HOCHSCHULE OSNABRÜCK
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fakultät Management, Kultur und Technik

Masterarbeit

im Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen Energiewirtschaft

über das Thema:

Szenarien für die Energieversorgung des Emslandes mit 100%iger Deckung des Energiebedarfs aus erneuerbaren Energien unter Berücksichtigung der Sektorkopplung

Autor: Lennart Friebel

Matrikel-Nr.: 631821

Erstprüferin: Frau Prof. Dr. Anne Schierenbeck

Zweitprüfer: Herr Prof. Dr. Johannes Koke

Ausgabedatum: 11.06.19

Abgabedatum: 08.11.19

Danksagung

Ein ganz besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr. Anne Schierenbeck, die mir stets mit fachlichem und persönlichem Rat zur Seite stand und sich bereit erklärt hat, diese Arbeit als Erstprüferin zu betreuen.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr. Johannes Koke für sein Engagement als Zweitprüfer.

Herr Schmidt-Kanefendt, der Entwickler des Simulationstools 100prosim, hat mir wichtige Fragen zu dem Tool stets zeitnah und ausführlich beantwortet, sodass ihm ebenfalls ein besonderer Dank gilt.

Außerdem bedanke ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden, die mich während des gesamten Studiums unterstützt und mir Rückhalt gegeben haben.

Zusammenfassung

Für die Erreichung der Pariser Klimaziele ist die Umstellung des Energiesystems Deutschlands auf 100 % erneuerbare Energien notwendig. Darüber hinaus muss der Energieverbrauch durch Effizienzsteigerungen sinken. Da Ballungsräume zu wenig Flächen für eine eigene erneuerbare Energieerzeugung besitzen, müssen diese durch ländliche Gebiete mit großem Potenzial für erneuerbare Energieerzeugung wie dem Emsland mit versorgt werden. Vor diesem Hintergrund setzt sich diese Masterarbeit mit dem zukünftigen, vollständig erneuerbaren Energiesystem des Emslandes auseinander. Da zukünftige Entwicklungen nicht genau vorhergesagt werden können und es verschiedene Prognosen für Effizienzsteigerungen und andere relevante Technologieentwicklungen gibt, bestehen verschiedene Möglichkeiten, wie das Energiesystem der Zukunft aussehen kann. Diese Möglichkeiten werden als Ergebnis dieser Arbeit dargestellt.

Demnach kann der Energieverbrauch des Emslandes und der mitversorgten Region mindestens um 17,1 % und maximal um 37,7 % bis 2040 gegenüber 2016 reduziert werden. Dieses kann durch umfassende Effizienzsteigerungen und Gebäudesanierungen, durch die Elektrifizierung des Verkehrs, durch die Substitution von fossilen Brennstoffen und durch die Implementierung von Möglichkeiten zur Sektorkopplung erreicht werden. Zur Deckung des Verbrauchs müssen die Onshore-Windkraft und Photovoltaik von 871 MW gesamter installierter Leistung in 2016 mindestens auf 7.456 MW und maximal auf 16.721 MW bis 2040 ausgebaut werden. Neben dem Ausbau anderer erneuerbarer Energiequellen müssen zusätzlich Speichermöglichkeiten auf eine Kapazität zwischen 3.118 GWh und 9.267 GWh sowie das Stromnetz ausgebaut werden.

Den größten Einfluss auf den Energieverbrauch haben die Pro-Kopf-Wohnfläche, die Prozesseffizienz in der Industrie und dem Gewerbe, der Materialverbrauch pro Person und die Entwicklung der gesamten Verkehrsleistung. Zur Optimierung dieser Aspekte müssen hierzu dementsprechend wirksame Anreize und Maßnahmen von der Politik und ein gesellschaftliches Bewusstsein in der Bevölkerung geschaffen werden.

Abstract

To achieve the Paris climate targets it is necessary for the german energy system to transition to the exclusive use of renewable energy. Furthermore energy consumption has to drop due to future efficiency gains. Conurbations usually do not have enough space to produce their own renewable energy and thus have to be provided with said energy by surrounding rural regions with big potential for renewable energy production as for example the Emsland. In this context this master thesis deals with the future exclusively renewable energy system of the Emsland. Because the future cannot be accurately predicted and because there are different forecasts for efficiency gains and other relevant technology developments there are various possibilities for the outline of the future energy system. Those possibilities are presented as the result of this master thesis.

The energy consumption of the region that is provided by the Emsland can be reduced by at least 17.1 % and at the most by 37.7 % until 2040 compared to 2016. This can be achieved by improved efficiency, comprehensive building refurbishment as well as electrification of traffic, the substitution of fossil fuels and implementing possibilities for sector coupling. To cover the demand the installed capacity of both onshore wind energy and photovoltaics will have to be expanded to a total of at least 7,456 MW and at most 16,721 MW until 2040. This is a significant increase from 871 MW of installed capacity in 2016. In addition to the expansion of other renewable energies and the grid energy storage options will have to be expanded to a capacity between 3,118 GWh und 9,267 GWh.

The living space per person, the process efficiency in the industry and commerce, the material consumption per person and the traffic performance have the biggest influence on energy consumption and thus have to be optimized. Therefore incentives and measures have to be created by politics and awareness and willingness to change one´s behaviour have to be adopted.

Inhalt

Abbildungsverzeichnis VII

Tabellenverzeichnis VIII

Abkürzungsverzeichnis IX

Symbolverzeichnis X

1 Einleitung 1

1.1 Ziel der Arbeit 2

1.2 Aufbau der Arbeit 2

1.3 Kurzvorstellung des Emslandes 3

2 Methodik 5

2.1 Literaturrecherche 5

2.2 Szenariotechnik 6

2.3 Flächenbasierter Ansatz 7

2.4 Verursacherprinzip und Solidarprinzip 8

2.5 Simulationstool 9

2.6 Sensitivitätsanalyse 11

3 Stand des Wissens 13

3.1 Energieverbrauch 13

3.1.1 Bevölkerungsentwicklung 13

3.1.2 Wirtschaftliche Entwicklung 15

3.1.3 KLIK 16

3.1.4 Gebäudewärme 18

3.1.5 Prozesswärme 21

3.1.6 Mobilität 22

3.1.7 Grundstoffsynthese 27

3.2 Sektorkopplung 28

3.2.1 Sektorkopplung im Wärmesektor 28

3.2.2 Sektorkopplung im Verkehrssektor 31
3.2.3 Auswirkungen der Sektorkopplung auf den Elektrizitätsbereich 32
3.3 Energieerzeugung 32
3.3.1 Solarenergie 33
3.3.2 Windenergie 34
3.3.3 Wasserkraft 38
3.3.4 Biogene Brennstoffe 38
3.3.5 Umgebungswärme 41
3.3.6 Tiefengeothermie 42
3.3.7 Stromwandlung und -speicherung 43
4 Szenarien „Emsland 100 % Erneuerbare Energien“ 45
4.1 Systematik der Szenarioerstellung 45
4.2 Betrachtungsjahr 46
4.3 Energiesystem des Emslandes im Jahr 2040 47
4.3.1 Energieverbrauch im Jahr 2040 48
4.3.2 Validierung des Energieverbrauchs 54
4.3.3 Energieerzeugung im Jahr 2040 55
4.3.4 Ausbau der erneuerbaren Energien 58
4.3.5 Implementierung der Sektorkopplung 62
4.4 Möglichkeitsraum des Energiesystems 63
4.4.1 Verbrauchsszenarien 64
4.4.2 Mobilitätsszenarien 67
4.4.3 Gebäudewärmeszenarien 68
4.5 Gegenüberstellung der Szenarienergebnisse 69
4.5.1 Vergleich der Ausbaupfade erneuerbarer Energien 70
4.5.2 Vergleich des Speicherbedarfs 71
4.5.3 Ausbau der Stromnetze 74
4.5.4 Einordnung der Szenarien 74

5 Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch 76
5.1 Sensitivitätsanalyse 76
5.2 Handlungsempfehlungen 80
6 Abschlussbetrachtungen 82
6.1 Kritische Reflexion 82
6.2 Fazit 84
6.3 Ausblick 87
Literaturverzeichnis XI
Anhang XXIV

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Flächennutzung im Emsland (Stand: 2016) 4
Abbildung 2: Flächenbasierter, jährlicher Energieertrag erneuerbarer Energien 7
Abbildung 3: Aufbau des Simulationstools 10
Abbildung 4: Prognosen zur Bevölkerungsentwicklung im Emsland 13
Abbildung 5: Nutzung der PtG-Technologie für Gebäudewärmeerzeugung 29
Abbildung 6: Flächenbedarf einer WKA und Anlagenanordnung in einem Windpark 36
Abbildung 7: Systematik bei der Szenarioerstellung 45
Abbildung 8: Mögliche Entwicklungen des Klimas 47
Abbildung 9: Endenergieverbrauch nach Energieformen von 2016 und 2040 . 50
Abbildung 10: Endenergieverbrauch nach Sektoren von 2016 und 2040 51
Abbildung 11: Validierung des errechneten Energieverbrauchs im Jahr 2040 ... 55
Abbildung 12: Endenergieerzeugung nach Energiequellen in 2016 und 2040 ... 57
Abbildung 13: Notwendiger Ausbau der erneuerbaren Energien von 2016 bis 2040 58
Abbildung 14: Energetische Flächennutzung in 2016 und 2040 59
Abbildung 15: Vergleich von Bruttoenergieerzeugung und Endenergieverbrauch im Jahr 2040 62
Abbildung 16: Endenergieverbrauch nach Energieformen in den Verbrauchsszenarien 64
Abbildung 17: Endenergieverbrauch nach Sektoren in den Verbrauchsszenarien 66
Abbildung 18: Endenergieverbrauch im Mobilitätssektor in den Mobilitätsszenarien..... 68
Abbildung 19: Endenergieverbrauch im Gebäudesektor in den Gebäudewärmeszenarien 69
Abbildung 20: Ausbaupfade für erneuerbare Energien aus den Szenarien 71
Abbildung 21: Vergleich nötiger Energiespeicherkapazitäten der Szenarien 73
Abbildung 22: Sensitivitätsanalyse im Sektor Gebäudewärme 76
Abbildung 23: Sensitivitätsanalyse im Sektor Prozesswärme 77
Abbildung 24: Sensitivitätsanalyse im Sektor Mobilität 78
Abbildung 25: Sensitivitätsanalyse im Sektor KLIK 79

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Flächenbilanz vom Raumordnungsprogramm des Emslandes zur Windenergienutzung 35
Tabelle 2: Durchschnittlicher Produkttyp einer WKA im Jahr 2040 38
Tabelle 3: Parameter für den Energieverbrauch 48
Tabelle 4: Parameter für die Energieerzeugung im MA-Zielszenario 56
Tabelle 5: Vergleich des gesamten Endenergieverbrauchs nach Sektoren und Anwendungsbereichen der Jahr 2012 und 2016 XXIV
Tabelle 6: Daten zu Abbildung 10 XXIV
Tabelle 7: Daten zu Abbildung 11 XXV
Tabelle 8: Daten zu Abbildung 17 XXV
Tabelle 9: Daten zu Abbildung 20 XXVI
Tabelle 10: Daten zu Abbildung 22 XXVI
Tabelle 11: Daten zu Abbildung 23 XXVII
Tabelle 12: Daten zu Abbildung 24 XXVII
Tabelle 13: Daten zu Abbildung 25 XXVIII

Abkürzungsverzeichnis

100prosim	Excelbasiertes Datenmodell
BEV	Battery Electric Vehicle
BIP	Bruttoinlandsprodukt
CCS	Carbon Dioxide Capture und Storage
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
GIS	Geoinformationssystem
KLIK	Kraft, Licht, Informations- und Kommunikationstechnologien und Kälte
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LSN	Landesamt für Statistik Niedersachsen
MA	Masterarbeit
MIV	Motorisierter Individualverkehr
ÖPNV	öffentlicher Personennahverkehr
PtG	Power-to-Gas
PtL	Power-to-Liquid
PtX	Power-to-X
PVD	Photovoltaik-Dachanlage
PVF	Photovoltaik-Freiflächenanlage
RD	Rotordurchmesser
THG	Treibhausgas
WKA	Windkraftanlage

Symbolverzeichnis

°C	Temperatur
a	Anno (Jahr)
A	Fläche
GWh	Gigawattstunde(n)
h	Hora (Stunde)
ha	Hektar
kWh	Kilowattstunde(n)
m	Meter
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde(n)

1 Einleitung

Zu den zentralen Herausforderungen für die Welt gehört gegenwärtig die Gestaltung der Energiewende. Dabei geht es darum, die Folgen des Klimawandels, zu denen eine steigende Durchschnittstemperatur, Extremwetterlagen und stärkere Klimaschwankungen gehören, zu begrenzen und gleichzeitig eine sichere, wirtschaftliche und nachhaltige Energieversorgung zu garantieren.[1] Eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen sowie ein Verzicht auf atomare Energie sind zentrale Bestandteile für ein nachhaltiges Energiesystem. Darum muss das Energiesystem durch den Einsatz erneuerbarer Energieträger dekarbonisiert und die erzeugte Energie möglichst effizient eingesetzt werden.[2]

Bei der UN-Klimakonferenz in Paris im Dezember 2015 einigten sich 197 Staaten auf das Ziel, die Erderwärmung im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter auf "deutlich unter" zwei Grad Celsius zu begrenzen mit Anstrengungen für eine Beschränkung auf 1,5 Grad Celsius. Darüber hinaus wird eine Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2050 angestrebt.[3] Die vollständige Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energien bis 2050 ist laut der Greenpeace Studie „Energy Revolution“ technisch machbar.[4] Eine besondere Verantwortung für den weltweiten Klimawandel trägt Deutschland als eine der führenden Industrienationen. Das aktuelle Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung sieht vor, das Klimaschutzziel eines um 55 % reduzierten Treibhausgasausstoßes bis zum Jahr 2030 gegenüber 1990 durch eine Bepreisung von CO_2 Emissionen, Fördermaßnahmen und gesetzliche Änderungen für mehr Innovationen und Investitionen zu erreichen.[5]

Ballungsräume werden ihren Energiebedarf durch einen Mangel geeigneter Flächen zur Erzeugung von erneuerbarer Energie nicht selbst decken können. Ländliche Gebiete wie das Emsland müssen deshalb in Zukunft diese Ballungsräume mit Energie versorgen.[6]

[1] Vgl. *Brasseur, G. P./Jacob, D./Schuck-Zöller*, S., 2017.
[2] Vgl. *Gerbert, P./Herhold, P.*, 2018.
[3] Vgl. *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit,* 2016.
[4] Vgl. *Teske; Dr. S./Sawyer, S./Schäfer, O.*, 2015.
[5] Vgl. *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2019.*
[6] Vgl. *Beck, H.-P./von Haaren, C.*, 2016.

1.1 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Masterarbeit ist die Erstellung mehrerer Energieszenarien, welche einen Möglichkeitsrahmen für die zukünftige vollständig erneuerbare Energieversorgung der Solidarregion Emsland abbilden. Eine Solidarregion ist ein Gebiet, das den Energiebedarf eines umliegenden Gebietes, das nicht durch eigens produzierte Energie versorgt werden kann, deckt. Unter Berücksichtigung der Sektorkopplung werden aus den erstellten Szenarien Voraussetzungen und Einflussfaktoren für das angestrebte dekarbonisierte Energiesystem bestimmt.

Der Landkreis Emsland ist in Niedersachsen der größte Produzent von Strom aus regenerativen Energien, weshalb die Ausarbeitung solcher Energieszenarien für diesen Standort interessant ist.[7]

Für die tiefergehende Bearbeitung dieser Thematik kommt das excelbasierte Datenmodell 100prosim zum Einsatz, welches auf dem vorliegenden Energieszenario für das Land Niedersachsen aufbaut.[8]

1.2 Aufbau der Arbeit

Zunächst wird eine Literaturrecherche durchgeführt, um für die einzelnen energiewirtschaftlichen Parameter einen Wertebereich abzubilden, der dem aktuellen Stand des Wissens und der Forschung entspricht. Die Technologieentwicklung auf der Energieerzeugungsseite sowie der anzunehmende, sinkende Energieverbrauch durch Effizienzsteigerung und Sektorkopplung stehen dabei neben Daten wie z.B. der Bevölkerungsentwicklung im Vordergrund. Diese Daten werden in das vorliegende Datenmodell 100prosim eingepflegt.

Anschließend werden Szenarien für einen festzulegenden Zeitpunkt modelliert, die eine 100%ige Energieversorgung aus erneuerbaren Energien unter Einbeziehung der Sektorkopplung aufzeigen. Durch die Variation der entsprechenden energiewirtschaftlichen Parameter werden verschiedene konsistente Szenarien erstellt, die extreme Entwicklungen analysieren.

Mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse soll im nächsten Schritt geklärt werden, welche Einflussfaktoren die größten Veränderungen am Energieverbrauch hervorrufen und

[7] Vgl. *Scheele, Prof. Dr. U./Kröcher, Dr. U./Brandstetter, S.*, 2015.
[8] Vgl. *Beck, H.-P./von Haaren, C.*, 2016.

somit am schwerwiegendsten sind. Daraus wird deutlich, in welchen Bereichen verstärkt Anreize bzw. Förderinstrumente von der Politik geschaffen werden müssen.

Daraufhin ordnet eine kritische Reflexion die Ergebnisse aus den Szenariokalkulationen ein. Abschließend werden die wichtigsten Ergebnisse im Fazit zusammengefasst und ein Ausblick gegeben.

Im Anhang befinden sich Wertetabellen zu Abbildungen, die keine Datenbeschriftungen enthalten. Der elektronische Anhang enthält die verschiedenen Szenariokalkulationen, sodass die Ergebnisse im Detail nachvollzogen und evtl. weiter bearbeitet werden können.

1.3 Kurzvorstellung des Emslandes

Das Emsland ist mit 288.207 ha der größte Landkreis Niedersachsens.[9] Besonders der südliche Teil der Region ist geprägt durch die Energiewirtschaft, die einen Schwerpunkt der Wirtschaft ausmacht. Die fossile Energieerzeugung erfolgt durch Erdölförderung und Raffinierung, ein Gaskraftwerk und ein Atomkraftwerk. Das Atomkraftwerk wird im Jahr 2022 den Betrieb einstellen, sodass ein hoher Energiebetrag zusätzlich durch erneuerbare Energien erzeugt werden muss. Der Anteil erneuerbarer Energien am Stromverbrauch liegt schon jetzt mit 112 % deutlich über dem niedersächsischen und deutschen Durchschnitt.[10] Eine Ansiedlung von energieintensiven Betrieben mit einem überdurchschnittlichen Beschäftigungsanteil in der Industrie profitiert von der sicheren Energieversorgung.[11] Die Fläche der mit 112 Einwohnern pro km^2 sehr dünn besiedelten Region wird zu knapp 64 % landwirtschaftlich genutzt, wie Abbildung 1 zeigt.

[9] Vgl. *Landesamt für Statistik Niedersachsen,* 2018.
[10] Vgl. *Landkreis Emsland*, 2017.
[11] Vgl. *Schasse, U./Japtok, J./Reinhold, M./Thiel, H.*, 2016.

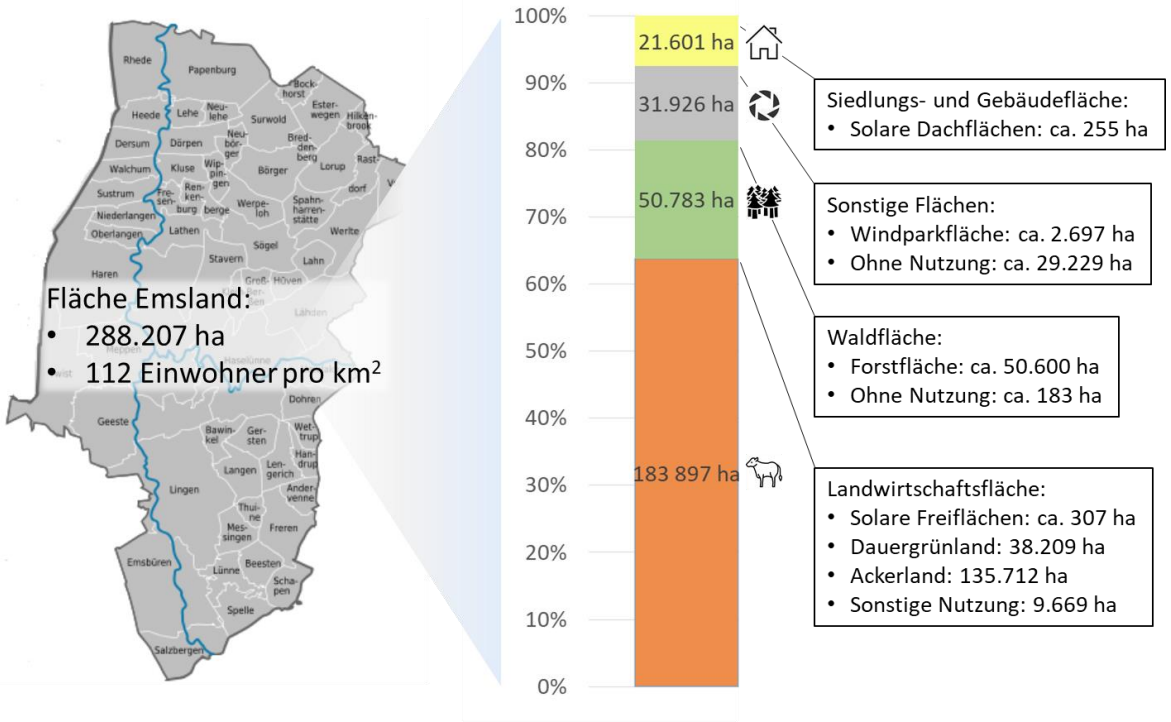

Abbildung 1: Flächennutzung im Emsland (Stand: 2016)
Quelle: Eigene Darstellung.

Solar genutzte Flächen werden als Freifläche mit einer Größe von ca. 307 ha und als Dachfläche mit ca. 255 ha für die Strom- und Wärmeproduktion genutzt. Windkraftanlagen (WKA) erzeugen auf einer Windparkfläche von ca. 2697 ha zusätzlich Strom. Darüber hinaus wird mit 327 Anlagen aus Biomasse Strom und Wärme erzeugt.[12] Im Jahr 2015 betrug die installierte Leistung aus erneuerbaren Energien insgesamt 1.331 MW peak.[13]

[12] Vgl. *3N Kompetenzzentrum Niedersachsen Netzwerk Nachwachsende Rohstoffe und Bioökonomie e. V.*, 2017.
[13] *Vgl. Landkreis Emsland, 2017.*

2 Methodik

Bestandteile dieser Arbeit sind neben der Literaturrecherche zum Stand des Wissens auch die Erstellung und Erläuterung verschiedener Szenarien und deren Auswertung mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse. Was bei den jeweiligen Schritten beachtet und wie dabei vorgegangen wird, wird nachfolgend kurz dargestellt.

2.1 Literaturrecherche

Wissenschaftliche Arbeiten basieren auf einer ausführlichen Literaturrecherche und der Auswertung von Fachliteratur. Dieser vorangestellte Arbeitsschritt hilft dabei, die eigene Arbeit zu strukturieren, zu gliedern und zu verfassen. Die eingehende Auseinandersetzung mit der Literatur fundiert den eigenen Kenntnisstand zur Thematik und dient als argumentative Absicherung für eigene Erkenntnisse.[14]

Für die Entwicklung verschiedener Szenarien sind viele Daten zu gesellschaftlichen und technischen Entwicklungen sowie geographischen Gegebenheiten des Emslandes zu recherchieren. Dazu ist eine systematische Auseinandersetzung mit der relevanten Literatur notwendig. Es gibt viele regionale und überregionale Szenarien zum Thema der vollständig regenerativen Energieversorgung, die als Primärliteratur für diese Arbeit dienen. Das erklärte Ziel ist meistens, die vollständige Dekarbonisierung der Energieversorgung einer Region bis zum Jahr 2050 zu erreichen.[15] [16] Die meisten Prognosen für gesellschaftlich und technisch relevante Entwicklungen haben aus diesem Grund den gleichen Zeithorizont, beinhalten teilweise jedoch keine Werte für vorherige Jahre.

In dieser Arbeit ist der zeitliche Rahmen vom Ausgangsjahr 2016 bis zum Zieljahr 2040 festgelegt. Für das Jahr 2040 finden sich nicht in allen zugrundeliegenden Prognosen konkrete Werte, sodass diese Werte teilweise interpoliert werden mussten. Beispielsweise gibt es keine Werte für den durchschnittlichen Endenergieverbrauch von Wohngebäuden für das Jahr 2040. In der Literatur gibt es nur Werte für die Jahre 2030 und 2050.[17] Der Anstieg des Raumwärmebedarfs wird als linear angenommen, sodass der Wert für das Jahr 2040 interpoliert werden kann. Der Endenergieverbrauch von Wohngebäuden wird gegenüber dem Jahr 2010 maximal

[14] Vgl. *Müller, Ragnar/Plieninger, Jürgen/Rapp, Christian,* 2013.
[15] Vgl. *Beck, H.-P./von Haaren, C.*, 2016.
[16] Vgl. *Walter, A./Wiehe, J.,* 2018.
[17] Vgl. *Hesse, Tilman/Bürger, Veit,* 2016.

um 43 % bis 2030 und 69 % bis 2050 reduziert.[18] Daraus kann der Wert für das Jahr 2040 interpoliert werden.[19]

Außerdem werden verschiedene Werte aus mangelnder Datenlage von der nächstgrößeren Region, z.B. Niedersachsen oder Deutschland, für das Emsland übernommen. Dieses betrifft vor allem Werte zur wirtschaftlichen Entwicklung. Der zukünftige Anstieg des Bruttoinlandproduktes bezieht sich auf ganz Deutschland und wird auf das Emsland übertragen, ohne angepasst zu werden.

2.2 Szenariotechnik

Um zukünftige Entwicklungen in unübersichtlichen Systemen einschätzen zu können, welche in ihren Dynamiken und Rahmenbedingungen nicht sicher vorhersehbar sind, kann die Szenariotechnik eingesetzt werden. Der Bereich der denkbaren, zukünftigen Entwicklungen wird eingegrenzt, indem mehrere Szenarien mit unterschiedlichen Annahmen erstellt und untereinander verglichen werden.[20] Dabei gibt es zwei verschiedene Szenariologiken, die vor allem in Klimaschutz- und Energieszenarien angewendet werden.

Bei indikativen Szenarien wird untersucht, wie festgelegte und einflussreiche technische Maßnahmen oder auch politische Instrumente sich auf ein Ziel wie z.B. die Senkung der Treibhausgasemissionen auswirken. Dabei gibt es keinen Zielwert für die Senkung der Treibhausgasemissionen.

Bei Zielszenarien wird ein zukünftiger Zielwert für ein Szenario festgelegt. Es werden technische Maßnahmen oder auch politische Instrumente untersucht, mit Hilfe derer das erklärte Ziel erreicht werden kann.[21]

In dieser Arbeit handelt es sich um die Untersuchung mehrerer Zielszenarien, bei denen vor allem die technisch nötigen Maßnahmen quantitativ ermittelt werden, die für eine Umstellung auf eine gänzlich erneuerbare Energieversorgung des Emslandes im Jahr 2040 nötig sind.

[18] Vgl. *Hesse, T./Bürger, V.,* 2016.
[19] Eine Reduzierung um 26 % von 2030 bis 2050 bedeutet eine Reduzierung von 13 % pro Dekade, woraus sich der interpolierte Wert von 56 % für 2040 ergibt.
[20] Vgl. *Kosow, H./Gaßner, R.,* 2008.
[21] Vgl. *Gerbert, P./Herhold, P.,* 2018.

2.3 Flächenbasierter Ansatz

Der flächenbasierte Ansatz beschreibt, dass eine Bewertung von Energieträgern anhand ihrer benötigten Fläche erfolgt. Ein Energieträger mit hoher Energiedichte braucht möglichst wenig Fläche und ist demnach der ideale Energielieferant.[22]

Fossile Energiequellen haben eine hohe Energiedichte und liegen meistens konzentriert unter der Erde, sodass für die Energiegewinnung wenig Fläche in Anspruch genommen wird. Erneuerbare Energien haben im Gegensatz dazu eine geringere Energiedichte und eine weiträumige Verteilung. Um diese Energieströme aufzufangen, werden große, meist dezentrale Flächen benötigt, die häufig auch anders genutzt werden können bzw. müssen, wodurch eine Flächenkonkurrenz entsteht. Eine Ausnahme bilden WKA, die auf landwirtschaftlich genutzten Flächen stehen können und somit nicht in Konkurrenz mit selbigen stehen. Bei einer Konkurrenz entscheidet der erzielbare Energieertrag pro Hektar und Jahr über die Möglichkeit zur Nutzung der Fläche. Anhand dieser Zielvereinbarung wird die energetische Nutzungsart der Flächen auch in den Szenarien dieser Arbeit bestimmt. Abbildung 2 zeigt den flächenbasierten, jährlichen Energieertrag erneuerbarer Energien.

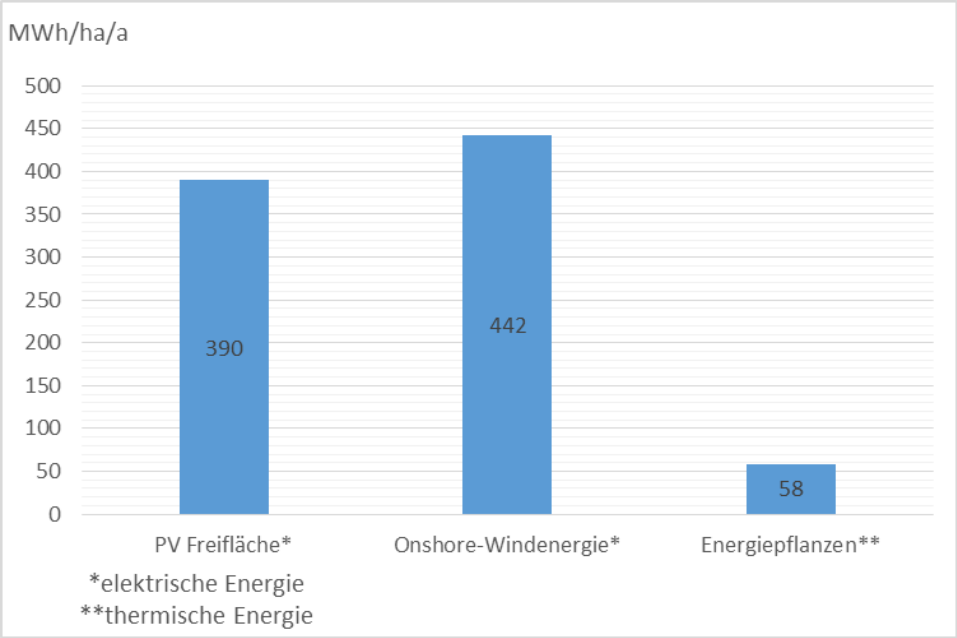

Abbildung 2: Flächenbasierter, jährlicher Energieertrag erneuerbarer Energien
Quelle: Eigene Darstellung.

Die in Deutschland durchschnittlich erzielbaren, flächenbasierten Energieerträge von Onshore-Windkraft und Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PVF) sind etwa 8 Mal

[22] Vgl. *Günther, M.*, 2015.

größer als die von biogenen Brennstoffen, wie in Abbildung 2 zu sehen ist. Sie liegen im Jahr 2016 bei etwa 400 MWh pro Hektar und Jahr, während Energiepflanzen z.B. jährlich etwa 50 MWh pro Hektar liefern, weshalb die Energieversorgung der Zukunft sich auch hauptsächlich auf diese Energieträger stützen wird.[23] Die Fläche für Windkraft ist dabei zusätzlich noch landwirtschaftlich nutzbar, was einen Vorteil gegenüber PVF darstellt.

2.4 Verursacherprinzip und Solidarprinzip

Der Energieverbrauch einer Region kann auf zwei Art und Weisen bestimmt werden. Beim Territorialprinzip wird der gesamte Energieverbrauch innerhalb des Gebietes bilanziert. Ein Nachteil von diesem Prinzip ist, dass, wenn sich die gegenwärtige Situation ändert und zum Beispiel ein großer Energieverbraucher wie ein Hochofen hinzukommt oder stillgelegt wird, sich auch der Verbrauch der Region ändert. Die Möglichkeit, dass sich die Anzahl wesentlicher Energieverbraucher im Emsland bis zum Jahr 2040 noch ändert, ist nicht ausgeschlossen.

Deshalb wird in dieser Arbeit das Verursacherprinzip angewendet. Sinngemäß sind die Verursacher des Energieverbrauchs die Einwohner des Emslandes und die Berechnung des gesamten Energieverbrauchs erfolgt über die Bildung des Produktes aus der Bevölkerungsgröße und des durchschnittlichen Pro-Kopf-Energieverbrauchs. Das Verbrauchsniveau ergibt sich aus dem Lebensstandard und beinhaltet deshalb nicht nur den Energieverbrauch im Wohn- und Mobilitätssektor, sondern beispielsweise auch den Verbrauch durch den Transport von Konsumgütern.

Ein ergänzend angewendetes Prinzip dabei ist das Solidarprinzip. Dieses Prinzip bedeutet, dass Gebiete ohne eigene Energieerzeugung von Gebieten mit überproportionaler Energieerzeugung mit versorgt werden. Besonders relevant ist dieses Prinzip bei einer Energieversorgung, die aus 100 % erneuerbaren Energien besteht, da in angrenzenden Ballungsräumen oft nicht genügend Fläche vorhanden ist, um Windkraft oder PV-Anlagen aufzustellen. Anwendung findet es heute schon bei der Versorgung mit Lebensmitteln, die ebenfalls hauptsächlich in ländlichen Räumen erzeugt werden. Für das Emsland ist demnach nicht die tatsächliche Bevölkerungszahl ausschlaggebend, sondern die Zahl, die sich aus dem Produkt der Bevölkerungsdichte in Deutschland und der Gebietsfläche des Emslandes ergibt.[24] Im Jahr

[23] Vgl. *Beck, H.-P./von Haaren, C.*, 2016.
[24] Vgl. *Beck, H.-P./von Haaren, C.*, 2016.

2016 bewohnten 82,52 Mio. Deutsche eine Fläche von 357.582 Quadratkilometern, was einer Bevölkerungsdichte von 231 Einwohnern pro Quadratkilometer gleichkommt.[25] [26]

Die Gebietsfläche des Emslandes beträgt 2.881 Quadratkilometer, sodass durch die Energieproduktion im Emsland insgesamt 665.511 Menschen versorgt werden müssen. Das entspricht mehr als dem doppelten Wert der tatsächlichen Bevölkerung von 321.391 Menschen im Jahr 2016.[27]

2.5 Simulationstool

Um die Energiewende auch regional voranzutreiben, ist eine Bestandsaufnahme der Region bezogen auf Energieverbrauch und erzielbare regenerative Energiemengen im ersten Schritt eine Grundvoraussetzung. Entsprechende Potenzialstudien können mit dem Simulationstool 100prosim erstellt werden. Das Tool basiert auf Microsoft Excel und beinhaltet verschiedene untereinander verknüpfte Tabellen, die je mehrere Arbeitsblätter umfassen. Es kann für beliebige Regionen angewendet werden und trifft Annahmen, die sich wiederum auf eine überschaubare Anzahl vergleichbarer Standardkennzahlen stützen. Das Tool verfügt über eine ausführliche Dokumentation bezüglich getroffener Annahmen, Herleitungen und Quellen, sodass auch tiefergehende Informationen nachvollzogen werden können. Ein Szenario kann verändert werden, indem Annahmen in Form von Tabellenwerten angepasst werden.

In Abbildung 3 ist der Aufbau des Simulationstools dargestellt. Die vier wichtigen Tabellen tragen die Abkürzungen „S“ für Szenariodokument, „WS“ für Wandlung des Stroms, „D“ für Datenmodell und „BS“ für Basisstrukturen. Dabei dienen Tabelle „S“ und „WS“ nur der Veranschaulichung bzw. der Übersicht, während die Tabellen „D“ und „BS“ für die Szenarioerstellung bearbeitet werden müssen.

[25] Vgl. *Statistisches Bundesamt,* 2018.
[26] Vgl. *Statistisches Bundesamt,* 2017.
[27] Vgl. *Landkreis Emsland,* 2017.

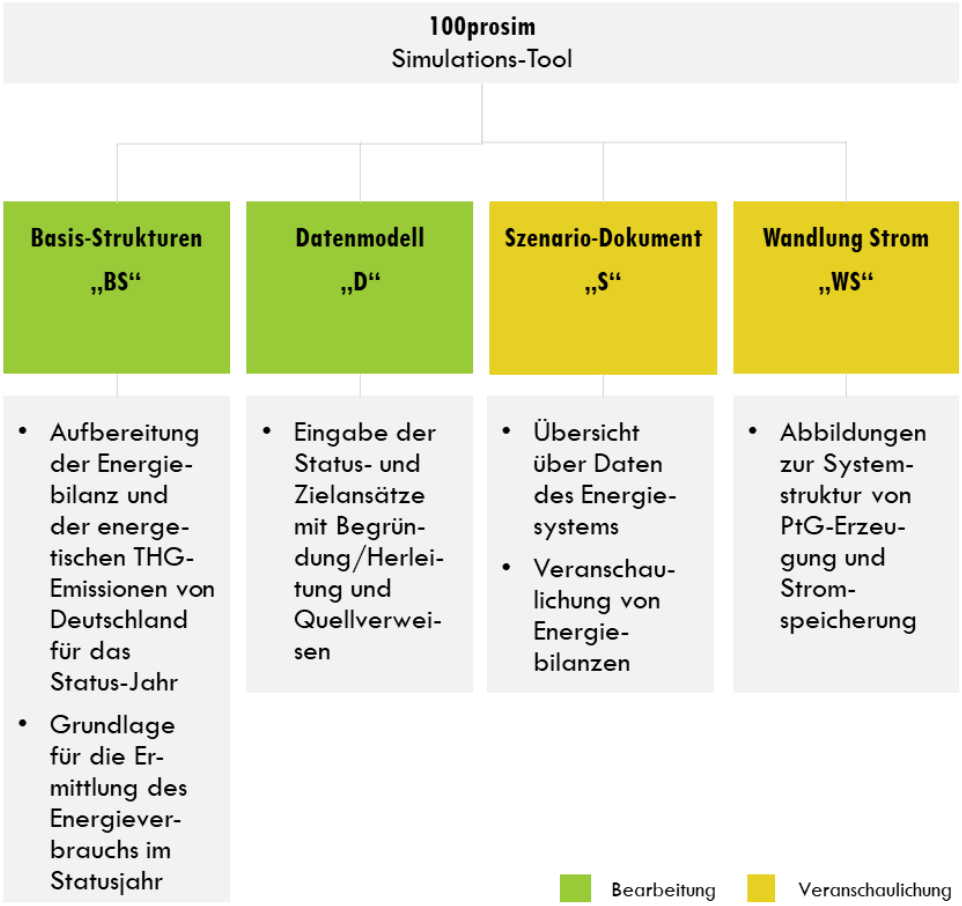

Abbildung 3: Aufbau des Simulationstools
Quelle: Eigene Darstellung.

Die als erstes zu bearbeitende Tabelle „BS“ enthält die Basisstrukturen des deutschen Energiesystems im Statusjahr, das in dieser Arbeit das Jahr 2016 ist. Dort werden die Energiebilanzen und die energetischen Treibhausgasemissionen von Deutschland für das Statusjahr aufgearbeitet. Dieses Tabellenblatt ist grundlegend, da bei der Berechnung des Energieverbrauchs der Region im Statusjahr auf die hier eingetragenen Werte zurückgegriffen wird.

Das Datenmodell in der Tabelle „D“ beinhaltet alle Parameter, die für die Berechnung der Energieerzeugung, der Energiespeicherung und des Energieverbrauchs sowohl für das Statusjahr 2016 als auch für das Zieljahr 2040 relevant sind. Wesentliche regionale Daten werden hier eingetragen. Demographische und wirtschaftliche Entwicklung wie auch alle Flächen der Region nach Nutzungsarten sind für die Kalkulation entscheidende Parameter. Ebenso enthalten sind alle für die Energieverbrauchssektoren spezifischen Kennzahlen, aus denen der Energieverbrauch abgeleitet werden kann. Alle Status- und Zielansätze werden mit einer Begründung oder Herleitung und Quellverweisen versehen.

In dem Szenariodokument „S“ findet sich eine Übersicht über die Daten des Energiesystems. Die Tabelle enthält vier Arbeitsblätter zu Flächen, zu den erneuerbaren Energieströmen, zum Bedarfsniveau und zum Verbrauch. Die Flächen werden nach Nutzungsform aufgelistet und direkt aus dem Datenmodell „D“ übernommen. Die solare Freifläche und die Windparkfläche, auf die sich im Zieljahr zu einem sehr großen Anteil die Energieversorgung stützt, werden von dem Tool berechnet, sodass der Energieverbrauch gedeckt werden kann. Im Arbeitsblatt „Erneuerbare“ werden alle regenerativen Energiemengen pro Jahr aus dem Datenmodell „D“ berechnet und am Ende summiert. Das Energiebedarfsniveau wird im nächsten Arbeitsblatt abgebildet. Die nach dem Solidar- oder Verursacherprinzip in „D“ berechnete Einwohnerzahl sowie der errechnete Energiebedarf pro Jahr nach Sektoren sind hier eingetragen. Der ermittelte Energieverbrauch ist im nächsten Arbeitsblatt eingetragen. Dieser wurde mit den im Datenmodell hinterlegten Parametern wie beispielsweise der durchschnittlichen Wohnfläche pro Person, die für den Gebäudewärmeverbrauch entscheidend ist, berechnet. Die übrigen Arbeitsblätter beinhalten im Wesentlichen übersichtliche Darstellungsformen und Tabellen zu Energiebilanzen.

In der Tabelle „WS“ ist ein übersichtliches Schaubild über die Systemstruktur von Power-to-Gas-Erzeugung (PtG)und Stromspeicherung dargestellt. Es ist zu erkennen, zu welchen Anteilen der Strom aus den verschiedenen erneuerbaren Energien in Langzeitstromspeichern und in Gasspeichern nach der Umwandlung zu Wasserstoff unter Berücksichtigung der jeweiligen Wirkungsgrade gespeichert wird. Die hier gezeigten Zusammenhänge entstammen ebenfalls dem Datenmodell „D“.[28]

2.6 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse ist ein mathematisches Instrument, das in vielen wirtschaftlichen und technischen Bereichen wie z.B. bei Investitionsrechnungen oder bei der Messtechnik zum Einsatz kommt. Sensitivität bedeutet in diesem Zusammenhang die Empfindlichkeit eines Ergebniswertes auf eine Änderung eines Ausgangswertes. Beispielsweise gibt es während der Planung von WKA bei der Berechnung der Wirtschaftlichkeit viele Einflussfaktoren, die die erzielbaren Einnahmen verändern können. Die Unsicherheiten bei den Windverhältnissen, der Einspeisevergütung oder auch bei den Betriebskosten sind oftmals hoch und können zum Erfolg bzw.

[28] Vgl. *Schmidt-Kanefendt, H-H.*, 2009.

Misserfolg eines Projektes beitragen.[29] Mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse kann überprüft werden, welcher der verschiedenen Parameter den größten Einfluss auf die Einnahmen hat.

In einem Energiesystem gibt es ebenfalls verschiedene Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch und die Energieerzeugung (vgl. Kapitel 3). Die Literatur ist sich nicht einig darüber, wie die Energieversorgung der Zukunft aussehen wird und wie sich der Energieverbrauch pro Kopf verändern wird. Es gibt verschiedene Prognosen zur Bevölkerungsentwicklung und zur wirtschaftlichen Entwicklung, die einen wesentlichen Einfluss auf den Energieverbrauch einer Region haben. Gleichzeitig herrscht Uneinigkeit darüber, welche Antriebssysteme sich im Verkehrssektor durchsetzen. Dies sind nur einige Beispiele für eine Reihe an Einflussfaktoren auf die Energieversorgung.

Durch die Veränderung einzelner Eingangsparameter bzw. Einflussfaktoren wird sich der Energieverbrauch unterschiedlich stark verändern. In dieser Arbeit soll herausgefunden werden, welches die größten Einflussfaktoren auf die Energieversorgung im Emsland sind.[30]

[29] Vgl. *Bundesverband WindEnergie,* 2018.
[30] Vgl. *Fuchs-Hanusch, D./Friedl, F./Zöggeler, A./Kainz, H.*, 2012.

3 Stand des Wissens

In diesem Kapitel wird der Stand des Wissens bezüglich zu erwartender Entwicklungen bei Energieerzeugung und -verbrauch im Emsland dargestellt.

3.1 Energieverbrauch

Der Energieverbrauchsentwicklung einer Region ist wesentlich von der wirtschaftlichen und demographischen Entwicklung, wie auch von technischen Effizienzsteigerungen abhängig. Die für die Solidarregion Emsland zu erwartenden Parameter zum Energieverbrauch werden im Folgenden diskutiert. Gesellschaftliche Entwicklungen, die z.B. aus einem gesteigerten Bewusstsein für den Klimawandel entstehen können, haben ebenfalls einen großen Einfluss, können jedoch nur teilweise berücksichtigt werden.[31]

3.1.1 Bevölkerungsentwicklung

Die Einwohnerzahl steht in direktem Zusammenhang mit dem Energieverbrauch und wird nachfolgend ermittelt. In den letzten Jahrzehnten verzeichnete das Emsland eine kontinuierliche Bevölkerungszunahme, die in den letzten Jahren allerdings rückläufig ist. In Abbildung 4 sind verschiedene Schätzungen zur zukünftigen Bevölkerungsentwicklung abgebildet, die von einer stagnierenden Entwicklung bis zu einer deutlich steigenden Entwicklung unterschiedliche Ergebnisse zeigen.

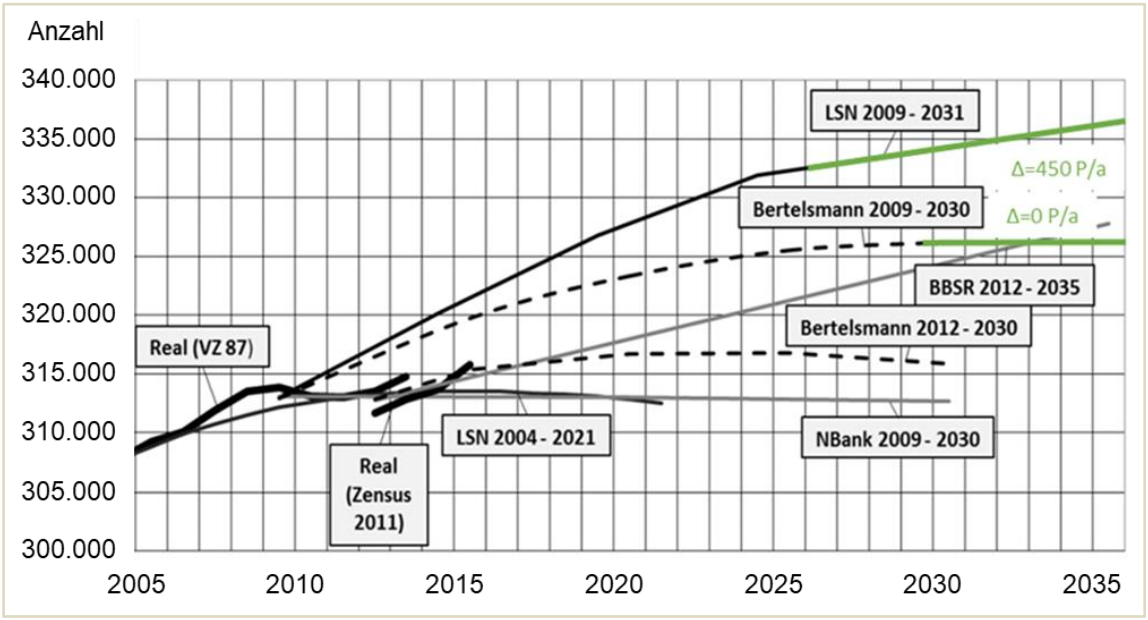

Abbildung 4: Prognosen zur Bevölkerungsentwicklung im Emsland [32]

[31] Vgl. *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit,* 2018.
[32] Vgl. *Landkreis Emsland*, 2016.

Die Studien beziehen sich alle näherungsweise auf die gleichen Basisjahre von 2006 bis 2010 und beleuchten den Zeitraum bis etwa 2030. Die unterschiedlichen Ergebnisse beruhen auf unterschiedlichen Annahmen bezüglich einer schwer vorauszusehenden Entwicklung bei Wanderungsbewegungen. Die zuletzt starken Gewinne durch Flüchtlingsströme könnten sich bei einer Entspannung der Situation in den Herkunftsländern der Geflüchteten kurz- oder mittelfristig in erhebliche Verluste umkehren. Deshalb ist es am sinnvollsten, für die Bevölkerungsentwicklung eine Bandbreite vom minimalen zum maximalen Schätzwert anzunehmen.[33]

Am 31.12.2016 lebten im Emsland 321.391 Menschen.[34] Am ehesten spiegeln diesen Wert die Studien LSN 2009 – 2031 und Bertelsmann 2009 – 2030 wieder. Deshalb werden nur diese beiden Bevölkerungsentwicklungen berücksichtigt. Näherungsweise wird der maximale Wert für 2040 von LSN 2009 – 2031 mit einer Weiterführung der ab dem Jahr 2025 anhaltenden konstanten Steigung von etwa 450 Menschen pro Jahr entsprechend der grünen Linie bestimmt. Bei Annahme der kontinuierlichen Zunahme wird im Jahr 2040 eine Einwohnerzahl von maximal 338.600 Menschen erreicht.[35] Das entspricht etwa einer Steigerung von insgesamt 5,4 %. Minimal stagniert die Bevölkerungszunahme gemäß Bertelsmann 2009 – 2030 ab 2030, sodass 2040 etwa 326.000 Menschen im Emsland leben werden, was einer Steigerung von 1,4 % entspricht.[36]

Die aktuellste Prognose für die Bevölkerungsentwicklung in Deutschland hat ergeben, dass die Bevölkerung von 2016 bis 2040 um 2,2 % sinkt.[37] [38] Deshalb wird dieser Wert als Untergrenze angenommen. Nach dem Solidaritätsprinzip müssen aber wie in Kapitel 2.4 beschrieben 665.511 Menschen versorgt werden. Vereinfachend wird angenommen, dass die Prognosen zur Bevölkerungsentwicklung des Emslandes als auch die deutschlandweite Prognose für den Solidaritätsraum gelten. Entsprechend müssen bis zum Jahr 2040 bei 2,2 prozentiger Abnahme minimal 650.870 Personen und maximal bei einer Zunahme von 5,4 % 701.449 Personen mit Energie versorgt werden. Der Mittelwert beider Werte beträgt 676.160 Personen.

[33] Vgl. *Landkreis Emsland,* 2016.
[34] Vgl. *Landkreis Emsland,* 2017.
[35] Bevölkerung (2040) = Bevölkerung (2032)+450 P/a·8 a = 335.000 P+3.600 P = 338.600 P
[36] Vgl. *Landkreis Emsland*, 2016.
[37] Vgl. *Statistisches Bundesamt*, 2019. (Bevölkerungsstand 2040: 80,7 Mio.)
[38] Vgl. *Statistisches Bundesamt*, 2018. (Bevölkerungsstand 2016: 82,52 Mio.)

Stark unterdurchschnittliche Lebenshaltungskosten, eine sehr hohe Eigenheimquote und zahlreiche Angebote für Betreuung und Bildung machen das Emsland als Wohnort attraktiv.[39]

3.1.2 Wirtschaftliche Entwicklung

Im Jahr 2016 betrug das Bruttoinlandsprodukt im Emsland je Einwohner 39.610 €.[40] Das Bruttoinlandsprodukt (BIP) beschreibt die Wirtschaftsleistung eines Volkes und steht in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Energiebedarf. Es beziffert den innerhalb eines Jahres in Form von Waren und Dienstleistungen hergestellten Gesamtwert einer Volkswirtschaft. Sofern das BIP pro Kopf steigt, nimmt der Energiebedarf ebenfalls zu, da mehr produziert wird. Für die Entwicklung des BIP in Deutschland ist gemäß der Literatur eine jährliche Steigerung zwischen 0,7 und 1,2 % anzunehmen.[41] [42] Für beide Extremfälle wird die Wachstumsrate des BIP pro Kopf mit Annahme einer durchschnittlichen Bevölkerungszunahme entsprechend Kapitel 3.1.1 nachfolgend berechnet.

Die Wachstumsrate des BIP pro Kopf beträgt bei kleiner Steigerung 0,63 %.[43] Bei größerer jährlicher Steigerung des BIP von 1,2 % ist ein maximaler Energieverbrauch zu erwarten. Die Wachstumsrate des BIP pro Kopf beträgt in diesem Fall 1,13 %.[44] Im Mittel ist demnach eine Wachstumsrate von 0,88 % zu erwarten.

In Deutschland sinkt der Primärenergieverbrauch jedoch seit einigen Jahren, wobei gleichzeitig das BIP steigt. Eine gänzliche Entkoppelung ist aber nicht für wahrscheinlich zu halten, sodass ein steigendes BIP wie gehabt einen evtl. geringeren Anstieg des Primärenergiebedarfs verursachen würde.[45]

Der Anteil von Dienstleistungen am BIP lag im Emsland im Jahr 2016 bei 63,9 %, gemessen an der Anzahl der Beschäftigten im Dienstleistungssektor zur Anzahl aller Beschäftigten.[46] Produktbezogene Dienstleistungen werden zukünftig aufgrund der Digitalisierung zunehmen. Sharing-Angebote, bei denen z.B. die Dienstleistung

[39] Vgl. *Landkreis Emsland*, 2018.
[40] Vgl. *komsis*, 2018.
[41] Vgl. *Walter, A./Wiehe, J.,* 2018.
[42] Vgl. *Maier, M.,* 2019.
[43] $\sqrt[24]{((1{,}007^{24}/676.160)/(1/665.511))} = 0{,}63\%$
[44] $\sqrt[24]{((1{,}012^{24}/676.160)/(1/665.511))} = 1{,}13\%$
[45] Vgl. *Statistisches Bundesamt,* 2019.
[46] Vgl. *Landkreis Emsland*, 2017.

Mobilität statt eines Autos gekauft wird, werden in vielen Bereichen den Erwerb eines Produktes eindämmen. Insgesamt ist also anzunehmen, dass der Dienstleistungsanteil am BIP bis zum Jahr 2040 leicht zunimmt. Er wird mit 70 % angenommen.[47]

Der Dienstleistungsbereich wird auf 132 % und der Industriebereich auf 126 % des jeweiligen Wertes aus dem Jahr 2016 wachsen.[48]

3.1.3 KLIK

Die Abkürzung KLIK steht für Kraft, Licht, Informations- und Kommunikationstechnologien und Kälte und umfasst damit einen Energieverbrauchssektor, der alle Stromanwendungen, ausgenommen Elektrowärme und strombedürftige Mobilitätsanwendungen, beinhaltet.

Der Energieverbrauch im Sektor KLIK lässt sich berechnen aus dem theoretischen Energiebedarf abzüglich zu erwartender Effizienzsteigerungen bis zum Jahr 2040. Effizienzsteigerungen lassen sich vor allem bei elektrischen Systemen und Anwendungen erreichen.

Klassische, strombetriebene Haushaltsgeräte unterliegen schon jetzt auf europäischer Ebene immer strenger werdenden Effizienzanforderungen.[49] Hier sind als Beispiel die Ökodesign-Richtlinie oder auch die Energie-Label-Verordnung zu nennen. Erstere stellt Ansprüche an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte. Die Festlegung immer höherer Mindesteffizienzstandards war schon im Bereich Beleuchtung erfolgreich, in dem der Verkauf ineffizienter Glühlampen verboten wurde und der Einsatz von LED-Technik mit optimaler Lichtausbeute bei geringem Stromverbrauch statt ineffizienter Halogenlampen gefördert wird.[50] Die Energie-Label-Verordnung vereinfacht es Verbrauchern, die Energieeffizienz von Produkten zu vergleichen, indem eine Datenbank erstellt werden soll, die Produkte nach ihrer Energieeffizienz anordnet. Dadurch wird der Verbraucher angehalten, sich für den Kauf eines effizienteren Produktes zu entscheiden.[51] Außerdem werden der Industrie durch das KfW-Energieeffizienzprogramm

[47] Vgl. *Neugebauer, R.,* 2018.
[48] Vgl. *Walter, A./Wiehe, J.,* 2018.
[49] Vgl. *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit*, 2019.
[50] Vgl. *Umweltbundesamt*, 2016.
[51] Vgl. *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie*, 2017.

zinsgünstige Darlehen für Investitionen in Maßnahmen zur Effizienzsteigerung angeboten.[52]

Ein weiterer wichtiger Faktor bei der Effizienzsteigerung elektrischer Gesamtsysteme ist das Internet der Dinge. Es beschreibt eine Kommunikation zwischen diversen Technologien und Einzelkomponenten, die eine effiziente Betriebsweise, die durch manuelle Bedienung nicht erreicht werden kann, ermöglicht. Die Digitalisierung sowie der Einzug von künstlicher Intelligenz dürften darüber hinaus ebenso zu Effizienzsteigerungen im Haushalt und in der Industrie führen.[53]

Effizienzsteigerungen führen jedoch nur zu einem geringeren Energieverbrauch, wenn ein gleichbleibendes oder sogar verringertes Konsumverhalten realisiert wird. Einsparungen durch geringere Stromkosten und Effizienzsteigerungen können aber auch den gegenteiligen Effekt auslösen, bei dem es zu einer Nachfragesteigerung kommt, die unter Umständen die Effizienzbemühungen überkompensiert. Dieser Effekt wird auch Rebound-Effekt genannt. In der heutigen Konsumgesellschaft ist es denkbar, dass eingespartes Geld wieder für strombetriebene Konsumgüter wie z.B. einen zweiten Fernseher ausgegeben wird, wodurch insgesamt nicht weniger Strom verbraucht wird. Der Rebound-Effekt ist also ein Unsicherheitsfaktor, der bei Prognosen zum Energieverbrauch im Sektor KLIK berücksichtigt werden muss.

Das Konzept der Suffizienz eignet sich, um dem Rebound-Effekt entgegenzuwirken. Dabei geht es um die gesellschaftliche Frage, was genug ist und wofür und in welchem Umfang Ressourcen und Energie eingesetzt werden sollten, sodass die Umwelt minimal belastet wird. Ein maßvoller Verbrauch und kein überschwänglicher Konsum von Waren und Dienstleistungen oder sogar Konsumverzicht erfordern jedoch ein gesellschaftliches Umdenken und sind bevölkerungsweit nicht zu erwarten. Darüber hinaus kann weniger Konsum zu sinkenden Beschäftigungszahlen und insgesamt zu einem geringeren Lebensstandard führen, was von der Politik nicht gewünscht ist.[54]

[52] Vgl. *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie*, 2016.
[53] Vgl. *Andelfinger, V. P./ Hänisch, T.*, 2015.
[54] Vgl. *Behrendt, S./Göll, E./ Korte, F.*, 2018.

Insgesamt wird für die Stromverbrauchsreduktion bis 2040 im Industrie- und Dienstleistungsbereich eine Reduktion auf 65 bis 75 % des Wertes des Statusjahres und in den Haushalten auf 70 bis 80 % festgelegt.[55]

3.1.4 Gebäudewärme

Wärme mit geringeren Temperaturen als 100 °C wird als Gebäudewärme bezeichnet. Der Energieverbrauch für Gebäudewärme im Jahr 2040 wird in 100prosim über den theoretischen Energiebedarf berechnet. Dieser wird aus der Wohnfläche abgeleitet, die den Gebäudewärmeverbrauch im Privatbereich liefert und aus der Erwerbstätigkeit, die den Verbrauch in der Industrie und dem Dienstleistungssektor liefert.

Die Wohnfläche pro Person im Emsland befindet sich seit 2014 mit 52,2 – 53,1 m^2 bezogen auf Einheitsgemeinden und Städte bis 2017 mit 53,3 m^2 auf einem gleichbleibenden Niveau.[56] [57] Der Mittelwert beträgt 52,8 m^2 und wird für das Statusjahr übernommen. Interessant ist, dass der Wert damit deutlich über dem deutschen Durchschnitt liegt, der im Jahr 2016 46,3 m^2 betrug.[58] Die Entwicklung der Wohnfläche wird in der Literatur als steigend angenommen. Ein Vergleich verschiedener Prognosen zur Wohnflächenentwicklung hat ergeben, dass bis zum Jahr 2040 eine Steigerung der Pro-Kopf-Wohnfläche von 9 bis 14 % erwartet wird.[59] Damit würde die Pro-Kopf-Wohnfläche im Emsland im Jahr 2040 zwischen 57,6 und 60,2 m^2 betragen.

Wegen des demografischen Wandels und des nachfolgend erläuterten Kohorteneffekts kann auch in Zukunft davon ausgegangen werden, dass die Pro-Kopf-Wohnfläche weiter steigt. Das Einkommen Erwerbstätiger steigt mit zunehmendem Alter, sodass mehr Geld in eine größere Wohnfläche oder in ein Eigenheim für die Familie investiert werden kann. Nach einem Auszug oder Tod eines Familienmitgliedes wird der freigewordene Wohnraum meistens durch die Hinterbliebenen genutzt.[60] Ein Seniorenhaushalt bewohnt heute durchschnittlich eine etwa doppelt so große Wohnung wie eine Familie mit Kindern.[61]

[55] Vgl. *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie*, 2016.
[56] Vgl. *Landkreis Emsland,* 2016.
[57] Vgl. *Der Bundeswahlleiter,* 2019.
[58] Vgl. *Umweltbundesamt,* 2018.
[59] Vgl. *Hesse, T./Bürger, V.,* 2016.
[60] Vgl. *Deschermeier, P./Henger, R., 2015.*
[61] Vgl. *Statistisches Bundesamt*, 2014.

Aus der Erwerbstätigkeit lässt sich auf den Gebäudewärmebedarf im Industrie- und Dienstleistungssektor schließen. Die Zahl der Erwerbstätigen wird in Zukunft durch Zuwanderung und das spätere Renteneintrittsalter steigen und gleichzeitig durch den demographischen Wandel sinken. Prognosen über die Zuwanderung im Emsland gibt es jedoch nicht. Erwerbstätigkeiten werden verstärkt im Homeoffice stattfinden, wodurch der Gebäudewärmebedarf im Industrie- und Dienstleistungssektor sinkt und dafür im Wohngebäudesektor steigt. Die gesuchten Arbeitskräfte werden aufgrund der Digitalisierung, Automatisierung und des Einsatzes von künstlicher Intelligenz und Robotik in geringerem Umfang einfachen Tätigkeiten nachgehen und dafür eher hoch qualifiziert sein. Die Zahl der Erwerbstätigen wird im Jahr 2040 in Folge der geschilderten Umstände auf 94 % im Vergleich zum Statusjahr fallen.[62]

Die Gebäudewärme wird in 100prosim in Raumwärme und Warmwasser unterteilt. Der Energieverbrauch für Raumwärme hängt wesentlich von dem Zustand des Gebäudes und ganzheitlich somit von der Sanierungsrate ab. Der Energieverbrauch für Warmwasser wird hauptsächlich durch Effizienzsteigerungen bei Technik und Anwendungen bestimmt.

Die jährliche Sanierungsrate wird bis zum Jahr 2040 in verschiedenen unterschiedlich ambitionierten Prognosen auf etwa 1,4 bis 2,7 % geschätzt.[63] Derzeit befindet sich die Sanierungsrate bei jährlich etwa 1 %. Je geringer die Sanierungsrate ist, desto höher muss der Anteil erneuerbarer Energien bei der Wärmeerzeugung sein, um möglichst emissionsfrei zu heizen. Eine Sanierung von 1,4 % jährlich reicht unter der Voraussetzung aus, dass die Wärmeversorgung sehr technologieoffen erfolgen kann. Regenerativer Strom für Wärmepumpen aber auch ein erheblicher Anteil gasförmiger und flüssiger Brennstoffe, die ebenfalls mit Power-to-X-Technologien (PtX) regenerativ erzeugt werden, müsste zum Einsatz kommen, um Emissionsausstoß zu verhindern. Das ist aufwändiger und kann vermutlich nur durch Importe erreicht werden. Bei einer Sanierungsrate von 2 % reicht eine rein elektrifizierte Wärmeversorgung mit Wärmepumpen aus. Eine Sanierungsrate von jährlich 2,7 % würde bedeuten, dass der komplette Gebäudebestand inklusive der Restriktionen unterworfenen Gebäude, die nicht saniert werden können, bis 2050 optimal gedämmt ist. Eine Sanierungsrate von 2,4 %, bei der alle möglichen Gebäude saniert

[62] Vgl. *Fuchs, J./Kubis, A./Schneider, L., 2015.*
[63] Vgl. *Hesse, T./Bürger, V.,* 2016.

werden, beziffert den höchstmöglichen Wert.[64] Die Sanierung von Gebäuden kann aber nicht willkürlich geschehen, sondern ist einigen Regularien unterworfen, die eine technische Modernisierung auf einen bestmöglichen Wärmeschutzstandard nicht überall erlauben. Beispielsweise gibt es für Gebäude, die unter Denkmalschutz stehen und schützenswerte Fassaden besitzen, eine Dämmrestriktion. Neben ordnungsrechtlichen Restriktionen gibt es auch konstruktiv oder bauphysikalisch bedingte Dämmrestriktionen.[65] Die Bandbreite für die angenommene Sanierungsrate reicht von mindestens 1,4 bis maximal 2,4 %.

Der Raumwärmebedarf kann nicht nur durch Sanierungen reduziert werden, sondern auch durch den Einsatz effizienterer Energieverbrauchsgeräte und Heizsysteme. Dadurch kann insgesamt eine Verringerung des Endenergieverbrauchs auf 80 bis 45 kWh/m^2 bis zum Jahr 2040 erreicht werden, während im Jahr 2016 der Raumwärmebedarf noch bei 125 kWh/m^2 lag.[66]

Bei der Warmwasserzubereitung kann der Endenergieverbrauch durch einige Effizienzmaßnahmen um ca. 14 % gesenkt werden.[67]

Der Energieverbrauch in diesem Sektor berechnet sich mit den beschriebenen Parametern und kann in die Energieformen Wärme, Strom für den Betrieb von Wärmepumpen und biogene Brennstoffe unterteilt werden. Biogene Brennstoffe haben aufgrund ihrer begrenzten Anbaufläche ein eingeschränktes Potenzial, sodass eine Verwendung abgewägt werden muss. Eine Verwendung in einem Sektor schränkt die Verwendung in einem anderen Sektor ein. Im Sektor Gebäudewärmeerzeugung ist insgesamt ein geringer Anteil der Endenergie aus biogenen Brennstoffen zu erwarten, da es gute Alternativen gibt. Die Nutzung von Solarthermie und Umgebungswärme hat den Vorteil, dass sie als Energiequellen das gewünschte Niedertemperaturniveau bis 100 °C liefern können und die Verwendung nicht zu einer eingeschränkten Verwendung in anderen Sektoren führt.

Auf die Nutzung von biogenen Brennstoffen zur Gebäudeheizung kann jedoch nicht gänzlich verzichtet werden, da ein geringer Gebäudestand, zu dem z.B. auch denk-

[64] Vgl.: *Deutsche Energie-Agentur GmbH*, 2017.
[65] Vgl.: *Mellwig, P.*, 2012.
[66] Vgl. *Hesse, T./Bürger, V.,* 2016.
[67] Vgl. *Walter, A./Wiehe, J.,* 2018.

malgeschützte Gebäude gehören, aus rechtlichen Gründen über eine Brennstoffheizung verfügen müssen. Für die Szenarien wird der Anteil biogener Brennstoffe zur Gebäudeheizung vereinfachend trotzdem auf 0 % festgelegt.

Neben einer eigenen Wärmeversorgung gibt es auch die Möglichkeit einer Wärmeversorgung über Wärmenetze, mit denen Niedertemperaturwärme in dicht besiedelten Gebieten verteilt werden kann. Hierzu gibt es im Emsland auch einige Konzepte wie z.B. im Bioenergiedorf Heede.[68] In der vorliegenden Arbeit werden jedoch nur die Energieerzeugung und der Energieverbrauch betrachtet, nicht aber die Energieverteilung.

3.1.5 Prozesswärme

Bei Wärme mit Temperaturen oberhalb von 100 °C handelt es sich um Prozesswärme. Der Energieverbrauch im Jahr 2040 kann durch die Annahme des zukünftigen Produktionsvolumens berechnet werden, da Prozesswärme vor allem im Industriesektor genutzt wird. Zu erwartende Effizienzsteigerungen bei thermischen Anwendungen vermindern den Energieverbrauch und müssen ebenfalls abgeschätzt werden.

Die Erzeugung von Prozesswärme mit Öfen, die mehrheitlich mit Brennstoffen betrieben werden und einen hohen Wärmeverlust durch die entstehenden Abgase aufweisen, ist ineffizient. Deutlich geringere Verluste haben elektrische Heizungen.[69] Unternehmen ab einer bestimmten Größe sind beispielsweise durch ein Energieaudit, das alle vier Jahre wiederholt werden muss, angehalten, Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung und zur Reduzierung der Energiekosten umzusetzen.[70] Die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen in der Industrie wird darüber hinaus auch noch durch die Vergabe zinsgünstiger Darlehen politisch gefördert.[71]

Deswegen ist davon auszugehen, dass der Prozesswärmeverbrauch in der Industrie reduziert wird. In Haushalten sind die Anreize für mehr Effizienz in diesem Bereich geringer, sodass hier ein geringerer Effekt zu erwarten ist. Es wird angenommen, dass der Prozesswärmeverbrauch in der Industrie im Jahr 2040 auf 83 % des Wertes im Statusjahr und im Bereich Haushalt auf respektive 86 % sinkt.

[68] Vgl. *Das Emsland*, 2014.
[69] Vgl. *Walter, A./Wiehe, J.,* 2018.
[70] Vgl. *Bundesministerium für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle*, 2016.
[71] Vgl. *Bundesministerium für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle*, 2019.

Die wirtschaftliche Entwicklung beeinflusst den Prozesswärmeverbrauch direkt, da bei einem größeren Produktionsvolumen mehr Prozesswärme benötigt wird.[72] Die für das Emsland angenommene Entwicklung auf 126 % wird dementsprechend den Prozesswärmeverbrauch erhöhen.

Parallel zur Gebäudewärme lässt sich Prozesswärme durch den Einsatz von Strom, Wärme und Brennstoffen erzeugen. Diese Energiequellen sind jedoch unterschiedlich gut geeignet für das geforderte Temperaturniveau von häufig über 500 bis über 1000 °C. Die Prozesswärmeerzeugung bis 140 °C kann am effizientesten durch elektrische Wärmepumpen erfolgen, während für Prozesswärme über 200 °C nur Verbrennungsprozesse mit biogenen Brennstoffen infrage kommen. Für ca. 60 % der industriellen Prozesswärme werden Temperaturen von mehr als 200 °C benötigt.[73] Solarthermie, Tiefengeothermie oder Umgebungswärme können das geforderte Temperaturniveau nicht erreichen und werden ausschließlich bei der Gebäudewärme eingesetzt.[74]

Eine verminderte Rolle bei der Prozesswärmeerzeugung wird der Strom einnehmen. Diese Art der Erzeugung dient eher zur Flexibilisierung und kann genutzt werden, wenn zu viel Strom durch erneuerbare Energien erzeugt wird, der z.B. durch Netzengpässe nicht zum Verbraucher gelangen kann.[75]

3.1.6 Mobilität

Der Energieverbrauch im Verkehrssektor im Jahr 2040 wird durch 100prosim berechnet, indem Verkehrsleistung, Antriebsarten und deren Wirkungsgrade berücksichtigt werden. Das Simulationstool schließt dabei den Personen- und Güterverkehr am Boden und in der Luft ein. Es wird dabei nicht erfasst, zu welchem Anteil der Verkehr privat oder öffentlich ist und welche Fortbewegungsmittel im Einzelnen genutzt werden.

Um in Zukunft die Dekarbonisierung des Verkehrssektors herbeizuführen, muss der Verkehr vermindert, verlagert und verbessert werden. Die Verlagerung des Personenverkehrs auf Schienen und der Verzicht auf den motorisierten Individualverkehr zu Gunsten von öffentlichen Verkehrsmitteln oder des Fahrrad- und Fußverkehrs

[72] Vgl. *Gerbert, P./Herhold, P.,* 2018.
[73] Vgl. *Agora Verkehrswende*, 2018.
[74] Vgl. *Walter, A./Wiehe, J.,* 2018.
[75] Vgl. *Hülsken, C.,* 2017.

sind dafür notwendige Maßnahmen.[76] Dafür muss ein gesellschaftliches Umdenken stattfinden, aber auch politisch die Richtung vorgegeben werden. Um die Innenstädte von motorisiertem Verkehr zu befreien, können zukünftig Parkplätze verknappt und autofreie Räume geschaffen werden. Im Gegenzug muss der Umstieg auf öffentliche Verkehrsmittel attraktiver gemacht werden, sodass kein Nachteil bei der Nutzung für den Verbraucher entsteht. Dazu muss der ÖPNV flexibler, zuverlässiger, weiträumiger und enger getaktet werden.[77] In Zukunft wird das autonome Fahren vermutlich technisch ausgereift und im öffentlichen Verkehr einsatzbereit sein, sodass der Personenverkehr in einem aufeinander abgestimmten System maximal effizient abläuft. Bis zum Zieljahr wird das autonome Fahren aber eher eine ergänzende Option der Beförderung darstellen.[78] In Städten findet der Individualverkehr zukünftig optimaler Weise hauptsächlich mit dem Fahrrad, zu Fuß oder mit elektrisch angetriebenen Untersätzen statt.[79] Das Emsland ist jedoch eine eher ländlich geprägte Region, wo Menschen häufig auf ein eigenes Kraftfahrzeug angewiesen sind, um z.B. zur Arbeit zu kommen. So kamen im Jahr 2016 auf 321.391 Menschen etwa 225.000 zugelassene Fahrzeuge, wobei der Fahrzeugbestand, ähnlich wie die Bevölkerung, seit 1980 mit etwa 115.000 zugelassenen Fahrzeugen stetig zugenommen hat.[80] Von den zugelassenen Fahrzeugen sind 184 reine Elektroautos. Ein direkter Zusammenhang zwischen Bevölkerungswachstum und Verkehrsleistung ist gegeben und wohl auch in Zukunft zu erwarten.

Verschiedene Studien haben in Prognosen für die Entwicklung der Personenverkehrsleistung ebenfalls eine Verknüpfung zwischen Bevölkerungsentwicklung und Verkehrsleistung statiert.[81]

Der Verkehrsaufwand des motorisierten Individualverkehrs (MIV) wird bei einer für Deutschland angenommenen Bevölkerungsabnahme von etwa 10 % bis 2050 gegenüber 2010 höchstens gleichbleiben oder entsprechend der Bevölkerungsabnahme um 10 % sinken. Der Verkehrsaufwand pro Kopf bleibt im Emsland also mindestens konstant oder steigt um 11,1 % bis zum Jahr 2050 in insgesamt 40 Jah-

[76] Vgl. *Umweltbundesamt,* 2016.
[77] Vgl. *Nationale Plattform Zukunft der Mobilität*, 2019.
[78] Vgl. *Esser, K./Kurte, J.*, 2018.
[79] Vgl. *Nitsch, J.,* 2018.
[80] Vgl. *Landkreis Emsland*, 2017.
[81] Vgl. *Erhard, Johannes*, 2014.

ren. Eine gleichbleibende Verkehrsleistung bei 10 prozentiger Bevölkerungsabnahme ist gleichzusetzen mit einer um 11,1 % gesteigerten Verkehrsleistung bei stagnierender Einwohnerzahl. Ausgehend davon, dass der Verkehrsaufwand pro Kopf sich linear über die Zeit erhöht, ist im für diese Arbeit relevanten Zeitraum von 24 Jahren von 2016 bis 2040 höchstens eine Steigerung um 6,7 % auf 106,7 % oder mindestens eine Stagnation zu erwarten.[82]

Die Güterverkehrsleistung wird vermutlich weiter zunehmen, da das BIP steigt und allgemein eine klare Entwicklung hin zum Onlinehandel besteht, die in Zukunft ähnlich bleiben wird. Der Güterverkehr schließt bei 100prosim den Gütertransport auf Straßen, Schienen und Binnenschiffen ein. Der Literatur ist zu entnehmen, dass eine Steigerung des Güterverkehrs auf 122 % bis zum Jahr 2040 anzunehmen ist.[83] [84]

Der Luftverkehr hat große Bedeutung für weite Strecken und das Verkehrsaufkommen hat sich in diesem Bereich stetig gesteigert. Anders als bei dem Verkehr auf dem Boden ist eine Elektrifizierung des Luftverkehrs aufgrund des Entwicklungsstandes der Batterietechnik und der Masse eines Flugzeugs nicht wahrscheinlich, sodass weiterhin Brennstoffe als Kraftstoff benötigt werden. Trotz der Annahme, dass immer mehr Inlandsflüge auf die Schienen verlegt werden, ist davon auszugehen, dass die Luftverkehrsleistung bis zum Jahr 2040 entsprechend der Personenverkehrsleistung gegenüber dem Statusjahr steigt.[85] [86] Effizienzmaßnahmen bei den Antrieben der Flugzeuge werden den Kraftstoffverbrauch auf 80,2 % bis 2040 senken.[87]

Zukünftig ist grundsätzlich ein Antrieb der Verkehrsmittel rein elektrisch, mit Verbrennungsmotoren, die biogene Kraftstoffe verbrennen, oder mit Wasserstoff und Sauerstoff in Brennstoffzellen denkbar. Der Wirkungsgrad von Elektromotoren liegt bei ca. 90 %, von Brennstoffzellen bei ca. 62 % und bei Verbrennungsmotoren bei etwa 35 %. Bei Verbrennungsmotoren sind kaum noch Effizienzverbesserungen zu erwarten, da ihre gesamte Entwicklungszeit schon so lang andauert. Elektromoto-

[82] Vgl. *Blanck, R./ Zimmer, W.*, 2016.
[83] Vgl. *Umweltbundesamt,* 2016.
[84] Vgl. *Blanck, R./ Zimmer, W.*, 2016.
[85] Vgl. *Umweltbundesamt,* 2016.
[86] Vgl. *Kasten, P./Mottschall, M.,* 2016.
[87] Vgl. *Wagner, U.,* 2009.

ren haben mit 90 % schon einen sehr guten Wirkungsgrad, während die Brennstoffzelle noch nicht lange und erst in wenigen Autos als Antrieb eingesetzt wird. Hier sind die größten Effizienzsteigerungen zu erwarten. [88] Hybridantriebe werden von 100prosim nicht erfasst. Welche Antriebsart sich in Zukunft durchsetzt, ist noch nicht abzusehen. Es gibt aktuell deutlich mehr Ladestationen für Fahrzeuge mit Elektroantrieb (16.330) als Wasserstofftankstellen in Deutschland (74).[89] [90]

An dieser Stelle sollen kurz wesentliche Vor- und Nachteile von Batteriefahrzeugen, kurz BEV für Battery Electric Vehicle, und Brennstoffzellenfahrzeugen, kurz FCEV für Fuel Cell Electric Vehicle, diskutiert werden, um begründet zu entscheiden, welche Antriebsart im Jahr 2040 wie stark vertreten sein wird. Beide Technologien sind lokal emissionsfrei und können erneuerbar erzeugten Strom für den Antrieb nutzen. Sie unterstützen damit die Dekarbonisierung des Verkehrssektors und fördern den Umweltschutz. Da FCEV sich einen Anteil ihrer Technik mit der der herkömmlichen Verbrennungsmotoren teilen und die Herstellung, Speicherung und Umwandlung von Wasserstoff Geschäftsfelder darstellen, kann diese Technik einen großen Teil der Wertschöpfung in Deutschland darstellen. Der Tankvorgang dauert bei einem FCEV nur 3 bis 5 Minuten, während eine Aufladung auf 80 % der Batteriekapazität bei einem Batteriefahrzeug mindestens 20 Minuten und bei geringer Ladeleistung sogar mehrere Stunden in Anspruch nehmen kann. Die Anpassung der Tank- bzw. Ladeinfrastruktur ist eine Voraussetzung für die Implementierung beider Technologien. Heutige Tankstellen können für die Umstellung auf Wasserstoff erweitert werden, sodass die bestehende Struktur genutzt werden kann. Der Ladevorgang dauert bei Batteriefahrzeugen deutlich länger, was dazu führt, dass gegenüber der Wasserstofftechnik deutlich mehr Ladesäulen zur Verfügung stehen müssen, wenn viele Fahrzeuge gleichzeitig betankt werden sollen. Die Ladesysteme für FCEV sind außerdem weltweit einheitlich, während bei BEV unterschiedliche Stecker und Steckdosen genutzt werden. Bei Batterien kann die Reichweite nur mit einer gleichzeitigen Vergrößerung der Leistung und des Gewichts erhöht werden, während bei FCEV ein größerer Wasserstofftank bei gleicher Leistung und nahezu gleichem Gewicht eingebaut werden kann, um die Reichweite zu verbessern. Dieser Nachteil

[88] Vgl. *Maier, M.,* 2019.
[89] Vgl. *H2 Live,* 2019. (Stand: August 2019)
[90] Vgl. *Chargemap,* 2019. (Stand: August 2019)

kann ab einer bestimmten Fahrzeugmasse den Vorteil des höheren Wirkungsgrades von BEV überwiegen. Schwere Fahrzeuge, die eine hohe Leistung benötigen, können dann besser mit Brennstoffzellen betrieben werden. Die Kosten zur Infrastrukturanpassung sind laut einer Szenarioanalyse der RWTH Aachen und des Forschungszentrums Jülich für einen Fahrzeugbestand ab 20 Mio. Fahrzeugen für die Wasserstoffversorgung geringer als für die Ausweitung der Ladesäulen. Gleichzeitig sind Kosten je gefahrenen Kilometer für beide Antriebsarten etwa gleich.[91] Die Rohstoffverfügbarkeit stellt mindestens bis zum Jahr 2050 bei beiden Möglichkeiten kein Problem dar, da Lithium, Nickel und Kobalt für Batterien sowie Platin für Brennstoffzellen ausreichend vorhanden sind. Darüber hinaus ist zukünftig mit einer Verbesserung von Recyclingprozessen zur Mehrfachnutzung der Rohstoffe zu rechnen. Der derzeitige Kostenvorteil liegt bei den BEV, da die Serienfertigung weiter vorangeschritten ist, sodass die Anschaffungskosten für ein Fahrzeug günstiger sind. Außerdem wird der Kauf eines BEV staatlich subventioniert. Sobald die Serienfertigung bei FCEV vorangeschritten ist, werden sich für Fahrzeuge mit großer Anforderung an die Reichweite beim Anschaffungspreis Kostenvorteile ergeben, da BEV für eine große Reichweite schwere Batterien mit hoher Kapazität brauchen. Durch Umwandlungsverluste, die bei der Herstellung von Wasserstoff mit erneuerbarem Strom entstehen, ist allerdings erheblich mehr Strom für eine Mobilität, die von FCEV dominiert wird, notwendig.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Brennstoffzelle mit zunehmenden Reichweitenanforderungen vor allem für große Fahrzeuge eine bessere Lösung darstellt. Bei kleineren Fahrzeugen ist aufgrund des besseren Wirkungsgrades die Batterietechnik im Vorteil, sodass im Verkehrssektor im Jahr 2040 vermutlich beide Antriebsarten vertreten sein werden. Auch Kombinationen aus beiden Technologien sind in Hybridfahrzeugen denkbar.[92] [93]

Im Jahr 2040 sollen etwa 56 % des Personen- und Güterverkehrs durch den Einsatz von BEV und FCEV erfolgen, während die restlichen Fahrzeuge Hybrid- oder Verbrennungsantriebe besitzen. Das Simulationstool schließt keine Hybridfahrzeuge bei den Berechnungen ein, sodass zum Ausgleich der Teil der BEC und FCEV auf 66 % erhöht wird. Die Brennstoffzelle als Antrieb wird durch die bisher fehlende

[91] Vgl. *Jülich Forschungszentrum,* 2017.
[92] Vgl. *VDI/VDE*, 2019.
[93] Vgl. *Plötz, P./Hacker, F./Jöhrens, J.*, 2018.

Tankinfrastruktur zunächst ein Nischendasein führen und vermutlich später den Markt durchdringen. Der Luftverkehr ist aufgrund zu schwacher Batteriekapazitäten für zurückzulegende Strecken und zu befördernde Massen nicht zu elektrisieren. Hier werden weiterhin flüssige Kraftstoffe zum Einsatz kommen.[94]

3.1.7 Grundstoffsynthese

Die chemische Industrie als auch der Verkehrssektor benötigen Wasserstoff als Grundstoff. Der tatsächliche Energieverbrauch hierfür kann aus dem theoretischen Bedarf für die Grundstoffsynthese und aus dem pro Person anfallenden Kunststoff- sowie Wasserstoffverbrauch für Grundstoffe errechnet werden.

Die Entwicklung des Bedarfs an Kunststoff für Verpackungen ist heute nur schwer einzuschätzen. Einerseits wird das Bewusstsein der Bevölkerung durch Nachrichtenmeldungen wie dem Müllteppich im pazifischen Ozean zunehmend für dieses Thema geschärft, was ein gesellschaftliches Umdenken hin zur Reduzierung des persönlichen Kunststoffverbrauchs hervorrufen könnte. Dafür spricht, dass die Zahl der gekauften Einwegplastiktüten im Einzelhandel deutlich gesunken ist.[95] Die Lebensmittelindustrie hat diesen Trend und die Notwendigkeit, weniger Kunststoff zu erzeugen, ebenfalls erkannt und vermindert die Zahl der Verpackungen bereits heute deutlich.[96] Darüber hinaus ist die Entwicklung neuer Technologien zum Müllrecycling in Zukunft zu erwarten.

Andererseits gibt es Studien, die zukünftig von einem Anstieg des Einsatzes von Kunststoffen in Deutschland ausgehen. Sie prognostizieren ein Wachstum von kunststoffreichen Sektoren wie der Verpackungsindustrie und einen generellen Anstieg des Kunststoffanteils in vielen Konsumbereichen. Potenziale zur Reduktion des Kunststoffverbrauchs durch mehr Materialeffizienz oder den Einsatz von Mehrwegprodukten sind zwar vorhanden, aber werden nicht genug umgesetzt. Dafür sind langfristig von der Politik implementierte regulatorische Instrumente nötig. Diese Studien gehen von einem Anstieg des Kunststoffverbrauchs zwischen 28 % in Deutschland bis 2030 und 70 % weltweit bis 2050 aus.[97] [98]

[94] Vgl. *Umweltbundesamt,* 2016.
[95] Vgl. *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit,* 2019.
[96] Vgl. *Handelsverband Deutschland*, 2019.
[97] Vgl. *Wilts, H.*, 2015.
[98] Vgl. *Goh, L.*, 2018.

Wasserstoff wird in Zukunft verstärkt mit erneuerbarem Strom erzeugt werden, der aufgrund von Netzengpässen im Moment nicht eingespeist werden kann.[99]

In dieser Arbeit wird angenommen, dass die Erzeugung von Kunststoffabfällen pro Person bis zu dem Jahr 2040 gegenüber dem Jahr 2016 aufgrund der unabsehbaren Entwicklungen maximal auf bis zu 70 % reduziert werden kann und höchstens auf 140 % ansteigt, während für die zukünftig vollständig regenerative Energieversorgung nur erneuerbare Grundstoffe genutzt werden.

3.2 Sektorkopplung

Die bei der Erzeugung und Umwandlung von Energie entstehenden Treibhausgase (THG) machen in Deutschland etwa 85 % der THG-Emissionen aus. Eine vollständig dekarbonisierte Energieversorgung ist nötig, um die Klimaschutzziele zu erreichen.

Diese energiebedingten Emissionen können dabei verschiedenen Sektoren zugeordnet werden. Eine Einteilung kann grob in Kraft, Licht, Informations- und Kommunikationstechnologien und Kälte (KLIK), Gebäude- und Prozesswärme (Wärme) und Mobilität erfolgen. Dem KLIK-Sektor wird die Energiewirtschaft untergeordnet, dem Wärmesektor die Industrie, Haushalte und GHD (Gewerbe, Handel und Dienstleistungen) und dem Mobilitätssektor der Nah- und Fernverkehr. Die Trennung zwischen den Sektoren ist nicht scharf, da z.B. in Haushalten auch Strom verbraucht wird, allerdings gibt diese Einteilung einen guten Richtwert über die Größenordnung.

Alle Sektoren müssen emissionsfrei werden und somit durch regenerative Energien versorgt werden. Wie die THG in den Sektoren Wärme, Mobilität und KLIK im Einzelnen aber vor allem auch sektorübergreifend reduziert werden können, wird im Folgenden beschrieben. Die Einsparung von Emissionen durch sektorübergreifende Anwendungen und Technologien wird als Sektorkopplung bezeichnet.[100]

3.2.1 Sektorkopplung im Wärmesektor

Im Jahr 2016 wird im Emsland der größte Teil der Endenergie mit etwa 54 % im Wärmesektor verbraucht. Dabei hat die Gebäudewärme mit 34 % und Prozess-

[99] Vgl. *Hülsken, C.,* 2017.
[100] Vgl. *Wietschel, M.*, 2019.

wärme mit 20 % die größten Anteile (vgl. Abbildung 10, S.53). Hierbei wird die benötigte Wärme zum Großteil durch fossile Energieträger gedeckt, weshalb die Dekarbonisierung des Wärmesektors erforderlich ist. Durch Bioenergie werden ca. 11 % der Endenergie des Wärmesektors bereitgestellt, während Solarthermie und Wärmepumpen mit jeweils 1 % und die Tiefengeothermie mit noch deutlich geringerem Anteil eher irrelevant sind.[101]

Eine regenerative Wärmeversorgung wird künftig aus folgenden Quellen bestehen:

- Biomasse,
- Solarthermie,
- Tiefengeothermie,
- Elektrische Wärmepumpen, die mit regenerativem Strom betrieben werden,
- Gaswärmepumpen, die Gas nutzen, das unter Einsatz von regenerativem Strom in Power-to-Gas-Anlagen (PtG) erzeugt wurde.

PtG-Anlagen substituieren fossiles und klimaschädliches Erdgas durch Methan, das aus erneuerbarem Strom erzeugt wird. Im Einzelnen wird Wasser mit Hilfe der Elektrolyse zu Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt, wofür erneuerbarer Strom genutzt wird. Der Wasserstoff reagiert mit Kohlenstoffdioxid zu Methan (Methanisierung) und Wasser. Das entstandene Methan kann nun als Erdgasersatz verbrannt werden. Das bei der Verbrennung u.a. entstehende Kohlenstoffdioxid wird bei der Methanisierung eingesetzt werden, sodass keine Emissionen entstehen.[102] Einen Überblick über das Verfahren liefert Abbildung 5.

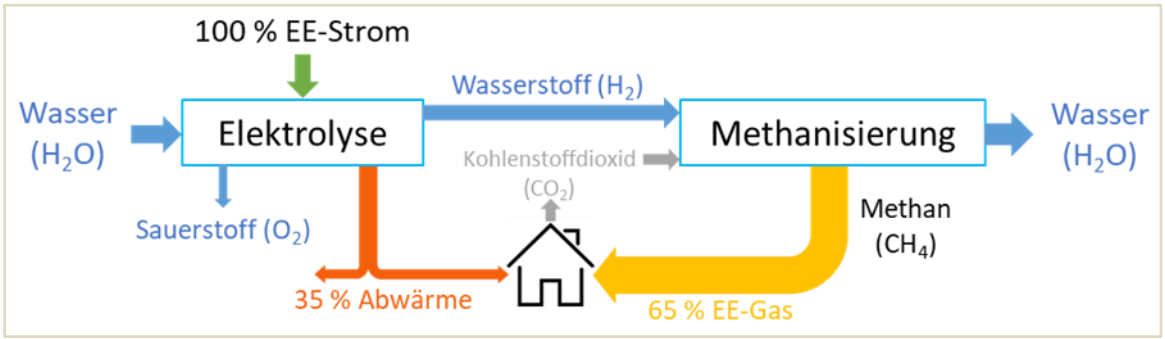

Abbildung 5: Nutzung der PtG-Technologie für Gebäudewärmeerzeugung
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an[103].

[101] Vgl. *Quaschning, V.*, 2016.
[102] Vgl. *Wietschel, M./Plötz, P.,* 2018.
[103] Vgl. *Quaschning, V.*, 2016.

Es treten hierbei Verluste von etwa 35 % auf, die als Abwärme anfallen und teilweise genutzt werden können. Die fluktuierende Stromerzeugung aus PV oder WKA führt jedoch dazu, dass PtG-Anlagen nicht ununterbrochen betrieben werden können. In Phasen geringer regenerativer Stromerzeugung müssen thermische Speicher entladen werden, um den Wärmebedarf zu decken.[104]

Der Einsatz von Wärmepumpen verspricht in Zukunft deutliche Effizienzgewinne zu erbringen.[105] Eine Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl (JAZ) von 3 ist ein Vielfaches effizienter als die Beheizung mit einem Gasbrennwertkessel, dessen Gas mit PtG hergestellt wird und deswegen einen höheren Stromverbrauch aufweist. Anlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) würden ebenfalls den Stromverbrauch zu stark in die Höhe treiben, da das Gas mit PtG erzeugt werden müsste. Eine zusätzliche Steigerung der JAZ ist durch Abwärmenutzung oder durch eine Systemkopplung mit Solarthermie zu erreichen, sodass Werte von 5 erreicht werden können.[106]

Neben Gebäudewärme wird auch noch Prozesswärme benötigt. Sie hat eine Temperatur von mehr als 100 °C und wird vor allem in der Industrie für technische Verfahren wie Trocknen, Schmelzen oder Schmieden, aber auch im Sektor GHD und im Haushalt z.B. zum Kochen benötigt. Im Haushalt kann die Prozesswärme durch elektrischen Strom gedeckt werden. Ebenso wird Prozess- und Klimakälte fast überall durch Strom bereitgestellt. Wärme, die durch Strom bereitgestellt werden kann, wird in Zukunft regenerativ erzeugt und somit emissionsfrei.

Wärmepumpen können das in der Industrie oft geforderte hohe Temperaturniveau nicht erreichen und sind keine Lösung für die Deckung der Prozesswärme. PtG-Anlagen haben den Nachteil, dass ein großer, zusätzlicher Strombedarf anfällt. Effizienter sind Lösungen, bei der die elektrische Energie direkt genutzt wird. Weiterhin bieten sich aufgrund des hohen Temperaturniveaus auch Möglichkeiten zur Wärmerückgewinnung an, die den Wärmebedarf reduzieren könnten. Effizienzsteigerungen können darüber hinaus vor allem auch durch Prozessoptimierungen erreicht werden.[107]

[104] Vgl. *Deutsche Energie-Agentur GmbH*, 2015.
[105] Vgl. *Fraunhofer IWES/IBP*, 2017.
[106] Vgl. *Quaschning, V.*, 2016.
[107] Vgl. *Fraunhofer IWES/IBP*, 2017.

3.2.2 Sektorkopplung im Verkehrssektor

Die Endenergie im Verkehrssektor entstammt dabei zu 29,2 % aus Vergaserkraftstoffen, zu 50,7 % aus Diesel, zu 13,8 % aus Flugkraftstoffen und damit insgesamt zu 93,7 % aus fossilen Energieträgern. Lediglich im Straßenverkehr in Deutschland werden über 83 % des im Verkehrssektor anfallenden Endenergieverbrauchs eingesetzt, was ihn zum wichtigsten Faktor bei der Dekarbonisierung macht.[108] Die Deckung erfolgte bislang nur zu 4,4 % aus erneuerbaren Energien, wobei hier überwiegend biogene Kraftstoffe zum Einsatz kommen. Die Elektrifizierung des Straßenverkehrs steht noch am Anfang, sodass nur 1,6 % des Endenergiebedarfs durch Strom gedeckt wird, der wiederum zu etwa 40 % regenerativ erzeugt wird. Dieser Anteil ist in den 4,4 % aus erneuerbaren Energien nicht enthalten.

Es gibt im Wesentlichen drei Möglichkeiten, den Verkehrssektor zu dekarbonisieren. Die fossilen Treibstoffe können ersetzt werden durch:

- biogene Treibstoffe,
- flüssige oder gasförmige Treibstoffe, die in Power-to-Gas- oder Power-to-Liquid-Anlagen (PtL)mit regenerativ erzeugtem Strom hergestellt werden,
- regenerativ erzeugten Strom, der batteriebetriebene Elektroautos antreibt.

Für die Deckung mit biogenen Kraftstoffen reicht die Anbaufläche in Deutschland nicht aus, um den Bedarf zu decken. Die beiden anderen Möglichkeiten unterscheiden sich stark bei der Effizienz. Da im Verkehrssektor sehr viel Endenergie verbraucht wird, ist es umso wichtiger, die effizienteste Technologie zu verwenden, damit der Strombedarf nicht so stark ansteigt. Aufgrund der geringeren Verluste ist die Nutzung batteriebetriebener Elektrofahrzeuge die effizienteste Art und Weise für den Individualverkehr.

Eine Elektrifizierung des LKW- und Busverkehrs ist genauso erforderlich. Die weiteren Distanzen, die hier zurückgelegt werden, erfordern in Verbindung mit den schweren Fahrzeugen eine hohe Batteriekapazität. Falls die Batterietechnik nicht leistungsfähig genug sein wird, müssen Oberleitungen den Verkehr auf Fernstraßen mit Strom versorgen. Als Alternative kann PtL einen Anteil des Transportwesens mit Treibstoff versorgen. Indem die Transportlast mehr auf den zunehmend elektrifizierten Schienengüterverkehr verteilt wird, kann das Verkehrsaufkommen reduziert und

[108] Vgl. *Blanck, R./ Zimmer, W.,* 2017.

die Elektrifizierung des Verkehrssektors erleichtert werden, da viele Strecken hier schon mit Oberleitungen ausgestattet sind. Flugzeuge und Schiffe benötigen noch deutlich mehr Treibstoff, sodass rein elektrische Lösungen hier auch in Zukunft als eher unwahrscheinlich einzuschätzen sind. Es ist davon auszugehen, dass Treibstoffe aus PtL oder Biomasse hier verstärkt zum Einsatz kommen.[109]

3.2.3 Auswirkungen der Sektorkopplung auf den Elektrizitätsbereich

Da durch die Dekarbonisierung bzw. die Elektrifizierung des Wärme- und Verkehrssektors in Zukunft zusätzlicher Strom benötigt wird, ist zu klären, wie dieser in der geforderten Menge und Verfügbarkeit erneuerbar erzeugt werden kann.

Um die sichere Versorgung mit Elektrizität derzeit zu gewährleisten, sind viele fossile Kraftwerke in Betrieb. Diese haben gegenüber den erneuerbaren Kraftwerken den Vorteil, dass sie nicht abhängig von Sonne und Wind sind. Einen gleichwertigen Ersatz können erneuerbare Kraftwerke zukünftig allerdings nur darstellen, wenn sie trotz schwankender Sonneneinstrahlung und Windbedingungen konstant die geforderte Systemleistung liefern können. Dazu ist eine Errichtung von Stromspeichern notwendig, die in windigen, sonnigen Zeiten geladen und bei wenig Wind und bedecktem Himmel entladen werden können und so eine stetige Verfügbarkeit von Elektrizität sicherstellen. Die notwenigen Speicherkapazitäten müssen durch zu errichtende Batterie- und Gasspeicher geschaffen werden, welche wiederum Umwandlungs- und Speicherverluste aufweisen.

3.3 Energieerzeugung

Die Energieversorgung für die zuvor beschriebenen Verbrauchssektoren soll bis zum Jahr 2040 zu 100 % aus erneuerbaren Energien erfolgen. Die Energieproduktion wird in 100prosim über die bereitstehenden Flächen zur Energieerzeugung sowie über weitere relevante Parameter wie z.B. Wirkungsgrade berechnet.

Die benötigten Flächengrößen wie z.B. Energieerzeugungsflächen, Dachflächen oder Siedlungsflächen werden soweit möglich recherchiert. Einige Flächen mit besonders spezifischer Flächennutzung konnten für das Emsland nicht recherchiert

[109] Vgl. *Agora Verkehrswende,* 2017.

werden und wurden über ein bestehendes Verhältnis bekannter Flächen mit gleicher Nutzung von der nächstgrößeren Region, meistens Niedersachsen, geschätzt.[110] Diese Einzelfälle sind im Simulationstool gekennzeichnet.

3.3.1 Solarenergie

Die Energie der Sonne kann durch Solarthermieanlagen als Wärme und durch Photovoltaikanlagen (PV) als elektrische Energie nutzbar gemacht werden. Als Flächen zur Installation entsprechender Anlagen sind sowohl Dachflächen als auch Fassaden geeignet. Weiterhin können auf landwirtschaftlichen Flächen Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PVF) errichtet werden, die ebenfalls Strom produzieren.[111]

3.3.1.1 Solarwärme

Die solar erzeugte Wärmemenge wird in 100prosim über den möglichen Energieertrag pro Fläche und Jahr der solarthermischen Kollektoren und die geeignete, gesamte Dachfläche im Emsland berechnet.

Geeignete Dachflächen werden bis 2040 laut vieler Studien überwiegend mit PV-Anlagen und geringfügig mit Solarthermieanlagen bestückt. Gründe dafür sind, dass geeignete Dachflächen für Solarthermie fehlen und dass es eine Konkurrenz um die Dachfläche mit der PV gibt. Mehrstöckige Häuser haben zu wenig Dachfläche im Verhältnis zur zu beheizenden Wohnfläche und können den gesamten Heizenergiebedarf durch den geringen Energieeintrag aus Solarthermie nicht decken.[112]

Es gibt jedoch auch Hinweise dafür, dass die Solarthermie in Zukunft eine wichtige Rolle bei der Niedertemperatur-Wärmeversorgung einnimmt. Ein gutes Beispiel dafür ist Dänemark, wo die Wärmeversorgung von Wohnhäusern zu 64 % durch Wärmenetze erfolgt. Solarthermie liefert derzeit zwar nur etwa 2 % des gesamten Wärmebedarfs, wird aber bis 2030 15 % und bis 2050 40 % des Wärmebedarfs decken. Die Technik wird immer günstiger und einfacher. Hindernis ist hauptsächlich die Installation eines Wärmenetzes, die nachträglich in einem Wohngebiet teuer ist. Bei der Planung von Neubaugebieten sind die Kosten geringer.[113]

[110] Vgl. *Beck, H.-P./von Haaren, C.,* 2016.
[111] Vgl. *Bundesverband Solarwirtschaft e.V.*, 2018.
[112] Vgl. *Gerbert, P./Herhold, P.*, 2018.
[113] Vgl. *Holm, E.*, 2018.

Ein Anstieg der verbauten Solarthermieanlagen ist insgesamt zu erwarten, da die Gebäudewärme, die überwiegend durch Niedertemperaturwärme gedeckt wird, zukünftig durch Wärmepumpen aber auch Solarthermieanlagen bereitgestellt werden soll. Bis zum Jahr 2040 sollen etwa 0,7 bis 9 % der geeigneten Dachflächen mit Solarthermie ausgestattet werden. Technische Verbesserungen ermöglichen außerdem einen Anstieg des Energieertrags der Solarthermieanlagen auf 5.000 MWh/ha/a bis zu dem Jahr 2040.[114]

3.3.1.2 Solarstrom

Die solar erzeugte Strommenge wird in 100prosim über den möglichen Energieertrag pro Fläche und Jahr der PV-Dachanlagen (PVD) und PV-Freiflächenanlagen (PVF) und die geeignete, gesamte Dachfläche im Emsland berechnet. Die zur Deckung des Energiebedarfs nötige installierte Leistung beider Anlagentypen wird über die jährlich zu erwartenden Volllaststunden berechnet. Volllaststunden geben die Zeit an, die eine Anlage bei Nennleistung betrieben werden müsste, um die gleiche jährlich erzeugte Energiemenge zu produzieren, die die gleiche Anlage unter realen Bedingungen mit Betriebspausen und Teillastbetrieb produziert.[115]

Geeignete Dachflächen sollen von 91 bis 99,3 % mit PV-Anlagen bestückt werden. Die erzielbaren Energieerträge belaufen sich auf 1.712 MWh/ha/a für PVD und 519 MWh/ha/a für PVF.[116] Der geringere Energieertrag bei Freiflächenanlagen kommt durch einen größeren Modulabstand zustande, der nötig ist, um eine gegenseitige Verschattung der Modulflächen zu verhindern. Der angesetzte Modulabstand beträgt ein 3,3-faches der Modulfläche.[117] Die Anzahl der Volllaststunden pro Jahr für PV-Anlagen in Niedersachsen lag in den 5 Jahren von 2011 bis 2015 durchschnittlich bei 844 h/a und wird dieses Niveau aufgrund konstanter Strahlungsbedingungen vermutlich halten.[118]

3.3.2 Windenergie

Die kinetische Energie des Windes kann durch Windkraftanlagen (WKA) an Land (onshore) oder vor der Küste (offshore) in elektrische Energie umgewandelt werden. Im Emsland befinden sich ausschließlich Onshore-WKA. Die geeignete Fläche zur

[114] Vgl. *Beck, H.-P./von Haaren, C.,* 2016.
[115] Vgl. *Mertens, K.,* 2018.
[116] Vgl. *Beck, H.-P./von Haaren, C.,* 2016.
[117] Vgl. *Wirth, H.*, 2019.
[118] Vgl. *Agentur für Erneuerbare Energien*, 2019.

Errichtung von Windparks, der spezifische Flächenbedarf einer Anlage und die erwartbaren Volllaststunden bilden Parameter bei der Berechnung der produzierten Strommenge.

Die nutzbare Fläche soll über die festgelegten Ausschlussflächen und über Toleranzstudien ermittelt werden. Ausschlussflächen werden vom Landkreis deklariert und können nicht als Windkraftstandort genutzt werden. Toleranzstudien haben die Akzeptanz der Bevölkerung gegenüber WKA untersucht und legen ebenfalls eine Obergrenze für Onshore-Flächen fest.

Aus der ersten Änderung des Raumordnungsprogramms von 2010 des Landkreises Emsland geht eine Flächenbilanz hervor, nach der insgesamt 4.389 ha als Fläche für Windenergienutzung festgelegt werden, wie Tabelle 1 zeigt.

Tabelle 1: Flächenbilanz vom Raumordnungsprogramm des Emslandes zur Windenergienutzung Quelle: Eigene Darstellung.

Flächen	Einheit	Größe
Bodenfläche Emsland	[ha]	288.207
Ausschlussflächen		
Harte Tabukriterien	[ha]	186.707
Weiche Tabukriterien	[ha]	97.111
Gesamt	[ha]	283.818
Nutzbare Flächen		
Vorranggebiet	[ha]	3.850
Vorranggebiet mit Kopplung an Speichernutzung	[ha]	214
Eignungsgebiet	[ha]	325
Gesamt	[ha]	4.389

Durch harte Tabukriterien wird eine Fläche von 186.707 ha von der Nutzung für Windkraft ausgeschlossen. Harte Tabukriterien machen die Errichtung von WKA aus tatsächlichen und/oder rechtlichen Gründen unmöglich. Durch weiche Tabukriterien, nach denen die Errichtung von WKA aus tatsächlichen und/oder rechtlichen Gründen möglich wäre, aber nach begründeten Überlegungen des Planers ausgeschlossen wird, scheiden 97.111 ha aus. Von den 4.389 ha werden 3.850 ha als Vorranggebiet, 214 ha als Vorranggebiet mit Kopplung an Speichernutzung und 325 ha als Eignungsgebiet deklariert.[119] Das tatsächlich nutzbare Flächenpotenzial

[119] Vgl. *Landkreis Emsland*, 2015.

des Emslandes beträgt damit etwa 1,5 % der Gebietsfläche und entspricht in etwa dem Wert für Deutschland.[120]

In Deutschland stehen grundsätzlich 13,8 % der Landesfläche für Windenergienutzung zur Verfügung. Die Studie des Umweltbundesamtes hat bei der Berechnung allerdings nur technische und ökologische Restriktionen einbezogen, wobei ökologische Einzelfallbetrachtungen nicht stattgefunden haben. Gerade Artenschutz stellt ein großes Hindernis für Windparks dar und verkleinert das Potenzial ebenfalls. Weiterhin wird das Flächenpotenzial allerdings auch durch wirtschaftliche Restriktionen beschränkt, sodass das tatsächlich realisierbare Potenzial deutlich kleiner ausfällt. Anders gesetzte Entwicklungsziele für Gebiete zu Gunsten von Siedlungsbau, mangelnde Akzeptanz von Flächeneigentümern und Anwohnern, wirtschaftliche Faktoren wie die Investitionskosten und Nutzungsansprüche auf Flächen, die z.B. die Bundeswehr innehat, lassen das tatsächlich realisierbare Flächenpotenzial in Deutschland auf 1,7 % schrumpfen.[121]

Ein 5-facher Rotordurchmesser (RD) in Hauptwindrichtung sowie ein 3-facher RD in Nebenwindrichtung werden in der Literatur als spezifischer Flächenbedarf bzw. als Abstand zwischen mehreren WKA genannt (vgl. Abbildung 6).[122]

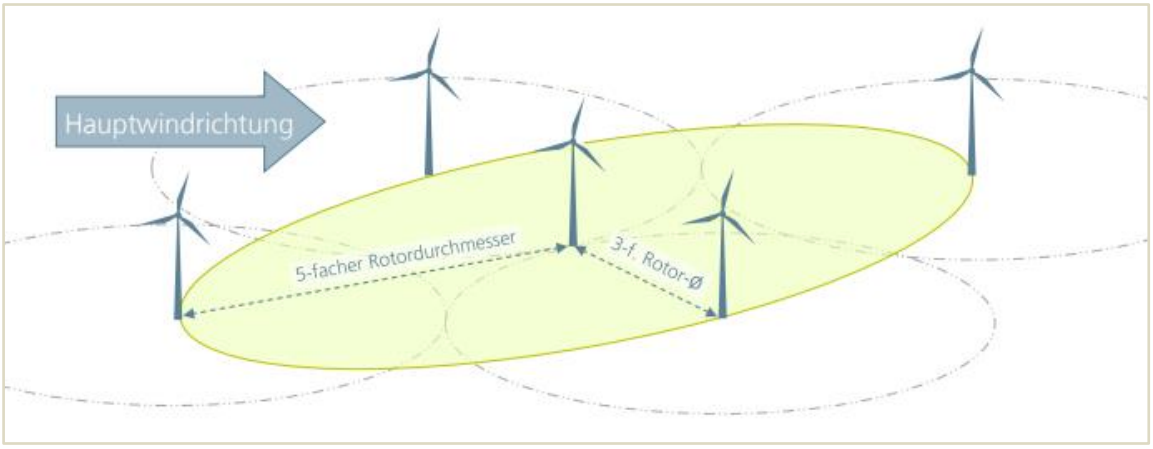

Abbildung 6: Flächenbedarf einer WKA und Anlagenanordnung in einem Windpark [123]

Die benötigte Fläche für eine Windkraftanlage (A_{WKA}) berechnet sich wie folgt:

$$A_{WKA} = \pi \cdot 5\ RD \cdot 3\ RD \quad (1)$$

[120] Vgl. *Landkreis Emsland* 2017; Gebietsfläche Emsland: 288.207 ha.
[121] Vgl. *Lütkehus, L./Salecker, H./Adlunger, K.*, 2013.
[122] Vgl. *Fachagentur Windenergie an Land*, 2019.
[123] Vgl. *Fachagentur Windenergie an Land*, 2019.

Die Erzeugung elektrischer Energie aus Windenergie betrug in Niedersachsen im Jahr 2016 19.287 GWh. Die installierte Leistung kam auf insgesamt 9.324 MW, während die durchschnittliche Leistung einer Anlage 1,6 MW betrug.[124] [125] Die Jahresvolllaststundenzahl betrug demnach 2.069 h.[126] Der darin enthaltene, sehr geringe Anteil von Offshore WKA hat mehr Jahresvolllaststunden, die demnach die durchschnittliche Volllaststundenzahl erhöhen. Da das Emsland keine Offshore-WKA betreibt, ist anzunehmen, dass die Anzahl an Volllaststunden hier geringfügig kleiner ausfällt. Mangels geeigneter Daten wird vereinfachend trotzdem die Volllaststundenzahl von 2.069 h für die Berechnungen verwendet. In Deutschland lag die Volllaststundenanzahl 2016 bei 1.745 h und die durchschnittliche Nennleistung einer Anlage lag bei 1,68 MW.[127] Die geringere Volllaststundenanzahl in ganz Deutschland lässt sich dadurch erklären, dass der Süden Deutschlands eine höhere Bodenrauigkeit aufweist, die die Windgeschwindigkeit reduziert.

In Zukunft werden die WKA immer leistungsstärker durch höhere Türme, größere RD und effizientere Technik. Die durchschnittliche Nennleistung einer neu dazu gebauten WKA lag in Deutschland in dem Jahr 2016 bei ca. 2,85 MW, wobei der Anlagenbestand durchschnittlich 16 Jahre alt war. Bis 2040 werden bestehende ältere und leistungsschwächere WKA vermutlich durch leistungsstärkere Produkttypen substituiert und darüber hinaus werden letztere dazu gebaut.[128] Eine durchschnittliche Nennleistung in Deutschland von 4 MW bis 4,5 MW im Jahr 2033 kann laut der Literatur erreicht werden, sodass neu gebaute WKA im Jahr 2040 durchschnittlich eine Nennleistung von 5 MW erreichen können.[129]

Die Anzahl der Volllaststunden kann im Norden Deutschlands auf 2.621 h steigen. Die Angabe der Volllaststunden bezieht sich dabei auf zwei Anlagentypen für Stark- und Schwachwind, wie sie 2040 durchschnittlich errichtet sein können.[130] Die beiden Anlagentypen werden in Tabelle 2 verglichen.

[124] Vgl. *Agentur für Erneuerbare Energien*, 2019.
[125] Vgl. *Bundesverband WindEnergie*, 2018.
[126] 19.287 GWh / 9.324 GW = 2.069 h
[127] Vgl. *Bundesverband WindEnergie*, 2019.
[128] Vgl. *Durstewitz, M./Behem, G.,* 2018.
[129] Vgl. *Lackmann, J.*, 2014.
[130] Vgl. *Lütkehus, L./Salecker, H./Adlunger, K.*, 2013.

Tabelle 2: Durchschnittlicher Produkttyp einer WKA im Jahr 2040
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [131].

Standort	Einheit	Schwachwind	Starkwind
Mittlere Windgeschwindigkeit in 140 m Höhe	[m/s]	< 7,5	> 7,5
Nabenhöhe	[m]	140	100
Rotordurchmesser	[m]	114	104
Gesamthöhe	[m]	197	152
Generatornennleistung	[MW]	3,2	3,4

Der spezifische Flächenbedarf einer Anlage ändert sich bis 2040 nicht, da angenommen wird, dass die Abstandsregeln aus Abbildung 6 auch zukünftig in unveränderter Form relevant sind.

3.3.3 Wasserkraft

Energie aus Wasserkraft wird im Emsland nicht gewonnen. Das Potenzial in den nördlichen Bundesländern ist beschränkt und wird im Folgenden vernachlässigt.[132]

3.3.4 Biogene Brennstoffe

Biogene Brennstoffe liegen in fester, flüssiger und gasförmiger Form vor und werden für die Energieproduktion verwendet.[133]

3.3.4.1 Feste biogene Brennstoffe

Die Energiemenge aus fester Biomasse berechnet sich aus der vorhandenen Anbaufläche und dem Energieertrag des verbrannten Rohstoffs. Zu den festen biogenen Brennstoffen zählen in 100prosim Energieholz aus Forst- und Ackerflächen, Stroh und biogene Abfälle wie z.B. Abfälle aus der Nahrungsmittelproduktion.

Grundsätzlich ist der flächenbezogene Energieertrag von Technologien, die regenerativen Strom erzeugen wie z.B. Windkraft, deutlich größer als von brennstofferzeugenden Energiequellen (vgl. Abbildung 2, S.7). Zusätzlich ist von einer extremen Nutzung von biogenen Feststoffen in Form von Energieholz abzusehen, da dadurch das Ökosystem Wald zerstört wird.[134] Deutschlandweit werden heute schon zwei Drittel des Potenzials für eine Energieholznutzung von Forstflächen ausgeschöpft, sodass aus den genannten Gründen bis 2040 nur ein geringfügiger Anteil des jähr-

[131] Vgl. *Lütkehus, L./Salecker, H./Adlunger, K.*, 2013.
[132] Vgl. *Agentur für Erneuerbare Energien*, 2019.
[133] Vgl. *Walter, A./Wiehe, J.*, 2018.
[134] Vgl. *Beck, H.-P./von Haaren, C.,* 2016.

lichen Holzzuwachses als Brennstoff genutzt werden soll. Eine energetische Nutzung von Stroh soll in der Zukunft stärker stattfinden, was im Emsland mit einer hohen Anzahl landwirtschaftlicher Betriebe vorteilhaft ist.[135]

Eine energetische Nutzung organischer Abfälle ist insgesamt nicht sehr effektiv und das Potenzial fast ausgeschöpft. Da in Zukunft verstärkt Strategien zur Müllvermeidung entwickelt werden, ist eine eindeutige Entwicklung nicht abzusehen.[136]

Die energetische Wertigkeit von biogenen Feststoffen verändert sich bis zum Jahr 2040 nicht. Weiterhin liefert die Literatur kaum quantitative Daten zur Entwicklung der Nutzung biogener Feststoffe, sondern hauptsächlich qualitative Meinungen, die oben kurz zusammengefasst wurden. Insgesamt bleibt der Energieertrag aus biogenen Feststoffen auf dem heutigen Niveau. In Nuancen kann sich dieser Wert steigern, wenn verstärkt energiereichere Bäume wie z.B. Pappeln angebaut werden.[137]

Biomasse ist ineffizient und unflexibel, wenn es zur Stromerzeugung eingesetzt werden soll. Ebenso ist die Verbrennung von fester Biomasse zur Gebäudeheizung z.B. in Pelletheizungen nicht sehr sinnvoll. Feste Biomasse eignet sich hingegen gut zur Erzeugung von Nieder- und Mitteltemperaturwärme im Industriesektor, da dort der Wirkungsgrad gut ist.[138]

In 100prosim werden die Anteile bzw. der Verwendungszeck der festen Biomasse durch die Bedarfsmengen in den verschiedenen Verbrauchssektoren festgelegt. Feste Biomasse wird deshalb vor allem für Prozesswärme verwendet, während Gebäudewärme nur einen sehr kleinen Anwendungsbereich darstellt und die Verstromung keine Rolle spielt.

3.3.4.2 Flüssige biogene Brennstoffe

Zu den flüssigen biogenen Brennstoffen zählen in 100prosim Biodiesel und Bioethanol. Verwendung können diese Kraftstoffe im Mobilitätssektor oder auch bei der Verstromung finden. Bioethanol wird aus Zucker, Cellulose oder Stärke hergestellt, hat aber gegenüber Biodiesel und Biomethan einen geringeren Energiegehalt, sodass die Literatur zukünftig von einer Einstellung des Anbaus ausgeht. Der Anbau

[135] Vgl. *Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz*, 2017.
[136] Vgl. *Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V.,* 2018.
[137] Vgl. *Hesse, T./Koch, M.,* 2018.
[138] Vgl. *Gerbert, P./Herhold, P.,* 2018.

von Biodiesel, der aus Getreide und Rapssaat hergestellt wird, soll bis 2040 ebenfalls verringert werden, da der Flächenbedarf für den Energiegehalt zu groß ist. Biomethan hingegen benötigt nur ein Drittel der Anbaufläche von Biodiesel für die gleiche Energiemenge. Das bei der Verwertung organischen Materials hergestellte Biomethan hat demnach das größte Potenzial.[139]

Entsprechend dieser Potenzialabstufungen werden bis 2040 ein Großteil der Anbauflächen im Emsland für Biomethan, ein geringerer Teil für Biodiesel und kein Teil für Bioethanol genutzt. Die genauen Anteile werden aus dem Szenario „Niedersachsen 100 Prozent Erneuerbare Energien“ angepasst und übernommen.[140]

Auch flüssige Biomasse hat sein Einsatzgebiet in Verbrauchssektoren statt bei der Verstromung. Vor allem eignet sich der biogene Energieträger in Fällen, in denen eine Elektrifizierung nicht möglich ist. Beispielhaft ist hier der Flugverkehr zu nennen. Hier können deshalb biogene Kraftstoffe verwendet werden.[141]

3.3.4.3 Gasförmige biogene Brennstoffe

Zu den gasförmigen biogenen Brennstoffen zählt Biogas, das bei einem anaeroben Gärungsprozess aus Biomasse entsteht. Rohstoffe für die Herstellung können Energiepflanzen wie Mais, aber auch Abfallstoffe z.B. aus Kläranlagen sein. Die Verwertung dieser Abfallstoffe ist ein Vorteil dieser Technologie, weshalb diese Art der Nutzung zukünftig eine wichtigere Rolle einnehmen wird.[142] Da z.B. bei regenerativen Stromerzeugungstechnologien eine geringere Fläche für den gleichen Energiebetrag benötigt wird, ist ein Anbau von Energiepflanzen für die Herstellung von Biogas weniger effizient. Die Flächenpotenziale werden zukünftig also eher für PV und Windkraft genutzt.[143]

Auszugehen ist aber von einer geringen Verschiebung hin zu einer verstärkten Nutzung von Abfallstoffen. Die aktuell erzeugte Biogasmenge stammt nur zu einem marginalen Teil aus Kläranlagen oder Deponien, während durch den Anbau von Energiepflanzen der Großteil Biogas entsteht. Große Industriebetriebe könnten durch die Nutzung von Biogas, das in der eigenen Kläranlage hergestellt und in

[139] Vgl. *Edel, M./Kühnel C.,* 2017.
[140] Vgl. *Beck, H.-P./von Haaren, C.,* 2016.
[141] Vgl. *Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V.,* 2018.
[142] Vgl. *Edel, M./Kühnel C.,* 2017.
[143] Vgl. *Repenning, J./Braungardt, S.,* 2015.

KWK-Anlagen genutzt wird, die Verschiebung zusätzlich verstärken. Ab einer gewissen Unternehmensgröße ist diese Möglichkeit attraktiv, da dadurch Wasser, Wärme und Strom eingespart werden können.[144]

Ähnlich wie bei den anderen biogenen Brennstoffen wird zukünftig von einer Verstromung abgesehen und ein Einsatz im Verkehrssektor vorgezogen. Der Anteil Verbrennungsmotoren, die 2040 noch betrieben werden, soll statt mit fossilen Brennstoffen mit Biomethan als Kraftstoff betrieben werden. Biomethan ist in Biogas enthalten und kann bei einer Aufbereitung extrahiert werden.

3.3.5 Umgebungswärme

Umgebungswärme kann durch Wärmepumpen nutzbar gemacht werden. Die Wärme kann dabei der Umgebungsluft oder dem Grundwasser bzw. oberflächennahen Erdschichten entzogen werden und mechanisch auf ein nutzbares Temperaturniveau gebracht werden. Diese zwei Kopplungsarten werden auch in 100prosim unterschieden. Die JAZ beschreibt dabei das Verhältnis aus erzeugter Heizungswärme zu eingesetztem Antriebsstrom der Wärmepumpe. Da der Strom bis zum Jahr 2040 zu 100 % regenerativ erzeugt werden soll, gilt diese Technologie als Schlüsseltechnologie für die sogenannte Wärmewende.[145]

Die luftgekoppelte Wärmepumpe lässt sich einfach installieren und hat die geringsten Kosten, weshalb für diese Art die größte Marktdurchdringung vorausgesagt wird. Ihr Anteil wird bis 2040 auf über 60 % geschätzt, während die Gesamtzahl der in Deutschland installierten Wärmepumpen bis 2040 auf etwa 13 Mio. steigen wird. Die Betriebskosten der luftgekoppelten Variante sind jedoch am höchsten, was an der geringsten JAZ von etwa 3,5 liegt, welche für das Jahr 2030 prognostiziert wird. Im Vergleich dazu wird für an das Erdreich gekoppelte Wärmepumpen eine JAZ von 4,4 vorausgesagt. Die Möglichkeiten zu Effizienzsteigerungen werden naturgemäß frühzeitig in großen Schritten ausgeschöpft, während mit der Zeit nur noch mit kleineren Optimierungen zu rechnen ist.[146] Der Fall, indem die anfangs großen Effizienzsteigerungen auch bis 2040 weitergehen, kann jedoch nicht ausgeschlossen werden. Dadurch ergeben sich bis 2040 zwei unterschiedliche Annahmen für die Effizienz von Wärmepumpen. Näherungsweise kann angenommen werden, dass

[144] Vgl. *Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V.,* 2018.
[145] Vgl. *Fraunhofer IWES/IBP,* 2017.
[146] Vgl. *Koch, M./Sperr, A.,* 2015.

die Werte für die JAZ aus dem Jahr 2030 sich bis zum Jahr 2040 nicht mehr verändern und bei 3,5 für luftgekoppelte Systeme und bei 4,4 für an das Erdreich gekoppelte Systeme bleiben. Durch weitere Entwicklungsfortschritte kann bis 2040 mit einer Steigerung der JAZ auf respektive 3,7 (luftgekoppelt) und 4,6 (erdgekoppelt) ausgegangen werden.[147]

3.3.6 Tiefengeothermie

Das Simulationstool berechnet die produzierte Strommenge der Geothermiekraftwerke aus der installierten elektrischen Leistung und den Volllaststunden. Als Nutzenergie berücksichtigt 100prosim nur elektrische Energie. Die Wärmeenergie wird dabei im Organic Rankine Cycle oder im Kalina-Kreisprozess verstromt. Anliegende Gebäude können die entstehende Abwärme für Heizungszwecke nutzen.

Bundesweit gibt es derzeit 37 Geothermie-Kraftwerke mit einer installierten elektrischen Leistung von 37,13 MW und einer installierten Wärmeleistung von 336,51 MW.[148] Im Emsland befindet sich am Greenenergypark in Heede/Dersum ein Forschungsprojekt, das den Bau eines Kraftwerks mit 3 MW elektrischer Leistung und 21 MW Wärmeleistung vorsieht. Die technische und wirtschaftliche Machbarkeit wurde bereits 2016 in einer Studie belegt, allerdings fehlt aktuell noch die finanzielle Unterstützung des Landes Niedersachsen für das 50 Mio. Euro Projekt, sodass noch keine Bauarbeiten begonnen haben. Die Zukunft des Projektes ist zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit ungewiss.[149]

Das finanzielle Risiko bei derartigen Projekten ist sehr hoch, weil die Tiefenbohrungen, die bis zu 6.000 m ins Erdreich vordringen, sehr teuer sind und nicht sicher ist, ob dort wirklich das erwartete warme Wasser vorhanden ist. Aus diesem Grund ist die zukünftige Entwicklung von Geothermiekraftwerken ungewiss.[150]

Für das Emsland wird angenommen, dass 0 bis 3 MW elektrischer Leistung in Form des Geothermiekraftwerks in Heede/Dersum bis zum Jahr 2040 zugebaut werden. Die durchschnittlichen Volllaststunden für ein Geothermiekraftwerk in Deutschland

[147] Vgl. *Fraunhofer IWES/IBP,* 2017.
[148] Vgl. *Bundesverband Geothermie e.V.,* 2019.
[149] Vgl. *Schade, G.*, 2018.
[150] Vgl. *Bundesverband Geothermie e.V.,* 2019.

betragen 7.500 h und können zukünftig auf 8.000 h steigen, während der Nutzungsgrad für die Verstromung bei 17 % liegt.[151] Die im Simulationstool anzugebene Abwärmeleistung wird auf 100 % festgelegt, da im Falle des Baus umliegende Unternehmen die Abwärme verwenden können.

3.3.7 Stromwandlung und -speicherung

Als Stromwandlung wird im Kontext der Energiewende die Wandlung von Strom in Wasserstoff mit dem Elektrolyseverfahren bezeichnet. Mit dem produzierten Wasserstoff können Prozesswärme und Kraft- bzw. Grundstoffe erzeugt werden. Die biogenen Brennstoffe haben den gleichen Nutzen, sodass die Wasserelektrolyse eine Erweiterung und Flexibilisierung darstellt. Sofern der Bedarf an Prozesswärme und Kraftstoffen nicht durch Biomasse gedeckt werden kann, wird Strom zur Erzeugung von Wasserstoff benutzt.

Industriell benötigte Prozesswärme wird im Zieljahr 2040 zu einem erheblichen Anteil durch feste Biomasse gedeckt, da dies der effektivste Anwendungsbereich für selbige ist. Hier wird kein Wasserstoff zur Deckung des Bedarfs benötigt.[152]

Der Mobilitätssektor kann sich in zwei verschiedene Richtungen entwickeln. Sofern die Elektromobilität sich gegen die Brennstoffzellentechnik durchsetzt, wie es aktuell scheint, wird elektrolytisch erzeugter Wasserstoff nur geringfügig als Ergänzungsoption für den Verkehrssektor benötigt. Für den Fall, dass die Brennstoffzelle der Antrieb der Zukunft sein wird, ist es notwendig, Wasserstoff als Kraftstoff einzusetzen (Vgl. Kapitel 3.1.6). Die Menge an Biomethan reicht als gasförmiger Kraftstoff aus, sodass kein Wasserstoff zusätzlich benötigt wird. Flüssige, synthetische Kraftstoffe werden aber definitiv für den Flugverkehr benötigt, weil die bereitstehende Menge an Biodiesel den Bedarf hierfür im Jahr 2040 nicht decken kann. Um Methan als Grundstoff zu erzeugen, der z.B. in der Chemieindustrie Einsatz findet, ist Wasserstoff auch erforderlich.[153]

Für die oben genannten im Jahr 2040 relevanten Prozesse sind die Wirkungsgrade für die Berechnung durch 100prosim entscheidend. Bis zu dem Jahr 2040 werden bei der Wasserelektrolyse Wirkungsgrade von etwa 80 % erreicht. Aus Wasserstoff können Flüssigkraftstoffe im Jahr 2040 ungefähr mit einem Wirkungsgrad von 63 %

[151] Vgl. *Geothermie-Allianz Bayern,* 2017.
[152] Vgl. *Gerbert, P./Herhold, P.,* 2018.
[153] Vgl. *Umweltbundesamt,* 2016.

und Methan mit einem Wirkungsgrad von 82 % hergestellt werden. Die Brennstoffzelle liefert heute Wirkungsgrade von etwa 60 %.[154]

Dem Problem der volatilen Energieerzeugung durch erneuerbare Energien muss mit Energiespeichern begegnet werden. Dazu eignet sich das PtG-Verfahren, bei dem erneuerbar erzeugter Strom in Wasserstoff umgewandelt und im gasförmigen Zustand gespeichert werden kann. Immer wenn Strom produziert und nicht unmittelbar verbraucht wird, kann dieser durch Wasserelektrolyse in Form von Wasserstoff unterirdisch gespeichert werden. Dieses Verfahren wird auch in 100prosim für die Langzeit-Stromspeicherung über Tage, Wochen und Monate berücksichtigt. Der gespeicherte Wasserstoff kann in Blockheizkraftwerken zurückverstromt werden, wenn der Strombedarf höher als die Stromerzeugung ist. Dabei entsteht Abwärme, die im Idealfall vor Ort oder über Wärmenetze als Gebäudewärme genutzt wird.[155]

Sowohl bei der Wasserelektrolyse als auch bei der Rückverstromung in Blockheizkraftwerken gibt es Umwandlungsverluste, die durch den technologischen Fortschritt zukünftig verringert werden. Der Wirkungsgrad für die Wasserelektrolyse wird für das Jahr 2040 wie bereits erwähnt zu 80 % und der für die Rückverstromung zu 56 % angenommen. Aus der Multiplikation beider Einzelwirkungsgrade lässt sich ein Gesamtwirkungsgrad von 44,8 % berechnen.

Es ist denkbar, dass die Speicherkapazität beim PtG-Verfahren zu gewissen Zeitpunkten mit hoher Stromerzeugung aus Wind- und Solarenergie nicht ausreicht. In dem Fall muss die Stromerzeugung durch Abregelung der WKA und PV-Anlagen gedrosselt werden. Nach der Erzeugung des Stroms wird dieser in das Stromnetz eingespeist, wo es zu Übertragungsverlusten kommt. Der Einspeisung vorangestellt wird häufig noch eine Kurzzeitspeicherung, die das Netz stabilisieren soll und ebenfalls verlustbehaftet ist. Beide Verluste belaufen sich auf einen Wert von 15,2 %.[156]

Die verfügbare Strommenge im Jahr 2040 resultiert damit aus der gesamten Stromproduktion abzüglich der Verluste des PtG-Verfahrens, der Stromspeicherung, der Einspeisung in das Netz und unter Berücksichtigung der ausfallenden Stromproduktion bei ggf. notwendiger Abregelung von WKA und PV-Anlagen.

[154] Vgl. *Deutsche Energie-Agentur GmbH,* 2018.
[155] Vgl. *Quaschning, V.,* 2016.
[156] Vgl. *Beck, H.-P./von Haaren, C.,* 2016.

4 Szenarien „Emsland 100 % Erneuerbare Energien“

Mehrere Möglichkeiten für das emsländische Energiesystem im Jahr 2040 sollen in dieser Arbeit mit dem Simulationstool 100prosim abgebildet werden. Dazu werden für die recherchierten Entwicklungen, die in Zukunft für Energieverbrauch und Erzeugung relevant sind, mehrere Szenarien entwickelt.

4.1 Systematik der Szenarioerstellung

Zur Übersichtlichkeit wird in Abbildung 7 kurz erläutert, nach welcher Systematik bei der Erstellung der Szenarien vorgegangen wird. Außerdem werden Begrifflichkeiten definiert.

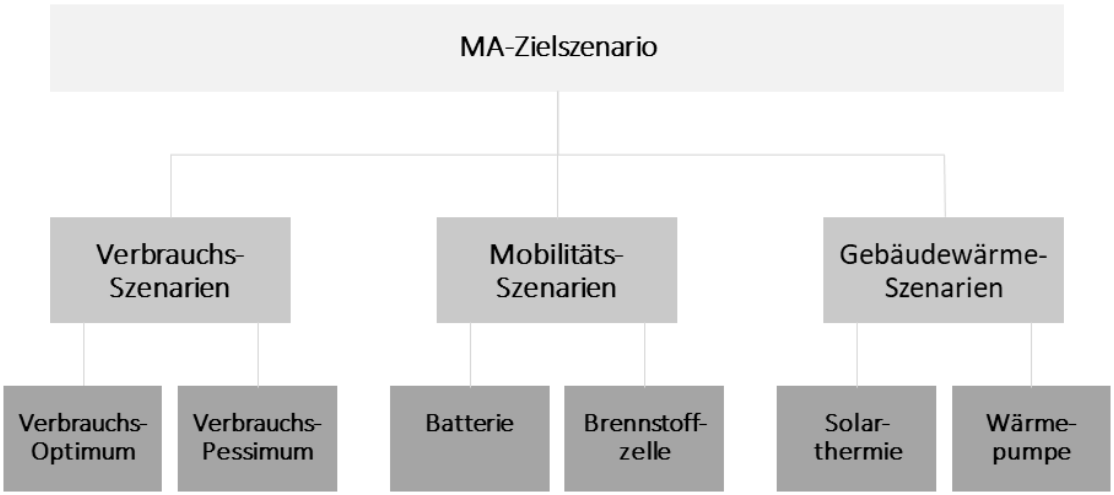

Abbildung 7: Systematik bei der Szenarioerstellung
Quelle: Eigene Darstellung.

Das Ausgangsjahr 2016, das den aktuellen Stand beschreibt, wird als Basisjahr bezeichnet. Das Betrachtungsjahr 2040, das bzgl. des Energieverbrauchs und der Energieerzeugung untersucht wird, wird Zieljahr genannt.

Die Szenarioerstellung folgt folgender Systematik: In Kapitel 3 werden wichtige Parameter für den Energieverbrauch und die Energieerzeugung recherchiert, die das Simulationstool 100prosim zur Szenariokalkulation benötigt. Da es sich bei den Parametern um Werte aus der Zukunft handelt, die aus Prognosen mit unterschiedlichen Annahmen entstammen, ergibt sich nicht ein Wert für einen Parameter sondern ein Wertebereich, wie aus Tabelle 3 hervorgeht.

Die Mittelwerte dieses abgebildeten Wertebereichs werden im Masterarbeits-Zielszenario (MA-Zielszenario) verwendet. Dieses Szenario stellt die Basis dar und

wird im nächsten Schritt modifiziert. Die Modifikationen spiegeln extreme Entwicklungen hinsichtlich des Energieverbrauchs, der Mobilität und der Gebäudewärmeversorgung wider und bilden einen Möglichkeitsraum für das Energiesystem der Solidarregion Emsland ab. Das Verbrauchs-Optimum-Szenario und das Verbrauchs-Pessimum-Szenario vergleichen ein besonders verbrauchsarmes mit einem eher verbrauchsintensiven Energiesystem. In den Mobilitätsszenarien wird untersucht, welche Antriebsform den Endenergieverbrauch deutlicher senken kann. Ein Mobilitätssektor, dessen Hauptantriebsform die Brennstoffzellentechnologie ist, wird dazu mit einem Sektor, der nur batteriebetriebene Fahrzeuge annimmt, verglichen. Weiterhin wird in den Gebäudewärmeszenarien eine solare Gebäudewärmeversorgung simuliert und mit der im MA-Zielszenario angenommenen Wärmebereitstellung durch Umgebungswärme in Kombination mit Wärmepumpen verglichen.

In der Gegenüberstellung der Szenarienergebnisse werden die Ausbaupfade der erneuerbaren Energien und der Speicherbedarf miteinander verglichen und Schlussfolgerungen abgeleitet.

4.2 Betrachtungsjahr

Mit Unterstützung der deutschen Bundesregierung wurde auf dem UN-Klimagipfel in Paris im Dezember 2015 ein völkerrechtlich bindendes Klimaabkommen ausgehandelt, mit dem Ziel, die globale Erwärmung auf 1,5 °C zu begrenzen. Wenn der Einsatz fossiler Brennstoffe und somit der Ausstoß von Treibhausgasen nicht drastisch reduziert wird, ist mit einem Anstieg der weltweit mittleren Temperatur um bis zu 5 °C bis zum Jahr 2100 zu rechnen. Die Folge wäre ein Meeresspiegelanstieg um einige Meter, der wiederum hunderte Millionen Menschen dazu zwingen wird, ihre Heimat zu verlassen. Die Situation ist aufgrund der riesigen Menschenmengen als Vielfaches dramatischer einzuschätzen als bei der Flüchtlingskrise 2015.[157]

Abbildung 8 zeigt die historische Veränderung und mögliche, zukünftige Entwicklungen des Klimas.

[157] Vgl. *Oxfam Deutschland e.V.*, 2016.

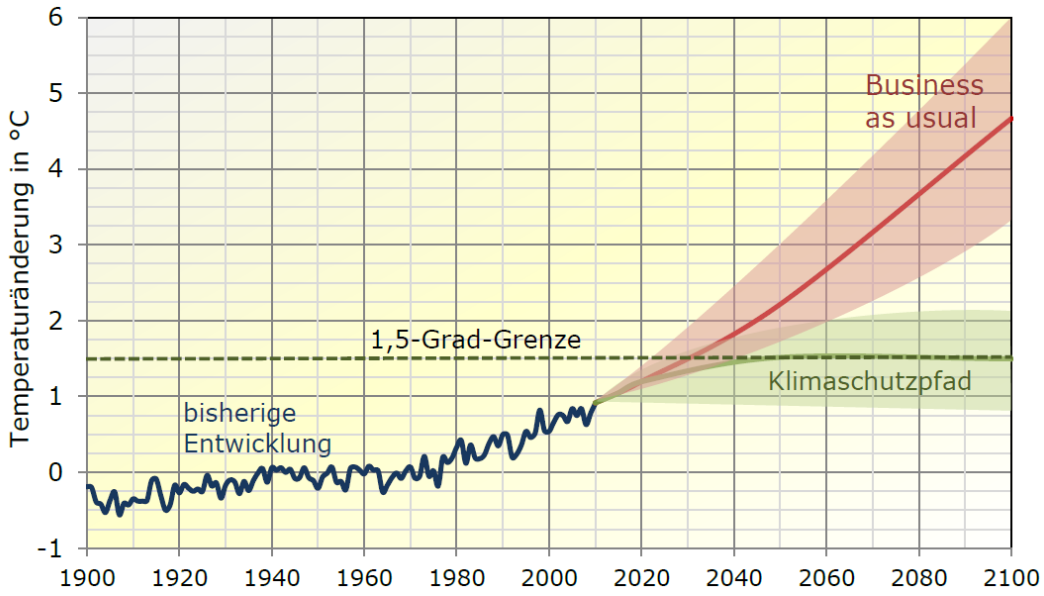

Abbildung 8: Mögliche Entwicklungen des Klimas[158]

Bisher ist die mittlere Temperatur im Vergleich zur vorindustrialisierten Zeit etwa um 1 °C angestiegen. Eine weitere Erhöhung auf die dem Klimaabkommen entsprechenden 1,5 °C sollte nicht vor dem Jahr 2040 erfolgen, um noch dem Klimaschutzpfad zu entsprechen. Die Konsequenz wäre weiterhin, dass ab diesem Zeitpunkt keine weiteren Treibhausgase durch Nutzung fossiler Energieträger mehr emittiert werden dürfen. Alternativ müssten die entstehenden THG-Emissionen durch sogenannte CCS-Verfahren (Carbon Dioxide Capture und Storage) aus der Atmosphäre entfernt werden. Diese Verfahren sind jedoch bisher sehr teuer und aufgrund der Frage nach einem Endlager sehr problematisch und stellen somit in Deutschland keine Option dar. Eine emissionsfreie und erneuerbare Energieversorgung ist deshalb bis zum Jahr 2040 zu erreichen.[159]

4.3 Energiesystem des Emslandes im Jahr 2040

Eine Möglichkeit für die Energieversorgung der Solidar-Region Emsland beschreibt das folgende MA-Zielszenario. Die Energieversorgung soll dabei ausschließlich durch erneuerbare Energien erfolgen. Zunächst wird der Energieverbrauch mit den getroffenen Annahmen für Effizienzsteigerungen berechnet, ehe ein Vergleich mit Energieverbrauchswerten aus anderen Potenzialstudien zur Überprüfung der Plausibilität vorgenommen wird. Anschließend wird dargestellt, aus welchen Anteilen

[158] Vgl. *Quaschning, V*. 2016.
[159] Vgl. *Quaschning, V*. 2016.

sich die Energieerzeugung im Jahr 2040 zusammensetzt und welche Energiequellen ausgebaut werden müssen. Daraus leitet sich eine Notwendigkeit zur Sektorkopplung ab, deren Optionen weiterführend diskutiert werden.

4.3.1 Energieverbrauch im Jahr 2040

Die zuvor recherchierten Parameter werden von 100prosim zur Simulation des Energieverbrauchs im Jahr 2040 verwendet. Die Tabelle 3 enthält dabei für die Parameter einen Wertebereich von einem minimalen bis zu einem maximalen Wert, da der Energieverbrauch der Zukunft nicht verlässlich prognostiziert werden kann. Bei mit Sternchen markierten Parametern wurde der Wertebereich um einen recherchierten Durchschnittswert herum festgelegt. Die Durchschnittswerte werden im MA-Zielszenario verwendet und die Werte der anderen beiden Spalten je für das Verbrauchs-Optimum- und das Verbrauchs-Pessimum-Szenario. Im Anschluss sollen die Ergebnisse interpretiert und die Plausibilität des simulierten Energieverbrauchs überprüft werden.

Tabelle 3: Parameter für den Energieverbrauch
Quelle: Eigene Darstellung.

Parameter	Einheit	Statusjahr 2016	Zieljahr 2040		
			MA-Zielszenario	Verbrauchs-Optimum	Verbrauchs-Pessimum
Bevölkerung und Wirtschaft					
Bevölkerungszahl		665.511	676.159	650.870	701.449
Wachstum des BIP/Kopf	[%/a]	2,8	0,88	0,63	1,13
Dienstleistungsanteil am BIP/Kopf	[%]	63,9	67,5	65	70
KLIK					
Energieverbrauch nach Effizienzsteigerungen der Stromanwendungen in den Haushalten*	[%]	100	75	70	80
Energieverbrauch nach Effizienzsteigerungen der Stromanwendungen im Industrie- und Dienstleistungsbereich*	[%]	100	80	75	85
Dienstleistungsvolumen*	[%]	100	132	128	136
Produktionsvolumen*	[%]	100	126	122	130
Gebäudewärme					
Wohnfläche/Kopf	[m2]	52,8	58,9	57,6	60,2
Erwerbstätigkeit	[%]	100	94	94	94
Sanierungsrate	[%/a]	1	1,9	2,4	1,4
Raumwärmebedarf	[kWh/m^2/a]	125	65	45	85
Warmwasserbedarf*	[%]	100	86	81	91
Gebäudewärme aus biogenen Brennstoffen	[%]	79	1	1	1

Parameter	Einheit	Statusjahr 2016	Zieljahr 2040		
			MA-Zielszena-rio	Ver-brauchs-Optimum	Ver-brauchs-Pessimum
Prozesswärme					
Produktionsvolumen*	[%]	100	126	122	130
Energieverbrauch nach Effizienz-steigerungen der Stromanwendun-gen in den Haushalten*	[%]	100	86	81	91
Energieverbrauch nach Effizienz-steigerungen der Stromanwendun-gen im Industrie- und Dienstleis-tungsbereich*	[%]	100	83	78	88
Prozesswärme aus Hochtempera-turwärme	[%]	11	0	0	0
Mobilität					
Personenverkehrsleistung	[%]	100	103,4	100	106,7
Elektromotoren im Personenverkehr	[%]	0,06	66	71	61
Verbrennungsmotoren im Perso-nenverkehr	[%]	99,94	34	29	39
Güterverkehrsleistung*	[%]	100	122	117	127
Elektromotoren im Güterverkehr	[%]	1,6	66	71	61
Verbrennungsmotoren im Güterver-kehr	[%]	98,6	34	29	39
Brennstoffzellen im Personen und Güterverkehr	[%]	0	0	0	0
Luftverkehrsleistung	[%]	100	103,4	100	106,7
Energieverbrauch nach Vermindе-rung des Kraftstoffverbrauchs im Flugverkehr*	[%]	100	80,2	75,2	85,2
Wirkungsgrad der Elektromotoren	[%]	90	95	95	95
Wirkungsgrad der Verbrennungs-motoren	[%]	35	35	35	35
Grundstoffe					
Kunststofferzeugung/Kopf	[%]	100	105	70	140

Die simulierten Endenergieverbräuche des Basisjahres 2016 und des Zieljahres 2040 werden, bezogen auf die genutzten Energieformen Strom, Brenn- und Kraftstoffe und Wärme, in Abbildung 9 dargestellt.

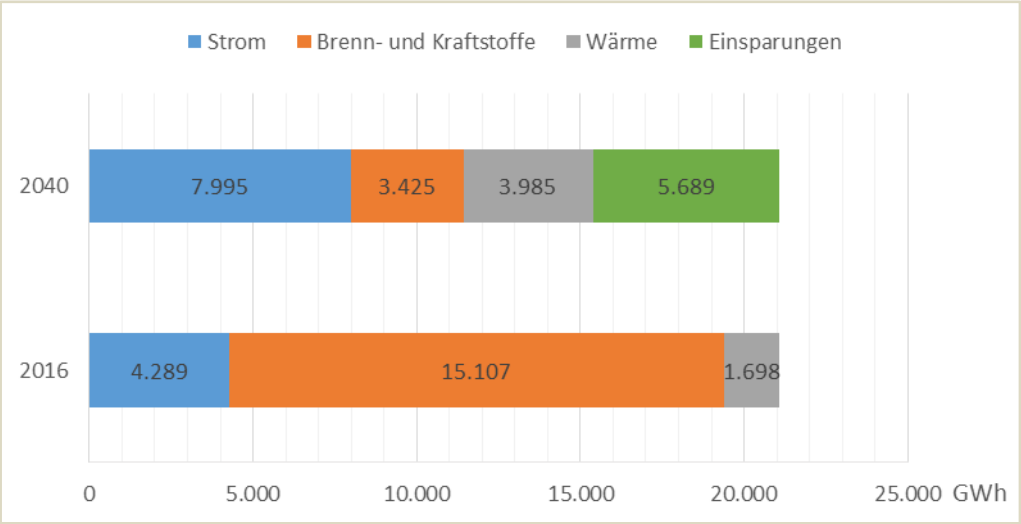

Abbildung 9: Endenergieverbrauch nach Energieformen von 2016 und 2040
Quelle: Eigene Darstellung.

Insgesamt sinkt der Endenergieverbrauch entsprechend der Simulation von 21.094 GWh im Jahr 2016 auf 15.405 GWh im Jahr 2040 um insgesamt 27 %.

Es ist deutlich zu erkennen, dass der Anteil von Strom am Endenergieverbrauch von 4.289 GWh auf 7.995 GWh zunimmt, während der Anteil von Brenn- und Kraftstoffen sich fast auf ein Fünftel reduziert und der Anteil an Wärme von 1.698 GWh auf 3.985 GWh steigt. Fossile Energieträger werden nicht mehr verwendet und die absoluten Energieeinsparungen betragen 5.689 GWh. Während im Jahr 2016 Brenn- und Kraftstoffe die wichtigste Energieform ist, kommt Strom im Jahr 2040 mit dem größten Anteil am Energiebedarf die wichtigste Rolle zu.

Die demographische Entwicklung ist mit einer leichten Zunahme der Bevölkerung um 1,6 % im Jahr 2040 nahezu auf einem gleichbleibenden Niveau. Innerhalb der Bevölkerung lassen sich ein Anstieg des Durchschnittsalters und damit ein Rückgang erwerbstätiger Menschen erkennen, der als demographischer Wandel bezeichnet wird.[160]

Die Wirtschaft wird weiter wachsen, was durch die jährliche Steigerung des Bruttoinlandproduktes pro Kopf von 0,88 % zum Ausdruck gebracht wird. Der Dienstleistungsbereich, der im Jahr 2040 einen leicht gestiegenen Anteil von 67,5 % am BIP pro Kopf ausmacht, wird dadurch auf 132 % zunehmen, was entsprechend auch für das Dienstleistungsvolumen pro Kopf gilt. Der Industriebereich sowie das Produktionsvolumen pro Kopf werden auf 126 % ansteigen.

[160] Vgl. *Buchert, M.*, 2017.

Die Veränderung des Endenergieverbrauchs von 2016 bis 2040 in den einzelnen Verbrauchssektoren KLIT, Gebäudewärme, Prozesswärme und Mobilität wird in Abbildung 10 veranschaulicht. Nachfolgend sollen die Ergebnisse mit Bezug auf Kapitel 3.1 interpretiert werden.

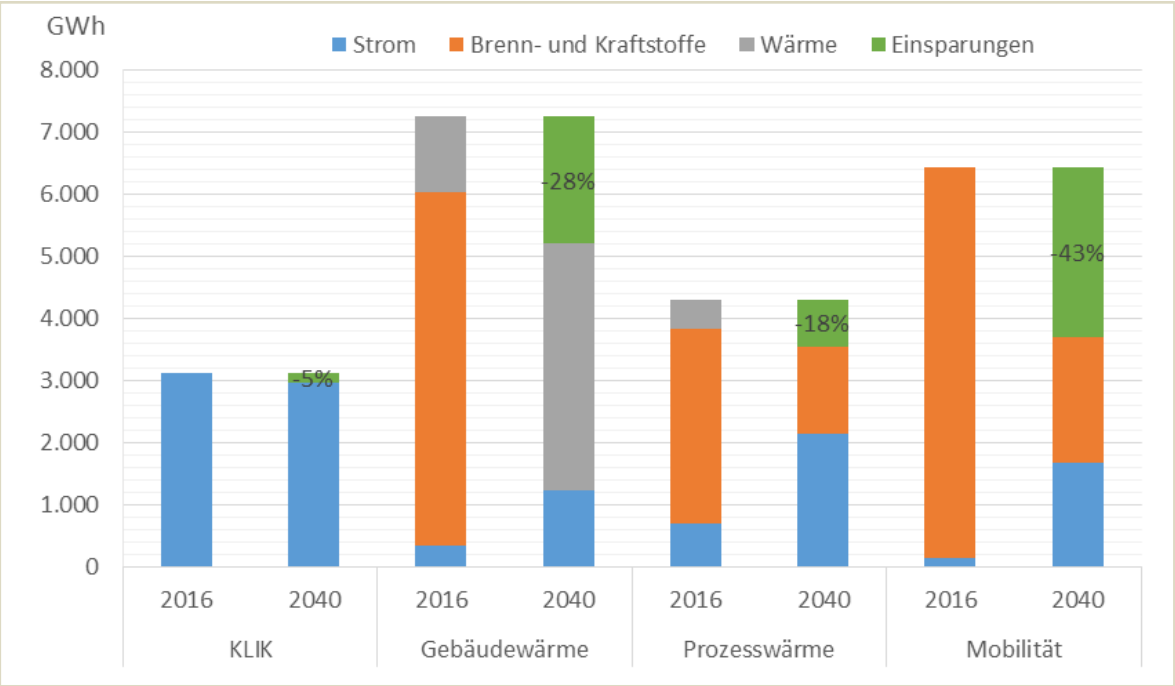

Abbildung 10: Endenergieverbrauch nach Sektoren von 2016 und 2040
Quelle: Eigene Darstellung.

In dem Sektor KLIK wird der Endenergieverbrauch bis zum Jahr 2040 um 5 % sinken. Dieses Ergebnis ist dadurch zu erklären, dass elektrische Geräte im Haushalt, der Industrie und dem Handel zwar etwa um 20 bis 25 % effizienter werden, aber gleichzeitig die Produktions- und Dienstleistungsvolumina zunehmen, was für sich betrachtet einen Mehrverbrauch zur Folge hat.[161] Der Einspareffekt der Effizienzfortschritte wird dadurch vermindert.

Im Sektor Gebäudewärme kann der Endenergieverbrauch um 28 % reduziert werden. Hier werden die Einsparungen durch Effizienzgewinne bei der Wärmeerzeugung bedingt durch den zukünftig prognostizierten Anstieg der Wohnfläche pro Kopf und durch die Bevölkerungszunahme und der damit verbundenen Zunahme von Haushalten begrenzt. Die Zahl der Erwerbstätigen wird vermutlich sinken, während gleichzeitig mehr Möglichkeiten zur Tätigkeit im Homeoffice geboten werden, weshalb insgesamt eine Verschiebung des Energiebedarfs vom Industrie- zum Haushaltssektor zu erwarten ist. Durch eine jährliche Sanierungsrate von 1,9 % kann der

[161] Vgl. *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit,* 2016.

Raumwärmebedarf von 125 kWh pro m^2 und Jahr auf 65 kWh pro m^2 und Jahr nahezu halbiert werden sowie der Warmwasserverbrauch um ca. 14 % gesenkt werden.[162] Die Gebäudewärme, die im Jahr 2016 noch zu 78,5 % durch hauptsächlich fossile Brennstoffe gedeckt wird, wird im Jahr 2040 vorrangig durch Umgebungswärme und zu einem geringfügigen Anteil durch Solarthermie gedeckt. Die Umgebungswärme wird dabei durch strombetriebene Wärmepumpen auf ein nutzbares Temperaturniveau gebracht.

Das Simulationstool berechnet im Sektor Prozesswärme eine Verbrauchsminderung von 18 % gegenüber dem Jahr 2016. Ursächlich dafür sind vor allem die Effizienzsteigerungen der Wärmeanwendungen in diesem Sektor, wobei durch die Zunahme des Produktionsvolumens um 26 % ein Mehrverbrauch entsteht. Die Erzeugung der Prozesswärme wird zu etwa 60 % durch erneuerbaren Strom und zu 40 % durch den Einsatz biogener statt fossiler Brennstoffe ermöglicht, sodass auf Wärme als Energiequelle verzichtet werden kann.[163] Die Deckung der Prozesswärme durch elektrische Energie ist ab Temperaturen von 140 °C ineffizient, wobei über 60 % der industriellen Prozesswärme Temperaturen über 200 °C benötigt (vgl. Kapitel 3.1.5). Ein höherer Deckungsanteil durch biogene Brennstoffe wird deshalb erwartet. Die Erklärung für den hohen Deckungsanteil durch elektrische Energie ist, dass im Mobilitätssektor ein erheblicher Teil des Energiebedarfs durch biogene Kraftstoffe gedeckt werden muss, da die Elektrifizierung des Verkehrs bis 2040 nicht vollständig erreicht wird. Der Energiebedarf für Prozesswärmesektor kann entsprechend in geringerem Maß durch biogene Brennstoffe gedeckt werden.

Der Umstieg von fossiler Wärmeerzeugung für Industrie-, Gewerbe- und Wohngebäude auf eine erneuerbare Wärmeerzeugung wird als Wärmewende bezeichnet und gilt als Schlüssel für den Erfolg der Energiewende.[164]

Im Sektor Mobilität können bis zum Jahr 2040 43 % der Energie eingespart werden. Das Simulationstool ermöglicht keine Technologieoffenheit bei der Energiebedarfsdeckung in diesem Sektor, sodass die Fortbewegung im MA-Zielszenario sich zu 66 % auf batteriebetriebene Elektrofahrzeuge, Hybridfahrzeuge und zu 34 % auf Fahrzeuge mit durch Biokraftstoff angetriebenen Verbrennungsmotoren stützt. Die

[162] Vgl. *Walter, A./Wiehe, J.*, 2018.
[163] Vgl. *Gerbert, P./Herhold, P*., 2018.
[164] Vgl. *Fraunhofer IWES/IBP,* 2017.

Brennstoffzelle findet als Antriebstechnologie keine Anwendung. Das steigende Produktionsvolumen und die zunehmende Tendenz zum Onlinehandel sorgen dafür, dass sich die Güterverkehrsleistung pro Kopf bis zum Jahr 2040 um 22 % erhöhen wird.[165] Die Personenverkehrsleistung und die Luftverkehrsleistung sollen auf 103,4 % zunehmen.[166] Neben einer Verbesserung der Effizienz der Antriebstechniken ist eine Verlagerung des Verkehrs auf öffentliche Verkehrsmittel oder das Fahrrad nötig, um den Energieverbrauch im Mobilitätssektor zu senken. In ländlichen Regionen, zu denen auch das Emsland gehört, stellt diese Verkehrswende eine besondere Herausforderung dar (vgl. Kapitel 3.1.6). Der motorisierte Individualverkehr wird trotzdem angetrieben durch Geschwindigkeitsbegrenzungen und eingerichtete PKW-freie Zonen reduziert.[167]

Technische Verbesserungen von Antriebstechnik und Fahrzeugen allgemein werden sich ebenfalls positiv auf den Energieverbrauch auswirken. Aufgrund des dreifach höheren Wirkungsgrades gegenüber Verbrennungsmotoren sind batteriebetriebene Elektrofahrzeuge die effizienteste Form der Fortbewegung. Eine vollständige Elektrifizierung des Personen- und Güterverkehrs ist nach aktueller Studienlage und aufgrund des sehr geringen Anteils zugelassener Elektrofahrzeuge im Emsland von weniger als 1 % im Jahr 2016 bis zum Jahr 2040 aber unwahrscheinlich. Ein Anstieg des Anteils elektrifizierter Fahrzeuge auf 66 % bei der Personen- und Güterbeförderung wird erwartet, wobei dieser mehrheitliche Anteil trotzdem nur 45 % der sektorspezifischen Energie verbraucht (vgl. Abbildung 10, S.52). Die Elektrifizierung des Luftverkehrs stellt aus den in Kapitel 3.1.6 genannten Gründen keine Option dar. Im Luftraum und bei den nicht elektrifizierten Fahrzeugen kommen vor allem biogene und auch aus Wasserstoff synthetisierte Flüssigkraftstoffe zum Einsatz. Die Brennstoffzellentechnologie findet in diesem MA-Zielszenario keine Anwendung, da 100prosim eine parallele Nutzung von Brennstoffzelle, Batterietechnik und Verbrennungsmotortechnik nicht zulässt. Die Batterietechnik kann nur mit einem von beiden Antriebskonzepten kombiniert werden. Der deutlich höhere Anschaffungspreis von Brennstoffzellenfahrzeugen ist der Hauptgrund, warum die Kombination aus Fahrzeugen mit Elektroantrieb und Verbrennungsmotor die wahrscheinlichere Kombination ist (vgl. Kapitel 3.1.6).[168] Der Sektor Verkehr kann bis

[165] Vgl. *Umweltbundesamt*, 2016.
[166] Vgl. *Blanck, R./ Zimmer, W.*, 2016.
[167] Vgl. *Agora Verkehrswende,* 2017:
[168] Vgl. *Umweltbundesamt*, 2016.

zum Jahr 2040 durch den Einsatz von biogenen Kraftstoffen und erneuerbar erzeugtem Strom gegenüber dem Jahr 2016, in dem fossile Energieträger nahezu die komplette Energie erzeugen, dekarbonisiert werden.

4.3.2 Validierung des Energieverbrauchs

Zur Überprüfung der Plausibilität des Energieverbrauchs im Zieljahr wird dieser mit Energieverbrauchswerten aus anderen Literaturszenarien verglichen. Da diese sowohl andere Regionen und damit auch eine andere Bevölkerungszahlen als auch teilweise andere Zieljahre betrachten, kann kein direkter Vergleich stattfinden. Die Energieverbräuche können jedoch verglichen werden, indem eine Interpolation der Verbrauchswerte vorgenommen wird, mit der der Energieverbrauch für das Jahr 2040 bestimmt werden kann. Es wird dazu vereinfachend angenommen, dass der Verbrauch linear vom Basisjahr bis zum Zieljahr sinkt. Gleichzeitig wird statt des absoluten Energieverbrauchs pro Jahr der Energieverbrauch pro tausend Einwohner und Jahr betrachtet, um die regionalen Bevölkerungsunterschiede unerheblich zu machen.

Abbildung 11 zeigt den Vergleich der spezifischen Energieverbräuche aus den Literaturszenarien mit dem MA-Zielszenario. Der Mittelwert für den spezifischen Energieverbrauch der Literaturszenarien liegt bei 23,97 GWh pro Jahr und 1.000 Einwohner. Der Wert aus dem MA-Zielszenario liegt bei 22,8 GWh pro Jahr und 1.000 Einwohner. Beide Werte liegen also dicht beieinander, sodass der errechnete Energieverbrauch des MA-Zielszenarios als plausibel bezeichnet werden kann.

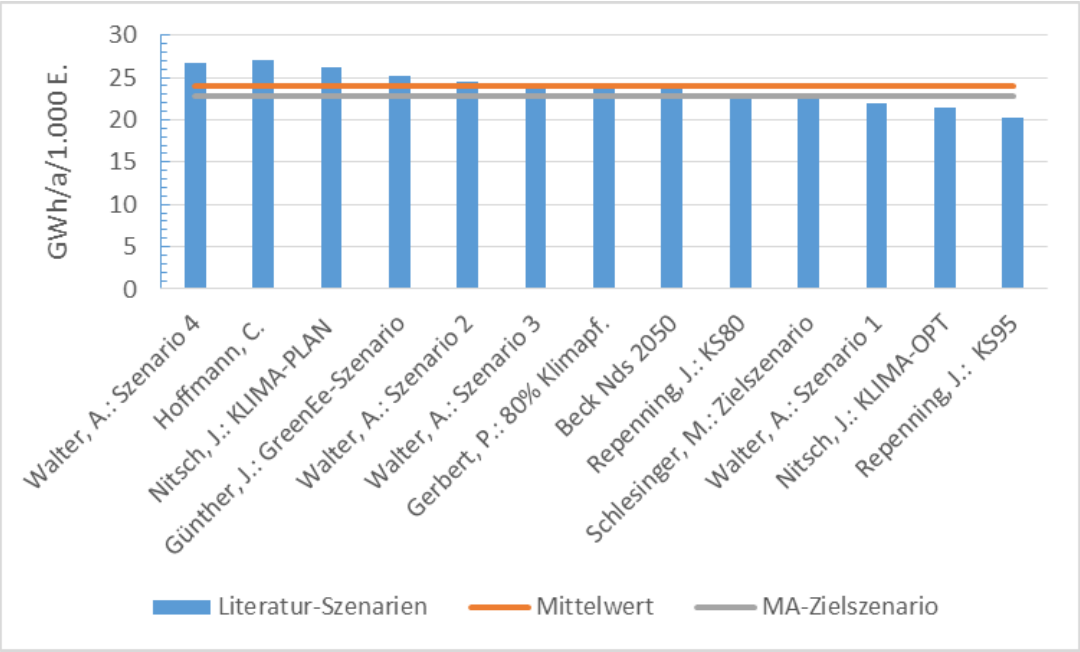

Abbildung 11: Validierung des errechneten Energieverbrauchs im Jahr 2040
Quelle: Eigene Darstellung.

Der errechnete Endenergieverbrauch des MA-Zielszenarios liegt insgesamt unterhalb des Durchschnittswertes, was daraufhin deutet, dass die getroffenen Annahmen bezüglich Effizienzsteigerungen und anderer verbrauchsmindernder Parameter ambitionierter sind, als die meisten anderen Literaturszenarien vermuten. Ein vergleichbares Verbrauchsniveau haben das Szenario KS80 von J. Repenning und das Zielszenarios von M. Schlesinger.[169] [170]

4.3.3 Energieerzeugung im Jahr 2040

Für die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende im Emsland müssen nicht nur der Energieverbrauch reduziert, sondern auch erneuerbare Energiequellen ausgebaut werden. In Kapitel 4.3.1 wird aufgezeigt, dass der Energieverbrauch durch die Optimierung vorhandener Technologien und durch die Substitution ineffizienter mit effizienteren Prozessen wesentlich verringert werden kann. Der Ausbau der erneuerbaren Energien erfordert gleichzeitig den Ausbau der Stromnetzinfrastruktur und die Erschließung und Implementierung neuer Energiewandlungs- und Speicherkapazitäten. Die Parameter der Energieerzeugung werden in nachfolgender Tabelle mit Bezug auf das Statusjahr 2016 und das Zieljahr 2040 dargestellt.

[169] Vgl. *Repenning, J./Braungardt, S.,* 2015.
[170] Vgl. *Schlesinger, M.*, 2014.

Tabelle 4: Parameter für die Energieerzeugung im MA-Zielszenario
Quelle: Eigene Darstellung.

Parameter	Einheit	Statusjahr 2016	Zieljahr 2040
Solarthermie			
Anteil mit Solarthermie ausgestatteter Dachflächen	[%]	4	0,6
Spez. Energieertrag der Solarthermie-Dachanlagen	[MWh/ha/a]	3713	5000
Solarstrom			
Anteil mit PV ausgestatteter Dachflächen	[%]	96	99,4
Spez. Energieertrag der PV-Dachanlagen	[MWh/ha/a]	1206	1688
Spez. Energieertrag der PV-Freiflächenanlagen	[MWh/ha/a]	365	512
Volllaststunden	[h/a]	844	844
Onshore-Windenergie			
Spez. Flächenbedarf	[ha/MW]	3,82	3,67
Volllaststunden	[h/a]	2069	2621
Wasserkraft			
Potenzialausschöpfung	[%]	71,7	71,7
Spez. Energieertrag der Wasserkraftwerke	[MWh/ha/a]	0,003	0,003
Feste biogene Brennstoffe			
Energetisch genutzter Teil des Holzaufkommens	[%]	46,7	44,4
Spez. Energieertrag des Energieholzes a. d. Forstwirtschaft	[MWh/ha/a]	24,6	25,3
Spez. Energieertrag des Energieholzes a. d. Ackerbau	[MWh/ha/a]	29,9	51,4
Energetisch genutzter Teil des Strohaufkommens	[%]	0	20
Spez. Energieertrag des Strohs	[%]	23,8	23,8
Energetisch genutzte feste biogene Abfallstoffe	[GWh/a]	141	141
Feste biogene Brennstoffe für Gebäudewärme	[%]	50,2	0
Feste biogene Brennstoffe für Prozesswärme	[%]	15,4	100
Feste biogene Brennstoffe zur Verstromung	[%]	34,4	0
Flüssige biogene Brennstoffe			
Spez. Energieertrag von Biodiesel	[MWh/ha/a]	14,4	11,5
Bioethanolnutzung	[%]	100	0
Flüssige biogene Brennstoffe für Mobilität	[%]	95,3	100
Flüssige biogene Brennstoffe zur Verstromung	[%]	4,7	0
Gasförmige biogene Brennstoffe			
Spez. Energieertrag Methan	[MWh/ha/a]	54,2	43,4
Biogas aus Abfall- und Reststoffen	[GWh/a]	344	689
Biogas aus Kläranlagen und Deponien	[GWh/a]	19	19
Biogas für Mobilität	[%]	0,6	70,9
Biogas für Prozesswärme	[%]	0	28,8
Biogas zur Verstromung	[%]	99,4	0
Umgebungswärme			
Anteil Wärmepumpen mit Luftkopplung	[%]	45,7	65
JAZ der Wärmepumpen mit Luftkopplung		2,8	3,5
Anteil Wärmepumpen mit Wasser- und Erdkopplung	[%]	54,3	35
JAZ der Wärmepumpen mit Wasser- und Erdkopplung		3,4	4,4
Tiefengeothermie			
Netzanschlussleistung	[MW]	0	3

Parameter	Einheit	Statusjahr 2016	Zieljahr 2040
Volllaststunden	[h/a]	0	8500
Elektrische Nutzung	[%]	0	10
Abwärmenutzung	[%]	0	100
Stromwandlung- und speicherung			
Wirkungsgrad der Methansynthese	[%]	0	83
Wirkungsgrad der Flüssigkraftstofferzeugung	[%]	0	63
Wirkungsgrad der Wasserelektrolyse	[%]	0	80
Wirkungsgrad der Langzeitstromspeicherung	[%]	0	37,7
Anteil Abwärmenutzung	[%]	0	12,7
Übertragungsverluste Stromnetz und Kurzzeitspeicher	[%]	5,2	15,2

Anzumerken ist, dass die Energieerzeugung aus Offshore-Windkraft im Emsland nicht vorhanden ist. Dadurch müssen Onshore-WKA und PVF in größerem Maß zur Deckung des Energieverbrauchs beitragen.

Der Endenergieverbrauch nach Energiequellen ist in Abbildung 12 dargestellt.

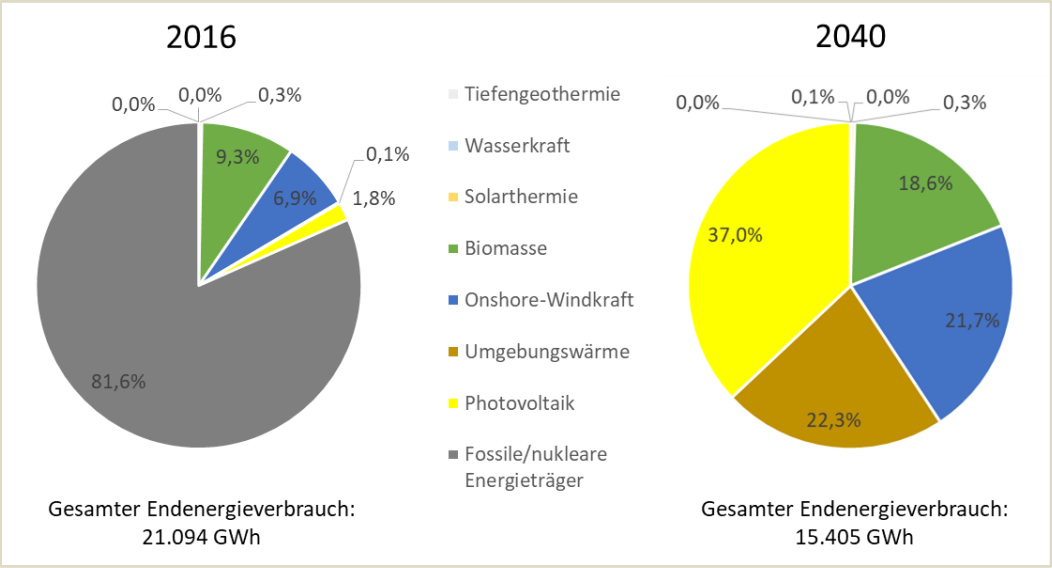

Abbildung 12: Endenergieerzeugung nach Energiequellen in 2016 und 2040
Quelle: Eigene Darstellung.

Es ist ersichtlich, dass PV im Jahr 2040 mit 37 % den größten Anteil an der Endenergieerzeugung hat. Den zweitgrößten Deckungsbeitrag liefert mit 22,3 % Umgebungswärme, die über Wärmepumpen nutzbar gemacht wird. Windenergie und Biomasse sind ebenfalls mit 21,7 und 18,6 % wichtige Energieerzeugungstechnologien, während Tiefengeothermie mit 0,1 % und Solarthermie mit 0,3 % kaum Anwendung finden und Wasserkraft einen vernachlässigbar kleinen Beitrag leistet. Auf den Einsatz von fossiler und nuklearer Energieerzeugung wird komplett verzichtet, während dieser Anteil im Jahr 2016 noch 81,6 % betrug. Dazu ist anzumerken, dass

der Anteil fossiler Energien im Jahr 2016 deshalb so groß ist, weil hierbei das Solidarprinzip angewendet wurde, nach dem mehr als doppelt so viele Menschen mit Energie versorgt werden müssen (vgl. Kapitel 2.4). Diese Verdopplung des Energiebedarfs kann in der Simulation nur durch fossile bzw. nukleare Energie gedeckt werden, weshalb ihr Anteil deutlich größer ist als er eigentlich im deutschen Energiemix von 2016 war.[171]

Aus dieser Abbildung wird deutlich, dass die erneuerbaren Energien bis zum Jahr 2040 noch ausgebaut werden müssen, worauf im Folgenden eingegangen wird.

4.3.4 Ausbau der erneuerbaren Energien

Die Simulation mit den Eingaben zu Energieverbrauch und -erzeugung liefert die Endenergiemengen der verschiedenen Erzeugungstechnologien im Zieljahr, die in diesem Abschnitt mit dem Statusjahr verglichen werden, um den Ausbau der erneuerbaren Energiequellen zu verdeutlichen.

In Abbildung 13 ist die durch erneuerbare Energien erzeugte Endenergie aus den Jahren 2016 und 2040 dargestellt. Aus der Differenz zwischen beiden Werten ergibt sich die jeweilige Ausbaumenge.

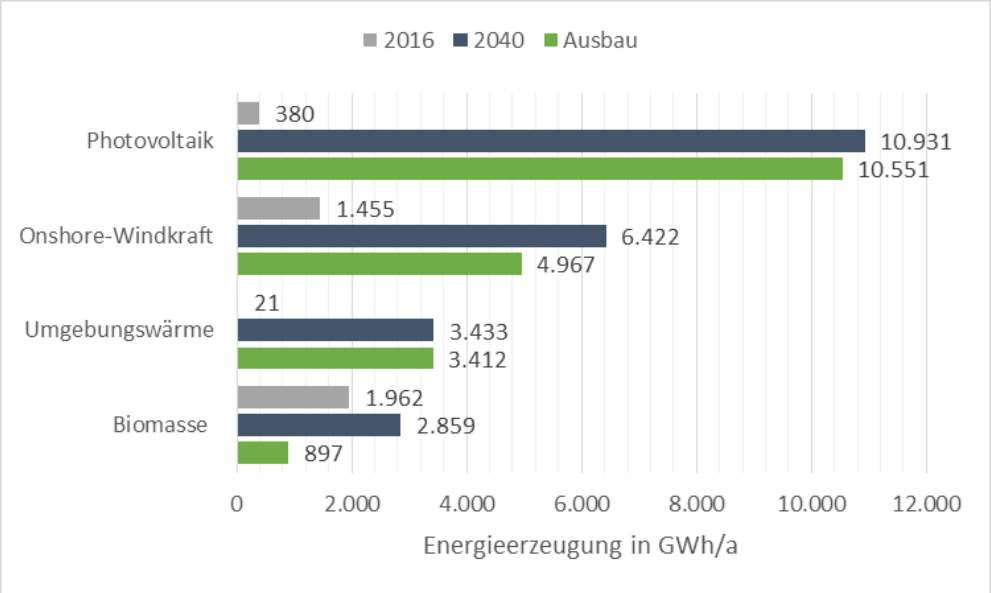

Abbildung 13: Notwendiger Ausbau der erneuerbaren Energien von 2016 bis 2040
Quelle: Eigene Darstellung.

Der flächenbezogene Ausbau der erneuerbaren Energien ist in Abbildung 14 dargestellt.

[171] Vgl. *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie,* 2018.

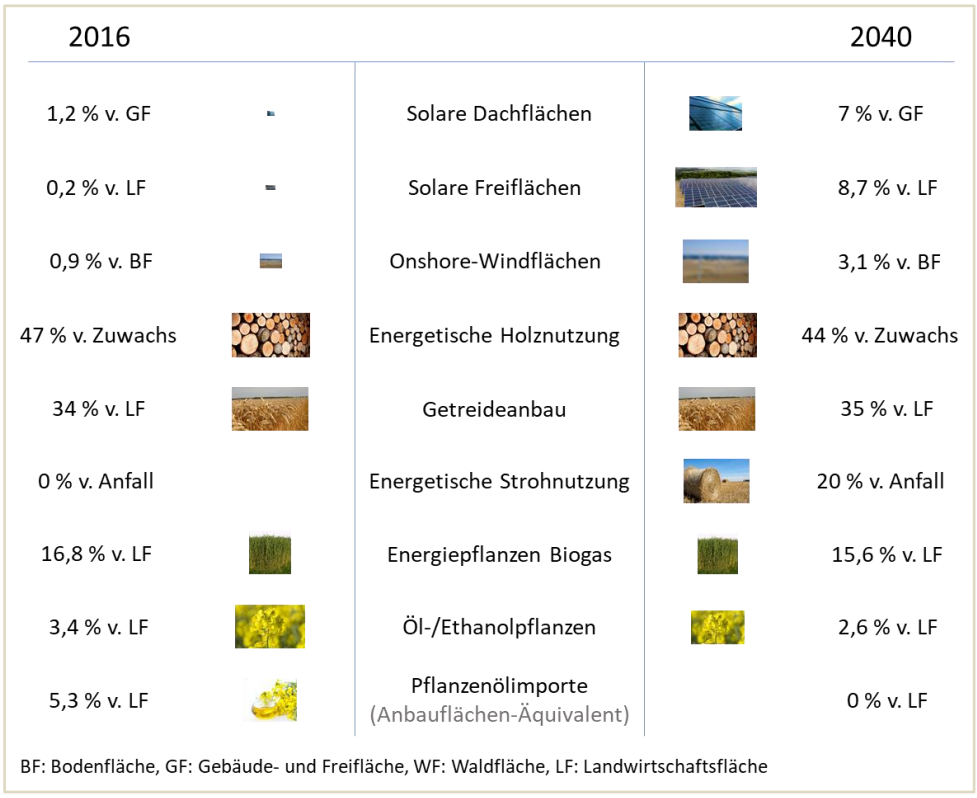

Abbildung 14: Energetische Flächennutzung in 2016 und 2040
Quelle: Eigene Darstellung.

Auf den Ausbau von Tiefengeothermie wird weitestgehend verzichtet, da Kosten und Risiken der Bohrungen zu hoch sind. Es wird angenommen, dass nur das Geothermiekraftwerk aus Heede/Dersum fertiggestellt wird (vgl. Kapitel 3.3.6).

Von einer zusätzlichen Nutzung von Wasserkraft zur Energieerzeugung wird ebenfalls abgesehen, da dessen Beitrag zur Energieerzeugung vergleichsweise gering und ihr Potenzial in Deutschland weitestgehend ausgeschöpft ist und ein Eingriff in die sensiblen Ökosysteme der Wasserläufe deshalb nicht verhältnismäßig erscheint.[172]

Der Ausbau von Solarthermie ist gleichermaßen nicht vorgesehen, da für die Bereitstellung von Gebäudewärme die Kombination aus Wärmepumpe und PV bzw. WKA insgesamt vorteilhafter ist, da diese an kalten Tagen effizienter Wärme liefern kann , da sie geringere Bereitstellungsverluste aufweist.[173] Außerdem ist PV in Zukunft besonders wichtig für die Stromproduktion, weshalb die Dachflächen mit dieser Technologie bestückt werden.

[172] Vgl. *Blanck, R./ Zimmer, W.*, 2016.
[173] Vgl. *Beck, H.-P./von Haaren, C.*, 2016.

Die Nutzung von Biomasse wird ausgebaut, da vor allem im Sektor der Mobilität mehr erneuerbare Kraftstoffe benötigt werden, weil dieser nicht vollständig elektrifiziert werden kann (vgl. Abbildung 10, S. 52). Der Teil, der nicht elektrifiziert werden kann, wird durch synthetische Kraftstoffe mit Energie versorgt, die wiederum den in der Biomasse enthaltenen Kohlenstoff zur Herstellung benötigen. Außerdem ist Biomasse bedeutend für die Deckung des Prozesswärmebedarfs. Als biogener Kraftstoff bzw. Brennstoff soll in der Zukunft vor allem Biogas eingesetzt werden, das einen etwa viermal so großen spez. Energieertrag wie Biodiesel und einen dreimal so großen spez. Energieertrag wie Bioethanol hat (vgl. Tabelle 4). Die Anbauflächen für Energiepflanzen sollen deshalb auch fast ausschließlich für die Erzeugung von Biogas genutzt werden, wobei die Anbaufläche leicht von 16,8 % auf 15,6 % der Landwirtschaftsfläche reduziert wird. Die Verkleinerung der Anbaufläche ist nötig, da hier ein Teil der PVF platziert werden soll. Der größere spez. Energieertrag von Biogas ist ein Grund dafür, dass entsprechend Abbildung 13 die Energieproduktion aus Biomasse um 897 GWh ausgebaut werden kann, wobei gleichzeitig die Flächennutzung für Biomasse gemäß Abbildung 14 leicht reduziert werden kann. Eine weitere Reduzierung der Anbaufläche wird durch die zukünftige energetische Nutzung von Getreidestroh erreicht, die einen Rückgang der energetischen Holznutzung und der damit verbundenen Anbaufläche möglich macht. Getreidestroh kann den festen biogenen Brennstoff Holz ersetzen, wodurch mehr Waldfläche zugunsten der Naturwaldentwicklung entsteht.

Der Ausbau der Onshore-Windkraft um 4.967 GWh ist zur Deckung des Strombedarfs nötig. Dazu wird die Windparkfläche von 0,9 % der Bodenfläche bzw. 2.697 ha auf 3,1 % der Bodenfläche bzw. 9.000 ha vergrößert. In Deutschland liegt das technische Flächenpotenzial für Windkraft bei 13,8 % der Bodenfläche, wobei das im Jahr 2016 umsetzbare Potenzial aufgrund von ökologischen Einzelfallbetrachtungen, wirtschaftlichen Restriktionen, anders gesetzten Entwicklungszielen für Gebiete und mangelnder Akzeptanz von Flächeneigentümern und Anwohnern nur 1,7 % der Bodenfläche beträgt (vgl. Kapitel 3.3.2).[174] Auch das Raumordnungsprogramm von 2010 des Landkreises Emsland legt lediglich eine Fläche von maximal 4.389 ha für Windenergienutzung fest.[175] Der für das MA-Zielszenario festgelegte Ausbau bis 2040 überschreitet beide im Jahr 2016 geltenden Grenzwerte für die

[174] Vgl. *Lütkehus, L./Salecker, H./Adlunger, K.*, 2013.
[175] Vgl. *Landkreis Emsland,* 2015.

maximale Flächennutzung. Es wird davon ausgegangen, dass sich diese Grenzwerte bzw. das umsetzbare Flächenpotenzial in Zukunft erhöhen, da sich die Onshore-Windkraft in Zukunft durch technische Lösungen besser mit dem Natur- und Artenschutz kombinieren lässt. Weiterhin wird die Errichtung und der Betrieb der Anlagen wirtschaftlich ertragreicher werden und die Akzeptanz bei den Menschen steigen, sodass insgesamt ein Zubau über die Grenze des heutigen Potenzials möglich wird. Die gesellschaftliche Akzeptanz innerhalb der Bevölkerung ist in einer Umfrage des Meinungsforschungsinstitutes Forsa überprüft worden. Dort wurde festgestellt, dass 80 % der Deutschen die Nutzung und den Ausbau der Windkraft wichtig oder sehr wichtig finden.[176] Es ist ebenfalls anzumerken, dass dem Emsland keine Offshore-WKA zur Verfügung stehen, deren flächenmäßigen Energieerträge deutlich höher sind als die von Onshore-WKA.[177] Dadurch ist ein verstärkter Ausbau von Onshore-Windkraft notwendig.

Mit einem Deckungsanteil von 22,3 % vom Endenergieverbrauch ist die Umgebungswärme die zweitwichtigste Energieerzeugungsquelle im Zieljahr 2040. Sie wird der Luft und dem oberflächennahen Erdreich entzogen und durch Wärmepumpen für die Gebäudewärmeversorgung nutzbar gemacht. Die luftgekoppelten Wärmepumpen haben hier einen Anteil von 65 % an der Nutzwärme, während der restliche Anteil von 35 % durch die erdgekoppelte Variante gedeckt wird. Die Dominanz der luftgekoppelten Wärmepumpe lässt sich durch die niedrigeren Anlagenkosten erklären. Allerdings hat sie eine geringere Jahresarbeitszahl von nur 3,5 gegenüber 4,4 bei dem erdgekoppelten System. Das hat zur Folge, dass mehr Strom für den Antrieb der Wärmepumpen benötigt wird, was zu höheren Betriebskosten führt. Die Erdkollektoren und -sonden der erdgekoppelten Wärmepumpen benötigen eine Wärmeentzugsfläche von insgesamt 1.442 ha, was 5,9 % der Siedlungsfläche entspricht. Dieser Wert liegt unterhalb des erschließbaren Potenzials von 13 %.[178]

Mit PV können 2040 37 % des Endenergieverbrauchs der Solidarregion Emsland gedeckt werden. Dafür ist ein Ausbau der PV um 10.551 GWh zur Deckung des Strombedarfs nötig. Für diesen Energieertrag muss insgesamt eine Fläche von 17.472 ha mit PV-Modulen bestückt werden. Die Modulfläche verteilt sich dabei zu

[176] Vgl. *Fachagentur Windenergie an Land*, 2018.
[177] Vgl. *Beck, H.-P./von Haaren, C.,* 2016.
[178] Vgl. *Jochum, P./Mellwig, P.*, 2017.

einem Anteil von 1.709 ha auf solare Dachflächen und zu 15.763 ha auf solare Freiflächen. Damit sind insgesamt 7 % der Gebäude- und Freiflächen durch PV-Module belegt, während es im Jahr 2016 noch 1,2 % waren. Die Modulfläche auf solarer Freifläche belegt insgesamt 8,7 % der landwirtschaftlichen Fläche und kann damit von allen erneuerbaren Energien den größten flächenmäßigen Zubau gegenüber dem Jahr 2016 mit 0,2 % der Landwirtschaftsfläche verzeichnen. Die Energieerzeugung aus PV ist wichtig, da ohne sie die Onshore-Windparkfläche noch weiter ausgedehnt werden müsste, was sehr unrealistisch erscheint, da das umsetzbare Flächenpotenzial aus dem Jahr 2016 schon deutlich überschritten wird. Der auf PV-Freiflächen einzuhaltende, größere Modulabstand reduziert den spez. Energieertrag von PVF auf 512 MWh/ha/a, während der spez. Energieertrag von PVD 1.688 MWh/ha/a beträgt (vgl. Kapitel 3.3.1.2).[179] Die Freiflächenanlagen werden auf landwirtschaftlichen Flächen und auf Dauergrünland errichtet.

4.3.5 Implementierung der Sektorkopplung

Zur Verdeutlichung der Notwendigkeit von Möglichkeiten zur Sektorkopplung wird in Abbildung 15 die Bruttoenergieerzeugung dem Endenergieverbrauch der jeweiligen Energieformen im Jahr 2040 gegenübergestellt.

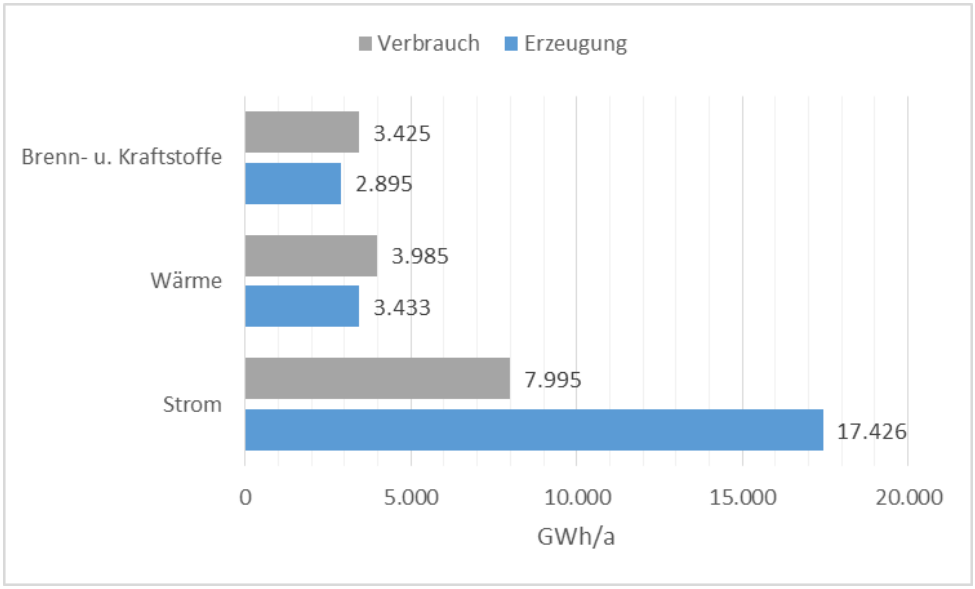

Abbildung 15: Vergleich von Bruttoenergieerzeugung und Endenergieverbrauch im Jahr 2040 Quelle: Eigene Darstellung.

Es ist zu erkennen, dass im Jahr 2040 weder genug Brenn- und Kraftstoffe noch genug Wärme zur Deckung des jeweiligen Endenergieverbrauchs erzeugt wird.

[179] Vgl. *Beck, H.-P./von Haaren, C.,* 2016.

Trotz der wesentlichen Reduzierung des Energieverbrauchs für Brenn- und Kraftstoffe gegenüber dem Jahr 2016 (vgl. Abbildung 9, S.51) und der Erhöhung der Energieerzeugung aus biogenen Brenn- und Kraftstoffen durch die Umstellung des Anbaus von Biodiesel und Bioethanol auf Biogas kann der Verbrauch nicht gedeckt werden. Der viel höhere Anteil an genutzter Umgebungswärme durch Wärmepumpen (vgl. Abbildung 12) sowie die Wärmeproduktion aus Solarthermie und Tiefengeothermie können den Wärmeverbrauch im Jahr 2040 ebenfalls nicht decken.

Um den jeweiligen Differenzbetrag von Energieverbrauch zu Energieerzeugung zu decken, wird Strom im Sinne der Sektorkopplung eingesetzt. Strom kann mit der PtX-Technologie in die jeweilig benötigte Energieform umgewandelt werden.[180] Die Menge an produziertem Strom muss deutlich höher ausfallen, da bei den Umwandlungsprozessen und bei der Stromübertragung und Speicherung Verluste auftreten (vgl. Kapitel 3.3.7).[181]

Strom kann im PtG-Verfahren zu Wasserstoff umgewandelt werden und schließlich nach Methansynthese für mobile Anwendungen als synthetischer Kraftstoff oder für die Industrie als Grundstoff eingesetzt werden. Synthetischer Flüssigkraftstoff, der im Rahmen der PtL-Technologie aus Strom gewonnen werden kann, kann dem Luftverkehr als Treibstoff dienen.[182]

Die bei der Wasserstoffelektrolyse entstehende Abwärme kann zur Deckung des restlichen Wärmebedarfs verwendet werden. Darüber hinaus wird bei der Rückverstromung der als Wasserstoff gespeicherten Energie in Blockheizkraftwerken Wärme frei, die ebenfalls zur Deckung des Wärmeverbrauchs genutzt werden kann. Insgesamt kann Strom folglich als Wärme oder als Kraft- und Brennstoff verwendet werden und den jeweiligen Verbrauch decken.

4.4 Möglichkeitsraum des Energiesystems

Die nachfolgenden Modifikationen des MA-Zielszenarios spiegeln extreme Entwicklungen hinsichtlich des Energieverbrauchs, der Mobilität und der Gebäudewärmeversorgung wieder und bilden einen Möglichkeitsraum für das Energiesystems der Solidarregion Emsland ab.

[180] Vgl. *Hoffmann, C.*, 2019.
[181] Vgl. *Nitsch, J./Gerhardt, N./Wenzel, B.,* 2012.
[182] Vgl. *Purr, K./Osiek, D.,* 2016.

4.4.1 Verbrauchsszenarien

In diesem Abschnitt sollen die Auswirkungen unterschiedlicher Annahmen zu Effizienzsteigerungen auf die Energieversorgung untersucht werden. Hierfür werden zwei Szenarien untersucht und mit dem MA-Zielszenario verglichen.

Eine besonders ambitionierte Entwicklung für die Energieversorgung der Solidar-Region Emsland beschreibt das Verbrauchs-Optimum-Szenario. Die Parameter vom MA-Zielszenario aus Tabelle 3 werden insofern angepasst, dass so wenig Energie wie möglich verbraucht wird. Höchstmögliche Effizienzsteigerungen, ein leichter Bevölkerungsrückgang, ein mäßiges Wirtschaftswachstum, eine geringere Verkehrsleistung sowie ein höherer Anteil von Elektroautos machen den Unterschied. Das Verbrauchs-Pessimum-Szenario stellt eine gegensätzliche Entwicklung dar, bei der die Ausschöpfung der Möglichkeiten zur Energieverbrauchsminderung deutlich geringer ausfällt. Für beide Szenarien wird der Endenergieverbrauch in den Verbrauchssektoren berechnet. Die Energieversorgung erfolgt bei beiden Szenarien ausschließlich durch erneuerbare Energien.

Die simulierten Endenergieverbräuche des Verbrauchs-Optimum-Szenarios und des Verbrauchs-Pessimum-Szenarios werden bezogen auf die genutzten Energieformen Strom, Brenn- und Kraftstoffe und Wärme in Abbildung 16 mit dem MA-Zielszenario verglichen.

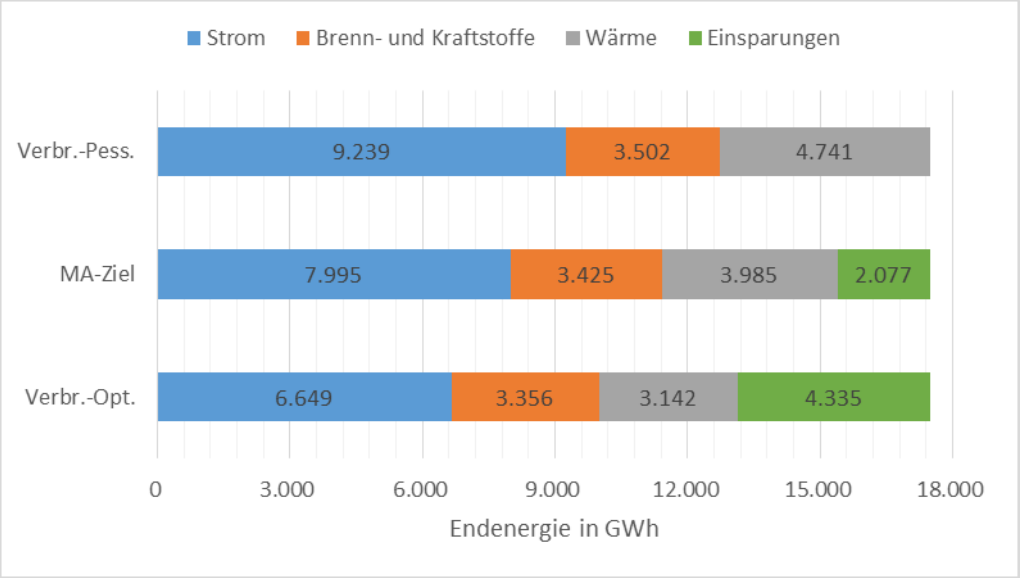

Abbildung 16: Endenergieverbrauch nach Energieformen in den Verbrauchsszenarien
Quelle: Eigene Darstellung.

Insgesamt sinkt der Endenergieverbrauch entsprechend der Simulation von 17.482 GWh im Verbrauchs-Pessimum-Szenario um 12 % auf 15.405 GWh im MA-

Zielszenario und um 25 % auf 13.146 GWh im Verbrauchs-Optimum-Szenario im Jahr 2040. Die ambitioniertere Ausschöpfung der Möglichkeiten für Energieeffizienz, der Bevölkerungsrückgang, das langsamere Wirtschaftswachstum, der Rückgang der Verkehrsleistung und der höhere Anteil von Elektroautos sind für diese Energieeinsparungen verantwortlich.

Es ist zu erkennen, dass der Endenergieverbrauch an Strom vom Verbrauchs-Pessimum Szenario zum MA-Zielszenario um 1.244 GWh und zum Verbrauchs-Optimum-Szenario um 2.590 GWh abnimmt. Der Anteil von Brenn- und Kraftstoffen verringert sich nur geringfügig um 77 GWh bzw. 146 GWh, während der Anteil an Wärme um 756 GWh bzw. 1.385 GWh reduziert wird.

Der Endenergieverbrauch sinkt daher entsprechend des Levels ergriffener Effizienzmaßnahmen. Die größten absoluten Einsparungen lassen sich beim Strom erzielen, der in jedem Verbrauchssektor genutzt wird und insgesamt den größten Anteil am Endenergieverbrauch hat. Der Wärmeverbrauch wird vor allem durch die Reduktion des Wohnraumbedarfs pro Kopf und durch den in Folge der höheren Sanierungsquote geringeren Raumwärme- und Warmwasserbedarf vermindert. Der Verbrauch von Kraft- und Brennstoffen ändert sich aufgrund der Effizienzunterschiede bei der Wärmeerzeugung geringfügig.

Die simulierten Endenergieverbräuche des Verbrauchs-Optimum-Szenarios und des Verbrauchs-Pessimum-Szenario werden in den Verbrauchssektoren KLIT, Gebäudewärme, Prozesswärme und Mobilität in Abbildung 17 mit dem MA-Zielszenario verglichen. Nachfolgend sollen die Ergebnisse mit Bezug auf Kapitel 3.1 interpretiert werden.

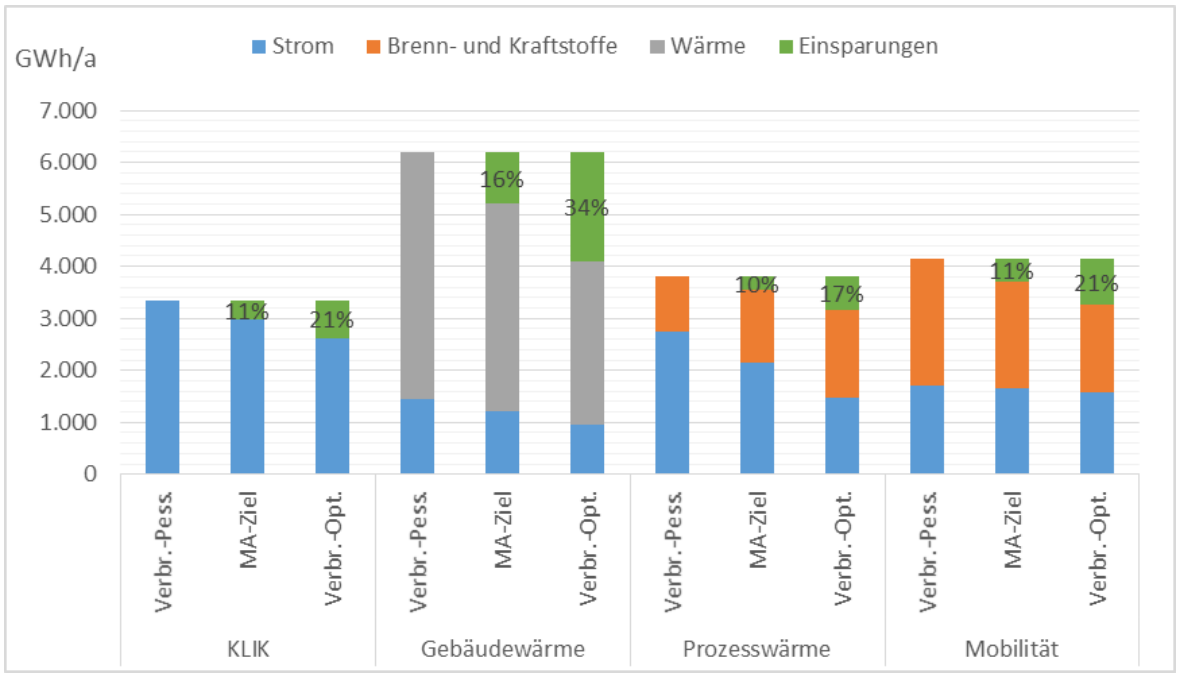

Abbildung 17: Endenergieverbrauch nach Sektoren in den Verbrauchsszenarien
Quelle: Eigene Darstellung.

Der Endenergieverbrauch kann gegenüber dem Verbrauchs-Pessimum-Szenario im Sektor KLIK um 11 % im MA-Zielszenario und um 21 % im Verbrauchs-Optimum-Szenario sinken. Der Gebäudewärmeverbrauch fällt um 16 % bzw. 34 %, während der Prozesswärmeverbrauch um 10 % bzw. 17 % sinkt. Im Sektor Mobilität können respektive 11 % bzw. 21 % der Endenergie eingespart werden.

Der deutlichste Energieverbrauchsvorteil ist also im Gebäudewärmebereich festzustellen, der durch die Reduzierung der Wohnfläche pro Kopf, durch eine höhere Sanierungsrate und einem daraus resultierenden geringeren Raumwärme- und Warmwasserbedarf sowie durch bessere Effizienzsteigerungen erklärbar ist. Auffällig ist weiterhin, dass der Anteil von Brenn- und Kraftstoffen im Prozesswärmesektor vom Verbrauchs-Pessimum-Szenario zum Verbrauchs-Optimum-Szenario steigt. Die Erklärung dafür ist, dass die Anbauflächen für biogene Brenn- und Kraftstoffe in allen Szenarien als konstant angenommen werden. Dadurch ergibt sich auch ein konstanter Energieertrag, der hauptsächlich in den Sektoren Prozesswärme und Mobilität genutzt werden muss. Der Mobilitätssektor verwendet Strom oder synthetische Kraftstoffe, die aus Energiepflanzen gewonnen werden, als Antriebsenergie. Der Anteil an Elektrofahrzeugen nimmt vom Verbrauchs-Pessimum-Szenario zum Verbrauchs-Optimum-Szenario zu, da diese Antriebsart die höchstmögliche Effizienz bietet (vgl. 3.1.6). Der restliche Anteil wird durch biogene Kraftstoffe gedeckt und wird dementsprechend vom Verbrauchs-Optimum-Szenario zum Verbrauchs-

Pessimum-Szenario größer. Da die gesamte Menge an biogenen Kraftstoffen genutzt wird, verschiebt sich bei Zunahme der Elektrifizierung des Mobilitätssektors der Anteil von biogenen Brenn- und Kraftstoffen zum Sektor Prozesswärme.

4.4.2 Mobilitätsszenarien

Eine erfolgreiche Gestaltung der Verkehrswende gilt neben der Wärmewende als wichtigste Herausforderung der Energiewende.[183] Der Begriff Verkehrswende bezeichnet den Prozess, den Mobilitätssektor durch den Einsatz erneuerbarer Energien zu dekarbonisieren und durch eine Umverteilung des motorisierten Individualverkehrs (MIV) auf den öffentlichen Personennahverkehr eine Reduzierung des Verkehrsaufkommens hervorzurufen.

Batteriefahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge stellen dabei mögliche Antriebskonzepte dar, die den Verbrennungsmotor ersetzen können. Das MA-Zielszenario berücksichtigt einen Einsatz von Batteriefahrzeugen und Verbrennerfahrzeugen, die durch erneuerbare Kraftstoffe betrieben werden. Deswegen wird an dieser Stelle untersucht, welche Auswirkung ein Verkehrssektor, dessen dominierende Antriebstechnologie die Brennstoffzelle ist, auf die Energieversorgung hat. Alle Fahrzeuge verfügen über einen Brennstoffzellenantrieb. Alternativ wird ein Verkehrssektor simuliert, dessen Personen- und Güterverkehr ausschließlich Batteriefahrzeuge enthält. Beide Szenarien sind nicht als realistisch einzuschätzen, da eine vollständige Substitution des Verbrennungsmotors bis zum Jahr 2040 nicht zu erwarten ist (vgl. Kapitel 3.1.6). Ein Antriebsmix aus allen drei Konzepten erscheint am realistischsten, kann aber nicht mit 100prosim simuliert werden. Für die restlichen Parameter werden die Werte aus dem MA-Zielszenario übernommen.

In Abbildung 18 ist der Endenergieverbrauch im Mobilitätssektor aus beiden Szenarien gegenübergestellt.

[183] Vgl. *Agora Verkehrswende,* 2017.

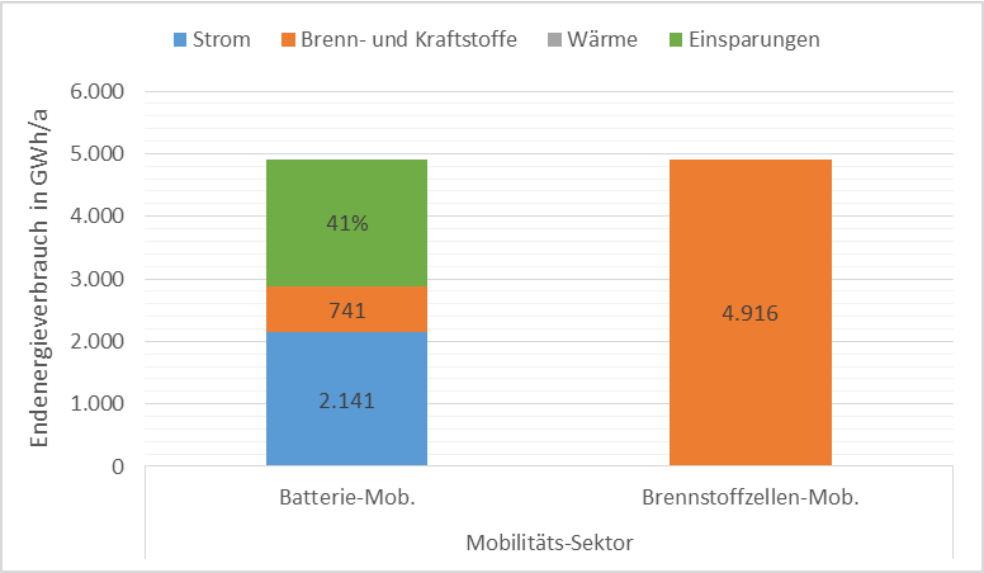

Abbildung 18: Endenergieverbrauch im Mobilitätssektor in den Mobilitätsszenarien
Quelle: Eigene Darstellung.

Es wird deutlich, dass der Einsatz von Brennstoffzellentechnologie den Endenergieverbrauch im Mobilitätssektor erhöht. Die Einsparungen beim Einsatz von ausschließlich Batteriefahrzeugen betragen 41 %. Der Brenn- und Kraftstoffanteil im Szenario Batteriemobilität wird für den Flugverkehr benötigt, da dieser nicht elektrifiziert werden kann. Der deutlich höhere Endenergiebedarf ist durch die unterschiedliche Effizienz der Antriebssysteme zu erklären. Ein Fahrzeug mit Brennstoffzelle und Elektroantrieb hat demnach etwa einen Energieverbrauch von 50 kWh pro 100 km, während ein vergleichbares Batteriefahrzeug für eine Fahrstrecke von 100 km nur 20 kWh verbraucht.[184]

4.4.3 Gebäudewärmeszenarien

Nachdem im vorigen Kapitel Alternativen zur Gestaltung der Verkehrswende vorgestellt wurden, werden in diesem Szenario zwei Möglichkeiten zur Erzeugung von Gebäudewärme verglichen. Das MA-Zielszenario berücksichtigt bei der Gebäudewärmeerzeugung hauptsächlich die Nutzung von Umgebungswärme mit dem Einsatz von Wärmepumpen. Solarthermieanlagen werden nicht berücksichtigt, da sie im Winter nur eingeschränkt nutzbar sind.[185]

Wärmepumpen, die im Sommer durch Strom aus PVD und im Winter durch Strom aus Windenergie angetrieben werden, sind aufgrund der ganzjährigen besseren Nutzbarkeit die bessere Alternative. Aufgrund des in Dänemark erkennbaren

[184] Vgl. *Quaschning, V.*, 2016.
[185] Vgl. *Fraunhofer IWES/IBP,* 2017.

Trends, die Gebäude mit Hilfe von Solarthermie und Wärmenetzen zu beheizen, wird ein ähnliches Solarthermie-Szenario simuliert (vgl. Kapitel 3.3.1.1). Es wird angenommen, dass die zur Verfügung stehende solare Dachfläche von 1.709 ha zu 55,9 % statt nur zu 0,6 % wie im MA-Zielszenario für Solarthermie genutzt wird. Dadurch kann der komplette Wärmebedarf für Gebäude durch Solarthermie gedeckt werden. Die Auswirkungen auf die Energieversorgung werden nachfolgend untersucht.

In Abbildung 19 ist der Endenergieverbrauch im Gebäudesektor aus beiden Szenarien gegenübergestellt.

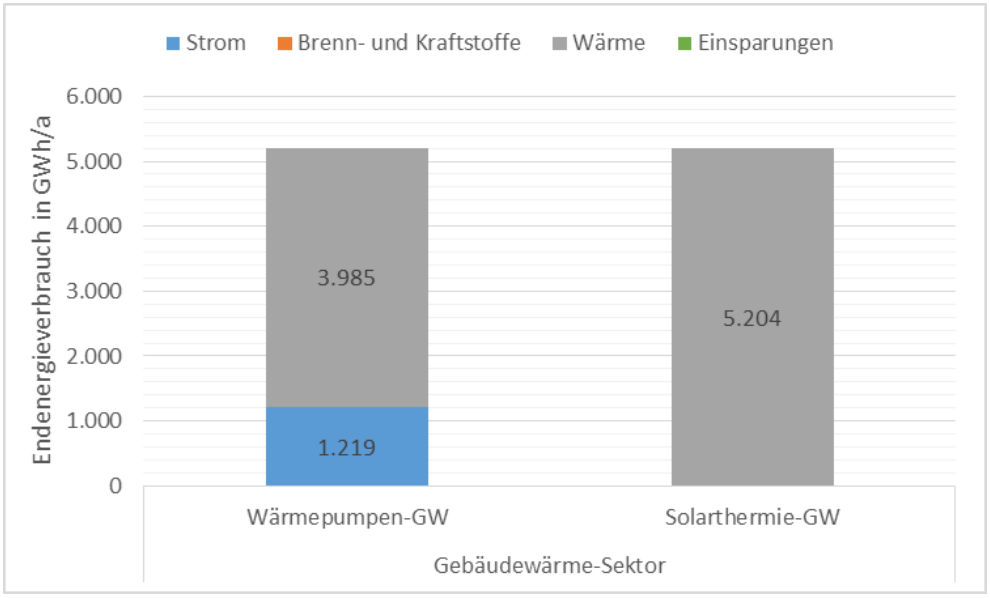

Abbildung 19: Endenergieverbrauch im Gebäudesektor in den Gebäudewärmeszenarien
Quelle: Eigene Darstellung.

Eine Umstellung der Gebäudewärmeversorgung hat keinen energetischen Verbrauchsvorteil. Der Stromverbrauch durch Wärmepumpen wird durch einen größeren Wärmeverbrauch aus Solarthermie substituiert.

4.5 Gegenüberstellung der Szenarienergebnisse

Um eine Beurteilung der verschiedenen Szenarien vornehmen zu können, werden sie in diesem Kapitel bezogen auf den nötigen Ausbau der erneuerbaren Energien und des Speicherbedarfes verglichen. Zusätzlich wird noch auf den Ausbau der Stromnetze eingegangen. Alle drei Aspekte sind Grundvoraussetzung für eine vollständig erneuerbare Energieversorgung und eine erfolgreiche Energiewende.[186]

[186] Vgl. *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie*, 2016.

4.5.1 Vergleich der Ausbaupfade erneuerbarer Energien

Der Ausbau erneuerbarer Energien wird in Deutschland durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) reguliert. Im EEG wird das jährliche Ausbauvolumen festgelegt und in Ausschreibungsverfahren an den Bieter mit dem geringsten Gebot vergeben.[187] Die Höhe der Förderung wird so wettbewerblich ermittelt und nur an die Bieter, die die geringste Vergütung für den Betrieb fordern, ausgeschüttet. Der dadurch entstehende enorme Kostendruck hat vor allem den Ausbau der Windenergie in den letzten Jahren verlangsamt, sodass sich viele Unternehmen aus der Windenergiebranche dem Geschäft im Ausland widmen.[188]

Onshore-WKA sollen in Deutschland von 2017 bis 2019 jährlich um 2.800 MW und ab 2020 um 2.900 MW ausgebaut werden bzw. durch neue leistungsfähigere Modelle ersetzt werden (Repowering). [189] Für PVF ist ein jährliches Ausbauziel von 1.250 MW im Jahr 2017 und ab 2018 von 1.350 MW festgeschrieben.[190] Die Ausbaumengen zielen dabei jedoch auf eine Deckung des Energieverbrauchs zu 60 % aus erneuerbaren Energien bis 2050, statt zu 100 % bis 2040, und fallen dementsprechend geringer aus. Eine Näherung für den zu erwartenden Ausbau im Emsland kann über das Verhältnis der Flächen vom Emsland zu Deutschland erfolgen. Dabei ist anzumerken, dass die Zuschläge für die Ausbaumengen jedoch regional unabhängig vergeben werden. Übertragen auf die Landesfläche des Emslandes beläuft sich das jährliche Ausbauvolumen von Onshore-WKA ab 2020 auf 23,4 MW und von PVF auf 10,9 MW.[191] [192]

Die Ausbaupfade für Onshore-WKA und PVF aus den verschiedenen Szenarien werden in Abbildung 20 verglichen. Dabei beträgt die installierte Leistung von Onshore-WKA im Jahr 2016 738 MW und von PVF 133 MW.

[187] Vgl. *Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz*, 2017.
[188] Vgl. *Durstewitz, M./Behem, G.*, 2018.
[189] Vgl. *Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz*, 2017.
[190] Vgl. *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie*, 2015.
[191] Ausbauziel Onshore-WKA: 2.881 km / 357.386 km · 2.900 MW = 23,4 MW
[192] Ausbauziel PVF: 2.881 km / 357.386 km · 1.350 MW = 10,9 MW

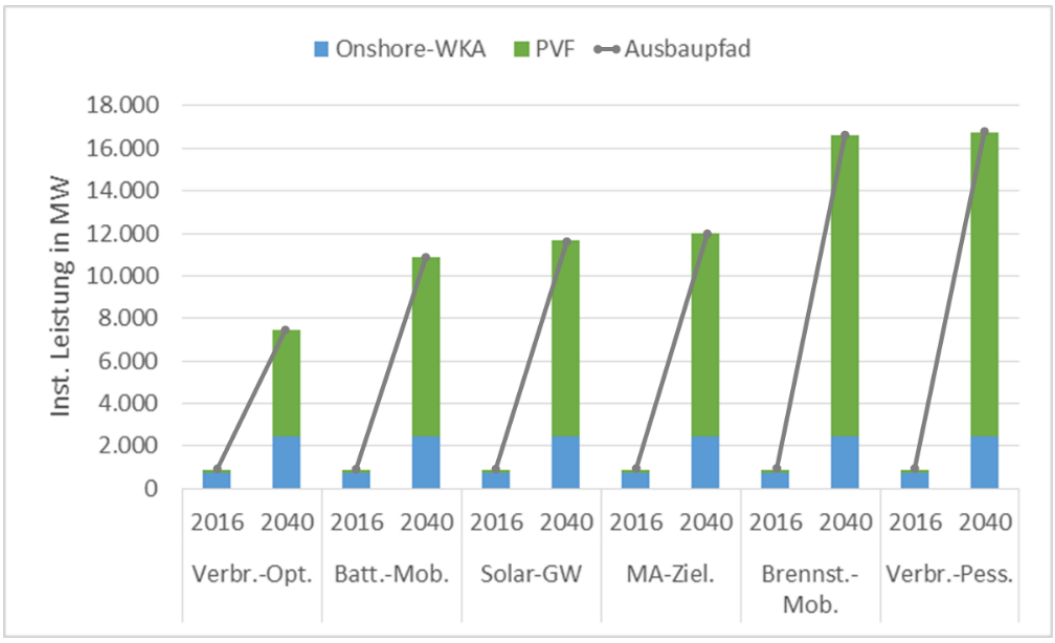

Abbildung 20: Ausbaupfade für erneuerbare Energien aus den Szenarien
Quelle: Eigene Darstellung.

Der Ausbaupfad verläuft im Verbrauchs-Optimum-Szenario mit der geringsten und im Verbrauchs-Pessimum mit der höchsten Steigung. Beide Ausbaupfade stellen damit den Korridor für den minimal und maximal notwendigen Ausbau von Onshore-WKA und PVF dar, um das Ziel einer vollständigen Energieversorgung aus erneuerbaren Energien bis 2040 zu erreichen. Der jährliche Ausbau im Verbrauchs-Optimum-Szenario, in dem der geringste Ausbau notwendig ist, beträgt 71 MW für Onshore-WKA und 203 MW für PVF.[193] [194]Damit ist die zu realisierende Ausbaumenge um ein Vielfaches größer als die festgelegte Menge im EEG, die für das Emsland genähert wurde. Ein noch größerer, jährlicher Ausbau, wie er in den anderen Szenarien notwendig ist, ist unter den gegebenen Umständen des hohen Wettbewerbs und des Kostendrucks eine große Herausforderung.

Der Ausbau von Onshore-WKA ist in den Szenarien auf ein festgelegtes Maximum von 3,1 % der Bodenfläche des Emslandes begrenzt, da der Ausbau von Windkraft mit großen Restriktionen verbunden ist (vgl. Kapitel 4.3.4). Deshalb ist der Anteil in allen Szenarien konstant.

4.5.2 Vergleich des Speicherbedarfs

Die Volatilität der Energieerzeugung aus Windkraft und solarer Energie muss in Zukunft durch Energiespeicher ausgeglichen werden, damit eine sichere und flexible

[193] Ausbau Onshore-WKA: (2.450 MW – 738 MW) / 24 a = 71 MW/a
[194] Ausbau PFV: (5.006 MW – 133 MW) / 24 a = 203 MW/a

Energieversorgung gewährleistet werden kann. Den kurzfristigen Ausgleich übernehmen Kurzzeitspeicher, die temporäre Einspeiseschwankungen beseitigen und das Stromnetz stabilisieren können. Druckluftspeicher- und Pumpspeicherkraftwerke sowie Batterien sind dafür geeignet.

Langzeitspeicher bieten die Möglichkeit, die Energie über mehrere Wochen oder sogar Monate zu speichern, sodass der zeitliche Versatz von Energieerzeugung zu Energieverbrauch kein Problem mehr darstellt.[195] Die Speicherung von Strom als chemische Energie in Form von Wasserstoff ist diesbezüglich besonders vorteilhaft, da sie eine hohe Energiedichte aufweist.[196]

In 100prosim sind für alle Szenarien jeweils zwei Speicher vorgesehen. Der erste speichert den Strom nach Umwandlung mit dem PtG-Verfahren mit dem Zweck, das Gas direkt zu verbrauchen. Der zweite Speicher speichert das Gas mit dem Zweck, es zurück zu verstromen. Der Jahresnutzungsgrad der Langzeitstromspeicherung setzt sich aus den Nutzungsgraden von Wasserelektrolyse und Gas-Rückverstromung zusammen und beträgt 38 %. Die Verluste durch Kurzzeitspeicherung werden nicht einzeln betrachtet, sondern bei den Verlusten durch das Stromübertragungs- und -verteilnetz berücksichtigt. Ein größerer Speicherbedarf führt zu mehr Speicherverlusten und verursacht zudem hohe Kosten für die Errichtung der Speicher.

In Abbildung 21 sind die verschiedenen Speicherkapazitäten der Szenarien gegenübergestellt.

[195] Vgl. *Freund, R.*, 2017.
[196] Vgl. *Beck, H.-P./von Haaren, C.*, 2016.

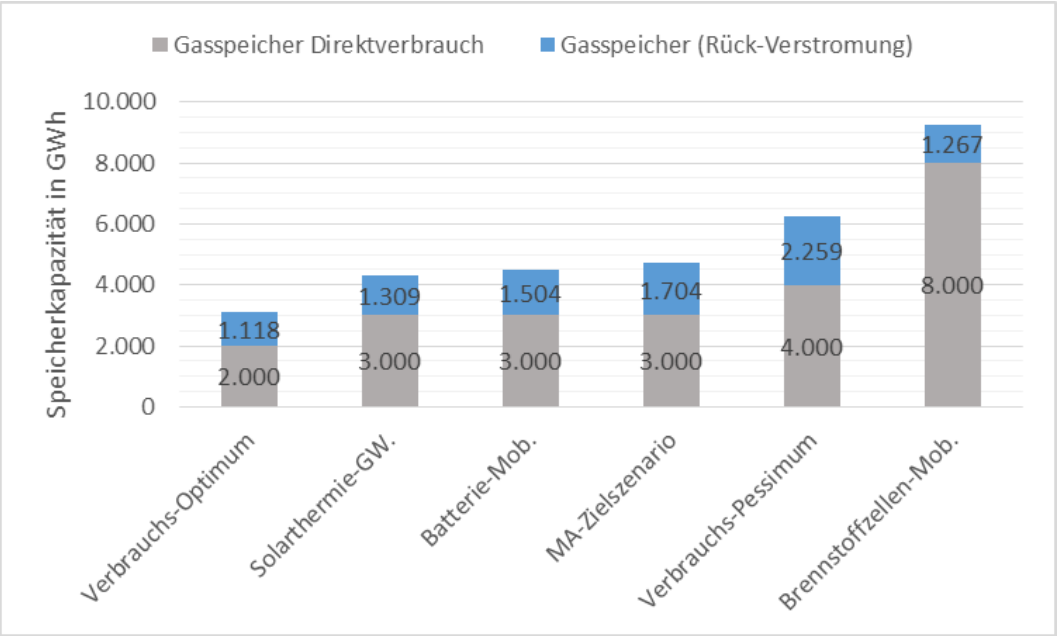

Abbildung 21: Vergleich nötiger Energiespeicherkapazitäten der Szenarien
Quelle: Eigene Darstellung.

Es ist zu erkennen, dass die Speicherkapazität im Verbrauchs-Optimum-Szenario mit insgesamt 3.118 GWh am geringsten und im Brennstoffzellen-Szenario mit 9.267 GWh am höchsten ist. Die Effizienzbemühungen wirken sich direkt auf die Speicherkapazität aus. Der Speicherbedarf im Solarthermie-Szenario ist ebenfalls gering, da kein Strom für den Betrieb der Wärmepumpen benötigt wird. Im Szenario Batterie-Mobilität wird weniger Strom verbraucht als im MA-Zielszenario, weshalb hier der Speicherbedarf geringer ausfällt. Die geringe Ausschöpfung der Möglichkeiten zu Effizienzbemühungen lässt den Speicherbedarf im Verbrauchs-Pessimum-Szenario auf 6.259 GWh steigen. Der hohe Wasserstoffbedarf und die damit verbundenen hohen Umwandlungsverluste der PtG-Technologie im Szenario Brennstoffzellen-Mobilität verursachen den höchsten Speicherbedarf.

Eine genaue Abschätzung der Kosten für Langzeitspeicheroptionen ist aufgrund der Vielzahl der Einflussfaktoren wie z.B. den Investitionskosten in Energiewandler und Speichermedien, Kosten für Wartung, Betrieb und Strom und der Anzahl der Speicherzyklen nicht möglich. Eine beispielhafte Berechnung der Kosten gibt im Folgenden zumindest Aufschluss über die Größenordnung der Kosten. Für den günstigsten H_2-Kavernenspeicher werden Speichervollkosten von etwa 120 Euro pro MW

angegeben.[197] Die Ausspeicherdauer eines H_2-Kavernenspeichers in der gesuchten Größenordnung beträgt mindestens etwa 24 h.[198] Damit hat der im Brennstoffzellen-Szenario benötigte Speicher etwa eine Be- bzw. Entladeleistung von ca. 333 GW und hat dementsprechend Vollkosten von ca. 40 Mio. Euro.[199] [200] Diese Summe ist aber nur als Richtwert zu verstehen, da die Kosten sehr spezifisch für den Anwendungsfall sind und in Zukunft vermutlich sinken werden.

4.5.3 Ausbau der Stromnetze

Da mit den erneuerbaren Energiequellen die Solidarregion um das Emsland herum mit Strom versorgt werden soll, muss das Stromübertragungs- und -verteilnetz in diesem Bereich ausgebaut werden. Weiterhin ist eine Digitalisierung der Stromnetze notwendig, damit in Zukunft alle Energieverbraucher, -speicher, -erzeuger und Netzbetreiber untereinander Informationen austauschen können, um so den Strom maximal effizient verteilen und das Stromnetz optimal auslasten zu können. In Zukunft kann z.B. die Spülmaschine Informationen über das intelligente Stromnetz, auch Smart Grid genannt, beziehen und dadurch in Phasen mit großer Netzauslastung und Stromüberschuss das Netz entlasten und so günstigeren Strom beziehen.[201] Die Übertragungsverluste des Stromübertragungs- und -verteilnetzes betragen 15,2 % und enthalten Verluste durch Kurzzeitspeicherung von angenommenen 10 %.[202]

4.5.4 Einordnung der Szenarien

Die Vergleiche der Ausbaupfade für erneuerbare Energien und des notwendigen Speicherbedarfs machen deutlich, dass das Verbrauchs-Optimum-Szenario die günstigste Variante zur Zielerreichung einer vollständig erneuerbaren Energieversorgung des Emslandes ist. Onshore-WKA müssen dafür auf eine installierte Leistung von 2.450 MW ausgebaut werden, während ein Ausbau von PVF auf 5.006 MW nötig ist. Gleichzeitig gibt es in diesem Szenario den geringsten Speicherbedarf von nur 3.118 GWh. Im MA-Zielszenario, in dem die Ausschöpfung der Effizienzmaßnahmen weniger ambitioniert sind, ist ein Ausbau auf insgesamt 12.003 MW nötig, während der Speicherbedarf auf 4.704 GWh erweitert werden

[197] Vgl. *Grünwald, R./Ragwitz, M./Sensfuß, F./Winkler, J.,* 2012.
[198] Vgl. *Sterner, M./Eckert, F./Thema, M.*, 2014.
[199] Leistung=8.000 GWh/24 h = 333,3 GW
[200] Vollkosten=333.300 MW · 120 €/MW = 39,99 Mio. €
[201] Vgl. *Rippel, K. M./Wiede, T.*, 2017.
[202] Vgl. *Beck, H.-P./von Haaren, C.*, 2016.

muss. Das entspricht einer prozentualen Steigerung gegenüber dem Verbrauchs-Optimum-Szenario beim Ausbau erneuerbarer Energien von 61 % und beim Speicherbedarf von 51 %. Das Verbrauchs-Pessimum-Szenario, das sich durch eine vergleichsweise schlechte Ausnutzung von Effizienzmaßnahmen auszeichnet, setzt einen Ausbau von erneuerbaren Energien auf 16.721 MW und eine Erweiterung der Speicherkapazität von 6.259 GWh voraus. Die relativen Steigerungen gegenüber dem Verbrauchs-Optimum-Szenario betragen 124 % bezogen auf den Ausbau der erneuerbaren Energien und 101 % bezogen auf den Speicherbedarf.

Sofern die Gebäudewärmeversorgung durch Solarthermie statt durch Wärmepumpen wie im MA-Zielszenario erfolgt, ist ein geringfügig kleinerer Ausbau von Onshore-WKA und PVF von insgesamt 330 MW sowie ein Speicherbedarf von 395 GWh nötig. Der geringere Ausbau ist durch einen geringeren Stromverbrauch durch fehlende Wärmepumpen zu erklären.

Der Vergleich zwischen den beiden Mobilitätsszenarien offenbart, dass ein ausschließlicher Einsatz der Brennstoffzellentechnologie als Antriebskonzept gegenüber einem Mobilitätssektor mit nur batteriebetriebenen Fahrzeugen einen um 52 % größeren Ausbau erneuerbarer Energien notwendig macht. Der Unterschied beim Speicherbedarf beträgt 106 %. Der jährliche Stromeinsatz für die Wasserstofferzeugung zur Erzeugung von Brenn-, Kraft- und Grundstoffen für die Industrie beträgt im Szenario Brennstoffzellen-Mobilität 13.507 GWh und im Szenario Batterie-Mobilität lediglich 5.832 GWh, weshalb der Speicherbedarf im Szenario Brennstoffzellen-Mobilität so groß ist. Der daraus resultierende große Umwandlungsverlust bei der Wasserelektrolyse und der geringere Wirkungsgrad der Brennstoffzelle gegenüber der Batterie sind ursächlich für den stark erhöhten Ausbaubedarf erneuerbarer Energien. Das Szenario Brennstoffzellen-Mobilität hat sogar einen größeren Speicherbedarf als das Verbrauchs-Pessimum-Szenario, obwohl es über höhere Effizienzbemühungen verfügt. Daraus wird ersichtlich, dass die Kombination aus Elektromotor und Batterie die geeignetere Antriebstechnik ist.

5 Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch

Die Erstellung der verschiedenen Szenarien hat gezeigt, dass es viele unterschiedliche Möglichkeiten für die Erreichung eines erneuerbaren Energiesystems für die Solidarregion Emsland gibt. Die genaue Abschätzung der technischen Möglichkeiten und der Grenzen der Potenziale bei Energieerzeugung, -verbrauch, und -speicherung im Jahr 2040 ist nicht einwandfrei möglich. Deshalb gibt es einen Möglichkeitsraum, der verschiedene Ansätze für die Energieerzeugung und den Energieverbrauch enthält. Die Grenzen des Möglichkeitsraumes werden mit den Parametern, die direkten Einfluss auf den Endenergieverbrauch haben, in der Tabelle 3 aufgezeigt. Um den genauen Einfluss der Parameter auf den Energieverbrauch quantifizieren und bewerten zu können, wird im Folgenden eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt.

5.1 Sensitivitätsanalyse

Dazu werden die in 100prosim veränderbaren Parameter aus jedem Verbrauchssektor in 10 %-Schritten von ihrem Ausgangswert aus dem MA-Zielszenario verändert. Die Auswirkungen auf den gesamten Endenergieverbrauch können so verglichen werden.

Die Ergebnisse im Sektor Gebäudewärme sind in Abbildung 22 dargestellt.

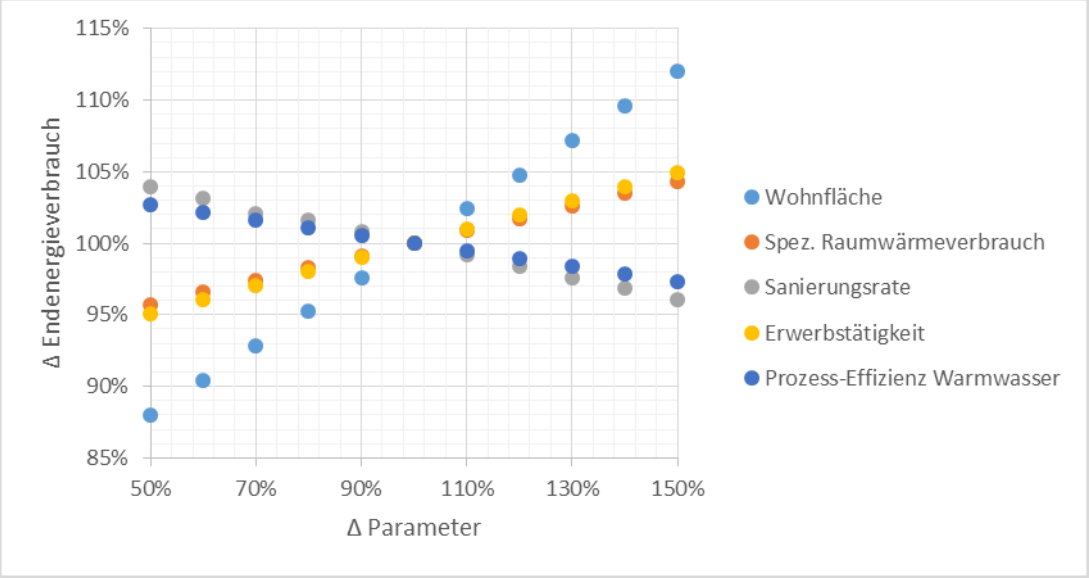

Abbildung 22: Sensitivitätsanalyse im Sektor Gebäudewärme
Quelle: Eigene Darstellung.

Die größten Auswirkungen auf den Endenergieverbrauch im Gebäudewärmesektor hat die zu beheizende Wohnfläche. Eine Anpassung um 50 % führt zu einer Veränderung des Endenergieverbrauchs um 12 %. Effizienzbemühungen und Sanierungsmaßnahmen, die die Parameter spezifischer Raumwärmeverbrauch, Sanierungsrate und Prozess-Effizienz Warmwasser implizieren, haben einzeln betrachtet ein geringeres Einsparpotenzial. Ein Rückgang der Erwerbsstätigkeit, der aufgrund des demographischen Wandels prognostiziert wird, reduziert neben dem Trend zum Homeoffice den Wärmeverbrauch in gewerblich genutzten Gebäuden und hat einen größeren Einfluss als Effizienzbemühungen und Sanierungsmaßnahmen.

Die Ergebnisse im Sektor Prozesswärme sind in Abbildung 23 dargestellt.

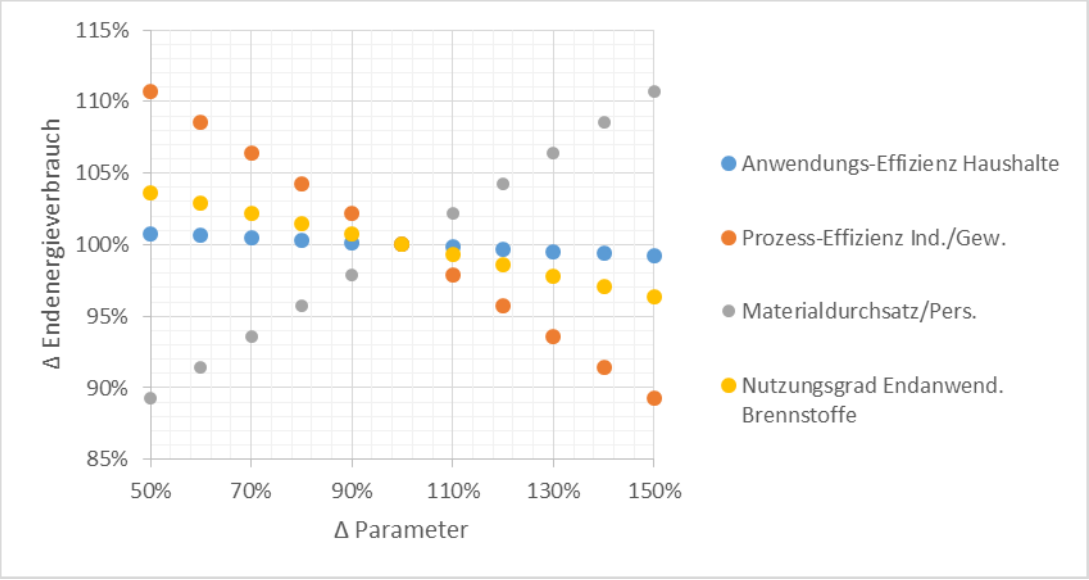

Abbildung 23: Sensitivitätsanalyse im Sektor Prozesswärme
Quelle: Eigene Darstellung.

In Industrie und Gewerbe werden über 90 % der Prozesswärme verbraucht.[203] Dementsprechend haben Effizienzverbesserungen den größten Einfluss auf den Endenergieverbrauch. Eine Steigerung der Prozess-Effizienz auf 150 % senkt den Endenergieverbrauch um ca. 11 %. Der Materialdurchsatz pro Person, der in Folge einer weiter wachsenden Wirtschaft zunehmen wird, hat dabei einen vergleichbar großen Einfluss. Die Effizienz bei Anwendungen im Haushalt, die Prozesswärme benötigen wie z.B. Back- und Kochgeräte, hat den geringsten Einfluss. Eine Effi-

[203] Vgl. *AGEB*, 2013.

zienzsteigerung um 50 % bei der Nutzung von Brennstoffen, die durch eine Reduzierung der Wandlungsverluste erreicht werden kann, kann den Endenergieverbrauch um etwa 4 % senken.

Die Ergebnisse im Sektor Mobilität sind in Abbildung 24 dargestellt.

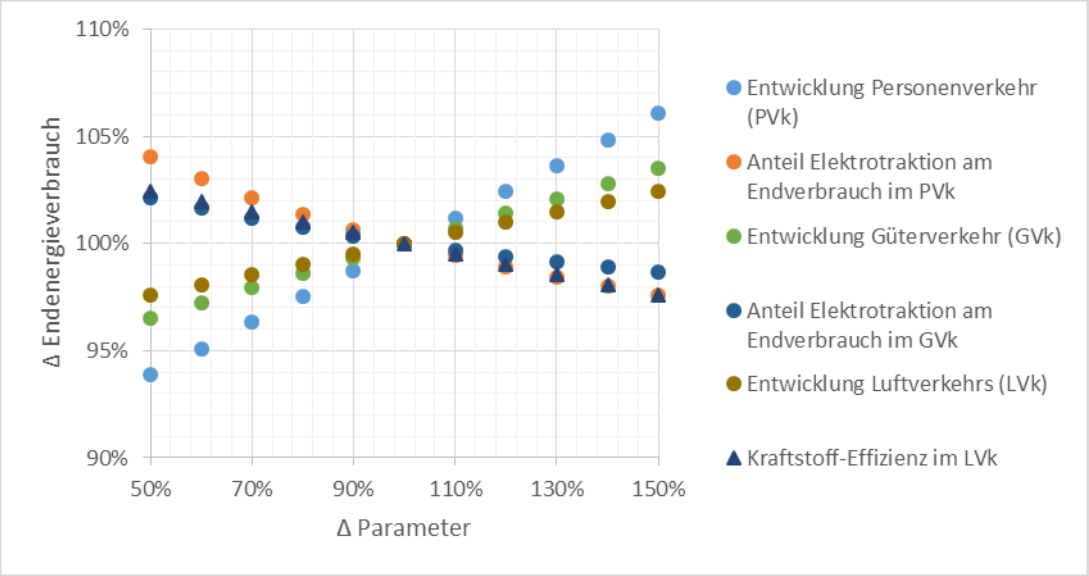

Abbildung 24: Sensitivitätsanalyse im Sektor Mobilität
Quelle: Eigene Darstellung.

Die Entwicklung des Personenverkehrs hat gefolgt von den Entwicklungen des Güterverkehrs und des Luftverkehrs den größten Einfluss auf den Endenergieverbrauch. Diese Kennzahlen beschreiben dabei die jährlich zurückgelegte Strecke pro Person mit dem jeweiligen Verkehrsmittel. Eine Reduzierung der Personenverkehrsleistung um 50 % kann den Endenergieverbrauch um 6 % senken. Eine Halbierung der Güterverkehrsleistung senkt den Endenergieverbrauch um etwa 3,5 %, während die Unterlassung jedes zweiten Fluges oder die Steigerung der Kraftstoffeffizienz von Flugzeugen um 50 % eine Verbrauchsminderung von je ca. 2,5 % zur Folge haben. Die Elektrifizierung des Mobilitätssektors ist weniger ausschlaggebend als die Entwicklung der Verkehrsleistung. So kann ein auf 150 % gesteigerter Anteil elektrifizierter Fahrzeuge im Personenverkehr und im Güterverkehr den Endenergieverbrauch um ca. 2,4 % bzw. 1,3 % senken.

Die Sensitivitätsanalyse im Sektor KLIK ist in Abbildung 25 dargestellt.

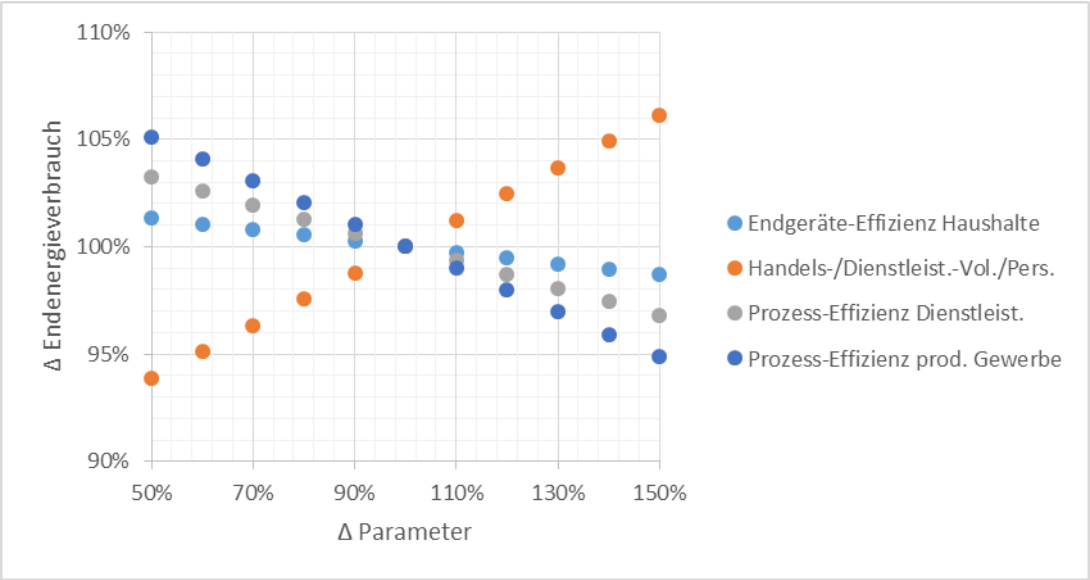

Abbildung 25: Sensitivitätsanalyse im Sektor KLIK
Quelle: Eigene Darstellung.

Die größten Einflussfaktoren auf den Endenergieverbrauch im Sektor KLIK sind das Handels- und Dienstleistungsvolumen pro Person, das aufgrund des Wirtschaftswachstums vermutlich weiter zunehmen wird und die Prozesseffizienz im produzierenden Gewerbe. Durch ein um 50 % größeres Volumen steigt der Endenergieverbrauch etwa um 6 % durch den höheren Stromverbrauch in diesem Bereich. Dieser Mehrverbrauch könnte durch eine Zunahme der Prozesseffizienz um 50 % nahezu ausgeglichen werden.[204] Effizienzsteigerungen im Dienstleistungs- und Haushaltsbereich sind weniger relevant, da hier weniger elektrische Geräte verwendet werden.

Insgesamt hat das Bevölkerungswachstum den größten Einfluss auf den Energieverbrauch, da jeder Einwohner direkter Energieverbraucher ist. Darüber hinaus sind die Pro-Kopf-Wohnfläche, die Prozesseffizienz in der Industrie und dem Gewerbe, der Materialdurchsatz pro Person und die Entwicklung der gesamten Verkehrsleistung ursächlich für die größten Schwankungen beim Endenergieverbrauch.

Daraus lässt sich ableiten, dass Suffizienz durch Verzicht auf eine größere Wohnung, materielle Besitztümer und motorbetriebene Fortbewegungsmittel neben Effizienzgewinnen durch technologischen Fortschritt eine entscheidende Rolle bei der Energiewende hat.

[204] Vgl. *Stürmer, M./von Hagen, J.*, 2012.

5.2 Handlungsempfehlungen

Aus den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse lassen sich Handlungsempfehlungen für die Politik ableiten, die die Reduktion des Endenergieverbrauchs herbeiführen. Es muss wirksame Anreize für die Reduzierung der Pro-Kopf-Wohnfläche, der Verkehrsleistung und des Materialdurchsatzes pro Kopf geben. Darüber hinaus müssen Instrumente zur Steigerung der Prozesseffizienz in der Industrie und dem Gewerbe geschaffen werden. Im September 2019 hat das Kabinett der Bundesregierung dazu ein aktuelles Klimaschutzprogramm beschlossen, das auf Emissionssenkung und Erreichung der gesetzten Klimaschutzziele ausgelegt ist. Zentrale Elemente des Programms sind die Bepreisung von CO_2, Fördermaßnahmen und neue gesetzliche Standards, die Innovationen und Investitionen begünstigen.

Ab 2020 wird es entsprechend des Klimaschutzprogramms im Bereich der Gebäudewärme nur Maßnahmen zur Förderung energetischer Sanierungsmaßnahmen geben. Es gibt jedoch keinen Hinweis darauf, dass es Anreize zur Verkleinerung der persönlichen Wohnfläche geben wird.[205] Die Förderung von gemeinschaftlichen Wohnprojekten wäre z.B. eine Möglichkeit dazu.

Im Bereich der Prozesseffizienz in der Industrie und im Gewerbe sollen dem Klimaschutzprogramm zu Folge bestehende Fördermaßnahmen weiterentwickelt werden. Der Aufwand für Unternehmen, die diese Förderprogramme in Anspruch nehmen wollen, soll minimiert werden. Zusätzlich soll ein höherer Mindeststandard entsprechend der EU-Ökodesign-Richtlinie vor allem bei Querschnittstechnologien eingeführt werden. Weiterhin ist die Ausgestaltung von Konzepten angedacht, die eine Beschleunigung bei der Umsetzung von Effizienzmaßnahmen erwirken, die aus Energieaudits oder Energiemanagementsystemen hervorgehen.

Zur Reduzierung der Personenverkehrsleistung bzw. des MIV plant die Bundesregierung einen Ausbau von Radwegen und des ÖPNV mit gleichzeitiger Modernisierung der Fahrzeugflotten. Zusätzlich soll das Bahnfahren durch Steuersenkungen 10 % günstiger und das Autofahren und Fliegen durch die Bepreisung von CO_2-Emissionen bzw. die Erhöhung der Luftverkehrsabgabe teurer gemacht werden. Dadurch soll die Attraktivität des ÖPNV gesteigert werden, sodass der MIV reduziert werden kann.

[205] Vgl. *Bundesregierung*, 2019.

Anreize zur Reduktion des Materialdurchsatzes und der Wohnfläche sind nicht im Klimaschutzprogramm enthalten. Weiterhin ist fragwürdig, ob die Reduzierung der Ticketpreise für Bahnfahrten um 10 % bei gleichzeitiger Erhöhung der Benzinpreise um 10 bis 15 Cent bis 2026 tatsächlich eine Reduzierung der Personenverkehrsleistung zur Folge hat. Der Ausbau des Schienenverkehrs, für den ab 2020 zusätzlich 1 Mrd. Euro investiert werden sollen, wird Jahre dauern und dadurch die Attraktivität des Schienenverkehrs nur langsam erhöhen. Die Fördermaßnahmen zur Erhöhung der Prozesseffizienz in der Industrie hingegen haben bereits in den vergangenen Jahren Wirkung gezeigt und sind Erfolg versprechend.[206]

Insgesamt ist die Wirksamkeit der geplanten Maßnahmen des Klimaschutzprogramms 2030 bezogen auf die einflussreichsten Parameter auf den Energieverbrauch als zu gering einzuschätzen.

[206] Vgl. *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2019.*

6 Abschlussbetrachtungen

Abschließend werden die angewendeten Methoden und Inhalte dieser Arbeit kritisch reflektiert, bevor im Fazit eine Zusammenfassung der Ergebnisse erfolgt und ein Ausblick gegeben wird.

6.1 Kritische Reflexion

Für diese Masterarbeit wird mehrheitlich auf aktuelle Quellen aus den Jahren 2015 bis 2019 zurückgegriffen, um den aktuellen Stand der Energiewende möglichst präzise abzubilden. Aktuelle politische Entscheidungen, die die Zielverfolgung der Emissionsneutralität maßgeblich beeinflussen, wie auch technische und gesellschaftliche Aspekte finden hier Berücksichtigung. Die Gestaltung der Energiewende wird aber auch durch Naturschutzbestimmungen und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen beeinflusst, die im Rahmen dieser Arbeit nicht repräsentiert werden. Ein Einbezug dieser Themen für tiefergehende Analysen insbesondere zum Thema Ausbau der erneuerbaren Energien kann diese Arbeit sinnvoll ergänzen.

Die Belastbarkeit der Szenarien ist grundsätzlich durch die Verwendung aktueller und seriöser Literatur gegeben, wird jedoch durch einige Punkte beeinträchtigt.

Der Energieverbrauch aus dem Jahr 2016 wird mit dem Energieverbrauch pro Kopf aus dem Jahr 2012 und der Bevölkerungszahl aus dem Jahr 2016 errechnet. Der Energieverbrauch pro Kopf wird aus den Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland ermittelt. Diese Bilanzen umfassen in zahlreichen Statistiken die Struktur des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern, Verbrauchssektoren und Anwendungen und müssen aufbereitet werden. Diese Aufbereitung der Daten für das Jahr 2016 bzw. eine Aktualisierung der Statusdaten aus dem Jahr 2012 ist laut Herrn Schmidt-Kanefendt, dem Urheber des Simulationstools, sehr aufwändig, weshalb in dem zur Verfügung stehenden Zeitraum dieser Arbeit darauf verzichtet wurde. Der gesamte Endenergieverbrauch nach Sektoren und Anwendungsbereichen hat sich von 2012 bis 2016 allerdings überwiegend nur geringfügig geändert, sodass die zugrunde liegenden Werte von 2012 noch durchaus als relevant bezeichnet werden können. Eine Gegenüberstellung der Werte, die die Relevanz der veralteten Werte bestätigt, erfolgt knapp in Tabelle 5 im Anhang. Dort ist zu erkennen, dass sich der gesamte Endenergieverbrauch von 2012 bis 2016 lediglich um 1 % erhöht hat. Die größten prozentualen Veränderungen gibt es bei der

Beleuchtung mit einem Rückgang des Verbrauchs um 16 %, im Kältebereich mit einem Mehrverbrauch von 15 % und im Bereich Warmwasser mit Einsparungen von 11 %.[207] [208]

Einige Flächen konnten zudem nicht recherchiert werden und werden über ein bestehendes Verhältnis bekannter Flächen mit gleicher Nutzung von der nächstgrößeren Region, meistens Niedersachsen, geschätzt. Beispielsweise wird das niedersächsische Verhältnis von der Anbaufläche für Energiepflanzen zur gesamten Landwirtschaftsfläche für die Schätzung der Anbaufläche von Energiepflanzen im Emsland genutzt. Die Übertragung der Verhältnismäßigkeit von Niedersachsen auf das Emsland ist nicht fehlerlos, was schon die höhere Einwohnerdichte von Niedersachsen mit 167 Einwohnern pro km^2 zu 113 Einwohnern pro km^2 nahelegt.[209] Dennoch ist eine Schätzung nach dieser Vorgehensweise ein geeignetes Mittel.

Für die Parameterbestimmung für das Jahr 2040 finden sich nicht in allen zugrundeliegenden Prognosen konkrete Werte, sodass diese Werte teilweise aus vorhandenen Werten interpoliert werden müssen. Dabei wird angenommen, dass ein proportionaler Zusammenhang vorliegt. Sofern dies nicht der Fall ist, können dadurch Ungenauigkeiten entstehen.

Das Simulationstool lässt im Verkehrssektor nur die Energieform Strom in Verbindung mit Wasserstoff oder Kraftstoffen für die Fortbewegung zu. Ein Szenario, in dem eine Kombination aus Fahrzeugen mit Batterien und Brennstoffzellen oder aus Fahrzeugen mit Batterien und Verbrennungsmotoren als Antriebsformen genutzt werden, ist für das Jahr 2040 eher unwahrscheinlich.[210] Eine Anpassung von 100prosim, die eine Technologieoffenheit im Sektor Mobilität erlaubt, ist dementsprechend sinnvoll. Außerdem nutzt das Tool teilweise Vereinfachungen. Z.B. kann die Verkehrsleistung, die als Parameter angegeben ist, die Mobilität ohne eine Differenzierung des Modal Splits nicht genau abbilden. Der Modal Split beschreibt dabei die Aufteilung des Transportaufkommens auf verschiedene Verkehrsmittel. Weiterhin werden die Verluste durch Kurzzeitspeicherung nicht einzeln, sondern durch einen Aufschlag der Übertragungsverluste des Stromnetzes berechnet.

[207] Vgl. *Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.,* 2013.
[208] Vgl. *Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.,* 2019.
[209] Vgl. *Beck, H.-P./von Haaren, C.,* 2016.
[210] Vgl. *Umweltbundesamt*, 2016.

Die Windparkfläche wird bei der Berechnung der verschiedenen Szenarien zur besseren Vergleichbarkeit konstant gelassen. In der Realität wird sie so klein wie möglich gehalten, weil ihr Ausbau mit den höchsten Restriktionen verbunden ist (vgl. Kapitel 3.3.2).

Insgesamt ist zu sagen, dass die Zukunft durch die verschiedenen Szenarien nicht genau vorhergesagt werden kann. Die Szenarien stellen allerdings einen Möglichkeitsraum dar, der einen Ausblick auf die Gestaltung der Energiewende im Emsland ermöglicht. In dem betrachteten Zeitraum von 24 Jahren können jedoch nicht abzusehende Ereignisse dazu führen, dass der simulierte Möglichkeitsraum nicht mehr zutreffend ist. Deshalb ist die Aktualisierung der vorliegenden Arbeit zukünftig sinnvoll.

6.2 Fazit

Ziel dieser Masterarbeit ist die Erstellung mehrerer Energieszenarien, welche einen Möglichkeitsrahmen für die zukünftige vollständig erneuerbare Energieversorgung der Solidarregion Emsland abbilden. Weiterhin sollen Voraussetzungen und Einflussfaktoren für das angestrebte dekarbonisierte Energiesystem bestimmt werden.

Das MA-Zielszenario hat gezeigt, dass der Endenergieverbrauch bis zum Jahr 2040 gegenüber 2016 um 27 % fällt, sofern die durchschnittlich prognostizierten Effizienzsteigerungen erreicht werden können. Der Sektor mit dem größten Einsparpotenzial ist der Mobilitätssektor mit einer Verminderung des Endenergieverbrauchs um 43 %. Dieses Potenzial wird durch den Umstieg auf Elektromobilität bzw. den Einsatz von erneuerbaren Kraftstoffen ausgeschöpft. Im Sektor Gebäudewärme verhelfen umfassende Sanierungsmaßnahmen zu einer Energieeinsparung von 28 %. Im Prozesswärme- und KLIK-Sektor fallen die Einsparungen mit 18 und 5 % geringer aus, da die Effizienzsteigerungen durch das Wirtschaftswachstum zum Teil relativiert werden. Elektrische Energie ist mit einem Anteil von 51,9 % die wichtigste Energieform der Zukunft, gefolgt von erneuerbarer Wärme mit 25,9 % und biogenen Brenn- und Kraftstoffen mit 22,2 %. Die fossilen Brenn- und Kraftstoffe werden in den Sektoren Prozesswärme und Mobilität durch elektrische Energie und biogene Brennstoffen und im Sektor Gebäudewärme durch die Nutzung von Umgebungswärme substituiert.

Die Endenergie wird im Jahr 2040 zu fast 37 % aus PV und zu 21,7 % aus Windenergie erzeugt, wofür die Windparkfläche auf mehr als das Dreifache ihrer Fläche im Jahr 2016 und die Freiflächen für PV sogar auf das 43-fache ausgebaut werden müssen (vgl. Abbildung 14, S.60). Auf den begrenzten Ackerflächen werden fast ausschließlich Energiepflanzen zur Herstellung von Biogas angebaut, das als Brenn- und Kraftstoff im nicht elektrifizierten Teil des Verkehrssektors und bei der Prozesswärmeerzeugung zum Einsatz kommt. Auf den Ausbau von Wasserkraft wird aus ökologischen Gründen verzichtet, während Tiefengeothermie aufgrund des hohen finanziellen Risikos nur geringfügig ausgebaut wird. Da Solarthermie in direkter Flächenkonkurrenz zur PV steht, werden geeignete Dachflächen zu 99,4 % zur Erzeugung elektrischer Energie genutzt.

Gleichzeitig müssen Energiespeichermöglichkeiten und das Stromnetz ausgebaut werden. Optionen zur Sektorkopplung sind essentiell für die Energieversorgung, da der Bedarf an Wärme und Brenn- und Kraftstoffen trotz des maximalen Ausbaus der erneuerbaren Energien nicht gänzlich gedeckt werden kann. Die durch Onshore-WKA und PVF erzeugte elektrische Energie kann dabei im Verkehrssektor direkt als Antriebsenergie oder nach Umwandlung im PtX-Verfahren als gasförmiger oder flüssiger synthetischer Kraftstoff eingesetzt werden. Im Wärmebereich wird elektrische Energie direkt für den Antrieb von Wärmepumpen verwendet oder durch das PtG-Verfahren als synthetischer Brennstoff genutzt.

Der dargestellte Möglichkeitsraum des Energiesystems bezieht sich auf den Energieverbrauch, die Wahl der Antriebsart im Mobilitätssektor und der Gebäudewärmeversorgung.

Der Vergleich verschiedener Energieverbrauchsszenarien hat gezeigt, dass der Endenergieverbrauch je nach Ausschöpfung des Potenzials aller Effizienzbemühungen um 4.336 GWh variieren kann. Das entspricht gemessen am MA-Zielszenario mehr als 25 % des Gesamtverbrauches. Zukünftige Effizienzsteigerungen haben eine tragende Rolle bei der Umsetzung der Energiewende. Die größte Energieverbrauchsreduzierung lässt sich mit einer möglichen Verbrauchsminderung von 34 % vom Verbrauchs-Optimum-Szenario zum Verbrauchs-Pessimum-Szenario im Sektor Gebäudewärme erzielen.

Als zukünftige Antriebsart, die den Verbrennungsmotor substituieren kann, eignet sich der batteriebetriebene Elektromotor besser als die Brennstoffzelle. Aufgrund des besseren Wirkungsgrades und der bei der Wasserstoffherstellung entstehenden Umwandlungsverluste ist der Endenergieverbrauch in einem Mobilitätssektor, dessen Fahrzeuge ausschließlich durch batteriebetriebene Elektromotoren betrieben werden, um 41 % geringer als in einem Mobilitätssektor, der nur Brennstoffzellen als Antriebskonzept hat. Eine vollständige Elektrifizierung des Personen- und Güterverkehrs bis 2040 ist innerhalb von 24 Jahren jedoch nicht realistisch, sodass dieses Szenario eher mit einem größeren Zeithorizont relevant sein kann. Der Antriebsmix im Jahr 2040 wird optimalerweise durch batteriebetriebene Fahrzeuge dominiert, während die Brennstoffzelle vor allem für große und schwere Fahrzeuge eine gute Alternative darstellt. Der Verbrennungsmotor wird bis 2040 vermutlich nicht komplett substituiert, sondern vor allem als Hybridantrieb vertreten sein. Die fossilen Kraftstoffe im Flugverkehr müssen durch erneuerbare biogene Kraftstoffe oder PtL-Lösungen ersetzt werden.

Die Gestaltung der Wärmewende kann durch den Einsatz von Wärmepumpen mit Nutzung der Umgebungswärme oder durch Solarthermie erfolgen. Die Gebäudewärmeversorgung durch Solarthermie hat keinen Verbrauchsvorteil gegenüber der Versorgung mit Wärme durch Wärmepumpen, reduziert aber insgesamt den Strombedarf um 1.219 GWh jährlich. Dadurch werden Kosten beim Ausbau der Technologien zur Erzeugung, Speicherung und Übertragung erneuerbaren Stroms gespart. Für eine gleichmäßige Verteilung der Wärme, die durch Solarthermie gewonnen wird, müssen jedoch Wärmenetze gebaut werden, die durch Wärmespeicher ergänzt werden müssen. Die dadurch entstehenden Kosten können an dieser Stelle nicht abgeschätzt werden, relativieren aber den Vorteil des reduzierten Strombedarfs. Zusätzlich kann im Winter durch Solarthermie infolge der geringen solaren Deckungsrate wenig Wärme erzeugt werden, während durch Wärmepumpen ganzjährig Umgebungswärme nutzbar gemacht werden kann. Aufgrund der genannten Punkte kann keine explizite Empfehlung zur Gestaltung der Wärmewende ausgesprochen werden. Eine Technologieoffenheit sowie technische und wirtschaftliche Einzelfallbetrachtungen sind daher zur zukünftigen Deckung des Wärmebedarfs für Gebäude nötig.

Insgesamt ist für das Ziel einer vollständig erneuerbaren Energieversorgung der Solidarregion Emsland mindestens ein jährlicher Ausbau der erneuerbaren Energien von 71,3 MW für Onshore-WKA und 200 MW für PVF notwendig, während das jährliche Ausbauvolumen ab 2020 nach EEG für Onshore-WKA etwa 23,4 MW und für PVF etwa 10,9 MW beträgt. Aufgrund der Differenz zwischen beiden Ausbaupfaden stellt die Realisierung der Szenarien eine sehr große Herausforderung dar, für die politische und gesellschaftliche Unterstützung notwendig ist. Der aufwendige und kostenintensive Ausbau der Speichermöglichkeiten und des Stromnetzes sind ebenfalls Voraussetzungen für die Zielerreichung. Der Speicherbedarf im Jahr 2040 beträgt zwischen 3.118 und 9.267 GWh.

Die größten Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch sind die Pro-Kopf-Wohnfläche, die Prozesseffizienz in der Industrie und dem Gewerbe, der Materialdurchsatz pro Person und die Entwicklung der Verkehrsleistung. Eine realistische Reduktion der Pro-Kopf-Wohnfläche oder der gesamten Verkehrsleistung oder des Materialdurchsatzes pro Kopf um je 10 % kann den Endenergieverbrauch um 2 bis 3 % reduzieren. Eine Zunahme der Prozesseffizienz in der Industrie und dem Gewerbe um 10 % reduziert den Endenergieverbrauch um 2,2 %. Nicht nur Effizienz, sondern auch Suffizienz durch den Verzicht auf Wohnfläche, materielle Güter und Autofahrten oder Flugreisen ist folglich entscheidend für die Energieverbrauchsreduzierung und die erfolgreiche Gestaltung der Energiewende. Anreize zur Umsetzung von Effizienzmaßnahmen gibt es vor allem in der Industrie genug, während Suffizienzmaßnahmen von der Politik bisher nicht berücksichtigt werden.

6.3 Ausblick

Forschungsberichte bestätigen immer wieder, dass die wichtigsten Maßnahmen für eine erfolgreiche Gestaltung der Energiewende die Elektrifizierung des Mobilitätssektors, die Gebäudesanierung sowie die Umstellung der Gebäudewärmeversorgung auf erneuerbare Wärme mit Wärmepumpen als Schlüsseltechnologie sind. Ebenfalls ist die durch Wasserelektrolyse ermöglichte Sektorkopplung und Energiespeicherung und die Energieerzeugung durch Wind- und Solarenergie fundamentaler Bestandteil des zukünftigen Energiesystems. Die Reduzierung des Energieverbrauchs wird bisher vor allem durch Effizienzsteigerungen verfolgt, während Suffizienzmaßnahmen wie z.B. die Reduktion der Pro-Kopf-Wohnfläche kaum berücksichtigt werden, obwohl sie ebenfalls effektiv sind.

Die Umsetzung der genannten Aspekte stellt eine große Herausforderung dar, weil sie kostenintensiv und aufwendig ist. Die wirtschaftlichen Schäden durch die Folgen eines ungebremsten Klimawandels werden jedoch als deutlich höher eingeschätzt.[211]

Klimawissenschaftler haben in Studien herausgefunden, dass die Umstellung der deutschen Energieversorgung auf 100 % erneuerbare Energien schon vor dem Jahr 2050 notwendig ist.[212] Dabei hat die Bundesregierung in ihrem neu verabschiedeten Klimaschutzgesetz gerade erst ihre zuvor konkreten Klimaschutzziele abgeschwächt.[213] Insgesamt bleibt offen, bis zu welchem Jahr die Umstellung des deutschen Energiesystems erfolgen wird. Sicher ist nur, dass dafür sowohl gesellschaftliche als auch politische Unterstützung erforderlich ist.

[211] Vgl. *Schwermer, S.*, 2012.
[212] Vgl. *Rahmstorf, S.*, 2019.
[213] Vgl. *Bundesverbrand Erneuerbare Energien e.V., 2019.*

Literaturverzeichnis

3N Kompetenzzentrum Niedersachsen Netzwerk Nachwachsende Rohstoffe und Bioökonomie e. V. (Hrsg.): Biogas in Niedersachsen –Inventur 2016, 2017, https://www.3-n.info/media/4_Downloads/pdf_WssnSrvc_Srvc_Biogas_BiogasinventurNiedersachsen2016.pdf (Zugriff: 08.08.19).

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB): Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2011 und 2012 mit Zeitreihen von 2008 bis 2012, 2013, http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_endbericht_anwendungsbilanzen_2011-2012_endg.pdf (Zugriff: 01.10.19).

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB): Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2013 bis 2017, 2019, file:///C:/Users/lfrie/Downloads/ageb_bericht_anwendungsbilanzen_2013-2017_final__2019-01-03%20(4).pdf (Zugriff: 20.10.19).

Agentur für Erneuerbare Energien: Bundesländer-Übersicht zu Erneuerbaren Energien, 2019, https://www.foederal-erneuerbar.de/uebersicht/bundeslaender/NI/kategorie/solar/auswahl/813-durchschnittliche_ja/versatz/0/#goto_813 (Zugriff: 23.09.19).

Agentur für Erneuerbare Energien: Landesinfo Niedersachsen, 2019, https://www.foederal-erneuerbar.de/landesinfo/bundesland/NI/kategorie/top%2010/auswahl/177-stromerzeugung_aus_w/ (Zugriff: 23.09.19).

Agentur für Erneuerbare Energien: Landesinfo Niedersachsen, 2019, https://www.foederal-erneuerbar.de/landesinfo/bundesland/NI/kategorie/wind (Zugriff:08.09.19).

Agora Verkehrswende (Hrsg.): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe, 2018, https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2017/Syn-Kost_2050/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf (Zugriff: 15.09.19).

Agora Verkehrswende (Hrsg.): Mit der Verkehrswende die Mobilität von morgen sichern. 12 Thesen zur Verkehrswende, 2017, https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/12_Thesen/Agora-Verkehrswende-12-Thesen_WEB.pdf (Zugriff: 02.10.19).

Andelfinger, Volker P./Hänisch, Till: Internet der Dinge : Technik, Trends und Geschäftsmodelle, Springer-Verlag, 2015.

Beck, Hans-Peter/von Haaren, Christina; Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (Hrsg.): Szenarien zur Energieversorgung in Niedersachsen im

Jahr 2050, 2016, http://www.umwelt.niedersachsen.de/download/106468/Szenarienzur-EnergieversorgunginNiedersach-senimJahr2050-Gutachten-April2016.pdf (Zugriff: 01.07.19).

Behrendt, Siegfried/Göll, Edgar/Korte, Friederike; Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (Hrsg.): Effizienz, Konsistenz, Suffizienz Strategieanalytische Betrachtung für eine Green Economy, 2018, https://www.izt.de/fileadmin/publikationen/IZT_Text_1-2018_EKS.pdf (Zugriff: 12.08.19).

Blanck, Ruth/ Zimmer, Dr. Wiebke; *Öko-Institut e.V.* (Hrsg.): Sektorale Emissionspfade in Deutschland bis 2050 - Verkehr, 2016, https://www.oeko.de/oekodoc/2517/2016-047-de.pdf (Zugriff: 25.09.19).

Brasseur, Guy P./Jacob, Daniela/Schuck-Zöller, Susanne: Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven, Springer-Verlag, 2017.

Buchert, Matthias; Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Schlussbericht - Demografischer Wandel und Auswirkungen auf die Abfallwirtschaft, 2017, https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Forschungsdatenbank/fkz_3715_33_328_demografischer_wandel_abfallwirtschaft_bf.pdf (Zugriff: 01.10.19).

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (Hrsg.): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien: Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2017, 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/EEG_2017.pdf (Zugriff: 18.07.19)

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (Hrsg.): Das BMU klärt auf zum Thema Plastikrecycling, 2019, https://www.bmu.de/meldung/das-bmu-klaert-auf-zum-thema-plastikrecycling/ (Zugriff: 13.08.19).

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (Hrsg.): Klimaschutz in Zahlen, 2018, https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Broschueren/klimaschutz_in_zahlen_2018_bf.pdf (Zugriff: 22.10.19).

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (Hrsg.): Klimaschutzplan 2050: Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung, 2016, https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf (Zugriff: 01.10.19).

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (Hrsg.): Neue EU-Regeln für mehr Effizienz und Langlebigkeit von Haushaltsgeräten beschlossen, 2019,

https://www.bmu.de/pressemitteilung/neue-eu-regeln-fuer-mehr-effizienz-und-langlebigkeit-von-haushaltsgeraeten-beschlossen/ (Zugriff:12.08.19).

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (Hrsg.): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050, 2019, https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf?download=1 (Zugriff: 15.10.19).

Bundesministerium für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (Bafa): Energieaudit, 2016, https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Energieaudit/energieaudit_node.html (Zugriff: 13.08.19).

Bundesministerium für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Förderung, 2019, https://www.bfee-online.de/BfEE/DE/Foerderung/foerderung_node.html (Zugriff: 13.08.19).

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Energieverbrauchskennzeichnung von Produkten, 2017, https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energieverbrauchskennzeichnung-von-produkten-01-rahmenverordnung.html (Zugriff: 12.08.19).

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): Energiewende in der Industrie, 2019, https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie.pdf?__blob=publicationFile&v=10 (Zugriff: 04.11.19)

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Erneuerbare Energien, 2018, https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html (Zugriff: 01.10.19).

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): Grünbuch Energieeffizienz - Diskussionspapier des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, 2016, https://www.bmbf.de/upload_filestore/pub_hts/gruenbuch_energieeffizienz.pdf (Zugriff: 30.09.19).

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): Eckpunkte der Verordnung zur PV-Pilotausschreibung: Freiflächenausschreibungsverordnung, 2015, https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/eckpunkte-verordnung-zur-photovoltaik-pilotausschreibung.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (Zugriff: 20.09.19)

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): Sechster Monitoring-Bericht zur Energiewende: Berichtsjahr 2016: Die Energie der Zukunft, 2016,

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/sechster-monitoring-bericht-zur-energiewende.pdf?__blob=publicationFile&v=37 (Zugriff: 12.08.19).

Bundesregierung (Hrsg.): Eckpunkte für das Klimaschutzprogramm 2030, 2019, https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975232/1673502/768b67ba939c098c994b71c0b7d6e636/2019-09-20-klimaschutzprogramm-data.pdf?download=1 (Zugriff: 26.10.19).

Bundesverbrand Erneuerbare Energien e.V. (Hrsg.): Stellungnahme zum Referentenentwurf des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit zum Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG), 2019, https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Positionspapiere_Stellungnahmen/BEE/20191008_BEE-Stellungnahme_zum_Referentenentwurf_des_BMUB_zum_Bundes-Klimaschutzgesetz.pdf (Zugriff: 03.11.19).

Bundesverband Geothermie e.V. (Hrsg): Tiefe Geothermie-Projekte in Deutschland 2019, 2019, https://www.geothermie.de/fileadmin/user_upload/Bibliothek/Downloads/Poster_TG-Projekte_in_Deutschland_2018_2019_72dpi.pdf (Zugriff: 24.09.19).

Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (Hrsg.): Statistische Zahlen der deutschen Solarstrombranche (Photovoltaik), 2019, https://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/user_upload/bsw_faktenblatt_pv_2019_3.pdf, (Zugriff: 18.08.19).

Bundesverband WindEnergie (BWE): Windenergie in Deutschland - Zahlen und Fakten, 2019, https://www.wind-energie.de/themen/zahlen-und-fakten/deutschland/ (Zugriff: 06.09.19).

Bundesverband WindEnergie (BWE): Planung von Windenergieanlagen, 2018, https://www.wind-energie.de/themen/mensch-und-umwelt/planung/, (Zugriff: 12.08.19).

Chargemap (Hrsg.): Anzahl der Ladestationen in Deutschland, 2019, https://de.chargemap.com/about/stats/deutschland (Zugriff: 13.08.19).

Das Emsland: Werpeloh entscheidet Kreiswettbewerb für sich, 2014, https://www.emsland.de/buerger-behoerde/aktuell/pressemitteilungen/werpeloh_entscheidet_kreiswettbewerb_fuer_sich.html (Zugriff: 10.07.19).

Der Bundeswahlleiter: Europawahl 2019 – Strukturdaten Emsland, 2019, https://www.bundeswahlleiter.de/europawahlen/2019/strukturdaten/bund-99/land-3/kreis-3454.html (Zugriff: 10.07.19).

Deschermeier, Phillip/Henger, Ralf: Die Bedeutung des zukünftigen Kohorteneffekts auf den Wohnflächenkonsum, 2015, https://www.iwkoeln.de/fileadmin/publikationen/2015/233983/IW-Trends_2015-03-02_Deschermeier_Henger.pdf, (Zugriff: 10.07.19).

Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.): Gebäude-Energiewende braucht offene Technologiepfade, Bezahlbarkeit und Akzeptanz, 2017, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Meldungen/dena_Thesenpapier_Gebaeudestudie.pdf (Zugriff: 10.07.19).

Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.): Power to X Technologien, 2018, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/607/9264_Power_to_X_Technologien.pdf (Zugriff: 24.09.19).

Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.)*:* Systemlösung Power to Gas -Chancen, Herausforderungen und Stellschrauben auf dem Weg zur Marktreife, 2015, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9096_Fachbroschuere_Systemloesung_Power_to_Gas.pdf (Zugriff: 19.09.19).

Durstewitz, Michael/Behem, Guillaume; Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (Hrsg.): Windenergie Report Deutschland 2017, 2018, http://windmonitor.iee.fraunhofer.de/opencms/export/sites/windmoni-tor/img/Windmonitor-2017/WERD_2017_180523_Web_96ppi.pdf. (Zugriff:08.09.19).

Esser, Dr. Klaus/Kurte, Dr. Judith: Autonomes Fahren -Aktueller Stand, Potentiale und Auswirkungsanalyse, 2018, https://www.dihk.de/ressourcen/downloads/studie-autonomes-fahren.pdf (Zugriff: 02.10.19).

Erhard, Johannes, (WWF Deutschland): Klimafreundlicher Verkehr in Deutschland – Weichenstellung bis 2050, 2014, https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/mobilitaet/mobilitaet_klimafreundlicher_verkehr_in_deutschland_01.pdf (Zugriff: 13.08.19).

Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V. (Hrsg.): Basisdaten Bioenergie Deutschland 2018, 2018, http://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Broschuere_Basisdaten_Bioenergie_2018_web.pdf (Zugriff: 24.09.19).

Fachagentur Windenergie an Land (Hrsg.): Überblick Windenergie an Land, 2019, https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/Faktenpapiere/FA_Wind_Hoehenbegrenzungen_Wind-an-Land_03-2019.pdf (Zugriff: 06.09.19).

Fachagentur Windenergie an Land (Hrsg.): Umfrage zur Akzeptanz der Windenergie an Land, 2018, https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/FA_Wind_Umfrageergebnisse_Herbst_2018.pdf (Zugriff: 02.10.19).

Fraunhofer ISE (Hrsg.): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland, 2019, https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf (Zugriff: 18.08.19).

Fraunhofer IWES/IBP (Hrsg.): Wärmewende 2030. Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, 2017, https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2016/Sektoruebergreifende_EW/Waermewende-2030_WEB.pdf (Zugriff: 24.09.19).

Freund, Robert: Kurzbericht Speicherung in Deutschland: Aktueller Stand im Themenfeld Energiespeicherung in Deutschland, Entwicklung neu initiierter Aktivitäten, 2017, https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/energie/pdf/energiespeicherung-deutschland.pdf (Zugriff: 01.10.19).

Fuchs-Hanusch, Daniela/Friedl, Franz/Zöggeler, A./Kainz, Harald: Globale Sensitivitätsanalyse von Kostenparametern in der Erneuerungspriorisierung von Trinkwasserleitungen, Springer-Verlag, 2012.

Fuchs, Johann/Kubis, Alexander/Schneider, Lutz: Die Effekte der Zuwanderung auf das langfristige Erwerbspersonenpotenzial, 2015, https://www.econstor.eu/bitstream/10419/172646/1/844223611.pdf (Zugriff: 10.07.19).

Gerbert, Philipp/Herhold, Patrick; The Boston Consulting Group/ Prognos (Hrsg.): Klimapfade für Deutschland, 2018, https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2018/Januar/Klima-pfade_fuer_Deutschland_BDI-Studie_/Klimapfade-fuer-Deutschland-BDI-Stu-die-12-01-2018.pdf.

Geothermie-Allianz Bayern: Potential der hydrothermalen Geothermie zur Stromerzeugung in Deutschland, 2017, https://www.es.mw.tum.de/fileadmin/w00bhq/www/pdf/Potential_der_hydrothermalen_Geothermie_zur_Stromerzeugung_in_Deutschland.pdf (Zugriff: 24.09.19).

Goh, Lois; World Bank (Hrsg.): Waht a waste 2.0 - A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050, 2018, http://pubdocs.worldbank.org/en/429851552939596362/What-a-Waste-2-Revised-version.pdf (Zugriff: 29.09.19).

Grünwald, Reinhard/Ragwitz, Mario/Sensfuß, Frank/Winkler, Jenny; Büro für Technikfolgen-Abschätzungen beim deutschen Bundestag (Hrsg.): Regenerative Energieträger zur

Sicherung der Grundlast in der Stromversorgung, 2012, http://www.itas.kit.edu/pub/v/2012/grua12b.pdf (Zugriff: 01.10.19).

Günther, Jens/Lehmann, Harry; Umweltbundesamt (Hrsg.): Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten, 2019, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/190215_uba_fachbrosch_rtd_bf.pdf (Zugriff: 01.08.19).

Günther, Matthias: Energieeffizienz durch Erneuerbare Energien: Möglichkeiten, Potenziale, Systeme, Springer-Verlag, 2015.

H2 Live: Wasserstoff Tankstellen in Deutschland & Europa, 2019, https://h2.live/ (Zugriff: 13.08.19).

Handelsverband Deutschland (HDE): Verbrauch an Plastiktüten sinkt erneut, 2019, https://einzelhandel.de/presse/aktuellemeldungen/12163-verbrauch-an-plastiktuetensinkt-erneut (Zugriff: 13.08.19).

Hesse, Tilman/Bürger, Veit; Büro Freiburg/ Fraunhofer ISI/ IREES GmbH (Hrsg.)*:* Sektorale Emissionspfade in Deutschland bis 2050: Gebäudesektor und Stromverbrauch Privathaushalte, 2016, https://www.oeko.de/oekodoc/2595/2016-603-de.pdf (Zugriff: 01.07.19).

Hesse, Tilman/Koch, Matthias: Rolle Bioenergie im Strom Wärmemarkt bis 2050 unter Einbeziehung des zukünftigen Gebäudebestandes, 2018, https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB114_Bericht_Bio-Strom-W%C3%A4rme.pdf (Zugriff: 24.09.19).

Holm, Erik: Denmark at global front within solar heating, 2018, https://www.dtu.dk/english/news/2018/12/6-themedynamo-denmark-at-global-front-within-solar-heating?id=e86b4f49-0538-4c33-8415-de8852ce0971 (Zugriff: 18.08.19).

Hoffmann, Clemens; Fraunhofer IEE (Hrsg.): Barometer der Energiewende: Endenergiebedarf 2050, 2019, https://www.herkulesprojekt.de/de/Barometer/barometer_2019/endenergiebedarf2050.html (Zugriff: 01.10.19).

Hülsken, Christina; Agentur für Erneuerbare Energien e.V. (Hrsg.): Erneuerbare Energien für die Industrie: Prozesswärme aus Bioenergie sorgt für Unabhängigkeit und Klimaschutz, 2017, https://www.unendlich-viel-energie.de/media/file/1301.Renews_Kompakt_Prozesswaerme.pdf (Zugriff: 13.08.19).

Jülich Forschungszentrum: Jahresbericht 2017, 2017, https://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Downloads/PORTAL/DE/publikationen/jahresberichte/jahresbericht2017.pdf?__blob=publicationFile (Zugriff:22.10.19).

Jochum, Patrick./Mellwig, Peter: Ableitung eines Korridors für den Ausbau der erneuerbaren Wärme im Gebäudebereich, 2017, https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/BeuthHS_ifeu_Anlagenpotenzial_Endbericht_2017.pdf (Zugriff: 06.10.19).

Kosow, Hannah/Gaßner, Robert; Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (Hrsg.): Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse - Überblick, Bewertung und Auswahlkriterien, 2008, https://www.izt.de/fileadmin/downloads/pdf/IZT_WB103.pdf (Zugriff: 22.10.19).

Kasten, Peter/Mottschall, Moritz; Umweltbundesamt (Hrsg.): Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050, 2016, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/2016-11-10_endbericht_energieversorgung_des_verkehrs_2050_final.pdf (Zugriff: 13.08.19).

Koch, Michael/Sperr, Alexander; Bundesverband Wärmepumpe e.V. (Hrsg.): Branchenstudie 2015: Szenarien und politische Handlungsempfehlungen, 2015, https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user_upload/waermepumpe/07_Publikationen/2016-04-08_Branchenprognose_2015_web.pdf (Zugriff: 24.09.19).

Komsis-Netzwerk der Landkreise und kreisfreien Städte in Niedersachsen: Standortinfos Landkreis Emsland, 2018; https://www.komsis.de/de/standorte_niedersachsen/?profile=SI-40290 (Zugriff: 12.08.19).

Lackmann, Johannes; *WestfalenWind GmbH* (Hrsg.): Optimale Nutzung der Windkraft-Technisches Potential von Wind-Onshore Anlagen, 2014, http://www.izes.de/sites/default/files/publikationen/Veranstaltungen/3.Energiekongress_Block_1_Lackmann.pdf. (Zugriff: 08.09.19).

Landesamt für Statistik Niedersachsen (Hrsg.) : Bodenflächen in Niedersachsen nach Art der tatsächlichen Nutzung 2016, 2018, https://www.statistik.niedersachsen.de/download/133521 (Zugriff: 08.09.19).

Landkreis Emsland (Hrsg.): 1. Änderung des Regionalen Raumordnungsprogramms 2010 für den Landkreis Emsland, 2015, https://www.emsland.de/pdf_files/rp-3-begruendung_1234_1.pdf (Zugriff: 04.09.19).

Landkreis Emsland (Hrsg.): Datenspiegel 2016, 2017, https://www.emsland.de/pdf_files/zahlen-und-daten/datenspiegel-2016-web_1181_1.pdf (Zugriff: 24.08.19).

Landkreis Emsland (Hrsg.): Demografie: Aktuelle Entwicklungen und Tendenzen im Landkreis Emsland, 2016, https://www.emsland.de/pdf_files/demographie-emsland-2016_1046_1.pdf (Zugriff: 12.08.19).

Landkreis Emsland (Hrsg.): Die Gemeinden im Landkreis Emsland - Strukturdaten im Vergleich, 2016, https://www.emsland.de/pdf_files/zahlen-und-daten/gemeindevergleich-emsland-2016_1172_1.pdf (Zugriff: 12.08.19).

Landkreis Emsland (Hrsg.): Kurzinformation über den Landkreis, 2017, https://www.emsland.de/pdf_files/zahlen-und-daten/el-informations-broschuere-web-11-2017_2352_1.pdf (Zugriff: 12.08.19).

Landkreis Emsland (Hrsg.): Pressemitteilung: Das Emsland im Focus Deutschland-Ranking, 2018, https://www.emsland.de/buerger-behoerde/aktuell/pressemitteilungen/das-emsland-im-focus-deutschland-ranking.html (Zugriff: 12.08.19).

Lütkehus, Linda/Salecker, Hanno/Adlunger, Kirsten; Umweltbundesamt (Hrsg.): Potenzial der Windenergie an Land, 2013, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/potenzial_der_windenergie.pdf (Zugriff: 06.09.19).

Maier, Magnus; Agentur für Erneuerbare Energien e.V. (Hrsg.): Metaanalyse: Strom und strombasierte Kraftstoffe für den Verkehr, 2019, http://www.forschungsradar.de/fileadmin/content/bilder/Vergleichsgrafiken/meta_strom-verkehr_jan19/AEE_Metaanalyse_Strom_Verkehr_jan19.pdf (Zugriff: 10.07.19).

Mellwig, Peter; Institut für Energie- und Umweltforschung (Hrsg.): Technische Restriktionen bei der energetischen Modernisierung von Bestandsgebäuden, 2012, https://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/ake48/IWU-Tagung_2012-05-31_Mellwig_ifeu_RestriktionenWN%CC%83rmeschutz.pdf (Zugriff: 10.07.19).

Mertens, Konrad: Photovoltaik : Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis, 4.Auflage, 2018, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.

Müller, Ragnar/Plieninger, Jürgen/Rapp, Christian; Recherche 2.0 : Finden und Weiterverarbeiten in Studium und Beruf, 2013, Springer-Verlag.

Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (Hrsg.): Wege zur Erreichung der Klimaziele 2030 im Verkehrssektor, 2019, https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2019/03/Zwischenbericht-03_2019-der-AG1-Klimaschutz-der-NPM-Wege-zur-Erreichung-der-Klimaziele-2030-im-Verkehrssektor.pdf (Zugriff: 22.10.19).

Neugebauer, Reimund, Digitalisierung: Schlüsseltechnologien für Wirtschaft und Gesellschaft, 2018, Springer Verlag.

Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.): Die niedersächsische Landwirtschaft in Zahlen, 2017, https://www.ml.niedersachsen.de/download/124920/Die_niedersaeschsische_Landwirtschaft_in_Zahlen_2017.pdf (Zugriff: 24.09.19).

Nitsch, Joachim: Was für einen erfolgreichen Klimaschutz erforderlich ist: Schlussfolgerungen aus aktuellen Szenarien der deutschen Energieversorgung, 2018, https://co2abgabe.de/wp-content/uploads/2018/03/Klimaschutz-18.pdf (Zugriff: 13.08.19).

Nitsch, Joachim/Gerhardt, Norman/Wenzel, Bernd: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global, 2012, https://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/bilder/portal/portal_2012_1/leitstudie2011_bf.pdf (Zugriff: 15.09.19).

Oxfam Deutschland e.V. (Hrsg.): Migration und Flucht durch Klimawandel, 2016, https://www.oxfam.de/system/files/oxfam_migration_und-flucht-durch-klimawandel.pdf (Zugriff: 15.09.19).

Plötz, Patrick/Hacker, Florian/Jöhrens, Julius; Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (Hrsg.): Alternative Antriebe und Kraftstoffe im Straßengüterverkehr – Handlungsempfehlungen für Deutschland, 2018, https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/Thesen_Zukunft_StrG%C3%BCterverkehr.pdf (Zugriff: 19.08.19).

Quaschning, Volker: Sektorkopplung durch die Energiewende: Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zum Erreichen der Pariser Klimaschutz-ziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung, 2016, https://pvspeicher.htw-berlin.de/wp-content/uploads/2016/05/HTW-2016-Sektorkopplungsstudie.pdf (Zugriff: 24.09.19).

Rahmstorf, Stefan: Wie viel Kohlendioxid bleibt Deutschland noch?, 2019, https://www.spektrum.de/kolumne/wie-viel-kohlendioxid-bleibt-deutschland-noch/1636218 (Zugriff: 03.11.19).

Repenning, Julia/Braungardt, Sibylle; Öko-Institut e.V./ Fraunhofer ISI (Hrsg.): Klimaschutzszenario 2050: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Um-welt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2015, https://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf (Zugriff: 15.09.19).

Rippel, Kerstin Maria/Wiede, Thomas; 50Hertz Transmission GmbH u. a. (Hrsg.): Netzentwicklungsplan Strom 2030, 2017, https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/NEP_2030_1_Entwurf_Teil1_0.pdf (Zugriff: 06.10.19).

Schade, Gerd; Neue Osnabrücker Zeitung: Pläne für Geothermiekraftwerk: Woran es in Heede hakt, 2018, https://www.noz.de/lokales/doerpen/artikel/1588510/plaene-fuer-geothermiekraftwerk-woran-es-in-heede-hakt-1 (Zugriff: 24.09.19).

Schasse, Ulrich/Japtok, Jessica/Reinhold, Mario/Thiel, Hendrik; Niedersächsisches Institut für Wirtschaftsforschung e. V. (Hrsg.): Die regionalökonomische Bedeutung des Energiestandorts Emsland, 2016, https://geo.uni-greifswald.de/storages/uni-greifswald/fakultaet/mnf/geowissenschaften/Arbeitsbereiche_Geographie/Wirtschaft_Sozialgeographie/Seite_Forschung/NIW_Gutachten/Energiestandort_Emsland_Bedeutung_2016.pdf (Zugriff: 06.10.19).

Scheele, Prof. Dr. Ulrich/Kröcher, Dr. Uwe/Brandstetter, Sebastian; Stadt Oldenburg (Hrsg.): Energieregion Weser-Ems - Struktur, Entwicklung und Perspektiven der energiewirtschaftlichen Potenziale, 2015, https://www.energiecluster.de/pdf/studie_energieregion-weser-ems.pdf (Zugriff: 15.10.19).

Schlesinger, Dr. Michael/Lindenberger, Dr. Dietmar/Lutz, Dr. Christian: Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose, 2014, https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/entwicklung-der-energiemaerkte-energiereferenzprognose-endbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=7 (Zugriff: 01.10.19).

Schmidt-Kanefendt, Hans-Heinrich: Zukunftsfähige Energieversorgung, 2009, http://skn.privat.t-online.de/wattweg/files/100prosimPB.pdf, (Zugriff: 02.09.19).

Schwermer, Dr. Sylvia; Umweltbundesamt (Hrsg.): Ökonomische Bewertung von Umweltschäden, 2012, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/uba_methodenkonvention_2.0_-_2012_gesamt.pdf (Zugriff: 03.11.19).

Statistisches Bundesamt (Destatis): Bevölkerung in Deutschland nach Altersgruppen in den Jahren von 2018 bis 2060, 2019, https://de.statista.com/statistik/daten/studie/71539/umfrage/bevoelkerung-in-deutschland-nach-altersgruppen/ (Zugriff: 02.09.19).

Statistisches Bundesamt (Destatis): Bevölkerung in Deutschland zum Jahresende 2016 auf 82,5 Millionen Personen gewachsen, 2018, https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2018/01/PD18_019_12411.html (Zugriff: 02.09.19).

Statistisches Bundesamt (Destatis): Bodenfläche insgesamt nach Nutzungsarten in Deutschland am 31.12.2017, 2017, https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Flaechennutzung/Tabellen/bodenflaeche-insgesamt.html (Zugriff: 02.09.19).

Statistisches Bundesamt (Destatis): Durchschnittliche Wohnfläche pro Person nach Haushaltstyp, 2014, https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Tabellen/liste-haushaltsstruktur-wohnflaeche.html (Zugriff: 10.07.19).

Statistisches Bundesamt (Destatis): Umweltnutzung und Wirtschaft, 2019, https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Publikationen/Umweltnutzung-Wirtschaft/umweltnutzung-und-wirtschaft-tabelle-5850007187006-teil-1.pdf?__blob=publicationFile&v=5 (Zugriff: 15.07.19).

Sterner, Prof. Dr.-Ing. Michael/Eckert, Fabian/Thema, Martin; Forschungsstelle für Energienetze und Energiespeicher (Hrsg.); Langzeitspeicher in der Energiewende, 2014, https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/speicherkonferenz-michael-sterner-langzeitspeicher-energiewende.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (Zugriff: 02.10.19).

Stürmer, M./von Hagen, J.; Deutsche Rohstoffagentur (DERA) (Hrsg.): Der Einfluss des Wirtschaftswachstums aufstrebender Industrienationen auf die Märkte mineralischer Rohstoffe, 2012, https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-11.pdf?__blob=publicationFile&v=5 (Zugriff: 03.10.19).

Teske; Dr. Sven/Sawyer, Steve/Schäfer, Oliver; Greenpeace International (Hrsg.): energy [r]evolution, 2015, https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/greenpeace_energy-revolution_erneuerbare_2050_20150921.pdf (Zugriff: 09.09.19).

Umweltbundesamt: Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050, 2016, https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimaschutzbeitrag-des-verkehrs-bis-2050 (Zugriff: 13.08.19).

Umweltbundesamt: Ökodesign-Richtlinie, 2016, https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/oekodesign/oekodesign-richtlinie (Zugriff: 12.08.19)

Umweltbundesamt: Wohnfläche, 2018, https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/wohnflaeche#textpart-1 (Zugriff: 10.07.19).

VDI/VDE (Hrsg.): Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge – Bedeutung für die Elektromobilität, 2019, https://www.vdi.de/fileadmin/pages/vdi_de/redakteure/ueber_uns/dateien/Studie_Brennstoffzellen_und_Batteriefahrzeuge_.pdf (Zugriff: 19.08.19).

Wagner, U.; Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (Hrsg.): Energiezukunft 2050: Teil II – Szenarien, 2009, https://www.ffe.de/download/berichte/Endbericht_Energiezukunft_2050_Teil_II.pdf (Zugriff: 13.08.19).

Walter, Anna/Wiehe, Julia: Naturverträgliche Energieversorgung aus 100 % erneuerbaren Energien 2050, 2018, https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/service/Dokumente/skripten/Skript501.pdf (Zugriff: 23.09.19).

Wietschel, Martin; Umweltbundesamt (Hrsg.): Integration erneuerbarer Energien durch Sektorkopplung: Analyse zu technischen Sektorkopplungsoptionen, 2019, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-03-12_cc_03-2019_sektrokopplung.pdf (Zugriff: 02.10.19).

Wietschel, Martin/Plötz, Patrick; Fraunhofer ISI (Hrsg.): Sektorkopplung – Definition, Chancen und Herausforderungen, 2018, https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/sustainability-innovation/2018/WP01-2018_Sektorkopplung_Wietschel.pdf (Zugriff: 08.08.19).

Wilts, Henning; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH (Hrsg.): Einsparpotenziale beim Kunststoffeinsatz durch Industrie, Handel und Haushalte in Deutschland, 2015, https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/abfallpolitik/150414_nabu_plastikvermeidungsstudie.pdf (Zugriff: 29.09.19).

Wirth, Dr. Harry, Fraunhofer ISE (Hrsg.): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland, 2019, https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf (Zugriff: 23.09.19).

Anhang

Tabelle 5: Vergleich des gesamten Endenergieverbrauchs nach Sektoren und Anwendungsbereichen der Jahr 2012 und 2016
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [214] [215].

		Wärmenawendungen				Kälteanwendungen			Mech. Energie	IKT	Beleuchtung	Summe EEV
		Raumwärme	Warmwasser	sonst. Prozesswärme	Wärme gesamt	Klimakälte	sonst. Prozesskälte	Kälte gesamt				
Struktur des Endenergieverbrauch nach Anwendungszwecken [PJ]												
Industrie	2012	227,9	23,9	1669,8	1921,6	17,3	18,9	36,2	568,0	33,3	39,4	**2599**
	2016	154,9	16,3	1740,7	1911,9	17,2	37,2	54,4	577,9	32,8	32,2	**2609,3**
GHD	2012	662,0	75,2	108,6	845,8	13,7	35,8	49,5	212,4	78,4	210,6	**1397**
	2016	641,5	64,9	95,9	802,3	13,8	48,7	62,5	258,3	89,4	183,4	**1396**
Haushalte	2012	1664,4	370,3	144,7	2179,4	0,0	105,1	105,1	12,3	88,8	45,9	**2432**
	2016	1651,9	341,1	141,9	2134,9	4,4	102,7	107,1	20,3	77,2	36,7	**2376,3**
Verkehr	2012	13,1	0,0	0,0	13,1	2,6	0,0	2,6	2532,2	10,5	12,8	**2571**
	2016	12,7	0,0	0,0	12,7	2,7	0,0	2,7	2651,4	10,1	12,7	**2689,7**
Endenergie gesamt	2012	2567,4	469,4	1923,1	4959,9	33,6	159,8	193,4	3324,9	211,0	308,7	**8998**
	2016	2461,1	422,3	1978,5	4861,8	38,2	188,6	226,7	3508,0	209,5	265,1	**9071,2**
Veränderung EEV von 2012 bis 2016		**-4%**	**-11%**	**3%**	**-2%**	**12%**	**15%**	**15%**	**5%**	**-1%**	**-16%**	**1%**

Tabelle 6: Daten zu Abbildung 10
Quelle: Eigene Darstellung.

	KLIK		Gebäudewärme		Prozesswärme		Mobilität	
	2016	2040	2016	2040	2016	2040	2016	2040
Einheit	[GWh]							
Strom	3.124	2.969	328	1.220	702	2.145	136	1.661
Brenn- und Kraftstoffe	0	0	5.688	0	3.123	1.393	6.296	2.032
Wärme	0	0	1.226	3.985	472	0	0	0
Einsparungen	0	5 %	0	28 %	0	18 %	0	43 %

[214] Vgl. *Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.,* 2013.
[215] Vgl. *Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.,* 2019.

Tabelle 7: Daten zu Abbildung 11
Quelle: Eigene Darstellung.

	Basis-jahr	Ziel-jahr	Basisver-brauch	Zielver-brauch	Bevölke-rungszahl Zieljahr	Zielver-brauch 2040	Zielver-brauch 2040
Einheit			[GWh/a]	[GWh/a]		[GWh/a]	[GWh/a/1.000E]
Beck Nds 2050	2012	2050	340.456	187.631	9.452.211	227.848	24,11
Walter, A.: Szenario 1	2012	2050	2.554.000	1.362.000	76.600.000	1.675.684	21,88
Walter, A.: Szenario 2	2012	2050	2.554.000	1.630.605	76.600.000	1.873.604	24,46
Walter, A.: Szenario 3	2012	2050	2.554.000	1.595.658	76.600.000	1.847.853	24,12
Walter, A.: Szenario 4	2012	2050	2.554.000	1.864.038	76.600.000	2.045.607	26,71
Hoffmann, C.	2017	2050	2.591.000	1.850.000	76.600.000	2.074.545	27,08
Nitsch, J.: KLIMA-PLAN	2017	2050	2.591.000	1.758.333	76.600.000	2.010.657	26,25
Nitsch, J.: KLIMA-OPT	2017	2050	2.591.000	1.223.333	76.600.000	1.637.778	21,38
Gerbert, P.: 80% Klimapf.	2015	2050	2.458.000	1.617.000	76.600.000	1.857.286	24,25
Günther, J.: GreenEe-Szenario	2015	2050	2.737.000	1.608.000	76.600.000	1.930.571	25,20
Repenning, J.: KS80	2010	2050	2.588.050	1.507.500	76.600.000	1.777.638	23,21
Repenning, J.: KS95	2010	2050	2.588.050	1.210.830	76.600.000	1.555.135	20,30
Schlesinger, M.: Zielszenario	2011	2050	2.466.940	1.484.722	76.600.000	1.736.573	22,67
Mittelwert							23,97
MA-Zielszenario	2016	2040	21.094	15.405	675.743	15.405	22,80

Tabelle 8: Daten zu Abbildung 17
Quelle: Eigene Darstellung.

	Szenario	Strom	Brenn- und Kraftstoffe	Wärme	Einsparungen
Einheit		[GWh]	[GWh]	[GWh]	[%]
KLIK	Verbr.-Pess.	3340	0	0	0
	MA-Ziel	2.969	0	0	11
	Verbr.-Opt.	2.628	0	0	21
Gebäude-wärme	Verbr.-Pess.	1.454	0	4.741	0
	MA-Ziel	1.220	0	3.985	16
	Verbr.-Opt.	953	0	3.142	34
Prozess-wärme	Verbr.-Pess.	2.735	1.065	0	0
	MA-Ziel	2.145	1.393	0	10
	Verbr.-Opt.	1.484	1.686	0	17
Mobilität	Verbr.-Pess.	1.710	2.436	0	0
	MA-Ziel	1.661	2.032	0	11
	Verbr.-Opt.	1.585	1.670	0	21

Tabelle 9: Daten zu Abbildung 20
Quelle: Eigene Darstellung.

		Installierte Leistung	
		Onshore-WKA	PVF
Einheit		[MW]	[MW]
Verbr.-Opt.	2016	738	133
	2040	2.450	5.006
Batt.-Mob.	2016	738	133
	2040	2.450	8.435
Solar-GW	2016	738	133
	2040	2.450	9.223
MA-Ziel.	2016	738	133
	2040	2.450	9.553
Brennst.-Mob.	2016	738	133
	2040	2.450	14.133
Verbr.-Pess.	2016	738	133
	2040	2.450	14.271

Tabelle 10: Daten zu Abbildung 22
Quelle: Eigene Darstellung.

	Wohnfläche	Spez. Raum-wärmever-brauch	Sanierungs-rate	Erwerbstätig-keit	Prozess-Effizi-enz Warmwas-ser
Δ Parameter	Δ Endenergieverbrauch				
50%	88,0%	95,7%	104,0%	95,1%	102,7%
60%	90,4%	96,6%	103,2%	96,1%	102,2%
70%	92,8%	97,4%	102,1%	97,1%	101,6%
80%	95,2%	98,3%	101,6%	98,0%	101,1%
90%	97,6%	99,1%	100,8%	99,0%	100,6%
100%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
110%	102,4%	100,9%	99,2%	101,0%	99,5%
120%	104,8%	101,7%	98,4%	102,0%	98,9%
130%	107,2%	102,6%	97,6%	103,0%	98,4%
140%	109,6%	103,5%	96,8%	103,9%	97,9%
150%	112,0%	104,3%	96,0%	104,9%	97,3%

Tabelle 11: Daten zu Abbildung 23
Quelle: Eigene Darstellung.

	Anwendungs-Effizienz Haushalte	Prozess-Effizienz Ind./Gew.	Materialdurchsatz/Pers.	Nutzungsgrad Endanwend. Brennstoffe
Δ Parameter	**Δ Endenergieverbrauch**			
50%	100,8%	110,7%	89,3%	103,6%
60%	100,6%	108,6%	91,4%	102,9%
70%	100,5%	106,4%	93,6%	102,2%
80%	100,3%	104,3%	95,7%	101,5%
90%	100,2%	102,1%	97,9%	100,7%
100%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
110%	99,9%	97,9%	102,2%	99,3%
120%	99,7%	95,7%	104,3%	98,6%
130%	99,5%	93,6%	106,4%	97,8%
140%	99,4%	91,4%	108,6%	97,1%
150%	99,2%	89,3%	110,7%	96,4%

Tabelle 12: Daten zu Abbildung 24
Quelle: Eigene Darstellung.

	Entwicklung Personenverkehr (PVk)	Anteil Elektrotraktion am Endverbrauch im PVk	Entwicklung Güterverkehr (GVk)	Anteil Elektrotraktion am Endverbrauch im GVk	Entwicklung Luftverkehrs (LVk)	Kraftstoff-Effizienz im LVk
Δ Parameter	**Δ Endenergieverbrauch**					
50%	93,9%	104,0%	96,5%	102,2%	97,6%	102,4%
60%	95,1%	103,0%	97,2%	101,6%	98,1%	101,9%
70%	96,3%	102,1%	97,9%	101,2%	98,6%	101,5%
80%	97,5%	101,4%	98,6%	100,7%	99,0%	101,0%
90%	98,8%	100,6%	99,3%	100,4%	99,5%	100,5%
100%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
110%	101,2%	99,4%	100,7%	99,7%	100,5%	99,5%
120%	102,4%	98,9%	101,4%	99,4%	101,0%	99,0%
130%	103,6%	98,4%	102,1%	99,1%	101,5%	98,6%
140%	104,8%	98,0%	102,8%	98,9%	101,9%	98,1%
150%	106,1%	97,6%	103,5%	98,7%	102,4%	97,6%

Tabelle 13: Daten zu Abbildung 25
Quelle: Eigene Darstellung.

	Endgeräte-Effizienz Haushalte	Handels-/Dienstleist.-Vol./Pers.	Prozess-Effizienz Dienstleist.	Prozess-Effizienz prod. Gewerbe
Δ Parameter	**Δ Endenergieverbrauch**			
50%	101,3%	93,9%	103,2%	105,1%
60%	101,1%	95,1%	102,6%	104,1%
70%	100,8%	96,3%	101,9%	103,1%
80%	100,5%	97,6%	101,3%	102,0%
90%	100,3%	98,8%	100,7%	101,0%
100%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
110%	99,7%	101,2%	99,4%	99,0%
120%	99,5%	102,5%	98,7%	98,0%
130%	99,2%	103,7%	98,1%	96,9%
140%	99,0%	104,9%	97,4%	95,9%
150%	98,7%	106,1%	96,8%	94,9%

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremdem Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Ort, Datum

Unterschrift