



HOCHSCHULE OSNABRÜCK
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fakultät Management, Kultur und Technik

Institut für Duale Studiengänge

Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen

Anonymisierte Fassung der Bachelorarbeit mit dem Titel:

**Die Rolle der Onshore-Windenergie
in Deutschlands Energiesystem der Zukunft
mit 100 % erneuerbaren Energien**

Erstprüferin: Frau Prof. Dr. Anne Schierenbeck

Zweitprüfer: Herr Prof. Dr. Johannes Koke

Eingereicht von: Ann-Kathrin Bergmeier

Matrikelnummer: 762224

Ausgabedatum: 01.04.2019

Abgabedatum: 27.05.2019

Vermerk

Die Bachelorarbeit mit dem Titel:

„Die Rolle der Onshore-Windenergie in Deutschlands Energiesystem der Zukunft mit 100 % erneuerbaren Energien“

von Ann-Kathrin Bergmeier wurde mit Unterstützung durch die GE Wind Energy GmbH in Salzbergen angefertigt und unterliegt einer Vertraulichkeitsvereinbarung.

Die vorliegende anonymisierte Fassung der Arbeit wurde zur Veröffentlichung in der Hochschulbibliothek und für hochschulinterne Zwecke durch die GE Wind Energy GmbH freigegeben.

Zusammenfassung

Für eine sichere, nachhaltige und wirtschaftliche Energieversorgung der Zukunft sowie das Erreichen der Pariser Klimaziele, ist eine Umstellung des Energiesystems in Deutschland auf 100 % erneuerbare Energien erforderlich. Dies ist bis zum Jahr 2050 realisierbar. Insbesondere Unternehmen der Energiebranche, wie der Windkraftanlagenhersteller GE Wind Energy GmbH, sollen sich mit den zukünftigen Änderungen des Energiesystems auseinandersetzen. Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich die Bachelorarbeit mit Deutschlands Energiesystem der Zukunft aus 100 % erneuerbaren Energien und der damit verbundenen Rolle der Onshore-Windenergie. Dazu erfolgt eine Ermittlung von Deutschlands zukünftigem Energieverbrauch und der Voraussetzungen für die Energieversorgung im Jahr 2050 mit Hilfe des Simulations-Tools 100prosim. Der zukünftige Beitrag der Onshore-Windenergie wird unter Berücksichtigung der technischen Entwicklung dieser Energiequelle untersucht sowie mit klimapolitischen und gesellschaftlichen Ansichten verglichen. Als Ergebnisse der Bachelorarbeit kann Deutschlands Energieverbrauch im Jahr 2050, in Folge von umfassenden Gebäudesanierungen sowie der Verlagerung, Vermeidung und Verbesserung des Verkehrs, Substitution von Brennstoffen und weiteren Effizienzsteigerungen, um 41,84 % reduziert werden gegenüber 2016. Für die Deckung des Energiebedarfs müssen Energiespeicher, intelligente Stromnetze sowie alle erneuerbaren Energiequellen ausgebaut und technisch verbessert werden. Zukünftig sind Onshore-WKA mit durchschnittlich 5,5 MW Nennleistung, 2870 Volllaststunden und 7,94 ha/MW Flächenbedarf zu erwarten. Folglich wird Onshore-Windenergie die Hauptrolle in der zukünftigen Energieversorgung übernehmen. Durch einen Ausbau von Onshore-WKA, der die klimapolitischen Ziele deutlich übersteigt, auf 4,15 % (187.028 MW) bis 5,3 % (238.629 MW) der Landesfläche, wird die Energiewende zu einem Energiesystem mit 100 % erneuerbaren Energien bis 2050 ermöglicht.

Abstract

To ensure a secure, sustainable and economic energy supply in the future and to achieve the Paris climate targets, the energy system in Germany must be restructured to use 100 % renewable energies. Realistically this can be accomplished by 2050. In this context companies in the energy sector such as the wind turbine manufacturer GE Wind Energy GmbH, need to deal with future changes of the energy system. The bachelor thesis deals with Germany's energy system of the future with 100 % renewable energies and the associated role of onshore wind energy. Therefore, the German energy consumption and the prerequisites for the energy supply in the year 2050 will be determined by using the simulation tool 100prosim. The future performance of onshore wind energy will be analysed in consideration of the technical development of this energy source as well as compared with policy and social views. As results of the Bachelor thesis, Germany's energy consumption in 2050 can be reduced by 41.84 % compared to 2016. This can be achieved by comprehensive building refurbishment, as well as relocation, avoidance and improvement of traffic, substitution of fuels and further efficiency improvements. To cover the energy demand, energy storage systems, intelligent power grids and all renewable energy sources must be expanded and technically improved. In the future onshore wind turbines can be expected with on average 5.5 MW rated power, 2870 full load hours and 7.94 ha/MW land requirement. Therefore onshore wind energy will become the main supplier of energy in the future. The expansion of onshore wind turbines to 4.15 % (187,028 MW) to 5.3 % (238,629 MW) of the land area will enable an energy system with 100 % renewable energies by 2050. This exceeds the climate policy goals.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	VII
Symbolverzeichnis.....	VIII
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	X
Anlagenverzeichnis.....	XI
1 Einleitung.....	1
1.1 Hintergrund	1
1.2 Lösungsansatz und Vorgehensweise	2
2 Theoretische Szenario-Grundlagen	4
2.1 Betrachtungsjahr	4
2.2 Simulations-Tool	5
2.2.1 Grundstruktur.....	5
2.2.2 Energieverbrauch	7
2.2.2.1 Bevölkerung.....	7
2.2.2.2 Bruttoinlandsprodukt	8
2.2.2.3 KLIK.....	9
2.2.2.4 Gebäudewärme	10
2.2.2.5 Prozesswärme.....	13
2.2.2.6 Mobilität	15
2.2.2.7 Grundstoff-Synthese	18
2.2.3 Energieversorgung	19
2.2.3.1 Solarenergie	19
2.2.3.2 Windenergie	20
2.2.3.3 Wasserkraft	21
2.2.3.4 Biogene Brennstoffe.....	22
2.2.3.5 Umgebungswärme	24
2.2.3.6 Tiefengeothermie	25
2.2.3.7 Stromwandlung und -speicherung	26
3 Energieverbrauch der Zukunft	29
3.1 Simulation des Energieverbrauchs.....	29

3.2	Validierung des Ergebnisses	30
3.3	Interpretation des Energieverbrauchs.....	31
4	Technische Entwicklungen der Onshore-Windenergie	35
4.1	Zusammensetzung des Energieertrags.....	35
4.2	Vergangene Entwicklungen.....	37
4.3	Zukünftige Entwicklungen	40
5	Voraussetzungen für die Energieversorgung	44
5.1	Simulation der Energieversorgung	44
5.2	Ausbau der erneuerbaren Energien	45
5.2.1	Onshore-WKA und PVF	48
5.3	Implementierung der Sektorkopplung.....	51
5.4	Ausbau der Energiespeicher	53
5.5	Erweiterung der Stromnetze.....	54
6	Vergleich der Ausbauziele.....	55
6.1	Klimapolitische Notwendigkeiten	55
6.2	Gesellschaftliche Ansichten	57
7	Schlussfolgerungen.....	58
7.1	Kritische Reflexion	58
7.2	Fazit	60
7.3	Ausblick	62
	Literaturverzeichnis	XII

Abkürzungsverzeichnis

BIP	Bruttoinlandsprodukt
ca.	circa
d.h.	das heißt
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
GE	General Electric
ggf.	gegebenenfalls
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
i.d.R.	in der Regel
KLIK	Kraft/Licht/Information/Kommunikation/Kälte
Mio.	Millionen
PKW	Personenkraftwagen
PV	Photovoltaik
PVF	Photovoltaik-Freiflächenanlage(n)
RD	Rotordurchmesser
UA	Unterabschnitt
u.a.	unter anderem
UUA	Unterunterabschnitt
vgl.	vergleiche
WKA	Windkraftanlage(n)

Symbolverzeichnis

$^{\circ}\text{C}$	Grad Celsius
%	Prozent
a	Anno (Jahr)
$A_{\text{Flächenbedarf}}$	Spezifischer Flächenbedarf
A_{Wp}	Windparkfläche
b_{Wp}	Breite der Windparkfläche
d_{Rotor}	Rotordurchmesser
$E_{\text{Flächenertrag}}$	Spezifischer Flächenertrag
E_{Wp}	Energieertrag des Windparks
GWh	Gigawattstunde(n)
h	Hora (Stunde)
ha	Hektar
KWh	Kilowattstunde(n)
l_{Wp}	Länge der Windparkfläche
m	Meter
m^2	Quadratmeter
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde(n)
n_{WKA}	Anzahl an WKA
P_{Nenn}	Nennleistung
t_{Volllast}	Volllaststunden
$t_{\text{VolllastNord}}$	Volllaststunden in Norddeutschland
$t_{\text{VolllastSüd}}$	Volllaststunden in Süddeutschland

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Validierung des Energieverbrauchs	30
Abbildung 2: Veränderung des Energieverbrauchs der Verbrauchssektoren	31
Abbildung 3: Veränderung des Energieverbrauchs der Energieformen	34
Abbildung 4: Windparkstruktur	38
Abbildung 5: Energieerzeugung der Energiequellen.....	46
Abbildung 6: Installierte Leistung der Onshore-WKA und PVF	50
Abbildung 7: Vergleich von Energieerzeugung und Energieverbrauch	52
Abbildung 8: Vergleich der Ausbauziele	56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Parameter des Energieverbrauchs.....	30
Tabelle 2: WKA-Produkttypen der GE Wind Energy GmbH.....	37
Tabelle 3: Energieerträge und Volllaststunden	38
Tabelle 4: Windparkflächen der WKA-Produkttypen	38
Tabelle 5: Spezifische Flächenerträge und -bedarfe der WKA-Produkttypen.....	39
Tabelle 6: Windparkfläche, Volllaststunden und Energieerträge	42
Tabelle 7: Zukünftiger spezifischer Flächenbedarf	43
Tabelle 8: Parameter der Energieversorgung	45
Tabelle 9: Ausbauverhältnis der Onshore-WKA und PVF	49
Tabelle 10: Eingaben in WindPro	XIII
Tabelle 11: Daten zu Abbildung 1.....	XIII
Tabelle 12: Daten zu Abbildung 2 und Abbildung 3	XIII
Tabelle 13: Daten zu Abbildung 5.....	XIII
Tabelle 14: Daten zu Abbildung 7.....	XIII
Tabelle 15: Daten zu Abbildung 8.....	XIII
Tabelle 16: Daten zu Abbildung 6.....	XIII

Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Eingaben in WindPro.....	XIX
Anlage 2: Wertetabellen	XX
Anlage 3: Eidesstattliche Erklärung	XXIII

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Die Energiewende ist ein zentrales Element der Energiepolitik und gehört zu den zukünftigen Herausforderungen für Deutschland und die Welt. Der Hintergrund dieser Wende ist der Klimawandel, welcher sich in steigenden Durchschnittstemperaturen, stärkeren Klimavariabilitäten und Extremwetterereignissen äußert.¹ Als Ziel der Energiewende soll durch eine Transformation des aktuellen Energiesystems der Klimawandel begrenzt sowie die sichere, nachhaltige und wirtschaftliche Energieversorgung verbessert werden.² Um dies zu erreichen, ist ein Verzicht auf Atomkraft und eine Verringerung der Treibhausgasemissionen notwendig. Entsprechende Maßnahmen sind dafür der Umstieg von fossilen auf erneuerbare Energieträger sowie ein effizienterer Energieeinsatz.³

Im Pariser Klimaabkommen setzten sich 2015 alle Länder das Ziel, Beiträge zum Klimaschutz zu leisten, um die Erderwärmung auf „deutlich“ unter 2 °C zu begrenzen und eine weltweite Treibhausgasneutralität bis 2050 zu erreichen.⁴ Die Industriestaaten spielen in der Energiewende eine besondere Rolle, weil sie, aufgrund der langen Industrialisierungsgeschichte, hauptverantwortlich für den Klimawandel sind. Zudem besitzen sie wirtschaftliche, technische und gesellschaftliche Kapazitäten für eine erfolgreiche Umsetzung der Energiewende.⁵ Deutschlands nationale Klimaziele sind im Klimaschutzplan 2050 zusammengefasst. Dieser zielt u.a. auf Energieeffizienzsteigerungen sowie einen Anteil an erneuerbaren Energien von 60 % am deutschen Energieverbrauch 2050 ab.⁶

¹ Vgl. Kühne, O./Weber, F., 2018.

² Vgl. European Commission: Directorate-General for Research and Innovation, 2018.

³ Vgl. Gerbert, P./Herhold, P., 2018.

⁴ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2016.

⁵ Vgl. Repenning, J./Braungardt, S., 2015.

⁶ Vgl. Nitsch, J., 2018.

Während zurzeit ca. 40 % des Stroms in Deutschland aus regenerativen Energien gewonnen wird, zeigt die Greenpeace-Studie Energy Revolution, dass eine globale Energieversorgung aus 100 % erneuerbaren Energien im Jahr 2050 technisch möglich ist.⁷ Hierfür sind neben technischen Entwicklungen ein nachhaltiges Bewusstsein und verminderter Konsum der Bevölkerung von Bedeutung.⁸

Vor dem Hintergrund der Energiewende ist es für Unternehmen in der Energiebranche besonders bedeutend sich mit den zukünftigen Änderungen des Energiesystems auseinanderzusetzen. Der Hersteller von Windkraftanlagen (WKA) GE Wind Energy GmbH, mit dem Hauptsitz in Salzburg, gehört als Tochtergesellschaft zu dem amerikanischen Konzern General Electric. Das Produkt- und Serviceportfolio umfasst Onshore-WKA mit Nennleistungen zwischen 1,5 MW und 5,5 MW sowie Entwicklung, Produktion, Wartungen von WKA und Netzintegrationen. An dem Hauptstandort sind zurzeit ca. 1000 Mitarbeiter beschäftigt und es werden das Maschinenhaus, die Nabe und elektrische Komponenten für den Turmfuß montiert.⁹ Für den zukünftigen Erfolg des Unternehmens ist es sinnvoll den Energiebedarf und die Rolle der Onshore-Windenergie in Deutschland zu kennen, um den Markt und die Auftragslage einschätzen zu können. Diese Bachelorarbeit beschäftigt sich folglich mit Deutschlands Energiesystem der Zukunft aus 100 % erneuerbaren Energien.

1.2 Lösungsansatz und Vorgehensweise

Das Ziel ist es, mit Hilfe des Simulations-Tools 100prosim¹⁰, die folgende Forschungsfrage zu beantworten:

Welchen Beitrag wird die Onshore-Windenergie in Deutschlands Energiesystem der Zukunft aus 100 % erneuerbaren Energien leisten, unter Berücksichtigung der technischen Entwicklungen dieser Energiequelle?

⁷ Vgl. *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie*, 2016.

⁸ Vgl. *Teske, S./Sawyer, S.*, 2015.

⁹ Vgl. *GE Wind Energy GmbH*, 2019 (04.04.2019).

¹⁰ Vgl. *Schmidt-Kanefendt, H.-H.*, 2019 (02.04.2019).

Für die Beantwortung erfolgt eine schrittweise Betrachtung folgender Teilaspekte:

1. Wie hoch wird Deutschlands Energieverbrauch der Zukunft sein?
2. Welche technischen Entwicklungen sind für die Onshore-Windenergie zukünftig zu erwarten?
3. Unter welchen Voraussetzungen kann der Energiebedarf der Zukunft zu 100 % aus erneuerbaren Energiequellen gedeckt werden?
4. Ein Vergleich der aktuellen Ausbauziele mit den klimapolitischen Notwendigkeiten und gesellschaftlichen Ansichten.

Zunächst erfolgt eine theoretische Vorstellung der Struktur des Simulations-Tools. Anhand einer Literaturrecherche wird anschließend nachvollzogen, welche Ansätze in 100prosim ggf. aktualisiert werden müssen sowie die angenommenen Rahmenbedingungen und die fixen Parameter für die Bachelorarbeit bestimmt. Mittels verschiedener Simulationen und Berechnungen werden die Unterfragen untersucht, um dadurch die Forschungsfrage zu beantworten. Abschließend erfolgte eine kritische Betrachtung, Zusammenfassung und ausblickende Einordnung der Ergebnisse.

2 Theoretische Szenario-Grundlagen

Als erstes wird ermittelt, zu welchem Zeitpunkt eine Energieversorgung mit 100 % erneuerbaren Energien in Deutschland existieren kann. Im Rahmen der Vorstellung des Simulations-Tools, werden Parameter für die Simulation eines Szenarios bestimmt, welches Deutschlands Energiesystem zu dem bestimmten Jahr repräsentiert.

2.1 Betrachtungsjahr

Für eine erfolgreiche Energiewende ist der Ausbau von erneuerbaren Energien unverzichtbar, jedoch wird durch das aktuelle Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) in Deutschland die Ausbaugeschwindigkeit dieser gebremst. Dadurch ist eine langfristig stabile Energieversorgung des Landes mit 100 % erneuerbaren Energien, ohne Energieimporte, in kurzer Zeit nicht erreichbar.¹¹ Zuvor müssen erneuerbare Energiequellen, Energiespeicher und Stromnetze ausgebaut werden. Dabei sind einige Technologien zurzeit in der Forschungs- und Entwicklungsphase und müssen für großtechnische Anwendungen weiterentwickelt werden. Durch Effizienzsteigerungen und gesellschaftliches Umweltbewusstsein muss der Energieverbrauch zudem zunächst gesenkt werden, um diesen mit 100 % erneuerbare Energien decken zu können.¹²

In der Literatur wird überwiegend davon ausgegangen, dass Deutschlands Energieversorgung ab 2050 vollständig aus regenerativen Energien bestehen kann.^{13 14 15} Als frühestmöglichem Zeitpunkt wird das Jahr 2040 genannt.¹⁶ Die Bundesregierung setzt hingegen das Ziel im Jahr 2050 einen Anteil von 60 % des Energieverbrauchs und 80 % des Stromverbrauchs in Deutschland mit erneuerbaren Energien zu decken.¹⁷

¹¹ Vgl. Kunz, C./Kirmann, S., 2015.

¹² Vgl. Elsner, P./Fischedick, M., 2015.

¹³ Vgl. Teske, S./Sawyer, S., 2015.

¹⁴ Vgl. Ram, M./Fell, H.-J., 2018.

¹⁵ Vgl. Walter, A./Wiehe, J., 2018.

¹⁶ Vgl. Quaschnig, V., 2016.

¹⁷ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2016.

Jedoch müssen die zuvor genannten notwendigen Schritte für die Energiewende u.a. durch politische Entschlüsse vorangetrieben werden. Die Politik bremst aber den Ausbau von erneuerbaren Energien und fokussiert einen geringeren Beitrag dieser zur Energieversorgung als Literaturquellen.

Somit erscheint 2050 als Zieljahr sinnvoller als 2040. Die Bachelorarbeit beschäftigt sich folglich mit Deutschlands Energiesystem im Zieljahr 2050 mit 100 % erneuerbaren Energien und ohne Energieimporte.

2.2 Simulations-Tool

Dieser Abschnitt thematisiert das in der Bachelorarbeit verwendete Simulations-Tool 100prosim. Dazu wird dessen Grundstruktur vorgestellt und nacheinander auf die im Simulations-Tool abgebildeten Energieverbrauchssektoren und Energiequellen eingegangen. Jeweils wird beschrieben aus welchen Parametern sich diese zusammensetzen und im Rahmen einer Quellenüberprüfung die Aktualität der zugrunde liegenden Quellen untersucht.

2.2.1 Grundstruktur

Das Simulations-Tool 100prosim ist ein Excel-Berechnungstool für eine flächenbasierte Modellierung eines Zielszenarios, bei dem der Energiebedarf in einer Region zu einem bestimmten Zielzeitpunkt mit 100 % erneuerbaren Energien gedeckt wird. Durch die zielorientierte Methodik von 100prosim kann eine Ziel-Situation in der Zukunft simuliert werden. Das Simulations-Tool umfasst die Bereiche Energieverbrauch und Energieerzeugung. Diese gliedern sich jeweils in verschiedene Verbrauchssektoren und erneuerbare Energiequellen, welche aus Berechnungen mit unterschiedlichen Parametern aufgebaut sind. Die Darstellung erfolgt übersichtlich in mehreren Excel-Tabellenblättern.

Dabei wird zwischen einem Status-Szenario und einem Zielszenario unterschieden. Das Status-Szenario repräsentiert Deutschlands Energiesituation im Statusjahr 2016, wobei in 100prosim für alle Parameter literaturbasierte Werte aus 2016 vorliegen.

Das Zielszenario wird vom Benutzer des Simulations-Tools generiert. Es bildet das zukünftige Energiesystem mit 100 % erneuerbaren Energien ab, in einem bestimmten Jahr. Als Hilfestellung werden für dieses Zielszenario ebenfalls Werte vorgeschlagen, zu denen Quellenangaben vorliegen. Durch die Variation verschiedener Parameter kann ein eigenes Zielszenario für das festgelegte Zieljahr simuliert werden. Diesem steht das Status-Szenario gegenüber, um die Veränderungen in der Zukunft gegenüber dem Statusjahr sichtbar zu machen.¹⁸

Es wird ein theoretischer Energiebedarf Deutschlands nach dem Verursacher-Prinzip, d.h. aus dem Produkt der Einwohnerzahl und dem durchschnittlichen deutschen Pro-Kopf-Energieverbrauch, prognostiziert. Falls nur eine einzelne Region Deutschlands betrachtet wird, kann der Energiebedarf zusätzlich mit dem Solidar-Prinzip verrechnet werden, welches auf Grundlage der Bevölkerungsdichte, einen Energieaustausch zwischen dicht besiedelten Ballungs- und schwach besiedelten ländlichen Gebieten, innerhalb der betrachteten Region, impliziert.

Der theoretische Energiebedarf herrscht in den Verbrauchssektoren KLIK (Kraft/Licht/Information/Kommunikation/Kälte), Gebäudewärme, Prozesswärme und Mobilität.¹⁹ Alle Verbrauchssektoren setzen sich aus Berechnungen mit mehreren Parametern zusammen. Aus Verrechnungen des theoretischen Energiebedarfs in allen Verbrauchssektoren für das Zieljahr mit den jeweiligen Parametern resultiert der tatsächliche zukünftige Energieverbrauch.

Folglich ist das Ziel, diesen simulierten Energieverbrauch mit 100 % erneuerbaren Energien zu decken. Dafür sind im Simulations-Tool die Energiequellen Solar-, Windenergie, Wasserkraft, Biomasse, Umgebungswärme und Tiefengeothermie abgebildet. Dessen Energieproduktion ist primär physisch begrenzt und berechnet sich ebenfalls durch verschiedene Parameter bezüglich naturräumlicher Gegebenheiten sowie technischer Kenngrößen.²⁰

¹⁸ Vgl. *Dingeldey, M./Hertle, H.*, 2012.

¹⁹ Vgl. *Schmidt-Kanefendt, H.-H.*, 2018.

²⁰ Vgl. *Hermes, J.*, 2014.

Dabei umfasst das Simulations-Tool die Energieformen Strom, Wärme, Brennstoffe und Kraftstoffe, welche von den Energiequellen produziert werden müssen, um diese in den Energieverbrauchssektoren zu nutzen.

Im Folgenden werden nacheinander die einzelnen Energieverbrauchssektoren sowie Energiequellen thematisiert und erklärt aus welchen Parametern sich diese hauptsächlich zusammensetzen. Mittels einer Literaturrecherche werden die im Simulations-Tool vorgeschlagenen Werte für das Jahr 2050 überprüft und ggf. aktualisiert. Das bereits bestehende Szenario mit den vorgeschlagenen Werten für 2050 wird im Folgenden als Vorschlag-Szenario bezeichnet. Das durch Aktualisierung der Werte entstehende eigene Szenario heißt BA-Zielszenario. Das Status-Szenario beschreibt das Energiesystem im Statusjahr 2016.

Zu fast allen Parametern bestehen in der Literatur sehr verschiedene Ansätze. Dementsprechend wird sich je Parameter für einen Wert entschieden, der aus einer möglichst aktuellen Literaturquelle stammt und sich als realistischer Zielwert eignet, um eine Energieversorgung aus 100 % erneuerbaren Energien in Deutschland zu erreichen.

2.2.2 Energieverbrauch

Zunächst wird mit Hilfe des Simulations-Tools der theoretische Energiebedarf in den einzelnen Verbrauchssektoren für 2050 durch das Verbraucher-Prinzip ermittelt. Danach wird unter Einbeziehung verschiedener Parameter in den jeweiligen Sektoren aus dem theoretischen Energiebedarf der tatsächliche Energieverbrauch für das Zieljahr berechnet.

2.2.2.1 Bevölkerung

Die anfängliche Ermittlung des theoretischen Energiebedarfs für 2050 erfolgt in allen Energieverbrauchssektoren nach dem Verursacher-Prinzip. Es herrscht demnach ein direkter Zusammenhang zwischen der Einwohnerzahl und dem Energiebedarf.

Während im Vorschlag-Szenario für das Zieljahr die gleiche Bevölkerungsanzahl in Deutschland wie im Statusjahr festgelegt ist, befürworten die meisten Literaturquellen eine Bevölkerungsabnahme. Ältere Quellen prognostizieren dabei eine stärkere Bevölkerungsabnahme als aktuellere. Aufgrund von steigenden Geburtenzahlen und verstärkter Einwanderung in den letzten Jahren ergeben sich Unterschiede in den Literaturquellen und somit große Unsicherheiten hinsichtlich der Bevölkerungsentwicklung.²¹ Zwei aktuelle Studien prognostizieren, dass 2050 ca. 79.238.000 Einwohner in Deutschland leben werden.^{22 23} Die Werte werden in das BA-Zielszenario übernommen.

In der Literatur herrscht Einigkeit hinsichtlich einer sich verändernden Bevölkerungsstruktur durch den demografischen Wandel. Dies zeigt sich in einem sinkenden Anteil an jungen Menschen und gleichzeitig steigenden Anteil an älteren Menschen.²⁴

2.2.2.2 Bruttoinlandsprodukt

In Folge der durchschnittlichen Jahreswachstumsrate des BIP pro Kopf von 0 % im Vorschlag-Szenario ändert sich dieses 2050 gegenüber 2016 nicht. Bei einer gleichen (Vorschlag-Szenario) bzw. leicht geringeren Bevölkerungsanzahl (BA-Zielszenario), wird das BIP im Zieljahr den gleichen bzw. einen leicht geringeren Wert als im Statusjahr besitzen. In der Literatur wird hingegen von einem durchschnittlichen jährlichen Wirtschaftswachstum zwischen 0,7 % und 1,2 % und einer Bevölkerungsdegression ausgegangen.^{25 26} Aus dem Mittelwert von 0,95 % für das BIP und der Bevölkerungsabnahme (vgl. UUA 2.2.2.1) ergibt sich eine durchschnittliche Wachstumsrate des BIP pro Kopf von 1,06 %.²⁷ Nichtsdestotrotz befindet sich der Dienstleistungsanteil am BIP seit dem Jahr 2000 nahezu auf einem konstanten Niveau mit 68 %.²⁸

²¹ Vgl. *Statistisches Bundesamt*, 2015 (09.04.2019).

²² Vgl. *United Nations*, 2017.

²³ Vgl. *Statistisches Bundesamt*, 2019 (08.04.2019).

²⁴ Vgl. *Statistisches Bundesamt*, 2015 (09.04.2019).

²⁵ Vgl. *Walter, A./Wiehe, J.*, 2018.

²⁶ Vgl. *Maier, M.*, 2019.

²⁷ $\sqrt[34]{(1,0095^{34} \div 79.238.000) \div (1 \div 82.175.684)} = 1,06 \%$

²⁸ Vgl. *Statistisches Bundesamt*, 2018 (09.04.2019).

In Anbetracht der Digitalisierung steigt der Anteil von produktbezogenen Dienstleistungen, wie der Service für komplexere Produkte. Außerdem geht der Trend zu einer Nachfrage nach der Nutzung, statt dem Erwerb eines Produktes.²⁹ Resultierend aus dem zuletzt gleichgebliebenen Anteil und der zukünftigen Bedeutungszunahme der Dienstleistungen sowie dem leicht steigenden BIP pro Kopf, wird eine geringe Zunahme des Dienstleistungsanteils auf 70 % im Jahr 2050 für das BA-Zielszenario festgelegt. Dadurch wird im Zieljahr der Dienstleistungsbereich bei 146 % und der Industriebereich am BIP pro Kopf bei 136,74 % gegenüber dem Statusjahr liegen.

2.2.2.3 KLIK

Der Energieverbrauchssektor KLIK steht für Kraft (mechanische Energie), Licht (Beleuchtung), Informations-, Kommunikations-Technologien sowie Kälte und beinhaltet alle herkömmlichen Stromanwendungen bis auf Elektrowärme und Anwendungen im Mobilitätssektor. Aus dem theoretischen Energiebedarf berechnet sich unter Berücksichtigung der zu erwartenden Effizienzsteigerungen elektrischer Technologien und Prozesse sowie des zukünftigen Dienstleistungs- und Produktionsvolumens der tatsächliche Energieverbrauch im Sektor KLIK 2050.

Für typische stromverbrauchende elektrische Haushaltsgeräte, wie Geschirrspüler, Waschmaschinen, Lampen und Netzteile steigen zukünftig die Anforderungen an die Energieeffizienz, sodass Energie eingespart werden kann.³⁰ Z.B. Halogenlampen werden stufenweise durch effizientere LED-Lampen ersetzt.³¹ Auch bei industriell eingesetzten Geräten, wie Motoren, Transformatoren, Schweißgeräten und Kühlgeräten sind Effizienzsteigerungen zu erwarten.³²

²⁹ Vgl. Klaus, T./Vollmer, C., 2010.

³⁰ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2019 (08.04.2019).

³¹ Vgl. Gerbert, P./Herhold, P., 2018.

³² Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2019 (08.04.2019).

Im Rahmen der Energie-Label-Verordnung von 2017 soll eine EU-Produktdatenbank aufgebaut werden, um Effizienzvergleiche zwischen Produkten und Überprüfungen der Labelanforderungen zu ermöglichen.³³

Die Politik unterstützt im Rahmen des KfW-Energieeffizienzprogramms Energieeffizienzmaßnahmen in Unternehmen mit zinsgünstigen Darlehen. Durch die Initiative Energieeffizienznetzwerke können sich Firmen in einem Netzwerk Energiesparziele setzen, Erfahrungen austauschen und sich von Fachpersonal beraten lassen.³⁴ In Folge der politischen Förderungen sind im Industriebereich schnellere und stärkere Effizienzsteigerungen zu erwarten. Durch den hohen Stromverbrauch können ebenso größere Strommengen eingespart werden als in den Haushalten. Resultierend wird für das BA-Zielszenario eine Stromverbrauchsreduktion bis 2050 im Industrie- und Dienstleistungsbereich auf 70 % des Statusjahres und in den Haushalten auf 75 % festgelegt.³⁵

Bezüglich des, ebenfalls den Stromverbrauch beeinflussenden, Dienstleistungs- und Produktionsvolumens im Jahr 2050 ist eine Kopplung an die wirtschaftlichen Entwicklungen dieser Bereiche von 146,04 % und 136,74 % gegenüber 2016 (vgl. UUA 2.2.2.2) sinnvoll.

2.2.2.4 Gebäudewärme

Die Gebäudewärme umfasst Wärme mit Temperaturen unter 100 °C. In 100prosim wird aus dem theoretischen Energiebedarf durch Einbeziehung der Wohnfläche und Erwerbstätigkeit, welche den Gebäudewärmeverbrauch im Dienstleistungssektor und in der Industrie repräsentiert, der tatsächliche Energieverbrauch für Gebäudewärme im Zieljahr berechnet.

Abweichend von der gleichbleibenden Wohnfläche pro Person im Vorschlag-Szenario, wird in der Literatur von einer Steigerung dieser auf 51 m² bis 55 m² im Jahr 2050 ausgegangen.^{36 37}

³³ Vgl. *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie*, 2016.

³⁴ Vgl. *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie*, 2016.

³⁵ Vgl. *Beck, H.-P./Haaren, C. v.*, 2016.

³⁶ Vgl. *Repenning, J./Braungardt, S.*, 2015.

³⁷ Vgl. *Gerbert, P./Herhold, P.*, 2018.

Die in der Vergangenheit gestiegene Wohnfläche wird aufgrund des demografischen Wandels und Kohorteneffekts vermutlich weiterhin zunehmen. Letzterer beschreibt die Nachfrage nach mehr Wohnfläche pro Person mit steigendem Alter, oft aufgrund eines zunehmenden Wohlstands durch steigendes Einkommen im erwerbstätigen Alter und eines Eigenheims für die Familie. Wenn Familienmitglieder ausziehen oder versterben nimmt die verbleibende Familie meist den freigewordenen Wohnraum zusätzlich ein.³⁸ So wird heute in Seniorenhaushalten durchschnittlich auf einer doppelt so großen Wohnfläche gelebt wie in Familienhaushalten mit Kindern.³⁹ Um den steigenden Energieverbrauch aufgrund der zunehmenden Wohnfläche gering zu halten, wird diese im BA-Zielszenario auf 51 m² festgelegt.

Um das heutige Niveau von 45 Mio. Erwerbspersonen bis 2050 zu halten, ist eine jährliche Zuwanderung von mindestens 400.000 Menschen erforderlich. Während dadurch und in Folge eines späteren Renteneintrittsalters die Anzahl an Erwerbstätigen steigt, resultiert aus der demografischen Alterung eine gegensätzliche Entwicklung.⁴⁰ In Folge von Digitalisierung und Automatisierung sowie dem Einsatz künstlicher Intelligenz und Robotik, werden auf dem Arbeitsmarkt überwiegend hochqualifizierte Fachkräfte nachgefragt.

Die Erwerbstätigkeit repräsentiert im Simulations-Tool den Gebäudewärmebedarf im Dienstleistungs- und Industriesektor. Bezüglich dessen ist der Trend zum Arbeiten im Homeoffice zu beachten, wodurch der Gebäudewärmeverbrauch in Bürogebäuden sinkt.⁴¹ Unter Einbeziehung dieser Faktoren und einer mittleren zukünftigen jährlichen Zuwanderung von 200.000 Menschen wird die Anzahl an Arbeitnehmern oder Selbständigen mit einer auf wirtschaftlichen Erwerb gerichteten Tätigkeit im Zieljahr 2050 bei 92 % des Statusjahres liegen.⁴²

³⁸ Vgl. Deschermeier, P./Henger, R., 2015.

³⁹ Vgl. Statistisches Bundesamt, 2019 (07.04.2019).

⁴⁰ Vgl. Fuchs, J./Kubis, A., 2016.

⁴¹ Vgl. Brandt, M., 2017.

⁴² Vgl. Fuchs, J./Kubis, A., 2016.

Weitergehend folgt im Simulations-Tool die Aufteilung der Gebäudewärme in Raumwärme, welche von der Gebäudesanierung abhängt, und in Warmwasser. Letzteres wird von den Effizienzsteigerungen der Warmwasseranwendungen und -prozesse bis 2050 beeinflusst.

Den meisten Literaturquellen zufolge muss die jährliche Sanierungsrate bei über 2 % liegen.⁴³ Dabei unterliegen energetische Modernisierungen von Gebäuden Dämmrestriktionen, wie bei unter Denkmalschutz stehende schützenswerte Fassaden, geometrischen Einschränkungen oder zu niedrigen Kellerdecken. Folglich können nicht alle Gebäude auf den höchstmöglichen Wärmeschutzstandard saniert werden.⁴⁴ Deshalb kann die im Vorschlag-Szenario gewählte Sanierungsrate von jährlichen 2,6 %, mit der Begründung dadurch bis 2050 alle Gebäude auf einen zukunftsfähigen Wärmeschutz zu bringen, nicht erreicht werden. Für das BA-Zielszenario wird eine jährliche Sanierungsrate von 2,4 % gewählt, wodurch alle möglichen Gebäude saniert werden sollen.

Neben der Gebäudesanierung kann der Raumwärmebedarf durch effizientere Energieverbrauchsgeräte und Heizsysteme gesenkt werden.⁴⁵ Dabei wird von einer insgesamt möglichen Verringerung des Energieverbrauchs in Wohngebäuden um bis zu 65 % ausgegangen, auf 42,7 kWh/m² im Jahr 2050.⁴⁶ Der Endenergiebedarf für die Warmwasserzubereitung kann durch weitere Effizienzmaßnahmen, wie im Vorschlag-Szenario festgelegt, um 20 % gesenkt werden.⁴⁷

Der sich durch diese Parameter berechnende Energieverbrauch im Sektor Gebäudewärme setzt sich anteilmäßig aus den Energieformen Wärme, Strom für den Antrieb von Wärmepumpen sowie biogenen Brennstoffen zusammen. Infolge des begrenzten Potenzials der biogenen Brennstoffe muss eine Verwendung dieser sorgfältig überlegt werden.

⁴³ Vgl. Hesse, T./Bürger, V., 2016.

⁴⁴ Vgl. Bürger, V./Hesse, T., 2017.

⁴⁵ Vgl. Bürger, V./Hesse, T., 2017.

⁴⁶ Vgl. Günther, J./Lehmann, H., 2019.

⁴⁷ Vgl. Walter, A./Wiehe, J., 2018.

Je mehr biogene Brennstoffe in einem Verbrauchssektor, wie für die Gebäudewärme, eingesetzt werden, desto weniger steht in den übrigen Sektoren zur Verfügung.⁴⁸ Trotz sehr verschiedener Ansätze in der Literatur wird überwiegend von der Nutzung eines geringen Anteils an biogenen Brennstoffen für die Gebäudewärmeerzeugung ausgegangen. Begründet wird dies durch das Vorhandensein von alternativen Energiequellen wie Solarthermie und Umgebungswärme, welche sich für den Niedertemperaturbereich der Gebäudewärme unter 100 °C eignen und somit dafür primär eingesetzt werden sollen.⁴⁹ Wenige Gebäude, wie denkmalgeschützte alte Häuser, können nicht auf diese Weise beheizt werden und verfügen zukünftig weiterhin über Brennstoffheizungen.⁵⁰ Das BA-Zielszenario bildet die Ausnahme mit einer zukünftigen Biomassenutzung für Gebäudewärme von 1 % ab.

An Gebäude ohne eigene Wärmeversorgung, wie in dicht besiedelten Stadtregionen, wird die Niedertemperaturwärme in isolierten Rohrleitungen über Wärmenetze geleitet. Während räumlich gering ausgedehnte Wärmenetze, wie in Siedlungen, Nahwärme transportieren, wird in weitläufigen Netzen, in Ballungsräumen und Städten, Fernwärme verteilt. Seit 2017 werden im Rahmen des Konzeptes „Wärmenetzsysteme 4.0“ innovative Wärmeinfrastrukturen mit temperatur- und verlustoptimierten Wärmenetzen gefördert.⁵¹ In der Bachelorarbeit bezieht sich auf den Energieverbrauch und die Energieerzeugung, nicht auf die Energieverteilung.

2.2.2.5 Prozesswärme

Prozesswärme ist Hochtemperaturwärme mit über 100 °C. Aus dem theoretischen Energiebedarf dieser wird durch Betrachtung der zukünftigen Effizienzsteigerungen thermischer Technologien und Prozesse sowie des Produktionsvolumens der tatsächliche Energieverbrauch für die Prozesswärme berechnet.

⁴⁸ Vgl. Hesse, T./Bürger, V., 2016.

⁴⁹ Vgl. Walter, A./Wiehe, J., 2018.

⁵⁰ Vgl. Gerbert, P./Herhold, P., 2018.

⁵¹ Vgl. Bormann, S., 2017.

Effizienzgewinne resultieren aus einer Ablösung heutiger, überwiegend mit Brennstoffen betriebenen und mit Abgasverlusten behafteten Öfen durch verlustarme elektrische Heizungen.⁵² Zudem werden Energieeffizienzmaßnahmen in Unternehmen politisch gefördert durch z.B. zinsgünstige Darlehen oder Energieeffizienznetzwerke. Folglich sind im Industriebereich schnellere und umfassendere Effizienzsteigerungen zu erwarten (vgl. UUA 2.2.2.3).⁵³ Im BA-Zielszenario wird somit eine Verringerung des Prozesswärmeverbrauchs in der Industrie auf 76 % des Statusjahres und in den Haushalten auf 80 % festgelegt.⁵⁴

Die wachsende Bruttowertschöpfung führt im Gegensatz zu den Effizienzsteigerungen zu einem steigenden Prozesswärmeverbrauch.⁵⁵ Das zukünftige Produktionsvolumen im BA-Zielszenario wird an die wirtschaftliche Entwicklung gekoppelt auf 136,74 % gegenüber 2016 festgelegt (vgl. UUA 2.2.2.2). Hingegen wird im Vorschlag-Szenario von einem unveränderten Prozesswärmebedarf ausgegangen, vermutlich aufgrund der in dem Szenario angenommenen gleichbleibenden Wirtschaftsleistung.

Der sich durch diese Parameter berechnende Energieverbrauch für die Prozesswärme setzt sich aus den Energieformen Strom, Wärme und Brennstoffen zusammen. Im Vorschlag-Szenario wird von einer Bereitstellung der Prozesswärme ausschließlich aus Brennstoffen und Strom ausgegangen. Auch in der Literatur wird die Nutzung von Biomasse für die Erzeugung von Prozesswärme befürwortet, vor allem im Industriebereich, wo i.d.R. mit hohen Temperaturen gearbeitet wird. So finden Prozesse in drei Viertel der Industriezweige bei Temperaturen über 500 °C und in der Metall- und Chemieindustrie bei über 1.000 °C statt.⁵⁶ Da Temperaturen unter 500 °C erschließbar für Solarthermie, Tiefengeothermie und Umgebungswärme sind, sollen diese Energiequellen für die Gebäudewärme verwendet werden. Die Verbrennung von Biomasse erreicht über 500 °C, sodass sich dies für die Prozesswärmeerzeugung eignet.⁵⁷

⁵² Vgl. *Walter, A./Wiehe, J.*, 2018.

⁵³ Vgl. *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie*, 2016.

⁵⁴ Vgl. *Beck, H.-P./Haaren, C. v.*, 2016.

⁵⁵ Vgl. *Gerbert, P./Herhold, P.*, 2018.

⁵⁶ Vgl. *Repenning, J./Braungardt, S.*, 2015.

⁵⁷ Vgl. *Walter, A./Wiehe, J.*, 2018.

Eine zusätzliche elektrische Bereitstellung von Prozesswärme kann zukünftig als Flexibilisierungsoption funktionieren, indem überschüssiger Strom aus erneuerbaren Energien, welcher wegen Netzengpässen nicht eingespeist werden kann, für diese Wärmeerzeugung genutzt wird.⁵⁸

2.2.2.6 Mobilität

Der Energieverbrauchssektor Mobilität beinhaltet im Simulations-Tool den Personen- und Güterverkehr am Boden sowie den Luftverkehr. Aus dem theoretischen Energiebedarf wird unter Berücksichtigung der Verkehrsleistung sowie der Antriebsarten und deren Wirkungsgrade der tatsächlich zu erwartende Energieverbrauch im Jahr 2050 berechnet.

In 100prosim umfasst der Personenverkehr die motorisierte Fortbewegung von Personen auf der Straße und Schiene, wobei die Anteile des Individualverkehrs und des öffentlichen Verkehrs sowie der einzelnen Verkehrsträger (PKW, Motorrad, etc.) nicht erfasst werden. Literaturquellen zufolge ist eine zukünftige Verkehrsverlagerung, -vermeidung und -verbesserung notwendig. So soll der Personenverkehr von der Straße auf die Schiene verlagert sowie motorisierter Individualverkehr vermieden werden, indem öffentlicher Verkehr und das Fahrrad genutzt oder zu Fuß gegangen wird.⁵⁹ Die Politik soll diese Entwicklung mittels Einführungen von allgemeinen Geschwindigkeitsbegrenzungen und Einschränkungen des motorisierten Individualverkehrs in Städten, durch z.B. PKW freie Zonen und Parkraumverknappung, fördern. Ergänzend soll eine Ausweitung und Attraktivitätssteigerung des öffentlichen Verkehrs und des Fahrradverkehrs erfolgen.⁶⁰

Während durch eine Vermeidung des motorisierten Verkehrs die Personenverkehrsleistung sinkt, führt die Verkehrsverlagerung nicht unbedingt und nur ggf. zu einer leichten Verringerung.

⁵⁸ Vgl. *Hülsken, C.*, 2017.

⁵⁹ Vgl. *Umweltbundesamt*, 2016.

⁶⁰ Vgl. *Nitsch, J.*, 2018.

Denn damit statt des Individualverkehrs der öffentliche Verkehr genutzt wird, muss letzterer eine ähnlich hohe Flexibilität besitzen, was durch ein weiträumig ausgebautes öffentliches Verkehrsnetz und regelmäßige Fahrzeiten erreicht werden kann. Folglich legt ein Bus täglich große Strecken zurück, unabhängig von der Anzahl der mitfahrenden Personen. In der Literatur wird von einer sehr geringen Verminderung der zurückgelegten jährlichen Gesamtstrecke mit Personenverkehrsmitteln auf 98 % im Zieljahr ausgegangen.⁶¹ Abweichend dazu ist im Vorschlag-Szenario eine zukünftig gleichbleibende Personen- und Güterverkehrsleistung festgelegt.

Eine stärkere Abweichung vom Vorschlag-Szenario ist bezüglich der Güterverkehrsleistung festzustellen, welche im Simulations-Tool den Gütertransport auf Straßen, Schienen und Binnenschiffen beinhaltet.⁶² So prognostizieren Literaturquellen neben der Verlagerung des Güterverkehrs auf die Schiene, die steigende Güterverkehrsleistung auf 130 % im Jahr 2050.⁶³ Dieser Ansatz scheint plausibel, wenn in Folge von steigender Bruttowertschöpfung (vgl. UUA 2.2.2.2) und zunehmendem Online-Handel mehr Güter transportiert werden.

Die Luftverkehrsleistung ist in der Vergangenheit kontinuierlich gestiegen und auch weiterhin wird das Verkehrsmittel beliebt sein, um große Strecken in relativ kurzer Zeit zurückzulegen. Aufgrund der nicht abzusehenden Elektrifizierung des Luftverkehrs, werden weiterhin Brennstoffe als Kraftstoff benötigt. Trotz technischer Minderungen des Kraftstoffverbrauchs, soll das Luftverkehrsaufkommen nicht unendlich steigen.⁶⁴ So können insbesondere nationale Kurzstreckenflüge auf die Schiene verlagert werden.⁶⁵ Unter Einbeziehung der bis 2050 unveränderten Personenverkehrsleistung und der steigenden Güterverkehrsleistung im BA-Zielszenario, wird die Luftverkehrsleistung auf 110 % im Zieljahr gegenüber dem Statusjahr festgelegt.

⁶¹ Vgl. Gerbert, P./Herhold, P., 2018.

⁶² Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2016.

⁶³ Vgl. Umweltbundesamt, 2016.

⁶⁴ Vgl. Umweltbundesamt, 2016.

⁶⁵ Vgl. Kasten, P./Mottschall, M., 2016.

Der Kraftstoffverbrauch kann auf 71,9 % im Zieljahr reduziert werden.⁶⁶ Im Vorschlag-Szenario wird hingegen von einem gleichbleibenden Niveau der Luftverkehrsleistung, aber derselben Verbrauchsreduktion ausgegangen.

Alternativ zu fossilen Kraftstoffen können Verkehrsmittel grundsätzlich rein durch Strom mit Elektromotoren angetrieben werden sowie mit Verbrennungsmotoren, welche gasförmige oder flüssige Kohlenwasserstoffe benötigen. Diese Kraftstoffe können zukünftig Biomethan, Biodiesel und Bioethanol sein. Übersteigt der Bedarf an biogenen Kraftstoffen die Potentiale, können ergänzend mittels Wasserelektrolyse synthetische Kraftstoffe hergestellt werden (vgl. UUA 2.2.3.7). Ebenso kann ein Antrieb durch die Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff in Brennstoffzellen erfolgen.⁶⁷ Hybridantriebe, als Kombination aus Verbrennungs- und Elektromotoren, sind im Simulations-Tool nicht explizit abgebildet.

Bezüglich der zukünftigen Nutzung der Antriebe gehen die Meinungen in der Literatur auseinander. Aktuell sind 66 Wasserstofftankstellen in Deutschland installiert⁶⁸, welche bis 2023 auf 400 Stationen ausgebaut werden sollen.⁶⁹ Dies sind trotzdem viel weniger als die aktuell 14.322 Ladestationen für Elektrofahrzeuge.⁷⁰ Für Flüssigkraftstoffe kann die bestehende Tankinfrastruktur weiter genutzt werden.⁷¹ Der Energieverbrauch der Technologien hängt mit den jeweiligen Wirkungsgraden zusammen, welche in der Literatur für Elektromotoren auf 89 %, Brennstoffzellen 62 % und Verbrennungsmotoren auf 35 % geschätzt werden.⁷²

Somit soll 2050 der Großteil im Personen- und Güterverkehr elektrisch (80 %) angetrieben werden und die restlichen Fahrzeuge Hybrid- oder Verbrennungsantriebe besitzen.⁷³

⁶⁶ Vgl. *Wagner, U.*, 2009.

⁶⁷ Vgl. *Maier, M.*, 2019.

⁶⁸ Vgl. *H2 Live*, 2019 (19.04.2019).

⁶⁹ Vgl. *Clean Energy Partnership*, 2019.

⁷⁰ Vgl. *Chargemap*, 2019 (19.04.2019).

⁷¹ Vgl. *Maier, M.*, 2019.

⁷² Vgl. *Umweltbundesamt*, 2016.

⁷³ Vgl. *Maier, M.*, 2019.

Da im Simulations-Tool Hybridfahrzeuge nicht berücksichtigt werden, wird der Anteil der Elektrifizierung im BA-Zielszenario auf 90 % erhöht. Brennstoffzellenfahrzeuge bleiben vermutlich zunächst eine Nische und werden, aufgrund der erforderlichen Umbaumaßnahmen der Tankinfrastruktur, ggf. später den Markt durchdringen. Diese Antriebsart wird deshalb im BA-Zielszenario nicht berücksichtigt. Weil im Luftverkehr die Elektrifizierung keine Option darstellt, kommen Flüssigkraftstoffe (Biodiesel, Bioethanol, synthetische Flüssigkraftstoffe) zum Einsatz.⁷⁴

2.2.2.7 Grundstoff-Synthese

Aus dem theoretischen Bedarf an Wasserstoff als Grundstoff für die Chemieindustrie oder den Verkehr, wird durch Berücksichtigung der Kunststoffherzeugung pro Person sowie der benötigten Menge an aus Wasserstoff erzeugten Grundstoffen, der tatsächliche Energieverbrauch berechnet.

Der erzeugte Kunststoffabfall kann z.B. durch ein nachhaltiges umweltbewusstes Verhalten der Gesellschaft, mit weniger Einmal-Produkten und Kunststoffverpackungen auf dem Markt sowie ein verbessertes Recycling-System, reduziert werden.⁷⁵ Des Weiteren soll überschüssiger Strom aus erneuerbaren Energien, der aufgrund von Netzengpässen nicht direkt eingespeist wird, für die elektrische Wasserstoffsynthese genutzt werden.⁷⁶ Dem Vorschlag-Szenario zufolge kann die Kunststoffabfallherzeugung pro Person bis 2050 halbiert werden. Für eine Energieversorgung mit 100 % erneuerbaren Energien sollen zukünftig ausschließlich erneuerbare Grundstoffe eingesetzt werden. Die Werte werden in das BA-Zielszenario übernommen.

⁷⁴ Vgl. *Umweltbundesamt*, 2016.

⁷⁵ Vgl. *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit*, 2019 (02.05.2019).

⁷⁶ Vgl. *Hülsken, C.*, 2017.

2.2.3 Energieversorgung

Deutschlands Energieverbrauch in den zuvor erläuterten Verbrauchssektoren soll 2050 zu 100 % aus erneuerbaren Energien gedeckt werden. Dafür wird in 100prosim auf Basis der verfügbaren Energieerzeugungsflächen und weiterer Parameter die Energieproduktion für die verschiedenen Energiequellen berechnet.

Alle Flächengrößen, wie die Siedlungsfläche, Ackerfläche und Waldfläche, des Vorschlag-Szenarios werden trotz älterer Literaturquellen (2012 bis 2017) in das BA-Zielszenario übernommen. Aktuellere Prognosen bezüglich der Flächen unterscheiden sich nämlich kaum von den vorliegenden Werten.

2.2.3.1 Solarenergie

Aus der Sonnenenergie kann mittels Solarthermieanlagen Solarwärme und durch Photovoltaikanlagen (PV) Solarstrom erzeugt werden. Während beide Technologien auf geeigneten Dachflächen und Fassaden installiert werden können, eignet sich zusätzlich ein Teil der gesamten Landwirtschaftsfläche für die Stromproduktion mit Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PVF).⁷⁷

2.2.3.1.1 Solarwärme

Die erzeugte Wärmemenge berechnet sich in dem Simulations-Tool aus der gesamten Dachfläche mit solarthermischen Kollektoren in Deutschland und dem Energieertrag der Technologie.

Im Vorschlag-Szenario werden im Zieljahr auf 0,7 % der geeigneten Dachflächen Solarthermieanlagen und auf den verbleibenden 99,3 % PV-Anlagen installiert. Dieses eingeschränkte Potential von Solarthermie durch die Menge an geeigneten Dachflächen sowie Nutzungskonflikte mit PV-Anlagen wird in der Literatur bestätigt.⁷⁸

⁷⁷ Vgl. *Bundesverband Solarwirtschaft e.V.*, 2018.

⁷⁸ Vgl. *Gerbert, P./Herhold, P.*, 2018.

Weil zukünftig der Gebäudewärmebedarf hauptsächlich mit Niedertemperaturwärme aus Wärmepumpen und Solarthermieanlagen gedeckt werden soll, ist ein stärkerer Ausbau der Solarthermieanlagen notwendig.⁷⁹ Dementsprechend werden im BA-Zielszenario, zu Lasten der PV-Anlagen, 5 % der Dachflächen für die Solarwärmeproduktion genutzt. Die entgangene Solarstrommenge muss durch andere Technologien, wie z.B. PVF oder WKA, kompensiert werden. Durch technische Fortschritte kann der Energieertrag von Solarthermieanlagen zukünftig, stärker als im Vorschlag-Szenario, auf 5500 MWh/ha/a erhöht werden.⁸⁰

2.2.3.1.2 Solarstrom

Die produzierte Menge an Solarstrom hängt von der Gesamtgröße an geeigneten Dachflächen und Freiflächen sowie dem Energieertrag der PV-Dachanlagen und PVF ab. Die erforderliche installierte Leistung von beiden Technologien wird unter Einbeziehung der jährlichen Volllaststunden berechnet. Diese geben die Stunden an, welche eine technische Anlage mit ihrer Nennleistung laufen müsste, um den tatsächlichen Jahresenergieertrag zu produzieren.⁸¹

Somit sollen im BA-Zielszenario die übrigen 95 % der geeigneten Dachflächen mit PV-Anlagen beansprucht werden. Die Solarstromerträge von 1840 MWh/ha/a (PV-Dachanlagen) und 736 MWh/ha/a (PVF) im Vorschlag-Szenario stammen aus aktuellen Literaturquellen, sodass diese übernommen werden. Darüber hinaus werden für PV-Anlagen zukünftig 900 bis 1000 Volllaststunden im Jahr erwartet, weshalb der Wert von 920 Volllaststunden im Vorschlag-Szenario plausibel erscheint.⁸²

2.2.3.2 Windenergie

Die kinetische Windenergie wird von Onshore-WKA auf dem Land und von Offshore-WKA auf dem Meer in elektrische Energie gewandelt.⁸³

⁷⁹ Vgl. *Repenning, J./Braungardt, S.*, 2015.

⁸⁰ Vgl. *Beck, H.-P./Haaren, C. v.*, 2016.

⁸¹ Vgl. *Knorr, K./Horst, D.*, 2017.

⁸² Vgl. *Fraunhofer ISE*, 2019.

⁸³ Vgl. *Kunz, C./Kirmann, S.*, 2015.

2.2.3.2.1 Onshore-Windenergie

Die produzierte Strommenge von Onshore-WKA wird auf Basis der geeigneten Windparkfläche im Binnenland sowie dem spezifischen Flächenbedarf und den Volllaststunden dieser Technologie berechnet.

In der Literatur wird zwischen mehreren WKA ein Abstand von mindestens 5 Rotordurchmesser (RD) in Hauptwindrichtung und 3 bis 3,5 RD in Nebenwindrichtung empfohlen.⁸⁴ Der resultierende zukünftige spezifische Flächenbedarf sowie die Volllaststunden für das BA-Zielszenario werden im Rahmen der technischen Entwicklung der Onshore-Windenergie (vgl. Kapitel 4) ermittelt.

2.2.3.2.2 Offshore-Windenergie

Die Stromerzeugungsmenge durch Offshore-WKA wird in 100prosim unter Berücksichtigung der installierten Leistung dieser Technologie im Jahr 2050 und der jährlichen Volllaststunden berechnet.

In der Literatur wird von einer möglichen installierten Offshore-Windenergieleistung in der deutschen Nord- und Ostsee von 57.000 MW im Zieljahr ausgegangen. Dabei können durchschnittlich 4660 Volllaststunden im Jahr erreicht werden.⁸⁵ Beides liegt über den Werten im Vorschlag-Szenario und wird in das BA-Zielszenario übernommen.

2.2.3.3 Wasserkraft

Die produzierte Strommenge durch Wasserkraft resultiert aus dem genutzten Potential und dem Energieertrag der Technologie.

Abweichend vom Vorschlag-Szenario, ist das Potential der Wasserkraft nicht vollständig ausgeschöpft. In der Literatur wird von einer Erhöhung der aktuell installierten Leistung um 1000 MW, durch den Umbau bestehender Anlagen, ausgegangen.

⁸⁴ Vgl. Lütkehus, I./Salecker, H., 2013.

⁸⁵ Vgl. Knorr, K./Horst, D., 2017.

Jedoch wird sich aufgrund des geringen Potentials überwiegend auf den Ausbau ertragreicherer Technologien konzentriert.⁸⁶ Folglich wird im BA-Zielszenario von einer geringen Erhöhung bis 2050 ausgegangen, wohingegen im Vorschlag-Szenario die Energieproduktion durch Wasserkraft auf dem heutigen Niveau bleibt.

2.2.3.4 Biogene Brennstoffe

Biogene Brennstoffe werden in einem festen, flüssigen und gasförmigen Zustand für die Energieversorgung eingesetzt.⁸⁷

2.2.3.4.1 Feste biogene Brennstoffe

Zu der festen Biomasse gehören in 100prosim Energieholz aus Forst- und Ackerflächen sowie Stroh und biogene Abfälle. Aus der verfügbaren Flächengröße und dem Energieertrag der jeweiligen Rohstoffe berechnet sich die gesamte Energiemenge aus festen biogenen Brennstoffen.

Weil das Potential an Energieholz auf Forstflächen heute bereits zu zwei Drittel ausgeschöpft ist, soll 2050 nur ein geringerer Anteil des jährlichen Holzzuwachses als Brennstoff genutzt werden und so das Ökosystem Wald langfristig erhalten bleiben. Stattdessen soll aktuell kaum energetisch genutztes Stroh zukünftig vermehrt eingesetzt werden. Das Energiepotenzial organischer Abfallstoffe ist insgesamt gering und heute fast ausgeschöpft. Dessen Verwendung in der Zukunft kann schwer eingeschätzt werden, wenn z.B. umfassendere Müllvermeidungsstrategien angewandt werden.⁸⁸ Über die qualitativen Meinungen hinaus mangelt es in der Literatur an konkreten Daten. Deshalb werden diese aus dem Vorschlag-Szenario, welche die gleichen Entwicklungsrichtungen wie die Literatur repräsentieren, in das BA-Zielszenario übernommen.

⁸⁶ Vgl. Schmidt-Curreli, J./Knebel, A., 2016.

⁸⁷ Vgl. Walter, A./Wiehe, J., 2018.

⁸⁸ Vgl. Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V., 2018.

Der Energieertrag von fester Biomasse kann durch Variation der Anbaupflanzen verändert werden. So erzielen energiereichere Holzarten, wie Pappeln, höhere Energieerträge auf gleichgroßen Ackerflächen.

Weil sich aber die energetischen Eigenschaften von Holz und Stroh selbst nicht verändern, gleicht deren Energieertrag im BA-Zielszenario dem heutigen.⁸⁹

In 100prosim können die festen Brennstoffe anteilig für die Bereitstellung von Prozess- und Gebäudewärme sowie für Verstromung verwendet werden. Die Anteile werden durch die Bedarfsmengen in den Verbrauchssektoren bestimmt (vgl. UA 2.2.2). Folglich wird feste Biomasse im BA-Zielszenario hauptsächlich zur Erzeugung von hochtemperierter Prozesswärme verwendet sowie nur in Ausnahmefällen für die Gebäudewärme und gar nicht verstromt.

2.2.3.4.2 Flüssige biogene Brennstoffe

Zu der flüssigen Biomasse gehören im Simulations-Tool Biodiesel und Bioethanol. Abhängig von der Anbaufläche für Ölpflanzen und dem Energieertrag dieser kann eine Verwendung als Kraftstoff für den Mobilitätssektor und für die Verstromung erfolgen.

In der Literatur wird von einer Verringerung der Anbaufläche für Energiepflanzen, die zur Biodieselherstellung genutzt werden, bis 2050 ausgegangen. Die Herstellung von Bioethanol soll aufgrund geringerer Energieerträge gegenüber Biodiesel und Biomethan eingestellt werden. Aber auch für Biomethan wird nur ein Drittel der Anbaufläche benötigt wie für Biodiesel, um die gleichen Energiemengen zu erzeugen.⁹⁰ Es wird der Ansatz, zukünftig die ohnehin begrenzten Flächenpotenziale überwiegend für die Herstellung von Biomethan, wenig Flächen für Biodiesel und keine für Bioethanol zu nutzen, für das BA-Zielszenario festgelegt.

⁸⁹ Vgl. Hesse, T./Koch, M., 2018.

⁹⁰ Vgl. Edel, M./Kühnel Christine, 2017.

Auch flüssige Biomasse soll nicht für die Verstromung, sondern in Verbrauchssektoren eingesetzt werden, in denen eine Substitution der fossilen Energieträger anspruchsvoll ist. So können im Mobilitätssektor nicht alle Verkehrsträger elektrifiziert werden und Biodiesel soll zukünftig als Kraftstoff für Flugzeuge dienen.⁹¹

2.2.3.4.3 Gasförmige biogene Brennstoffe

Biogas kann durch Vergärung von Energiepflanzen, Abfall- und Reststoffen sowie aus Kläranlagen und Deponien gewonnen werden.

In der Literatur wird davon ausgegangen, dass aufgrund von zunehmend anderweitiger Flächennutzung für z.B. PVF im Jahr 2050 weniger Biogas aus angebauten Energiepflanzen gewonnen wird als heute.⁹² Hingegen sollen vermehrt Abfall- und Reststoffe verwendet werden, welche unabhängig von dessen energetischer Nutzung in der Industrie und den Haushalten entstehen.⁹³ Trotz der Veränderungen werden aber weiterhin Energiepflanzen den Hauptteil zu der produzierten Biogasmenge in der Zukunft beitragen. Sehr wenig Biogas stammt aktuell aus Kläranlagen und Deponien und selbst eine zukünftige Steigerung des Anteils wäre vernachlässigbar gegenüber der gesamten Biogasmenge.⁹⁴

Ebenfalls die gasförmigen biogenen Brennstoffe sollen im BA-Zielszenario nicht verstromt, sondern wie Biodiesel primär im Verkehr eingesetzt werden. Für die 10 % Verbrennungsmotoren im Personen- und Güterverkehr 2050 (vgl. UUA 2.2.2.6) soll Biomethan als Kraftstoff dienen, welcher durch die Aufbereitung von Biogas entsteht.⁹⁵

2.2.3.5 Umgebungswärme

Im Simulations-Tool wird zwischen Wärmepumpen mit Luftkopplung sowie mit Wasser- und Erdkopplung für die Nutzung von Umgebungswärme unterschieden.

⁹¹ Vgl. *Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V.*, 2018.

⁹² Vgl. *Repenning, J./Braungardt, S.*, 2015.

⁹³ Vgl. *Edel, M./Kühnel Christine*, 2017.

⁹⁴ Vgl. *Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V.*, 2018.

⁹⁵ Vgl. *Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V.*, 2018.

Abhängig von der jeweiligen Antriebstromaufnahme und der Jahresarbeitszahl beider Technologien ergibt sich die Menge der Wärmeförderung.

In der Literatur werden Wärmepumpen als zukünftige Schlüsseltechnologie für die Gebäudewärmeversorgung mit einer hohen Marktdurchdringung prognostiziert. Dazu sollen bis 2050 ca. 16 Mio. Wärmepumpen im Land installiert sein. Wie im Vorschlag-Szenario werden die luftgekoppelten Wärmepumpen mit 72 % aller Wärmepumpen dominieren, aufgrund einer einfacheren Installation und geringerer Kosten.⁹⁶

Die Jahresarbeitszahl beschreibt, als Maß für die Effizienz, wie viel Kilowattstunden Wärme mit einer Kilowattstunde Strom gewonnen werden können. Diese wird in der Literatur für Wärmepumpen mit Luftkopplung auf 3,5 sowie für wasser- und erdgekoppelte Wärmepumpen auf 4,4 im Jahr 2030 geschätzt. Zudem werden von 2010 bis 2030 mit der Zeit weniger effizientere Neuinstallationen prognostiziert, sodass für 2050 nur noch geringe Effizienzsteigerungen gegenüber 2030 zu erwarten sind.⁹⁷ Im Vorschlag-Szenario sind ähnliche Jahresarbeitszahlen wie in der Literatur für 2030 abgebildet. Hingegen wird im BA-Zielszenario von einer Fortsetzung des bisherigen Trends mit geringen und jährlich abschwächenden Effizienzsteigerungen ausgegangen. Demnach soll 2050 die Jahresarbeitszahl von Wärmepumpen mit Luftkopplung bei ca. 3,9 sowie von wasser- und erdgekoppelten Wärmepumpen bei ca. 4,8 liegen.

2.2.3.6 Tiefengeothermie

Aus der installierten elektrischen Leistung von Geothermiekraftwerken in Deutschland und den Volllaststunden wird in 100prosim die Stromproduktionsmenge berechnet. Es ist also im Simulations-Tool eine ausschließliche Verstromung der geförderten Wärmemenge vorgesehen. Nur die dabei entstehende Abwärme kann als Gebäudewärme genutzt werden.

⁹⁶ Vgl. *Elsner, P./Fischedick, M.*, 2015.

⁹⁷ Vgl. *Koch, M./Sperr, A.*, 2015.

Allerdings wird aktuell in den meisten Tiefengeothermiekraftwerken in Deutschland die geförderte Wärme direkt über Wärmetauscher genutzt. Ebenfalls soll in der Zukunft diese Energiequelle hauptsächlich für die Wärmaförderung verwendet werden und ist notwendig, um die Klimaziele zu erreichen.

In der angestrebten Menge für die Wärme- und Stromproduktion unterscheiden sich die Studien stark voneinander. Aufgrund der mit den Tiefenbohrungen verbundenen hohen Risiken und Kosten können die zukünftigen Entwicklungen schwer eingeschätzt werden. Im Vorschlag-Szenario wird dagegen vollständig von einem zukünftigen Einsatz der Tiefengeothermie abgesehen. Falls die Hälfte der aktuell 33 Tiefengeothermieprojekte in der Bau- und Planungsphase bis 2050 mit einer elektrischen Leistung von durchschnittlich 4 MW in Deutschland installiert wäre, würde sich die Gesamtleistung auf 105 MW fast verdreifachen.⁹⁸

Vor zwei Jahren wurde das beste deutsche Geothermiekraftwerk mit 8.584 Volllaststunden ausgezeichnet, der Durchschnitt liegt aktuell bei 7500 Stunden. In der Literatur wird von durchschnittlichen 8000 Volllaststunden in der Zukunft ausgegangen. Der Nutzungsgrad für die Verstromung der Wärme liegt bei 17 %.⁹⁹

Da die Monate lang andauernden Bohrungen viel Lärm verursachen, befinden sich Tiefengeothermiekraftwerke meist in großer Entfernung zu Wohnhäusern. Deshalb werden diese oft ohne Abwärmenutzung konzipiert. Um zukünftige direkte Wärmebereitstellung der Tiefengeothermie über Wärmetauscher im BA-Zielszenario zu berücksichtigen, wird der Parameter der Abwärmenutzung stattdessen auf 100 % festgelegt.

2.2.3.7 Stromwandlung und -speicherung

Für die Stromwandlung ist in 100prosim die Wasserelektrolyse abgebildet, wobei mit Strom Wasserstoff erzeugt wird, der sich für die Erzeugung von Prozesswärme, Kraft- und Grundstoffen eignet.

⁹⁸ Vgl. *Bundesverband Geothermie*, 2019.

⁹⁹ Vgl. *Geothermie-Allianz Bayern*, 2017.

Dies ist somit eine Ergänzung der biogenen Brennstoffe. Abhängig von dem verbleibenden Bedarf, der nicht mit Biomasse gedeckt werden kann, wird eine bestimmte Strommenge für das Verfahren genutzt.

Weil feste Biomasse im Zieljahr fast ausschließlich für Prozesswärme eingesetzt werden soll, reicht diese Menge aus und es besteht kein Bedarf an elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff in diesem Verbrauchssektor.¹⁰⁰ Auch für Brennstoffzellen im Mobilitätssektor wird im BA-Zielszenario kein Wasserstoff benötigt, weil für diese Technologie keine Perspektive gesehen wird. Das verfügbare Biomethan reicht ebenfalls aus, sodass keine weiteren gasförmigen Kraftstoffe synthetisch hergestellt werden müssen. Hingegen besteht ein hoher Bedarf an synthetischen Flüssigkraftstoffen z.B. im Luftverkehr, da die verfügbare Menge an Biodiesel im Jahr 2050 nicht reichen wird. Für die Synthese von Methan als Grundstoff z.B. für die Chemieindustrie wird ebenfalls Wasserstoff benötigt.¹⁰¹

Folglich wird nur auf die Wirkungsgrade der tatsächlich in Anspruch genommenen Prozesse im Zieljahr eingegangen. Dabei gehen Literaturquellen von einem erreichbaren Wirkungsgrad von 84 % bei der Wasserelektrolyse bis 2050 aus. Die Synthese von Flüssigkraftstoffen aus Wasserstoff und die Methansynthese können zukünftig bei Wirkungsgraden von 66 % und 87 % geschehen.¹⁰² Diese Werte liegen über denen im Vorschlag-Szenario und werden in das BA-Zielszenario übernommen.

Die schwankende Verfügbarkeit von z.B. Wind- und Solarenergie muss für eine sichere zukünftige Energieversorgung mit Hilfe von Energiespeicher ausgeglichen werden. Im Simulations-Tool ist die Langzeitstromspeicherung über mehrere Tage, Wochen und Monate durch die Wasserelektrolyse abgebildet. Zeitweise nicht verbrauchter, überschüssiger Strom wird durch dieses Verfahren in Wasserstoff umgewandelt und in unterirdischen Speichern gespeichert.

¹⁰⁰ Vgl. Gerbert, P./Herhold, P., 2018.

¹⁰¹ Vgl. Umweltbundesamt, 2016.

¹⁰² Vgl. Deutsche Energie-Agentur GmbH, 2018.

In Mangelphasen, in denen der Strombedarf höher ist als die Stromproduktion, wird das gespeicherte Wasserstoffgas in Blockheizkraftwerken rückverstromt. Die dabei entstehende Abwärme soll als Gebäudewärme genutzt werden.¹⁰³

Bei dem gesamten Prozess entstehen Wandlungsverluste. In der Literatur wird, wie zuvor beschrieben, ein höherer zukünftiger Wirkungsgrad für die Wasserelektrolyse angenommen. Dadurch ergibt sich im BA-Zielszenario ebenso ein höherer Wirkungsgrad für die Langzeitstromspeicherung durch die Wasserelektrolyse und anschließende Rückverstromung, welcher 2050 folglich bei 49,14 % liegen wird.¹⁰⁴

Falls an Zeitpunkten mit einem sehr hohem Wind- und Solarstromangebot die Kapazität der Wasserelektrolyse nicht ausreicht, um die gesamte Strommenge zu speichern, erfolgt eine Abregelung der WKA und PV-Anlagen.¹⁰⁵ Die ausfallende Energieproduktion vermindert die insgesamt erzeugte Energiemenge.

Bei der Einspeisung des erneuerbaren Stroms in das Stromnetz entstehen Übertragungsverluste. In 100prosim werden in diesen Parameter zusätzlich Verluste durch Kurzzeitspeicherungen einberechnet. Letztere sorgen für den Ausgleich der Stromschwankungen innerhalb eines Tages und für die Netzstabilisierung.¹⁰⁶ Aufgrund der Zusammenfassung von Netzübertragungsverlusten und Speicherverlusten wird der Verlustanteil aus dem Vorschlag-Szenario in das BA-Zielszenario übernommen.

Insgesamt ergibt sich aus der Gesamtmenge des produzierten Stroms aus erneuerbaren Energien, abzüglich des erforderlichen Stroms für die Wasserstoffsynthese sowie Verlusten der Stromspeicherung, Einspeisung in das Stromnetz und Abregelung von WKA und PV-Anlagen die zur Verfügung stehende Strommenge.

¹⁰³ Vgl. *Quaschnig, V.*, 2016.

¹⁰⁴ Aus den Wirkungsgraden der Wasserelektrolyse und der Rückverstromung berechnet sich der gesamte Wirkungsgrad: $84 \% \cdot 58,5 \% = 49,14 \%$

¹⁰⁵ Vgl. *Beck, H.-P./Haaren, C. v.*, 2016.

¹⁰⁶ Vgl. *Beck, H.-P./Haaren, C. v.*, 2016.

3 Energieverbrauch der Zukunft

In diesem Kapitel geht es um Deutschlands Energieverbrauch im Jahr 2050. Dieser wird auf Basis der zuvor festgelegten Parameter des BA-Zielszenarios (vgl. UA 2.2.2) und mit Hilfe des Simulations-Tools simuliert. Das Ergebnis wird anschließend interpretiert und mit dem Energieverbrauch des Statusjahres verglichen.

3.1 Simulation des Energieverbrauchs

In der folgenden Tabelle 1 sind die Parameter des Energieverbrauchs im Status- und BA-Zielszenario zusammengefasst.

Parameter		Status-Szenario	BA-Zielszenario
Bevölkerung und Wirtschaft			
Bevölkerungszahl		82.175.684	79.238.000
Wachstum des BIP/Kopf	[%/a]	2,8	1,06
Dienstleistungsanteil am BIP/Kopf	[%]	68,6	70
KLIK			
Energieverbrauch nach Effizienzsteigerungen der Strom-Anwendungen in den Haushalten	[%]	100	75
Energieverbrauch nach Effizienzsteigerungen der Strom-Anwendungen im Industrie- und Dienstleistungsbereich	[%]	100	70
Dienstleistungsvolumen	[%]	100	146,04
Produktionsvolumen	[%]	100	136,74
Gebäudewärme			
Wohnfläche/Kopf	[m ²]	43,2	51
Erwerbstätigkeit	[%]	100	92
Sanierungsrate	[%/a]	1	2,4
Raumwärmebedarf	[kWh/m ² /a]	122,1	42,7
Warmwasserbedarf	[%]	100	80
Gebäudewärme aus biogenen Brennstoffen	[%]	79	1
Prozesswärme			
Produktionsvolumen	[%]	100	136,74
Energieverbrauch nach Effizienzsteigerungen der Prozesswärme-Anwendungen in den Haushalten	[%]	100	80
Energieverbrauch nach Effizienzsteigerungen der Prozesswärme-Anwendungen im Industrie- und Dienstleistungsbereich	[%]	100	76
Prozesswärme aus Hochtemperaturwärme	[%]	11	0
Mobilität			
Personenverkehrsleistung	[%]	100	98
Elektromotoren im Personenverkehr	[%]	2,30	90
Verbrennungsmotoren im Personenverkehr	[%]	97,7	10
Güterverkehrsleistung	[%]	100	130
Elektromotoren im Güterverkehr	[%]	1,6	90

Verbrennungsmotoren im Güterverkehr	[%]	98,4	10
Brennstoffzellen im Personen- und Güterverkehr	[%]	0	0
Luftverkehrsleistung	[%]	100	110
Energieverbrauch nach Verminderungen des Kraftstoffverbrauchs im Flugverkehr	[%]	100	72
Wirkungsgrad der Elektromotoren	[%]	78	89
Wirkungsgrad der Verbrennungsmotoren	[%]	25,5	35
Grundstoffe			
Kunststoffherzeugung/Kopf	[%]	100	50

Tabelle 1: Parameter des Energieverbrauchs
Quelle: Eigene Darstellung

Es fallen die notwendigen Effizienzsteigerungen von Strom- und Prozesswärme-Anwendungen sowie die erhöhte Sanierungsrate auf, um den Strom- und Wärmeverbrauch in Zukunft zu verringern. Auch die starke Elektrifizierung des Verkehrs zählt zu den größten Veränderungen bis 2050. Als Ergebnis der Simulation des BA-Zielszenarios werden im Zieljahr 2050 insgesamt 1.515.808 GWh Energie verbraucht. Dieser Energieverbrauch ist um 41,84 % geringer als im Statusjahr 2016.

3.2 Validierung des Ergebnisses

Um die Plausibilität des Energieverbrauchs im BA-Zielszenario zu überprüfen, wird dieser den Energieverbräuchen verschiedener Szenarien mit demselben Zieljahr aus der Literatur gegenübergestellt. Diese, der durchschnittliche Energieverbrauch und der im BA-Zielszenario sind in der Abbildung 1 visualisiert.

Die Energieverbräuche in drei Szenarien liegen über dem Mittelwert.

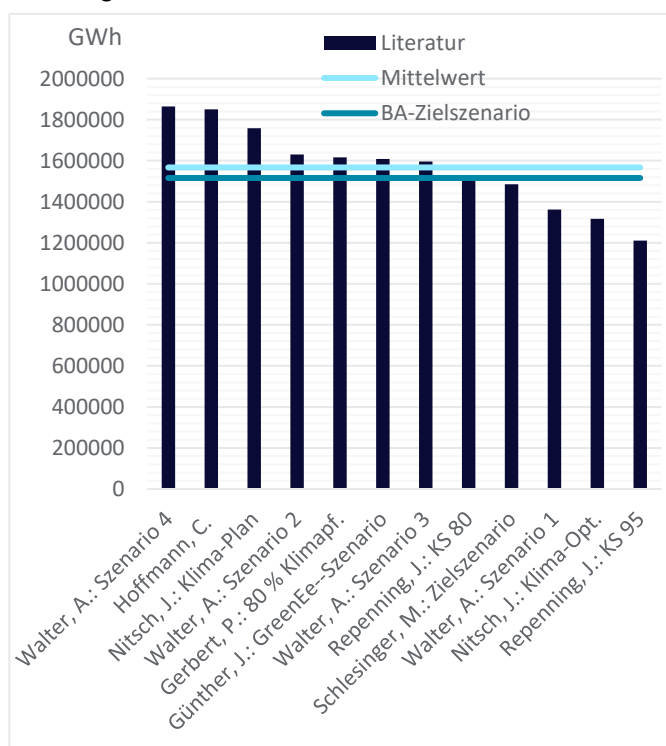


Abbildung 1: Validierung des Energieverbrauchs
Quelle: Eigene Darstellung.

Ebenfalls in drei Szenarien liegen diese deutlich unter dem Mittelwert, wohingegen sind die übrigen Werte auf einem ca. gleichen Niveau befinden. Der Energieverbrauch im BA-Zielszenario ist nur wenig geringer als der Mittelwert und erscheint somit schlüssig.

3.3 Interpretation des Energieverbrauchs

In der folgenden Abbildung 2 ist der Energieverbrauch und die Anteile der einzelnen Energieformen an diesem in den vier Verbrauchssektoren im Jahr 2050 sowie im Vergleich zum Statusjahr visualisiert. Die zukünftige Energiebedarfsminderung ist für die vollständige Deckung dessen mit erneuerbaren Energien erforderlich. In der folgenden Interpretation der Abbildung 2 werden die wesentlichen Merkmale des zukünftigen Energieverbrauchs aus dem UA 2.2.2 aufgegriffen.

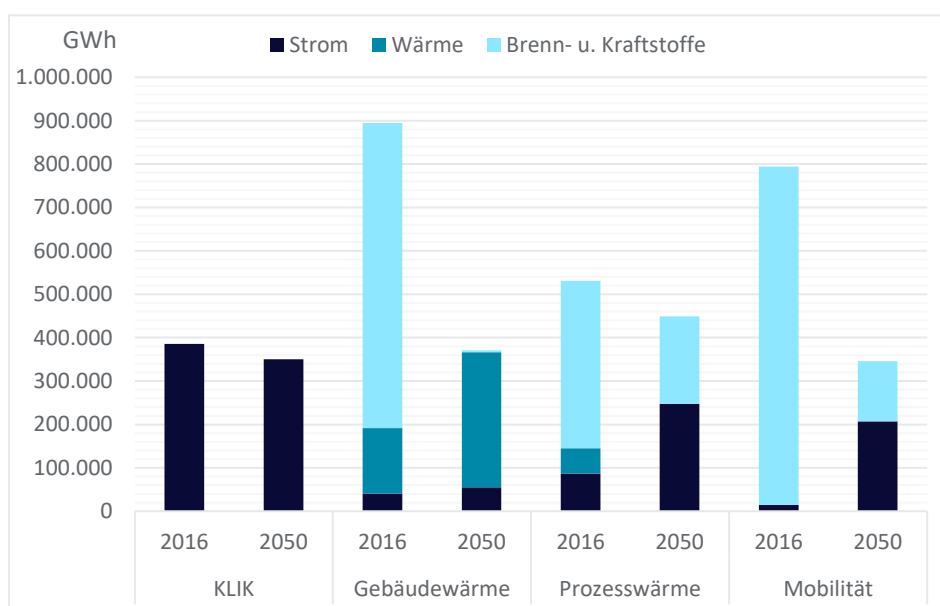


Abbildung 2: Veränderung des Energieverbrauchs der Verbrauchssektoren
Quelle: Eigene Darstellung.

In Deutschland ist die zukünftige Entwicklung der Bevölkerungszahlen fast stabil, sodass bis 2050 nur ca. 3,6 % weniger Menschen als heute im Land leben werden.¹⁰⁷ Dabei ist in der Bevölkerungsstruktur ein demografischer Wandel zu einem höheren Durchschnittsalter zu erkennen.¹⁰⁸

¹⁰⁷ Vgl. Statistisches Bundesamt, 2019 (08.04.2019).

¹⁰⁸ Vgl. Statistisches Bundesamt, 2015 (09.04.2019).

Das Bruttoinlandsprodukt pro Kopf wächst jährlich mit durchschnittlich 1,06 % moderat und der Dienstleistungsanteil steigt nur um wenige Prozentpunkte. Entsprechend der leicht abnehmenden Bevölkerungsanzahl wird das BIP pro Kopf bis 2050 im Dienstleistungsbereich um 46,04 % und im Industriebereich um 36,74 % steigen.¹⁰⁹ Für das zukünftige Dienstleistungs- und Produktionsvolumen pro Person werden gleiche Entwicklungen angenommen.

Im Sektor KLIK wird der Energieverbrauch der Simulation zufolge im Zieljahr noch bei 90,75 % gegenüber dem Statusjahr liegen. Durch Effizienzsteigerungen von Strom verbrauchenden Anwendungen kann der Verbrauch im Haushalt, Industrie und Handel gesenkt werden.¹¹⁰ Dies wird beinahe vollständig durch das um 46,04 % und 36,74 % erhöhte prognostizierte Dienstleistungs- und Produktionsvolumen im Jahr 2050, welches den Energieverbrauch ansteigen lässt, aufgehoben.

Der Energieverbrauch für Gebäudewärme kann bis 2050 auf 41,44 % verringert werden. In der Literatur wird eine zukünftig steigende Wohnfläche pro Person¹¹¹ und eine sinkende Anzahl der Erwerbstätigen vermutet (vgl. UUA 2.2.2.4).¹¹² Dazu sollen die Homeoffice-Möglichkeiten ausgebaut werden. Demnach wird sich der Energiebedarf von Industrie- und Gewerbegebäuden zu Wohngebäuden verschieben.¹¹³ Die Bundesregierung sieht eine umfassende Gebäudesanierung für die Zukunft vor. Mit einer jährlichen Sanierungsrate von 2,4 % kann der Raumwärmebedarf um 65 % und der Warmwasserverbrauch um 20 % bis zum Zieljahr gesenkt werden.¹¹⁴ Vor allem die Gebäudesanierung ist folglich notwendig, um zukünftig den Energieverbrauch für die Gebäudewärme zu reduzieren. Während im Statusjahr 78,55 % der Gebäudewärme aus Brennstoffen erzeugt wird, sollen diese im zukünftigen Energiesystem mit 100 % erneuerbaren Energien in Deutschland fast vollkommen substituiert werden.

¹⁰⁹ Vgl. *Statistisches Bundesamt*, 2018 (09.04.2019).

¹¹⁰ Vgl. *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit*, 2016.

¹¹¹ Vgl. *Repenning, J./Braungardt, S.*, 2015.

¹¹² Vgl. *Fuchs, J./Kubis, A.*, 2016.

¹¹³ Vgl. *Brandt, M.*, 2017.

¹¹⁴ Vgl. *Walter, A./Wiehe, J.*, 2018.

Hingegen sollen im Jahr 2050 hauptsächlich Solarthermie und Umgebungswärme eingesetzt werden. Zum Antrieb der Umgebungswärme fördernden Wärmepumpen wird zusätzlich Strom benötigt.

Im Bereich der Prozesswärme liegt der Energieverbrauch in Deutschland der Simulation zufolge im Zieljahr bei 84,6 % des Jahres 2016. Während aus Effizienzsteigerungen von Prozesswärme-Anwendungen eine Reduktion des Energieverbrauchs resultieren kann, steigt der Verbrauch durch das gleichzeitig um 36,74 % erhöhte Produktionsvolumen im Jahr 2050. Ein Teil der benötigten Brennstoffe für die Erzeugung von Prozesswärme soll zukünftig durch Strom ersetzt werden.¹¹⁵ So kann dieser Sektor im Jahr 2050 zu ungefähr gleichen Anteilen aus Strom und Brennstoffen versorgt werden. Die Umstellung der Wärmeversorgung mit Prozess- und Gebäudewärme im Industrie- und Dienstleistungsbereich sowie in den Haushalten wird als Wärmewende bezeichnet.

Im Sektor Mobilität ist eine zukünftige Reduktion des Energieverbrauchs auf 43,5 % gegenüber dem Statusjahrs möglich. Verbunden mit dem steigenden Produktionsvolumen und dem zunehmenden Online-Handel, wird in der Literatur von einer um 30 % erhöhten Güterverkehrsleistung pro Kopf im Jahr 2050 ausgegangen.¹¹⁶ Hingegen soll die Luftverkehrsleistung auf dem Niveau des Statusjahres bleiben und die Personenverkehrsleistung sehr gering abnehmen.¹¹⁷ Um die zukünftige Verringerung des Energieverbrauchs im Mobilitätssektor realisieren zu können, ist eine Vermeidung und Verlagerung des Verkehrs sowie eine Verbesserung der Energieeffizienz notwendig. Diese Umstellung des Mobilitätssektors wird als Verkehrswende bezeichnet. So soll u.a. der Verkehr auf die Schiene verlagert werden. Durch die Ausweitung und Attraktivitätssteigerung des öffentlichen Nahverkehrs und Fahrradverkehrs, Geschwindigkeitsbegrenzung und PKW freie Zonen soll der motorisierte Individualverkehr zukünftig reduziert werden.¹¹⁸

¹¹⁵ Vgl. Gerbert, P./Herhold, P., 2018.

¹¹⁶ Vgl. Umweltbundesamt, 2016.

¹¹⁷ Vgl. Gerbert, P./Herhold, P., 2018.

¹¹⁸ Vgl. Nitsch, J., 2018.

Ebenfalls kann der verringerte Energieverbrauch durch technisch verbesserte Motoren und Fahrzeuge erreicht werden. Während bis 2050 der Großteil des Personen- und Güterverkehrs auf effiziente Elektromotoren umgestellt werden soll, bleibt in einigen Verkehrsbereichen, wie dem Luftverkehr, die Elektrifizierung keine Option. Alternativ können biogene Kraftstoffe, ergänzt durch synthetische Flüssigkraftstoffe aus Wasserstoff, zum Einsatz kommen. Ein nennenswerter Anteil mit Antrieben durch Brennstoffzellen wird für die Zukunft nicht vermutet.¹¹⁹ Während im Statusjahr überwiegend fossile Brennstoffe in dem Sektor verbraucht werden, können diese in einem Energiesystem mit 100 % erneuerbaren Energien durch biogene Brennstoffe und Strom substituiert werden.

Die Verbrauchsveränderung der Energieformen ist in Abbildung 3 abgebildet.

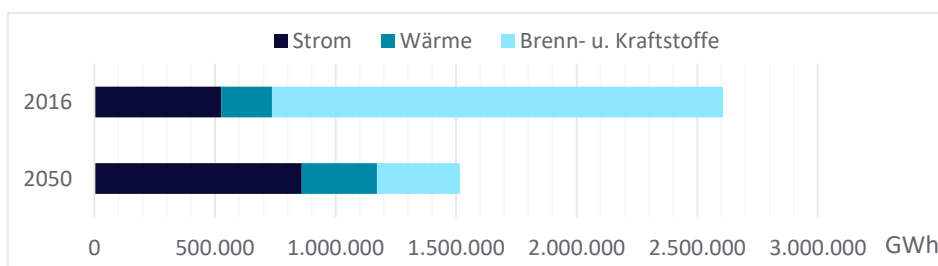


Abbildung 3: Veränderung des Energieverbrauchs der Energieformen
Quelle: Eigene Darstellung.

So wird im Zieljahr trotz des um 41,84 % verminderten Energieverbrauchs 63,08 % mehr Strom und 48,37 % mehr Wärme in Deutschland benötigt. Hierdurch kann der Verbrauch an Brenn- und Kraftstoffen auf 18,43 % gegenüber 2016 reduziert werden. Dabei kommen 2050 keine fossilen, sondern ausschließlich erneuerbare Energien zum Einsatz.

¹¹⁹ Vgl. Umweltbundesamt, 2016.

4 Technische Entwicklungen der Onshore-Windenergie

Onshore-WKA sind eine der kostengünstigsten Technologien für die Stromerzeugung in Deutschland. Entsprechend soll diese möglichst weit ausgebaut werden, um zukünftig einen großen Beitrag zu der Energieversorgung aus 100 % erneuerbaren Energien zu leisten.¹²⁰ In diesem Kapitel geht es um die technischen Entwicklungen der Onshore-Windenergie in Deutschland. Mit Hilfe der Windparkplanungssoftware WindPro werden die vergangenen und zukünftigen Entwicklungen untersucht, um den zu erwartenden spezifischen Flächenbedarf sowie die Volllaststunden der Onshore-Windenergie als Parameter für das BA-Zielszenario zu ermitteln.

4.1 Zusammensetzung des Energieertrags

Um die zukünftig benötigte Strommenge aus Windenergie produzieren zu können, müssen Entscheidungen über die nötige Anzahl an WKA sowie die dafür benötigte Landesfläche getroffen werden. Dazu muss der Energieertrag, den WKA in einem Windpark jährlich erzeugen, bekannt sein. Die Energieertragsanalyse wird im Rahmen der Windpark-Planung durchgeführt. Dabei beeinflussen folgende Größen den jährlichen Energieertrag der WKA in einem Windpark.

Die standortspezifischen Parameter, wie die mittlere Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe der WKA, die Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen, Umgebungsrauigkeit, Turbulenzintensität, Temperatur, Luftdruck und Luftdichte sind aus einem Gutachten für den betrachteten Windparkstandort zu entnehmen. Mit zunehmender Nabenhöhe wird der Wind weniger durch das Gelände beeinflusst. Durch diese geringere Umgebungsrauigkeit steigt i.d.R. die Windgeschwindigkeit und die Turbulenzintensität nimmt ab, was sich positiv auf die Höhe des Energieertrags auswirkt.¹²¹

¹²⁰ Vgl. Kost, C./Shammugam, S., 2018.

¹²¹ Vgl. Heier, S., 2009.

Die Luftdichte hängt mit dem Luftdruck und der Umgebungstemperatur durch die ideale Gasgleichung zusammen, sodass z.B. in tropischen Zonen (höhere Temperaturen) und an hoch über dem Meeresspiegel liegenden Orten (niedrigerer Druck) eine geringere Luftdichte herrscht.¹²²

Des Weiteren sind spezifische Parameter der WKA, wie die Nabenhöhe, RD, Nennleistung, Leistungskurve, Leistungsbeiwert und Volllaststunden zu berücksichtigen. Durch eine große Rotorfläche können bei niedrigen Windgeschwindigkeiten höhere Energieerträge erreicht werden. Die installierte Nennleistung, als größtmögliche Leistung, liegt in der Realität über der tatsächlich erbrachten Leistung, welche von den standortspezifischen Parametern im Windpark abhängt. Dementsprechend produzieren zwei identisch konzipierte Windparks an unterschiedlichen Standorten verschiedene Energiemengen. Jeder WKA-Produkttyp besitzt eine spezifische Leistungskurve, welche die Höhe der abgegebenen elektrischen Leistung in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe veranschaulicht. Während der Leistungsbeiwert den Wirkungsgrad des Rotors beschreibt, geben die Volllaststunden die Stunden an, in der eine WKA an einem Standort mit ihrer Nennleistung laufen müsste, um den tatsächlichen Jahresenergieertrag zu erreichen.¹²³

Es treten grundsätzlich Energieverluste am Rotor sowie elektrische Verluste auf. Hinter jeder WKA entstehen Windturbulenzen und eine verminderte Windgeschwindigkeit, wodurch WKA in zweiter Reihe eines Windparks weniger Energie produzieren. Um diesen Wake-Effekt zu verringern, sollen die Mindestabstände zwischen WKA in einem Windpark 5 RD in Hauptwindrichtung und 3,5 RD in Nebenwindrichtung betragen.¹²⁴

Aufgrund der vielfältigen Einflüsse auf den Energieertrag in einem Windpark ist eine softwarebasierte Berechnung unumgänglich, weshalb in der Bachelorarbeit die Windparkplanungs-Software WindPro verwendet wird.

¹²² Vgl. *Durstewitz, M./Behem, G.*, 2018.

¹²³ Vgl. *Heier, S.*, 2009.

¹²⁴ Vgl. *Durstewitz, M./Behem, G.*, 2018.

4.2 Vergangene Entwicklungen

In der Vergangenheit waren die technischen Entwicklungen von WKA in Deutschland überwiegend durch eine Konstruktion von immer größeren WKA gekennzeichnet, die folglich eine höhere Leistung erbringen.¹²⁵ So bringt auch die GE Wind Energy GmbH mit der Zeit Produkte mit höherer Nennleistung und größeren RD auf den Markt.¹²⁶ Anhand eines Vergleichs der vier Produkttypen (vgl. Tabelle 2) werden nachfolgend die technischen Entwicklungen der Onshore-Windenergie hinsichtlich der spezifischen Flächenenerträge und Flächenbedarfe untersucht.

Produkt	Nennleistung	Rotordurchmesser	Nabenhöhe
	[MW]	[m]	m
5.5-158	5,5	158	161
3.6-137	3,6	137	164,5
2.75-120	2,75	120	139
1.5-77	1,5	77	100

Tabelle 2: WKA-Produkttypen der GE Wind Energy GmbH
Quelle: Eigene Darstellung.

Mit Hilfe von WindPro wird nacheinander für jeden WKA-Produkttyp ein gleich strukturierter Windpark mit jeweils 25 WKA simuliert. Durch diese Anzahl können Verluste durch den Wake-Effekt berücksichtigt werden. Als Abstände zwischen den WKA werden 5 RD in Hauptwindrichtung und 3,5 RD in Nebenwindrichtung übernommen. Zusätzlich sollen für alle vier Windparks mit jeweils einem WKA-Produkttypen gleiche Standortbedingungen herrschen. Für bereits installierte Windparks liegen der GE Wind Energy GmbH bereits exakte standortspezifische Daten vor, welche in die Simulation der vier Windparks übernommen werden können. Die Lage des Standortes in Deutschland ist für den Vergleich der Produkttypen nicht relevant. Dementsprechend wird auf die standortspezifischen Daten eines bestehenden Windparks (WP1) zurückgegriffen. Die spezifischen Kennwerte für die vier WKA-Produkttypen liegen im Anlagenkatalog in WindPro vor. Mit Hilfe der Software werden für alle vier Windparks die Volllaststunden und der Energieertrag berechnet, wobei letzter zusätzlich um 10 % verringert werden muss, um elektrische und z.B. durch verschmutzte Rotorblätter entstehende, Verluste zu berücksichtigen.

¹²⁵ Vgl. Bundesverband WindEnergie e.V., 2018.

¹²⁶ Vgl. GE Wind Energy GmbH, 2017.

Die Eingaben in die Software sind in Anlage 1 und die Ergebnisse in Tabelle 3 zusammengefasst.

Produkt	WKA	Installierte Leistung	Volllaststunden	Energieertrag
	[St.]	[MW]	[h]	[MWh/a]
5.5-158	25	137,5	3469	429.350
3.6-137	25	90	3746	305.921
2.75-120	25	68,75	3565	220.562
1.5-77	25	37,5	2189	73.877

Tabelle 3: Energieerträge und Volllaststunden der WKA-Produkttypen
Quelle: Eigene Darstellung.

Die Anordnung der WKA auf der Windparkfläche ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Begrenzung des Windparks liegt jeweils in einer halben Abstandslänge zu den äußeren WKA. So werden alle notwendigen Abstände eingehalten, falls ein weiterer Windpark neben diesen gebaut wird.

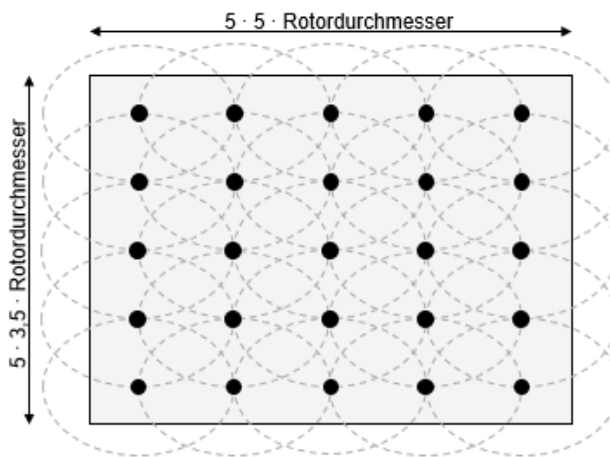


Abbildung 4: Windparkstruktur
Quelle: Eigene Darstellung.

Mittels der Formeln werden die Größen der Windparkflächen berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 dargestellt.

$$A_{WP} = l_{WP} \cdot b_{WP}$$

$$A_{WP} = (5 \cdot 5 \cdot d_{Rotor}) \cdot (3,5 \cdot 5 \cdot d_{Rotor})$$

Während ein 0,714 ha großes Fußballfeld ca. 1530 mal auf die Fläche des größten Windparks passt, gleicht der Windpark mit 1,5 MW WKA einer deutlich kleineren Fläche von ca. 363 Fußballfeldern.¹²⁷

Produkt	Windparkfläche
	[ha]
5.5-158	1.092,18
3.6-137	821,14
2.75-120	630,00
1.5-77	259,39

Tabelle 4: Windparkflächen der WKA-Produkttypen
Quelle: Eigene Darstellung.

¹²⁷ Vgl. Kalusche, D., 2016.

Durch die folgenden Formeln berechnen sich die spezifischen Flächenerträge und -bedarfe für alle Windparks (vgl. Tabelle 5).

$$E_{\text{Flächenertrag}} = \frac{E_{\text{WP}}}{A_{\text{WP}}}$$

$$A_{\text{Flächenbedarf}} = \frac{A_{\text{WP}}}{n_{\text{WKA}} \cdot P_{\text{Nenn}}}$$

Demzufolge nimmt der spezifische Flächenertrag mit einem größerem RD und höherer Nennleistung einer WKA zu. In Folge der Entwicklung zu leistungsstärkeren WKA mit größeren RD kann mehr Energie auf einer gleichgroßen Fläche produziert werden. Dennoch steigen die Verluste durch den Wake-Effekt mit zunehmender WKA-Anzahl, sodass größere Windparks geringere Flächenerträge einbringen als kleinere mit den gleichen WKA-Produkttypen.

Produkt	Flächenbedarf	Flächenertrag
	[ha/MW]	[MWh/ha]
5.5-158	7,94	393,11
3.6-137	9,12	372,55
2.75-120	9,16	350,10
1.5-77	6,92	284,81

Tabelle 5: Spezifische Flächenerträge und -bedarfe der WKA-Produkttypen

Quelle: Eigene Darstellung.

Diese Zusammenhänge sind bezüglich der spezifischen Flächenbedarfe nicht zu erkennen. In den Ergebnissen fällt auf, dass die 2,75 MW und 3,6 MW WKA den größten und einen ähnlichen Flächenbedarf haben. Hingegen beansprucht die größte und leistungsstärkste 5,5 MW WKA weniger und die kleinste und leistungsschwächste 1,5 MW WKA am wenigsten Fläche pro 1 MW installierte Leistung. Der Grund für die Differenzen ist, dass das Verhältnis der Rotorfläche zu der Nennleistung bei den 2,75 MW und 3,6 MW WKA am größten ist. Diese WKA mit großen Rotoren und dazu relativ kleinen Nennleistungen auf hohen Türmen werden vorwiegend an Schwachwindstandorten eingesetzt, wo niedrige Windgeschwindigkeiten ohnehin geringe Energieerträge erzielen.¹²⁸ So bewirkt z.B. ein 1 % größerer RD eine 2 % größere Rotorfläche und folglich einen höheren Energieertrag. Hierfür werden an Schwachwindstandorten größere Mindestabstände und höhere Flächenbedarfe der WKA akzeptiert.

¹²⁸ Vgl. Durstewitz, M./Behem, G., 2018.

An windstarken Standorten lassen die hohen Windgeschwindigkeiten hauptsächlich den Energieertrag ansteigen, weshalb dort i.d.R. Starkwindkraftanlagen mit großen Nennleistungen und relativ kleinen Rotoren installiert werden. Trotz eines hohen Flächenertrages ist der Flächenbedarf dieser WKA verhältnismäßig gering. Es können somit mehr Starkwindanlagen als Schwachwindanlagen auf einer gleichgroßen Fläche installiert werden. Im Gegensatz zum spezifischen Flächenertrag bleibt der spezifische Flächenbedarf unabhängig von der Anzahl an WKA in einem Windpark gleich.

4.3 Zukünftige Entwicklungen

Die vergangenen technischen Entwicklungen der Onshore-Windenergie deuten auf eine zukünftige Weiterentwicklung zu noch leistungsstärkeren WKA mit größeren RD hin. Dabei erkennen Experten einen Trend zu kleineren Verhältnissen zwischen dem RD und der Nennleistung von WKA. Dies ist auch bei dem neuesten Produkt der GE Wind Energy GmbH, der 5,5 MW WKA, der Fall. Trotz dieser Entwicklung liegt die durchschnittliche Nennleistung der WKA in Deutschland aktuell bei ca. 2,98 MW und das durchschnittliche Betriebsalter bei 16 Jahren. Es wird vermutet, dass bis zu dem Jahr 2050 die bestehenden älteren und leistungsschwächeren WKA durch leistungsstärkere Produkttypen ersetzt werden und zudem ein Zubau letzterer stattfindet.¹²⁹ In der Literatur wird von 4 MW bis 4,5 MW durchschnittlicher Nennleistung in Deutschland im Jahr 2033 ausgegangen, weshalb für 2050 eine durchschnittliche Nennleistung von 5,5 MW plausibel erscheint.¹³⁰ Ebenfalls liegen der GE Wind Energy GmbH für größere WKA keine anlagenspezifischen Daten vor, sodass eine Energieertragsberechnung für diese unmöglich ist.

Für die Simulation der Energieversorgung im BA-Zielszenario müssen der spezifische Flächenbedarf und die Volllaststunden als Parameter der Onshore-Windenergie für das Zieljahr festgelegt werden.

¹²⁹ Vgl. *Durstewitz, M./Behem, G.*, 2018.

¹³⁰ Vgl. *Lackmann, J.*, 2014.

Der spezifische Flächenbedarf wird aufgrund der Standortunabhängigkeit aus den Berechnungen des vorherigen Abschnitts 4.2 übernommen. Dieser liegt bei 7,94 ha/MW bzw. 43,67 ha je 5,5 MW WKA.¹³¹ Innerhalb dieser Fläche dürfen keine weiteren WKA oder Gebäude errichtet werden. Die WKA benötigt eine Fundamentfläche von 0,06 ha und eine zusätzlich 0,3 ha Fläche für z.B. Zufahrten oder als Abstellfläche.¹³² Die umliegenden Flächen können anderweitig genutzt werden, z.B. für Landwirtschaft. Dementsprechend liegt die tatsächliche Flächeninanspruchnahme bei 0,82 % des Flächenbedarfes.¹³³ Ggf. werden in einigen Windparks weitere Flächen benötigt, sodass die durchschnittliche tatsächliche Flächeninanspruchnahme bei 1 % des spezifischen Flächenbedarfs liegt.

Die Höhe der Volllaststunden hängt von dem WKA-Produkttyp und den Standortbedingungen ab. So werden im Norden Deutschlands, aufgrund geringerer Umgebungsrauigkeiten und höherer Windgeschwindigkeiten, eine größere Auslastung der WKA und damit mehr Volllaststunden als im Süden erwartet.¹³⁴ Da die Volllaststunden in die Energieertragsberechnung einfließen, ist der spezifische Flächenertrag eine standortspezifische Größe.

Folglich wird mit Hilfe der Software WindPro der jährliche Energieertrag für einen simulierten Windpark im Norden und einen identisch strukturierten Windpark im Süden Deutschlands berechnet. Die Standorte repräsentieren jeweils die nördliche und südliche Landeshälfte. Weil der Windpark WP1 (vgl. Abschnitt 4.2) zentral im nördlichen Teil Deutschlands liegt, werden Ergebnisse aus der vorangegangenen Simulation des Windparks mit 5,5 MW WKA übernommen. Für die Simulation des südlichen Windparks können die standortspezifischen Daten eines Windparks in der südlichen Landeshälfte (WP2) verwendet werden. An diesem Standort wird ebenfalls ein Windpark mit 25 5,5 MW WKA und den Abständen von 5 RD in Hauptwindrichtung und 3,5 RD in Nebenwindrichtung simuliert.

¹³¹ $5,5 \text{ MW} \cdot 7,99 \text{ MW/ha} = 43,67 \text{ ha}$

¹³² Vgl. Lazar, S., 2019 (28.04.2019).

¹³³ $(0,06 \text{ ha} + 0,3 \text{ ha}) : 43,67 \text{ ha} = 0,82 \%$

¹³⁴ Vgl. Deutsche WindGuard GmbH, 2018.

Die Ergebnisse sind in der Tabelle 6 dargestellt.

Produkt	Anzahl	Standort	Installierte Leistung	Windparkfläche	Volllaststunden	Energieertrag
	[St.]		[MW]	[ha]	[h]	[MWh/a]
5.5-158	25	Norden (WP1)	137,5	1092,18	3469	429.350
5.5-158	25	Süden (WP2)	137,5	1092,18	2056	254.372

Tabelle 6: Windparkfläche, Volllaststunden und Energieerträge des nördlichen und südlichen Windparks
Quelle: Eigene Darstellung.

Im Süden wird folglich ein 40,75 % geringerer Energieertrag erzeugt als im Norden. Dabei gleicht der Energieertrag eines Windparks WP2 mit den 5,5 MW WKA im Süden einem Windpark WP1 im Norden mit 2,75 MW WKA. Letzterer besitzt jedoch eine geringere Gesamtfläche, wodurch der Flächenertrag des 2,75 MW Windparks im Norden höher ist als der des 5,5 MW Windparks im Süden Deutschlands. Entsprechend lässt es sich nachvollziehen, dass aktuell mehr WKA im nördlichen Teil des Landes installiert sind. Die Aussage aus der Literatur, dass dort höhere Volllaststunden zu erwarten sind wird durch das Ergebnis bestätigt.¹³⁵

Laut einer Studie sind, unabhängig von den aktuell installierten WKA, 13,8 % der Landesfläche technisch und ökologisch als Windparkfläche geeignet. Davon befinden sich 57,64 % im Norden und 42,36 % im Süden. Ökonomische und gesellschaftliche Aspekte sind dabei nicht berücksichtigt.¹³⁶ Weil zurzeit mehr WKA im nördlichen als im südlichen Landesteil installiert sind, wird eine zukünftige Aufteilung der Windparks in dem prozentualen Verhältnis auf Norden und Süden angenommen. Die durchschnittlichen Volllaststunden werden als gewichteter Mittelwert bestimmt.

$$t_{\text{Volllast}} = (0,5764 \cdot t_{\text{Volllast}_{\text{Nord}}}) + (0,4236 \cdot t_{\text{Volllast}_{\text{Süd}}})$$

Es ergeben sich 2.870 Volllaststunden.

¹³⁵ Vgl. *Deutsche WindGuard GmbH*, 2018.

¹³⁶ Vgl. *Lütkehus, I./Salecker, H.*, 2013.

Als Ergebnis der technischen Entwicklungen der Onshore-Windenergie wird diese Energiequelle in der Zukunft durch folgende Größen gekennzeichnet sein (vgl. Tabelle 7). Diese werden als Parameter in das BA-Zielszenario übernommen.

Es fällt auf, dass einige Literaturquellen geringere zukünftige Flächenbedarfe und höhere Volllaststunden einschätzen.¹³⁷ Dabei

	Flächenbedarf [ha/MW]	Tatsächliche Flächeninanspruchnahme [ha/MW]	Volllaststunden [h]
Resultierend	7,94	0,0794	2870

Tabelle 7: Zukünftiger spezifischer Flächenbedarf und Volllaststunden
Quelle: Eigene Darstellung.

sind jedoch kleinere Abstände in Nebenwindrichtung mit drei RD sowie keine Unterschiede zwischen nördlichen und südlichen Standorten einberechnet.¹³⁸

¹³⁷ Vgl. Klein, S., 2017.

¹³⁸ Vgl. Quentin, J./Thomsen, J., 2019.

5 Voraussetzungen für die Energieversorgung

Für die Energiewende zu einer Energieversorgung mit 100 % erneuerbaren Energien ist auf der einen Seite eine Verringerung des gesamten Energieverbrauchs notwendig. Dies kann u.a. in Folge eines nachhaltigen Nutzungsverhaltens der Gesellschaft sowie effizienteren Prozessen und Technologien erreicht werden (vgl. Kapitel 3 und 4). Andererseits bestehen Voraussetzungen bezüglich der Energieversorgung. Dieses Kapitel thematisiert den Ausbau der Energiequellen und Stromnetze sowie die Energiewandlung und -speicherung als Voraussetzungen für die Energiewende.

5.1 Simulation der Energieversorgung

In der folgenden Tabelle 8 sind die Parameter der Energieversorgung im Status-Szenario und BA-Zielszenario zusammengefasst.

Parameter	Einheit	Status-Szenario 2016	BA-Zielszenario 2050
Solarthermie			
Mit Solarthermie beanspruchte geeignete Dachflächen	[%]	8,9	5
Energieertrag der Solarthermie-Dachanlagen	[MWh/ha/a]	4079	5500
Solarstrom			
Mit PV beanspruchte geeignete Dachflächen	[%]	91	95
Energieertrag der PV-Dachanlagen	[MWh/ha/a]	1314	1840
Energieertrag der PV-Freiflächeanlagen	[MWh/ha/a]	526	736
Volllaststunden	[h/a]	920	920
Onshore-Windenergie			
Spezifischer Flächenbedarf	[ha/MW]	4,77	7,94
Volllaststunden	[h/a]	1708	2870
Offshore-Windenergie			
Installierte Leistung	[MW]	2566	57000
Volllaststunden	[h/a]	4255	4660
Wasserkraft			
Nutzanteil am Potenzial	[%]	81,9	85
Energieertrag der Wasserkraftwerke	[MWh/ha/a]	0,69	0,69
Feste biogene Brennstoffe			
Energetisch genutzter Teil des Holzaufkommens	[%]	45,5	44,4
Energieertrag des Energieholzes aus der Forstwirtschaft	[MWh/ha/a]	27,1	27,1
Energieertrag des Energieholzes aus dem Ackerbau	[MWh/ha/a]	29,9	51,4
Energetisch genutzter Teil des Strohaufkommens	[%]	0,2	33
Energieertrag von Stroh	[%]	23,8	23,8
Energetisch genutzte feste biogene Abfallstoffe	[GWh/a]	17845	17845
Feste biogene Brennstoffe für Gebäudewärme	[%]	50,19	3,81
Feste biogene Brennstoffe für Prozesswärme	[%]	15,4	96,19

Feste biogene Brennstoffe zur Verstromung	[%]	34,41	0
Flüssige biogene Brennstoffe			
Biodiesel Energieertrag	[MWh/ha/a]	17,8	14,2
Bioethanolnutzung	[%]	100	0
Flüssige biogene Brennstoffe für Mobilität	[%]	95,5	100
Flüssige biogene Brennstoffe zur Verstromung	[%]	4,5	0
Gasförmige biogene Brennstoffe			
Methanertrag	[MWh/ha/a]	51,6	41,3
Biogas aus Abfall- und Reststoffen	[GWh/a]	15039	30079
Biogas aus Kläranlagen und Deponien	[GWh/a]	4753	4753
Biogas für Mobilität	[%]	0,4	59,8
Biogas für PW	[%]	0	40,2
Biogas zur Verstromung	[%]	99,6	0
Umgebungswärme			
Wärmepumpen mit Luftkopplung	[%]	50	72
Jahresarbeitszahl der Wärmepumpen mit Luftkopplung		2,8	3,9
Wärmepumpne mit Wasser- und Erdkopplung	[%]	50	28
Jahresarbeitszahl der Wärmepumpen mit Wasser- und Erdkopplung		3,4	4,8
Tiefengeothermie			
Netzanschlussleistung	[MW]	39	105
Volllaststunden	[h/a]	4154	8000
Elektrische Nutzung	[%]	0	17
Abwärmenutzung	[%]	0	100
Stromwandlung und -speicherung			
Wirkungsgrad der Methansynthese	[%]	0	87
Wirkungsgrad der Flüssigkraftstofferzeugung	[%]	0	66
Wirkungsgrad der Wasserelektrolyse	[%]	0	84
Wirkungsgrad der Langzeitstromspeicherung	[%]	0	49,14
Abwärmenutzung	[%]	0	12,7
Übertragungsverluste des Stromnetzes und der Kurzzeitspeicher	[%]	5,2	15,2

Tabelle 8: Parameter der Energieversorgung
Quelle: Eigene Darstellung.

Das Ergebnis der Simulation des BA-Zielszenarios enthält die Energiemengen der verschiedenen Energiequellen, welche im Zieljahr 2050 produziert werden können. In Abbildung 5 im folgenden Abschnitt ist die Energieerzeugung im Statusjahr (grau) und die Zusätzliche im Jahr 2050 (farbig) visualisiert. Beide Anteile ergeben zusammen die jeweilige gesamte Energieproduktionsmenge im Zieljahr.

5.2 Ausbau der erneuerbaren Energien

Im Gegensatz zu den übrigen erneuerbaren Energien werden flüssige biogene Brennstoffe im Zieljahr mit einem geringeren Anteil zu der Energieversorgung beitragen als im Statusjahr (grau gestreift).

Die ohnehin begrenzten Anbauflächen für Energiepflanzen sollen zukünftig, statt für die Erzeugung von Biodiesel und Bioethanol, überwiegend für die Biogasproduktion genutzt werden, das einen höheren Energieertrag besitzt.¹³⁹ Wenig Biodiesel wird als Kraftstoff für Verbrennungsmotoren im Mobilitätssektor eingesetzt. Hingegen wird feste Biomasse der zukünftig

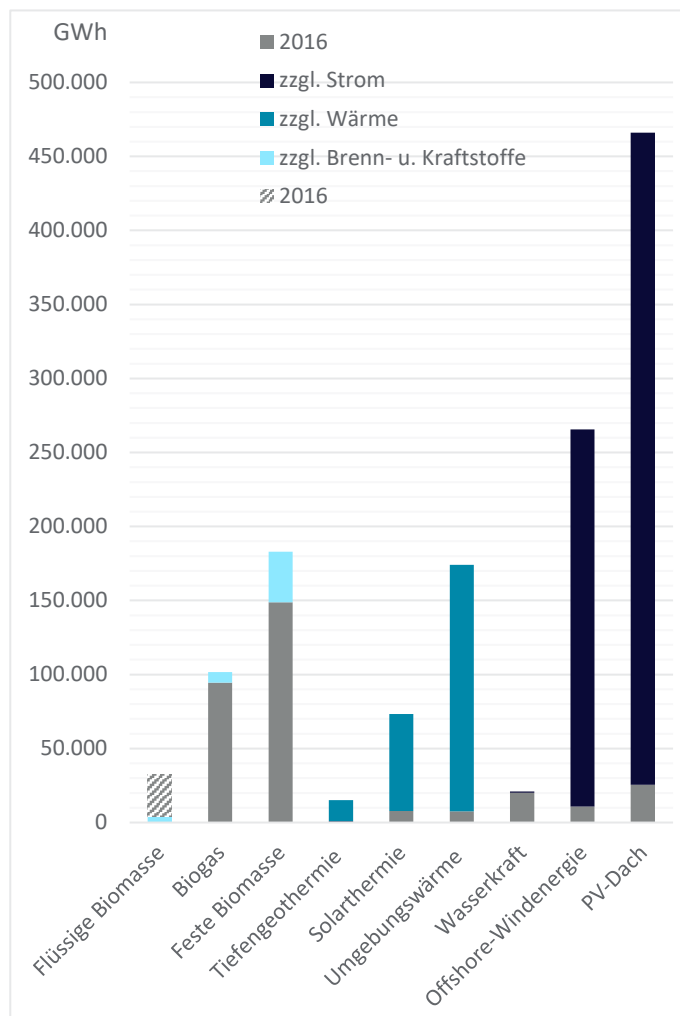


Abbildung 5: Energieerzeugung der Energiequellen
Quelle: Eigene Darstellung.

meist genutzte biogene Brennstoff sein. Davon sollen neben Holz aktuell kaum energetisch genutztes Stroh sowie Abfall- und Reststoffe eingesetzt werden. Letztere entstehen ohnehin und hängen mit keinen Flächennutzungskonflikten zusammen.¹⁴⁰

Obwohl Tiefengeothermie gegenüber dem Statusjahr zukünftig primär für die Wärmeerzeugung genutzt wird, ist der Beitrag dieser Energiequelle gering. Aufgrund der mit den Tiefenbohrungen verbundenen Kosten und Risiken ist der Ausbau dieser Technologie ungewiss.¹⁴¹

¹³⁹ Vgl. Edel, M./Kühnel Christine, 2017.

¹⁴⁰ Vgl. Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V., 2018.

¹⁴¹ Vgl. Geothermie-Allianz Bayern, 2017.

Hingegen wird Solarthermie im Jahr 2050 fast zehnmal mehr Wärme bereitstellen als heute. Für den Ausbau wird keine Landesfläche beansprucht, sondern nur ohnehin vorhandene Dachflächen.¹⁴² Die mittels Wärmepumpen bereitgestellte Umgebungswärme wird im BA-Zielszenario am stärksten zu der zukünftigen Wärmeversorgung beitragen. Dies ist mit der einfachen und kostengünstigen Installation sowie vorauszusehenden Effizienzsteigerungen der Technologie zu begründen.¹⁴³

Der Stromverbrauch wird gegenüber den übrigen Energieformen zukünftig am meisten ansteigen. Folglich besitzt dieser den größten Anteil an dem gesamten Energieverbrauch im Zieljahr (vgl. Abschnitt 3.3). Windstrom (aus Onshore-WKA und Offshore-WKA) und Solarstrom (aus PV-Dachanlagen und PV-Freiflächenanlagen) tragen schon heute in Deutschland am meisten zur erneuerbaren Stromerzeugung bei, wobei der größte Anteil mit Onshore-Windenergie gedeckt wird.¹⁴⁴ In der Literatur besteht Einigkeit darüber, dass Wind- und Solarstrom die bedeutendsten Rollen in der zukünftigen Energieversorgung haben werden, weshalb ein starker Ausbau der Technologien erforderlich ist.¹⁴⁵ Mit PV-Dachanlagen kann konfliktarm Strom erzeugt werden, weil keine zusätzlichen Flächen beansprucht werden, sondern nur die ohnehin vorhandenen Dachflächen.¹⁴⁶ Ebenso wird durch Offshore-WKA auf dem Meer keine Landesfläche eingenommen und es kann durch höhere Windgeschwindigkeiten als im Binnenland eine größere Energiemenge produziert werden.¹⁴⁷ Ein maximaler Ausbau dieser beiden Technologien erscheint daher sinnvoll. Wasserkraft trägt vergleichsweise mit einem geringen Anteil zu der Stromversorgung bei und weist sehr geringe Ausbaupotentiale auf.¹⁴⁸ Folglich muss der übrige Strombedarf durch Onshore-WKA und PVF gedeckt werden. Diese besitzen zudem geringere Stromgestehungskosten als die übrigen Technologien.¹⁴⁹

¹⁴² Vgl. Gerbert, P./Herhold, P., 2018.

¹⁴³ Vgl. Elsner, P./Fischedick, M., 2015.

¹⁴⁴ Vgl. Burger, B., 2018.

¹⁴⁵ Vgl. Repenning, J./Braungardt, S., 2015.

¹⁴⁶ Vgl. Knorr, K./Horst, D., 2017.

¹⁴⁷ Vgl. Günther, M., 2015.

¹⁴⁸ Vgl. Schmidt-Curreli, J./Knebel, A., 2016.

¹⁴⁹ Vgl. Kost, C./Shammugam, S., 2018.

5.2.1 Onshore-WKA und PVF

Die Bestimmung geeigneter Anteile beider Technologien, um den übrigen Strombedarf zu decken, erfolgt anhand folgender Kriterien.

Zum einen soll eine möglichst kleine Gesamtfläche beansprucht werden. Durch u.a. Gebäudebebauungen und Erweiterungen der Verkehrsinfrastruktur werden die geeigneten Flächen für Onshore-WKA und PVF beschränkt. Außerdem bestehen Flächennutzungskonflikte bezüglich der geeigneten Flächen, weil anderweitige Verwendungen möglich sind, z.B. für die Landwirtschaft. Zum anderen ist ein geringer Energiespeicherbedarf vorteilhaft, da bei der in 100prosim abgebildeten Langzeitspeicherung mittels Wasserelektrolyse hohe Energieverluste entstehen (Wirkungsgrad: 49,1 %). Je mehr Strom gespeichert wird, desto größer sind die Verluste und für dessen Ausgleich muss insgesamt mehr Strom produziert werden. Wenn zu jeder Zeit ähnlich viel Energie verbraucht wie produziert wird, entstehen wenige Überschuss- und Mangelphasen. Somit besteht jederzeit eine sichere Stromversorgung mit geringem Energiespeicherbedarf. Des Weiteren ist eine große gesamte installierte Leistungsmenge i.d.R. mit Installations-, Wartungsaufwand und höheren Kosten verbunden, da mehrere und effizientere Technologien installiert werden müssen. Deshalb ist eine insgesamt kleine Leistungsmenge von Vorteil.

In 100prosim berechnet sich aus dem mit PVF beanspruchten Anteil der Landesfläche und dem Energieertrag dieser Technologie die produzierte Strommenge durch PVF im Zieljahr. Folglich wird die erforderliche Windparkfläche umgekehrt berechnet, aus der ergänzend benötigten Strommenge mit den zukünftigen Volllaststunden und dem spezifischen Flächenbedarf der Onshore-Windenergie. Die Windpark- und PVF-Flächen werden im Folgenden prozentual zur Landesfläche angegeben.¹⁵⁰

¹⁵⁰ In 100prosim selbst erfolgt die Flächenangabe der PV-Freiflächenanlagen prozentual zu Landwirtschafts- und nicht zu Landesfläche.

Die Simulationsergebnisse des BA-Zielszenarios mit verschiedenen Anteilen der Onshore-WKA und PVF sind in Tabelle 9 dargestellt.

Je mehr Fläche mit Onshore-WKA und weniger mit PVF beansprucht wird, desto mehr Landesfläche ist insgesamt erforderlich (vgl. Spalte 3 von links). Dies lässt sich auf den hohen Flächenbedarf der WKA von 7,94 ha/MW (5,5 MW WKA) zurückführen, unter Einbeziehung der erforderlichen Abstände. Hingegen benötigen PVF weniger als 1,6 ha/MW.¹⁵¹ Während 99 % der Windparkfläche anderweitig genutzt werden können, z.B. für den Anbau von Futtermittel oder Energiepflanzen, ist dies in Folge einer Bebauung mit PVF nur sehr eingeschränkt möglich.¹⁵² Unter Einbeziehung der tatsächlichen Flächeninanspruchnahme der Onshore-WKA von 1 % kehrt sich der Zusammenhang um. Die beanspruchte Gesamtfläche verringert sich durch mehr Onshore-WKA und weniger PVF (vgl. Spalte 4).

PV-Freiflächen	Onshore-WKA	Gesamtfläche	Gesamtflächeninanspruchnahme	Stromaufnahme Langzeit-speicher
[%]	[%]	[ha]	[ha]	[GWh/a]
0,00	6,05	2.164.664	21.682	303.348
0,10	5,79	2.107.618	56.477	301.089
0,20	5,54	2.053.305	91.334	299.503
0,30	5,30	2.001.986	126.221	298.229
0,40	5,06	1.952.425	161.126	297.497
0,50	4,83	1.904.609	196.048	297.172
0,60	4,60	1.858.464	230.987	297.201
0,70	4,37	1.814.194	265.945	297.740
0,80	4,15	1.771.069	300.914	298.804
0,90	3,94	1.729.920	335.903	300.284
1,00	3,73	1.691.115	370.915	302.316
1,10	3,52	1.653.675	405.941	304.329
1,20	3,32	1.617.558	440.980	306.505
1,30	3,13	1.582.352	476.029	309.104
1,40	2,93	1.548.545	511.091	312.068
1,50	2,74	1.515.994	546.166	315.025
1,60	2,56	1.486.350	581.270	318.167
1,70	2,38	1.458.540	616.392	321.936
1,80	2,21	1.432.408	651.531	326.047
1,90	2,04	1.407.206	686.679	330.237
2,00	1,87	1.383.154	721.839	334.424
2,10	1,70	1.360.036	757.008	339.022
2,20	1,54	1.338.182	792.190	343.911
2,30	1,38	1.317.452	827.383	349.104
2,40	1,23	1.297.080	862.580	354.496
2,50	1,07	1.277.550	897.785	360.235
2,60	0,92	1.259.834	933.008	365.902
2,70	0,78	1.243.616	968.247	371.270
2,80	0,64	1.228.864	1.003.499	376.570
2,90	0,50	1.215.032	1.038.761	381.868
3,00	0,36	1.202.331	1.074.035	387.172
3,10	0,23	1.191.007	1.109.322	392.654
3,20	0,10	1.181.279	1.144.625	398.374
3,28	0,00	1.174.122	1.174.087	403.193

Tabelle 9: Ausbauverhältnis der Onshore-WKA und PVF

Quelle: Eigene Darstellung.

¹⁵¹ Vgl. Bundesnetzagentur, 2016.

¹⁵² Vgl. Weyres-Borchert, B., 2018.

Der Langzeitenergiespeicherbedarf steigt mit zunehmendem Anteil an PVF (vgl. Spalte 5) Dies liegt vermutlich an den vorhersehbaren Schwankungen der Solarstromproduktion sowie einem grundsätzlich höheren Energiebedarf im Winter als im Sommer.¹⁵³ Weil mittags und im Sommer mehr Solarstrom als im Winter und nachts erzeugt wird, müssen die entstehenden Stromüberschuss- und Strommangelphasen mit Energiespeichern ausgeglichen werden.¹⁵⁴ Schwankungen der Windenergieproduktion sind oft nicht so stark und vorhersehbarer, wobei in den Herbst-, Winter- und Frühjahrsmonaten sowie nachts höhere Energieerträge erwartet werden.¹⁵⁵ Aufgrund von größeren Windstärken leisten WKA im nördlichen Teil Deutschlands i.d.R. höhere Erträge, während eine stärkere Sonneneinstrahlung in der südlichen Landeshälfte zu einer höheren Solarstromproduktion führt.

Beide Technologien ergänzen sich somit hinsichtlich unterschiedlicher Stromerzeugungsmengen zu verschiedenen Zeiten. Dies begründet das Auftreten des minimalen Langzeitspeicherbedarfs bei einer Beanspruchung von 4,83 % der Landesfläche mit Onshore-WKA und 0,5 % mit PVF. In diesem Verhältnis erzeugen Onshore-WKA annähernd gleich viel Strom wie PVF und PV-Dachflächenanlagen zusammen, wodurch sich Wind- und Solarstrom ergänzen. Es erscheint folglich ein zukünftiger Ausbau beider sinnvoller, als die Konzentration auf eine Technologie. Zusätzlich variiert die gesamte installierte Leistungsmenge für verschiedene Anteile beider Technologien, aber einer unveränderten Gesamtstromproduktionsmenge (vgl. Abbildung 6).

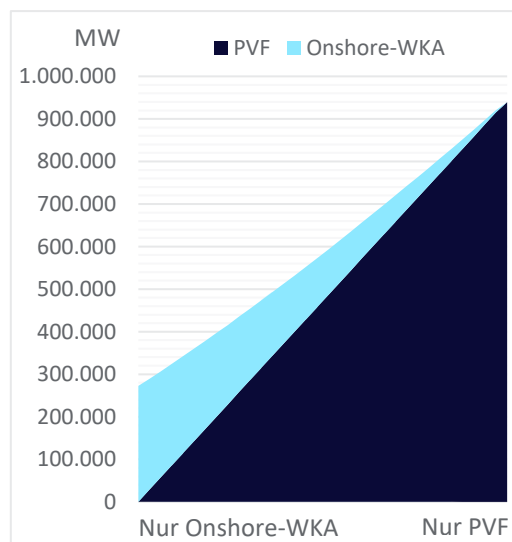


Abbildung 6: Installierte Leistung der Onshore-WKA und PVF
Quelle: Eigene Darstellung.

¹⁵³ Vgl. Kost, C./Shammugam, S., 2018.

¹⁵⁴ Vgl. Fraunhofer ISE, 2019.

¹⁵⁵ Vgl. Deutsche WindGuard GmbH, 2018.

Bei einem ausschließlichen Einsatz von Onshore-WKA ist die erforderliche Gesamtleistung um zwei Drittel geringer, als für eine alleinige Nutzung von PVF. Dies lässt sich mit den höheren Volllaststunden der Onshore-Windenergie im Jahr 2050 begründen, wodurch gegenüber den PVF eine ertragreichere Energieproduktion bei gleichgroßer Leistungsmenge möglich ist. Folglich muss mit steigendem Anteil der PVF viel mehr Leistung installiert werden.

Hinsichtlich der Kriterien ist somit eine Beanspruchung von 4,15 % bis 5,3 % mit Onshore-WKA und ergänzend zwischen 0,3 % und 0,8 % der Landesfläche mit PVF in Zukunft geeignet. Dadurch tragen beide Technologien zu der Energieversorgung bei, es entsteht ein niedriger Energiespeicherbedarf und eine geringe vollständige Flächeninanspruchnahme. Allerdings sind eine politische Förderung und gesellschaftliche Akzeptanz erforderlich (vgl. Abschnitt 6.1 und 6.2). Die prozentuale Windparkfläche bezieht sich auf den gesamten Flächenbedarf, davon können 99 % anderweitig genutzt werden. In Anbetracht der eingeschätzten technisch und ökologisch verfügbaren Flächenpotentiale in der Literatur für Onshore-WKA mit 13,8 % und PVF mit 15,4 % der Landesfläche, erscheinen die festgelegten Anteile realistisch.¹⁵⁶ Für eine Bestimmung der exakten Flächengrößen müssen weitere Faktoren, wie u.a. Kosten und der Platzbedarf der Energiespeicher, untersucht werden. Im Statusjahr 2016 waren Onshore-WKA auf 0,55 % und PVF auf 0,11 % der Landesfläche installiert.¹⁵⁷

5.3 Implementierung der Sektorkopplung

Die aus dem Ausbau der erneuerbaren Energiequellen resultierende Energieproduktion im BA-Zielszenario ist in der folgenden Abbildung 7 dem Energieverbrauch im Jahr 2050 gegenübergestellt.

¹⁵⁶ Vgl. Schicketanz, S., 2015.

¹⁵⁷ Aus dem Status-Szenario in 100prosim

Folglich können im Jahr 2050 nicht genug Brenn- und Kraftstoffe aus erneuerbaren Quellen bereitgestellt werden. Dies ist trotz des um 81,75 % verminderten Energieverbrauchs für Brenn- und Kraftstoffe gegenüber dem Statusjahr (vgl. Abschnitt 3.3) so-

wie des zukünftig vermehrten Anbaus von ertragsstärkerem Biogas, anstatt Biodiesel und -ethanol, auf der begrenzten Anbaufläche nicht möglich (vgl. Abschnitt 5.2).¹⁵⁸

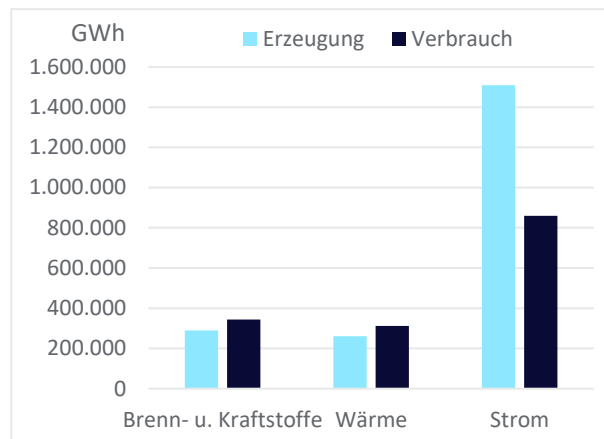


Abbildung 7: Vergleich von Energieerzeugung und Energieverbrauch
Quelle: Eigene Darstellung.

Obwohl im BA-Zielszenario Wärmepumpen für die Nutzung von Umgebungswärme zukünftig sehr stark ausgebaut werden und sich die Wärmeproduktion aus Solarthermie fast verzehnfacht (vgl. Abschnitt 5.2), erzeugen diese Technologien zusammen mit der Tiefengeothermie immer noch weniger Wärme, als im Jahr 2050 verbraucht wird.

Von der Energieform Strom muss im Zieljahr am meisten produziert werden. Dies liegt einerseits an dem zukünftig steigenden Stromverbrauch, z.B. durch die Elektrifizierung im Mobilitätssektor (vgl. Abschnitt 3.33.2). Andererseits kann mit Hilfe von Strom der übrige Bedarf an Brenn- und Kraftstoffen sowie Wärme gedeckt werden.

Für Letzteres ist eine Sektorkopplung notwendig, welche eine Umwandlung des erneuerbaren Stroms in andere Energieformen, wie Wärme und Brenn- und Kraftstoffe (Power-to-X), ermöglicht.¹⁵⁹ Weil diese Prozesse mit verschiedenen Wirkungsgraden behaftet sind und somit Energieverluste entstehen, muss entsprechend mehr Strom eingesetzt werden.

¹⁵⁸ Vgl. Edel, M./Kühnel Christine, 2017.

¹⁵⁹ Vgl. Hoffmann, C., 2019.

Demnach soll zukünftig ein Teil des Stroms für die Erzeugung von Wasserstoff mittels der Wasserelektrolyse (Power-to-Gas) verwendet werden. In Folge einer anschließenden Methansynthese kann gasförmiger synthetischer Kraftstoff, als Ergänzung zu Biomethan, im Mobilitätssektor oder Methan als Grundstoff in der Industrie eingesetzt werden. Zusätzlich soll eine Weiterverarbeitung zu synthetischen Flüssigkraftstoffen stattfinden (Power-to-Liquid), welche zusammen mit Biodiesel vorwiegend für den Luftverkehr eingesetzt werden.¹⁶⁰ Um den restlichen Bedarf an Wärme decken zu können, soll die bei der Wasserelektrolyse entstehende Abwärme genutzt werden. Andererseits entsteht in Folge der Rückverstromung des Wasserstoffs in Blockheizkraftwerken neben Strom ebenfalls Wärme.¹⁶¹ Somit wird auf Basis von Strom der zukünftige Verbrauch von Wärme, Kraft- und Brennstoffen vollständig gedeckt.

5.4 Ausbau der Energiespeicher

Energiespeicher tragen dazu bei, die wetterabhängigen und somit schwankenden Energieproduktionen von Wind- und Solarenergie auszugleichen, um zukünftig jederzeit eine sichere und flexible Energieversorgung zu gewährleisten. Einerseits sollen für ein stabiles Stromnetz die Stromschwankungen kurzfristig ausgeglichen werden. Hierfür werden Kurzzeitspeicher eingesetzt, wofür sich in Deutschland z.B. Batterien, Pumpspeicherwerke und Druckluftspeicher eignen.

Andererseits sollen die Energieerzeugung und der -verbrauch zeitlich entkoppelt werden. Mit Hilfe von Langzeitspeichern kann die Energieproduktion über mehrere Wochen und Monate ausgeglichen werden.¹⁶² In Deutschland kommt hierfür nur die Speicherung in Form von chemischer Energie in Frage, da durch hohe Energiedichten viel Energie auf verhältnismäßig wenig Fläche gespeichert werden kann.¹⁶³

¹⁶⁰ Vgl. Purr, K./Osiek, D., 2016.

¹⁶¹ Vgl. Quaschnig, V., 2016.

¹⁶² Vgl. Freund, R., 2017.

¹⁶³ Vgl. Beck, H.-P./Haaren, C. v., 2016.

Der durch Wasserelektrolyse erzeugte Wasserstoff dient folglich als Basis für die Sektorkopplung und für die Langzeitspeicherung.

5.5 Erweiterung der Stromnetze

Die verschiedenen erneuerbaren Energiequellen und Energiespeicher sind aufgrund der räumlichen Bedingungen in Deutschland verteilt. So sind WKA beispielsweise vorrangig an windstarken Standorten im Norden und auf dem Meer installiert, während sich Pumpspeicherkraftwerke in gebirgigen Regionen im Süden befinden. Für diese dezentrale Energieversorgung mit 100 % erneuerbaren Energien ist eine Digitalisierung und der Ausbau von Stromübertragungs- und -verteilernetzen notwendig. Über intelligente Stromnetze (Smart Grids) kann ein Informationsaustausch zwischen allen Energieerzeugern, -speichern, -verbrauchern und Netzbetreibern erfolgen, mit dem Ziel einer effizienten Energienutzung und Verbesserung der Netzauslastung. Darüber hinaus können intelligente elektrische Energieverbraucher, wie z.B. Waschmaschinen, die sich in Stromüberschussphasen automatisch einschalten, zu einer effizienten Energienutzung beitragen.¹⁶⁴

¹⁶⁴ Vgl. *Rippel, K. M./Wiede, T.*, 2017.

6 Vergleich der Ausbauziele

Um die Effizienzsteigerungen sowie den Ausbau der Energiequellen, -speicher und Stromnetze erfolgreich durchzuführen, ist eine politische und gesellschaftliche Unterstützung notwendig. In diesem Kapitel geht es um die klimapolitischen Notwendigkeiten und gesellschaftlichen Ansichten im Vergleich zu erforderlichen Ausbauzielen bezüglich der Onshore-Windenergie (vgl. Abschnitt 5.2.15.1).

6.1 Klimapolitische Notwendigkeiten

Bezüglich des angestrebten Ausbaus der erneuerbaren Energien verweist der Klimaschutzplan 2050 auf das EEG. Im EEG 2017 wird die Höhe der Förderung für erneuerbaren Strom wettbewerblich in Ausschreibungen ermittelt, wobei nur diejenigen gefördert werden, welche die geringste Vergütung für den Betrieb der Technologie fordern.

Seitdem herrscht vor allem in der Windenergiebranche ein hoher Kostendruck, sodass Unternehmen dem deutschen Windenergiemarkt pessimistisch einschätzen und sich auf das Geschäft im Ausland fokussieren.¹⁶⁵

Zudem wird das jährliche Ausbauvolumen der erneuerbaren Energien in Folge des Gesetzes limitiert. So sollen Onshore-WKA jährlich von 2017 bis 2019 um 2800 MW sowie ab 2020 jeweils um 2.900 MW ausgebaut oder durch leistungsstärkere WKA ersetzt werden (Repowering).¹⁶⁶ PVF sollen im Jahr 2017 um 1250 MW und ab 2018 jährlich um 1350 MW ausgebaut oder repowert werden.¹⁶⁷ Diese Mengen setzen sich aus 300 MW (2017) bzw. 400 MW (ab 2018) großen PVF (über 750 kW) und 950 MW kleinen PVF (unter 750 kW) zusammen.¹⁶⁸ Durch einen jährlichen Zubau bzw. ein Repowering entsprechend dieser Vorgaben, wird bis 2050 der gesamte heutige WKA-Bestand ersetzt sowie erweitert.

¹⁶⁵ Vgl. *Bundesverband WindEnergie e.V.*, 2018.

¹⁶⁶ Vgl. *Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz*, 2017.

¹⁶⁷ Vgl. *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie*, 2015.

¹⁶⁸ Es wird angenommen, dass die insgesamt 1900 MW kleine PV-Anlagen zu Hälfte PV-Dachanlagen (950 MW) und Freiflächenanlagen (950 MW) sind.

Es resultiert daraus eine Gesamtleistung der Onshore-WKA von 98.300 MW. Gleichmaßen können PVF auf insgesamt 45.800 MW ausgebaut werden.

Dem BA-Zielszenario zufolge ist eine Installation von Onshore-WKA auf mindestens 4,15 % bis maximal 5,3 % der Landesfläche sowie von PVF auf 0,3 % bis 0,8 % bis 2050 erforderlich. In diesem Vergleich mit den politischen Zielen wird sich auf die maximale Windparkfläche (5,3 %) und damit minimale PVF-Fläche (0,3 %) bezogen, weil dabei die gesamte installierte Leistungsmenge von beiden Technologien am geringsten ist. Dies entspricht einer installierten Onshore-Windenergieleistung von 238.629 MW und einer ergänzend erforderlichen Leistung von 85.819 MW mit PVF. In der folgenden Abbildung 8 sind die Ausbaupfade der Bundesregierung dem erforderlichen Ausbau im BA-Zielszenario gegenübergestellt.

Ausgehend von der 2016 installierten Menge an Onshore-WKA und PVF ist im BA-Zielszenario ein viel stärkerer Ausbau beider Technologien notwendig, als von der Bundesregierung angestrebt ist. Dabei soll die installierte Gesamtleistung im Jahr 2030 82 % und 2050 225 % über den klimapolitischen Notwendigkeiten liegen. Das Verhältnis von 4 : 1 zwischen Onshore-WKA und PVF ähnelt sich jedoch in den beiden Ausbaupfaden.

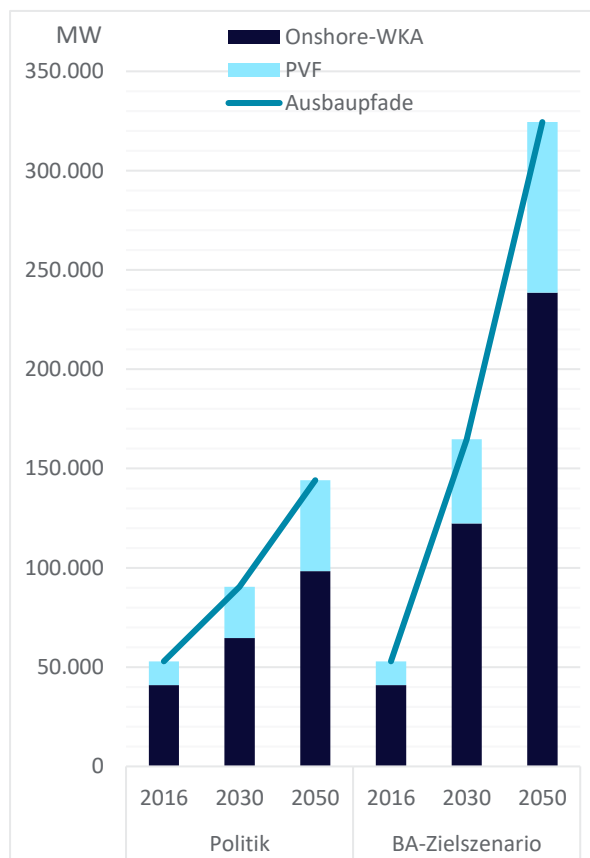


Abbildung 8: Vergleich der Ausbauziele
Quelle: Eigene Darstellung.

Für eine Energieversorgung mit 100 % erneuerbaren Energien bis 2050 sind die aktuellen klimapolitischen Ausbauziele für Onshore-WKA und PVF, trotz des maximalen Ausbaus der übrigen Energiequellen (BA-Zielszenario), somit unzureichend. Es ist jedoch zu beachten, dass die Bundesregierung bis zum Zieljahr nur auf eine Deckung des Energieverbrauchs mit 60 % erneuerbaren Energien abzielt.¹⁶⁹

6.2 Gesellschaftliche Ansichten

Neben der politischen Unterstützung sind gesellschaftliche Ansichten für die erfolgreiche Energiewende von Bedeutung. Als Ergebnis einer Umfrage zu der gesellschaftlichen Akzeptanz der Onshore-Windenergie in Deutschland aus dem letzten Jahr fordern 74 % der Befragten einen stärkeren Einsatz der Bundesregierung für die Umsetzung der Energiewende. Von 80 % wird der Ausbau der Onshore-Windenergie als wichtig oder sehr wichtig eingeschätzt.¹⁷⁰

Die Argumente gegen Onshore-WKA betreffen u.a. eine Gefährdung von Vögeln und Fledermäusen. Die Anzahl an getöteten Vögeln durch WKA von jährlich 10.000 bis 100.000 ist, im Vergleich zu über 18 Mio. an Glasscheiben, gering.¹⁷¹ Windkraftgegner klagen zudem über Zerstörungen des Landschaftsbildes, Schattenwurf und Lärm durch WKA. Letzte Aspekte können durch das Einhalten von Mindestabständen zu Wohngebäuden, Lärmrichtlinien und technische Verbesserungen der WKA reduziert werden.¹⁷²

Der Studie zufolge fühlen sich knapp die Hälfte der Befragten nicht genügend über Onshore-Windenergie informiert.¹⁷³ Da viele Argumente gegen Onshore-WKA widerlegt werden können, lässt sich die Akzeptanz vermutlich durch ausführlicheres Informieren der Gesellschaft steigern.

¹⁶⁹ Vgl. *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit*, 2016.

¹⁷⁰ Vgl. *Sondershaus, F.*, 2018.

¹⁷¹ Vgl. *Mayer, A.*, 2017 (01.05.2019).

¹⁷² Vgl. *Greenpeace*, 2017.

¹⁷³ Vgl. *Sondershaus, F.*, 2018.

Dies kann zusätzlich durch Beteiligungsmöglichkeiten an Bürgerwindparks und Flächenverpachtung für Windparks gefördert werden.¹⁷⁴

7 Schlussfolgerungen

Zunächst erfolgt eine kritische Betrachtung der angewendeten Methoden und des Inhalts der Bachelorarbeit. Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick gegeben.

7.1 Kritische Reflexion

Insgesamt wird in dieser Arbeit auf Literaturquellen mit einer hohen Aktualität, welche überwiegend aus dem Zeitraum 2015 bis 2019 stammen, zurückgegriffen. Dies ist hinsichtlich des aktuellen Themas der Energiewende unerlässlich, da in der letzten Zeit viele politische Entscheidungen getroffen wurden. Trotzdem sind in der Bachelorarbeit nur technische, politische und gesellschaftliche Aspekte berücksichtigt, sodass keine Naturschutz-, Kosten- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgt. Letztere können über diese Arbeit hinaus einbezogen werden, insbesondere die konkreten Anteile der Onshore-WKA und PVF in Deutschland festzulegen.

Das vorliegende Status-Szenario in 100prosim bezieht sich überwiegend auf die Energiesituation des Jahres 2016, wobei einigen Parametern Werte aus 2014 zugrunde liegen. Diese Inkonsistenz wird bei dem Vergleich des Energieverbrauchs im Status-Szenario und BA-Zielszenario nicht beachtet. Im Vorschlag-Szenario verändern sich die meisten Parameter im Zieljahr 2050 nicht gegenüber dem Statusjahr. Im Rahmen der Quellenüberprüfung werden Abweichungen von der Literatur festgestellt, sodass sich das Vorschlag-Szenario aus überwiegend veralteten Werten zusammensetzt. Dies wird besonders bezüglich des spezifischen Flächenbedarfs und der Volllaststunden deutlich, welche im Vorschlag-Szenario deutlich von den Ergebnissen der technischen Entwicklung der Onshore-Windenergie abweichen.

¹⁷⁴ Vgl. *Bundesverband WindEnergie e.V.*, 2019.

Darüber hinaus ist die Bedeutung einzelner Parameter unklar, wie z.B. ob der nationale oder internationale Flugverkehr gemeint ist. Ebenso ist das Simulations-Tool mit Vereinfachungen behaftet, wie z.B. die Verkehrsleistung als Parameter, wobei eine differenzierte Berücksichtigung des Modalsplits nicht vorgesehen ist. Genauso werden Kurzzeitspeicher nicht einzeln abgebildet, sondern zusammen mit den Übertragungsverlusten des Stromnetzes über einen Faktor berücksichtigt.

Mit Hilfe von 100prosim wird ein realistisches aber zielorientiertes Zukunftsszenario (BA-Zielszenario) für Deutschlands Energiesystem 2050 simuliert. Für eine weitere Untersuchung ist eine Simulation eines explorativen Trendszenarios, wobei aktuelle Entwicklungen fortgeschrieben werden, und ein Vergleich beider Ergebnisse interessant. Nichtsdestotrotz kann mit dem Simulations-Tool nur der Endzustand in einem Betrachtungsjahr aufgezeigt werden, wobei der Weg dorthin unberücksichtigt bleibt. Bezüglich jeden Parameters muss sich für einen der sehr verschiedenen Ansätze in der Literatur entschieden werden, weshalb das BA-Zielszenario nur ein mögliches Zukunftsszenario ist. Dementsprechend kann eine Untersuchung unterschiedlicher Szenarien und die Auswirkung der Veränderung bestimmter Parameter interessant sein. Zudem ist die Plausibilität der angenommenen Selbstversorgung Deutschlands in den Simulationen zu hinterfragen. Allerdings müssen für die Einbeziehung von Energieimporten und -exporten weitere Parameter wie die Energiebedarfe der Nachbarländer beachtet werden.

Über den Vergleich der politischen Ausbauziele für Onshore-WKA und PVF mit denen im BA-Zielszenario hinaus, ist eine solche Gegenüberstellung bezüglich der Erweiterung sonstiger Energiequellen, Energiespeicher und Stromnetzen relevant. Hierfür müssen zunächst die konkret erforderlichen Ausbaumaßnahmen, wie Längen und Streckenprofile von Stromtrassen, ermittelt werden, um diese mit den politischen Zielsetzungen zu vergleichen.

Grundsätzlich kann die Zukunft nicht exakt vorhergesagt werden, sodass alle Einschätzungen mit Unsicherheit behaftet sind.

Im Zeitraum bis 2050 können unvorhersehbare Ereignisse eintreten, die in dieser Bachelorarbeit nicht berücksichtigt werden. Entsprechend ist es sinnvoll diese Arbeit mit der Zeit zu aktualisieren.

7.2 Fazit

Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, den Beitrag der Onshore-Windenergie in Deutschlands Energiesystem aus 100 % erneuerbaren Energien im Jahr 2050 zu ermitteln, unter Berücksichtigung der technischen Entwicklungen dieser Energiequelle. Die Ergebnisse der dazu untersuchten Teilaspekte werden folglich zusammengefasst.

In Folge von Effizienzsteigerungen kann Deutschlands Energieverbrauch im Jahr 2050 um 41,84 % reduziert werden gegenüber 2016. Ausschlaggebend hierfür ist eine umfassende Gebäudesanierung sowie die Vermeidung, Verlagerung und Verbesserung des Verkehrs, wodurch der Energieverbrauch für Gebäudewärme und im Verkehr auf 41,44 % und 43,5 % gesenkt werden kann. In den Sektoren Prozesswärme und KLIK steht den Effizienzsteigerungen das zukünftige Wirtschaftswachstum entgegen, weshalb nur eine vergleichsweise geringe Verbrauchsminderung auf 84,6 % und 90,75 % möglich ist. Durch eine weitestgehende Elektrifizierung des Verkehrs und die ausschließliche Nutzung von Solarthermie, Umweltwärme und Tiefengeothermie als Gebäudewärme, sollen die Brennstoffe in diesen Bereichen fast vollständig substituiert werden. Stattdessen können diese zusammen mit Strom für Prozesswärme und geringfügig als Kraftstoff eingesetzt werden. Insgesamt sinkt der Brenn- und Kraftstoffbedarf bis 2050 auf 18,43 % gegenüber 2016 und es werden 48,37 % mehr Wärme sowie 63,08 % mehr Strom benötigt.

Um Deutschlands Energiebedarf 2050 mit 100 % erneuerbaren Energien zu decken, müssen neben Energiespeichern und intelligenten Stromnetzen vor allem erneuerbare Energiequellen technisch verbessert und ausgebaut werden. Dabei sollen auf den begrenzten Ackerflächen vor allem Energiepflanzen für Biogas und zum Teil Biodiesel angebaut werden, zur Erzeugung von Kraftstoffen für nicht elektrifizierbare Verkehrsbereiche, wie der Flugverkehr.

Ebenso erscheint die zukünftige Verwendung von bisher kaum energetisch genutztem Stroh und organischen Abfällen sinnvoll. Die größte Niedertemperaturwärmemenge soll aus Umgebungswärme mittels Wärmepumpen als zukünftige Schlüsseltechnologie bereitgestellt werden. Halb so viel Wärme kann durch den Ausbau von Solarthermie auf 5 % der geeigneten Dachflächen und ein kleiner Anteil durch geringe Potentiale der Tiefengeothermie produziert werden. Weil die weitestgehend erschlossenen Potentiale der Wasserkraft keine große Steigerung der produzierten Strommenge zulassen, sollen die restlichen geeigneten Dachflächen sowie die Potentiale in Nord- und Ostsee vollständig für die Solarstromerzeugung genutzt werden. Trotz des maximalen Ausbaus dieser erneuerbaren Energiequellen kann Deutschlands zukünftiger Energiebedarf nicht vollständig gedeckt werden. Dementsprechend müssen Verbrauchssektoren gekoppelt und die übrigen Strom-, Wärme-, Brenn- und Kraftstoffmengen durch Onshore-Windenergie und PVF erzeugt werden.

Onshore-Windenergie wird zukünftig die Hauptrolle in der Energieversorgung übernehmen und den insgesamt größten Beitrag zu dieser leisten sowie am stärksten ausgebaut werden, im Vergleich mit allen Energiequellen. In Folge von technischen Entwicklungen sind WKA mit durchschnittlichen Nennleistungen von je 5,5 MW zu erwarten, die jährlich 2870 Volllaststunden in Deutschland erreichen. Resultierend aus dem spezifischen Flächenbedarf von 7,94 ha/MW wird erst durch den Ausbau von Onshore-WKA auf 4,15 % (187.028 MW) bis 5,3 % (238.629 MW) der Landesfläche die Energiewende zu einem Energiesystem mit 100 % erneuerbaren Energien bis 2050 ermöglicht. Dabei werden nur 1 % der Fläche vollständig von WKA beansprucht. Insgesamt muss der aktuelle WKA-Bestand repowert und zudem mindestens verdoppelt werden. Weil ohne den Ausbau die Energiewende nicht gelingt, sollen Unternehmen, wie die GE Wind Energie GmbH, sich nicht vollständig zu ausländischen Märkten umorientieren. Hingegen bietet Deutschlands Windenergiemarkt große Potentiale, gegensätzlich zu den Erwartungen der Windenergiebranche.

Während aktuell die klimapolitischen Ausbauziele für die Onshore-Windenergie im EEG weit unter den Notwendigkeiten liegen, ist die gesellschaftliche Akzeptanz der Technologie überwiegend vorhanden und kann durch ausführlichere Informationen gesteigert werden.

7.3 Ausblick

Als bedeutendste Maßnahmen der Energiewende werden die Elektrifizierung der Verkehrsträger, die Gebäudesanierung und die Schlüsselfunktion von Wärmepumpen für die Gebäudewärmeversorgung, die durch Wasserelektrolyse mögliche Energiespeicherung und Sektorkopplung sowie die Hauptrollen von Onshore-Wind- und Solarenergie in der Energieversorgung, immer wieder in Forschungsberichten bestätigt. Gleichzeitig stellt die Umsetzung dieser Aspekte große Herausforderungen dar, weil hohe Kosten und Aufwand damit verbunden sind. Dies gilt aber auch für die notwendigen Effizienzsteigerungen und Verminderung des Brennstoffeinsatzes sowie den Ausbau intelligenter Stromnetze.

Nichtsdestotrotz geht aus aktuellen Forschungen der Klimawissenschaftler die Notwendigkeit der vollständigen Umstellung von Deutschlands Energiesystem schon vor dem Jahr 2050 hervor.¹⁷⁵ Dabei bleibt offen, bis zu welchem Jahr diese erfolgen soll und kann. In jedem Fall sind politische und gesellschaftliche Unterstützung unerlässlich, um bis 2050 oder früher in Deutschland ein Energiesystem mit 100 % erneuerbaren Energien zu erreichen.

¹⁷⁵ Vgl. *Rahmstorf, S., 2019.*

Literaturverzeichnis

Beck, Hans-Peter/Haaren, Christina von; Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (Hrsg.): Szenarien zur Energieversorgung in Niedersachsen im Jahr 2050, 2016, <http://www.umwelt.niedersachsen.de/download/106468/SzenarienzurEnergieversorgunginNiedersachsenimJahr2050-Gutachten-April2016.pdf>.

Bormann, Susanne; Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): Wärmenetzsysteme 4.0: Kurzstudie zur Umsetzung der Maßnahme „Modellvorhaben erneuerbare Energien in hocheffizienten Niedertemperaturwärmenetzen“, 2017, <https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/W%C3%A4rmenetze-4.0-Endbericht-final.pdf>.

Brandt, Mathias: Homeoffice in Deutschland, 2017, <https://de.statista.com/infografik/9161/verbreitung-von-home-office-in-deutschland/>.

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.

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.

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: 2019-05-02).

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: 2019-04-08).

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.

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=26://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/sechster-monitoring-bericht-zur-energiewende.pdf?__blob=publicationFile&v=26.

- Bundesnetzagentur* (Hrsg.): Bericht über die Flächeninanspruchnahme für Freiflächenanlagen, 2016, https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/PV-Freiflaechenanlagen/Bericht_Flaecheninanspruchnahme_2016.pdf?__blob=publicationFile&v=2.
- Bundesverband Geothermie* (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.
- Bundesverband Solarwirtschaft e. V.* (Hrsg.): Statistische Zahlen der deutschen Solarstrombranche (Photovoltaik), 2018, https://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/user_upload/bsw_faktenblatt_pv_4018_4.pdf.
- Bundesverband WindEnergie e. V.*: Jahrbuch Windenergie 2018: BWE Marktübersicht, Berlin, 2018.
- Bundesverband WindEnergie e. V.* (Hrsg.): Wind bewegt, 2019, https://www.windenergie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/01-mensch-und-umwelt/01-windkraft-vor-ort/190225_BWE_Argumentarium_Wind_bewegt_web.pdf.
- Burger, Bruno; Fraunhofer ISE* (Hrsg.): Stromerzeugung in Deutschland im Jahr 2017, 2018, https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/daten-zu-erneuerbaren-energien/Stromerzeugung_2017.pdf.
- Bürger, Veit/Hesse, Tilman*: Klimaneutraler Gebäudebestand 2050: Energieeffizienzpotenziale und die Auswirkungen des Klimawandels auf den Gebäudebestand, 2017, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_06_2016_klimaneutraler_gebaeudebestand_2050.pdf.
- Chargemap* (Hrsg.): Anzahl der Ladestationen in Deutschland, 2019, <https://de.chargemap.com/about/stats/deutschland> (Zugriff: 2019-04-19).
- Clean Energy Partnership* (Hrsg.): Wasserstoff bewegt, 2019, https://cleanenergypartnership.de/fileadmin/Assets/06_h2-mediathek/_pdf-download/CEP_Imagebroschuere_2015.pdf.
- Deschermeier, Philipp/Henger, Ralph*: 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.
- Deutsche Energie-Agentur GmbH*: Power to X Technologien, 2018, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/607/9264_Power_to_X_Technologien.pdf.
- Deutsche WindGuard GmbH*: Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland, 2018, https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/pressemitteilungen/2019/20190129_Factsheet_Status_des_Windenergieausbaus-Jahr_2018.pdf.

- Dingeldey, Miriam/Hertle, Hans; Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH* (Hrsg.): Potenzialstudie für ein integriertes Klimaschutzkonzept, 2012, https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/BGSA_Endversion_Mai2012-1.pdf.
- Durstewitz, Michael/Behem, Guillaume; Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik* (Hrsg.): Windenergie Report Deutschland 2017, 2018, http://windmonitor.iese.fraunhofer.de/opencms/export/sites/windmonitor/img/Windmonitor-2017/WERD_2017_180523_Web_96ppi.pdf.
- Edel, Matthias/Kühnel Christine*: Studie: Rolle und Beitrag von Biomethan im Klimaschutz heute und in 2050, 2017, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9218_Analyse_Rolle_Beitrag_Biomethan_Klimaschutz_2050.pdf.
- Elsner, Peter/Fischedick, Manfred* (Hrsg.): Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050: Technologien - Szenarien - Systemzusammenhänge, acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V., München, 2015.
- European Commission: Directorate-General for Research and Innovation*: Final Report of the High-Level Panel of the European Decarbonisation, 2018.
- Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e. V.* (Hrsg.): Basisdaten Bioenergie Deutschland 2018, 2018, http://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Basisdaten_Bioenergie_2018.pdf.
- Fraunhofer ISE*: 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>.
- Freund, Robert*: Kurzbericht Speicherung in Deutschland: Aktueller Stand im Themenfeld Energiespeicherung in Deutschland, Entwicklung neu initiiertes Aktivitäten, 2017, <https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/energie/pdf/energiespeicherung-deutschland.pdf>.
- Fuchs, Johann/Kubis, Alexander*: Zuwanderungsbedarf und Arbeitskräfteangebot bis 2050: Wie viele Zuwanderer benötigt Deutschland für ein konstantes Erwerbsspersonspotential?, 2016, https://www.destatis.de/DE/Methoden/WISTA-Wirtschaft-und-Statistik/2016/07_Sonderheft/zuwanderungsbedarf-bis-2050-072016.pdf?__blob=publicationFile&v=3.
- GE Wind Energy GmbH* (Hrsg.): GE's 3 MW Platform, 2017, https://www.ge.com/content/dam/gepower-renewables/global/en_US/downloads/brochures/wind-onshore-3mw-wind-turbine-platform-gea32208b-r1.pdf.
- GE Wind Energy GmbH*: Über uns, 2019, <https://www.gerewableenergy.com/de/unternehmen/uber-uns> (Zugriff: 2019-04-04).
- 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.

- 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/Klimapfade_fuer_Deutschland_BDI-Studie_/Klimapfade-fuer-Deutschland-BDI-Studie-12-01-2018.pdf.
- Greenpeace* (Hrsg.): Windkraft und Anwohnerschutz, 2017, https://aachen-hat-energie.de/aktuelles/greenpeace_flyer.pdf.
- 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.
- Günther, Matthias*: Energieeffizienz durch Erneuerbare Energien: Möglichkeiten, Potenziale, Systeme, Springer-Verlag, 2015.
- H2 Live*: Wasserstoff Tankstellen in Deutschland & Europa, 2019, <https://h2.live/> (Zugriff: 2019-04-19).
- Heier, Siegfried*: Windkraftanlagen: Systemauslegung, Netzintegration und Regelung, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2009.
- Hermes, Johannes*: Optimierte Simulation von Landnutzungsänderungen im Kontext eines vermehrten Biomasseanbaus, 2014, http://www.alr-hochschulpreis.de/2014_Wettbewerbsbeitrag_Hermes.pdf.
- 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/oeko-doc/2595/2016-603-de.pdf>.
- Hesse, Tilman/Koch, Matthias*: Rolle Bioenergie im Strom Wärmemarkt bis 2050, 2018, https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB114_Bericht_Bio-Strom-W%C3%A4rme.pdf.
- Hoffmann, Clemens; Fraunhofer IEE* (Hrsg.): Barometer der Energiewende: Endenergiebedarf 2050, 2019, https://www.herkulesprojekt.de/de/Barometer/barometer_2019/endenergiebedarf2050.html.
- Hülken, 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.
- Kalusche, Dietmar*: Ökologie in Zahlen: Eine Datensammlung in Tabellen mit über 10.000 Einzelwerten, Berlin, 2016.
- 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.

- Klaus, Thomas/Vollmer, Carla*: Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen, 2010, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/energieziel_2050.pdf.
- Klein, Sebastian; Enervis energy advisors GmbH* (Hrsg.): Erneuerbare Gase: ein Systemupdate der Energiewende, 2017, https://erdgasspeicher.de/files/20171212_studie_erneuerbare_gase.pdf.
- Knorr, Kaspar/Horst, Daniel; Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik* (Hrsg.): Energiewirtschaftliche Bedeutung der Offshore-Windenergie für die Energiewende: Update 2017, 2017, https://www.offshore-stiftung.de/sites/offshorelink.de/files/documents/Studie_Energiewirtschaftliche%20Bedeutung%20Offshore%20Wind.pdf.
- 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.
- Kost, Christoph/Shammugam, Shivenes; Fraunhofer ISE* (Hrsg.): Stromentstehungskosten: Erneuerbare Energien, 2018, https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2018_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf.
- Kühne, Olaf/Weber, Florian*: Bausteine der Energiewende, Springer-Verlag, 2018.
- Kunz, Claudia/Kirrmann, Sven; Agentur für Erneuerbare Energien e. V.* (Hrsg.): Die neue Stromwelt: Szenario eines 100% erneuerbaren Stromversorgungssystem, 2015, https://www.unendlich-viel-energie.de/media/file/390.AEE_Neue_Stromwelt_mrz15_Final.pdf.
- 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.
- Lazar, Silvia; Bundesverband Boden e. V.* (Hrsg.): Boden und Windenergie, 2019, <https://www.bodenwelten.de/content/boden-und-windenergie> (Zugriff: 2019-04-28).
- Lütkehus, Insa/Salecker, Hanno; Umweltbundesamt* (Hrsg.): Potenzial der Windenergie an Land, 2013, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/potenzial_der_windenergie.pdf.
- 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.
- Mayer, Axel*: Vogeltod: Nicht nur Windräder, 2017, <http://www.klimaretter.info/meinungen/standpunkte/23367-vogeltod-nicht-nur-windraeder> (Zugriff: 2019-05-01).

- 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>.
- Purr, Katja/Osiek, Dirk; Umweltbundesamt* (Hrsg.): Integration von Power to Gas/Power to Liquid in den laufenden Transformationsprozess, 2016, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/position_power_to_gas-power_to_liquid_web.pdf.
- Quaschnig, Volker*: Sektorkopplung durch die Energiewende: Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zum Erreichen der Pariser Klimaziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung, 2016, <https://pv-speicher.htw-berlin.de/wp-content/uploads/2016/05/HTW-2016-Sektorkopplungsstudie.pdf>.
- Quentin, Jürgen/Thomsen, Jannik; Fachagentur Windenergie an Land* (Hrsg.): Überblick Windenergie an Land: Anlagenhöhen, Flächenbedarf, Turbinenanzahl, 2019, https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/Faktenpapiere/FA_Wind_Hoehenbegrenzungen_Wind-an-Land_03-2019.pdf.
- Rahmstorf, Stefan*: Wie viel Kohlendioxid bleibt Deutschland noch?, 2019, <https://www.spektrum.de/kolumne/wie-viel-kohlendioxid-bleibt-deutschland-noch/1636218>.
- Ram, Manish/Fell, Hans-Josef; LUT University/Energy Watch Group* (Hrsg.): Global Energy System based on 100% Renewable Energy: Energy Transition in Europe Across Power, Heat, Transport and Desalination Sectors, 2018, http://energywatchgroup.org/wp-content/uploads/2018/12/EWG-LUT_Full-Study_Energy-Transition-Europe.pdf.
- Repenning, Julia/Braungardt, Sibylle; Öko-Institut e.V./ Fraunhofer ISI* (Hrsg.): Klimaschutzszenario 2050: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2015, <https://www.oeko.de/oeko-doc/2451/2015-608-de.pdf>.
- 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.
- Schicketanz, Sven; Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur* (Hrsg.): Räumlich differenzierte Flächenpotentiale für erneuerbare Energien in Deutschland, 2015, https://www.bbr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/ministerien/BMVI/BMVIOnline/2015/DL_BMVI_Online_08_15.pdf?__blob=publicationFile&v=2.
- Schmidt-Curreli, Janine/Knebel, Alexander; Agentur für Erneuerbare Energien e.V.* (Hrsg.): Energiewendeatlas: Deutschland 2030, 2016, https://www.unendlich-viel-energie.de/media/file/971.EWAtlas2017_Mai17_web.pdf.

- Schmidt-Kanefendt, Hans-Heinrich*: 100prosim - Methodik, 2018, <http://www.wattweg.net/media/files/100prosim-Methodik140824-01.pdf>.
- Schmidt-Kanefendt, Hans-Heinrich*: 100prosim - Simulator-Software, 2019, <http://www.wattweg.net/simulation.html> (Zugriff: 2019-04-02).
- Sondershaus, Frank; Fachagentur Windenergie an Land (Hrsg.)*: Umfrage zur Akzeptanz der Windenergie an Land Herbst 2018, 2018, https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/FA_Wind_Umfrageergebnisse_Herbst_2018.pdf.
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.)*: Entwicklung der Altersstruktur in Deutschland von 1950 bis 2010 und Prognose bis 2060, 2015, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/543299/umfrage/entwicklung-und-prognose-der-altersstruktur-in-deutschland/> (Zugriff: 2019-04-09).
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.)*: Bruttoinlandsproduktsberechnung: Erste Jahresergebnisse, 2018, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/36153/umfrage/anteil-des-dienstleistungssektors-an-der-gesamten-bruttowertschoepfung/> (Zugriff: 2019-04-09).
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.)*: Bevölkerungsvorausberechnung, 2019, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsvorausberechnung/Tabellen/2015-2a-altersgruppen-bis2060.html> (Zugriff: 2019-04-08).
- Statistisches Bundesamt*: Durchschnittliche Wohnfläche pro Person, 2019, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Tabellen/haushaltsstruktur-deutschland-wohnflaeche-vorlage.html> (Zugriff: 2019-04-07).
- Teske, Sven/Sawyer, Steve; Greenpeace (Hrsg.)*: Energy Revolution: 100% renewable energy for all, 2015, <https://www.greenpeace.org/archive-international/Global/international/publications/climate/2015/Energy-Revolution-2015-Full.pdf>.
- Umweltbundesamt*: Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050, 2016, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/texte_56_2016_klimaschutzbeitrag_des_verkehrs_2050_getagged.pdf.
- United Nations (Hrsg.)*: World Population Prospects: 2017 Revision, 2017, <https://www.compassion.com/multimedia/world-population-prospects.pdf>.
- 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.
- Walter, Anna/Wiehe, Julia*: Naturverträgliche Energieversorgung aus 100 % erneuerbaren Energien 2050, 2018.
- Weyres-Borchert, Bernhard; Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e. V (Hrsg.)*: Ratgeber-Photovoltaik, 2018, <https://www.solaranlage-ratgeber.de/wp-content/uploads/ratgeber-photovoltaik.pdf>.

Anlage 1: Eingaben in WindPro

Standortspezifisch		Daten stammen aus dem Windgutachten für den jeweiligen Standort				
Windpark		Süden (WP2)		Norden (WP1)		
Durchschnittliche Windgeschwindigkeit	[m/s]	7,50		6,00		
Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen, -geschwindigkeiten, -frequenzen		Weibull-Verteilung und weitere Daten im Windgutachten				
Oberflächenrauheit		1,90		2,30		
Anlagenspezifisch						
WKA-Anzahl	[St.]	25				
Anordnung		5 x 5				
Abstände	[m/s]	5 x Rotordurchmesser in Hauptwindrichtung 3,5 x Rotordurchmesser in Nebenwindrichtung				
WKA-Produkttypen		5.5-158		3.6-137	2.75-120	1.5-77
Nennleistung	[MW]	5,5		3,6	2,75	1,5
Rotordurchmesser	[m]	158		137	120	77
Nabenhöhe	[m]	161		164,5	139	100
Durchschnittliche Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe	[m/s]	5,9	7,4	7,5	7,1	6,4
Leistungskurven		5.5-158 NO Med TI Power_Curve-NO_5.3-158-xxHz_106dB_Thrust665_Eng-Rev03_EN_r02		Level 0 - Calculated - NO Medium TI - 11-2016 Power_Curve-NO_3.6-DFIG-137-xxHz_3MW_Eng-b0_EN_r02	Level 0 - Calculated - Normal operation - 2014 2.xDF- 120_xxHz_P CD_allComp _NRO_IEC.E Nxxx.00.docx	Man. 01- 2000
Luftdichte in Nabenhöhe	[kg/m³]	1,183	1,232	1,232	1,235	1,24
Wake Model		N.O. Jensen (EMD) : 2005				

Tabelle 10: Eingaben in WindPro

Quelle: Eigene Darstellung.

Anlage 2: Wertetabellen

Quellen	Energie- verbrauch [GWh]
Walter, A/Wiehe, J.	1.864.040
Hoffmann, C.	1.850.000
Nitsch, J.	1.758.333
Walter, A/Wiehe, J.	1.630.605
Gerbert, P./Herhold, P.	1.617.000
Günther, J./Lehmann, H.	1.608.000
Walter, A/Wiehe, J.	1.595.660
Repenning, J./Braungardt, S.	1.507.500
Schlesinger, M./Hofer, P.	1.484.722
Walter, A/Wiehe, J.	1.362.230
Nitsch, J.	1.316.667
Repenning, J./Braungardt, S.	1.210.833
Mittelwert	1.567.133
BA-Zielszenario	1.515.808

Tabella 11: Daten zu Abbildung 1
Quelle: Eigene Darstellung.

Verbrauchs- sektor	Jahr	Strom	Wärme	Brenn- u. Kraftstoffe	Summe
		[GWh]	[GWh]	[GWh]	[GWh]
KLIK	2016	385.953	0	0	385.953
	2050	350.255	0	0	350.255
Gebäude- wärme	2016	40.480	151.463	702.891	894.835
	2050	55.203	311.246	4.392	370.841
Prozess- wärme	2016	86.687	58.311	385.834	530.832
	2050	247.379	0	201.690	449.069
Mobilität	2016	14.245	0	780.410	794.655
	2050	207.199	0	138.444	345.643
Summe	2016	141.413	209.775	1.869.135	2.606.275
	2050	860.036	311.246	344.526	1.515.808

Tabella 12: Daten zu Abbildung 2 und Abbildung 3
Quelle: Eigene Darstellung.

Energiequellen	Jahr	Strom	Wärme	Brenn- u. Kraftstoffe	Summe
		[GWh]	[GWh]	[GWh]	[GWh]
PV-Dachflächen	2016	25.616	0	0	25.616
	2050	465.985	0	0	465.985
Offshore- Windenergie	2016	10.918	0	0	10.918
	2050	265.620	0	0	265.620
Wasserkraft	2016	20.219	0	0	20.219
	2050	20.986	0	0	20.986
Umgebungs- wärme	2016	0	7.658	0	7.658
	2050	0	173.999	0	173.999
Solarthermie	2016	0	7.800	0	7.800
	2050	0	73.330	0	73.330
Tiefen- geothermie	2016	162	0	0	162
	2050	840	14.280	0	15.120
Feste biogene Brennstoffe	2016	0	0	148.842	148.842
	2050	0	0	183.001	183.001
Gasförmige bio- gene Brennstoffe	2016	0	0	94.571	94.571
	2050	0	0	101.710	101.710
Flüssige biogene Brennstoffe	2016	0	0	32.157	32.157
	2050	0	0	4.303	4.303
Summe	2016	137.907	15.458	275.570	428.934
	2050	1.508.533	261.609	289.014	2.059.156

Tabelle 13: Daten zu Abbildung 5
Quelle: Eigene Darstellung.

	Strom	Wärme	Brenn- u. Kraftstoffe	Summe
	[GWh]	[GWh]	[GWh]	[GWh]
Erzeugung	1.508.533	261.609	289.014	2.059.156
Verbrauch	860.036	311.246	344.526	1.515.808
Erzeugung - Verbrauch	648.498	-49.637	-55.513	543.348

Tabelle 14: Daten zu Abbildung 7
Quelle: Eigene Darstellung.

	Jahr	Onshore- WKA	PVF	Summe
		[GWh]	[GWh]	[GWh]
Politik	2016	40.989	11.936	52.925
	2030	64.588	25.880	90.468
	2050	98.300	45.800	144.100
BA- Zielszenario	2016	40.989	11.936	52.925
	2030	122.370	42.358	164.728
	2050	238.629	85.819	324.448

Tabelle 15: Daten zu Abbildung 8
Quelle: Eigene Darstellung.

PV-Freiflächen		Onshore-WKA		Gesamtleistung
[%]	[MW]	[%]	[MW]	[MW]
0,00	0	6,05	272.623	272.623
0,10	28.606	5,79	260.940	289.546
0,20	57.213	5,54	249.596	306.808
0,30	85.819	5,30	238.629	324.448
0,40	114.425	5,06	227.883	342.309
0,50	143.032	4,83	217.358	360.389
0,60	171.638	4,60	207.042	378.681
0,70	200.245	4,37	196.963	397.208
0,80	228.851	4,15	187.028	415.879
0,90	257.457	3,94	177.342	434.800
1,00	286.064	3,73	167.952	454.015
1,10	314.670	3,52	158.733	473.403
1,20	343.276	3,32	149.680	492.957
1,30	371.883	3,13	140.743	512.626
1,40	400.489	2,93	131.982	532.471
1,50	429.096	2,74	123.378	552.474
1,60	457.702	2,56	115.141	572.843
1,70	486.308	2,38	107.135	593.444
1,80	514.915	2,21	99.341	614.255
1,90	543.521	2,04	91.663	635.184
2,00	572.127	1,87	84.130	656.258
2,10	600.734	1,70	76.715	677.449
2,20	629.340	1,54	69.459	698.799
2,30	657.947	1,38	62.345	720.291
2,40	686.553	1,23	55.276	741.829
2,50	715.159	1,07	48.313	763.472
2,60	743.766	0,92	41.578	785.343
2,70	772.372	0,78	35.032	807.404
2,80	800.978	0,64	28.670	829.649
2,90	829.585	0,50	22.425	852.009
3,00	858.191	0,36	16.321	874.513
3,10	886.797	0,23	10.392	897.189
3,20	915.404	0,10	4.663	920.067
3,28	939.269	0,00	0	939.269

Tabelle 16: Daten zu Abbildung 6
Quelle: Eigene Darstellung.

Anlage 3: Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit

Die Rolle der Onshore-Windenergie in Deutschlands Energiesystem der Zukunft mit 100 % erneuerbaren Energien

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.

Lingen, 22.05.2019

Ort, Datum

A. Bergmüller

Unterschrift