

---

# **BACHELORARBEIT**

---

Herr  
**Maximilian Merczel**

## **Windenergieanlagen – Chancen, Notwendigkeit und Umweltbelastung**

Mittweida, 2021



Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen

---

## **BACHELORARBEIT**

---

# **Windenergieanlagen – Chancen, Notwendigkeit und Umweltbelastung**

Autor:

**Herr**

**Maximilian Merczel**

Studiengang:

**Immobilien und Facilities Management**

Seminargruppe:

**FM17w1-B**

Erstprüfer:

**Prof. Dr.-Ing. Jörg Mehlis**

Zweitprüfer:

**Prof. Dr. Dipl.-Ing. Jan Schaaf**

Einreichung:

**Mittweida, 15. Januar 2021**

Verteidigung/Bewertung:

**Mittweida, 2021**



Faculty Industrial Engineering

---

# **BACHELORTHESIS**

---

## **Wind turbines – opportunities, necessity and environmental pollution**

author:

**Mr.**

**Maximilian Merczel**

course of studies:

**Real Estate and Facilities Management**

seminar group:

**FM17w1-B**

first examiner:

**Prof. Dr.-Ing. Jörg Mehlis**

second examiner:

**Prof. Dr. Dipl.-Ing. Jan Schaaf**

submission:

**Mittweida, 15. January 2021**

defence/ evaluation:

**Mittweida, 2021**



## **Bibliografische Beschreibung:**

Merczel, Maximilian:

Windenergieanlagen – Chancen, Notwendigkeit und Umweltbelastung -  
2020 – Seitenzahl Verzeichnisse 15, Seitenzahl des Inhalts 71, Seitenzahl der  
Anhänge 0

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen,  
Bachelorarbeit, 2021

## **Referat:**

Hintergrund dieser Arbeit ist die Untersuchung der Realisierbarkeit von Windenergie als autarke Energiegewinnungsform für Deutschland. Hierbei werden die Aspekte des gesetzlichen Rahmens berücksichtigt und die flächenbezogene Umsetzbarkeit betrachtet. Es findet eine Skalierung auf die gesamte Fläche Deutschlands statt unter Berücksichtigung verschiedener Einflüsse und Determinanten, welche unabdingbar sind. Des Weiteren legt diese Facharbeit den Schwerpunkt auf die Ermittlung der von den Windenergieanlagen ausgehenden Umweltbelastungen. Es werden die den Anlagen direkt zuzuordnenden Treibhausgase und weitere Arten der Belastung aufgeführt und untersucht. Ergebnis dieser Arbeit ist die Auswertung aller ermittelten Komponenten in Bezug auf die Untersuchung und Machbarkeit sowie den Belastungen von Windenergie.





# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 Vorbemerkungen</b> .....	<b>12</b>
<b>2 Grundlagen</b> .....	<b>14</b>
2.1 <i>Die Definition von Nachhaltigkeit</i> .....	14
2.2 <i>Historische Entwicklung des anthropogenen Klimawandels</i> .....	15
<b>3 Entstehung eines verbindlichen Rahmens</b> .....	<b>18</b>
3.1 <i>Klimakonzeption für Deutschland</i> .....	18
3.2 <i>Das Bundesklimaschutzgesetz</i> .....	20
3.3 <i>Die Vorreiter des Gebäude-Energie-Gesetzes</i> .....	21
<b>4 Strommarkt Deutschland</b> .....	<b>24</b>
4.1 <i>Stromerzeugung - Energiegewinnungsquellen</i> .....	24
4.1.1 Fossile Energiegewinnung .....	27
4.1.2 Erneuerbare Energiegewinnung .....	30
4.2 <i>Strombedarf in Deutschland</i> .....	34
<b>5 Potenzial Windenergieanlage</b> .....	<b>38</b>
5.1 <i>Lebenszyklus</i> .....	38
5.2 <i>Flächenanalyse</i> .....	42
5.2.1 Witterungsbedingte Determinanten .....	42
5.2.1.1 Wind .....	42
5.2.1.2 Windhöufigkeit .....	43
5.2.1.3 Hangneigung .....	45
5.2.1.4 Bodenrauigkeit .....	45
5.2.2 Flächenbedingte Determinanten .....	45
5.2.2.1 Regional- und Raumordnungsplanung .....	45
5.2.2.2 Natur- und andere Schutzgebiete .....	47

---

5.2.2.3	Tatsächliche Flächennutzung.....	48
5.2.2.4	Aktueller Bestand.....	49
5.3	<i>Umweltbedingte Analyse</i> .....	51
5.3.1	Belastung des Klimas.....	51
5.3.2	Belastung von Natur und Umwelt.....	52
5.3.3	Belastungen für Menschen .....	54
5.4	<i>Bauarten einer WEA</i> .....	56
5.4.1	Dreiblattrotor-Windenergieanlage .....	58
5.4.1.1	Fundament.....	59
5.4.1.2	Turm .....	60
5.4.1.3	Gondel .....	62
5.4.1.4	Rotorblätter .....	64
5.4.2	Emissionen bei der Errichtung .....	65
5.4.2.1	Materialwirtschaft.....	65
5.4.2.2	Emissionen durch Transportwege .....	70
<b>6</b>	<b>Auswertung</b> .....	<b>74</b>
6.1	<i>Auswertung der Umweltbelastung</i> .....	74
6.2	<i>Flächen- und energiebedingte Auswertung</i> .....	77
<b>7</b>	<b>Fazit</b> .....	<b>82</b>
<b>8</b>	<b>Literatur- und Quellenverzeichnis</b> .....	<b>84</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Anteil Erneuerbarer Energien .....	23
Abbildung 2 Kraftwerke und Verbundnetze in Deutschland .....	25
Abbildung 3 Klassifizierung der Energieträger .....	26
Abbildung 4 Installierte Leistung pro Bundesland   Gebiet.....	32
Abbildung 5 Entwicklung der Bruttostromerzeugung und des Bruttostromverbrauchs .....	36
Abbildung 6 Lebenszyklus einer WEA.....	39
Abbildung 7 Windgeschwindigkeiten in Deutschland .....	44
Abbildung 8 Planungshierarchie der Raumordnung in Deutschland .....	46
Abbildung 9 Rotoren mit vertikaler Drehachse.....	57
Abbildung 10 DBR-Windenergieanlage .....	58
Abbildung 11 Fundament mit Schalung und Bewehrung einer WEA .....	59
Abbildung 12 Aufstellung eines Hybridturms einer WEA .....	62
Abbildung 13 Aufbau einer WEA .....	63
Abbildung 14 Materialwirtschaft für ein Windkraftrad .....	66
Abbildung 15 Power to X Umwandlung und Nutzungsmöglichkeiten .....	80

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Zulässige Jahresemissionen nach Sektor.....	20
Tabelle 2 Umweltbundesamt - lärminduzierte Abstandswerte .....	48
Tabelle 3 Lärmpegel nach TA Lärm für WEA.....	55
Tabelle 4 Materialaufwand je Baugruppe in kg.....	66
Tabelle 5 Auswertung der Materialwirtschaft.....	74
Tabelle 6 Auswertung der Logistik .....	74
Tabelle 7 Kombinierte Auswertung .....	74
Tabelle 8 CO <sub>2</sub> -Intensitäten verschiedener Kraftwerksarten .....	76

## Abkürzungsverzeichnis

<b>BauGB</b>	Baugesetzbuch
<b>BauVO</b>	Bauverordnung
<b>BHKW</b>	Blockheizkraftwerk
<b>BImSchG</b>	Bundesimmissionsschutzgesetz
<b>CFK</b>	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
<b>CH<sub>4</sub></b>	Methan
<b>CO<sub>2</sub></b>	Kohlenstoffdioxid
<b>CO<sub>2</sub>e</b>	CO <sub>2</sub> -Äquivalent
<b>COP21</b>	Pariser Abkommen
<b>DBR</b>	Dreiblattrotor (-Windenergieanlage)
<b>EEG</b>	Erneuerbare-Energien-Gesetz
<b>EG</b>	Eignungsgebiete
<b>EnEG</b>	Energieeinsparungsgesetz
<b>EnEV</b>	Energieeinsparverordnung
<b>EEWärmeG</b>	Erneuerbare-Energien-WärmeGesetz
<b>GEG</b>	Gebäude-Energie-Gesetz
<b>GFK</b>	Glasfaserverstärkter Kunststoff
<b>H-FKW/FKW</b>	halogenierte Fluorkohlenwasserstoffe
<b>ICT</b>	Institut für chemische Technologie
<b>IPBES</b>	Weltbiodiversitätsrat
<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change
<b>KSG</b>	Bundesklimaschutzgesetz
<b>LAG VSW</b>	Länderarbeitsgemeinschaften der Vogelschutzwarten
<b>N<sub>2</sub>O</b>	Lachgas (Distickstoffmonoxid)
<b>ROG</b>	Raumordnungsgesetz

<b>SF<sub>6</sub></b>	Schwefelhexafluorid
<b>TA Lärm</b>	Technische Anleitung Lärm
<b>UNEP</b>	Umweltprogramm der Vereinten Nationen
<b>VBG</b>	Vorbehaltsgebiete
<b>VRG</b>	Vorranggebiete
<b>WEA</b>	Windenergieanlage
<b>WMO</b>	Weltorganisation für Meteorologie



# 1 Vorbemerkungen

Diese Thesis wird im Rahmen des Bachelor of Engineering im Bereich Immobilien- und Facilities Management angefertigt. Schwerpunkt des Themas wird die Untersuchung der Realisierbarkeit sein, dass die Windenergie Deutschland autark mit elektrischer Energie versorgen kann. Zentrale Fragestellung wird hierbei folgende sein: „Kann Windenergie den Energiebedarf Deutschlands autark bedienen und wie umweltbelastend wirken sich diese Anlagen dabei ganzheitlich aus?“ Windenergieanlagen rücken in Deutschland immer mehr in den Mittelpunkt der Energiewende. Deshalb stellen diese Anlagen eine wichtige Komponente für die energetische Zukunft dar. Der Fokus in dieser Facharbeit wird auf die Determinanten des Flächenpotenzials und den durch die Energiegewinnung verursachten anthropogenen Treibhauseffekts liegen. Der Autor wird zum Einstieg mit allgemeinen und historischen Merkmalen beginnen und die Grundlagen der Energiegewinnung aufzeigen. Im Anschluss geht die Facharbeit in den Hauptteil über, wo das Potenzial der Windkraft untersucht wird. In diesem Kapitel geht der Autor auf die verschiedenen umwelt- und flächenbezogenen Präferenzen ein. Anschließend wird der physische Aufbau und die damit einhergehende Materialwirtschaft analysiert und kalkuliert. In der Auswertung werden die einzelnen Teilberechnungen der Analyse zusammengefasst und in Bezug auf vorher festgelegte Benchmarks präsentiert. Diese werden im Verlauf der Arbeit schrittweise festgelegt.





## 2 Grundlagen

### 2.1 Die Definition von Nachhaltigkeit

Hans Carl Carlowitz, geb. am 24. Dezember 1645 in Chemnitz – OT Oberrabenstein, prägte bereits vor gut 300 Jahren den Begriff der Nachhaltigkeit. Zu seiner Zeit bestand die Hauptproblematik in der sich schon bald einsetzenden Holznot. Carlowitz führte jahrelange Beobachtungen und Studien durch, um sich mit der Gesamtsituation auf seinem Kontinent Europa vertraut zu machen. Als gebildeter Mann setzte er sich zum Zeitpunkt, als er die Position eines Oberberghauptmannes innehatte, dafür ein, dass nur so viel Holz abgebaut wird, wie in einem Wald auch nachwachsen kann. Die damit einhergehende Flächenknappheit war Carlowitz bekannt. Wenn hier kein Umdenken der Flächennutzung stattfinden würde, wären die Folgen der nicht nachhaltigen Verwendung natürlicher Ressourcen enorm.<sup>1</sup> Seine Kernaussage hierzu lautet: „Der Mensch dürfe niemals *wider die Natur handeln*, sondern müsse stets *mit ihr agieren*. ... *Also soll man ... der Natur nach ahmen / weil selbige am besten weiß / was nützlich / nöthig und profitabel dabey ist.*“<sup>2</sup> Heutzutage ist der Begriff der Nachhaltigkeit moderner denn je und aus dem alltäglichen Leben nicht mehr wegzudenken. Der Mensch schaut darauf, nachhaltig zu sein. Nachhaltigkeit bekommt des Weiteren als Synonym CO<sub>2</sub>-neutral zu agieren, umweltfreundlich zu sein aber auch nach der Definition von Hans Carl Carlowitz, mit der Natur verbunden zu handeln. Durch Abweichungen im Konsumverhalten produziert jedes Individuum unterschiedlich hohe Kohlenstoffdioxidausstöße, also CO<sub>2</sub>. Dabei achten immer mehr auf einen bewussten Umgang bezüglich dieser Thematik. Doch warum fühlen wir uns heute so sehr in der Verantwortung für die Umwelt?

---

<sup>1</sup> Vgl. (Grober, 2013)

<sup>2</sup> (Grober, 2013)

## 2.2 Historische Entwicklung des anthropogenen Klimawandels

Mit der Frage „Warum müssen wir in unserer Energiewirtschaft umdenken und warum müssen wir klimafreundlicher sein?“ möchte der Autor diese Facharbeit beginnen. Die Entstehung der Ansicht, dass es einen anthropogenen Klimawandel, also durch Menschen verstärkten Treibhauseffekt gibt, ist eine noch nicht allzu lang vernommene Betrachtungsweise. Die Entdeckung des Treibhauseffektes jedoch selbst, liegt schon länger zurück. Bereits 1824 hat der französische Mathematiker Joseph Fourier in Zusammenhang mit seiner Annahme, die Erdatmosphäre besitzt isolierende Eigenschaften, den Treibhauseffekt entdeckt.<sup>3</sup> 38 Jahre später, aufbauend auf dem Wissensstand von Joseph Fourier, konnte John Tyndall 1862 die ersten für den Treibhauseffekt verantwortlichen Gase identifizieren. Darunter zählen unter anderem Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>), Lachgas (Distickstoffmonoxid N<sub>2</sub>O), teilhalogenierte und vollständig halogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW/FKW) sowie Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>)<sup>4</sup>. Der erste Nachweis für den anthropogenen Treibhauseffekt wurde deutlich später, erst 1958 von Charles D. Keeling erbracht. Dank seiner Initiative wurde eine Bewegung gestartet, bei der weltweit Messstationen und Beobachtungssatelliten installiert wurden, um die Treibhauskonzentration zu messen, Daten zu sammeln und zu bewerten.<sup>5</sup> „Seit Ende der 1970er Jahre beschäftigt sich die internationale Staatengemeinschaft mit den möglichen Auswirkungen von Aktivitäten der Menschen auf das Klima. Die erste Weltklimakonferenz 1979 mündete in einer Erklärung, in der die Regierungen der Welt aufgefordert wurden, sich auf potenzielle, vom Menschen verursachte Änderungen im Klima, die sich nachteilig auf das Wohl der Menschheit auswirken können, einzustellen und sie zu verhindern.“<sup>6</sup> Denn die durch den Menschen verursachten Treibhausgase erhöhen die Konzentration weltweit von Treibhausgasen in der Atmosphäre. Durch

---

<sup>3</sup> Vgl. (Fourier, 1824), S. 136-167

<sup>4</sup> Vgl. (Bayrisches Landesamt für Umwelt, 2020)

<sup>5</sup> Vgl. (ProOxygen, Tagesaktuelle und Historische CO<sub>2</sub>-Werte)

<sup>6</sup> (Schiffer, 2019), S. 460

den anthropogenen Treibhauseffekt werden zum einen ein Anstieg des Meeresspiegels und zum anderen die Verschiebung der Klimazonen vorhergesagt. Aufgrund der Klimazonenverschiebung steigen die Temperaturen stetig an. Die daraus resultierenden Auswirkungen sind nur schwer prognostizierbar, denn starke Dürren, Hochwasser sowie extreme Witterungsverhältnisse, anhaltende Kältezeiten oder Starksommer können die Folge sein. Zusätzlich sind noch weitere Gefahren möglich, welche derzeit noch nicht genau abzusehen sind. Hauptemittenten des anthropogenen Treibhauseffekts sind hierbei zum einen die Energiewirtschaft und zum anderen der Verkehrssektor mit einem kumulierten Gesamtanteil von circa 50 Prozent. Aus diesem Grund richtet sich diese Facharbeit schwerpunkttechnisch auf die Energiewende im Bereich Stromerzeugung und -bedarf, da die Auswirkungen in diesem Bereich umwelttechnisch stärker ins Gewicht fallen als andere Bereiche. Die internationale Staatengemeinschaft von 1979, welche auf der ersten Klimakonferenz wegweisende Leitlinien vorgab, wurde über die Jahre immer weiter durchgeführt und ausgebaut, sodass ein weltweites Commitment entstanden ist. In Zeiten der Globalisierung wurden Programme von verschiedenen Organisationen für den Klima- und Umweltschutz erstellt und durchgeführt. 1988 begründeten zwei Organisationen, zum einen das Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) zum anderen die Weltorganisation für Meteorologie (WMO), den Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Diese Organisation bekam den Auftrag<sup>7</sup>, „eine Bestandsaufnahme des vorhandenen Wissens über das Klimasystem und den Klimawandel vorzunehmen, die Auswirkungen des Klimawandels auf Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft zu prüfen und mögliche gegensteuernde Strategien auszuarbeiten.“<sup>8</sup>

---

<sup>7</sup> Vgl. Schiffers 2019, S. 459 ff.

<sup>8</sup> Schiffers 2019, S. 460, 461



## 3 Entstehung eines verbindlichen Rahmens

### 3.1 Klimakonzeption für Deutschland

1990 gelang es dem IPCC seinen ersten Bericht über die aktuellen Erkenntnisse vorzulegen. Weitere Berichte folgten und fassten schließlich den weltweiten Forschungsstand bezüglich der Klimaforschung zusammen. Es wurden auf Grundlage all dieser Ausarbeitungen folgende Kernthesen vereinbart, die wie folgt lauten:<sup>9</sup>

- „Die Wahrscheinlichkeit ist gestiegen, dass der Klimawandel anthropogen verursacht ist.
- Die Wahrscheinlichkeit, dass der Klimawandel zu einem Anstieg von Extremwetterereignissen führt, wird geringer als in der Vergangenheit eingeschätzt.
- Die Einschätzung zur Klimasensitivität von CO<sub>2</sub> hat im Vergleich zum IPCC-Report aus dem Jahr 2007 deutlich zugenommen. Bei einer Verdoppelung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre beträgt die – isoliert betrachtet – daraus folgende Temperaturerhöhung „nur“ noch 1 bis 2,5 °C (2007: 2 bis 4,5 °C mit einem Mittelwert von 3 °C).“<sup>10</sup>

Daraus kann man unter anderem ableiten, dass der Klimawandel auch durch das Verhalten der Menschen verursacht wird. Die Korrektur der Einschätzung von 4,5 °C auf 1 bis 2,5 °C lässt in diesem Fall nicht aufatmen. Ein kontinuierlicher Temperaturanstieg kann sowohl das Leben von Menschen als auch vom gesamten Ökosystem gefährden. Sicherlich gibt es Tierarten, denen es möglich ist, sich an die neuen Verhältnisse Schritt für Schritt bis zu einem gewissen Punkt mit anzupassen, doch bei vielen Teilnehmern unseres Ökosystems ist dies nicht der Fall. Laut einer Metastudie des Weltbiodiversitätsrats IPBES vom 06. Mai 2019 ist das Ausmaß des Artensterbens noch nie derart intensiv gewesen wie heute. So wird in diesem Report berichtet, dass schon jetzt allein

---

<sup>9</sup> Vgl. Schiffers 2019, S. 461

<sup>10</sup> Schiffers 2019, S. 461

seit dem 20. Jahrhundert circa 20 Prozent aller Tierarten verschwunden sind. Laut der Studie sind hierfür die veränderte Nutzung der Gewässer sowie die Ausbeutung von Tieren und Pflanzen ein markanter Grund.<sup>11</sup> Aufbauend auf dem Kyotoprotokoll, in dem nur einige Industriestaaten den Verpflichtungen nachgingen die Emissionen zu senken, wurde ein historischer Meilenstein durch das Pariser Abkommen (auch COP21 genannt und gleichzeitig auch das elfte Kyoto-Protokoll-Treffen) am 15. Dezember 2015, gelegt. Im Pariser Abkommen verpflichteten sich mindestens 55 Staaten, die zusammen mindestens 55 Prozent aller weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen verursachten, sich zu verpflichten, die Weltwirtschaft klimafreundlich zu verändern. Bereits am 4. November 2016, also nur knapp ein Jahr später, trat das Abkommen von Paris in Kraft.<sup>12</sup> „Anderers als noch im Kyoto-Protokoll haben nun fast alle Staaten der Erde nationale Klimaschutzziele definiert. Mit der Ratifizierung sind die Staaten völkerrechtlich verpflichtet, Maßnahmen zur Erreichung der Ziele zu ergreifen. Ein weiterer wichtiger Teil des Abkommens: Ärmere Länder werden finanziell sowie durch Wissens- und Technologietransfer dabei unterstützt, ihre Maßnahmen zum Klimaschutz umzusetzen. Die jeweiligen nationalen Klimaschutzziele werden von den Staaten selbst bestimmt und waren nicht Gegenstand der Verhandlungen. Das Abkommen verpflichtet die Regierungen allerdings dazu, alle fünf Jahre neue Ziele vorzulegen. Und die müssen deutlich ambitionierter als die vorherigen sein. Ein Komitee zur Umsetzungskontrolle sowie Regeln zur Transparenz stellen sicher, dass die Staaten ihre Verpflichtungen einhalten.“<sup>13</sup> Damit Deutschland seine Klimaschutzziele erreichen kann entstanden verschiedene Ebenen in der Gesetzgebung. Auf Grundlage des Abkommens von Paris entstand für Deutschland das Klimaschutzgesetz (KSG). Dieses bildet für Deutschland die Basis zur Einhaltung sämtlicher Absprachen durch das Erreichen der gesetzten Ziele.

---

<sup>11</sup> Vgl. (MDR, 2019)

<sup>12</sup> Vgl. (BMU, 2017)

<sup>13</sup> (BMU, 2017)

### 3.2 Das Bundesklimaschutzgesetz

Das KSG beinhaltet die Klimaschutzziele des Klimaschutzplans 2050 von Deutschland für die Limitierung beziehungsweise Budgetierung der Emissionen. Es ist für alle Bundesländer einheitlich gültig. Dennoch können Länder abweichend dieser Regelung eigene Klimaschutzgesetze erlassen, solange diese unbeschadet mit den Vorgaben des KSG existieren.<sup>14</sup> Aus Maßgaben des Pariser Abkommens wurden Gesetzestexte entworfen und Maßnahmen eingeleitet. Das KSG normiert Kraft Gesetz erstmals die Jahresemissionen an Treibhausgasen in den verschiedenen Bereichen wie der Energie, Industrie, Verkehr, Gebäude, Landwirtschaft und Abfallwirtschaft (siehe Tabelle 1).<sup>15</sup>

**Tabelle 1 Zulässige Jahresemissionen nach Sektor<sup>16</sup>**

Jahresemissionsmenge in Mio. Tonnen CO <sub>2</sub> -Äquivalent	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Energiewirtschaft	280		257								175
Industrie	186	182	177	172	168	163	158	154	149	145	140
Gebäude	118	113	108	103	99	94	89	84	80	75	70
Verkehr	150	145	139	134	128	123	117	112	106	101	95
Landwirtschaft	70	68	67	66	65	64	63	61	60	59	58
Abfallwirtschaft (...)	9	9	8	8	7	7	7	6	6	5	5

Aus dieser Tabelle wird ersichtlich, dass die Emissionen in den einzelnen Bereichen in den nächsten zehn Jahren deutlich zurückgehen müssen. Die Energiewirtschaft muss demnach die Emissionen auf nur noch 62,50 Prozent ihrer aktuellen Emissionen bis zum Jahr 2030 reduzieren. Gebäude müssen in dieser Zeit über 40 Prozent einsparen.

<sup>14</sup> Vgl. § 14 Abs. 1 Klimaschutzgesetz (2019)

<sup>15</sup> Vgl. (Deutscher Bundestag, 2019)

<sup>16</sup> Anlage 2 (zu §4 Klimaschutzgesetz (2019)). Tabelle: Zulässige Jahresemissionen



In anderen Bereichen wirkt sich die Reduzierung der zulässigen Jahresemission nicht so gravierend aus wie in diesen beiden Sektoren. Somit betrifft die Einsparung der Jahresemissionen des Verkehrs nur rund ein Drittel, die Industrie knapp ein Viertel, die Land- und Abfallwirtschaft sogar noch weniger. Somit wird am meisten Druck auf die Sektoren Gebäude und Energiewirtschaft ausgeübt. „Zweck dieses Gesetzes ist es, zum Schutz vor den Auswirkungen des weltweiten Klimawandels die Erfüllung der nationalen Klimaschutzziele sowie die Einhaltung der europäischen Zielvorgaben zu gewährleisten. Die ökologischen, sozialen und ökonomischen Folgen werden berücksichtigt. Grundlage bildet die Verpflichtung nach dem Übereinkommen von Paris aufgrund der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen, wonach der Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2 Grad Celsius und möglichst auf 1,5 Grad Celsius gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen ist, um die Auswirkungen des weltweiten Klimawandels so gering wie möglich zu halten, sowie das Bekenntnis der Bundesrepublik Deutschland auf dem Klimagipfel der Vereinten Nationen am 23. September 2019 in New York, Treibhausgasneutralität bis 2050 als langfristiges Ziel zu verfolgen.“<sup>17</sup>

### 3.3 Die Vorreiter des Gebäude-Energie-Gesetzes

Außerdem wurde das Gesetz für Erneuerbare Energien 2017 (EEG 2017), aufbauend auf dem vorherigen EEG 2014 bzw. EEG 2000, welches das bis dato gültige Stromerzeugungsgesetz von 1991 ablöste, novelliert und weiterentwickelt.<sup>18</sup> Für diverse Spezialbereiche wurden weitere Gesetzestexte und Verordnungen erstellt. So entstand das Energieeinsparungsgesetz (EnEG) und mit diesem Gesetz die Energieeinsparverordnung sowie das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG).

Zum 1. November 2020 werden das EEWärmeG, das EnEG und die EnEV durch das Gebäude-Energie-Gesetz (GEG) zusammengefasst.<sup>19</sup> „Das neue Gebäudeenergiegesetz

---

<sup>17</sup> § 1 Klimaschutzgesetz (2019)

<sup>18</sup> Vgl. (Schiffer, 2019), S. 282 ff.

<sup>19</sup> Vgl. (geg-info, 2020)

enthält Anforderungen an die energetische Qualität von Gebäuden, die Erstellung und die Verwendung von Energieausweisen sowie an den Einsatz erneuerbarer Energien in Gebäuden. (...) Mit dem GEG werden der Koalitionsvertrag, die Beschlüsse des Wohngipfels 2018 sowie die in den Eckpunkten für das Klimaschutzprogramm 2030 beschlossenen Maßnahmen in Bezug auf das Energieeinsparrecht für Gebäude umgesetzt.“<sup>20</sup>

Im EEG 2017 werden im ersten Paragraphen bereits der Zweck und die allgemeinen Ziele festgelegt. Der erste Absatz beinhaltet das Bemühen der gesamten Bevölkerung um eine nachhaltige Energieversorgung. Hier wird insbesondere darauf verwiesen, dass die Weiterentwicklung erneuerbarer Energiequellen im Fokus steht und die fossilen Ressourcen schonend behandelt werden müssen. Im zweiten Absatz werden diese Aussagen mit Fakten untermauert. Und zwar müssen bis zum Jahr 2030 mindestens 65 Prozent des in Deutschland anfallenden Bruttostromverbrauchs aus erneuerbaren Energien erzeugt werden. Bis zum Kalenderjahr 2050 sogar 80 Prozent.<sup>21</sup> „Dieser Ausbau soll stetig, kosteneffizient und netzverträglich erfolgen.“<sup>22</sup> Zum aktuellen Jahr, also 2020, liegt das Mindestmaß bei 18 Prozent an erneuerbarer Energie.

Laut Statista beträgt dieser Anteil allerdings bereits heute schon 42,1 Prozent (Stand 2019, siehe Abbildung 1). Im Vorjahr lag dieser noch bei 34 Prozent.<sup>23</sup> Den Hauptanteil hierbei steuert die Windenergie On- und Offshore, also an Land und auf See, mit 5390 Volllaststunden bei. Das macht einen absoluten Anteil von 15,21 Prozent an erneuerbar erzeugter Energie aus.<sup>24</sup> Um die Klimafreundlichkeit weiter zu fokussieren, werden immer wieder neue Werkzeuge inkludiert, um den Ausbau finanziell zu stützen und attraktiv für Unternehmen und Privatanleger zu gestalten. So gab es in der Vergangenheit bereits große Subventionen beziehungsweise Förderungen vom Staat für den Aus-

---

<sup>20</sup> (Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, 2020)

<sup>21</sup> §1 Erneuerbare-Energien-Gesetz

<sup>22</sup> §1 Abs. 2 Nr. 2 Satz 2 (Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (EEG))

<sup>23</sup> Vgl. (Jerzy, 2020)

<sup>24</sup> Vgl. (Bundesamt der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., 2020)

bau von Solarenergie, Windenergie und anderen erneuerbaren Energiegewinnungsanlagen wie beispielsweise den Photovoltaikanlagen. Deutschland liegt mit seiner Klimapolitik auf Kurs und belegt den dritten Platz weltweit im Bereich Wind- und Solarenergie.<sup>25</sup>

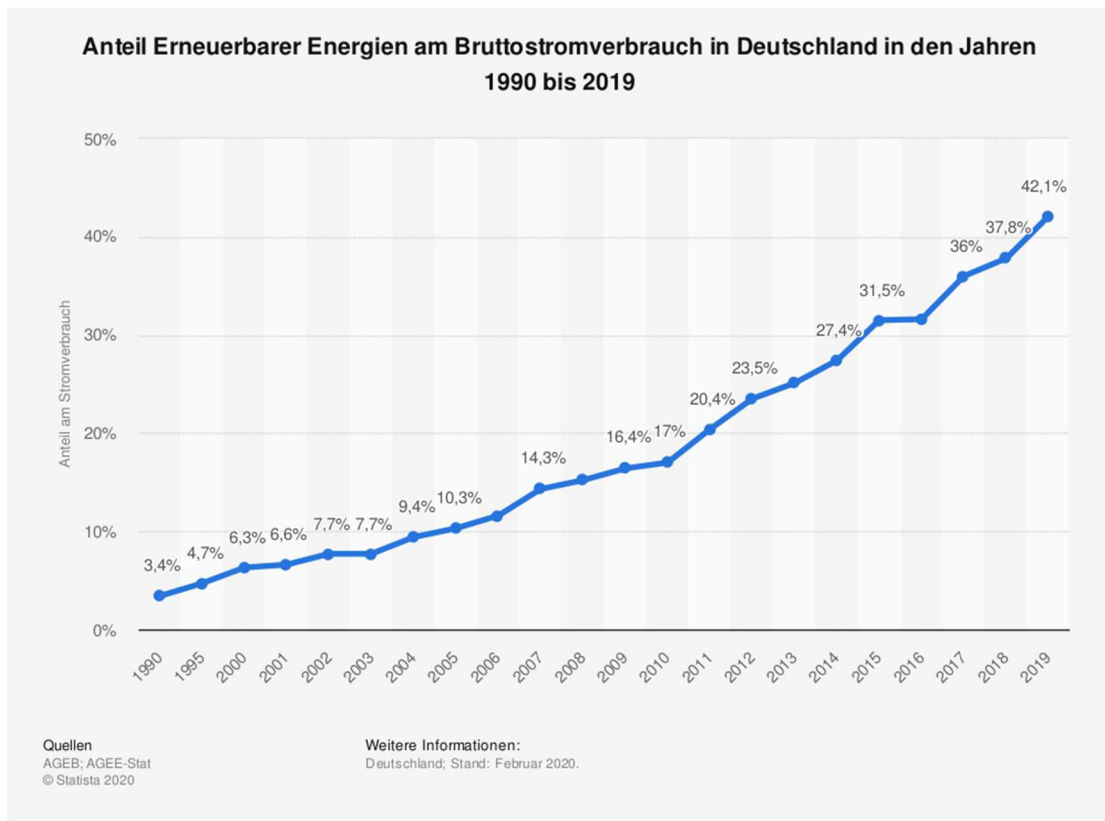


Abbildung 1 Anteil Erneuerbarer Energien<sup>26</sup>

<sup>25</sup> Vgl. (Jerzy, 2020)

<sup>26</sup> (Breitkopf, Statista, 2020)

## 4 Strommarkt Deutschland

„Energie ist die Fähigkeit Arbeit zu verrichten.“<sup>27</sup> Unser heutiges Leben wird in jedem Augenblick von Einrichtungen unterstützt, die Energie bedürfen. Ob es die Brotschneidemaschine für das tägliche Frühstück oder die City-Bahn für den Weg zur Arbeit ist. Smartphones, Autos, Tablets, Laptops, Maschinenparks und so vieles mehr. Sie alle werden durch verschiedene Formen der Energie in einem nutzbaren Zustand erhalten. Es gibt verschiedene Formen der Energie. Zum einen ist da die elektrische Energie, auf deren Gewinnung sich diese Facharbeit klimatisch und flächenbezogen fokussiert. Des Weiteren gibt es noch die Bewegungsenergie (kinetische Energie), die Wärmeenergie (thermische Energie), die Lageenergie (potenzielle Energie) sowie die Atom-, Kern und Strahlungsenergie. Alle Energieformen können ineinander konvertiert werden.

### 4.1 Stromerzeugung - Energiegewinnungsquellen

Deutschland verfügt über ein infrastrukturell gut ausgebautes Netz sowohl für die Stromerzeugung als auch für die Verteilung und Übertragung. In der folgenden Grafik (Abbildung 2) sind die derzeit auf dem deutschen Markt betriebenen Kraftwerke mit einer Nennleistung ab 100 MW<sub>el</sub> (Mega-Watt elektrischen Stromerzeugnis) verzeichnet.

---

<sup>27</sup> (WEKA MEDIA GmbH & Co. KG, 2020)

# Kraftwerke und Verbundnetze in Deutschland

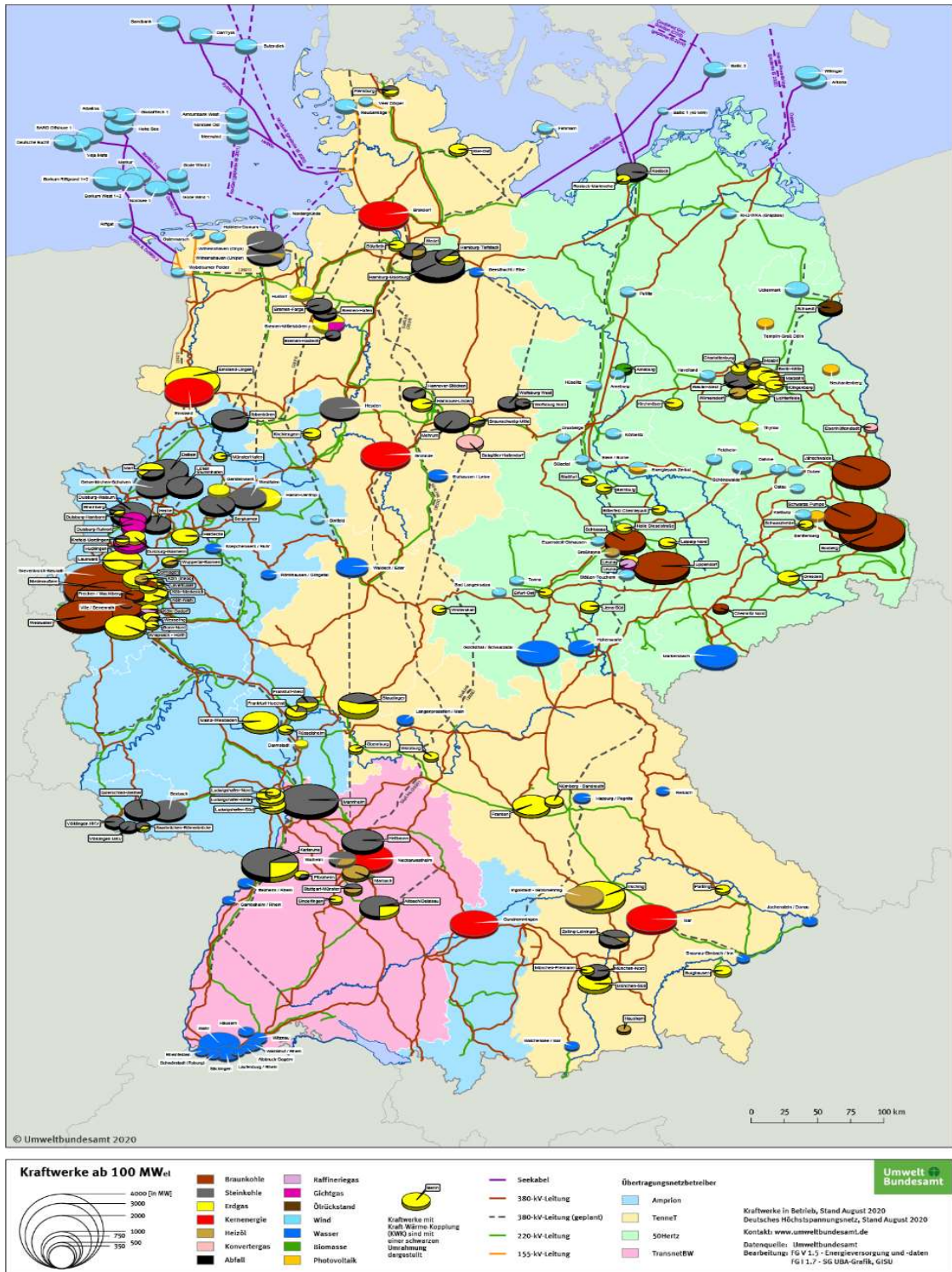


Abbildung 2 Kraftwerke und Verbundnetze in Deutschland<sup>28</sup>

<sup>28</sup> (Umweltbundesamt, 2020)

Verschiedenste Energiegewinnungsformen kommen hierbei zum Einsatz. Fossile Energiequellen sowie auch erneuerbaren Energien bilden somit einen derzeit relativ ausgeglichenen Strommix in Deutschland. Im Folgenden ist eine Kategorisierung der verschiedenen Energieträger zu sehen (Abbildung 3).

### Klassifizierung der Energieträger

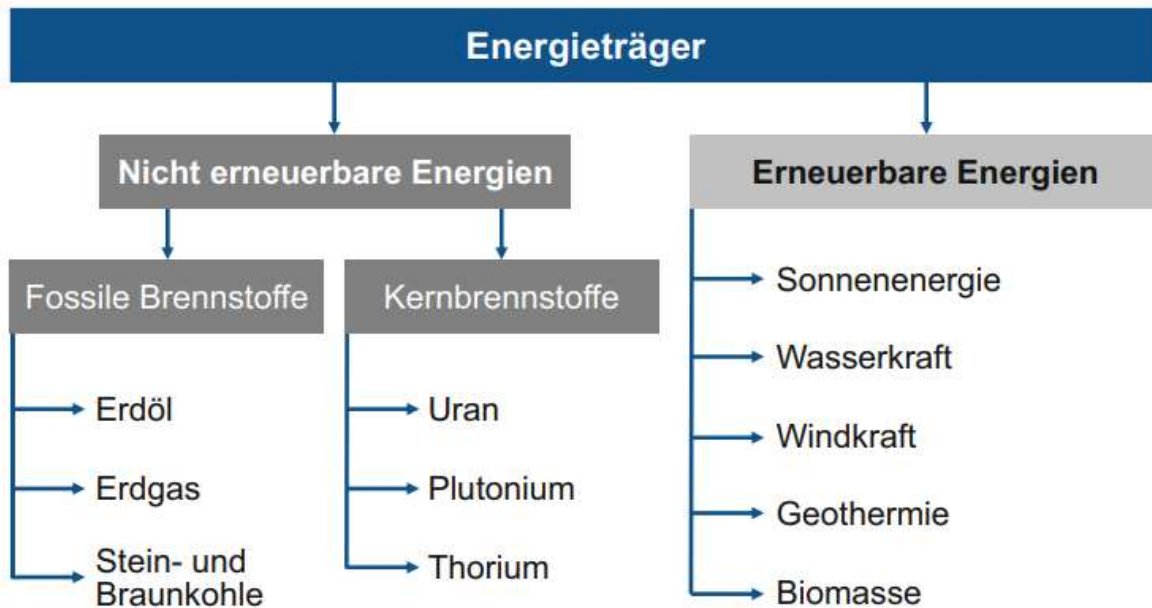


Abbildung 3 Klassifizierung der Energieträger<sup>29</sup>

Die fossile Energiegewinnung wird dabei mit Hilfe der Verbrennung von brennbaren Materialien, welche nur endlich zur Verfügung stehen, betrieben. So verbrauchen Kohlekraftwerke beispielsweise Braun- und Steinkohle, Gaskraftwerke Erdgas beziehungsweise andere Gase als Beimischung, PKW fahren mit Benzin oder Diesel, welches aus Erdöl gewonnen wird. Auch Kernkraftwerke bedienen sich einem zusätzlichen Material, dem Uran. Somit zählen auch diese zu den fossilen Kraftwerksarten.

Erneuerbare Energiequellen sind dadurch geprägt, dass sie umweltbelastungsfrei arbeiten. Das heißt zum einen, sie stoßen kein Kohlendioxid aus, um Energie zu erzeugen, zum andere sind sie unendlich verfügbar, da sie mit der Natur harmonieren und

<sup>29</sup> (Schiffer, 2019), S. 2

von dieser partizipieren. Erneuerbare Energiequellen nutzen die Gegebenheiten der Erde effizient und nachhaltig. So wird beispielsweise die potenzielle Energie des Wassers genutzt, die thermische Energie der Sonne oder auch die kinetische Energie des Windes, nur um einige aufzuführen. Wie genau dies geschieht wird in Kapitel 4.1.1 und 4.1.2 erläutert.

### **4.1.1 Fossile Energiegewinnung**

Der Energiemarkt mit fossilen Brennstoffen nimmt ab. Im Folgenden werden die verschiedenen fossilen Kraftwerksarten aufgeführt und anschnidend erläutert. Vom ersten fossilen Brennstoff aus Abbildung 3, dem Erdöl, produzieren Ölkraftwerke sowohl elektrische als auch Wärmeenergie. Nutzt ein solches Kraftwerk sowohl den erzeugten Strom als auch die bei der Verbrennung entstandenen Abwärme, spricht man von einem Blockheizkraftwerk (BHKW). Kleine Ölkraftwerke werden mit der Technik von Dieselmotoren errichtet. Größere Kraftwerke haben eine Turbine, welche bei der Verbrennung des Öls angetrieben werden und Strom erzeugen.<sup>30</sup> Aufgrund ihres niedrigen Wirkungsgrades und des hohen Ölpreises werden diese Kraftwerke allerdings nicht mehr im großen Stil betrieben. Verwendung finden diese Kraftwerke hauptsächlich als Reservekraftwerke. Wie die in der Zukunft dieser Kraftwerksart aussieht, bleibt in Betracht des verringerten Ölbedarfs weltweit abzuwarten. Da bei der Verbrennung außerdem die gefährlichen für den Treibhauseffekt verantwortlichen Gase aufsteigen, bekommt diese Bauform mit Hinblick auf die erneuerbaren Energien kaum mehr Aufmerksamkeit.

Erdgasbetriebene Kraftwerke, also Gaskraftwerke bedienen sich dem zweiten in der Abbildung 3 aufgeführten fossilen Brennstoff. Ein Gaskraftwerk besteht im Wesentlichen aus einer Gasturbine, einer Dampfturbine, einem Heizkessel sowie einem Kessel für die Kondensation, sowie die zur Energieumwandlung gekoppelten Generatoren an

---

<sup>30</sup> Vgl. (Dr. Paschotta, 2020)

den jeweiligen Turbine. Die Gasturbine wird durch die Verbrennung des fossilen Brennstoffes, dem Gas, angetrieben und erzeugt am Generator Strom. Bei der Verbrennung entsteht viel Wärme, was das Wasser im Heizkessel erhitzt und zum Verdampfen bringt. Dieser Dampf steigt auf und betreibt die Dampfturbine, welche ebenfalls an einem Generator angeknüpft ist und Strom erzeugt. Der aufsteigende Wasserdampf wird in einem Kondensationsbehälter gesammelt und dem Heizkessel über eine Pumpe zurückgeführt. Somit ist das Wasser wieder im Kreislauf und kann erneut erhitzt werden. Bei dem Prozess der Verbrennung des Gases entstehen die Abgase Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf.<sup>31</sup>

Dem dritten Brennstoff, der Stein- und Braunkohle, widmen sich Kohlekraftwerke. In Deutschland werden derzeit noch rund 100 Kraftwerke, welche mit Kohle betrieben werden, aktiv. Da in Deutschland noch ausreichend Braunkohleaufkommen besteht, wird diese hauptsächlich aus dem eigenen Land abgebaut und verwendet. Anders ist das bei Steinkohle, diese wird hauptsächlich importiert. Da die Förderkosten für Steinkohle unter Tage deutlich höher sind als das importierte Gut, ergeben sich wirtschaftliche Gründe, die Steinkohle nicht mehr in Deutschland abzubauen. Deshalb werden bestehende Bergwerke nach und nach stillgelegt. Braunkohle- und Steinkohlekraftwerke sind in der Funktion ähnlich wie die bisherigen aufgeführten Kraftwerksarten. „Ein Kohlekraftwerk wandelt Wärmeenergie mithilfe von Dampf in elektrische Energie um – deshalb auch die Bezeichnung Dampfkraftwerk. Kohle wird gemahlen, in die Brennkammer eingeblasen und dort verbrannt. Dabei entstehen heiße Rauchgase. Diese erhitzen Wasser, das über ein Rohrsystem durch die Brennkammer geführt wird. Heißer Dampf entsteht. Der Dampf durchströmt eine Turbine und gibt seine Energie an die Turbinenschaufeln ab. Diese Energie wird in Drehenergie umgewandelt. Die Turbinenwelle treibt einen Generator an, der Strom erzeugt. Der abgearbeitete Dampf

---

<sup>31</sup> Vgl. (Redaktion SimplyScience.ch, 2012)



wird im Kondensator zu Wasser abgekühlt, das wieder in den Dampferzeuger zurückgepumpt wird. So entsteht aus chemisch gebundener Energie über thermische und mechanische Energie die gewünschte elektrische Energie.<sup>32</sup>

In Abbildung 3 werden die nicht erneuerbaren Energien in fossile und Kernbrennstoffe differenziert. Da allerdings Kernkraftwerke mit radioaktivem Material, welches ebenfalls nur endlich zur Verfügung steht, funktioniert, wird diese Kraftwerksart ebenfalls als fossil betrachtet. Auch wenn bei der Stromerzeugung kein CO<sub>2</sub> freigesetzt wird. „Ein Kernkraftwerk besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen: Im nuklearen Teil wird durch Kernspaltung Wärme erzeugt. Im konventionellen Teil wird die Wärme in elektrischen Strom umgewandelt. Der konventionelle Anlagenteil ist jenem in Kohle-, Gas- und Erdwärmekraftwerken sehr ähnlich. Kühltürme sind deshalb keine Besonderheit von Kernkraftwerken – sie werden auch bei Kohle- und Gaskraftwerken eingesetzt. Was aus dem Kühlturm aufsteigt, ist eine reine Nebelfahne.“<sup>33</sup> Bei der Kernspaltung entstehen radioaktive Stoffe, welche nur bedingt gelagert werden können, allerdings unbedingt versiegelt gelagert werden müssen. Das Thema der Endlagerung der radioaktiven Abfälle ist schon seit langem ein wichtiges und umfassend diskutiertes Thema. Die Verantwortung für die Entsorgung lag lange Zeit allein bei den Gesellschaften, die bei der Stromproduktion diese Abfälle produzierten. Am 26.06.2017 wurde die Verantwortung auf den Bund und die Gesellschaften verteilt. Widersprüchlich erscheint hierbei allerdings die Tatsache, dass im Atomgesetz die direkte Endlagerung vorgeschrieben wird, allerdings als ersten Schritt eine Zwischenlagerung stattfindet. Problem hierbei besteht insoweit darin, dass es bis heute keine Endlagerungsstätte für den Atommüll in Deutschland gibt. Da große Gefahren von diesem Müll ausgehen, ist diese Form der Energiegewinnung weder zu befürworten noch als nachhaltig zu betrachten.<sup>34</sup>

Der Bundestag hat in mehreren Stufen den Ausstieg aus dem fossilen Energiemarkt beschlossen. Sowohl in der privaten als auch in der gewerblichen Energiewirtschaft

---

<sup>32</sup> (EnBW, 2020)

<sup>33</sup> (swissnuclear ©, 2020)

<sup>34</sup> (Schiffer, 2019), S. 213 ff.

werden in den nächsten Jahren und Jahrzehnten Veränderungen stattfinden. So ist laut dem Bundesklimaschutzgesetz (KSG, auch Klimapaket genannt), welches 2019 in Kraft getreten ist, festgelegt, dass ab dem Jahr 2026 keine neue Ölheizung mehr im Deutschland verbaut werden darf.<sup>35</sup> Im Jahr 2038 ist der ganzheitliche Kohleausstieg für Deutschland manifestiert. Das bedeutet, dass bis zum Jahr 2038 alle Kohlekraftwerke noch betrieben werden dürfen, danach aber nicht mehr. Da die Kohlekraft noch immer die Hauptenergiequelle für den deutschen Strom liefert, ist der Ausbau für andere Formen notwendig. Die Kohlekraft vertritt derzeit noch, mit einen Anteil von 23 Prozent, den größten Anteil des in Deutschland produzierten Stroms Auf Platz 2 folgt die Windkraft mit 16,3 Prozent.<sup>36</sup>

#### **4.1.2 Erneuerbare Energiegewinnung**

Der Anteil an erneuerbaren Energieerzeugnissen war in diesem Jahr erstmals größer als der Anteil Fossiler.<sup>37</sup> Betrachtet man die Nettostromerzeugung Deutschlands aus Kraftwerken, zeigt sich, dass sich im Jahr 2019 die Windenergie mit einem Anteil von über 40 Prozent der erneuerbaren Energien und einen absoluten Anteil von 24,4 Prozent als Spitzenkandidat der nachhaltigen Energiequellen positioniert hat. In Nordrhein-Westfalen befinden sich Windparks mit einer jährlich installierten Leistung von 5.920 MW. Damit ist das Bundesland deutschlandweit auf Platz 4 in Bezug auf die installierte Leistung aus Windenergie, gefolgt von Schleswig-Holstein mit 6.996 MW, Brandenburg mit 7.320 MW und führend mit 11.325 MW Niedersachsen (siehe Abbildung 4). Um einen aussagekräftigen und standortbezogenen Wert für den Betrieb einer WEA zu erhalten verwendet man allerdings nicht die installierte Leistung (Nennleistung), sondern Volllasttage. An diesem Wert erkennt man den Nutzungsgrad einer solchen Anlage in Bezug auf die installierte Leistung plus weiteren Faktoren wie beispielsweise der Standortbezogenheit. Da politische und ökologischen Kräfte auf den Ener-

---

<sup>35</sup> Vgl. (Vaillant, 2020)

<sup>36</sup> Vgl. (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, 2020)

<sup>37</sup> Vgl. (Fraunhofer-Institut, 2020)

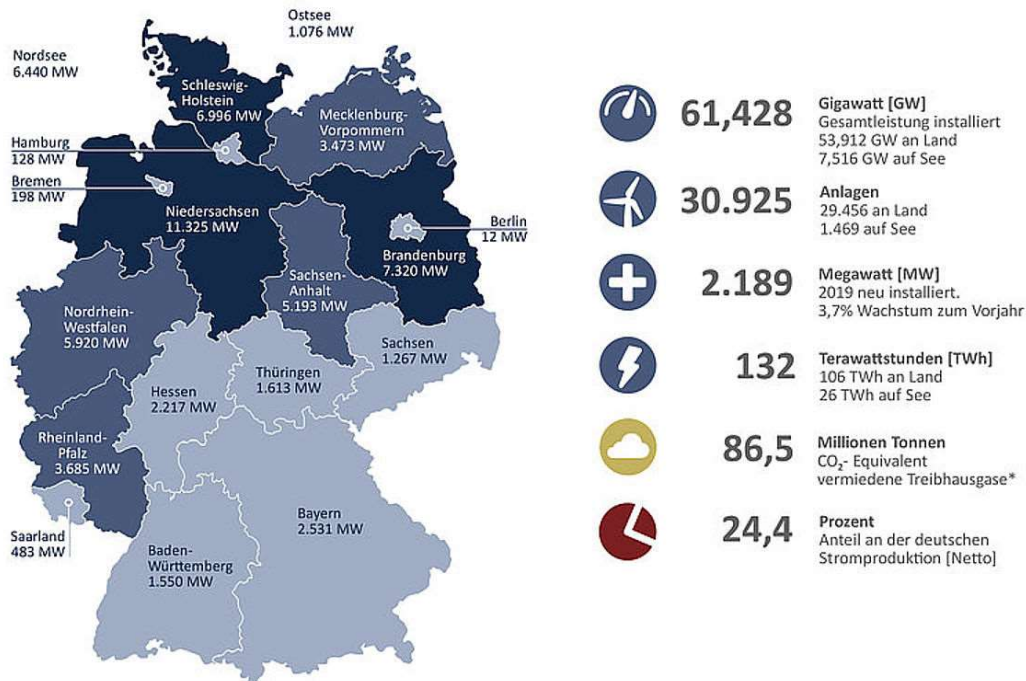
giemarkt weiterwirken, wird der Ausbau erneuerbarer Energien immer weiter vorangetrieben. Neben der Windenergie gibt es noch weitere erneuerbare Energiequellen. „Die Sonne strahlt Licht und Wärme in Richtung Erde ab.“<sup>38</sup> Die Wärme kann durch Solarkraftwerke genutzt werden. „Dabei macht man sich nicht die Lichteigenschaften, sondern die in der Sonnenstrahlung mitgeführte Wärmeenergie zu nutzen. (...) Da thermische Energie auch zwischengespeichert werden kann, funktioniert die Stromerzeugung durch solche Kraftwerke auch bei mangelhafter oder gar keiner Sonneneinstrahlung.“<sup>39</sup> Eine weitere Möglichkeit die Sonnenenergie zu nutzen ist über die Technologie von Photovoltaikanlagen. „Das Licht (...) kann mithilfe des Photoeffekts zur Gewinnung von elektrischen Strom genutzt werden. Dazu werden Solarzellen verwendet, die normalerweise in Solarmodule eingebunden sind. Die Gesamtheit aller verbundenen Solarmodule nennt man Photovoltaikanlage.“<sup>40</sup>

---

<sup>38</sup> (Osterhage, 2019), S. 81

<sup>39</sup> (Osterhage, 2019), S. 80

<sup>40</sup> (Osterhage, 2019), S. 81

**INSTALLIERTE LEISTUNG PRO BUNDESLAND | GEBIET**


Quellen: BWE, Dt.WindGuard, Fraunhofer ISE, Umweltbundesamt, AEE e.V. \*Daten vorläufig Grafik: Strom-Report Stand: Februar 2020

**Abbildung 4 Installierte Leistung pro Bundesland | Gebiet<sup>41</sup>**

Gerade für mobile Geräte wie Baustellen-Warntafeln, aber auch stationäre Geräte mit wenig Energiebedarf wie Parkuhren, sind solche Anlagen besonders gut geeignet.

Eine weitere Art der erneuerbaren Energien ist die Wasserkraft. Für die Wasserkraft gibt es zwei Arten der Stromerzeugung. Die erste Variante ist das Verbauen von Turbinen in fließenden Gewässern und Strömungen. Hierbei wird durch die Strömung die Turbine angetrieben. Diese versetzt sich dabei in Bewegung und hängt an einem Generator. Dieser wandelt die kinetische Energie in elektrische Energie um und speichert sie. Die zweite Form Wasser als Energiequelle zu nutzen ist, die potenzielle Energie des

<sup>41</sup> (BWE, 2020)

Wasser in kinetische Energie umzuwandeln.<sup>42</sup> Um mit diesem Prinzip arbeiten zu können bedarf es einiger lokaler Gegebenheiten. Man benötigt mehrere Auffangbecken auf verschiedenen Höhen, wobei die Höhe maßgeblich ist für die Energiegewinnung. Je höher desto besser. Das Wasser muss zu diesem Zweck im oberen Auffangbecken gesammelt werden, wie zum Beispiel in Talsperren. Dieses Becken kann dann über Öffnungen das Wasser freigeben. Angenommen auf das obere Staubecken folgen mehrere Staustufen, welche mit einem Rohrleitungssystem verbunden sind. So kann man im Bedarfsfall den Wasserablauf öffnen, durch den Fall des Wassers, beziehungsweise der Strömung in das nächste Staubecken, wird hier eine Turbine angetrieben, die wiederum an einem Stromgenerator für Strom sorgt. Ist das Wasser im letzten Becken angekommen, wird es wieder in das oberste Becken gepumpt. Aus diesem Grund bezeichnet man diese Kraftwerke als Pumpenspeicherkraftwerke. Diese Prozedur hat den Vorteil, die finanziellen Schwankungen des Marktes auszunutzen und den tatsächlichen Energiebedarf zu glätten.<sup>43</sup>

Neben der Windkraft, Sonnenenergie und Wasserkraft gibt es noch zwei weitere Möglichkeiten, erneuerbare Energien zur Erzeugung von Strom zu verwenden. Das ist zum einen die Erdwärme und zum anderen Biomasse. Bei der Biomasse werden grundsätzlich drei verschiedene Verfahren angewandt, um Energie zu gewinnen. „Die zur Verstromung eingesetzten Verfahren

- direkte Verbrennung
- thermische Vergasung mit anschließender Verbrennung des Gases
- biologische Vergasung mit anschließender Verbrennung des Gases

sind altbekannte Verfahren. (...) Die thermische Vergasung ist eine chemische Umwandlung der Biomasse etwa unter Zugabe von Sauerstoff und Wasserdampf. Das sich ergebende Gas ist ein Gemisch aus Wasserstoff, Methan, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid. (...) Die bei der direkten Verbrennung entstehenden gefährlichen Substanzen

---

<sup>42</sup> Vgl. (Osterhage, 2019), S. 99

<sup>43</sup> Vgl. (Osterhage, 2019), S. 99

wie **Dioxine** und **Furane** treten bei der thermischen Vergasung nicht auf. Bei der biologischen Vergasung entsteht Biogas durch (...) Vergärung der Biomasse mit Hilfe von Mikroorganismen. Das dabei entstehende Gas ist ein Gemisch aus Methan und Kohlendioxid. Der Anteil des Methans ist dabei dominierend. Als Biomasse zur Biogasproduktion werden Mist, Gülle und Silage aus Energiepflanzen eingesetzt.<sup>44</sup>

Die als Letztes aufgeführte erneuerbare Energiegewinnungsform ist die Erdwärme. Bei der Erdwärme, auch Geothermie genannt, wird Energie aus dem Inneren der Erde entnommen. „Die Energie aus dem Inneren der Erde ist Wärmeenergie aus der Entstehungszeit der Erde und Energie, die durch den Zerfall radioaktiver Stoffe permanent freigesetzt wird.“<sup>45</sup> Durch Bohrungen in das Erdreich wird Wasser erhitzt und durch Umwandlungsprozesse in elektrische Energie umgewandelt. Da sich Geothermie in Bezug auf die Stromerzeugung noch im Forschungsstatus befindet, ist ihr Anteil am Bruttostromerzeugnis in Deutschland allerdings marginal.

## 4.2 Strombedarf in Deutschland

Durch Verwendung fossiler und erneuerbarer Energiequellen wurden innerhalb der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 2019 604 TWh (Terawattstunden) Strom erzeugt.<sup>46</sup> „Das deutsche Stromnetz unterteilt sich in vier Spannungsebenen. Die Niederspannungsebene (...) versorgt vor allem Haushalte, kleine Gewerbebetriebe und die Landwirtschaft lokal mit Strom. Die regionalen Verteilnetze sind in der Mittelspannungsebene angesiedelt (...). Die Kunden der Hochspannungsebene (...) sind insbesondere lokale Stromversorger, Industrie sowie größere Gewerbebetriebe. Die überregionalen Stromautobahnen sind die Höchstspannungsnetze (...) – Kunden in diesem Großhandelsbereich sind regionale Stromversorger und sehr große Industriebetriebe. Dar-

---

<sup>44</sup> (Unger & Hurtado, 2013), S. 151

<sup>45</sup> (Unger & Hurtado, 2013), S. 155

<sup>46</sup> Vgl. (Breitkopf, Statista, 2020)

über hinaus verbinden die Höchstspannungsleitungen Deutschland auch mit dem Ausland.<sup>47</sup> Diese Infrastruktur der Energie ist notwendig, um eine flächendeckende Versorgung für das ganze Land zu gewährleisten. Im Jahr 2018 beträgt die Gesamtlänge des deutschen Stromnetzes rund 519.000 Kilometer. Auf dem Transportweg vom Stromerzeuger bis zum Endverbraucher gehen weltweit im Schnitt 8,8 Prozent der erzeugten Energie auf diesem Weg verloren.<sup>48</sup> Dennoch, „in Deutschland wird Energie vergleichsweise effizient genutzt. Dies zeigt sich, wenn man den Energieverbrauch ins Verhältnis setzt zur Summe der erwirtschafteten Güter und Dienstleistungen. (...) Im weltweiten Durchschnitt ist der spezifische Energieverbrauch doppelt so hoch“<sup>49</sup>.

Da durch das Klimaabkommen und die daraus resultierenden gesetzlichen Gegebenheiten Subventionen für die Betreiber bereitgestellt wurden und werden, nutzen diese die Förderungen der Bundesregierung für den Ausbau erneuerbarer Energien, was zum Wachstum in der Bilanz führt.<sup>50</sup> Da die Bundesregierung als Ziel einen Anteil von 65 Prozent bis zum Jahr 2030 an erneuerbaren Energien fordert, bedeutet dies einen Ausbau solcher Energiegewinnungsanlagen von 150 Terawattstunden.<sup>51</sup> Der Anteil an erneuerbaren Energien wächst sukzessiv in den verschiedenen Bereichen.<sup>52</sup> Dies bedeutet allerdings auch einen weiteren Ausbau des Stromnetzes, was zu einem erhöhten Flächenbedarf für die Energiewende führen kann. Die Planung für den Ausbau wird in einem Netzentwicklungsplan durchgeführt. Verantwortlich für diesen Plan ist die Bundesnetzagentur. Der Gesetzgeber hat aus Gründen der Bevölkerungsakzeptanz für den Netzausbau Ende 2015 Das Gesetz zur Änderung von Bestimmungen des Rechts des Energieleitungsbaus gebilligt, damit vorrangig Erdkabel für Leitungen zur Höchstspannungs-Gleichstromübertragung Verwendung finden.<sup>53,54</sup> Die zusätzlichen Netze

---

<sup>47</sup> (Schiffer, 2019), S. 224

<sup>48</sup> Vgl. (Valov, 2020), S. 229

<sup>49</sup> (Schiffer, 2019), S. 4

<sup>50</sup> Vgl. (Schiffer, 2019), S. 261

<sup>51</sup> Vgl. (Fachagentur Windenergie an Land, 2020), S. 1

<sup>52</sup> Vgl. (Breitkopf, Statista, 2020)

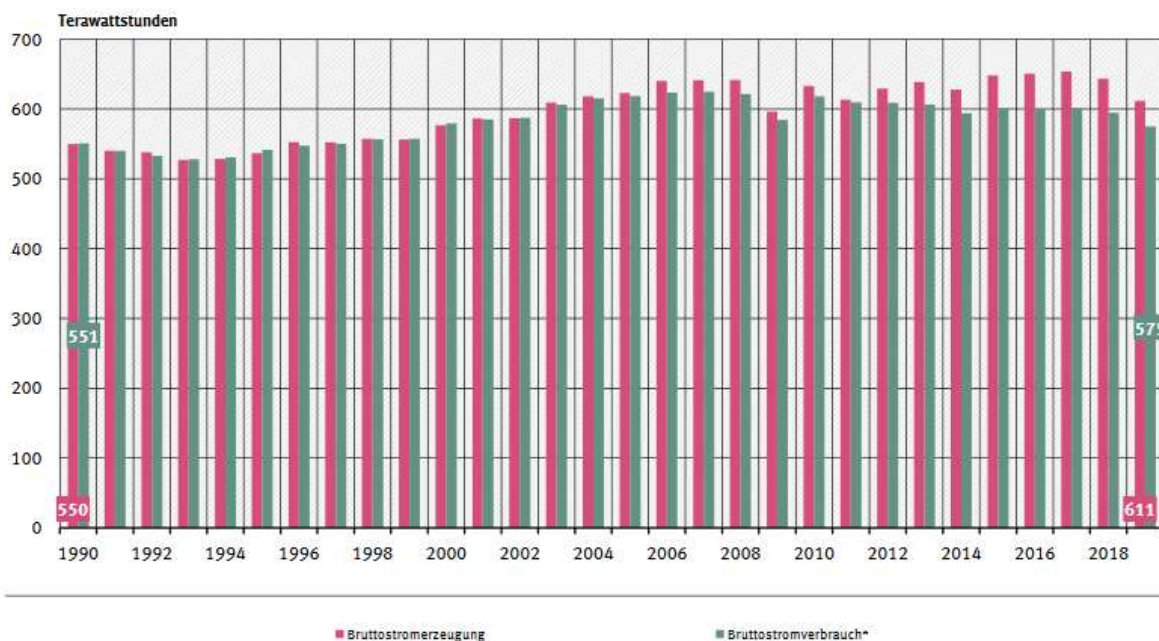
<sup>53</sup> Vgl. (Schiffer, 2019), S. 233

<sup>54</sup> Vgl. (Die Bundesregierung, 2015)

sind notwendig für den weiteren Ausbau. „Dem stetig wachsenden Anteil erneuerbarer Energien an der Bruttostromerzeugung steht nicht im gleichen Maße ein Rückgang der konventionellen Stromerzeugung gegenüber. Bis zum Jahre 2003 hielten sich Erzeugung und Verbrauch noch in etwa die Waage, seither wurde in Deutschland mehr Strom produziert als verbraucht und netto Strom exportiert.“<sup>55</sup> (siehe Abbildung 5).

Ein weiterer Aspekt ist die Berücksichtigung der Energiebereitstellung. Da oftmals mehr Energie produziert wird als benötigt wird, wird Strom an dieser Stelle exportiert, da er nur zeitlich knapp begrenzt gespeichert werden kann. Andernfalls gibt es auch Phasen in denen Strom importiert wird aufgrund von kurzfristigen Engpässen. Auf Jahr betrachtet hat Deutschland daher einen Anteil von rund 37 Terawattstunden, die es mehr exportiert als importiert (Stand 2018).<sup>56</sup>

Entwicklung der Bruttostromerzeugung und des Bruttostromverbrauchs



\* einschließlich Netzverluste und Eigenverbrauch  
2019 vorläufige Angaben, zum Teil geschätzt

Quelle: Umweltbundesamt auf Basis AG Energiebilanzen, Sondertabelle Bruttostromerzeugung in Deutschland von 1990 bis 2019 nach Energieträgern, Stand 12/2019

Abbildung 5 Entwicklung der Bruttostromerzeugung und des Bruttostromverbrauchs<sup>57</sup>

<sup>55</sup> (Umweltbundesamt, 2020)

<sup>56</sup> Vgl. (Breitkopf, Statista, 2019)

<sup>57</sup> (Umweltbundesamt, 2019)



Da Strom nicht nur Energie, sondern auch ein Wirtschaftsgut ist, ist die zusätzliche Menge als solches auf den ersten Blick nicht negativ zu bewerten für die deutsche Wirtschaft. Dennoch bestehen hierbei Unstimmigkeiten. „Das Problem: Das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) schreibt vor, dass die Übertragungsnetzbetreiber Strom aus erneuerbaren Quellen auch dann abnehmen und vermarkten müssen, wenn ihn eigentlich niemand will. Die Produzenten erhalten auch normal die ihnen garantierte EEG-Umlage dafür - unabhängig davon, ob der Strom überhaupt benötigt wird. Da zu viel Strom die Netze überlasten würde, er aber auch nicht gespeichert werden kann, drückt das Überangebot an der Strombörse die Preise an solchen Tagen ins Negative. Die Übertragungsnetzbetreiber zahlen also dafür, dass ihnen jemand den Strom abnimmt. Häufig sitzen die Abnehmer im Ausland. (...) Wieviel Geld Deutschland jedes Jahr auf diesem Weg genau ins Ausland verschenkt, lässt [sich] aber nicht genau beziffern, da die Netzbetreiber teilweise auch an der Strombörse vorbei direkt untereinander Strom austauschen.“<sup>58</sup> Da allerdings die Nachfrage nach Strom in der Bundesrepublik steigt, bleibt abzuwarten, ob es hier weitere Eingriffe seitens des Staates geben wird. Elektrofahrzeuge, raumluftechnische Anlagen und weitere Gerätschaften, welche zum Betreiben Strom benötigen, erfahren derzeit einen rasanten Anstieg in ihrem Aufkommen und Anwendung, was nicht zuletzt auf den Klimawandel zurückgeführt werden kann. Demnach ist ein Anstieg am Strombedarf nicht abwegig, viel mehr zu erwarten.

---

<sup>58</sup> (Poppe, 2019)

## 5 Potenzial Windenergieanlage

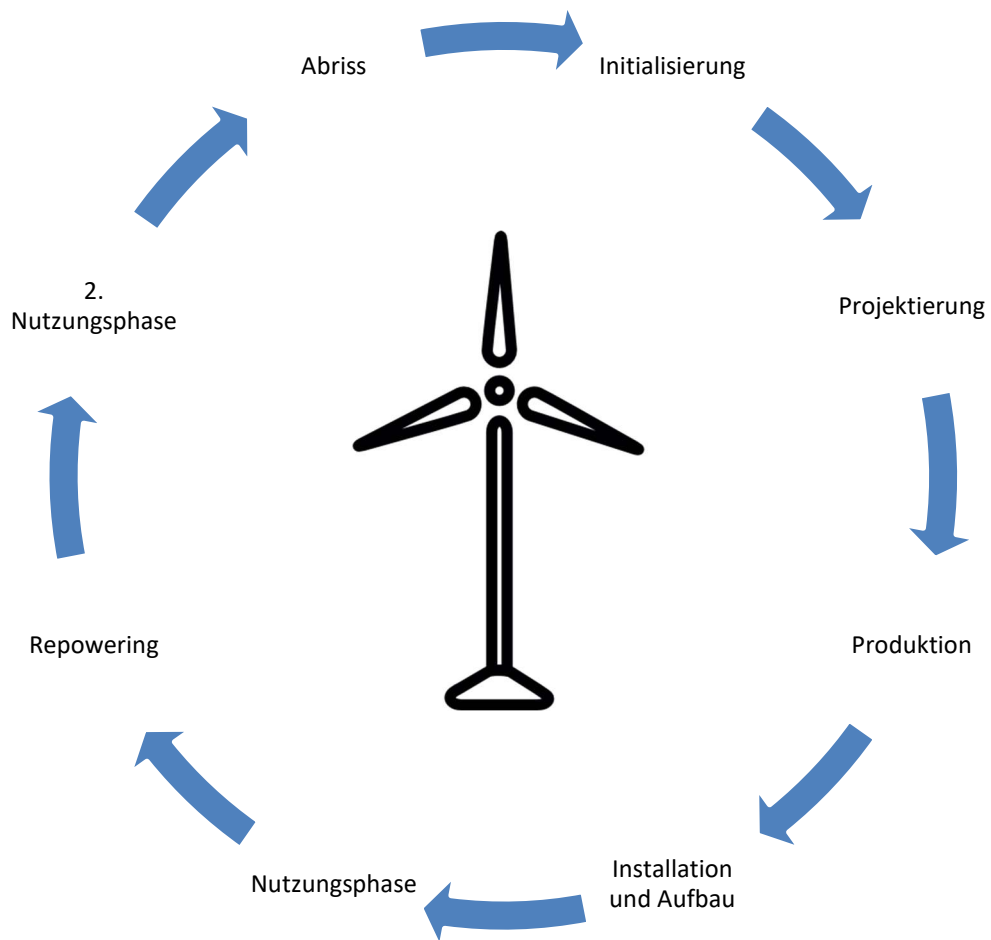
Aus diesem Grunde ist es umso notwendiger, dass die Windenergie und auch andere nachhaltige erneuerbare Energiegewinnungsarten mehr Aufmerksamkeit bekommen und stetig weitergeforscht, verbessert und ausgebaut werden. Im Folgenden dieser Facharbeit wird nun das Potenzial der Windenergieanlagen (WEA) untersucht mit Hinblick auf die Umweltbelastung und Möglichkeiten, die sie uns bieten kann.

### 5.1 Lebenszyklus

Der Lebenszyklus (siehe Abbildung 6<sup>59</sup>) von Immobilien legt eine ganzheitliche Betrachtung für eine Windkraftanlage. Vom Entstehen der Planung über den Bau, der Nutzungsphase bis hin zum Rückbau. Im Folgenden werden die einzelnen Phasen in Bezug auf eine WEA aufgeführt.

---

<sup>59</sup> Die Vector-Grafik „Windrad“ wird von cleanpng.com zur Verfügung gestellt. Abgerufen am 01. Dezember 2020: <https://de.cleanpng.com/png-vadlcn/download-png.html>



**Abbildung 6 Lebenszyklus einer WEA**

## 1. Initialisierung

Ein oder mehrere Investoren möchten den Bau eines Windkrafttrades in Auftrag geben. Dafür schließen sich die Parteien zusammen und wählen ein Projektentwicklungsteam zur Umsetzung ihrer Idee aus. Dieses Team erstellt auf Basis der Angaben der Investoren einen Rahmen für die zukünftigen Lebensphasen.

## **2. Projektierung**

In der Projektierungsphase wird das Projekt „Bau einer WEA“ geplant und kalkuliert. Es wird zwischen verschiedenen Anbietern, Größe und Bauweise entschieden und dabei die umgebenden und rechtlichen Bedingungen berücksichtigt. Die Finanzierung und die Rahmenbedingungen werden entschieden und festgelegt. Anschließend, wenn alle planungsrelevanten Schritte durchgeführt wurden, geht es in die praktische Phase, der Produktion über.

## **3. Produktion**

In der Produktionsphase werden die einzelnen zum Aufbau benötigten Materialien und Baugruppen hergestellt. In dieser Phase entstehen aufgrund des großen Gewichts dieser Anlagen viel Emissionen, Materialverbrauch und Aufwand, welche im späteren Verlauf dieses Kapitels noch näher beleuchtet werden.

## **4. Installation und Aufbau**

In der vierten Phase werden nun die einzelnen produzierten Teile an Ort und Stelle gebracht und aufgebaut. Neben den produzierten Baugruppen wird zusätzlich die Errichtung eines Fundaments durchgeführt, um die Baugruppen zusammenzuführen. Zum Schluss wird die Anlage geprüft und getestet bevor sie in den laufenden Betrieb übergeht.

## **5. Nutzungsphase**

In der Nutzungsphase wird die Anlage in Betrieb genommen und produziert nun Strom. Die technische Lebensdauer einer WEA beträgt im Schnitt rund 20 Jahre. „Die technische Lebensdauer  $L$  kennzeichnet den Zeitraum, in dem eine Anlage physisch zur Verfügung steht und die geforderten Aufgaben zur Energieumwandlung ohne Einschränkungen erfüllt. Sie wird in Jahren angegeben. Während des Betriebs unterliegen eine Anlage und ihre Komponenten Alterung und Verschleiß. Daher sind innerhalb der

technischen Lebensdauer Wartungsarbeiten erforderlich. Nach Erreichen der technischen Lebensdauer werden Kraftwerke entweder grundlegend modernisiert, durch Neubauten ersetzt oder stillgelegt und zurück gebaut.<sup>60</sup>

## **6. Verschleißgrenze / Repowering<sup>61</sup>**

In Deutschland gibt es für den Erbau von Windenergieanlagen über einen bestimmten Zeitraum staatliche Förderungen.<sup>62</sup> Diese sind so erheblich, dass eine Nutzung über diesen Zeitraum oftmals nicht mehr wirtschaftlich möglich ist. Dank der Möglichkeit, das Fundament erneut für eine neue und wirtschaftlichere WEA zu nutzen, besteht die Möglichkeit des Repowering. Oft werden Windkraftträder nach der Zeit der Förderung in ihre Einzelteile zerlegt und verkauft, sodass das Fundament frei steht für ein neues Rad. Ist dies nicht der Fall, geht der Lebenszyklus direkt in die letzte Phase, der Phase 8 über.

## **7. 2. Nutzungsphase**

Die zweite Nutzungsphase ist der ersten Nutzungsphase identisch. Diese Schleife zwischen der Nutzungs- und Repoweringphase ist unbegrenzt oft wiederholbar, solange die Gegebenheiten als auch das Fundament dies zulassen.

## **8. Rückbau und Abriss**

Nicht immer kommt es zu einer 2. Nutzungsphase, also einem Repowering der Anlagen, beziehungsweise der Anlagenfläche. Ist das der Fall, muss die Anlage zurückgebaut werden. Diese Verpflichtung geht aus dem Baugesetzbuch § 35. Abs. 5 S. 2 i. V. m. S. 3 hervor. § 35 Abs. 5. S. 2 betrifft dabei den Rückbau sowie die Beseitigung der Bodenversiegelung nach dauerhafter Aufgabe der zulässigen Nutzung. Dies bedeutet, dass

---

<sup>60</sup> (Reich & Reppich, 2018)

<sup>61</sup> Repowering: Neue Anlagentechnik verbauen, um die Effizienz zu steigern

<sup>62</sup> Vgl. (Bundesnetzagentur, 2020)

wenn eine WEA länger als 12 Monate ohne weiteren zulässigen Betrieb besteht, muss der Betreiber diese zurückbauen und auch die Fundamentfläche rekultivieren.<sup>63</sup>

Hierbei können neben hohen Rückbaukosten auch erneut hohe Emissionen entstehen, aufgrund des Energieaufwandes der notwendig ist, um das Erdreich zu revitalisieren.

## 5.2 Flächenanalyse

### 5.2.1 Witterungsbedingte Determinanten

#### 5.2.1.1 Wind

Nicht nur Photovoltaikanlagen und Solarthermieranlagen profitieren von der Sonne. Denn: „Für die Entstehung des Windes ist auch die Sonne verantwortlich. Ständig erreichen uns gigantische Mengen an solarer Strahlungsenergie. Damit sich die Erde nicht kontinuierlich erwärmt und dadurch letztendlich verglüht, muss sie die eintreffende Sonnenenergie wieder ins Weltall abstrahlen. (...) Riesige weltweite Luftzirkulationen pumpen die Wärme vom Äquator zu den Polen. Es entstehen gigantische Zirkulationszellen, sogenannte Hadley-Zellen (...). Die Erdrotation lenkt diese Strömungen ab.“<sup>64</sup> Aufgrund dieses Ereignisses entstehen weltweit relativ gleichmäßige Winde. Zusätzlich zu Strömungen gibt es noch weitere beeinflussende Faktoren für die Entstehung des Windes. Unterschiedliche Hoch und Tiefdruckgebiete lösen durch die Drehbewegung des Globus zusätzliche Luftbewegungen aus.<sup>65</sup> „In Küstennähe treten auch sogenannte auflandige oder ablandige Winde auf. Durch die Sonneneinstrahlung erwärmen sich tagsüber das Land und die Luft darüber deutlich mehr als das angrenzende Meerwasser. Die warme Luft steigt über dem Land auf, und kühlere Luft strömt vom Meer nach. Nachts dreht sich dieser Kreislauf um, da das Land

---

<sup>63</sup> Vgl. (Bundesverband WindEnergie BWE, 2018)

<sup>64</sup> (Quaschnig, 2009), S. 222 ff.; Hadley-Zellen beschreiben ein Zirkulationsmuster der Luftbewegungen

<sup>65</sup> Vgl. (Quaschnig, 2009), S. 223

wieder schneller abkühlt als das Meer. In Gebirgen oder Polargebieten treten auch Fallwinde auf, bei denen kalte Luft Berghänge mit zum Teil sehr großen Windgeschwindigkeiten herabströmt.“<sup>66</sup>

### **5.2.1.2 Windhöffigkeit**

Die Windhöffigkeit trifft die Kernaussage, ob eine WEA in einem Gebiet wirtschaftlich betrieben werden kann oder nicht. Dabei ist die bauliche Größe der WEA ebenfalls entscheidend. Die Windhöffigkeit gibt die jährlichen vor Ort herrschenden Windgeschwindigkeiten für einen Referenzwert von 100 Metern Höhe über der Erdoberfläche an. Laut Brigitte Zaspel-Heisters ist eine gute Windhöffigkeit gegeben, wenn die Windgeschwindigkeit mindestens im Bereich von 5,25 bis 6 m/s (Meter pro Sekunde) liegt. Eine Übersicht von Windgeschwindigkeiten ist in Abbildung 7 aufgeführt. Grüne Bereiche kennzeichnen ein Gebiet mit weniger starkem Windaufkommen, gelb bis orange eine mittlere Windgeschwindigkeit von 4,0 – circa 5,0 m/s und die roten Bereiche mit einer Windgeschwindigkeit größer als 5,0 m/s. hier zugrundeliegenden Parameter sind leicht abweichend zu denen, welche für die WEA benötigte Windhöffigkeit Verwendung finden. Demnach ist die Höhe der Messungen des Deutschen Wetterdienstes bei 80, nicht bei 100 Meter.<sup>67</sup>

Als weitere Voraussetzung gilt es, die Örtlichkeit genauer auf Grundlage ihrer Beschaffenheit zu analysieren. Eine wichtige Determinante ist hierfür der Grad der Neigung der zu bebauenden Erdoberfläche.<sup>68</sup>

---

<sup>66</sup> (Quaschnig, 2009), S. 224

<sup>67</sup> Vgl. (Hermann, Eltges, & Kaltenbrunner, 2015), S. 545 von Brigitte Zaspel-Heisters

<sup>68</sup> (Bundesinstitut für Bau-, -Stadt- und Raumforschung (BBSR), 2016), S. 544

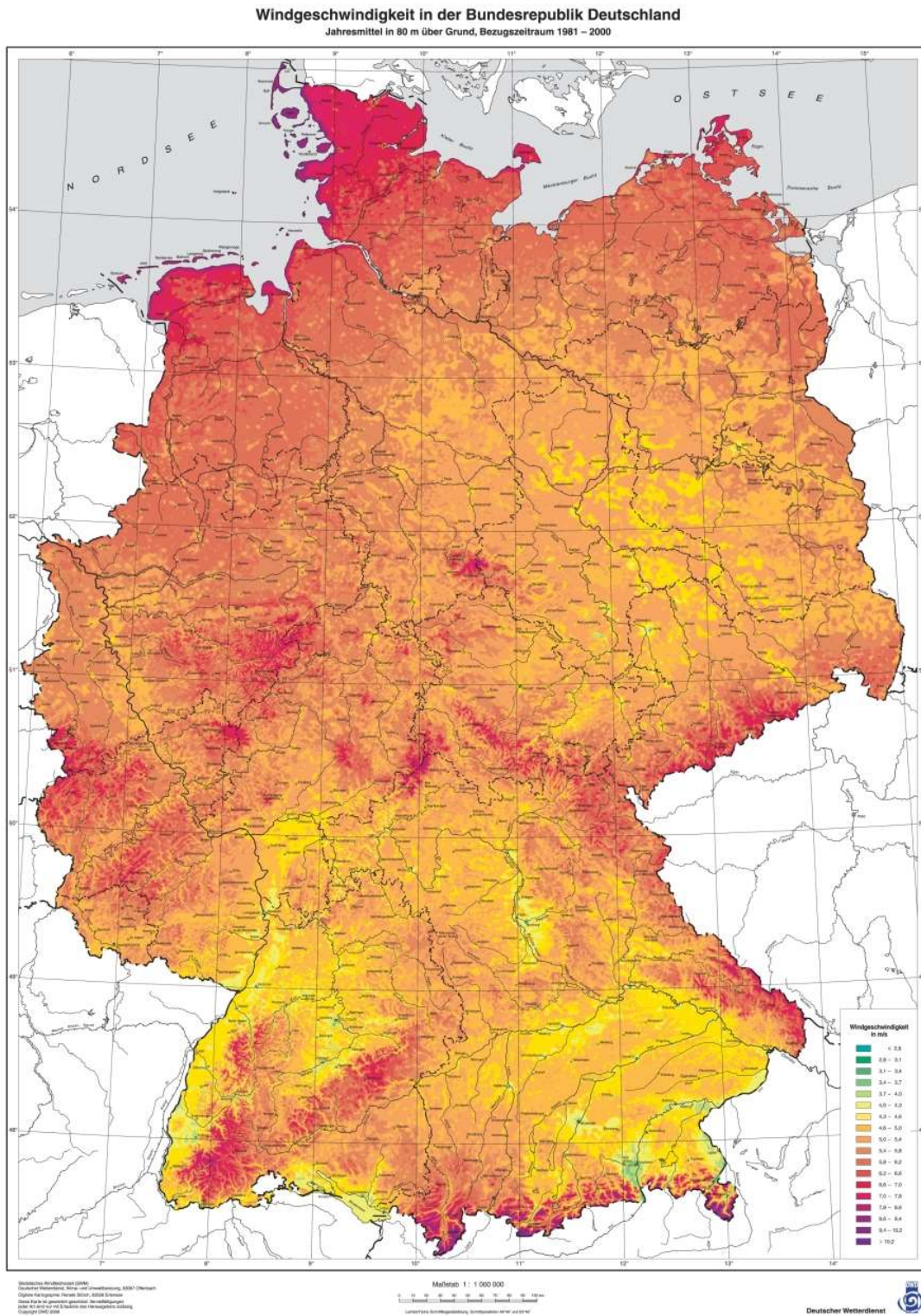


Abbildung 7 Windgeschwindigkeiten in Deutschland<sup>69</sup>

<sup>69</sup> (Deutscher Wetterdienst, 2020)



### **5.2.1.3 Hangneigung**

Die Hangneigung ist für WEA maßgeblich. Zwar sind Flächen meist nie ganz eben. Allerdings lässt sich auf Flächen mit geringer Neigung besser ein Fundament für eine WEA errichten als auf einer Fläche mit starker. Zusätzlich müssen auch die Winde an einem Hang anders bewertet werden als auf einer ebenen Fläche, da der Wind in seiner Bewegung durch den Hang beeinflusst werden kann. Deshalb werden aufgrund technischer Herausforderungen, bei einer Hangneigung die größer als 30 ° (**Grad**) ist, keine WEA errichtet.<sup>70</sup>

### **5.2.1.4 Bodenrauigkeit**

„Die Erdoberfläche (Land- und Wasser-oberfläche) ist nicht aerodynamisch glatt, sondern durch Rauigkeitselemente (Hindernisse) charakterisiert, angefangen von Sandkörnern und Grashalmen über Bäume und Gebäude (...). Sie bremsen den Wind umso mehr ab, je höher die Bodenrauigkeit ist und je kräftiger der Wind weht. Rauigkeit bewirkt also eine Erhöhung der Reibung und damit eine Reduzierung der Windgeschwindigkeit.“<sup>71</sup>

## **5.2.2 Flächenbedingte Determinanten**

### **5.2.2.1 Regional- und Raumordnungsplanung**

Der regionalplanerische Aspekt ist ein Planungsrechtlicher, bei dem jede der derzeit 109 Regionen in Deutschland ihre eigene Planung, unter Berücksichtigung der regionalen Entwicklung, der kommunalen Planung, der Flächennutzungspläne, der rechtlichen Situation nach dem Raumordnungsgesetz (ROG), dem Baugesetzbuch (BauGB) sowie den Bauverordnungen (BauVO) vorlegt. Die Hierarchie hierzu ist in Abbildung 8 zu sehen.<sup>72</sup>

---

<sup>70</sup> Vgl. (Bundesinstitut für Bau-, -Stadt- und Raumforschung (BBSR), 2016), S. 545

<sup>71</sup> (Hupfer, Kuttler, Chmielewski, & Pethe, 2005)

<sup>72</sup> Vgl. (Krappweis, 2020)



Abbildung 8 Planungshierarchie der Raumordnung in Deutschland<sup>73</sup>

„Zusammenfassende, überörtliche und fachübergreifende Regionalpläne legen (...) bundesweit (...) verbindliche Vorgaben fest, die bei Genehmigungsentscheidungen über Windenergieanlagen“<sup>74</sup> zu berücksichtigen sind. In der Regionalplanung werden Raumordnungsgebiete festgelegt, um an Standorten bestimmte Nutzungen und Funktionen festzulegen. Eine Kategorisierung verschiedener Flächen werden durch die Regionalplanung außerdem ausgewiesen. Die Definition der einzelnen Flächenbezeichnungen sind im Raumordnungsgesetz festgelegt. Von Relevanz sind hierbei die Vorranggebiete (VRG), die Vorbehaltsgebiete (VBG), die Eignungsgebiete (EG), außerdem Vorranggebiete mit einer Ausschlusswirkung oder auch mit Wirkung von Eignungsgebieten.<sup>75</sup>

„Generell ist zwischen abschließender und nicht abschließender Planung zu unterscheiden. Während bei einer nicht abschließenden Planung weiterhin die Privilegierung der Windenergie bestand hat, kann durch eine abschließende Planung der übrige

<sup>73</sup> (FIS - Forschungs-Informations-System, 2020)

<sup>74</sup> (Hermann, Eltges, & Kaltenbrunner, 2015), S. 545

<sup>75</sup> Vgl. (Bons, et al., 2019), S. 43

Planungsraum von den an sich privilegierten Anlagen freigehalten werden. Diese Einschränkung der Privilegierung von WEA im Außenbereich wird auch als Planvorbehalt bezeichnet.<sup>76</sup>

Im Folgenden werden die einzelnen Gebietstypen genauer beschrieben.

- „Vorranggebiete gewähren der Windenergie Vorrang und schließen raumbedeutsame Vorhaben, die mit der Windenergienutzung nicht vereinbar sind, in diesem Gebiet aus.
- Vorbehaltsgebiete schreiben den Belangen der Windenergie in einem Gebiet ein erhöhtes Gewicht in der planerischen Abwägung zu, gewähren aber keinen generellen Vorrang.
- Eignungsgebiete sind immer mit einer außergebietlichen Ausschlusswirkung verknüpft, sodass der Ausbau der Windenergie im restlichen Planungsgebiet i. d. R. ausgeschlossen ist.
- Vorranggebiete mit der Wirkung von Eignungsgebieten vereinen den Vorrang innerhalb der Fläche mit der außergebietlichen Ausschlusswirkung.<sup>77</sup>

Sind weder Eignungsgebiete noch Vorranggebiete mit Ausschlusswirkung in den einzelnen Regionen ausgewiesen, besteht für die Kommunen die Möglichkeit, weitere Flächen für die Windenergie auszuweisen.<sup>78</sup>

#### **5.2.2.2 Natur- und andere Schutzgebiete**

Gebiete in denen WEA nicht errichtet und betrieben werden dürfen sind unter anderem Natur- und Landschaftsschutzgebiete, und Flächen des Emissions- und Immissionsschutzes. Hierzu zählen insbesondere Naturschutzgebiete, Nationalparks, Biosphärengebiete, Landschaftsschutzgebiete als auch Naturparke und andere Biosphärenreservate wie Moore und Sümpfe. Des Weiteren gibt es für den Bereich des Artenschutzes ein Verfahren, um die Tierwelt zu schützen. Sollte sich der Betrieb einer WEA in

---

<sup>76</sup> (Bons, et al., 2019), S. 43

<sup>77</sup> (Bons, et al., 2019), S. 43

<sup>78</sup> Vgl. (Bons, et al., 2019), S. 49

einem Gebiet negativ auf die Lebensräume von Tierarten wie Fledermäusen, Vögeln oder anderer Lebewesen auswirken, sind solche Flächen ebenfalls tabu.<sup>79</sup> Als letzten Aspekt für die Errichtung wird die tatsächliche Flächennutzung aufgeführt.

### 5.2.2.3 Tatsächliche Flächennutzung

Bereits bebaute Flächen und auch Flächen mit direkter Zuordnung stehen in der Regel nicht mehr für den Bau von WEA. Der Mensch selbst soll bei der Errichtung und in der Betriebsphase von schädlichen Auswirkungen der WEA geschützt werden. Von WEA gehen verschiedene Gefahren aus. Zum einen entsteht durch die Größe einer WEA für manche das Gefühl der Bedrängung. Deshalb muss ausreichend Abstand zu Siedlungsflächen gewahrt werden. Eine weitere Gefahr ist die Lärmeinwirkung auf den Menschen durch die im Betrieb befindliche Anlage.<sup>80</sup> „Grundlage für die Beurteilung der Lärmeinwirkung auf den Menschen ist die Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (...). Sie legt abgestufte Immissionsrichtwerte für die in der Baunutzungsverordnung differenzierten Baugebiete fest“<sup>81</sup>. In Tabelle 2 sind die vom Umweltbundesamt festgelegten Werte ersichtlich. Einzelne landesplanerische Abstandsempfehlungen weichen hiervon allerdings ab. So hat Bayern beispielsweise eine sogenannte 10 - H - Regel eingeführt, in der eine WEA mind. zehnmal so weit von einem Wohngebiet entfernt sein muss, wie sie hoch ist, gemessen am oberen Rotorblattende.<sup>82</sup>

**Tabelle 2 Umweltbundesamt - lärminduzierte Abstandswerte<sup>83</sup>**

Gebiet	Abstand
Industrie- u. Gewerbeflächen	250 m
Wohnbauflächen (inkl. Mischgebiete)	600 m
Wochenend- u. Ferienhausbebauung	900 m

<sup>79</sup> Vgl. (Hermann, Eltges, & Kaltenbrunner, 2015), S. 548

<sup>80</sup> Vgl. (Hermann, Eltges, & Kaltenbrunner, 2015), S. 548

<sup>81</sup> (Hermann, Eltges, & Kaltenbrunner, 2015), S. 548

<sup>82</sup> Vgl. (Plappert, Rudolph, & Vollmer, 2019), S. 9 ff.

<sup>83</sup> Vgl. (Hermann, Eltges, & Kaltenbrunner, 2015), S. 548

All diese Anforderungen an die Umgebung müssen bei der Errichtung einer WEA berücksichtigt werden und beschränken den Ausbau für die Anlagen erneuerbaren Energien im Bereich Windenergie.

#### **5.2.2.4 Aktueller Bestand**

Deutschland besitzt circa 357.581 km<sup>2</sup> Fläche. Für die Windenergie werden unter Berücksichtigung aller bedingenden Determinanten sowohl im Wasser (Offshore) als auch an Land (Onshore) nur noch ein Bruchteil Verwendung finden.<sup>84</sup> Da pro Windenergieanlage im Schnitt 0,4 bis 0,5 ha Fläche benötigt wird, ist der Ausbaustand derzeit bei 29.456 an Land eine Fläche von knapp 15.000 ha (Hektar) bebaut (siehe Kapitel 4.1.2 Abbildung 3). Das sind umgerechnet 21.000 Fußballfelder, beziehungsweise 150 km<sup>2</sup>. In Bezug auf die gesicherte Fläche macht dies einen Anteil von nicht mal 5 Prozent aus. Demnach kann die Kapazität an verfügbaren Flächen in Deutschland für den weiteren Ausbau gewährleistet werden.

Zum heutigen Zeitpunkt umfasst die Windenergie 30.925 Windräder. Das entspricht einer installierten Nennleistung von rund 61.428 MW.<sup>85</sup> Laut einer umfassenden Flächenanalysestudie des Umweltbundesamtes stehen in Deutschland rund 3.132 km<sup>2</sup> für die Windkraft derzeit gesichert zur Verfügung. Das entspricht in etwa 0,9 Prozent der in Deutschland zur Verfügung stehenden Gesamtfläche.<sup>86</sup> Bereits mit WEA bebaute Flächen wurden in der Studie bereits mitberücksichtigt.

Rund 0,4 Hektar, also 4.000 m<sup>2</sup> benötigt man im Schnitt für den Bau einer Windenergieanlage. Die derzeit verbaute Nennleistung ( $P_w$ ) der Generatoren in den Windkraftanlagen liegt bei rund 3,34 MW.<sup>87</sup> Die Nennleistung gibt allerdings einen für den Betrieb unrealistischen Wert an, da dieser für die voll anliegende Dauerlast nicht erzielbar ist.

---

<sup>84</sup> Vgl. (Umweltbundesamt, 2020)

<sup>85</sup> laut BWE Stand: 2019; siehe Seite x, Abbildung 3. installierte Leistung, Anlagen

<sup>86</sup> Vgl. (Bons, et al., 2019), S. 147

<sup>87</sup> Vgl. (Fraunhofer-Institut, 2020)

Gründe sind weniger starke Winde beziehungsweise zu geringe Luftbewegungen, so dass das Windrad langsam oder gar nicht dreht. Aus diesem Grund wird ein anderer Wert zur Berechnung beansprucht, und zwar die Volllaststunde. Sie gibt an, wie viele Stunden das Windrad je nach Position pro Jahr zum Einsatz kommt. Die durchschnittliche Volllaststundenzahl für die WEA in Deutschland liegen im Onshore-Bereich bei 1880, im Offshore-Bereich sogar bei 3510.<sup>88</sup> Ein Jahr hat im Normalfall 365 Tage, das entspricht 8760 Stunden.

Die durchschnittliche Leistung einer WEA ( $P_{WEA}$ ) wird somit folgendermaßen ermittelt:

$$P_{WEA.ON} = \frac{T_V}{8760} P_W = \frac{1880}{8760} = 0,215 \triangleq 21,5 \%$$

$$P_{WEA.OFF} = \frac{T_V}{8760} P_W = \frac{3510}{8760} = 0,401 \triangleq 40,1 \%^{89}$$

Somit ist festzuhalten, dass die durchschnittliche Leistung der Anlagen in Bezug auf ihre Nennleistung an Land lediglich rund ein Fünftel dessen an elektrischer Energie erzeugen wird, als angegeben ist. Bei Offshore-Anlagen ist die durchschnittliche Leistung immerhin doppelt so hoch wie bei Onshore. Umgerechnet bedeutet dies, dass eine Windenergieanlage an Land eine durchschnittliche Leistung von umgerechnet rund 720 kW und eine Offshore-Anlage von circa 1.340 kW statt 3.400 Kilowatt leistet.

Bezogen auf den derzeitigen Ausbau der Windenergieanlagen, verfügt Deutschland somit über rund 29.456 Onshore-Anlagen mit einer tatsächlichen Leistung von 21.208.320 kW. Im Offshore-Segment sind es 1.469 Anlagen mit umgerechnet 1.968.460 kW. Dies entspricht einer aktuellen Gesamtleistung von 23.176.780 kW, also 23.176,780 MW.<sup>90</sup>

---

<sup>88</sup> Vgl. (Breitkopf, Statista, 2020)

<sup>89</sup> Vgl. (Ahlborn, 2013)

<sup>90</sup> Berechnung anhand von Daten aus Abbildung 4 und oben aufgeführten durchschnittlichen Leistungsdaten

## 5.3 Umweltbedingte Analyse

### 5.3.1 Belastung des Klimas

Die Errichtung von WEA, beziehungsweise Windparks<sup>91</sup> ist menschengemacht. Der anthropogene Treibhauseffekt wird im Laufe des Lebenszyklus einer WEA genauso angetrieben wie bei anderen Kraftwerken. Allerdings ist die Intensität eine andere und auch der Zeitraum ist hier nicht stetig. So werden in den ersten Zyklen, sprich Phase 1 Initialisierung und Phase 2 Projektierung keine nennenswerten Schadstoffe der Umwelt zugefügt. Lediglich in Phase 3, der Produktion sowie in Phase 4 entstehen markante Auswürfe von Treibhausgasen. Auch entstehen in der Repowering- und 2. Nutzungsphase erneut Schadstoffe, welche der Windenergie direkt zugeordnet werden können. Ebenfalls in der letzten Phase, dem Abriss.

Beim Abriss wird durch erhöhten Aufwand der Rückbau der Anlage vollzogen, die Fundamente der Anlage und Krantechnik zerstört und schrittweise abgetragen. Hierbei kommen Maschinen zum Einsatz, welche zum Betreiben fossile Energie benötigen und somit Emissionen verursachen.

Außerdem beeinflussen WEA das Mikroklima. „Zu diesem Schluss kommen die Ingenieure Lee M. Miller und David W. Keith, von der Harvard Universität, in einem Fachbeitrag, der im Oktober 2018 in der Zeitschrift „Joule“ erschienen ist. Nach ihren Erkenntnissen reduziert Windenergie zwar Emissionen. Gleichzeitig verursacht sie jedoch klimatische Veränderungen wie etwa wärmere Temperaturen in der Umgebung der Windparks.“<sup>92</sup>

Dies begründen die Ingenieure damit, dass die atmosphärische Strömung durch die WEA beeinflusst wird. Demnach werden Feuchtigkeit und Wärme nicht natürlich verteilt, sondern gelenkt.

---

<sup>91</sup> Ein Gebiet, in dem mehrere Windräder konzentriert in einem Gebiet, unter Einhaltung der Mindestabstände errichtet werden

<sup>92</sup> (Zinke, 2019)

Das Ergebnis dieser Studie belegt durch ein Modell, dass wenn die USA flächendeckend durch Windenergie ihren Strom autark erzeugen würde, sich die Oberflächentemperatur um 0,24 Grad Celsius erhöhen würde.<sup>93</sup> „Diese Erwärmung entsteht durch die Umverteilung der Wärme und das Durchmischen der Luftschichten durch die Turbinen der Windräder.“<sup>94</sup>

Somit ist die Belastung für Windenergien in Bezug auf das Klima folgendermaßen festzuhalten:

1. Spart Emissionen auf die gesamte Lebensdauer im Vergleich zu fossilen energieträgerbenötigten Kraftwerken ein
2. Verursacht die meisten Treibhausgase, bezogen auf den Lebenszyklus einer WEA, am Anfang und am Ende
3. WEA beeinflussen das Klima ihrer Umgebung negativ durch den Eingriff in die natürlichen Luftbewegungen

### **5.3.2 Belastung von Natur und Umwelt**

Neben dem Klima gehen weitere Umwelteinflüsse von WEA einher. So belasten die Anlagen auch ihre unmittelbare Umgebung und die darin lebenden Tiere. Aus einem Papier des „Bundesverband WindEnergie“ gehen verschiedene Daten bezüglich der Entwicklung und Gefährdung verschiedener Lebewesen hervor. So wird der Windenergie das Sterben von bis zu 100.000 Vögeln jährlich zugestanden. Verglichen mit anderen Ursachenquellen ist diese Zahl allerdings marginal. So verzeichnet der Sektor Verkehr beispielsweise 70 Millionen Vögel oder Glasscheiben sogar 115 Millionen jährlich, welche ableben. Der Milan, ein Raubvogel, der unter Artenschutz steht, ist aufgrund der Größe der Windräder besonders stark gefährdet. Eine weitere Teil der Studie kann allerdings auch den Mythos entkräften, dass WEA am Insektensterben mit verantwortlich seien. Insekten sind im Wesentlichen nicht von den Windenergieanlagen betroffen,

---

<sup>93</sup> Vgl. (Zinke, 2019)

<sup>94</sup> (Zinke, 2019)



da sie sich hauptsächlich in niedrigerer Höhe als die Rotorblätter bewegen.<sup>95</sup> Wenn Lebensräume von bestimmten Tierarten gefährdet sind, können WEA an dieser Stelle untersagt werden. In einer Ausarbeitung der Länderarbeitsgemeinschaften der Vogelschutzwarten (LAG VSW) werden beispielsweise für diesen Zweck verschiedene Abstandsempfehlungen je Vogelart definiert.<sup>96</sup> Auch Fledermäuse sind eine betroffene Tierart und unterliegen besonderem Schutz. „Fledermäuse verunglücken regelmäßig an WEA, in erster Linie durch Kollisionen mit den sich drehenden Rotorblättern oder Verletzungen durch Druckunterschiede im Nahbereich der Rotorblätter (...). In der zentralen Fundkartei der Staatlichen Vogelschutzwarte im Landesamt für Umwelt Brandenburg sind derzeit über 3000 Fledermaus-Schlagopfer an WEA in Deutschland gemeldet, was sicherlich nur einen Bruchteil der tatsächlichen Todesopfer widerspiegelt (...). Besonders betroffen sind die Arten Großer Abendsegler, Rauhautfledermaus, Zwergfledermaus, Kleinabendsegler, Zweifarbfledermaus, Mückenfledermaus und Breitflügelfledermaus (...)“<sup>97</sup> (Stand: 2018). Um diesem entgegenzuwirken werden die WEA zeitweise abgeschaltet. Die Zeiträume hierfür werden algorithmisch festgelegt.<sup>98</sup>

Die Auswirkung auf die Natur ist in mehrere Gesichtspunkte zu unterteilen. Zum einen beeinträchtigen WEA das Gesamtbild der Natur. Eine unnatürliche hohe Säule mit großen Flügeln, schmeichelt einer grünen Wiese eher weniger. Des Weiteren benötigen Windräder ausreichend Fläche für den Aufbau und verdichten damit den Boden unter sich. Hierbei wird das vorliegende Habitat vernichtet, um ein Fundament für die Anlage zu errichten. Diese Fundamente gehen mehrere Meter tief ins Erdreich und besetzen Fläche, an der normalerweise die Insektenwelt beherbergt wird.

Somit ist für die Natur und Tierwelt folgendes festzuhalten:

1. Vögel und Fledermäuse sterben aufgrund der Rotorblätter
2. Insekten sind nur auf dem Boden durch die WEA gestört

---

<sup>95</sup> Vgl. (Bundesverband WindeEnergie, 2019)

<sup>96</sup> Vgl. (Ländergemeinschaften der Vogelschutzwarten (LAG VSW), 2015)

<sup>97</sup> (Behr, et al., 2018), S. 378

<sup>98</sup> Vgl. (Behr, et al., 2018), S. 379

3. Optischer Eingriff in die vorliegende Natur, welcher negativ bewertet wird.

### 5.3.3 Belastungen für Menschen

Um die Belastungen auf den Menschen zu betrachten, muss man die einzelnen Komponenten des Lebenszyklus betrachten. In der ersten und zweiten Phase, der Initialisierung und Projektierung entstehen auf die Menschen noch keinerlei Belastungen.

In der Bauphase entstehen die Treibhausgase wie im Kapitel 4.3.1 bereits aufgeführt, was zu einem Temperaturanstieg in der Atmosphäre führen und somit das Klima für den Menschen und dessen Umwelt negativ beeinflussen kann.

Gesetze und Verordnungen grenzen den Rahmen des Errichten und Betriebens immer weiter ein. Hierbei wirken im Wesentlichen das BauGB mit den baulichen Maßgaben, das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) mit dem Schutze aller vor schädlichen Einflüssen sowie die Raumordnungspläne sowie länderspezifischen Flächenpläne (Flächennutzungspläne, Regionale Raumordnungsplanung, Bauleitplanung usw.) sowie die Verwaltungsvorschrift TA Lärm.

Schädliche Einflüsse, welche auf den Menschen durch Windräder verursacht werden, sind zum einen eine erdrückende Wirkung, wodurch sich Personen umliegender Siedlungen bedrängt fühlen können. Auch ist die Optik störend für den Blick in die Natur, wobei dies beides subjektive Aspekte sind. Eine weitere Komponente ist der von der WEA ausgehende Schall.

Schall

Zuerst muss hierbei zwischen Schallemissionen und Schallimmissionen differenziert werden. Schallemissionen sind die Geräusche, die von der WEA ausgehen. Schallimmissionen sind die aus der Ferne zu hörenden Geräusche, beispielsweise für Mensch und Tier aus einer bestimmten Entfernung.<sup>99</sup> „Für die Wahrnehmung von Geräuschen ist

---

<sup>99</sup> Vgl. (Neddermann, 2011)

die Schallausbreitung von der Quelle bis zum Einwirkungsort von wesentlicher Bedeutung. Es ist zu beachten, dass die Energie der Schallwellen mit dem Quadrat der Entfernung ( $\frac{1}{r^2}$ ) von der Schallquelle abnimmt. Die von der Schallquelle abgestrahlte Schallleistung, der Schallleistungspegel, charakterisiert dabei sozusagen die Ursache des Schalls. Für die Wahrnehmung des Schalls durch das menschliche Ohr ist jedoch der Schalldruck maßgeblich. Die Wirkung des Schalls wird deshalb durch den Schalldruckpegel ausgedrückt.<sup>100</sup>

Die zuvor genannte TA Lärm schreibt die Abstände in Bezug auf den Lärmpegel zu diversen Gebieten vor. Zusätzlich ist ein weiterer Faktor der Tag und Nachtzyklus (siehe Tabelle 3<sup>101</sup>).

**Tabelle 3 Lärmpegel nach TA Lärm für WEA**

	<b>tags</b>	<b>nachts</b>
Industriegebiete	70 dB(A)	70 dB(A)
Gewerbegebiete	65 dB(A)	50 dB(A)
Kerngebiete, Dorfgebiete, Mischgebiete	60 dB(A)	45 dB(A)
Wohngebiete, Kleinsiedlungsgebiete	55 dB(A)	40 dB(A)
Reine Wohngebiete	50 dB(A)	35 dB(A)
Kurgebiete, Krankenhäuser, Pflegeanstalten	45 dB(A)	35 dB(A)

In Industriegebieten liegt der Schwellenwert dabei am höchsten mit 70 dB. Diese Lautstärke ist zu vergleichen mit einem Wasserkocher oder Staubsauger. Dabei ist in Industriegebieten keine Abweichung zwischen Tag und Nacht. Bei allen anderen Gebieten sind Abweichungen in diesem Rhythmus gegeben. Besonders in Wohngebieten

<sup>100</sup> (Neddermann, 2011)

<sup>101</sup> (Neddermann, 2011), S. 5

dürfen nachts nur noch bis zu 35 Dezibel hörbar sein. Das ist vergleichbar mit dem Rascheln von Blättern oder die Lautstärke beim Flüstern.

Diese Lärmkulissenanalyse ist für eine WEA bedeutsam, denn sie muss sich an diese Richtwerte halten und demnach den Mindestabstand zu den einzelnen Gebietszonen einhalten. Andernfalls kann sich der Lärm so auf den Menschen einwirken, dass er langfristig bleibende Einschränkungen seiner Qualität hinnehmen müsste. Die Abstände zu den einzelnen Gebieten sind je nach Bundesland unterschiedlich bewertet, allerdings es gibt für übergeordnete Einheiten, wie es in 4.3.1.6 aufgeführt wird, Richtwerte, die bundesweit gelten und nicht zu unterschreiten sind.

Also ist für den Menschen Folgendes festzuhalten:

1. Temperaturanstieg durch produktions-, aufbau- und abrissverursachtes CO<sub>2</sub>.
2. Erdrückende, bedrängende Wirkung auf den Menschen
3. Optische Störung im Landschaftsbild
4. Schallimmissionen auf den Menschen

## 5.4 Bauarten einer WEA

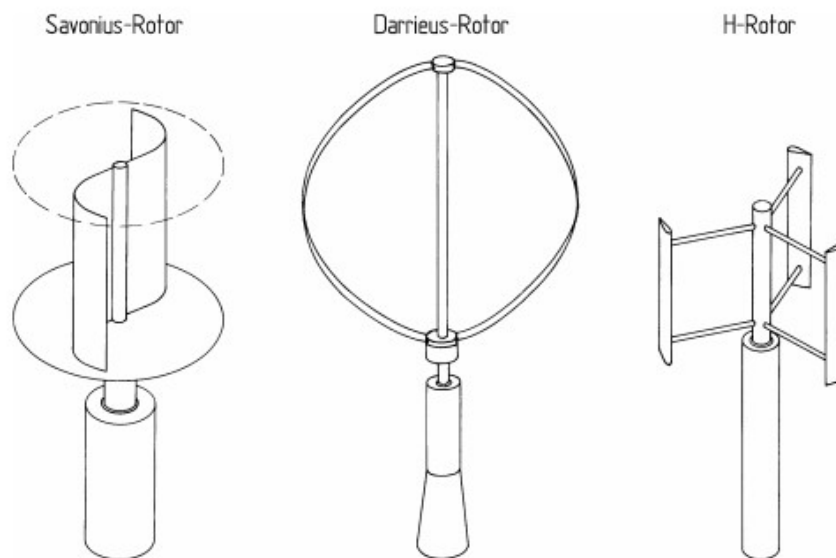
Grundlegend werden WEA in erster Linie nicht nach der Größe differenziert, sondern auf Grund ihrer technischen Bauweise. Historisch betrachtet gibt es eine Vielzahl an Bauformen, die sich bis in das Jahr 0 erstrecken, also rund 2.000 Jahre schon. Die Funktionsweisen aller WEA kann man in 4 Hauptgruppen unterscheiden. Zum einen das Auftriebsprinzip für WEA mit horizontaler Achse, dann das Auftriebsprinzip mit vertikaler Achse, sowie konzentrierende Maschinen und Das Prinzip des Widerstands.<sup>102</sup> In dieser Facharbeit wird sich auf die derzeit wesentlichen zur Verwendung findenden Bauweisen bezogen. Zusätzlich wird im Fazit eine vielversprechende neue Bauform aufgeführt, welche allerdings derzeit über eine noch nicht ausgereifte Technik verfügt.

---

<sup>102</sup> Vgl. (Jungbauer, 1998), S. 19

Für den Aufbau in Bezug auf die Ressourcen werden nun die Benchmarks festgelegt. Hierbei wird sich auf die bei der Herstellung **verbrauchten Güter** und die dabei entstandene Menge an **emittierten CO<sub>2</sub>e bezogen**. Später sollen noch **die tatsächliche mögliche Leistung und Auslastung** ermittelt und bewertet werden.

Heutzutage werden im Wesentlichen drei Bauweisen für WEA verwendet. Der Dreiblattrotor (DBR), dem sogenannten Darrieus-Rotor und der Savonius Rotor. Eine abgewandelte Form des Darrieus-Rotor ist der H-Rotor. Die wohl am bekanntesten und meist verwendete Variante ist der Dreiblattrotor. Dreiblattrotoren sind leicht an ihren drei langen „Flügeln“ zu erkennen, die hoch an einem Turm an der Gondel befestigt sind und sich vertikal drehen. Anders drehen sich die restlichen Bauweisen horizontal in ihrer Achse (siehe Abbildung 9). Die Verwendung dieser Bauweisen ist im Vergleich zu den Dreiblattrotoren marginal.<sup>103</sup> Aus diesem Grund wird sich diese Facharbeit mit diesen Bauweisen nicht auseinandersetzen und dient hier lediglich zu Aufzählungszwecken.



**Abbildung 9 Rotoren mit vertikaler Drehachse<sup>104</sup>**

<sup>103</sup> Vgl. (Hau, 2008), S. 66 ff.

<sup>104</sup> (Hau, 2008), S. 66

### 5.4.1 Dreiblattrotor-Windenergieanlage

Die Dreiblattrotor-Windenergieanlage (Abbildung 10) ist die am häufigsten vorkommende Bauweise. Sie zeichnet sich durch drei von außen gut sichtbare Merkmale aus. Das erste Merkmal bezieht sich auf die Größe – ein sehr hoher Turm auf dem die Nabe, also das Getriebe und somit das Herzstück der WEA liegt. Solche Türme erreichen Nabenhöhen von 10 bis über 160 Metern.<sup>105</sup> „Für den Turm kommen drei Varianten in Frage: der Stahlrohrturm, der Gitternetzturm oder der Betonturm. Früher kamen meist Gitternetzmasten, die von Hochspannungsleitungen her bekannt sind, zum Einsatz. In den vergangenen Jahren haben sich dann aus ästhetischen Gründen Strahlrohrtürme durchgesetzt. Aufgrund der stark gestiegenen Stahlpreise und zunehmender Transportprobleme bei den großen Rohrsegmenten für die größten Anlantypen werden heute vermehrt auch Beton- und Gitternetztürme verwendet.“<sup>106</sup> Auf diesem Turm ist eine Gondel aufgesetzt, welche die technischen Baugruppen innehat. Horizontal an der Gondel gekoppelt befinden sich frontal drei Rotorblätter, welche sich durch den Wind in Bewegung setzen und dadurch den Generator antreiben.

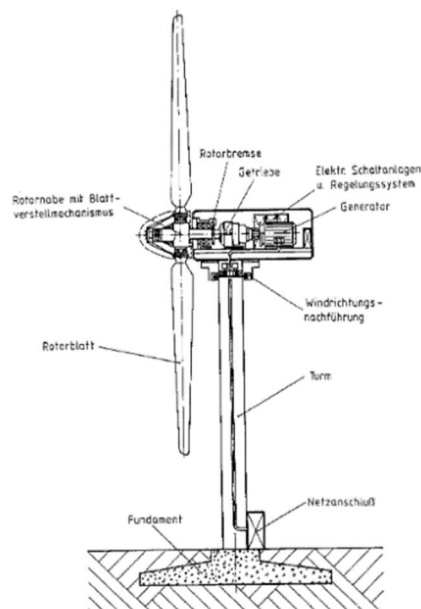


Abbildung 10 DBR-Windenergieanlage<sup>107</sup>

<sup>105</sup> In Anlehnung an Abbildung 5.6 (Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), 2017), S. 39

<sup>106</sup> (Quaschnig, 2009), S. 232

<sup>107</sup> (Jungbauer, 1998), S. 15

Um eine Windenergieanlage zu errichten, bedarf es eines vorherigen Fundaments. Da WEA sowohl an Land (Onshore) als auch auf hoher See (Offshore) errichtet werden können, müssen diese deshalb getrennt voneinander betrachtet werden. Der zusätzliche Aufwand für das Fundament im Meer ist je nach Tiefe des Gewässers unterschiedlich. Aus diesem Grund bezieht sich der Autor für den Aufbau im Folgenden ausschließlich auf Onshore Windkraftanlagen.

#### **5.4.1.1 Fundament**

Für das Fundament (Abbildung 11) wird ein Aushub von – je nach Größe des Windrades – drei bis vier Metern Tiefe mit einem Durchmesser von rund 20 Metern abgetragen, um es folglich mit einer Schalung zu umranden sowie mit Bewehrung und Beton zu versehen.<sup>108</sup> Für das Fundament benötigt man rund 1.000 Tonnen Beton. Die Menge der Bewehrung für das Fundament umfasst in Abhängigkeit der Größe zusätzlich 52,3



**Abbildung 11 Fundament mit Schalung und Bewehrung einer WEA<sup>109</sup>**

---

<sup>108</sup> Vgl. (Andre, 2018)

<sup>109</sup> (Knake, 2015)

Tonnen Stahl.<sup>110</sup> Neben dem Hauptfundament für das Windrad werden zusätzlich versiegelte<sup>111</sup> Flächen benötigt, um die Krantechnik betriebssicher zu gewährleisten, welche für die Errichtung der einzelnen Bauteile unabdingbar ist. Eine solche Fläche umfasst neben den rund 0,2ha für das Windrad nochmals 0,15 ha, also insgesamt 0,35 ha.

#### **5.4.1.2 Turm**

Heutzutage kommen für den Turm drei verschiedene Bauvarianten zum Einsatz. Es gibt Stahlrohtürme, Betontürme, Gitternetztürme und Hybridtürme (Stahlbeton). Der Gitternetzturm ist auch von Hochspannungsmasten bekannt. Aufgrund von ästhetischen Gründen werden heutzutage allerdings mehrheitlich vollummantelte Türme verbaut aus Stahl und oder Beton. Bei Gitternetztürmen kommt lediglich halb so viel Stahl zum Einsatz, wie bei einem Stahlrohturm. In Regionen mit günstigen Arbeitslöhnen können diese Türme immer noch rentabel aufgebaut werden. Die Materialkosten sind bei dieser Bauweise am geringsten. Allerdings ist für den Aufbau ein großer Zeitaufwand notwendig, was die Lohnkosten unproportional zu anderen Bauweisen steigen lässt und somit für Deutschland nicht mehr lohnend ist. Der Transport der Materialien an Ort und Stelle ist hierbei unproblematisch, da die Türme vor Ort errichtet werden und die Einzelteile keinen besonderen Raum einnehmen. Stahlrohtürme werden in verschiedenen Formen produziert. Es gibt sie in konischer, unterkonischer und zylindrischer Form. Aufgrund des Gewichts von Stahl wiegt ein Turm für eine Windenergieanlage bei einer Turmhöhe von 120 Metern Höhe 250 Tonnen. Um einen Stahlurm an Ort und Stelle aufbauen zu können, benötigt es einiger zusätzlicher Aufwendungen. Stahltürme dieser Größe werden in lediglich 5 Teilstücke geteilt, bei dem jedes eine Größe von 20 bis 30 Metern besitzt. Hierbei ist der Transport problematisch zu betrachten, da normale Brückenhöhen zu niedrig sind, um diese Segmente an Ort und Stelle

---

<sup>110</sup> Vgl. (Pomrehm, 2015)

<sup>111</sup> Versiegelte Flächen sind alle Flächen die „bebaut, betoniert, asphaltiert, gepflastert oder anderweitig befestigt [sind]. Damit gehen wichtige Bodenfunktionen, vor allem die Wasserdurchlässigkeit und die Bodenfruchtbarkeit, verloren.“ (Quelle: Umweltbundesamt: Bodenversiegelung vom 12.02.2020. Abgerufen am 22. November 2020: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/boden/bodenversiegelung>)



über die Autobahn zu transportieren. Für Betontürme kommt Stahlbeton zum Einsatz. Um einen Turm aus Stahlbeton zu errichten, benötigt man, verglichen mit einem Stahlrohrturm, etwa fünfmal so viel Material. Durch das derartig größere Gewicht muss das Fundament folglich auch an die veränderten Gegebenheiten angepasst werden und verbraucht mehr Material. Der Vorteil dieser Bauweise sind allerdings die günstigeren Schallemissionen, also der von der WEA ausgehende Lärmpegel. Außerdem bieten solche Türme bessere Schwingungseigenschaften als reine Stahltürme. Dies kann für mehr Sicherheit sorgen.<sup>112</sup> Die zuletzt aufgeführte Variante sind die Hybridtürme. Der Hybridturm (siehe Abbildung 12) besteht im unteren Teil aus Stahlbeton und im oberen Bereich aus Stahl. Diese Variante kommt grundsätzlich für große WEA in Betracht, da Sie das Transportproblem der unteren großen Segmente umgehen, welches bei reinen Stahltürmen der Fall ist.<sup>113</sup>

---

<sup>112</sup> Vgl. (Quaschnig, 2009), S. 232 ff.

<sup>113</sup> Vgl. (Bundesverband WindEnergie e. V. (BWE), 2020)



**Abbildung 12 Aufstellung eines Hybridturms einer WEA<sup>114</sup>**

Sowohl Türme der Art Stahlrohrturm, Betonturm als auch Hybridturm werden im Normalfall in zwei bis fünf Segmente geteilt geliefert, wobei jedes Segment eine Höhe von 20 bis 30 Metern besitzt. Ein solches Segment beinhaltet ein Gewicht von bis zu 250 Tonnen. Diese werden am Einsatzort aufeinander aufgestapelt und verbunden.<sup>115</sup>

#### **5.4.1.3 Gondel**

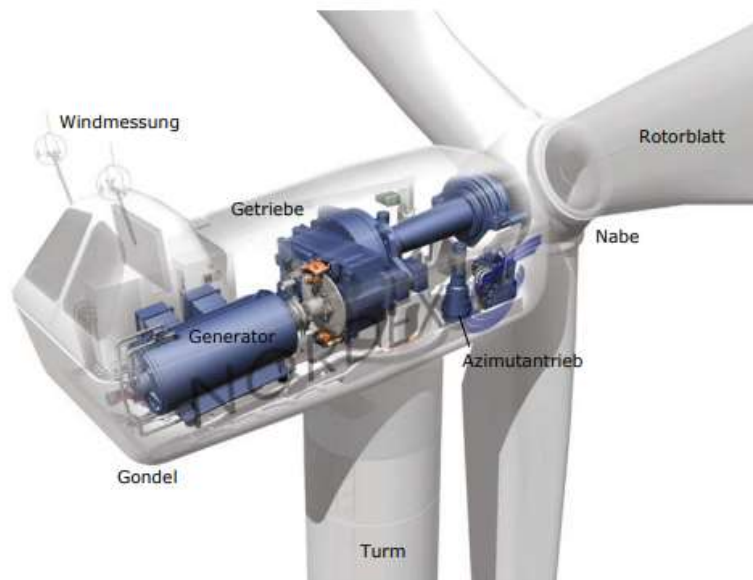
Die Gondel beherbergt die technische Baugruppe und wird deshalb auch als Maschinenhaus bezeichnet. Sie wird auf den Turm der entstehenden Windkraftanlage ohne

---

<sup>114</sup> (DYWIDAG, 2020)

<sup>115</sup> Vgl. (BWE, 2020)

vormontierte Rotorblätter gekoppelt und kann sich in ihrer Achse horizontal bewegen, um sich in die Windrichtung hinein oder aber auch hinaus zu bewegen. Da der Turm im inneren mindestens mit einer Steigleitung versehen wird – oder in großen modernen Anlagen sogar mit Fahrstuhl –, erreicht man über Diesen das in der Gondel liegende Maschinenhaus. Sie wiegt bei einer Anlage mit 3 MW Nennleistung rund 130 bis 150 Tonnen und besteht aus den Werkstoffen Stahl, Aluminium, Kupfer und Stahlguss.<sup>116,117</sup> Die Gondel wird inklusive vormontierter Maschinen an den Einsatzort geliefert. Die Elektroanlage, welche in der Gondel sitzt, verfügt über verschiedene technische Einheiten (siehe Abbildung 13).<sup>118</sup>



**Abbildung 13 Aufbau einer WEA<sup>119</sup>**

Den Hauptanteil der Anlage macht dabei der Generator, der den Strom erzeugt und das Getriebe zur Übersetzung der Drehbewegung aus. Des Weiteren befinden sich an

---

<sup>116</sup> Vgl. (Quaschnig, 2009), S. 233, 234

<sup>117</sup> Vgl. (Thomas, 2011)

<sup>118</sup> Vgl. (BWE, 2020)

<sup>119</sup> (Quaschnig, 2009), S. 233

der Gondel für die Windmessung und zur Erfassung der Windrichtung und Windgeschwindigkeit ein Windmesser sowie der Azimutantrieb. Dieser Antrieb ist der Stellmotor, um die Gondel und damit die Rotorblätter nach dem Wind auszurichten.<sup>120</sup>

Für die derzeit größte im Offshore-Betrieb verwendete Gondel, ist die von Siemens Gamesa entwickelte „SG 14-222 DD“. Diese verfügt über eine Nennleistung von bis zu 15 MW bei einem Rotordurchmesser von 222 Metern.<sup>121</sup>

#### **5.4.1.4 Rotorblätter**

An die Gondel über eine Nabe gekoppelt drehen sich Rotorblätter, um die Windenergie abzufangen und sie direkt an das Maschinenhaus weiterzugeben, um so Strom zu erzeugen. Je nach Windgeschwindigkeiten können die Rotorblätter in ihrer Längsachse justiert werden, um die Drehzahl und somit die Leistungsabgabe einzustellen. Diese Justierung ist wichtig, um die Leistung des Windrades optimal auszunutzen, aber auch um Überlastungen und so mögliche Schäden zu verhindern. Die Rotorblätter können je nach Größe des Windrades eine Länge von über 100 Metern erreichen. Diese werden meist auf Tiefladern an Ort und Stelle transportiert. Sind die Rotorblätter nicht zu lang, können alle drei auf einem LKW mit einer Fahrt transportiert werden. Ist dies nicht der Fall und die Rotorblätter sind bedeutend länger als 35 Meter, müssen diese oftmals einzeln geliefert werden.<sup>122</sup>

Je nach Bauweise und Größe sowie Einsatzort der WEA bestehen Rotorblätter aus verschiedenen Werkstoffgemischen. Hauptsächlich kommen heutzutage glasfaserverstärkte Kunststoffe zum Einsatz. Meistens ist es Epoxidharz mit eingebetteten Glasfasern (GFK<sup>123</sup>). Auch Kohlefasern (CFK<sup>124</sup>) sind heutzutage immer mehr in den für die

---

<sup>120</sup> Vgl. (Aurich (DE) Patentnr. WO 01/86141 A1, 2001)

<sup>121</sup> Vgl. (Akoto, 2020)

<sup>122</sup> Vgl. (Bundesverband WindEnergie e. V. (BWE), 2020)

<sup>123</sup> GFK = glasfaserverstärkter Kunststoff

<sup>124</sup> CFK = kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff

Rotorblätter verwendeten Kunststoffverbund enthalten, da diese eine sehr gute Festigkeitseigenschaften mitbringen. Hintergrund für die Verwendung derartig komplexer Materialien ist, dass die Rotorblätter ganz besondere Eigenschaften besitzen müssen und dennoch sämtlichen Witterungsverhältnissen ausgesetzt werden. Ein solcher Rotor wird neben starken Winden auch dauerhafter Sonne, einfallendem Regen, Schnee und sämtlichen anderen Witterungsfällen ausgesetzt. Diesen Witterungen müssen die Rotoren mitunter 20 Jahre und länger Widerstand leisten.<sup>125</sup>

Im Folgenden werden, die für die gesamte WEA verwendeten Materialien eine Übersicht geboten und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Umwelt kalkuliert.

## **5.4.2 Emissionen bei der Errichtung**

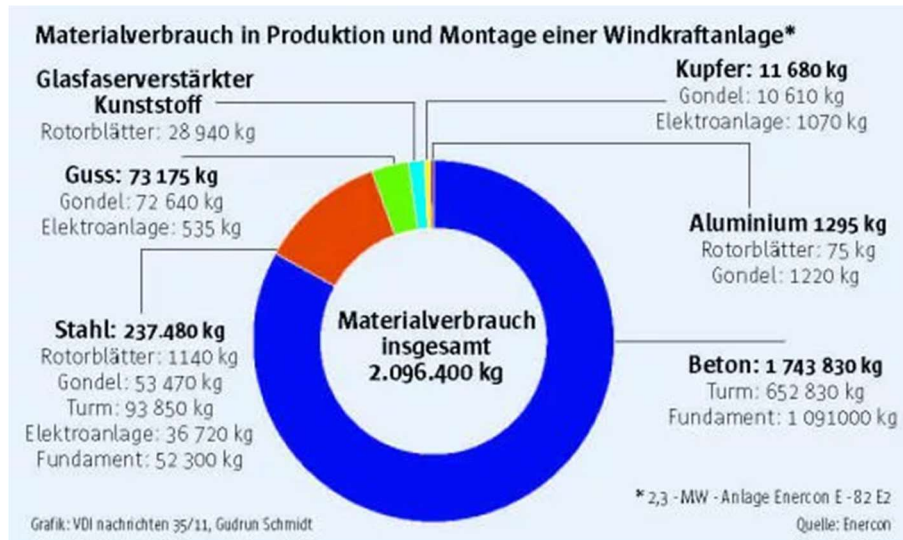
Die für die Materialwirtschaft verwendeten Daten beziehen sich auf den WEA-Typen E82-E2 vom Hersteller Enercon mit einer Nabenhöhe von 85 Meter.

### **5.4.2.1 Materialwirtschaft**

In Bezug auf die Produktion und der Montage einer Windkraftanlage vom Typ Enercon E-82 E2 hat der Hersteller Enercon eine Auflistung für die einzelnen Materialbereiche erstellt (Abbildung 13). Somit ergeben sich für die einzelnen Bereiche die aufgeführten Mengen an Materialverbrauch. Nun müssen die einzelnen Bereiche genauer betrachtet werden, um die Umweltbelastung der Materialien genauer zu betrachten. Hierbei ist es notwendig die einzelnen Segmente aufzuschlüsseln und auf den Arbeitsprozess bei der Produktion und Montage zu achten.

---

<sup>125</sup> Vgl. (Crome, 2018)



**Abbildung 14 Materialwirtschaft für ein Windkraftrad<sup>126</sup>**

Somit werden die einzelnen Bereiche im Folgenden materialbezogen selektiert:

**Tabelle 4 Materialaufwand je Baugruppe in kg**

Material / Pos.	Fundament	Turm	Gondel	Rotorblätter	Elektroanlage
<b>Beton</b>	1.091.000	652.830	-	-	-
<b>Stahl</b>	52.300	93.850	53.470	1.140	36.720
<b>Guss</b>	-	-	72.640	-	535
<b>Aluminium</b>	-	-	1.220	75	-
<b>Kupfer</b>	-	-	10.610	-	10.610

<sup>126</sup> (Thomas, 2011) Alter Typ mit geringerer Höhe und Leistung als heutzutage im Regelfall verwendet. Für die Materialwirtschaft allerdings ein ausreichendes Beispiel.

<b>Kunststoff<sup>127</sup></b>	-	-	-	28.940	-
---------------------------------	---	---	---	--------	---

Da diese Materialien in Verfahren mit fossilen Energien hergestellt werden, werden bei der Produktion Treibhausgase freigesetzt. Die hierbei entstandenen Gase sind dem Werkstoff direkt zuzuordnen. Um nun diese zu berechnen werden die spezifischen CO<sub>2</sub>-Äquivalente verwendet. Eine Besonderheit stellt hierbei die Position der Rotorblätter dar, da diese in einem sehr aufwendigen Prozess hergestellt werden. Sie bestehen aus GFK und CFK (Epoxidharz und Carbon).

Verwendet werden für

$$\text{Beton} = 323,8 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \text{CO}_2e$$

$$\text{Stahl} = 1.444 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \text{CO}_2e$$

$$\text{Guss} = 2.500 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \text{CO}_2e$$

$$\text{Aluminium} = 17.000 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \text{CO}_2e$$

$$\text{Kupfer} = 220 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \text{CO}_2e$$

$$\text{Glasfaserverstärkter Kunststoff}^{128} 30.100 = \frac{\text{g}}{\text{kg}} \text{CO}_2e$$

Somit ergeben sich für die einzelnen Abschnitte folgende CO<sub>2</sub>-Äquivalente:

<sup>127</sup> Bestehend aus Glasfaserverstärkten Kunststoff (GFK) und Kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff (CFK)

<sup>128</sup> CFK: 29.500 g/kg CO<sub>2</sub>e zzgl. GFK: 150 g/kg

Formel: Masse \* Emission je kg

Fundament (CO<sub>2</sub>e)

$$\begin{aligned}
 &= 1.091.000 \text{ kg}_{\text{Beton}} * 323,8 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \text{CO}_2\text{e} + 52.300 \text{ kg}_{\text{Stal}} \\
 &* 1.444 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \text{CO}_2\text{e} \\
 &= \mathbf{428.787 \text{ kg CO}_2\text{e}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Turm (CO}_2\text{e)} &= 652.830 \text{ kg}_{\text{Beton}} * 323,8 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \text{CO}_2\text{e} + 93.850 \text{ kg}_{\text{Stahl}} * 1.444 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \text{CO}_2\text{e} \\
 &= \mathbf{346.905,75 \text{ kg CO}_2\text{e}}
 \end{aligned}$$

Gondel (CO<sub>2</sub>e)

$$\begin{aligned}
 &= 53.470 \text{ kg}_{\text{Stahl}} * 1.444 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \text{CO}_2\text{e} + 72.640 \text{ kg}_{\text{Guss}} * 2.500 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \text{CO}_2\text{e} \\
 &+ 1.220 \text{ kg}_{\text{Aluminium}} * 17.000 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \text{CO}_2\text{e} + 10.610 \text{ kg}_{\text{Kupfer}} \\
 &* 220 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \text{CO}_2\text{e} \\
 &= \mathbf{281.884,88 \text{ kg CO}_2\text{e}}
 \end{aligned}$$

Rotorblätter (CO<sub>2</sub>e)

$$\begin{aligned}
 &= 1.140 \text{ kg}_{\text{Stahl}} * 1.444 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \text{CO}_2\text{e} + 75 \text{ kg}_{\text{Aluminium}} * 17.000 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \text{CO}_2\text{e} \\
 &+ 28.940 \text{ kg}_{\text{GFK/CFK}} * 31.100 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \text{CO}_2\text{e} \\
 &= \mathbf{902.955,16 \text{ kg CO}_2\text{e}}
 \end{aligned}$$

Elektroanlage (CO<sub>2</sub>e)

$$\begin{aligned}
 &= 36.720 \text{ kg}_{\text{Stahl}} * 1.444 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \text{CO}_2\text{e} + 535 \text{ kg}_{\text{Guss}} * 2.500 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \text{CO}_2\text{e} \\
 &+ 10.610 \text{ kg}_{\text{Kupfer}} * 220 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \text{CO}_2\text{e} \\
 &= \mathbf{56.695,38 \text{ kg CO}_2\text{e}}
 \end{aligned}$$



Die Rotorblätter verursachen mit einem Anteil von 44,8 Prozent fast die Hälfte aller bei der Produktion entstandenen Treibhausgase, gefolgt vom Fundament mit 21,3 Prozent. Weniger ins Gewicht dagegen fällt die Elektroanlage mit nur 2,8 Prozent. Insgesamt beträgt die Menge der in der Produktion angefallenen Menge 217.017.438,17 kg CO<sub>2e</sub>, also rund 217 Tonnen CO<sub>2</sub>. Zum Vergleich, ein Braunkohlekraftwerk setzt pro Kilowattstunde (kWh) zwischen 790 und 1080 Gramm CO<sub>2</sub> frei.<sup>129</sup> Auf die Menge an Treibhausgasen, die bei der Produktion entstünden, bezogen, könnten hierfür 217 Terawattstunden Strom, in Bezug auf die Emissionen, durch ein Braunkohlekraftwerk erzeugt werden. Das entspricht rund 40 Prozent des in Deutschland derzeit benötigten Strom innerhalb eines Jahres.

Die bei der Produktion gemischten Metalle und auch Metall-Nichtmetall-Gemische werden nach Ablauf der Nutzungsphase aufwendig recycelt oder teilweise zwischengelagert. Für fast alle, in einer Windenergieanlage verwendeten Materialien existieren geeignete Entsorgungswege“, sagt Elisa Seiler vom Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT), „wodurch eine Recyclingquote von 80 bis 90 Prozent erreicht werden kann.“<sup>130</sup> Gerade der Verbundstoff aus Epoxidharz und glasfaser- oder kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff, welcher für die Rotorblätter Verwendung findet, ist besonders hart. Ihre Stabilität für die Nutzungsphase macht das Recycling schwerer. Aufgrund eines Verbotes aus dem Jahr 2005, aus dem das Deponieren von GFK-Abfällen untersagt wird, ist das Lagern dieser ausgedienten Rotorblätter nicht möglich. Bis vor kurzem war der Werdegang folgender, die Rotorblätter wurden mit reichlich Energieaufwand geschreddert und die Metallbestandteile abgeschieden. Das restliche Material kam entweder als Sandersatz der Zementmischung bei oder in kleinen Mengen in Müllverbrennungsanlagen als Brennstoff. Dank stetiger Forschung ist es heutzutage möglich, die GFK-Reste besser zu recyceln und zu verbrennen.<sup>131</sup>

---

<sup>129</sup> Vgl. (Carstens, 2018)

<sup>130</sup> (Crome, 2018)

<sup>131</sup> Vgl. (Crome, 2018)

### 5.4.2.2 Emissionen durch Transportwege

Da je nach Größe, Typ, Leistung und Gegebenheiten unterschiedliche Eigenschaften für die WEA bestehen, gilt dies auch für die mit ihr in Verbindung stehenden Transportstrecken. Große WEA benötigen mehr Logistikaufwand als Kleinere. Im Folgenden werden die einzelnen Transportwege für alle aus dem Aufbau genannten Bereiche aufgeführt und ihr CO<sub>2</sub>-Äquivalent dabei annähernd ermittelt.

- **Transportfahrten für das Fundament**

- Für den Transport der Materialien des Fundaments fallen unzählige Fahrten mit Schwerlastkraftwagen an. Für die Menge des Betons gibt die Organisation Beton 125 LKW-Fahrten mit Betonmischern an.<sup>132</sup> Da für LKW im Stahlbewehrungssegment eine maximale Ladekapazität inklusive Eigengewicht ohne Sondergenehmigung 40 Tonnen nicht überschreiten darf, werden hierfür zusätzlich 4 Fahrten angenommen, sodass rund 129 Fahrten für die Bewehrung notwendig sind, plus einen Kran zur Verladung von Gütern.<sup>133</sup> Für diese Fahrten wird eine vereinfachte Berechnung zur Ermittlung des verursachten CO<sub>2</sub>e angewandt.
- Es wird eine einfache Strecke von 20 km zum Errichtungsort festgelegt. Daraus ergibt sich bei 129 Fahrten eine Gesamtstrecke von 5.160 km.

Geg.: (m<sub>1</sub>) = 2.600 t Durchschnittsgut für Fahrt m<sub>1</sub> = 20,8 t<sup>134</sup> ≙ 125 Fahrten

(m<sub>2</sub>) = 160 t Durchschnittsgut für Fahrt m<sub>2</sub> = 40 t ≙ 4 Fahrten

CO<sub>2</sub>-Rechner<sup>135</sup> zur Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Äquivalents für die LKW-Fahrten:

---

<sup>132</sup> Vgl. (Dyckerhoff GmbH, 2020)

<sup>133</sup> Vgl. (bauformstahl Deutscher Stahlbau. Gut beraten., 2013)

<sup>134</sup> In Anlehnung an die Vorgabe der Organisation beton.org: „125 Mischfahrten“

<sup>135</sup> Von Arktik.de. Abgerufen am 23.11.2020: <https://www.arktik.de/CO2-Bilanz-Logistik/> zur Berechnung des CO<sub>2</sub>-Äquivalents für LKW. Dieses Kalkulationstool berücksichtigt neben der Distanz zusätzlich das ausgewählte Vehikel und das Frachtvolumen.

einfache Fahrt:  $CO_2e_{Beton} = 30,33 \text{ kg } CO_2e$

einfache Fahrt:  $CO_2e_{Stahl} = 58,33 \text{ kg } CO_2e$

Gesamtfahrten:  $CO_2e_{Gesamt} = (30,33 \text{ kg } CO_2e * 250) +$   
 $(58,33 \text{ kg } CO_2e * 8)$

$$CO_2e_{Gesamt} = \mathbf{8.049,14 \text{ kg } CO_2e} \cong \mathbf{8,049 \text{ t } CO_2e}$$

Demnach werden allein durch die Fahrten für das Fundament zur Materiallieferung rund 8 Tonnen CO<sub>2</sub> freigesetzt.

Nachdem die notwendigen Fahrten für ein Fundament berechnet und die damit einhergehenden Emissionen kalkuliert wurden, ist die nächste Baugruppe der Turm.

### Transportwege für den Turm:

Für den Transportweg werden wie in der vorherigen Berechnung pauschal 20 Kilometer angesetzt. Ausgehend von einer WEA mit einer Turmhöhe von 90 Metern und einem Gewicht von 660 Tonnen. Es werden 3 Fahrten angesetzt mit je 30 Metern Höhe.

Geg.:  $(m_1) = 660\text{t}$       Durchschnittsgut für Fahrt  $m_1 = 220 \text{ t} \cong 3 \text{ Fahrten}$

CO<sub>2</sub>-Rechner zur Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Äquivalents für die LKW-Fahrten:

einfache Fahrt:  $CO_2e_{Turm} = 320,80 \text{ kg } CO_2e$

Gesamtfahrten:  $CO_2e_{Gesamt} = (320,80 \text{ kg } CO_2e * 6)$

$$CO_2e_{Gesamt} = \mathbf{1.924,80 \text{ kg } CO_2e} \cong \mathbf{1,9248 \text{ t } CO_2e}$$

Im Folgenden werden für die Gondel und die Elektroanlage die Transportwege zusammengefasst, da diese Baugruppe zusammengehört.

### Transportwege für Gondel + Elektroanlage:

Angenommen wird eine Gondel inklusive Elektroanlage und Getriebe mit 150 Tonnen Gesamtgewicht. Hierfür ist lediglich eine Fahrt notwendig, da das Maschinenhaus im Ganzen vormontiert geliefert wird.

Geg.:  $(m_1) = 150t$

Durchschnittsgut für Fahrt  $m_1 = 150 t \triangleq 1$  Fahrt

CO<sub>2</sub>-Rechner zur Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Äquivalents für die LKW-Fahrten:

einfache Fahrt:  $CO_2e_{Turm} = 218,73 \text{ kg } CO_2e$

Gesamtfahrten:  $CO_2e_{Gesamt} = (218,73 \text{ kg } CO_2e * 2)$

$CO_2e_{Gesamt} = \mathbf{437,46 \text{ kg } CO_2e} \triangleq \mathbf{0,43746 \text{ t } CO_2e}$



## 6 Auswertung

### 6.1 Auswertung der Umweltbelastung

Im Folgenden werden die einzelnen Teilergebnisse der Berechnungen aus Kapitel 5.4.2.1 und 5.4.2.2 tabellarisch erfasst. Anschließend werden die Teilabschnitte gewichtet und bewertet.

**Tabelle 5 Auswertung der Materialwirtschaft**

Pos.	Menge in kg CO <sub>2</sub> e	Anteil in %
Fundament	428.787,00	21,26
Turm	346.905,75	17,20
Gondel	281.884,88	13,97
Elektroanlage	56.695,38	2,81
Rotorblätter	902.955,16	44,76
<b>Gesamt</b>	<b>2.017.228,17</b>	<b>100</b>

**Tabelle 6 Auswertung der Logistik**

Fundament	8.049,14	73,91
Turm	2.175,66	19,97
Gondel	402,46	3,70
Elektroanlage		
Rotorblätter	262,5	2,41
<b>Gesamt</b>	<b>10.889,76</b>	<b>100</b>

**Tabelle 7 Kombinierte Auswertung**

Pos.	Menge in kg CO <sub>2</sub> e	Anteil in %
Fundament	436,836,14	21,54
Turm	349.081,41	17,21
Gondel	338.982,72	16,71

Elektroanlage		
Rotorblätter	903.217,66	44,54
<b>Gesamt</b>	<b>2.028.077,03</b>	<b>100</b>

In der Kalkulation macht die Produktion einen Anteil in Höhe von 99,47 Prozent des ermittelten CO<sub>2</sub>e aus. Demnach trägt die Logistik einen marginalen Anteil von 0,53 Prozent. Den größten Anteil mit 44,5 Prozent, also knapp der Hälfte, tragen die Rotorblätter gefolgt vom Fundament mit 21,54 Prozent. Während der Nutzungsphase ist eine WEA klimafreundlich und verursacht keine nennenswerten Kohlenstoffdioxid-Emissionen. Lediglich bei der Stilllegung, der Trockenlegung, dem Rückbau und Abriss entstehen erneut Emissionen. In einem Schreiben des Bundesverbands Windenergie wird für diesen Bereich circa ein Prozent nochmals aufgeschlagen, also zusätzliche 20.280 kg CO<sub>2</sub>e. Somit erhält man einen Gesamtwert von 2.048.357,03 kg CO<sub>2</sub>e, Also rund 2 Tonnen CO<sub>2</sub>e.<sup>136</sup>

Eine WEA vom Typ Enercon E-82 E2 mit einer Nabenhöhe von 85m, produziert bei 1.880 Volllaststunden rund 6.000 MWh pro Jahr.<sup>137</sup> Das macht eine Gesamtleistung von 120.000 MWh, bei einer durchschnittlichen Lebenserwartung von 20 Jahren.

Nun wird die Leistung mit den Emissionen ins Verhältnis gebracht, um einen Vergleichswert mit anderen Energiegewinnungsanlagen zu erhalten. Dies bezeichnet man als CO<sub>2</sub>-Intensität. Im fossilen Energiegewinnungssegment wird hierbei das Verhältnis bewertet, wie viel Kohlenstoffdioxid pro erzeugter Energieeinheit entsteht. Dies wird mit g CO<sub>2</sub> pro kWh angegeben. Zu beachten ist folgender Hintergrund: Je länger eine Anlage betrieben wird, desto besser ist der berechnete Wert.<sup>138</sup>

$$\begin{aligned}
 \text{CO}_2 - \text{Intensität} &= \frac{\text{CO}_2 - \text{Äquivalent}}{\text{elektrische Arbeitsleistung}} \\
 &= \frac{2.048.357.030,00 \text{ g CO}_2\text{e}}{120.000 \text{ MWh}} = \mathbf{17,07 \text{ g} \frac{\text{CO}_2}{\text{kWh}}}
 \end{aligned}$$

<sup>136</sup> Vgl. (BWE Bundesverband WindEnergie, 2017), S. 3

<sup>137</sup> Vgl. (Enercon, 2020). Technische Angaben zum Typ Enercon E-82 E2

<sup>138</sup> Vgl. (bundestag, 2007)

Heutige Anlagen produzieren laut den Ausarbeitungen der Hersteller bedeutend weniger CO<sub>2</sub>. Hintergrund dafür sind andere Berechnungsgrundlagen. Hier können Abweichungen der Volllaststunden der Fall sein, da diese mitunter bis zu 2.500 Volllaststunden angegeben wird für den Onshore-Betrieb. Des Weiteren können Abweichungen der Lebensdauer nach oben vorliegen, was zusätzlich eine Begünstigung der CO<sub>2</sub>-Intensität abbildet. Variiert man für dieses Rechenbeispiel die soeben genannten Determinanten auf 2.500 Volllaststunden pro Jahr und einer erwarteten Lebensdauer von 25 Jahren würde man auf nur noch 10,27 g CO<sub>2</sub> je kWh kommen. Erhöht sich der Wirkungsgrad der Anlage durch mehr Wind, höhere Türme und größere Rotorblätter, ist die Umgebung begünstigend für die Anlage, können bessere Intensitäten erzielbar sein. Verglichen mit fossiler Energiegewinnung wie beispielsweise der Braunkohle, sind diese Werte allerdings marginal. Ein Braunkohlekraftwerk verursacht für die Produktion einer Kilowattstunde immerhin über ein Kilogramm CO<sub>2</sub>.<sup>139</sup> In folgender Tabelle sind die CO<sub>2</sub>-Intensitäten anderer Kraftwerksarten exemplarisch aufgelistet, um einen sichtbaren Vergleich zu anderen Kraftwerksarten herzustellen.

**Tabelle 8 CO<sub>2</sub>-Intensitäten verschiedener Kraftwerksarten<sup>140</sup>**

<b>Kraftwerksart</b>	<b>CO<sub>2</sub>-Intensität in g CO<sub>2</sub> / kWh</b>
Kohlekraftwerk	1.170
Kernkraftwerk	12
Gaskraftwerk	330
BHKW	280
Biomasse	130
Photovoltaik	60-180
Wasserkraftwerk	2.200

<sup>139</sup> Vgl. (bund-nrw, 2020)

<sup>140</sup> Vgl. (Quasching, 2015)



Schlussfolgernd ist festzustellen, dass die Windenergie im Abstand bessere CO<sub>2</sub>-Bilanzen aufweist als die restlichen Kraftwerksarten. Dies wird sicherlich auch einer der Hauptgründe sein, warum sich Deutschland sequenziell am intensivsten auf die Windkraft fokussiert, da in ihr die beste Möglichkeit, in Bezug auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoß bei der Stromgewinnung, besteht einzusparen.

Neben der Kohlenstoffbelastung trägt die Windenergie zu unnatürlichen Windbewegungen und somit einer Erwärmung der Bodenflächen bei. Auch werden diverse Tierarten in ihrem Lebensraum gestört und gefährdet. Besonders Vögel und Fledermäuse sind hierbei betroffen, wobei der Anteil im Verhältnis zu anderen Gefährdungsstätten der Tiere auch hier wieder als geringfügig einzustufen ist.

Heutzutage können die Materialien einer Windenergieanlage komplett recycelt werden und im Wirtschaftskreislauf weiterverarbeitet werden. Somit ist auch der nachhaltige Aspekt der verwendeten Güter gegeben.

Als faktisch negative Position sind die Belastungen auf den Menschen zu bewerten. Diese werden allerdings durch diverse Gesetze, Verordnungen und anderen verbindlichen Vorgaben heutzutage sehr gut reguliert, sodass der Mensch keine objektiven Einschränkungen durch diese Anlagen hinnehmen muss.

## **6.2 Flächen- und energiebedingte Auswertung**

357.581 km<sup>2</sup> Fläche bietet uns das Land. Für die Windenergie bleiben hiervon aufgrund mehrerer Einschränkungen und Gebote nur noch ein Bruchteil davon übrig. Die Raumordnungsplanung auf verschiedenen Ebenen sowie die Flächennutzungspläne und Bauleitpläne geben hierbei die Richtung, wo gebaut werden darf und wo nicht. Insgesamt verbleiben derzeit für die Windenergie rund 3.132 km<sup>2</sup> Fläche zur Verfügung, von der bereits 150 km<sup>2</sup> zum Stand Februar 2020 verbaut ist. Die restlichen Flächen werden aus diversen Gründen ausgeschlossen. Entweder aus naturschutzrechtlicher Sicht o-

der aber, weil diese Flächen bereits bebaut, beziehungsweise ungeeignet sind. Ungeeignet sind all die Flächen bei denen die Kriterien der Hangneigung, Bodenrauigkeit sowie dem vorliegenden Wind und seiner Windhöffigkeit. Einschränkungen bezüglich der Umwelt bilden eine zusätzliche Determinante für Einschränkungen der Flächennutzung für WEA. Sind Natur und oder Tier gefährdet, sind solche Flächen ebenfalls ausgeschlossen.

In Deutschland liegt der Bedarf ( $W_v$ ) derzeit bei 604 TWh im Jahr, Tendenz steigend. Da diese Facharbeit die Möglichkeit der Autarkie hinterfragt, wird im Folgenden eine Abwägung der Machbarkeit in Bezug auf die mögliche Leistung der Windenergie durchgeführt.

Folgende Berechnung ist unter Vorbehalt verschiedener Annahmen und keine verbindliche Angabe, da aufgrund der verschiedenen Determinanten, welche ortsabhängig sind, keine allgemeine Aussage hierfür möglich ist. Die Datenmenge für eine solche Kalkulation würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Des Weiteren sind Kalkulationen in diesem Segment immer von sich ständig ändernden Naturereignissen wie der Witterung und dem Klima abhängig, weshalb eine solche Kalkulation auch mit Vorlage eines umfangreichen Datensatzes immer nur eine Momentaufnahme ist. Dazu kommt, dass Investoren unterschiedliche Modelle und damit unterschiedliche Leistungen verbauen können. Um Plausibilität in die Berechnung zu bringen, wird flächendeckend und unberücksichtigt von der vorliegenden Windhöffigkeit und anderen Determinanten, vom Typ E82-E2 mit einer Nennleistung von 2,3 MW ausgegangen.

Bei einer Gesamtfläche von 357.581 km<sup>2</sup>, ausgehend von einer derzeit gesicherten Fläche von 3132 km<sup>2</sup> ( $A_{\text{gesichert}}$ ) ist noch hinreichend Kapazität für die nächsten Jahre, um WEA zu errichten. Derzeit verfügt Deutschland über rund 30.925 WEA Onshore und Offshore, 29.456 davon im Bereich Onshore. Derzeit sind knapp 150 km<sup>2</sup> bebaut was eine Restkapazität von 2.982 km<sup>2</sup> bedeutet. Pro Anlage ( $A_{\text{Anlage}}$ ) benötigt man 0,4 ha, also 0,004 km<sup>2</sup>. Rechnet man nun die Anlagenmenge auf die derzeit gesicherte Fläche hoch, so erhält man eine Gesamtmenge ( $WEA_{\text{Gesamt}}$ ) an WEA, die für Deutschland zum heutigen Stand flächentechnisch realisierbar ist.

$$WEA_{Gesamt} = \frac{A_{Anlage}}{A_{gesichert}}$$

$$WEA_{Gesamt} = \frac{0,004 \text{ km}^2}{3.132 \text{ km}^2}$$

$$WEA_{Gesamt} = \mathbf{783.000}$$

Demnach ist festzuhalten, dass Deutschland über eine Flächenkapazität für noch 783.000 weitere Windräder hat. Die durchschnittliche Leistung einer WEA vom Typ E82-E2 wird laut Hersteller mit 6.000 MWh ( $W_i$ ) im Jahr angegeben. Also wird die Gesamte Arbeitsleistung ( $W_{ges}$ ) der 783.000 Windräder folgendermaßen ermittelt:

$$W_{ges} = WEA_{Gesamt} * W_i$$

$$W_{ges} = 783.000 * 6.000 \text{ MWh}$$

$$W_{ges} = 4.698.000.000 \text{ MWh}$$

$$W_{ges} = \mathbf{4.698 \text{ TWh}}$$

Somit

$$W_{ges} > W_v$$

$$4.698 \text{ TWh} > 604 \text{ TWh}$$

Rein von der Kalkulation her wäre es denkbar möglich, den Bedarf für den benötigten Strom zu erzeugen. Allerdings wird diese Zahl kritisch betrachtet.

Derzeit gibt es keine Technik, eine solche Strommenge über einen längeren Zeitraum zu speichern, wodurch der saubererzeugte Strom höchstwahrscheinlich exportiert werden müsste und im Bedarfsfall andere Energieträger zusätzlich zum Einsatz kommen. Ein weiterer Fakt ist, dass WEA komplett abhängig von der Witterung sind, was keine flächendeckend gleichmäßige Sicherung des ständigen Bedarfs an elektrischer Energie decken würde. Somit wäre auch aus diesem Grund eine Abhängigkeit von anderen Energieträgern vorhanden.

Möglichkeiten bestehen allerdings in der Umwandlung des erzeugten Stroms, um ihn in ein speicherbares Medium zu verwandeln. Hierfür gibt es diverse Möglichkeiten. Mit dem Begriff „Power to X“ werden diese Verfahren bezeichnet und derzeit immer weiter in ihren Möglichkeiten erforscht. Dadurch besteht beispielsweise die Möglichkeit, die

durch die Windkraft gewonnene elektrische Energie in Wasserstoff umzuwandeln, welcher durch weitere Verfahren auch in synthetische Kraft- und Brennstoffe umgewandelt werden kann. Wasserstoff und andere Brennstoffe können dann für verschiedenste Einsatzgebiete verwendet werden. Eine Übersicht hierfür ist in Abbildung x zu sehen. Ein wesentlicher Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die vorhandene elektrische Energie in sämtliche andere Energien umgewandelt und somit nutzbar gemacht werden kann, gleich ob es für den Verkehr, Wärme, Kälte oder aber auch für die Industrie ist. Dennoch ist als wesentlicher Nachteil die Volatilität der Versorgung zu berücksichtigen, was eine autarke Versorgung nach Ansicht des Autors als eher unwahrscheinlich erscheinen lässt. Verbindet man die Windenergie mit anderen nachhaltigen Energieträgern, so würde es Möglichkeiten geben diese Lücken zu schließen, die bei der Windenergie entstehen.<sup>141</sup>

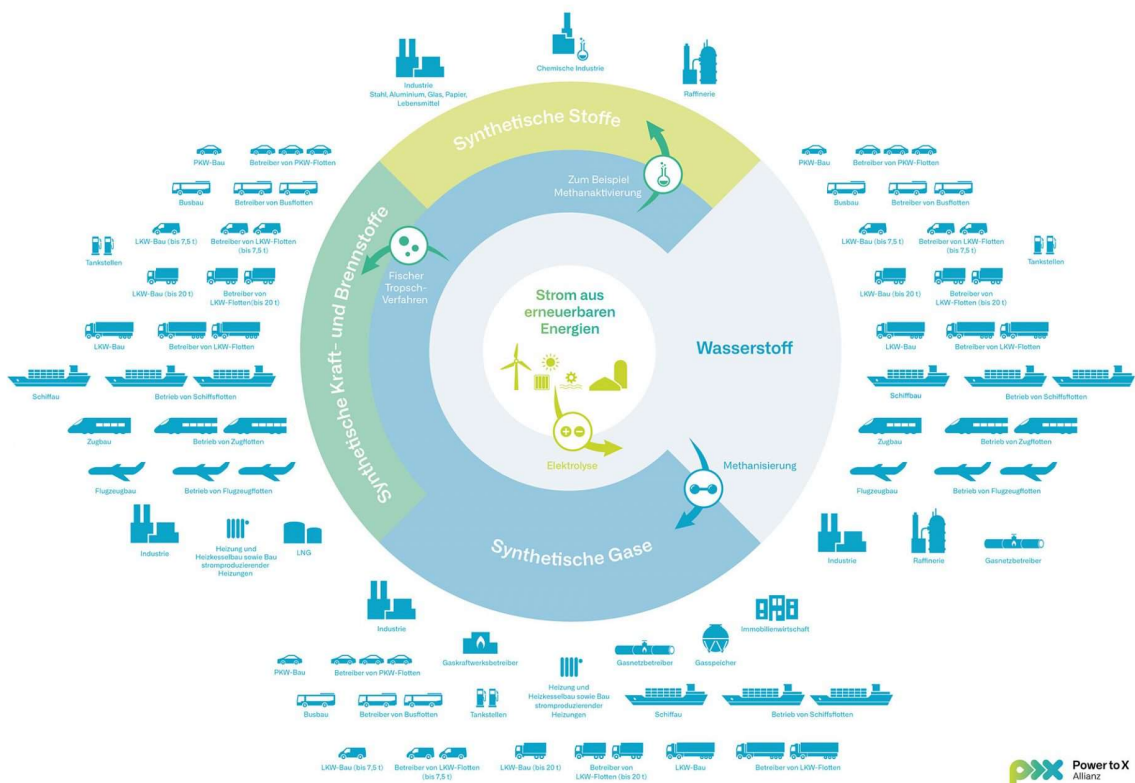


Abbildung 15 Power to X Umwandlung und Nutzungsmöglichkeiten<sup>142</sup>

<sup>141</sup> Vgl. (Power to X Allianz, 2020)  
<sup>142</sup> (Power to X Allianz, 2020)

Des Weiteren ist der erhebliche Materialverbrauch für eine solche Anzahl an WEA immens. Bei einem Verbrauch an Rohstoffen insgesamt von 2.096.400 kg pro WEA würde das einen Gesamtverbrauch von 1.641.481.200.000 kg bedeuten, also 1.641 Millionen Tonnen. Dieser Wert ist zu vergleichen mit der Stahlproduktion weltweit für ein ganzes Jahr mit 1.691 Millionen Tonnen. Als Maßstab, Deutschland produziert circa 42 Millionen Tonnen Stahl im Jahr.<sup>143</sup>

Forschungen auf Ebene der Windenergie versprechen für diesen Materialverbrauch Hoffnung. Eine neue Variante, welche derzeit noch in den Kinderschuhen für die Massenproduktion steckt, verspricht nur noch einen Bruchteil an Material für die Windenergie zu verbrauchen. Die Rede ist hierbei von der sogenannten Kitecraft. Die Idee dahinter ist, kleine Stationen auf dem Boden oder als schwimmende Boie auf dem Wasser zu platzieren, an denen eine Art Drachen gekoppelt ist. Diese steigen im Wind auf und bewegen sich. Diese Auftriebsenergie versetzt dabei die Leine, an dem der sogenannte „Microgrid“ angelegt ist in Bewegung und erzeugt dabei elektrische Energie.<sup>144</sup>

---

<sup>143</sup> Vgl. (Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2019), S. 2

<sup>144</sup> Vgl. (Isensee, Bauer, Drexler, & Fridrich, 2020)

## 7 Fazit

Ganz nach dem Prinzip von Hans Carl Carlowitz ist heute der Trend der Energiewende. Die Energiegewinnung der Zukunft wird durch den Begriff der Nachhaltigkeit geprägt. In Bezug auf die Umwelt muss unser Bedarf von Energie so gesättigt werden, dass wir die Natur dabei nicht ausbeuten oder gefährden. Wir dürfen die Natur nicht ausbeuten, um unseren Nutzen davon zu ziehen, ohne hierbei den Fokus auf die zukünftigen Generationen zu verlieren. Die bisher zum größten Teil genutzten fossilen Ressourcen sind auf dieser Erde lediglich endlich. Seit dem 19. Jahrhundert forschen Wissenschaftler am anthropogenen Treibhauseffekt. Es bildeten sich seither eine Vielzahl an Institutionen und Vereinigungen, um gegen die Klimaerwärmung vorzugehen. Forschung und Wirtschaft sind sich hierbei im Klaren, dass die Energiewende zur CO<sub>2</sub>-neutralen Energiegewinnung zwingend notwendig ist, um den Temperaturanstieg, der durch die Treibhausgase entsteht einzudämmen. Deshalb platzieren sich die erneuerbaren Energien als Zugpferd der Energiewende und versprechen dabei, nachhaltig zu agieren. In dieser Facharbeit wurde die Möglichkeit der Autarkie in Bezug auf die Windkraft für Deutschland untersucht und ist zu dem Ergebnis gekommen, dass diese rein zahlen-technisch realisierbar wäre, wenn die Windkraft nicht von unregelmäßig und unvorhersehbaren Witterungsbedingungen abhängig wäre unter der Voraussetzung, dass alle derzeit für die Windkraft gesicherten Flächen laut Raumordnungsplanung ausgebaut werden. Dadurch würde sogar eine Überversorgung entstehen, wodurch andere ärmere Länder gestützt werden könnten. Aufgrund der auch heute noch kaum vorhandenen Speichermöglichkeiten elektrischer Energie, macht es allerdings nur zum Teil Sinn, Energiegewinnung allein über die Windkraft abzubilden. Windkraft ist eine sehr saubere Energiegewinnung, wenn man sie mit fossiler Energiegewinnung vergleicht. Die Energiewirtschaft verursacht heutzutage immer noch den größten Posten des anthropogenen Treibhauseffekts. Im direkten Vergleich von Windkraft zu Braunkohle macht das Verhältnis der CO<sub>2</sub>-Intensität von rund 1:100 einen erheblichen Unterschied in der Bilanz. Langfristig betrachtet liegt hier ein erheblicher Vorteil in der Windkraft.

Nachteilig zu betrachten ist, dass die Windkraft einen nicht unerheblichen Materialbedarf verursacht. Ein weiterer negativer Aspekt ist, dass die Windkraft wohl auch für Erderwärmung durch unnatürliche Luftbewegungen verantwortlich sein kann. Neutral bewertet werden kann der Umstand, dass Lebewesen durch die Windenergie gefährdet sein können, denn hierbei greifen eine Vielzahl an Voruntersuchungen und Reglementierungen ein, um diese zu schützen. Insgesamt kann die Windkraft allerdings als eine sehr positiv zu bewertende Energiegewinnungsform betrachtet werden, die wie jede andere Energiegewinnungsanlage ihre Stärken und Schwächen aufweist.

Da es noch weitere erneuerbare beziehungsweise regenerative Energien gibt wie beispielsweise die Biomasse, die Energie aus Abfallprodukten gewinnt und dennoch auf eine schwarze Null in der CO<sub>2</sub>-Bilanz kommt, sämtliche aus der Sonne gewonnenen Energien sowie die noch nicht ausreichend erforschte Geothermie können alle dazu beitragen, dass die Energie in Zukunft weiterhin gesichert wird – aber GRÜN.

## 8 Literatur- und Quellenverzeichnis

- Ahlborn, D.-I. D. (1. Juni 2013). *Vernunftkraft - Bundesinitiative für vernünftige Energiepolitik*. Abgerufen am 29. November 2020 von <https://www.vernunftkraft.de/dreisatz/>
- Akoto, P. (19. Mai 2020). *ener|gate messenger +*. Abgerufen am 2. Dezember 2020 von <https://www.energate-messenger.de/news/202596/siemens-gamesa-kuendigt-14-mw-windrad-an>
- Andre, K. (26. März 2018). *Blog ErneuerbareEnergien.NRW*. Abgerufen am 28. November 2020 von | Fachbeitrag | Das Fundament von Windenergieanlagen: Was passiert beim Rückbau?: <https://www.energieagentur.nrw/blogs/erneuerbare/beitraege/das-fundament-von-windenergieanlagen-was-passiert-beim-rueckbau/>
- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen. (21. Oktober 2020). *Destatis Statistisches Bundesamt*. Abgerufen am 29. November 2020 von <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Energie/Erzeugung/Tabellen/bruttostromerzeugung.html>
- bauforumstahl Deutscher Stahlbau. Gut beraten. (01. März 2013). Arbeitshilfe Ausführung von Stahlbauten - Transport. Düsseldorf, Nordrhein-Westfalen, Deutschland. Abgerufen am 12. Dezember 2020 von [https://bauforumstahl.de/upload/documents/publikationen/arbeitshilfen/Arbeitshilfe\\_05-05.pdf](https://bauforumstahl.de/upload/documents/publikationen/arbeitshilfen/Arbeitshilfe_05-05.pdf)
- Bayrisches Landesamt für Umwelt. (25. November 2020). *Bayrisches Landesamt für Umwelt*. Abgerufen am 25. November 2020 von <https://www.lfu.bayern.de/klima/klimaschutz/treibhausgase/index.htm>
- Behr, O., Brinkmann, R., Hochradel, K., Mages, J., Korner-Nievergelt, F., Reinhard, H., . . . Nagy, M. (2018). *Bestimmung des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen in der Planungspraxis (RENEBAT III)*. Universität Erlangen-Nürnberg. Abgerufen am 1. Dezember 2020 von <http://windbat.techfak.fau.de/Abschlussbericht/renebat-iii.pdf>
- BMU (Hrsg.). (09. Mai 2017). *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit*. Abgerufen am 29. November 2020 von <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/internationale-klimapolitik/pariser-abkommen/>



- Bons, M., Döring, M., Klessmann, C., Knapp, J., Tiedemann, S., Pape, C., . . . Stappel, M. (1. Juni 2019). Analyse der kurz- und mittelfristigen Verfügbarkeit von Flächen für die Windenergienutzung an Land. Dessau-Roßlau, Sachsen, Deutschland.
- Breitkopf, A. (01. 12 2019). *Statista*. Abgerufen am 29. November 2020 von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/153533/umfrage/stromimportsaldo-von-deutschland-seit-1990/>
- Breitkopf, A. (21. Dezember 2020). *Statista*. Abgerufen am 29. Dezember 2020 von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/153267/umfrage/bruttostromerzeugung-in-deutschland-seit-1990/>
- Breitkopf, A. (24. März 2020). *Statista*. Abgerufen am 28. November 2020 von <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/153267/umfrage/bruttostromerzeugung-in-deutschland-seit-1990/>
- Breitkopf, A. (18. August 2020). *Statista*. Abgerufen am 2. Dezember 2020 von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2142/umfrage/erneuerbare-energien-anteil-am-stromverbrauch/>
- Breitkopf, A. (31. Juli 2020). *Statista*. Abgerufen am 3. Dezember 2020 von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/37610/umfrage/jahresvolllaststunden-deutscher-kraftwerke-im-jahr-2009/>
- Breitkopf, A. (19. Oktober 2020). *Statista*. Abgerufen am 20. Dezember 2020 von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/13121/umfrage/verbleibende-reststrommengen-deutscher-kernkraftwerke/>
- Bundesamt der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (6. November 2020). *bdew Energie. Wasser. Leben*. Abgerufen am 10. Dezember 2020 von <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/jahresvolllaststunden/>
- Bundesinstitut für Bau-, -Stadt- und Raumforschung (BBSR). (2016). *Ausbaukontroverse Windenergie*. Stuttgart: Franz Steiner Verlag.
- Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat. (12. November 2020). *Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat*. Abgerufen am 2. Dezember 2020 von <https://www.bmi.bund.de/DE/themen/bauen-wohnen/bauen/energieeffizientes-bauen-sanieren/energieausweise/gebäudeenergiegesetz-node.html>
- Bundesnetzagentur. (1. Dezember 2020). *Bundesnetzagentur*. Abgerufen am 1. Dezember 2020 von [https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen\\_Institutionen/Ausschreibungen/Wind\\_Onshore/Wind\\_Onshore\\_node.html](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Ausschreibungen/Wind_Onshore/Wind_Onshore_node.html)

- Bundesregierung. (2011). *Menschenrechtsverletzungen und Umweltzerstörung durch Uranabbau in Niger*. Berlin: H. Heenemann GmbH & Co. Buch und Offset Druckerei.
- bundestag. (2007). *CO2-Bilanzen verschiedener Energieträger im Vergleich*. Berlin: Deutscher Bundestag. Abgerufen am 2. Dezember 2020
- Bundesverband WindeEnergie. (1. August 2019). *Bundesverband WindEnergie BWE*. Abgerufen am 1. Dezember 2020 von [https://www.winde-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/meldungen/2019/Online\\_-\\_Poster\\_zur\\_Naturschutzbroschuere\\_-\\_20190823\\_-\\_FINAL.PDF](https://www.winde-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/meldungen/2019/Online_-_Poster_zur_Naturschutzbroschuere_-_20190823_-_FINAL.PDF)
- Bundesverband WindEnergie BWE. (1. Juni 2018). *wind-energie*. Abgerufen am 1. Dezember 2020 von [https://www.winde-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/hintergrundpapiere-oeffentlich/themen/Technik/20180611\\_bwe\\_hintergrundpapier\\_rueckbau.pdf](https://www.winde-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/hintergrundpapiere-oeffentlich/themen/Technik/20180611_bwe_hintergrundpapier_rueckbau.pdf)
- Bundesverband WindEnergie e. V. (BWE). (25. November 2020). *Bundesverband WindEnergie*. Abgerufen am 14. Dezember 2020 von <https://www.winde-energie.de/themen/anlagentechnik/konstruktiver-aufbau/turm-und-mast/>
- bund-nrw. (1. Dezember 2020). *Bund Friends of the Earth Germany*. Abgerufen am 1. Dezember 2020 von <https://www.bund-nrw.de/themen/braunkohle/hintergruende-und-publikationen/braunkohle-und-umwelt/braunkohle-und-klima/>
- Bürgerinitiative BI-Berken. (22. November 2020). *bi-berken*. Abgerufen am 22. November 2020 von [http://bi-berken.de/resources/Dimensionen+Windkraftanlagen\\_.pdf](http://bi-berken.de/resources/Dimensionen+Windkraftanlagen_.pdf)
- BWE. (12. November 2020). *Bundesverband WindEnergie e. V.* Abgerufen am 3. Dezember 2020 von [https://www.winde-energie.de/fileadmin/\\_processed\\_/b/8/csm\\_Wind\\_Factsheet\\_BWE\\_2019-Block1\\_ea2ed8b8f6.jpg](https://www.winde-energie.de/fileadmin/_processed_/b/8/csm_Wind_Factsheet_BWE_2019-Block1_ea2ed8b8f6.jpg)
- BWE Bundesverband WindEnergie. (1. November 2017). *BWE*. Abgerufen am 12. Dezember 2020 von [https://www.winde-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/02-technik-und-netze/09-rueckbau/20170930\\_hintergrundpapier-oekobilanz-von-windenergieanlagen.pdf](https://www.winde-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/02-technik-und-netze/09-rueckbau/20170930_hintergrundpapier-oekobilanz-von-windenergieanlagen.pdf)
- Carstens, P. (18. September 2018). *GEO*. Abgerufen am 5. Dezember 2020 von Was ist eigentlich so klimaschädlich an Braunkohle?: <https://www.geo.de/natur/nachhaltigkeit/19619-rtkl-stromerzeugung-was-ist-eigentlich-so-klimaschaedlich-braunkohle#312294-darum-setzt-braunkohle-pro-kw-h-besonders-viel-co2-frei>

- Crome, K. (12. April 2018). *Blog ErneuerbareEnergien.NRW*. Abgerufen am 4. Dezember 2020 von <https://www.energieagentur.nrw/blogs/erneuerbare/beitraege/recycling-wie-werden-rotorblaetter-entsorgt/>
- Deutsche Sektion der Internationalen Ärzte für die Verhütung des Atomkrieges – Ärzte in sozialer Verantwortung e. V. (IPPNW). (20. November 2020). *Hibakusha*. (E. A.–Ä. (IPPNW), Hrsg.) Abgerufen am 20. November 2020 von Hibakusha - worldwide: <https://hibakusha-worldwide.org/de/orte/arlit-und-akokan>
- Deutscher Bundestag. (13. November 2019). *Deutscher Bundestag*. Abgerufen am 28. Dezember 2020 von <https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2019/kw46-de-bundesklimaschutzgesetz-667190>
- Deutscher Wetterdienst. (20. 11 2020). *Wetter und Klima aus einer Hand*. Abgerufen am 13. Dezember 2020 von [https://www.dwd.de/DE/leistungen/windkarten/deutschland\\_und\\_bundeslaender.html](https://www.dwd.de/DE/leistungen/windkarten/deutschland_und_bundeslaender.html)
- Die Bundesregierung. (18. Dezember 2015). *Die Bundesregierung*. Abgerufen am 13. Dezember 2020 von <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/erdkabel-statt-freileitung-388676>
- Dr. Paschotta, R. (16. Oktober 2020). *Energie-Lexikon*. Abgerufen am 6. Dezember 2020 von <https://www.energie-lexikon.info/oelkraftwerk.html>
- Dyckerhoff GmbH. (20. April 2020). *beton.org*. Abgerufen am 7. Dezember 2020 von <https://www.beton.org/aktuell/news/details/beton-fuer-windenergie/>
- DYWIDAG. (7. Dezember 2020). *DYWIDAG*. Abgerufen am 7. Dezember 2020 von <https://www.dywidag-systems.com/de/projekte/2010-info-18/dywidag-fertigspannglieder-sichern-innovative-windturbine-mit-ats-hybridturm/>
- Einig, K., & Dr. Zaspel-Heisters, B. (1. Januar 2014). *Windenergieanlagen und Raumordnungsgebiete*. (S. u. Bundesinstitut für Bau-, Hrsg.) Abgerufen am 7. Dezember 2020 von [https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/analysen-kompakt/2014/DL\\_01\\_2014.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/analysen-kompakt/2014/DL_01_2014.pdf?__blob=publicationFile&v=3)
- EnBW. (11. November 2020). *EnBW*. Abgerufen am 29. November 2020 von <https://www.enbw.com/energie-entdecken/energieerzeugung/konventionelle-erzeugung/kohlekraftwerk.html>
- Enercon. (2. Dezember 2020). *Enercon*. Abgerufen am 2. Dezember 2020 von <https://www.enercon.de/produkte/ep-2/e-82/>

- Fachagentur Windenergie an Land. (22. November 2020). *Fachagentur-Windenergie*.  
Abgerufen am 22. November 2020 von [https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/Faktenpapiere/FA\\_Wind\\_Hoeh enbegrenzungen\\_Wind-an-Land\\_03-2019.pdf](https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/Faktenpapiere/FA_Wind_Hoeh enbegrenzungen_Wind-an-Land_03-2019.pdf)
- FIS - Forschungs-Informationssystem. (09. Januar 2020). *Mobilität und Verkehr*.  
Abgerufen am 27. November 2020 von <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/53282/>
- Fourier, J. B. (1824). *Remarques Générales Sur Les Températures* (Bd. 27). (A. d. Physique, Hrsg.) Burgess.
- Fraunhofer-Institut. (02. Januar 2020). *Fraunhofer ISE*. Abgerufen am 27. November 2020 von <http://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/news/2019/oeffentliche-nettostromerzeugung-in-deutschland-2019.html>
- Fraunhofer-Institut. (30. November 2020). *Windmonitor*. Abgerufen am 30. November 2020 von [http://windmonitor.iee.fraunhofer.de/windmonitor\\_de/3\\_Onshore/2\\_technik/4\\_anla gengroesse/](http://windmonitor.iee.fraunhofer.de/windmonitor_de/3_Onshore/2_technik/4_anla gengroesse/)
- Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES). (2017). *Windenergie Report Deutschland 2016*. (P. D. Rohrig, Hrsg.) Ochsenfurt-Hohestadt: FRAUENHOFER VERLAG.
- geg-info. (20. November 2020). *geg-info GebäudeEnergieGesetz*. Abgerufen am 4. Dezember 2020 von <https://geg-info.de/>
- Grober, U. (10. April 2013). *natur.de*. Abgerufen am 4. Dezember 2020 von <https://www.wissenschaft.de/umwelt-natur/die-entdeckung-der-nachhaltigkeit-3/>
- Hau, E. (2008). *Windkraftanlagen - Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit*. Berlin: Springer Vieweg.
- Hermann, H., Eltges, M., & Kaltenbrunner, R. (2015). *Ausbaukontroverse Windenergie*. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. Stuttgart: Franz Steiner Verlag.
- Hupfer, P., Kuttler, W., Chmielewski, F.-M., & Pethe, H. (2005). *Witterung und Klima*. Wiesbaden: Teubner-Verlag.
- Isensee, M., Bauer, F., Drexler, C., & Frirdrich, A. (10. Dezember 2020). *Kite//Kraft*. Abgerufen am 10. Dezember 2020 von <https://www.kitekraft.de/>
- Jerzy, N. (6. Juni 2020). *Capital Wirtschaft ist Gesellschaft*. Abgerufen am 12. Dezember 2020 von <https://www.capital.de/wirtschaft-politik/laenderranking-oekostrom>

- Jungbauer, A. (1. Januar 1998). Analyse der Windkraftanlagen Eberschwang und Laussa. *Windenergienutzung in einem regenerativen Energiesystem*. Graz, Österreich. Abgerufen am 25. November 2020 von <https://elite.tugraz.at/diplomarbeiten/Jungbauer.pdf>
- Klimarahmenkonvention, S. d. (Hrsg.). (1997). Das Protokoll von Kyoto. *Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen*, (S. 40). Kyoto.
- Knake, M. (3. Februar 2015). *Wattenrat*. Abgerufen am 24. November 2020 von <https://www.wattenrat.de/2015/02/03/rueckbau-von-windkraftanlagen-wer-entsorgt-die-fundamente/>
- Krappweis, S. (29. Dezember 2020). *Regionalplanung in Deutschland*. Abgerufen am 29. Dezember 2020 von <http://www.planung-tu-berlin.de/Profil/Regionalplanung.htm>
- Ländergemeinschaften der Vogelschutzwarten (LAG VSW). (15. April 2015). *nabu*. Abgerufen am 29. November 2020 von Abstandsempfehlungen für Windenergieanlagen zu bedeutsamen Vogellebensräumen sowie Brutplätzen ausgewählter Vogelarten: [https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/vogelschutz/150526-lag-vsw\\_-\\_abstandsempfehlungen.pdf](https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/vogelschutz/150526-lag-vsw_-_abstandsempfehlungen.pdf)
- MDR. (23. Juli 2019). *Mitteldeutscher Rundfunk*. (MDR, Herausgeber) Abgerufen am 24. November 2020 von <http://www.mdr.de/wissen/umwelt/klimawandel-tiere-kommen-nicht-mit-100.html>
- myclimate.org. (12. November 2020). *myclimate shape our future*. Abgerufen am 12. Dezember 2020 von <https://www.myclimate.org/de/informieren/faq/faq-detail/was-sind-co2-aequivalente/>
- Neddermann, B. (1. August 2011). Schallimmissionen von Windenergieanlagen. *Schallimmissionen von Windenergieanlagen*. (R. I.-A. e.V., Hrsg.) Hannover. Abgerufen am 1. Dezember 2020 von [https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Schall/2011-08-30\\_RIB\\_Hintergrundpapier-Schallimmissionen\\_FA-Wind.pdf](https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Schall/2011-08-30_RIB_Hintergrundpapier-Schallimmissionen_FA-Wind.pdf)
- Nuklearsicherheit.de. (12. November 2020). *Sicherheit in der Kerntechnik Ein Informationsportal von Bund und Ländern*. Abgerufen am 24. November 2020 von [www.nuklearesicherheit.de/P380](http://www.nuklearesicherheit.de/P380)
- Osterhage, W. (2019). *Chancen und Grenzen der Energieverwertung*. Wachtberg, Nordrhein-Westfalen, Deutschland: Springer Vieweg.

- Plappert, M.-L., Rudolph, M., & Vollmer, C. (1. März 2019). *Umweltbundesamt*. Abgerufen am 29. Dezember 2020 von Auswirkungen von Mindestabständen zwischen Windenergieanlagen und Siedlungen: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-03-20\\_pp\\_mindestabstaende-windenergieanlagen.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-03-20_pp_mindestabstaende-windenergieanlagen.pdf)
- Pomrehm. (15. April 2015). *Telepolis*. Abgerufen am 27. November 2020 von heise online: <https://www.heise.de/tp/features/Wie-klimafreundlich-ist-Windkraft-3371277.html>
- Poppe, M. (24. April 2019). Deutschland verschenkt Strom-Millionen an Frankreich – auf Kosten der Verbraucher. Focus Online. Abgerufen am 10. Dezember 2020 von [https://www.focus.de/immobilien/energiesparen/regenerative\\_energie/negative-strompreise-deutschland-verschenkt-tausende-euro-ans-ausland-die-rechnung-zahlt-der-verbraucher\\_id\\_8309486.html](https://www.focus.de/immobilien/energiesparen/regenerative_energie/negative-strompreise-deutschland-verschenkt-tausende-euro-ans-ausland-die-rechnung-zahlt-der-verbraucher_id_8309486.html)
- Power to X Allianz. (5. Dezember 2020). *Power to X Allianz*. Abgerufen am 5. Dezember 2020 von <https://www.ptx-allianz.de/innovation-fuer-klimaschutz/anwendungen-von-power-to-x/>
- ProOxygen. (Tagesaktuelle und Historische CO<sub>2</sub>-Werte). *co2-earth*. Abgerufen am 9. Dezember 2020 von <https://www.co2.earth/>
- Quasching, V. (1. Juni 2015). *Erneuerbare-Energien-und-Klimaschutz.de*. Abgerufen am 20. Dezember 2020 von [volker-quasching.de](http://volker-quasching.de): <https://www.volker-quaschning.de/datserv/CO2-spez/index.php>
- Quaschning, V. (2009). *Erneuerbare Energien und Klimaschutz*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
- Redaktion SimplyScience.ch. (10. Oktober 2012). *Simply Science*. Abgerufen am 12. Dezember 2020 von <https://www.simplyscience.ch/teens-liesnach-archiv/articles/wie-funktioniert-ein-gaskraftwerk.html>
- Reich, G., & Reppich, M. (2018). *Regenerative Energien* (Bd. 2. Auflage). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Ruhrkultour. (17. Januar 2020). *Ruhrkultour*. Abgerufen am 28. November 2020 von <https://ruhrkultour.de/der-unglaubliche-flaechenbedarf-durch-wind-solar/#landnutzung-vergleich-kernkraft-gegen-wind-und-solkraft-76096cb0-7c16-46b6-98b2-0273cf2dcd60>
- Schiffer, H.-W. (2019). *Energiemarkt Deutschland*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.

- swissnuclear ©. (21. November 2020). *kernenergie*. Abgerufen am 21. November 2020 von <https://www.kernenergie.ch/de/so-funktioniert-ein-kernkraftwerk.html>
- Thomas, T. (2. September 2011). *Ingenieur.de*. Abgerufen am 20. Dezember 2020 von <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/energie/oekobilanzen-fuer-onshore-windenergieanlagen-im-blick/>
- Umweltbundesamt. (01. Dezember 2019). Entwicklung der Bruttostromerzeugung und des Bruttostromverbrauchs. Abgerufen am 1. Dezember 2020
- Umweltbundesamt. (26. November 2020). *Umweltbundesamt*. Abgerufen am 1. Dezember 2020 von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/flaeche/struktur-der-flaechennutzung#die-wichtigsten-flachennutzungen>
- Umweltbundesamt. (01. August 2020). *Umweltbundesamt*. Abgerufen am 1. Dezember 2020 von <https://www.umweltbundesamt.de/bild/kraftwerke-verbundnetze-in-deutschland>
- Umweltbundesamt. (16. März 2020). *Umweltbundesamt*. Abgerufen am 28. November 2020 von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/erneuerbare-konventionelle-stromerzeugung#definition-und-zeitliche-entwicklung>
- Umweltbundesamt, I. L. (2013). *Potenzial der Windenergie an Land*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Unger, J., & Hurtado, A. (2013). *Energie, Ökologie und Unvernunft*. Wiesbaden: Springer Spektrum.
- Vaillant. (21. November 2020). *Ölheizungsverbot ab 2026 - was ist dran?* Abgerufen am 21. November 2020 von <https://www.vaillant.de/heizung/klima-foerderung/oelheizung-austauschen/>
- Valov, B. (2020). *Elektrische Netze mit Erzeugungsanlagen Erneuerbarer Energien*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Wagener, L. (12. November 2020). *co2online*. Abgerufen am 21. November 2020 von <https://www.co2online.de/klima-schuetzen/klimawandel/was-ist-co2/>
- WEKA MEDIA GmbH & Co. KG. (20. Oktober 2020). *Energiemanagement und Energieeffizienz*. Abgerufen am 20. November 2020 von Das Info-Portal zum Thema Energie im Betrieb: <https://www.energiemanagement-und-energieeffizienz.de/informationen/was-ist-energie/>

Wirtschaftsvereinigung Stahl. (1. Januar 2019). *stahl-online*. Abgerufen am 05. Dezember 2020 von [https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2019/09/WVStahl\\_Fakten\\_zur\\_Stahlindustrie\\_2019.pdf](https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2019/09/WVStahl_Fakten_zur_Stahlindustrie_2019.pdf)

Wobben, A. (2001). *Aurich (DE) Patentnr. WO 01/86141 A1*.

Zinke, O. (9. September 2019). *agrarheute*. Abgerufen am 01. Dezember 2020 von <https://www.agrarheute.com/management/agribusiness/studie-windraeder-beeinflussen-mikroklima-558040>



## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 15. Januar 2021

Maximilian Merczel