



Die deutsche Mobilitätswende bis 2045: Entwicklung, Analyse und Vergleich von Transformationspfaden unter ökonomischen Restriktionen

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades „Master of Science (M.Sc.)“
im Studiengang Wirtschaftswissenschaft
der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Leibniz Universität Hannover

vorgelegt von

Name: von der Reith

Vorname: André

Geb. am:

in:

Prüfer: Prof. Dr. M. H. Breitner

, 04.12.2023

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
Abstract	VII
Management Zusammenfassung	IX
Einleitung	IX
Methodik	X
Ergebnisse	X
Handlungsempfehlungen	XIII
Fazit	XV
1 Einleitung.....	1
1.1 EU Klimaziele und Koalitionsvertrag 2021.....	1
1.2 Forschungsfragen und Zielsetzung	2
1.3 Vorgehensweise und Methodik.....	2
2 Grundlagen und Rahmenbedingungen	4
2.1 Nachhaltigkeit und Klimaneutralität	4
2.2 Antriebstechnologien	5
2.2.1 Verbrennungsantriebe.....	5
2.2.2 Batterieelektrische Antriebe	8
2.2.3 Brennstoffzellenantriebe	10
2.2.4 Hybridantriebe.....	12
2.3 Energieträger.....	15
2.3.1 Erdölbasierte Kraftstoffe.....	15
2.3.2 Elektrische Energie	15
2.3.3 Wasserstoff	18
2.3.4 Synthetische Kraftstoffe	19
2.3.5 Bio- und Erdgas	19
2.4 Infrastrukturinvestitionen und Energieimporte	20
2.4.1 Investitionen in die Energieproduktionsinfrastruktur.....	20

2.4.2	Energieimporte.....	21
2.4.3	Investitionen in die Mobilitätsinfrastruktur	22
3	Status Quo Analyse des Mobilitätssektors.....	23
3.1	Energieimporte und Infrastruktur	23
3.2	Personenverkehr	25
3.3	Güterverkehr	29
4	Entwicklung der Transformationspfade.....	32
4.1	Grundlegende Annahmen und Beschreibung des TETDM.....	32
4.2	Ökonomische Restriktionen.....	34
4.3	Transformationspfad 1.....	36
4.4	Transformationspfad 2.....	37
4.5	Transformationspfad 3.....	39
4.6	Transformationspfad 4.....	40
4.7	Transformationspfad 5.....	42
5	Analyse, Vergleich, Diskussion und Implikationen der Transformationspfade ...	44
5.1	Entwicklung des Energiebedarfs und der Fahrzeugflotte	44
5.2	Veränderungen in Energieimporten, Kapitalströmen und Handelsbilanzen .	53
5.3	Energiepreisentwicklungen und Infrastrukturinvestitionen.....	61
5.4	Handlungsempfehlungen für Politik, Wirtschaft, Forschung und Bürger	74
6	Limitationen und Diskussion nicht betrachteter Faktoren	79
6.1	Limitationen durch getroffene Annahmen	79
6.2	Globale Emissionen und Verrechnung mit deutscher Treibhausgas Bilanz .	80
7	Schlussbetrachtung	83
7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse und Erkenntnisse	83
7.2	Ausblick auf weitere Entwicklungen und Forschungen.....	84
8	Literaturverzeichnis	85
9	Anhangsverzeichnis	97
10	Ehrenwörtliche Erklärung	107

1 Einleitung

1.1 EU Klimaziele und Koalitionsvertrag 2021

Die Herausforderungen des Klimawandels haben die internationale Gemeinschaft dazu veranlasst, konkrete Ziele zur Begrenzung der globalen Erwärmung zu definieren. Das im Rahmen des Pariser Abkommens formulierte 1,5 Grad Ziel stellt hierbei einen entscheidenden Meilenstein dar, dem sich insgesamt 197 Staaten verpflichtet haben. Dieses ambitionierte Ziel zielt darauf ab, die Erderwärmung auf 1,5 Grad Celsius über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen, um schwerwiegende Auswirkungen des Klimawandels zu verhindern. Die Europäische Union (EU) hat 2021 in Form des EU-Klimagesetzes bestimmt, im Jahr 2050 als erster Kontinent Klimaneutralität zu erreichen und somit den Verpflichtungen gemäß des Pariser Abkommens nachzukommen. Darüber hinaus wurde festgelegt, dass die EU ihre Treibhausgasemissionen bis 2030 um mindestens 55 % gegenüber dem Stand von 1990 reduzieren will (vgl. Umweltbundesamt 2023g). Dieses Zwischenziel ist entscheidend, um den Weg zur Klimaneutralität bis 2050 zu ebnen. In diesem Kontext werden unter anderem die Energieeffizienz in Form der Reduzierung des Primärenergiebedarfs (PEB) sowie der Einsatz erneuerbarer Energien (EE) als zentrale Faktoren für die Einhaltung dieses Ziels herausgestellt (vgl. Europäische Kommission - Generaldirektion Klimapolitik 2019, S. 5–9).

Als Mitgliedstaat der EU ist auch Deutschland dazu verpflichtet, an der Erreichung dieses Ziels mitzuwirken. Der im Jahr 2021 geschlossene Koalitionsvertrag der Bundesregierungsfraktionen reflektiert diese europäischen Verpflichtungen und stellt den Klimaschutz als zentralen Aspekt heraus. Dabei wird die Mobilitätswende sowie die damit verbundene Dekarbonisierung des Verkehrs bis 2045 als wichtiger Handlungsbereich identifiziert (vgl. Bundesregierung 2021, S. 48). Mit 148 Mio. Tonnen emittierten Treibhausgasen (Kohlenstoffdioxid-Äquivalente) im Jahr 2021 ist der Mobilitätssektor für insgesamt 23 % aller energiebedingten Treibhausgasemissionen Deutschlands verantwortlich (vgl. Umweltbundesamt 2023f), welche es bis 2045 gänzlich zu reduzieren gilt. Dafür wurden weitreichende Maßnahmen in den Bereichen Infrastruktur, Verkehrsträger sowie alternative Antriebstechnologien und Kraftstoffe definiert, wodurch die Komplexität der Mobilitätswende verdeutlicht wird. So soll beispielsweise die Elektromobilität als auch der Einsatz synthetischer Kraftstoffe im motorisierten Individualverkehr an Relevanz gewinnen. Darüber hinaus wird der Ausbau des öffentlichen Nahverkehrs, des Schienenverkehrs sowie des Güterschiffsverkehrs als wichtiges Zielbild genannt (vgl. Bundesregierung 2021, S. 48–54). Im Kontext der Mobilitätswende stellt zudem auch die Energiewende einen essenziellen Handlungsbereich dar. Der Einsatz synthetischer Kraftstoffe oder die Nutzung elektrischer Fahrzeuge kann

nur dann zu einer klimaneutralen Mobilität führen, wenn diese auf EE basieren. Daher sind nicht nur Investitionen in die Mobilitätsinfrastruktur, sondern auch in die Energieinfrastruktur von Bedeutung.

1.2 Forschungsfragen und Zielsetzung

Die erfolgreiche Umsetzung der deutschen Mobilitätswende wird von einer Vielzahl an Faktoren beeinflusst. Die Verfügbarkeit diverser Antriebstechnologien, Energieträger sowie Verkehrsmittel mit unterschiedlichen spezifischen Eigenschaften sorgt für vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten hin zu einer nachhaltigen Mobilität in Deutschland. Dabei sollten ökonomische Faktoren sowie Auswirkungen einzelner Entscheidungen umfassend berücksichtigt werden, um die Mobilitätswende auch wirtschaftlich effizient zu gestalten. Die Wahl eines Transformationspfads nimmt einen direkten Einfluss auf den zukünftigen PEB, die Energiekostenentwicklung, Infrastrukturinvestitionen als auch auf den Energiehandel. Es erfordert somit eine ausführliche Analyse dieser Zusammenhänge sowie die Identifizierung von strategisch nutzbaren Potenzialen, um Entscheidungen zu treffen, die einen langfristigen Erfolg der Mobilitätswende gewährleisten.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens soll untersucht werden, welche Technologien und Verkehrsträger einen entscheidenden Beitrag in der deutschen Mobilitätswende leisten können, um sowohl energieeffiziente als auch wirtschaftliche Verbesserungen im Vergleich zum Status Quo zu erzielen. In diesem Zusammenhang sollen die Investitionsbedarfe sowie Auswirkungen auf den Energiehandel identifiziert werden, um eine ganzheitliche Betrachtung der Mobilitätswende zu ermöglichen.

Daraus ergeben sich folgende Forschungsfragen:

***F1:** Welche Kombinationen aus Antriebstechnologien, Energieträgern und Verkehrsmitteln ermöglichen eine ökologisch und ökonomisch erfolgreiche deutsche Mobilitätswende bis zum Jahr 2045?*

***F2:** Wie wirken sich getroffene Technologieentscheidungen auf den Primärenergiebedarf, die Energiekosten, benötigte Infrastrukturinvestitionen als auch auf den Energiehandel aus?*

1.3 Vorgehensweise und Methodik

Mit dem Anspruch einer strukturierten Herangehensweise zur Beantwortung der aufgestellten Forschungsfragen werden in Kapitel 2 zunächst die theoretischen Grundlagen und Rahmenbedingungen erläutert. Dafür wird zunächst der Begriff der Nachhaltigkeit sowie das Konzept der Klimaneutralität definiert. Anschließend werden die im Kontext der Mobilitätswende verfügbaren Antriebstechnologien und Energieträger

anhand ihrer Funktionsweise und Energieeffizienz vorgestellt sowie deren Einsatzbereiche definiert. In diesem Kontext stellt der Begriff des Wirkungsgrades eine entscheidende Kennzahl dar. Darüber hinaus werden mit diesen Technologien in Verbindung stehende Investitionsbeträge für den Ausbau sowie ökonomische Kennzahlen der Energieerzeugung und des -imports vorgestellt.

Im anschließenden Kapitel 3 wird eine ausführliche Status Quo Analyse des Mobilitätssektors im Hinblick auf das Verkehrsaufkommen, die genutzten Technologien und Verkehrsträger sowie die Mobilitätsinfrastruktur durchgeführt. Ebenso werden aktuelle mobilitätsbezogene Energieimporte sowie die damit verbundene Handelspartner Deutschlands identifiziert. Es ist ein essenzieller Schritt die aktuelle Situation umfassend zu analysieren und zu verstehen, um daraus resultierende Potenziale zu erkennen, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit genutzt werden können.

Das in Kapitel 2 und 3 erlangte Wissen wird in Kapitel 4 miteinander in Zusammenhang gebracht, sodass daraus für die Beantwortung der Forschungsfragen relevante Kennzahlen und Entwicklungen ermittelt werden können. Dazu wird das Microsoft Excel basierte Tool zur Entwicklung von Transformationspfaden der deutschen Mobilitätswende (TETDM) entwickelt. Darauf aufbauend werden unter Anwendung des TETDM fünf beispielhafte Konfigurationen für Transformationspfade hin zu einer klimaneutralen Mobilität Deutschlands im Jahr 2045 erstellt, wobei die Transformationspfade unterschiedliche Kennzahlenentwicklungen anstreben. Ein Transformationspfad wird im Kontext dieser Arbeit als anteilbasierte Kombination von Antriebstechnologien und Verkehrsträgern definiert, deren Auswirkungen auf Energiebedarfe, Energiekosten, Infrastrukturinvestitionen sowie Energieimporte es zu verstehen gilt.

Die Auswertung der Energiebedarfsentwicklung, der Veränderungen in Energieimporten sowie der Energiepreis und Infrastrukturentwicklungen erfolgt in Kapitel 5. Dafür werden sowohl die spezifischen Ergebnisse der entwickelten Transformationspfade vorgestellt als auch allgemeine Erkenntnisse diskutiert, welche zum Abschluss des Kapitels in klaren Handlungsempfehlungen für Politik, Wirtschaft sowie Forschung und Bürger resultieren.

Die hohe Komplexität der Transformation des Mobilitätssektors bedingt, dass die erlangten Erkenntnisse dieser Arbeit unter dem Bewusstsein bestimmter Limitationen betrachtet werden müssen. Daher ist Kapitel 6 der Hervorhebung dieser Einschränkungen sowie der Diskussion nicht betrachteter Faktoren gewidmet. Die in Kapitel 7 durchgeführte Schlussbetrachtung fasst abschließend die wichtigsten Erkenntnisse dieser Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungen und Forschungsbedarfe.

7 Schlussbetrachtung

7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse und Erkenntnisse

Die in dieser Arbeit thematisierte Umsetzung der deutschen Mobilitätswende wird von einer Vielzahl an Faktoren beeinflusst. Die Verfügbarkeit diverser Antriebstechnologien, Energieträger sowie Verkehrsmittel mit unterschiedlichen spezifischen Eigenschaften sorgt für vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten - hin zu einer nachhaltigen Mobilität in Deutschland. Dabei sollten ökonomische Faktoren sowie Auswirkungen einzelner Entscheidungen umfassend berücksichtigt werden, um die Mobilitätswende auch wirtschaftlich effizient zu gestalten. Um sowohl ökologisch als auch wirtschaftlich effiziente Transformationspfade zu entwickeln, wurden zunächst die verfügbaren Antriebstechnologien und Energieträger anhand ihrer Funktionsweise und Energieeffizienz eingeführt sowie deren Einsatzbereiche definiert. Darüber hinaus wurden mit diesen Technologien in Verbindung stehende Investitionsbeträge für den Ausbau sowie ökonomische Kennzahlen der Energieerzeugung und des -imports vorgestellt. Die in diesem Teil ermittelten Daten dienten mit der anschließenden Status Quo Analyse des Mobilitätssektors als Grundlage der Entwicklung des TETDM. Dieses wurde genutzt, um insgesamt fünf Transformationspfade mit unterschiedlichen Anforderungen, hinsichtlich der Zielkennzahlen, zu entwickeln.

Hinsichtlich der zu Beginn der Arbeit definierten Forschungsfragen zeigte die Analyse der Transformationspfade, dass die reine Elektromobilität die vielversprechendste Antriebstechnologie sowohl in Bezug auf Energie- als auch Kosteneffizienz darstellt. Wo der Einsatz dieser nicht problemlos möglich ist, können Wasserstoff- und Hybridantriebstechnologien eingesetzt werden. Es wird empfohlen, den öffentlichen Straßen- und Schienenverkehr zu erhöhen und gleichzeitig den motorisierten Individualverkehr zu reduzieren, um Skalierungsmöglichkeiten in Bezug auf Energie- und Kosteneffizienzen zu nutzen. Im Güterverkehr sollte der Straßengüterverkehr stark reduziert und auf den Schienen- oder Binnengüterschiffsverkehr umverteilt werden. Der inländische Flugverkehr sollte sowohl für Güter- als auch für Personentransporte stark reduziert werden, da aktuell keine klimaneutrale Antriebsmöglichkeit mit vergleichbaren Kosten und PEB verfügbar ist. Hinsichtlich hoher Anschaffungskosten und langer Nutzungszeiträume von S- und U-Bahnen, Zügen, Schiffen und Flugzeugen können synthetische Kraftstoffe während einer Übergangsphase genutzt werden, um die bestehende Flotte klimaneutral zu betreiben. Synthetische Kraftstoffe sind jedoch im motorisierten Individualverkehr, im Straßengüterverkehr und Teilen des öffentlichen Straßenpersonenverkehrs aufgrund hoher Kosten und PEB nicht zu bevorzugen. Methanol ist zum aktuellen Zeitpunkt in keinem Verkehrsbereich sinnvoll einzusetzen, da es weder eine Übergangsphase ermöglichen noch PEB- oder Kostensenkungen erzielen kann.

Die Mobilitätswende bietet ein signifikantes Potenzial zur Senkung der Energieimportquote sowie der damit verbundenen Abhängigkeit von anderen Staaten. Die Mobilität im Jahr 2045 benötigt eine große Menge Strom aus EE, die aus Kostengründen zu einem großen Teil in Deutschland erzeugt werden sollte. Dabei ist ein weitreichender Ausbau der Energieinfrastruktur von entscheidender Bedeutung. Darüber hinaus zeigen sich deutliche Veränderungen hinsichtlich der zukünftigen Handelspartner im Bereich der Energiebeschaffung. Aktuell im Bereich fossiler Energieträger wichtige Handelsbeziehungen beispielsweise zu Norwegen, Großbritannien, Kasachstan, den USA sowie den Vereinigten Arabischen Emiraten werden langfristig durch den vermehrten Energiehandel mit südeuropäischen, nordafrikanischen und mittelamerikanischen Staaten sowie Indien und Australien abgelöst. Es werden außerdem Investitionen in die Mobilitätsinfrastruktur zur effizienten und alltäglichen Nutzung der gewünschten Technologien, besonders in den Bereichen der Schienennetzerweiterung und öffentlichen Ladeinfrastruktur, benötigt. In diesem Zusammenhang müssen die Förderbudgets des Bundeshaushalts angehoben oder umverteilt werden, um die sich im Kontext der Mobilitätswende ergebenden Chancen bestmöglich zu nutzen und keine auf Budgetbeschränkungen beruhenden Kompromisslösungen eingehen zu müssen.

7.2 Ausblick auf weitere Entwicklungen und Forschungen

Aufgrund zukünftiger Entwicklungen im Bereich von Technologieinnovationen sowie in dieser Arbeit thematisierter Limitationen ergibt sich ein zusätzlicher Forschungsbedarf. Dieser besteht hauptsächlich darin, weitere Faktoren in die Kalkulation von Transformationspfaden aufzunehmen, um realistischere Einschätzungen für deren Auswirkungen im Energie- und Mobilitätssektor zu erhalten. Dabei ist es relevant, Aspekte, wie das Adaptionverhalten der Wirtschaft und Individuen sowie die globalen Effekte im Zusammenhang mit importierten Emissionen zu erforschen. Ebenso ist die Geschwindigkeit der Anpassung von Produktionskapazitäten zu untersuchen, um zeitliche Herausforderungen zu erkennen und Transformationspfade dementsprechend auszurichten. Die Rohstoffverfügbarkeit und deren Einfluss auf die Fahrzeugpreise stellen ebenfalls relevante Kennzahlen dar, die es in zukünftigen Forschungen zu untersuchen gilt. Um die Realitätsnähe der Transformationspfade weiter zu erhöhen, sollte eine Analyse hinsichtlich der maximal installierbaren EE Leistung in Deutschland durchgeführt sowie damit einhergehende Flächen- und Technologieverfügbarkeiten berücksichtigt werden. Außerdem sollten saisonale Effekte auf die Energiepreise untersucht und einbezogen werden, da EE dahingehenden Schwankungen unterliegen können. Die stetige Datenaktualisierung auf Basis neuer Erkenntnisse und Innovationen sowie eine entsprechende Anpassung der Pfade ist außerdem von essenzieller Bedeutung, um langfristig eine ökologisch und ökonomisch erfolgreiche Mobilitätswende durchzuführen.