespezifische Regulierung wird im 3. Kapitel vollzogen. Nach einer Vorstellung der Technologieoptionen für die Dekarbonisierung des Straßenverkehrs (Abschnitt 3.2), der Abgrenzung

22 BMVI (2018), S. 311.

23 SRU (2017), S. 77 ff.

der relevanten Entscheidungsfelder (Abschnitt 3.3) und einer Begründung der Auswahl der im Rahmen dieser Studie betrachteten Technologieoptionen (Abschnitt 3.4) erfolgt die Vorstellung der Methodik für die Analyse der Technologieoptionen auf das Vorliegen der Voraussetzungen für technologiespezifische Regulierungseingriffe (Abschnitt 3.5). In Abschnitt 3.6 werden die Ergebnisse der Analyse vorgestellt. Vorbereitend für die Instrumentendiskussion im 4. Kapitel werden Implikationen aus der Technologieanalyse in Hinblick auf die Indikation für technologiespezifische Regulierung im motorisierten Straßenverkehr sowie die Informationsvoraussetzungen für technologiespezifische Eingriffe aufbereitet und instrumentelle Ansatzpunkte für die Regulierung abgeleitet (Abschnitt 3.7). Abschließend werden die Erkenntnisse des Kapitels in Thesen zur grundsätzlichen Sinnhaftigkeit von Technologieneutralität und Technologiespezifität im Straßenverkehrssektor zusammengefasst (Abschnitt 3.8).

Der dritte Schritt der Analyse dieser Studie (Bewertung von Ausgestaltungsoptionen einer Dekarbonisierungspolitik) wird schließlich im 4. Kapitel vorgenommen. Einer Klassifikation von Regulierungsinstrumenten zum Zwecke der summarischen Bewertung (Abschnitt 4.2) folgt die Vorstellung der Kriterien, die der Instrumentenbewertung zugrunde gelegt werden (Abschnitt 4.3). Die Bewertung der technologiepolitischen Regulierungsinstrumente selbst wird in Abschnitt 4.4 vorgenommen und erfolgt entlang der in Kapitel 3 hergeleiteten Ansatzpunkte „Exnovation“, „komplementäre Infrastruktur“, „Innovation“, „Suffizienz“ und „glaubwürdige politische Selbstbindung (Commitment)“. Die wesentlichen Erkenntnisse aus der Bewertung der verkehrspolitischen Instrumente werden zusammenfassend in Thesen zur Ausgestaltung von Dekarbonisierungsinstrumenten für den Straßenverkehrssektor festgehalten (Abschnitt 4.5).

In einer Schlussbetrachtung (Kapitel 5) werden die wesentlichen Ergebnisse der Studie zusammengefasst, eine knappe Bewertung der aktuellen klimapolitischen Beschlüsse der Bundesregierung vor dem Hintergrund der Studie vorgenommen und die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Politikbereiche diskutiert.

3 | Definition und ökonomische Bewertung von Technologieneutralität und -spezifität

3.1 Regulierung der Technologienutzung privater Akteure als Staatsaufgabe

Regulierung: Regulierungsziele, Regulierungseingriffe und Instrumente

Erweist sich ein (wirtschafts-)politisches Ziel unter den aktuell gegebenen marktlichen, politischen und sonstigen institutionellen Rahmenbedingungen als nicht oder nicht in der gewünschten Zeit erreichbar, so kommt ein staatlicher Eingriff in Betracht (Regulierung). Prominentes Regulierungsziel ist der Klimaschutz durch Dekarbonisierung von Produktions- und Konsumprozessen.

Staatliche Regulierung zielt darauf ab, durch hoheitliche Einflussnahme auf die Produktions- und Konsumentscheidungen privater und öffentlicher Akteure ein bestimmtes Set an Regulierungszielen zu erreichen. Der hierzu gesetzte Regulierungsrahmen verändert das Entscheidungsfeld der Akteure und kann auf diese Weise dem Regulierungsziel zuträglich, bei inadäquatem Design aber durchaus auch abträglich sein. Regulierung erfolgt über unterschiedliche Formen, Intensitäten und Ansatzpunkte des staatlichen Zugriffs. Bei der Erscheinungsform sind verschiedene Instrumente (zum Beispiel Grenzwerte, Emissionshandel, Informationskampagnen) zu unterscheiden (dazu Kapitel 4.2).

Direkte und indirekte Technologiesteuerung

Werden regulatorische Eingriffe mit Blick auf Entscheidungen zur Auswahl von Technologien für die Bewältigung von Mobilitätsanforderungen vorgenommen, so lassen sich unterscheiden:

- direkte Formen, bei denen der Regulator die Technologiewahl unmittelbar steuert, zum Beispiel, indem bestimmte Technologien verboten oder für bestimmte Verwendungen vorgegeben werden,
- indirekte Formen, bei denen der Regulator lediglich das Entscheidungsfeld privater (gegebenenfalls auch anderer öffentlicher) Akteure beeinflusst und so auf eine dezentrale Technologiewahl steuernd Einfluss nimmt.

Für die Zwecke der weiteren Analyse des motorisierten Straßenverkehrs unter Klimaschutzgesichtspunkten wird zunächst ein Setting unterstellt, bei dem vor allem private Akteure mobilitätsbezogene Technologiewahl

betreiben (Antriebe, Kraftstoffe) und dabei im Interesse der Dekarbonisierung des Verkehrssektors unter regulatorischen Einfluss gesetzt werden. Dabei greift der Regulierer in die Entscheidungen (zumeist) privater Akteure über die Technologienutzung (das heißt Art und Umfang der jeweils eingesetzten Technologien) ein. Dies schließt durchaus ein, dass der Regulierer durch seine Intervention den Entscheidungsraum der Akteure verkleinert, etwa durch ordnungsrechtliche Beschränkungen der dezentralen Technologiewahl.

Ein zentralplanerischer Ansatz direkter Technologiesteuerung, bei dem der Regulierer zum Beispiel eine Technologienutzung exakt vorschreibt beziehungsweise Technologie selbst zur Verfügung stellt (und zu diesem Zwecke zentral beschafft oder selbst produziert) wird als technologiepolitische Variante im Rahmen der Instrumentendiskussion (Kapitel 4) jedoch ebenfalls aufgegriffen.

Äquivalenz und Heterogenität von Mobilitätstechnologien

Voraussetzung für eine vergleichende Diskussion technologiepolitischer Regulierungsansätze (insbesondere Instrumente) ist freilich, dass grundsätzlich mehrere Technologien zur Bereitstellung desselben Mobilitätsdienstes zur Verfügung stehen (**Äquivalenz**). Zudem sollten sich diese Technologien in für die private Auswahlentscheidung wichtigen Parametern (Nutzen, Kosten, Marktreife, Abhängigkeit von komplementärer Infrastruktur usw.) substantiell unterscheiden (**Heterogenität**).

Erst in einem solchen **Umfeld äquivalenter, aber heterogener Technologien** stellt sich die Frage danach, ob eine technologieneutrale oder technologiespezifische Regulierung zur Erreichung des jeweils definierten Regulierungsziels geeignet ist. Stünde theoretisch lediglich eine einzige Technologieoption zur Bereitstellung einer betrachteten Dienstleistung zur Verfügung, hätte dies zur Folge, dass die Art der eingesetzten Technologie unabhängig von der Ausgestaltung der Technologiepolitik wäre. In einem solchen Kontext verspräche eine Diskussion technologiespezifischer oder -neutraler Regulierung daher keinen Erkenntnisgewinn. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass im Falle von Technologieauswahlentscheidungen mit längerfristiger Bindungswirkung (Pfadabhängigkeit) stets auch heute noch unreife oder gänzlich unbekannte Technologieoptionen der Zukunft um Berücksichtigung für spätere Perioden konkurrieren können.

Invest und Betrieb

Mobilitätsbezogene Technologieentscheidungen können sich einerseits auf die Beschaffung von überjährig nutzbaren Gütern (Betriebsmittel oder Gebrauchsgegenstände des Konsums) beziehen, stellen also Investitionsentscheidungen dar (Invest). Standardfall ist die Anschaffung eines Kraftfahrzeuges. Daneben werden auch Entscheidungen im Bereich der Nutzung der beschafften Technologie getroffen (Betrieb), zum Beispiel Nutzungsumfang eines Kfz, Technologiewahl (zum Beispiel Verbrennungsantrieb vs. Batterieantrieb) bei Hybridantrieben, Wahl des Kraftstoffs (fossil vs. erneuerbar) usw.

Agency-Problem der Regulierung

Soweit der Regulierer die Entscheidungen über die Technologienutzung nicht selbst trifft, sondern diese durch dezentrale, zumeist private Akteure erfolgen, stellt sich ein sogenanntes Agency-Problem ein. Als Agency-Problem bezeichnet man eine Konstellation, in der ein Zielgeber (Prinzipal) und eine ausführende Einheit (Agent) voneinander getrennt sind.²⁴ Der Regulator bedient sich also dezentralen Einheiten, um seine Vorstellungen über Klimaschutz im Verkehrssektor zu erreichen. Dies stellt ihn grundsätzlich vor die Herausforderung, die handelnden Akteure so zu steuern, dass gerade das bestehende Ziel erreicht werden kann.

Der Regulierer agiert mithin als „Prinzipal“, der durch den Einsatz regulatorischer Instrumente die Erreichung seines Zielsystems (im Rahmen dieser Studie die Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs) sicherzustellen versucht. Die finalen Entscheidungen über die Technologienutzung erfolgen hingegen im Rahmen des indirekten Settings der Technologiewahl durch dezentrale (zumeist private) Akteure; sie fungieren folglich als „Agenten“ der Regulierung. Die Zielsysteme von Prinzipal und Agent werden in der Regel voneinander abweichen. Zur Erreichung seiner Ziele muss der Regulierer daher geeignete Instrumente nutzen, um die privaten Akteure zu Technologienutzungsentscheidungen zu bewegen, die die Erreichung seines Zielsystems gewährleisten.

In der ökonomischen Theorie agieren die privaten Akteure als Maximierer ihres individuellen Profits (im Falle von privaten Unternehmen) beziehungsweise ihres Nutzens (im Falle von privaten Konsumenten). Ver-

haltensökonomische Ansätze lassen auch komplexere Zielfunktionen zu, insbesondere bei Konsumenten. Die Akteure treffen ihre Entscheidungen dabei in einem **Entscheidungsfeld**, das durch verschiedene entscheidungsprägende Charakteristika gekennzeichnet ist:

- i. die Akteure mit ihren Eigenschaften (das heißt ihrer Zielfunktion, ihren Präferenzen, ihrem Wissen, ihren kognitiven Kapazitäten und ihren Budgetrestriktionen),
- ii. die Technologieoptionen mit ihren Eigenschaften (das heißt ihren Nettokosten und -nutzen und entsprechenden Unsicherheiten, der Marktreife, der Notwendigkeit komplementärer Infrastruktur usw.),
- iii. die relevanten (Mobilitäts- und Technologie-)Märkte mit ihren jeweiligen Eigenschaften (das heißt den gehandelten Gütern, der Wettbewerbssituation),
- iv. das sonstige Regelsystem, das heißt das vor dem betrachteten Regulierungseingriff bestehende Bedingungsgefüge (zum Beispiel gesetzliche Bestimmungen, bestehende Steuern und Subventionen, technische Vorgaben und Bestimmungen), aber auch informelle gesellschaftliche Normen (wie der assoziierte Status einer bestimmten Technologie oder Marke, etwa im Rahmen von Distinktionskonsum).

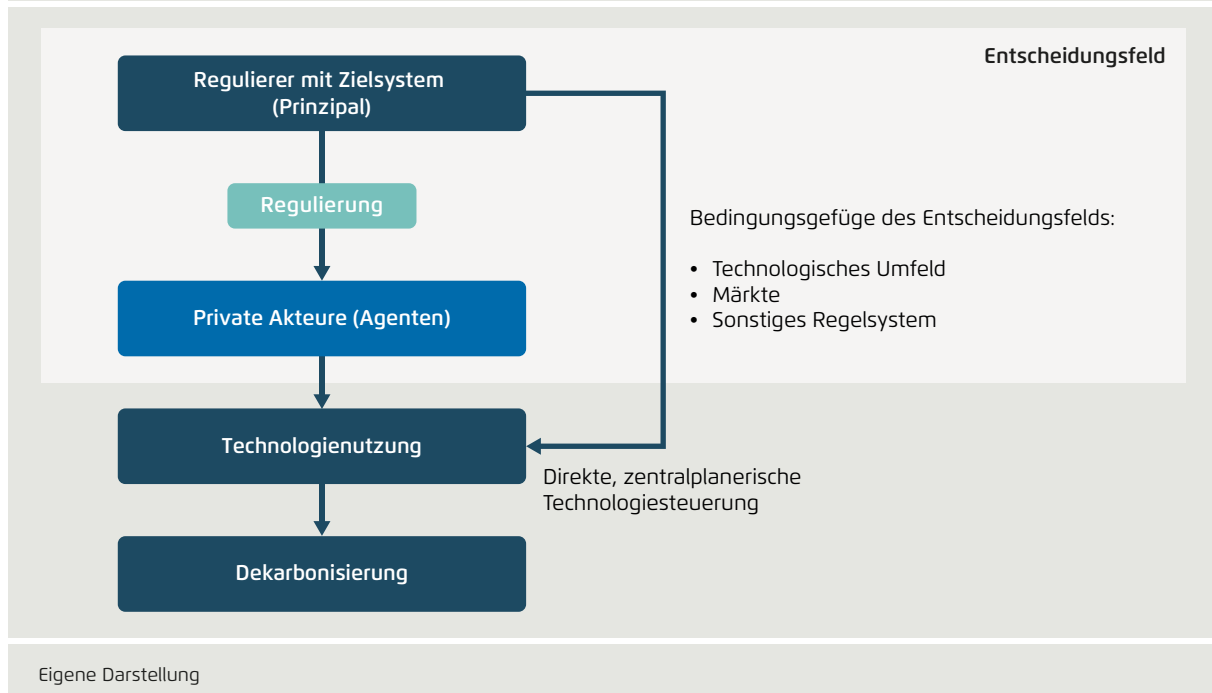
Die Charakteristika des Entscheidungsfeldes bestimmen über die Technologieauswahl- (Invest) und -nutzungsentscheidungen (Betrieb) der dezentralen Akteure. Entsprechend muss der Regulierer diese Charakteristika bei der Ausgestaltung der Regulierungsinstrumente (so weit wie möglich) berücksichtigen. Voraussetzung für die Berücksichtigung der Charakteristika des Entscheidungsfeldes ist jedoch, dass dem Regulierer zutreffende und ausreichende Informationen hierzu vorliegen beziehungsweise er diese erlangen kann (weitere Ausführungen hierzu in Abschnitt 2.3.1).

Abbildung 1 stellt das dargelegte Entscheidungsfeld mit seinen Charakteristika noch einmal grafisch dar.

24 Jensen; Meckling (1976).

Das Entscheidungsfeld mit seinen Charakteristika

Abbildung 1



Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes

Die Charakteristika des Entscheidungsfeldes bestimmen gleichzeitig darüber, ob alle zur Verfügung stehenden Technologien (einschließlich der sich noch entfaltenden Zukunftstechnologien) eine faire Chance besitzen, berücksichtigt zu werden. Ein Entscheidungsfeld nennen wir **„technologieoffen“**, wenn und soweit die Technologiewahl auf einem im Übrigen (das heißt jenseits des Klimaschutzes) unverzerrten Entscheidungsfeld stattfindet. Als unverzerrt stellt sich ein Entscheidungsfeld dann dar, wenn die (privaten oder staatlichen) Entscheider in Kenntnis und unter Berücksichtigung aller volkswirtschaftlich relevanten Kosten und Nutzen insoweit „richtige“ Abwägungsentscheidungen treffen, die auf kostenwahren Preisen basieren.

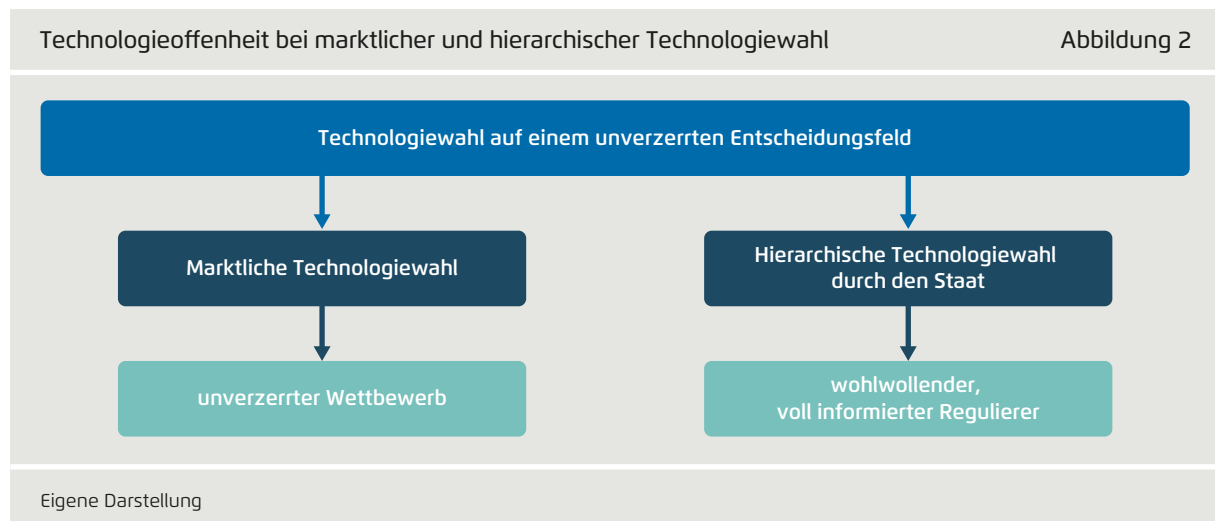
Dabei kann das Auswahlverfahren theoretisch **marktlícher** Natur sein (zum Beispiel Kfz-Nutzer entscheiden sich für alternative Modelle im Rahmen der Anschaffung), aber auch **„hierarchisch“**, das heißt durch hoheitliche Verbindlichkeit, gekennzeichnet sein: Hier würden staatliche Instanzen die Auswahl treffen (Abbildung 2). „Markt“ oder „Hierarchie“ (beziehungsweise beliebige Hybridformen davon) stellen lediglich verschiedene Verfahren der Aus-

wahl dar. Unabhängig davon kann sich dieses Auswahlverfahren als „technologieoffen“ erweisen, wenn nämlich

- bei marktlicher Auswahl ein unverzerrter Wettbewerb der Technologien stattfindet,
- bei hierarchischer Auswahl ein wohlwollender (benevolenter), angemessen informierter staatlicher Regulator unverzerrt entscheidet.

Umgekehrt können beide gedanklichen Idealtypen eines Auswahlverfahrens durch verschiedenste Formen des Markt- und Politikversagens „verzerrt“ sein. Dann bestünde gerade keine Technologieoffenheit mehr. Im Falle des Politikversagens wären zum einen Abweichungen von der benevolenten Zielsetzung des Regulators denkbar, aber auch verkürzte und verzerrte Informationsstände.²⁵ Politikversagen bezeichnet daher solche Verzerrungen des Entscheidungsfeldes, die in politischen Prozessen und Eingriffen begründet sind. Solche Verzerrungen können etwa durch regulatorische Unsicherheit oder regulatorische Eingriffe in das Preisgefüge des Marktes entstehen, die nicht der Internalisierung einer Externalität dienen. Im Ergebnis werden dann mögli-

25 Bickenbach et al. (1999), S. 10.



cherweise durch ineffiziente staatliche Regulierung die falschen Technologien ausgewählt.

Wir wollen die **Technologieoffenheit als Eigenschaft eines verzerrungsfreien Entscheidungsfeldes** ganz grundlegend von der **technologiebezogenen Neutralität des regulatorischen Eingriffs** im Interesse der Dekarbonisierung des Verkehrssektors unterscheiden. So kann sich beispielsweise zur Sicherung eines technologieoffenen Entscheidungsfeldes gerade ein korrigierender technologiespezifischer Eingriff rechtfertigen (dazu unten Abschnitt 2.6).

3.2 Begriffliche Abgrenzung von Technologiespezifität, Technologieneutralität und Technologieoffenheit

Die Begrifflichkeiten einer technologiespezifischen beziehungsweise technologieneutralen Regulierung sowie der Technologieoffenheit werden im öffentlichen und politischen Diskurs sehr unspezifisch und uneinheitlich verwendet und ihr konkretes Verständnis bleibt häufig unscharf. Auch in der wissenschaftlichen Literatur sind technologiespezifische und -neutrale Regulierung nicht eindeutig definiert und werden von verschiedenen Autoren in unterschiedlicher Weise verwendet. Die Verwendung der Begriffe bezieht sich dabei jedoch stets auf die Regulierung beziehungsweise ihre Instrumente und nicht auf das Resultat der Regulierung.

Der Begriff der Technologieneutralität wird von einigen Autoren so verstanden, dass das betrachtete Instrument beziehungsweise der betrachtete Instrumentenmix Wettbewerb zwischen den verschiedenen Technologieoptionen zur Erreichung des Politikziels erhält beziehungsweise herstellt. So definieren etwa Andor et al. eine technologieneutrale Förderung als „auf einem einheitlichen Fördersatz [beruhend] und daher nicht zwischen den unterschiedlichen Technologien [differenzierend]. Hierdurch kommt es zu einer Konkurrenzsituation zwischen den Technologien“.²⁶ Körber beschreibt eine technologieneutrale Regulierung als das „Prinzip einer in jeder Hinsicht möglichst neutralen, den Wettbewerb so wenig wie möglich verfälschenden Regulierung“.²⁷ Und Carton hält fest: „Technology neutrality assumes that different technologies can be unproblematically equated under a single market mechanism, and that the market will then gravitate towards the most costefficient [...] technologies.“²⁸

Ein zweites Definitionsmerkmal ist das bei Andor et al. und Carton schon aufscheinende Kriterium der Abwesenheit der spezifischen Behandlung einzelner Technologien oder Technologiestränge unterhalb des eigentlichen Regulierungsziels. So definiert Richter: „Unter Technologieneutralität wird ein Regulierungsansatz verstanden, der konkrete technische Entwicklungen

26 Andor et al. (2015), S. 8 f.

27 Körber (2008), S. 148.

28 Carton (2016), S. 70.

nicht spezifisch reguliert, sondern Regeln schafft, die sich durch eine möglichst hohe Abstraktion von Technik auszeichnen.“²⁹ Umgekehrt formuliert bedeutet dies also, dass eine technologieneutrale Intervention eine hohe Nähe zum eigentlichen Regulierungsziel aufweist.

Abbildung 3 veranschaulicht noch einmal exemplarisch das Zusammenspiel der beiden Definitionsmerkmale für das Beispiel der Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs. Dabei wird kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben, insbesondere ist eine Vielzahl weiterer Zwischenebenen auf der horizontalen Achse denkbar. Das erste Definitionsmerkmal für Technologieneutralität knüpft an der vertikalen Ebene an und verlangt, dass keine regulatorische Unterscheidung der unterschiedlichen Technologieoptionen entlang dieser Ebene vorgenommen wird (Technologieneutralität der Instrumentierung). Das zweite Merkmal knüpft an der horizontalen Ebene an und definiert Technologieneutralität als einen Regulierungsansatz, der möglichst weit links im Schaubild, das heißt möglichst dicht am Regulierungsziel ansetzt (Technologieneutralität der Zielre-

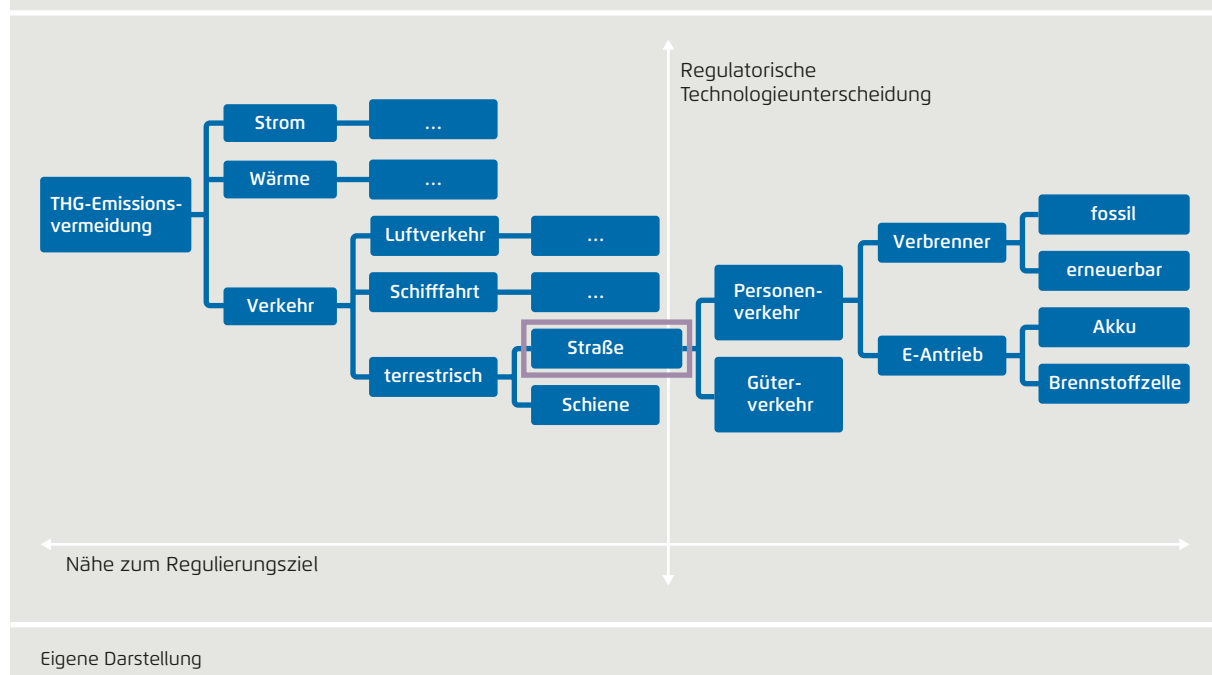
ferenz). Diese beiden Merkmale sind in gewissem Maße miteinander verbunden und werden von den genannten Autoren wohl teilweise auch als identisch angesehen. Denn eine Regulierung, die unterhalb des Regulierungsziels ansetzt, ist stets auch mit einer regulatorischen Technologieunterscheidung verbunden, da sie nur einzelne Technologieoptionen reguliert. Anders herum ist jedoch eine Regulierung auf Ebene des Regulierungsziels nicht unbedingt auch mit der Abwesenheit einer regulatorischen Technologieunterscheidung verbunden. So kann etwa ein Emissionshandel für den Straßenverkehr, der also auf der Ebene des Regulierungsziels Dekarbonisierung des Straßenverkehrs ansetzt, sehr wohl eine Technologieunterscheidung beinhalten, etwa durch die kostenfreie Vergabe von Zertifikaten für einzelne Technologieoptionen des Straßenverkehrs oder durch unterschiedliche Anforderungen der vorzuhaltenden Zertifikate für verschiedene Technologieoptionen.

Es wird vor diesem Hintergrund deutlich, dass unterschieden werden kann zwischen der Technologieneutralität der Regulierung (Bleibt eine regulatorische Diskriminierung zwischen den Technologieoptionen aus?) und der Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes

29 Richter (2016), S. 91.

Dimensionen der Technologieneutralität am Beispiel der Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs

Abbildung 3



(Findet die Technologiewahl – gegebenenfalls induziert durch die regulatorische Intervention – auf einem unverzerrten Entscheidungsfeld statt?). Die Begrifflichkeiten der Technologieneutralität und Technologiespezifität beziehen sich im Verständnis dieser Studie somit auf die hoheitliche Intervention zur Erreichung eines gesetzten Politikziels, das heißt die Regulierung selbst. Für die Zwecke dieser Studie sollen die technologieneutrale und die technologiespezifische Regulierung wie folgt definiert werden:

Technologieneutrale Regulierung

- setzt (a) unmittelbar an einem definierten Regulierungsziel (zum Beispiel Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs) an. Die Klassifikation einer Regulierung als technologieneutral hängt somit insbesondere auch von der Definition des Regulierungsziels ab
- und sieht (b) von einer differenzierenden Behandlung einzelner Technologien oder Technologiegruppen beziehungsweise –stränge (innerhalb eines möglicherweise ausgewählten Sektors) ab.

Technologiespezifische Regulierung

- setzt (a) nicht (ausschließlich) am Regulierungsziel selbst an und/oder
- adressiert (b) das Regulierungsziel durch eine differenzierte regulatorische Behandlung unterschiedlicher Technologien oder Technologiegruppen oder –stränge.

Die Einordnung einer Regulierung als technologieneutral oder –spezifisch hat somit zwei Dimensionen. Zum einen die Technologieneutralität der Zielreferenz (a), die sich daran bemisst, ob die Regulierung auf der Ebene des Regulierungsziels oder erst darunter ansetzt.³⁰ Zum anderen die Technologieneutralität der Instrumentierung (b), die sich daran bemisst, ob die verschiedenen technologischen Optionen zur Erreichung des Regulierungsziels einer unterschiedlichen regulatorischen Behandlung unterliegen.

30 Es sei darauf hingewiesen, dass im Grunde jedwede Zielsetzung selbst bereits technologiespezifisch sein kann. Das Regulierungsziel der Dekarbonisierung des Verkehrssektors etwa ist unter der Annahme des übergeordneten Ziels des Klimaschutzes bereits technologiespezifisch, da es lediglich auf einen Sektor (und somit die zugehörigen Technologieoptionen) abzielt.

Eine technologieneutrale Regulierung kann allerdings, obwohl in ihrer Ausgestaltung per definitionem technologieneutral, in ihrer Wirkung sehr wohl zwischen den Technologieoptionen differieren. Ein einheitlicher CO₂-Preis etwa, bei dem also nicht regulatorisch zwischen den verschiedenen Technologieoptionen differenziert wird (weder beim Preisniveau noch bei der Bemessungsgrundlage), belastet Technologieoptionen mit unterschiedlichen CO₂-Emissionen in unterschiedlichem Maße.

Basierend auf diesen Definitionen und der Abgrenzung gegenüber dem Begriff der Technologieoffenheit wird in den folgenden Abschnitten dieses Kapitels weiter ausgeführt, inwiefern eine technologieneutrale oder eine technologiespezifische Regulierung aus ökonomischer Sicht zur Erreichung eines gesetzten Regulierungsziels beziehungsweise mehrerer Regulierungsziele geeignet ist.

3.3 Technologieneutralität und Effizienz

3.3.1 Effiziente Technologiepolitik bei unvollständiger Information

Die Erreichung des Regulierungsziels ist bei Existenz heterogener Technologien in der Regel durch unterschiedliche Ausgestaltungen der Technologiewahl zu erreichen, die mit unterschiedlichen gesamtwirtschaftlichen Kosten einhergehen. Aus wohlfahrtstheoretischer Sicht sollte der Regulierer zur Maximierung der sozialen Wohlfahrt die Erreichung seines Regulierungsziels zu möglichst geringen Kosten anstreben. Hieraus lässt sich die Forderung nach einer kosteneffizienten Erreichung des Regulierungsziels ableiten.

Dimensionen einer effizienten Regulierung

Die Effizienzforderung hat dabei unterschiedliche Dimensionen. Sie bezieht sich einerseits auf die **Produktionskosten** der Technologienutzung, also die privaten sowie die externen Kosten der Technologienutzung. Zur Sicherstellung der Effizienz müssen demnach die vollständigen volkswirtschaftlichen Kosten der Produktion bei der Technologiewahl berücksichtigt werden. Andererseits sind für die Betrachtung der Gesamtwohlfahrt auch die **Transaktionskosten**, also etwa Such-, Informations- und Überwachungskosten, von Belang.³¹ Im Regu-

31 Krutilla; Krause (2010); Richter; Furubotn (2010), S. 53 ff.

lierungskontext bedeutet dies, dass zur Maximierung der sozialen Wohlfahrt bei gegebenem Dekarbonisierungsziel nicht unbedingt diejenige Technologiewahl effizient ist, die die geringsten Produktionskosten aufweist. Ist diese nur durch eine Regulierung sicherzustellen, die mit hohen Transaktionskosten einhergeht, kann möglicherweise eine andere Instrumentierung der Regulierung eine höhere soziale Wohlfahrt generieren, obwohl sie nicht die Minimierung der Produktionskosten zur Folge hat. Bei der Effizienzbewertung von Regulierungsinstrumenten sind also sowohl die aus dem Regulierungsergebnis resultierenden Produktionskosten der Technologiewahl als auch die mit der Regulierung verbundenen Transaktionskosten zu berücksichtigen.

Daneben hat die Effizienzforderung eine zeitliche Komponente, da sie sowohl die **statischen Effekte**, das heißt die heutigen Kosten und Nutzen, als auch die **dynamischen Effekte**, das heißt die zukünftige Entwicklung der Kosten und Nutzen, berücksichtigen muss.³² Eine Regulierung, die eine Technologienutzung anreizt, die die Wohlfahrt auf Basis der heutigen Kosten und Nutzen der Technologien maximiert, ist möglicherweise nicht geeignet, zukünftige Kostenreduktionen anzureizen und damit auch die dynamische Effizienz sicherzustellen.³³

Sofern, wie im Rahmen dieser Studie angenommen, privatwirtschaftliche Akteure dezentral über die Technologiewahl entscheiden, also ein (mindestens teilweise) marktliches Arrangement der Technologiewahl vorliegt, ist zur Erreichung der Effizienz notwendig, dass ein unverzerrter Wettbewerb zwischen den verschiedenen technologischen Optionen bei der Entscheidung besteht (vergleiche Abschnitt 2.1). Ein unverzerrter Wettbewerb besteht nur dann, wenn die Preise die wahren heutigen und künftigen volkswirtschaftlichen Kosten und Nutzen der Technologienutzung widerspiegeln. Nur in einem solchen Umfeld können private Akteure – soweit sie rational handeln – eine effiziente Technologieauswahl treffen. Zur Sicherstellung eines technologieoffenen Entscheidungsfeldes muss das Ziel einer effizienten Technologiepolitik

bei privater Technologieauswahl mithin sein, durch die Regulierung Verzerrungen des Wettbewerbs auszugleichen beziehungsweise Verzerrungen des Wettbewerbs durch die Regulierung zu vermeiden, sofern im Status quo ante bereits ein unverzerrter Wettbewerb bestand.

Informationsprobleme der Regulierung

Die Ausgestaltung und Umsetzung effizienter Technologiepolitik setzt voraus, dass der Regulierer über die Charakteristika des Entscheidungsfeldes angemessen informiert ist, um durch seine Intervention Technologieoffenheit herstellen zu können. Bei der Verfolgung seines Regulierungsziels – und damit auch bei der Wahl des technologiepolitischen Instrumentariums – steht der Regulierer jedoch verschiedenartigen Informationsproblemen gegenüber. Denn häufig verfügt er nur über unvollständige Informationen über die verfügbaren und zukünftigen Technologieoptionen und über die Unsicherheiten der zukünftigen Entwicklungen. Diese Informationsprobleme sind einerseits in einer asymmetrischen Informationsverteilung begründet, andererseits resultieren sie aber auch aus genereller Unsicherheit. Unterschieden werden kann dabei zwischen vorhandenem Wissen und neuem Wissen. Während vorhandenes Wissen grundsätzlich durch Suche gewonnen werden kann, muss neues Wissen durch Forschung oder Erfahrung erst noch generiert werden.³⁴

Die Generierung neuen Wissens erfordert Investitionen in Forschung und Entwicklung. Die wohlfahrtsmaximierende Allokation von Wissen setzt jedoch voraus, dass neues Wissen kostenlos zur Verfügung steht. Dies führt in ein Dilemma, da die Wissensgenerierung mit Kosten verbunden ist und bei kostenloser Verfügbarkeit für alle Akteure kein Anreiz für einen privaten Investor besteht, in Forschung und Entwicklung zu investieren. Kann die Information zu neuem Wissen hingegen mit einem Preis versehen werden, stellt sich keine wohlfahrtsmaximale Allokation der Information mehr ein. In der Folge dieses Dilemmas ist zu erwarten, dass sich bei privatwirtschaftlicher Generierung neuen Wissens entweder zu geringe Investitionen in Forschung und Entwicklung einstellen (wenn Informationen kostenlos zur Verfügung gestellt werden) oder dieses Wissen nicht volkswirtschaftlich optimal genutzt werden kann (wenn die Informationen nicht kostenlos verfügbar sind). Da

32 Knieps (2008), S. 247 f.

33 Der Trade-off zwischen den statischen und dynamischen Effizienzwirkungen eines Regulierungsinstruments wird insbesondere im Zusammenhang mit der Regulierung natürlicher Monopole intensiv diskutiert (vergleiche zum Beispiel im Überblick Bauknecht (2012)).

34 Gawel (1997), S. 268 ff.

insbesondere Grundlagenforschung ein wichtiger Input für weitere Forschungsaktivitäten ist, ist diese Problematik hier besonders groß.³⁵

Informationen über die Existenz der Technologieoptionen sowie über ihre ökonomischen Eigenschaften, wie etwa ihre Kosten und Nutzen oder ihre Kostensenkungspotenziale, liegen häufig dezentral bei den privaten Akteuren vor, sodass eine **asymmetrische Informationsverteilung** zwischen dem Regulierer und den privaten Akteuren besteht. Dies gilt insbesondere auch für die Präferenzen der privaten Akteure, die dem Regulierer in der Regel zunächst unbekannt sind. Die asymmetrische Verteilung der Information hat zur Folge, dass die Wahl des regulatorischen Instrumentariums unter Unwissen und Unsicherheit erfolgt und dem Informationsvorsprung der dezentralen Akteure Rechnung tragen muss.

Die Asymmetrie der Informationsverteilung kann zwar grundsätzlich durch die Beschaffung der notwendigen Informationen durch den Regulierer aufgelöst werden. Hierzu notwendige Informationskosten (für die Informationsbeschaffung und -aufbereitung sowohl beim Regulierer als auch bei den Regulierungsunterworfenen) sowie mögliche Anreize zur Informationsvorenthaltung oder Fehlinformation bei den dezentralen Akteuren haben jedoch zur Folge, dass eine vollständige Informationsbeschaffung nur selten möglich sein wird.

Ein Informationsproblem kann aber nicht nur darin bestehen, dass die relevanten Informationen dem Regulierer nicht oder nicht vollständig zugänglich sind, jedoch bei den privaten Akteuren vorliegen (asymmetrische Information), sondern auch darin begründet sein, dass Informationen allgemein schlicht nicht verfügbar (Unwissen) oder mit Unsicherheit behaftet sind. Dies gilt insbesondere, aber nicht ausschließlich hinsichtlich zukünftiger Technologieentwicklungen und -optionen. Unwissen und Unsicherheit sind dabei nicht allein auf den Regulierer beschränkt, sondern können gleichermaßen die privaten Akteure betreffen und determinieren die Auswahl des politischen Instrumentariums ebenfalls.

Um eine effiziente Erreichung seines Regulierungsziels zu realisieren, muss der Regulierer die aufgezeigten Informationsprobleme bei der Ausgestaltung des Regu-

lierungsrahmens berücksichtigen und ihnen in effizienter Weise Rechnung tragen. Inwiefern ein technologie-neutraler oder ein technologiespezifischer Ansatz hierfür geeignet ist, wird in den folgenden Abschnitten 2.3.2 bis 2.4 näher diskutiert.

3.3.2 Theoretische Effizienz technologieneutraler Regulierung

Wie in Abschnitt 2.1 dargelegt, wird im Rahmen dieser Studie davon ausgegangen, dass private Akteure die finale Entscheidung über die eingesetzten Technologien und ihre Verwendung treffen. In einem solchen Arrangement hat der Regulierer bei der Umsetzung eines Politikziels die Möglichkeit, unterschiedliche Regulierungsansätze zur Adressierung des gesetzten Ziels anzuwenden. Im Rahmen der regulatorischen Intervention kann der Regulierer einerseits gezielt einzelne Technologien, die zur Erreichung des Ziels geeignet erscheinen, fördern (zum Beispiel durch Kaufpreiszuschüsse für einzelne Technologien) beziehungsweise Technologien, die dem politischen Ziel entgegenstehen, sanktionieren, also technologiespezifisch intervenieren. Andererseits kann er auch eine Politik betreiben, die die privaten Akteure dazu anhält, eine zur Erreichung des gesetzten Ziels geeignete Entscheidung über die Technologienutzung vorzunehmen, dabei jedoch keine spezifische regulatorische Behandlung einzelner Technologien anwenden (zum Beispiel durch die Bepreisung von Kohlendioxidemissionen zur Erreichung des Politikziels „Minderung von CO₂-Emissionen“), also einen technologieneutralen Regulierungsansatz wählen.

Das klassische ökonomische Lehrbuchmodell konstatiert einen Effizienzvorteil einer technologieneutralen Regulierung gegenüber technologiespezifischen Eingriffen. Der Grund für den vermeintlichen Effizienzvorteil einer technologieneutralen Regulierung besteht darin, dass die Intervention keine Verzerrung des Wettbewerbs gegenüber dem Status quo ante, also dem Zustand vor dem Regulierungseingriff, zeitigt.³⁶ Es wird also postuliert, dass Technologieneutralität notwendig sei, um Technologieoffenheit zu gewährleisten. Gibt der Regulierer den privaten Akteuren lediglich ein Regulierungsziel vor und lässt ihnen dabei die regulatorisch nicht verzerrte Wahl zwischen den verschiedenen technologischen Optionen zur Erreichung dieses Ziels, so wählen sie die

35 Arrow (1962a).

36 Monopolkommission (2015), S. 80.

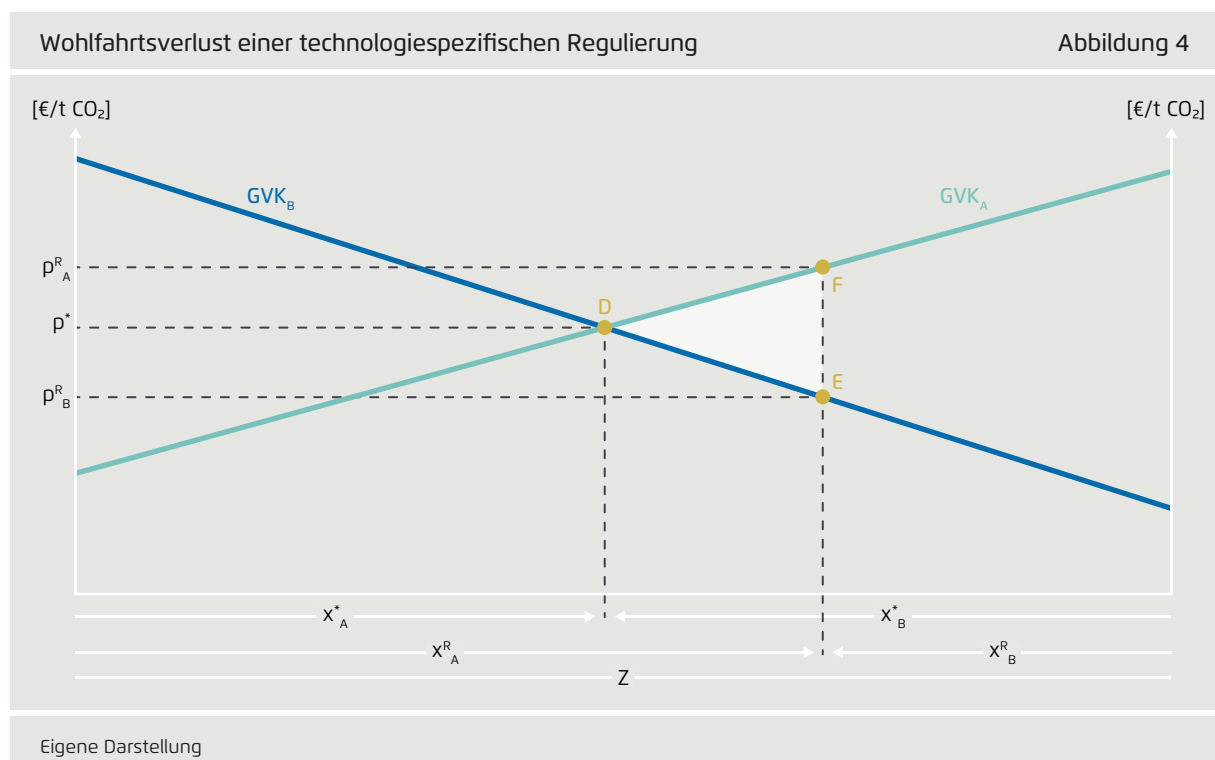
kostengünstigsten Technologieoptionen zur Befriedigung ihrer Bedürfnisse. Auf diese Weise wird dezentrales Kosten-Nutzen-Wissen für die Technologiewahl aktiviert. Hierdurch stellt sich ein effizientes Marktergebnis ein und die soziale Wohlfahrt wird maximiert, so die Argumentation. Dieser Vorteil eines technologieneutralen Ansatzes kommt insbesondere zum Tragen, wenn Informationsdefizite aufseiten des Regulierers bestehen und diesem der wohlfahrtsmaximierende Technologiemix daher unbekannt ist. Eine technologieneutrale Intervention kann unter diesen Umständen verhindern, dass durch technologiespezifische Eingriffe die „falschen Gewinner“ durch den Regulierer ausgewählt werden und das gesetzte Regulierungsziel auf ineffiziente Weise erreicht wird.³⁷

Abbildung 4 veranschaulicht diese Argumentation noch einmal grafisch. Vereinfachend wird hier dargestellt, dass lediglich zwei Technologieoptionen (A und B) zur Erreichung eines Dekarbonisierungsziels Z zur Verfügung stehen. Beide Technologien weisen steigende Grenzvermeidungskosten auf. Als Grenzvermeidungskosten wer-

den jene Kosten bezeichnet, die (ausgehend von einem bestimmten Emissionsniveau) notwendig sind, um eine zusätzliche Einheit an Emissionen zu den geringstmöglichen Kosten zu vermeiden. Die Grenzvermeidungskosten von Technologie A sind dabei von links nach rechts abgetragen, die von Technologie B von rechts nach links. Das Wohlfahrtsoptimum wird erreicht, wenn die beiden Technologien in dem Umfang eingesetzt werden, dass sich die Grenzvermeidungskosten gleichen (Punkt D). An diesem Punkt wird Technologie A im Umfang x_A^* , die Technologie B im Umfang x_B^* eingesetzt. Dieser Technologiemix gewährleistet, dass das Dekarbonisierungsziel Z zu den geringsten Kosten erreicht wird.

Wird eine Preispolitik eingesetzt, kann Punkt D nur durch einen technologieneutralen Preis p^* erreicht werden. Jede technologiespezifische Differenzierung der Preispolitik hat zum Resultat, dass es nicht mehr zum Ausgleich der Grenzvermeidungskosten kommt. Verändert der Regulierer durch eine technologiespezifische Intervention etwa die Preise dergestalt, dass sich der Preis p_A^R für Technologie A und der Preis p_B^R für die Technologie B einstellt, so kommt es in der Folge zu einem Wohlfahrtsverlust in Höhe der Fläche des Dreiecks DEF.

37 Azar; Sandén (2011), S. 137; Jaffe et al. (2005), S. 171.



Der Grund hierfür liegt darin, dass infolge des regulatorischen Eingriffs nun im Umfang der Abweichung vom Technologiemix im sozialen Optimum (Differenz von x_A^R und x_A^*) die Technologie A mit höheren Grenzvermeidungskosten zum Einsatz kommt und auf den Einsatz der Technologie B mit den geringeren Grenzvermeidungskosten im selben Umfang verzichtet wird.

Wird hingegen eine Mengensteuerung eingesetzt, kann Punkt D zumindest theoretisch durch eine technologiespezifische Regulierung erreicht werden. In diesem Fall müsste der Regulierer für die Technologie A die Einsatzmenge x_A^* , für Technologie B die Einsatzmenge x_B^* festlegen. Dazu muss der Regulierer die jeweiligen Grenzvermeidungskosten jedoch genau kennen. In der Realität ist das jedoch typischerweise gerade nicht der Fall. Aufgrund unzureichender Information läuft der Regulierer dann Gefahr, einen ineffizienten Technologiemix vorzuschreiben, etwa x_A^R und x_B^R . Im einfachen Modell würden Ökonomen daher auch im Fall einer Mengensteuerung einen technologieneutralen Ansatz empfehlen. Dabei sollte der Regulierer lediglich das Gesamt mengenziel Z festlegen. Entsprechend der Gesamtmenge sollte er dann Zertifikate ausgeben und von den privaten Akteuren handeln lassen. Im Ergebnis würde sich dann ein Preis für Zertifikate (beziehungsweise Vermeidungsaktivitäten) herausbilden, der gerade p^* entspricht. Der kostenminimale Technologiemix würde (wie bei der technologieneutralen Preislösung) erreicht – auch ohne dass der Regulierer eine genaue Vorstellung von den Grenzvermeidungskosten hat. Im Falle einer Mengensteuerung sprechen dann also insbesondere auch die Transaktionskosten der Informationsbeschaffung für einen technologieneutralen Regulierungsansatz.

Zudem muss ein technologieneutrales Instrumentarium unter Umständen nicht an technologischen Fortschritt und die Entwicklung neuer Technologien angepasst werden, sodass hierfür notwendige Transaktionskosten ebenfalls vermieden werden.³⁸ Außerdem kann ein technologieneutraler Ansatz dazu beitragen, dass Rent-Seeking-Aktivitäten weniger erfolgreich erscheinen.³⁹ So kann bei einer technologieneutralen Regulierung ein bestimmter Steuersatz nur im Konsens mit allen politischen Interessengruppen verhandelt werden.

Im Gegensatz dazu ermöglicht eine technologiespezifische Regulierung den einzelnen Interessengruppen im Extremfall, ihre jeweiligen Interessen gleichzeitig durchzusetzen – etwa durch differenzierte Steuersätze, die den Bedürfnissen des jeweiligen Industriesektors entsprechend angepasst werden. Eine technologieneutrale Regulierung erhöht mithin den Wettbewerb im politischen System. Im Ergebnis ist es für die privaten Akteure – so die Erwartung – weniger lohnend, Ressourcen in Rent-Seeking-Aktivitäten zu investieren. Stattdessen können diese Ressourcen dann für effizienzsteigerndes Profit-Seeking verwendet werden – etwa die Verringerung der Steuerbelastung durch die Entwicklung innovativer Vermeidungsoptionen.

3.3.3 Voraussetzungen für die Effizienz technologieneutraler Regulierung

Dass technologieneutrale Regulierung tatsächlich zu einer höheren sozialen Wohlfahrt führt als eine technologiespezifische, beruht jedoch auf mehreren wichtigen Annahmen.

Unüberbrückbarer Informationsvorteil privater Akteure:

Die Informationen zu den Kosten und Nutzen der Technologien sind dezentral unter den privaten Akteuren verteilt oder können im Wesentlichen nur von diesen zuverlässig beschafft beziehungsweise erzeugt werden. Die Beschaffung dieser Informationen ist für den zentralen Regulierer entweder kostspielig, durch strategisches Verhalten der privaten Wissensträger verzerrt oder aber gänzlich unmöglich, zum Beispiel bei den Opportunitätskosten von Konsumenten bei der Technologienutzung (Beispiel: verringerter Konsumnutzen („Verzichtsleid“) bei Qualitätseinbußen).

Je geringer der relevante Informationsvorteil der privaten Akteure beziehungsweise je zentralisierbarer dezentrale Information ist, desto weniger komparativ vorteilhaft ist Technologieneutralität gegenüber einer Spezifität im Technologieeingriff.

Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes im Status quo ante:

Im Entscheidungsfeld funktioniert die **Koordination des Marktes störungsfrei** jenseits der adressierten Umweltexternalität. Eine störungsfreie Koordination des Marktes wird beispielsweise in der ökonomischen Theorie des

38 Roßnagel (2009), S. 324.

39 Kalkuhl et al. (2012), S. 2; Aalbers et al. (2013), S. 1246.

vollkommenen Marktes beschrieben.⁴⁰ Störungsfreiheit bedeutet in statischer Hinsicht, dass

- die Marktteilnehmer perfekt informiert sein müssen, also einerseits die Informationen über die Technologieoptionen vollständig sind und andererseits keine Informationsasymmetrien zwischen den Marktteilnehmern bestehen (etwa infolge von Transaktionskosten für die Informationsbeschaffung),
- die Marktpreise alle gesellschaftlich relevanten Kosten und Nutzen abbilden, die weiteren (außer der durch den Regulierungseingriff möglicherweise adressierten) Externalitäten also vollständig internalisiert sind,
- keine Marktmacht auf den relevanten Märkten besteht, also funktionierender Wettbewerb gewährleistet ist.

In dynamischer Hinsicht erfordert störungsfreie Marktkoordination, dass

- vollständige Vorausschau aufseiten der privaten Akteure besteht, diese also über alle notwendigen Informationen zu zukünftigen Technologie- und Kostenentwicklungen verfügen,
- zukünftige Kosten und Nutzen in den Entscheidungen der privaten Akteure perfekt berücksichtigt werden
- und keine Marktversagenstatbestände bei der Technologieentwicklung vorliegen, also insbesondere das erworbene Wissen vollständig patentiert werden kann.

Zudem dürfen die Technologieentscheidungen der privaten Akteure nicht durch **technologische oder institutionelle Pfadabhängigkeiten** beeinflusst werden. Es muss also vollständige räumliche und zeitliche Flexibilität bei der Technologiewahl bestehen.

Selbst bei Vorliegen aller vorgenannten Voraussetzungen führt eine technologieneutrale Regulierung nur zu einem Wohlfahrtsoptimum, wenn der **Regulierer im gesamtgesellschaftlichen Interesse agiert** („wohlwollender Diktator“), zum Beispiel also die Externalität vollständig eingepreist wird. Darüber hinaus bestehen keine politikinduzierten Preisverzerrungen auf den relevanten Märkten und es darf keine Unsicherheit bei den privaten Akteuren über die zukünftige Politikgestaltung herrschen.

In einem solchen Umfeld störungsfreier Marktkoordination, der Abwesenheit von Pfadabhängigkeiten und der Existenz eines wohlwollend agierenden Regulierers kann ein technologieneutraler Regulierungsansatz Technologieoffenheit gewährleisten und die Technologieentscheidungen der privaten Akteure führen zu einem effizienten Marktergebnis. Dass technologieneutrale Regulierung die effiziente Form der Technologiepolitik bildet, setzt mithin voraus, dass bereits vor dem Regulierungseingriff weitgehende Technologieoffenheit bestand. Sind jedoch nicht alle der dargestellten Annahmen erfüllt, ist die Sicherstellung eines effizienten Marktergebnisses durch eine technologieneutrale Intervention des Regulierers nicht mehr gewährleistet. Denn in diesem Falle werden die Entscheidungen der privaten Akteure nicht auf einem technologieoffenen Entscheidungsfeld getroffen und die Technologieauswahl entspricht nicht dem kosteneffizienten Technologiemix.

Ein Regulierungsziel beziehungsweise -kriterium: effiziente Dekarbonisierung

Implizit nimmt das Lehrbuchmodell an, dass der Regulierer mit dem eingesetzten Instrument nur ein Regulierungsziel verfolgt, also etwa die Reduktion von Treibhausgasemissionen, und andere Regulierungsziele durch weitere Instrumente adressiert werden (können).

3.4 Ökonomische Parameter zur Entscheidung über die technologiepolitische Ausgestaltung der Regulierung

Wie in Abschnitt 2.3.2 dargelegt wurde, bescheinigt das ökonomische Lehrbuchmodell einem technologieneutralen Regulierungsansatz einen Effizienzvorteil gegenüber einer technologiespezifischen Intervention. Werden die stringenten Annahmen des Lehrbuchmodells jedoch aufgehoben, können verschiedene ökonomische Begründungen für den Einsatz einer technologiespezifischen Regulierung sprechen. Im Folgenden soll näher dargelegt werden, welche ökonomischen Parameter für die Entscheidung für oder wider die Anwendung eines technologiespezifischen Regulierungsinstrumentariums eine Rolle spielen. Diese Parameter lassen sich analog zu den in Abschnitt 2.3.3 dargestellten Annahmen des Lehrbuchmodells der Technologiepolitik in drei Kategorien unterteilen.

40 Die Theorie des vollkommenen Marktes findet sich in vielen Lehrbüchern der Mikroökonomik, beispielhaft sei hier auf Varian (2001) verwiesen.

3.4.1 Die Rolle zentralen Wissens

Ein technologieneutraler Ansatz verspricht insbesondere dann einen Vorteil, wenn das Wissen über die Existenz, zukünftige Entwicklungen und die entsprechenden Kosten-Nutzen-Profile der geeigneten Technologieoptionen zur Erreichung des Regulierungsziels dezentral verteilt ist. In einem solchen Umfeld verfügt der zentrale Regulierer nicht über die notwendigen Informationen, um technologiespezifische Instrumente so auszugestalten, dass sie die privaten Akteure zu einer effizienten Technologiewahl anhalten.⁴¹ Ein technologieneutraler Ansatz kann hingegen durch die Nutzung des dezentralen Entscheidungs- und Entdeckungsmechanismus des Marktes das dezentral vorhandene Kosten-Nutzen-Wissen für die Technologiewahl aktivieren. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass die Vorteilhaftigkeit eines technologieneutralen Regulierungsansatzes mit zunehmender Verfügbarkeit der Informationen beim zentralen Regulierer abnimmt.⁴² Die Frage, inwiefern die Informationen zentral verfügbar sind, betrifft

- sowohl die statische Perspektive, also das Kosten-Nutzen-Wissen über die verfügbaren Technologieoptionen zur Erreichung des Regulierungsziels sowie die Nutzerpräferenzen,
- als auch die dynamische Perspektive, also einerseits das Wissen über die zukünftigen Kosten und Nutzen der verfügbaren Technologieoptionen und andererseits neues Wissen über noch nicht bekannte Technologieoptionen.

3.4.2 Grad der Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes im Status quo ante

Sofern die Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes im Status quo ante eingeschränkt ist, kann sich hieraus eine Indikation für technologiespezifische Regulierung ergeben. Die Technologieoffenheit kann insbesondere infolge einer gestörten Koordination des Marktes, aufgrund von Pfadabhängigkeiten oder durch Marktversagen eingeschränkt sein. Diese drei Felder möglicher Begründungen für technologiespezifische Regulierung werden im Folgenden näher ausgeführt.

Gestörte Koordination des Marktes

Wie in Abschnitt 2.3.3 dargelegt, kann eine technologieneutrale Intervention eine effiziente Technologiewahl nur dann sicherstellen, wenn das Entscheidungsfeld bereits im Status quo ante bis auf die die Regulierung begründende Verzerrung technologieoffen gewesen ist. Dies setzt voraus, dass die Koordination der relevanten Technologie-, Güter- und Dienstleistungsmärkte störungsfrei funktioniert, und die privaten Akteure ihre Technologiewahl rational aufgrund von Effizienzentscheidungen, die auf kostenwahren Preisen basieren, treffen.

Die Koordination des Marktes kann jedoch durch **Marktversagen** gestört sein. Marktversagen auf der **Angebotsseite** entsteht beispielsweise durch:

- Wissens-Spillover, also den Umstand, dass generiertes Wissen nicht vollständig patentierbar ist und auf verschiedene Weisen in konkurrierende Unternehmen gelangen kann (zum Beispiel durch Personalwechsel oder Reverse Engineering). Mithin hat neues technologisches Wissen immer bis zu einem gewissen Grad den Charakter eines öffentlichen Gutes.⁴³ In der Folge kommt es zu einem ineffizient geringen Niveau an Investitionen in die Wissensgenerierung.⁴⁴
- Angebotsseitige Marktmacht in den Technologiemärkten, die einerseits zu einem ineffizienten Marktergebnis (Ineffizienz durch Wahl des Produktionsniveaus und eingeschränkten Markteintritt) und andererseits zu ineffizienter Innovationstätigkeit führen kann (Ineffizienz durch Wahl des Innovationsniveaus).⁴⁵

Marktversagen auf der **Nachfrageseite** wird unter anderem verursacht durch:

- nachfrageseitige Marktmacht, die zu einem ineffizienten Marktergebnis führen kann,
- Verhaltensanomalien,⁴⁶ etwa infolge irrationaler Risikobewertung neuer Technologien.⁴⁷

Auf beiden Marktseiten können **Informationsasymmetrien** und **Transaktionskosten** für die Informationsbe-

41 Rodrik (2014), S. 472.

42 Dies gilt allerdings nur unter der Annahme, dass der Regulierer als „wohlwollender Diktator“ agiert und mithin das zentrale Wissen nutzt, um die Regulierung wohlfahrtsmaximierend zu gestalten.

43 Arrow (1962b), S. 168.

44 Elmer (2016), S. 69 ff.

45 Fritsch (2011), S. 179 f., Elmer (2016), S. 78 ff.

46 Elmer (2016), S. 88 ff.

47 Vgl. etwa die Diskussion unzureichender privater Investitionen zur Steigerung der Energieeffizienz in Gillingham; Palmer (2014).

schaffung über Kosten und Nutzen der Technologien die Entscheidungen der privaten Akteure auf Basis vollständiger Informationen verhindern.⁴⁸

Zudem können effiziente Entscheidungen durch **Budgetrestriktionen** verhindert werden. Mangels finanzieller Ressourcen können die privaten Akteure dann die effiziente und für sie langfristig lohnende Technologiewahl nicht umsetzen. Das wird insbesondere dann zum Problem, wenn hohe Anfangsinvestitionen nicht über den Kapital- und Kreditmarkt finanziert werden können.⁴⁹

Pfadabhängigkeiten

Auch bei einer ansonsten störungsfreien Koordination des Marktes kann es infolge von Pfadabhängigkeiten zu ineffizienten Technologieentscheidungen kommen. Pfadabhängigkeiten treten auf, wenn (Investitions-) Entscheidungen der Vergangenheit die Wirtschaftlichkeit zukünftiger Investitionsentscheidungen beeinflussen.⁵⁰ In der Folge wird ein Pfadwechsel hin zu neuen Technologien erschwert beziehungsweise verteuert. Ursächlich hierfür können sowohl techno-ökonomische Eigenschaften der Technologien als auch der institutionelle Rahmen, aber auch das Zusammenwirken dieser beiden Sphären, sein.⁵¹

Technologische Pfadabhängigkeiten entstehen beispielsweise durch:

- die Existenz von Netzwerkeffekten, die den individuellen Nutzen einer Technologie mit steigender Anwenderzahl steigen lassen,⁵²
- die Notwendigkeit spezifischer Investitionen in komplementäre Infrastruktur für die Nutzung der Technologie (Diese Notwendigkeit verhindert einerseits die Kompatibilität mit der bestehenden Infrastruktur und kann so die Technologiewahl zugunsten der bestehenden Technologie verschieben. Andererseits kann eine hohe Spezifität Investitionen in die komplementäre Infrastruktur für eine neue Technologie hemmen, da die Gefahr gestrandeter Investitionen bei einem erneuten Technologiewechsel besteht.),⁵³

- Lerneffekte sowohl bei der Produktion als auch der Nutzung einer Technologie, die zu Kostensenkungen beziehungsweise Nutzensteigerungen bei der Produktion und Anwendung mit zunehmender beziehungsweise andauernder Nutzung einer Technologie führen⁵⁴ (Während diese Lerneffekte bei bestehenden Technologien schon erfolgt sind, stehen sie bei neuen Technologien noch aus.),
- adaptive Erwartungen, da mit zunehmender Verbreitung einer Technologie die Unsicherheit über deren Nutzen und Qualität abnimmt,⁵⁵
- positive Skalenerträge, die bei steigender Stückzahl zu sinkenden Stückkosten führen und so einen Kostenvorteil bei etablierten Technologieoptionen zeitigen,⁵⁶
- Verbundvorteile, die durch Kostenvorteile bei der gleichzeitigen Produktion mehrerer Produkte die Stückkosten einer Technologie vergünstigen können,
- Dichteeffekte, die durch die Versorgung räumlich geballter Nachfrager die Stückkosten senken,
- Langlebigkeit und Irreversibilität (versunkene Kosten) der Investitionen,
- spezifische Gutseigenschaften (So wird zum Beispiel bei elektrischem Strom die Pfadabhängigkeit dadurch verschärft, dass Strom ein homogenes Gut ist und neue Technologien sich nur durch niedrigere Kosten, nicht aber durch bessere Qualität durchsetzen können: Preiswettbewerb vs. Qualitätswettbewerb.).⁵⁷

Institutionelle Pfadabhängigkeiten werden unter anderem verursacht durch:⁵⁸

- ein institutionelles Regelwerk, das auf die etablierten Technologien zugeschnitten ist und Hemmungswirkung für die Nutzung neuer Technologien entfalten kann,
- mentale Muster, die zu irrationalen Technologieentscheidungen der Nachfrager führen können, etwa die generelle Neigung, den Status quo bewahren zu wollen.

Politikversagen

Verzerrungen der privaten Technologieentscheidungen durch die politische Sphäre – sogenanntes Politikversagen – können ebenfalls negative Auswirkungen auf die

48 Akerlof (1970).

49 Gillingham; Palmer (2014).

50 Arthur (1989), S. 116.

51 Elmer (2016), S. 69 ff.

52 Katz; Shapiro (1985), S. 424 ff.

53 Setterfield (1997), S. 127 ff.

54 Arrow (1962b), McWilliams; Zilberman (1996), S. 140.

55 Unruh (2000), S. 820 f.

56 Sandén; Azar (2005), S. 1559.

57 Kalkuhl et al. (2012), S. 2.

58 Unruh (2000), S. 824 f.

Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes haben und somit die Vorteilhaftigkeit einer technologieutralen Intervention infrage stellen. Politikversagen kann begründet sein in:

- ineffizienten Markteingriffen der Politik, also etwa in unvollständigen Internalisierungen von Externalitäten oder in effizienzmindernden Subventionen (Diese können sowohl Nicht-Wissen geschuldet als auch polit-ökonomisch bedingt sein.⁵⁹ Im Ergebnis wird eine theoretisch effiziente technologie neutrale Regulierung zur Erreichung des Dekarbonisierungsziels, zum Beispiel ein CO₂-Preis, dann nicht ideal umgesetzt.),
- politisch verursachter Unsicherheit aufseiten der privaten Akteure (Diese kann einerseits bedingt sein durch häufige und erratische Änderungen des regulatorischen Umfelds in der Vergangenheit. Unsicherheit kann andererseits instrumentenspezifisch sein, also zum Beispiel bei einem Emissionshandel höher als bei einer CO₂-Steuer. Denn der Preis bei Ersterem ist volatil (der Preis beim Emissionshandel hängt nicht nur vom Cap, sondern auch von exogenen Faktoren wie dem Wirtschaftswachstum ab), bei Letzterer ist er variabel.⁶⁰ Diese Unsicherheit ist jedoch klar abzugrenzen von marktbezogener Unsicherheit, etwa hinsichtlich Ressourcenpreisen oder Konsumentenpräferenzen.).

3.4.3 Weitere Regulierungsziele neben der Dekarbonisierung

Verfolgt der Regulierer mit der Intervention nicht allein das Ziel einer effizienten Dekarbonisierung, sondern auch andere politische Ziele, etwa industrie- oder verteilungspolitische, kann die spezifische Regulierung der unterschiedlichen Technologieoptionen unter Umständen eine höhere Effizienz bei der Erreichung der multiplen Politikziele aufweisen als eine technologie neutrale Intervention (allein).⁶¹ Dies gilt jedoch nur, sofern die Erreichung der weiteren Politikziele durch die verschiedenen Technologieoptionen in unterschiedlichem Maße erfolgt. So wird etwa mit der energetischen Biomassenutzung oftmals gleichzeitig das Ziel der Wertschöpfung und Beschäftigung im ländlichen Raum verfolgt.

3.4.4 Zur Begründung technologiespezifischer Regulierung

Für viele der aufgezeigten Abweichungen vom Lehrbuchmodell stellt eine technologiespezifische Intervention als korrigierendes Instrument zudem lediglich einen „zweitbesten“ Ansatz dar. Das bedeutet, dass neben einer technologiespezifischen Intervention theoretisch andere Instrumente existieren, um die entsprechenden Verzerrungen des Entscheidungsfeldes direkter und damit auch effizienter zu adressieren. Budgetrestriktionen etwa sollten in einer „erstbesten“ Umwelt durch Sozialtransfers und/oder verbesserten Zugang zu Krediten behoben werden. Bestehende Externalitäten sollten durch (schadensbezogene) Preisanpassungen vollständig internalisiert werden. Sind jedoch solche „erstbesten“ Regulierungseingriffe ausgeschlossen, etwa aufgrund polit-ökonomischer Barrieren, fehlender Informationen oder hoher administrativer Kosten, so kann eine technologiespezifische Intervention gegebenenfalls als Zweitbest-Lösung zur Wohlfahrtserhöhung angezeigt sein.

Für die Wahl eines wohlfahrtsmaximierenden Regulierungsinstrumentariums sind zudem, wie in Abschnitt 2.3.1 dargelegt, auch die Transaktionskosten des Regulierungsmechanismus selbst relevant. Die aufgezeigten ökonomischen Begründungen für technologiespezifische Interventionen sollten aus diesem Grunde zunächst lediglich als notwendige Bedingung betrachtet werden. Für die Beurteilung der tatsächlichen Wohlfahrtsauswirkungen sind im Einzelfall auch die Transaktionskosten des Regulierungsmechanismus mit zu berücksichtigen.

Die in diesem Abschnitt (2.4) dargelegten Parameter zeigen auf, dass grundsätzlich vielfältige Gründe für einen möglichen Effizienzvorteil eines technologiespezifischen Instrumentariums sprechen können. Jedoch lässt sich aus dem Zutreffen einzelner ökonomischer Begründungen nicht unmittelbar eine Vorteilhaftigkeit technologiespezifischer Regulierung ableiten. Die Anwendung technologiespezifischer Regulierung verspricht nur dann tatsächlich ein besseres Regulierungsergebnis, wenn

- die genannten ökonomischen Parameter zu einer strukturellen Ungleichbehandlung der Technologieoptionen führen,
- keine besseren Regulierungsinstrumente (insbesondere „erstbeste“ Instrumente) zur Adressierung der gestörten Koordination des Marktes zur Verfügung stehen beziehungsweise anwendbar sind,

59 Zum Beispiel Gawel et al. (2017), Lehmann; Söderholm (2018).

60 Zum Beispiel Lehmann; Gawel (2013).

61 Lehmann; Gawel (2013), S. 603 f.

- die technologiespezifische Regulierung nicht selbst aufgrund von Transaktionskosten und polit-ökonomischen Verzerrungen Fehlanreize setzt und somit einen neuen Tatbestand von Politikversagen bildet.

Diese Herausforderungen werden im folgenden Abschnitt noch einmal anhand ausgewählter Beispiele technologiespezifischer Regulierung in der Praxis illustriert.

3.5 Erfahrungen mit dem Einsatz technologiespezifischer Regulierung

In diesem Kapitel sollen nun praktische Erfahrungen mit technologiespezifischer Regulierung reflektiert werden. Im Mittelpunkt stehen dabei drei exemplarische Politikfälle:

- die Förderung erneuerbarer Energien im Stromsektor als Beispiel für die staatliche Förderung des großskaligen Ausbaus eines neuen Technologiestrangs,
- der Atomausstieg als Beispiel für die staatlich gesteuerte Beendigung der Nutzung eines bestehenden Technologiestrangs und
- der Transrapid als Beispiel für die staatliche Förderung eines zunächst kleinskalig angelegten Pilotprojekts.

Für jeden Politikfall wird zunächst die politische Debatte und ökonomische Kritik am technologiespezifischen Vorgehen dargestellt. Anschließend wird beleuchtet, welche ökonomischen Argumente möglicherweise zu einer Indikation für technologiespezifische Regulierung führen können – und inwieweit diese für die tatsächlichen politischen Entscheidungen bedeutsam waren. Abschließend werden Herausforderungen und Risiken technologiespezifischer Regulierung beleuchtet, welche am Beispiel dieser Politikfälle deutlich werden. Im Ergebnis vermittelt dieses Kapitel daher anhand der Politikbeispiele eine Zusammenschau der Chancen, aber auch Risiken, welche mit der praktischen Umsetzung technologiespezifischer Maßnahmen verbunden sind.

3.5.1 Förderung erneuerbarer Energien

Einführung technologiespezifischer Förderung und ökonomische Kritik

Mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) wurde im Jahr 2000 eine in zweierlei Hinsicht technologiespezi-

fische Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien eingeführt. Zum einen wird damit die Wettbewerbsposition erneuerbarer Energien gegenüber anderen Technologien zur Stromerzeugung verbessert. Zum anderen erfolgt die Förderung für verschiedene Erneuerbare-Energie-Technologien differenziert.⁶²

Spätestens seit der Einführung des Emissionshandels als klimapolitischem Leitinstrument auf europäischer Ebene insbesondere für den Stromsektor wurde auf wissenschaftlicher Ebene verstärkt Kritik am EEG geäußert: Im Zusammenspiel mit dem Emissionshandel führe die Förderung erneuerbarer Energien im Stromsektor zu keiner Emissionsreduzierung insgesamt, sondern lediglich zur Verlagerung der Emissionen in andere Sektoren beziehungsweise andere Länder. Gleichzeitig würden die Kosten der Erreichung der Reduktionsziele in den Emissionshandelssektoren erhöht. Diese Argumente sind vielfach belegt worden – sowohl auf qualitativer⁶³ als auch auf quantitativer Ebene.⁶⁴

In der Folge wurde sowohl aus den Reihen der Wissenschaft⁶⁵ und von nationalen ökonomischen Beratungsgremien⁶⁶ als auch von der Europäischen Kommission⁶⁷ immer wieder gefordert, die EEG-Förderung komplett abzuschaffen – oder zumindest technologieneutral zu gestalten, zum Beispiel über eine Quotenlösung für erneuerbare Energien. Insgesamt vorzugswürdig sei eine komplett technologieneutrale Emissionsminderung über einen Emissionshandel, der über alle Sektoren und Stromerzeugungsformen hinweg ein einheitliches Preis-

62 Gawel et al. (2017).

63 del Rio (2009); Fischer; Preonas (2010); Frondel (2008); Frondel et al. (2010a); (2011); Lehmann; Gawel (2013); Sorrell; Sijm (2003).

64 Abrell; Weigt (2008); Amundsen; Mortensen (2001); Böhringer et al. (2009); Böhringer; Rosendahl (2010); (2011); De Jonghe et al. (2009); Fankhauser et al. (2011); Frontier Economics (2012); (2014); Frontier Economics; r2b (2013); Fürsch et al. (2010); Hindsberger et al. (2003); Jägemann (2014); Jägemann et al. (2013); Jensen; Skytte (2003); Linares et al. (2008); Morris (2009); Morthorst (2003); Paltsev et al. (2009); Pethig; Wittlich (2009); Rathmann (2007); Traber; Kemfert (2009); Unger; Ahlgren (2005).

65 Fankhauser et al. (2011); Frondel et al. (2008); (2010b); Morris (2009); Paltsev et al. (2009); Weimann (2008); (2009).

66 Monopolkommission (2011); (2013); SVR (2014).

67 European Commission (2013a); (2013b); (2013c).

signal sendet und dem Markt die konkreten Maßnahmen- und Technologiewahl überlässt.

Indikation für Technologiespezifität und politische Relevanz

Trotz dieser Einwände bestand und besteht jedoch eine relativ starke Indikation für eine technologiespezifische Förderung erneuerbarer Energien im Stromsektor.

Rolle zentralen Wissens. Bei der Einführung des EEG war klar, dass die Dekarbonisierung des Stromsektors bei gleichzeitigem Kernkraftausstieg mittelfristig nur durch den Ausbau der heute bekannten erneuerbaren Energien zu bewältigen sein würde. Auch war absehbar, dass es dafür eines breiten Portfolios erneuerbarer Energien bedarf. Die Unsicherheit bezog sich primär auf die Entwicklung der Kosten der Nutzung erneuerbarer Energien und damit die genauen Anteile im „optimalen“ Technologiemix. Darüber hinaus ist Strom im Vergleich zu herkömmlichen Gütern ein relativ homogenes Gut: Sein ökonomischer Nutzen bestimmt sich zunächst unabhängig von der Art der Erzeugung.⁶⁸ Einschränkungen ergeben sich erst dann, wenn Unterschiede in der Versorgungssicherheit auftreten oder auf Verbraucherseite unabhängig von der direkten Nutzung bestimmte Präferenzen für bestimmte Erzeugungstechnologien bestehen (zum Beispiel für Öko- oder gegen Atomstrom). Mithin können Konsequenzen eines Umstiegs auf erneuerbare Energien auf Nachfrageseite mutmaßlich einfacher abgeschätzt werden als bei konventionellen Gütern. Insgesamt waren damit maßgebliche Informationen für die Ausgestaltung einer technologiespezifischen Förderung auf zentraler Ebene zumindest teilweise vorhanden.

Eingeschränkte Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes. In der Literatur wurde gezeigt, dass ein fairer Technologiewettbewerb im Stromsektor aus verschiedenen Gründen nicht gewährleistet ist und daher die technologiespezifische Förderung erneuerbarer Energien notwendig machen kann, weil neutrale Mechanismen (zum Beispiel Quotenlösung) unter Umständen diese Marktverzerrung fortschreiben:

- Die Koordination des Marktes wird insbesondere aufgrund von positiven Externalitäten durch Wissens-Spillover gestört. Diese entstehen bei Forschung und Entwicklung⁶⁹ sowie der Anwendung erneuerbarer Energien.⁷⁰

Zahlreiche Studien zeigen, dass technologiespezifische Subventionen eine erstbeste Antwort auf derartiges Marktversagen sind.⁷¹

- Starke Pfadabhängigkeiten (Carbon Lock-in) beeinträchtigen die Unabhängigkeit der heutigen Technologiewahl von früheren Entscheidungen im Stromsektor insbesondere aufgrund (1) der Höhe und Langlebigkeit der Investitionen in Kraftwerke und Netze, (2) steigender Grenzerträge der Nutzung (zum Beispiel durch Lernkurveneffekte), (3) der Homogenität des Gutes Strom (neue Technologien können nicht durch Qualitätsvorteile, sondern nur durch niedrigere Kosten in der Markt kommen) sowie (4) eines institutionellen und regulatorischen Rahmens, der für konventionelle Stromerzeugung optimiert wurde.⁷²
- Tatbestände von Politikversagen ergeben sich insbesondere durch (1) die unzureichende Internalisierung der externen Kosten von CO₂-Emissionen und regulatorische Unsicherheit im Rahmen des EU-Emissionshandels,⁷³ (2) weitere, nicht internalisierte Umweltkosten der Technologienutzung⁷⁴ sowie (3) bestehende direkte Subventionen für fossil-nukleare Erzeugungstechnologien.⁷⁵ Insoweit die Ursachen des Politikversagens nicht direkt behoben werden können (zum Beispiel durch eine Stärkung des EU-Emissionshandels), kann die Förderung erneuerbarer Energien als zweitbesten Regulierungsansatz sinnvoll sein.⁷⁶ Zudem variieren nicht-internalisierte Kosten – etwa bezüglich der Systemintegration und der Umweltwirkungen – auch stark zwischen verschiedenen erneuerbaren Energieträgern und mit dem Ausmaß des Zubaus. Derartige Unterschiede können dann auch

Shestalova (2013); Popp (2002).

70 Bollinger; Gillingham (2014); Hansen et al. (2003); IEA (2000).

71 Bläsi; Requate (2010); Canton; Johannesson Lindén (2010); Fischer; Newell (2008); Kalkuhl et al. (2012); Kverndokk; Rosendahl (2007); Lehmann (2009); Lehmann; Söderholm (2018); van Benthem et al. (2008).

72 Grubb (1997); Kalkuhl et al. (2012); Lehmann; Gawel (2013); Neuhoff (2005); Unruh (2000).

73 Betz; Sato (2006); Isoard; Soria (2001); Kettner et al. (2010); Matthes (2010).

74 BMU (2008); Lehmann; Gawel (2013); Matthes (2010).

75 Greenpeace (2008); UBA (2008).

76 Bläsi; Requate (2007); Fischer (2008); Kalkuhl et al. (2013); Lehmann; Gawel (2013); Lehmann et al. (2018).

68 Neuhoff (2005).

69 Braun et al. (2010); Dechezleprêtre et al. (2013); Noailly;

eine differenzierte Förderung erneuerbarer Energien ökonomisch notwendig machen.⁷⁷

Entsprechend fanden sich Argumente eingeschränkter Technologieoffenheit auch als Begründung für technologiespezifische Förderung im EEG wieder.⁷⁸ Die Förderung der gleichzeitigen Entwicklung diverser Technologiefade war stets ein Leitziel des EEG.⁷⁹ Zudem wurde die Differenzierung zwischen Erneuerbaren-Energie-Technologien typischerweise auch mit unterschiedlichen externen Kosten begründet, die mit ihrer Nutzung einhergehen. Speziell die spätere Reduktion der Förderung der Biomasse wurde so begründet.⁸⁰

Weitere Politikziele. Darüber hinaus wurde mit der Förderung erneuerbarer Energien politisch nicht nur das Ziel einer effizienten Dekarbonisierung des Stromsektors verfolgt. Gleichzeitig sollten auch weitere Umweltexternalitäten (zum Beispiel Umweltwirkungen des Abbaus, Transports und der Entsorgung) und Importabhängigkeiten reduziert werden, die bei der Nutzung fossiler und nuklearer Energieträger auftreten. Vor diesem Hintergrund können auch die explizit von der Bundesregierung gesetzten, separaten Erneuerbaren-Ziele verstanden und möglicherweise ökonomisch begründet werden. In jedem Fall können diese Ziele durch eine separate Förderung erneuerbarer Energien deutlich günstiger erreicht werden als über eine entsprechende Verschärfung eines

CO₂-Preises.⁸¹ Bedeutsam waren zudem industriepolitische Erwägungen.⁸² So sollte etwa durch die Förderung der Biomasse auch die Entwicklung ländlicher Räume unterstützt werden. Insgesamt ist empirisch unklar geblieben ist, ob die EEG-Förderung überhaupt ein ziel führendes Instrument für die Förderung wirtschaftlicher Entwicklung und Beschäftigung ist.⁸³ Außerdem waren verteilungspolitische Erwägungen als politische Begründung für technologiespezifische EEG-Förderung wichtig. Differenzierte Fördersätze ermöglichen es insbesondere, die Gesamtförderkosten zu senken, indem unterschiedliche technologiespezifische Produzentenrenten abgeschöpft werden.⁸⁴ Tatsächlich waren verteilungspolitische Erwägungen Treiber für diverse technologiespezifische Regelungen und Anpassungen im EEG – etwa das räumlich differenzierte Referenzertragsmodell für die Windenergie an Land,⁸⁵ die im EEG 2014 festgelegten separaten Ausbaukorridore für einzelne Technologien⁸⁶ sowie die technologiespezifische Ausschreibung seit dem EEG 2017.⁸⁷

Mithin wird deutlich, dass für den Fall des Ausbaus erneuerbarer Energien für die Stromerzeugung eine relativ deutliche ökonomische Indikation für eine technolo-

77 Gawel et al. (2017); Lehmann; Söderholm (2018).

78 Gawel et al. (2017).

79 Bundestag (1999), S. 9; Bundestag (2008), S. 51 ff.

80 BMU (2011), S. 85, 88; Bundesregierung (2011), S. 15; Bundestag (2011), S. 17.

81 Boots (2003); Jensen; Skytte (2003); Lehmann et al. (2018); Pethig; Wittlich (2009).

82 BMU (2008); Bundestag (2000); (2008).

83 Vgl. zum Beispiel den Überblick in Lehmann; Gawel (2013).

84 Bergek; Jacobsson (2010); del Rio; Cerdá (2014); Held et al. (2014); Resch et al. (2014).

85 Bundestag (1999), S. 9.

86 Bundestag (2014), S. 89 f.

87 Bundesrat (2016), S. 177.

Ökonomische Defizite eines rein technologieneutralen Politikansatzes für die Energiewende (zum Beispiel CO₂-Bepreisung, technologieübergreifende Quote für erneuerbare Energien):

- ineffizient niedrige Anreize für Forschung, Entwicklung und Ausbau erneuerbarer Energien, zudem nur Förderung der gegenwärtig (aber möglicherweise nicht langfristig) günstigsten Technologien,
- unzureichende Anreize zur Überwindung von Pfadabhängigkeiten („Carbon Lock-in“),
- keine Berücksichtigung von externen Umweltkosten und Politikzielen jenseits des Klimaschutzes,
- dadurch insgesamt zu hohe langfristige volkswirtschaftliche Kosten bei der Umsetzung der Energiewende im Stromsektor.

giespezifische Steuerung bestand und besteht – sowohl für eine parallel zum Emissionshandel existierende Erneuerbaren-Förderung insgesamt als auch für die Differenzierung dieser Förderung zwischen verschiedenen erneuerbaren Energieträgern.⁸⁸ Es wurde auch deutlich, dass die oben genannten ökonomischen Argumente zumindest teilweise maßgeblich waren für die Ausgestaltung des EEG in Deutschland.

Risiken von Technologiespezifität

Trotz der bestehenden Indikation für Technologiespezifität sind bei der Ausgestaltung und Weiterentwicklung des EEG auch diverse Risiken dieses Politikansatzes offenkundig geworden.

Grenzen regulatorischen Wissens. Auch wenn ein allgemeines Grundverständnis darüber bestand, mit welchen erneuerbaren Energietechnologien die Energiewende im Stromsektor zu bewältigen ist, sind im Laufe des Bestehens des EEG informatorische Herausforderungen für die Politik deutlich zutage getreten. Insbesondere bestanden aufseiten des Regulierers klare Wissensgrenzen bezüglich der tatsächlichen Entwicklung des technologischen Fortschritts, der weiteren externen Kosten der Technologien (Umweltwirkungen, Akzeptanz etc.) sowie auch der Reaktion der privaten Investoren auf staatliche Fördersätze.⁸⁹ So wurde die tatsächliche Kostenreduktion der erneuerbaren Energien etwa regelmäßig falsch eingeschätzt – Prognosen bezüglich der Windenergie waren zu optimistisch, Prognosen bezüglich der Photovoltaik deutlich zu pessimistisch. Die administrativ festgelegten Einspeisevergütungen reagierten – anders als etwa Zertifikatspreise bei einer technologieneutralen Erneuerbaren-Quote – nicht automatisch auf diese neuen Wissensstände. Vielmehr musste insbesondere ab etwa 2010 kontinuierlich durch EEG-Novellen nachgesteuert werden.⁹⁰ Aufgrund der Trägheit des politischen Gesetzgebungsprozesses hinkten die regulatorischen Entscheidungen hier jedoch typischerweise den aktuellen technologischen Entwicklungen hinterher. In gewissem Maße war also das aufgrund von staatlichen Wissensgrenzen befürchtete Politikversagen bei der technologiespezifischen EEG-Steuerung beobachtbar.⁹¹ Mithin wurde

es insbesondere in Anbetracht des gewählten, relativ unflexiblen Ansatzes der festen Einspeisevergütungen notwendig, gute institutionelle Rahmenbedingungen für politisches Lernen zu schaffen.⁹² Dazu gehörten einerseits Maßnahmen, um die Flexibilität der Anpassung zu gestalten, etwa die von Beginn an regelmäßig vorgesehenen Revisionen des EEG oder die spätere Einrichtung einer Monitoringkommission. Gleichfalls bedeutsam wurde es aber auch, zu einem stärker flexiblen Politikdesign selbst überzugehen, etwa durch die Einführung des „atmenden Deckels“ oder von Ausschreibungen.⁹³

Polit-ökonomische Verzerrungen. Insgesamt ist seit Einführung des EEG auch deutlich geworden, dass der gewählte Grad der Technologiespezifität stark durch die Interessen einzelner Bundesländer sowie der Energiewirtschaftsverbände getrieben wurde.⁹⁴ Polit-ökonomisch war dies zu erwarten: So besitzt technologiespezifische im Vergleich zu technologieneutraler Förderung die besondere Eigenschaft, dass möglicherweise divergierende Interessen unterschiedlicher Stakeholder-Gruppen gleichzeitig bedient werden können.⁹⁵ Je nach naturräumlicher Ausstattung und regionalen Wirtschaftskapazitäten und -interessen hatten beispielsweise Bundesländer sehr unterschiedliche Vorstellungen davon, welche Technologien bevorzugt gefördert werden sollten. Der technologiespezifische Förderansatz machte es nun möglich, dass in den politischen Verhandlungen die Interessen aller Länder parallel befriedigt werden konnten (Nordländer: mehr Windenergieförderung, Bayern: mehr Biomasse- und Photovoltaik-Förderung).⁹⁶ Zudem haben gerade auch die polit-ökonomischen Rahmenbedingungen dazu geführt, dass insbesondere in den letzten Jahren immer stärker beim EEG nachgesteuert wurde. Ähnliches ist auch für die Zukunft der Ausschreibungen zu erwarten.⁹⁷

Insgesamt wird damit deutlich, dass die tatsächlich gewählte technologiespezifische Ausgestaltung des EEG aufgrund von Wissensdefiziten und polit-ökonomischen

Economics; r2b (2013); Monopolkommission (2013); SVR (2014).

92 Foxon; Pearson (2008); Rodrik (2014).

93 Gawel; Lehmann (2019).

94 Gawel et al. (2017); Hoppmann et al. (2014); Strunz et al. (2015); Sühlsen; Hisschemöller (2014); Vossler (2014).

95 Aalbers et al. (2013); Helm (2010); Strunz et al. (2016).

96 BMWi (2016), S. 1 f.; Gawel (2014); Gawel; Lehmann (2014).

97 Gawel; Lehmann (2019).

88 Gawel et al. (2017); Lehmann; Söderholm (2018).

89 Lehmann; Söderholm (2018); Purkus et al. (2015).

90 Gawel; Lehmann (2019).

91 del Rio; Cerdá (2014); Frontier Economics (2014); Frontier

Restriktionen sehr wahrscheinlich nicht mit der theoretisch zu rechtfertigenden Ausgestaltung übereinstimmt.

3.5.2 Atomausstieg

Einführung technologiespezifischer Förderung und ökonomische Kritik

Der Beschluss, den Betrieb von Kernkraftwerken für die Stromerzeugung in Deutschland zu beenden (Atomausstieg), erfolgte zunächst im Jahr 2000 durch die damalige Bundesregierung von SPD und Bündnis 90/Die Grünen. Die seinerzeitige Entscheidung sah eine Maximallaufzeit von 32 Jahren je Kernkraftwerk vor. Optional konnten Restlaufzeiten dabei auch auf andere Reaktoren übertragen werden. Nach dem Wechsel zu einer Regierungskoalition aus CDU, CSU und FDP wurde 2010 eine Verlängerung der Laufzeiten beschlossen. Unter dem Eindruck des Nuklearunfalls von Fukushima erfolgte Anfang 2011 jedoch ein erneuter Politikwechsel. Die Laufzeitverlängerungen wurden zurückgenommen. Stattdessen wurden nun konkrete Abschaltzeitpunkte individuell für alle Kernkraftwerke festgelegt. Planmäßig wird das letzte deutsche Kernkraftwerk Ende 2022 vom Netz gehen.⁹⁸ Insgesamt stellt der Atomausstieg einen sehr technologiespezifischen regulatorischen Eingriff dar: Mittels eines ordnungsrechtlichen Instruments wird der Einsatz einer einzelnen Technologie für Stromerzeugung mittelfristig komplett ausgeschlossen.

Im Anschluss an die Entscheidung entspann sich schnell eine politische und wissenschaftliche Debatte um mögliche negative Konsequenzen des Atomausstiegs. So wurde diskutiert, ob der Ausstieg aus der CO₂-armen Kernkraft nicht die Erreichung der klimapolitischen Ziele gefährde und verteuere.⁹⁹ Zudem wurden mögliche Auswirkungen des Atomausstiegs auf die Strompreise und die gesamtwirtschaftliche Entwicklung kritisch untersucht.¹⁰⁰ Nicht zuletzt spielte auch die Sorge um die Gewährleistung einer sicheren Stromversorgung in Deutschland ohne die grundlastfähige Kernkraft eine Rolle.¹⁰¹ Insgesamt deutete

sich jedoch ein wissenschaftlicher Konsens an, dass derartige negative Auswirkungen des Atomausstiegs zwar zu erwarten seien, insgesamt aber nur in geringem Ausmaße und vorübergehend auftreten würden.¹⁰²

Indikation für Technologiespezifität und politische Relevanz

Gleichzeitig bestand eine relativ starke Indikation für die Einführung eines technologiespezifischen Instruments zur Regulierung der Nutzung der Kernkraft.

Rolle zentralen Wissens. So war bereits zum Zeitpunkt der Entscheidung über den Atomausstieg nicht nur bekannt, dass die negativen Auswirkungen vermutlich begrenzt wären. Gleichzeitig war deutlich geworden, dass die Kernkraft nur unter sehr ausgewählten Bedingungen (zum Beispiel in rohstoffarmen Ländern wie Japan) betriebswirtschaftlich rentabel betrieben werden konnte.¹⁰³ Darüber hinaus waren Risiken für gesellschaftliche Kosten zu berücksichtigen (siehe weiter unten), die durch den Fukushima-Unfall wieder in das Bewusstsein der politischen Entscheider gerückt wurden. Die gesellschaftlichen Risiken eines Weiterbetriebs der Kernkraftwerke erschienen mithin deutlich größer als die Kosten eines Atomausstiegs.¹⁰⁴ Löscher¹⁰⁵ weist dabei noch auf ein grundlegendes Problem bei der Bewertung der Nutzung der Kernkraft hin. Die Möglichkeit gewaltiger wirtschaftlicher Schäden mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit verhindere eine klassische Kosten-Nutzen-Analyse. Letztlich war daher eine gesellschaftliche – und mithin zentralpolitische – Entscheidung über die Weiternutzung der Kernkraft notwendig und unvermeidlich.

Eingeschränkte Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes. Im Technologiewettbewerb erhielt die Kernkraft insbesondere durch diverse, nicht vollständig eingepreiste externe Kosten einen unbotmäßigen Vorteil.¹⁰⁶

- negative Umweltauswirkungen bei Gewinnung der Kernbrennstoffe,

98 Matthes (2012).

99 Bruninx et al. (2013); De Cian et al. (2014); Duscha et al. (2013); Holm-Müller; Weber (2011); Knopf et al. (2014).

100 Bauer et al. (2012); Bretschger et al. (2012); Duscha et al. (2013); Hennicke; Schleicher (2011); Holm-Müller; Weber (2011); Matthes (2012).

101 Bruninx et al. (2013); Hirschhausen et al. (2015).

102 So etwa Matthes (2012).

103 Bradford (2012).

104 Hennicke; Schleicher (2011); Nitsch et al. (2004).

105 Löscher (2011), S. 310.

106 Meyer (2012); Nitsch et al. (2004); Peterson (2011); Rabl; Rabl (2013); Thomas et al. (2007); WBGU (2011); Welsch (2016).

- Gesundheitsrisiken durch mögliche Störfälle in Kernkraftwerken und durch mögliche Anschläge auf Kernkraftwerke,
- Kosten der Endlagerung radioaktiver Abfälle,
- Risiken militärischen Missbrauchs, unkontrollierter Proliferation.

Diese Externalitäten treten spezifisch bei der Nutzung der Kernkraft auf und rechtfertigen daher auch den Einsatz technologiespezifischer Instrumente zu ihrer Internalisierung. Bestehende Instrumente – etwa gesetzliche Regelungen zu Haftung und Rückstellungen – erfüllten diesen Zweck nur begrenzt.¹⁰⁷ Entsprechend wurden insbesondere Risiken des Betriebs und Probleme der langfristigen Lagerung der radioaktiven Abfälle auch als Begründung für den im Jahr 2000 beschlossenen Atomausstieg angeführt.¹⁰⁸

Zudem wurde die Nutzung der Kernkraft durch direkte Subventionen – sowohl für Forschung und Entwicklung als auch für den Bau von Kernkraftwerken – in der Vergangenheit massiv begünstigt.¹⁰⁹ Im Verbund mit den generell im Energiebereich vorzufindenden Pfadabhängigkeiten führten diese Formen von Markt- und Politikversagen zu einer ineffizient hohen Nutzung der Kernkraft in Deutschland.

Teilweise wurde der Atomausstieg auch als Instrument diskutiert, um Forschung und Entwicklung im Bereich alternativer Treibhausgasvermeidungstechnologien voranzubringen.¹¹⁰ Ohne einen Atomausstieg, so die Erwartung, würde kaum jemand etwa in die Entwicklung erneuerbarer Energien investieren. Schließlich waren diese im Vergleich zur Kernkraft eine noch verhältnismäßig teure Vermeidungsoption. Aus ökonomischer Sicht sind zur Förderung von Innovation und Diffusion jedoch direktere Instrumente vorteilhafter (vgl. die Diskussion in Kapitel 2.4.1). Ein Atomausstieg als alleiniges Innovationsinstrument stellt hier bestenfalls eine zweit- oder drittbeste Lösung dar.

Insgesamt wird deutlich, dass eine technologiespezifische Regulierung der Kernkraft ökonomisch angezeigt war – insbesondere, um deren spezifische gesellschaftliche Kosten und Risiken besser zu berücksichtigen.

Risiken von Technologiespezifität

Am Beispiel des Atomausstiegs wurde im Zeitverlauf jedoch auch deutlich, dass die politischen Entscheidungen nicht alleine durch die Abwägung gesellschaftlicher Risiken und Nutzen der Kernkraft bestimmt waren. Das lag nicht zuvorderst an Wissensdefiziten, sondern vielmehr an polit-ökonomischen Einflussfaktoren.¹¹¹ So wurde die Entscheidung der Bundesregierung im Jahr 2000 für einen Atomausstieg auch maßgeblich durch wirtschaftliche Rahmenbedingungen erleichtert. Die Kernkraftwerke waren zu diesem Zeitpunkt bereits abgeschrieben und der weitere Betrieb wurde durch den Preisdruck der Strommarktliberalisierung zunehmend unrentabel. Vor diesem Hintergrund hielt sich der politische Widerstand der Kernkraftwerksbetreiber in Grenzen. Vielmehr boten die Verhandlungen über den Atomausstieg die Möglichkeit, Kompensationszahlungen für die Stilllegung der Kraftwerke zu erwirken. Das änderte sich jedoch maßgeblich gegen Mitte der 2000er Jahre. Die Einführung des Emissionshandels sowie steigende Weltmarktpreise für Kohle und Gas hatten zu steigenden Großhandelspreisen für Strom geführt und den Betrieb von Kernkraftwerken wieder profitabel gemacht. Mit dem Wechsel zu einer CDU/CSU-FDP-Regierung öffnete sich dann auch das politische Gelegenheitsfenster für eine Verlängerung der Laufzeiten. Laut Matthes¹¹² entstand den Kernkraftwerksbetreibern durch die Laufzeitverlängerung ein ökonomischer Vorteil von 42 bis 64 Milliarden Euro. Erst der Fukushima-Unfall ließ den politischen Druck so groß werden, dass von der Verlängerung wieder Abstand genommen wurde.

Die politischen Wendungen waren gleichzeitig ein Lehrbeispiel dafür, wie unzureichendes politisches Commitment zum Atomausstieg dessen Wirkung beeinträchtigte. Als Mitte der 2000er Jahre absehbar wurde, dass der Betrieb der Kernkraftwerke wieder wirtschaftlich werden würde, spekulierten die Betreiber zunehmend darauf, dass der Atomausstieg bei einem Regierungswechsel rückgängig gemacht würde. Entsprechend

107 Matthes (2012); Meyer (2012); Peterson (2011); Thomas et al. (2007); Hirschhausen et al. (2015).

108 Bundesregierung (2002).

109 Bradford (2012); Matthes (2012).

110 De Cian et al. (2014); Hennicke; Schleicher (2011).

111 So etwa Matthes (2012).

112 Matthes (2012), S. 47.

unterließen sie Investitionen in neue Technologien, etwa in erneuerbare Energien, weitgehend.

Polit-ökonomisch geprägt war zudem auch die Instrumentenwahl zur Umsetzung des Atomausstiegs. Entsprechend der ökonomischen Theorie hätte eine Steuer- oder Abgabensenkung eingeführt werden sollen, um die externen Kosten der Kernkraftnutzung – soweit möglich – zu internalisieren. Stattdessen setzte die Politik jedoch auf einen ordnungsrechtlichen Ansatz. Jenseits der Vorgabe, die Kraftwerke zu einem bestimmten Zeitpunkt abzuschalten, führte dieser zu keiner zusätzlichen finanziellen Belastung der Kraftwerksbetreiber. Polit-ökonomisch lag diese Lösung nahe. Volkswirtschaftlich war sie jedoch problematisch, da dadurch keine Anreize gesetzt wurden, die Stromproduktion – und damit die einhergehenden Externalitäten – aus Kernkraft auch schon während der Restlaufzeit zu reduzieren. Zudem wurde kein Steueraufkommen generiert, mit dem man die weiterhin auftretenden externen Kosten hätte begleichen oder kompensieren können. Das galt umso mehr, als die ursprünglich parallel wirkende Brennelementesteuer als verfassungswidrig eingestuft und zurückgenommen wurde.¹¹³ Insgesamt wird damit deutlich, dass ein technologiespezifischer politischer Eingriff zur Regulierung der Kernkraftnutzung zwar ökonomisch indiziert war, die Umsetzung im Rahmen des Atomausstiegs jedoch volkswirtschaftlich suboptimal erfolgte.

3.5.3 Transrapid

Einführung technologiespezifischer Förderung und ökonomische Kritik

Ab 1971 wurde durch das damalige Bundesministerium für Forschung und Technik (BMFT) in Kooperation mit großen deutschen Industrieunternehmen die Entwicklung einer Magnetschwebbahn unter dem Namen Transrapid als Alternative zum bestehenden Rad-Schiene-System gefördert. 1985 wurde eine Teststrecke im Emsland in Betrieb genommen. 1991 bescheinigte das Bundesbahn-Zentralamt dem Transrapid die technische Einsatzreife. In der Folge wurde mit der Planung möglicher Transrapid-Strecken begonnen, u.a. von Hamburg nach Berlin, im Ruhrgebiet sowie vom Münchner Hauptbahnhof zum Flughafen München. Letztlich wurde aus Wirtschaftlichkeitsgründen jedoch keine der Strecken

in Deutschland realisiert. Lediglich eine Strecke in China wurde in Betrieb genommen. Spätestens seit Einstellung der Teststrecke im Emsland im Jahr 2011 gilt das Projekt Transrapid faktisch als gescheitert.¹¹⁴

Mit dem Projekt Transrapid wurde eine Technologie durch hochspezifische staatliche Förderung vorangetrieben. Ziel war es, eine Alternative zum bestehenden Rad-Schiene-System zu entwickeln, dem keine technische Weiterentwicklung, insbesondere hinsichtlich höherer Reisegeschwindigkeiten, zugetraut wurde. Spätestens seit den 1980er-Jahren wurden jedoch immer wieder Zweifel an der wirtschaftlichen Sinnhaftigkeit des Vorhabens geäußert, etwa durch den Bundesrechnungshof.¹¹⁵

Indikation für Technologiespezifität und politische Relevanz

Prinzipiell konnte durchaus auch im Fall des Transrapids eine Indikation für technologiespezifische Regulierung festgestellt werden.

Rolle zentralen Wissens. Die Entwicklung des Transrapids erfolgte von Anfang an in enger Kooperation zwischen staatlichen und einer begrenzten Zahl privater Akteure.¹¹⁶ Zumindest theoretisch hatten die politischen Entscheider im BMFT daher verhältnismäßig guten Zugang zu Informationen über Kosten und Nutzen des Vorhabens.

Eingeschränkte Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes. Insoweit es sich bei der Entwicklung des Transrapids um Grundlagenforschung handelte, konnte die spezifische staatliche Förderung durch Technologie Marktversagen in diesem Stadium – etwa aufgrund hoher Risiken und Wissensexternalitäten – begründet werden. Eppendorfer¹¹⁷ wendet diesbezüglich jedoch ein, dass die Technologie zum Zeitpunkt der Förderentscheidung 1971 das Stadium der Grundlagenforschung bereits verlassen hatte. Spätestens jedoch mit der Bescheinigung der technischen Einsatzreife durch das Bundesbahn-Zentralamt im Jahr 1991 war eine Förderung als Grundlagenforschung nicht mehr ökonomisch begründ-

113 Luhmann (2017).

114 Schewe et al. (2013).

115 Haßheider; Malina (2003).

116 Eppendorfer (1999).

117 Eppendorfer (1999).

bar. Darüber hinaus konnten jedoch auch Pfadabhängigkeiten als Begründung für einen technologiespezifischen Eingriff herangezogen werden. Der Technologiewettbewerb war etwa aufgrund massiver Skaleneffekte und Netzwerkexternalitäten zugunsten des bestehenden Rad-Schiene-Systems verzerrt. Der Aufbau einer neuen Infrastruktur wäre extrem kapitalintensiv und risikobehaftet gewesen. Daher war der Aufbau durch private Investoren allein nicht zu erwarten, bevor eine kritische Mindestgröße der Infrastruktur durch staatliche Förderung bereitgestellt würde.

Weitere Politikziele. Mit der Förderung des Transrapids wurden zudem auch in starkem Maße industriepolitische Ziele verfolgt. So sollten den beteiligten Industrieunternehmen insbesondere auch im Ausland neue Absatzmärkte erschlossen werden.¹¹⁸ Inwieweit dafür tatsächlich eine möglicherweise unwirtschaftlich betriebene Pilotstrecke in Deutschland notwendig war, blieb freilich unklar.¹¹⁹

Risiken von Technologiespezifität

Der Transrapid gilt gemeinhin als Paradebeispiel dafür, dass der Staat bei der technologiespezifischen Förderung einer neuen Technologie versagt. Dabei ist jedoch zunächst festzuhalten, dass das Scheitern eines staatlich initiierten Technologieprojekts allein nicht per se als Beleg für Politikversagen gewertet werden kann. Vielmehr können ineffizient hohe Projektrisiken eines privaten Investments ja gerade als Begründung für staatliches Eingreifen herangezogen werden. Die Möglichkeit des Scheiterns ist solchen Projekten mithin inhärent. Förderte der Staat umgekehrt nur Projekte mit niedrigen Risiken, käme er gerade seiner ordnungspolitischen Aufgabe nicht nach. Rodrik fasst diese Überlegungen wie folgt zusammen: „Mistakes are an inevitable and necessary part of a well-designed industrial policy programme; in fact, too few mistakes are a sign of underperformance.“¹²⁰

Nichtsdestotrotz deutet viel darauf hin, dass die technologiepolitischen Entscheidungen bezüglich der Förderung des Transrapids polit-ökonomisch stark verzerrt wurden. Am Anfang stand die verkehrspolitische Frage,

wie das seit den 1950er-Jahren steigende Verkehrsaufkommen bewältigt werden sollte. Staatlich subventionierte technische Großlösungen (Ausbau von Verkehrsinfrastruktur) waren politisch opportuner als etwa eine stärkere Bepreisung von Individualverkehr.¹²¹ Durch die Trennung von Finanzierung und Nutzung wurde das Transrapid-Projekt für die politischen Entscheider zu einem sogenannten White Elephant.¹²² Ihre Wähler nahmen als potenzielle Nutzer primär die Vorteile des Projekts wahr (höhere Mobilität, Symbol für Fortschritt und Erfolg des Industrielandes Deutschland, Exportchancen etc.). Die Kosten für die Subventionen konnten jedoch im Steuer- und Abgabensystem versteckt werden. Unter diesen Umständen erhöhte das Projekt die Wiederwahlchancen für die politischen Entscheider. Als Konsequenz hatten sie starke Anreize, das Projekt Transrapid auch dann noch weiterzuverfolgen, als seine fehlende Wirtschaftlichkeit bereits offenbar geworden war. Politisch vorangetrieben wurde das Projekt zudem durch einen kleinen, gut organisierten und einflussreichen Kreis deutscher Industrieunternehmen.¹²³ Nicht zuletzt half das Transrapid-Projekt dem damals gerade gegründeten BMFT, seinen politischen Einflussbereich zu festigen und seine Kompetenzen etwa gegenüber dem Verkehrsministerium abzugrenzen.¹²⁴

Insgesamt erfolgten die technologiepolitischen Entscheidungen zum Transrapid mithin nur sehr bedingt auf Basis gesamtwirtschaftlicher Wohlfahrtsüberlegungen. Der politische Durchsetzungsprozess des Transrapids erfolgte weitgehend losgelöst von den normativen Anforderungen an eine staatliche Forschungspolitik.¹²⁵ Ohne die staatliche Förderung wäre das Projekt vermutlich viel früher aufgegeben worden.¹²⁶ Das Beispiel des Transrapids zeigt damit deutlich, wie stark gerade polit-ökonomische Einflüsse die Umsetzung, Effizienz und Wirksamkeit technologiespezifischer Instrumente beeinträchtigen können.

118 Eppendorfer (1999); Schewe et al. (2013).

119 Haßheider; Malina (2003).

120 Rodrik (2014), S. 472.

121 Bernstein (2014); Eppendorfer (1999).

122 Gawel (2013); Haßheider; Malina (2003).

123 Eppendorfer (1999).

124 Bernstein (2014).

125 Eppendorfer (1999).

126 Büllingen (1997).

3.6 Zwischenfazit: Zum Zusammenhang von Technologieneutralität und Technologieoffenheit

Die Ausführungen in Abschnitt 2.3.3 haben gezeigt, dass eine technologieneutrale Intervention nur unter sehr strikten Voraussetzungen tatsächlich die Erreichung einer wohlfahrtsoptimierenden Technologiewahl durch die privaten Akteure gewährleisten kann. Sie ist somit eher als ein theoretischer Referenzpunkt im Diskurs um die Ausgestaltung einer technologiepolitischen Intervention zu betrachten. In der regulatorischen Praxis ist hingegen typischerweise ein gewisser Grad an Technologiespezifität zu beobachten. Oftmals stellt bereits das Regulierungsziel eine technologiespezifische Rahmung dar. So ist etwa unter der Annahme des übergeordneten Regulierungsziels des Klimaschutzes auch die in der vorliegenden Studie betrachtete Fragestellung der geeigneten Regulierung von Technologieoptionen zur Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs in hohem Maße technologiespezifisch (vergleiche auch Abbildung 3). Selbst theoretisch technologieneutrale Regulierungsinstrumente wie der Emissionshandel sind in der Praxis häufig technologiespezifisch ausgestaltet, indem

sie etwa wie im Falle des europäischen Emissionshandels lediglich einige der relevanten Sektoren umfassen oder die Emissionszertifikate technologiespezifisch allozieren. Die für die regulatorische Praxis relevante Fragestellung ist somit in der Regel keine dichotome Entscheidung für oder wider Technologieneutralität, sondern vielmehr eine Frage des geeigneten Grades der Technologiespezifität sowie der konkreten Ausgestaltung des Instrumentariums.¹²⁷

In einer theoretischen Betrachtungsweise kann eine technologieneutrale Intervention nur in dem Fall eine effiziente Technologiewahl der privaten Akteure sicherstellen, in dem bereits im Status quo ante (das heißt vor dem betrachteten Regulierungseingriff) ein technologieoffenes Entscheidungsfeld bestanden hat – mit Ausnahme der zu regulierenden Externalität der CO₂-Emissionen. Denn unter dieser Voraussetzung erhält eine technologieneutrale Intervention die Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes aufrecht. Ist hingegen der Technologiewettbewerb vor dem Regulierungseingriff bereits verzerrt, besteht bei einer technologieneutralen

127 Hallegatte et al. (2013), S. 17.

Technologieneutralität und Technologieoffenheit		Abbildung 5	
Regulierung		Entscheidungsfeld	
		Technologieoffenheit vor Regulierung niedrig	Technologieoffenheit vor Regulierung hoch
	technologie-neutral	ineffizient neutral	effizient neutral
	technologie-spezifisch	effizient diskriminierend ineffizient diskriminierend	ineffizient diskriminierend
Eigene Darstellung			

Intervention diese Verzerrung fort. Entsprechend macht dies gemäß der Zweitbest-Theorie einen korrigierenden Regulierungseingriff notwendig, um der bestehenden Verzerrung entgegenzuwirken¹²⁸ – dies gilt zunächst jedoch nur unter Vernachlässigung von Transaktionskosten. Um Technologieoffenheit im Entscheidungsfeld herzustellen, kann also ein technologiespezifischer Eingriff notwendig sein, der die bestehende(n) Verzerrung(en) egalisiert. Es können daher, wie in Abschnitt 2.4 aufgezeigt, verschiedene ökonomische Begründungen für eine technologiespezifische Regulierung sprechen.

Technologieoffenheit kann somit sowohl durch technologieneutrale als auch durch technologiespezifische Regulierung erreicht werden. Entscheidend ist, ob das Entscheidungsfeld bereits im Status quo ante technologieoffen war. Der Zusammenhang zwischen dem Status quo ante des Entscheidungsfeldes und der theoretischen Eignung einer technologieneutralen oder einer technologiespezifischen Intervention zur Erreichung von Technologieoffenheit ist in Abbildung 5 noch einmal illustriert.

Der Umstand, dass ein technologieneutraler Regulierungsansatz nur unter sehr restriktiven Voraussetzungen eine effiziente Technologiewahl der privaten Akteure gewährleisten kann, bedeutet jedoch nicht, dass eine technologiespezifische Regulierung per se eine höhere Wohlfahrt gewährleistet. Vielmehr sind auch die Anforderungen an eine effiziente technologiespezifische Intervention hoch. So muss der Regulierer über die notwendigen Informationen über die Existenz und das Ausmaß der Verzerrungen im Entscheidungsfeld verfügen, um korrigierend mit technologiespezifischen Instrumenten eingreifen zu können. Zudem darf die Ausgestaltung der technologiespezifischen Regulierung nicht polit-ökonomisch verzerrt sein. Die Erfahrungen mit bestehenden, technologiespezifischen Ansätzen (vgl. Abschnitt 2.5) zeigen, dass beide Anforderungen in der Praxis oft nicht erfüllt sind. Wie Abbildung 5 verdeutlicht, kann der Regulierer mit einer inadäquaten technologiespezifischen Intervention durchaus bestehende Verzerrungen im Entscheidungsfeld verstärken oder neue schaffen. Zudem können mögliche Effizienzvorteile bei der Technologiewahl durch hohe Transaktionskosten der Regulierung überkompensiert werden, sodass eine höhere Effizienz

der Technologiewahl durch die privaten Akteure nicht per se auch zu einer höheren Wohlfahrt führt.

Grundsätzlich bleibt damit auch festzuhalten, dass der Effizienzvorteil einer technologieneutralen Intervention potenziell umso höher ist, je weniger die notwendigen Informationen zentral verfügbar sind und je höher die Technologieoffenheit des Regulierungsfeldes im Status quo ante ist.

3.7 Thesen zum theoretischen Konzept der Technologieneutralität

1. Eine erfolgreiche **Dekarbonisierung des Straßenverkehrs** setzt staatliche Eingriffe voraus, da insbesondere die Klimaauswirkungen fossiler Mobilität nicht angemessen in den Marktpreisen widerspiegelt werden. Für eine emissionsarme beziehungsweise -freie Mobilität stehen im motorisierten Straßenverkehr verschiedene, miteinander konkurrierende Technologien zur Verfügung. Es stellt sich daher aus ökonomischer Sicht die Frage, ob und inwieweit staatliche Regulierungseingriffe möglichst neutral in Bezug auf diese Technologien sein sollen.
2. **Technologieneutralität der Regulierung umfasst zwei Dimensionen.** Eine perfekt neutrale Regulierung setzt zum einen unmittelbar an einem definierten Regulierungsziel (zum Beispiel Verminderung von Treibhausgasemissionen) an. Sie belässt so alle denkbaren Entscheidungsspielräume in nachgeordneten Feldern wie etwa einzelnen Sektoren, um das Regulierungsziel zu erreichen, und gibt nicht etwa Sektorenziele vor, etwa für Strom, Wärme, Verkehr oder nachgeordnet für Schienen-, Straßen-, Luftverkehr und Schifffahrt. Zum anderen verzichtet perfekt neutrale Regulierung auf jedwede Diskriminierung einzelner Technologien (innerhalb eines möglicherweise ausgewählten Sektors) und überlässt diese Auswahlentscheidung gerade den gesellschaftlichen Akteuren. Dies geschieht in der Annahme, diese Akteure besäßen die bessere Informationslage insbesondere über nur dezentral verfügbare Kosten und Nutzen beziehungsweise könnten derartige Informationen leichter zuverlässig beschaffen oder erzeugen. Die dezentral über den Markt organisierte Technologiewahl führt daher eher zum gesellschaftlichen Kostenoptimum. Je

128 Lipsey; Lancaster (1956).

weiter sich eine tatsächliche Regulierung von diesen Anforderungen an perfekte Technologieneutralität entfernt, desto technologiespezifischer wird sie.

3. Technologieneutralität und Technologiespezifität von Regulierung sind mithin **keine dichotomen Alternativen, sondern bilden lediglich die gedanklichen Endpunkte eines komplexen zweidimensionalen Kontinuums** aus, in dem sich praktische Ansätze konkret verorten lassen. Ein auf bestimmte Sektoren beschränkter Emissionshandel setzt bereits technologische Einschränkungen für die Möglichkeiten zur Treibhausgasreduktion. Er verkörpert damit faktisch bereits Elemente von Technologiespezifität. Dies wiederum bedeutet, dass es für konkrete Wirtschaftspolitik schon konzeptionell gar nicht um ein Entweder-oder, sondern um eine komplexere Gestaltungsaufgabe geht, die letztlich von beiden Ansätzen angemessenen Gebrauch machen muss.
4. Technologiespezifität der Regulierung muss wiederum von Technologiespezifität von Investments (zum Beispiel in Produktionskapazitäten für Kraftfahrzeuge) unterschieden werden. Eine Investition gilt für die hier zu klärende Frage als „spezifisch“, wenn ihre (ungeschmälernten) Erträge die Weiternutzung der bisherigen Technologien voraussetzen, also nicht anderweitig, zum Beispiel für innovative Technologien, nutzbar erscheinen oder dabei nennenswerte Einbußen erführen. So können etwa vielfältige private Investments für konventionelle Antriebstechnologien weiter genutzt werden, sofern künftig synthetische Kraftstoffe zum Einsatz kommen.
5. **Für die Zwecke dieser Untersuchung wird Technologieneutralität der Regulierung ferner von der Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes**, in das die Regulierung hineinwirkt, unterschieden. Technologieoffenheit ist damit ein Merkmal des Regulierungsumfeldes (inklusive der Eigenschaften der relevanten Akteure, Technologien, Märkte und bestehender Regelungen), Technologieneutralität hingegen eine Eigenschaft des staatlichen Eingriffes. Wir nennen ein Entscheidungsfeld „technologieoffen“, wenn und soweit die Technologiewahl auf einem im Übrigen (das heißt jenseits des Klimaschutzes) unverzerrten Entscheidungsfeld stattfindet. Als unverzerrt stellt sich ein Entscheidungsfeld dann dar, wenn die (privaten oder staatlichen) Entscheider in Kenntnis aller volkswirtschaftlich relevanten Kosten und Nutzen insoweit „richtige“

Abwägungsentscheidungen treffen können, die auf kostenwahren Preisen basieren. Ein mobilitätsbezogenes Beispiel für ein weitgehend technologieoffenes Entscheidungsfeld ist der Markt für Fahrräder: Die verfügbaren Technologien sind mitunter heterogen (Art der Gangschaltung, Rahmenmaterial, Komfortfunktionen etc.), bei der Wahl zwischen den Technologien berücksichtigen die Käufer jedoch weitgehend alle relevanten volkswirtschaftlichen Kosten und Nutzen.

6. Bestehen hingegen neben den externen Kosten des Treibhausgasausstoßes weitere Markt-unvollkommenheiten oder ist der politische Entscheidungsprozess von anderen als Wohlfahrtsmotiven geleitet, offenbart sich ein entsprechend verzerrtes Entscheidungsfeld. Dies aber hat erhebliche Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit eines neutralen Regulierungsansatzes. Die störungsfreie Koordination der relevanten Technologie-, Güter- und Dienstleistungsmärkte wird unter anderem durch technologische Wissens-Spillover-Effekte, vermachtete Märkte, Transaktionskosten, Informationsdefizite oder -asymmetrien sowie verhaltensbedingte Barrieren und Pfadabhängigkeiten beeinträchtigt (Marktversagen). Hinzu treten Verzerrungen der privaten Technologieentscheidungen durch die politische Sphäre (Politikversagen); diese können ebenfalls negative Auswirkungen auf die Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes haben und somit die Vorteilhaftigkeit einer technologieneutralen Intervention infrage stellen. Hierzu zählen unvollkommene Regulierungseingriffe (zum Beispiel zu niedriger CO₂-Preis) sowie durch häufige und erratische Änderungen der politischen Rahmenbedingungen ausgelöste Unsicherheiten bei Privaten.
7. **Die Erreichung des Dekarbonisierungsziels zu minimalen gesellschaftlichen Kosten verspricht eine technologieneutrale Klimaschutzregulierung nur dann, wenn sie auf ein perfekt technologieoffenes Entscheidungsfeld trifft.** Ist dies – wie typischerweise in der Praxis – hingegen nicht der Fall, so impliziert Neutralität der Regulierung keine Effizienzlösung mehr. Um die vorgefundenen Verzerrungen effizient zu adressieren, müssen vielmehr spezifische Eingriffe vorgenommen werden (Technologiespezifität der Regulierung). Technologiespezifität kann ökonomisch im Übrigen auch dadurch indiziert sein, dass die Annahme dezentraler Infor-

mationsvorsprünge brüchig wird und dass – neben der Dekarbonisierung – weitere Regulierungsziele (etwa zu den sonstigen Umweltfolgen des Verkehrs) verfolgt werden müssen.

8. **Regulierung mit dem Ziel des Klimaschutzes kann daher sowohl effizient diskriminierend als auch effizient nicht-diskriminierend sein**, je nachdem, wie sich das zu gestaltende Entscheidungsumfeld präsentiert. Unterstellt man in der Praxis ein regelmäßig vielfältig verzerrtes (nicht-technologieoffenes) Entscheidungsfeld, so scheidet eine strikt neutrale Regulierung als perfekte Effizienzlösung bereits aus. Sie perpetuiert vielmehr die vorgefundenen Verzerrungen und kann kein Kostenminimum des Regulierungseingriffes gewährleisten.
9. Gleichzeitig steht aber auch eine technologiespezifische Regulierung vor dem Risiko, zwar theoretisch (bei perfekt angepasstem Design) effizient regulieren zu können, dies aber bei ungeeignetem Design ebenfalls nicht gewährleisten zu können. Mithin stellt sich neben der Frage der Indikation von Technologiespezifität der Regulierung (**Indikationsproblem**) auch die Herausforderung, in welcher Form Technologiespezifität adäquat auf ein jeweils vorgefundenes Entscheidungsfeld antworten sollte (**Adäquanzproblem**).
10. Es zeigt sich, dass eine technologieneutrale Intervention nur unter sehr strikten Voraussetzungen tatsächlich die Erreichung einer wohlfahrtsopimierenden Technologiewahl durch die privaten Akteure gewährleisten kann. Sie ist somit eher als ein **theoretischer Referenzpunkt im Diskurs** um die Ausgestaltung einer technologiepolitischen Intervention zu betrachten. In der regulatorischen Praxis ist hingegen typischerweise ein gewisser Grad an Technologiespezifität unumgänglich. Oftmals stellt bereits das Regulierungsziel eine technologiespezifische Rahmung dar. So ist etwa unter der Annahme des übergeordneten Regulierungsziels des Klimaschutzes auch die hier betrachtete Fragestellung der geeigneten Regulierung von Technologieoptionen zur Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs bereits technologiespezifisch, nämlich durch Verkürzung des Optionenraumes auf motorisierten Straßenverkehr. Selbst theoretisch technologieneutrale Regulierungsinstrumente wie der Emissionshandel sind in der Praxis häufig technologiespezifisch ausgestaltet, indem sie etwa wie im

Falle des europäischen Emissionshandels lediglich einige der relevanten Sektoren umfassen oder die Emissionszertifikate technologiespezifisch allokalisieren. Die für die regulatorische Praxis relevante Fragestellung ist somit in der Regel keine dichotome Entscheidung für oder wider Technologieneutralität, sondern vielmehr eine Frage des geeigneten Grades der Technologiespezifität sowie der konkreten Ausgestaltung des Instrumentariums.

11. Der Umstand, dass ein technologieneutraler Regulierungsansatz nur unter sehr restriktiven Voraussetzungen eine effiziente Technologiewahl der privaten Akteure gewährleisten kann, bedeutet jedoch nicht, dass eine technologiespezifische Regulierung per se eine höhere Wohlfahrt gewährleistet. Vielmehr sind auch die Anforderungen an eine effiziente technologiespezifische Intervention hoch. So muss der Regulierer über die notwendigen Informationen über die Existenz und das Ausmaß der Verzerrungen im Entscheidungsfeld verfügen, um korrigierend mit technologiespezifischen Instrumenten eingreifen zu können. Zudem darf die Ausgestaltung der technologiespezifischen Regulierung nicht polit-ökonomisch verzerrt sein. Die Erfahrungen mit bestehenden, technologiespezifischen Ansätzen (zum Beispiel bei der Stromwende) zeigen, dass beide Anforderungen in der Praxis oft nicht erfüllt sind. So kann der Regulierer mit einer inadäquaten technologiespezifischen Intervention durchaus bestehende Verzerrungen im Entscheidungsfeld verstärken oder neue schaffen. Zudem können mögliche Effizienzvorteile bei der Technologiewahl durch hohe Transaktionskosten der Regulierung überkompensiert werden, sodass eine höhere Effizienz der Technologiewahl durch die privaten Akteure nicht per se auch zu einer höheren Wohlfahrt führt.
12. Insgesamt gilt, dass der potenzielle Effizienzvorteil einer technologieneutralen Intervention umso höher ist,
 - je höher die Technologieoffenheit des Regulierungsfeldes vor dem Regulierungseingriff ist,
 - je weniger Regulierungsziele neben der Dekarbonisierung politisch zu adressieren sind und
 - je weniger ein zentraler Regulierer über die notwendigen Informationen für eine spezifische Regulierung verfügt.

Spiegelbildlich fallen die komparativen Vorzüge einer adäquaten Technologiespezifität aus. Typischerweise wird man daher aus ökonomischer Pers-

pektive gerade für die Praxis ein Nebeneinander von technologiespezifischen sowie der Neutralitätsidee verpflichteten Ansätzen als bestmögliche Lösung erwarten müssen. Die politische Gestaltungsaufgabe lautet daher nicht, sich für das eine oder das andere zu entscheiden, sondern eine auch unter Effizienzgesichtspunkten angemessene Lösung in einem komplexen, von vielfältigen Verzerrungen geprägten Entscheidungsfeld zu kreieren.

4 | Indikation für Technologieneutralität und -spezifität im Straßenverkehr

4.1 Überblick und Zweck der Untersuchung

In diesem Kapitel soll nun für das Anwendungsfeld des motorisierten Straßenverkehrs untersucht werden, inwiefern und in welchen Bereichen technologiespezifische Regulierungseingriffe aus ökonomischer Sicht angezeigt sein können. Hierzu werden aufbauend auf der in Kapitel 2 erarbeiteten theoretischen Konzeption die ökonomischen Parameter für und wider den Einsatz technologiespezifischer Politikinstrumente in der Anwendung auf verschiedene Technologieoptionen zur Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs untersucht. Basierend auf den Ergebnissen dieser Technologieanalysen werden abschließend Thesen zur Indikation technologiespezifischer Regulierung für die Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs aufgestellt. Mit diesem Vorgehen soll festgestellt werden, inwiefern sich eine theoretische Begründung für die Anwendung technologiespezifischer Regulierung im Anwendungsfeld der Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs ergibt. Eine solche Begründung stellt eine notwendige, aber keine hinreichende Begründung für die Anwendung technologiespezifischer Regulierung dar. Denn auch bei theoretischer Eignung technologiespezifischer Regulierung können Politikversagen infolge von Wissensdefiziten aufseiten des Regulierers, hohe Transaktionskosten eines technologiespezifischen Instrumentariums, rechtliche Barrieren, Zielkonflikte oder auch die Anfälligkeit für polit-ökonomische Verzerrungen gegen den Einsatz technologiespezifischer Instrumente sprechen. Der tatsächliche Effizienzvorteil – und somit die hinreichende Begründung für den Einsatz technologiespezifischer Instrumente – entscheidet sich an den Charakteristika der im konkreten Anwendungsfall zur Verfügung stehenden Instrumentenoptionen. Die in diesem Kapitel erzielten Erkenntnisse über die Indikation von Technologiespezifität im motorisierten Straßenverkehr dienen somit als Grundlage für die Diskussion der konkreten Ausgestaltung verkehrspolitischer Instrumente in Kapitel 4.

In diesem Kapitel wird zunächst ein Überblick über die für die Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs grundsätzlich in Betracht kommenden Technologieoptionen (Abschnitt 3.2) sowie die in dieser Studie betrachteten Entscheidungsfelder im motorisierten Straßenverkehr (Abschnitt 3.3) gegeben. In Abschnitt 3.4 wird mit Hinblick auf die definierten Entscheidungsfel-

der eine Auswahl der im Rahmen dieser Studie zu analysierenden Technologieoptionen für die Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs vorgenommen und begründet. Abschnitt 3.5 dient der Beschreibung des methodischen Vorgehens bei der Technologieanalyse. Zunächst werden in diesem Abschnitt der Zweck und die Funktionsweise der vorgenommenen Technologieanalyse erläutert (Abschnitt 3.5.1), bevor in Abschnitt 3.5.2 dargestellt wird, welche Technologieeigenschaften mit welchem Erkenntnisziel in der Technologieanalyse aufbereitet werden. Im darauffolgenden Abschnitt 3.6 werden die Ergebnisse der Technologieanalyse dargestellt und eine Skaleneinordnung der Technologieoptionen hinsichtlich der analysierten Technologieeigenschaften vorgenommen. Die aus der Analyse gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der Fragestellung der Indikation technologiespezifischer Regulierung im motorisierten Straßenverkehr werden schließlich in Abschnitt 3.7 aufbereitet und in Abschnitt 3.8 in Thesenform zusammengefasst.

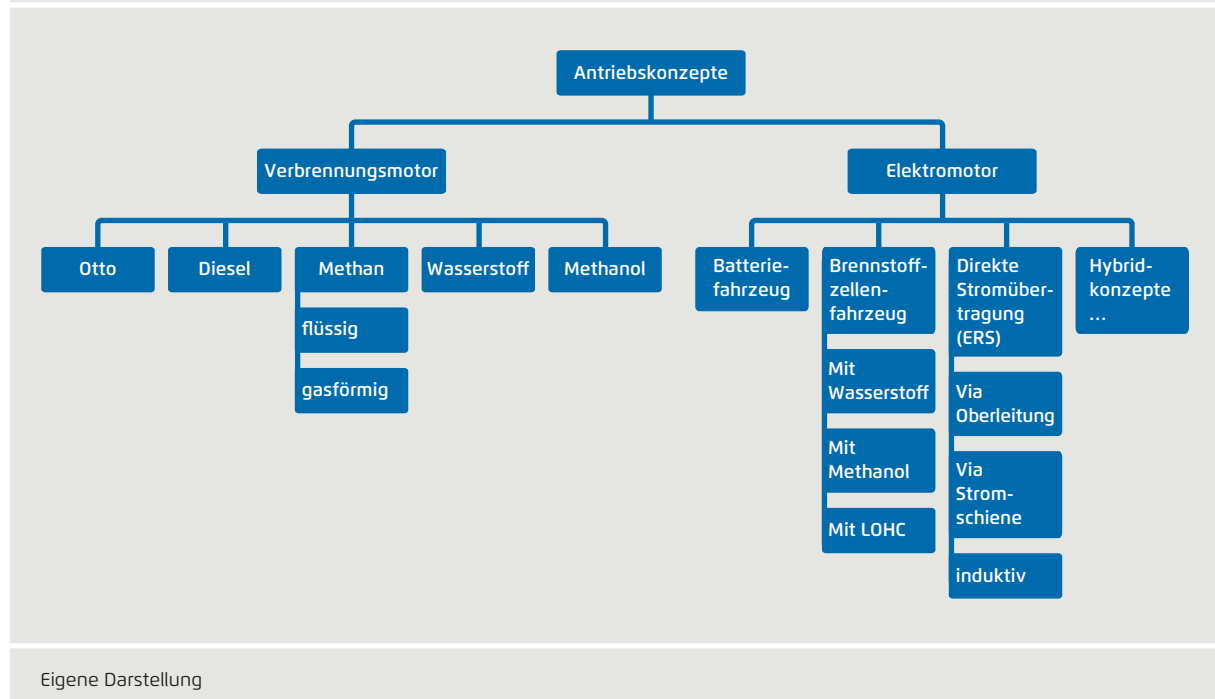
4.2 Übersicht der Technologieoptionen

Als Technologieoptionen für den motorisierten Straßenverkehr werden hier die Technologien des Fahrzeugantriebs („Antriebskonzept“) und der Energiebereitstellung berücksichtigt. Für jede Antriebstechnologie sind prinzipiell verschiedene Arten der Energiebereitstellung („Energievorketten“) möglich. Teilweise kann dieselbe Energievorkette auch in verschiedenen Antriebssystemen verwendet werden (zum Beispiel Wasserstoff im Verbrennungsmotor oder in der Brennstoffzelle). Das Spektrum der jeweils verfügbaren Technologien wird nachfolgend kurz beschrieben.

Die Antriebstechnologien lassen sich zunächst in solche mit Verbrennungsmotoren und solche mit Elektromotoren aufteilen (Abbildung 6). Verbrennungsantriebe können mit verschiedenen flüssigen oder gasförmigen Kraftstoffen betrieben werden. Je nach Kraftstoff unterscheidet sich die technische Ausgestaltung des Verbrennungsmotors. Manche Motoren können mit mehreren Kraftstoffen betrieben werden, bei zwei möglichen Kraftstoffarten spricht man von bivalenten Antrieben. Diese sind vor allem bei Erdgasfahrzeugen verbreitet, die meist auch Ottokraftstoff tanken können. Es gibt daneben auch sogenannte Dual-Fuel-Antriebe, bei denen gleichzeitig zu gewissen Anteilen Diesel und Erdgas eingesetzt wird.

Antriebstechnologien für den Straßenverkehr

Abbildung 6



Im motorisierten Straßenverkehr mit Abstand am weitesten verbreitet sind heutzutage Otto- und Dieselmotoren. Im Pkw-Bestand finden sich derzeit etwa 64 Prozent Ottomotoren und 34 Prozent Dieselmotoren.¹²⁹ Bei den Nutzfahrzeugen mit mehr als einer Tonne Zuladung sind gegenwärtig fast ausschließlich Dieselantriebe im Einsatz.¹³⁰

Elektrische Maschinen werden mit elektrischem Strom betrieben, der entweder im Fahrzeug gespeichert (mittels Batterie oder Kondensatoren hoher Kapazität), während der Fahrt im Fahrzeug erzeugt (beispielsweise mittels einer Brennstoffzelle oder über einen Verbrennungsmotor mit angeschlossenem Generator) oder dem Fahrzeug während der Fahrt über eine geeignete Infrastruktur von außen zugeführt wird (Electric Road Systems, ERS).¹³¹ Bei ERS ist grundsätzlich konduktive sowie induktive Übertragung möglich, wobei Erstere über Oberleitun-

gen¹³² oder über eine Stromschiene in der Fahrbahn¹³³ oder deren seitlicher Begrenzung¹³⁴ möglich ist. ERS wird momentan vor allem im Nutzfahrzeugbereich getestet. Bei Brennstoffzellenfahrzeugen kann der Wasserstoff prinzipiell als komprimiertes Gas oder gebunden in anorganischen (Methanol) oder organischen (LOHC) Flüssigkeiten getankt werden.

Bei elektrischen Antrieben gibt es eine große Vielfalt denkbarer Hybridoptionen. Am geläufigsten ist der Einsatz eines Verbrennungsmotors als Zweittrieb, um Nachteile hinsichtlich der Reichweite insbesondere von Batterieantrieben auszugleichen („Plug-in-Hybrid“, PHEV). Doch auch Hybridkombinationen aus den Varianten Batterie, Brennstoffzelle und ERS sind denkbar.

Alle von den vorgenannten Antriebstechnologien benötigten Energieträger lassen sich entweder aus fossilen Rohstoffen, biogenen Rohstoffen oder aus elektrischem Strom herstellen (Abbildung 7). Der elektrische Strom seinerseits kann wiederum aus fossiler Energie, biogenen

129 ifeu (2019).

130 KBA (2019).

131 Ein umfangreicher Vergleich verschiedener ERS-Technologien ist unter anderem zu finden in PIARC (2018).

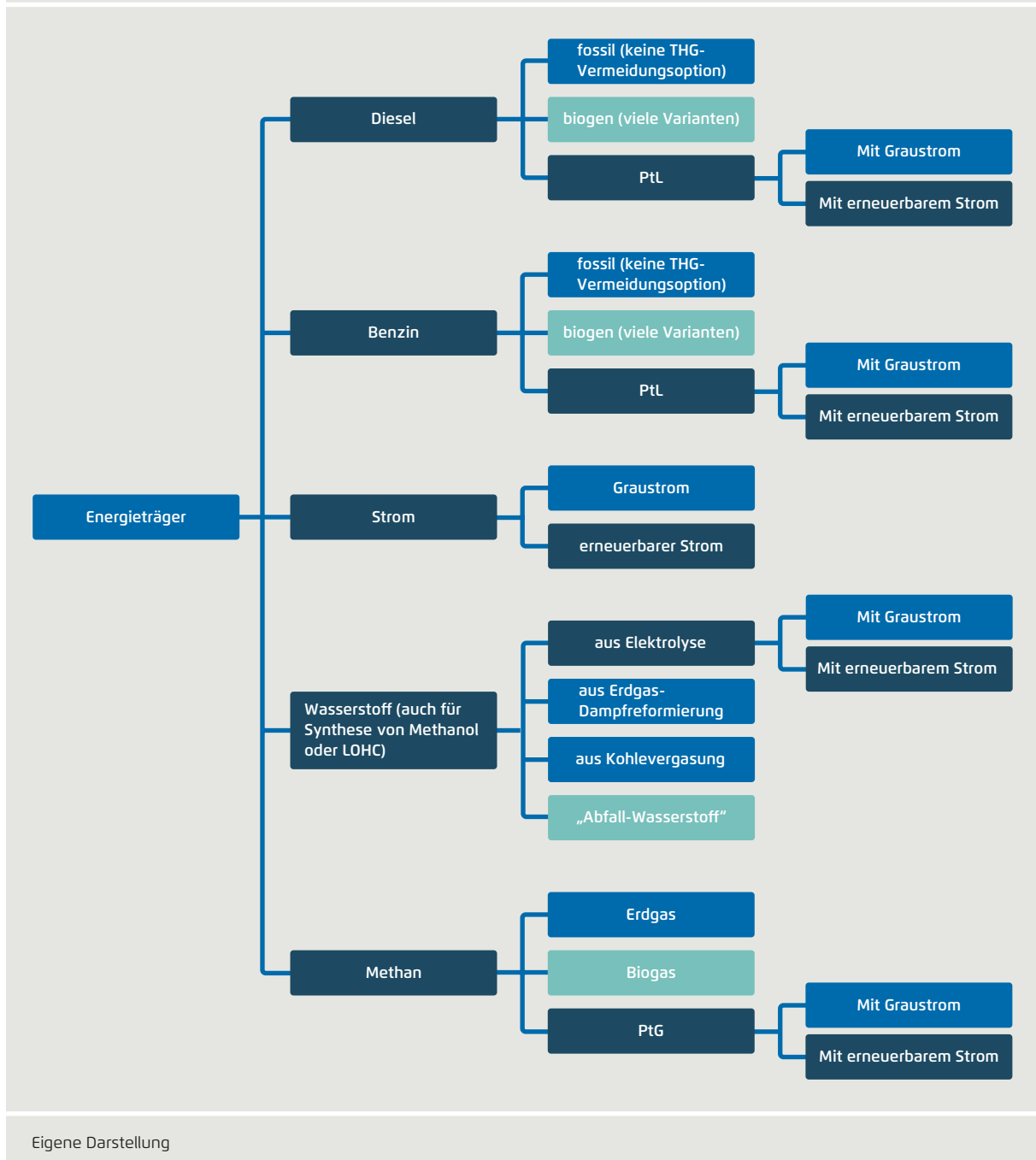
132 Siemens AG (2017).

133 ELONROAD (2019).

134 Entwicklung durch Honda: Tajima (2019).

Technologien der Energiebereitstellung für den Straßenverkehr

Abbildung 7



Energieträgern (Biogas, Holz) oder direkt aus erneuerbaren Energien (Wind, Sonne, Geothermie, Gezeitenkraftwerke) erzeugt werden. Alle genannten Energieträger können somit grundsätzlich aus erneuerbaren Energien hergestellt werden. Zur Synthetisierung von Kohlenwasserstoffen (Benzin, Diesel, Methan) als Kraftstoff mittels

elektrischer Energie wird darüber hinaus CO₂ als Eingangsprodukt benötigt, das bei Nutzung der Kraftstoffe wieder emittiert wird.

Die Energiebereitstellungspfade, die auf erneuerbarem Strom basieren, erlauben prinzipiell eine Dekarbonisie-

rung des motorisierten Straßenverkehrs (in Abbildung 7 grün dargestellt). Bereitstellungspfade via Biomasse (orange dargestellt) können zwar ebenfalls einen Beitrag zur Dekarbonisierung leisten, unterliegen allerdings bedeutenden Potenzialbeschränkungen (siehe Diskussion dazu in Abschnitt 3.4).

Welche Energievorkette für eine bestimmte Antriebstechnologie in der Realität zum Zuge kommt, kann von marktlichen, regulatorischen und teilweise auch technischen Faktoren abhängen, unter anderem

- den Gestehungskosten,
- der zeitlichen Verfügbarkeit (relevant zum Beispiel bei fluktuierendem erneuerbarem Strom),
- gesetzlichen Quotenregelungen (über die europäische Renewable Energy Directive¹³⁵ beziehungsweise die Fuel Quality Directive¹³⁶),
- der Verträglichkeit mit dem Antriebssystem (zum Beispiel E10).

Das Portfolio der denkbaren Technologiekombinationen für Antrieb und Energievorkette ist sehr groß und muss für die vorliegende Untersuchung eingegrenzt werden. Dies geschieht im Abschnitt 3.4 auf Basis einer Reihe von Kriterien und mit Blick auf die im folgenden Abschnitt 3.3 dargelegten Entscheidungsfelder des motorisierten Straßenverkehrs.

4.3 Entscheidungsfelder im motorisierten Straßenverkehr

Ein Entscheidungsfeld wird in dieser Untersuchung verstanden als ein Marktsegment, in dem separate Technologieentscheidungen unter relativ homogenen Rahmenbedingungen getroffen werden (zum Beispiel ähnlicher Verwendungszweck der Fahrzeuge). Prägende Charakteristika eines Entscheidungsfeldes sind das technologische Umfeld (insbesondere die Anforderungen an die Fahrzeuge), die relevanten Märkte sowie das regulatorische Umfeld (siehe hierzu auch Abschnitt 2.1).

Innerhalb des motorisierten Straßenverkehrs können zunächst der Personen- und der Güterverkehr als separate Entscheidungsfelder definiert werden.

Diese Bereiche unterscheiden sich grundlegend hinsichtlich

- der technischen Anforderungen (Fahrzeuggrößen, Beladung, Reichweiten) sowie
- der Rolle wirtschaftlicher Gesichtspunkte (im Straßengüterverkehr herrscht ein hoher Kostendruck,¹³⁷ im Straßenpersonenverkehr spielen hingegen stärker nicht-monetäre Faktoren eine Rolle¹³⁸).

Mit Blick auf die technischen Unterschiede zwischen den verfügbaren Antriebstechnologien bietet sich darüber hinaus eine Differenzierung nach Reichweite beziehungsweise Aktionsradius der jeweiligen Fahrzeuge an. Bei Lkw ist die Aufteilung in Nahverkehr (bis 50 km), Regionalverkehr (bis 150 km) sowie Fernverkehr (> 150 km) gängig (und war bis 1998 auch transportrechtlich relevant). Für diese Distanzklassen werden in der Praxis auch unterschiedliche Fahrzeugbauformen eingesetzt. Prinzipiell gilt dabei: Je geringer der Aktionsradius, desto kleiner das Fahrzeug.¹³⁹ Im Fernverkehr werden zum weit überwiegenden Anteil Fahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 40 Tonnen eingesetzt, wobei etwa zwei Drittel davon Sattelzüge sind. Der Nah- und Regionalverkehr ist primär für die Feinverteilung der Güter zuständig. Hier sind hauptsächlich Fahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht von unter 12 Tonnen unterwegs. Nutzfahrzeuge werden daher in aller Regel entweder für den Nah- und Regionalverkehr oder für den Fernverkehr angeschafft, haben also einen klar umrissenen Einsatzzweck. Somit können diese beiden Bereiche des Straßengüterverkehrs als separate Entscheidungsfelder im Sinne dieser Untersuchung angesehen werden.

Innerhalb des Pkw-Bereichs ist eine solche Unterscheidung nicht möglich. Zwar gibt es auch hier etliche Teilbereiche des Marktes, die beispielsweise nach folgenden Kriterien abgegrenzt werden können:

- Firmenkunden vs. Privatkunden (Dienstwagen vs. Privatwagen)
- Zweitwagen vs. Erstwagen
- Benzin vs. Diesel.

Über diese Teilbereiche hinweg gibt es allerdings die weitgehende Kundenerwartung, dass ein Pkw univer-

135 Europäische Kommission (2018), S. 128.

136 Europäische Kommission (2009), S. 26.

137 Jöhrens et al. (2018).

138 DAT Group (2016).

139 Bäumer et al. (2017).

sell einsetzbar ist (auch für Langstrecken, viel Gepäck, maximale Sitzplatzanzahl etc.). Zudem werden Pkw oftmals nicht allein anhand der Mobilitätsbedürfnisse beziehungsweise kostengetrieben gekauft, sondern auch andere Werte (zum Beispiel Fahrzeuggröße, Kaufpreis, Sicherheit, Marke, Design) spielen eine erhebliche Rolle.¹⁴⁰ Es ist somit nicht möglich, klar abgegrenzte Entscheidungsfelder innerhalb des Pkw-Bereichs zu definieren; dieser wird daher in der vorliegenden Untersuchung als ein einziges Entscheidungsfeld gehandhabt.

Im Folgenden wird kurz auf Unterschiede zwischen den Entscheidungsfeldern eingegangen, die potenziell Einfluss auf den Prozess der Technologiewahl haben. Im **Vergleich Straßenpersonenverkehr vs. Straßengüterverkehr** fällt u.a. Folgendes auf:

- Der Güterverkehr ist deutlich stärker kostengetrieben als der Pkw-Bereich. Geringe Margen sorgen dafür, dass Fahrzeugbetreiber in der Regel sehr risikoavers sind und beispielsweise für Investitionen in Energieeffizienztechnologien auf eine kurze Amortisationszeit Wert legen.¹⁴¹
- Die Bindung der Nutzer an bestimmte Fahrzeugmarken spielt sowohl bei Pkw als auch Lkw eine wichtige Rolle. Hierbei können sowohl vertragliche als auch emotionale Gründe eine Rolle spielen. Markenbindung kann prinzipiell die Markteinführung neuer Technologien behindern, solange diese nur von wenigen Herstellern angeboten werden.
- Ein großer Teil der neu zugelassenen Pkw wird zunächst als Firmenwagen zugelassen und wandert später in den Privatmarkt. Der Neuwagenmarkt und damit auch die Einführung neuer Technologien sind also auch im Pkw-Bereich wesentlich von den Anforderungen gewerblicher Kunden geprägt.
- Pkw haben im Mittel eine längere Nutzungsdauer als Nutzfahrzeuge. Die Haltedauer ist für Erstnutzer von Pkw allerdings in der Regel deutlich geringer als für Zweitnutzer.
- Bei Nutzfahrzeugen werden die Anforderungen an die Transportdienstleistung maßgeblich durch die Kunden der Fahrzeugbetreiber definiert. Mehrkosten für neue Technologien können in der Regel nur dann getragen werden, wenn die Verloader einen umweltfreundlichen Transporteur honorieren (beispielsweise durch eine höhere Vergütung oder eine längerfristige vertragliche Bindung, die Planungssicherheit schafft).

Der **Vergleich innerhalb des Straßengüterverkehrs** zwischen den Entscheidungsfeldern Nah-/Regionalverkehr einerseits und Fernverkehr andererseits stellt sich wie folgt dar:

- Ein großer Teil der Einsatzprofile im Nahverkehr und eingeschränkt auch im Regionalverkehr kann unter Maßgabe der aktuellen Reichweitenrestriktionen aller Technologieoptionen bereits heute durchgeführt werden. Grund dafür ist neben den kürzeren Strecken, dass die Fahrzeuge in der Regel täglich zu ihrer Basis zurückkehren und dort betankt/aufgeladen werden können.
- Im Langstreckenverkehr ist die Jahresfahrleistung der Fahrzeuge deutlich höher als im Nah- und Regionalverkehr.¹⁴² Entsprechend ergeben sich hier pro Fahrzeug vergleichsweise hohe absolute Emissionen und damit hohe absolute Minderungspotenziale über die Lebenszeit.
- Im Langstreckenverkehr ist das Feld klassifizierbarer Einsatzprofile heterogener als im Nah-/Regionalverkehr. Während Letzterer vor allem Auslieferung oder Einsammlung von Waren von einem zentralen Standort aus oder zu einem zentralen Standort hin durchführt, gibt es im Fernverkehr Linienverkehre, Hub-and-Spoke-Systeme, Begegnungsverkehre, Tramp-Verkehre und weitere.¹⁴³
- Im Langstreckenverkehr ist ein großer Anteil gebietsfremder Fahrzeuge in Deutschland unterwegs (ca. 40 Prozent der mautpflichtigen Fahrleistung¹⁴⁴).
- Die Lkw-Maut spielt in der Kostenstruktur des Langstreckenverkehrs eine wichtigere Rolle als im Nah-/Regionalverkehr, da hier zum einen die Fahrleistung höher ist und sich die Fahrleistung außerdem zu einem größeren Anteil auf Autobahnen und Bundesstraßen abspielt.
- Im Fernverkehr sind die eingesetzten Fahrzeugtypen relativ homogen: Es kommen Sattelzüge sowie zu einem geringeren Anteil Lastzüge zum Einsatz. Im Kurzstreckenbereich gibt es eine Vielzahl verschiedener Fahrzeugplattformen.

140 DAT Group (2016).

141 Dünnebeil et al. (2015).

142 ifeu (2019).

143 Jöhrens et al. (2018).

144 BAG (2018).

4.4 Technologieauswahl für die Analysen dieser Studie

Die in Abschnitt 3.2 aufgezeigte Vielfalt der Antriebs- und Energiebereitstellungstechnologien muss nun für die Analyse in dieser Studie eingegrenzt werden. Dazu werden die folgenden Kriterien angelegt:

1. Die Technologie muss eine Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs, also eine drastische Minderung der spezifischen Treibhausgasemissionen pro Fahrzeugkilometer ermöglichen (um mindestens -80 Prozent). Es ist zu erwarten, dass der Fahrzeugbestand im Jahr 2030 nur zu einem gewissen Teil mit alternativen Antrieben durchdrungen sein wird. Um dennoch entsprechend den Zielen eine Gesamtminde- rung von ca. 40 Prozent im Verkehrssektor zu erzielen, müssen die spezifischen Minderungen pro Fahrzeug entsprechend höher ausfallen. Hinzu kommt, dass die Einführung alternativer Antriebe mit Blick auf 2030 auch Pfadabhängigkeiten bis 2050 schafft. Für dieses Zieljahr müssen die Emissionen gegenüber dem heutigen Stand um mindestens 80 Prozent gesenkt werden.¹⁴⁵
2. Die Technologie muss über ein nachhaltiges Men- genpotenzial verfügen, das einen signifikanten Anteil der Technologie am gesamten Technologiemix erlaubt und deutlich über den Status quo hinausgeht. Technologien, deren Mengenpotenzial absehbar nur kleine Marktanteile bedienen kann, haben innerhalb des Entscheidungsfeldes eine Sonderstellung, die im Rahmen dieser Studie nicht näher betrachtet werden kann.
3. Die Technologie muss eine gewisse technische Reife beziehungsweise Marktnähe aufweisen. Ihr Techno-logy Readiness Level muss daher mindestens Stufe 6 betragen („Prototyp in Einsatzumgebung“).¹⁴⁶ Diese Abgrenzung gilt auch für die betrachteten Hybrid- antriebe. Konnte der reale Einsatz einer Technologie noch nicht erfolgreich nachgewiesen werden, so scheint ein (größerskaliger) Einsatz mit Blick auf das Zieljahr 2030 unwahrscheinlich.

Wie in Abschnitt 3.2 dargelegt, ergibt sich aus den verfügbaren Technologien für Antriebssysteme und Energiebereitstellungspfade eine Vielzahl an Kombinati- onsmöglichkeiten. Die Wahl von Antrieb und Energiebe- reitstellung bedingt sich auf vielfältige Weise gegenseitig, weswegen eine isolierte Betrachtung mit Blick auf die hier relevanten regulatorischen Fragestellungen nicht sinnvoll erscheint. Es werden daher im Folgenden stets Kombinationen aus Antrieb und Energiebereitstellung zu einer einzigen Technologie zusammengefasst.

Aufgrund des ersten Kriteriums (Dekarbonisierungsfä- higkeit) scheiden fossile Pfade der Energiebereitstellung grundsätzlich aus. Ein LNG-Antrieb mit fossilem Erdgas ist somit beispielsweise nicht Gegenstand der Betrach- tung. Bei strombasierten Pfaden ergibt sich automatisch, dass diese mit erneuerbarem Strom gespeist werden müssen. Biokraftstoffe wären nach dem ersten Kriterium zugelassen, da sie im Regelfall spezifische Treibhausgas- minderungen von über 80 Prozent erreichen.¹⁴⁷

Das zweite Kriterium (Mengenpotenzial) führt aller- dings zum Ausschluss von Biokraftstoffen der 1. und 2. Generation aus der Betrachtung (siehe Exkurs unten). Zwar kommt diesen Kraftstoffen voraussichtlich eine gewisse Rolle bei der Erreichung von Klimaschutzzielen zu, aufgrund des begrenzten Potenzials sollte ihr Ein- satz auf diejenigen Verkehrsträger (Luft- und Schiff- fahrt) fokussiert werden, bei denen dekarbonisierende Alternativtechnologien mit deutlich höheren Hürden verbunden sind als im motorisierten Straßenverkehr. Bei Biokraftstoffen der 3. Generation (beispielsweise auf Grundlage von Algen) ist das Mengenpotenzial prinzipi- ell deutlich größer, allerdings sind diese noch sehr weit von der Marktreife entfernt (siehe nachfolgendes drittes Kriterium).

¹⁴⁵ Aufgrund nicht vermeidbarer Treibhausgasemissionen in anderen Sektoren (vor allem in der Landwirtschaft) ist für energiebedingte Emissionen (die im Verkehrssektor maß- geblich sind) eine deutlich stärkere Minderung erforderlich (BMU (2016)).

¹⁴⁶ Department of Defense (2011).

¹⁴⁷ BLE (2017).

Technologiereife der verschiedenen Antriebs- und Kraftstofftechnologien

Tabelle 1

Technologie	Technology Readiness Level (TRL)
ICEV	TRL 9
BEV	BEV-Pkw: TRL 9 (Roll-out in 7-stelliger Stückzahl) ¹⁴⁹ Li-Ionen-Batterie: TRL 8–9 ¹⁵⁰ Zentrale Herausforderungen: Preis, Energiedichte, Lebensdauer, Entwicklung alternativer Elektrodenmaterialien (Kosten und Umweltverträglichkeit), Zertifizierungs-/Genehmigungsprozess BEV-Lkw: TRL 7–8 ¹⁵¹ Zentrale Herausforderungen: Reichweite, Ladedauer, Zuladungsverluste Redox-Flow-Batterie (Flussbatterie): TRL 5 ¹⁵²
PtL	Konventionelle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor können genutzt werden (TRL 9) Zentrale Herausforderungen: Wirkungsgrad, Kosten der Kraftstoffherstellung CO₂-Gewinnung aus Luft: TRL 6 ¹⁵³ Fischer-Tropsch-Verfahren: TRL 6–8 ¹⁵⁴ Methanolsynthese: TRL 8 ¹⁵⁵
PtG	PtG-Fahrzeuge: TRL 9 (derzeit betrieben mit fossilem Erdgas) Zentrale Herausforderungen: Wirkungsgrad, Kosten der Kraftstoffherstellung CO₂-Gewinnung aus Luft: TRL 6 ¹⁵⁶ Methanisierung: TRL 8 ¹⁵⁷
FCEV	Elektrolyse: TRL 9 ¹⁵⁸ Brennstoffzelle: TRL 8–9 ¹⁵⁹ Zentrale Herausforderungen: geringe Produktionszahlen, Verwendung von Nichtelegmetallen, Zuverlässigkeit, Kosten ¹⁶⁰ Wasserstofftank: TRL 8–9 ¹⁶¹ Wasserstofftankstelle: TRL 8 ¹⁶² LOHC: TRL 3 ¹⁶³ Methanol-Brennstoffzelle: TRL 5 ¹⁶⁴ Brennstoffzellen-Lkw: TRL 6–7 ¹⁶⁵ Zentrale Herausforderungen: Infrastrukturaufbau, Wirkungsgrad, Kostenreduktion der Kraftstoffherstellung
ERS mit Batterie-fahrzeugen	O-Lkw: TRL 6–7 ¹⁶⁶ Zentrale Herausforderungen: Infrastrukturaufbau, Batterietechnologie, Akzeptanz, Integration in Logistikprozesse
ERS mit Hybrid-fahrzeugen	OH-Lkw: TRL 6–7 ¹⁶⁷ Zentrale Herausforderungen: Infrastrukturaufbau, Batterietechnologie, Akzeptanz, Integration in Logistikprozesse Stromschiene: TRL 5 ¹⁶⁸ Induktive ERS: TRL 5 ¹⁶⁹
PHEV	TRL 9 (Roll-out in 7-stelliger Stückzahl) ¹⁷⁰
Biokraftstoffe	3. Generation: TRL 3 ¹⁷¹

148 Munoz (2019).

149 Darmani; Jullien (2017).

150 Plötz et al. (2018).

151 Gomoll (2016); Jendrischik (2018).

152 Schmidt et al. (2016).

153 Schmidt et al. (2016); DENA (2018).

154 Schmidt et al. (2016); DENA (2018).

155 Schmidt et al. (2016).

156 DENA (2018).

157 DENA (2018).

158 Darmani; Jullien (2017).

159 Wang et al. (2018).

160 Ronnebro (2012).

161 H2 Mobility (2018).

162 Eigene Einschätzung, basierend unter anderem auf Litzfelder (2019); Hydrogenious LOHC Technologies (2018).

163 Beispiele für Prototypen siehe unter anderem Stegmaier (2018); SerEnergy (2018); Soller (2018).

164 Plötz et al. (2018).

165 Plötz et al. (2018).

166 Plötz et al. (2018); Gnann (2018), S. 26.

167 Electric Roads (2019).

168 Electric Roads (2019).

169 Adolf et al. (2016).

170 Eigene Einschätzung, basierend unter anderem auf Faber (2019); ExxonMobil (2019).

Eigene Darstellung

Das dritte Kriterium bedient sich des Technology Readiness Levels (TRL), um technische Reife und Marktnähe abzubilden. Tabelle 1 stellt die jeweiligen TRLs der betrachteten Technologien dar. Biokraftstoffe der 3. Generation, Methanol, Carbazol sowie die Redox-Flow-Batterie scheiden aus der Betrachtung aus, da ihr TRL zumindest für den Einsatz in Fahrzeugen unter der gesetzten Grenze von 6 liegt.

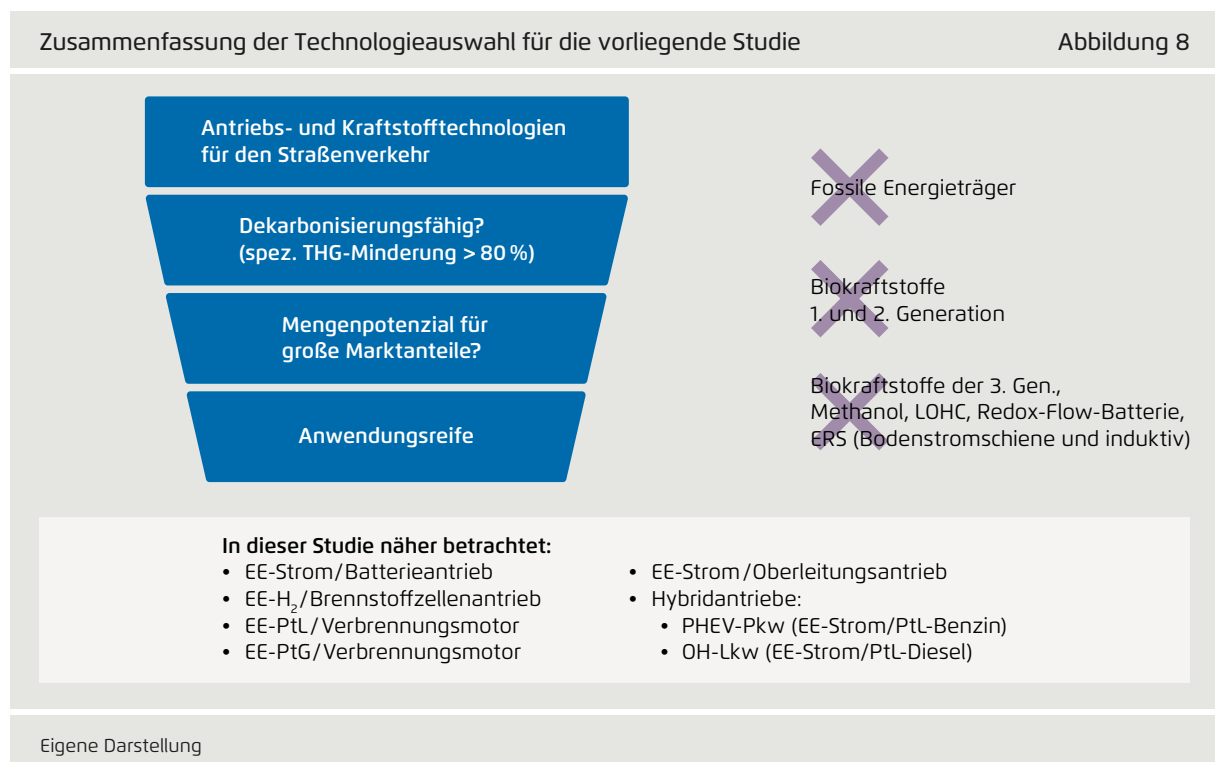
Der oben beschriebene Auswahlprozess ist in Abbildung 8 noch einmal zusammengefasst.

Folgende Technologien erfüllen alle gesetzten Kriterien und werden daher im Folgenden näher betrachtet:

1. EE-Strom/Batterieantrieb
2. EE-H₂/Brennstoffzellenantrieb
3. EE-PtL/Verbrennungsmotor
4. EE-PtG/CNG beziehungsweise LNG
5. EE-Strom/Oberleitungsantrieb¹⁷¹

Als Hybridvarianten werden zudem im Pkw-Bereich der Plug-in-Hybrid (1+3) sowie der Oberleitungs-Hybrid-Lkw (3+5(+1)) betrachtet. Zu Vergleichszwecken wird zudem der mit fossilem Kraftstoff betriebene Verbrennungsmotor (ICEV) in die Betrachtung einbezogen.

171 Andere ERS-Übertragungstechnologien erreichen noch nicht das gesetzte Kriterium (TRL>5) der technologischen Reife.



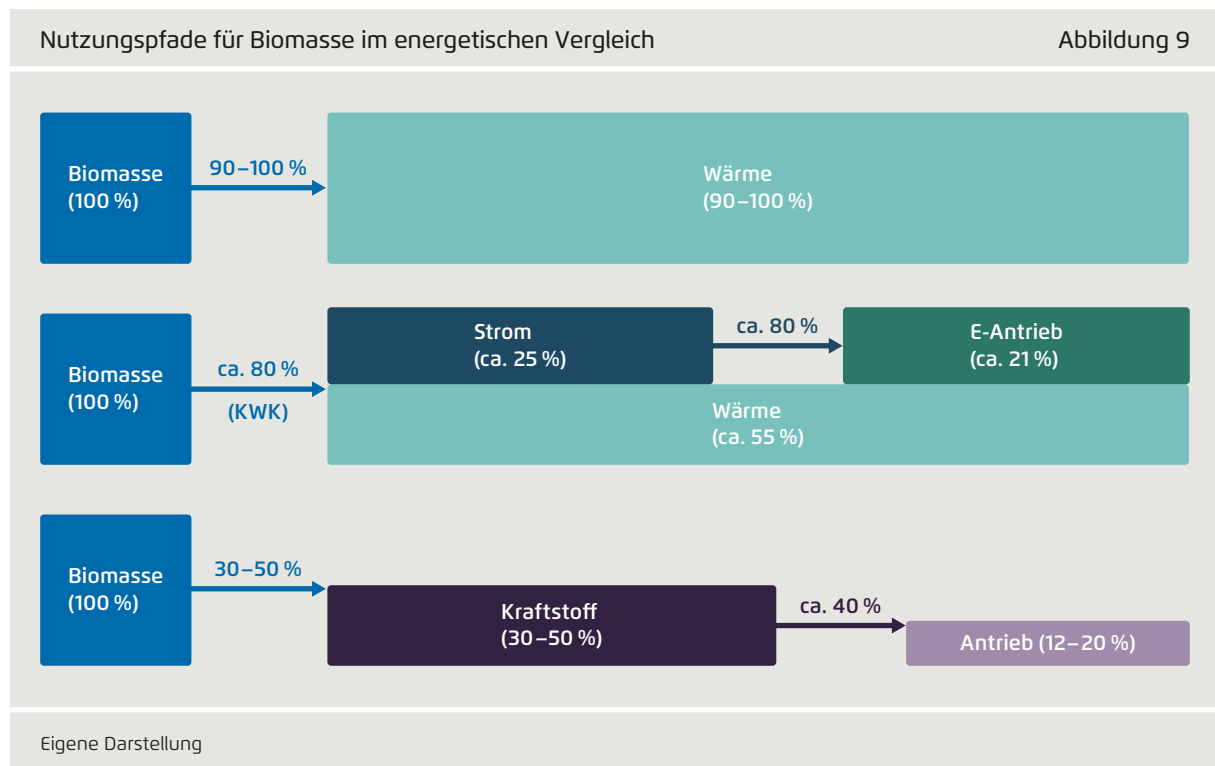
Exkurs Biokraftstoffe

In Bezug auf Biokraftstoffe unterscheidet man drei Generationen. Biokraftstoffe der 1. Generation, auch Agrokraftstoffe oder konventionelle Biokraftstoffe genannt, werden auf Basis von Lebens- und Futtermitteln hergestellt. Somit ist klar, dass sie in direkter Konkurrenz zu Nahrungsmitteln stehen, denn die globalen landwirtschaftlichen Anbauflächen sind begrenzt. Auch wenn durch entsprechende Zertifizierungsverfahren direkte Landnutzungsänderungen heute weitgehend ausgeschlossen werden, so führt die Herstellung von Agrokraftstoffen jedoch zu indirekten Landnutzungsänderungen (ILUC), insbesondere in den Ländern der Tropen mit Umwandlung von Primärwäldern. Zieht man zudem die Bilanzergebnisse der FAO über die unzureichende globale Getreideproduktion im Jahr 2018 in Betracht, so wird deutlich, dass sowohl ethische als auch umweltpolitische Gründe gegen eine weitere Steigerung des Anbaus von Agrokraftstoffen sprechen. Dies nahm die Europäische Kommission zum Anlass, in der Erneuerbaren-Energien-Richtlinie von 2018 (RED II) den Anteil der Agrokraftstoffe auf 7 Prozent beziehungsweise 1 Prozentpunkt über dem im Jahr 2020 tatsächlich beigemischten Anteil zu deckeln.

Im Hinblick auf das globale Bioenergiepotenzial liegen viele Studien vor, die eine sehr große Spannweite aufweisen.¹⁷² Bezieht man sowohl Ackerflächen und marginale Flächen für die Produktion von Agrokraftstoffen als auch Biokraftstoffe der 2. Generation aus Abfall- und Reststoffen mit ein, so stecken die vorliegenden Studien einen Rahmen für das Bioenergiepotenzial von 80 bis 300 Exajoule pro Jahr ab. Bei der Interpretation dieser Zahlen sind unter anderem folgende Punkte zu beachten: Insbesondere der obere angegebene Wert beschreibt ein technisch mögliches Potenzial, welches Nachhaltigkeitsaspekte weitgehend außer Acht lässt. Zudem werden der Einfluss des Klimawandels und die globale Entwicklung hin zu einer fleischlastigeren und damit ressourcenintensiveren Ernährung oft nicht berücksichtigt. Aus diesen Gründen scheint die angegebene untere Grenze eher eine realistische Schätzung des Bioenergiepotenzials zu sein. Darüber hinaus unterliegt auch das genannte Bioenergiepotenzial Nutzungskonkurrenzen. Zum einen wird die stoffliche Nutzung der Biomasse in den nächsten Jahrzehnten an Bedeutung gewinnen, da insbesondere die chemische Industrie Ersatz für das zur Neige gehende Erdöl benötigt. Im Gegensatz zur energetischen Nutzung gibt es hierbei kaum Alternativen zur Biomasse, weshalb die stoffliche Nutzung Vorrang gegenüber der energetischen haben sollte. Zum anderen sind energetische Nutzungsformen wie die Wärme- und Stromgewinnung aufgrund der höheren Wirkungsgrade (vgl. Abbildung 9) ökonomisch und ökologisch vorteilhafter als die Umwandlung in Biokraftstoffe. Hinzu kommt, dass bereits ein beachtlicher Teil der Biomasse zur Wärme- und Stromgewinnung genutzt wird, weshalb man bei einer vollständigen Verwendung des Bioenergiepotenzials für Biokraftstoffe die Biomasse erst diesen anderen Nutzungsformen entziehen müsste. Selbst wenn man die oben genannten Zahlen aufgrund der bis hierhin genannten Gründe stark nach unten korrigiert, sind sie noch nicht mit dem für 2040 prognostizierten jährlichen Energieverbrauch im Verkehrssektor von 160 Exajoule vergleichbar, da hierfür noch Verluste bei der Umwandlung von Biomasse in Kraftstoffe (50–70 Prozent) berücksichtigt werden müssen.

Die aufgeführten Gründe machen deutlich, dass Biokraftstoffe der 1. und 2. Generation allenfalls einen Beitrag zur Dekarbonisierung von Teilbereichen des Verkehrssektors, vor allem des Luft- und Schiffsverkehrs, leisten können und sollten. In Verbindung mit der zuvor genannten Prämisse führt dies zu ihrem Ausschluss von der weiteren Betrachtung. Biokraftstoffe der 3. Generation (beispielsweise auf Grundlage von Algen) sind noch sehr weit von der Marktreife entfernt und fallen daher unter die Technologien der fernen Zukunft, die gesammelt als separate Kategorie behandelt werden.

172 Smeets et al. (2007); Zeddies et al. (2012); IRENA (2016); WBGU (2009).



Es kann nicht völlig ausgeschlossen werden, dass signifikante Beiträge zur Dekarbonisierung im Straßenverkehr künftig durch Technologien erbracht werden, die heute noch nicht bekannt sind beziehungsweise sich in einem sehr frühen Entwicklungsstadium befinden und aufgrund des Kriteriums „Technische Reife“ nicht Teil der Betrachtung sind. Solche Technologien werden in der Untersuchung durch einen Platzhalter („Zukunft“) vertreten, für den soweit möglich allgemeingültige Aussagen getroffen werden.

Die ausgewählten Technologien sind für die im vorangegangenen Abschnitt definierten Entscheidungsfelder in unterschiedlichem Maße geeignet. In der nachfolgenden Kreuztabelle (Tabelle 2) ist dies jeweils markiert. Ein eingeklammertes „X“ bedeutet hier eingeschränkte Eignung:

- Prinzipiell ist es denkbar, dass auch Pkw Electric Road Systems nutzen. Die Stromübertragung kann in diesem Fall allerdings nicht durch eine Oberleitung erfolgen (wie derzeit in Deutschland im Rahmen von Feldversuchen erprobt), sondern muss durch eine in der Fahrbahn oder der Leitplanke integrierte Stromschiene oder durch induktive Übertragung durch die

Fahrbahndecke geschehen. Aufgrund großer ungelöster Herausforderungen (u.a. Sicherheit, Wartungsaufwand, elektromagnetische Verträglichkeit) und des gegenüber Alternativtechnologien im Pkw-Bereich weit zurückliegenden Entwicklungsstands¹⁷³ wird ein Einsatz von ERS für Pkw jedoch als zumindest mittelfristig unwahrscheinlich angesehen.

- Für den Lkw-Fernverkehr gibt es von einzelnen Herstellern¹⁷⁴ erste Ankündigungen reiner Batteriefahrzeuge. Hierfür sind allerdings hohe Kosten zu erwarten, dazu kommen Herausforderungen wie der hohe elektrische Leistungsbedarf an den vorgesehenen Ladepunkten und der hohe Ressourcenbedarf für die Fahrzeugproduktion. Gegenüber den Alternativtechnologien wird der Einsatz reiner Batteriefahrzeuge im Güterfernverkehr daher als eher unwahrscheinlich angesehen.
- Im Lkw-Verteilverkehr (Entscheidungsfeld Güternah- und -regionalverkehr) können alle betrachteten Antriebstechnologien die Anforderungen aus technischer Sicht gut darstellen (eher geringe Reichweiten

¹⁷³ Siehe zum Beispiel PIARC (2018).

¹⁷⁴ Wolters (2017).

Zuordnung der Technologien zu den Entscheidungsfeldern

Tabelle 2

	Otto-Fzg.	Diesel-Fzg.	CH ₄ -Fzg.	Batterie-fzg.	Brennstoffzellen-Fzg.	ERS (z. B. Oberleitungs-Fzg.)	Hybride
Pkw	×	×	×	×	×	(X)	×
Lkw							
Nah- und Regionalverkehr	×	×	×	×	×	(X)	(X)
Fernverkehr		×	×	(X)	×	×	×

Eigene Darstellung

notwendig, relativ gute Planbarkeit von Touren). Der Einsatz von Hybridlösungen wird daher in diesem Entscheidungsfeld aus Kostengründen als eher unwahrscheinlich angesehen.

4.5 Methodisches Vorgehen bei der Technologieanalyse

4.5.1 Zweck und Methodik

Kernanliegen dieses Abschnitts ist es, die in Abschnitt 3.4 ausgewählten Technologien für den motorisierten Straßenverkehr hinsichtlich ihrer Indikation für technologiespezifische Regulierungseingriffe zu analysieren. Zu diesem Zweck werden für die Technologien wichtige techno-ökonomische Parameter in Form eines Screenings untersucht. Als Ergebnis werden die untersuchten Technologieoptionen (Antriebskonzept und Energiebereitstellung) für die zur Bewertung der Instrumentenwahl relevanten Fragestellungen eingeordnet (Abschnitt 3.6).

In Abschnitt 2.4 wurden ökonomische Parameter identifiziert, die für die Entscheidung über die Effizienz technologiespezifischer Regulierung relevant sind. Zu den verschiedenen Kategorien ökonomischer Parameter (Rolle zentralen Wissens, Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes im Status quo ante, weitere Regulierungsziele neben der Dekarbonisierung, siehe auch Abschnitt 2.4) wurden Klassifizierungsfragen zu den Technologieeigenschaften entwickelt, um auf Basis der Antworten Einschätzung zur Adäquanz technologiespezifischer Regulierung vornehmen zu können (siehe 3.5.2). Die Fragen werden für die einzelnen Technologien entweder binär (ja/nein) oder auf einer fünfstufigen

Ordinalskala beantwortet. Für jede Frage wird darüber hinaus textlich im Vergleich der Technologien begründet, auf welcher Grundlage die jeweilige Einschätzung zustande kam. Wo dies möglich war, wurden vorhandene Studien in die Bewertung einbezogen. Der Ansatz hat den Charakter eines Screenings: Wesentliches Ziel ist es, ein konsistentes Gesamtbild zu erhalten, sodass aus der Gesamtschau der Einzelbewertungen Schlussfolgerungen für die Instrumentenausgestaltung im motorisierten Straßenverkehr gezogen werden können. Die umfangreiche Ausleuchtung von Einzelfragestellungen steht hingegen nicht im Vordergrund.

Um die Auswertung der Antworten hinsichtlich der Fragestellung zu vereinfachen, wird die Skala stets folgendermaßen definiert: Diejenige Ausprägung des jeweiligen Parameters, die eine Indikation **für eine technologiespezifische Intervention** des Regulierers impliziert, steht immer auf der **rechten** Seite der einzelnen Diagramme. Dies gilt auch bei Ja/Nein-Fragen. Ein Ausschlag des Indikators nach links bedeutet hingegen eine Indikation für eine technologiespezifische Intervention im Bereich der betrachteten Technologieeigenschaft.

Die gewählte Methode zeigt sowohl die absolute Einordnung der Technologien bezüglich der Fragen als auch relevante Unterschiede zwischen den Technologien. Die absolute Einordnung erfordert prinzipiell eine Normierung auf einen bestimmten Referenzpunkt. In vielen Fällen ist dieser Referenzpunkt durch die Frage gegeben (zum Beispiel Anwendungsreife), bei einigen Fragen (zum Beispiel Anschaffungspreisdifferenz) stellt der mit fossilem Kraftstoff betriebene Verbrennungsmotor die Referenz dar. Darüber hinaus gibt es Fragen (zum Beispiel Anzahl der Informationsträger), bei denen ein absoluter Bezug aus grundsätzlichen Erwägungen schwer

herzustellen ist. Bei diesen Fragen ist allein die relative Einschätzung im Vergleich der Technologien relevant.

Auf Basis der in der Technologieanalyse vorgenommenen Einordnungen werden im Anschluss für die Synthese der aufbereiteten Informationen Profillinien der einzelnen Technologieoptionen erstellt, die grafisch aufzeigen, in welchen Bereichen (bei welchen Technologieeigenschaften) eine Tendenz für Technologieneutralität oder Technologiespezifität der Regulierung ausgemacht werden kann. Auf Basis dieser Synthese sollen wiederum Schlüsse für die grundsätzliche Indikation von Technologiespezifität im motorisierten Straßenverkehr gezogen werden (Abschnitt 3.7.1).

4.5.2 Analysierte Technologieeigenschaften

Wie in Abschnitt 3.5.1 dargelegt, werden für die Analyse der Technologieoptionen die in Abschnitt 2.4 hergeleiteten Kategorien ökonomischer Parameter, die für die Indikation von Technologiespezifität relevant sind (Rolle zentralen Wissens, Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes im Status quo ante, weitere Ziele neben der Dekarbonisierung) wieder aufgegriffen. Innerhalb dieser Kategorien werden verschiedene Technologieeigenschaften analysiert, die die ökonomischen Parameter zur Entscheidung über die technologiepolitische Ausgestaltung der Regulierung auf den Anwendungsbereich des motorisierten Straßenverkehrs übertragen.

Die Auswahl und Anzahl der betrachteten Technologieeigenschaften dient allein der Gewinnung wichtiger Erkenntnisse zur Indikationsstellung für oder wider den Einsatz technologiespezifischer Regulierung im Anwendungsfeld des motorisierten Straßenverkehrs. Sie bedeuten jedoch keine Aussage über das Gewicht beziehungsweise die Wichtigkeit der betrachteten Parameter in der Analyse (die Vielzahl der abgefragten Eigenschaften in der Kategorie Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes im Status quo ante bedeutet nicht, dass diese Kategorie eine größere Bedeutung besitzt als die anderen Kategorien).

In der Kategorie „**Rolle des zentralen Wissens**“ (vgl. zur theoretischen Herleitung Abschnitt 2.4.1) werden Informationen zur dezentralen Informationsverteilung, zur Informationsverfügbarkeit und zur Existenz nicht-monetärer Kosten/Nutzen-Komponenten analysiert. Technologieeigenschaften aus dieser Kategorie tragen

das Kürzel „W“ für Wissen. Die grundsätzliche Hypothese hinsichtlich der Rolle des zentralen Wissens ist dabei, dass mit zunehmender zentraler Verfügbarkeit der relevanten Informationen die Fehlerwahrscheinlichkeit bei der Ausgestaltung technologiespezifischer Regulierung abnimmt.

Ein erster Block in diesem Komplex zielt auf die Erlangung von Erkenntnissen darüber, inwiefern relevante Informationen dezentral verteilt sind:

- Die Analyse der **Struktur und Anzahl der Informationsträger** (W-1 in der Technologieanalyse) dient als Anhaltspunkt für den Aufwand der zentralen Erfassung der relevanten Informationen. Je weniger dezentral die Information zu einer Technologieoption verteilt ist und je geringer damit auch die Anzahl der Informationsträger ist, desto einfacher ist die zentrale Erfassung der relevanten Informationen.
- Die Analyse des **Informationszugangs des Regulierers** zu heutigen (W-2a) und zukünftigen (W-2b) Kosten und Nutzen der Technologieoptionen zielt darauf, abschätzen zu können, inwiefern der Regulierer in der Lage ist, die privaten und externen Kosten und Nutzen zutreffend abzuschätzen. Je besser der öffentliche Zugang zu den Informationen ist, desto einfacher ist die zentrale Erfassung der Informationen.

Ein zweiter Block zielt auf die Beantwortung der Frage, inwiefern die zu erlangenden relevanten Informationen überhaupt (sicher) verfügbar sind:

- Die Analyse der **Anwendungsreife** der Technologieoptionen mit Blick auf die zentrale Verfügbarkeit von Informationen (W-3) hat zum Ziel, einen Anhaltspunkt über die Unsicherheit der zukünftigen Entwicklung der Technologieoption zu erlangen. Je höher die Anwendungsreife ist, desto geringer ist auch die Unsicherheit über die zukünftige Entwicklung der Kosten und Nutzen der Technologieoption.
- Die Analyse der **Unsicherheit über die zukünftige Kostenentwicklung** (W-4) dient der Erfassung der Spannbreiten bei den Schätzungen zur zukünftigen Kostenentwicklung als Indikator für die diesbezügliche Unsicherheit. Je geringer die Unsicherheit über die zukünftige Kostenentwicklung ist, desto leichter kann der zentrale Regulierer die zukünftigen Kosten und Nutzen bewerten.

Zudem wird hier die Heterogenität der Technologieoptionen aus Nutzersicht untersucht:

- Die Analyse der **nicht-monetären Kosten** auf Nutzerseite (wie etwa geringere Reichweiten, längere Betankungszeiten, geringere Zuladungsvolumina) der Technologieoptionen (W-5) dient der Abschätzung der Vollständigkeit der Informationsbasis des zentralen Regulierers, da diese privaten Informationen schwer zu erlangen und zu bewerten sind. Je geringer die Bedeutung nicht-monetärer Kosten, desto einfacher ist die (vollständige) zentrale Bewertung von Kosten und Nutzen.

In der Kategorie „**Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes im Status quo ante**“ (vgl. zur theoretischen Herleitung Abschnitt 2.4.2) werden Technologieeigenschaften in drei Unterkategorien – störungsfreie Koordination des Marktes, Pfadabhängigkeiten und Politikversagen – analysiert. Technologieeigenschaften aus dieser Kategorie tragen das Kürzel „TO“ für Technologieoffenheit. Die zugrunde liegende Hypothese in dieser Kategorie ist, dass bei geringer Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes vor dem Regulierungseingriff der Einsatz technologiespezifischer Instrumente das Potenzial besitzt, effizienzverbessernd zu wirken, da diese die Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes erhöhen können.

In der Unterkategorie „**störungsfreie Koordination des Marktes**“ (TO-1 bis TO-3) werden hierzu Informationen über externe Umwelteffekte, Marktmacht im Entscheidungsfeld und Budgetrestriktionen auf der Nutzerseite aufbereitet. Grundsätzlich gilt dabei: Je stärker die Koordination des Marktes gestört ist, desto stärker ist die Indikation für technologiespezifische Regulierungsinstrumente.

- Die Analyse von externen Umweltkosten und -nutzen (TO-1) dient der Abschätzung, in welchem Maße die Endverbraucherpreise der betrachteten Technologien die vollständigen ökonomischen (das heißt sowohl die privaten als auch die externen) Kosten widerspiegeln. Preisverzerrungen infolge nicht-internalisierter externer Effekte schränken die Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes ein. In diesem Bereich wird daher untersucht, welche Externalitäten mit der Nutzung der Technologieoptionen verbunden sind, ob Politikinstrumente zur Internalisierung existieren und ob diese eine vollständige Internalisierung bewir-

ken. Je größer die Bedeutung nicht-internalisierter externer Kosten und Nutzen ist, desto stärker fällt die Störung der Koordination des Marktes aus.

- Die Analyse von **Marktmacht** im Entscheidungsfeld (TO-2) hat zum Ziel, zu identifizieren, inwiefern Güterpreise und Anreize für Forschung und Entwicklung durch Marktmachtkonzentration verzerrt sind. Die Existenz von Marktmacht wirkt verzerrend auf die Ressourcenallokation, sowohl in statischer als auch in dynamischer Hinsicht. In diesem Bereich wird einerseits untersucht, wie hoch die vertikale Integration (TO-2a) bei der jeweiligen Technologieoption ist, und andererseits, wie hoch die horizontale Integration, also die Wettbewerbsintensität auf verschiedenen Stufen der Wertschöpfungskette, das heißt bei den Herstellern (TO-2b) sowie bei der Treibstoffbereitstellung (TO-2c) ist. Je höher die Marktkonzentration ist, desto stärker fällt die Störung der Koordination des Marktes aus.
- Die Analyse **nutzerseitiger Budgetrestriktionen** (TO-3) zielt darauf, mögliche Barrieren bei der Anschaffung der Technologieoptionen infolge von Erschwinglichkeitsproblemen zu identifizieren. Hierzu wird untersucht, wie stark sich die Total Cost of Ownership (TO-3a), die Anschaffungspreise (TO-3b) und die Einstiegspreise (TO-3c) gegenüber der Referenz eines fossil betriebenen Verbrennungsfahrzeugs unterscheiden. Höhere Anschaffungs- und Einstiegspreise für emissionsarme Technologieoptionen in Verbindung mit nutzerseitigen Budgetgrenzen können zur Folge haben, dass die Anschaffungsentcheidung (trotz gleicher oder geringerer Kosten über den Lebenszyklus) zugunsten der konventionellen Verbrennertechnologie ausfällt. Je größer die Bedeutung von Budgetrestriktionen ist, desto stärker fällt die Störung der Koordination des Marktes aus.

In der Unterkategorie „Pfadabhängigkeiten“ (TO-4 bis TO-6) werden Informationen zur komplementären Infrastruktur, der Spezifität von Investitionen und zu Lern- und Skaleneffekten bei der Produktion aufbereitet. Grundsätzlich gilt hier, dass mit zunehmender Bedeutung von Pfadabhängigkeiten die Indikation für den Einsatz technologiespezifischer Regulierungsinstrumente steigt, um die Pfadabhängigkeiten aufzubrechen.

- Die Analyse **komplementärer Infrastruktur** (TO-4) zielt darauf ab, mögliche Pfadabhängigkeiten infolge der Notwendigkeit des Aufbaus komplementärer

Infrastruktur für die Technologieoptionen auszumachen. Unter komplementärer Infrastruktur werden dabei physische Einrichtungen verstanden, die für die Nutzung der jeweiligen Technologie zwingend notwendig sind (also etwa Einrichtungen für die Energieversorgung des Fahrzeugs, zur Erbringung von Reparaturdienstleistungen etc.). Von der Betrachtung der Infrastruktur, die für alle Technologieoptionen gleichermaßen notwendig ist, wie etwa Straßen und Parkflächen, wird jedoch abgesehen, da diese aufgrund der Uniformität der Anforderungen über die unterschiedlichen Technologieoptionen keine Pfadabhängigkeiten zugunsten einzelner Optionen zeitigen. Es wird in diesem Rahmen untersucht, ob komplementäre Infrastruktur für die Nutzung der jeweiligen Technologieoption notwendig ist (TO-4a), ob die Mitnutzung bestehender Infrastruktur möglich ist (TO-4b), ob die Infrastrukturinvestitionen spezifisch sind (TO-4c), ob Netzwerk- (TO-4d) und/ oder Verbundeffekte (TO-4e) mit der Infrastruktur verbunden sind und ob eine staatliche Bereitstellung der Infrastruktur aus rechtlichen oder anderen Gründen zwingend notwendig ist (TO-4f). Wenn der Aufbau einer neuen Infrastruktur notwendig ist und ökonomische (spezifische Investitionen, Netzwerkeffekte) oder rechtliche Hürden bei ihrem Aufbau bestehen, erschwert dies eine Abkehr von der bestehenden Technologie mit einer etablierten komplementären Infrastruktur.

- Die Analyse der **Spezifität von Investitionen** (TO-5) auf der Produzentenseite (TO-5a) und der Nachfrageseite (in Form der Abhängigkeit vom Ausbau der komplementären Infrastruktur, TO-5b) dient der Identifikation möglicher Investitionsbarrieren in die Anlagen zur Herstellung der emissionsarmen Fahrzeug- und Kraftstoffoptionen auf der Produzentenseite beziehungsweise in die Fahrzeuganschaffung auf der Nachfrageseite. Bei bestehender Unsicherheit über die zukünftige Entwicklung des Fahrzeugsektors im motorisierten Straßenverkehr und somit über den Absatz von Fahrzeugen beziehungsweise die Nutzbarkeit des anzuschaffenden Fahrzeugs bestimmt die Spezifität der Investitionen über die Höhe der versunkenen Kosten im Falle einer gescheiterten Investition. Je höher die Spezifität der Investitionen ausfällt, desto stärker hemmt Unsicherheit die Investition in die entsprechende Technologie.

- Die Analyse von **Lern- und Skaleneffekten** (TO-6) hat zum Ziel, mögliche Kostenvorteile der etablierten Technologie aufgrund noch ausstehender Lern- und Skaleneffekte bei den neuen Technologieoptionen zu identifizieren. Zu diesem Zwecke werden der Stand auf der Erfahrungskurve (TO-6a) sowie die Anwendungsreife mit Blick auf die dezentrale Technologiewahl (TO-6b) untersucht. Sowohl eine geringe Erfahrung bei der Herstellung der Technologie als auch eine geringe Anwendungsreife implizieren, dass Lern- und Skaleneffekte noch weitgehend ausstehen und aufgrund des daraus resultierenden Kostenvorteils der etablierten Technologie auch nicht (vollständig) erfolgen können. Je geringer der Stand auf der Erfahrungskurve und/oder die Anwendungsreife einer Technologieoption ist, desto stärker sind die Pfadabhängigkeiten zugunsten der etablierten Technologie.

Die Unterkategorie „**Politikversagen**“ (TO-7) analysiert politische Eingriffe in das Preisgefüge mit dem Ziel, Einschränkungen der Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes durch staatliche Preisbestandteile zu identifizieren. Hierzu wird untersucht, ob und welche staatlich veranlassten Preisbestandteile es bei den Technologieoptionen gibt. Liegen im Entscheidungsfeld Preiseingriffe des Staates vor, schränken sie die Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes ein, sofern sie nicht der Erhöhung der Kostenwahrheit durch die Internalisierung externer Effekte dienen. Je größer die Bedeutung solcher Preisverzerrungen, desto geringer ist die Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes.

In der Kategorie „**weitere Regulierungsziele neben der Dekarbonisierung**“ (vgl. zur theoretischen Herleitung Abschnitt 2.4.3) werden Informationen zur Verfolgung weiterer politischer Ziele neben der Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs aufbereitet. Technologieeigenschaften aus dieser Kategorie tragen das Kürzel „Z“ für Ziele. Verfolgt der Staat mehrere Ziele durch die technologiepolitischen Entscheidungen im motorisierten Straßenverkehr und werden diese weiteren Ziele durch die verschiedenen Technologieoptionen in unterschiedlichem Maße erfüllt, kann dies eine Indikation für den Einsatz technologiespezifischer Regulierungsinstrumente begründen. Hierzu wird zum einen analysiert, ob und welche weiteren politischen Ziele mit dem Einsatz

der Technologieoptionen verbunden sind (Z-1), zum anderen wird untersucht, in welchem Maße die Technologieoptionen einen Beitrag zur Erreichung weiterer Politikziele leisten können (Z-2). Je höher der Beitrag zu weiteren Politikzielen ist, desto stärker spricht dies für den Einsatz technologiespezifischer Regulierung.

Tabelle 3 fasst die analysierten Technologieeigenschaften noch einmal zusammen. Die zuvor dargelegten Technologieeigenschaften sind dabei in den Zeilen abgetragen. Neben dem Kürzel der Technologieeigenschaften (Spalte 1) und einer Kurzbezeichnung (Spalte 2) ist in der dritten Spalte die angelegte Skala für die Einordnung der Technologien aufgeführt. In der vierten Spalte findet sich zudem eine verbale Kurzzusammenfassung des in den vorangegangenen Absätzen dargestellten Zusammenhangs zwischen der Ausprägung der jeweiligen Technologieeigenschaft und der daraus resultierenden Indikation für eine stärker technologiespezifische oder eine stärker technologieneutrale Regulierung. Die dargestellte Tabelle wird zur übersichtlichen Darstellung der Ergebnisse der Technologieanalyse im Anschluss an die verbale Darlegung für die analysierten Technologieoptionen wieder aufgegriffen (Abschnitt Übersicht der Ergebnisse der Technologiecharakterisierung 3.6.4).

Übersicht der analysierten Technologieeigenschaften

Tabelle 3.1

Kürzel	Technologie-eigenschaft	Skala ● Tendenz zu T-Neutralität ○ Keine Tendenzaussage ● Tendenz zu T-Spezifität	
Rolle zentralen Wissens (W)			Je höher die Zentralität des Wissens, desto geringer die Fehlerwahrscheinlichkeit technologiespezifischer Regulierung.
W-1	Anzahl Informationsträger	hoch ● mittel ○ gering ●	Je geringer die Anzahl der Informationsträger, desto einfacher die zentrale Informationserfassung.
W-2a	Informationszugang Regulierer (heute)	gering ● mittel ○ hoch ●	Je höher der öffentliche Zugang zu Informationen, desto einfacher die zentrale Informationserfassung.
W-2b	Informationszugang Regulierer (Zukunft)	gering ● mittel ○ hoch ●	Je höher der öffentliche Zugang zu Informationen, desto einfacher die zentrale Informationserfassung.
W-3	Anwendungsreife (Zentralität d. Wissens)	gering ● mittel ○ hoch ●	Je geringer die Anwendungsreife, desto schwieriger die zentrale Informationserfassung.
W-4	Unsicherheit Kostenentwicklung	hoch ● mittel ○ gering ●	Je geringer die Unsicherheit über die Kostenentwicklung, desto leichter die zentrale Bewertung von Kosten und Nutzen.
W-5	Bedeutung nicht-monetäre Kosten/ Nutzen	hoch ● mittel ○ gering ●	Je geringer die nicht-monetären Kosten auf der Nutzerseite (private Info), desto einfacher die zentrale Bewertung von Kosten und Nutzen.
Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes (TO)			
Störungsfreie Koordination des Marktes			Je stärker die Koordination des Marktes gestört ist, desto stärker ist die Indikation für Technologiespezifität.
TO-1	Nicht-internalisierte externe Kosten	nein ● ja ●	Wenn externe Kosten nicht vollständig internalisiert sind, können verzerrte Preise die Koordination des Marktes stören.
TO-2a	Komplexität Wertschöpfungskette	niedrige vert. Int. ● mittel ○ hoch ●	Je höher der Grad der vertikalen Integration, desto stärker kann Marktmacht einen verzerrten Technologiewettbewerb induzieren.
TO-2b	Wettbewerbsintensität (Hersteller)	hoch ● mittel ○ gering ●	Je geringer die Wettbewerbsintensität, desto stärker kann Marktmacht einen verzerrten Technologiewettbewerb induzieren.
TO-2c	Wettbewerbsintensität (Treibstoff)	hoch ● mittel ○ gering ●	Je geringer die Wettbewerbsintensität, desto stärker kann Marktmacht einen verzerrten Technologiewettbewerb induzieren.
TO-3a	Km-Gesamtkosten	deutlich geringer ● etwa so hoch ○ deutlich höher ●	Je deutlicher die gegenwärtigen Km-Gesamtkosten über denen des konventionellen angetriebenen Verbrenners liegen, desto höher ist der Anreiz, ein konventionelles Fahrzeug anzuschaffen.
TO-3b	Anschaffungspreisdifferenz	etwa genauso hoch ● etwas höher ○ deutlich höher ●	Je deutlicher die Anschaffungskosten über denen des Verbrennungsfahrzeugs liegen, desto wahrscheinlicher können Budgetrestriktionen den Kauf eines alternativen Antriebs verhindern.
TO-3c	Einstiegspreisdifferenz	etwa genauso hoch ● etwas höher ○ deutlich höher ●	Je deutlicher die Einstiegspreise über denen des Verbrennungsfahrzeugs liegen, desto wahrscheinlicher können Budgetrestriktionen den Kauf eines alternativen Antriebs verhindern.
Pfadabhängigkeiten			Je stärker Pfadabhängigkeiten die Flexibilität der Technologiewahl stören, desto stärker ist die Indikation für technologiespezifische Regulierung.
TO-4a	Notwendigkeit Infrastruktur	nein ● ja ●	Wenn komplementäre Infrastruktur notwendig ist, kann dies die freie Technologiewahl stören.
TO-4b	Nutzbarkeit bestehender Infrastruktur	ja ● nein ●	Wenn bestehende Infrastruktur nicht mitgenutzt werden kann, kann die Notwendigkeit neuer Infrastruktur die freie Technologiewahl stören.

Übersicht der analysierten Technologieeigenschaften

Tabelle 3.2

Kürzel	Technologie-eigenschaft	Skala ● Tendenz zu T-Neutralität ● Keine Tendenzaussage ● Tendenz zu T-Spezifität	
Pfadabhängigkeiten			Je stärker Pfadabhängigkeiten die Flexibilität der Technologiewahl stören, desto stärker ist die Indikation für technologiespezifische Regulierung.
TO-4c	Investitionsspezifität Infrastruktur	nein ● ja ●	Wenn spezifische Investitionen zur Errichtung der Infrastruktur notwendig sind, kann dies ein Hemmnis für ihren Aufbau darstellen.
TO-4d	Netzwerkeffekte Infrastruktur	nein ● ja ●	Wenn Netzwerkeffekte bei der kompl. Infrastruktur bestehen, können die ersten Einheiten (zunächst) nicht kostendeckend betrieben werden.
TO-4e	Verbundeffekte Infrastruktur	ja ● nein ●	Wenn keine Verbundeffekte bei der kompl. Infrastruktur bestehen, muss sie allein über die Technologienutzung refinanziert werden.
TO-4f	Notwendigkeit öff. Bereitstellung	nein ● ja ●	Wenn die kompl. Infrastruktur öffentlich bereitgestellt werden muss, bedarf es technologiespezifischer Infrastrukturbereitstellung.
TO-5a	Investitionsspezifität Produzenten	gering ● mittel ○ hoch ●	Je höher die Spezifität der produktionsseitigen Investitionen, desto größer die Hemmniswirkung auf die Investitionen in die Produktionsanlagen.
TO-5b	Infrastrukturabhängigkeit Fahrzeug-Invest	gering ● mittel ○ hoch ●	Je höher die Abhängigkeit der konsumentenseitigen Investition vom Infrastrukturausbau, desto größer die Hemmniswirkung auf die Nachfrage.
TO-6a	Erfahrungskurve	vollständig ● weitgehend ○ kaum ●	Je weniger die Erfahrungskurve abgeschritten ist, desto stärker können Preisvorteile der etablierten Technologie Pfadabhängigkeiten schaffen.
TO-6b	Anwendungsreife Technologiewahl (dezentrale)	hoch ● mittel ○ gering ●	Je geringer die Anwendungsreife neuer Technologien, desto stärker können Preisvorteile der etablierten Technologie Pfadabhängigkeiten schaffen.
Politikversagen			Je stärker Politikversagen die Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes stört, desto stärker ist die Indikation für technologiespezifische Regulierung.
TO-7	Einfluss Politik auf relative Preise	nein ● ja ●	Wenn politische Preiseingriffe vorliegen, können Preisverzerrungen die Technologieoffenheit einschränken.
Weitere Regulierungsziele neben der Dekarbonisierung (Z)			Je größer die Bedeutung weiterer Regulierungsziele, desto stärker ist die Indikation für technologiespezifische Regulierung.
Z-1	Zielpluralität	nein ● ja ●	Wenn mit der Technologie weitere Ziele verfolgt werden, kann Technologiespezifität die Erreichung der Ziele fördern.
Z-2a	Zielbeitrag Energieeffizienz	gering ● mittel ○ hoch ●	Je höher der Beitrag der Technologie zu weiteren Zielen, desto stärker kann dies für eine technologiespezifische Regulierung sprechen.
Z-2b	Zielbeitrag Materialbedarf	gering ● mittel ○ hoch ●	Je höher der Beitrag der Technologie zu weiteren Zielen, desto stärker kann dies für eine technologiespezifische Regulierung sprechen.
Z-2c	Zielbeitrag Luftqualität	gering ● mittel ○ hoch ●	Je höher der Beitrag der Technologie zu weiteren Zielen, desto stärker kann dies für eine technologiespezifische Regulierung sprechen.
Z-2d	Zielbeitrag Energiesystemoptimierung	gering ● mittel ○ hoch ●	Je höher der Beitrag der Technologie zu weiteren Zielen, desto stärker kann dies für eine technologiespezifische Regulierung sprechen.

Eigene Darstellung durch ifeu

4.6 Ergebnisse der Technologieanalyse

Als Grundlage für die Indikation einer technologie-neutralen oder technologiespezifischen Regulierung werden die ausgewählten Zukunftstechnologien (und als Referenz auch noch die aktuelle Verbrennertechnologie mit fossilem Kraftstoff) hinsichtlich der genannten Technologieeigenschaften zu einer ersten Einordnung für das weitere Verfahren eingeschätzt.¹⁷⁵ Dies wird (wie in Abschnitt 3.5.2 dargelegt) für die folgenden Kategorien und die zugrunde liegenden Fragestellungen beschrieben:

- Rolle des zentralen Wissens
- Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes im Status quo ante, mit den Unterkategorien
 - Störungsfreie Koordination des Marktes
 - Pfadabhängigkeiten
 - Politikversagen
- Weitere Regulierungsziele neben der Dekarbonisierung.

4.6.1 Ergebnisse in der Kategorie „Rolle des zentralen Wissens“

Der Einordnung mit Blick auf die Indikation technologiespezifischer Regulierung in der Kategorie „Rolle des zentralen Wissens“ liegt die Hypothese zugrunde, dass mit zunehmender zentraler Verfügbarkeit der relevanten Informationen die Fehlerwahrscheinlichkeit bei der Ausgestaltung technologiespezifischer Regulierung abnimmt.

Anzahl der Informationsträger (W-1)

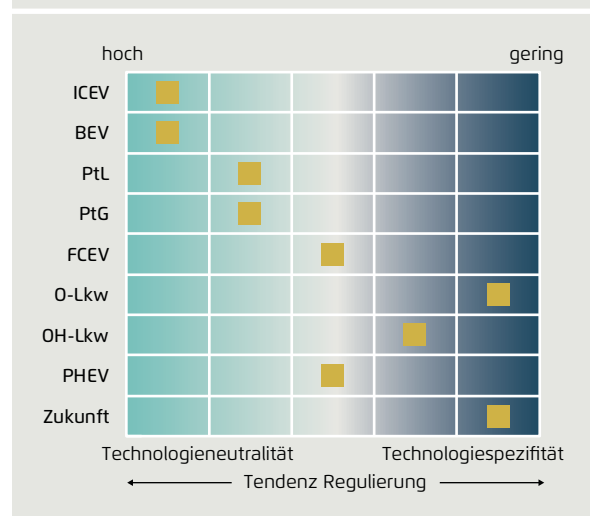
Die Analyse der Struktur und Anzahl der Informationsträger dient als Anhaltspunkt für den Aufwand der zentralen Erfassung der relevanten Informationen. Je weniger dezentral die Information zu einer Technologieoption verteilt ist und je geringer damit auch die Anzahl der Informationsträger ist, desto einfacher ist die zentrale Erfassung der relevanten Informationen.

Zur Bewertung dieses Kriteriums wurde vereinfachend angenommen, dass die Anzahl der Informationsträger im Wesentlichen der Anzahl der im jeweiligen Bereich wahrnehmbaren Akteure entspricht. Bei ICEV und BEV

als marktgängigen Technologien ist die höchste Anzahl von Akteuren vorhanden. An der Herstellung von ICEV ist aufgrund ihrer Komplexität im Regelfall eine Vielzahl von Zulieferern beteiligt. Bei BEV ist die Komplexität der Herstellung geringer, auf der anderen Seite gibt es aber mittlerweile eine große Menge an Firmen, die sich ausschließlich auf Elektroantriebe im Automotive-Bereich spezialisiert haben. Bei PtX-Kraftstoffen sind Akteure sowohl der Chemie-, der Mineralöl- als auch der Automobilindustrie beteiligt, zudem findet viel Forschung im Bereich der Prozesstechnik statt, sodass die Anzahl der Informationsträger auch hier vergleichsweise hoch ist. PHEV und FCEV werden derzeit nur durch wenige große Automobilhersteller entwickelt, die das benötigte Wissen vereinen. Daher wird die Anzahl der Informationsträger hier gegenüber den vorgenannten Technologien als deutlich geringer eingeschätzt, auch wenn insbesondere an der Herstellung von PHEV natürlich wiederum eine Vielzahl an Zulieferern beteiligt ist. Bei ERS-Lkw, die bisher nur von einzelnen Herstellern entwickelt und in wenigen Feldversuchen weltweit getestet werden, ist die Anzahl der Informationsträger am geringsten.

Wie hoch ist die Anzahl der Informationsträger hinsichtlich der (heutigen und zukünftigen) Kosten und Nutzen der Technologie?

W-1



Eigene Darstellung

¹⁷⁵ Diese Einschätzung kann in einigen Bereichen – aus Gründen des Umfangs der Fragestellungen – nur einige Punkte erwähnen und somit nicht als abschließend betrachtet werden.

Informationszugang Regulierer (W-2)

Die Analyse des Informationszugangs des Regulierers zu heutigen und zukünftigen Kosten und Nutzen der Technologieoptionen zielt darauf, abschätzen zu können, inwiefern der Regulierer in der Lage ist, die privaten und externen Kosten und Nutzen zutreffend abzuschätzen. Je besser der öffentliche Zugang zu den Informationen ist, desto einfacher ist die zentrale Erfassung der Informationen.

Der Regulierer kann die Kosten und Nutzen am besten für schon marktgängige Technologien abschätzen. Hier liegen detaillierte Informationen und Messergebnisse vor allem über Tests oder Datenbanken (zum Beispiel ADAC EcoTest/ Autotest¹⁷⁶) vor. Bei ICEV, BEV und PHEV ist die Informationslage daher als gut anzusehen. Bei Technologien, deren Entwicklung zu einem erheblichen Teil staatlich unterstützt wurde, hat der Staat ebenfalls einen guten Einblick. Dies trifft auf den OH-Lkw sowie den O-Lkw zu.¹⁷⁷

Bei mit PtL/PtX betriebenen Verbrennern ist die Informationslage hinsichtlich der Fahrzeuge sehr gut, die

Erzeugungskosten der synthetischen Kraftstoffe basieren hingegen auf Schätzungen aus verschiedenen Studien.¹⁷⁸ Bei PtL/PtG und FCEV wird, insbesondere wegen der Unsicherheiten hinsichtlich des Kraftstoffpreises sowie die Bereitstellung des Wasserstoffes, der Informationszugang als etwas schwieriger angesehen.

Bei der zukünftigen Entwicklung sind bei allen Technologien noch Entwicklungspotenziale, aber auch Risiken vorhanden.

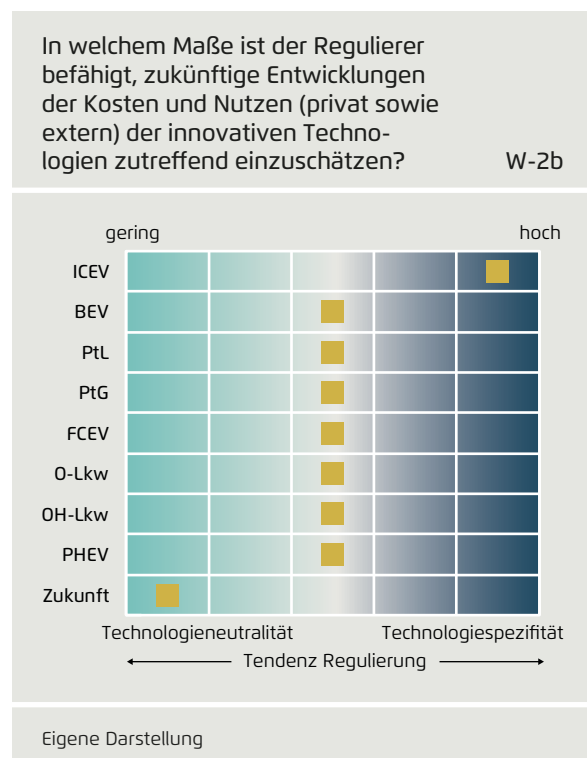
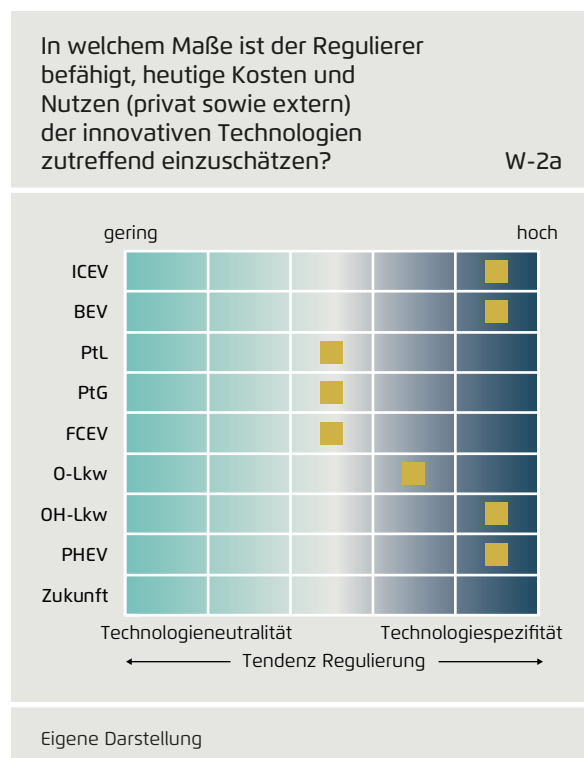
Für den Verbrennungsmotor kann der Regulierer die Entwicklungspotenziale am besten einschätzen.¹⁷⁹ Zwar finden die Forschungsaktivitäten hier größtenteils im privatwirtschaftlichen Sektor statt, es gibt bei Verbrennungskraftmaschinen aber klare physikalische Grenzen der erreichbaren Effizienz. Zudem existieren aufgrund der regulatorischen Relevanz etliche Studien hierzu. Bei den Alternativtechnologien ist die technische und kostenseitige Entwicklung deutlich schwerer vorherzusagen, da man hier von den physikalischen Grenzen noch weiter entfernt ist und nicht genau vorhersagbare

176 ADAC (2019a).

177 Siemens AG (2012).

178 Pfennig et al. (2017); Agora Verkehrswende et al. (2018).

179 Barba (2018), S. 34; EC (2017).



Entwicklungssprünge auftreten können. Entsprechend wird dieser Punkt hier mit „mittel“ bewertet. Zu beachten ist, dass bei der Oberleitungstechnologie die Wahrscheinlichkeit großer Technologiesprünge deutlich unwahrscheinlicher und diese Technologieentwicklung daher aus Sicht des Regulierers besser vorhersehbar ist. Dennoch bleibt für Oberleitungs-Lkw die Unsicherheit hinsichtlich der Batterieentwicklung (O-BEV) beziehungsweise des PtL-Kraftstoffs (OH-Lkw) mit Blick auf eine vollständige Dekarbonisierung. Die größten Unsicherheiten liegen natürlich bei noch nicht näher definierten Zukunftstechnologien.

Anwendungsreife mit Blick auf die zentrale Verfügbarkeit von Informationen (W-3)

Die Analyse der Anwendungsreife der Technologieoptionen mit Blick auf die zentrale Verfügbarkeit von Informationen hat zum Ziel, einen Anhaltspunkt über die Unsicherheit der zukünftigen Entwicklung der Technologieoption zu erlangen. Je höher die Anwendungsreife ist, desto geringer ist auch die Unsicherheit über die zukünftige Entwicklung der Kosten und Nutzen der Technologieoption.

Grundlage für die Beurteilung der Anwendungsreife ist der Technology Readiness Level (TRL), der in Tabelle 1 für

die betrachteten Technologien beziehungsweise gegebenenfalls für ihre Komponenten dargestellt ist. Der TRL bezieht sich primär auf die Zuverlässigkeit einer Technologie und reflektiert nicht mögliche Einschränkungen der Technologie im Anwendungsgebiet gegenüber einer anderen Technologie.

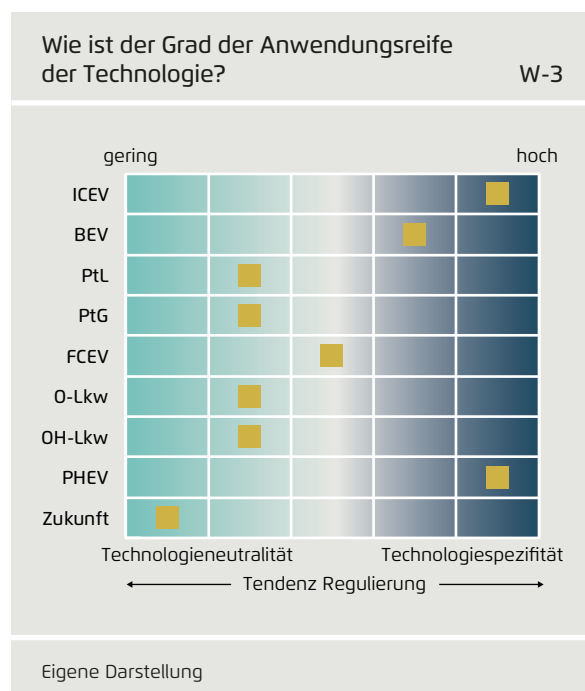
ICEV und PHEV sind seit längerem auf dem Markt und voll einsatzfähig. Dementsprechend ist die Anwendungsreife hoch (TRL 9). Reine Elektro-Pkw (BEV) haben ebenfalls eine hohe Anwendungsreife. Unabhängig vom TRL liegen hier die Herausforderungen noch im Preis, der Energiedichte der Batterien (und damit der erzielbaren Reichweite) sowie in der Ladeinfrastruktur. Hier besteht noch Entwicklungspotenzial.

FCEV können prinzipiell schon gekauft werden (Hyundai Nexo, Toyota Mirai), es bestehen allerdings noch eine lückenhafte Tankinfrastruktur, geringe Modellvielfalt sowie offene Fragen hinsichtlich der Lebensdauer der Brennstoffzelle. Synthetische Kraftstoffe und auch O(H)-Lkw können noch nicht auf dem Markt gekauft werden. Bei OH-Lkw haben die ersten Pilotversuche in Deutschland begonnen,¹⁸⁰ bei synthetischen Kraftstoffen gibt es einige Pilotanlagen sowie umfassende Forschungsprojekte.¹⁸¹

Unsicherheit Kostenentwicklung (W-4)

Die Analyse der Unsicherheit über die zukünftige Kostenentwicklung dient der Erfassung der Spannbreiten bei den Schätzungen zur zukünftigen Kostenentwicklung als Indikator für die diesbezügliche Unsicherheit. Je geringer die Unsicherheit über die zukünftige Kostenentwicklung ist, desto leichter kann der zentrale Regulierer die zukünftigen Kosten und Nutzen bewerten.

Die zukünftige Kostenentwicklung bei ICEV wird primär durch die höheren Anforderungen an die Abgasbehandlung (Euro 7) und die Entwicklung der Kraftstoffpreise getrieben. Die Unsicherheiten der Kostenentwicklung sind damit überschaubar. Bei BEV dagegen liegen die Unsicherheiten weniger in den Strompreisen begründet, die laut aktuellen Prognosen¹⁸² auch längerfristig relativ stabil bleiben dürften, sondern vor allem in der Entwick-



180 BMU (2019).

181 Deutscher Bundestag (2018).

182 Schlesinger et al. (2014), S. 227.

lung der Batteriekosten. Bei den Batterien wird eine stetige Weiterentwicklung (Energiedichte, Kosten, Lebensdauer etc.) erwartet.¹⁸³ Zudem gibt es verschiedene technische Ansätze, die zu sprunghaften Verbesserungen führen könnten. Dazu zählen insbesondere Batterietechnologien mit Festkörperelektrolyt,¹⁸⁴ Lithium-Schwefel- sowie Lithium-Luft-Batterien, die bei Erlangung entsprechender technischer Reife erheblichen Einfluss auf die Kosten haben könnten.¹⁸⁵

Die höchsten Unsicherheiten liegen bei der Produktion von synthetischen Kraftstoffen und Wasserstoff vor; die Energieeffizienz dieser Prozesse ist verglichen mit direkter Stromnutzung in Fahrzeugen gering und die noch unsicheren Gestehungskosten der hohen benötigten Strommengen (deren inländische Bereitstellung gegenwärtig als unwahrscheinlich angesehen wird¹⁸⁶) haben einen starken Einfluss auf den Preis der Endprodukte Wasserstoff und PtL. Bei Brennstoffzellenantrieben kommt die Produktion der Brennstoffzelle als

Unsicherheitsfaktor hinzu (hier ist unter anderem der Platingehalt ein Kostentreiber).¹⁸⁷

Zu beachten ist, dass nach erfolgtem Markthochlauf die Infrastrukturkosten für sämtliche Technologien gegenüber den Energiekosten in den Hintergrund treten. Das bedeutet für die Oberleitungstechnologie aufgrund ihrer hohen Energieeffizienz eine vergleichsweise geringe Unsicherheit der langfristigen Kostenentwicklung.¹⁸⁸

Bedeutung nicht-monetärer Kosten (W-5)

Die Analyse der nicht-monetären Kosten der Technologieoptionen auf Nutzerseite (wie etwa geringere Reichweiten, längere Betankungszeiten, geringere Zuladungsvolumina) dient der Abschätzung der Vollständigkeit der Informationsbasis des zentralen Regulierers, da diese privaten Informationen schwer zu erlangen und zu bewerten sind. Je geringer die Bedeutung nicht-monetärer Kosten ist, desto einfacher ist die (vollständige) zentrale Bewertung von Kosten und Nutzen.

Die Handhabung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ändert sich nicht durch die Einführung alternativer Kraftstoffe. Demzufolge kommt es bei PtL und PtG nicht zu zusätzlichen nicht-monetären Kosten gegenüber fossil betriebenen Verbrennungsfahrzeugen.

PHEV haben zwei Antriebstechnologien an Bord. Dies bedeutet für den Nutzer eine gewisse zusätzliche Komplexität, da er sowohl laden als auch tanken muss/kann. Zudem kann es durch den doppelten Antrieb zu Einschränkungen im Zuladungsvolumen kommen.¹⁸⁹

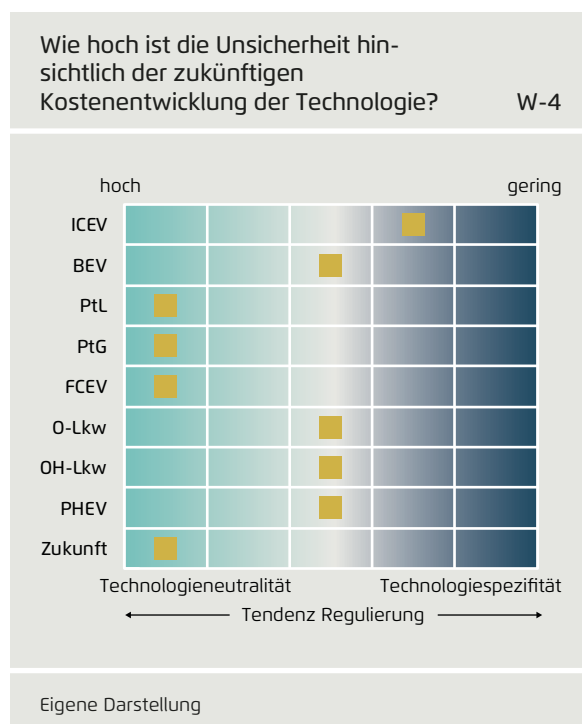
Die aufgeführten Technologien ohne Verbrennungsantrieb haben heute noch einige Einschränkungen. Zum einen ist die Reichweite gegenüber Verbrennungsantrieben bei Brennstoffzellenfahrzeugen etwas und bei Batteriefahrzeugen deutlich geringer. Auch sind bei Batteriefahrzeugen die Ladevorgänge länger als bei konventionellem Kraftstoff. Bei Batteriefahrzeugen ist das Antriebssystem durch die Batterie in der Regel deutlich schwerer. Vor allem bei Nutzfahrzeugen kann dies eine Verringerung der Nutzlast bedeuten, worauf der Gesetzgeber bereits mit entsprechenden Ausnahmen reagiert

183 Michaelis et al. (2018).

184 Yu et al. (2019); Schwarzer (2019).

185 Thielmann et al. (2017).

186 UBA (2016b).



187 Plötz et al. (2018).

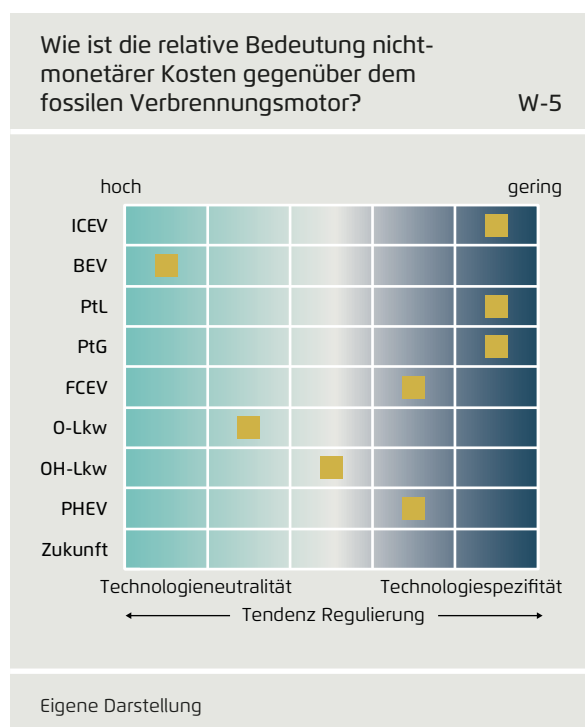
188 Kasten et al. (2016).

189 ADAC (2019e).

hat.¹⁹⁰ Sowohl FCEV als auch BEV benötigen für Antrieb und Energiespeicher zudem tendenziell etwas mehr Bauraum als ICEV. Andererseits macht der Elektroantrieb auch neue Konzepte der Raumaufteilung im Fahrzeug möglich, sodass der Komfort beispielsweise durch Wegfall des Kardantunnels gesteigert werden kann.

Oberleitungs-Lkw haben hohe Anforderungen an die Infrastruktur, was bei nur geringem Infrastrukturausbau zu Lasten der Flexibilität beim Fahrzeugeinsatz geht. Auf der anderen Seite müssen bei weitgehendem Oberleitungsbetrieb keine großen Energiespeicher mitgeführt werden, sodass die Einschränkung der Zuladung verglichen mit beispielsweise Batterie-Lkw deutlich geringer ist. Die Energieaufnahme während der Fahrt ermöglicht zudem prinzipiell einen kontinuierlichen Einsatz der Fahrzeuge, was vor allem dann ein Vorteil werden dürfte, wenn Lkw künftig autonom fahren können.

190 Baumann; Priemer (2017).



4.6.2 Ergebnisse in der Kategorie „Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes im Status quo ante“

Der Einordnung mit Blick auf die Indikation technologiespezifischer Regulierung in der Kategorie „Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes im Status quo ante“ liegt die Hypothese zugrunde, dass bei geringer Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes vor dem Regulierungseingriff der Einsatz technologiespezifischer Instrumente das Potenzial besitzt, effizienzverbessernd zu wirken, da diese die Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes erhöhen können.

4.6.2.1 Ergebnisse in der Unterkategorie „Störungsfreie Koordination des Marktes“

In der Unterkategorie „störungsfreie Koordination des Marktes“ (TO-1 bis TO-3) werden Informationen über externe Umwelteffekte, Marktmacht im Entscheidungsfeld und Budgetrestriktionen auf der Nutzerseite aufbereitet. Grundsätzlich gilt dabei: Je stärker die Koordination des Marktes gestört ist, desto stärker ist die Indikation für technologiespezifische Regulierungsinstrumente.

Externe Umweltkosten und -nutzen (TO-1)

Die Analyse von externen Umweltkosten und -nutzen dient der Abschätzung, in welchem Maße die Endverbraucherpreise der betrachteten Technologien die vollständigen ökonomischen (das heißt sowohl die privaten als auch die externen) Kosten widerspiegeln. Preisverzerrungen infolge nicht-internalisierter externer Effekte schränken die Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes ein. Hier wird daher dargestellt, welche Externalitäten mit der Nutzung der Technologieoptionen verbunden sind, ob Politikinstrumente zur Internalisierung existieren und ob diese eine vollständige Internalisierung bewirken. Je größer die Bedeutung nicht-internalisierter externer Kosten und Nutzen, desto stärker fällt die Störung der Koordination des Marktes aus.

Die wichtigsten Externalitäten des Transports sind: Unfälle, Luftverschmutzung, Beitrag zum anthropogenen Treibhauseffekt, Lärm, Stau, Emissionen zur Bereitstellung der Energieträger, Flächenverbrauch und -zerschneidung. Daneben treten noch weitere Externalitäten (zum Beispiel Boden- und Wasserverschmutzung) auf. Diese werden umfassend im aktuellen Handbuch der EU

für alle Verkehrsträger in Europa ermittelt.¹⁹¹ Die Kosten werden für die verschiedenen Fahrzeugkategorien und differenzierte Unterkategorien (zum Beispiel städtischer oder ländlicher Raum) ermittelt.

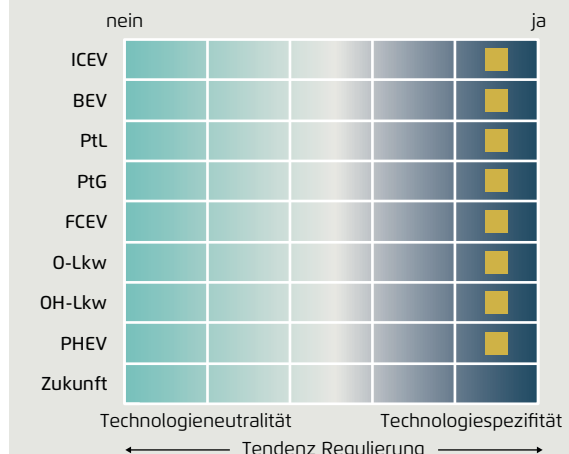
Während sich die Externalitäten durch Flächenverbrauch und -zerschneidung durch die Nutzung der Fahrzeuge zwischen den Technologien wenig unterscheiden, sind die Unterschiede in den anderen Kategorien stärker. Hier spielen die konkreten Verfahren (zum Beispiel Rohstoffabbau, Transport, Herstellung) und der eingesetzte Energiemix (zum Beispiel Strombereitstellung) eine wichtige Rolle.

Nach der Methodenkonvention 3.0 des Umweltbundesamtes¹⁹² liegen die mittleren Umweltkosten pro Fahrzeugkilometer (Treibhausgase, Luftschadstoffemissionen, Lärm sowie Vorprozesse) bei Elektro-Pkw im Jahr 2016 bei 6,1 Eurocent/Fzg.-km, bei Diesel-Pkw bei 7,53 Eurocent/Fzg.-km und bei Otto-Pkw bei 6,42 Eurocent/Fzg.-km. Mit einer Dekarbonisierung des Strommixes wird sich dieses Verhältnis verschieben. Auch in Zukunft ist davon auszugehen, dass die direkten Emissionen von Verbrennern (Schadstoffemissionen/Lärm) höher liegen als bei Elektrofahrzeugen. Bei Einsatz von PtL/PtG werden die Externalitäten bei den Treibhausgasemissionen zudem wegen des geringen Wirkungsgrades höher eingeschätzt (Restemissionen einer nicht vollständig erneuerbaren Stromerzeugung schlagen hier deutlich stärker zu Buche). Nicht berücksichtigt werden hier die Externalitäten durch den unregulierten Abbau von Rohstoffen.

Die Internalisierung externer Kosten kann durch markt-basierte Instrumente (zum Beispiel Steuern, Abgaben, Emissionshandel) erfolgen. Für den Personen- und Güterverkehr besteht eine Reihe staatlicher Abgaben, die in unterschiedlichem Maße mit den durch den Verkehr verursachten externen Kosten korrelieren. Die Mineralölsteuer macht einen erheblichen Teil des Tankstellenpreises von Kraftstoffen aus, die Kfz-Steuer hat eine CO₂-abhängige Komponente, die Lkw-Maut dient zur Finanzierung der Infrastruktur und hängt unter anderem vom Schadstoffausstoß ab, wird aber nur auf Autobahnen und Bundesstraßen eingesetzt.

Bestehen externe Kosten, die nicht vollständig durch bestehende Instrumente internalisiert sind?

TO-1



Eigene Darstellung

Insgesamt gehen von diesen Abgaben zwar effektiv mehr oder weniger starke Anreize aus, die durch die Fahrzeugnutzung entstehende Umweltbelastung zu senken, allerdings erfolgt dies nicht in systematischer Weise und mit dem Ziel, die externen Kosten zu internalisieren. Primäres Ziel und Bemessungsgrundlage sind vielmehr die Generierung von Haushaltseinnahmen für den Staat beziehungsweise die Finanzierung der Wegekosten im Falle der Lkw-Maut. In letzterem Fall werden zwar externe Kosten durch Luftschadstoffemissionen und Lärm mit einbezogen, allerdings keine Klimafolgeschäden.¹⁹³

Unterstellt man dennoch, dass durch die genannten Instrumente eine Internalisierung externer Kosten des Straßenverkehrs stattfinden soll, so findet diese Internalisierung in Deutschland beziehungsweise Europa nur in geringem Maß statt.¹⁹⁴ Bei den meisten Fahrzeugkategorien werden nur ca. 15–25 Prozent der externen Kosten und Infrastrukturkosten abgedeckt. Die Beiträge der Kfz-Steuer und der Lkw-Maut decken nur einen geringen Anteil der durch den Verkehr verursachten externen Kosten.

191 Van Essen et al. (2019).

192 Bünge; Matthey (2018).

193 Korn et al. (2018).

194 Becker et al. (2012); Van Essen et al. (2019), S. 10.

Marktmacht (TO-2)

Die Analyse von Marktmacht im Entscheidungsfeld hat zum Ziel, zu identifizieren, inwiefern Güterpreise und Anreize für Forschung und Entwicklung durch Marktmachtkonzentration verzerrt sind. Die Existenz von Marktmacht wirkt verzerrend auf die Ressourcenallokation, sowohl in statischer als auch in dynamischer Hinsicht. In diesem Bereich wird einerseits untersucht, wie hoch die vertikale Integration (TO-2a) bei der jeweiligen Technologieoption ist und andererseits, wie hoch die horizontale Integration, also die Wettbewerbsintensität, auf verschiedenen Stufen der Wertschöpfungskette – das heißt bei den Herstellern (TO-2b) und bei der Treibstoffbereitstellung (TO-2c) – ist. Je höher die Marktkonzentration ist, desto stärker fällt die Störung der Koordination des Marktes aus.

Komplexität Wertschöpfungskette (TO-2a)

Als Bewertungsmaßstab für die Komplexität der Wertschöpfungskette dient die vertikale Integration in den jeweiligen Bereichen.

Die Wertschöpfungskette bei der Fahrzeugherstellung setzt sich derzeit aus den OEM und Zulieferfirmen zusammen. Hier haben sich bei den **Verbrennungsmotoren** Spezialisierungen gebildet (zum Beispiel Elektronik, Zündkerzen etc.). Die Teile werden dem OEM geliefert und von diesem zusammengebaut. Die vertikale Integration ist damit bei der Pkw-Fertigung (ICEV) bisher gering.¹⁹⁵

Bei **Elektrofahrzeugen** ist hier noch offen, wie das Zusammenspiel zwischen OEM und Zulieferern zukünftig genau aussehen soll. Prinzipiell benötigt ein Elektrofahrzeug weniger Teile als ein Verbrennerfahrzeug. Tesla ist an der Herstellung der meisten Bauteile seiner Fahrzeuge beteiligt¹⁹⁶ und betreibt die Ladeinfrastruktur. Auch für andere OEMs wird die Dringlichkeit gesehen, dass sie im Zuge einer BEV-Produktion in Batterietechnologie und Ladeinfrastruktur investieren.¹⁹⁷

Bei **Oberleitungs-Lkw** kommt der Pantograf als zusätzliche Komponente hinzu und wird zumindest mittelfristig wahrscheinlich durch spezialisierte Zulieferer bereitgestellt. Handelt es sich um Diesel-Hybridfahrzeuge, so

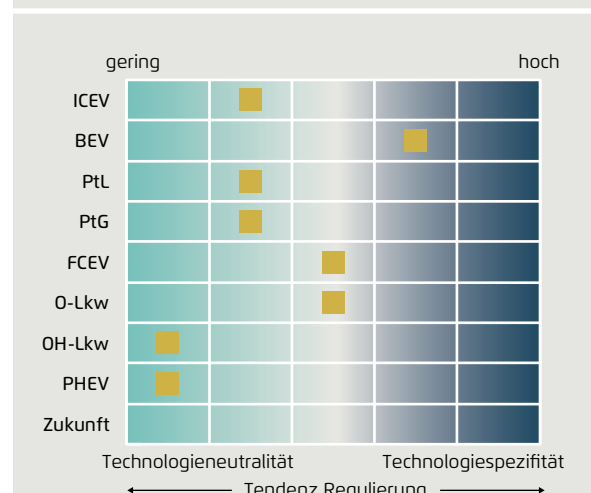
kommt der Hybridantriebsstrang mit wiederum einer Vielzahl beteiligter Zulieferer ins Spiel. Überdies ist auch im Bereich der Infrastruktur für ERS die Beteiligung weiterer Player (Energieversorger, Systemintegratoren) zu erwarten. Die erwartete vertikale Integration fällt daher bei ERS vergleichsweise niedrig aus.

Brennstoffzellenfahrzeuge werden bisher von wenigen Herstellern produziert. Die OEM kaufen Brennstoffzellen von Spezialisten (zum Beispiel Ballard) ein. Die Infrastruktur wird in Deutschland über das Industriekonsortium H2 Mobility Deutschland GmbH organisiert.¹⁹⁸

PtL/PtG: Es ist noch unklar, welche Firmen hier aktiv werden. Vermutlich werden die Mineralölindustrie und große Elektrizitätsunternehmen eine wichtige Rolle spielen. Es besteht dann eine große Wahrscheinlichkeit, dass die Produktion der synthetischen Kraftstoffe (wie heute bei den Mineralölen) in einer Hand liegt (hohe vertikale Integration). Dessen ungeachtet ist auf der Antriebsseite (Verbrennungsantrieb) weiterhin eine niedrige vertikale Integration zu erwarten.

198 H2 Mobility (2019a).

Wie ist der Grad der vertikalen Integration der Wertschöpfungskette (Fahrzeuge und Energiebereitstellung)? TO-2a



Eigene Darstellung

195 Deloitte (2017).

196 Bloomberg (2018).

197 Frost & Sullivan (2018).

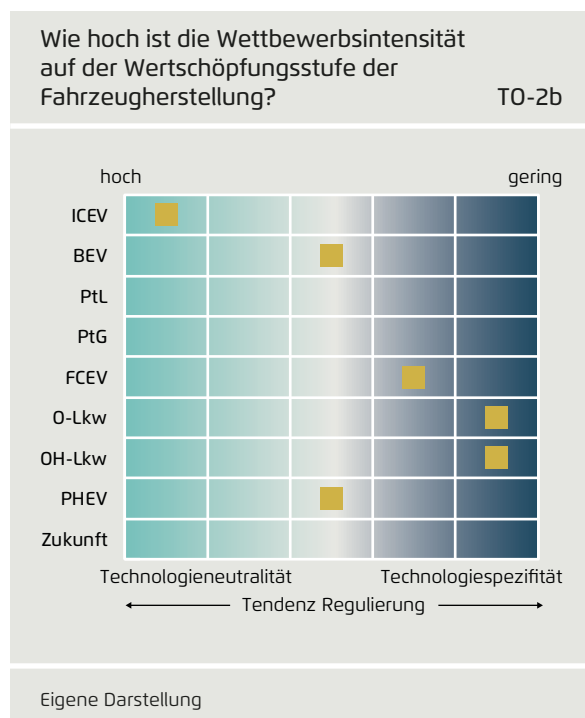
Wettbewerbsintensität (TO-2b und TO-2c)

Hersteller von Fahrzeugen (TO-2b): Die höchste Wettbewerbsintensität besteht zweifellos auf dem Massenmarkt der Verbrennerfahrzeuge. Auf dem deutschen Markt wurden im Jahr 2018 von 30 verschiedenen Fahrzeugmarken jeweils mehr als 10.000 Fahrzeuge verkauft.¹⁹⁹ Mehr als 800 Fahrzeugmodelle erreichten dabei eine verkaufte Stückzahl von über 1.000 Einheiten.

Der Markt der PHEV und BEV hat sich in den letzten Jahren weiterentwickelt. Insgesamt wurden im Jahr 2019 von 14 Marken batterieelektrische Fahrzeuge zugelassen. Dabei erreichten jedoch nur 13 Modelle mehr als 1.000 verkaufte Einheiten. Die angebotenen Fahrzeuge sind in der Regel nur sehr eingeschränkt konfigurierbar, haben oftmals lange Lieferzeiten und es werden im Gegensatz zu Verbrennungsfahrzeugen kaum Nachlässe auf den Listenpreis gewährt. Der Markt ist somit insgesamt klar durch die Angebotsseite bestimmt. Für die Hersteller ist der Verkauf von BEV und PHEV primär deshalb wichtig, um die EU-CO₂-Flottenzielwerte zu erreichen.²⁰⁰

199 KBA (2018).

200 Plötz et al. (2019).



Brennstoffzellenfahrzeuge werden in Deutschland bisher nur von zwei Herstellern (Hyundai, Toyota) und in kleiner Stückzahl auf den Markt gebracht und sind noch stark in der Entwicklungs- beziehungsweise Pilotphase. Dementsprechend ist hier der Wettbewerb noch gering.

Oberleitungs-Lkw werden zurzeit nur auf wenigen Pilotstrecken getestet. Die Fahrzeuge sind Einzelanfertigungen, von einem Wettbewerb kann demzufolge noch nicht gesprochen werden.

Energiebereitstellung (TO-2c): Auf Grund des liberalisierten Strommarktes ist hier für Elektrofahrzeuge die Wettbewerbsintensität sehr hoch, zumindest im Bereich des privaten Ladens. Bei öffentlichen Ladepunkten ist bei der derzeit geringen Anzahl an Fahrzeugen noch kein kostendeckender Betrieb von Ladeinfrastruktur möglich. Die Wettbewerbssituation kann daher gegenwärtig noch nicht abschließend beurteilt werden.

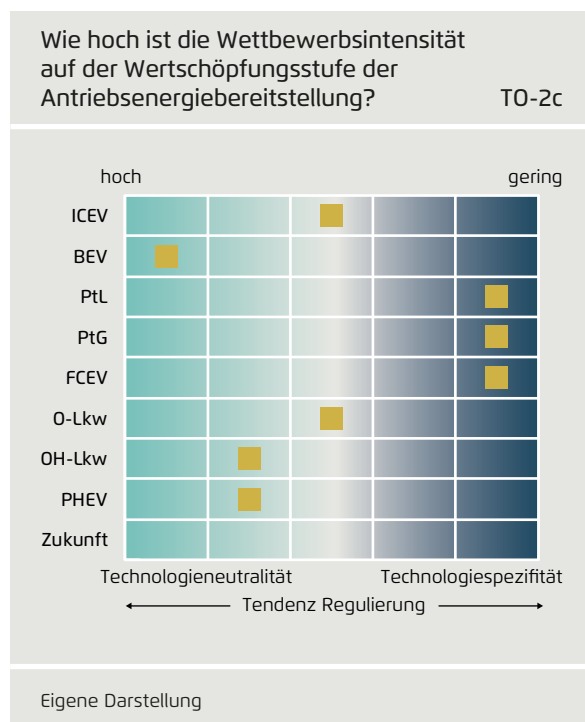
Bei Tankstellen für fossile Kraftstoffe bestehen Oligopolstrukturen mit großer Marktmacht einiger weniger Mineralölkonzerne, die über eigene Raffineriekapazitäten verfügen.²⁰¹ Die Einführung von PtX-Kraftstoffen könnte dazu führen, dass neue Akteure als Großhändleranbieter von Kraftstoffen neben die Raffinerien treten und somit Einfluss auf die Endverbraucherpreise nehmen. Aufgrund der absehbar hohen Gestehungskosten von PtX-Kraftstoffen dürften diese allerdings erst über eine Beimischungsquote oder eine wie auch immer geartete Deckelung der CO₂-Emissionen aus dem Kraftstofflebenszyklus (zum Beispiel über einen Emissionshandel oder eine Treibhausgasminderungsquote²⁰²) eine Rolle spielen.

Bei Wasserstoff sind erst wenige Fahrzeuge auf dem Markt, die Infrastruktur ist somit noch weit von einer Auslastung entfernt und dementsprechend gering ist der Wettbewerb. Gegenwärtig geht es hier primär um den Aufbau einer Basisinfrastruktur, die derzeit zur Hälfte staatlich gefördert wird.²⁰³ Diese wird vor allem durch das Industriekonsortium H2 Mobility betrieben. Bei der Infrastruktur für Oberleitungs-Lkw geht es derzeit um den Aufbau von Pilotprojekten.

201 Dewenter et al. (2012).

202 Fehrenbach; Jöhrens (2017).

203 BMVI (2017).



Budgetrestriktionen (TO-3)

Die Analyse nutzerseitiger Budgetrestriktionen zielt darauf, mögliche Barrieren bei der Anschaffung der Technologieoptionen infolge von Erschwinglichkeitsproblemen zu identifizieren. Hierzu wird untersucht, wie stark sich die Total Cost of Ownership (TO-3a), die Anschaffungspreise (TO-3b) und die Einstiegspreise (TO-3c) gegenüber der Referenz eines fossil betriebenen Verbrennungsfahrzeugs unterscheiden. Höhere Anschaffungs- und Einstiegspreise für emissionsarme Technologieoptionen in Verbindung mit nutzerseitigen Budgetgrenzen können zur Folge haben, dass die Anschaffungsentscheidung (trotz gleicher oder geringerer Kosten über den Lebenszyklus) zugunsten der konventionellen Verbrennertechnologie ausfällt. Je größer die Bedeutung von Budgetrestriktionen ist, desto stärker fällt die Störung der Koordination des Marktes aus.

Km-Gesamtkosten (TO-3a)

Einige Elektroautos sind heute schon günstiger als vergleichbare Pkw mit Verbrenner, andere teurer. Dies zeigt die Vollkostenberechnung des ADAC,²⁰⁴ in der neben dem Verkaufspreis und Energie- und Wartungskosten auch der Wertverlust und weitere Kosten berücksichtigt

204 ADAC (2018b).

werden. Auch PHEV liegen in etwa auf dem Niveau von Verbrennern,²⁰⁵ wobei in allen Fällen der Fahrzeugeinsatz (Tageskilometer-Leistung, Geschwindigkeiten etc.) der Nutzer und die Modell- beziehungsweise Preispolitik der Hersteller eine große Rolle spielen kann. Wir gehen hier im Mittel von vergleichbaren Kosten für Elektro-, PHEV und Verbrenner-Pkw aus.²⁰⁶ Brennstoffzellen-Pkw sind in den Anschaffungskosten heute noch deutlich teurer als Verbrenner-Pkw. Der ADAC macht für die beiden auf dem Markt befindlichen Brennstoffzellen-Pkw keine Angaben zu den Gesamtkosten, da unter anderem keine Aussage über den Restwert getroffen werden kann.²⁰⁷ Fest steht allerdings, dass die Energiekosten derzeit für Brennstoffzellenfahrzeuge (etwa 9,50 €/100 km²⁰⁸) deutlich höher liegen als für Batteriefahrzeuge (etwa 5–6 €/100 km²⁰⁹). Die Vollkosten (TCO) für die untersuchten Alternativtech-

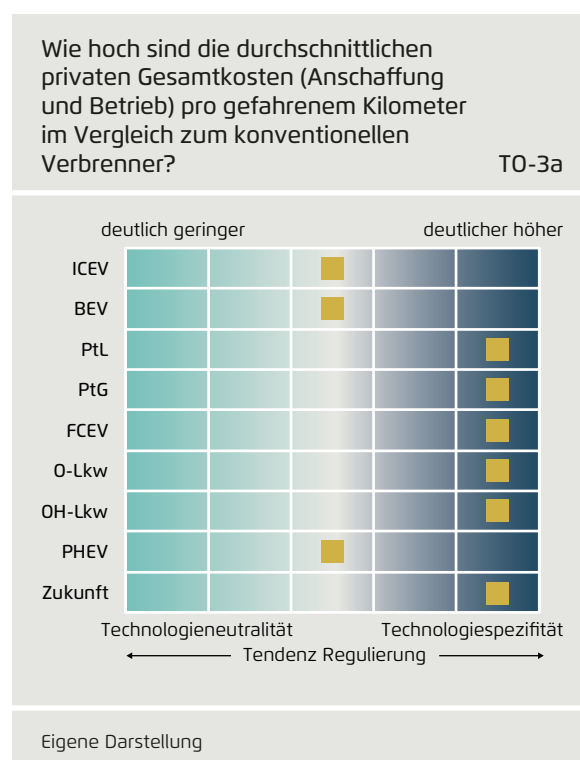
205 ADAC (2019d).

206 Öko-Institut (2019).

207 ADAC (2018c); ADAC (2017).

208 Bei einem angenommenen Verbrauch von 1 kg/100 km und dem derzeitigen Standard-Abgabepreis an deutschen H2-Tankstellen (H2 Mobility (2019b)).

209 Bei einem angenommenen Verbrauch von 20 kWh/100 km und einem üblichen Haushaltsstrompreis von 25–30 Eurocent/kWh.



nologien bei Lkw liegen heute deutlich höher als bei Diesel. Prognosen für die zukünftigen TCO bei Lkw für verschiedene Technologien (FCEV, BEV, OH, PtL), jeweils unter Annahme eines Massenmarktes für die jeweilige Technologie, zeigen jedoch ein differenziertes Bild.²¹⁰ Die Fahrzeugkosten verlieren hier gegenüber den Energiekosten an Bedeutung, weshalb ERS-Fahrzeuge aufgrund der hohen Systemeffizienz gegenüber Brennstoffzellen-Lkw und mit PtL betriebenen Lkw deutlich günstiger abschneiden.

Anschaffungspreisdifferenz (TO-3b)

Während die Anschaffungskosten von PHEV in vielen Fällen nur geringfügig über denen entsprechender ICEV liegen, sind die Anschaffungskosten von Batterie-Pkw heute noch deutlich höher (etwa 9.000 bis 14.000 € Preisdifferenz zwischen BEV-Pkw und vergleichbarem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor²¹¹). Die Preisdifferenz geht hauptsächlich auf die Batterie zurück, hier werden für die Zukunft weitere Kostendegressionen erwartet.²¹² Bei den

FCEV-Pkw werden auf dem deutschen Markt derzeit lediglich zwei Modelle zu hohen Preisen verkauft.²¹³

Für den Einsatz von PtG und PtL können konventionelle Verbrennerfahrzeuge verwendet werden (Drop-In). Entsprechend erhöhen sich die Anschaffungskosten der Fahrzeuge gegenüber dem konventionellen Verbrenner nicht.

Im Bereich der schweren Lkw sind OH-Lkw und Brennstoffzellenfahrzeuge noch im Pilotstadium. Beim OH-Lkw entstehen zusätzliche Kosten für den Pantografen und seine Integration ins Antriebssystem.²¹⁴ Dementsprechend liegen die Anschaffungskosten dieser Fahrzeuge heute um einiges höher als beim konventionellen Verbrenner.

Einstiegspreisdifferenz (TO-3c)

Der Einstiegspreis des jeweils günstigsten Fahrzeugs unterscheidet sich erheblich zwischen den untersuchten Technologien bei Pkw. Der ADAC-Autokostenrechner gibt folgende Listenpreise an:

210 Plötz et al. (2018).

211 Vergleich der Listenpreise von Fahrzeugen unterschiedlicher Antriebstechnologie.

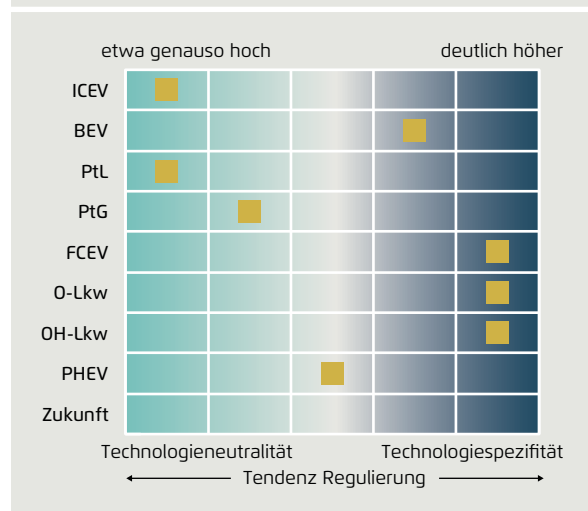
212 Thielmann et al. (2017).

213 H2 Mobility (2019c): Toyota Mirai: 78.600 €; Hyundai Nexo: 69.000 €.

214 Kühnel et al. (2018): 2015 ca. 56.000 €; langfristig ca. 10.000–18.000 €.

Wie viel höher sind die gegenwärtigen Anschaffungskosten im Vergleich zu Fahrzeugen mit konventionellem Antrieb/Kraftstoff?

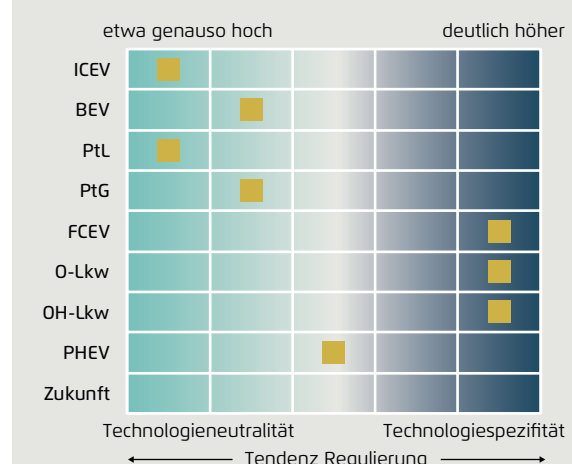
TO-3b



Eigene Darstellung

Wie hoch sind die Kosten des günstigsten angebotenen Fahrzeugs der jeweiligen Technologie relativ zum ICEV Otto?

TO-3c



Eigene Darstellung

- ICEV Otto: 6.990 € (Dacia Sandero)
- ICEV Diesel: 12.100 € (Dacia Dokker Blue)
- ICEV CNG: 12.720 € (Skoda Citigo 1.0)
- BEV: 15.900 €: e.Go Life 20
- PHEV: 29.900 € (Hyundai Ioniq)
- FCEV: 69.000 € (Hyundai Nexö).²¹⁵

Damit sind ICEV Otto am günstigsten. Leicht höher liegt der Preis für Diesel- und CNG- (entsprechend PtG-) Fahrzeuge. Der günstigste BEV (e.Go Life 20) wird der Kategorie der Mikrowagen zugeordnet, sein Listenpreis beträgt 15.900 €.

Der Anschaffungspreis für den günstigsten PHEV-Pkw liegt damit um einiges höher als für Otto-Pkw. Hier handelt es sich um ein Fahrzeug der unteren Mittelklasse („Golf-Klasse“), während günstige Otto-Pkw der Kleinwagenklasse zugeordnet werden.

4.6.2.2 Ergebnisse in der Unterkategorie „Pfadabhängigkeiten“

In der Unterkategorie „Pfadabhängigkeiten“ (TO-4 bis TO-6) werden Informationen zur komplementären Infrastruktur, zur Spezifität von Investitionen und zu Lern- und Skaleneffekten bei der Produktion aufbereitet. Grundsätzlich gilt hier, dass mit zunehmender Bedeutung von Pfadabhängigkeiten die Indikation für den Einsatz technologiespezifischer Regulierungsinstrumente steigt, um die Pfadabhängigkeiten aufzubrechen.

Komplementäre Infrastruktur (TO-4)

Die Analyse komplementärer Infrastruktur zielt darauf ab, mögliche Pfadabhängigkeiten infolge der Notwendigkeit des Aufbaus komplementärer Infrastruktur für die Technologieoptionen auszumachen. Hierzu wird untersucht, ob komplementäre Infrastruktur für die Nutzung der jeweiligen Technologieoption notwendig ist (TO-4a), ob die Mitnutzung bestehender Infrastruktur möglich ist (TO-4b), ob die Infrastrukturinvestitionen spezifisch sind (TO-4c), ob Netzwerk- (TO-4d) und/oder Verbundeffekte (TO-4e) mit der Infrastruktur verbunden sind sowie ob eine staatliche Bereitstellung der Infrastruktur aus rechtlichen oder anderen Gründen zwingend notwendig ist (TO-4f). Wenn der Aufbau einer neuen Infrastruktur notwendig ist und ökonomische (spezifische Investitionen, Netzwerkeffekte) oder rechtliche Hürden

bei ihrem Aufbau bestehen, erschwert dies eine Abkehr von der bestehenden Technologie mit einer etablierten komplementären Infrastruktur.

Notwendigkeit von komplementärer Infrastruktur (TO-4a)

Alle betrachteten Technologien benötigen eine komplementäre Infrastruktur zur Energieversorgung. Mit Verbrennungsmotoren betriebene Fahrzeuge werden von Tankstellen mit Diesel- und Ottokraftstoffen beziehungsweise CNG/LPG versorgt. Über diese Infrastruktur können auch Kraftstoffe verteilt werden, die eine gewisse Beimischung an PtL-Benzin oder -Diesel beziehungsweise PtG-Methan enthalten, oder auch reine PtX-Kraftstoffe.

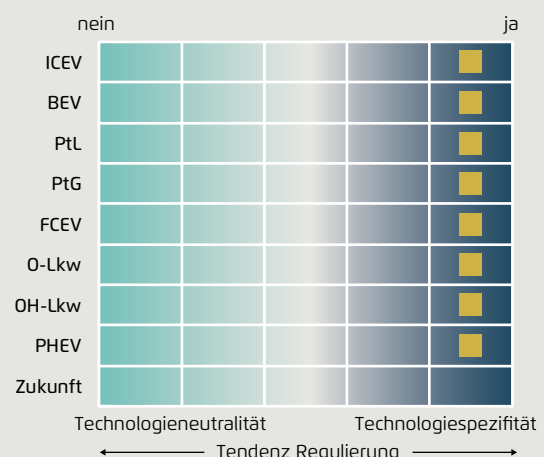
Batterieelektrische Pkw benötigen Ladeinfrastruktur. Aktuell wird davon ausgegangen, dass diese Fahrzeuge in vielen Fällen vorwiegend zu Hause²¹⁶ sowie am Arbeitsplatz²¹⁷ geladen werden. Öffentlichen Ladestationen kommt eine ergänzende Rolle zur Erweiterung der Mobi-

²¹⁶ „Eine repräsentative Umfrage von prolytics und BDEW zeigt: 65 Prozent der Deutschen würden ihr E-Auto am liebsten zuhause laden“ (BDEW (2019a)).

²¹⁷ NPE (2019).

Ist komplementäre Infrastruktur für die Nutzung der Technologie notwendig?

TO-4a



Eigene Darstellung

²¹⁵ H2 Mobility (2019c).

litäts Optionen zu.²¹⁸ Für Nutzer ohne elektrifizierbaren eigenen Parkplatz ist öffentliche Ladeinfrastruktur darüber hinaus Grundvoraussetzung für die Nutzung eines Batteriefahrzeugs. Brennstoffzellenfahrzeuge werden an Wasserstofftankstellen (üblicherweise im öffentlichen Raum) betankt. Oberleitungs-Lkw benötigen für den elektrischen Betrieb eine Oberleitungsinfrastruktur entlang häufig befahrener Routen.

Neben der Energieversorgungsinfrastruktur sind weitere Services (zum Beispiel Reparaturservice) und entsprechende Infrastruktur zum Betrieb der jeweiligen Technologie notwendig, die in der Regel durch die Fahrzeughersteller beziehungsweise ihre Vertragshändler/-werkstätten betrieben werden. Recycling und Entsorgung beziehungsweise Weiternutzung spielt für Batterien (BEV) eine große Rolle und muss von den Herstellern entsprechend berücksichtigt werden.

Nutzbarkeit bestehender Infrastruktur (TO-4b)

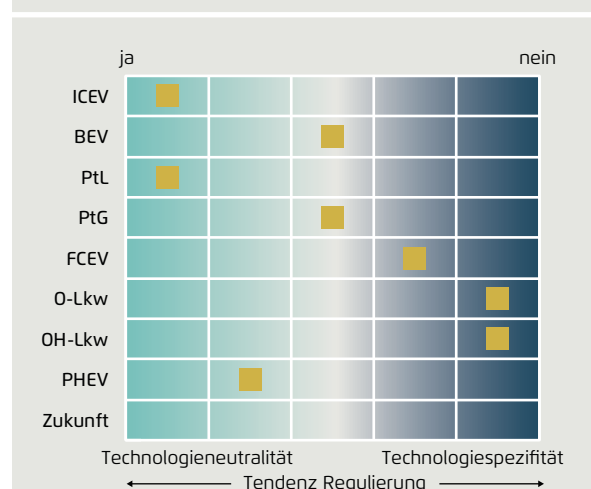
Der Ausbau- und Nutzungsstand der Energieversorgungsinfrastruktur differiert stark zwischen den betrachteten Technologien. Den besten Stand hat die Infrastruktur für Verbrennerfahrzeuge. Diesel- und Otto-Kraftstoffe werden über ein engmaschiges Tankstellennetz (14.118 Tankstellen im Jahr 2018²¹⁹) angeboten. Diese Tankstellen könnten neben der Versorgung mit fossilem Diesel beziehungsweise Benzin auch für die Versorgung von Verbrenner-Pkw mit PtL genutzt werden („Drop in“).

Etwa 900 Tankstellen bieten in Deutschland CNG an.²²⁰ Autogas kann an ca. 7.100 Tankstellen bundesweit getankt werden.²²¹ Prinzipiell kann diese Infrastruktur auch für die Versorgung der Kraftfahrzeuge mit PtG genutzt werden. Obwohl die Anzahl der Tankstellen bei CNG recht hoch ist, scheint eine nicht flächendeckende Abdeckung (neben der geringeren Modellvielfalt) bisher in Deutschland ein Argument gegen die Kaufentscheidung von CNG-Fahrzeugen gewesen zu sein. Bei Strom kann bei der Ladung zu Hause (soweit kein Laternenparker) und beim Arbeitgeber prinzipiell auf das bestehende Stromnetz zurückgegriffen werden. Zur

schnelleren Ladung der Fahrzeuge und zur Gewährleistung von Sicherheitsanforderungen sind dabei Ladestationen mit höherer Leistung (zum Beispiel Wallboxen) mit entsprechenden Kosten notwendig. Im Bereich gemieteter Immobilien sowie bei Mehrparteienhäusern bestehen derzeit noch signifikante Hürden für die Genehmigung dieser Infrastruktur durch Vermieter beziehungsweise Eigentümergemeinschaften. Weiterhin muss mit verstärkter Nutzung von Elektrofahrzeugen das Verteilnetz zum Teil ausgebaut und Ladesäulen im öffentlichen oder halb-öffentlichen Bereich (zum Beispiel an Supermärkten und anderen hochfrequentierten Zielen) errichtet werden. Aktuell (Ende 2018) gibt es in Deutschland 16.100 öffentliche und teilöffentliche Ladepunkte (davon 12 Prozent Schnelllader).²²² Der Ausbau öffentlicher Infrastruktur wird insbesondere auf den wichtigsten Autobahnrouen in Europa vorangetrieben (zum Beispiel von Allego, Tesla, Ionity) sowohl als AC- als auch als DC-Ladestationen mit teilweise bis zu 350 kW Ladeleistung.

222 BDEW (2019b).

Kann (mindestens teilweise) auf eine bestehende komplementäre Infrastruktur zur Energieversorgung der Fahrzeuge zurückgegriffen werden? TO-4b



Eigene Darstellung

218 Gizzi et al. (2018).

219 ADAC (2019b).

220 ADAC (2019c).

221 Deutscher Verband Flüssiggas e. V. (2019).

In Deutschland stehen 76 Wasserstofftankstellen (700 bar)²²³ zur Verfügung (in Europa 102), bis Anfang 2020 sollen es 100 öffentliche Tankstellen für Pkw sein. Für Baden-Württemberg wurde bis zum Jahr 2025 ein Bedarf zwischen 70 und 200 Tankstellen geschätzt.²²⁴

Die Stromzuführung für Lkw während der Fahrt über Oberleitungen befindet sich zurzeit noch in der Pilotphase. In Deutschland wird die Technologie im Rahmen von drei Feldversuchen auf der A5 (Elisa; 10 km), der A1 (FESH; 10 km) und der B462 (eWayBW; 6 km) getestet.²²⁵ Diese Pilotstrecken könnten prinzipiell bei einem weiten Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur genutzt werden. Nach aktuellen Untersuchungen kann bei Aufbau eines 2000–2500 km langen Oberleitungsnetzes etwa ein Viertel aller Nutzfahrzeuge über 12 Tonnen wirtschaftlich als Oberleitungs-Lkw betrieben werden.²²⁶ Bei einem Netzausbau von etwa 4000 km steigt dieser Anteil auf ca. 80 Prozent der Fahrzeuge.

Weitere Infrastruktur (Werkstätten, Rettungsdienste etc.) ist für heutige Fahrzeuge mit Otto- und Dieselmotor vorhanden. Rettungsdienste und Feuerwehren müssen zum Teil zusätzliche Geräte anschaffen und Fortbildungen durchführen, um bei Unfällen mit Elektro- oder Brennstoffzellenfahrzeugen angemessen reagieren zu können. In den letzten Jahren wurden zudem für die Wartung und Reparatur von Elektro-Pkw große Anstrengungen unternommen, um sowohl Ausbildung als auch Werkstätten entsprechend anzupassen. Sowohl bei Oberleitungs-Lkw als auch bei Brennstoffzellenfahrzeugen, die noch in der Pilotphase beziehungsweise mit nur wenigen Fahrzeugen auf dem Markt sind, müssen hier noch erhebliche Anstrengungen unternommen werden, wenn diese Technologien weiter ausgebaut werden sollten.

Investitionsspezifität der Infrastruktur (TO-4c)

Wasserstofftankstellen und Schnelllader können prinzipiell die Standorte heutiger Tankstelleninfrastruktur nutzen. Annahme ist hier, dass diese Infrastruktur ähnlich wie derzeitige Kraftstoffinfrastruktur genutzt und dem Nutzer nur eine geringe Umstellung abverlangt wird. Tankstellenbetreiber haben bereits Schnelllader

(zum Beispiel Shell, HEM, Orlen, Tank&Rast) als auch Wasserstofftankstellen (zum Beispiel Shell, Total, OMV) eingerichtet und wollen diese künftig weiter ausbauen. Daneben werden aber sowohl Schnelllader als auch Wasserstofftankstellen unabhängig von der bisherigen Tankstelleninfrastruktur betrieben.²²⁷

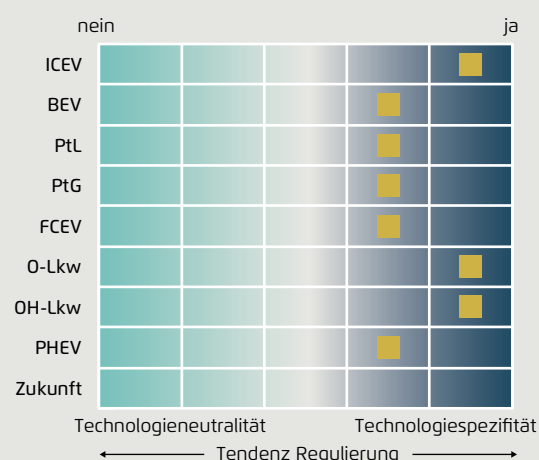
Für jede der betrachteten Technologien (Verbrenner, Brennstoffzelle, Elektro-Kfz) wird eine mehr oder weniger spezifische Energieversorgungsinfrastruktur benötigt. Alle neuen Technologien können dazu einen Beitrag zur Integration erneuerbarer Energien leisten (Stabilisierung der Netze, Dunkelflaute etc.). Unter Berücksichtigung dieser Aspekte wird die Investitionsspezifität der komplementären Infrastruktur als etwas geringer als bei ICEV eingeordnet. Eine Differenzierung nach den einzelnen Technologien für Pkw wird dabei nicht vorgenommen, bei Oberleitungen wird von einer hohen Spezifität ausgegangen.

Ladestationen (privat, Arbeitgeber, öffentlich) für Elektro-Pkw können von BEV und PHEV genutzt werden. Die genutzten Steckertypen werden weiter vereinheitlicht,

²²⁷ Siehe zum Beispiel Tesla Deutschland (2019); GoingElectric (2019).

Sind die Investitionen in neu zu errichtende komplementäre Infrastruktur spezifisch?

TO-4c



Eigene Darstellung

²²³ H2 Mobility (2019d), Stand 15.10.2019.

²²⁴ E-mobil BW (2013).

²²⁵ Electric Roads (2019).

²²⁶ ISI (2017).

was nicht zuletzt auf eine gesetzliche Festlegung (AFID²²⁸/LSV²²⁹) auf den Typ-2- beziehungsweise CCS-Standart zurückgeht. Auch die Abrechnungssysteme sollen in Zukunft immer stärker vereinheitlicht werden (siehe auch NPE, AFID etc.). Zudem ist es sowohl für ERS als auch für Batteriefahrzeuge (und in gewissem Umfang auch für die Brennstoffzellentechnologie) notwendig, elektrische Anschlusskapazität an wichtigen Straßen zu installieren beziehungsweise signifikant zu erweitern. Diese Investitionen in die vorgelagerte Infrastruktur sind somit nicht spezifisch für eine dieser Technologien.

Oberleitungen für Lkw, die primär für Bundesautobahnen angedacht sind, stellen zunächst einmal eine spezifische Lösung mit dem Ziel dar, Lkw während der Fahrt mit Strom zu versorgen. Bei anderen ERS-Varianten (Übertragung mittels Stromschiene oder induktiv) könnten grundsätzlich auch Pkw von der Infrastruktur profitieren. Allerdings gibt es auch bezüglich Oberleitungen erste Untersuchungen zur „rollenden Elektrotankstelle“ im Rahmen des Projekts eWayBW,²³⁰ bei denen die Machbarkeit der automatisierten Aufladung eines Pkws an einem an der Oberleitung fahrenden Lkw getestet wird, wodurch Pkw ebenfalls von Oberleitungen profitieren könnten.

Netzwerkeffekte Infrastruktur (TO-4d)

Netzwerkeffekte – also der Anstieg des spezifischen Nutzens der einzelnen Infrastruktureinheit und damit auch der möglichen spezifischen Erlöse je Einheit mit zunehmender Verbreitung der Technologie – bestehen bei allen Energieinfrastrukturen der untersuchten Technologien in hohem Maße. Denn der Nutzen des Basisprodukts in Form des Fahrzeugs hängt (auch) von der Existenz und Anzahl von Energieinfrastruktureinheiten ab. Mit steigenden Fahrzeugzahlen einer Technologieoption steigt wiederum der Nutzen der Energieinfrastruktur. Hier bestehen also starke Wechselwirkungen zwischen den komplementären Produkten/Dienstleistungen. Wie sich

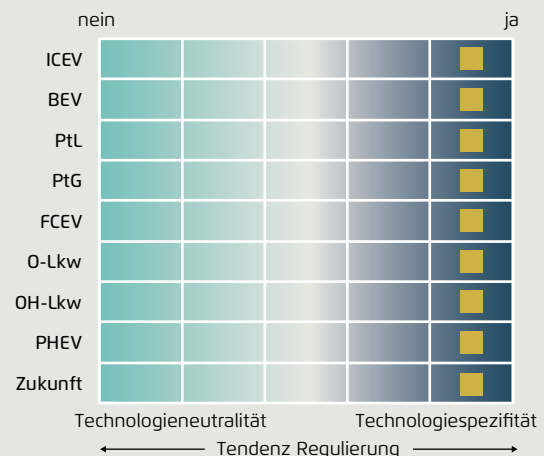
228 Richtlinie 2014/94/EU über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (Alternative Fuels Infrastructure Directive, AFID).

229 Verordnung über technische Mindestanforderungen an den sicheren und interoperablen Aufbau und Betrieb von öffentlich zugänglichen Ladepunkten für Elektromobile (Ladesäulenverordnung – LSV).

230 EwayBW (2019).

Bestehen angebotsseitige Netzwerkeffekte bei der komplementären Infrastruktur?

TO-4d



Eigene Darstellung

der konkrete Erlös/Gewinn in einem wachsenden Markt darstellen wird, hängt allerdings unter anderem auch stark von der jeweiligen Konkurrenzsituation und den entsprechenden Strukturen (zum Beispiel Oligopole) ab.

Mit höherer Anzahl von Betankungsvorgängen bei Wasserstoff und Ladevorgängen bei Schnellladern erhöht sich beispielweise der direkte Nutzen (höhere Einnahmen) als auch der indirekte Nutzen (bessere Abschreibung der Investitionen) für die Betreiber der Energieinfrastruktur. Auch Oberleitungsinfrastruktur kann erst bei einer höheren Durchdringung der Lkw-Flotte relevante Einnahmen generieren.²³¹

Verbundeffekte Infrastruktur (TO-4e)

Verbundeffekte werden aktuell bei allen Technologien außer der Oberleitungsinfrastruktur erwartet. Ladesäulen können als Werbeträger genutzt werden, Parken und Laden kann kombiniert angeboten werden und auch Einzelhandelsketten können Ladesäulen zur Kundenbindung nutzen (zum Beispiel Aldi, IKEA, Lidl).²³² Wie bei heutigen Tankstellen können auch bei Wasserstofftankstellen und Schnellladern entsprechende Geschäftsideen (zum

231 ISI (2017).

232 Autobild (2019).

Beispiel Tankstellen-Shops, Autowäsche etc.) entwickelt werden. Auch können Verbundeffekte für Netzbetreiber durch die kostengünstige Errichtung von Ladesäulen auf dem eigenen Gelände und die Verknüpfung mit weiteren Services entstehen. Des Weiteren wird versucht, die gegenüber herkömmlichem Tanken etwas erhöhte Verweildauer von Nutzern an der Schnellladeinfrastruktur für bestimmte Geschäftsmodelle nutzbar zu machen.

Langfristig können intelligente Ladestationen und Elektrofahrzeuge auch zur Stabilisierung der Stromversorgungsnetze eingesetzt werden,²³³ was einen Beitrag zur Energiewende ermöglichen würde. Die gleiche Erwartung wird mit dem Aufbau der Infrastruktur für Wasserstoff verbunden. Wasserstoff hat, wie auch PtL/PtG, das Potenzial, Risiken der sogenannten Dunkelflaute zu verringern. Aktuell wird 80 Prozent des an Wasserstofftankstellen verkauften Wasserstoffes aus fossilen Energieträgern (primär Erdgas) gewonnen.²³⁴ In Zukunft könnte Wasserstoff zum Beispiel in Kombination mit Blockheizkraftwerken zur Stabilisierung des Stromnetzes eingesetzt werden. Bei Oberleitungsinfrastruktur sind uns keine Verbundeffekte bekannt.

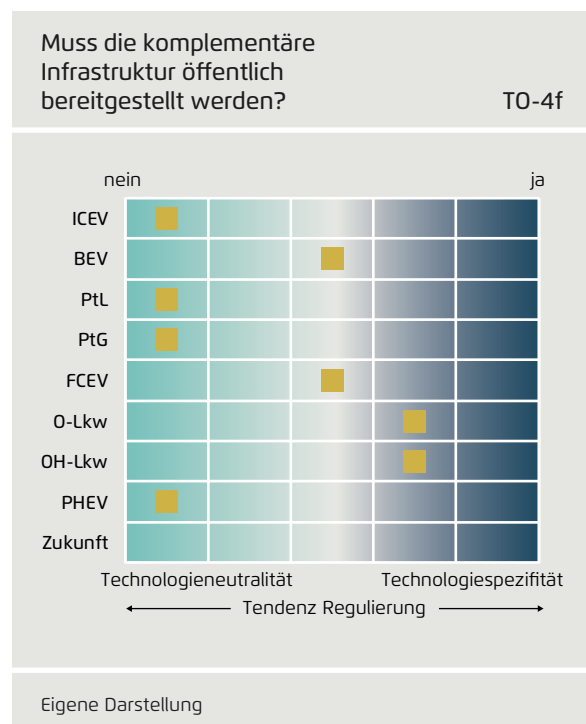
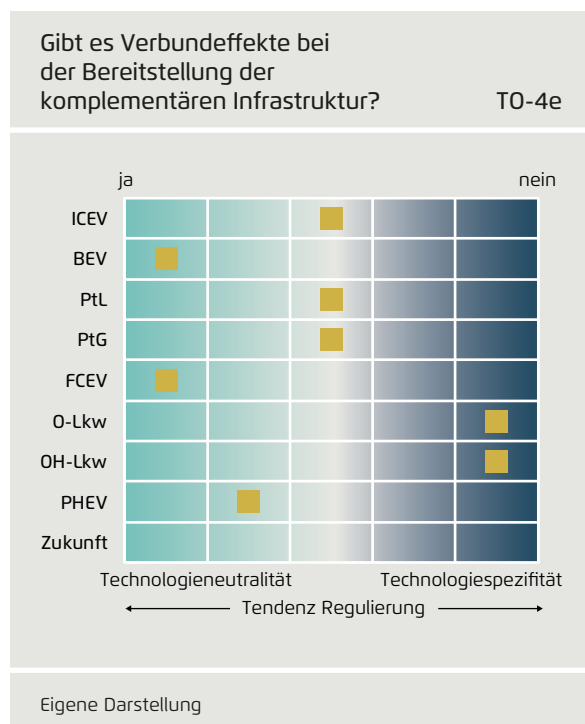
233 The Mobility House (2018).

234 MDR (2019).

Notwendigkeit öffentliche Bereitstellung der Infrastruktur (TO-4f)

Die Infrastruktur für Benzin, Diesel und auch CNG ist heutzutage flächendeckend in Deutschland und Europa vorhanden und muss demnach nicht zur Verfügung gestellt werden.

Elektroautos könnten zwar (bei Nicht-Laternenparkern) großenteils zu Hause oder am Arbeitsplatz geladen werden. Die Akzeptanz von Batteriefahrzeugen durch breitere Kundenschichten setzt aber die Verfügbarkeit von öffentlichen Ladepunkten voraus, um Mobilitätsoptionen zu erweitern. Momentan wird der Aufbau von Ladeinfrastruktur durch verschiedene Bundes- und Landesprogramme gefördert. In jedem Fall ist auch längerfristig zumindest eine öffentliche Koordination der Infrastruktur hilfreich, da die verfügbaren öffentlichen Flächen begrenzt sind und zudem im Falle der Oberleitungstechnologie ein natürliches Monopol unvermeidlich ist. Die Koordination kann beispielsweise über Ausschreibungsmodelle geschehen, die vielerorts praktiziert werden. Mit zunehmender Marktdurchdringung wird der Finanzbedarf dafür geringer und ab einem gewissen Punkt kann



der Staat dann durch die Vergabe von Konzessionen für die Platzierung von Ladeinfrastruktur Geld verdienen.²³⁵

Tankstelleninfrastruktur für Brennstoffzellenfahrzeuge (H_2) wird heute öffentlich stark gefördert. Auf längere Zeit sollten hier aber auch private Betreibermodelle möglich sein.

Der Aufbau einer Oberleitungsinfrastruktur stellt ein natürliches Monopol dar und erfordert hohe Investitionen in der Markteinführungsphase ohne kostendeckende Einnahmen. Hier ist voraussichtlich eine Bereitstellung der Infrastruktur unter Beteiligung der öffentlichen Hand notwendig.

Spezifität von Investitionen (TO-5)

Investitionsspezifität auf der Angebotsseite (TO-5a)

Die Analyse der Spezifität von Investitionen auf der Produzentenseite dient der Identifikation möglicher Investitionsbarrieren in die Anlagen zur Herstellung der emissionsarmen Fahrzeug- und Kraftstoffoptionen. Bei bestehender Unsicherheit über die zukünftige Entwicklung des Fahrzeugsektors im motorisierten Straßenverkehr und somit über den Absatz von Fahrzeugen bestimmt die Spezifität der Investitionen über die Höhe der versunkenen Kosten im Falle einer gescheiterten Investition. Je höher die Spezifität der Investitionen ausfällt, desto stärker hemmt dies die Investition in die entsprechende Technologie.

Für alle Antriebstechnologien sind gemeinsame modulare Produktionslinien für mehrere Antriebstypen grundsätzlich möglich.²³⁶ Bei der Einführung einer neuen Antriebstechnologie entstehen aber Kosten für zusätzliche technologische Ausstattung. Grundsätzlich besteht ein Zusatzaufwand für die Anpassung der Konstruktion des Grundfahrzeugs (Crash-Sicherheit, Raum für Energiespeicher und andere Komponenten, Elektrik etc.).

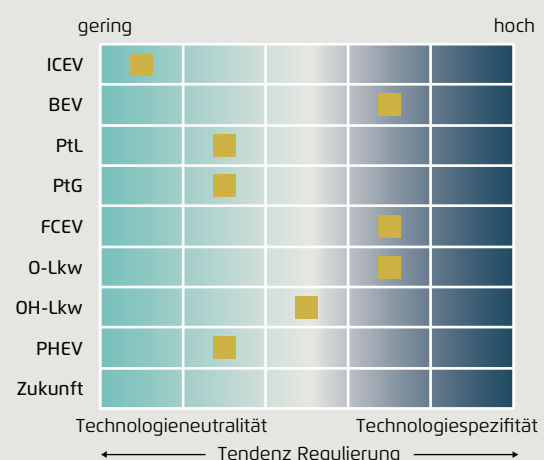
Zwischen den elektrischen Antriebstechnologien (BEV, PHEV, FCEV, O-Lkw) gibt es hinsichtlich zentraler Komponenten (insbesondere Elektromotoren und Batterien) Überschneidungen. Aus Herstellersicht stellt die Umstellung der herkömmlichen Produktion auf die Produktion

elektrischer Antriebsstränge somit die größte Herausforderung mit entsprechenden Investitionen dar. Darüber hinaus sind auch technologiespezifische Investitionen in die Entwicklung und Produktion einzelner Komponenten wie Batterien, Brennstoffzellen oder Stromabnehmer notwendig. Hier gibt es allerdings bereits eine Vielzahl spezialisierter Hersteller, sodass die Herausforderung für Automobilhersteller in der Regel darin besteht, strategische Kooperationen einzugehen (wie zum Beispiel bei VW und Northvolt geschehen) oder sich an entsprechenden Firmen zu beteiligen.

Bei der Energiebereitstellung unterscheidet sich die Technologiespezifität je nach Ort der Produktionskette (Wertschöpfungskette). Erneuerbarer Strom muss zum wesentlichen Teil die Grundlage für alle untersuchten im Verkehr eingesetzten Energieträger werden, wenn eine weitgehende Dekarbonisierung erreicht werden soll. Daher ist bei der Stromerzeugung die Investitionsspezifität gering. Erneuerbar erzeugter Wasserstoff wird zukünftig in vielen Wirtschaftsbereichen auch außerhalb des Verkehrssektors zum Einsatz kommen. Luft- und Seefahrt sind zur Dekarbonisierung absehbar auf CO_2 -neutrale Flüssigkraftstoffe angewiesen und stellen somit potenzielle Abnehmer für PtX-Kraftstoffe dar.

Wie ist der Grad der Spezifität von Investitionen auf der Angebotsseite?

TO-5a



Eigene Darstellung

²³⁵ In den Niederlanden ist dies zum Teil bereits erreicht, siehe van Beek (2019).

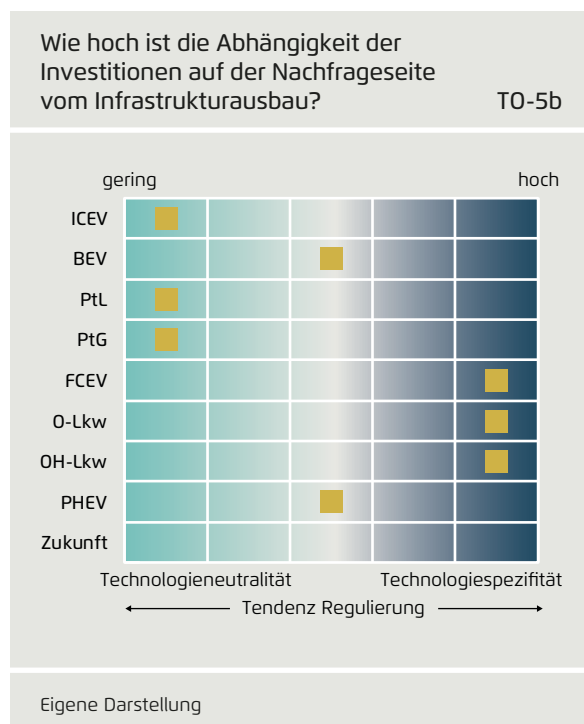
²³⁶ Volkswagen AG (2015).

Die Ertragsaussichten von Investitionen in die Entwicklung von Herstellungsanlagen für PtX-Kraftstoffe hängen daher nicht notwendigerweise von der Technologiewahl im Straßenverkehr ab.

Infrastrukturabhängigkeit der Investitionsentscheidung des Konsumenten (TO-5b)

Die Analyse der Spezifität von Investitionen auf der Nachfrageseite (in Form der Abhängigkeit vom Ausbau der komplementären Infrastruktur) dient der Identifikation möglicher Investitionsbarrieren in die Fahrzeuganschaffung. Bei bestehender Unsicherheit über die zukünftige Entwicklung des Fahrzeugsektors im motorisierten Straßenverkehr und somit über die Nutzbarkeit des anzuschaffenden Fahrzeugs, bestimmt die Spezifität der Investitionen über die Höhe der versunkenen Kosten im Falle einer gescheiterten Investition. Je höher die Spezifität der Investitionen ausfällt, desto stärker hemmt dies die Investition in die entsprechende Technologie.

Mit dem umfassend vorhandenen Tankstellennetz stellt die Energiebereitstellungsinfrastruktur für den Nachfrager der Technologie kein Hindernis dar. Batteriefahrzeuge können heute schon sowohl an vielen öffentlichen Ladestationen als auch zu Hause und am Arbeitsplatz geladen werden.



Dagegen stellt das weniger ausgebaute Wasserstofftankstellennetz noch ein größeres Hindernis dar. Bei Oberleitungen wird die Technologieentscheidung stark verknüpft sein mit dem Ausbau des Oberleitungsnetzes. Bisher bestehen in Deutschland nur drei kurze Pilotstrecken.

Lern- und Skaleneffekte (TO-6)

Die Analyse von Lern- und Skaleneffekten hat zum Ziel, mögliche Kostenvorteile der etablierten Technologie aufgrund noch ausstehender Lern- und Skaleneffekte bei den neuen Technologieoptionen zu identifizieren. Zu diesem Zwecke werden der Stand auf der Erfahrungskurve (TO-6a) sowie die Anwendungsreife mit Blick auf die dezentrale Technologiewahl (TO-6b) untersucht. Sowohl eine geringe Erfahrung bei der Herstellung der Technologie als auch eine geringe Anwendungsreife implizieren, dass Lern- und Skaleneffekte noch weitgehend ausstehen und aufgrund des daraus resultierenden Kostenvorteils der etablierten Technologie auch nicht (vollständig) erfolgen können. Je geringer der Stand auf der Erfahrungskurve und/oder die Anwendungsreife einer Technologieoption ist, desto stärker sind die Pfadabhängigkeiten zugunsten der etablierten Technologie.

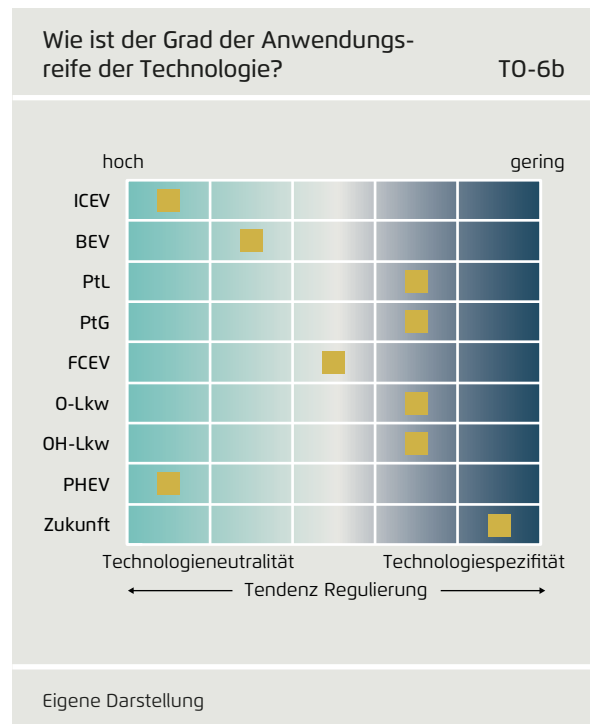
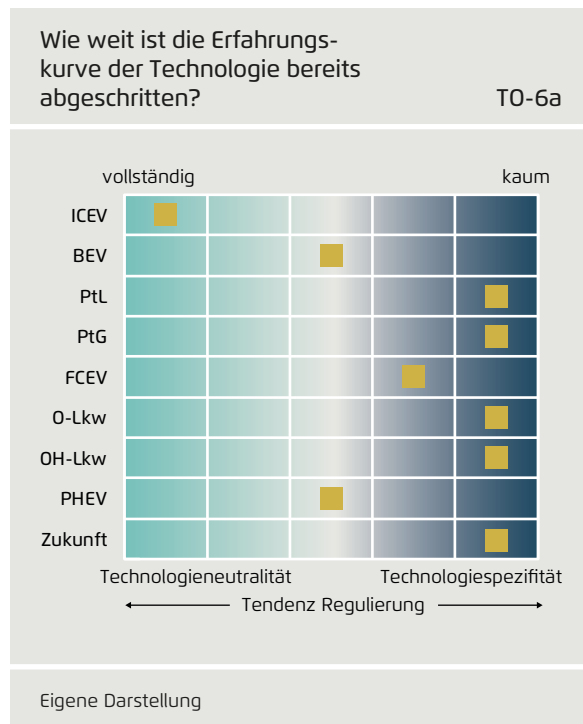
Erfahrungskurve (TO-6a)

Der Grad der Erfahrung mit einer Technologie hängt hauptsächlich davon ab, in welcher Größenordnung die Technologie bislang zum Einsatz kam. Verbrennungsmotoren stellen bislang den vorherrschenden Antrieb im Straßenverkehr dar, wodurch umfassende Erfahrungen vorliegen und das verbleibende Entwicklungspotenzial entsprechend begrenzt eingeschätzt wird. Auch für die Bereitstellung (Exploration, Förderung, Transport, Raffinerie) der Kraftstoffe aus fossilen Quellen (Erdöl) liegen umfangreiche Erfahrungen vor.

Der weltweite Bestand von Batteriefahrzeugen (Pkw und leichte Nutzfahrzeuge) hat mittlerweile 5,6 Millionen Fahrzeuge erreicht.²³⁷ Demgegenüber liegt der globale Bestand an Brennstoffzellenfahrzeugen unter 10.000 Einheiten;²³⁸ derzeit sind hier nur zwei Fahrzeugmodelle serienmäßig am Markt verfügbar. Bei Oberleitungs-Lkw gibt es derzeit lediglich Prototypen, die im Rahmen von Feldversuchen in Deutschland und Schweden getestet werden. PtX-Kraftstoffe

²³⁷ Heise online (2019).

²³⁸ Werwitzke (2018).



werden derzeit ebenfalls ausschließlich in Pilot- und Demonstrationsanlagen hergestellt. Es werden derzeit 0,5 Petajoule PtG in Form von Wasserstoff und Methan produziert, bis 2021 ist in Deutschland ein Aufbau von über 12 Megawatt PtG-Anlagenkapazität zu erwarten.²³⁹ Diese Technologien stehen somit noch am Anfang der Erfahrungskurve. Noch sind die weltweit identifizierten PtL-Anlagen im Pilotstadium. Einzig eine Methanol-Anlage (George Olah Methanol Plant) produziert mit über 5 Millionen Litern in größerem Maßstab.²⁴⁰

Anwendungsreife mit Blick auf die dezentrale Technologiewahl (TO-6b)

Der Grad der Anwendungsreife wurde unter W-3 bereits mit Blick auf die zentrale Verfügbarkeit von Informationen analysiert. Die Einordnung der Technologien hinsichtlich der Anwendungsreife fällt entsprechend analog aus. Für die Begründung sei daher auf die entsprechenden Ausführungen zur Technologieeigenschaft W-3 in Abschnitt 3.6.1 verwiesen. Die aus dem Grad der Anwendungsreife resultierende Indikation für die Technologiespezifität der Regulierung fällt mit Blick auf die dezentrale Technologiewahl jedoch andersherum aus

als bei der Betrachtung der zentralen Verfügbarkeit von Informationen. Denn eine geringere Anwendungsreife impliziert, dass Lern- und Skaleneffekte noch weitgehend ausstehen und aufgrund des daraus resultierenden Kostenvorteils der etablierten Technologie auch nicht (vollständig) erfolgen können, was Pfadabhängigkeiten zugunsten der etablierten Technologie des fossilen Verbrennungsmotors befördern kann.

4.6.2.3 Ergebnisse in der Unterkategorie „Politikversagen“

Die Unterkategorie „Politikversagen“ (TO-7) analysiert politische Eingriffe in das Preisgefüge mit dem Ziel, Einschränkungen der Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes durch staatliche Preisbestandteile zu identifizieren. Hierzu wird untersucht, ob und welche staatlich veranlassten Preisbestandteile es bei den Technologieoptionen gibt. Liegen im Entscheidungsfeld Preiseingriffe des Staates vor, schränken sie die Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes ein, sofern sie nicht der Erhöhung der Kostenwahrheit durch die Internalisierung externer Effekte dienen. Je größer die Bedeutung solcher Preisverzerrungen, desto geringer ist die Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes.

²³⁹ DBFZ (2019).

²⁴⁰ Heyne et al. (2019).

Bei allen untersuchten Technologien bestehen Steuern und Abgaben. Die Politik nimmt somit Einfluss auf die relativen Preise. Beispielsweise beträgt die BAFA-Förderung für BEV und FCEV 2.000 €, für ein PHEV 1.500 €. ²⁴¹ Weiterhin bestehen zum Beispiel eine Kfz-Steuerbefreiung sowie eine reduzierte Dienstwagenregelung für Elektro-Pkw (0,5 statt 1 Prozent des Listenpreises müssen monatlich versteuert werden). Auch sind Elektro-Lkw von der Lkw-Maut befreit.

Aus der Existenz staatlicher Preiseingriffe allein lässt sich noch kein Politikversagen in Form (ineffizient) verzerrter Preise ableiten. Daher ist zu prüfen, inwiefern ökonomisch gerechtfertigte Begründungen für die hoheitlichen Preiseingriffe angeführt werden.

Die Begründungen für den Preiseingriff sind je nach Instrument unterschiedlich. So wird der „Umweltbonus“ mit der Förderung des Absatzes neuer Elektrofahrzeuge zur Reduktion der Schadstoffbelastung begründet (Auslöser war hier die Luftqualitätsdebatte in Folge des VW-Dieselskandals). ²⁴² Die Befreiung elektrisch betriebener Fahrzeuge sowie mit Erdgas betriebener Nutzfahrzeuge

von der Lkw-Maut (bis 2021 verringerter Mautsatz) ²⁴³ soll einen Anreiz für den Einsatz alternativer Antriebe in diesem Bereich schaffen.

Die gesamten für Pkw zu zahlenden Steuern liegen in Deutschland im Vergleich zu den meisten anderen Ländern ²⁴⁴ niedrig – insbesondere für Fahrzeuge aus dem Luxussegment. Durch die Preisreduktionen bei Batterien in den vergangenen Jahren haben sich die Listenpreise von BEV und ICEV bereits angenähert, sodass die Förderungen für BEV und PHEV (0,5-Prozent-Dienstwagenregelung, Umweltbonus, reduzierte Kfz-Steuer) in vielen Fällen den Ausschlag zur Wirtschaftlichkeit geben können. Bei FCEV spielen die Förderungen – wegen der hohen Listenpreise der Fahrzeuge – eine geringere Rolle.

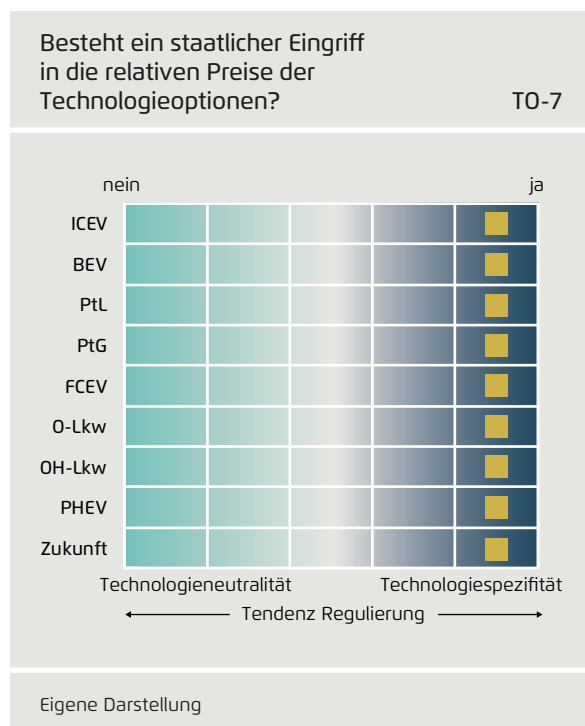
Im nationalen Lkw-Fernverkehr beträgt der Anteil der Maut an den Gesamtkosten etwa 9,6 Prozent. ²⁴⁵ Die Mautbefreiung von Elektro-Lkw stellt damit einen höchst relevanten Hebel dar.

4.6.3 Ergebnisse in der Kategorie „weitere Regulierungsziele neben der Dekarbonisierung“

In der Kategorie „weitere Regulierungsziele neben der Dekarbonisierung“ werden Informationen zur Verfolgung weiterer politischer Ziele neben der Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs aufbereitet. Verfolgt der Staat durch die technologiepolitischen Entscheidungen im motorisierten Straßenverkehr mehrere Ziele und werden die weiteren Ziele (neben dem Dekarbonisierungsziel) durch die verschiedenen Technologieoptionen in unterschiedlichem Maße erfüllt, kann dies eine Indikation für den Einsatz technologiespezifischer Regulierungsinstrumente begründen. Hierzu wird zum einen analysiert, ob und welche weiteren politischen Ziele mit dem Einsatz der Technologieoptionen verbunden sind (Z-1) und zum anderen wird untersucht, in welchem Maße die Technologieoptionen einen Beitrag zur Erreichung weiterer Politikziele leisten können (Z-2). Je höher der Beitrag zu weiteren Politikzielen ist, desto stärker spricht dies für den Einsatz technologiespezifischer Regulierung.

241 BMWi (2019).

242 BMWi (2019).



243 Maut-In (2019).

244 Runkel; Mahler (2018), S. 24.

245 BGL (2019).

Ziellpluralität (Z-1)

Die von politischen Akteuren in Bezug auf neue Antriebstechnologien artikulierten Ziele (neben der Reduktion der Treibhausgasemissionen) lassen sich grob in folgende Bereiche einteilen:

- **Verbraucherbezogen:** Zuverlässigkeit, Wirtschaftlichkeit, Bezahlbarkeit, Sozialverträglichkeit, Sicherstellung der Mobilität gewährleisten
- **Wirtschaftsbezogen:** Wettbewerbsfähigkeit, Wachstum, Schaffung von Arbeitsplätzen, Generierung neuer Marktchancen, Sicherstellung der Mobilität
- **Umweltbezogen:** Treibhausgasreduktion, Umweltverträglichkeit, Vermeidung von Konkurrenz zwischen Nahrungsmitteln und Kraftstoffen, Verbesserung der Luftqualität, Energieeffizienz
- **Systembezogen:** Sicherung der Energieversorgung, Unabhängigkeit von politisch instabilen Regionen.

Die Bundesregierung hat schon im Jahr 2009 mit dem „Nationalem Entwicklungsplan Elektromobilität“ unter anderem die Lärminderung und die Verbesserung der Wettbewerbs- beziehungsweise Innovationsfähigkeit Deutschlands als wichtiges Ziel für die Entwicklung der Elektromobilität genannt.²⁴⁶ Bei strombasierten Flüssigkraftstoffen wird eine Vielfalt von Zielen für den Einsatz genannt.²⁴⁷ Hier steht insbesondere die Erreichbarkeit der langfristigen Klimaziele für 2050 (mit Schwerpunkt auf den Sektoren Luft- und Schiffsverkehr) im Fokus der Begründung. Eine hohe Akzeptanz spielt für einige Akteure aufgrund der Drop-in-Fähigkeit der Kraftstoffe eine große Rolle. Auch die Langfristspeicherung von Energie mit chemischen Energieträgern (PtL, PtG, Wasserstoff²⁴⁸) in großem Maßstab zur Ausgleiche der Fluktuationen bei der Stromerzeugung mit erneuerbaren Energien wird als wichtig angesehen.

Einige der oben genannten Ziele sind prinzipiell unscharf (zum Beispiel Bezahlbarkeit, Generierung neuer Marktchancen, Wettbewerbsfähigkeit) und werden primär zur Ansprache bestimmter Zielgruppen im politischen Diskurs verwendet. Im Folgenden wird auf Ziele fokussiert, die im Kontext nachhaltiger Entwicklung eine wichtige Rolle spielen.

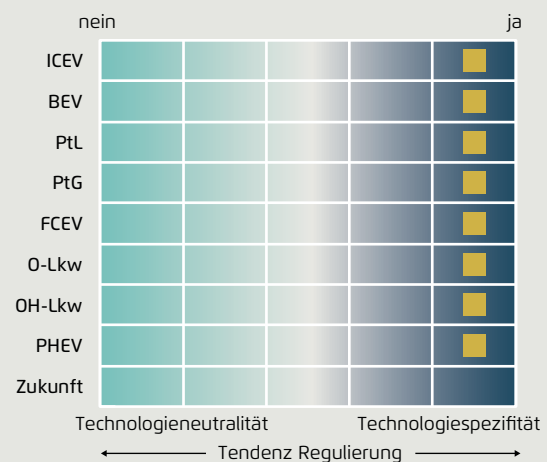
²⁴⁶ Bundesregierung (2009).

²⁴⁷ Kasten; Kühnel (2019).

²⁴⁸ e-mobil BW (2016); BMBF (2019).

Werden mit der Nutzung der Technologie weitere politische Ziele verfolgt?

Z-1



Eigene Darstellung

Dies sind

- Energieeffizienz²⁴⁹
- Materialeffizienz²⁵⁰
- Verbesserung der Luftqualität²⁵¹
- Transformation des Energiesystems.²⁵²

Zielbeitrag Energieeffizienz (Z-2a)

Der energetische Gesamtwirkungsgrad von mit PtX betriebenen Verbrennungsmotoren liegt bei 12–20 Prozent, bei Brennstoffzellenfahrzeugen bei 25–35 Prozent und bei batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen bei 70–80 Prozent.²⁵³ Oberleitungs-Lkw liegen – aufgrund der Direktnutzung des Stroms aus der Leitung, hier am oberen Ende.

Der Wirkungsgrad von PHEV als Hybridtechnologie von Verbrenner- und Elektrofahrzeugen liegt damit zwischen PtX und BEV. Konventionelle Fahrzeuge werden in diesem Vergleich nicht berücksichtigt, da der Vergleich sich alleine auf die Nutzung von (erneuerbarem) Strom bezieht.

²⁴⁹ United Nations (2017), siehe Ziel 7.

²⁵⁰ United Nations (2017), siehe Ziel 12.2.

²⁵¹ United Nations (2017), siehe Ziel 11.6.

²⁵² United Nations (2017), siehe Ziel 7.2.

²⁵³ SRU (2017).

Zielbeitrag Materialbedarf (Z-2b)

Gegenüber Verbrennungsantrieben ist bei Elektroantrieben der Bedarf an strategischen Rohstoffen für das Antriebssystem tendenziell höher. Hervorzuheben ist hier die Traktionsbatterie (vor allem Lithium, Nickel, Kobalt, Kupfer), die Brennstoffzelle (Platingruppenmetalle) sowie der Elektromotor (Kupfer, gegebenenfalls Seltene Erden). Der für die Technologien benötigte Rohstoffbedarf kann aus dem Bergbau (Primärgewinnung) und durch Recycling (Sekundärgewinnung) bereitgestellt werden. Über den konkreten Materialbedarf der einzelnen Technologien in der Zukunft gibt es in der Literatur eine große Spannbreite unterschiedlicher Angaben.²⁵⁴ Zudem kommt es sehr darauf an, welche Materialien und damit verbundene Umwelt- und Sozialauswirkungen betrachtet werden. Überdies treten Materialbedarfe nicht nur bei der Fahrzeugherstellung, sondern auch bei der Bereitstellung der Infrastruktur sowie der Energiegewinnung und -umwandlung auf.

Allgemein lässt sich allerdings Folgendes festhalten:

- Bei Langstrecken Anwendungen haben Brennstoffzellenantriebe beim Materialbedarf tendenziell Vorteile gegenüber Batterieantrieben.

254 SRU (2017); Kaindl (2018); DLR (2015).

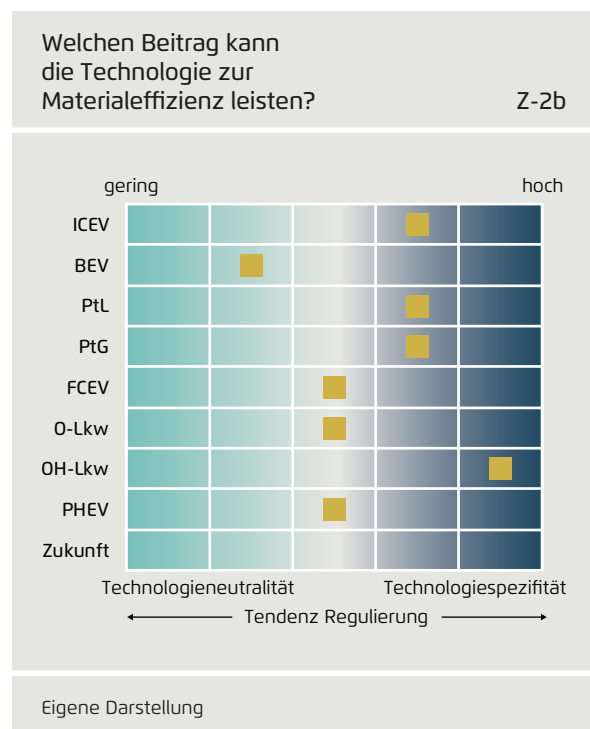
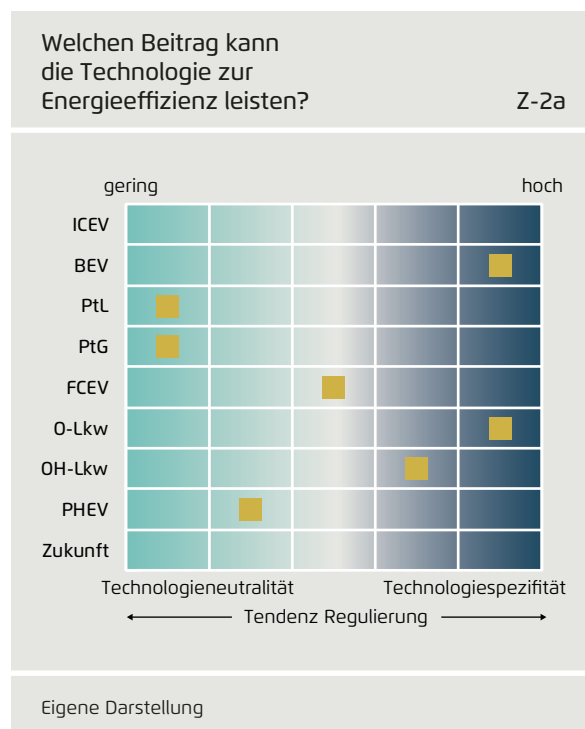
- Direkte Stromnutzung über ERS kann notwendige Energiespeicher an Bord der Fahrzeuge reduzieren und somit den Materialbedarf signifikant senken.

Demzufolge ordnen sich die einzelnen Technologien auf der Bewertungsskala ein. Die Extrema werden von der Batterietechnologie mit einem hohen Materialbedarf sowie vom OH-Lkw mit einem niedrigen Materialbedarf sowohl im Fahrzeug als auch in der Energiebereitstellung markiert.²⁵⁵

Zielbeitrag Luftqualität (Z-2c)

Technologien ohne direkte Auspuffemissionen haben das höchste Minderungspotenzial bei der Reduktion der lokalen Luftbelastung. Bei Hybridfahrzeugen hängt der Beitrag stark vom Einsatz der Technologien (Verbrenner/Elektro) vor Ort ab. Die lokalen Emissionen von mit PtG und PtL betriebenen Verbrennerfahrzeugen hängen primär von der eingesetzten Abgasminderungstechnologie ab und tragen somit nicht stark zur Verminderung der Luftqualität gegenüber dem konventionell betriebenen Pkw bei.

255 Der Materialaufwand für die ERS-Infrastruktur spielt bei einem eingeschwungenen System mit entsprechender Auslastung nur eine untergeordnete Rolle.



Zielbeitrag Energiesystemoptimierung (Z-2d)

Für die Langfristspeicherung von Energie in großem Maßstab werden auf chemische Energieträger (PtL, PtG, Wasserstoff²⁵⁶) zum Ausgleich der Fluktuationen bei der Stromerzeugung mit erneuerbaren Energien große Hoffnungen gesetzt.²⁵⁷

Auch Batteriefahrzeuge können mit ihrer Stromspeicherkapazität langfristig zur Stabilisierung der Stromversorgungsnetze beitragen.²⁵⁸ Sie können aufgrund der begrenzten Kapazität nur relativ kurzfristige Schwankungen ausgleichen, dafür aber prinzipiell sehr hohe Leistungen bereitstellen.

Oberleitungs-Lkw verursachen eine zeitlich und örtlich relativ starre Stromnachfrage und machen daher voraussichtlich Flexibilität an anderen Stellen des Energiesystems notwendig. Bei O-BEV können durch Einsatz der Batterie möglicherweise kurzfristige Lastverschiebungen realisiert werden, ähnlich wie bei Batteriefahrzeugen ohne Stromabnehmer.

4.6.4 Übersicht der Ergebnisse der Technologiecharakterisierung

Abschließend werden in diesem Abschnitt die in den Abschnitten 3.6.1–3.6.3 verbal begründeten Ergebnisse der Technologieanalyse zum Zwecke der Zusammenfassung noch einmal komprimiert in tabellarischer Form dargestellt. Wie bereits erwähnt kann aus der reinen Anzahl der analysierten Technologieeigenschaften in den einzelnen Kategorien keine Implikation hinsichtlich der Bedeutung der Technologieeigenschaften oder ihrer Kategorien für die Indikation von Technologiespezifität abgeleitet werden. Die Darstellung von Implikationen, die sich aus der Technologieanalyse für die grundsätzliche Ausgestaltung einer Dekarbonisierungspolitik im motorisierten Straßenverkehr gewinnen lassen, wird im folgenden Abschnitt 3.7 vorgenommen.

²⁵⁶ E-mobil BW (2016).

²⁵⁷ Bünger et al. (2014).

²⁵⁸ The Mobility House (2018).

Synthese der Ergebnisse der Technologieanalyse

Tabelle 4.1

Kürzel	Technologie-eigenschaft	Skala ● Tendenz zu T-Neutralität ● Keine Tendenzaussage ● Tendenz zu T-Spezifität		ICEV	BEV	PlL	PlG	FCEV	O-Lkw	OH-Lkw	PHEV	Zukunft
Rolle zentralen Wissens (W)			Je höher die Zentralität des Wissens, desto geringer die Fehlerwahrscheinlichkeit technologiespezifischer Regulierung.									
W-1	Anzahl Informationsträger	hoch ● mittel ○ gering ●	Je geringer die Anzahl der Informationsträger, desto einfacher die zentrale Informationserfassung.									
W-2a	Informationszugang Regulierer (heute)	gering ● mittel ○ hoch ●	Je höher der öffentliche Zugang zu Informationen, desto einfacher die zentrale Informationserfassung.									k. A.
W-2b	Informationszugang Regulierer (Zukunft)	gering ● mittel ○ hoch ●	Je höher der öffentliche Zugang zu Informationen, desto einfacher die zentrale Informationserfassung.									
W-3	Anwendungsreife (Zentralität d. Wissens)	gering ● mittel ○ hoch ●	Je geringer die Anwendungsreife, desto schwieriger die zentrale Informationserfassung.									
W-4	Unsicherheit Kostenentwicklung	hoch ● mittel ○ gering ●	Je geringer die Unsicherheit über die Kostenentwicklung, desto leichter die zentrale Bewertung von Kosten und Nutzen.									
W-5	Bedeutung nicht-monetäre Kosten/Nutzen	hoch ● mittel ○ gering ●	Je geringer die nicht-monetären Kosten auf der Nutzerseite (private Info), desto einfacher die zentrale Bewertung von Kosten und Nutzen.									k. A.
Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes (TO)				ICEV	BEV	PlL	PlG	FCEV	O-Lkw	OH-Lkw	PHEV	Zukunft
Störungsfreie Koordination des Marktes			Je stärker die Koordination des Marktes gestört ist, desto stärker ist die Indikation für Technologiespezifität.									
TO-1	Nicht-internalisierte externe Kosten	nein ● ja ●	Wenn externe Kosten nicht vollständig internalisiert sind, können verzerrte Preise die Koordination des Marktes stören.									k. A.
TO-2a	Komplexität Wertschöpfungskette	niedrige vert. Int. ● mittel ○ hoch ●	Je höher der Grad der vertikalen Integration, desto stärker kann Marktmacht einen verzerrten Technologiewettbewerb induzieren.									k. A.
TO-2b	Wettbewerbsintensität (Hersteller)	hoch ● mittel ○ gering ●	Je geringer die Wettbewerbsintensität, desto stärker kann Marktmacht einen verzerrten Technologiewettbewerb induzieren.			k. A.	k. A.					k. A.
TO-2c	Wettbewerbsintensität (Treibstoff)	hoch ● mittel ○ gering ●	Je geringer die Wettbewerbsintensität, desto stärker kann Marktmacht einen verzerrten Technologiewettbewerb induzieren.									k. A.
TO-3a	Km-Gesamtkosten	deutlich geringer ● etwa so hoch ○ deutlich höher ●	Je deutlicher die gegenwärtigen Km-Gesamtkosten über denen des konventionellen angetriebenen Verbrenners liegen, desto höher ist der Anreiz, ein konventionelles Fahrzeug anzuschaffen.									
TO-3b	Anschaffungspreisdifferenz	etwa genauso hoch ● etwas höher ○ deutlich höher ●	Je deutlicher die Anschaffungskosten über denen des Verbrennungsfahrzeugs liegen, desto wahrscheinlicher können Budgetrestriktionen den Kauf eines alternativen Antriebs verhindern.									k. A.
TO-3c	Einstiegspreisdifferenz	etwa genauso hoch ● etwas höher ○ deutlich höher ●	Je deutlicher die Einstiegspreise über denen des Verbrennungsfahrzeugs liegen, desto wahrscheinlicher können Budgetrestriktionen den Kauf eines alternativen Antriebs verhindern.									k. A.

Synthese der Ergebnisse der Technologieanalyse

Tabelle 4.2

Kürzel	Technologie-eigenschaft	Skala ● Tendenz zu T-Neutralität ● Keine Tendenzaussage ● Tendenz zu T-Spezifität		ICEV	BEV	PtL	PtG	FCEV	O-Lkw	OH-Lkw	PHEV	Zukunft
Pfadabhängigkeiten			Je stärker Pfadabhängigkeiten die Flexibilität der Technologiewahl stören, desto stärker die Indikation für technologie-spezifische Regulierung.									
TO-4a	Notwendigkeit Infrastruktur	nein ● ja ●	Wenn komplementäre Infrastruktur notwendig ist, kann dies die freie Technologiewahl stören.									k. A.
TO-4b	Nutzbarkeit bestehender Infrastruktur	ja ● nein ●	Wenn bestehende Infrastruktur nicht mitgenutzt werden kann, kann die Notwendigkeit neuer Infrastruktur die freie Technologiewahl stören.									k. A.
TO-4c	Investitionsspezifität Infrastruktur	nein ● ja ●	Wenn spezifische Investitionen zur Errichtung der Infrastruktur notwendig sind, kann dies ein Hemmnis für ihren Aufbau darstellen.									k. A.
TO-4d	Netzwerkeffekte Infrastruktur	nein ● ja ●	Wenn Netzwerkeffekte bei der kompl. Infrastruktur bestehen, können die ersten Einheiten (zunächst) nicht kostendeckend betrieben werden.									
TO-4e	Verbundeffekte Infrastruktur	ja ● nein ●	Wenn keine Verbundeffekte bei der kompl. Infrastruktur bestehen, muss sie allein über die Technologienutzung refinanziert werden.									k. A.
TO-4f	Notwendigkeit öff. Bereitstellung	nein ● ja ●	Wenn die kompl. Infrastruktur öffentlich bereitgestellt werden muss, bedarf es technologiespezifischer Infrastruktur-bereitstellung.									k. A.
TO-5a	Investitionsspezifität Produzenten	gering ● mittel ○ hoch ●	Je höher die Spezifität der produktionseitigen Investitionen, desto größer die Hemmniswirkung auf die Investitionen in die Produktionsanlagen.									k. A.
TO-5b	Infrastrukturabhängigkeit Fahrzeug-Invest	gering ● mittel ○ hoch ●	Je höher die Abhängigkeit der konsumentenseitigen Investition vom Infrastrukturausbau, desto größer die Hemmniswirkung auf die Nachfrage.									k. A.
TO-6a	Erfahrungskurve	vollständig ● weitgehend ○ kaum ●	Je weniger die Erfahrungskurve abgeschritten ist, desto stärker können Preisvorteile der etablierten Technologie Pfadabhängigkeiten schaffen.									
TO-6b	Anwendungsreife (dezentrale Technologiewahl)	hoch ● mittel ○ gering ●	Je geringer die Anwendungsreife neuer Technologien, desto stärker können Preisvorteile der etablierten Technologie Pfadabhängigkeiten schaffen.									
Politikversagen			Je stärker Politikversagen die Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes stört, desto stärker ist die Indikation für technologiespezifische Regulierung.									
TO-7	Einfluss Politik auf relative Preise	nein ● ja ●	Wenn politische Preis Eingriffe vorliegen, können Preisverzerrungen die Technologieoffenheit einschränken.									

Synthese der Ergebnisse der Technologieanalyse

Tabelle 4.3

Kürzel	Technologie-eigenschaft	Skala ● Tendenz zu T-Neutralität ● Keine Tendenzaussage ● Tendenz zu T-Spezifität		ICEV	BEV	PL	PLG	FCEV	O-Lkw	OH-Lkw	PHEV	Zukunft
Weitere Regulierungsziele neben der Dekarbonisierung (Z)			Je größer die Bedeutung weiterer Regulierungsziele, desto stärker ist die Indikation für technologiespezifische Regulierung.									
Z-1	Zielppluralität	nein ● ja ●	Wenn mit der Technologie weitere Ziele verfolgt werden, kann Technologiespezifität die Erreichung der Ziele fördern.									k. A.
Z-2a	Zielbeitrag Energieeffizienz	gering ● mittel ○ hoch ●	Je höher der Beitrag der Technologie zu weiteren Zielen, desto stärker kann dies für eine technologiespezifische Regulierung sprechen.	k. A.								k. A.
Z-2b	Zielbeitrag Materialbedarf	gering ● mittel ○ hoch ●	Je höher der Beitrag der Technologie zu weiteren Zielen, desto stärker kann dies für eine technologiespezifische Regulierung sprechen.									k. A.
Z-2c	Zielbeitrag Luftqualität	gering ● mittel ○ hoch ●	Je höher der Beitrag der Technologie zu weiteren Zielen, desto stärker kann dies für eine technologiespezifische Regulierung sprechen.									k. A.
Z-2d	Zielbeitrag Energiesystem-optimierung	gering ● mittel ○ hoch ●	Je höher der Beitrag der Technologie zu weiteren Zielen, desto stärker kann dies für eine technologiespezifische Regulierung sprechen.									k. A.

Eigene Darstellung

4.7 Implikationen der Technologieanalyse für die grundsätzliche Ausgestaltung einer Dekarbonisierungspolitik im motorisierten Straßenverkehr

Aufbauend auf den in diesem Kapitel dargestellten Analysen hinsichtlich der Entscheidungsfelder und Technologieoptionen für die Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs können einige Implikationen für die Ausgestaltung einer Verkehrswendepolitik abgeleitet werden. Erstens lassen sich Rückschlüsse mit Blick auf die Indikation von Technologiespezifität im motorisierten Straßenverkehr ziehen (Abschnitt 3.7.1). Zweitens können Folgerungen zur Notwendigkeit des Einsatzes verschiedener Technologieoptionen für die Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs (Abschnitt 3.7.2) sowie zur effizienten Kombination dieser Technologieoptionen (Abschnitt 3.7.3) abgeleitet werden. Und drittens lassen sich aus den vorangegangenen Analysen für den Straßenverkehrssektor in Kombination mit den in Kapitel 2 beschriebenen theoretischen Erkenntnissen

Ansatzpunkte einer Dekarbonisierungspolitik im motorisierten Straßenverkehr herleiten (Abschnitt 3.7.4).

4.7.1 Indikation von Technologiespezifität im motorisierten Straßenverkehr

Die skalenmäßigen Einordnungen der Technologieoptionen hinsichtlich der Technologieeigenschaften in Abschnitt 3.6 sind zum Zwecke der Ableitung von Schlussfolgerungen hinsichtlich der Indikation von Technologiespezifität im motorisierten Straßenverkehr in Profillinien grafisch aufbereitet (Abbildung 10). Die Profillinien dienen zur einfachen und schnellen visuellen Erfassung der Ergebnisse der Technologieanalyse in der Zusammenschau, auf deren Basis Aussagen über die Indikation von Technologiespezifität im motorisierten Straßenverkehr getroffen werden sollen. Abgetragen sind dabei auf der Y-Achse von oben nach unten die einzelnen abgefragten Technologieeigenschaften. Die schwarzen horizontalen Linien kennzeichnen die Grenze zwischen den in Abschnitt 2.4 aufgestellten Kategorien „Rolle des zentralen Wissens“, „Störungsfreie Koordination des Marktes“, „Pfadabhängigkeiten“, „Politikversagen“ und „weitere Regulierungsziele neben

der Dekarbonisierung“. Dabei markiert, wie in Abschnitt 3.5.1 beschrieben, ein Ausschlag nach links eine Tendenz für Technologieneutralität bei der entsprechenden Technologieeigenschaft, ein Ausschlag nach rechts eine Tendenz für Technologiespezifität.

Aus der Synthese der Ergebnisse der Technologieanalyse lassen sich erste Schlussfolgerungen in Bezug auf die Indikation technologiespezifischer Regulierung im motorisierten Straßenverkehr ziehen. Dabei zeigen die Ausschläge der Profillinien nach rechts diejenigen Teilbereiche auf, in denen technologiespezifische Regulierung zu einer Verbesserung der Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes beitragen kann.

Die Auswertung der Profillinien zeigt erstens, dass bei sämtlichen Technologieoptionen Ausschläge der Linie nach rechts zu beobachten sind. Dies zeigt, wie oben bereits erläutert, eine **Indikation für technologiespezifische Regulierung** im Bereich der jeweiligen Technologieeigenschaft an. Es wird somit aus der Zusammenschau deutlich, dass eine rein technologieneutrale Regulierung nicht geeignet ist, ein technologieoffenes Entscheidungsfeld und somit eine effiziente Technologiewahl im motorisierten Straßenverkehr herzustellen.

Zweitens wird aus der Betrachtung der Profillinien für die Einzeltechnologien deutlich, dass die Richtung der Ausschläge variiert (bei sämtlichen Technologien gibt es Ausschläge nach links und nach rechts). Es gibt somit Teilbereiche, in denen eine adäquate technologiespezifische Regulierung geeignet ist, ein technologieoffenes Entscheidungsfeld herzustellen, da die Technologieoffenheit vor dem Regulierungseingriff gering ist. Allerdings gibt es ebenfalls Teilbereiche, in denen dies nicht der Fall ist. Wenngleich also Technologiespezifität in einigen Teilbereichen indiziert ist, ist eine rein technologiespezifische Regulierung nicht angezeigt. Es wird somit deutlich, dass für eine effiziente Technologieauswahl ein **Mix aus technologieneutralen und technologiespezifischen Instrumenten** indiziert ist.

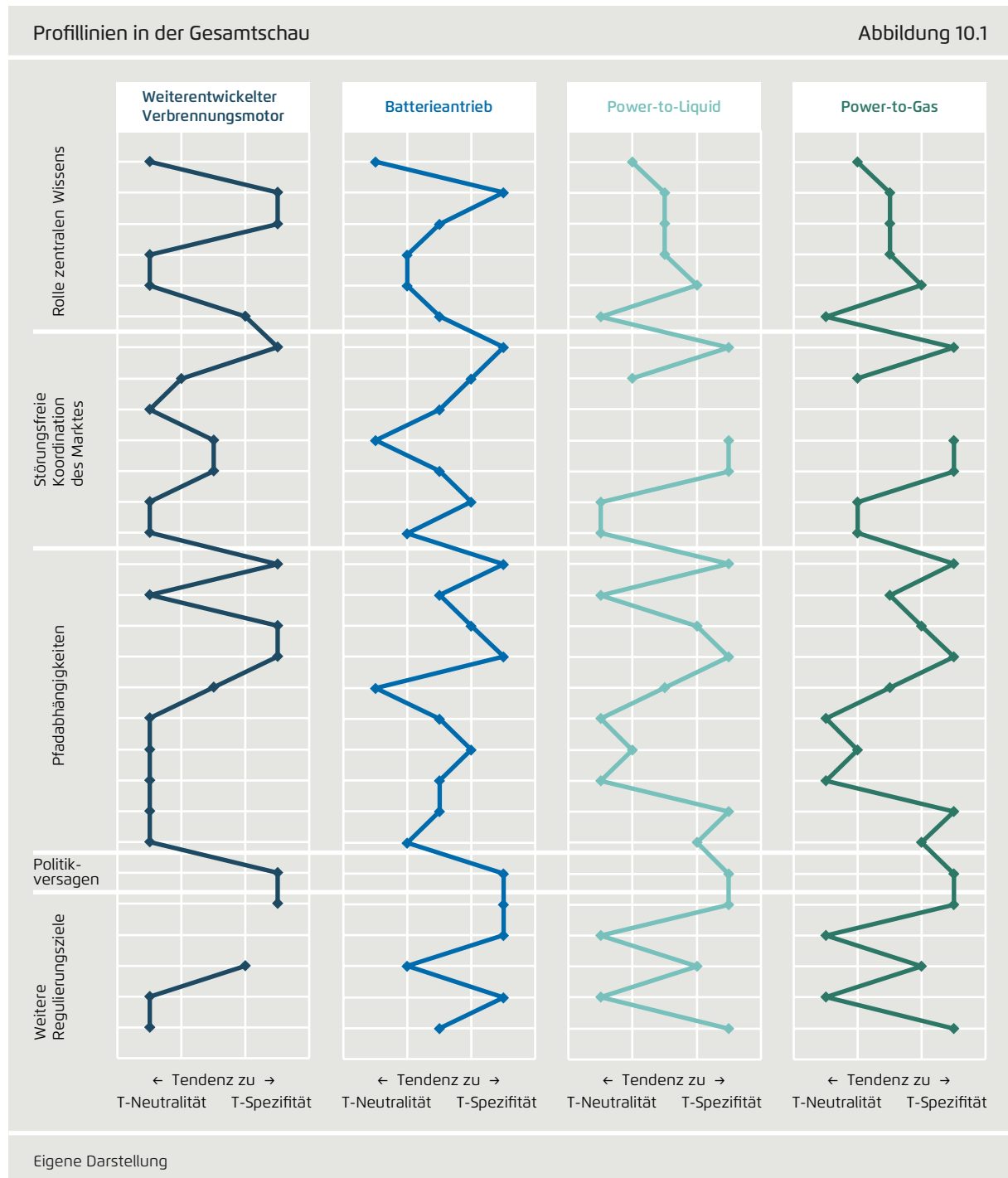
Im horizontalen Vergleich der Profillinien wird drittens deutlich, dass die Argumente für und wider Technologiespezifität bei der Regulierung zwischen den Technologieoptionen variieren. Dies gilt sowohl im Vergleich aller Technologieoptionen als auch im Vergleich der Technologieoptionen der drei Entscheidungsfelder „Pkw-Verkehr“,

„Güternah- und -regionalverkehr“ „Güterfernverkehr“ (vgl. Abschnitt 3.3). So ist etwa im Bereich der komplexen Infrastruktur eine Indikation für Technologiespezifität nur bei den elektrischen Antrieben gegeben, nicht jedoch bei den Drop-in-Substituten für den Verbrennungsmotor (PtL und PtG). Bei einigen Argumenten gibt es jedoch auch eine Synchronizität in den Ausschlägen der Profillinien über die Technologieoptionen (etwa bei der Bedeutsamkeit von Technologieexternalitäten oder der Existenz weiterer Regulierungsziele). Dies macht deutlich, dass für den Bereich des motorisierten Straßenverkehrs insgesamt, aber auch für die einzelnen Entscheidungsfelder, **keine One-fits-all-Instrumentierung** geeignet ist, da sie den spezifischen ökonomischen Barrieren nicht Rechnung tragen kann.

Viertens zeigt die Häufigkeit und Intensität der Ausschläge nach rechts auf, dass die **Indikation für Technologiespezifität für die neuen Technologien stärker ausgeprägt ist als für die Weiterentwicklung des fossilen Verbrennungsantriebs (ICEV)**. Die Anwendung rein technologieneutraler Regulierung hätte daher zur Folge, dass der fossile Verbrennungsmotor einen Wettbewerbsvorteil durch den Regulierungsrahmen besäße, sodass keine faire Berücksichtigung der anderen Technologieoptionen bei der Technologiewahl gegeben wäre.

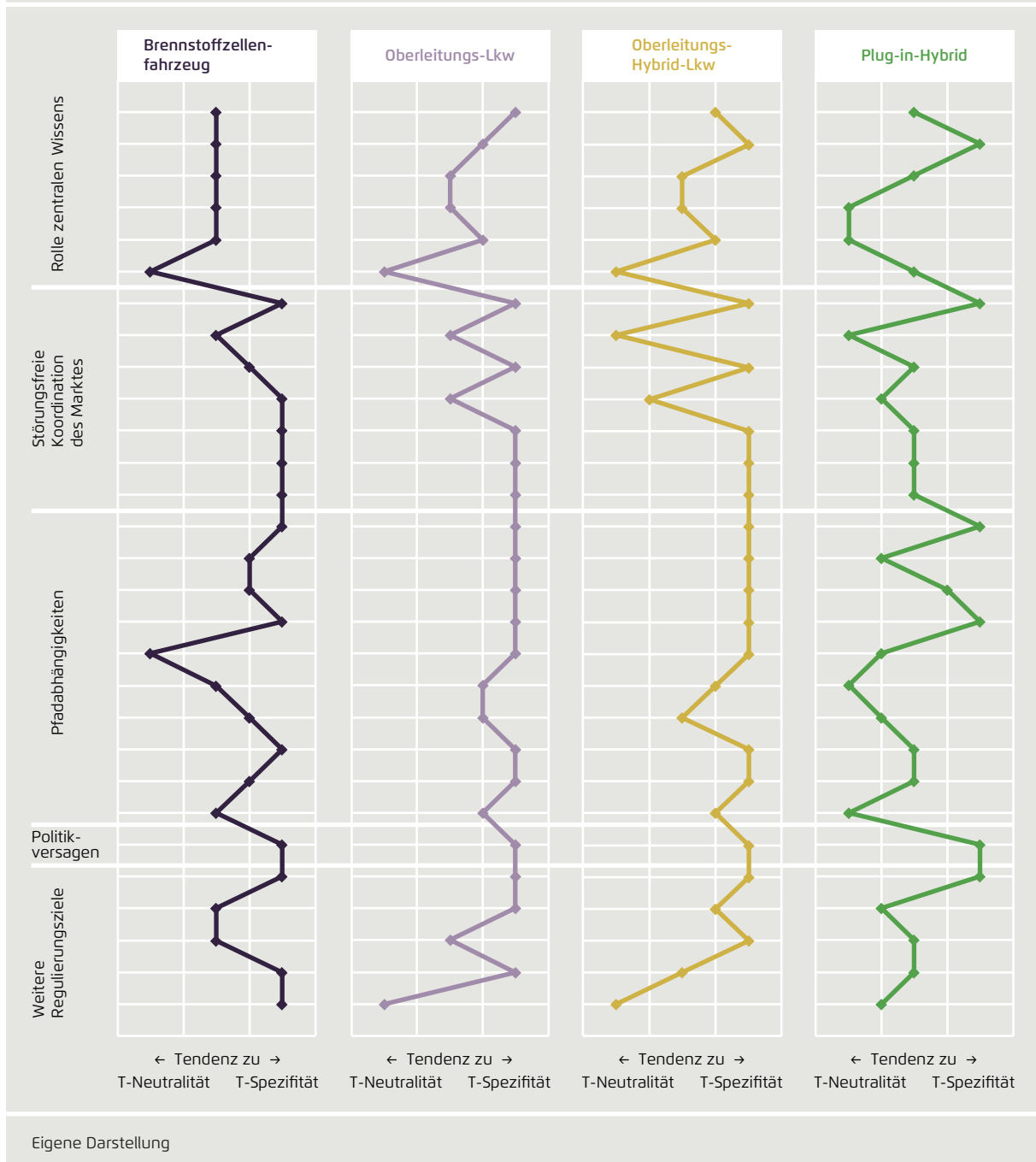
Aus den vorhergenannten Erkenntnissen lässt sich fünftens ableiten, dass zur Herstellung eines technologieoffenen Entscheidungsfeldes die konkrete Regulierung auf die Technologieoptionen und die jeweiligen Argumente für Technologiespezifität zugeschnitten sein muss (**Adäquanz der Regulierung**).

Die Synthese der Analyseergebnisse in den Profillinien gibt Hinweise für die Ansatzpunkte der Regulierung (siehe hierzu weiter Abschnitt 3.7.4). Für die konkrete Ausgestaltung technologiespezifischer Instrumente ist jedoch in den einzelnen Argumenten eine Detailanalyse der ökonomischen Barrieren erforderlich, um eine Effizienzverbesserung durch die Regulierung zu gewährleisten. Die Indikation von Technologiespezifität bedeutet nicht, dass eine beliebig ausgestaltete technologiespezifische Regulierung zu einer Verbesserung der Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes führt. Vielmehr kann, wie in Abschnitt 2.6 dargelegt, eine ungeeignet gestaltete technologiespezifische Regulierung auch eine Verringerung der Technologieoffenheit zur Folge haben.



Profillinien in der Gesamtschau

Abbildung 10.2



4.7.2 Notwendigkeit von Technologiepluralität bei der effizienten Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs

Die Ausführungen in Abschnitt 3.3 haben aufgezeigt, dass sich drei unterschiedliche Entscheidungsfelder identifizieren lassen, in denen die Akteure Entscheidungen zwischen den voraussichtlich zur Verfügung stehenden Technologieoptionen treffen. Die Unterteilung in unterschiedliche Entscheidungsfelder ist insbesondere zielführend, weil sich aufgrund differierender Nutzungsprofile die technischen Anforderungen an das Fahrzeug in den verschiedenen Entscheidungsfeldern unterscheiden. Dadurch bedingt kann auch der effiziente Technologiemix differieren. Dies gilt voraussichtlich jedoch nicht nur aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen zwischen den einzelnen Entscheidungsfeldern, sondern auch innerhalb der drei Entscheidungsfelder.

So liegen im Entscheidungsfeld „Pkw-Personenverkehr“ heterogene Nutzungsprofile vor. Sie differieren etwa hinsichtlich der Anforderungen an die benötigten Reichweiten und Größen der Fahrzeuge oder auch der Häufigkeit ihres Einsatzes. Somit unterscheiden sich auch die möglichen Zeitfenster für die Betankung beziehungsweise das Aufladen der Fahrzeugbatterie, aber auch die Wirtschaftlichkeit für die unterschiedlichen Einsatzzwecke infolge unterschiedlicher Kostenprofile der verschiedenen Optionen (zum Beispiel hohe Anschaffungskosten und niedrige Betriebskosten vs. niedrige Anschaffungskosten bei hohen Betriebskosten). Die Abdeckung dieser unterschiedlichen Anforderungen mit lediglich einer Technologieoption kann daher einerseits ökonomisch ineffizient sein. Andererseits können auch aus ökologischer beziehungsweise klimapolitischer Sicht unterschiedliche Technologieoptionen für unterschiedliche Nutzungsprofile vorteilhaft sein, da etwa mit zunehmender Batteriekapazität die Emissionsvorteile der effizienteren Energienutzung für den Antrieb durch die steigenden Emissionen für die Batterieherstellung überkompensiert werden können.²⁵⁹ Grundsätzlich verliert der Batterieantrieb bei Langstreckenfahrprofilen an Attraktivität gegenüber den anderen Optionen. Bei sehr wenig genutzten Fahrzeugen wiederum gewinnt die Fahrzeugherstellung bei Umweltbilanz und Kosten an Bedeutung, was allgemein den Einsatz alternativer Kraftstoffe in Verbrennungsmotoren gegenüber alternativen

Antrieben begünstigt. Die politischen Ziele der Verkehrswende (Reduktion des Fahrzeugbestands insbesondere in Städten, Verlagerung insbesondere des Langstreckenverkehrs von der Straße auf die Schiene) lassen jedoch für die Zukunft ein tendenziell weniger heterogenes Einsatzprofil von Pkw erwarten.

Im Entscheidungsfeld „Güternah- und -regionalverkehr“ ist davon auszugehen, dass der batterieelektrische Antrieb in der näheren Zukunft eine Vielzahl der Nutzungsprofile bedienen können wird, da häufig planbare Einsatzprofile und damit regelmäßige Lademöglichkeiten bestehen. Allerdings wird in einigen Fällen der Einsatz von BEV unter Umständen nicht effizient sein. So können etwa bei seltener Nutzung analog zu Pkw die TCO und möglicherweise auch die gesamtwirtschaftlichen Kosten eines BEV-Fahrzeugs höher liegen als beim Einsatz anderer Technologieoptionen, etwa synthetischer Kraftstoffe. Da der Güterverkehr stark kostengetrieben ist, wird allerdings in diesem Entscheidungsfeld generell versucht, die Auslastung der Fahrzeuge zu optimieren, sodass sehr geringe Auslastungen selten vorkommen. Andersherum können aber auch sehr hohe Einsatzdauern beziehungsweise Laufleistungen den Einsatz der BEV-Technologie ineffizient machen, da kaum Zeitfenster für das Aufladen verbleiben, sodass gegebenenfalls die Anschaffung höherer Fahrzeugzahlen als beim Einsatz anderer Technologieoptionen notwendig würde. Hier könnten etwa Oberleitungen als Option zur Ladung der Fahrzeuge im Betrieb oder andere Hybridkonzepte die Einsatzmöglichkeiten des Batterieantriebs erweitern.

Im Entscheidungsfeld „Güter-Fernverkehr“ finden sich unterschiedliche Einsatzprofile der Fahrzeuge, etwa Pendelverkehre, Linienverkehre, Tramp-Verkehre oder Hub-and-Spoke-Systeme. Zudem sind die Fahrzeuge häufig im internationalen Verkehr im Einsatz und müssen entsprechend auch außerhalb Deutschlands einsatzfähig sein. Der Einsatz des batterieelektrischen Antriebs als einzige Energiequelle ist daher voraussichtlich nur in begrenzten Anwendungsfällen möglich. Weitere Antriebskonzepte werden für die anderen Anwendungsfälle zum Einsatz kommen müssen. So können etwa Oberleitungen auf stark befahrenen Strecken, die zur direkten Stromnutzung und zur Ladung der Batterien genutzt werden können, den Anwendungsbereich ausweiten und so einen großen Teil der Einsatzprofile abdecken. Beim Aufbau der Oberleitungsinfrastruktur

259 Sternberg et al. (2019).

ergeben sich jedoch durch die geografische Spezifität planerische Herausforderungen, da ihre Nutzung mehr als bei Tankstelleninfrastruktur von den konkreten Verkehrsflüssen abhängt. Des Weiteren muss das System an die Entwicklung des Fahrzeugmarktes anpassbar sein (zum Beispiel die mögliche Anzahl von Fahrzeugen pro Versorgungsabschnitt der Oberleitung sowie die Anpassung der Leistungsabgabe an die Fahrzeugkonfiguration). Der Aufbau eines Oberleitungsnetzes ist zudem nur auf Strecken ab einer bestimmten Befahrungsstärke wirtschaftlich. Der Einsatz anderer Technologieoptionen (Wasserstoff oder synthetische Kraftstoffe) ist daher für die Dekarbonisierung von Güterfernverkehren notwendig, die nur einen geringen Fahranteil auf dem Oberleitungsnetz erreichen. Aufgrund der vergleichsweise geringen Kosten eines Stromabnehmers ist zu erwarten, dass verschiedene Hybridkombinationen wirtschaftlich sinnvoll sein könnten. So wären neben OH-Lkw auch Brennstoffzellenfahrzeuge mit Stromabnehmer denkbar.

Insgesamt ist somit für den Zeithorizont bis zum Jahr 2030 recht gut absehbar, welche Technologien in den Entscheidungsfeldern zum Einsatz kommen werden, wenn die Dekarbonisierungsziele im Verkehrssektor erreicht werden sollen. Dabei wird deutlich, dass dies nicht allein mit einer Technologieoption effizient möglich sein wird, sondern (mindestens in Teilen des Marktes) ein Mix verschiedener Technologien erforderlich wird, um den unterschiedlichen Anforderungen an die Fahrzeuge gerecht zu werden.

4.7.3 Unsicherheit über den effizienten Technologiemix

Wenngleich, wie im vorherigen Abschnitt 3.7.2 dargelegt, recht gut abschätzbar erscheint, welche Technologieoptionen für die Erreichung der 2030-Ziele im Straßenverkehr zum Einsatz kommen werden, ist unsicher, in welchem relativen und absoluten Umfang die verschiedenen Optionen zu einer effizienten Dekarbonisierung beitragen müssen. Im Entscheidungsfeld „Pkw-Verkehr“ sind die auftretenden Nutzungsprofile sehr heterogen. Sie werden sich im Zuge der Verkehrswende jedoch voraussichtlich eher zugunsten alternativer Antriebe ändern, da Sharing-Konzepte, autonomes Fahren und der Wechsel auf andere Modalformen (insbesondere im Fernverkehr) an Bedeutung gewinnen können. Darüber hinaus bestehen Unsicherheiten über die Entwicklung der zukünftigen (Lebenszyklus-)Kosten der Technolo-

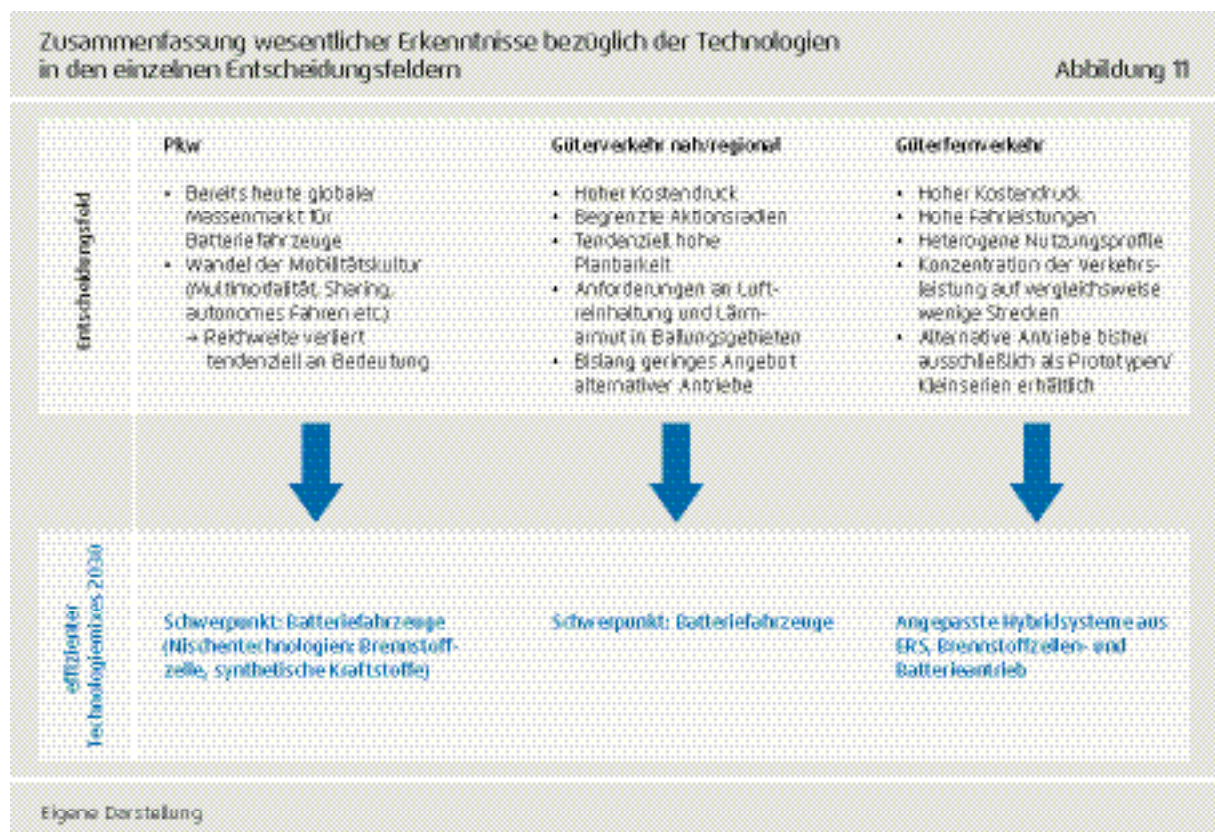
gieoptionen. Dies gilt insbesondere für die Brennstoffzellentechnologie, da hier bislang noch kaum Produkte auf dem Markt sind und zudem sowohl auf Ebene der Antriebstechnologie (etwa mit Blick auf die Lebensdauer und den Platingehalt) als auch auf Ebene der Wasserstoffbereitstellung (zum Beispiel Herkunft, Kosten, Verfügbarkeit) Unsicherheiten verbleiben. Es gilt aber auch in geringerem Maße für den Bereich des batterieelektrischen Antriebs, da Entwicklungen und Reaktionen des Stromversorgungssystems (etwa Auswirkungen auf die Stromnachfrage mit entsprechenden preislichen Folgen, finanzielle Vergütung für die Bereitstellung von Systemdienstleistungen) nur schwer abzuschätzen sind. Zudem hat die weitere Entwicklung des Anteils erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung maßgeblichen Einfluss auf den effizienten Technologiemix, denn der „Hebel“ des spezifischen Emissionsfaktors der Stromerzeugung in der Klimabilanz variiert zwischen den Antriebstechnologien – und somit auch die Effektivität und Effizienz der Technologie bei der Dekarbonisierung. Bei vollständiger Versorgung mit Grünstrom etwa sind die Well-to-wheel-Emissionen für alle elektrischen Antriebe nahe Null. Bei Anrechnung des derzeitigen deutschen Strommixes für die Klimabilanzierung können Batteriefahrzeuge in der Nutzungsphase noch eine deutliche Verbesserung der CO₂-Bilanz gegenüber fossilen Verbrennern generieren, Brennstoffzellenfahrzeuge weisen jedoch in einem solchen Szenario eine schlechtere CO₂-Bilanz und PtL-betriebene Verbrennern mindestens dreifach so hohe Emissionen wie fossile Verbrennungsfahrzeuge auf. Welche Rolle die Technologien mit Blick auf das Zieljahr 2030 realistischerweise spielen können, wird gleichwohl wesentlich vom aktuellen Entwicklungsstand des Marktes bestimmt. Hier haben batterieelektrische Antriebe gegenüber Brennstoffzellenantrieben und synthetischen Kraftstoffen gegenwärtig einen erheblichen Vorsprung. Es erscheint daher absehbar, dass mit Blick auf das Zieljahr 2030 dem batterieelektrischen Antrieb im Entscheidungsfeld Pkw-Verkehr die größte Bedeutung zukommen wird und die Nutzung von Wasserstoff in Brennstoffzellen sowie von synthetischen Kraftstoffen in Verbrennungsmotoren eher relevante Nischentechnologien darstellen werden (siehe auch Abbildung 11).

Im Entscheidungsfeld „Güternah- und -regionalverkehr“ scheint der effiziente Technologiemix besser abschätzbar. Wie in Abschnitt 3.7.2 beschrieben, werden

die meisten Einsatzprofile voraussichtlich durch den batterieelektrischen Antrieb bedient werden können. Gleichwohl bleiben – wie beschrieben – auch hier Einsatzbereiche, in denen BEV nicht die effiziente Option darstellen wird (weil technologisch nicht geeignet oder ökonomisch ineffizient), und somit verbleibt in Teilen auch Unsicherheit über die effiziente Kombination der Technologieoptionen für die Dekarbonisierung.

Im Entscheidungsfeld „Güterfernverkehr“ bestehen aus mehreren Gründen Unsicherheiten über den effizienten Technologiemark. Elektrische Antriebe mit direkter Stromzuführung, Brennstoffzelle oder Batterie können sich hier gut ergänzen (gegebenenfalls auch in Hybridkombinationen), werden aber jeweils voraussichtlich nicht alle Anforderungsprofile erfüllen können. Insbesondere bei den Technologieoptionen, die den Einsatz von Oberleitungen voraussetzen, sind große Unsicherheiten immanent. Auf der Kostenseite werden mögliche Skaleneffekte unter anderem davon abhängen, inwiefern ein solches System auch international zum Einsatz kommt. Zwar ist auch bei einem lediglich nationalen Roll-out des Systems bereits

ein Massenmarkt zu erwarten, wenn die infrastrukturellen Voraussetzungen für einen breiten Einsatz geschaffen werden, allerdings könnten die Skaleneffekte in einem solchen Fall geringer ausfallen. Aus technischer Sicht bestehen zudem Unsicherheiten über die Auslegung und Kapazität eines Oberleitungssystems (zum Beispiel, wie viele Lkw pro Stunde über eine Strecke fahren können, Auslegung der Stromzuführung, abschnittsweise Elektrifizierung, resiliente Systeme), die für die Bedeutung im zukünftigen Technologiemark von Relevanz sind. Bei der Brennstoffzelle bestehen, wie bereits zum Entscheidungsfeld „Pkw-Personenverkehr“ dargelegt, hohe Unsicherheiten über die Kostenentwicklung sowie die Entwicklungen im Stromversorgungssystem (zum Beispiel Lastprofile, Vergütung Systemdienstleistungen). Synthetische Kraftstoffe schließlich werden aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit erneuerbaren Stroms in Deutschland im Falle eines Massenmarktes weitgehend importiert werden müssen. Die Bereitschaft möglicher Erzeugerländer, eine entsprechende Produktion aufzubauen und die Produkte zu exportieren, sowie mögliche Bedingungen dafür wurden bisher nicht näher untersucht. Somit bergen sämtliche



Technologieoptionen für den Güterfernverkehr gewisse Unsicherheiten. Obgleich Oberleitungs-Lkw für einen großen Teil der Verkehre voraussichtlich die kosteneffiziente Option zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen darstellen,²⁶⁰ verbleiben Unsicherheiten bezüglich des optimalen Technologiemies in der Fläche.

Die wesentlichen Erkenntnisse zu den Technologien in den einzelnen Entscheidungsfeldern und den zu erwartenden Schwerpunkttechnologien in einem effizienten Technologiemies des Zieljahrs 2030 sind in Abbildung 11 noch einmal zusammengetragen.

Insgesamt ist somit festzuhalten, dass in den Entscheidungsfeldern zwar weitgehend absehbar ist, welche Technologieoptionen zukünftig zum Einsatz kommen werden, allerdings unsicher ist, in welchem Umfang die verschiedenen Technologieoptionen in einem effizienten Technologiemies eine Rolle spielen werden. In den Entscheidungsfeldern „Pkw-Verkehr“ und „Güternahe- und -regionalverkehr“ scheint allerdings absehbar, dass große Anteile der Verkehrsleistung wohl effizient durch die Option des batterieelektrischen Antriebs erbracht werden können. Die recht gute zentrale Verfügbarkeit von Informationen über den Technologiemies sowie die dargelegten ökonomischen Barrieren, die eine Indikation für den Einsatz technologiespezifischer Instrumente bilden (siehe Abschnitt 3.7.1), sprechen für einen zielgerichteten Einsatz adäquater technologiespezifischer Instrumente in diesen beiden Entscheidungsfeldern. Gleichwohl verbleiben Unsicherheiten sowohl hinsichtlich des effizienten Technologiemies als auch der effizienten Technologieausgestaltung, weshalb technologieneutrale Freiheitsgrade bei der Ausgestaltung sowie der Einsatz komplementärer technologieneutraler Instrumente angezeigt erscheinen. Im Güterfernverkehr bestehen im Vergleich noch größere Unsicherheiten über den effizienten Technologiemies. Die Indikation für eine technologiespezifische Regulierung fällt daher in diesem Entscheidungsfeld deutlich schwächer aus. Gleichzeitig spricht vieles für eine wichtige Rolle sowohl der Brennstoffzellen- als auch der Oberleitungstechnologie, die beide mit erheblichem Bedarf spezifischer Investitionen in Infrastruktur einhergehen und insofern mit einer Barriere konfrontiert sind, deren Überwindung technologiespezifische Regulierungseingriffe notwendig macht.

4.7.4 Ansatzpunkte für eine Dekarbonisierungspolitik im motorisierten Straßenverkehr

Aus der Analyse der realistischerweise zur Verfügung stehenden Technologien für einen dekarbonisierten Straßenverkehr in den vorangegangenen Abschnitten 3.2 bis 3.6 lassen sich nicht nur die grundsätzliche Indikation für technologiespezifische staatliche Eingriffe (oben 3.7.1) sowie Aussagen zu den erforderlichen Technologieportfolios in den einzelnen Entscheidungsfeldern herleiten (3.7.2 und 3.7.3). Darüber hinaus gestattet die hier vorgenommene Technologiecharakterisierung auch erste Implikationen für eine konkrete Dekarbonisierungspolitik. Es lassen sich nämlich fünf grundlegende Elemente einer zum Teil technologiedifferenzierten Dekarbonisierungspolitik im motorisierten Straßenverkehr identifizieren, die fortan als grundlegende „Ansatzpunkte“ bezeichnet werden sollen.

1. Marktaustritt fossiler Energieträger (Exnovation):

Die Analyse hat gezeigt, dass die aus Gründen eines möglichst unverzerrten Wettbewerbs anzustrebende Technologieoffenheit in den relevanten Entscheidungsfeldern aus zahlreichen Gründen (Pfadabhängigkeiten, Technologieausreifung, fehlende Internalisierung externer Kosten und andere mehr) nicht besteht. Daraus ergeben sich erhebliche, aber nicht begründete Wettbewerbsvorteile zugunsten konventionell-fossiler Technologien. Spiegelbildlich sehen sich innovative, CO₂-arme beziehungsweise -freie Technologien massiven Wettbewerbsnachteilen ausgesetzt. Dieses Differenzial kann dadurch adäquat vermindert werden, dass staatliche Eingriffe dafür sorgen, dass der ungerechtfertigte Wettbewerbsvorteil „alter“ Technologien gezielt erodiert wird. Wir wollen diesen wichtigen ersten Ansatzpunkt einer wirksamen Dekarbonisierungspolitik „Exnovation“ nennen. Maßnahmen in diesem Bereich sorgen dafür, dass der bestehende Lock-in-Effekt zu Lasten neuer Technologien „an der Quelle“ gemindert wird. Typische Beispiele einer derartigen Exnovationspolitik sind die verschiedenen Formen einer CO₂-Bepreisung. Sie ordnen möglichst verursachergerecht die sozialen Kosten der Emission von Treibhausgasen den auslösenden Technologien zu und sorgen für einen ersten strategischen Abbau von Wettbewerbsverzerrungen. Auf diese Weise muss den neuen Technologien nicht allein durch förderpolitische staatliche Eingriffe der Weg in den Markt gebahnt werden, was nicht nur die

260 Gerbert et al. (2018).

öffentliche Hand fiskalisch herausfordert, sondern auch mit erheblichen Effektivitäts- und Effizienzrisiken einhergehen dürfte.

Der Ansatzpunkt „Exnovation“ zielt mithin darauf ab, „alte“ Technologien gezielt vom Markt auslesen zu lassen, indem ihnen weithin ungerechtfertigte Wettbewerbsvorteile genommen werden. Exnovation wirkt grundsätzlich mit Blick auf die neuen Technologien neutral, geht aber bei der Marktauslese naturgemäß spezifisch vor. Aus Effizienzgründen empfehlen sich in erster Näherung marktorientierte Exnovationsansätze (dazu 4.4.1).

- 2. Komplementäre Infrastruktur:** Die Technologieanalyse hat nochmals die große Bedeutung unterstrichen, welche komplementären Infrastrukturgütern bei der Nutzung innovativer Technologien zukommt. Soweit staatlicherseits zwingend oder – aufgrund von Netzwerkeffekten – zumindest bis zu einer kritischen Schwelle eine öffentliche Bereitstellung (typischerweise technologiespezifisch) dieser Komplementärgüter erforderlich ist, offenbart sich unmittelbar als zweiter Ansatzpunkt einer Dekarbonisierungspolitik im motorisierten Straßenverkehr die Bereitstellung komplementärer Infrastruktur (dazu 4.4.2).

- 3. Innovation:** Die Technologieanalyse hat weiter aufgezeigt, dass sich mit den beiden vorgenannten Politikinterventionen die Wettbewerbsnachteile innovativer Technologien noch nicht hinreichend beseitigen lassen. Auf der Nutzerseite können dies insbesondere Budgetrestriktionen, monetäre und nicht-monetäre Kosten der Technologienutzung (zum Beispiel Einschränkungen bei der Reichweite oder Anpassungen des Nutzerverhaltens an die Anforderungen der Technologie) oder auch Informationsdefizite sein. Auf der Angebotsseite können Barrieren insbesondere in Form von Kostennachteilen infolge noch nicht erfolgter Lern- und Skaleneffekte sowie aufgrund von Wissensexternalitäten verbleiben. Das Ausbleiben von Lern- und Skaleneffekten hat zur Folge, dass neue Technologien höhere Kosten aufweisen als die vorherrschende Technologie. Um derartige Hemmnisse adäquat zu adressieren, bedarf es einer gezielten Begünstigung einzelner innovativer Technologien in dem noch erforderlichen Ausmaß. Wir wollen diesen Ansatzpunkt „Innovation“ nennen (dazu 4.4.3). Politikmaßnahmen in diesem Bereich sorgen dafür, dass

residuale Wettbewerbsverzerrungen, die *spezifisch* in der Charakteristik der jeweiligen neuen Technologie begründet sind, ergänzend adäquat abgebaut werden können, zum Beispiel durch technologiespezifische Fördertatbestände auf der Angebots- oder Nachfrageseite.

4. Verlagerung und Verringerung des Straßenverkehrs:

Eine auf die vorangegangenen drei Ansatzpunkte gestützte Dekarbonisierungspolitik bleibt freilich noch unvollständig, soweit es ihr durch die so stimulierte allmähliche Technologiesubstitution nicht gelingt, verbleibende Klima- und Umwelteffekte durch konterkarierende Mehrung der Verkehrsleistung oder kontraproduktive Effekte beim Modal Split zu kontrollieren. Der zunehmende Einsatz emissionsärmerer Antriebe und Kraftstoffe bleibt daher sowohl mit Blick auf die absolute Treibhausgasbelastung als auch auf sonstige Umweltbeeinträchtigungen im Verkehrssektor (Unfälle, Lärm, Flächenverbrauch, Luftemissionen) unvollständig, soweit nicht auch die Fahrleistung sowie der Verkehrsträgermix berücksichtigt werden.

Der flankierende Ansatzpunkt der **Verlagerung und Verringerung des Straßenverkehrs** (dazu 4.4.4) verfolgt vor diesem Hintergrund das Ziel, das Verkehrsaufkommen aus motorisiertem Straßenverkehr zu reduzieren. Dies scheint einerseits deswegen angezeigt, da auf diese Weise ein nachhaltiger, weil rebound-robuster Beitrag zur Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs geleistet werden kann, andererseits weil dadurch auch weitere mit dem motorisierten Straßenverkehr verbundene Externalitäten vermieden werden. Instrumente zur Verkehrsverlagerung und -verringerung sind zudem im Verbund mit Eingriffen an den anderen Ansatzpunkten (Infrastrukturförderung (4.4.2), Innovationsförderung (4.4.3)) notwendig, da diese eine Vergünstigung von motorisiertem Straßenverkehr zur Folge haben und mithin eine höhere Verkehrsleistung in diesem Bereich nach sich ziehen können.

- 5. Glaubwürdige politische Selbstbindung:** Es ist davon auszugehen, dass auch ein dekarbonisierter motorisierter Straßenverkehr im eingeschwungenen Zustand nahezu vollständig marktlich bereitgestellt werden kann. Daher ist es Aufgabe einer Dekarbonisierungspolitik, möglichst früh und möglichst

weitgehend private Investments zu mobilisieren, soweit dies rentabel möglich erscheint. Neben den zuvor genannten Verzerrungsgründen kann aber entscheidend auch regulatorische Unsicherheit dazu beitragen, private Investitionen zurückzuhalten und zunächst abzuwarten, welche Technologien sich möglicherweise durchsetzen oder welche zeitlich verlässlichen Rahmenbedingungen politisch gesetzt werden. Der Ansatzpunkt „glaubwürdige politische Selbstbindung (Commitment)“ (dazu 4.4.5) sollte daher dafür sorgen, regulatorische Unsicherheit abzubauen und durch klare, verlässliche und glaubwürdige Regelsetzung privates Kapital früh und umfassend auf ein als künftig rentabel anmutendes Innovationsfeld zu „locken“. Je stärker dies gelingt, desto weniger müssen politische Maßnahmen eine Dekarbonisierung unter den Bedingungen von Investitions-Attentismus oder Rent-Seeking-Aktivitäten der Akteure ins Werk setzen, was notwendig zu zeitlichen und kostenmäßigen Reibungsverlusten bei der Transformation beiträgt, welche der Staat nicht aus eigenem Vermögen überwinden kann. Der regulatorische Prinzipal muss private Agenten zu privatnützigem Engagement im Innovationsfeld motivieren. Selbstbindung setzt daher auch voraus, die notwendige Sicherheit über den mittelfristig rentablen Technologiemix in den Entscheidungsfeldern für private Agenten herzustellen. Dies gilt selbst dann, wenn der zukünftige Technologiemix unter Wissens- und Effizienzgesichtspunkten noch Irrtumswahrscheinlichkeiten unterliegen sollte.

Eine erfolgreiche und hinsichtlich der Technologiespezifität adäquate Dekarbonisierungspolitik wird sich auf alle fünf genannten Ansatzpunkte stützen müssen. Diese ergänzen sich in ihrer absichernden Wirkung und gestatten nur in ihrem Zusammenwirken einen verlässlichen Dekarbonisierungspfad. So werden Förderpolitiken im Innovationsfeld nur dann kraftvolle Impulse setzen können, wenn zugleich die komplementäre Infrastruktur bereitgestellt wird, die Beharrungskräfte des fossilen Lock-in gemindert und zugleich klare und glaubwürdige Transformationssignale aus dem politischen Raum auf Technologie- und Wählerstimmenmärkte gesendet werden können. Absicherungen gegen Rebound-Effekte und assoziierte weitere Umweltexternalitäten runden diesen Politikmix sinnvoll ab.

4.8 Thesen zur grundsätzlichen Sinnhaftigkeit von Technologieneutralität und Technologiespezifität im motorisierten Straßenverkehr (Indikation)

Ob Technologiespezifität ökonomisch indiziert sein kann, hängt davon ab, (1) ob die zentralen Entscheider über hinreichendes Wissen verfügen, (2) ob die Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes eingeschränkt ist und (3) welche politischen Zielstellungen mit der Energiewende im Verkehrssektor durch Technologiesubstitution verbunden werden (vgl. Abschnitt 2.4). Die Untersuchung der ausgewählten Technologieoptionen und Entscheidungsfelder in diesem Kapitel führt diesbezüglich zu den folgenden Erkenntnissen:

Rolle zentralen Wissens

- 1. Die für die Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs bis 2030 erforderlichen Technologien gelten bereits heute als im Wesentlichen bekannt.** Insoweit sind zumindest die informatorischen Voraussetzungen für staatliche Eingriffe in die Technologiewahl vorhanden.
- 2. Es ist absehbar, dass ein diversifiziertes Technologieportfolio erforderlich sein wird.** (Im PKW-Bereich könnten dies zum Beispiel neben batterieelektrischen Antrieben in geringerem Umfang auch Brennstoffzellen und mit synthetischen Kraftstoffen betriebene Verbrennungsmotoren sein.) Erforderlich ist daher ein regulatorischer Rahmen, der einen entsprechenden Technologiemix ermöglicht.
- 3. Der effiziente Technologiemix 2030 ist jedoch gegenwärtig nicht sicher vorhersagbar.** Staatliche Festlegungen auf bestimmte Anteile einzelner Technologien im Mix – oder gar Festlegungen auf einzelne Technologien – sind daher problematisch. Insoweit ergibt sich die Notwendigkeit für eine weitere Nutzung dezentralen Wissens sowie eine Balance zwischen stabilen politischen Rahmenbedingungen und politischem Lernen.
- 4. Die genaue technologische Ausgestaltung der jeweiligen Technologieoptionen bleibt im Detail typischerweise unsicher** (Beispiel: Art der Akkutechnologie für batterieelektrische Fahrzeuge). Die Tiefe technologiespezifischer Diskriminierung sollte daher jeweils begrenzt sein.

Insgesamt ist also bekannt, welche Technologien voraussichtlich für die Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs notwendig sein werden. Es verbleiben jedoch Wissensgrenzen hinsichtlich ihrer genauen Kombination und Ausgestaltung.

Technologieoffenheit

1. Technologieentscheidungen zu Antrieb, Kraftstoff und Infrastruktur sind eng miteinander verwoben.

So werden sich beispielsweise neue Antriebstechnologien (zum Beispiel batterieelektrische Antriebe) selbst bei Marktreife nur dann durchsetzen, wenn auch die komplementäre Infrastruktur (zum Beispiel Ladesäulen) in ausreichendem Umfang verfügbar ist. Technologieoffenheit lässt sich daher nur dann herstellen, wenn mögliche Einschränkungen parallel in den Bereichen Antrieb, Kraftstoff und Infrastruktur adressiert werden.

2. Technologieentscheidungen sind durch erhebliche Pfadabhängigkeiten bestimmt.

Die heutige Technologiewahl wird maßgeblich durch Investitionsentscheidungen privater und öffentlicher Akteure in der Vergangenheit bestimmt. Diese Pfadabhängigkeiten behindern den Umstieg auf neue Technologien – jedoch unterschiedlich stark. Gleichfalls schaffen alle heutigen Entscheidungen – etwa hinsichtlich des Aufbaus neuer Infrastrukturen – typischerweise neue Pfadabhängigkeiten. Vergangene und heutige politische Fehlsteuerungen werfen daher einen langen Schatten. Dieses Risiko muss auch bei technologie-spezifischen Eingriffen berücksichtigt werden.

3. Die Technologiewahl im Verkehrssektor erfolgt gegenwärtig nicht unter Berücksichtigung aller relevanten Kosten und Nutzen.

Diverse Formen von Markt- und Politikversagen verzerren die Technologieentscheidungen in den Entscheidungsfeldern Pkw-Verkehr sowie Güternah-/regional- und -fernverkehr. Für private Akteure ist ein Umstieg auf neue, klimafreundliche Technologien derzeit oft nicht wirtschaftlich. Die Einpreisung aller (sowohl privater als auch gesellschaftlicher) Kosten und Nutzen kann sowohl technologie-neutrale also auch technologie-spezifische Eingriffe erfordern.

Die Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes ist daher insgesamt eingeschränkt. Die Verzerrungen variieren dabei auch stark zwischen den neuen Technologien. Technologiespezifität in geeigneter Form kann

insofern aus ökonomischer Sicht dazu beitragen, Technologieoffenheit gerade zu erhöhen.

Politisches Zielsystem

1. Vielfach werden neben der Dekarbonisierung noch weitere politische Ziele bei der Beeinflussung der Technologiewahl verfolgt,

etwa weitere Nachhaltigkeits- sowie verteilungs- oder industriepolitische Ziele. Im Bereich der Nachhaltigkeitsziele geht es insbesondere auch um die Reduktion weiterer Umweltbelastungen, Energie- und Materialeffizienz sowie potenzielle Beiträge der Verkehrstechnologien zu einer Umstellung des Energiesystems auf erneuerbare Energiequellen. Der Einsatz einzelner Technologien kann in unterschiedlichem Maße geeignet sein, diese Ziele zu erreichen. Insofern kann es politisch notwendig sein, in der Regulierung zwischen Technologien zu differenzieren.

Zwischenfazit

1. Strikte Technologieneutralität erscheint für die Erreichung der Emissionsreduktionsziele im Verkehrssektor bis zum Jahr 2030 ökonomisch nicht sinnvoll.

Vielmehr besteht eine Indikation für eine gewisse Technologiespezifität in den drei Entscheidungsfeldern PKW-Verkehr sowie Güternah-/regional- und -fernverkehr. Technologiespezifische Eingriffe sind voraussichtlich notwendig, um die Technologieoffenheit in den jeweiligen Entscheidungsfeldern zu erhöhen und weitere politische Ziele neben der Dekarbonisierung zu adressieren. Das dafür notwendige zentrale Wissen liegt zumindest teilweise vor. Die ökonomischen Begründungen für technologiespezifische Eingriffe variieren dabei zwischen einzelnen Technologien und Entscheidungsfeldern. Technologie-neutrale Politikansätze, die auf ein verzerrtes, das heißt nicht technologieoffenes Entscheidungsfeld treffen, können diese Verzerrungen nicht beseitigen, sondern schreiben sie fort; das Ergebnis wäre eine „ineffiziente Technologieneutralität“, die zu vermeiden ist.

2. Technologiespezifität bedeutet nicht notwendigerweise die Festlegung auf eine Technologie.

Grundsätzlich kann auch bei technologiespezifischen staatlichen Eingriffen das Nebeneinander mehrerer Technologien sinnvoll sein. So können staatliche Eingriffe neben wenigen (oder sogar nur einer) Schwerpunkttechnologien (zum Beispiel batterieelektrischer Antrieb im PKW-Bereich) auch Nischentechnologien

(zum Beispiel Brennstoffzelle im PKW-Bereich) in den Blick nehmen. Die Priorisierung einzelner Technologien erscheint notwendig, um unterschiedlichen Marktpotenzialen bis zum Jahr 2030, unterschiedlich starker Indikation für Technologiespezifität sowie budgetären Grenzen für mögliche Staatsausgaben Rechnung zu tragen. Trotzdem sollte die Entwicklung von Nischentechnologien durch regulatorische Maßnahmen mit begrenztem Aufwand ebenfalls vorangetrieben werden, um technologische Optionen gerade auch für die Erreichung der langfristigen Klimaschutzziele über das Jahr 2030 hinaus zu wahren. Die gezielte staatliche Auslese von einzelnen Technologien ist lediglich im Bereich fossil betriebener Verbrennungsmotoren angezeigt.

3. **Im Entscheidungsfeld „Pkw-Verkehr“ werden batterieelektrische Antriebe kurz- bis mittelfristig die zentrale Rolle spielen.** Sie sind heute schon marktreif und erlauben langfristig eine Dekarbonisierung bei gleichzeitig hoher Energieeffizienz. Regulatorische Eingriffe sollten daher jetzt darauf fokussieren, insbesondere Barrieren für die Nutzung batterieelektrischer Antriebe (BEV) abzubauen und bei Plug-in-Hybridantrieben hohe elektrische Fahranteile sicherzustellen. Dafür sind sowohl technologieneutrale als auch -spezifische Eingriffe notwendig. Die Nutzung von Wasserstoff in Brennstoffzellen sowie von synthetischen Kraftstoffen in Verbrennungsmotoren stellen relevante Nischentechnologien dar. Beide Technologien sollten nicht im Mittelpunkt heutiger verkehrspolitischer Entscheidungen für den Pkw-Verkehr stehen, jedoch als potenzielle technologische Optionen für die langfristig angestrebte vollständige Dekarbonisierung des Straßenverkehrs gewahrt werden. Bezüglich der Weiterentwicklung von Wasserstofftechnologien und synthetischen Kraftstoffen sind zudem positive Spillover-Effekte aus dem Nutzfahrzeugbereich sowie dem Flug- und Schiffsverkehr zu erwarten. Insgesamt erscheint bei diesen Nischentechnologien eine umfangreiche technologiespezifische Adressierung daher weniger notwendig.
4. **Im Entscheidungsfeld „Güternah- und -regionalverkehr“ (Verteilverkehr bis 150 km) ist bereits unter den derzeitigen marktlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen (zum Beispiel Luftqualitätsanforderungen, CO₂-Flottengrenzwerte) mittelfristig eine Durchdringung mit Batteriefahrzeugen zu erwarten.** Auch ohne umfangreiche technologiespezi-

fische staatliche Eingriffe wird der batterieelektrische Antrieb in diesem Entscheidungsfeld daher voraussichtlich die CO₂-mindernde Schwerpunkttechnologie werden. Lediglich im Bereich der komplementären Infrastruktur (Ladeinfrastruktur) sollte gegebenenfalls technologiespezifisch nachgeschärft werden, um die Barrieren der Einführung batterieelektrischer Antriebe abzubauen.

5. **Im Entscheidungsfeld „Güterfernverkehr“ werden voraussichtlich verschiedene Antriebs- und Kraftstoffoptionen parallel zum Einsatz kommen.** Hier stellt insbesondere die effiziente Bewältigung langer Distanzen (national und international) mit Fahrzeugen zum Transport großer Lasten und dementsprechend hohem Energieverbrauch eine große Herausforderung dar. Eine direkte Stromzuführung für Elektro-Lkw mittels Oberleitungen stellt die energieeffizienteste Antriebsoption dar und hat auf stark befahrenen Strecken auch die geringsten Systemkosten. In der Fläche ist der Rückgriff auf Batterie- oder Brennstoffzellenantriebe günstiger, da deren Infrastruktur bei gleichen Kosten einen größeren Einsatzbereich abdecken kann. Eine intelligente Kombination dieser Optionen wird voraussichtlich das wirtschaftliche Optimum darstellen. Insofern erscheint es geboten, in diesem Entscheidungsfeld Barrieren bei der Einführung mehrerer Technologien parallel durch geeignete technologieneutrale und -spezifische Eingriffe zu adressieren sowie Synergien (zum Beispiel durch Hybridkonzepte) zu ermöglichen. So sind insbesondere bei der staatlichen Planung von Energieversorgungsinfrastruktur Synergien zwischen verschiedenen elektrischen Antriebssystemen zu berücksichtigen. Eine derart breite Technologieförderung diversifiziert zudem regulatorische Risiken, welche daraus resultieren, dass die weitere Entwicklung der genannten Technologien noch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist. Ein enger Technologiefokus wäre zwar kurzfristig möglicherweise günstiger, aber risikoreich und damit längerfristig potenziell teuer bzw. die Klimaziele gefährdend.
6. **Typischerweise bleibt ein Mindestmaß an wettbewerblicher Technologieauswahl (Technologieneutralität) bedeutsam.** Dies gilt insbesondere für die Details der Technologieausgestaltung (zum Beispiel Akkutechnologie für batterieelektrische Antriebe). Aber auch regulatorische Vorfestlegungen hinsichtlich der

genauen Zusammensetzung des Technologiemies oder der Ausgestaltung einzelner Technologien im Detail sollte vermieden werden (siehe zum Beispiel Thesen 3 und 4). Ebenso sollte der explizite ordnungsrechtliche Ausschluss (zum Beispiel mittels Verbot) einzelner Technologien, die potenziell einen Beitrag zur Dekarbonisierung leisten können, nur bei klarer Indikation im Einzelfall erfolgen.

5 | Ausgestaltung der Instrumente zur Dekarbonisierung des Straßenverkehrs

Aufbauend auf den theoretischen Überlegungen zu den ökonomischen Parametern für die Indikation einer technologiespezifischen Regulierung in Kapitel 2 und den Analysen zur Ausprägung dieser Parameter im Bereich der Technologieoptionen zur Emissionsreduktion im motorisierten Straßenverkehr in Kapitel 3 sollen in diesem Kapitel Überlegungen zur Ausgestaltung der Regulierungsinstrumente für eine Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs angestellt werden. Als Ausgangspunkt für die Instrumentendiskussion dienen dabei die in Abschnitt 3.7.4 hergeleiteten Ansatzpunkte für eine Dekarbonisierungspolitik. Entlang dieser Ansatzpunkte wird eine summarische Bewertung verkehrspolitischer Instrumente vorgenommen, mit dem Ziel, Stärken und Schwächen verschiedener Instrumentenklassen herauszuarbeiten. Der Fokus der Analysen richtet sich dabei insbesondere auf die Erreichung der nationalen Emissionsreduktionsziele im Verkehrssektor im Jahr 2030. Gleichwohl wird die Notwendigkeit weiterer Emissionsreduktionen über das Jahr 2030 hinaus – hin zu einer nahezu vollständigen Dekarbonisierung bis spätestens 2050 – mitbedacht und findet an relevanter Stelle ebenfalls Eingang in die Analysen.

5.1 Überblick über das Kapitel

Zur Bewertung der Eignung verschiedener in der öffentlichen und wissenschaftlichen Diskussion befindlicher Politikinstrumente zur Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs ist das 4. Kapitel wie folgt aufgebaut: Im nachstehenden Abschnitt 4.2 wird zunächst eine Klassifikation der Instrumente anhand bestimmter Eigenschaften vorgenommen, um im weiteren Verlauf eine summarische Bewertung von Instrumentenklassen vornehmen zu können. Abschnitt 4.3 legt anschließend die bei der Bewertung der Instrumente zugrunde gelegten Kriterien dar. In Abschnitt 4.4 erfolgt sodann die summarische Bewertung der verkehrspolitischen Instrumente. In den einzelnen Abschnitten (4.4.1–4.4.5) werden die relevanten Instrumente entlang der Ansatzpunkte aus Abschnitt 3.7.4 untersucht. Abschließend werden die Ergebnisse dieses Kapitels in Thesen über die Ausgestaltung von Regulierungsinstrumenten für die Erreichung der angestrebten Emissionsreduktionen im Verkehrssektor zusammengefasst (Abschnitt 4.5).

5.2 Klassifikation verkehrspolitischer Instrumente zur Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs

Dieser Abschnitt dient der Klassifikation verkehrspolitischer Instrumente zur Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs. Zweck dieser Klassifikation ist einerseits, eine geeignete summarische Diskussion der Vielzahl der in der Debatte befindlichen Instrumente vornehmen zu können. Andererseits entfalten unterschiedliche Klassen von Instrumenten auch eine unterschiedliche Wirkung hinsichtlich der im nächsten Abschnitt 4.3 dargelegten Bewertungskriterien, sodass die Zusammenfassung in Klassen auch diesbezüglich zweckmäßig ist.

Tabelle 5 zeigt die im Folgenden vorgestellten Klassifikationsansätze in der Übersicht.

Neben der direkten Einflussnahme auf die Entscheidungen der Privatakteure durch Regulierung besitzt der Regulierer die Möglichkeit, durch die öffentliche Bereitstellung von (Komplementär-) Gütern, zum Beispiel technische Infrastruktur, indirekt auf die Entscheidungen der privaten Akteure einzuwirken. Eine erste Klassifikation von Instrumenten kann also dahingehend vorgenommen werden, ob eine öffentliche Bereitstellung von Gütern erfolgt oder eine Regulierung der Entscheidungen privater Akteure vorgenommen wird (Ebene der Bereitstellungsentscheidung).

Sofern eine Regulierung der Entscheidungen privater Akteure erfolgt, zielen Regulierungsinstrumente darauf ab, die Entscheidungen der privaten Akteure zum Zwecke der Erreichung gesetzter Politikziele zu beeinflussen. Nach ökonomischer Theorie wählen rationale Akteure aus den möglichen Alternativen jene aus, die ihnen das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis bietet. Die Wahl wird dabei durch drei Determinanten beeinflusst: die zur Verfügung stehenden Handlungsalternativen, die mit ihnen verbundenen Kosten und Dienste und die individuellen Präferenzen und verfügbaren Informationen zum Entscheidungszeitpunkt. Entsprechend kann regulatorisch auf diese Determinanten eingewirkt werden, indem die Menge der Handlungsalternativen verkleinert wird (ordnungsrechtliche Instrumente), auf das Kosten-Nutzen-Gefüge der Optionen Einfluss genommen wird (marktbasierte Instrumente) oder auf den Informations-

Klassifikationsansätze für Regulierungsinstrumente		Tabelle 5
Instrumentenklassifikation	Ausprägungen	Unterausprägungen
Ebene der Bereitstellungsentscheidung	staatliche Bereitstellung	
	regulierte private Entscheidung	
Instrumentencharakter	ordnungsrechtlich	Emissionsauflagen
		Technologieauflagen
	marktbasiert	preisbasiert
		mengenbasiert
Nähe zum Regulierungsziel	informativ / suasorisch	
	gering	
	–	
Technologiedifferenzierung	hoch	
	ja	
Eingriffspunkt der Regulierung	nein	
	Technologieentwicklung	
	Technologieanschaffung	
	Technologienutzung	
Zeitlicher Regulierungsverlauf	Komplementäre Infrastruktur	
	Anwendungsdauer	dauerhaft
		temporär
	Konstanz	fix
		veränderlich
	Abfolge	parallel
		sequenziell
Eigene Darstellung		

stand und/oder die Präferenzen der Akteure eingewirkt wird (informativ beziehungsweise suasorische Instrumente).²⁶¹ Hierzu kann mithin eine Klassifikation nach dem Instrumentencharakter (ordnungsrechtlich, marktbasiert, informativ) vorgenommen werden.

Für die Regulierung privater Entscheidungen bieten sich dem Regulierer also unterschiedliche Kategorien von Regulierungsinstrumenten. Zum einen kann er durch marktbasierte Instrumente Einfluss auf die Kosten-Nutzen-Relation der verschiedenen Handlungsalternativen nehmen und auf diese Weise in das Entscheidungskalkül der privaten Akteure eingreifen. Marktbasierte Instrumente lassen sich dabei weiter aufgliedern in mengenbasierte und preisbasierte Instrumente.

Mengenbasierte Instrumente wirken indirekt auf den Preis der regulierten Güter ein, indem eine zulässige minimale beziehungsweise maximale Menge eines handelbaren Gutes regulatorisch festgelegt wird. Auf diese Weise wird regulatorisch eine künstliche Knappheit geschaffen, die sich auf den Preis des entsprechenden Gutes auswirkt und so auf die Kosten-Nutzen-Entscheidung der Akteure einwirkt.²⁶² Mengenbasierte Instrumente haben daher einen planbaren Effekt auf die gehandelte Menge eines Gutes, der Preis des Gutes jedoch bildet sich am Markt und ist damit bei unvollständiger Information und Voraussicht nicht exakt planbar. Dem Bereich der mengenbasierten Instrumente lassen sich etwa der Handel mit Emissionszertifikaten oder die Einführung handelbarer Quoten für bestimmte Technologieoptionen zuordnen.

261 Michaelis (1996), S. 25 f.

262 Stavins (2003).

Preisbasierte Instrumente wirken hingegen direkt auf den Preis, indem eine regulatorische Preiskomponente festgelegt wird. Eine solche Preiskomponente kann entweder abschöpfend ausgestaltet sein (im Falle einer Abgabe) oder zuführend (im Falle einer Subvention) und so preiserhöhend beziehungsweise preisreduzierend wirken. Preisbasierte Instrumente haben somit einen besser planbaren Effekt auf den Preis des regulierten Gutes als mengenbasierte Instrumente,²⁶³ jedoch ist der Effekt auf die gehandelte Menge des Gutes bei unvollständiger Information und Voraussicht ex ante nicht exakt abschätzbar.²⁶⁴ Der Kategorie der Abgaben lassen sich etwa die Steuern für den Verkehrssektor (CO₂-Besteuerung, Energiesteuer, Stromsteuer) sowie ein Malus für bestimmte Antriebstechnologien im Falle einer Bonus-Malus-Regelung zuordnen. Im Rahmen dieser Studie wird ein breites Verständnis einer CO₂-Besteuerung verwendet, das insbesondere auch eine CO₂-orientierte Reform bestehender Aufwand- und Verbrauchsteuern umfasst.²⁶⁵ Instrumente, die der Kategorie der Subventionen zuzuordnen sind, sind etwa Kaufprämien für alternative Antriebe, Bonuszahlungen im Rahmen von Bonus-Malus-Regelungen, die finanzielle Förderung komplementärer Infrastruktur oder Steuererleichterungen (zum Beispiel bei der Kfz-Steuer, einer Maut oder der steuerlichen Privilegierung von Dienstwagen).

Zum anderen kann der Regulierer durch ordnungsrechtliche Instrumente, das heißt Ge- und Verbote, Einfluss auf die Entscheidungen der privaten Akteure nehmen. In diesem Fall wird der Entscheidungsraum der Handlungs-

alternativen regulatorisch verkleinert. Im Verkehrssektor können ordnungsrechtliche Instrumente noch aufgegliedert werden in Emissionsauflagen (das heißt CO₂-Grenzwerte) und Technologieauflagen. Technologieauflagen sind etwa Einfahrverbote (zum Beispiel ein Dieselvebot) für bestimmte räumlich abgegrenzte Gebiete, Betriebs- oder Zulassungsverbote für einzelne Technologieoptionen (etwa ein Neuzulassungsverbot für Verbrennungsmotoren), nicht handelbare Quoten für das Inverkehrbringen von Kraftstoffen (zum Beispiel eine Biokraftstoffquote) oder Antriebstechnologien (zum Beispiel eine Quote für Elektrofahrzeuge) oder Gebote zur Vorhaltung komplementärer Infrastruktur (zum Beispiel Ladesäulen für Elektrofahrzeuge) für definierte Akteursgruppen.

Die dargelegte klassische ökonomische Klassifikation von Instrumenten und die Zuordnung der diskutierten Instrumente zur Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs ist in Abbildung 12 noch einmal grafisch dargestellt.

In der Praxis ist eine klare Abgrenzung in ordnungsrechtliche und marktbasierende Instrumente nicht immer möglich, da die angewandten Maßnahmen häufig Mischformen darstellen.

Unabhängig von der Kategorisierung als marktbasierendes oder ordnungsrechtliches Instrument können die Regulierungseingriffe zum Zwecke ihrer summarischen Bewertung auch hinsichtlich weiterer Ausgestaltungsparameter klassifiziert werden. So kann eine Klassifikation nach der Nähe zum Regulierungsziel – im Rahmen dieser Studie also die Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs – sinnvoll sein. Hierbei kann dahingehend unterschieden werden, ob das Instrument an den (nationalen) Treibhausgasemissionen insgesamt, den Emissionen des Verkehrssektors, den spezifischen Emissionen, am Fahrzeugtypus (Pkw/Lkw, Fahrzeugflotte oder Einzelfahrzeug), dem Fahrzeugantrieb beziehungsweise Komponenten des Antriebs oder dem Kraftstoff ansetzt. Ein sektorenübergreifendes Emissionshandelssystem etwa würde in einer solchen Klassifikation nah am eigentlichen Regulierungsziel ansetzen, die Förderung komplementärer Infrastruktur für einzelne Technologieoptionen hingegen eine geringe Nähe zum Regulierungsziel aufweisen, das so nur indirekt und partiell adressiert werden könnte.

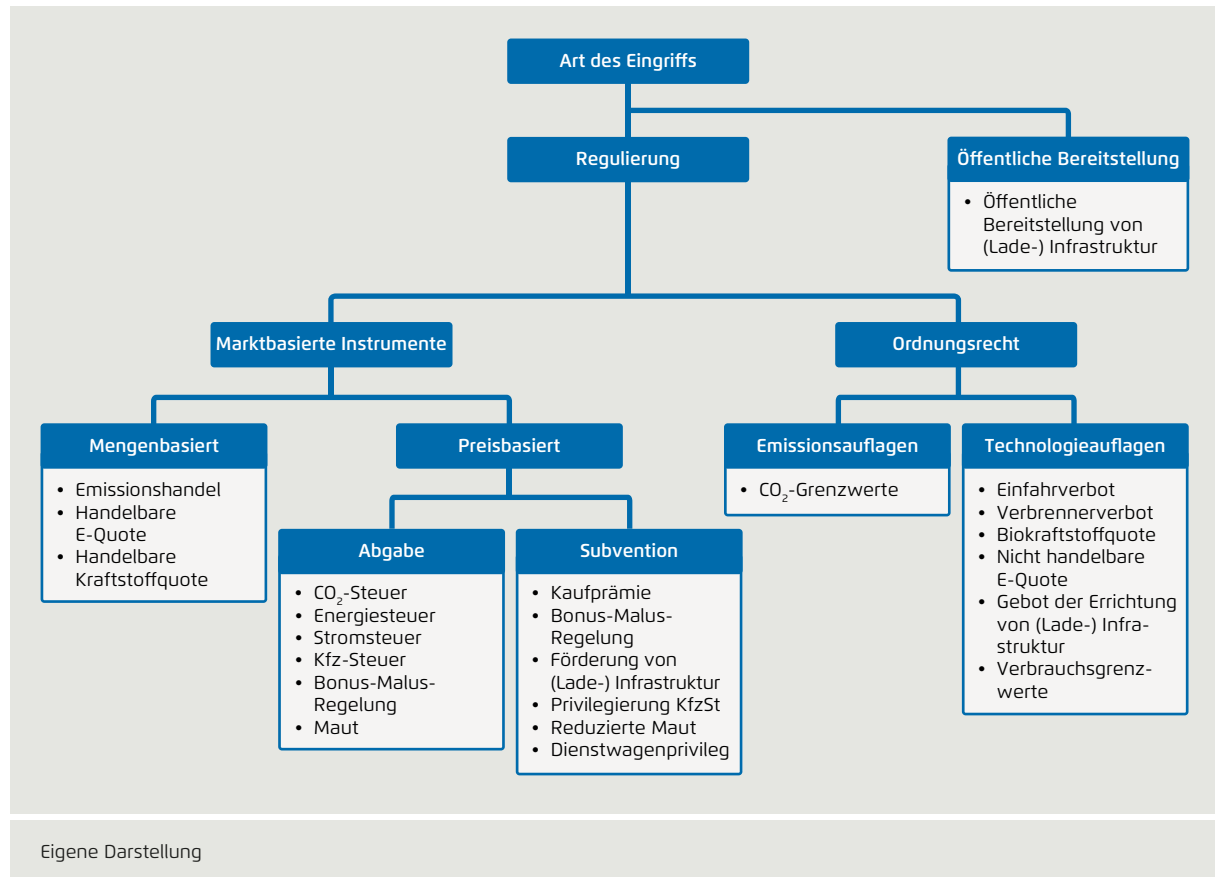
263 Vollständig abschätzbar ist der Effekt auf den Güterpreis jedoch unter unvollständiger Information auch bei preisbasierten Instrumenten nicht, da, abhängig von den Preiselastizitäten von Angebot und Nachfrage, Abgaben und Subventionen unter Umständen teilweise zulasten beziehungsweise zugunsten der Profitabilität von Herstellern und Händlern eingepreist werden. Zudem führen Einkommens- und Substitutionseffekte infolge des preisbasierten Eingriffs zu Änderungen der gehandelten Menge und damit auch des Nettopreises des entsprechenden Gutes.

264 Stavins (2003).

265 Dabei ist freilich auf verfassungsrechtliche Restriktionen, etwa hinsichtlich der Neueinführung einer expliziten CO₂-Steuer, Rücksicht zu nehmen. Die verfassungsrechtliche Bewertung einzelner Instrumentenvorschläge ist jedoch nicht Teil der im Rahmen dieser Studie vorgenommenen Analysen.

Klassifikation von Regulierungsinstrumenten für die Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs

Abbildung 12



Zudem kann auch eine Klassifikation hinsichtlich der regulatorischen Differenzierung zwischen den Technologieoptionen zweckmäßig sein. Hierbei kann dahingehend unterschieden werden, ob die Technologien regulatorisch gleichbehandelt werden, also keine Differenzierung aufgrund technologischer Charakteristika vorgenommen wird (zum Beispiel ein einheitlicher technologieunabhängiger Emissionspreis), oder ob unterschiedliche Technologiegruppen oder Einzeltechnologien differenziert reguliert werden (zum Beispiel eine Kaufprämie für Elektrofahrzeuge).

Klassifiziert werden kann auch hinsichtlich des Eingriffspunkts der Regulierung. Der Eingriffspunkt der Regulierung kann die Technologieentwicklung (zum Beispiel Forschungsförderung), die Technologieanschaffung, das heißt die Investition (zum Beispiel eine Kaufprämie), die Technologienutzung, das heißt der Betrieb (zum Beispiel eine Kraftstoffbesteuerung) oder die komplemen-

täre Infrastruktur (zum Beispiel der Aufbau elektrischer Oberleitungen an Autobahnen) sein.

Zweckmäßig kann zudem eine Klassifikation nach dem zeitlichen Verlauf des Regulierungseingriffs sein. Einerseits gilt dies hinsichtlich der Beständigkeit eines Instruments, zum einen dahingehend, ob ein Instrument dauerhaft (zum Beispiel Instrumente zur Internalisierung externer Effekte) oder nur temporär (zum Beispiel Anschubförderung zur Marktdurchdringung) Anwendung finden sollte, zum anderen dahingehend, ob Anpassungen des Instruments über die Zeit angezeigt sind (zum Beispiel Abschmelzung von Fördersätzen über die Zeit). Andererseits gilt dies auch hinsichtlich der Frage, ob Instrumente parallel (zum Beispiel gleichzeitiger Ladeinfrastrukturaufbau und CO₂-Bepreisung) oder sequentiell (zum Beispiel Kaufprämien im Anschluss an Forschungsförderung) Anwendung finden sollten.

Die unterschiedlichen Ansätze zur Klassifikation sind dabei nicht als einander ausschließend zu betrachten, sondern sollen vielmehr zweckmäßig im Rahmen der Instrumentenbewertung miteinander kombiniert werden.

5.3 Kriterien für die Bewertung der verkehrspolitischen Instrumentenoptionen

Für die nachfolgende Bewertung der unterschiedlichen Instrumentenoptionen zur Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs werden mehrere Kriterien herangezogen, die sich maßgeblich aus dem umwelt-ökonomischen Standardprogramm der Instrumentenanalyse speisen.²⁶⁶ Mithilfe dieser Kriterien sollen die den Ansatzpunkten zuzuordnenden verkehrspolitischen Instrumente summarisch (in Form einer zweckmäßigen Klassifikation, wie in Abschnitt 4.2 dargestellt) auf ihre theoretische und praktische Tauglichkeit für die Dekarbonisierung des Verkehrssektors abgeprüft werden.

Vor dem Hintergrund der Fragestellung, die dieser Studie zugrunde liegt, ist primäres Kriterium für die Bewertung der Instrumente das **Kriterium der Adäquanz**. Mit dem Kriterium der Adäquanz ist die Frage verbunden, welche technologiespezifische Ausprägung eines Instruments ökonomisch jeweils zu rechtfertigen ist. Die Forderung dieses Kriteriums ist also, dass die technologiespezifische Ausgestaltung des Instruments zur ökonomischen Begründung des regulatorischen Eingriffs passen muss. Nicht adäquat wäre etwa, auf (zum Beispiel rechtliche) Barrieren beim Ausbau der komplementären Infrastruktur mit Förderinstrumenten für die Fahrzeuganschaffung zu reagieren.

Daneben ergeben sich aus der zugrunde liegenden Zielsetzung der Dekarbonisierung des Verkehrssektors, dem ökonomischen Anspruch der Wohlfahrtsmaximierung und Herausforderungen der politischen Praxis weitere Kriterien für die Bewertung regulatorischer Instrumente. Zunächst ist vor dem Hintergrund der Emissionsreduktionsziele für den Verkehrssektor an ein Instrument die Forderung anzulegen, dass es einen Beitrag zur Erreichung des Emissionsziels leistet (**Kriterium der Effektivität**). Hier stellt sich also die Frage, ob das analysierte

Instrument (allein) im gebotenen Zeitraum die zuverlässige Erreichung der klimapolitischen Zielsetzung im betrachteten Verkehrssektor gewährleisten kann.

Aus dem ökonomischen Postulat eines effizienten Ressourceneinsatzes lässt sich zudem das **Kriterium der Kosteneffizienz** ableiten. Hieraus stellt sich die Anforderung an das Instrument, dass es geeignet sein muss, die im entsprechenden Ansatzpunkt adressierte(n) ökonomische(n) Barriere(n) zu geringstmöglichen Kosten abzubauen. Das Kriterium entspricht damit dem sogenannten Standard-Preis-Ansatz,²⁶⁷ der ein vorgegebenes gesellschaftliches Ziel (hier: die Sektor-Emissionsminderungen bis 2030) mit geringstmöglichen volkswirtschaftlichen Kosten erreicht sehen will.

Die Anwendung hoheitlicher Regulierung geht mit Transaktionskosten für die Regulierung einher (etwa für die Implementierung, die Überwachung und die Durchsetzung der Regulierung).²⁶⁸ Die Transaktionskosten nehmen dabei etwa mit den Informationsanforderungen für den Regulierer und die Regulierten, der Komplexität des Regulierungsinstruments und der Anzahl der involvierten Akteure zu. Das **Kriterium der Transaktionskosteneffizienz** fordert daher, dass die Transaktionskosten der Regulierung aufseiten des Regulierers und der Regulierten möglichst gering ausfallen. Kosteneffizienz und Transaktionskosteneffizienz können durchaus in einem Zielkonflikt zueinander stehen, etwa wenn eine hohe Kosteneffizienz bei der Überwindung der ökonomischen Barrieren den Einsatz komplexer Regulierungsinstrumente notwendig macht.

Neben der Dekarbonisierung des Verkehrssektors verfolgt die Politik weitere Ziele, die durch den regulatorischen Eingriff zur Dekarbonisierung tangiert werden können. Das betrachtete Instrument kann dabei mit der Erreichung der weiteren Ziele kollidieren, neutral hinsichtlich der Erreichung der weiteren Ziele wirken oder förderlich für die Erreichung der weiteren Ziele sein. Mit dem **Kriterium der Zielkonformität** wird daher die Anforderung an ein Regulierungsinstrument zur Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs gestellt, in möglichst geringem Konflikt mit der Verfolgung weiterer Politikziele zu stehen. Die Menge weite-

266 Siehe etwa Michaelis (1996), mit weiteren Nachweisen.

267 Baumol; Oates (1971).

268 Krutilla; Krause (2010).

rer Politikziele ist freilich vielzählig. Die Analysen im Rahmen der Instrumentenbewertung konzentrieren sich daher auf die Auswirkungen auf verteilungs-, industrie- und weitere umweltpolitische Ziele, da diese auch im Rahmen der Energiewende von hoher Relevanz im politischen Diskurs und somit bei der Ausgestaltung der Politikinstrumente waren und sind.²⁶⁹

Theoretisch geeignete Instrumente können in der praktischen Umsetzung an polit-ökonomischen Barrieren scheitern. Widerstände von Interessengruppen können die Umsetzung im Extremfall vollständig verhindern, jedenfalls aber im politischen Verhandlungsprozess zu einer Ausgestaltung des Instruments führen, die die Adäquanz, Effektivität und/oder Kosteneffizienz des Instruments gefährdet.²⁷⁰ Mit dem **Kriterium der politischen Umsetzbarkeit** ist daher die Forderung verbunden,

269 Beispielhaft sei hier auf das Energiekonzept der Bundesregierung von 2010 verwiesen, das bereits im Titel die Erläuterung „für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“ trägt (Bundesregierung (2010)).

270 Stigler (1971).

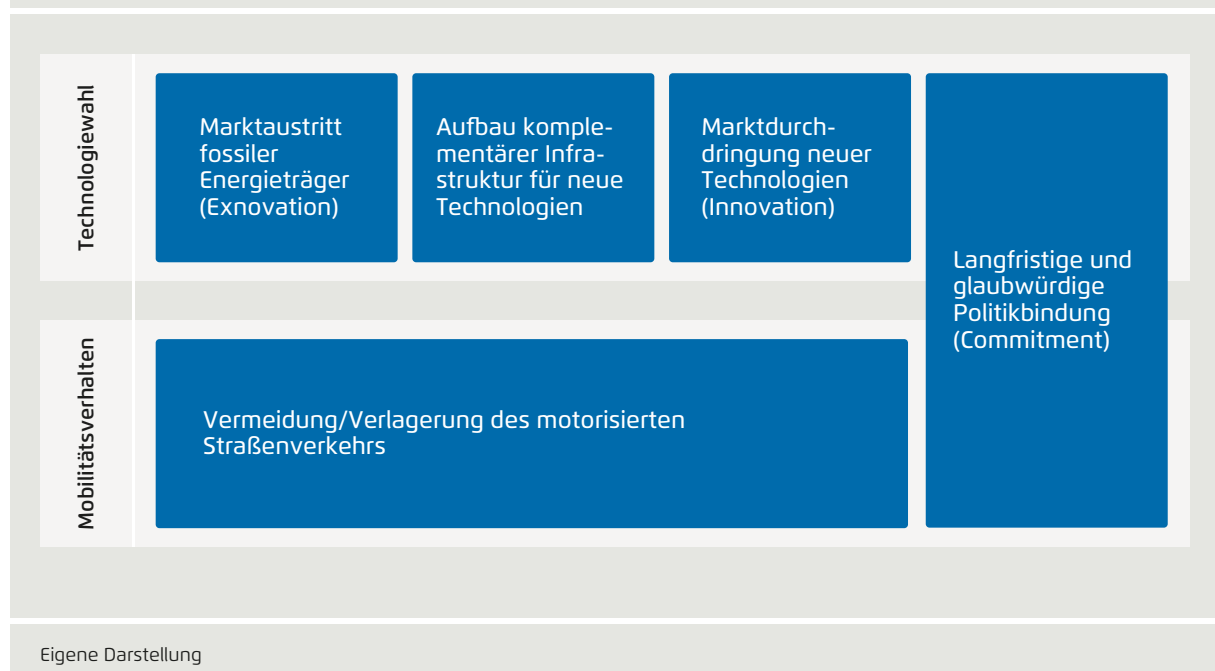
dass das analysierte Instrument auch unter polit-ökonomischen Restriktionen umsetzbar erscheint. Hier wird also der Frage nachgegangen, welche Verzerrungen der Ausgestaltung gegenüber der theoretisch geeigneten im politischen Verhandlungsprozess zu erwarten sind.

5.4 Bewertung verkehrspolitischer Instrumente entlang von Ansatzpunkten für die Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs

Anhand der im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Kriterien wird im Folgenden eine summarische Bewertung von Instrumentenoptionen für die Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs vorgenommen. Die Analyse erfolgt dabei in der Regel zusammengefasst für zweckmäßig zusammengestellte Instrumentenklassen, wie in Abschnitt 4.2 dargelegt. Einzelne Instrumente werden jedoch in Boxen auch etwas eingehender diskutiert. In den folgenden Abschnitten werden für die in Abschnitt 3.7.4 hergeleiteten Ansatzpunkte für die

Ansatzpunkte einer Instrumentierung von Dekarbonisierungspolitik für den Straßenverkehr

Abbildung 13



Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs jeweils mögliche Instrumente zur Adressierung des Ansatzpunktes zusammengetragen und auf Basis der Kriterien aus Abschnitt 4.3 bewertet. Dabei kommt auch dem Zusammenspiel der einzelnen Ansatzpunkte eine gewichtige Rolle zu. Abbildung 13 zeigt die Ansatzpunkte noch einmal in der Übersicht. Die drei zuerst diskutierten Ansatzpunkte – Exnovation (4.4.1), komplementäre Infrastruktur (4.4.2) und Innovation (4.4.3) – zielen auf die Technologiewahl der privaten Akteure und damit auf die Investitionsentscheidungen („Invest“). In Abschnitt 4.4.4 wird mit der Suffizienz ein Ansatzpunkt betrachtet, der auf das Mobilitätsverhalten der privaten Akteure zielt und somit speziell auf die Nutzungsentscheidungen („Betrieb“) – die freilich bei vorausschauenden Akteuren Rückwirkungen auf die Investitionsentscheidungen entwickeln können. Der in Abschnitt 4.4.5 diskutierte Ansatzpunkt der glaubwürdigen politischen Selbstbindung („Commitment“) tangiert alle zuvor diskutierten Ansatzpunkte und bildet somit ein Querschnittsthema in den Analysen.

5.4.1 Marktaustritt fossiler Energieträger (Exnovation)

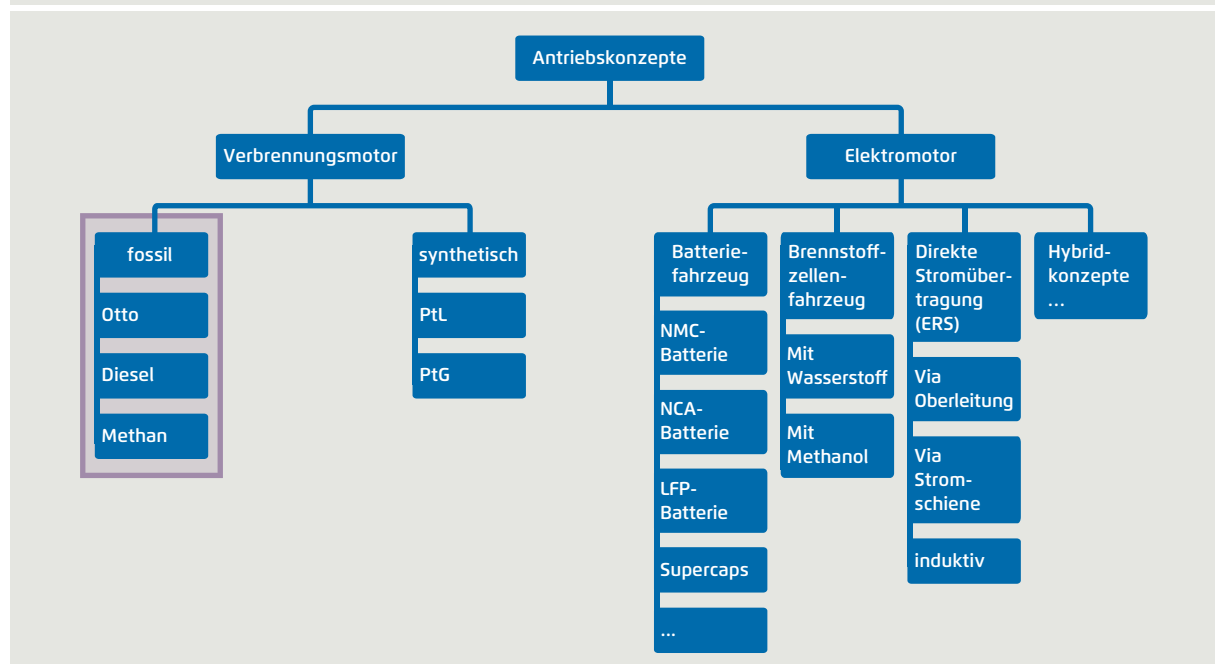
Dem Ansatzpunkt des Marktaustritts fossiler Energieträger (im Folgenden kurz „Exnovation“ genannt) lassen sich sowohl marktbasierende als auch ordnungsrechtliche Politikinstrumente zuordnen. Ihnen ist gemeinsam, dass sie auf die Auslese „alter“ Technologien zielen und nicht etwa die Marktdurchdringung neuer, emissionsarmer oder -freier Technologien direkt adressieren. Auf diese Weise bereinigt Exnovation den Markt und schafft den nötigen Wettbewerbsraum für „neue“ Technologien“. Abbildung 14 verdeutlicht grafisch die Verortung des Ansatzpunktes der Exnovation im Technologiebaum.

Tabelle 6 zeigt die im Weiteren betrachteten Instrumentenoptionen im Ansatzpunkt Exnovation in der Übersicht.

Instrumente im Exnovationsbereich können einerseits auf eine angemessenere Bepreisung beziehungsweise die Begrenzung von CO₂-Emissionen zielen und auf diese Weise versuchen, die Technologie der Verbrennung fossiler Kraftstoffe aus dem Markt zu drängen. Als markt-basierte Instrumente sind hier eine CO₂-Besteuerung

Verortung der Exnovationsregulierung im Technologiebaum

Abbildung 14



Eigene Darstellung

Instrumentenoptionen im Ansatzpunkt „Marktaustritt fossiler Energieträger“

Tabelle 6

Emissionshandel im Verkehrssektor
CO₂-Bepreisung
CO₂-Flottengrenzwerte
Verbrennerverbot
Quoten für alternative Antriebe
Höhere Kfz-Steuer für Verbrennungsantrieb (Malus-Regelung)
Abbau von Steuervorteilen für den fossilen Verbrenner
Eigene Darstellung

sowie eine Ausweitung des Emissionshandels auf den Verkehrssektor beziehungsweise die Einführung eines sektoralen Emissionshandels für den Verkehr in der Diskussion. Während eine CO₂-Besteuerung über den Preis Einfluss auf die Menge der Treibhausgasemissionen zu nehmen versucht, wirkt der Emissionshandel mengensteuernd, indem eine Emissionsobergrenze politisch festgelegt wird. Diese marktbasierenden Instrumente führen zu einer Einpreisung externer Kosten der Treibhausgasemissionen in die Kosten für den Betrieb CO₂-emittierender Technologieoptionen. Daneben ist mit einem Malus, das heißt einer regulatorischen Preiserhöhung für die Anschaffung beziehungsweise das Halten CO₂-intensiver Fahrzeuge, auch ein marktbasierendes Instrument in der Debatte, das die Investition in ein konventionelles Verbrennungsfahrzeug verteuert.

Die CO₂-Flottengrenzwerte der Europäischen Union stellen hingegen ein spezielles ordnungsrechtliches Instrument dar, das an den CO₂-Emissionen anknüpft, indem es Grenzwerte für die Emissionen der Fahrzeugflotten der einzelnen Fahrzeughersteller fest schreibt.²⁷¹

271 Flottengrenzwerte werden hier trotz ihrer eingeschränkten Handelbarkeit als ordnungsrechtliches Instrument klassifiziert, da sie eine individuelle (auf Ebene eines einzelnen Herstellers) staatliche Vorgabe darstellen, bei deren Nichterfüllung ein Sanktionsmechanismus greift. Aufgrund der Handelbarkeit klassifizieren andere Autoren die Flottengrenzwerte als marktbasierendes Instrument (vgl. etwa Elmer (2016)). Wie in Abschnitt 4.2 dargelegt, ist aufgrund des Mischcharakters vieler Instrumente in der Praxis eine eindeutige Klassifizierung nicht immer möglich beziehungsweise diskutabel.

Neben Instrumenten, die auf eine Steuerung der CO₂-Emissionen zielen, können andererseits Quoten (im Sinne einer Untergrenze) für alternative Antriebe als Exnovationsinstrument zum Einsatz kommen, die die Hersteller zu einem festgelegten Anteil erneuerbarer Antriebe am Absatz neuer Fahrzeuge verpflichten. Diese stellen implizit auch eine Quote (im Sinne einer Obergrenze) für die konventionellen Antriebe dar. Je nachdem, ob eine solche Quote handelbar ausgestaltet ist oder nicht, stellt sie ein marktbasierendes (in ersterem Falle) oder ein ordnungsrechtliches (in letzterem Falle) Instrument dar. Mit dem sogenannten Verbrennerverbot ist zudem ein ordnungsrechtliches Instrument in der Debatte, das einer 100-Prozent-Quote für alternative Antriebe entspricht und somit die Neuzulassung von Kfz mit bestimmten Technologien des Verbrennungsmotors untersagt.

Instrumente zur Exnovation haben durch die relative Verteuierung beziehungsweise die Einschränkung oder das Verbot der vorherrschenden Technologie des fossilen Verbrennungsmotors zum Ziel, den Lock-in im Bereich der konventionellen Antriebe zu überwinden.²⁷² Grundsätzlich erscheinen alle dargestellten Instrumente zur Erfüllung dieser Aufgabe **adäquat** im Sinne des Technologiebezuges. Dies gilt insbesondere dann, wenn sie sich technologieneutral gegenüber den „neuen“ Technologien als Technologiealternativen zum fossilen Verbrennungsantrieb verhalten. Denn der Ansatzpunkt der Exnovation ist hinsichtlich der neuen Technologien neutral (obwohl er gegenüber den jeweils adressierten konventionellen

272 Heyen (2016).

Technologien technologiespezifisch erscheinen mag, zum Beispiel als Verbot).

Exnovationsinstrumente sind jedoch sämtlich nicht geeignet, die ökonomischen Barrieren für den Markteintritt neuer Technologien vollständig zu überwinden. So können etwa Hemmnisse, die im Fehlen komplementärer Infrastruktur bestehen, durch die dargestellten Exnovationsinstrumente nicht beseitigt werden. Im Gegenteil können Instrumente, die die Technologie des Verbrennungsmotors grundsätzlich aus dem Markt herauszudrängen versuchen (wie etwa ein Verbrennerverbot oder eine relativ höhere Kfz-Steuer für Verbrenner), sogar neue Verzerrungen im Entscheidungsfeld verursachen. Dies liegt darin begründet, dass sie (auch bezüglich der neuen Technologien) technologiespezifisch wirken, da sie auch die Dekarbonisierungsoption der synthetischen Kraftstoffe treffen und nicht allein die Nutzung fossiler Kraftstoffe. Ein auf fossile Kraftstoffe begrenztes Verbot würde hingegen nicht gestatten, nur Neuzulassungen auszuschließen, sondern müsste den Kraftstofferverb betreffen, was unverhältnismäßig wäre.

Exnovationsinstrumente besitzen allerdings eine hohe Bedeutung als Komplementärintstrument, da sie durch das Aufbrechen der bestehenden Pfadabhängigkeiten bei der Technologie des fossil angetriebenen Verbrenners die instrumentelle Umsetzung in den weiteren Ansatzpunkten erleichtern und auf diese Weise die Kosten senken können. Blicke der Einsatz von Exnovationsinstrumenten aus, müsste die Intensität der Instrumente bei den anderen Ansatzpunkten höher ausfallen, um den bestehenden Pfadabhängigkeiten entgegenwirken zu können.²⁷³

Die **Effektivität** der Instrumente zur Erreichung einer Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs fällt unterschiedlich aus, ist aber für sämtliche Instrumente mit Unsicherheiten behaftet. Instrumente, die an den tatsächlichen CO₂-Emissionen (das heißt an der Betriebsentscheidung) ansetzen, besitzen dabei den Vorteil, dass sie potenziell eine höhere Effektivität bezüglich des Emissionsziels gewährleisten können. Denn

Instrumente, die allein auf die Anschaffung von (Neu-) Fahrzeugen Einfluss nehmen (wie etwa CO₂-Flottengrenzwerte, Steuernachteile/Malus für die Anschaffung CO₂-intensiver Antriebe oder ein Verbrennerverbot) können keinen Steuerungseffekt auf die Fahrleistung (von Alt- und Neufahrzeugen), den eingesetzten Kraftstoff (erneuerbar oder fossil) und die Nutzungsdauer emissionsintensiver Altfahrzeuge entwickeln.

Preisbasierte Instrumente zur CO₂-Bepreisung besitzen gegenüber mengenbasierten Instrumenten den Nachteil, dass bei unbekannten Grenzvermeidungskosten der gesetzte CO₂-Preis höher oder niedriger als zur Zielerreichung nötig gewählt sein kann und mithin das Emissionsziel unter Umständen nicht punktgenau erreicht wird. Bei mengenbasierten Instrumenten benötigt der Regulierer zur Sicherstellung der Zielerreichung hingegen keine Information über die Grenzvermeidungskosten, sondern legt lediglich das Mengenziel fest, sodass die punktgenaue Erreichung des Emissionsziels theoretisch gewährleistet ist.²⁷⁴ Preisbasierte Instrumente besitzen jedoch, sofern die zukünftige Entwicklung des Preissignals politisch glaubwürdig festgelegt ist, eine höhere Innovationswirkung, da aufseiten der privaten Akteure eine höhere Investitionssicherheit besteht als bei mengenbasierten Instrumenten mit volatilen Preisen. Im Falle der diskutierten Ausweitung des europäischen Emissionshandelssystems auf den Verkehrssektor ist die Effektivität dadurch gefährdet, dass Emissionszertifikate zwischen den Sektoren und den involvierten Nationalstaaten gehandelt werden können und somit die nationale Zielerreichung im Verkehrssektor nicht sichergestellt wäre.²⁷⁵ Ähnliches gilt auch für die mögliche Einrichtung eines nationalen sektorenübergreifenden Zertifikathandelssystems. Allein ein mengenbasiertes Instrument, das sich auf den Verkehrssektor beschränkt, kann theoretisch die punktgenaue Erreichung des Sektorziels gewährleisten.

²⁷⁴ Michaelis (1996), S. 36 ff.

²⁷⁵ Die Erreichung des Emissionsziels im Verkehrssektor wäre lediglich in dem sehr unwahrscheinlichen Fall gewährleistet, dass der Zertifikatspreis im (sektorenübergreifenden) Emissionshandel den Grenzvermeidungskosten des Emissionsziels im Verkehrssektor entspräche. Inwiefern Emissionsziele für einzelne Sektoren neben einem globalen Ziel sinnvoll sind, ist diskutabel, jedoch nicht Gegenstand der Untersuchung dieser Studie, die von der Annahme ausgeht, dass das Sektorziel für den Verkehr erreicht werden soll.

²⁷³ So zeigen etwa Boston Consulting Group und Prognos in ihren Berechnungen, dass ein geringerer CO₂-Preisimpuls die Notwendigkeit von Förderinstrumenten für die Anschaffung alternativer Antriebe erhöht (BCG; Prognos (2019), S. 4).

Die **Kosteneffizienz** des Abbaus der Barriere eines Carbon Lock-in ist nach ökonomischer Theorie bei marktbasierenden Instrumenten höher als bei ordnungsrechtlichen, da bei marktlichen Entscheidungen über Art und Umfang der einzusetzenden Substitute für den fossilen Verbrennungsantrieb jene Technologien zum Einsatz kommen, die (im Rahmen der regulatorischen Freiheitsgrade) die geringsten Grenzvermeidungskosten aufweisen.²⁷⁶ Der theoretisch hohe Grad der Technologieutralität (hinsichtlich der alternativen Antriebe) aller hier zur Exnovation diskutierten Instrumente belässt jedoch selbst bei ordnungsrechtlichen Instrumenten eine hohe Anzahl an Freiheitsgraden bei der Technologiewahl und ermöglicht so prinzipiell eine hohe Kosteneffizienz bei der Überwindung des Carbon Lock-in. Voraussetzung für die tatsächliche Effizienz rein marktlicher Mechanismen ist, dass das Entscheidungsfeld vor dem Regulierungsgriff weitgehend unverzerrt ist. Wie die Analysen in Kapitel 3 gezeigt haben, ist dies jedoch im Bereich des motorisierten Straßenverkehrs nicht gegeben, sodass die Verzerrungen auch bei Einsatz der diskutierten Instrumente fortgeschrieben würden. Der alleinige Einsatz der hier diskutierten Instrumente kann daher eine kosteneffiziente Überwindung des Carbon Lock-in nicht gewährleisten.

Die Kosteneffizienz einzelner Instrumente kann zudem durch die spezifische Attraktivitätsminderung bestimmter Technologien (Verbrennerverbot, höhere Kfz-Steuer/Malus für Verbrennungsantriebe) infrage gestellt sein. Denn derartige Instrumente schließen unter Umständen auch einzelne emissionsarme Substitute (in diesem Fall synthetische Kraftstoffe) aus, die sich (langfristig) als Teil eines kosteneffizienten Technologiemixes erweisen könnten.

Hinsichtlich der **Transaktionskosten** der Regulierung ist davon auszugehen, dass die Kosten für die Politikformulierung und Entscheidungsfindung sowie die Implementation der Regulierung insbesondere bei der Einführung neuer komplexer Regulierungsinstrumente (wie Quotenregelungen für alternative Antriebe) relativ hoch ausfallen dürften. Das Verbot von Verbrennungsmotoren könnte hingegen unter Umständen recht simpel ausgestaltet sein, sofern lediglich die (Neu-)Zulassung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ausgeschlossen

sen wird. In der Praxis sind aber auch hier vermutlich Ausnahmeregelungen zu erwarten, die die Komplexität des Instruments erhöhen. Werden hingegen lediglich bestehende Instrumente angepasst oder erweitert (wie bei einer CO₂-orientierten Reform der Aufwand- und Verbrauchsteuern oder einer Ausweitung des Emissionshandels) kann auf bestehende Institutionen und Organisationen zu deren Umsetzung zurückgegriffen werden, sodass hier relativ betrachtet geringere (zusätzliche) Transaktionskosten für Politikformulierung, Entscheidungsfindung und Implementation der Regulierung anfallen dürften. So gab es etwa auf EU-Ebene bereits einmal Überlegungen, Energiesteuern am Energie- und CO₂-Gehalt auszurichten,²⁷⁷ die gegebenenfalls wieder aufgenommen werden könnten. Die Transaktionskosten der Regulierungsdurchführung und -überwachung werden zum einen durch die Komplexität der Regulierung bestimmt, zum anderen aber auch durch die Anzahl der Transaktionspartner und die Häufigkeit der Transaktion im Sinne eines Eingriffs zur Durchführung und Überwachung der Regulierung. Hinsichtlich der Häufigkeit ist daher zu erwarten, dass Instrumente, die auf die Fahrzeuganschaffung beziehungsweise -zulassung abzielen (wie ein Verbrennerverbot, CO₂-Flottengrenzwerte, Fahrzeugquoten oder eine CO₂-orientierte Kfz-Steuerreform beziehungsweise ein Malus für Verbrennungsmotoren) einen Transaktionskostenvorteil gegenüber Instrumenten mit hoher Transaktionsfrequenz (wie etwa eine CO₂-Steuer, der Emissionshandel oder eine CO₂-orientierte Reform der Energiesteuern) aufweisen. Werden zudem lediglich bestehende Regulierungsinstrumente angepasst (etwa durch reine Steuersatzanpassungen bei der Kfz-Steuer oder anderen Aufwand- und Verbrauchsteuern) ändern sich die Transaktionskosten der Regulierungsdurchführung ceteris paribus gegenüber dem Status quo kaum. Die Zahl der Transaktionspartner lässt sich grundsätzlich gering halten, indem Upstream-Lösungen angewandt werden (also etwa bereits der Hersteller oder Großhändler Entrichtungspflichtiger der CO₂-Bepreisung ist). Upstream-Lösungen lassen sich für die verschiedenen Instrumente unterschiedlich gut implementieren. Bei Instrumenten, die beim Endverbraucher ansetzen (wie etwa eine CO₂-orientierte Kfz-Steuer) ist die Anzahl der Transaktionspartner per definitionem deutlich höher als bei Instrumenten, die beispielsweise auf Ebene der Hersteller ansetzen (wie Flottengrenzwerte oder Fahr-

276 Stavins (2003).

277 Gawel; Purkus (2015).

zeugquoten). Bei Instrumenten, die auf unterschiedlichen Ebenen der Wertschöpfungskette ansetzen können (wie Energie- und CO₂-Steuern oder der Emissionshandel), besteht hingegen ein größerer Gestaltungsspielraum zur Reduktion der Transaktionspartner.

Die diskutierten Instrumente zur Exnovation – wie alle anderen Ansätze, die nicht Lasten vollständig subventionieren – stehen sämtlich in einem gewissen **Zielkonflikt** mit der Erschwinglichkeit des motorisierten Individualverkehrs. Denn sie suchen durch die relative Verteuerung beziehungsweise den Ausschluss der vorherrschenden Technologie des fossilen Verbrennungsmotors den Rückgriff auf emissionsärmere Technologieoptionen mit (zumindest kurzfristig) höheren privaten Kosten anzureizen. Dies gilt (wie die Analysen in Kapitel 3 gezeigt haben) im Falle der meisten im Rahmen dieser Studie betrachteten Technologieoptionen für die Total Cost of Ownership, zumindest aber (wie im Falle des batterieelektrischen Verkehrs) für die Anschaffungskosten. Diesem Zielkonflikt kann teilweise durch eine gezielte Rückverteilung eventueller Einnahmen aus abführenden Exnovationsinstrumenten (wie einer CO₂-Besteuerung, auktionierten Emissionszertifikaten oder einem Malus für CO₂-intensive Antriebe) begegnet werden. Freilich funktioniert ein solcher Ansatz jedoch nur begrenzt, da ab einem gewissen Punkt mit zunehmender Effektivität des Exnovationsinstruments auch die Einnahmenbasis erodiert – bei maximaler Effektivität fallen keine Einnahmen mehr an. Zudem besteht ein gewisser industriepolitischer Zielkonflikt zwischen der Verdrängung des fossilen Verbrennungsmotors und der starken Spezialisierung der deutschen Automobilindustrie auf die Verbrennertechnologie. Dieser erscheint besonders gravierend im Falle von Instrumenten, die zukünftige technische Effizienzsteigerungen und/oder die Nutzung synthetischer erneuerbarer Kraftstoffe im Verbrennungsmotor ausschließen beziehungsweise verteuern (wie beim Verbrennerverbot oder Kfz-Steuererhöhungen/Malus für Verbrennungsmotor-Kfz der Fall).

Die **politische Umsetzbarkeit** der diskutierten Instrumente hängt von verschiedenen Instrumenteneigenschaften ab. Grundsätzlich ist anzunehmen, dass eine Anpassung bestehender Regulierungsinstrumente eher umsetzbar sein dürfte als die Einführung neuer Regulierungsinstrumente, insbesondere die Einführung neuer Steuern. Gleichwohl könnte die aktuelle Debatte

um die Unzulänglichkeit der bisherigen Klimapolitik auch ein Gelegenheitsfenster für die Einführung neuer Instrumente darstellen.²⁷⁸ Daneben stellt sich die Frage, ob eine Entscheidung über die Einführung beziehungsweise Anpassung eines Instruments auf nationaler oder europäischer Ebene (wie bei Emissionshandel oder Flottengrenzwerten) erfolgt beziehungsweise erfolgen muss. Entscheidungen auf europäischer Ebene erfordern eine Zustimmung anderer Mitgliedstaaten und erschweren somit unter Umständen die (kurz- bis mittelfristige) politische Machbarkeit und damit auch die Erreichung der (kurz- bis mittelfristigen) Emissionsminderungsziele. Zudem können hier politische Zyklen für die Anpassung von Instrumenten etabliert sein. So sind etwa die Flottengrenzwerte für das Jahr 2030 erst jüngst auf EU-Ebene beschlossen worden,²⁷⁹ was eine zeitnahe Änderung beziehungsweise Verschärfung unwahrscheinlich erscheinen lässt.

Für die politische Umsetzbarkeit entscheidend ist zudem, welche Verteilungs- beziehungsweise Belastungswirkungen mit einem Regulierungsinstrument einhergehen. Die Verfolgung von Partikularinteressen und Lobbyismus können in der politischen Praxis zur Folge haben, dass regulatorische Preis- oder Mengenfestsetzungen von der eigentlichen politischen Zielsetzung abweichen. Der theoretische Vorteil mengenbasierter Instrumente bei der Effektivität der Zielerreichung kann sich daher in der politischen Praxis als deutlich geringer oder nicht existent herausstellen, wenn die Mengenfestsetzung bei der Instrumentengestaltung Ergebnis eines Verhandlungsprozesses ist und nicht der ursprünglichen Emissionszielsetzung folgt. Wie oben zu den Zielkonflikten bereits dargestellt, ist davon auszugehen, dass alle diskutierten Exnovationsinstrumente mit einer Verteuerung des motorisierten Individualverkehrs und somit zunächst auch mit einer finanziellen Belastung eines Großteils der Wählerschaft einhergehen, was (bei alleiniger Einführung) die politische Umsetzbarkeit erschweren dürfte. Sofern dabei Einnahmen für die öffentliche Hand generiert werden, können diese allerdings zur Abmilderung der finanziellen Belastung an die Privatakteure zurückgeführt und dabei gegebenenfalls auch verteilungspolitische Ziele verfolgt werden. Nach polit-ökonomischer Theorie ist der Einfluss von Interessengruppen

²⁷⁸ Heyen (2016), S. 16.

²⁷⁹ Europäische Kommission (2019).

umso größer, je kleiner und homogener sie sind, da sie ihre Interessen besser organisieren können.²⁸⁰ Es ist daher davon auszugehen, dass Instrumente, die auch die Unternehmen (direkt) finanziell belasten (wie etwa die Einführung einer generellen CO₂-Bepreisung), schwieriger durchzusetzen sein dürften als Instrumente, die (überwiegend) die große und heterogene Gruppe der Endverbraucher belasten (wie etwa eine Erhöhung von Energiesteuern, von denen energieintensive Unternehmen bislang oftmals weitgehend ausgenommen sind).

Zudem kann sich die politische Durchsetzbarkeit von Instrumenten auch aufgrund ihrer Marktnähe unterscheiden. Marktbasierte Instrumente besitzen gegenüber ordnungsrechtlichen den Nachteil, dass sämtliche erfassten Emissionen bepreist werden, während bei ordnungsrechtlichen Instrumenten Emissionen, die unterhalb eines festgeschriebenen Emissionsniveaus liegen, für die betroffenen Akteure kostenlos sind. In der Wahrnehmung der Akteure geht das ordnungsrechtliche Instrument daher mit geringeren finanziellen Belastungen einher, was den politischen Widerstand gegen die Umsetzung schmälern dürfte.

Zwischenfazit

Die Rahmung einer Dekarbonisierungspolitik im motorisierten Straßenverkehr durch Instrumente zum Marktaustritt fossiler Energieträger ist von zentraler Bedeutung, da gegen die verzerrungsbedingten Wettbewerbsnachteile der emissionsarmen Technologien eine (rasche) Technologiesubstitution nur schwierig und mit hohen finanziellen Aufwendungen der öffentlichen Hand gelingen kann. Der Versuch, allein durch Fördermaßnahmen für emissionsarme Technologien die angestrebte Dekarbonisierung zu erreichen, wäre insbesondere ineffizient, da gleichzeitig weiterhin (implizite) Subventionierungen im Bereich der konventionellen Technologien bestehen, die durch entsprechende Fördermaßnahmen kompensiert werden müssten. Ohne einen Exnovationsansatz droht daher eine finanzielle Überforderung der öffentlichen Hand. Eine Preiskorrektur zulasten der Technologie des konventionellen Verbrenners scheint daher als Push-Faktor zum Abschmelzen der bestehenden Wettbewerbsvorteile des konventionellen Verbrenners aufgrund von Pfadabhängigkeiten und Subventionierungen angezeigt.

²⁸⁰ Olson (1965).

Als theoretisch beste Lösung bietet sich hier aus ökonomischer Sicht eine Ausweitung des bestehenden europäischen Emissionshandelssystems auf den Straßenverkehr an. Dieser Ansatz bietet den Vorteil, dass seine marktbasierte Konstruktion eine hohe Effizienz der Dekarbonisierung des Straßenverkehrs gewährleisten kann, da Emissionen dort vermieden werden, wo dies zu den geringsten Kosten möglich ist. Da der Emissionshandel sektorenübergreifend wirksam ist, würden zudem im Verkehrssektor lediglich bis zu jenem Umfang Emissionen reduziert, wo dies nicht in anderen Sektoren günstiger möglich ist. Dieser statische Effizienzvorteil (bei der Verfolgung des übergeordneten Ziels der Emissionsvermeidung) ginge jedoch unter Umständen zulasten der Effektivität bei der Erreichung des nationalen Emissionsziels im Verkehrssektor. Dies ist dann der Fall, wenn die für den Verkehrssektor vorgegebene Emissionsreduktion teilweise in anderen Sektoren und/oder anderen Mitgliedstaaten kostengünstiger zu erbringen wäre. Zur Sicherstellung der Effektivität in Bezug auf ein nationales Sektorziel kann daher auch auf Sektorbasis ein nationaler Emissionshandel installiert werden, der jedoch entsprechend mit einer a priori geringeren Gesamteffizienz verbunden ist. Eine EU-weite Lösung besäße zudem den Vorteil, dass sie keine Wettbewerbsverzerrung zwischen den Staaten der Europäischen Union zur Folge hätte, wie dies bei einem isolierten nationalen Ansatz der Fall wäre. Defizite in der Praxis (zum Beispiel hohe Transaktionskosten, Effektivitätsprobleme aufgrund langwieriger Einführung, Leakage-Effekte in andere Bereiche oder unsichere Preissignale) können die theoretische Überlegenheit eines Emissionshandels jedoch zunichtemachen.

Unter Umständen kann sich daher eine CO₂-Besteuerung durch einen emissionsbezogenen Umbau der verkehrsbezogenen Steuern als überlegenes Exnovationsinstrument erweisen. Gegenüber einem (sektorenübergreifenden) Emissionshandel besitzt ein solcher Ansatz den theoretischen Vorteil, stabile Preissignale zu senden, Leakage-Effekte zu vermeiden und unter Umständen schneller umsetzbar zu sein.²⁸¹ Dem stehen jedoch

²⁸¹ In der Praxis können jedoch wie beim Emissionshandel diverse Ausgestaltungsmängel (zum Beispiel polit-ökonomisch verzerrte Ausgestaltung der Steuersätze oder Besteuerungsgrundlage und informationsbedingte Defizite (etwa Steuerschlupflöcher), Transaktionskosten) diese

hohe Hürden bei der Europäisierbarkeit aufgrund der Steuerhoheit der Nationalstaaten, damit einhergehende Verzerrungen im innereuropäischen Wettbewerb sowie mögliche Zielverfehlungen bei der Emissionsreduktion aufgrund inadäquater Steuersätze gegenüber. Wie beim Emissionshandel sollte auch bei einer Steuerlösung aus oben genanntem Grunde eine EU-weite Lösung in Form einer Mindestbesteuerung für CO₂ angestrebt werden. Erscheinen auch hier die Umsetzungshürden zu hoch, könnte die CO₂-Besteuerung hilfsweise national erfolgen.

Flottengrenzwerte als komplementäres Instrument können den aus einer CO₂-Bepreisung resultierenden Kaufkraftabzug abmildern, da sie die Hersteller direkt mit Emissionsreduktionsvorgaben belegen und diese entsprechend angehalten sind, emissionsarme Antriebe anzubieten, um Strafzahlungen zu vermeiden. Sofern höhere Kosten für emissionsarme Antriebe nicht vollständig auf die Konsumenten überwält werden können, träge die finanzielle Bürde somit nicht allein die Konsumenten, wie dies bei einer alleinigen CO₂-Bepreisung der Fall wäre.

theoretischen Vorteile eines Besteuerungsansatzes zunichtemachen. Die vermeintliche Überlegenheit eines dem theoretischen Ideal entsprechend ausgestalteten gegenüber einem im politischen Prozess unzulänglich ausgestalteten Instruments (sogenannter Nirwana-Ansatz) kann sich daher in Praxis als Trugschluss erweisen und sollte nicht handlungsführend bei der Eignungsbeurteilung und Auswahl von Politikinstrumenten sein.

Ein Verbrennerverbot hingegen ist mit verschiedenen Unzulänglichkeiten behaftet und sollte daher lediglich als Ultima Ratio in Betracht gezogen werden. Denn einerseits schließt ein Verbrennerverbot den Strang der Emissionsreduktion durch Effizienzsteigerungen bei der Verbrennertechnologie und/oder den Einsatz synthetischer Kraftstoffe aus – und damit unter Umständen eine in Teilbereichen des motorisierten Straßenverkehrs effiziente Lösung zur Dekarbonisierung. Andererseits sind massive politische Widerstände gegen ein Verbot der derzeit vorherrschenden und derzeit auch mit den geringsten privaten Kosten verbundenen Technologie zu erwarten. Zudem erscheint das politische Commitment eines solchen Ansatzes schwierig, da kaum zu erwarten ist, dass ein Verbrennerverbot bei ausbleibendem technischen Fortschritt und/oder Kostendegressionen bei den technologischen Alternativen aufrechterhalten würde.

In jedem Falle sind zur Exnovation bestehende Förderungen für die konventionellen Technologien im Steuer- und Subventionssystem abzubauen, da sie den Einsatz klimaschädlicher Technologieoptionen begünstigen und widersprüchliche Anreize platzieren.²⁸² Da im Bereich der Pkw ein beachtlicher Teil der Neuzulassungen im Dienstwagensegment stattfindet, könnte etwa der Abbau des Dienstwagenprivilegs für konventionelle Antriebe ein wirksamer Hebel in einem Exnovationsinstrumentarium sein.

282 Köder; Burger (2016), S. 6 f.

„CO₂-Bepreisung“ als Instrument

Instrumentencharakterisierung:

Die Bepreisung von CO₂-Emissionen als ein Regulierungsinstrument, das zumindest theoretisch direkt an den Treibhausgasemissionen ansetzt, weist eine hohe Nähe zum Regulierungsziel der Reduktion von Treibhausgasemissionen auf. Sie stellt ein Instrument zur Demeritorisierung der Klimaexternalität von Treibhausgasemissionen dar. Hierzu erfolgt eine regulatorisch determinierte Bepreisung von CO₂-Emissionen in Form eines Emissionshandelssystems oder einer Besteuerung. Nicht-CO₂-Treibhausgasemissionen können dabei mittels Konversionsfaktoren in CO₂-Äquivalente umgerechnet und auf diese Weise miterfasst werden. Die CO₂-Bepreisung stellt folglich ein marktbasierendes Instrument dar, das entweder mengensteuernd (Emissionshandel) oder preisstuernd (Besteuerung) wirkt, indem CO₂-intensive Dienstleistungen und Güter verteuert werden. Sie zielt somit auf eine Kostenallokation nach dem Verursacherprinzip und hat die Exnovation „grauer“ Technologien zum Ziel. Durch die

Ausgestaltung als staatliche Abgabe ist eine CO₂-Besteuerung zudem mit der Erzielung öffentlicher Einnahmen verbunden, Gleiches gilt im Falle einer Auktionierung von Zertifikaten auch für den Emissionshandel, jedoch nicht bei der kostenlosen Vergabe handelbarer Zertifikate (sogenanntes Grandfathering). Werden öffentliche Einnahmen erzielt, können sie zur Refinanzierung öffentlicher Aufgaben oder zur Reduktion staatlicher Belastungen an anderer Stelle dienen.

Einsatzfelder des Instruments:

Eine CO₂-Bepreisung kann prinzipiell in allen Bereichen zum Einsatz kommen, wo Treibhausgasemissionen relevant sind beziehungsweise vermieden werden sollen, und ist somit in ihrem Einsatzbereich nicht auf den Verkehrssektor beschränkt. Im Verkehrssektor kann sie insbesondere als Exnovationsanreiz Wirksamkeit entfalten, da sie eine relative Verteuerung des emissionsintensiven fossilen Verbrennungsantriebs gegenüber emissionsärmeren Alternativen zur Folge hat. Durch die absolute Verteuerung emissionsbehafteter Mobilität (gegenüber einer Referenz ohne eine CO₂-Bepreisung) kann sie zudem Anreize für die Reduktion von Verkehrsleistungen in diesem Bereich setzen (Suffizienzanreiz). Sie kann jedoch nicht die diversen Barrieren bei den neuen Technologieoptionen beheben.

Stärken und Schwächen des Instruments:

Als marktbasiertes Instrument liegt eine Stärke der CO₂-Bepreisung in der Ermöglichung einer (in kurzfristiger Perspektive) kosteneffizienten Emissionsminderung, da sie einen Ausgleich der kurzfristigen Grenzvermeidungskosten zeitigt. Sie besitzt somit eine hohe statische Vermeidungskosteneffizienz und setzt dabei Anreize für alle Optionen zur Emissionsvermeidung (also sowohl für eine Technologiesubstitution als auch für Verkehrsvermeidung). Eine weitere Stärke besteht in der sektorübergreifenden Anwendbarkeit, die weitere Effizienzpotenziale heben kann. Sofern die Bepreisung in Form eines Zertifikatehandels vorgenommen wird, besitzt sie zudem den Vorzug, eine punktgenaue Erreichung des Emissionsziels zu gewährleisten. Aus fiskalischer Sicht besitzt die CO₂-Bepreisung in einigen Fällen (siehe oben) den Vorteil der Generierung öffentlicher Einnahmen und damit der Möglichkeit zur Entlastung der privaten Akteure an anderer Stelle.

Eine Schwäche der CO₂-Bepreisung liegt darin, dass sie als technologieneutrales Instrument im Verkehrssektor in ein Entscheidungsfeld mit geringer Technologieoffenheit eingreift und somit bestehende Verzerrungen fortschreibt beziehungsweise nicht behebt. Als alleiniges Instrument ist sie für eine effiziente Dekarbonisierung somit nicht geeignet. Auch kann die preisstärkende Wirkung der CO₂-Bepreisung unerwünschte Verteilungseffekte und Erschwinglichkeitsprobleme verursachen. Sofern sie als preisbasiertes Instrument (Besteuerung) ausgestaltet ist, ist zudem die mit ihr einhergehende Emissionsreduktion ex ante nicht eindeutig. Es drohen somit Zielverfehlungen und/oder Nachsteuerungen beim Steuersatz, die politikinduzierte Unsicherheit bei den privaten Akteuren verursachen. Die Festlegung des Steuersatzes sowie eventueller Ausnahmen von der Besteuerung sind anfällig für politökonomische Verzerrungen und daraus folgende Ineffizienzen. Bei einem Emissionshandelssystem werden die Preise zwar marktlich ermittelt und sind somit nicht anfällig für politökonomische Verzerrungen, hier werden allerdings die Emissionsobergrenze sowie die Allokationsregeln im politischen Prozess festgelegt, worunter die theoretische Effizienz und Effektivität in der Praxis leiden können. Die angesprochene punktgenaue Zielerreichung eines Zertifikatehandels ist zudem für den Verkehrssektor auch nur in dem Falle gewährleistet, dass es ein Handelssystem gibt, dass sich allein auf den Verkehrssektor beschränkt. In einem sektorübergreifenden System kann der Emissionshandel die Erreichung der Sektorreduktionsziele nicht mehr gewährleisten.

Ausgestaltungsfragen:

Bei der Ausgestaltung des Instruments der CO₂-Bepreisung ist eine Vielzahl von offenen Fragen zu klären, die Rückwirkungen auf die Effektivität und Effizienz des Instruments haben. Zunächst stellt sich die Frage der Reichweite des Instruments. Bei der Besteuerung heißt dies: Wird sie sektorübergreifend oder nur in einzelnen Nicht-Emissionshandelssektoren eingesetzt und in welchen? Beim Emissionshandel stellt sich die Frage, ob das bestehende System auf den Verkehrssektor ausgeweitet oder ob ein separates System für den Verkehrssektor aufgebaut werden soll. Aufbauend auf der grundsätzlichen Frage, ob ein preisbasiertes (Steuer) oder ein mengenbasiertes (Emissionshandel) System zum Einsatz kommen soll, stellen sich weitere Ausgestaltungsfragen für das jeweilige Instrument.

Bei der CO₂-Besteuerung ist das Zusammenspiel mit dem bestehenden Emissionshandelssystem zu klären. Generell stehen CO₂-Besteuerung und Emissionshandel in einem eher substitutiven Verhältnis, und es stellt sich die Frage, ob es zu Doppelbesteuerungen kommt und wie sich diese vermeiden lassen. Daneben stellen sich verschiedene Fragen im Zusammenhang mit der konkreten Ausgestaltung der Besteuerung. Sofern die CO₂-Besteuerung sektorübergreifend ausgestaltet ist, muss entschieden werden, ob differenzierte Steuersätze oder ein einheitliches Preissignal Anwendung finden. Es ist zu klären, wie die Festlegung des Steuersatzes erfolgt: Ist dieser fixiert oder erfolgen Anpassungen im Zeitablauf? Folgen die Anpassungen einem ex ante festgelegten Pfad oder sind sie Resultat eines Automatismus (etwa in Abhängigkeit von der Emissionsreduktion)? Zudem ist zu klären, ob zur Vermeidung von Carbon-Leakage-Effekten und/oder aus Gründen der Sozialverträglichkeit Ausnahmen von der Besteuerung geschaffen werden.

Bei der Anwendung eines Emissionshandelssystems stellt sich die Frage nach der Obergrenze. Hierzu müsste zunächst ein Emissionsreduktionspfad hin zum 2030-Ziel durch die Politik festgelegt werden. Es ist sodann zu klären, welche Akteure am Handel mit den Zertifikaten teilnehmen sollen (Importeure, Händler, Verbraucher etc.). Zudem ist die Frage des Allokationsmechanismus offen, also ob die Zertifikate an die Marktteilnehmer versteigert werden oder eine kostenlose Vergabe auf Basis vergangener Emissionen erfolgt (Grandfathering).

Im Zusammenspiel mit weiteren Politikinstrumenten muss einerseits die Passfähigkeit der CO₂-Bepreisung mit dem Mix bestehender Internalisierungsinstrumente (etwa der CO₂-Komponente in der Kfz- oder der Mineralölsteuer) beziehungsweise die effiziente Einbettung in eine mögliche allgemeine Abgabenreform sichergestellt werden. Andererseits ist ihre Rolle im Zusammenspiel mit Innovationsinstrumenten zu klären: Kommt sie lediglich begleitend zum Einsatz oder soll sie als Hauptinstrument einen starken Impuls setzen?

Nachgelagert stellt sich zudem die Frage, für welche Zwecke das eventuell generierte öffentliche Einkommen aus der CO₂-Bepreisung verwendet werden soll.

„Verbrennerverbot“ als Instrument

Instrumentencharakterisierung:

Das Instrument des Verbrennerverbots zielt auf die gezielte Auslese der Technologie des Verbrennungsmotors aus der Menge der Technologieoptionen für die Erbringung von Transportdienstleistungen im motorisierten Straßenverkehr. Das Verbrennerverbot stellt ein ordnungsrechtliches Instrument dar, indem es die Neuzulassung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor untersagt. Als Instrument, das die Nutzung von Neufahrzeugen mit Verbrennungsmotor im öffentlichen Straßenverkehr unterbindet, ist es jener Klasse von Instrumenten zuzuordnen, die am Betrieb ansetzen.

Einsatzfelder des Instruments:

Als Instrument, das gezielt auf die Ausscheidung der Incumbent Technology zielt, kann ein Verbrennerverbot zur Setzung von Exnovationsanreizen genutzt werden. Möglich ist dabei der Einsatz im gesamten Sektor des motorisierten Straßenverkehrs als auch in Teilsektoren, beispielsweise im Pkw-Bereich. Grundsätzlich ist aber auch ein breitflächiger Einsatz über den Verkehrssektor hinaus denkbar, der entsprechend auch Diesellaggregate etc. betreffen würde. Durch die Auslese der Bestandstechnologie setzt ein solches Instrument freilich auch Innovationsanreize, da die Nachfrage nach alternativen Antriebstechnologien steigt.

Stärken und Schwächen des Instruments:

Eine deutliche Stärke eines Verbrennerverbots ist in der hohen Planbarkeit für die privaten Akteure zu sehen. Die Gewissheit über den Zeitpunkt des Ausscheidens der Bestandstechnologie schafft hohe Anreize für Innovationstätigkeit in der Automobilindustrie, um rechtzeitig alternative Antriebe anbieten zu können, sofern die Umsetzung des Verbots glaubwürdig für die privaten Akteure erscheint. Der regulatorische Ausschluss der Technologie stellt zudem eine hohe Effektivität bei der Verdrängung der Incumbent Technology sicher. Eine weitere Stärke ist darin zu sehen, dass Halter von Verbrennungsfahrzeugen aufgrund der Beschränkung auf Neuzulassungen Bestandsschutz genießen und durch den Einsatz des Instruments nicht negativ betroffen sind.

Die Beschränkung auf Neuzulassungen stellt jedoch gleichzeitig auch eine Schwäche des Instruments dar, da (bei isoliertem Einsatz) keine Dekarbonisierungsanreize auf den Bestand an Verbrennungsfahrzeugen entstehen. Entsprechend ist die Effektivität des Instruments auf den Bereich von Neuzulassungen beschränkt. Die lange technische Nutzbarkeit von Fahrzeugen kann daher die Erreichung der Emissionsminderungsziele gefährden. Eine weitere Schwäche des Instruments liegt zudem im grundsätzlichen Ausschluss der Technologieoption des Verbrennungsmotors und damit einerseits auch der Dekarbonisierungsoption der synthetischen Kraftstoffe im Verbrennungsmotor sowie andererseits dem Ausschluss der Verbrennertechnologie in Einsatzfeldern, wo sie die Option mit der höchsten Effizienz darstellen könnte (zum Beispiel bei nur sehr geringen Fahrleistungen des Fahrzeugs).

Ausgestaltungsfragen:

Hinsichtlich der konkreten Ausgestaltung eines Verbrennerverbots sind verschiedene Fragen zu klären. So stellt sich die Frage nach der Anwendungsbreite des Instruments, also ob das Verbrennerverbot auf sämtliche Fahrzeugsektoren Anwendung finden soll oder auf einzelne Sektoren, etwa Pkw-Zulassungen oder Privatfahrzeuge, beschränkt wird. Zudem ist die zeitliche Sequenz des Instruments festzulegen: Findet lediglich ein vollständiges Verbot von Verbrennungsmotoren ab einem Zieljahr statt oder erfolgt ein schrittweises Verbot (etwa durch eine absinkende Quote).

Aufgrund der dargelegten Eigenschaft des Instruments, lediglich auf Neuzulassungen einzuwirken, ist zudem zu klären, wie Vorzieheffekte vermieden werden können, denn aufgrund der langen Nutzbarkeit von Fahrzeugen können diese die Effektivität des Instruments gefährden. Zuletzt stellt sich auch die Frage, ob und wie eine politisch robuste Implementierung des Instruments erfolgen kann. Denn Vested Interests der deutschen Automobilindustrie im Bereich der Verbrennertechnologie lassen erwarten, dass hohe politische Widerstände gegen die Einführung eines Verbrennerverbots eine ineffektive und ineffiziente Ausgestaltung zur Folge haben können oder die Einführung sogar vollständig unmöglich machen.

5.4.2 Komplementäre Infrastruktur

Instrumente im Bereich des Ansatzpunkts der komplementären Infrastruktur haben zum Ziel, die Bereitstellung der notwendigen komplementären Infrastruktur für die Nutzung der verschiedenen in Abschnitt 3.4 aufgezeigten Technologieoptionen zur Dekarbonisierung sicherzustellen. Auf diese Weise sollen die bestehenden, in Abschnitt 3.6 aufgezeigten Barrieren im Bereich der komplementären Infrastruktur abgebaut werden.

Tabelle 7 zeigt die analysierten Instrumentenoptionen im Ansatzpunkt „Komplementäre Infrastruktur“ in der Übersicht.

Da die komplementäre Infrastruktur im Bereich des konventionellen Verbrennungsmotors bereits gut ausgebaut ist, ist der Handlungsbedarf hier deutlich geringer als bei den neuen Antriebskonzepten. Entsprechend richtet sich die Betrachtung im Folgenden auch im Wesentlichen auf die Frage der Infrastrukturbereitstellung für die neuen Antriebskonzepte (vgl. Abbildung 15). Die weiteren Ausführungen dieses Abschnitts konzentrieren sich dabei auf den kritischen Bereich der komplementären Infrastruktur zur Energieversorgung der Fahrzeuge. Regulierungsentscheidungen sind darüber hinaus freilich auch in anderen Bereichen der komplementären Infrastruktur zu treffen (etwa bei der Parkraumbewirtschaftung

oder Regelungen zur Mitnutzung von Busspuren durch bestimmte Fahrzeuge). Die Regulierungsentscheidungen im Bereich der komplementären Infrastruktur werden de lege lata häufig auf kommunaler Ebene getroffen und sollten gut aufeinander sowie auf die technologiepolitischen Entscheidungen der übergeordneten föderalen Ebenen abgestimmt sein (Konsistenz des Instrumentenmixes, siehe hierzu auch Abschnitt 4.4.5).

Dem Regulierer stellt sich zunächst grundsätzlich die Frage, wie viele und welche komplementären Infrastrukturen bereitgestellt werden sollten. Zur Herstellung von Technologieoffenheit im Entscheidungsfeld wäre prinzipiell der Aufbau der komplementären Infrastruktur für alle Technologieoptionen zur Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs notwendig, bei denen Marktunvollkommenheiten bei der Infrastrukturbereitstellung vorliegen. Ein solcher Ansatz wäre jedoch mit hohen volkswirtschaftlichen und im Falle von Subventionierungen auch fiskalischen Kosten verbunden, die sich insbesondere dann als versunkene Kosten herausstellen können, wenn die Nutzung der Technologieoption an anderen Barrieren als der komplementären Infrastruktur oder auch an schlichtweg hohen volkswirtschaftlichen Kosten scheitert. Der Aufbau (sämtlicher) komplementärer Infrastruktur für alle Technologieoptionen ist daher nicht erstrebenswert und ein „Picking the winners“

Instrumentenoptionen im Ansatzpunkt „Komplementäre Infrastruktur“

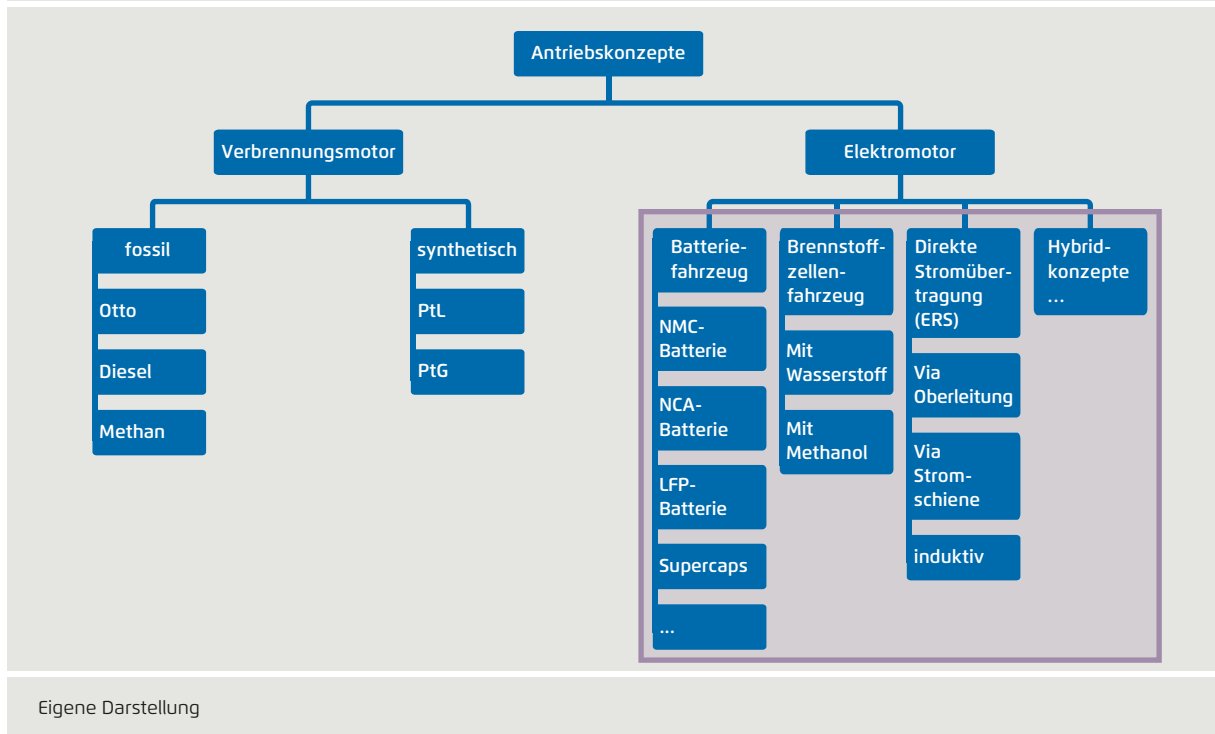
Tabelle 7

Staatliche Bereitstellung komplementärer Infrastruktur
Staatliche(r) Förderung/Errichtung/Betrieb komplementärer Infrastruktur
Errichtungsgebot für komplementäre Infrastruktur

Eigene Darstellung

Verortung der Regulierung komplementärer Infrastruktur im Technologiebaum

Abbildung 15



durch den Regulierer scheint unvermeidlich.²⁸³ Da die komplementäre Infrastruktur kritisch für den Einsatz der alternativen Technologien ist, bestimmt diese Frage auch über die Instrumente bei den anderen Ansatzpunkten, an denen technologiespezifisch eingegriffen werden sollte (vgl. die folgenden Abschnitte 4.4.3–4.4.5), und ist daher von zentraler Bedeutung.

Dem Regulierer bieten sich zur Sicherstellung der Bereitstellung komplementärer Infrastruktur grundsätzlich zwei Herangehensweisen. Er kann die Infrastruktur entweder selbst bereitstellen (staatliche Bereitstellung) oder die privaten Akteure dazu anhalten, die entsprechende Infrastruktur vorzuhalten (private Bereitstellung). Eine staatliche Bereitstellung bedeutet nicht unbedingt, dass der Staat die Infrastruktur auch selbst errichten und betreiben muss. Er kann diese Leistungen auch bei privatwirtschaftlichen Akteuren kontrahieren und auf diese Weise die Bereitstellung öffentlich sicherstellen, bestimmt dabei jedoch über Art und Umfang der bereitzustellenden

Infrastruktur.²⁸⁴ Die private Bereitstellung kann wiederum durch marktbasierende Instrumente finanziell angereizt oder durch rechtliche Gebote vorgeschrieben werden. Art und Umfang werden dann (im Rahmen der regulatorischen Freiheitsgrade) durch die privaten Akteure bestimmt. Als marktbasierendes Instrument ist dem Ansatzpunkt der komplementären Infrastruktur die staatliche Förderung der Errichtung und/oder des Betriebs von Infrastruktur zuzuordnen. Als ordnungsrechtliches Instrument kommt die Verpflichtung zur Bereitstellung komplementärer Infrastruktur für die emissionsarmen Technologien infrage, zum Beispiel ein Gebot, bei Gebäudeneubauten Ladeinfrastruktur für BEV anzulegen, oder die Verpflichtung zur Vorhaltung von Wasserstoff- oder Gaszapfsäulen für Tankstellenbetreiber.

Im Bereich der komplementären Infrastruktur erfordert die **Adäquanz** des Instrumentariums den Einsatz technologiespezifischer Instrumente, da auch die komplementäre Infrastruktur selbst in der Regel nur spezifisch für einzelne Technologieoptionen nutzbar ist, wie die

283 Fox et al. (2017).

284 Mühlenkamp et al. (2007).

Analysen in Abschnitt 3.6 gezeigt haben (etwa Ladesäulen für BEV oder Oberleitungen für Pantografen-LKW). Diese Anforderung können alle Instrumente (staatliche Bereitstellung, Förderung der Infrastrukturbereitstellung, ordnungsrechtliches Gebot zur Bereitstellung), die diesem Ansatzpunkt zugeordnet werden, erfüllen.

Da mit der Bereitstellung der komplementären Infrastruktur für emissionsarme Antriebstechnologien Barrieren für den Einsatz der entsprechenden Technologien abgebaut werden, ist grundsätzlich davon auszugehen, dass eine Substitution des konventionellen fossilen Verbrennungsantriebs erleichtert wird. Unter diesem Gesichtspunkt ist also zu konstatieren, dass die genannten Instrumente **effektiv** hinsichtlich der Reduktion von Treibhausgasen im motorisierten Straßenverkehr sein können. Allerdings kann ein (vollständig) nutzerfinanzierter Ausbau der komplementären Infrastruktur den Einsatz der jeweiligen emissionsarmen Technologieoptionen hemmen, da gegenüber einem öffentlich finanzierten Ausbau die Betriebskosten der Fahrzeuge höher lägen. Eine Förderung komplementärer Infrastruktur senkt jedoch gleichzeitig die Kosten (sowohl monetäre als auch nicht-monetäre, etwa durch geringere Fahrzeiten zur nächsten Ladesäule) der Nutzung der zugehörigen Antriebstechnologien. Entsprechend werden mit derartigen Maßnahmen keine Anreize für eine Reduktion der Fahrleistung im motorisierten Straßenverkehr gesetzt, gegebenenfalls entstehen sogar Anreize für höhere Fahrleistungen mit entsprechenden Auswirkungen auf die gesamte Pro-Kopf-Fahrleistung und den Modal Split. Die geringeren spezifischen Emissionen je km durch die Antriebssubstitution können daher durch höhere Emissionen aufgrund der höheren Fahrleistung im motorisierten Straßenverkehr teilweise (im Extremfall vollständig) kompensiert werden. Aufgrund der gegenläufigen Effekte (Substitutionseffekt vs. Rebound-Effekt/Einkommenseffekt) hinsichtlich der Reduktion von Treibhausgasen ist die Effektivität unklar. Bei isoliertem Einsatz von Instrumenten im Bereich der komplementären Infrastruktur ohne gleichzeitigen Einsatz von Suffizienzinstrumenten (siehe Abschnitt 4.4.4) kann daher die Effektivität der Instrumente herabgesetzt sein.

Die Notwendigkeit differierender komplementärer Infrastruktur für die unterschiedlichen Technologieoptionen macht den Einsatz differenzierter technologie-spezifischer Instrumente notwendig. Daher ist auch

die **Kosteneffizienz** der Instrumente abhängig von den Technologien und/oder dem Nutzungsumfeld zu bewerten. Insbesondere im Pkw-Bereich werden die Fahrzeuge häufig überwiegend in einem begrenzten räumlichen Umkreis genutzt, sodass die kritische Masse öffentlicher Ladepunkte insbesondere auch im räumlichen Kontext bedeutsam ist und die Regulierung in diesem Bereich entsprechend auch räumlich spezifisch wirken sollte.

Im Bereich der synthetischen Kraftstoffe, die technisch auf den Verbrennungsmotor zurückgreifen, ist die komplementäre Infrastruktur bereits weitgehend vorhanden (etwa ein großflächiges Netz an Tankstellen und Werkstätten) und wird von privatwirtschaftlichen Akteuren profitabel betrieben. In diesem Bereich erscheint der Einsatz zusätzlicher Instrumente zur Förderung der komplementären Infrastruktur daher nicht notwendig und ein Verzicht auf spezifische regulatorische Eingriffe mithin angezeigt. Regulierungsbedarf kann sich jedoch bei der Infrastruktur für die Erzeugung synthetischer Kraftstoffe ergeben.

Die batterieelektrische Mobilität ist neben der eventuellen Vorhaltung von privaten Ladesäulen bei Besitzern von BEV auch auf die Existenz öffentlicher Ladesäulen angewiesen (etwa für Nutzer ohne festen privaten Stellplatz oder für Langstreckenfahrten). Die Bereitstellung der öffentlichen Ladesäuleninfrastruktur kann grundsätzlich privatwirtschaftlich erfolgen, teilweise ist dies auch bereits der Fall. Die geringe Kapitalintensität für den Aufbau von Ladesäulen lässt auch keine signifikanten Budgetrestriktionen in diesem Bereich erwarten. Zudem ermöglichen Synergieeffekte bei der Bereitstellung öffentlicher Ladesäulen Skaleneffekte beim Aufbau einer öffentlichen Ladeinfrastruktur. Aufgrund indirekter (regionaler) Netzwerkeffekte bei der Bereitstellung öffentlicher Ladesäulen ist die Bereitstellung der ersten Einheiten jedoch nicht profitabel, sodass hier eine Förderung in Form von Subventionen Abhilfe schaffen kann. Die grundsätzlich private Refinanzierbarkeit öffentlicher Ladeinfrastruktur stellt jedoch an eine kosteneffiziente Instrumentierung den Anspruch, dass derartige Förderinstrumente lediglich bis zur Erreichung einer kritischen Masse eingesetzt werden, von der an sich eine profitable private Bereitstellung erreichen lässt.

Bei der Versorgungsinfrastruktur für wasserstoffbetriebene Mobilität bestehen hohe Synergieeffekte mit

der industriellen Wasserstoffnutzung. Die relativ kurze Betankungsdauer von Wasserstofffahrzeugen lässt zudem grundsätzlich die Mit-Nutzbarkeit konventioneller Tankstellen zu. Eine profitable private Bereitstellung scheint daher grundsätzlich möglich. Ob hier eine zusätzliche staatliche Förderung notwendig ist, ist daher fraglich. Auch bei wasserstoffbetriebener Mobilität bestehen jedoch indirekte Netzwerkeffekte der Betankungsinfrastruktur, sodass hier eine Förderung bis zu Erreichung einer kritischen Masse an Wasserstofftankstellen effizient sein kann.

Die Bereitstellung elektrischer Oberleitungen für Lkw stellt ein natürliches Monopol dar, da hier der Aufbau von Parallelstrukturen nur zu ineffizient hohen Kosten möglich wäre.²⁸⁵ Aus diesem Grund ist eine technologie-spezifische Regulierung in diesem Bereich ökonomisch angezeigt. Da die Autobahnen, auf denen Oberleitungen zu errichten sind, in der Regel im öffentlichen Besitz sind, ist in diesem Bereich auf absehbare Zeit eine Bereitstellung durch den Staat notwendig. Wie oben dargelegt, muss der Staat diese Infrastruktur jedoch nicht unbedingt selbst errichten und betreiben.

Unter dem Gesichtspunkt der Kosteneffizienz sind marktbasierende Instrumente ordnungsrechtlichen Geboten zur Errichtung komplementärer Infrastruktur vorzuziehen, da letztere die private Kosten-Nutzen-Erwägung der Errichtung unterbinden.²⁸⁶ In der Folge kann es zu einem ineffizient starken oder schwachen Ausbau der komplementären Infrastruktur kommen. Eine staatliche Bereitstellung komplementärer Infrastruktur sieht sich vor die Herausforderung gestellt, dezentrales Wissen über Kosten und Nutzen der Infrastruktur erlangen zu müssen, um den effizienten Umfang der bereitzustellenden Infrastruktur zu ermitteln. Da dies aus verschiedenen Gründen (zum Beispiel Transaktionskosten oder strategisches Verhalten der privaten Akteure) nicht in vollem Maße möglich sein wird, ist davon auszugehen, dass es bei staatlicher Bereitstellung zu einem ineffizienten Infrastrukturangebot kommen wird.

Sowohl bei ordnungsrechtlichem als auch bei marktbasierendem Instrumentarium sind bei privater Bereitstellung der komplementären Infrastruktur hohe **Transaktions-**

kosten zu erwarten. Gebote zur Errichtung der komplementären Infrastruktur bedürfen der Einhaltungsbewachung, die gegebenenfalls (etwa Ladestationszwang bei Neubauten) eine Vielzahl von Akteuren und Transaktionen betrifft. Subventionen für die Bereitstellung komplementärer Infrastruktur wiederum müssten durch zuständige staatliche Institutionen (etwa das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle) verwaltet werden und könnten ebenfalls eine Vielzahl von Akteuren und Transaktionen umfassen. Die staatliche Bereitstellung lässt hingegen aufgrund der direkteren Weisungsbefugnis und der geringeren Anzahl betroffener Akteure und Transaktionen geringere Transaktionskosten erwarten,²⁸⁷ geht jedoch, wie oben dargestellt, mit der Gefahr höherer Ineffizienzen bei der Produktionskosteneffizienz einher.

Instrumente zur Förderung der komplementären Infrastruktur haben zur Folge, dass die Kosten der Nutzung der zugehörigen Technologie sinken. Entsprechend ist unter diesem Gesichtspunkt kein **Zielkonflikt** mit dem Ziel der Erschwinglichkeit von Mobilität zu erwarten. Allerdings profitieren aufgrund des höheren Anteils einkommensstarker Haushalte am motorisierten Individualverkehr auch vorrangig einkommensstarke Haushalte von Förderinstrumenten im Bereich des motorisierten Individualverkehrs (MIV).²⁸⁸ Sofern Hausbesitzer zur Installation von Ladepunkten verpflichtet werden und diese Kosten auf die Mieter umgelegt werden können, sind in der Folge Mietkostensteigerungen zu erwarten, die den derzeitigen politischen Bemühungen zur Eindämmung der Mietkosten entgegenstünden. Die Notwendigkeit technologiespezifischer Behandlung der komplementären Infrastruktur ermöglicht die gleichzeitige Verfolgung industriepolitischer Ziele, steht dieser jedenfalls nicht entgegen. Zielkonflikte ergeben sich bei staatlicher Förderung des Infrastrukturausbaus jedoch mit umweltpolitischen Zielsetzungen wie Lärmemissionen, Luftverschmutzung oder Landschaftszerschneidung.²⁸⁹ Denn die mit der Förderung der Infrastruktur einhergehende Vergünstigung von motorisiertem Stra-

287 Mühlenkamp et al. (2007), S. 709 ff.

288 Abhängig von der Form der notwendigen Erhebung öffentlicher Mittel zur Refinanzierung der Förderinstrumente sind einkommensstarke Haushalte aber unter Umständen auch stärker von den Belastungswirkungen betroffen, sodass der Gesamteffekt unklar ist.

289 Van Essen et al. (2019).

285 Knieps (2008).

286 Stavins (2003).

ßenverkehr setzt *ceteris paribus* Anreize für ein höheres Verkehrsaufkommen bei diesen Modalformen. Wie oben dargelegt, kann dies umweltpolitisch unerwünschte Veränderungen im Modal Split sowie eine allgemeine Erhöhung der Verkehrsleistung zur Folge haben und entsprechend ein Ansteigen der damit verbundenen Externalitäten.

Die **politische Umsetzbarkeit** der dargestellten Instrumente ist insbesondere vom Weg der Refinanzierung abhängig. Eine (vollständige) Refinanzierung durch Nutzungsgebühren führt zu entsprechenden sichtbaren finanziellen Belastungen der Infrastrukturnutzer und kann in der Folge politischen Widerstand gegen entsprechend gestaltete Instrumente hervorrufen. Eine (teilweise) Refinanzierung aus dem öffentlichen Haushalt hingegen kann die Kosten für die Bereitstellung beziehungsweise Subventionierung der komplementären Infrastruktur (teilweise) im allgemeinen Haushalt „verstecken“ und suggeriert den Infrastrukturnutzern und Wählern so eine scheinbare Kostenlosigkeit der Maßnahme,²⁹⁰ was die politische Durchsetzbarkeit der Maßnahme erleichtert. Allerdings erfordert ein solches Vorgehen unter Umständen unpopuläre Kürzungen öffentlicher Ausgaben an anderen Stellen beziehungsweise Steuererhöhungen oder zusätzliche Staatsverschuldung. Derartige Maßnahmen sind aber deutlich weniger direkt sichtbar als Nutzungsgebühren und erscheinen daher politisch leichter durchsetzbar.

Zwischenfazit

Da das Angebot komplementärer Infrastruktur grundsätzlich auch für Private ein profitables Geschäft sein kann (zum Beispiel Tankstelleninfrastruktur), sollten staatliche Instrumente für diesen Ansatzpunkt insoweit nur temporär Anwendung zur Erreichung einer gegebenenfalls erforderlichen kritischen Masse im Markt finden. Ihr Einsatz zum derzeitigen Zeitpunkt ist jedoch angezeigt, da, wie die Analysen in Kapitel 3 gezeigt haben, die komplementäre Infrastruktur mit Netzwerkeffekten einhergeht und mithin das privatwirtschaftliche Angebot erst ab einer kritischen Masse profitabel wird. Aufgrund der Regionalität von Netzwerkeffekten ist die Notwendigkeit von Regulierungsinstrumenten im Bereich der komplementären Infrastruktur vorzugsweise auch regional zu beurteilen. Kein beziehungsweise

höchstens geringer Handlungsbedarf bei der Regulierung der komplementären Infrastruktur besteht im Bereich der Drop-in-Substitute für den Verbrennungsmotor. Für den Einsatz dieser Technologieoption kann ein bestehendes, über Jahrzehnte aufgebautes Netz komplementärer Infrastruktur für den Einsatz klassischer Verbrennungsmotoren mitgenutzt werden. Allenfalls im Bereich der Erzeugung synthetischer Kraftstoffe kann hier die Notwendigkeit für regulatorische Eingriffe bestehen.

Nach Erreichung der kritischen Masse kann sich der Regulierer aus vielen Bereichen der komplementären Infrastruktur zurückziehen und das Angebot dem Kosten-Nutzen-Kalkül privatwirtschaftlicher Akteure überlassen. In Bereichen, in denen die Infrastruktur aus (eigentums-) rechtlichen Gründen zwingend staatlich bereitgestellt werden muss (etwa Oberleitungen an Bundesautobahnen), muss eine entsprechende staatliche Bereitstellung jedoch dauerhaft gewährleistet werden, da eine private Bereitstellung hier aus Rechtsgründen nicht möglich ist. Im Feld der Elektromobilität ist zudem zu beachten, dass das Angebot von Ladesäulen zwar grundsätzlich privatwirtschaftlich und kompetitiv erfolgen kann, jedoch ist zur Vorhaltung dieser Infrastruktur in der Regel der Zugriff auf das öffentliche Stromnetz notwendig, dass als natürliches Monopol einer dauerhaften staatlichen Regulierung unterliegen muss.²⁹¹ Hier sind entsprechend im Rahmen der Stromnetzregulierung die Voraussetzungen dafür zu schaffen, dass ein wettbewerbliches Angebot von Ladeinfrastruktur möglich ist, das etwa durch eine Übertragung der Monopolmacht auf die komplementären Teilmärkte (wie etwa die Bereitstellung von Ladesäulen) oder die Verweigerung des Netzzugangs gefährdet sein kann.²⁹²

In anderen Fällen müssen Barrieren für eine privatwirtschaftliche Infrastrukturbereitstellung beseitigt werden, etwa im Bau- beziehungsweise Gemeinschaftseigentumsrecht mit Blick auf private Ladestationen in Sammelgaragen.

290 Gawel (2013), S. 237 f.

291 Knieps (2007), S. 157 ff.

292 Neuhoff (2005), S. 95.

5.4.3 Innovation

Der Ansatzpunkt der Innovation verfolgt das Ziel, den neuen, emissionsarmen Technologien bei noch verbleibenden Barrieren – trotz Adressierung von Exnovation (4.4.1), Infrastruktur (4.4.2) und einem glaubwürdigen politischen Commitment (siehe 4.4.5) – in den Markt zu verhelfen. Bleiben trotz geeigneter Adressierung der zuvor genannten Ansatzpunkte Barrieren bestehen, die die Technologiewahl zwischen dem fossilen Verbrennungsantrieb und marktreifen neuen Technologien oder auch zwischen den neuen Technologien selbst verzerren, erscheint ein zusätzlicher (technologiespezifischer) regulatorischer Eingriff zur Erhöhung der Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes **adäquat**.

Zur Rechtfertigung weiterer (neben den in den Abschnitten 4.4.1 und 4.4.2 dargelegten) instrumenteller Eingriffe im Bereich „Innovation“ ist zu prüfen, welche Begründungen für eine verzerrte Technologiewahl noch verbleiben. Verbleibende Barrieren unterscheiden sich in der Regel für die verschiedenen Technologieoptionen und erfordern daher auch technologiespezifische Instrumente zu ihrer Adressierung.

Auf der Nutzerseite können dies insbesondere Budgetrestriktionen, monetäre und nicht-monetäre Kosten der Technologienutzung (zum Beispiel Einschränkungen bei der Reichweite oder Anpassungen des Nutzerverhaltens an die Anforderungen der Technologie) oder auch Informationsdefizite sein. Budgetrestriktionen können bei höheren Anschaffungskosten neuer Technologien im Vergleich mit der vorherrschenden Technologie zur Folge haben, dass Nutzer bei ihrer Kaufentscheidung selbst bei einer höheren Zahlungsbereitschaft für die neue Technologie auf ein konventionelles Fahrzeug zurückgreifen, da sie nicht die notwendigen Mittel zur Anschaffung des teureren Fahrzeugs haben. Zudem können auch bei geringeren privaten Kosten der Fahrzeugnutzung über den gesamten Lebenszyklus (Total Cost of Ownership) höhere Anschaffungskosten als beim konventionellen Fahrzeug verhindern, dass die neue Technologie zum Einsatz kommt. Bei Instrumenten, die der Überwindung von Budgetrestriktionen dienen sollen, sind Förderungen in Form zukünftiger Kostenvorteile (etwa durch eine geringere Kfz-Steuer) nur eingeschränkt adäquat, da sie finanzielle Hürden bei der Anschaffung nicht (direkt) adressieren können. One-Shot-Lösungen (wie etwa Kaufprämien) können hier theoretisch eine höhere Wirk-

samkeit entfalten, bergen aber die Gefahr der Einpreisung, was die Wirkung wiederum begrenzt. Darüber hinaus können aber auch tatsächlich höhere monetäre sowie nicht-monetäre Kosten (zum Beispiel längere „Bettungsdauer“, geringere Zuladungsvolumina oder weitere Wege zu Fachwerkstätten) von der Anschaffung neuer Technologien abhalten und so einen Markthochlauf mit einhergehenden Kostenreduktionen verhindern.²⁹³ Aber auch Informationsdefizite aufseiten der Nutzer, etwa hinsichtlich der tatsächlichen Lebenszykluskosten alternativer Antriebe oder technischer Weiterentwicklungen, können die Anschaffung neuer Technologien verhindern, obwohl sie bei voll informierten Entscheidern gegebenenfalls ausgewählt worden wären.

Die nutzerseitigen Barrieren scheinen in erster Linie im privaten Pkw-Bereich relevant, da hier der Zugang zu Krediten erschwert sein kann und der Informationsstand häufig unvollständig ist. Nutzer im Güterverkehr hingegen sind professionelle Wirtschaftsakteure, die Zugang zu Krediten für die Anschaffung neuer Fahrzeuge haben und wohlinformierte Entscheidungen über die Wahl neuer Fahrzeuge treffen (können müssen). Hier können also informatorische Instrumente ausreichend sein. Jedoch ist zu bedenken, dass Logistikunternehmen auch eine höhere Mobilität bei der Zulassung ihres Fahrzeugparks besitzen als Privatpersonen und auf höhere Kosten infolge nationaler regulatorischer Auflagen unter Umständen mit Verlagerungen in andere europäische Länder mit geringeren regulatorischen Auflagen reagieren. Daher können bei höheren monetären und nicht-monetären Kosten neuer Technologien auch im Logistikbereich Innovationsinstrumente adäquat sein. Auf der Angebotsseite können Barrieren insbesondere in Form von Kostennachteilen infolge noch nicht erfolgter Lern- und Skaleneffekte sowie aufgrund von Wissensexternalitäten verbleiben. Das Ausbleiben von Lern- und Skaleneffekten hat zur Folge, dass neue Technologien höhere Kosten aufweisen als die vorherrschende Technologie.²⁹⁴ Aufgrund der höheren Kosten bleibt auch die Nachfrage nach den neuen Technologien aus, sodass infolge fehlender Massenproduktion Lern- und Skale-

293 Die staatliche Förderung solcher Technologieoptionen lässt sich zwar, sofern alle Externalitäten internalisiert sind, aus Effizienzgesichtspunkten nicht rechtfertigen, kann aber aus politischen Gründen gleichwohl gewünscht sein.

294 Sandén; Azar (2005).

neffekte nicht (vollständig) eintreten und die Kosten der Technologie hoch bleiben. Wissensexternalitäten haben zur Folge, dass innovierende Unternehmen den Nutzen (Kostenreduktionen, technologischer Vorsprung) ihrer Innovationstätigkeit nicht vollständig selbst verwenden können, sondern ein Teil des generierten Wissens auch von Wettbewerbern genutzt werden kann. Während der Nutzen teilweise bei den Wettbewerbern anfällt, etwa da erworbenes Wissen nicht vollständig patentiert werden kann oder infolge von Mitarbeiterwechseln zu Wettbewerbern gelangt, verbleiben die Kosten der Innovation vollständig beim innovierenden Unternehmen. Dies hat zur Folge, dass die Anreize für Innovationen geschmälert sind und unter Umständen ein regulatorischer Ausgleich adäquat sein kann.²⁹⁵

Insbesondere im Pkw-Bereich stellt sich die Frage, ob alle neuen Technologien technologieneutral, etwa in Form einer Quote für alternative Antriebe, oder ausgewählte Technologien parallel technologiespezifisch gefördert werden sollten. Eine zusätzliche Förderung zur

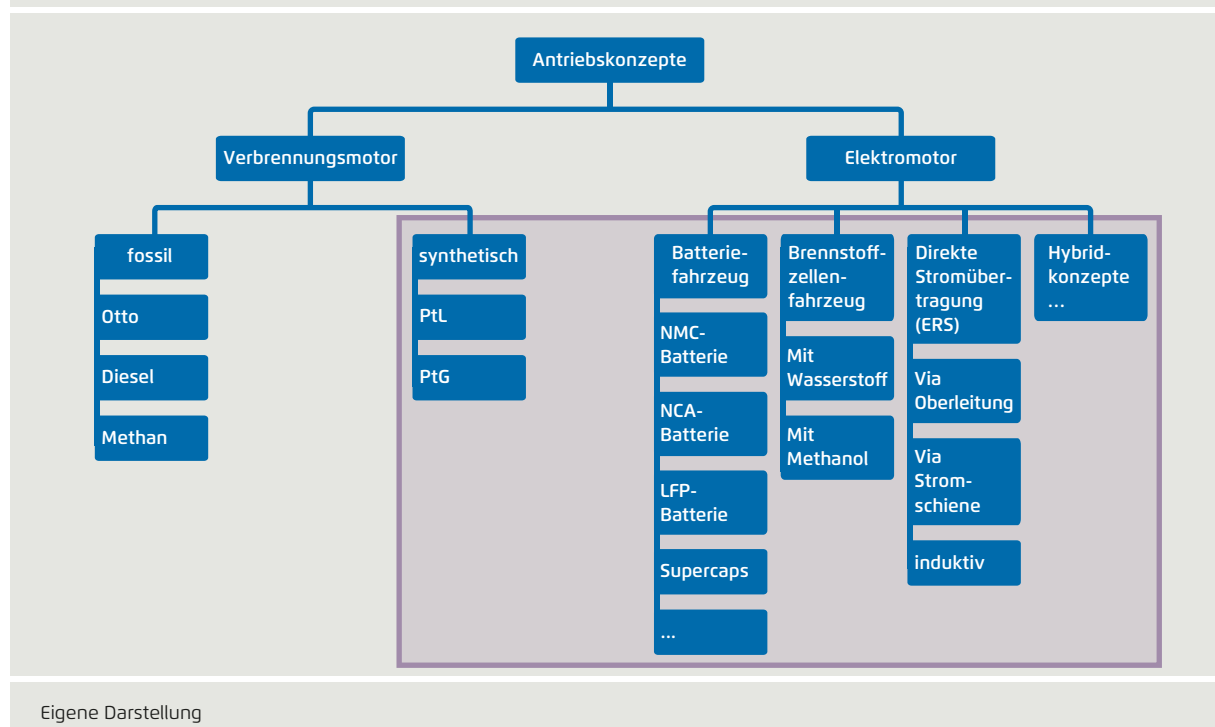
Marktdurchdringung scheint bei den PtX-Technologien, zumindest auf Ebene des Fahrzeugs, nicht angezeigt, da hier auf die weitgehend ausgereifte bestehende Technologie des Verbrennungsmotors zurückgegriffen werden kann. Die neuen Antriebskonzepte des batterieelektrischen Antriebs und der Wasserstoffbrennzelle befinden sich hingegen noch in einem relativ frühen Entwicklungsstadium. Sie sind daher derzeit noch mit hohen Kosten verbunden und es sind zukünftige Kostenreduktionen durch Lernkurven- und Skaleneffekte zu erwarten. Budgetrestriktionen, Informationsdefizite sowie Anpassungen des Nutzerverhaltens an die neue Technologie sind bei diesen Technologien daher deutlich relevanter. Entsprechend muss die Regulierung im Ansatzpunkt „Innovation“ insbesondere die Technologieoptionen des Antriebskonzepts des Elektromotors adressieren, wie Abbildung 16 noch einmal illustriert.

Es ist somit zu klären, ob für BEV und FCEV im Ansatzpunkt Innovation eine technologieneutrale oder technologiespezifische Förderung angezeigt ist. Für eine technologiespezifische Förderung spricht, dass sich die identifizierten verbleibenden Barrieren zwischen den

295 Arrow (1962b).

Verortung der Innovationsregulierung im Technologiebaum

Abbildung 16



Instrumentenoptionen im Ansatzpunkt „Innovation“

Tabelle 8

Quoten für alternative Antriebe (handelbar, nicht handelbar)
Kaufprämien
Steuervorteile (Kfz-Steuer, Dienstwagenprivileg, Maut)
Eigene Darstellung

Technologieoptionen unterscheiden. Die Unsicherheit aufseiten des Regulierers über die zukünftige Rolle der einzelnen Technologien im Verkehrssektor spricht hingegen eher für eine technologieneutrale Förderung. Tabelle 8 zeigt die analysierten Instrumentenoptionen im Ansatzpunkt „Innovation“ in der Übersicht.

Mögliche Innovationsinstrumente können einerseits mengenbasiert sein. Dies ist bei Quoten der Fall, die als Herstellerquoten für Einzeltechnologien (BEV, FCEV) oder generell für emissionsarme Antriebstechnologien ausgestaltet sein können. Sie können entweder ein ordnungsrechtliches Instrument darstellen, wenn sie nicht handelbar sind, oder ein marktbasiertes Instrument, wenn die Quotenerfüllung handelbar ausgestaltet ist. Andererseits können preisbasierte Instrumente in Form von Kaufprämien beziehungsweise Boni oder in Gestalt von Steuer- und Abgabeprivilegien (etwa beim Dienstwagenprivileg, durch eine Reduktion der Kfz-Steuer oder ermäßigte Tarife bei einer Maut) zum Einsatz kommen. Abgesehen von einer möglichen Reduktion des Mautsatzes einer entfernungsabhängigen Maut setzten sämtliche Innovationsinstrumente an der Investition an, auch wenn im Falle einer Reduktion der Kfz-Steuer unter Umständen jährliche finanzielle Vorteile gewährt werden. Diese sind jedoch unabhängig von der tatsächlichen Fahrleistung und daher in ihrer Anreizwirkung auf die Nutzer theoretisch einer einmaligen Kaufsubvention äquivalent.

Bei allen diskutierten Instrumenten ist aufgrund ihrer Förderwirkung für emissionsarme Antriebe davon auszugehen, dass sie durch die angestoßene Substitution des fossilen Verbrenners grundsätzlich einen Beitrag zur Emissionsreduktion leisten können und somit prinzipiell **effektiv** hinsichtlich des Ziels der Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs sind. Das tatsächliche Ausmaß ist dabei abhängig von der Höhe und Ausgestaltung der Fördermaßnahme sowie vom Zusammenwirken

mit anderen Instrumenten (siehe auch Abschnitt 4.4.6). Die Effektivität aller Instrumente im Ansatzpunkt ist dadurch eingeschränkt, dass sie lediglich auf den Bereich der Neufahrzeuge zielen und somit keine Emissionsreduktionen im Bestand (etwa durch Reduktion der Verkehrsleistung oder Anpassung der Fahrweise) erzielen können.

Quoten als mengenbasierten Instrumenten ist dabei eine höhere Effektivität zu attestieren, da sie durch die Mengenvorgaben theoretisch eine höhere Zielgenauigkeit beim Anteil der neuen Technologien am Fuhrpark gewährleisten.²⁹⁶ Gleichwohl ist mit einer Quote für Antriebstechnologien nicht festgelegt, mit welcher Intensität die unterschiedlichen Technologieoptionen genutzt werden, und somit, welche tatsächlichen Emissionen damit einhergehen.²⁹⁷

Preisbasierte Instrumente besitzen hinsichtlich der Effektivität den grundsätzlichen Nachteil, dass infolge von Informationsdefiziten eine punktgenaue Erreichung des Mengenziels in der Regel nicht möglich ist. Hinzu kommt bei direkten finanziellen Anreizen wie einer Kaufprämie oder Boni, dass unklar ist, inwieweit sie tatsächlich zu Preisreduktionen und somit zu einem höheren Anteil emissionsarmer Antriebe bei Neuzulassungen führen oder ob sie lediglich als Windfall-Profits bei den Herstellern und Händlern verbleiben.²⁹⁸ Diese Gefahr stellt sich bei indirekteren Förderinstrumenten wie dem Dienstwagenprivileg oder der Kfz-Steuer in geringerem Maße, da die Einpreisung in den Kaufpreis zu sichtbaren

296 Stavins (2003).

297 Denn eine Quote für Antriebstechnologien kann auch zur Folge haben, dass die Fahrzeuge mit emissionsärmeren Antrieben lediglich als Zweitfahrzeuge genutzt werden, der Großteil der Verkehrsleistung aber weiterhin mit fossil betriebenen Verbrennungsfahrzeugen erbracht wird.

298 Arguedas; van Soest (2009).

Preiserhöhungen führen würde. Weil derartige indirekte Subventionen jedoch nicht vollständig zum Zeitpunkt der Investition budgetwirksam werden, können sie höheren Anschaffungskosten für emissionsarme Technologien und damit einhergehenden Budgetrestriktionen nicht (vollständig) begegnen. Aus diesem Grunde können sich auch bei diesen Instrumenten Einbußen bei der Effektivität ergeben, wenn Budgetrestriktionen als ökonomische Barriere für den Einsatz der neuen Technologie(n) fungieren.

Eine punktgenaue Erreichung von Emissionszielen durch die genannten Innovationsinstrumente ist zudem nur möglich, wenn die neuen Technologien vollständig emissionsfrei sind. Ist dies nicht der Fall (etwa durch den Einsatz von Graustrom im elektrischen Antrieb, den überwiegenden Betrieb von PHEV mit fossilem Kraftstoff oder durch Treibhausgasemissionen in der Vorkette der Produktion), erweist sich als problematisch, dass Instrumente mit einer Förderwirkung keine Anreize für Suffizienz setzen und es somit zu Rebound-Effekten in Form höherer Verkehrsleistung und damit zu geringeren Emissionsreduktionen, theoretisch sogar zu Emissionssteigerungen kommen kann.

Die Effektivität (isolierter) regulatorischer Vorteile für emissionsarme Antriebe beim Dienstwagenprivileg ist dahingehend beschränkt, dass dies nur für den Teilbereich der Dienstwagen an den Neuzulassungen eine Wirkung entfalten kann. Dieser Umstand machte also gegebenenfalls einen komplementären Einsatz weiterer Instrumente für den Bereich der privaten Anschaffung von Neufahrzeugen notwendig, sofern das gesamte Pkw-Segment adressiert werden soll.

Im Bereich der Innovation sind – wie dargestellt – insbesondere Barrieren im Bereich der Diffusion neuer Technologien sowie in Form von Budgetrestriktionen aufgrund höherer Anschaffungskosten innovativer Technologieoptionen zu überwinden. Ein **kosteneffizienter** Abbau dieser Barrieren stellt unterschiedliche Anforderungen an die Instrumentengestaltung. Während für die Überwindung von Budgetrestriktionen zuführende, das heißt auch preisbasierte Instrumente unumgänglich sind, kann die Marktdurchdringung auch mithilfe mengenbasierter²⁹⁹ sowie ordnungsrechtlicher Instrumente

erreicht werden. Aus Kosteneffizienzgesichtspunkten sind marktbasierende Instrumente ordnungsrechtlichen vorzuziehen, da sie Entscheidungsspielräume bei den privaten Akteuren belassen. Auf diese Weise besitzen die privaten Akteure Anreize, Kostensenkungspotenziale zu identifizieren und nutzen, und so eine höhere Kosteneffizienz bei der Marktdurchdringung innovativer, emissionsarmer Technologien sicherzustellen.³⁰⁰ Sollten etwa Quoten als Innovationsinstrument Anwendung finden, so sollten diese handelbar ausgestaltet sein, um eine kosteneffiziente Erreichung zu ermöglichen. Zudem versprechen in Bezug auf die Marktdurchdringung mengenbasierte Instrumente eine höhere Kosteneffizienz, da sie eine zielgenaue Erreichung der angestrebten Marktdurchdringung sicherstellen können und dabei die Kostenminimierungspotenziale des Marktes nutzen.

Preisbasierte Instrumente in Form von Subventionen besitzen hingegen gegenüber mengenbasierten Instrumenten den Vorteil, dass sie nicht allein Barrieren im Bereich der Diffusion neuer Technologien adressieren können, sondern zudem auch Budgetrestriktionen schmälern oder überwinden können. Letztere sind insbesondere auf der Nachfrageseite von Relevanz. Das Postulat der Kosteneffizienz würde freilich fordern, dass Subventionen zur Überwindung von Budgetrestriktionen nur jenen Akteuren zukommen, die tatsächlich mit Budgetrestriktionen konfrontiert sind. Vor diesem Hintergrund könnte eine Beschränkung auf das Kleinwagensegment, wo Budgetrestriktionen mutmaßlich die größte Relevanz besitzen, effizienzsteigernd sein. Zur Kombination des Vorteils preisbasierter Ansätze zur Adressierung von Budgetrestriktionen mit dem Effektivitätsvorteil mengenbasierter Ansätze könnte daher ein komplementärer Einsatz mengenbasierter Instrumente auf der Angebotsseite und preisbasierter Instrumente auf der Nachfrageseite Anwendung finden.³⁰¹

mengenbasierte Instrumente durch Preissenkungen der Hersteller zum Abbau von Budgetrestriktionen beitragen. Unter der Annahme vollständigen Wettbewerbs bei den Herstellern (das heißt Null-Gewinnen im Marktgleichgewicht) sind Preissenkungen allerdings langfristig nicht umsetzbar.

299 Sofern die Gewinnspannen der Hersteller im Bereich alternativer Antriebe Preissenkungen erlauben, können auch

300 Stavins (2003).

301 Roberts; Spence (1976).

Das Kriterium der Kosteneffizienz stellt gleichzeitig die Anforderung, dass Innovationsinstrumente lediglich zeitlich begrenzt zum Einsatz kommen, da viele der zu adressierenden ökonomischen Barrieren im Innovationsbereich durch Kostennachteile in Folge geringer Marktdurchdringung begründet sind. Derartige Barrieren verschwinden mit zunehmender Marktdurchdringung, etwa durch Fortschritte bei der Technologieentwicklung und Skaleneffekte bei der Produktion, mit einhergehenden Kosten- und Preisreduktionen. Eine dauerhafte Anwendung von Innovationsinstrumenten würde die Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes mithin langfristig einschränken, was die Kosteneffizienz der Maßnahme schmälerte.

Die **Transaktionskosten** der Regulierung sind bei Quoten als Upstream-Lösungen deutlich geringer zu erwarten als bei Förderinstrumenten für die Anschaffung emissionsarmer Fahrzeuge. Quoten für neue Antriebe auf Herstellerseite sind vergleichsweise leicht zu überwachen, da die Zusammensetzung der abgesetzten Fahrzeuge recht einfach zu erfassen ist beziehungsweise bei handelbaren Quoten zudem die Vorhaltung der entsprechenden Zertifikate recht leicht überprüfbar erscheint. Zudem ist aufgrund der (gegenüber den Fahrzeugkäufern) geringen Anzahl von Fahrzeugherstellern die Anzahl der involvierten Akteure gering. Dies stellt sich im Falle von Förderinstrumenten für die Fahrzeuganschaffung anders dar, da hier unter Umständen individuelle Förderanträge gestellt und bearbeitet werden müssen. Die größere Anzahl der involvierten Akteure, nämlich neben den zuständigen Behörden auch die Vielzahl von Fahrzeugkäufern, macht viele Transaktionen notwendig und geht mit entsprechend hohen Transaktionskosten einher. Bezieht sich das Instrumentarium jedoch auf Anpassungen bei der (ja bereits bestehenden) Kfz-Steuer, ist davon auszugehen, dass die zusätzlichen Transaktionskosten gegenüber dem Status quo recht gering ausfallen dürften.

Eventuelle **Zielkonflikte** mit verteilungspolitischen Zielen, die sich aufgrund der (anfänglich) höheren privaten Kosten der emissionsarmen Technologieoptionen ergeben können, können lediglich durch preisbasierte Ansätze in Form von Subventionen für die Nutzer der neuen Technologien abgemildert oder aufgelöst werden. Mengenbasierte Instrumente können zwar die Effektivität der Marktdurchdringung der neuen Technologien

gewährleisten, eventuellen Kostensteigerungen auf der Nachfrageseite infolge der Markteinführung teurerer, emissionsarmer Technologien können sie jedoch nicht begegnen.³⁰² Um möglichen Härten höherer Preise bei der Anschaffung zu begegnen, scheinen Kaufprämien oder andere One-Shot-Lösungen eine höhere Eignung aufzuweisen als finanzielle Vorteile über die Lebensdauer des Fahrzeugs (wie etwa Ermäßigungen bei der Kfz-Steuer oder einer Maut), da Letztere zum Zeitpunkt der potenziellen Anschaffung noch nicht zur Verfügung stehen. Wie bereits bei der Förderung komplementärer Infrastruktur in Abschnitt 4.4.2 dargestellt, ist jedoch aufgrund ihres überproportionalen Anteils am MIV davon auszugehen, dass in erster Linie einkommensstarke Haushalte von Förderinstrumenten für die Anschaffung von Neufahrzeugen profitieren dürften.

Die Notwendigkeit, Innovationsinstrumente technologiespezifisch auszugestalten, ermöglicht es (wie bereits zur komplementären Infrastruktur in 4.4.2 dargestellt) dem Regulierer gleichzeitig, industriepolitische Interessen zu verfolgen,³⁰³ etwa indem jene Technologieoptionen gefördert werden, die den industriepolitischen Zielen in hohem Maße zuträglich sind. Die mit den Innovationsinstrumenten einhergehende Förderwirkung für die Nutzung des motorisierten Straßenverkehrs steht allerdings im Konflikt mit umweltpolitischen Zielsetzungen wie der Eindämmung von Lärmemissionen oder der Zerschneidung von Landschaften und Ökosystemen.

Die **politische Umsetzbarkeit** von preisbasierten Förderinstrumenten und mengenbasierten Instrumenten dürfte sich vor dem Hintergrund der aufgezeigten verteilungspolitischen Unterschiede deutlich für diese zwei Typen von Innovationsinstrumenten unterscheiden. Mengenbasierte Instrumente sind zwar (anders als preisbasierte Instrumente) neutral hinsichtlich des öffentlichen Haushalts, lassen jedoch tendenziell höhere Fahrzeugkosten erwarten und rufen in der Folge politische Widerstände hervor. Die Subventionierung neuer Antriebe führt hingegen zu geringeren Kaufpreisen, sofern sie nicht von Herstellern und Händlern eingepreist werden, und lassen

302 Inwiefern sich die höheren Kosten neuer Technologien bei einer Quote für neue Antriebe tatsächlich auch in höheren Preisen für die Nachfrage widerspiegeln, hängt vom Verhältnis der Preiselastizitäten von Angebot und Nachfrage ab.

303 Hallegatte et al. (2013), S. 4.

entsprechend geringeren Widerstand erwarten. Zwar macht die Subventionierung eine Gegenfinanzierung aus dem öffentlichen Haushalt notwendig, jedoch ist die Herkunft der Mittel (Kürzungen an anderen Stellen, Erhöhung der Staatsverschuldung, Steuererhöhungen) oftmals intransparent und mithin die Betroffenheit unklar, sodass bei einem solchen Ansatz geringerer politischer Gegendruck zu erwarten ist.³⁰⁴

Die polit-ökonomische Durchsetzbarkeit ist zudem auch hinsichtlich der Frage, ob das Instrument an der Investition oder am Betrieb ansetzt, von Relevanz. Unterbleibt der Anreiz, bereits bei der Investition emissionsarme Technologieoptionen zu wählen, erschwert dies die politische Durchsetzbarkeit einer emissionsmindernden Regulierung des Betriebs nach erfolgter Investitionsentscheidung, da dies eine rückwirkende Nutzenminderung der Investition für die Nutzer darstellt und entsprechende Widerstände hervorrufen dürfte.

Zwischenfazit

Innovationsinstrumente zielen darauf ab, Barrieren bei der Marktdurchdringung emissionsarmer Technologieoptionen, die trotz adäquater Adressierung der anderen Ansatzpunkte verbleiben, zu überwinden. Sie sind häufig als Subventionen auszugestalten, um insbesondere der Barriere höherer anfänglicher Kosten emissionsärmerer Technologien für Privatakteure begegnen zu können. Auf diese Weise werden gegenwärtige Preisdifferenziale zuungunsten neuer Technologien ausgeglichen, soweit sie nicht bereits mit Hilfe preislicher Exnovationsansätze (Verteuerung fossiler Mobilität) beseitigt werden können. Subventionierende Innovationsinstrumente (Finanzhilfen, Steuervergünstigungen) gehen entsprechend regelmäßig mit zusätzlichen Kosten für die öffentliche Hand einher und sollten daher nur punktuell (wo adäquat) eingesetzt werden. Zudem ist aus Budgetgründen, aber auch aufgrund der dargestellten Reduktion der Barrieren mit fortschreitender Marktdurchdringung, der Einsatz öffentlicher Förderung im Bereich Innovation nur temporär begrenzt angezeigt. Der größte Handlungsbedarf im dekarbonisierungspolitischen Ansatzpunkt der Innovation scheint bei der Hochskalierung der neuen Antriebskonzepte (BEV und FCEV) gegeben zu sein, da hier Kostennachteile aufgrund

fehlender Marktdurchdringung (und damit einhergehend noch zu durchlaufenden Lern- und Skaleneffekten) bestehen. Da Budgetrestriktionen insbesondere im Bereich der privaten Fahrzeuganschaffung von Bedeutung sind (höhere Anschaffungskosten bei fehlenden Mitteln für Neuanschaffungen), scheint der Einsatz von Förderinstrumenten zudem vor allem im Pkw-Bereich auf der Nachfrageseite und hier insbesondere im Segment der unteren Fahrzeugklassen angezeigt. Die Möglichkeit der Flexibilität bei der Wahl nationaler Zulassungen von Fahrzeugflotten bei Logistikunternehmen macht jedoch unter Umständen auch im Lkw-Segment finanzielle Förderungen notwendig, um Leakage-Effekte nationaler Regulierung zu vermeiden. Geringer Handlungsbedarf hinsichtlich der Antriebstechnologie kann bei den synthetischen Kraftstoffen ausgemacht werden, da hier auf die ausgereifte und vergleichsweise preisgünstige Technologie des Verbrennungsmotors zurückgegriffen werden kann. Pfadabhängigkeiten im Bereich der fossilen Kraftstoffe können jedoch die Marktdurchdringung mit synthetischen Kraftstoffen verhindern und hier unter Umständen ein korrigierendes regulatorisches Eingreifen notwendig machen.

Bei der Ausgestaltung möglicher Förderinstrumente ist zu beachten, dass insbesondere bei direkten Kaufprämien die Gefahr der Einpreisung durch Hersteller und Händler die Effektivität der Instrumente gefährdet. Eine flächendeckende oder zeitlich nicht klar begrenzte Ausschüttung von Kaufprämien erscheint daher nicht empfehlenswert. Sowohl bei der Förderwürdigkeit prämierter Transaktionen als auch beim potenziellen Käuferkreis sind gezielte Fokussierungen ratsam. Technologisch könnte hingegen ein Neutralitätsakzent gesetzt werden (zum Beispiel alle Arten von Elektrofahrzeugen).

Im Bereich der Pkw findet ein beachtlicher Teil der Neuzulassungen im Dienstwagensegment statt. Innovationsinstrumente müssen daher insbesondere in diesem Segment wirksam sein. Innovationsfördernde Anpassungen des sogenannten Dienstwagenprivilegs im Steuerrecht können daher unter Umständen von größerer Bedeutung für die Effektivität der Regulierung sein als die Ausschüttung von Kaufprämien. Auch Vorschriften zur Anschaffung alternativer Antriebe in der öffentlichen Beschaffung könnten einen Beitrag zur Marktdurchdringung der entsprechenden Technolo-

304 Auf die Intransparenz der Finanzierung aus dem öffentlichen Haushalt weist etwa Gawel (2013, S. 237) hin.

„Kaufprämien“ als Instrument

Instrumentencharakterisierung:

Die Ausschüttung von Prämien für den Kauf von Fahrzeugen mit ausgewählten Antriebstechnologien kann zur Adressierung möglicher Budgetrestriktionen angewandt werden. Da Kaufprämien an der Investitionsentscheidung ansetzen, nicht aber an den tatsächlichen Emissionen, ist die Nähe zum Regulierungsziel eher gering. Aus diesem Grunde haben Kaufprämien auch keine Anreizwirkung auf die Betriebsentscheidungen der Fahrzeughalter. Kaufprämien stellen ein marktbasiertes Instrument dar, das durch Preissteuerung Einfluss auf die Investitionsentscheidungen der privaten Akteure zu nehmen versucht. Ihre Ausschüttung erfordert die Bereitstellung öffentlicher Mittel und somit (wie jede Subvention) die Refinanzierung aus dem öffentlichen Haushalt.

Einsatzfelder des Instruments:

Kaufprämien können in Bereichen Anwendung finden, in denen Budgetrestriktionen und/oder Kosten-Nutzen-Erwägungen vom Kauf zum Marktpreis abhalten. Sie können somit ein adäquates Instrument zur Überwindung von Budgetrestriktionen darstellen. Zudem können sie vorübergehende Kosten-nachteile neuer Technologieoptionen ausgleichen, die aufgrund noch nicht (in gleichem Maße wie bei den etablierten Technologieoptionen) erfolgter Lernkurven- und Skaleneffekte bestehen. Durch den (teilweisen) Ausgleich der Kaufpreisdifferenz gewinnt die geförderte Technologieoption nachfrageseitig an Attraktivität gegenüber den anderen Technologieoptionen und daraus resultierende Nachfragesteigerungen erlauben den Eintritt kostensenkender Lernkurven- und Skaleneffekte.

Stärken und Schwächen des Instruments:

Eine gewichtige Stärke von Kaufprämien liegt darin, dass sie theoretisch das Potenzial besitzen, gleichzeitig Barrieren auf der Angebots- und Nachfrageseite adressieren zu können. Durch die Stimulation der Nachfrage können mit steigenden Absatzzahlen realisierbare Skalen- und Lerneffekte auf der Angebotsseite umgesetzt werden. Gleichzeitig können mögliche Budgetrestriktionen auf der Nachfrageseite überwunden werden.

Allerdings stehen dem einige Schwächen gegenüber. Zunächst ist unklar, in welchem Umfang Kaufprämien tatsächlich zu einem geringeren Kaufpreis führen. Denn in Abhängigkeit von den Preiselastizitäten auf der Angebots- und Nachfrageseite ist es möglich, dass die Subvention teilweise oder vollständig von Herstellern und/oder Händlern eingepreist wird. Daneben entstehen auf der Nachfrageseite Mitnahmeeffekte bei denjenigen Akteuren, die auch ohne die Prämie ein entsprechendes Fahrzeug gekauft hätten.

Eine weitere Schwäche der Subventionierung des Fahrzeugkaufs liegt darin, dass sie (sofern isoliert angewandt) keinen Effekt auf die Betriebsentscheidung hat und unter Umständen sogar höhere Fahrleistungen als zuvor stimulieren kann, wenn in der Folge motorisierter Straßenverkehr relativ billiger für die privaten Akteure wird.

Zudem liegt eine grundsätzliche Schwäche zuführender Politikinstrumente wie der Kaufprämie darin, dass sie eine Belastung des öffentlichen Haushalts mit sich bringt.

Ausgestaltungsfragen des Instruments:

Beim Einsatz von Kaufprämien stellen sich unterschiedliche Fragen zur Ausgestaltung des Instruments, die ihren Einsatz trotz Indikation und Adäquanz kritisch machen. Zunächst stellt sich die grundlegende Frage, ob eine Prämie technologiespezifisch oder technologie-neutral ausgestaltet werden soll, also ob sich die Höhe der Prämie für die verschiedenen Technologieoptionen unterscheidet beziehungsweise nur für einzelne Dekarbonisierungsoptionen ausgeschüttet wird oder ob eine einheitliche Prämie für mehrere oder alle Dekarbonisierungsoptionen gezahlt wird. Zudem ist zu klären, ob die Anspruchsberechtigung unkonditioniert ist oder ob die Auszahlung an Voraussetzungen, etwa einen maximalen Fahrzeugpreis oder persönliche Charakteristika der Käufer, gebunden ist. Daneben muss die Höhe der Prämie festgelegt werden. Dabei steht der Regulierer grundsätzlich vor der Herausforderung, ausreichend hohe Anreize zu setzen, Mitnahmeeffekte aber möglichst gering zu halten. Auch der Anwendungshorizont ist vor Einführung zu klären, also einerseits, ob es eine zeitliche oder volumenmäßige Beschränkung der Gewährung gibt, und andererseits, ob die Höhe der Prämie über den Zeitverlauf konstant bleibt oder im Zeitablauf beziehungsweise in Abhängigkeit vom in Anspruch genommenen Volumen angepasst wird.

Neben den aufgezeigten Fragen der Mittelverwendung muss auch die Frage der Mittelherkunft geklärt werden. In Betracht kommen hier neben Steuererhöhungen beziehungsweise der Einführung neuer Steuern Kürzungen der öffentlichen Ausgaben an anderer Stelle oder die Finanzierung aus Neuverschuldung (das heißt Steuererhöhungen oder Ausgabenkürzungen in der Zukunft). Bei in der Diskussion befindlichen Bonus-Malus-Systemen ist zudem zu klären, wie die Finanzierung der Prämie erfolgen soll, wenn der Anreiz maximal erfolgreich ist, also keine Malus-Zahlungen und mithin auch keine Einnahmen zur Refinanzierung von Boni mehr anfallen.

gien leisten und auf diese Weise dem Abbau der mit der geringen Marktdurchdringung verbundenen Barrieren im Innovationsbereich zuträglich sein.

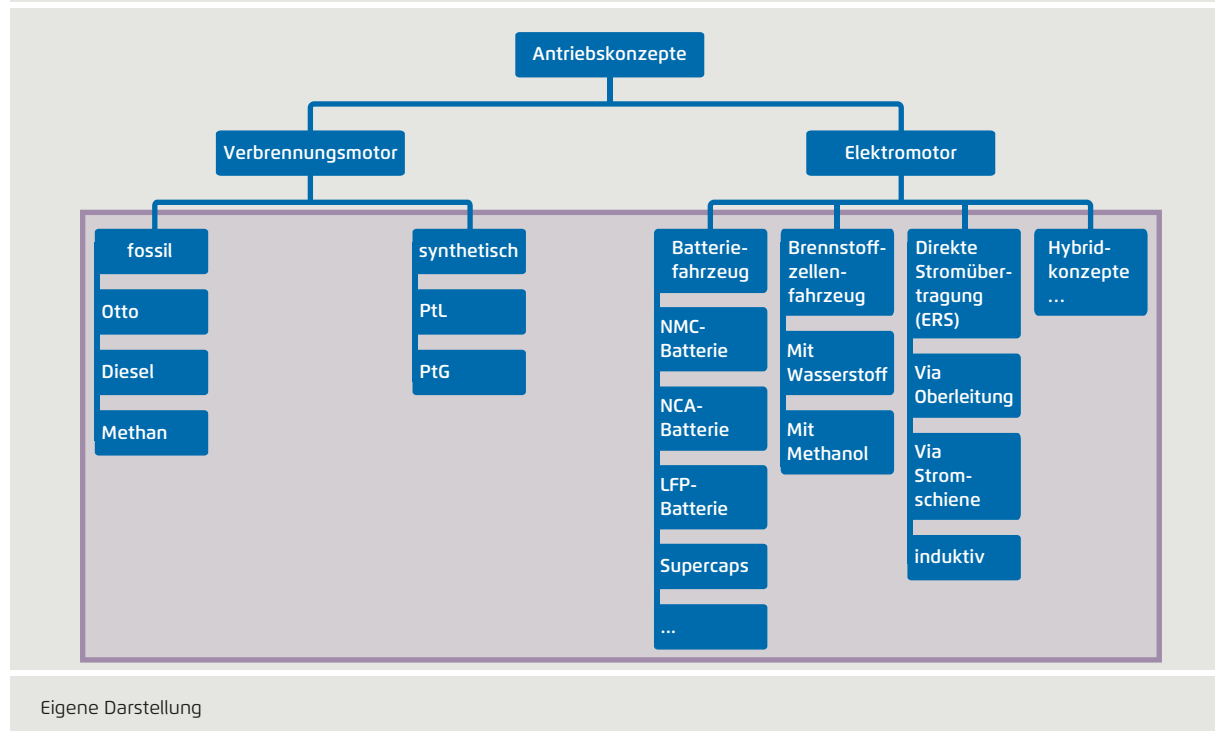
Betrachtet man die heute anstehenden Politikmaßnahmen unter dem Gesichtspunkt der Emissionsreduktionsziele für 2050, erscheint eine technologiespezifische Förderung der Forschung und Entwicklung beziehungsweise öffentliche Forschung für ein breites Technologieportfolio sinnvoll, um neue Technologien mit (effizientem) Dekarbonisierungspotenzial entdecken und identifizieren zu können. Zudem sollten Nischentechnologien nicht ausdrücklich von Fördermaßnahmen zum Zwecke der Marktdurchdringung neuer Technologien ausgeschlossen werden, sodass sie bei Erreichung der Marktreife in Wettbewerb mit den anderen Dekarbonisierungsoptionen treten können.

5.4.4 Verlagerung und Verringerung des motorisierten Straßenverkehrs

Der zunehmende Einsatz emissionsärmerer Antriebe und Kraftstoffe bleibt sowohl mit Blick auf die absolute Treibhausgasbelastung als auch sonstige Umweltbeeinträchtigungen im Verkehrssektor (Unfälle, Lärm, Flächenverbrauch, Schadstoffemissionen) unvollständig, soweit nicht auch die Fahrleistung sowie der Verkehrsträgermix berücksichtigt werden.

Der flankierende Ansatzpunkt der Verlagerung und Verringerung des motorisierten Straßenverkehrs (im Folgenden kurz „Suffizienz“ genannt) verfolgt vor diesem Hintergrund das Ziel, das Verkehrsaufkommen aus motorisiertem Individualverkehr und straßengebundenem Güterverkehr zu reduzieren. Dies scheint einerseits deswegen angezeigt, da auf diese Weise ein nachhaltiger, weil rebound-robuster Beitrag zur Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs geleistet werden kann, andererseits weil dadurch auch weitere mit dem motorisierten Straßenverkehr verbundene Externalitäten vermieden werden. Suffizienzinstrumente sind zudem

Verortung der Regulierung zu Verkehrsverlagerung und -verringern im Technologiebaum Abbildung 17



im Verbund mit Eingriffen an den anderen Ansatzpunkten (Infrastrukturförderung (4.4.2), Innovationsförderung (4.4.3)) notwendig, da diese ceteris paribus eine Vergünstigung von motorisiertem Straßenverkehr zur Folge haben und eine höhere Verkehrsleistung in diesem Bereich nach sich ziehen. Entsprechend entstehen auch Anreize für Verlagerungen im Modal Split hin zum motorisierten Straßenverkehr. Die Adressierung von Suffizienz betrifft somit sämtliche Technologieoptionen des motorisierten Straßenverkehrs, wie Abbildung 17 noch einmal grafisch veranschaulicht.

Instrumente, die dem Ansatzpunkt der Suffizienz zuzuordnen sind, sind typischerweise marktlichen Charakters. Dies kann eine CO₂-Bepreisung in Form einer CO₂-Besteuerung, einer Ausweitung des Emissionshandels oder einer CO₂-orientierten Reform von Aufwand- und Verbrauchsteuern sein, die zur Folge hätte, dass CO₂-intensiver motorisierter Straßenverkehr relativ teurer gegenüber emissionsärmeren Optionen würde. Zudem entwickelt eine Energiebesteuerung grundsätzlich Suffizienzankreize, da für sämtliche Technologieoptionen Antriebsenergie notwendig ist. Daneben kann die

Einführung beziehungsweise Ausweitung einer entfernungsabhängigen Maut auf den MIV in Betracht gezogen werden, mit der Folge einer Verteuerung des motorisierten Straßenverkehrs generell.

Tabelle 9 zeigt die analysierten Instrumentenoptionen im Ansatzpunkt „Suffizienz“ in der Übersicht.

Prinzipiell ist die Verlagerung und Verringerung des motorisierten Straßenverkehrs ein technologieübergreifender Ansatzpunkt, sodass grundsätzlich technologie-neutrale Instrumente **adäquat** sind. Diese Anforderung erfüllt von den genannten Instrumenten zunächst nur eine entfernungsabhängige, nicht nach Technologien differenzierende Maut. Das Suffizienzziel lässt sich jedoch insbesondere durch mit dem Technologieeinsatz verbundene Externalitäten begründen (unter anderem CO₂-Emissionen, Externalitäten der Stromerzeugung jenseits von CO₂-Emissionen, Externalitäten der Batterieherstellung/der Gewinnung von Ressourcen, Externalitäten des motorisierten Straßenverkehrs generell (Lärmemissionen, Flächenversiegelung, Landschaftszer-schneidung etc.)). Diese Externalitäten differieren zum

Instrumentenoptionen im Ansatzpunkt „Verlagerung und Verringerung des motorisierten Straßenverkehrs“

Tabelle 9

CO ₂ -Bepreisung (CO ₂ -Besteuerung, Emissionshandel)
Energiebesteuerung
Entfernungsabhängige Maut
Eigene Darstellung

Teil zwischen den unterschiedlichen Technologien,³⁰⁵ sodass technologiespezifische Instrumente adäquat sein können, sofern die Externalitäten nicht direkt internalisiert werden können und nicht für alle Technologien in gleichem Maße auftreten. So belasten Suffizienzinstrumente, die an einer CO₂-Bepreisung ansetzen, lediglich solche Technologien, die CO₂ emittieren. Sie entwickeln mithin keine Suffizienzwirkung mehr, wenn diese Technologien aus dem Markt scheiden. In dem angestrebten Umfeld eines dekarbonisierten motorisierten Straßenverkehrs bedarf es daher anderer beziehungsweise weiterer Suffizienzinstrumente. Kommen dabei unterschiedliche Energieträger zum Einsatz, bedarf es auch technologiespezifischer Suffizienzinstrumente, sofern diese am Energieträger selbst ansetzen, etwa einer Besteuerung von Strom und gegebenenfalls auch Wasserstoff (insbesondere, sofern dessen Erzeugung von einer Stromsteuer befreit sein sollte).

Durch die Vermeidungswirkung auf den motorisierten Straßenverkehr besitzen zunächst sämtliche aufgeführten Suffizienzinstrumente einen CO₂-Emissionen reduzierenden Effekt und sind somit **effektiv** hinsichtlich der Dekarbonisierung. Dieser Effekt ist einerseits direkter Natur, wenn auf den Einsatz fossiler Kraftstoffe im Straßenverkehr verzichtet wird. Er ist andererseits indirekter Natur, wenn durch den Verzicht auf motorisierten Straßenverkehr auf den Vorstufen CO₂-Emissionen reduziert werden (etwa bei der Stromproduktion für den elektrifizierten Straßenverkehr oder bei der Fahrzeugproduktion, wenn durch Verlagerungen im Modal Split auf die Anschaffung eines eigenen Fahrzeugs verzichtet wird). Sofern Suffizienzinstrumente am Energieträger ansetzen, ist die Effektivität bei solchen Instrumenten höher, die CO₂-Emissionen bepreisen. Wie in Abschnitt

4.4.1 dargelegt, ist die Effektivität eines sektoralen Emissionshandels im Verkehrssektor dabei am höchsten, da durch die Mengenbasierung des Instruments das Emissionsziel theoretisch punktgenau erreicht wird. Preisbasierte Instrumente sind hingegen mit Unsicherheit bezüglich der Zielerreichung verbunden. Dies gilt auch für die Anwendung einer entfernungsabhängigen Maut, bei der der Mautsatz exakt so hoch angesetzt werden müsste, dass das Emissionsziel durch die Verkehrsvermeidung punktgenau erreicht werden kann. Sofern eine Maut nur für einen Teil des Straßennetzes erhoben wird (etwa nur auf Autobahnen) oder unterschiedliche Mautsätze auf verschiedenen Straßen gelten, besteht zudem die Gefahr, dass es teilweise zu Verlagerungen des Verkehrs auf mautfreie Strecken kommt, die unter Umständen sogar zu höheren CO₂-Emissionen führen können (durch Streckenverlängerungen oder höhere spezifische Emissionen je km).

Als marktbasierte Instrumente bieten alle hier diskutierten Instrumente Anreize, motorisierten Straßenverkehr dort zu reduzieren, wo dies am günstigsten möglich ist. Sie sind somit hinsichtlich der **Kosteneffizienz** des Instrumentariums grundsätzlich positiv zu bewerten. Instrumente zur CO₂-Bepreisung setzen zudem gleichzeitig Anreize für einen Technologiewechsel hin zu emissionsarmen Antriebstechnologien. Da sie jedoch, wie im letzten Absatz dargestellt, in einem emissionsarmen oder -freien Straßenverkehrssektor ineffektiv sind, sind komplementäre Instrumente (zum Beispiel für Strom und Wasserstoff) notwendig, die nach Energieträgern differenzieren und so mit der Gefahr ineffizienter Verzerrungen durch die Regulierung einhergehen. Insoweit jedoch Externalitäten die Differenzierung begründen, wirkt die Technologiespezifität der Instrumente effizienzsteigernd.

305 van Essen et al. (2019).

Die Gefahr ineffizienter technologiespezifischer Verzerrungen besteht bei einer technologieneutral ausgestalteten Maut nicht. Sie besitzt damit jedoch auch keine Möglichkeit für effizienzsteigernde (weil differierende Externalitäten adressierende) technologiespezifische Korrekturen. Zudem setzt eine technologieneutral ausgestaltete Maut keine Anreize für die Nutzung emissionsarmer Antriebstechnologien durch die privaten Akteure.

Wie im Abschnitt 4.4.1 bereits dargelegt, sind hohe **Transaktionskosten** unter anderem bei neu einzuführenden Instrumenten zu erwarten. Dies gilt insbesondere dann, wenn zur Umsetzung und Überwachung zusätzliche technische Infrastruktur notwendig ist, wie dies bei einer Maut im Pkw-Bereich der Fall wäre. Unter Umständen kann hier jedoch auf der existierenden Infrastruktur für den Lkw-Verkehr aufgebaut werden. Eine Anpassung bestehender Instrumente (wie eine Ausweitung des europäischen Emissionshandels auf den Verkehrssektor oder eine Reform bestehender Verbrauch- und Aufwandsteuern) lässt hingegen geringere Transaktionskosten erwarten.

Sämtliche diskutierten Instrumente haben zur Folge, dass der motorisierte Straßenverkehr teurer wird, und bringen somit verteilungspolitische Herausforderungen mit sich. Sofern durch die Instrumente ein zusätzliches Aufkommen öffentlicher Mittel generiert wird (etwa durch höhere Steuereinnahmen oder Mauterlöse) können diese jedoch grundsätzlich eingesetzt werden, um unerwünschten Verteilungseffekten entgegenzuwirken. Hierbei besteht jedoch bei ungeeigneter Ausgestaltung die Gefahr, dass die Rückverteilung die Effektivität der Suffizienzinstrumente (vollständig) konterkariert.

Die zusätzliche finanzielle Belastung von motorisiertem Straßenverkehr kann auch die **politische Umsetzbarkeit** der Instrumente erschweren, da politischer Widerstand von den betroffenen Akteursgruppen zu erwarten ist. Da resultierende Kostensteigerungen bei der Reform bestehender Steuern unter Umständen nicht so direkt ersichtlich sind wie bei der Einführung neuer Steuern oder einer Maut, dürfte die politische Durchsetzbarkeit hier jedoch vergleichsweise einfacher sein. Sofern ein neues Aufkommen öffentlicher Mittel generiert wird, kann dieses möglicherweise für finanzielle Erleichterungen oder die Erweiterung der öffentlichen Leistungen genutzt werden und die zusätzliche Belastung (der rele-

vantesten) Akteursgruppen schmälern, um die politische Durchsetzbarkeit zu verbessern.

Zwischenfazit

Auch Verkehrsverlagerung und -verringerung können für eine Dekarbonisierung wichtige Beiträge leisten. Um Rebound-Effekte reiner Technologiesubstitution zu vermeiden, müssen sie sogar im Blick behalten werden. Zur Platzierung adäquater Suffizienzinstrumente für die verschiedenen Technologieoptionen erscheint ein Mix verschiedener Maßnahmen notwendig. Einerseits ist hier der Einsatz einer CO₂-Bepreisung notwendig, um Suffizienz im Bereich der CO₂-emittierenden Technologien anzureizen. Zusätzlich sind jedoch in einer dekarbonisierten Welt auch Suffizienzinstrumente für die emissionsfreien Energieträger notwendig. Dazu gehört in erster Linie ein Abbau beziehungsweise eine kritische Durchmusterung verkehrsfördernder oder umweltfreundliche Verkehrsträger benachteiligender Subventionen. Neue preisbasierte Instrumente können hinzutreten. Eine technologieneutrale Streckenmaut ist insoweit jedoch als unvollständig zu betrachten, da sie die differierenden Externalitäten der unterschiedlichen Technologieoptionen nicht angemessen adressieren kann. Im Bereich von Externalitäten, die weitgehend unabhängig von der eingesetzten Antriebstechnologie auftreten (etwa Lärmemissionen, Landschaftszerschneidung, Unfallexternalitäten) kann eine technologieneutrale, entfernungsabhängige Maut jedoch unter Umständen als sinnvolles Komplementärintstrument dienen.

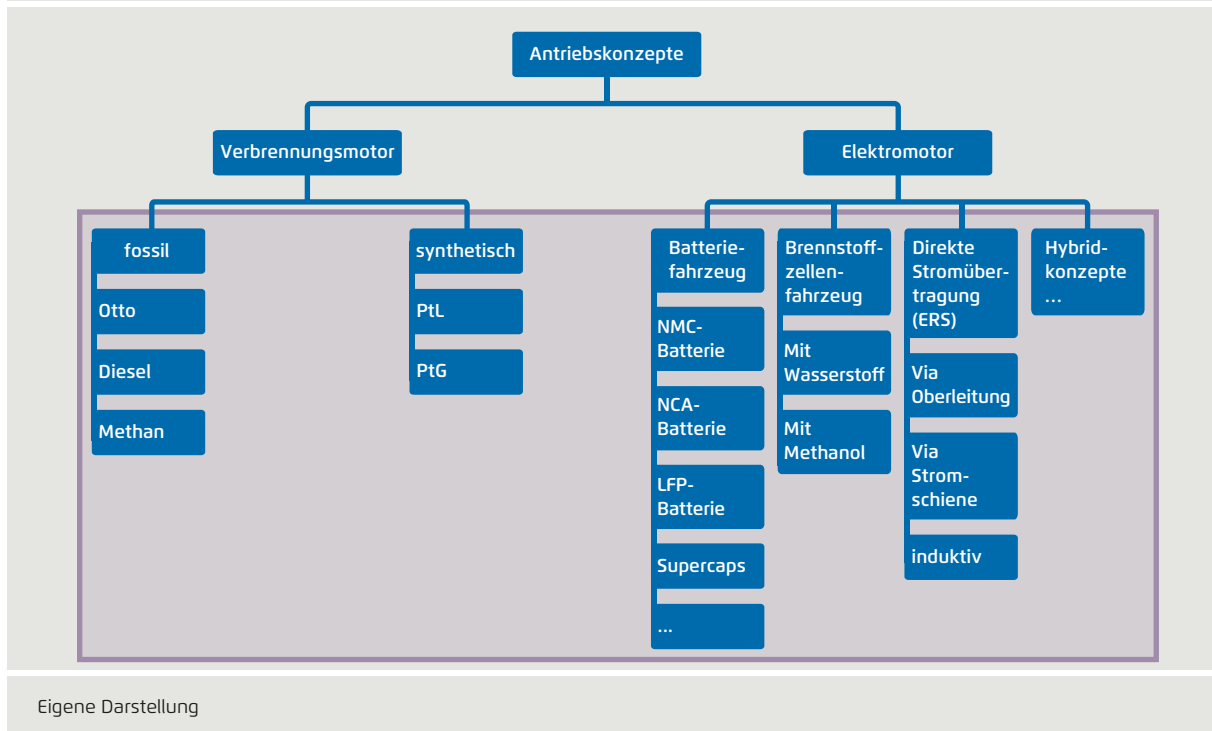
5.4.5 Glaubwürdige politische Selbstbindung („Commitment“)

Es ist davon auszugehen, dass auch künftig ein privates Angebot von Mobilitätskomponenten und -infrastrukturen profitabel darstellbar ist. Private Investments in dekarbonisierte Mobilitätsstrukturen sind daher unerlässlich. Mittel der öffentlichen Hand müssen insofern auf die gezielte Beseitigung von Hemmnissen beschränkt werden, um Überförderung ebenso auszuschließen wie effektfreie Mittelverausgabung bei fortbestehenden Unsicherheiten oder Transformationsbarrieren.

Neben der Frage der instrumentellen Ausgestaltung im Bereich der vier zuvor genannten Ansatzpunkte (Marktaustritt fossiler Energieträger, komplementäre Infrastruktur, Innovation, Verlagerung und Verringerung des motorisierten Straßenverkehrs) ist daher von großer

Verortung der glaubwürdigen politischen Selbstbindung im Technologiebaum

Abbildung 18



Bedeutung, dass die instrumentellen Eingriffe durch eine glaubwürdige politische Selbstbindung („Commitment“) über Ziele, Richtung und Unumkehrbarkeit der Transformation untermauert sind. Die Instrumentierung im Ansatzpunkt „Commitment“ muss daher alle Technologieoptionen zur Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs adressieren (vgl. Abbildung 18).

Bestehen Zweifel bei den privaten Akteuren, dass der eingeschlagene technologiepolitische Ansatz von politischen Akteuren konsequent verfolgt wird, hat dies zur Konsequenz, dass hohe Unsicherheit über die Profitabilität (irreversibler) potenzieller privater Investitionen besteht. In der Folge droht Attentismus bei den privaten Akteuren, sodass die notwendigen privaten Investitionen (teilweise) ausbleiben.³⁰⁶ Der bestehenden Unsicherheit müsste daher bei fehlendem Vertrauen der privaten Akteure in die zukünftige technologiepolitische Ausrichtung durch die öffentliche Zahlung von Risikoprämien begegnet werden, um den avisierten technologi-

schen Wandel zu erreichen.³⁰⁷ Dies würde die Kosten der öffentlichen Hand für den Einsatz von Förderinstrumenten in die Höhe treiben und birgt die Gefahr der Überforderung der öffentlichen Haushalte.

Tabelle 10 zeigt die analysierten Instrumentenoptionen im Ansatzpunkt „Glaubwürdige politische Selbstbindung“ in der Übersicht.

Zur Minimierung der notwendigen öffentlichen Aufwendungen für den angestrebten technologischen Wandel hin zu emissionsarmen Antrieben ist daher von zentraler Bedeutung, dass es der Politik gelingt, glaubwürdig zu vermitteln, dass der eingeschlagene Weg konsequent weiterverfolgt werden wird. Neben einer Selbstbindung durch (gesetzliche) Zielfestlegungen und -explikation, die öffentlichen Druck zu ihrer Einhaltung (siehe etwa Fridays for Future) generieren können, kann dies etwa dadurch unterstrichen werden, dass der Staat öffentliche Investitionen in die komplementäre Infrastruktur ausgewählter Technologieoptionen vornimmt. Aufgrund

306 Engau; Hoffmann (2009).

307 Die Erforderlichkeit von Risikoprämien infolge politischer Unsicherheit zeigen zum Beispiel Pástor; Veronesi (2013).

Instrumentenoptionen im Ansatzpunkt „Glaubwürdige politische Selbstbindung“

Tabelle 10

Zielfestlegungen und -explikation
Infrastrukturinvestitionen
Bestandsschutz für private Investitionen
Kohärenz im Instrumentenmix
Revisionsresilienz (konsensuale Klimapolitik, Mehrebenenverankerung)
Eigene Darstellung

der Spezifität dieser Investitionen bilden sie im Falle der Nichtnutzung Stranded Investments,³⁰⁸ weshalb die privaten Akteure ein genuines Interesse des Staates an der Weiterverfolgung des eingeschlagenen Weges vermuten dürfen. Ein weiterer Ansatz zur Schaffung von Vertrauen in die Beständigkeit des technologiepolitischen Ansatzes kann in der Schaffung (langfristiger) Bestandsschutzmaßnahmen für private Investitionen bestehen, wie dies etwa beim EEG in Form der 20-jährigen Förderzusagen der Fall war und ist. Auf diese Weise findet eine rechtliche Selbstbindung des Regulierers statt, die eine Abkehr vom eingeschlagenen technologiepolitischen Pfad unwahrscheinlich bis unmöglich macht und so das Vertrauen in die Unumkehrbarkeit des eingeschlagenen technologiepolitischen Pfades stärkt.³⁰⁹ Vor diesem Hintergrund weisen zum Beispiel Einmalzahlungen, Zuschüsse oder CO₂-Guthaben eine bessere Eignung zur politischen Selbstbindung auf als periodische Vorteile für den Einsatz emissionsarmer Technologieoptionen, die relativ leicht revidierbar sind. Ebenso können Genehmigungen mit Bestandsschutz eine starke Selbstbindung des Regulierers bewirken. Daneben kann ein kohärenter Instrumentenmix bei der Adressierung der zuvor genannten Ansatzpunkte (Marktaustritt fossiler Energieträger, komplementäre Infrastruktur, Innovation sowie Verlagerung und Verringerung des motorisierten Straßenverkehrs) die Konsequenz der politischen Weichenstellung untermauern, indem er den ausgerufenen technologischen Pfadwechsel auch nachvollziehbar instrumentell dokumentiert. Dabei muss insbesondere auch deutlich werden, dass die Verbrennung fossiler Kraftstoffe im zukünftigen Technologiemarkt keine Rolle spielen kann. Inkonsistente

Instrumentenkombinationen, wie etwa ein finanzieller Ausgleich der Belastung CO₂-intensiver Mobilität durch Subventionierung an anderer Stelle oder die Aufrechterhaltung klimaschädlicher Subventionen, schwächen hingegen das Vertrauen in die Konsequenz der technologiepolitischen Ausrichtung und gehen entsprechend mit Attentismus und der Zurückhaltung privater Investitionen einher. Die Glaubwürdigkeit des Commitments kann zudem durch eine geringe Wahrscheinlichkeit der Revision des eingeschlagenen Politikpfades bei einem Regierungswechsel gestärkt werden (Revisionsresilienz). Dem kann einerseits eine konsensuale Klimapolitik im Verbund mit einem möglichst großen Teil der Opposition zuträglich sein. Andererseits kann auch eine Verankerung der Regulierung auf supranationaler Ebene hierzu beitragen. Die Notwendigkeit multilateraler Konsensfindung hinsichtlich einer Modifikation oder Abschaffung von Regulierungsinstrumenten auf EU-Ebene lässt eine höhere Beständigkeit europäischer als nationaler Regulierung erwarten. Freilich ist aber auch die (zügige) Implementation von Instrumenten auf europäischer Ebene entsprechend erschwert. Generell gilt aber, dass eine glaubwürdige Dekarbonisierungspolitik für den Verkehrssektor auf allen politischen Ebenen verankert sein muss.

Werden jedoch (isoliert) alternative Antriebe und Kraftstoffe gefördert, ohne dass ein glaubwürdiges Commitment vermittelt, dass diese Technologien auch in Zukunft eine Rolle spielen werden, wird in immer höherem Maße der Einsatz öffentlicher Mittel bei geringem Effekt auf die Emissionen im Verkehrssektor erforderlich sein, um den resultierenden Attentismus bei den privaten Akteuren aufzubrechen.

308 Williamson (1979), S. 240.

309 Richter; Furubotn (2010), S. 332 f.

Glaubwürdige politische Selbstbindung als Instrument der Dekarbonisierungspolitik („Commitment“)

Funktionsweise:

Eine erfolgreiche Dekarbonisierungspolitik im Straßenverkehr benötigt sowohl auf Anbieter- wie auf Nachfrageseite in hohem Umfange private Investitionen in die Umstellung von Antrieben, Kraftstoffen und Infrastrukturen. Diese werden aber nur dann zeitnah und zuverlässig erfolgen, wenn es gelingt, diesen privaten Akteuren ein klares und glaubwürdiges Signal einer unumkehrbaren technologischen Transformation des Straßenverkehrs zu senden. Dazu gehören auch Signale darüber, welche Technologien künftig das Rückgrat der Mobilität bilden werden.

Eine diesbezügliche **glaubwürdige politische Selbstbindung** ist für die Dekarbonisierungspolitik essenziell. Bleibt diese in der Wahrnehmung privater Akteure aus und bestehen Zweifel, dass der eingeschlagene technologiepolitische Ansatz von politischen Akteuren stringent verfolgt wird, so hat dies zur Konsequenz, dass hohe Unsicherheit über die Profitabilität potenzieller privater Investitionen besteht. In der Folge droht Attentismus im privaten Sektor. Die notwendigen privaten Investitionen bleiben (teilweise) aus oder verzögern sich. Zudem bestehen Anreize, eher in die Meinungs- und Regelbildung zugunsten profitabler fossiler Strukturen zu investieren als in neue Technologien (Rent Seeking statt Profit Seeking). Einer fortbestehenden Unsicherheit müsste daher bei fehlendem Vertrauen der privaten Akteure in die zukünftige technologiepolitische Ausrichtung durch die Zahlung von Risikoprämien begegnet werden, um den avisierten technologischen Wandel zu erreichen. Dies würde die Kosten der öffentlichen Hand für den Einsatz von Förderinstrumenten (bei unsicherem Erfolg) unnötig in die Höhe treiben. Zudem würde dies absehbar die öffentlichen Haushalte überfordern.

Knappe Mittel der öffentlichen Hand müssen daher auf die gezielte Beseitigung von Hemmnissen beschränkt werden, um Überförderung ebenso auszuschließen wie ineffektive Mittelverausgabung bei fortbestehenden Unsicherheiten oder Transformationsbarrieren.

Die Schaffung von Vertrauen in den Fortbestand und die Konsequenz des eingeschlagenen Weges ist dabei möglicherweise von noch höherer Bedeutung als dessen genaue Richtung, das heißt die Auswahl der konkreten zukünftigen Antriebstechnologie(n) und Kraftstoffe im motorisierten Straßenverkehr. Hierbei sind Entscheidungen des Regulierers, die sich im Nachhinein (theoretisch) als ineffizient herausstellen, genauso wenig auszuschließen, wie dies bei Entscheidungen privater Akteure möglich wäre. Dies sollte aber staatliche Akteure nicht davon abhalten, klare und glaubwürdig verlässliche Vorgaben über den anstehenden Transformationspfad zu machen.

Instrumente der Selbstbindung:

Ein klassisches Instrument der Selbstbindung, das die politischen Entscheidungsträger bei Nichteinhaltung unter Rechtfertigungsdruck setzt, ist die Etablierung (rechtlich verankerter) Zielstellungen. Daneben kann der Staat öffentliche Investitionen in die komplementäre Infrastruktur ausgewählter Technologieoptionen vornehmen. Aufgrund der Spezifität dieser Investitionen bilden sie im Falle der Nichtnutzung Stranded Investments, sodass die privaten Akteure ein genuines Interesse des Staates an der Weiterverfolgung des eingeschlagenen Weges vermuten dürfen. Ein weiterer Ansatz zur Schaffung von Vertrauen kann in der Schaffung (langfristigen) Bestandsschutzes für private Investitionen bestehen, wie dies etwa beim EEG in Form der 20-jährigen Förderzusagen der Fall war und ist.

Die Glaubwürdigkeit des Commitments kann zudem durch eine geringe Wahrscheinlichkeit der Revision bei einem Regierungswechsel gestärkt werden. Dem kann einerseits eine konsensuale Klimapolitik im Verbund mit einem möglichst großen Teil der Opposition zuträglich sein. Andererseits kann auch eine Verankerung der Regulierung auf supranationaler Ebene (EU) hierzu beitragen. Schließlich trägt ein widerspruchsfreier Instrumentenmix, der zum Beispiel auf gleichzeitige Honorierung fossiler Strukturen konsequent verzichtet, zur Vertrauensbildung bei.

Die Schaffung von Vertrauen in den Fortbestand und die Konsequenz des eingeschlagenen Weges ist dabei möglicherweise von noch höherer Bedeutung als dessen Richtung und Inhalt, das heißt die Auswahl der konkreten zukünftigen Antriebstechnologie(n) und Kraftstoffe im motorisierten Straßenverkehr. Dass eine glaubwürdige politische Selbstbindung stattfindet, dürfte mithin unter Vertrauensgesichtspunkten noch wichtiger sein, als was konkret Gegenstand einer derartigen Selbstbindung ist. Hierbei sind Entscheidungen des Regulierers, die sich im Nachhinein (theoretisch) als ineffizient herausstellen, genauso wenig auszuschließen, wie dies bei Entscheidungen privater Akteure möglich wäre. Dies sollte freilich nicht als Freifahrtschein für eine irgendwie geartete Verkehrspolitik, etwa zur Bedienung von Partialinteressen, verstanden werden, wohl aber als Plädoyer für ein konsequentes Voranschreiten in der Dekarbonisierungspolitik für den motorisierten Straßenverkehr unter bestmöglicher Nutzung der verfügbaren Information. Verbleibende Unsicherheiten legitimieren insoweit mit Blick auf 2030 wohl kein weiteres politisches Zuwarten.

5.4.6 Fazit

Die Bereitstellung von Fahrzeugen inklusive ihrer Antriebstechnologie sowie von Kraftstoffen für den Fahrzeugbetrieb einschließlich ihrer Versorgungsinfrastruktur ist grundsätzlich ein in hohem Maße profitables Geschäft, das auf hohe Zahlungsbereitschaften der Nachfrage stößt und insoweit prinzipiell flächendeckend auch privat erfolgen kann – und bislang auch erfolgt. Die private Bereitstellung erfolgt jedoch nur, wenn auch ein ausreichender Grad an Sicherheit über die künftige Profitabilität der Investitionen besteht. Sollen zukünftig emissionsarme Antriebskonzepte und Kraftstoffe – zunächst im Wettbewerb mit konventionellen Technologien – (ergänzend) privat bereitgestellt werden, muss die Politik notwendigerweise Anreize und Rahmenbedingungen so setzen, dass der Markt diese Funktion übernehmen kann.

Hierzu sollte der Regulierer alle fünf dargelegten Ansatzpunkte instrumentell adressieren und dabei auf Konsistenz des Instrumentenmixes achten, um eine hohe Effizienz und Effektivität der Regulierung zu gewährleisten.

Dabei ist es erstens notwendig, dass das bislang profitabelste Antriebskonzept der Verbrennung fossiler Kraftstoffe aus Klimaschutzgründen aus dem Markt gedrängt wird, um die Durchsetzung neuer, emissionsarmer Antriebskonzepte zu ermöglichen. Diese Exnovation sollte durch einen technologieneutralen Ansatz der Bepreisung von Treibhausgasemissionen verfolgt werden, um grundsätzlich allen Technologieoptionen (inklusive der Verbrennung emissionsarmer Kraftstoffe) die Möglichkeit zur Verdrängung des bisherigen Antriebskonzepts zu bieten. Die zwingende Notwendigkeit der Verdrängung der Technologieoption des fossilen Verbrennungsmotors legt zudem nahe, dass die technologie neutrale instrumentelle Adressierung der Exnovation eine No-Regret-Maßnahme darstellt.

Zweitens ist es notwendig, dass die komplementäre Infrastruktur für alternative Antriebskonzepte durch den Markt oder falls erforderlich auch durch den Staat bereitgestellt wird. Dieser Ansatzpunkt muss notwendigerweise technologiespezifisch adressiert werden, da die komplementären Infrastrukturen großteils nur einzelne Technologieoptionen bedienen können. In diesem Bereich ist insbesondere eine politische Weichenstellung notwendig, wie viele und welche parallelen Infrastrukturen in welchem Ausmaß gefördert werden sollen.

Insoweit durch die Maßnahmen in diesen beiden Bereichen die Barrieren für die in Zukunft als notwendig erachteten Technologien noch nicht vollständig behoben sind, sollten drittens Instrumente im Ansatzpunkt der Innovation eingesetzt werden. Diese sollten darauf abzielen, verbleibende Barrieren bei der Marktdurch-

dringung jener Technologieoptionen zu beheben, die der Regulierer als notwendig für die Transformation des motorisierten Straßenverkehrs erachtet. Die verbleibenden Barrieren bestehen dabei zum einen wohl insbesondere in einer fehlenden Marktdurchdringung der neuen Technologieoptionen, die sich aufgrund ausbleibender Lernkurven- und Skaleneffekte in höheren Preisen niederschlagen. Hier sind also Maßnahmen notwendig, die die Marktdurchdringung mit innovativen Technologien stimulieren. Vor dem Hintergrund der Bedeutung der internationalen beziehungsweise globalen Marktdurchdringung auf die Lern- und Skaleneffekte sind diesbezüglich unter Umständen auch internationale Instrumente, wie etwa Quoten auf EU-Ebene, anzustreben. Zum anderen verbleibt aufgrund der höheren (derzeitigen) Kosten und damit auch Preise eine weitere Barriere in Form von Budgetrestriktionen, die die Anschaffung emissionsarmer Technologieoptionen behindern können. Budgetrestriktionen können aufgrund der höheren Anschaffungskosten und mangelnden Zugangs zu Krediten insbesondere im Bereich von Pkw bei den batterieelektrischen Antrieben und der Wasserstoffbrennzelle wirksam sein – und hier wohl insbesondere auch im Bereich der unteren Fahrzeugklassen. Zur Überwindung von Budgetrestriktionen ist der Einsatz zuführender, preisbasierter Instrumente notwendig. Eingriffe im Ansatzpunkt „Innovation“ sollten jedoch stets nur temporären Charakter haben und mit ausreichender Marktdurchdringung der entsprechenden Technologie(n) zurückgefahren werden, um sowohl Marktverzerrungen als auch eine Überlastung der öffentlichen Haushalte zu vermeiden.

Um einerseits zu vermeiden, dass durch die Förderung emissionsarmer Antriebstechnologien Rebound-Effekte entstehen, und um andererseits nicht-internalisierten externen Kosten des motorisierten Straßenverkehrs Rechnung zu tragen, sind viertens Instrumente zur Verlagerung und Verringerung des motorisierten Straßenverkehrs notwendig. Hier erscheint zum einen eine Bepreisung von CO₂ angeraten, um Minderungen der Verkehrsleistung emissionsintensiver Antriebe anzureizen, zum anderen sind aber (längerfristig) auch energieträgerspezifische Suffizienzinstrumente für emissionsärmere Antriebe notwendig (etwa die Beibehaltung der Stromsteuer und gegebenenfalls eine Steuer auf Wasserstoff). Externalitäten des motorisierten Straßenverkehrs, die über alle Technologieoptionen in gleichem Maße

anfallen (wie etwa Lärm, Unfälle oder Landschaftszerstörung), können zudem durch eine entfernungsabhängige Maut auch im Pkw-Bereich internalisiert werden.

Um die Kosten des technologischen Pfadwechsels gering zu halten, ist fünftens notwendig, dass die Konsequenz und Beständigkeit des Pfadwechsels regulatorisch glaubwürdig untermauert sind. Andernfalls drohen trotz regulatorischer Eingriffe eine Verfehlung der Emissionsziele und eine ineffiziente Ausschüttung von Fördergeldern. Die Explikation von Dekarbonisierungszielen im motorisierten Straßenverkehr, staatliche Investitionen in komplementäre Infrastruktur, eine rechtliche Selbstbindung des Regulierers, etwa durch die Schaffung von Ansprüchen mit Bestandsschutz, sowie eine konsistente Ausgestaltung des Instrumentenmixes, soweit möglich auch auf supranationaler Ebene, können Bestandteile eines solchen glaubwürdigen Commitments der Politik sein, um private Investments in neue Zukunftsfelder der Mobilität zu „locken“.

Die Instrumentierung der Ansatzpunkte sollte dabei einem zeitlichen Transformationspfad folgen. Ihre Rolle wird sich mit fortschreitender Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs und technologischer Entwicklung verändern. Exnovationsinstrumente können bei erfolgreicher Dekarbonisierung wieder abgeschafft werden. Förderinstrumente für den Aufbau komplementärer Infrastruktur und Innovation werden typischerweise nur temporär benötigt, bis eine kritische Masse erreicht ist. Instrumente zur Verkehrsverlagerung und -verringerung müssen sich bei Veränderung des Technologiemixes ebenfalls anpassen. Gegenwärtig kann eine CO₂-Bepreisung auch Suffizienzsignale setzen. Mit fortschreitender Elektrifizierung der Mobilität muss diese Aufgabe etwa durch eine Stromsteuer übernommen werden. Im eingeschwungenen Zustand muss ein dekarbonisierter Straßenverkehr zudem auf andere Weise zur Finanzierung der Straßenverkehrsinfrastruktur und zur Finanzierung öffentlicher Haushalte beitragen, als dies gegenwärtig der Fall ist.

Auswirkungen einer isolierten Adressierung einzelner Ansatzpunkte

Die gemeinsame und abgestimmte Adressierung aller fünf Ansatzpunkte für eine Dekarbonisierungspolitik im motorisierten Straßenverkehr ist von hoher Relevanz für die Effektivität und Effizienz der Politik. Die isolierte Adressierung einzelner Ansatzpunkte, etwa infolge polit-ökonomischer Restriktionen, birgt daher die Gefahr, die Erreichung der Emissionsziele unnötig teuer zu machen oder eine Zielverfehlung nach sich zu ziehen.

Eine Fokussierung der Regulierung zum Beispiel auf den Ansatzpunkt der Innovation ohne (wirksame) Regulierung im Bereich des Marktaustritts fossiler Energieträger muss gegen die bestehenden Pfadabhängigkeiten des Systems des fossil betriebenen Verbrennungsmotors arbeiten und etwa Subventionen entsprechend hoch ansetzen, um den Lock-in aufbrechen zu können. Ein solches Vorgehen geht mit verschiedenartigen Problemen einher, insbesondere droht eine Überlastung des öffentlichen Haushalts wegen hoher Ausgaben öffentlicher Mittel zur Finanzierung der Förderungsinstrumente. Eine alleinige Fokussierung auf den Ansatzpunkt des Marktaustritts fossiler Energieträger wiederum erfordert bei Anwendung einer CO₂-Bepreisung extrem hohe CO₂-Preise, um die spezifischen Barrieren bei den emissionsarmen Technologieoptionen überwinden zu können.

Eine Fokussierung allein auf die staatliche Förderung alternativer Antriebsformen durch Förderung in den Ansatzpunkten Innovation und komplementäre Infrastruktur hat die Vergünstigung des motorisierten Straßenverkehrs zur Folge. Es drohen damit entsprechende Verlagerungen im Modal Split hin zum motorisierten Straßenverkehr, unter Umständen auch eine generelle Zunahme von Mobilität. Da auch alternative Antriebsformen nicht vollständig emissionsfrei sind, kann ein solches Vorgehen die Effektivität herabsetzen und bedroht die Emissionsreduktionsziele. Zudem geht der motorisierte Straßenverkehr mit weiteren externen Kosten einher (Belastung mit Schadstoffen, Bodenversiegelung, Landschaftszerschneidung, Lärm, Unfallexternalitäten etc.), deren Erzeugung mit einem solchen Ansatz entsprechend stimuliert würde. Dies macht deutlich, dass der komplementäre Einsatz von Instrumenten zur Verkehrsverlagerung und -verringern notwendig ist.

Diese Beispiele verdeutlichen, dass das Zusammenspiel der Ansatzpunkte maßgeblich für die Effizienz und Effektivität der Dekarbonisierungspolitik ist und die isolierte Regulierung einzelner Ansatzpunkte die Performanz der Politik herabsetzen, im Extremfall gar zu Erhöhungen der Treibhausgasemissionen (Backfire) führen kann.

5.5 Thesen zur Ausgestaltung der Dekarbonisierungsinstrumente im motorisierten Straßenverkehr

Grundsätzlich kann zum Einsatz und zur Ausgestaltung technologiespezifischer Instrumente für die Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs festgehalten werden:

1. **Mögliche technologiespezifische Instrumente müssen zur ökonomischen Begründung der Indikation passen (Kriterium der Adäquanz).** Die Begründung für einen etwaigen technologiespezifischen Eingriff – und damit die Sinnhaftigkeit einzelner Instrumente – kann zwischen Technologien stark variieren. Allein das Vorliegen einer ökonomischen Indikation für einen technologiespezifischen Eingriff rechtfertigt also nicht jedwede instrumentelle Umsetzung. Die Passfähigkeit neuer technologiespezifischer Instrumente zur Indikation sollte vor ihrer Einführung explizit gemacht und nachvollziehbar begründet werden.
2. **Effiziente technologiespezifische Instrumente sollten, soweit sinnvoll, Freiheitsgrade bei der Detailausgestaltung der Technologieoptionen belassen.** Das gilt insbesondere aufgrund technologischer Unsicherheiten und Informationsgrenzen aufseiten des Regulierers. Generell sollte daher gelten: So viel Technologiespezifität wie nötig, so viel Technologie-neutralität wie möglich.
3. **Für die Instrumentierung einer Dekarbonisierungspolitik für den motorisierten Straßenverkehr zeichnen sich fünf Hauptansatzpunkte ab:**
 - (1) Marktaustritt fossiler Technologien (Exnovation),
 - (2) Aufbau komplementärer Infrastruktur für neue emissionsarme Technologien,
 - (3) Entwicklung, Produktion und Marktdurchdringung neuer emissionsarmer Technologien (Innovation),
 - (4) Verringerung und Verlagerung des motorisierten Straßenverkehrs sowie
 - (5) insgesamt eine langfristige und glaubwürdige politische Selbstbindung hinsichtlich der Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs.

Ein effektiver und effizienter Instrumentenmix muss diese Hauptansatzpunkte gemeinsam in den Blick nehmen und zusammendenken.
4. **Exnovationsinstrumente sind notwendig, um den ungerechtfertigten Wettbewerbsvorteil des mit fossilen Kraftstoffen angetriebenen Verbrennungsmotors abzubauen und sein für das Erreichen der Klimaziele notwendiges Ausscheiden aus dem Markt zu beschleunigen.** Starke Pfadabhängigkeiten und Lock-in-Effekte behindern andernfalls die Dekarbonisierung des Straßenverkehrs. Exnovationsinstrumente können dabei technologieneutral gegenüber neuen, CO₂-freien Technologien bleiben. Fester Bestandteil eines Maßnahmenbündels zur Beschleunigung der Exnovation muss ein ambitionierter CO₂-Preis sein. Dieser sanktioniert den CO₂-Ausstoß, belässt aber gleichzeitig Freiheitsgrade, um die Reduktionsziele effizient zu erreichen. Dessen genaue Umsetzung – etwa als Emissionshandel oder Steuer – ist eine nachgelagerte Frage. Zur Absicherung der Zielerreichung können ergänzend ordnungsrechtliche Instrumente, etwa Flottengrenzwerke, auf der Produzentenseite eingesetzt werden.
5. **Der Aufbau komplementärer Infrastruktur für den Betrieb neuer Technologien muss zumindest temporär staatlich gefördert werden.** Da sich komplementäre Infrastrukturen typischerweise auf einzelne Technologien beziehen, ist eine staatliche Technologiewahl an dieser Stelle unumgänglich (welche Technologieoptionen hier insbesondere förderungswürdig erscheinen, ist in den Thesen in Kapitel 3 dargelegt). Dies gilt umso mehr, als es aufgrund budgetärer Grenzen der öffentlichen Haushalte kaum in Betracht kommt, für alle Technologien komplementäre Infrastrukturen parallel in großskaligem Maßstab bereitzustellen. Es steht zu erwarten, dass der privatwirtschaftliche Betrieb der neuen komplementären Infrastrukturen ohne staatliche Förderung möglich ist, sobald eine kritische Masse erreicht wird. Gleichwohl kann in einigen Bereichen eine dauerhafte Regulierung zum Beispiel von Standorten und Tarifen notwendig sein, etwa im Falle des Aufbaus von Oberleitungsnetzen für den Straßengüterverkehr.
6. **Gegebenenfalls sind zusätzlich Innovationsinstrumente notwendig, welche die Verbreitung von Fahrzeugen mit emissionsarmen Technologien gezielt fördern, um verbleibende Verzerrungen des Technologiewettbewerbs zu adressieren.** Dabei ist jedoch kritisch zu prüfen, welche Barrieren (zum Beispiel hohe Anschaffungskosten, unvollständige

Information, mit Lernkurven verbundene Wissens-externalitäten) dadurch noch sinnvoll abgebaut werden können – insbesondere wenn die Exnovation fossiler Technologien sowie der Ausbau neuer komplementärer Infrastrukturen bereits durch andere Instrumente gewährleistet ist. Je nach Indikation kann die Ausgestaltung sowohl technologieneutral als auch technologiespezifisch erfolgen. Ordnungsrechtlich geprägte Instrumente, etwa (handelbare) Fahrzeugquoten, können hier große Wirksamkeit entfalten. Ähnlich würde es sich mit einer Begrenzung des Dienstwagenprivilegs auf emissionsarme Antriebstechnologien verhalten. Prämien für den Kauf von Fahrzeugen mit emissionsarmen Antrieben bieten die Chance, Barrieren auf Nutzerseite, insbesondere eine begrenzte Zahlungsfähigkeit, unmittelbar zu überwinden. Gleichwohl ist die klimapolitische Effektivität von Kaufprämien unsicher (nur begrenzte Weiterreichung an Autokäufer, Gefahr von Mitnahme- und Rebound-Effekten). Es ist daher angezeigt, Kaufprämien nach Höhe und Laufzeit zu begrenzen, Effektivität sicherzustellen und die Finanzierung möglichst verursacherbezogen auszugestalten (zum Beispiel über eine Bonus-Malus-Regelung in der Kfz-Steuer).

7. **Eine effiziente Dekarbonisierungspolitik für den motorisierten Straßenverkehr erfordert schließlich auch Instrumente, welche Anreize zu einer Verringerung und Verlagerung der straßengebundenen motorisierten Mobilität setzen.** Das gilt auch im Falle einer erfolgreichen technischen Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs. Schließlich verursacht der motorisierte Straßenverkehr neben CO₂-Emissionen diverse weitere negative Umweltwirkungen (zum Beispiel Luftverschmutzung, Ressourcen- und Flächenverbrauch). Insbesondere Instrumente zur Förderung von Infrastrukturaufbau und Innovation setzen diesbezüglich nur unzureichende Anreize, können sogar zu ökologisch problematischen Rebound-Effekten führen. Die Ausgestaltung der Instrumente zur Verkehrsverlagerung und -verringerung muss sich dabei an den vorherrschenden Technologien orientieren. Unter den gegenwärtigen Bedingungen kann ein CO₂-Preis Suffizienzreize setzen. In einer rein strombasierten Mobilitätswelt können derartige Signale von einer Stromsteuer ausgehen. Stärker technologieneutrale Anreize zur Verkehrsvermeidung und

-verlagerung kann eine entfernungsabhängige Maut vermitteln.

8. **In jedem Falle erfordert eine erfolgreiche Dekarbonisierungspolitik im motorisierten Straßenverkehr zusätzlich eine klare und langfristig glaubwürdige politische Selbstbindung zugunsten eines Transformationspfades (Commitment).** Ohne eine glaubwürdige politische Bindung bezüglich der Ziele, Richtung und Unumkehrbarkeit der angestrebten Transformation werden die notwendigen großskaligen Investitionen privater Akteure in neue Infrastruktur und Produktionsanlagen nicht in ausreichendem Maße erfolgen. Entsprechendes Vertrauen kann die öffentliche Hand etwa durch öffentliche Investitionen in komplementäre Infrastruktur und durch eine parteiübergreifende Verständigung auf einen ambitionierten Klimaschutz schaffen. Hilfreich ist ferner ein Instrumentenmix, der klare verkehrs- und umweltpolitische Ziele definiert, auf breiter Front alle genannten Ansatzpunkte adressiert und zudem auf allen politischen Ebenen (europäisch, national, lokal) sichtbar verankert wird.
9. **Bei der Ausgestaltung des Instrumentenmixes sind Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen den Ansatzpunkten zu bedenken.** Insoweit von staatlicher Seite eine selektive Politik bezüglich bestimmter Technologien erfolgt, muss diese über alle Ansatzpunkte hinweg konsistent sein. So müssen etwa Infrastrukturförderung und Innovationsförderung zusammengedacht werden. Zudem interagieren die Ansatzpunkte wie kommunizierende Röhren: So können etwa stringenter Exnovationsinstrumente oder eine stärkere staatliche Förderung des Aufbaus komplementärer Infrastruktur die Notwendigkeit oder Intensität ergänzender Innovationsinstrumente reduzieren.
10. **Einzelinstrumentelle Lösungsstrategien können die Transformation des motorisierten Straßenverkehrs in keinem Falle effizient gewährleisten.** Eine effiziente Dekarbonisierungspolitik muss alle fünf Ansatzpunkte gemeinsam adressieren und darf sich nicht auf die Regulierung ausgewählter Ansatzpunkte beschränken. Dabei ist es sinnvoll, eher technologieneutrale und stärker technologiespezifische Instrumente miteinander zu kombinieren. So würde eine alleinige (technologieneutrale) CO₂-Bepreisung zwar Anreize zu Exnovation und Verkehrsverlagerung und -verringerung setzen, aber nicht alle

Barrieren bei der Durchsetzung neuer Technologien überwinden. In diesem Fall werden sich manche Technologien nicht in ökonomisch sinnvollem Ausmaß durchsetzen können. Die Transformation des motorisierten Straßenverkehrs würde länger dauern und teurer werden, der politische Gegendruck würde steigen. Umgekehrt wäre auch eine Strategie problematisch, welche allein auf (technologiespezifische) Innovationsinstrumente, wie etwa Kaufprämien, setzt. Ohne Exnovationsinstrumente und ein glaubwürdiges politisches Commitment bliebe die Effektivität solcher Instrumente fraglich. Gleichzeitig müssten unnötig hohe Förderkosten in Kauf genommen werden. Zudem würde eine reine Förderpolitik zu weiterem Verkehrswachstum beitragen.

11. **Die Instrumentierung der Ansatzpunkte beschreibt einen zeitlichen Transformationspfad.** Ihre Rolle wird sich mit fortschreitender Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs und technologischer Entwicklung verändern. Exnovationsinstrumente können bei erfolgreicher Dekarbonisierung wieder abgeschafft werden. Förderinstrumente für den Aufbau komplementärer Infrastruktur und Innovation werden typischerweise nur temporär benötigt, bis eine kritische Masse erreicht ist. Instrumente zur Verkehrsverlagerung und -verringerung müssen sich bei Veränderung des Technologiemixes ebenfalls anpassen. Gegenwärtig kann eine CO₂-Steuer auch Suffizienzsignale setzen. Mit fortschreitender Elektrifizierung der Mobilität muss diese Aufgabe etwa durch eine Stromsteuer übernommen werden. Im eingeschwungenen Zustand muss ein dekarbonisierter motorisierter Straßenverkehr zudem auf andere Weise als gegenwärtig zur Finanzierung der Straßenverkehrsinfrastruktur, zum Beispiel über eine entfernungsabhängige Maut, und zur Finanzierung öffentlicher Haushalte beitragen.
12. **Grundsätzlich gilt, dass sich neue (technologiespezifische) Instrumente sinnvoll in den bestehenden regulatorischen Rahmen einfügen müssen.** Aufgrund der Komplexität der einzelnen verkehrspolitischen Entscheidungsfelder ist ein Mix aus bestehenden und neuen Instrumenten unumgänglich. Bei der Neueinführung von Instrumenten müssen mögliche unerwünschte Wechselwirkungen mit dem bestehenden System berücksichtigt werden. Gegebenenfalls sind auch Anpassungen des bestehenden regulatorischen Rahmens notwendig. Andernfalls

steht nicht nur die Effektivität und Effizienz des Instruments infrage, sondern auch seine politische Umsetzbarkeit. So dürfte die Einführung von CO₂-Preisen ohne geeignete Abschmelzung klimaschädlicher Subventionen kaum erfolgversprechend sein.

13. **Auch theoretisch grundsätzlich vorteilhafte technologiespezifische Instrumente können in der Praxis an der Herausforderung einer effizienten und effektiven Umsetzung scheitern.** Entscheidend ist zum einen immer die konkrete Ausgestaltung der Instrumente. Zudem ist das regulatorische Setting zu beachten, in welches ein Instrument eingepasst wird. Aufgrund von Zielkonflikten, Wirkungsbrüchen im Instrumentenmix, rechtlichen Problemen, Informationsdefiziten, Transaktionskosten und politischer Einflussnahme können konzeptionell geeignete technologiespezifische Ansätze im praktischen Instrumentenvergleich zurückfallen. Dann besteht die Gefahr, dass fehlgeleitete technologiespezifische Eingriffe neue Verzerrungen schaffen, welche die Technologieoffenheit weiter einschränken. Es ist daher stets zu überprüfen und darzulegen, dass die letztlich im politischen Prozess ausgehandelte konkrete Ausgestaltung technologiespezifischer Instrumente noch zur eigentlichen ökonomischen Indikation passt.
14. **Verbleibende Unsicherheiten hinsichtlich der Effektivität und Effizienz der verkehrspolitischen Instrumente dürfen jedoch nicht als Entschuldigung für politische Inaktivität genutzt werden.** In Anbetracht der klimapolitischen Dringlichkeit und der notwendigen langfristigen Investitionen im motorisierten Straßenverkehr müssen jetzt klare politische Weichenstellungen erfolgen, um die Dekarbonisierung des Verkehrssektors unverzüglich einzuleiten. Grundsätzlich gilt dabei: Besser eine „zweitbeste“ Dekarbonisierungspolitik für den Straßenverkehrssektor als ein Verzicht auf eine klare politische Positionierung.

6 | Schlussbetrachtung

Der Klimaschutzplan 2050 der deutschen Bundesregierung sieht vor, dass die Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors bis zum Jahr 2030 um 40 bis 42 Prozent gegenüber dem Basisjahr 1990 gesenkt werden sollen. Um diese Ziele zu erreichen, bedarf es insbesondere einer substanziellen Dekarbonisierung des Straßenverkehrs. Eine wichtige Säule dieser Dekarbonisierung ist der Übergang zu emissionsärmeren (oder -freien) Antriebs-technologien und Kraftstoffen.

Unter politischen Akteuren besteht Uneinigkeit darüber, welche politischen Rahmensetzungen notwendig sind, um die 2030-Ziele zu erreichen. Im Mittelpunkt der politischen Diskussionen steht dabei auch die ökonomische Idee der Technologieneutralität. Dahinter steht die Forderung, dass klimapolitische Regulierung im Idealfall unmittelbar an der eigentlichen Zielgröße (hier: Reduktion der Treibhausgasemissionen im gesamten Verkehrssektor) ansetzen und dabei nicht zwischen verschiedenen technologischen Vermeidungsoptionen differenzieren sollte. Technologieneutralität, so das Argument, führe dazu, dass die Dekarbonisierung des gesamten Verkehrssektors langfristig kosteneffizient erfolge. Die Stärke eines technologieneutralen Ansatzes liege dabei insbesondere darin, dass dieser dezentrales Wissen über die Kosten und Nutzen verschiedener Technologien zu heben vermag, das dem Regulator für eine geeignete Differenzierung zwischen Technologien und Sektoren kaum zuverlässig zur Verfügung stehe. Im Mittelpunkt dieser Studie stand die kritische Reflektion dieses Arguments. Der Fokus lag dabei auf dem Pkw-Verkehr sowie dem Güternah-/regional- und -fernverkehr auf der Straße (kurz: motorisierter Straßenverkehr).

Technologieneutralität der Regulierung ist grundsätzlich zu unterscheiden von der Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes (inklusive der Eigenschaften der relevanten Akteure, Technologien, Märkte und bestehender Regelungen). Technologieoffenheit ist gegeben, wenn und soweit die Technologiewahl auf einem im Übrigen (das heißt jenseits des Klimaschutzes) unverzerrten Entscheidungsfeld stattfindet. Als unverzerrt stellt sich ein Entscheidungsfeld dann dar, wenn die (privaten oder staatlichen) Entscheider in Kenntnis und unter Berücksichtigung aller volkswirtschaftlich relevanten Kosten und Nutzen insoweit „richtige“ Abwägungsentscheidungen treffen.

In der Praxis ist die Technologiewahl im motorisierten Straßenverkehr typischerweise aufgrund diverser Marktunvollkommenheiten, politischer Fehlsteuerung und Pfadabhängigkeiten verzerrt. Hier ist technologieneutrale Regulierung jedoch gerade nicht in der Lage, Technologieoffenheit herzustellen. Um die vorgefundenen Verzerrungen effizient zu beheben, müssen vielmehr spezifische Eingriffe vorgenommen werden. Mithin besteht eine ökonomische Indikation für technologiespezifische Regulierung, wenn und soweit sich das vorgefundene Entscheidungsfeld (noch) nicht technologieoffen präsentiert.

Die ökonomische Indikation für technologiespezifische Regulierung wird zudem durch die Tatsache gestärkt, dass heute weitgehend bekannt sein dürfte, welche Technologien in den einzelnen Entscheidungsfeldern im motorisierten Straßenverkehr eine maßgebliche Rolle für die Erreichung der 2030-Ziele spielen werden. Im Entscheidungsfeld „Pkw-Verkehr“ werden batterieelektrische Antriebe kurz- bis mittelfristig die zentrale Rolle spielen. Die Nutzung von Wasserstoff in Brennstoffzellen sowie von synthetischen Kraftstoffen in Verbrennungsmotoren stellen zumindest bis zum Jahr 2030 lediglich Nischentechnologien dar. Im Entscheidungsfeld „Güternah- und -regionalverkehr“ (Verteilverkehr bis 150 km) ist bereits unter den derzeitigen marktlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen mittelfristig eine Durchdringung mit Batteriefahrzeugen zu erwarten. Im Entscheidungsfeld „Güterfernverkehr“ werden hingegen voraussichtlich hybride Lösungen – zum Beispiel Kombinationen von Oberleitungen, Batterie- und Brennstoffzellenantrieben – zum Einsatz kommen müssen.

Gleichzeitig steht aber auch eine technologiespezifische Regulierung vor dem Risiko, zwar theoretisch (bei perfekt angepasstem Design) effizient regulieren zu können, dies aber bei ungeeignetem Design in der Praxis nicht gewährleisten zu können – etwa aufgrund von Wissensdefiziten im Detail oder polit-ökonomischen Verzerrungen. Mithin stellt sich neben der Frage der Indikation von Technologiespezifität der Regulierung auch die Herausforderung, in welcher Form Technologiespezifität adäquat auf jeweils vorgefundene Verzerrungen im Entscheidungsfeld antworten sollte. Typischerweise bleibt ein Mindestmaß an wettbewerblicher Technologieauswahl bedeutsam, die auch dann noch sinnvoll bleibt, wenn einzelne technologiespezifische Eingriffe

Bewertung der aktuellen klimapolitischen Beschlüsse der Bundesregierung vor dem Hintergrund der Studie

Die Bundesregierung hat mit dem „**Klimaschutzprogramm 2030**“ einen Maßnahmenkatalog vorgelegt, mit dem die verkehrspolitischen Ziele entsprechend dem Klimaschutzplan 2050 bzw. dem Bundes-Klimaschutzgesetz erreicht werden sollen. Diese wurden teilweise bereits in Gesetzesform gegossen, teilweise bedürfen sie noch einer weiteren Konkretisierung. Die nachfolgende Übersicht skizziert, inwieweit die in dieser Studie als sinnvoll erachteten Ansatzpunkte einer Klimaschutzpolitik für den Straßenverkehrssektor darin adäquat berücksichtigt werden.

Marktaustritt fossiler Energieträger („Exnovation“)

Um den schrittweisen Austritt von mit fossilen Kraftstoffen betriebenen Antrieben zu forcieren, soll ein Emissionshandel für im Verkehrs- und Gebäudesektor eingesetzte Brennstoffe eingeführt werden. Geplant war dabei zunächst ein anfänglicher Fixpreis von 10 Euro je Tonne CO₂; im Zuge von Nachverhandlungen mit dem Bundesrat liegt der Anfangspreis im Jahr 2021 nunmehr bei 25 Euro je Tonne CO₂. Weiterhin setzt das Programm auf die bereits bestehenden EU-Flottengrenzwerte für CO₂-Emissionen. Zudem soll künftig eine CO₂-Differenzierung der Lkw-Maut erfolgen. Die Kfz-Steuer soll ebenfalls stärker an den CO₂-Emissionen ausgerichtet werden. Eine Konkretisierung und zeitliche Umsetzungsplanung stehen hierbei allerdings noch aus.

Inwieweit von den bisher vorgeschlagenen und verabschiedeten Instrumenten eine für das Gelingen der Verkehrswende ausreichende Exnovations-Wirkung ausgehen kann, bleibt zweifelhaft. Notwendig wäre dafür insbesondere ein ambitionierterer Einstiegspreis und nachfolgender Preispfad für den Emissionshandel. Gerade wenn dies politisch nicht durchsetzbar sein sollte, käme einer CO₂-orientierten Reform der Kfz-Steuer größere Bedeutung bei. Diese könnte einhergehen mit einer grundsätzlichen Weiterentwicklung in Richtung eines konsistenten, aufkommensneutralen Bonus-Malus-Systems, bei dem fiskalische Anreize verstärkt unmittelbar beim Fahrzeugkauf ansetzen. Ein deutlicher Malus für CO₂-intensive Antriebe würde dann Anreize zum Kauf klimafreundlicher Fahrzeuge setzen.

Zudem würde eine Korrektur weiterhin bestehender Fehlanreize wichtige Exnovationsanreize setzen. Als Beispiele für solche Fehlanreize zu nennen sind etwa die fragwürdigen Differenzierungen innerhalb der Energiesteuern, insbesondere das Dieselprivileg, und die fortbestehende steuerliche Privilegierung auch von Dienstwagen mit konventionellem Antrieb.

Aufbau von komplementärer Infrastruktur für neue emissionsarme Technologien

Im Mittelpunkt des Programms steht der Ausbau der **Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Fahrzeuge** (1 Mio. Ladepunkte bis 2030). Neben der staatlichen Förderung der Errichtung von Ladepunkten sollen auch rechtliche Hemmnisse für deren Errichtung, beispielsweise im Bau- und Wohneigentumsrecht, abgebaut werden. Zudem will die Bundesregierung **Konzepte für den Ausbau der Tank-, Lade- und Oberleitungsinfrastruktur** für den Bereich des Güterverkehrs entwickeln.

Die technologiespezifische Fokussierung auf die Förderung der Bereitstellung von Ladesäulen für batterieelektrische Fahrzeuge erscheint zumindest für den Pkw-Bereich ökonomisch begründbar. Eine solche staatliche Förderung ist jedoch nur sinnvoll, bis eine kritische Masse an Infrastruktur bereitsteht, die dann auch privat weiter ausgebaut wird. Ob diese kritische Masse bei 1 Mio. Ladepunkten erreicht oder sogar schon überschritten ist, konnte bislang nicht schlüssig gezeigt werden. Maßnahmen zur Bereitstellung der notwendigen komplementären Infrastruktur für den Güterverkehr bedürfen in jedem Falle einer zeitnahen Konkretisierung und Umsetzung, damit die erforderlichen Emissionsminderungen im Güterverkehr ermöglicht werden. Die im Klimaschutzprogramm gemachten Ausführungen lassen hier noch keine Bewertung zu.

Entwicklung, Produktion und Anschaffung neuer emissionsarmer Technologien („Innovation“)

Als zentrales Instrument, um die Marktdurchdringung von Fahrzeugen mit alternativen Antriebstechnologien zu fördern, sieht das Klimaschutzprogramm **staatliche Kaufprämien für Elektrofahrzeuge** (batterieelektrischer Antrieb, Brennstoffzelle, Plug-in-Hybride) sowohl im Pkw- als auch im Lkw-Bereich vor. Im Pkw-Bereich sollen die bestehenden Kaufprämien verlängert und erhöht werden, insbesondere für Fahrzeuge mit einem Kaufpreis von weniger als 40.000 Euro. Zudem soll das **Steuerprivileg** für batterieelektrische und plug-in-hybride Dienstwagen bis zum Jahr 2030 verlängert und für Fahrzeuge mit einem Kaufpreis von weniger als 40.000 Euro ausgeweitet werden. Flankierend soll die **Forschung und Entwicklung zu Brennstoffzelle sowie strombasierten synthetischen Kraftstoffen und fortschrittlichen Biokraftstoffen** unterstützt werden.

Die klimapolitische Wirksamkeit dieser Maßnahmen ist insgesamt unsicher (Gefahr von nur begrenzter Weiterreichung von Subventionen an Autokäufer sowie von Mitnahme- und Rebound-Effekten), zumal falls parallel keine spürbare Belastung von mit fossilen Kraftstoffen betriebenen Antriebstechnologien erfolgt. Vor diesem Hintergrund – und auch zur Schonung der öffentlichen Haushalte – erscheint es sinnvoll, Kaufprämien stärker zu fokussieren. So könnte eine weitgehende Begrenzung der Kaufprämie auf Fahrzeuge mit einem Kaufpreis von weniger als 40.000 Euro helfen, Nachfrage insbesondere in den Segmenten zu stimulieren, in denen tatsächlich relevante Budgetrestriktionen bestehen. Eine hohe Wirksamkeit hinsichtlich der Marktdurchdringung würde im Übrigen auch eine handelbare (und haushaltsneutrale) Quote für emissionsfreie Fahrzeuge aufweisen.

Auch die Sinnhaftigkeit der vorgesehenen Förderung von Plug-in-Hybriden, vor allem im Rahmen der Dienstwagenbesteuerung, ist aus klimapolitischer Perspektive kritisch zu hinterfragen. Soweit diese in der Praxis primär mit fossilen Kraftstoffen betrieben werden, leisten sie keinen nennenswerten Klimaschutzbeitrag. Spezifische Förderungen sollten jedoch nur ausgereicht werden, wenn und insoweit die profitierenden Technologien einen solchen Beitrag tatsächlich erwarten lassen.

Unbeschadet einer stärkeren Fokussierung der Förderinstrumente behält die gleichzeitige CO₂-orientierte Verteuerung des mit fossiler Energie angetriebenen Verbrenners aus Effizienz-, Effektivitäts- und auch aus Finanzierungsgründen ihre Wichtigkeit.

Verlagerung und Verringerung des Straßenverkehrs

Um den Straßenverkehr insgesamt zu reduzieren, setzt das Programm auf diverse Maßnahmen, welche **andere Mobilitätsformen fördern und günstiger machen** (z.B. Mehrwertsteuersenkung für den Eisenbahnfernverkehr, Ausbau sowie Modernisierung und Elektrifizierung von Bahnstrecken, mehr öffentliche Mittel für Ausbau von öffentlichem Personennahverkehr und Radwegen). Es ist allerdings fraglich, ob die vorgeschlagenen Maßnahmen tatsächlich dazu beitragen werden, den Straßenverkehr signifikant zu verlagern und verringern. Zum einen vermag der wenig ambitionierte Emissionshandel hier kaum Wirkung zu entfalten. Zum anderen sind die Effekte der Fördermaßnahmen unklar (z.B. kurz- bis mittelfristige Kapazitätsengpässe bei Bahn und ÖPNV, um die Passagierzahlen substanziell zu erhöhen; eventuelle zukünftige Einpreisung der Mehrwertsteuersenkung bei Tarifierhöhungen der Bahn).

Ferner werden mit dem Klimaprogramm auch Anreize gesetzt, die sogar zu mehr Straßenverkehr führen könnten. Hierzu zählen beispielsweise die Erhöhung der Entfernungspauschale für Fernpendler sowie die Einführung einer „Mobilitätsprämie“. Auch die Verlängerung und weitere Erhöhung der steuerlichen Privilegierung für privat genutzte Dienstwagen mit alternativem Antrieb wirkt tendenziell verkehrsinduzierend. Mit Blick auf die verlängerten umfangreichen Privilegien für Plug-in-Hybride kann hiermit sogar auch ein Anstieg der CO₂-Emissionen einhergehen.

Somit sind zwingend weitere Maßnahmen notwendig, um dem stetigen Wachstum des Straßenverkehrs entgegenzuwirken. Andernfalls kann das Klimaschutzpaket – das bislang primär auf die Förderung des Wechsels der Antriebstechnologien setzt – eine effiziente und nachhaltige Erreichung der klimapolitischen Ziele im Verkehrssektor nicht gewährleisten. Als Anreiz für eine stärkere Verkehrsverlagerung und -verringerung kommen zum gegenwärtigen Zeitpunkt insbesondere ein deutlich ambitionierterer CO₂-Preis oder höhere Energiesteuern in Frage, mittelfristig könnte eine entfernungsabhängige Pkw-Maut diesem Zweck dienen und überdies eine effizientere Verkehrslenkung unterstützen.

In einer zunehmend elektrifizierten Mobilitätswelt kann künftig zudem der Stromsteuer eine Rolle bei der Verkehrsverlagerung und -verringerung zufallen. Ebenfalls helfen könnte sie bei der Umkehr des Trends zu immer größeren, schwereren und leistungstärkeren Fahrzeugen. Mit Blick auf die in der Vorkette anfallenden Umweltbelastungen sollten schließlich auch (lokal) emissionsfreie elektrische Fahrzeuge möglichst sparsam im Energieverbrauch sein, wozu es geeignete Instrumente zu entwerfen gilt.

Langfristige und glaubwürdige politische Selbstbindung

Zum Zweck der langfristigen politischen Orientierung werden **für jeden Sektor und jedes Jahr Minderungsziele** für Treibhausgasemissionen explizit in einem Bundes-Klimaschutzgesetz festgehalten. Es ist vorgesehen, die Einhaltung dieser Ziele **fortlaufend zu überwachen**. Bei Nichterreichung der jährlichen Minderungsziele soll durch Sofortprogramme nachgesteuert werden.

Grundsätzlich ist die gesetzliche Fixierung konkreter Sektorziele unter dem Gesichtspunkt der langfristigen und glaubwürdigen politischen Selbstbindung zu begrüßen. Sanktionsbewehrt ist eine Zielverfehlung insoweit, dass hieraus erhebliche Kosten für den Bundeshaushalt im

Rahmen der Climate-Action-Verordnung entstehen können. Diese regelt die Lastenteilung in der Europäischen Union bei der Treibhausgasminderung in den nicht vom europäischen Emissionshandel erfassten Sektoren, zu denen auch der Straßenverkehr gehört. Werden die Ziele in diesem sogenannten Non-ETS-Bereich verfehlt, muss Deutschland Emissionsrechte bei Ländern zukaufen, die ihre Minderungsziele übererfüllen. Auf Ebene der einzelnen Sektoren bzw. der Ressortebene fehlt es hingegen an expliziten und wirksamen Sanktionsmechanismen für den Fall der Zielverletzung, was die Glaubwürdigkeit der Sektorziele schwächt.

Die weithin bestehende Einschätzung, dass diesem Klimaschutzprogramm zwingend weitere Maßnahmen zur Zielerreichung werden folgen müssen, sowie der Fortbestand widersprüchlicher Signale etwa im Bereich klimaschädlicher Subventionen, tragen ebenfalls nicht zu glaubwürdiger Selbstbindung bei.

angezeigt sind, etwa bei der Auswahl alternativer Batterietechnologien. Insgesamt dürfte daher gelten: Soviel Technologieneutralität wie möglich, so viel Technologiespezifität wie nötig.

Für die Instrumentierung einer Dekarbonisierungspolitik für den motorisierten Straßenverkehr zeichnen sich fünf Hauptansatzpunkte ab: (1) Marktaustritt fossiler Technologien (Exnovation), (2) Aufbau komplementärer Infrastruktur für neue emissionsarme Technologien, (3) Entwicklung, Produktion und Marktdurchdringung neuer emissionsarmer Technologien (Innovation), (4) Verlagerung und Verlagerung des Straßenverkehrs sowie (5) insgesamt eine langfristige und glaubwürdige politische Selbstbindung hinsichtlich der Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs. Ein effektiver und effizienter Instrumentenmix zur Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs muss diese Hauptansatzpunkte gemeinsam in den Blick nehmen und zusammendenken. Dabei bietet sich eine Kombination aus eher technologieneutralen Instrumenten (zum Beispiel für Exnovation und Verkehrsverlagerung und -verringern) und stärker technologiespezifischen Instrumenten (zum Beispiel für Innovation und Infrastruktur) an.

In Anbetracht der klimapolitischen Dringlichkeit und der notwendigen langfristigen Investitionen im Straßenverkehr müssen jetzt klare politische Weichenstellungen erfolgen, um die Dekarbonisierung des Verkehrssektors unverzüglich einzuleiten und für alle Akteure als unumkehrbar zu vermitteln. Grundsätzlich gilt dabei: Besser eine „zweitbeste“ Dekarbonisierungspolitik für den

Straßenverkehr als ein Verzicht auf eine klare politische Positionierung. Vor diesem Hintergrund müssen auch die aktuellen politischen Beschlüsse für das Klimaschutzprogramm 2030 bewertet werden (vgl. Box).

Die Diskussion verkehrspolitischer Weichenstellungen erfolgt im Rahmen dieser Studie insbesondere in Hinblick auf die Erreichung der für das Jahr 2030 gesetzten Emissionsreduktionsziele. Wird die Perspektive über diesen Zeitraum geweitet, stellen sich zusätzliche Herausforderungen. Insbesondere ist gegenwärtig noch nicht absehbar, welche Technologien die vollständige Dekarbonisierung des motorisierten Straßenverkehrs bis zum Jahr 2050 effektiv und kosteneffizient bewerkstelligen können. Das liegt insbesondere daran, dass die technologische Entwicklung über diesen Zeitraum größeren Unsicherheiten unterliegt als etwas eine Betrachtung bis zum Jahr 2030. Umso wichtiger ist es daher, heutige politische Weichenstellungen so zu treffen, dass keine perspektivisch nutzbaren Technologien unnötigerweise administrativ ausgeschlossen werden. Regulatorische Rahmenbedingungen sollten es daher ermöglichen, dass sich heutige technologische Nischen (zum Beispiel Nutzung von Brennstoffzelle oder synthetischen Kraftstoffen im Pkw) auch dann weiterentwickeln können, wenn in absehbarer Zeit noch keine großskalige Nutzung erfolgen dürfte und sinnvoll ist. Darüber hinaus müssen die Effektivität und Adäquanz insbesondere technologiespezifischer Regulierungsansätze kontinuierlich überwacht und geprüft werden. Mit fortschreitendem technologischem Wandel sind zu späteren Zeitpunkten (nach 2030) zum Beispiel möglicherweise neue Förderschwerpunkte festzulegen.

Darüber hinaus beschränkt sich die Studie auf die Regulierung des Straßenverkehrs in Deutschland. So wurden etwa der Nutzung von Bahn, Schiff oder Flugzeug und den damit verbundenen Technologieentscheidungen, die ebenfalls zur Dekarbonisierung im Verkehr beitragen müssen, nur am Rande Aufmerksamkeit gewidmet. Gleiches gilt für die Beschränkung auf den nationalen Klimabeitrag. Damit wurde schon von vornherein ein im Verständnis diese Studie stark technologiespezifischer Zugang gewählt, da nur Klimaschutzbeiträge eines bestimmten Emittentensegments in den Blick genommen wurden. Es liegt auf der Hand, dass derartige sektorale Betrachtungseinschränkungen Gefahr laufen, die Kosteneffizienz der Regulierung im Interesse des Klimaschutzes einzuschränken. Speziell für technologie neutrale Instrumente – wie etwa ein CO₂-Preis – sollte die Diskussion vorzugsweise immer auch sektorübergreifend sowie auf europäischer Ebene erfolgen, um Probleme durch mögliche Verschiebungen von Emissionen (Effektivitätsproblem) oder unterschiedlich starke Vermeidungsanreize (Effizienzproblem) zu adressieren. Gleichwohl bleibt die Frage, wie die Klimaschutzbeiträge des motorisierten Straßenverkehrs in Deutschland zielkonform politisch organisiert werden können.

Grundsätzlich können die hier vorgestellten Überlegungen zur Technologieneutralität auch auf andere politische Handlungsfelder übertragen werden. So stellen sich etwa bei der Energiewende im Stromsektor ähnliche Fragen, etwa zur Angemessenheit der differenzierten Behandlung von Technologien der Stromerzeugung. Aktuell ist eine Diskussion um Technologieneutralität zudem auch im Kontext grüner Industriepolitik allgemein (Stichwort: „European Green New Deal“) oder grüner Finanzpolitik zu erwarten. Auch in diesen Kontexten mag man möglicherweise argumentieren, dass die Voraussetzungen für eine ökonomische Überlegenheit rein technologie neutraler Ansätze (relevante Vorsprünge dezentralen Wissens, perfekte Technologieoffenheit des Entscheidungsfeldes, ein einziges politisches Regulierungsziel) nicht notwendigerweise vorliegen. Gleichwohl hat die Untersuchung am Beispiel des motorisierten Straßenverkehrs auch gezeigt, dass eine ökonomische Indikation für oder wider Technologiespezifität ein genaues Verständnis technologischer, marktlicher und sonstiger institutioneller Eigenschaften des jeweiligen Entscheidungsfeldes voraussetzt und dass selbst aus einer möglichen Indikation noch keine Begründetheit jedweden Politikdesigns

der Technologiedifferenzierung folgt. Insofern bedürfen die in dieser Studie getroffenen Aussagen zur Ausgestaltung technologiespezifischer Instrumente einer näheren Kontextprüfung, wenn Empfehlungen auch für andere politische Handlungsfelder abgeleitet werden sollen.

7 | Literaturverzeichnis

Aalbers et al. (2013): Aalbers, Rob; Shestalova, Victoria; Kocsis, Viktória. *Innovation policy for directing technical change in the power sector*. In: Energy Policy 63, S. 1240–1250.

Abrell; Weigt (2008): Abrell, J.; Weigt, H. *The Interaction of Emissions Trading and Renewable Energy Promotion*. Discussion Paper, Dresden University of Technology Dresden.

ADAC (2017): Allgemeiner Deutscher Automobilclub e. V. *ADAC Autotest – Toyota Mirai*. URL: https://www.adac.de/_ext/itr/tests/Autotest/AT5568_Toyota_Mirai/Toyota_Mirai.pdf. Letzter Zugriff am: 06.10.2019.

ADAC (2018a): Allgemeiner Deutscher Automobilclub e. V. *Mit alternativen Antrieben zur Mobilität von morgen*. Pressemitteilung vom 24.09.2018. URL: <https://presse.adac.de/meldungen/adac-ev/verkehr/mit-alternativen-antrieben-zur-mobilitaet-von-morgen.html>. Letzter Zugriff am: 09.10.2019.

ADAC (2018b): Allgemeiner Deutscher Automobilclub e. V. *Welcher Pkw fährt billiger: Elektro, Benziner oder Diesel?* URL: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/e-mobilitaet/kaufen/elektroauto-kostenvergleich/>. Letzter Zugriff am: 14.10.2019.

ADAC (2018c): Allgemeiner Deutscher Automobilclub e. V. *ADAC Autotest – Hyundai Nexi*. URL: https://www.adac.de/_ext/itr/tests/Autotest/AT5772_Hyundai_Nexo/Hyundai_Nexo.pdf. Letzter Zugriff am: 06.10.2019.

ADAC (2019a): Allgemeiner Deutscher Automobilclub e. V. *ADAC EcoTest – Fünf Sterne für die Umwelt*. URL: <https://www.adac.de/infotestrat/tests/eco-test/default.aspx>. Letzter Zugriff am: 04.10.2019.

ADAC (2019b): Allgemeiner Deutscher Automobilclub e. V. *Tankstellen in Deutschland*. URL: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/deutschland/tankstellen-in-deutschland/>. Letzter Zugriff am: 14.10.2019.

ADAC (2019c): Allgemeiner Deutscher Automobilclub e. V. *Kraftstoffe – Erdgas*. URL: <https://www.adac.de/info-testrat/tanken-kraftstoffe-und-antrieb/alternative-kraftstoffe/erdgas/>. Letzter Zugriff am: 14.10.2019.

ADAC (2019d): Allgemeiner Deutscher Automobilclub e. V. *Kostenvergleich E-Fahrzeuge + Plug-In Hybride gegen Benziner und Diesel*. URL: https://www.adac.de/_mmm/pdf/E-AutosVergleich_260562.pdf. Letzter Zugriff am: 21.10.2019.

ADAC (2019e): Allgemeiner Deutscher Automobilclub e. V. *Toyota Prius Plug-in-Hybrid: Test, Verbrauch, Daten*. URL: <https://www.adac.de/der-adac/motorwelt/reportagen-berichte/auto-innovation/toyota-prius-plug-in-hybrid-dauertest/>. Letzter Zugriff am: 05.10.2019.

Adolf et al. (2016): Adolf, J.; Balzer, C.; Haase, F.; Lenz, B.; Lischke, A.; Knitschky, G. *Shell Nutzfahrzeug-Studie 2016*. URL: https://www.shell.de/promos/media/shell-goods-vehicle-study/_jcr_content.stream/1466682556570/006b9c62dcca41b86d0adaf-c3ee2ad4fa14ef4d3/shell-nutzfahrzeugstudie.pdf. Letzter Zugriff am: 15.10.2019.

AfD (2019): Alternative für Deutschland. *„Programm der Alternative für Deutschland für die Wahl zum 9. Europäischen Parlament 2019“*. URL: <http://www.afd.de/europa-wahlprogramm>. Letzter Zugriff am: 09.10.2019.

Agora Verkehrswende (2017): Agora Verkehrswende. *Mit der Verkehrswende die Mobilität von morgen sichern – 12 Thesen zur Verkehrswende*. URL: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/12_Thesen/Agora-Verkehrswende-12-Thesen_WEB.pdf. Letzter Zugriff am: 25.11.2019.

Agora Verkehrswende et al. (2018): Agora Verkehrswende; Agora Energiewende; Frontier Economics. *Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe*. URL: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_Syn-Cost-Studie_WEB.pdf. Letzter Zugriff am: 21.10.2019.

Akerlof (1970): Akerlof, George A. *The Market for “Lemons”: Quality Uncertainty and the Market Mechanism*. Quarterly Journal of Economics 84, S. 488–500.

Amundsen; Mortensen (2001): Amundsen, E. S.; Mortensen, J. B. *The Danish Green Certificate Market: Some Simple Analytical Results*. In: Energy Economics 23, S. 489–509.

Andor et al. (2015): Andor, Mark; Frondel, Manuel; Schmidt, Christoph; Simora, Michael; Sommer, Stephan. *Klima- und Energiepolitik in Deutschland – Dissens und Konsens*. In: List Forum 41 (1), S. 3–21.

Arguedas; van Soest (2009): Arguedas, Carmen; van Soest, Daan P. *On reducing the windfall profits in environmental subsidy programs*. In: Journal of Environmental Economics and Management 58 (2), S. 192–205.

Arrow (1962a): Arrow, Kenneth. *Economic Welfare and the allocation of Resources for Invention*. In: National Bureau of Economic Research (Hrsg.), *The Rate and Direction of Inventive Activity: Economic and Social Factors*, Princeton University Press, Princeton, S. 609–626.

Arrow (1962b): Arrow, Kenneth. *The economic implications of learning by doing*. In: Review of Economic Studies 29, S. 155–173.

Arthur (1989): Arthur, Brian. *Competing technologies, increasing returns, and lock-in by historical events*. In: The Economic Journal 99, S. 116–131.

Autobild (2019): Autobild. *E-Auto laden bei Aldi, Lidl, Kaufland und Ikea: E-Ladesäulen*. URL: <https://www.autobild.de/artikel/e-auto-laden-bei-aldi-lidl-und-ikea-e-ladesaeulen-930292.html>. Letzter Zugriff am: 15.10.2019.

Azar; Sandén (2011): Azar, Christian; Sandén, Björn. *The elusive quest for technology-neutral policies*. In: Environmental Innovation and Societal Transitions 1 (1), S. 135–139.

BAG (2018): Bundesamt für Güterverkehr. *Mautstatistik*.

Barba (2018): Barba, D. *Assessing the efficiency potential of future gasoline engines*. Präsentation bei SAE 2018 High Efficiency IC Engine Symposium, 8. April 2018. URL: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-10/documents/high-efficiency-ic-engine-sae-2018-04.pdf>. Letzter Zugriff am: 03.12.2019.

Bauer et al. (2012): Bauer, N.; Brecha, R. J.; Luderer, G. *Economics of nuclear power and climate change mitigation policies*. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 109, S. 16805–16810.

Bauknecht (2012): Bauknecht, Dierk. *Transforming the grid. Electricity System Governance and Network Integration of Distributed Generation*. Nomos: Baden-Baden.

Baumann; Priemer (2017): Baumann, U.; Priemer, B. *Mercedes Urban eTruck: Elektroantrieb für Lkw*. URL: <https://www.auto-motor-und-sport.de/news/mercedes-urban-etruck-elektroantrieb-fuer-lkw/>. Letzter Zugriff am: 15.10.2019.

Bäumer et al. (2017): Bäumer, Marcus; Hautzinger, Heinz; Pfeiffer, Manfred; Stock, Wilfried; Lenz, Barbara; Kuhnimhof, Tobias; Köhler, Katja. *Fahrleistungserhebung 2014 – Inländerfahrleistung. Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen Verkehrstechnik V 290*. Bremen: Fachverlag NW.

Baumol; Oates (1971): Baumol, William J.; Oates, Wallace E. *The Use of Standards and Prices for Protection of the Environment*. In: The Swedish Journal of Economics 73 (1), S. 42–54.

BCG; Prognos (2019): Boston Consulting Group; Prognos. *Analyse Klimapfade 2030*. URL: <https://e.issuu.com/embed.html#2902526/67315068>. Letzter Zugriff am: 13.08.2019.

BDEW (2019a): Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft. *Zahl der Woche / 65 Prozent...* URL: <http://www.bdew.de/presse/presseinformationen/zahl-der-woche-65-prozent/>. Letzter Zugriff am: 14.10.2019.

BDEW (2019b): Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft. *Ladesäulenregister*. URL: <https://ladesaeulenregister.de/>. Letzter Zugriff am: 03.12.2019.

Becker et al. (2012): Becker, U.; Becker, T.; Gerlach. *Externe Autokosten in der EU-27 Überblick über existierende Studien*. URL: https://www.greens-efa.eu/legacy/fileadmin/dam/Documents/Studies/Costs_of_cars/The_true_costs_of_cars_DE.pdf. Letzter Zugriff am: 04.10.2019.

Bergek; Jacobsson (2010): Bergek, A.; Jacobsson, S. *Are tradable green certificates a cost-efficient policy driving technical change or a rent-generating machine? Lessons from Sweden 2003–2008*. In: Energy Policy 38, S. 1255–1271.

Bernstein (2014): Bernstein, T. *Probleme eines Economic Public Sector Comparators am Beispiel der Magnetschnellbahn in München*. URL: <https://download.e-bookshelf.de/download/0002/9334/13/L-G-0002933413-0005509815.pdf>. Letzter Zugriff am: 21.10.2019.

Betz; Sato (2006): Betz, R.; Sato, M. *Emissions trading: lessons learnt from the 1st phase of the EU ETS and prospects for the 2nd phase*. In: Climate Policy 6, S. 351–359.

BGL (2019): Bundesverbandes Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung. *Modellrechnungen zur Kostenentwicklung im Güterkraftverkehr*. URL: http://www.bgl-ev.de/web/der_bgl/informationen/branchenkostenentwicklung.htm. Letzter Zugriff am: 15.10.2019.

Bickenbach et al.(1999): Bickenbach, Frank; Kumkar, Lars; Soltwedel, Rüdiger. *The New Institutional Economics of Antitrust and Regulation*. In: Kiel Working Paper No. 961.

Bläsi; Requate (2007): Bläsi, A.; Requate, T. *Subsidies for Wind Power: Surfing down the Learning Curve?* CAU Economic Working Paper, Christian-Albrechts-Universität Kiel.

Bläsi; Requate (2010): Bläsi, A.; Requate, T. *Feed-in-Tariffs for Electricity from Renewable Energy Resources to Move Down the Learning Curve?* In: Public Finance and Management 10, S. 213–250.

BLE (2017): Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. *Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2017 – Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung – Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung*. URL: https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Klima-Energie/Nachhaltige-Biomasseherstellung/Evaluationsbericht_2017.pdf?jsessionid=BD276F204EE0FE6CA4D-1CCA319C5166B.2_cid325?__blob=publicationFile&v=3. Letzter Zugriff am: 04.10.2019.

Bloomberg (2018): Bloomberg New Energy Finance. *Elektromobilität: Teslas Batteriezellen stellen die deutsche Konkurrenz in den Schatten*. URL: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/elektromobilitaet-teslas-batteriezellen-stellen-die-deutsche-konkurrenz-in-den-schatten/22992678.html>. Letzter Zugriff am: 14.10.2019.

BMBF (2019): Bundesministerium für Bildung und Forschung – BMBF. *Synthetische Kraftstoffe*. URL: <https://www.bmbf.de/de/synthetische-kraftstoffe-5040.html>. Letzter Zugriff am: 15.10.2019.

BMU (2008): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. *Erneuerbare Energien in Zahlen – Nationale und internationale Entwicklung (Internet-Update)*. Berlin.

BMU (2011): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. *Entwurf Erfahrungsbericht 2011 zum Erneuerbare-Energien-Gesetz (Stand 3.5.2011)*. Berlin.

BMU (2016): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. *Klimaschutzplan 2050 – Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung*. Berlin.

BMU (2018): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. *Klimabilanz 2018: 4,5 Prozent weniger Treibhausgasemissionen*. Pressemitteilung vom 02.04.2019. URL: <https://www.bmu.de/pressemitteilung/klimabilanz-2018-45-prozent-weniger-treibhausgasemissionen/>. Letzter Zugriff am: 23.10.2019.

BMU (2019): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. *Erster eHighway auf deutscher Autobahn – BMU-Pressemitteilung*. URL: <https://www.bmu.de/PM8497>. Letzter Zugriff am: 04.10.2019.

BMVI (2017): Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. *Aufruf zur Antragseinreichung zur Förderung von öffentlich zugänglichen Wasserstofftankstellen im Straßenverkehr (05/2019)*. URL: <https://www.now-gmbh.de/content/2-bundesfoerderung-wasserstoff-und-brennstoffzelle/1-foerderrichtlinien/oeffentliche-tankstellen.pdf>. Letzter Zugriff am: 07.10.2019.

BMVI (2018): Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. *Verkehr in Zahlen 2018/2019*.

BMWi (2016): Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. *Referentenentwurf des BMWi (IIIB2). Entwurf eines Gesetzes zur Einführung von Ausschreibungen für Strom aus erneuerbaren Energien und zu weiteren Änderungen des Rechts der erneuerbaren Energien*. Berlin.

BMWi (2019): Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. *Bekanntmachung Richtlinie zur Förderung des Absatzes von elektrisch betriebenen Fahrzeugen (Umweltbonus) vom 30. Mai 2019*. URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/bekanntmachung-zur-richtlinie-zur-foerderung-des-absatzes-von-elektrisch-betriebenen-fahrzeugen.pdf?__blob=publicationFile&v=6. Letzter Zugriff am: 06.10.2019.

Böhringer et al. (2009): Böhringer, C.; Löschel, A.; Moslener, U.; Rutherford, T.F. *EU climate policy up to 2020: An economic impact assessment*. In: *Energy Economics* 31, S. 295–305.

Böhringer; Rosendahl (2010): Böhringer, C.; Rosendahl, K.E. *Green Promotes the Dirtiest: On the Interaction between Black and Green Quotas in Energy Markets*. In: *Journal of Regulatory Economics* 37, S. 316–325.

Böhringer; Rosendahl (2011): Böhringer, C.; Rosendahl, K.E. *Greening Electricity More Than Necessary: On the Cost Implications of Overlapping Regulation in EU Climate Policy*. In: *Schmollers Jahrbuch* 131, S. 469–492.

Bollinger; Gillingham (2014): Bollinger, B.; Gillingham, K. *Learning-by-Doing in Solar Photovoltaic Installations*, Discussion Paper, Yale University New Haven.

Boots (2003): Boots, M. *Green certificates and carbon trading in the Netherlands*. In: *Energy Policy* 31, S. 43–50.

Bradford (2012): Bradford, P. *The nuclear landscape*. In: *Nature* 483, S. 151–152.

Braun et al. (2010): Braun, F.G.; Schmidt-Ehmcke, J.; Złoczysty, P. *Innovative Activity in Wind and Solar Technology: Empirical Evidence on Knowledge Spillovers Using Patent Data*. Discussion Paper, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung Berlin.

Bretschger et al. (2012): Bretschger, L.; Ramer, R.; Zhang, L. *Economic effects of a nuclear phase-out policy: A CGE analysis*, Working Paper 12/167, Center of Economic Research at ETH Zurich.

Bruninx et al. (2013): Bruninx, K.; Madzharov, D.; Delarue, E.; D'haeseleer, W. *Impact of the German nuclear phase-out on Europe's electricity generation – A comprehensive study*. In: *Energy Policy* 60, S. 251–261.

Büllingen (1997): Büllingen, F. *Die Genese der Magnetbahn Transrapid*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.

BUND (2019): Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland. *Mobilität der Zukunft muss Energie und Ressourcen sparen Verkehrswende ist vor allem Ausbau des öffentlichen Nahverkehrs und mehr Raum für Radfahrer und Fußgänger*. Pressemitteilung vom 08.05.2019. URL: <https://www.bund.net/service/presse/%20pressemittelungen/detail/news/mobilitaet-der-zukunft-muss-energie-und-ressourcen-sparen-verkehrswende-ist-vor-alle-m-ausbau-des-oef/>. Letzter Zugriff am: 09.10.2019.

Bundesrat (2016): Bundesrat. *Drucksache des Bundesrates 310/16 vom 09.06.2016. Gesetzentwurf der Bundesregierung. Entwurf eines Gesetzes zur Einführung von Ausschreibungen für Strom aus erneuerbaren Energien und zu weiteren Änderungen des Rechts der erneuerbaren Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG 2016)*.

Bundesregierung (2002): *Perspektiven für Deutschland – Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung*.

Bundesregierung (2009): Bundesregierung: *Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung*.

Bundesregierung (2010): *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*. URL: <https://archiv.bundesregierung.de/resource/blob/656922/779770/794fd0c40425acd7f46a-facbe62600f6/energiekonzept-final-data.pdf?download=1>. Letzter Zugriff am: 23.08.2019.

Bundesregierung (2011): Bundesregierung. *Erfahrungsbericht 2011 zum Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG-Erfahrungsbericht) gemäß § 65 EEG vorzulegen dem Deutschen Bundestag durch die Bundesregierung.*

Bundestag (1999): Bundestag. *Drucksache des Deutschen Bundestages 14/2341 vom 13.12.1999: Entwurf eines Gesetzes zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG) sowie zur Änderung des Mineralölsteuergesetzes.*

Bundestag (2000): Bundestag. *Drucksache des Deutschen Bundestages 14/2776 vom 23.02.2000: Beschlussempfehlung und Bericht des Ausschusses für Wirtschaft und Technologie (9. Ausschuss) zu dem Gesetzesentwurf der Fraktionen SPD und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN – Drucksache 14/2341 – Entwurf eines Gesetzes zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG) sowie zur Änderung des Mineralölsteuergesetzes.*

Bundestag (2008): Bundestag. *Drucksache des Deutschen Bundestages 16/8148 vom 18.02.2008: Entwurf eines Gesetzes zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich und zur Änderung damit zusammenhängender Vorschriften.*

Bundestag (2011): Bundestag. *Drucksache des Deutschen Bundestages 17/6247 vom 22. 06. 2011. Gesetzesentwurf der Bundesregierung Entwurf eines Gesetzes zur Neuregelung des Rechtsrahmens für die Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien.*

Bundestag (2014): Bundestag. *Drucksache des Deutschen Bundestages 18/1304 vom 05.05.2014: Entwurf eines Gesetzes zur grundlegenden Reform des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und zur Änderung weiterer Bestimmungen des Energiewirtschaftsrechts.*

Bündnis 90/Die Grünen (2019): Bündnis 90/Die Grünen. *Europas Versprechen erneuern. Europawahlprogramm 2019.* URL: https://cms.gruene.de/uploads/documents/B90GRUENE_Europawahlprogramm_2019_barrierefrei.pdf. Letzter Zugriff am: 09.10.2019.

Bünger et al. (2014): Bünger, U.; Landinger, H.; Pschorr-Schoberer, E.; Weindorf, W.; Jöhrens, J.; Lambrecht, U.; Naumann, K.; Lischke, A. *Power-to-Gas (PtG) im Verkehr – Aktueller Stand und Entwicklungsperspektiven.* URL: <http://www.lbst.de/download/2014/mks-kurzstudie-ptg.pdf>. Letzter Zugriff am: 21.10.2019.

Bünger; Matthey (2018): Bünger, D. B.; Matthey, D. A. *Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten – Methodische Grundlagen.* S. 62. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-11-12_methodenkonvention-3-0_methodische-grundlagen.pdf. Letzter Zugriff am: 21.10.2019.

Canton; Johannesson Lindén (2010): Canton, J.; Johannesson Lindén, A. *Support schemes for renewable electricity in the EU.* Economic Papers, European Commission Brussels.

Carton (2016): Carton, Wim. *Money for nothin' and coal for free. 'Technology neutrality' and biomass development under the Flemish tradable green certificate scheme.* Geoforum 70, S. 69–78.

Darmani; Jullien (2017): Darmani, A.; Jullien, C. *Innovation Readiness Level Report – Energy Storage Technologies.* URL: <http://www.reeem.org/wp-content/uploads/2017/09/REEEM-D2.2a.pdf>. Letzter Zugriff am: 21.10.2019.

DAT Group (2016): DAT Group. *DAT Report 2016.* URL: <https://www.dat.de/fileadmin/media/download/DAT-Report/DAT-Report-2016.pdf>. Letzter Zugriff: 04.10.2019.

DBFZ (2019): Deutsches Biomasseforschungszentrum. *Monitoring Biokraftstoffsektor, 4. Auflage.* URL: https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/DBFZ_Reports/DBFZ_Report_11_4.pdf. Letzter Zugriff am: 06.10.2019.

Dechezleprêtre et al. (2013): Dechezleprêtre, A.; Martin, R.; Mohnen, M. *Knowledge spillovers from clean and dirty technologies: A patent citation analysis.* Discussion Paper, London School of Economics.

De Cian et al. (2014): De Cian, E.; Carrara, S.; Tavoni, M. *Nuclear expansion or phase-out? Costs and opportunities*. Review of Environment, Energy and Economics, Fondazione Eni Enrico Mattei Milan.

De Jonghe et al. (2009): De Jonghe, C.; Delarue, E.; Belmans, R.; D'haeseleer, W. *Interactions between measures for the support of electricity from renewable energy sources and CO₂ mitigation*. In: Energy Policy 37, S. 4743–4752.

Deloitte (2017): Deloitte. *The Future of the Automotive Value Chain 2025 and beyond*. URL: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/us/Documents/consumer-business/us-auto-the-future-of-the-automotive-value-chain.pdf>. Letzter Zugriff am: 15.10.2019.

del Rio (2009): del Rio, P. *Interactions between climate and energy policies: the case of Spain*. In: Climate Policy 9, S. 119–138.

del Rio; Cerdá (2014): del Rio, P.; Cerdá, E. *The policy implications of the different interpretations of the cost-effectiveness of renewable electricity support*. In: Energy Policy 64, S. 364–372.

DENA (2018): Deutsche Energie-Agentur. *Power to X: Technologien*. URL: https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/esd/9264_Power_to_X_Technologien.pdf. Letzter Zugriff am: 21.10.2019.

Department of Defense (2011): Department of Defense. *Technology Readiness Assessment (TRA) Guidance*. URL: <https://web.archive.org/web/20120617073510/http://www.acq.osd.mil/chieftechnologist/publications/docs/TRA2011.pdf>. Letzter Zugriff am: 04.10.2019.

Der Spiegel (2019a): Der Spiegel. *Sprit aus Stroh*. In: Der Spiegel, Nr. 14, 30.03.2019, S. 97.

Der Spiegel (2019b): Der Spiegel. *Berlin spielt Klima-Mikado*. In: Der Spiegel, Nr. 14, 30.03.2019, S. 61.

Der Spiegel (2019c): Der Spiegel. *Flucht nach vorn*. In: Der Spiegel, Nr. 8, 16.02.2019, S. 62.

Deutscher Bundestag (2018): Deutscher Bundestag. *Dokumentation E-Fuels*. URL: <https://www.bundestag.de/resource/blob/544092/dab1b2ac5f0264e-4b35ea370d197922e/wd-5-008-18-pdf-data.pdf>. Letzter Zugriff am: 04.10.2019.

Deutscher Verband Flüssiggas e.V. (2019): Deutscher Verband Flüssiggas e.V. *Autogas-Tankstellen*. URL: <https://www.dvfg.de/fahren-mit-fluessiggas/auto-gas-tankstellen/>. Letzter Zugriff am: 14.10.2019.

Dewenter et al. (2012): Dewenter, R.; Haucap, J.; Heimeshoff, U. *Maßnahmen zur Steigerung des Wettbewerbs auf den Kraftstoffmärkten in Deutschland*. ADAC-Studie zur Mobilität. URL: https://www.adac.de/_mmm/pdf/Studie_Kraftstoffm%C3%A4rkte_2831560_133448.pdf. Letzter Zugriff am: 21.10.2019.

Die Linke (o. J.): Die Linke. *Elektroauto/Elektromobilität. Themenpapier der Fraktion Die Linke*. URL: <https://www.linksfraktion.de/themen/a-z/detailansicht/elektroauto-elektromobilitaet/>. Letzter Zugriff am: 04.12.2019.

DLR, Wuppertal Institut (2015): Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. *Begleitforschung zu Technologien, Perspektiven und Ökobilanzen der Elektromobilität – STROMbegleitung*. URL: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/5966/file/5966_STROMbegleitung.pdf. Letzter Zugriff am: 21.10.2019.

Dünnebeil et al. (2015): Dünnebeil, F.; Reinhard, C.; Lambrecht, U.; Kies, A.; Hausberger, S.; Rexeis, M. *Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasminimierung bei schweren Nutzfahrzeugen*. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_32_2015_kraftstoff-einsparung-bei-nutzfahrzeugen.pdf. Letzter Zugriff am: 21.10.2019.

Duscha et al. (2013): Duscha, V.; Schumacher, K.; Schleich, J.; Buisson, P. *Costs of meeting international climate targets without nuclear power*. In: Climate Policy 14, S. 327–352.

EC (2017): European Commission. *Commission Staff Working Document Impact Assessment*. Brüssel.

Electric Roads (2019): Electric Roads. *Electric Road Systems*. URL: <https://www.electricroads.org/electric-road-systems/>. Letzter Zugriff am: 15.10.2019.

Elmer (2016): Elmer, Carl-Friedrich. *The Economics of Vehicle CO₂ Emissions Standards and Fuel Economy Regulations – Rationale, Design, and the Electrification Challenge*. Dissertation. Technische Universität Berlin.

ELONROAD (2019): ELONROAD. *ELONROAD – Electric roads for the future*. URL: <http://elonroad.com/>. Letzter Zugriff am: 14.10.2019.

Engau; Hoffmann (2009): Engau, Christian; Hoffmann, Volker H. *Effects of regulatory uncertainty on corporate strategy – an analysis of firms' responses to uncertainty about post-Kyoto policy*. In: *Environmental Science and Policy* 12, S. 766–777.

e-mobil BW (2013): Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg. *Wasserstoff-Infrastruktur für eine nachhaltige Mobilität*. URL: https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/Wasserstoff-Infrastruktur_fuer_eine_nachhaltige_Mobilitaet_-_final_WEB.pdf. Letzter Zugriff am: 21.10.2019.

e-mobil BW (2016): Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg. *Kommerzialisierung der Wasserstofftechnologie in Baden-Württemberg*. URL: https://elib.dlr.de/103522/1/Studie_H2-Kommerzialisierung_Neu_RZ_WebPDF.pdf. Letzter Zugriff am: 21.10.2019.

Eppendorfer (1999): Eppendorfer, C. *Die staatliche Transrapid-Förderung: ordnungspolitischer Sündenfall oder strategische Investition in die Zukunft?* Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht.

Europäische Kommission (2009): Europäische Kommission. *Richtlinie 2009/30/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Änderung der Richtlinie 98/70/EG im Hinblick auf die Spezifikationen für Otto-, Diesel- und Gasölkraftstoffe und die Einführung eines Systems zur Überwachung und Verringerung der Treibhausgasemissionen sowie zur Änderung der Richtlinie 1999/32/EG des Rates im Hinblick auf die Spezifikationen für von Binnenschiffen gebrauchte Kraftstoffe und zur Aufhebung der Richtlinie 93/12/EWG*.

Europäische Kommission (2018): Europäische Kommission. *Richtlinie (EU) 2018/ 2001 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen*.

Europäische Kommission (2019): Europäische Kommission. *Post-2020 CO₂ emission performance standards for cars and vans*. URL: https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/regulation_de. Letzter Zugriff am: 05.12.2019.

European Commission (2013a): European Commission. *Delivering the internal electricity market and making the most of public intervention*. COM (2013) 7243 final. Brussels: European Commission.

European Commission (2013b): European Commission. *European Commission guidance for the design of renewables support schemes*. SWD (2013) 439 final. Brussels: European Commission.

European Commission (2013c): European Commission. *Report from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Renewable Energy Progress Report*. Brussels: European Commission.

ewayBW (2019): Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg. *Die rollende Elektrotankstelle*. URL: https://ewaybw.de/html/content/die_rollende_elektrotankstelle.html. Letzter Zugriff am: 15.10.2019.

ExxonMobil (2019): ExxonMobil Deutschland. *Unsere Forschungsarbeit zu Biokraftstoffen*. URL: <https://corporate.exxonmobil.de/443/Forschung-und-Entwicklung/Fortschrittliche-Biokraftstoffe/Unsere-Forschungsarbeit-zu-Biokraftstoffen>. Letzter Zugriff am: 04.10.2019.

Faber (2019): Faber. *Energiegewinnung – Algen als Biokraftwerke*. URL: https://www.deutschlandfunkkultur.de/energiegewinnung-algen-als-biokraftwerke.976.de.html?dram:article_id=455286. Letzter Zugriff am: 04.10.2019.

Fankhauser et al. (2011): Fankhauser, S.; Hepburn, C.; Park, J. *Combining multiple climate policy instruments: how not to do it*. Working Paper, Centre for Climate Change Economics and Policy London/Leeds.

FAZ (2019): Frankfurter Allgemeine Zeitung. *Autoin-
dustrie bringt Spannung ins Kanzleramt*. In: Frankfurter
Allgemeine Zeitung, 17.06.2019. URL: [https://www.faz.
net/-gya-9o3mj](https://www.faz.net/-gya-9o3mj). Letzter Zugriff am: 09.10.2019.

Fehrenbach; Jöhrens (2017): Fehrenbach, H.; Jöhrens, J.
Weiterentwicklung der THG-Quote als Instrument des
Klimaschutzes. S. 49. URL: [https://vm.baden-wuerttem-
berg.de/fileadmin/redaktion/m-mvi/intern/Dateien/
PDF/Klimaschutz_IFEU_Kurzstudie_THG-Einspar-
quote_als_Instrument_180104.pdf](https://vm.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-mvi/intern/Dateien/PDF/Klimaschutz_IFEU_Kurzstudie_THG-Einspar-
quote_als_Instrument_180104.pdf). Letzter Zugriff am:
21.10.2019.

Fischer (2008): Fischer, C. *Emissions Pricing, Spillovers,
and Public Investment in Environmentally Friendly Tech-
nologies*. In: Energy Economics 30, S. 487–502.

Fischer; Newell (2016): Fischer, C.; Newell, R.G. *Envi-
ronmental and Technology Policies for Climate Change
Mitigation*. In: Journal of Environmental Economics and
Management 55, S. 142–162.

Fischer; Preonas (2010): Fischer, C.; Preonas, L. *Combini-
ng Policies for Renewable Energy: Is the Whole Less Than
the Sum of Its Parts?* In: International Review of Environ-
mental and Resource Economics 4, S. 51–92.

Fox et al. (2017): Fox, Jacob; Axsen, Jonn; Jaccard, Mark.
*Picking Winners: Modelling the Costs of Technology-spe-
cific Climate Policy in the U.S. Passenger Vehicle Sector*.
Ecological Economics 137, S. 133–147.

Foxon; Pearson (2008): Foxon, T.; Pearson, P. *Overcoming
barriers to innovation and diffusion of cleaner technol-
ogies: some features of a sustainable innovation policy
regime*. In: Journal of Cleaner Production 16, S. 148–161.

Fritsch (2011): Fritsch, Michael. *Marktversagen und
Wirtschaftspolitik*. 8. Aufl., München: Vahlen.

Frondel (2008): Frondel, M.; Ritter, N.; Schmidt, C.M.
*Germany's solar cell promotion: Dark clouds on the hori-
zon*. Energy Policy 36, S. 4198–4204.

Frondel et al. (2010a): Frondel, M.; Ritter, N.; Schmidt,
C.M. *Die Förderung der Photovoltaik – ein Kosten-
Tsunami*. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen,
12/2010, S. 36–44.

Frondel et al. (2010b): Frondel, M.; Ritter, N.; Schmidt,
C.M.; Vance, C. *Economic impacts from the promotion of
renewable energy technologies: The German experience*.
In: Energy Policy 38, S. 4048–4056.

Frondel et al. (2011): Frondel, M.; Ritter, N.; Schmidt,
C.M. *Teure Grünstrom-Euphorie: Die Kosten der Energie-
wende*. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 12/2011,
S. 20–25.

Frontier Economics (2012): Frontier Economics Ltd. *Die
Zukunft des EEG – Handlungsoptionen und Reforman-
sätze*. Bericht für die EnBW AG, Frontier Economics Ltd.
London.

Frontier Economics (2014): Frontier Economics Ltd.
*Technologieoffene Ausschreibungen für Erneuerbare
Energien. Ein Bericht für EFET Deutschland*. Frontier
Economics Ltd. London.

Frontier Economics; r2b (2013): Frontier Economics Ltd,
r2b. *Effizientes Regime für den Ausbau der EE, Weiterent-
wicklung des Energy-Only-Marktes und Erhaltung des
EU-ETS. Ein Bericht für die RWE AG*. Frontier Economics
Ltd. London.

Frost & Sullivan (2018): Frost & Sullivan. *Durchschnitt-
liche Stückzahl bei der Elektroauto-Produktion steigt je
nach Plattform bis 2025 um das Zehnfache*. URL: [https://
www.erneuerbar-elektrisch-mobil.de/2018/05/17/
frost-sullivan-durchschnittliche-st%C3%BCckzahl-
bei-der-elektroauto-produktion-steigt-je-nach-plat-
tform-bis-2025-um-das-zehnfache/](https://www.erneuerbar-elektrisch-mobil.de/2018/05/17/frost-sullivan-durchschnittliche-st%C3%BCckzahl-bei-der-elektroauto-produktion-steigt-je-nach-plat-
tform-bis-2025-um-das-zehnfache/). Letzter Zugriff
am: 14.10.2019.

Fürsch et al. (2010): Fürsch, M.; Golling, C. Nicolosi, M.;
Wissen, R.; Lindenberger, D. *European RES-E Policy
Analysis – A model based analysis of RES-E deployment
and its impact on the conventional power market*. Ener-
giewirtschaftliches Institut an der Universität Köln.

Gawel (1997): Gawel, Erik. *Reguliertes Wissen um
Unwissen. Zur Generierung und Distribution von Risi-
koinformation aus ökonomischer Sicht*. In: Hart, D. (Hrsg.),
Privatrecht im „Risikostaat“, Baden-Baden: Nomos,
S. 265–323.

Gawel (2013): Gawel, E. *Nutzerfinanzierung öffentlicher Aufgaben – Renaissance des Entgeltstaates*, In: Schröter, E.; Reichard, C. (Eds.), *Zur Organisation öffentlicher Aufgaben. Effizienz, Effektivität und Legitimität*, Leverkusen: Verlag Barbara Budrich, S. 236–261.

Gawel (2014): Gawel, E. *Eckpunkte zur EEG-Reform: Der Energiewende nächster Akt*. In: Wirtschaftsdienst 94, S. 82–83.

Gawel et al. (2017): Gawel, E.; Lehmann, P.; Purkus, A.; Söderholm, P.; Witte, K. *Rationales for technology-specific RES support and their relevance for German policy*. In: Energy Policy 102, S. 16–26.

Gawel; Lehmann (2014): Gawel, E.; Lehmann, P. *Die Förderung der erneuerbaren Energien nach der EEG-Reform 2014*. In: Wirtschaftsdienst 94, S. 651–658.

Gawel; Lehmann (2019): Gawel, E.; Lehmann, P. *Should Renewable Energy Policy Be 'Renewable'?* Oxford Review of Economic Policy 35, S. 218–243.

Gawel; Purkus (2015): Gawel, E.; Purkus, A. *Die Rolle von Energie- und Strombesteuerung im Kontext der Energiewende*. In: Zeitschrift für Energiewirtschaft 39 (2), S. 77–103.

Gerbert et al. (2018): Gerbert, P.; Herhold, P.; Burchardt, J.; Schönberger, S.; Rechenmacher, F.; Kirchner, A.; Kemmler, A.; Wünsch, M.: *Klimapfade für Deutschland*. URL: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2018/Januar/Klimapfade_fuer_Deutschland_BDI-Studie_/Klimapfade-fuer-Deutschland-BDI-Studie-12-01-2018.pdf. Letzter Zugriff am: 25.11.2019.

Gillingham; Palmer (2014): Gillingham, Kenneth; Palmer, Karen. *Bridging the Energy Efficiency Gap: Policy Insights from Economic Theory and Empirical Evidence*. Review of Environmental Economics and Policy 8, S. 18–38.

Gizzi et al. (2018): Gizzi, Florian; Kreft, Till; Beckers, Thorsten. *Identifikation effizienter Modelle für die Bereitstellung der Ladeinfrastruktur für die Elektromobilität im öffentlichen Bereich in Deutschland unter Rückgriff auf institutionenökonomische Erkenntnisse*. URL: https://www.wip.tu-berlin.de/fileadmin/fg280/forschung/publikationen/2018/gizzi_kreft_beckers_2018-modelle_fuer_die_bereitstellung_der_ladeinfrastruktur-v010.pdf. Letzter Zugriff am: 03.12.2019.

Gnann (2018): Gnann, T. *Technologiebericht 7.2 Elektromobilität – Hybrid-Oberleitungs-Lkw (energiewirtschaftliche Aspekte) innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende*. URL: https://www.energieforschung.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/7001959F2CCB3EC1E0539A695E86DF0D/current/document/7.2_Elektromobilitaet_Hybrid-Oberleitungs-LKW.pdf. Letzter Zugriff am: 21.10.2019.

GoingElectric (2019): GoingElectric. *Stromtankstellen Verzeichnis*. URL: <https://www.goingelectric.de/stromtankstellen/>. Letzter Zugriff am: 15.10.2019.

Gomoll (2016): Gomoll, Wolfgang. *NanoFlowCell Quantino: Test*. URL: https://www.focus.de/auto/elektroauto/fahrbericht-nanoflowcell-quantino-das-flusszellen-zauberauto-neben-diesem-renner-sieht-sogar-tesla-ganz-alt-aus_id_6032208.html. Letzter Zugriff am: 04.10.2019.

Greenpeace (2008): Greenpeace Deutschland. *Umwelt-schädliche Subventionen und Steuervergünstigungen des Bundes*. Berlin: Greenpeace.

Greenpeace (2019): Greenpeace Deutschland. *Maßnahmen zur Förderung von Elektroautos*. URL: <https://act.gp/2EXhnw>. Letzter Zugriff am: 09.10.2019.

Grubb (1997): Grubb, M. *Technologies, Energy Systems and the Timing of CO₂ Emissions Abatement: An Overview of Economic Issues*. In: Energy Policy 25, S. 159–172.

H2 Mobility (2018): H2 Mobility. *H2M_IAC-Annual-Report2018_2019-02-05-1.pdf*. URL: https://content.h2.live/app/uploads/2019/02/H2M_IAC-Annual-Report2018_2019-02-05-1.pdf. Letzter Zugriff am: 04.10.2019.

H2 Mobility (2019a): H2 Mobility. *H2 Mobility: Wir bauen das Tankstellennetz der Zukunft*. URL: <https://h2.live/h2mobility>. Letzter Zugriff am: 14.10.2019.

H2 Mobility (2019b): H2 Mobility. *H2 Tankstellen: Häufige Fragen – H2.LIVE*. URL: <https://h2.live/faq>. Letzter Zugriff am: 10.10.2019.

H2 Mobility (2019c): H2 Mobility. *Wasserstoffautos: Alle Modelle im Überblick*. URL: <https://h2.live/wasserstoffautos>. Letzter Zugriff am: 14.10.2019.

H2 Mobility (2019d): H2 Mobility. *Ausbau der Wasserstofftankstellen Infrastruktur*. URL: <https://h2.live/netz-ausbau>. Letzter Zugriff am: 15.10.2019.

Hallegatte et al. (2013): Hallegatte, Stéphane; Fay, Marieanne; Vogt-Schilb, Adrien. *Green Industrial Policies – When and How. Policy Research Working Paper 6677, The World Bank*. URL: <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/16892/WPS6677.pdf?sequence=1>. Letzter Zugriff am: 06.12.2019.

Handelsblatt (2019a): Handelsblatt. *Bundesverkehrsminister Scheuer fordert technologieoffenen Ansatz*. In: Handelsblatt, 08.04.2019. URL: <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/foerderung-der-elektromobilitaet-bundesverkehrsminister-scheuer-fordert-technologieoffenen-ansatz/24194004.html?ticket=ST-20883899-qUCMiLDHqh4LcWovHweJ-ap4>. Letzter Zugriff am: 09.10.2019.

Handelsblatt (2019b): Handelsblatt. *Die E-Mobilität treibt einen Keil zwischen die Öl- und die Autobranche*. In: Handelsblatt, 17.04.2019. URL: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/elektromobilitaet-die-e-mobilitaet-treibt-einen-keil-zwischen-die-oel-und-die-autobranche/24225228.html?ticket=ST-21136054-FlkUNaLDbj1ET2dDr1CQ-ap4>. Letzter Zugriff am: 09.10.2019.

Hansen et al. (2003): Hansen, J.D.; Jensen, C.; Madsen, E.S. *The establishment of the Danish windmill industry – was it worthwhile?* Review of World Economics 139, S. 324–347.

Haßheider; Malina (2003): Haßheider, H.; Malina, R. *Durchsetzung von Partialinteressen in politischen Märkten am Beispiel Metrorapid*. In: Wirtschaftsdienst 82, S. 108–115.

Heise online (2019): Heise online. *5,6 Millionen Elektroautos rollen durch die Welt*. URL: <https://www.heise.de/newsticker/meldung/5-6-Millionen-Elektroautos-rollen-durch-die-Welt-4306179.html>. Letzter Zugriff am: 15.10.2019.

Held et al. (2014): Held, A.; Ragwitz, M.; Gephart, M.; De Visser, E.; Klessmann, C. *Design features of support schemes for renewable electricity, Task 2 report*. Brussels: Ecofys.

Helm (2010): Helm, D. *Government failure, rent-seeking, and capture: the design of climate change policy*. In: Oxford Review of Economics Policy 26, S. 182–196.

Hennicke; Schleicher (2011): Hennicke, P.; Schleicher, T. *Die ökonomischen Folgen des „Weiter so“*. In: Wirtschaftsdienst 91, S. 300–307.

Heyen (2016): Heyen, Dirk. *Exnovation: Herausforderungen und politische Gestaltungsansätze für den Ausstieg aus nicht-nachhaltigen Strukturen*. Öko-Institut Working Paper 3/2016, Freiburg.

Heyne et al. (2019): Heyne, S.; Bokinge, P.; Nyström, I. *Global production of bio-methane and synthetic fuels – overview*. URL: <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/m1421/m1421.pdf>. Letzter Zugriff am: 21.10.2019.

Hindsberger et al. (2003): Hindsberger, M.; Nybroe, M.H.; Ravn, H.F.; Schmidt, R. *Co-existence of electricity, TEP, and TGC markets in the Baltic Sea Region*. In: Energy Policy 31, S. 85–96.

Hirschhausen et al. (2015): Hirschhausen, C. von; Gerbaulet, C.; Kemfert, C.; Reitz, F.; Ziehm, C. *Atomaustieg geht in die nächste Phase: Stromversorgung bleibt sicher – große Herausforderungen und hohe Kosten bei Rückbau und Endlagerung*. In: DIW Wochenbericht 82, S. 523–531.

Holm-Müller; Weber (2011): Holm-Müller, K.; Weber, M. Ökonomische Folgen eines Atomausstiegs in Deutschland. In: Wirtschaftsdienst 91, S. 295–299.

Hoppmann et al. (2014): Hoppmann, J.; Huenteler, J.; Girod, B. *Compulsive policy-making – The evolution of the German feed-in tariff system for solar photovoltaic power*. In: Research Policy 43, S. 1422–1441.

Hydrogenious LOHC Technologies (2018): Hydrogenious LOHC Technologies. *Deutscher Zukunftspreis für Hydrogenious Technologies*. In: Hydrogenious LOHC Technologies.

IEA (2000): International Energy Agency. *Experience Curves for Technology Policy*. Paris: International Energy Agency.

ifeu (2019): Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg. *TREMODO 5.82 – Daten- und Rechenmodell: Schadstoffemissionen aus dem motorisierten Verkehr in Deutschland 1960 bis 2035*. URL: <https://www.ifeu.de/methoden/modelle/tremod/>. Letzter Zugriff am: 21.10.2019.

IRENA (2016): International Renewable Energy Agency. *Innovation Outlook: Advanced Liquid Biofuels*. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_Innovation_Outlook_Advanced_Liquid_Biofuels_2016.pdf. Letzter Zugriff am: 21.10.2019.

ISI (2017): Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung. *Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw*. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung.

Isoard; Soria (2001): Isoard, S.; Soria, A. *Technical Change Dynamics: Evidence from the Emerging Renewable Energy Technologies*. In: Energy Economics 23, S. 619–636.

Jaffe et al. (2005): Jaffe, Adam; Newell, Richard; Stavins, Robert. *A tale of two market failures: technology and environmental policy*. In: Ecological Economics 54, S. 164–174.

Jägemann (2014): Jägemann, C. *A Note on the Inefficiency of Technology- and Region-Specific Renewable Energy Support: The German Case*. In: Zeitschrift für Energie-wirtschaft 38, S. 235–253.

Jägemann et al. (2013): Jägemann, C.; Fürsch, M.; Hag-spiel, S.; Nagl, S. *Decarbonizing Europe's power sector by 2050 – Analyzing the economic implications of alternative decarbonization pathways*. In: Energy Economics 40, S. 622–636.

Jendrischik (2018): Jendrischik. *nanoFLOWCELL: Kuriositäten rund um angebliche Milliardenbestellung*. URL: <https://www.cleantalking.de/nanoflowcell-angebliche-milliardenbestellung/>. Letzter Zugriff am: 15.11.2019.

Jensen; Meckling (1976): Jensen, Michael; Meckling, William. *Theory of the firm: Managerial behavior, agency costs and ownership structure*. In: Journal of Financial Economics 3, S. 305–360.

Jensen; Skytte (2003): Jensen, S.G.; Skytte, K. *Simultaneous attainment of energy goals by means of green certificates and emission permits*. In: Energy Policy 31, S. 63–71.

Jöhrens et al. (2018): Jöhrens, J.; Rücker, J.; Helms, H.; Schade, W.; Hartwig, J. *Roadmap OH-Lkw: Hemmnisanalyse*. URL: <https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/Roadmap-OH-Lkw-Hemmnisanalyse.pdf>. Letzter Zugriff am: 21.10.2019.

Kaindl (2018): Kaindl, F. *Experten warnen: So gefährlich ist der Boom mit den E-Autos*. URL: <https://www.tz.de/auto/experten-warnen-gefaehrlich-boom-e-autos-zr-9399247.html>. Letzter Zugriff am: 15.10.2019.

Kalkuhl et al. (2012): Kalkuhl, Matthias; Edenhofer, Ottmar; Lessmann, Kai. *Learning or lock-in: optimal technology policies to support mitigation*. Resource and Energy Economics 34, S. 1–23.

Kalkuhl et al. (2013): Kalkuhl, M.; Edenhofer, O.; Lessmann, K. *Renewable energy subsidies: Second-best policy or fatal aberration for mitigation?* Resource and Energy Economics 35, S. 217–234.

Kasten et al. (2016): Kasten, P.; Mottschall, M.; Köppel, W.; Degünther, C.; Schmied, M.; Wüthrich, P. *Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050*. Umweltbundesamt. S. 127. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/2016-11-10_endbericht_energieversorgung_des_verkehrs_2050_final.pdf. Letzter Zugriff am: 21.10.2019.

Kasten; Kühnel (2019): Kasten, P.; Kühnel, S. *Positionen zur Nutzung strombasierter Flüssigkraftstoffe (efuels) im Verkehr. Erstellt als Teil des Kopernikus Fördervorhabens Power2X – Erforschung, Validierung und Implementierung von „Power-to-X“-Konzepten gefördert durch BMBF Förderkennzeichen: 03SFK2H0*. URL: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Stakeholder-Positionen-e-fuels.pdf>. Letzter Zugriff am: 21.10.2019.

Katz; Shapiro (1985): Katz, Michael; Shapiro, Carl. *Network externalities, competition and compatibility*. In: American Economic Review 75 (3), S. 424–440.

Kemfert et al. (2017): Kemfert, Claudia; Elmer, Carl-Friedrich; Dross, Miriam. *Grenzen der Technologie-neutralität: Infrastrukturförderung als notwendiger Pull für den Übergang zur Elektromobilität*. In: Zeitschrift für Politikwissenschaften 27 (4), S. 483–491.

Kettner et al. (2010): Kettner, C.; Köppl, A.; Schleicher, S. *The EU Emission Trading Scheme: Insights from the First Trading Years with a Focus on Price Volatility*. WIFO Working Papers, Österreichisches Institut für Wirtschaftsförderung Wien.

Knieps (2007): Knieps, Günter. *Netzökonomie. Grundlagen – Strategien – Wettbewerbspolitik*. Wiesbaden: Gabler.

Knieps (2008): Knieps, Günter. *Wettbewerbsökonomie – Regulierungstheorie, Industrieökonomie, Wettbewerbspolitik*. 3. Aufl., Berlin: Springer.

Knopf et al. (2014): Knopf, B.; Pahle, M.; Kondziella, H.; Joas, F.; Edenhofer, O.; Bruckner, T. *Germany's Nuclear Phase-out: Sensitivities and Impacts on Electricity Prices and CO₂ Emissions*. In: Economics of Energy and Environmental Policy 3, S. 89–105.

Köder; Burger (2016): Köder, Lea; Burger, Andreas. *Umweltschädliche Subventionen in Deutschland – Aktualisierte Ausgabe 2016*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/uba_fachbroschuere_umweltschaedliche-subventionen_bf.pdf. Letzter Zugriff am: 27.11.2019.

Körber (2008): Körber, Torsten. *Der Grundsatz der Technologie-neutralität als Maßstab für die Regulierung von Telekommunikationsmärkten*. In: Zeitschrift für Wettbewerbsrecht 6 (2), S. 146–169.

Korn et al. (2018): Korn, M.; Consult, A.; Leupold, A.; Consult, A.; Schneider, C.; Hartwig, K.-H.; Daniels, H. (2018): *Berechnung der Wegekosten für das Bundesfernstraßennetz sowie der externen Kosten nach Maßgabe der Richtlinie 1999/62/EG für die Jahre 2018 bis 2022*. Alfen Consult, Aviso, BUNG Ingenieure. URL: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StV/wegekostengutachten-2018-2022-endbericht.pdf?__blob=publicationFile. Letzter Zugriff am: 21.10.2019.

KBA (2018): Kraftfahrtbundesamt. *Neuzulassungen im Jahr 2018 nach Marken, Herstellern*. URL: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/MarkenHersteller/marken_hersteller_node.html. Letzter Zugriff am: 14.10.2019.

KBA (2019): Kraftfahrtbundesamt. *Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen – 1. Januar 2019*. Flensburg. URL: https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2019/fz13_2019.pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=10. Letzter Zugriff am: 21.10.2019.

Krutilla; Krause (2010): Krutilla, Kerry; Krause, Rachel. *Transaction costs and environmental policy: An assessment framework and literature review*. In: International Review of Environmental and Resource Economics 4 (3–4), S. 261–354.

Kühnel et al. (2018): Kühnel, S.; Hacker, F.; Görz, W. *Erster Teilbericht des Forschungsvorhabens „StratON – Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge“*. URL: <https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2018-09/Teilbericht%201%200-Lkw-Technologievergleich-2018.pdf>. Letzter Zugriff am: 21.10.2019.

Kverndokk; Rosendahl (2007): Kverndokk, S.; Rosendahl, K.E. *Climate policies and learning by doing: Impacts and timing of technology subsidies*. In: *Resource and Energy Economics* 29, S. 58–82.

Lehmann (2009): Lehmann, P. *Climate Policies with Pollution Externalities and Learning Spillovers*. UFZ Discussion Paper, Helmholtz-Centre for Environmental Research Leipzig.

Lehmann et al. (2018): Lehmann, P.; Sijm, J.; Gawel, E.; Strunz, S.; Chewpreecha, U.; Mercure, J.-F.; Pollitt, H. *Addressing multiple externalities from electricity generation: A case for EU renewable energy policy beyond 2020?* In: *Environmental Economics and Policy Studies* 21(2), S. 255–283.

Lehmann; Gawel (2013): Lehmann, Paul; Gawel, Erik. *Why should support schemes for renewable electricity complement the EU emissions trading scheme?* In: *Energy Policy* 52, S. 597–607.

Lehmann; Söderholm (2018): Lehmann, P.; Söderholm, P. *Can Technology-Specific Deployment Policies Be Cost-Effective? The Case of Renewable Energy Support Schemes*. In: *Environmental and Resource Economics* 71, S. 475–505.

Linares et al. (2008): Linares, P.; Santos, F.J.; Ventosa, M. *Coordination of carbon reduction and renewable energy support policies*. In: *Climate Policy* 8, S. 377–394.

Lipsey; Lancaster (1956): Lipsey, Richard G.; Lancaster, Kelvin (1956). *The General Theory of Second Best*. *Review of Economic Studies*. 24 (1), S. 11–32.

Litzfelder (2019): Litzfelder. *Wasserstoff-Autos: „Wir haben den passenden Stoff gefunden.“* URL: <https://www.infranken.de/regional/erlangenhoechstadt/wasserstoff-autos-wir-haben-den-passenden-stoff-gefunden;art215,4343573>. Letzter Zugriff am: 04.10.2019.

Löschel (2011): Löschel, A. *Energiepolitik nach Fukushima*. In: *Wirtschaftsdienst* 91, S. 307–310.

Luhmann (2017): Luhmann, H.-J. *Brennelementesteuer: Kollateralschaden auf Dauer*. In: *Wirtschaftsdienst* 97, S. 457–458.

Matthes (2010): Matthes, F.C. *Greenhouse gas emissions trading and complementary policies. Developing a smart mix for ambitious climate policies*. Berlin: Öko-Institut e.V.

Matthes (2012): Matthes, F.C. *Exit economics: The relatively low cost of Germany's nuclear phase-out*. In: *Bulletin of the Atomic Scientists* 68, S. 42–54.

Maut-In (2019): Maut-In. *Neue Lkw-Maut ab Januar 2019!* URL: <https://maut-in.de/lkw/neue-lkw-maut-2019.html>. Letzter Zugriff am: 15.10.2019.

McWilliams; Zilberman. (1996): McWilliams, Bruce; Zilberman, David. *Time of Technology Adoption and Learning by Using*. In: *Economics of Innovation and New Technology* 4 (2), S. 139–154.

MDR (2019): Mitteldeutscher Rundfunk. *Neueröffnung in Leipzig: Mogelpackung Wasserstofftankstelle?* URL: <https://www.mdr.de/wissen/wasserstofftankstelle-leipzig-eingeweiht-100.html>. Letzter Zugriff am: 15.10.2019.

Meyer (2012): Meyer, B. *Externe Kosten der Atomenergie und Reformvorschläge zum Atomhaftungsrecht*. Berlin: Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft e.V.

Michaelis (1996): Michaelis, Peter. *Ökonomische Instrumente in der Umweltpolitik. Eine anwendungsorientierte Einführung*. Heidelberg: Physica-Verlag.

Michaelis et al. (2018): Michaelis, S.; Rahimzei, E.; Kampker, A.; Heimes, H.; Lienemann, C. *Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030*. Frankfurt: Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau.

Mittelstands- und Wirtschaftsunion (2016): Mittelstands- und Wirtschaftsunion. *Alternative Antriebe technologieneutral fördern*. Pressemitteilung vom 07.12.2016. URL: <https://www.mit-bund.de/content/alternative-antriebe-technologieneutral-foerdern>. Letzter Zugriff am: 09.10.2019.

Monopolkommission (2011): Monopolkommission. *Sondergutachten 59: Energie 2011: Wettbewerbsentwicklung mit Licht und Schatten: Sondergutachten der Monopolkommission gemäß § 62 Abs 1 EnWG*. Berlin: Monopolkommission.

Monopolkommission (2013) Monopolkommission. Energie 2013: *Wettbewerb in Zeiten der Energiewende. Sondergutachten 65*. Berlin: Monopolkommission.

Monopolkommission (2015): Monopolkommission. *Energie 2015: Ein wettbewerbles Marktdesign für die Energiewende. Sondergutachten 71*. Berlin: Monopolkommission.

Morris (2009): Morris, J.F. *Combining a Renewable Portfolio Standard with a Cap-and-Trade Policy: A General Equilibrium Analysis*. University of North Carolina Chapel Hill.

Morthorst (2003): Morthorst, P.E. *National environmental targets and international emission reduction instruments*. In: *Energy Policy* 31, S. 73–83.

Mühlenkamp et al. (2007): Mühlenkamp, Holger; Haucap, Justus; Schöneich, Michael; Eisenkopf, Alexander. *Daseinsvorsorge durch staatliche oder private Unternehmen?* In: *Wirtschaftsdienst* 87 (11), S. 707–723.

Munoz (2019): Munoz. *Global sales of pure electric vehicles soar by 92% in H1 2019*. URL: <https://www.jato.com/global-sales-of-pure-electric-vehicles-soar-by-92-in-h1-2019/>. Letzter Zugriff am: 04.10.2019.

Neuhoff (2005): Neuhoff, Karsten. *Large-scale deployment of renewables for electricity generation*. In: *Oxford Review of Economic Policy* 21, S. 88–110.

Nittsch et al. (2004): Nitsch, J.; Krewitt, W.; Nast, M.; Viebahn, P.; Gärtner, S.; Pehnt, M.; Reinhardt, G.; Schmidt, R.; Uihlein, A.; Scheurlen, K.; Barthel, C.; Fischedick, M.; Merten, F. *Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Stuttgart, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie.

Noailly; Shestalova (2013): Noailly, J.; Shestalova, V. *Knowledge spillovers from renewable energy technologies: Lessons from patent citations*. CPB Discussion Paper, CPB Netherlands Bureau for Economic Policy Analysis, The Hague.

NPE (2019): Nationale Plattform Elektromobilität. *Elektromobilität: So funktioniert's | Privat laden*. URL: <http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/anwendung/privat-laden/>. Letzter Zugriff am: 14.10.2019.

Olson (1965): Olson, Mancur. *The Logic of Collective Action. Public Goods and the Theory of Groups*. Cambridge: Harvard University Press.

Öko-Institut (2019): Öko-Institut. *Gesamtkostenrechner Elektrofahrzeuge*. URL: <https://emob-kostenrechner-privat.oeko.de/#/>. Letzter Zugriff am: 14.10.2019.

Paltsev et al. (2009): Paltsev, S.; Reilly, J.M.; Jacoby, H.D.; Morris, J.F. *The Cost of Climate Policy in the United States*. Report, MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change Cambridge MA.

Pástor; Veronesi (2013): Pástor, Luboš, Veronesi, Pietro. *Political uncertainty and risk premia*. In: *Journal of Financial Economics* 110 (3), S. 520–545.

Peterson (2011): Peterson, S. *Die wahren Kosten der Atomkraft*. In: *Wirtschaftsdienst* 91, S. 224.

Pethig; Wittlich (2009): Pethig, R.; Wittlich, C. *Interaction of Carbon Reduction and Green Energy Promotion in a Small Fossil-Fuel Importing Economy*. CESifo Working Paper, CESifo Munich.

Pfennig et al. (2017): Pfennig, M.; Gerhardt, N.; Pape, C.; Böttger, D. *Mittel- und langfristige Potenziale von PtL- und H2-Importen aus internationalen EE-Vorzugsregionen*. URL: http://www.energieversorgung-elektromobilitaet.de/includes/reports/Teilbericht_Potenziale_PtL_H2_Importe_FraunhoferIWES.pdf. Letzter Zugriff am: 04.10.2019.

PIARC (2018): World Road Association. *Electric Road Systems – a Solution for the Future?* URL: https://www.trafikverket.se/contentassets/2d8f4da1602a497b82a-b6368e93baa6a/piarc_elvag.pdf. Letzter Zugriff am: 21.10.2019.

Plötz et al. (2018): Plötz, P.; Gnann, T.; Wietschel, M.; Kluschke, P.; Doll, C.; Hacker, F.; Blanck, R.; Kühnel, S.; Jöhrens, J.; Helms, H.; Lambrecht, U.; Dünnebeil, F. *Alternative Antriebe und Kraftstoffe im Straßengüterverkehr – Handlungsempfehlungen für Deutschland*. S. 20. URL: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/The-sen-Zukunft-StrGueterverkehr.pdf>. Letzter Zugriff am: 21.10.2019.

Plötz et al. (2019): Plötz, P.; Fritz, M.; Funke, S. *CO₂ Fleet Targets and Electric Vehicle Market Diffusion*. Proceedings of the 32nd International Electric Vehicle Symposium, Lyon, 19.-21. Mai 2019.

Popp (2002): Popp, D. *Induced Innovation and Energy Prices*. In: *American Economic Review* 92, S. 160–180.

Purkus et al. (2015): Purkus, A.; Röder, M.; Gawel, E.; Thrän, D.; Thornley, P. *Handling uncertainty in bioenergy policy design – A case study analysis of UK and German bioelectricity policy instruments*. In: *Biomass and Bioenergy* 79, S. 64–79.

Rabl; Rabl (2013): Rabl, A.; Rabl, V.A. *External costs of nuclear: Greater or less than the alternatives?* In: *Energy Policy* 57, S. 575–584.

Rathmann (2007): Rathmann, M. *Do support systems for RES-E reduce EU-ETS-driven electricity prices?* In: *Energy Policy* 35, S. 342–349.

Resch et al. (2014): Resch, G.; Liebmann, L.; Ortner, A.; Busch, S.; Panzer, C.; Del Rio, P.; Ragwitz, M.; Steinhilber, S.; Klobasa, M.; Winkler, J.; Gephart, M.; Klessmann, C.; de Lovinfosse, I.; Papaefthymiou, G.; Nysten, J.V.; Fouquet, D.; Johnston, A.; van der Marel, E.; Bañez, F.; Batlle, C.; Fernandes, C.; Frias, P.; Linares, P.; Olmos, L.; Rivier, M.; Knapke, J.; Kralik, T.; Faber, T.; Steinbaecker, S.; Borasoy, B.; Toro, F.; Plascencia, L. *Design and impact of a harmonised policy for renewable electricity in Europe – Final report of the beyond 2020 project – Approaches for a harmonisation of RES(-E) support in Europe*. Wien: Energy Economics Group et al.

Richter (2016): Richter, Philipp. *Instrumente zwischen rechtlicher Steuerung und technischer Entwicklung*. In: *Datenschutz und Datensicherheit* 40 (2), S. 89–93.

Richter; Furubotn (2010): Richter, Rudolf; Furubotn, Eirik. *Neue Institutionenökonomik*. 4. Aufl., Tübingen: Mohr Siebeck.

Roberts; Spence (1976): Roberts, Marc J.; Spence, Michael. *Effluent charges and licenses under uncertainty*. In: *Journal of Public Economics* 5, S. 193–208.

Rodrik (2014): Rodrik, Dani. *Green industrial policy*. In: *Oxford Review of Economic Policy* 30, S. 469–491.

Ronnebro (2012): Ronnebro, E. *Technology and Manufacturing Readiness of Early Market Motive and Non-Motive Hydrogen Storage Technologies for Fuel Cell Applications*. URL: <http://www.osti.gov/servlets/purl/1059626/>. Letzter Zugriff am: 25.03.2019.

Roßnagel (2009): Roßnagel, Alexander. *Technikneutrale Regulierung: Möglichkeiten und Grenzen*. In: Eifert, M., Hoffmann-Riem, W. (Hrsg.), *Innovationen und Recht II: Innovationsfördernde Regulierung*, Berlin: Duncker & Humblot, S. 323–327.

Runkel; Mahler (2018): Runkel, M.; Mahler, A. *A comparison of CO₂-based car taxation in EU-28, Norway and Switzerland*. URL: http://www.foes.de/pdf/2018-03_FOES_vehicle%20taxation.pdf. Letzter Zugriff am: 14.10.2019.

Sandén; Azar (2005): Sandén, Björn; Azar, Christian. *Near-term technology policies for long-term climate targets – economy wide versus technology specific approaches*. In: *Energy Policy* 33, S. 1557–1576.

Schewe et al. (2013): Schewe, G.; Liesenkötter, B.; Weber, P. *Schnell und doch nicht schnell genug – die technologische Konkurrenz zwischen Transrapid und konventionellen Hochgeschwindigkeitszügen. Eine Analyse aus Perspektive der Pfadabhängigkeitstheorie*. Arbeitspapiere des Lehrstuhls für Betriebswirtschaftslehre der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster Nr. 89., Westfälische-Wilhelms-Universität Münster.

Schlesinger et al. (2014): Schlesinger, M. Dr.; Lindenberg, D. Dr.; Lutz, C. *Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose*. URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/entwicklung-der-energiemaerkte-energiereferenzprognose-endbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=7. Letzter Zugriff am: 21.10.2019.

Schmidt et al. (2016): Schmidt, P.; Weindorf, W.; Roth, A.; Batteiger, V.; Riegel, F. *Power-to-Liquids: Potentials and Perspectives*. Umweltbundesamt. S. 36. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/161005_uba_hintergrund_ptl_barriere-frei.pdf. Letzter Zugriff am: 21.10.2019.

Schwarzer (2019): Schwarzer, C. M. *Festelektrolyt-Batterien: The Next Big Thing*. URL: <https://www.electrive.net/2019/07/23/festelektrolyt-batterien-the-next-big-thing/>. Letzter Zugriff am: 28.07.2019.

SerEnergy (2018): SerEnergy. *SerEnergy is fuel cell supplier to the world-first high-performance supercar with methanol fuel cells*. URL: <https://serenergy.com/serenergy-is-fuel-cell-supplier-to-the-world-first-high-performance-supercar-with-methanol-fuel-cells/>. Letzter Zugriff am: 21.10.2019.

Setterfield (1997): Setterfield, Mark. *Rapid Growth and Relative Decline: Modelling Macroeconomic Dynamics with Hysteresis*. Basingstoke: Macmillan Press.

Siemens AG (2012): Siemens AG. ENUBA – Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen Schlussbericht. URL: https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/publications/abschlussbericht-enuba_1.pdf. Letzter Zugriff am: 04.10.2019.

Siemens AG (2017): Siemens AG. *eHighway – Elektrifizierter Straßengüterverkehr*. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:11c243e4061ed-65b0a84a24d068d547b0a5a8afc/version:1500536895/broschuere-ehighway-de.pdf>. Letzter Zugriff am: 14.10.2019.

Smeets et al. (2007): Smeets, E. M. W.; Faaij, A. P. C.; Lewandowski, I. M.; Turkenburg, W. C. *A bottom-up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050*. In: Progress in Energy and Combustion Science 33(1), S. 56–106.

Soller (2018): Soller. *Aiways RG „Nathalie“: Revolution mit Methanol!* URL: <https://vision-mobility.de/news/aiways-rg-nathalie-revolution-mit-methanol-1904.html>. Letzter Zugriff am: 04.10.2019.

Sorrell; Sijm (2003): Sorrell, S.; Sijm, J. *Carbon Trading in the Policy Mix*. In: Oxford Review of Economic Policy 19, S. 420–437.

SRU (2017): Sachverständigenrat für Umweltfragen. *Umsteuern erforderlich: Klimaschutz im Verkehrssektor*. Berlin.

Stavins (2003): Stavins, Robert N. Experience with Market-Based Environmental Policy Instruments. In: Handbook of Environmental Economics, Volume 1, Elsevier: Amsterdam, S. 355–435.

Stegmaier (2018): Stegmaier, G. *Elektro-Supersportwagen mit Methanol-Brennstoffzelle: RG Nathalie von Gumpert Aiways*. URL: <https://www.auto-motor-und-sport.de/neuheiten/gumpert-rg-nathalie-elektroauto-aiways-china/>. Letzter Zugriff am: 04.10.2019.

Sternberg et al. (2019): Sternberg, André; Hank, Christoph; Hebling, Christopher. *Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten über 300 km*. URL: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/news/2019/ISE_Ergebnisse_Studie_Treibhausgasemissionen.pdf. Letzter Zugriff am: 04.9.2019.

Stigler (1971): Stigler, George J. *The theory of economic regulation*. In: Bell Journal of Economics 2, S. 3–21.

Strunz et al. (2015): Strunz, S.; Gawel, E.; Lehmann, P. *The Political Economy of Renewable Energy Policies in Germany and the EU*. UFZ Discussion Paper 12/2015, Helmholtz-Centre for Environmental Research, Leipzig.

Strunz et al. (2016): Strunz, S.; Gawel, E.; Lehmann, P. *The Political Economy of Renewable Energy Policies in Germany and the EU*. In: Utilities Policy 42, S. 33–41.

Sühlsen; Hisschemöller (2014): Sühlsen, K.; Hisschemöller, M. *Lobbying the 'Energiewende'. Assessing the effectiveness of strategies to promote the renewable energy business in Germany.* In: Energy Policy 69, S. 316–325.

SVR (2014): Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung. *Gegen eine rückwärtsgewandte Wirtschaftspolitik. Jahresgutachten 2013/14.* Wiesbaden: Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung.

Tagesspiegel (2019a): Tagesspiegel. *Christian Lindner und die Klima-Profis.* In: Tagesspiegel, 14.08.2019. URL: <https://www.tagesspiegel.de/politik/fdp-chef-unterwegs-christian-lindner-und-die-klima-profis/24902416.html>. Letzter Zugriff am: 09.10.2019.

Tagesspiegel (2019b): Tagesspiegel. *Tarifpartner schlagen Alarm. Ohne Autoindustrie kein Wohlstand.* In: Tagesspiegel, 13.05.2019. URL: <https://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/tarifpartner-schlagen-alarm-ohne-autoindustrie-kein-wohlstand/24336742.html>. Letzter Zugriff am: 09.10.2019.

Tajima (2019): Tajima, T. *Study of 450-kW Conductive ERS at 150km/h.* Vortrag auf der 3rd Electric Road Systems Conference in Frankfurt a. M., 8. Mai 2019.

Tesla Deutschland (2019): Tesla Deutschland. *Supercharger.* URL: https://www.tesla.com/de_DE/supercharger. Letzter Zugriff am: 15.10.2019.

The Mobility House (2018): The Mobility House. *Die rollenden Kraftwerke kommen: E-Auto Nissan Leaf stabilisiert deutsches Stromnetz.* Pressemitteilung vom 22.10.2018. URL: https://www.mobilityhouse.com/de_de/magazin/pressemeldungen/v2g-hagen-elektroauto-stabilisiert-stromnetz.html. Letzter Zugriff am: 15.11.2019.

Thielmann et al. (2017): Thielmann, A.; Neef, C.; Hetteshheimer, T. *Energiespeicher-Roadmap_Update 2017.* URL: <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/lib/Energiespeicher-Roadmap-Dezember-2017.pdf>. Letzter Zugriff am: 21.10.2019.

Thomas et al. (2007): Thomas, S.; Fishedick, M.; Irrek, W.; Lechtenböhrer, S.; Hennicke, P. *Kernenergie im energiepolitischen Zieldreieck von Klimaschutz, Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit.* Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.

Traber; Kemfert (2009): Traber, T.; Kemfert, C. *Impacts of the German Support for Renewable Energy on Electricity Prices, Emissions, and Firms.* In: Energy Journal 30, S. 155–178.

UBA (2008): Umweltbundesamt. *Umweltschädliche Subventionen in Deutschland.* Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

UBA (2016a): Umweltbundesamt. *Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050.* In: UBA-Texte 56/2016. Dessau-Roßlau.

UBA (2016b): Umweltbundesamt. *Integration von Power to Gas/Power to Liquid in den laufenden Transformationsprozess.* URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/position_power_to_gas-power_to_liquid_web.pdf. Letzter Zugriff am: 04.10.2019.

Unger; Ahlgren (2005): Unger, T.; Ahlgren, E.O. *Impacts of a common green certificate market on electricity and CO₂-emission markets in the Nordic countries.* In: Energy Policy 33, S. 2152–2163.

United Nations (2017): United Nations. *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development.* New York: Springer Publishing Company. URL: <http://connect.springerpub.com/lookup/doi/10.1891/9780826190123.ap02>. Letzter Zugriff am: 15.10.2019.

Unruh (2000): Unruh, Gregory. *Understanding Carbon Lock-in.* In: Energy Policy 28, S. 817–830.

Varian (2001): Varian, Hal R. *Grundzüge der Mikroökonomik.* 5. Auflage, München, Wien: Oldenbourg.

van Beek (2019): van Beek, Tim. *Designing PPP contracts for public charging – Evaluating 10 years of procurement of public charging infrastructure in the Netherlands.* Presentation at EVS32, Lyon 2019.

van Benthem et al. (2008): van Benthem, A.; Gillingham, K.; Sweeney, J.L. *Learning-by-Doing and the Optimal Solar Policy in California*. In: Energy Journal 29, S. 131–152.

van Essen et al. (2019): van Essen, H.; van Wijngaarden, L.; Schroten, A.; Sutter, D.; Bieler, C.; Maffii, S.; Brambilla, M.; Fiorello, D.; Fermi, F.; Parolin, R.; El Beyrouthy, K. *Handbook on the external costs of transport: Version 2019*. Brüssel: European Commission. URL: <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/studies/internalisation-handbook-isbn-978-92-79-96917-1.pdf>. Letzter Zugriff am: 06.12.2019.

VDA (2019): Verband der deutschen Automobilindustrie (2019). *Mobilität und Wachstum in Europa – Empfehlungen der deutschen Automobilindustrie für die 9. Legislaturperiode des Europäischen Parlaments*. URL: <https://www.vda.de/de/services/Publikationen/mobilitaet-und-wachstum-in-europa.html>. Letzter Zugriff am: 09.10.2019.

Volkswagen AG (2015): Volkswagen AG. *Viavision: Brennstoffzellentechnologie*. URL: <http://www.viavision.org/ftp/1750.pdf>. Letzter Zugriff am: 21.10.2019.

Vossler (2014): Vossler, C. *Entwicklung und Reformmöglichkeiten des EEG aus Sicht der neuen politischen Ökonomie*. In: Zeitschrift für Umweltpolitik und -recht 37, S. 198–223.

Wang et al. (2018): Wang, J.; Wang, H.; Fan, Y. *Tech-no-Economic Challenges of Fuel Cell Commercialization*. In: Engineering 4(3), S. 352–360.

WBGU (2009): Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung für Globale Umweltveränderungen. *Welt im Wandel: Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung*. Berlin: Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung für Globale Umweltveränderungen.

WBGU (2011): Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung für Globale Umweltveränderungen. *Welt im Wandel Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation*. Berlin: Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung für Globale Umweltveränderungen.

Weimann (2008): Weimann, J. *Die Klimapolitik-Katastrophe*. Marburg: Metropolis-Verlag.

Weimann (2009): Weimann, J. *Königswege und Sackgassen der Klimapolitik*, In: Beckenbach, F.; Leipert, C.; Meran, G.; Minsch, J.; Nutzinger, H.G.; Weimann, J.; Witt, U. (Eds.). *Jahrbuch Ökologische Ökonomik: Diskurs Klimapolitik*. Marburg: Metropolis-Verlag, S. 213–237.

Welsch (2016): Welsch, H. *Electricity Externalities, Siting, and the Energy Mix: A Survey*. In: International Review of Environmental and Resource Economics 10, S. 57–94.

Werwitzke (2018): Werwitzke, C. *Weltweit nur 6.475 verkaufte Brennstoffzellen-Pkw*. URL: <https://www.electrive.net/2018/02/28/weltweit-nur-6-475-verkaufte-brennstoffzellen-pkw/>. Letzter Zugriff am: 15.10.2019.

Williamson (1979): Williamson, Oliver E. *Transaction-Cost Economics: The Governance of Contractual Relations*. In: Journal of Law and Economics 22, (2), S. 233–261.

Wolters (2017): Wolters, H. *Vorbestellung für den Tesla-Truck in Europa möglich*. URL: <https://www.electrive.net/2017/12/21/vorbestellung-fuer-den-tesla-truck-in-europa-moeglich/>. Letzter Zugriff am: 04.10.2019.

Yu et al. (2019): Yu, S.; Schmohl, S.; Liu, Z.; Hoffmeyer, M.; Schön, N.; Hausen, F.; Tempel, H.; Kungl, H.; Wiemhöfer, H.; Eichel, R. *Insights into a layered hybrid solid electrolyte and its application in long lifespan high-voltage all-solid-state lithium batteries*. In: Journal of Materials Chemistry A 7(8), S. 3882–3894.

Zeddies et al. (2012): Zeddies, J.; Bahrs, E.; Schönleber, N.; Gamer, W. *Globale Biomassepotenziale _ FNR 22003911 Zwischenbericht 2012.pdf*. URL: https://projekte.uni-hohenheim.de/i410b/download/publikationen/Globale%20Biomassepotenziale%20_%20FNR%2022003911%20Zwischenbericht%202012.pdf. Letzter Zugriff am: 04.10.2019.

Publikationen von Agora Verkehrswende

Klimabilanz von strombasierten Antrieben und Kraftstoffen

Ausgeliefert – wie die Waren zu den Menschen kommen

Zahlen und Fakten zum städtischen Güterverkehr

E-Tretroller im Stadtverkehr

Handlungsempfehlungen für deutsche Städte und Gemeinden zum Umgang mit stationslosen Verleihsystemen

Studie: Verteilnetzausbau für die Energiewende

Elektromobilität im Fokus

15 Eckpunkte für das Klimaschutzgesetz

Klimabilanz von Elektroautos

Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial

Neue Wege in die Verkehrswende

Impulse für Kommunikationskampagnen zum Behaviour Change

Railmap 2030

Bahnpolitische Weichenstellungen für die Verkehrswende

Bikesharing im Blickpunkt

Eine datengestützte Analyse von Fahrradverleihsystemen in Berlin

Parkraummanagement lohnt sich!

Leitfaden für Kommunikation und Verwaltungspraxis

CO₂-Minderung bei Pkw – die Rolle der Steuerpolitik

Ein europäischer Vergleich

Die Kosten von unterlassenem Klimaschutz für den Bundeshaushalt

Die Klimaschutzverpflichtungen Deutschlands bei Verkehr, Gebäuden und Landwirtschaft nach der EU-Effort-Sharing-Entscheidung und der EU-Climate-Action-Verordnung

Umparken – Den öffentlichen Raum gerechter verteilen

Zahlen und Fakten zum Parkraummanagement

Öffentlicher Raum ist mehr wert

Ein Rechtsgutachten zu den Handlungsspielräumen in Kommunen

Klimaschutz im Verkehr: Maßnahmen zur Erreichung des Sektorziels 2030

Alle Publikationen finden Sie auf unserer Internetseite: www.agora-verkehrswende.de

Agora Verkehrswende hat zum Ziel, gemeinsam mit Akteuren aus Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft die Grundlagen dafür zu schaffen, dass der Verkehrssektor in Deutschland bis 2050 dekarbonisiert werden kann. Hierfür erarbeiten wir Klimaschutzstrategien und unterstützen deren Umsetzung.



Unter diesem QR-Code steht diese
Publikation als PDF zum Download
zur Verfügung.

Agora Verkehrswende

Anna-Louisa-Karsch-Str. 2 | 10178 Berlin
T +49 (0)30 700 14 35-000
F +49 (0)30 700 14 35-129
www.agora-verkehrswende.de
info@agora-verkehrswende.de

