
BACHELORARBEIT

Frau
Xinjing Hu

Energiewende in Deutschland

Mittweida, 2019

BACHELORARBEIT

Energiewende in Deutschland

Autorin:

Frau

Xinjing Hu

Studiengang:

Elektro- und Informationstechnik

Seminargruppe:

EI15wA-BC

first examiner:

Prof. Dr.-Ing. Alexander Lampe

second examiner:

M. Sc. Jan Roloff

submission:

Mittweida, 29.08.2019

defence / evaluation

Mittweida, 2019

Bibliografische Beschreibung:

Hu, Xinjing

Energiewende in Deutschland

Verzeichnisse: 7 Seiten, Inhalt: 57 Seiten

Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences,
Fakultät Ingenieurwissenschaften, Bachelorarbeit, 2019

Referat:

Mit der Reduzierung der fossilen Energiereserven und der Umweltverschmutzung ist die Energiewende bereits eine nationale Strategie. Deutschland ist der Vorreiter der Energiewende, und ist auch das erste Land, das den Ausstieg aus der Kernenergie bis 2022 beschlossen hat. Im September 2010 hat die Bundesregierung das Energieprogramm 2050 verabschiedet. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) ist im Jahr 2000 in Kraft getreten und wurde stetig weiterentwickelt. Im Januar 2014 hat Deutschland die Energiewende als vorrangig für die Regierungsarbeit eingestuft. Deutschland ist das erste Land der Welt, das von einer Ära der fossilen Brennstoffe zu einer Ära der erneuerbaren Energien übergeht.

Bacheloraufgabenstellung für

Xinjing Hu

Thema: Energiewende in Deutschland

Unter dem Begriff Energiewende versteht man einen alternativen, sauberen, bezahlbaren, sicheren - kurz nachhaltigen Weg, Energie zu erzeugen und zu nutzen. Das bedeutet die Abkehr von der traditionellen Strom- und Wärmeerzeugung vor allem durch Kohle- und Atomkraft und ein Hin zu erneuerbaren Energien und Energieeffizienz. Dabei ist eine sichere, zuverlässige und umweltschonende Energieversorgung ein wichtiger Aspekt in unserer Industriegesellschaft. Im Rahmen dieser Bacheloraufgabenstellung soll der Vorschritt bei der Energiewende in Deutschland untersucht werden und ein Ausblick auf zukünftige Schritte gegeben werden.

Arbeitspakete:

1. Energiewende
 - Wie definiert sich die Energiewende?
 - Welche Herausforderungen ergeben sich?
 - Welche Aufgaben lassen sich daraus ableiten?
2. Entwicklung der erneuerbaren Energien
 - Windkraft
 - Solarstrom
 - Wasserkraft

3. Energie und Umwelt

- Gründe für Energiewende
- Problem bei der Energiewende
- Ergebnisse der bisherigen Energiewende

Hochschulbetreuer:

M. Sc. Jan Roloff

Inhalt

Inhalt	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1 Einleitung.....	1
2 Energiewende in Deutschland.....	3
2.1 <i>Definition der Energiewende</i>	3
2.1.1 Hintergrund der Energiewende	3
2.2 <i>Ziele der Energiewende.....</i>	5
2.3 <i>Herausforderung der Energiewende.....</i>	9
2.3.1 Technische Herausforderung: Smart Grids.....	11
2.3.2 Technische Herausforderung: Speichertechnologien	13
2.3.3 Marktliche Herausforderung	15
3 Entwicklung der erneuerbaren Energien	18
3.1 <i>Solarenergie.....</i>	18
3.1.1 Photovoltaik.....	18
3.1.1.1 Komponenten von PV-Systemen	19
3.1.1.2 Typen von Photovoltaikanlagen.....	24
3.1.1.3 Vor-und Nachteile von Photovoltaikanlage	25
3.1.2 Solarthermie.....	26
3.1.2.1 Funktionsweise der Solarthermie.....	26
3.1.2.2 Komponenten einer Solarthermie-Anlage.....	27
3.2 <i>Windenergie.....</i>	27
3.2.1 Komponenten von Windkraftanlagen.....	28
3.2.2 Physik der Windkraftanlagen.....	31
3.2.3 Onshore- und Offshore Windparks.....	34

3.2.4	<i>Vor- und Nachteile von Windkraftanlagen.....</i>	36
3.3	<i>Wasserkraft.....</i>	37
3.3.1	<i>Typen von Wasserkraftwerken.....</i>	37
3.3.2	<i>Physik der Wasserkraftanlagen.....</i>	39
3.3.3	<i>Drei-Schluchten-Talsperre.....</i>	40
3.3.4	<i>Vor- und Nachteile Von Wasserkraftwerken.....</i>	40
4	Energie und Umwelt.....	43
4.1	<i>Gründe für Energiewende.....</i>	43
4.2	<i>Problem bei der Energiewende.....</i>	46
4.3	<i>Ergebnisse der bisherigen Energiewende.....</i>	48
5	Zusammenfassung und Ausblick	51
Index		52
Literatur		53
Anlagen		55
Anlagen, Teil 1		56
Anlagen, Teil 2		57
Selbstständigkeitserklärung		

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Primärenergie und Sekundärenergie Quelle: Ingenieurbüro für Gebäudemanagement und Energieberatung.....	1
Abbildung 2-1: Energieverbrauchsstruktur, Quelle: wikimedia.....	4
Abbildung 2-2: Atomausstieg bis 2022 Quelle: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Nukleare Sicherheit.....	4
Abbildung 2-3: Allgemeine Ziele des Energiekonzepts, Quelle: www.zukunft.erdgas.info ..	5
Abbildung 2-4: Zielsteckbrief: Erneuerbare Energien und Bruttoendenergieverbrauch Quelle: AGEE-Stat 08/2016.....	7
Abbildung 2-5: Zielsteckbrief: Erneuerbare Energien und Bruttostromverbrauch Quelle: AGEE-Stat 08/2016	8
Abbildung 2-6: Treibhausgas- Emissionen in Deutschland seit 1990 nach Gasen Quelle: Umweltbundsamt.....	9
Abbildung 2-7: Strom und Energieträger; Quelle: www.co2online.de	9
Abbildung: 2-18: Windstrom im Norden und PV im Süden Quelle: SOHertzT, TenneT, Amprion, Transnet BW, interndata.....	11
Abbildung 2-9: Windenergie im Jahresverlauf, Quelle: ISE.....	12
Abbildung 2-10: Regelmäßigkeit bei der PV Produktion, Quelle: ISE.....	12
Abbildung 2-11: Ökostromausbau festigt Netzstabilität Quelle: www.energiezukunft.eu	13
Abbildung 2-12: Merit-Order-Effekt, Quelle: ZSW.....	15
Abbildung 2-13: Tage mit negativen Strompreisen in Deutschland Quelle: Epex Spot.....	16
Abbildung 3-1: Solarzellen, Quelle: Energietechnik.....	19
Abbildung 3-2: Komponenten von Photovoltaikanlagen Quelle: Photovoltaik, Wesselak & Voswinckel.....	20

Abbildung 3-3: Aufbau einer Solarzelle im Detail	
Quelle: https://service.focus.de/solaranlagen/solarzelle/	21
Abbildung 3-4: p-n-Silizium, Quelle: Energietechnik.....	21
Abbildung 3-5: Kennlinien einer Standardsolarzelle für unterschiedliche Einstrahlungen und Temperaturen, Quelle: Photovoltaik, Wesselak & Voswinckel.....	22
Abbildung 3-6: Verschalten von Solarzellen Quelle: Energietechnik.....	23
Abbildung 3-7: Wechselrichter-Symbol, Quelle: Energietechnik.....	23
Abbildung 3-8: U-I Kennlinie und MPP eines Solargenerators. Quelle: Photovoltaik und Solartechnik, G.Schenk.....	24
Abbildung 3-9: Schema einer netzgekoppelten Photovoltaikanlage Quelle: solaranlage-ratgeber.de.....	25
Abbildung 3-10: Schema einer Photovoltaik- Inselanlage Quelle: solaranlage-ratgeber.de	27
Abbildung 3-12: Onshore-Windenergie und Offshore-Windenergie Quelle: https://www.smarterworld.de/smart-generation/wind/artikel/86110/	28
Abbildung 3-13: Schema einer Windkraftanlage Quelle: Energieautarke Gebäude; Hartmut Frey.....	29
Abbildung 3-14: Wirkungskette und Umwandlungsstufen einer Windenergieanlage Quelle: Windenergieanlagen; Siegfried Heier.....	31
Abbildung 3-15: Idealierte Strömung Quelle: Energieautarke Gebäude; Hartmut Frey	32
Abbildung 3-16: Idealer Leistungsbeiwert als Funktion der relativen Restgeschwindigkeit Quelle: Energieautarke Gebäude; Autor: Hartmut Frey.....	33
Abbildung 3-17: Leistungsbeiwert als Funktion der Schnelllaufzahl Quelle: Energietechnik; Prof. Dr.-Ing. Richard Zahoransky.....	34
Abbildung 3-18: Mittlere Windgeschwindigkeiten in 50m über Grund in m/s Quelle: Regenerative Energie-technik“, Autoren: Gerhard Reich und Marcus Reppich....	35
Abbildung 3-19: Ein Schwarm Stare fliegt vor einer Windkraftanlage, Quelle: dpa.....	36
Abbildung 3-19: Ein Schwarm Stare fliegt vor einer Windkraftanlage, Quelle: dpa.....	36

Abbildung 3-20: Laufwasser- und Speicherkraftwerke	
Quelle: Bayerische Landeskraftwerke GmbH.....	37
Abbildung 3-21: Prinzip eines Pumpspeicherkraftwerks. Im Generator- oder Pumpbetrieb	
Quelle: https://www.klassewasser.de/content/language1/html/7274.php	38
Abbildung 3-22: Drei-Schluchten-Talsperre	
Quelle: https://prezi.com/uoyiedks1b_s/die-drei-schluchten-talsperre/	40
Abbildung 3-23: Drei-Schluchten-Talsperre, Quelle: Baidu	41
Abbildung 4-1: Importabhängigkeit und Selbstversorgungsgrad Deutschlands in den Jahren 1999 und 2009, Quelle: AGEB 2010, BGR-Datenbank.....	42
Abbildung 4-2: Energieverbrauch nach Regionen; Quelle: BP Energy Outlook 2017	45
Abbildung 4-3: In der Arktis wird das Eis immer dünner; Quelle: Colourbox.....	46
Abbildung 4-4: So viel hat die Energiewende bis heute gekostet.....	47
Abbildung 4-5: Zusammensetzung des Strompreises; Quelle: Bundesnetzagentur.....	48

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Im Jahr 2017 waren noch acht Reaktoren in Deutschland in Betrieb Quelle: Kernenergie.de.....	6
Tabelle 2-2: Energieverbrauch und Energieeffizienz.....	7

Abkürzungsverzeichnis

AGEE-Stat	Die Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
CO₂	Kohlendioxid
CH₄	Methan
DICE	Düsseldorfer Instituts für Wettbewerbsökonomik
EE	Erneuerbare Energie
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
FiT	Feed-in Tariff (Einspeisetarife)
FKW/PFC	Perfluorierte Kohlenwasserstoffe
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung
H-FKW	Halogenierte Fluorkohlenwasserstoffe
MOE	Merit-Order-Effekt
MPP	Maximum Power Point
NaSCells	Natrium-Sulfid Batterien
N₂O	Distickstoffoxid
OC	Open circuit
PEV	Primärenergieverbrauch
PV	Photovoltaik
PVA	Photovoltaikanlagen
SC	Short circuit
SF₆	Schwefelhexafluorid
SMES	Super-conducting Magnetic Energy Storage
UBA	Umweltbundesamt
WEA	Windenergieanlage

1 Einleitung

Energie spielt eine große Rolle in unserem täglichen Leben. Wir alle nutzen Energie in mannigfaltiger Art und Weise. Ohne Energie läuft nichts. Aber der Begriff „Energie“ wurde in der Vergangenheit kaum erwähnt. Es sind die beiden Ölkrisen, die es zu einem Brennpunkt gemacht haben.

Das Ausmaß der Energieentwicklung und -nutzung sowie der Pro-Kopf-Verbrauch sind wichtige Indikatoren für Produktionstechnologie und Lebensstandard.

Energie kann unter verschiedene Sicht klassifiziert werden:

Durch die Weise, die Energie erzeugt wird, kann Energie in Primärenergie und Sekundärenergie unterteilt werden.

- Primärenergie: in der Natur vorkommenden Energiequellen.

Zur Primärenergie gehören: fossile Energieträger (Kohle, Torf, Erdgas, Erdöl)

regenerative Energien wie Sonnenenergie, Biomasse

- Sekundärenergie: durch einen Umwandlungsprozess aus einer Primärenergiequelle gewonnen wird.

Zur Sekundärenergie gehören: elektrische Energie, Fernwärme, Heizöl.

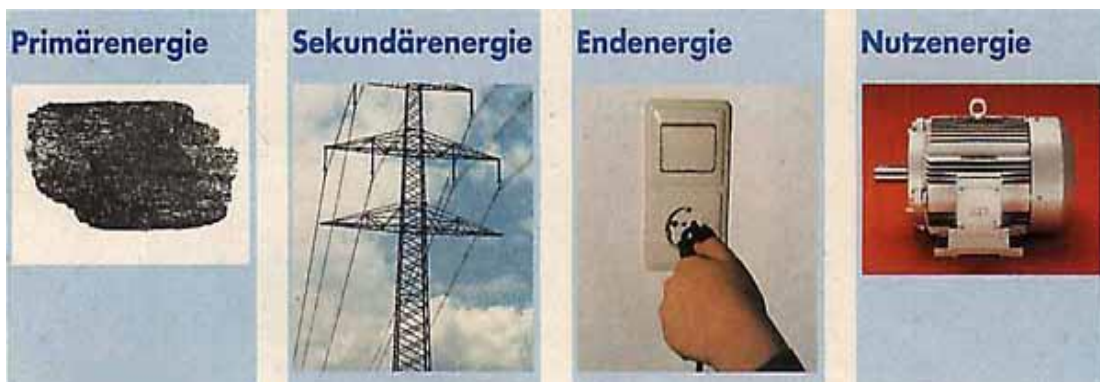


Abbildung 1-1: Primärenergie und Sekundärenergie

Quelle: Ingenieurbüro für Gebäudemanagement und Energieberatung

Je nachdem, ob die Energie erneuerbar ist, kann Energie in erneuerbare und nicht erneuerbare Energien unterteilt werden.

- erneuerbare Energien: ist Energie aus nachhaltigen Quellen

Zu den erneuerbaren Energien gehören: Wasserkraft, Windenergie, Sonnenenergie, Biomasse und Erdwärme.

- nicht erneuerbare Energien: nicht unbegrenzt zur Verfügung stehen und sich auch nicht regenerieren.

Zu den nicht erneuerbaren Energien gehören: Fossile Brennstoffe, Atomkraft

Nach der Zeit, die Energie begann zu benutzen, kann Energie in Konventionelle Energie und neue Energie unterteilt werden.

- Konventionelle Energie: Steinkohle, Braunkohle, Torf, Erdgas, Erdöl
- Neue Energie: Sonnenenergie, Erdwärme, Atomkraft

Aber mit der Verringerung der fossilen Energie und der Umweltverschmutzung steht eine Energiewende unmittelbar bevor.

2 Energiewende in Deutschland

Seit Beginn des 21. Jahrhunderts sind die Fragen der Energiesicherheit und des Umweltschutzes immer dringlicher: Erneuerbare Energien sind zu einem wichtigen Bestandteil der Energiestrategien vieler Ländern. Je nach Anwendungsbereich der erneuerbaren Energien ist es einfach zu erkennen, dass die Struktur des Stromerzeugungssystems hat sich sehr verändert, und die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien hat sich zum Mainstream des globalen Stromversorgungsbaus entwickelt. Unter ihnen stellte die zunehmende Stromerzeugungskapazität von Windenergie und Solarphotovoltaik einen neuen Rekord auf und beschleunigte den Prozess der Energiewende.

Die Energiewende ist in aller Munde. Aber was bedeutet Energiewende? Welche Herausforderungen ergeben sich? Was sind die Ziele der Energiewende in Deutschland?

2.1 Definition der Energiewende

Der Begriff Energiewende bezeichnet den Umstieg der Energieversorgung von fossilen und Kernbrennstoffen auf erneuerbare Energien.

Der Übergang von traditionellen fossilen Energien zu erneuerbaren Energien ist weltweit im Gang. Der Aufbau eines sauberen, kohlenstoffarmen, sicheren und effizienten modernen Energiesystems ist eine wichtige Aufgabe der Energiewende.

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) im Jahr 2000 trat in Kraft und beschleunigte die Energiewende weiter. Das Konzept der Energiewende ist bereits tief im Herzen der Menschen verwurzelt und hat einen großen Erfolg verzeichnet.

2.1.1 Hintergrund der Energiewende

Die frühe Energieverbrauchsstruktur in Deutschland wurde von Kohle dominiert, und Öl und Erdgas waren stark von Importen abhängig. Aufgrund vieler Nachteile bei fossilen Energieträgern wie Reservenmangel, Umweltverschmutzung, Erderwärmung usw. fördert Deutschland die Entwicklung erneuerbarer Energien und Kernenergie.

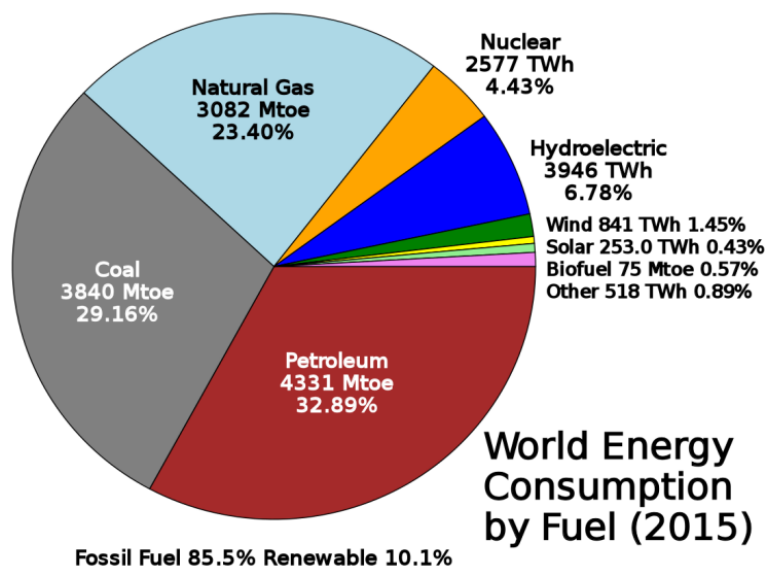


Abbildung 2-1: Energieverbrauchsstruktur

Quelle: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=33583618>

In Deutschland herrscht jedoch eine große Kontroverse um die Kernenergie, und der Zwischenfall mit nuklearen Leckagen hat diesen Widerspruch noch verstärkt. Deutschland kündigte den Ausstieg aus der Kernenergie an und plant, das letzte Atomkraftwerk bis 2022 stillzulegen.



Abbildung 2-2: Atomausstieg bis 2022

Quelle: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Nukleare Sicherheit

Die neue Energietechnologie hat große Fortschritte gemacht und die Technologien wie Photovoltaik, Windkraft sind ausgereift, was technische Unterstützung für die Energiewende bieten. Die Kosten für Windkraftanlagen und PV-Anlage sind in den letzten fünf Jahren deutlich gesunken.

2.2 Ziele der Energiewende

Die Richtung der Energiewende ist erneuerbare Energie. Ihre Vorteile sind sicher, sauber und bezahlbar. Basierend auf diesen drei Kriterien wird die Energiewende in mehrere Aufgaben unterteilt. Die Ziele und Indikatoren der Energiewende sind in der Tabelle dargestellt (vgl. Anlage 1)¹. Die deutsche Energiewende konzentriert sich hauptsächlich auf den Ausbau erneuerbarer Energien, die Reduzierung von Treibhausgasen und die Verbesserung der Energieeffizienz. Allgemeine Ziele des Energiekonzepts siehe Abbildung 2.3.

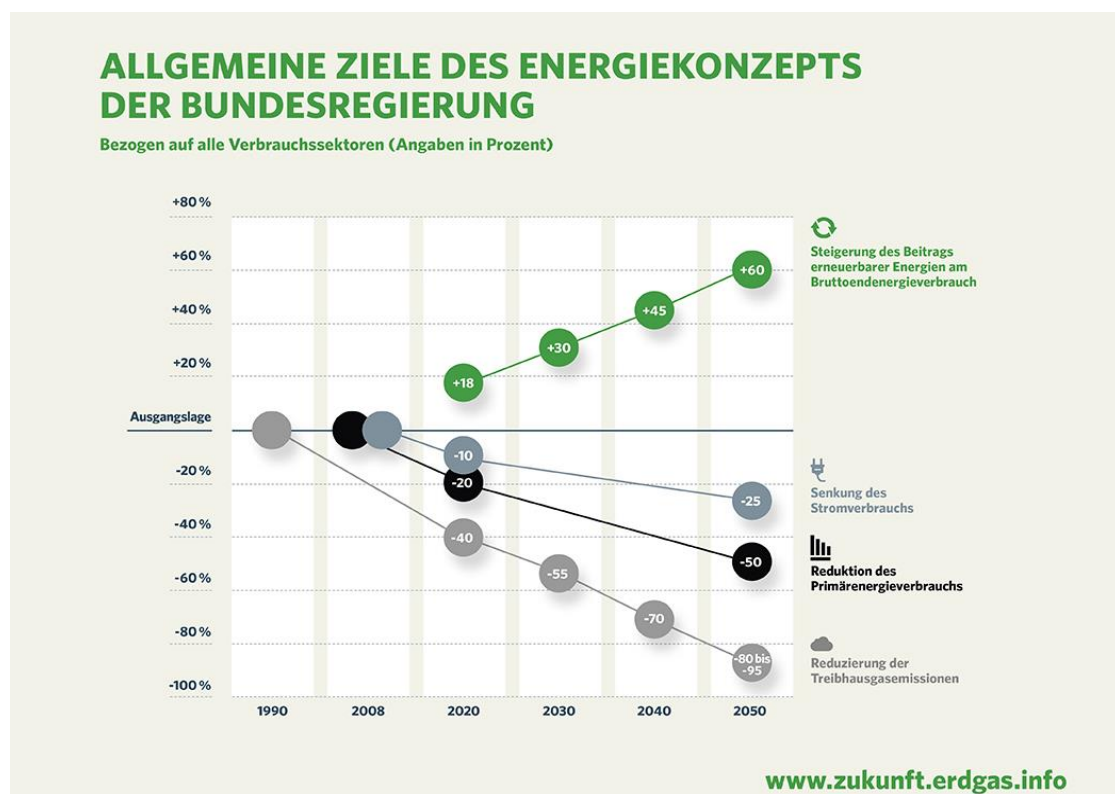


Abbildung 2-3: Allgemeine Ziele des Energiekonzepts

Quelle: www.zukunft.erdgas.info

◆ Ausstieg aus der Kernenergie bis Ende 2022

¹Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): „Fünfter Monitoring-Bericht zur Energiewende“, S7

Der Atomausstieg ist ein wichtiger Aspekt der Energiewende in Deutschland. Die Katastrophe von Tschernobyl (1986) und Fukushima (2011) haben uns die Gefahr der Atomenergienutzung vor Augen geführt. Die Bundesregierung beschloss im Jahr 2011, aus Atomkraft in mehreren Stufen bis 2022 auszusteigen. Kurz nach der japanischen Reaktorkatastrophe wurden 8 Reaktoren endgültig vom Netz genommen.

Atomkraftwerk	Bundesland	Inbetriebnahme	Stilllegung
Gundremmingen B	Bayern	1984	2017
Phillipsburg II	Baden-Württemberg	1985	2019
Grohnde	Niedersachsen	1985	2021
Gundremmingen C	Bayern	1985	2021
Brokdorf	Schleswig-Holstein	1986	2021
Isar II	Bayern	1988	2022
Emsland	Niedersachsen	1988	2022
Neckarwestheim II	Baden-Württemberg	1989	2022

Tabelle 2-1: Im Jahr 2017 waren noch acht Reaktoren in Deutschland in Betrieb

Quelle: Kernenergie.de

◆ Verringerung des Primärenergieverbrauchs gegenüber dem Jahr 2008

✧ bis 2020 um 20%

✧ bis 2050 um 50%²

◆ Erhöhung der Energieproduktivität um 2.1% pro Jahr ab 2008³.

	2015	2020	2050
--	------	------	------

² Daten stammen von „Fünfter Monitoring-Bericht zur Energiewende“; Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi); S25

³ Daten stammen von „Fünfter Monitoring-Bericht zur Energiewende“; BMWi; S25

Energieverbrauch und Energieeffizienz			
Primärenergieverbrauch	-7,6%	-20%	-50%
Endenergieproduktivität	1.3% pro Jahr (2008–2015)	2,1% pro Jahr (2008–2050)	

Tabelle 2-2: Energieverbrauch und Energieeffizienz. (Daten kommen von „Fünfter Monitoring-Bericht zur Energiewende“)

■ Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch⁴

✧ bis 2020 auf 18%

✧ bis 2030 auf 30%

✧ bis 2040 auf 45%

✧ bis 2050 auf 60%

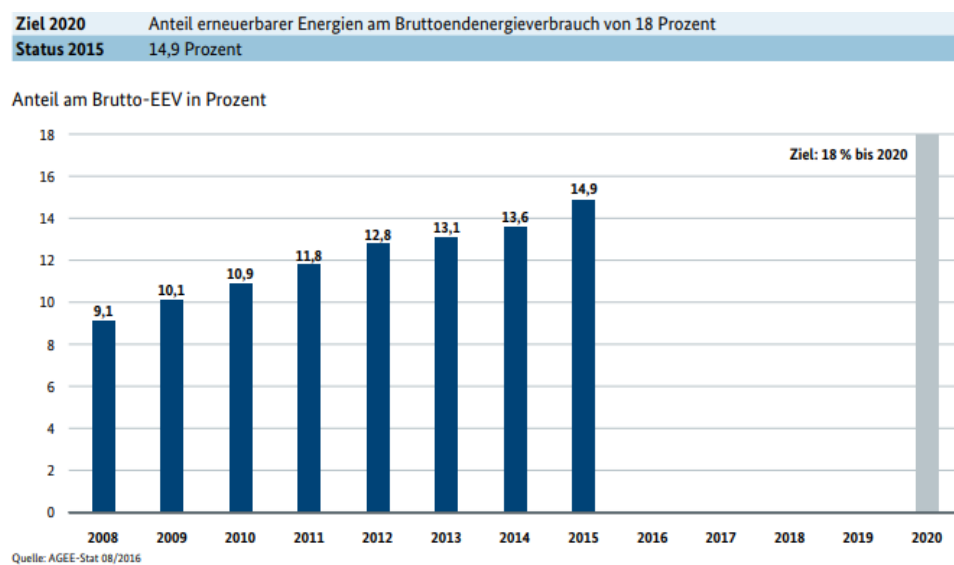


Abbildung 2-4: Zielsteckbrief: Erneuerbare Energien und Bruttoendenergieverbrauch

Quelle: AGEE-Stat 08/2016

■ Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch⁵

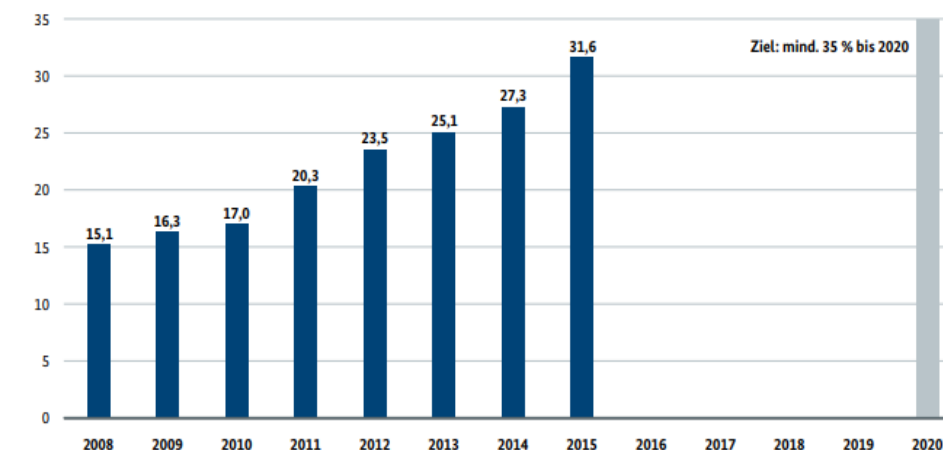
⁴ Daten stammen von „Fünfter Monitoring-Bericht zur Energiewende“; Tabelle auf S13

⁵ Daten stammen von „Fünfter Monitoring-Bericht zur Energiewende“; Tabelle auf S13

- ✧ bis 2020 auf 35%
- ✧ bis 2030 auf 50%
- ✧ bis 2040 auf 65%
- ✧ bis 2050 auf 80%

Ziel 2020	Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch von mindestens 35 Prozent
Status 2015	31,6 Prozent

Anteil am Bruttostromverbrauch in Prozent



Quelle: AGEE-Stat 08/2016

Abbildung 2-5: Zielsteckbrief: Erneuerbare Energien und Bruttostromverbrauch

Quelle: AGEE-Stat 08/2016

Erneuerbare Energien sind eine saubere Alternative zu Öl, Kohle und Gas, und auch eine sichere Alternative zu Atomkraft. Wegen des Atomausstieg und der Reduktion des Primärenergieverbrauch steigt der Anteil erneuerbarer Energien weiter an.

◆ Verringerung der Treibhausgasemissionen gegenüber dem Jahr 1990⁶

- ✧ bis 2020 um 40%
- ✧ bis 2030 um 55%
- ✧ bis 2040 um 70%
- ✧ bis 2050 um 80% bis 95%

⁶ Daten stammen von „Fünfter Monitoring-Bericht zur Energiewende“, Tabelle auf S7

Treibhausgas-Emissionen seit 1990 nach Gasen

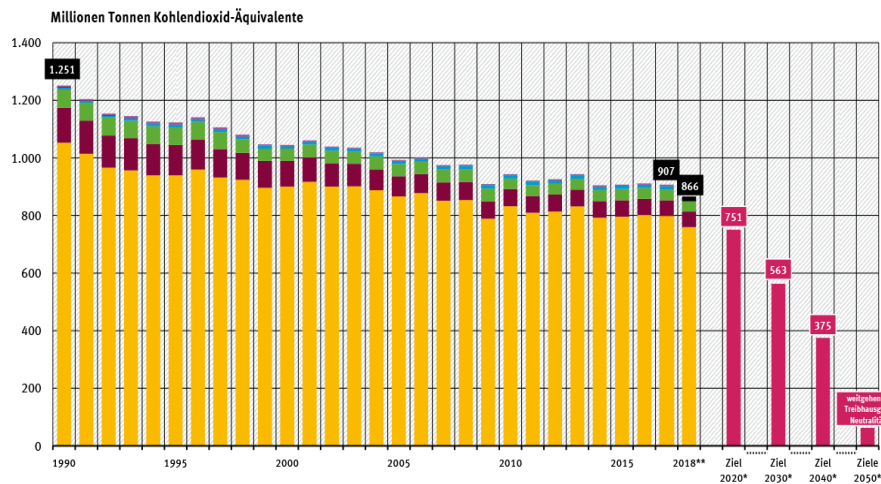


Abbildung 2-6: Treibhausgas- Emissionen in Deutschland seit 1990; Quelle: UBA

Die Verringerung von Treibhausgasen ist das ursprüngliche Ziel der Energiewende. Um das Ziel zu erreichen beschloss die Bundesregierung im 2016 den Klimaschutzplan 2050.

2.3 Herausforderung der Energiewende

Im Vergleich zu fossilen Brennstoffen und Kernenergie sind erneuerbare Energien sauber, sicher und unerschöpflich. Im Rahmen der Energiewende sollen fossile Brennstoffe und Atomstrom schrittweise durch erneuerbare Energien ersetzt werden.

Auf diesem Weg haben wir große Erfolge erzielt: Bislang stammen fast 40% des Stroms aus Wind, Sonne, Wasser oder Biomasse. Erneuerbare Energien sind in Deutschland eine sehr wichtige Stromquelle. Angesichts des gesamten Energieverbrauchs in Deutschland sind erneuerbare Energien jedoch immer noch ein Zwerg.

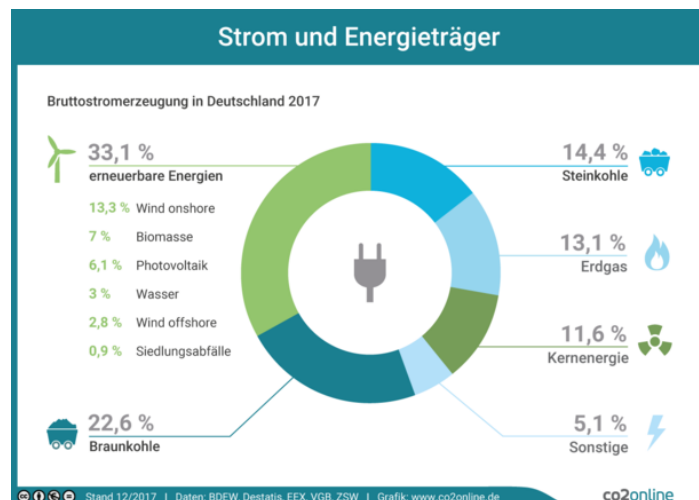


Abbildung 2-7: Strom und Energieträger Quelle: www.co2online.de

Nach der Zielarchitektur zur Energiewende wird der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch in Deutschland bis 2020 35%, bis 2030 50%, bis 2040 65% und bis 2050 über 80% betragen. Nach diesen vier Entwicklungszielen lässt sich die deutsche Energiewende in vier Phasen einteilen: Energiewende 1.0, Energiewende 2.0, Energiewende 3.0 und Energiewende 4.0. Derzeit befindet sich Deutschland in der ersten Phase, nämlich Energiewende 1.0. Was sind die wirklichen Herausforderungen für Energiewende? Und was ist die technische Herausforderung?

Die Energiewende stellt Deutschland vor große Herausforderungen. Bei der Energiewende sind viele Probleme aufgetreten, wie zum Beispiel: die hohen Umwandlungskosten, mehr CO₂-Emissionen und Energiearmut usw. Dies sind jedoch nur Probleme, nicht Herausforderungen.

Die Säulen der Energiewende sind Windkraft und Photovoltaik, die die günstigsten Technologien sind und das größte Potenzial haben. Mit steigenden Anteilen von Windkraft- und PV-Anlagen wird das Stromsystem und den Strommarkt grundlegend verändert. Das Stromsystem muss immer flexibler werden, um sich die zeitlich veränderliche Energiemengen aus Wind- und Sonnenenergie anzupassen.

Die Sonnen- und Windenergie sind Wetterabhängig, schnell fluktuierend und null Brennstoffkosten:

Die Herausforderungen der Energiewende in Deutschland liegt in der Volatilität von Sonnen- und Windenergie und der Null-Grenzkosten, nämlich:

- Netzstabilität bei stark Fluktuation der Stromerzeugung durch Wind- und Sonnenenergie
- Am Grenzkostenmarkt können sich Windkraft und PV prinzipiell nicht refinanzieren⁷

Lösungsansatz für die Volatilität von Sonnen- und Windenergie:

- ✧ Aufbau eines intelligenten Stromnetzes
- ✧ Ausbau des überregionalen Stromnetzes
- ✧ Energiespeichertechnologien

Lösungsansatz für die Null-Grenzkosten von Sonnen- und Windenergie:

- ✧ Aufbau eines Strommarkthandelssystem, das mit Windkraft und PV ohne Grenzkosten kompatibel ist.

⁷Agora Energiewende: „12 Thesen zur Energiewende“, 2012; S22

2.3.1 Technische Herausforderung: Smart Grids

Energiewende bedeutet das Ende von Kohlekraftwerken. Ohne ausgereifte intelligente Stromnetze und Speichertechnologien ist eine Energiewende jedoch nicht möglich.

Erneuerbare Energien weisen im Allgemeinen zwei Merkmale auf, die ausschlaggebend für die zukünftige Netzstruktur sind:

Zum einen ist die Dezentralisierung der Energiequellen: Große EE-Stromerzeuger sind ungleichmäßig verteilt, z.B. Windstrom im Norden (Off-Shore), PV im Süden. Norddeutschland liegt in der Nähe von Nordsee und Ostsee, wo der Wind stark weht.

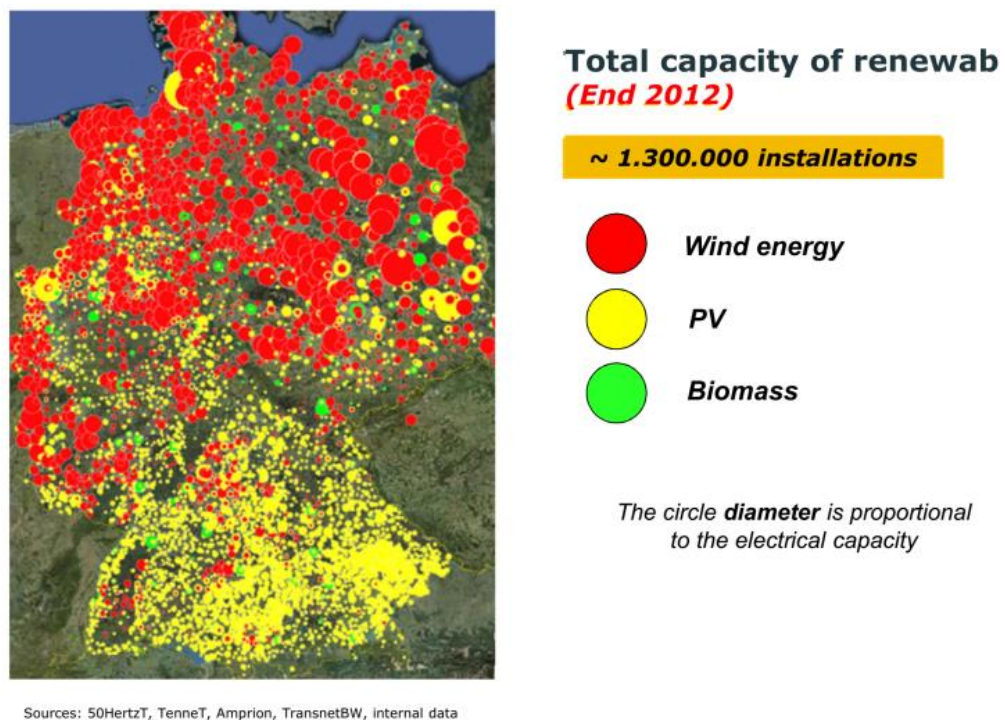


Abbildung 2-8: Windstrom im Norden (Off-Shore), PV im Süden

Quelle: SOHertzT, TenneT, Amprion, TransnetBW, internal data

Zum anderen ist die Volatilität der erneuerbaren Energien: Solar- und Windenergie sind stark abhängig von Wetter. Der Wind im Winter ist stark, und das Sonnenlicht im Sommer ist stark. PV-Anlagen können nachts oder an bewölkten Tagen keinen Strom erzeugen. Windenergieanlagen können bei Windstille keinen Strom erzeugen.

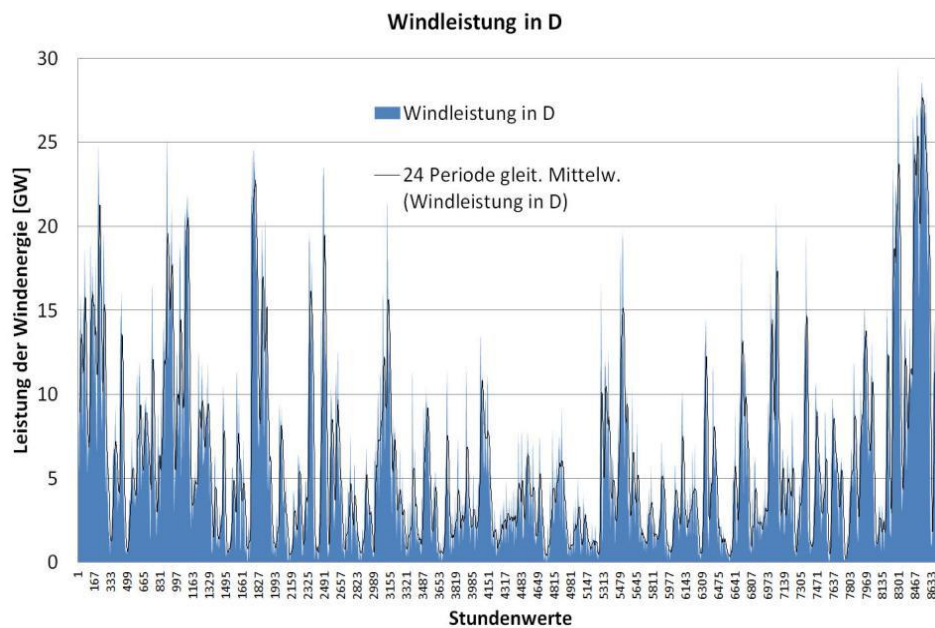


Abbildung 2-9: Windenergie im Jahresverlauf Daten: ISE

Sonnenenergie steht nur zur Verfügung, wenn die Sonne scheint:

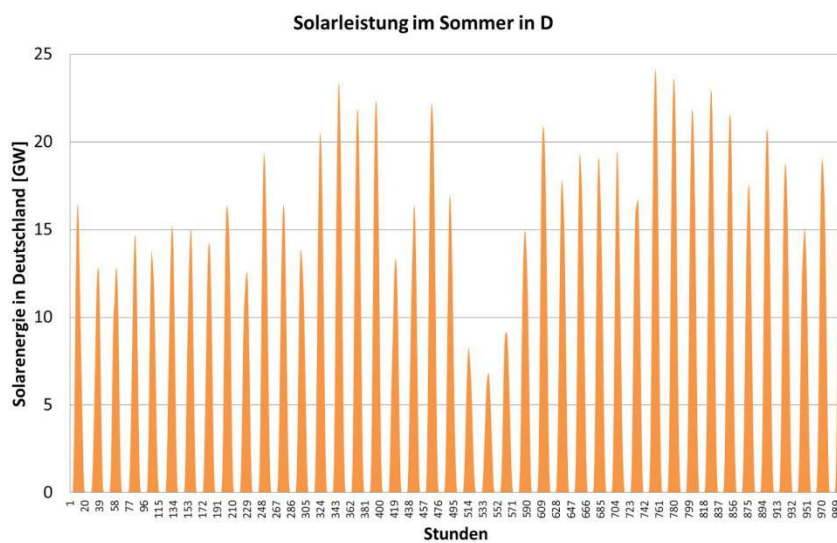


Abbildung 2-10: Regelmäßigkeit bei der PV Produktion Daten: ISE

Aber die Volatilität und Dezentralisierung der erneuerbaren Energien bringt die Probleme für die Netzstabilität mit sich: Mit steigendem Anteil Erneuerbarer Energien im Strommix sinken auch die Versorgungsunterbrechungen in den deutschen Stromnetzen.

Realität in Deutschland: Ökostromausbau festigt Netzstabilität

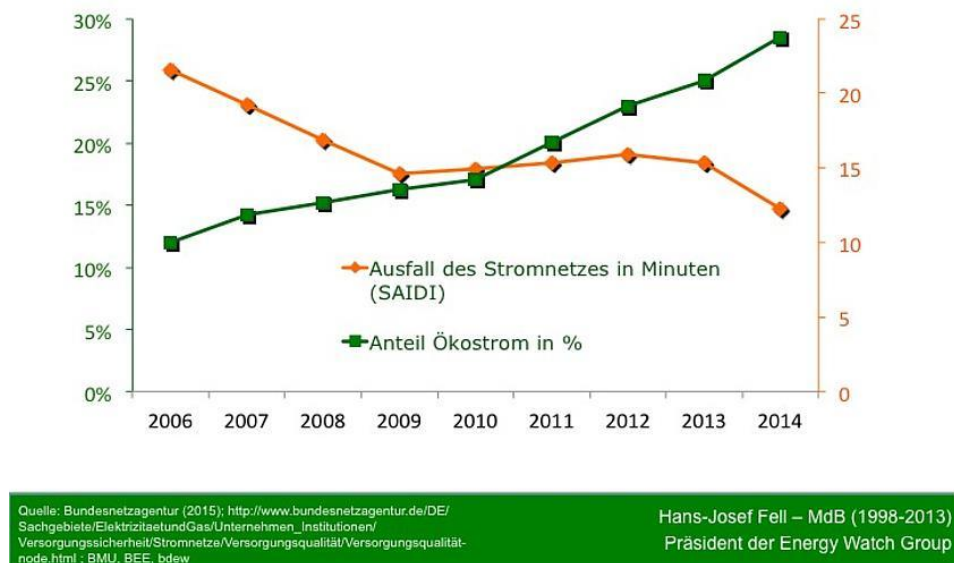


Abbildung 2-11: Ökostromausbau festigt Netzstabilität

Quelle: www.energiezukunft.eu

Um diesem Problem zu lösen, ist der Aufbau eines Smart Grids notwendig.

Intelligente Stromnetze sind ein entscheidendes Instrument für die Flexibilisierung des Stromsystems. Intelligente Stromnetze (Smart-Grids) kombinieren Erzeugung, Speicherung und Verbrauch. Eine zentrale Steuerung stimmt sie optimal aufeinander ab und gleicht somit Leistungsschwankungen – insbesondere durch fluktuierende erneuerbare Energien – im Netz aus⁸.

2.3.2 Technische Herausforderung: Speichertechnologien

Speichertechnologien sind ein weiteres, entscheidendes Instrument für die Flexibilisierung des Stromsystems.

Der Energiespeicher speichert die überschüssige Energie, die bei Bedarf zurückgewandelt wird. Wie zum Beispiel können sie in Zeiten mit starkem Wind Strom aufnehmen, den sie in Zeiten ohne Wind oder Sonnenlicht in das Netz einspeisen können.

Mit der rasanten Entwicklung intelligenter Stromnetze wird der Prozess der Energiewende immer schneller. Als eine der wichtigsten Infrastrukturen des Energiesystems ist die Speichertechnologie von entscheidender Bedeutung für die Entwicklung und

⁸ Was ist ein „Smart-Grid“? <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/was-ist-ein-smart-grid>

Umwandelung der weltweiten Energiewirtschaft. Ohne Speichertechnologie gäbe es nicht genug Energie im deutschen Stromnetz.

Elektrische Energie kann in chemische Energie, potentielle Energie, kinetische Energie, elektromagnetische Energie und andere Formen umwandelt und dann gespeichert werden. Je nach Art der Technologie kann man Energiespeicher einteilen in:

- mechanische Energiespeicher
 - ✧ Druckluftspeicher
 - ✧ Schwungrad-Speicher
 - ✧ Pumpspeicher (Wasser)
- chemische Energiespeicher
 - ✧ Akkumulatoren
 - ✧ Wasserstoff
 - ✧ Methan
- elektrochemische Energiespeicher
 - ✧ Natrium-Sulfid Batterien (NaSCells)
 - ✧ Blei-Säure Batterien
 - ✧ Redox-Flow Batterien
- elektromagnetische Energiespeicher
 - ✧ Super-conducting Magnetic Energy Storage (SMES)
 - ✧ Super-Kondensatoren
- thermische Energiespeicher
 - ✧ Kapazitive (sensible) Wärmespeicher
 - ✧ Latentwärmespeicher

Die Ziele der Energiewende bei EE sind: Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energie bei der Stromerzeugung (2014 c.a.16,3%):

- bis 2040 auf 65%

- bis 2050 auf 80%

Aber Neue Speichertechnologien werden erforderlich, wenn der Anteil von Erneuerbarer Energien mehr als 70%⁹ ist. Nach Ziele der Energiewende wird der Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch bis 2040 auf 65% und bis 2050 auf 80% gestiegen. Daher werden Speichertechnologien in der Energiewende 3.0 und Energiewende 4.0 eine wichtige Rolle spielen.

2.3.3 Marktliche Herausforderung

Die aktuelle globale Entwicklung erneuerbarer Energien ist in vollem Gang. Aber unter dem Gesichtspunkt der Kostendeckung und der wirtschaftlichen Nachhaltigkeit ist es leicht zu erkennen, Ohne die staatlichen Subventionen können Windkraft und Photovoltaik im Rahmen des bestehenden Stromhandelssystems die Investitionskosten nicht decken. Der Hauptgrund dafür ist, dass der derzeitige nationale Strommarkt auf fossilen Brennstoffen basiert und mit Windkraft und Photovoltaik nicht kompatibel ist.

Die Grundregel für Strommarkt ist Merit-Order. Als Merit-Order bezeichnet man die Einsatzreihenfolge der Kraftwerke. Diese wird durch die Grenzkosten der Stromerzeugung bestimmt¹⁰. Anfang mit den niedrigsten Grenzkosten wird ein Kraftwerk mit höheren Grenzkosten aktiviert, bis der Bedarf gedeckt ist.

Der Market-Clearing-Price (MCP) ist das letzte Angebot, welches einen Zuschlag erhält. Das Kraftwerk mit den höchsten Grenzkosten bestimmt den Marktpreis.

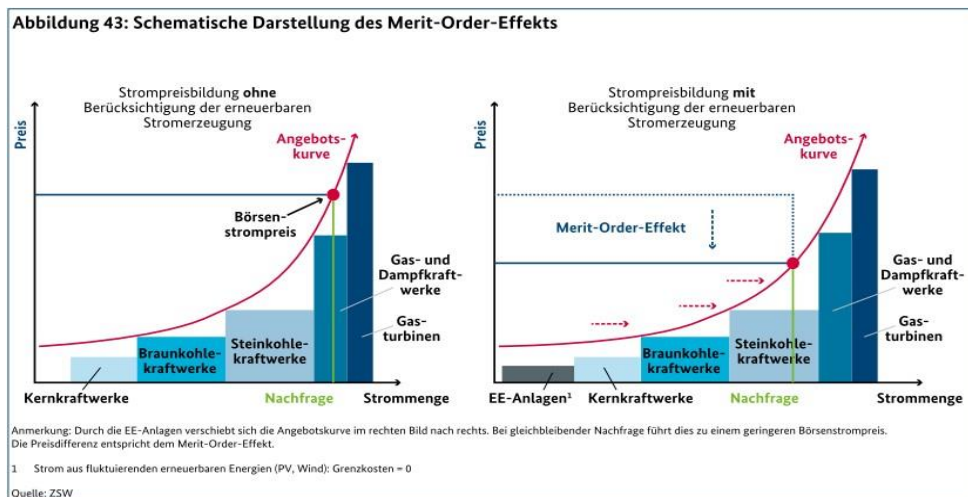


Abbildung 2-12: Merit-Order-Effekt Quelle: ZSW

⁹ Wert stammt von Agora Energiewende: „12 Thesen zur Energiewende“, 2012, S15

¹⁰ Merit-Order; <https://de.wikipedia.org/wiki/Merit-Order>

Dargestellt wie Abbildung 2.12 sind die Strompreisbildung und Marktverdrängung mit und ohne Strom aus EE durch den MOE. Strom aus EE hat Vorrang per Gesetz. Dann folgen es in aufsteigender Reihung die Kernenergie, Braun- und Steinkohle, Gas und Mineralöl.

Im Vergleich zu fossilen Kraftwerken sind Windkraftwerke und PV-Kraftwerke hohe Investitionskosten, niedrige Betriebskosten und Null-Brennstoffkosten, und ihre Grenzkosten für die Stromerzeugung liegen nahe Null.

Das Überangebot an Strom führt auch zu Instabilität des Stromnetzes. Stromerzeugung durch Wind- und Sonnenenergie ist stark wetterabhängig und schnell fluktuierend. Windkraftanlagen und PV-Anlagen erzeugen bei starkem Wind und Licht große Mengen Strom. Das Angebot ist größer als Nachfrage. Dann sind die Strompreise gefallen und wird die Marktgleichgewicht zerstört. Es sogar führt zu negativen Strompreisen.

Tage mit negativen Strompreisen in Deutschland

Durchschnitt aller negativen Preise des Jahres in Deutschland

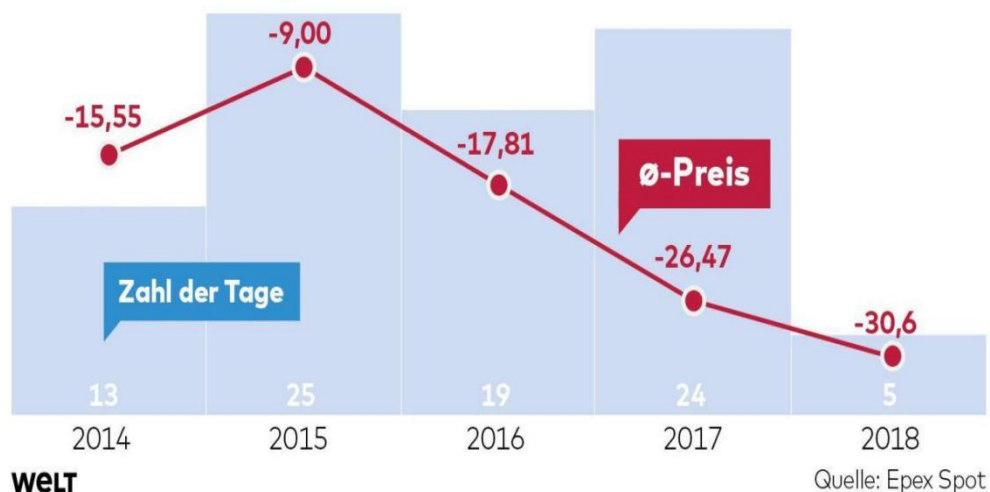


Abbildung 2-13: Tage mit negativen Strompreisen in Deutschland

Quelle: Epex Spot

Die Volatilität der Wind- und Sonnenenergie beeinflusst die Stabilität des Stromnetzes und Strommarkts erheblich. Mit dem Ausbau von Wind- und PV-Kraftwerken ist das Problem noch ernster. Es ist daher unbedingt erforderlich, ein neues Handelssystem für den Strommarkt einzurichten.

3 Entwicklung der erneuerbaren Energien

Die fossilen Energien sind begrenzt und schmutzig, und die Kernenergie ist nicht sicher. Daher wird in der Zukunft keine Energieerzeugung aus Kohle, Öl oder Atomkraft. Die Zukunft gehört den erneuerbaren Energien. Deutschland hat angekündigt, bis zum Jahr 2022 vollständig aus der Kernenergie auszusteigen und bis zum Jahr 2038 aus der Kohlekraft auszusteigen.

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), das im Jahr 2000 in Kraft getreten ist, ist das wichtigste Instrument zur Förderung der Entwicklung der erneuerbaren Energien. Mit dessen Hilfe sollen vor allem Solar- und Windkraft stark ausgebaut werden. Der Anteil der erneuerbaren Energien am Stromverbrauch nimmt zwischen 2000 und 2018 von 6,3% auf 37,8%¹¹ zu.

Vor- und Nachteile erneuerbarer Energien

Vorteile erneuerbarer Energien

- unbegrenzt oder regenerieren sich schnell
- sauber und umweltfreundlich
- sicher
- niedrige Betriebskosten

Nachteile erneuerbarer Energien

- hohe Investitionskosten
- Technologie für erneuerbare Energien nicht ausgereift genug

Formen von erneuerbaren Energien

- Photovoltaik
- Solarthermie
- Windkraft
- Erdwärme

¹¹Daten stammen von Umweltbundsamt; Indikator: Erneuerbare Energien

- Biomasse

Angesichts der Vor- und Nachteile verschiedener erneuerbarer Energiequellen, wie z.B. Kosten, Technologie, Potenzial usw., werden Photovoltaik und Windkraft die beiden Säulen der Energiewende.

Solarenergie ist die beliebteste erneuerbare Energiequelle in Deutschland. 59 Prozent der Bundesbürger bevorzugen Solarstrom, 38 Prozent Wind- und 26 Prozent Wasserkraft¹².

Dieses Kapitel befasst sich besonders mit Solarenergie, Windkraft und Wasserkraft.

3.1 Solarenergie

Solarenergie (auch Sonnenenergie genannt) ist die Energie der Sonnenstrahlung und kann technisch in Form von Strom, Wärme oder chemischer Energie genutzt werden.

Solarenergie ist einer der idealsten Substitute für fossile Energie. Sie spielt eine wichtige Rolle auf dem Weg der Energiewende.

Vorteile der Sonnenenergie:

- Unerschöpflich
- sauber und emissionsfrei
- Kostenlos

Nachteile der Sonnenenergie

- geringe Energiedichte
- Volatilität: wetter-, tages- und jahreszeitabhängig

Solarenergie kann grundsätzlich auf zwei Arten direkt genutzt werden: solarthermische Nutzung und die photovoltaische Nutzung.

3.1.1 Photovoltaik

Photovoltaik beschreibt den Umwandlungsprozess von Lichtenergie in elektrische, nutzbare Energie mittels Solarzellen. In Deutschland werden hauptsächlich einkristalline und polykristalline Solarzellen verwendet. In Deutschland nahm Photovoltaik im Jahr 2017 18 % der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien ein. Im Weltweit Durchschnitt trug

¹² Daten stammen von „Green City AG 2019“: Die Mehrheit der Deutschen bevorzugt Solarstrom
<https://www.sonnenseite.com/de/energie/green-city-studie-die-mehrheit-der-deutschen-bevorzugt-solarstrom.html>

der Anteil von PV-Stromerzeugung an der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien nur 7 %¹³.

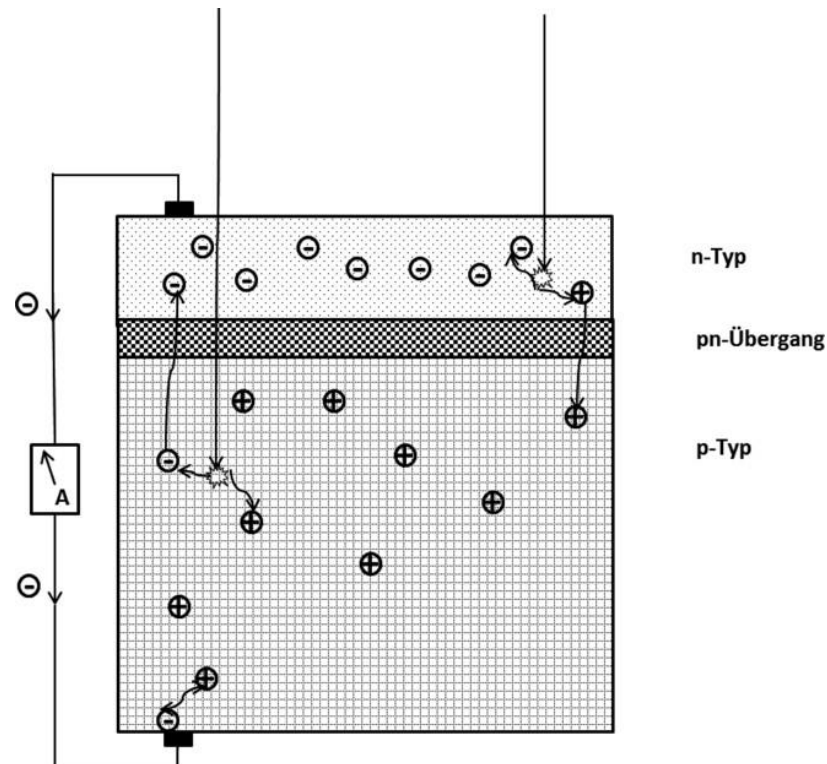


Abbildung 3-1: Solarzellen Quelle: Energietechnik

3.1.1.1 Komponenten von PV-Systemen

Eine Photovoltaikanlage kann gemäß Abb. 3.2 in drei Bereiche aufgeteilt werden: Photovoltaikgenerator, Wechselrichter/ Gleichstromsteller und Monitoring-Einheit¹⁴.

Der Photovoltaikgenerator verwandelt Strahlungsenergie in Gleichstrom. Der Wechselrichter dient zur Umwandlung von Gleichstrom in netzkonformen Wechselstrom. Das Monitoringsystem überwacht die erzeugte Energie, erkennt Fehlerzustände und sendet Fehlermeldungen an den Betreiber. I.d.R. ist das Monitoringsystem im Wechselrichter integriert.

¹³ Hans-Wilhelm Schiffer; „Energemarkt Deutschland“; Verlag: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018, S266

¹⁴ Wesselak & Voswinkel; „Photovoltaik“; Verlag: Springer Fachmedien Wiesbaden; 2012; S62

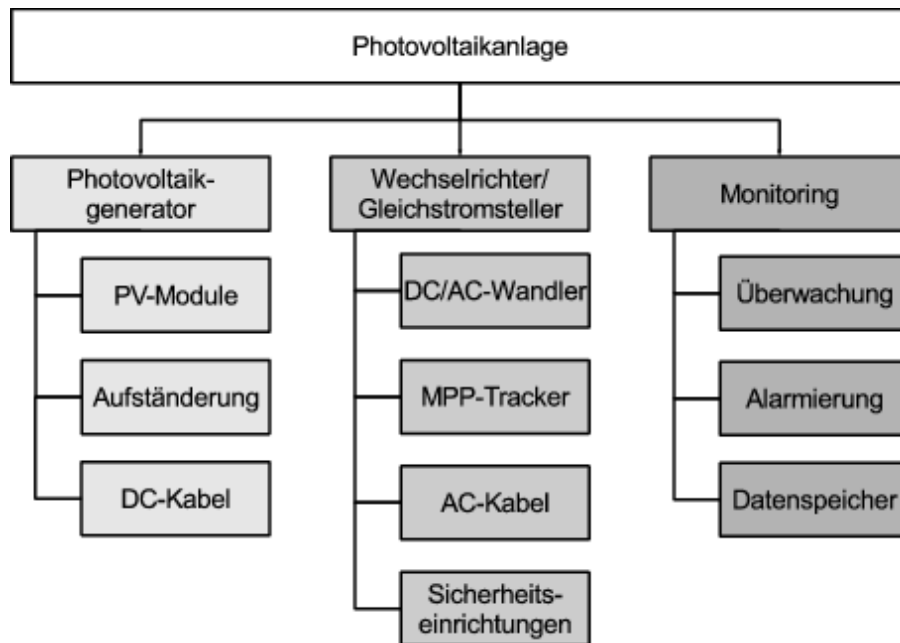


Abbildung 3-2: Komponenten von PV-Anlagen

Quelle: „Photovoltaik“, Wesselak & Voswinkel, 2012, S62

Die Hauptbestandteile von Photovoltaik-Anlagen sind Solarmodule und Wechselrichter. Andere Systemkomponenten variieren je nach Systemtyp.

◆ Solarmodul

Ein Solarmodul besteht aus Solarzellen, die in Serie oder Parallel geschaltet sind. Hier wird die Strahlungsenergie in Gleichstrom verwandelt. Um die Solarzellen vor äußere Einflüsse zu schützen, müssen sie verkapselt werden.

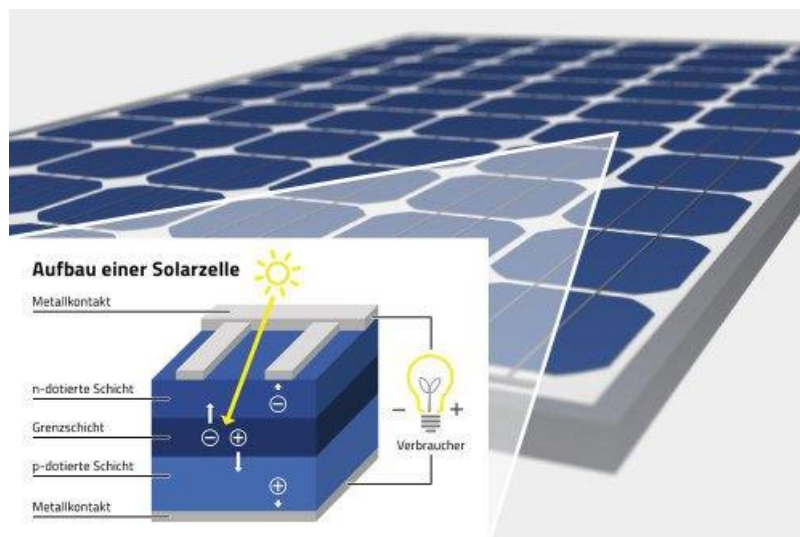


Abbildung 3-3: Aufbau einer Solarzelle im Detail

Quelle: <https://service.focus.de/solaranlagen/solarzelle/>

Herzstück einer Solarzelle ist ein Halbleiter, der durch die Zufuhr von Licht und Wärme leitfähig wird. Derzeit werden Solarzellen hauptsächlich aus Silizium (Si) hergestellt. Eine Si-Solarzelle besteht aus zwei Schichten: p-Siliziumschicht (Basis) und n-Siliziumschicht (Emitter). Zwischen den Schichten bildet sich eine Grenzschicht aus. Nur durch Sonnenlicht entstehen im p-n-Silizium mobile Ladungsträger.

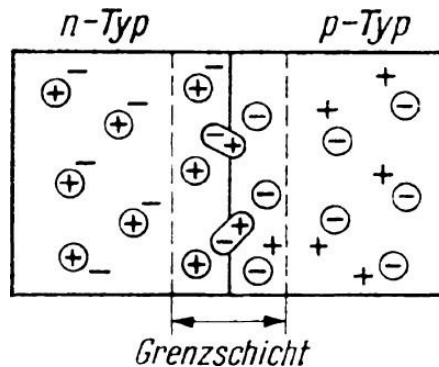


Abbildung 3-4: p-n-Silizium; Quelle: Energietechnik

Kennlinie einer Solarzelle wird von der Strahlung (W/m^2) und Zelltemperatur beeinflusst.

- Steigt die Bestrahlungsstärke so steigt die Stromstärke proportional. Die Leerlaufspannung erhöht sich nur wenig. Die Spannung im MPP ist fast konstant.
- Steigt die Temperatur aber sinkt die Leerlaufspannung. Der Kurzschlussstrom erhöht sich nur wenig. Somit wandert der Maximum Power Point nach links.

In Abb. 3.5 ist der MPP (Maximum Power Point) mit einem Kreis markiert.

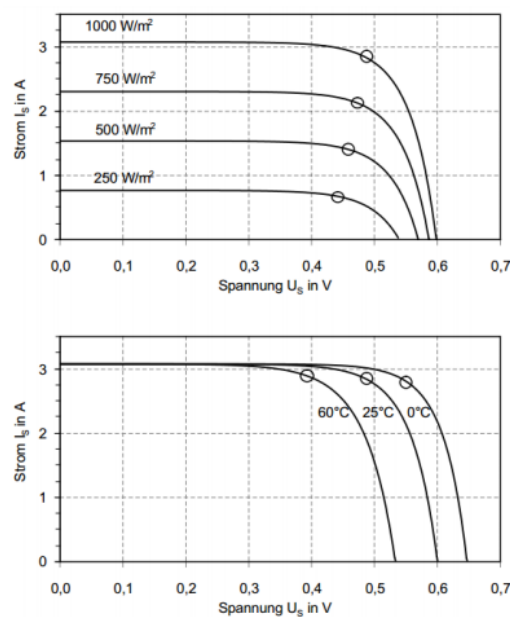


Abbildung 3-5: Kennlinien einer Standardsolarzelle für unterschiedliche Einstrahlungen und Temperaturen.

Quelle: Photovoltaik; Wesselak & Voswinckel, 2012, S. 38

Mit relativ geringer Leerlaufspannungen U_{oc} von Solarzellen (mono-Si-Zellen: 0,6 V) sind sie mit Modulen für Solarstromgeneratoren verschaltet.

Bei einer Reihenschaltung ist der Strom durch jede Zelle gleich, und die Spannung gleich der Summe der Spannungen der einzelnen Zellen

Bei einer Parallelschaltung ist die Spannung bei allen Zellen gleich, und der Strom gleich der Summe der Ströme durch die einzelnen Zellen.

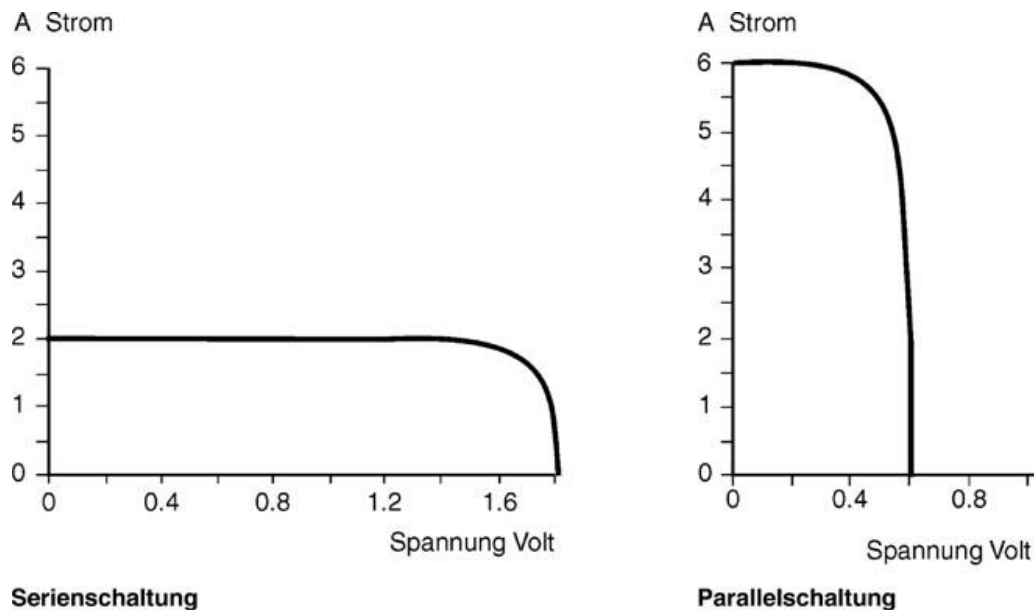


Abbildung 3-6: Verschalten von Solarzellen; Quelle: Energietechnik

Nach Halbleitermaterialien werden Solarzellen unterteilt in:

Monokristalline Solarzellen

Monokristalline Solarzellen besteht aus mono- beziehungsweise einkristallinem Silizium. Der Wirkungsgrad liegt zwischen 14% und 18%.

Polykristalline Solarzellen

Polykristalline Solarzellen besteht aus poly- oder multikristallinem Silizium. Der Wirkungsgrad liegt zwischen 12% und 16%.

Dünnschichtzellen

Dünnschichtzellen besteht aus dünnen Schichten, die aus amorphem Silizium oder anderem Material. Der Wirkungsgrad liegt zwischen 6% und 8%.

Mono- und polykristalline Solarzellen sind mit mehr als 85% Weltmarktanteil die am häufigsten eingesetzten Technologietypen¹⁵.

◆ Wechselrichter

Der Wechselrichter (auch Inverter) ist das Bindeglied zwischen Solargenerator und das öffentliche Stromnetz. Er wandelt den Gleichstrom in netzkonformen Wechselstrom (230 V und 50 Hz). In der Regel wird dieser dann in das allgemeine Stromnetz eingespeist, oder auch direkt von Verbrauchern genutzt werden.

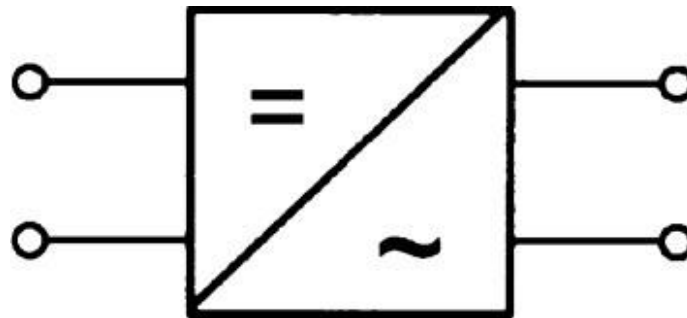


Abbildung 3-7: Wechselrichter-Symbol; Quelle: Energietechnik

MPP ist von der Sonneneinstrahlung, der Temperatur abhängig ist. Mit dem MPP-Tracker, der im Wechselrichter integriert, arbeitet jedes PV-Modul an seinem optimalen Betriebspunkt.

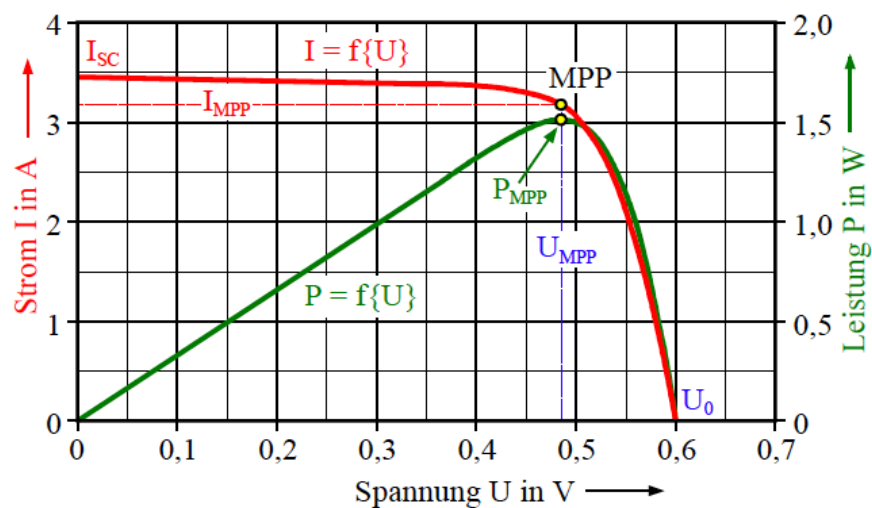


Abbildung 3-8: U-I Kennlinie und MPP eines Solargenerators.

Quelle: G.Schenk 2010, Photovoltaik und Solartechnik

Die Leistung im MPP errechnet sich aus:

¹⁵ Wesselak & Voswinckel: „Photovoltaik“, Verlag: Springer Fachmedien Wiesbaden; 2012, S43

$$P_{MPP} = U_{MPP} \cdot I_{MPP} < U_{OC} \cdot I_{SC}$$

P_{MPP} : Nennleistung

U_{MPP} : Spannung bei Strom bei

U_{OC} : Leerlaufspannung (oc-open circuit)

I_{SC} : Kurzschlussstrom (sc - short circuit)

3.1.1.2 Typen von Photovoltaikanlagen

Photovoltaikanlagen werden in Inselanlagen und netzgekoppelte Anlagen unterteilt. In Deutschland dominiert das netzgekoppelte System.

➤ netzgekoppelte Anlagen

Netzgekoppelte Anlagen sind an das öffentliche Stromnetz angeschlossen. Am Anschlusspunkt der PV-Anlage wird Strom ins Stromnetz eingespeist. Im Gegensatz zur Inselanlagen benötigen netzgekoppelte Anlagen keine Speicherbatterien aber Stromzähler, Einspeisemanagement.

Stromzähler: Mit dem Zähler wird die ins öffentliche Stromnetz eingespeiste Strom gemessen.

Einspeisemanagement: Einspeisemanagement bietet eine Fernüberwachungsmöglichkeit durch die Netzbetreiber.

In Deutschland schreibt das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) den Netzbetreibern vor, die Stromversorgung von PV-Anlagen zu priorisieren.

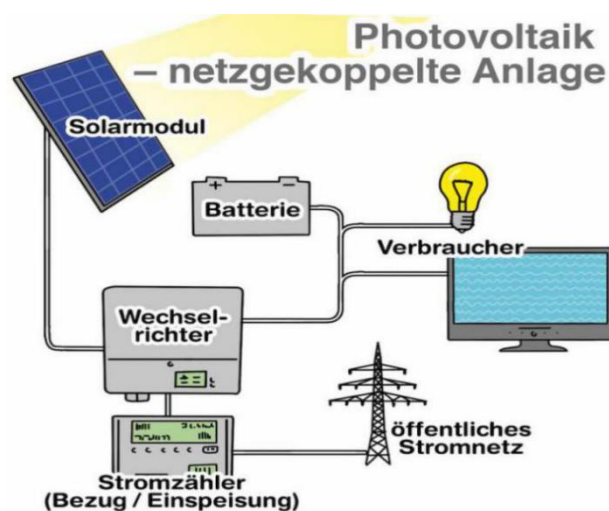


Abbildung 3-9: Schema einer netzgekoppelten Photovoltaikanlage

Quelle: solaranlage-ratgeber.de

● Inselanlagen

Inselanlagen sind autarke arbeitende PV-Anlagen, und unabhängig vom Stromnetz. Der im Solarmodul erzeugte Strom wird sofort verbraucht oder zwischengespeichert. Deshalb sind Batterien und Laderegler erforderlich.

Batterien: In Batterien wird der Strom gespeichert und bei Bedarf abends oder nachts wieder abgegeben. Ein häufig eingesetzter Batterietyp ist der Bleiakkumulator.

Laderegler: Laderegler dient zum Schutz der Batterie vor Überladung oder Tiefentladung.

Inselsysteme werden oft eingesetzt, wenn kein Netzanschluss vorhanden ist. z.B. in abgelegenen Gebieten, Garten-, Wochenendhäusern.

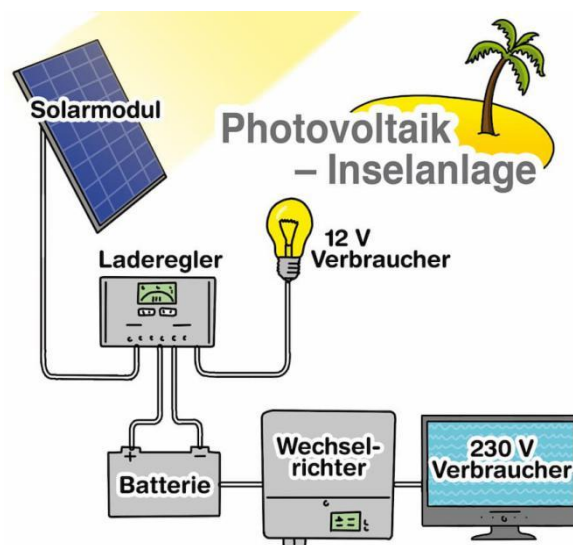


Abbildung 3-10: Schema einer Photovoltaik- Inselanlage

Quelle: solaranlage-ratgeber.de

3.1.1.3 Vor- und Nachteile von Photovoltaikanlagen

Vorteile von Photovoltaikanlagen:

- kostenfrei, unbegrenzt, sauber, sicher
- geringer Flächenbedarf
- kein Lärm, keine Geruch
- lange Lebensdauer: die Lebenserwartung von mindestens 20 - 25 Jahren.

Nachteile von Photovoltaikanlagen:

- hoch Investitionskosten

- schnelle Austauschen des Wechselrichters
- Schwankende Ausbeute: Photovoltaik ist wetter-, tages- und jahreszeitabhängig.

3.1.2 Solarthermie

Neben der Photovoltaik hat die Solarthermie auch einen großen Anteil. Im Gegensatz zur Photovoltaik beschreibt Solarthermie die Umwandlung der Sonnenenergie in nutzbare thermische Energie. Solarthermie wird normalerweise zum Erhitzen von Wasser oder zum Heizen verwendet. Die Technik für Solarthermie ist grundsätzlich ausgereift.

3.1.2.1 Komponenten einer Solarthermie-Anlage

Komponenten einer Solarthermie-Anlage umfassen:

- Solarthermie-Kollektoren
- Solarregler
- Wärmemengenzähler
- Solarspeicher
- Solarpumpe
- Ausdehnungsgefäß
- Solarflüssigkeit
- Solarrohre

Darunter sind Solarkollektoren, Solarspeicher und Solarrohre die Hauptbestandteile.

Solarkollektoren:

Das Herzstück einer Solarthermie-Anlage sind die Solarkollektoren, in der wird die Trägerflüssigkeit durch Sonnenlicht erwärmt. Häufig verwendete Kollektoren sind Flachkollektoren, Röhrenkollektoren und Luftkollektoren.

Solarspeicher:

Solarspeicher ist die zweite zentrale Komponente einer Solarthermieranlage. Er nimmt überschüssige Wärme auf und speichern sie über mehrere Tage.

Solarrohre:

Die Solarrohre macht die einzelnen Bauteile zu einem Ganzen: dem Solarheizkreis.

3.1.2.2 Funktionsweise der Solarthermie

Die Solarkollektoren absorbieren die Sonnenwärme, und weiterleiten an ein zirkulierender Trägerflüssigkeit. Das Wasser, das bis auf 95° erhitzt wird, wird über einen Wärmetauscher in den Solarspeicher geleitet. Das abgekühlte Gemisch wird wieder hoch zum Kollektor gepumpt und der Vorgang wiederholt sich. Der Wasserkreislauf wird über einen Solarregler gesteuert.

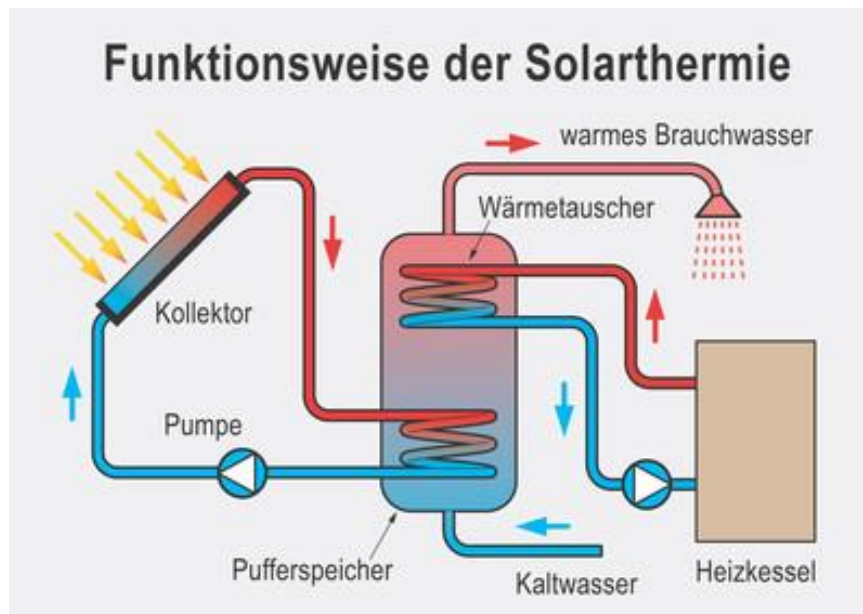


Abbildung 3-11: Funktionsweise der Solarthermie; Quelle: energiesparen-im-haushalt.de

3.2 Windenergie

Der Wind ist durch die Temperatur- und Druckdifferenz in der Atmosphäre verursacht. Daher ist er durch Sonneneinstrahlung stark beeinflusst. Schätzungsweise 2 % der Sonnenenergie wird in kinetische Energie der Luft umgewandelt. Dies ist eine Leistung von ca. $3,5 \cdot 10^9 \text{ MW}^{16}$.

Wie Windenergie genutzt wird: Erstens verwandelt der Rotor der Anlage die kinetische Energie des Windes in mechanische Rotationsenergie. Dann verwandelt der Generator kinetische Energie in elektrische Energie.

¹⁶ Fricke, J.: „Die Nutzung der Windenergie“. Phys. Unserer Zeit 12(6), 164 (1981). Wiley-VCH Verlag, Weinheim



Abbildung 3-12: Onshore-Windenergie und Offshore-Windenergie

Quelle: www.smarterworld.de/smart-generation/wind/artikel/86110/

Der Anteil der Bruttostromerzeugung aus Windenergie am deutschen Bruttostromverbrauch beträgt im Jahr 2018 18.6%, steht an zweiter Stelle nur nach der Braunkohle¹⁷.

Neben der Sonnenenergie ist die Windenergie eine weitere wichtige Säule der Energiewende.

3.2.1 Komponenten von Windkraftanlagen

Eine Windenergieanlage besteht wesentlich aus Turm, Rotor und Gondel mit den mechanischen Übertragungselementen und dem Generator sowie bei Horizontalachsenanlagen einem Windrichtungsnachführsystem¹⁸.

¹⁷ Umwelt Bundesamt: „Erneuerbare Energien in Deutschland Daten zur Entwicklung im Jahr 2018“

¹⁸ Siegfried Heier; „Windenergieanlagen“; Verlag: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018, S239

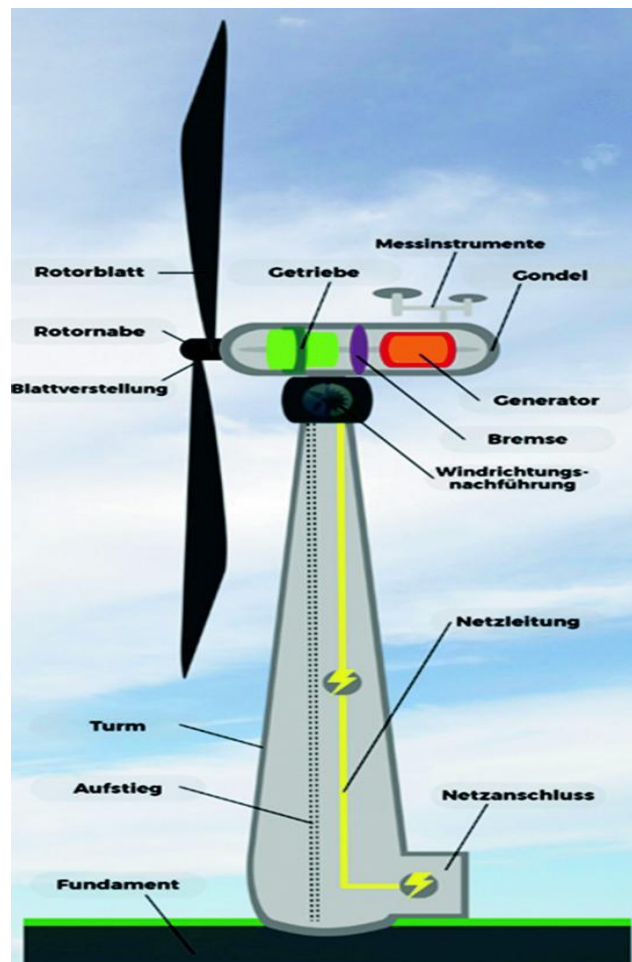


Abbildung 3-13: Schema einer Windkraftanlage, Quelle: Hartmut Frey, „Energieautarke Gebäude“

● Turm

Der Turm ist der größte und schwerste Teil von Windkraftanlage, kann mehrere hundert Tonnen schwer sein. Er trägt die Gondel und den Rotor. Die Windgeschwindigkeit nimmt mit der Höhe zu, daher sind die Türme an Land relativ hoch. In Off-shore Windparks sind meisten kleinere Türme, da die Windgeschwindigkeit auf See stärker als an Land ist.

Die Art des Turmes ist abhängig vom Anlagentyp, von der Nabenhöhe und der Stärke des Windes. Für große Windkraftanlagen sind meist Stahltürme oder Hybridtürme, und für kleine Windkraftanlagen Gittermasten.

✧ Rotor

Der Rotor besteht aus Nabe und Rotorblättern. Normalerweise haben die Windkraftanlagen eine Nabe mit drei Rotorblättern.

Die Rotorblätter sind die wichtigste Komponente einer Windkraftanlage. Sie wandeln Windenergie in mechanische Energie um. Die Windenergie hängt von der Größe der Fläche ab, die der Wind weht. Daher müssen die Rotorblätter so lang wie möglich sein.

Theoretisch steigt die Leistung einer Windkraftanlage mit der Anzahl der Rotorblätter. Der Übergang von einem Blatt zu zwei Blättern erhöhte die Leistung um 10%. Die Leistung des dritten Blatt stieg um 3% bis 4%, und das vierte Blatt stieg um jedoch nur 1% bis 2%¹⁹.

Die Nabe verbindet die Rotorblätter mit dem Rest der Maschine und überträgt die Leistung auf die Rotorwelle²⁰. Die meisten Windkraftanlagen sind mit starren oder pitchenden Naben ausgestattet.

- Gondel

Die Gondel ist das Maschinenhaus der Windkraftanlage. Sie ist drehbar und sich auf der Spitze des Turms befindet. In der Gondel befindet sich ein Getriebe, ein Generator und ein Frequenzumrichter.

Das Getriebe dient zur Erhöhung der Drehzahl. Die Drehzahl des Rotors ist sehr niedrig, und entspricht nicht den Anforderungen für die Stromerzeugung des Generators. Mit Hilfe eines Getriebes wird die Leistung mit niedriger Drehzahl und hohem Drehmoment in Leistung mit höherer Drehzahl und kleinem Drehmoment umwandelt.

Der Generator wandelt die mechanische Energie des Rotors in elektrische Energie um. Es gibt drei Haupttypen von Windgeneratoren: Synchrongenerator, Asynchrongenerator und doppelt gespeiste Asynchrongenerator.

Das Diagramm zeigt die Verknüpfungen zu den wichtigsten Systemkomponenten und die ihnen zugeordneten Energieumwandlungsstufen.

¹⁹ Daten stammen von Jürgen Staab: „Erneuerbare Energien in Kommunen“, Verlag: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018

²⁰ Jürgen Staab; „Erneuerbare Energien in Kommunen“; Verlag: Springer Fachmedien Wiesbaden;2018

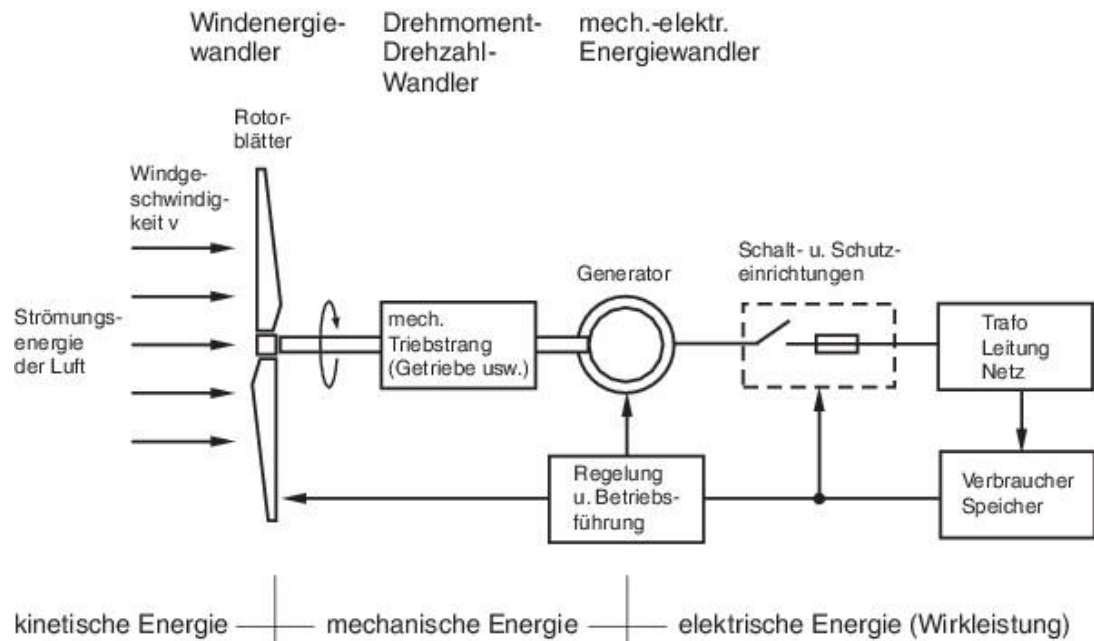


Abbildung 3-14: Wirkungskette und Umwandlungsstufen einer Windenergieanlage

Quelle: Siegfried Heier, "Windenergieanlagen"

3.2.2 Physik der Windkraftanlagen

Die spezifische kinetische Energie einer Strömung ist:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

m : Masse in kg

v : Geschwindigkeit in m/s

Die Luftmasse m ist gleich der Luftdichte ρ multipliziert mit dem Volumen V der Luft.

$$m = \rho \cdot V$$

ρ (Rho): Luftdichte in Kilogramm pro Kubikmeter (kg/m^3)

Der Volumenstrom V ist gleich der Rotorfläche A mal der Windgeschwindigkeit v .

$$V = A \cdot vt = r^2 \cdot \pi \cdot vt$$

A : Rotationsfläche in Quadratmeter (m^2)

r : Rotorradius in m

damit erhält man die Formel,

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot r^2 \cdot \pi \cdot vt$$

Leistung P = Energie E pro Zeiteinheit:

$$P_{wind} = \frac{E_{kin}}{t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot r^2 \cdot \pi \cdot v^3 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

Aber die effektive Windleistung ist immer geringer als obige Gleichung, weil die Windgeschwindigkeit auf der Rückseite der Windräder nicht null ist.

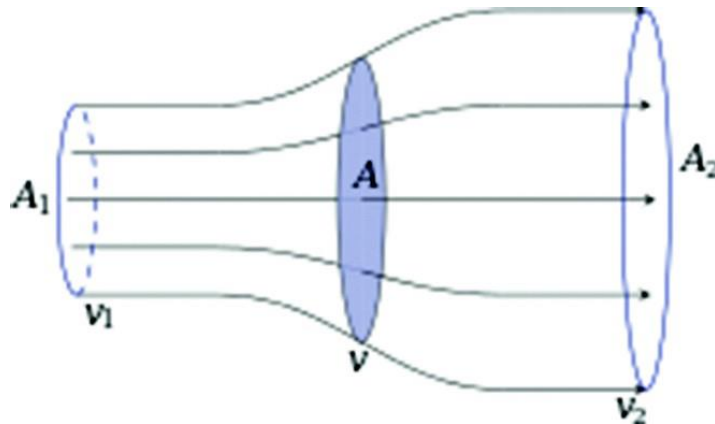


Abbildung 3-15: Idealisierte Strömung

Quelle: Hartmut Frey, „Energieautarke Gebäude“

$$P_{wind} = \frac{E_{kin}}{t} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v^2$$

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v$$

Die effektive Leistung ist dabei die Differenz aus der Windleistung vor und nach der Windkraftanlagen.

$$P_{eff} = P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2)$$

$$v_{Rotor} = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

$$P_{eff} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2)$$

C_P : Der Leistungsbeiwert, der die relative Leistungsentnahme charakterisiert:

$$C_P = \frac{P_{eff}}{P_{wind}} = \frac{(v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2)}{2v^3} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \cdot \left(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2}\right)$$

Ersetzen $\frac{v_2}{v_1}$ mit x , erhält man:

$$C_P(x) = \frac{1}{2} (1 + x) \cdot (1 - x^2)$$

Maximal ist C_P , wenn $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$:

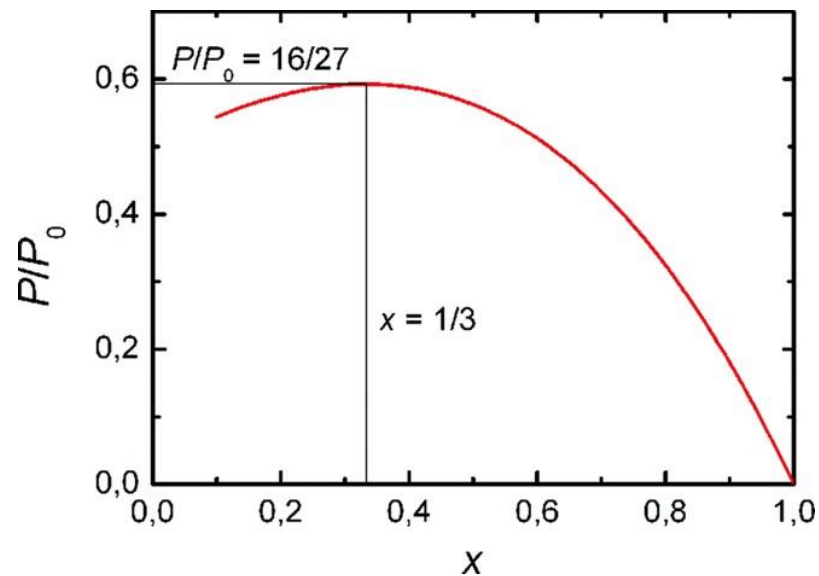


Abbildung 3-16: Idealer Leistungsbeiwert als Funktion der relativen Restgeschwindigkeit $x = \frac{v_2}{v_1}$,

Quelle: Hartmut Frey, „Energieautarke Gebäude“,

Mit diesem Ergebnis $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$ erhält man den Betzschen Leistungsbeiwert C_{Pmax}

$$C_{Pmax} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{3}\right) \left(1 - \frac{1}{3^2}\right) = \frac{16}{27}$$

Die Schnelllaufzahl λ ist ein weiterer wichtiger Parameter für die Windkraftanlagen:

$$\lambda = \frac{U}{v_1} = \frac{\Omega \cdot r}{v_1} = \frac{2\pi \cdot n \cdot r}{v_1}$$

U : maximale Umfangsgeschwindigkeit

v_1 : ungestörte Windgeschwindigkeit

Ω : Winkelgeschwindigkeit des Rotors

n : Rotordrehzahl

r : Rotorradius

Die Schnelllaufzahl λ bestimmt die Flügelanzahl. Hütter zeigte zuerst den Zusammenhang zwischen Leistungsbeiwert C_P und Schnelllaufzahl λ :

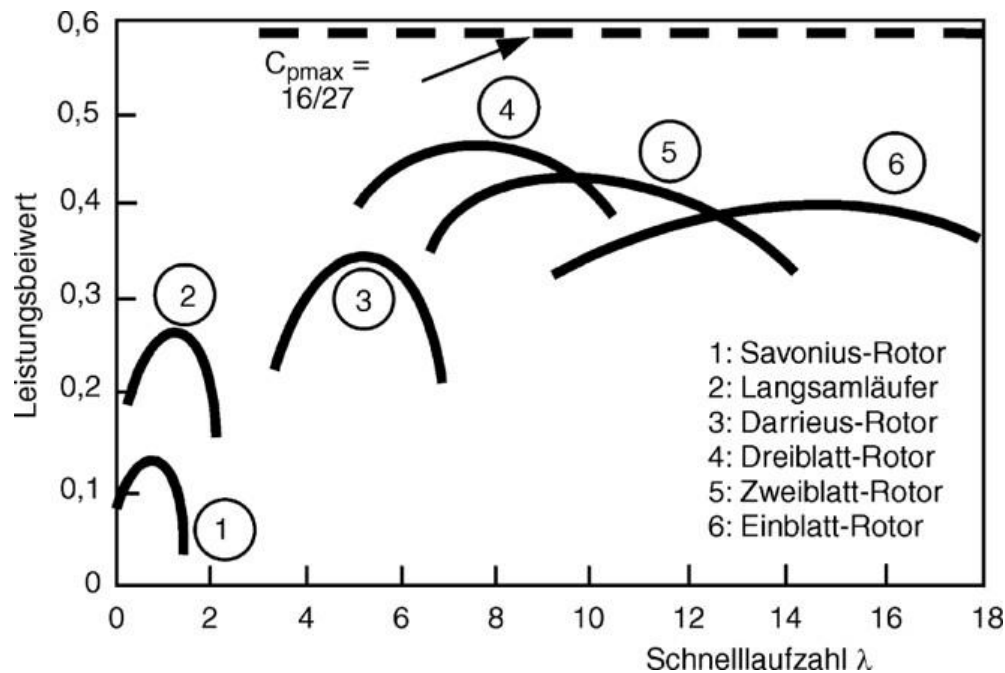


Abbildung 3-17: Leistungsbeiwert als Funktion der Schnellaufzahl

Quelle: Prof. Dr.-Ing. Richard Zahoransky „Energietechnik“

3.2.3 Onshore- und Offshore Windparks

Die Windstärke in Deutschland zeigt eine deutliche räumliche und zeitliche Charakteristik.

Räumliche Charakteristik: Die maximale Windgeschwindigkeit tritt auf Nordsee und Ostsee, in den Mittelgebirgen und Alpen auf. Die geografische Verteilung der Windgeschwindigkeit zeigt Abbildung 3.18. Es ist auffällig, dass die Windgeschwindigkeit von Nordwesten nach Südosten deutlich abnimmt.

Zeitliche Charakteristik: Die maximale Windgeschwindigkeit tritt in Deutschland überwiegend im Monat November auf, und die minimale Windgeschwindigkeit in den Monaten August und September auf²¹.

²¹ Gerhard Reich, Marcus Reppich: „Regenerative Energietechnik“, Verlag: Springer Fachmedien Wiesbaden; 2018, S154

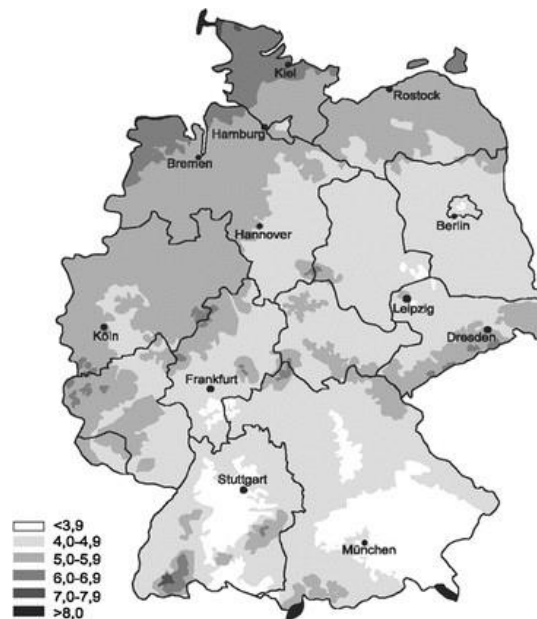


Abbildung 3-18: Mittlere Windgeschwindigkeiten in 50 m über Grund in m/s

Quelle: Gerhard Reich und Marcus Reppich „Regenerative Energietechnik“

Der Strom aus Windenergie wird vorrangig im Norden und Osten sowie auf See erzeugt. Der Wind weht auf See stärker und stetiger als an Land. Damit verschafft Offshore-Windenergie höheren und stetigeren Stromertrag. Aber der Anteil der Windenergie auf See an der gesamten Windenergie ist noch sehr gering. Im Jahr 2014 entfielen auf Windenergie 35,5% der erneuerbaren Energieerzeugung. Der Anteil der Offshore-Windenergie an der gesamten Windenergie beträgt nur 2,5%²².

Die großen Küstenentfernungen, hohen Wassertiefen, höhere Windgeschwindigkeit, Wellengang, Luftfeuchtigkeit und der Salzgehalt in der Luft stellen die Offshore-Anlagen vor neue Herausforderungen.

Große technische Herausforderungen dafür sind die Verankerung der Anlagen per Fundament bei großen Meerestiefen oder die Anbindung der Windparks an die Stromnetze an Land²³. Große Entfernungen und hohe Leistung führen zu hohen Übertragungsverlusten. Daher setzen die meisten Offshore-Windparks die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungstechnik (HGÜ) ein. Bei der HGÜ (auch HVDC) wird der Wechselstrom, der von den Windkraftanlagen kommt, in Gleichstrom umgewandelt. Dann wird der Gleichstrom mit Kabeln an Land transportiert. Bei der Gleichstromübertragung kann hohe Leistung über weite Entfernungen ohne die Anlagen zur Kompensation von Blindleistung übertragen werden. Weitere Herausforderung ist die Auswirkung von dem Wellengang, dem hohen Salzgehalt in der Luft, und der Feuchtigkeit.

²² Daten stammen von Bundesregierung, Indikator 3: Erneuerbare Energien, <https://www.umweltbundesamt.de/indikator-erneuerbare-energien>

²³ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Informationsportal Erneuerbare Energien; <http://www.erneuerbare-energien.de>

Daher sind zuverlässiger Korrosionsschutz und regelmäßige Zustandsüberwachung notwendig.

3.2.4 Vor- und Nachteile von Windkraftanlagen

Vorteile von Windkraftanlagen:

- unbegrenzt oder regenerieren sich schnell
- sauber und umweltfreundlich
- sicher
- die Investitionskosten amortisieren sich schnell
- geringer Flächenbedarf für Windkraftanlagen

Nachteile von Windkraftanlagen:

- Wind ist keine Konstante
- Ertrag stark standortabhängig
- Geräusche entstehen
- Vögel (On-Shore) und Meeresbewohner (Off-Shore) werden gestört
- starker Eingriff in das Landschaftsbild



Abbildung 3.19: Ein Schwarm Stare fliegt vor einer Windkraftanlage, Quelle: dpa

3.3 Wasserkraft

Wasserkraft ist eine der ältesten erneuerbaren Energien, und auch eine ausgereifte Technologie. Wasserkraft hält an der gesamten Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien 2017 in Deutschland nur einen Anteil von 9 %, aber im weltweiten einen Anteil von 65 %²⁴.

Im Vergleich zu Sonnen- und Windenergie ist Wasserkraft eine vorhersehbare Energiequelle. Ihre Stromproduktion ist nicht so schnell fluktuierend wie die von Sonnen- und Windenergie.

3.3.1 Typen von Wasserkraftwerken

Wasserkraft beschreibt die Umwandlung der kinetischen Energie des Wassers per Turbine in mechanische Energie, und anschließend per Generator in elektrische Energie.

Je nach Fallhöhe werden Wasserkraftwerke in Hochdruck-, Mitteldruck- und Niederdruckkraftwerke unterteilt.

- ✧ Niederdruckkraftwerke: Fallhöhe circa 15 m beträgt
- ✧ Mitteldruckkraftwerke: Fallhöhe zwischen 15 m und 50 m beträgt
- ✧ Hochdruckkraftwerke: Fallhöhe mehr als 50 m beträgt

Je nach Bauart werden Wasserkraftwerke in Laufwasserkraftwerk, Speicherkraftwerk, Pumpspeicherkraftwerke, Wellenkraftwerk, Gezeitenkraftwerk, Osmosekraftwerk, Gletscherkraftwerk unterteilt. Am häufigsten gibt es die Laufwasser- und Speicherkraftwerke.

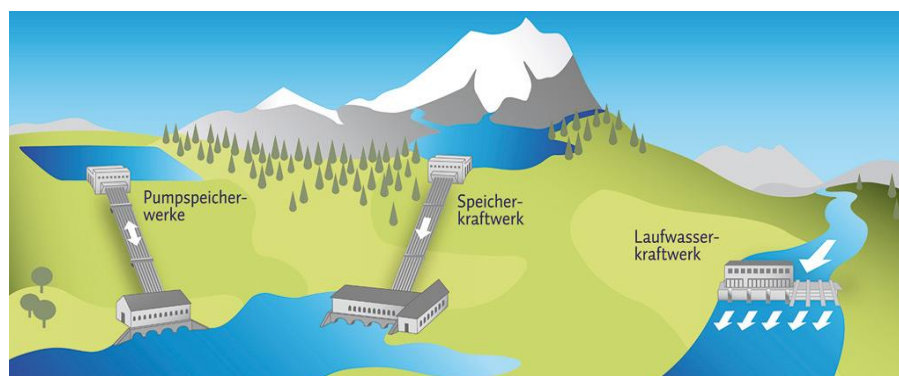


Abbildung 3-20: Laufwasser- und Speicherkraftwerke, Quelle: Bayerische Landeskraftwerke GmbH

²⁴ Daten stammen von Hans-Wilhelm Schiffer: „Energemarkt Deutschland“, Verlag: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018, S266

✧ Laufwasserkraftwerk (Niederdruckanlagen)

Laufwasserkraftwerke sind der größte Teil der deutschen Wasserkraft. Sie arbeiten an Flüssen und nutzen den schnellen Wasserfluss zur Energiegewinnung. Charakteristisch ist eine geringe Fallhöhe bei großer Wassermenge. Je größer die Fallhöhe des Wassers ist, desto höher ist die Kraft des Wassers. Um Fallhöhe des Wassers zu erhöhen, wird bei Laufwasserkraftwerken in der Regel eine Wehranlage gebaut. Normalerweise produzieren Laufwasserkraftwerke im Sommer viel Strom und im Winter wenig Strom.

✧ Speicherkraftwerk (meist Mitteldruckanlagen)

Speicherkraftwerke erzeugen Strom durch die hohen Gefälle und die Wasserspeicherkapazität von Dämmen und Bergseen. Daher müssen Dämme oder Talsperren aufgebaut werden. Charakteristisch ist, dass sie während der Regenzeit Wasser auffangen und speichern, und dann auf den fluktuierenden Energiebedarf entsprechend reagieren.

✧ Pumpspeicherkraftwerk (Hochdruckanlagen)

Pumpspeicherkraftwerke speichern elektrische Energie in Form von potentieller Energie. Sie können Energie besonders gut speichern. Ihr Hauptziel ist Stromspeicherung, aber nicht Stromerzeugung.

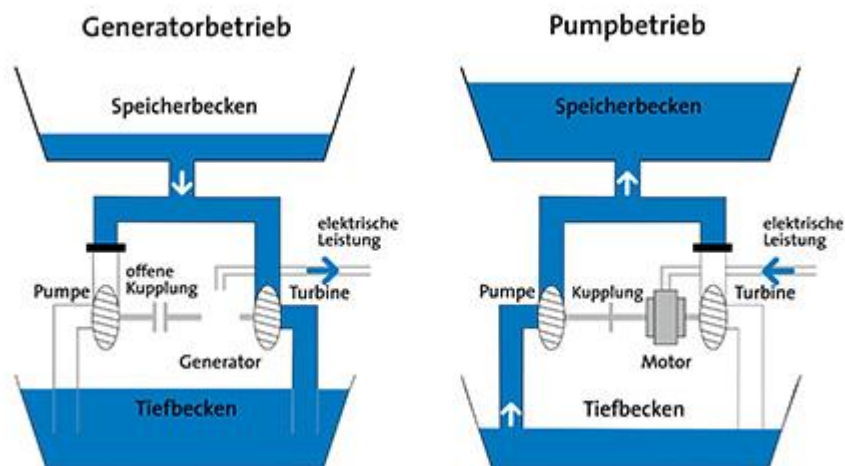


Abbildung 3-21: Prinzip eines Pumpspeicherkraftwerks. Im Generator- oder Pumpbetrieb.

Quelle: <https://www.klassewasser.de/content/language1/html/7274.php>

In Zeiten geringen Strombedarfs pumpt ein Motorgenerator Wasser aus dem unteren Becken in das obere. Damit wird der erzeugte Strom als potenzielle Energie des Wassers zwischengespeichert. In Zeiten hohen Strombedarfs wird das Wasser wieder zurück nach unten zum Pumpspeicherkraftwerk geleitet. Und die Turbinen wandeln die potentielle Energie des Wassers wieder in Strom um.

3.3.2 Physik der Wasserkraftanlagen

Formel zur Berechnung der Wasserenergie:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{gmH}{t}$$

g: Erdbeschleunigung ($\approx 9,81 \text{ m/s}^2$)

m: Masse von Wasser (in kg)

ρ : der Dichte von Wasser ($\approx 1000 \text{ kg/m}^3$)

H: der Fallhöhe h (in m)

$$m = \rho \cdot V$$

$$V = Q \cdot t$$

V: Volumenstrom von Wasser in m^3

Q: Wasserdurchfluss (in m^3/s)

damit erhält man die Formel:

$$P = \frac{gmH}{t} = \frac{g \cdot \rho \cdot Q \cdot t \cdot H}{t} = g \cdot \rho \cdot Q \cdot H$$

Wegen der Reibungsverluste und elektrischen Verluste, kann die potentielle Energie von Wasser nicht vollständig in elektrische Energie umgewandelt werden:

$$P_{eff} = \eta_{ges} \cdot g \cdot \rho \cdot Q \cdot H$$

Der Gesamtwirkungsgrad ergibt sich dabei als Produkt der Einzelwirkungsgrade (z. B. für die Rohrleitungen $\eta_{ges} \approx 0,93 \dots 0,90$, für die Turbine $\eta_{ges} \approx 0,85 \dots 0,94$ und für den Generator $\eta_{ges} \approx 0,95 \dots 0,99$), er liegt im Bereich zwischen 0,75 und 0,92²⁵.

3.3.3 Drei-Schluchten-Talsperre

Das größte Wasserkraftwerk der Erde ist die Drei-Schluchten-Talsperre. Die Drei-Schluchten sind die Qutang-Schlucht, die Wu-Schlucht und die Xiling-Schlucht. Der Damm befindet sich in Sandouping, und bildet mit dem Wasserkraftwerk Gezhouba ein

²⁵ Dipl.-Ing. Dietrich Oeding, Dr.-Ing. habil. Bernd R. Oswald: „Elektrische Kraftwerke und Netze“, Verlag: Springer Berlin Heidelberg, 2011, S205

Kaskadenkraftwerk. Die Hauptaufgaben der Drei Schluchten-Talsperre sind Stromerzeugung, Hochwasserschutz und Schifffahrt.



Abbildung 3-22: Drei-Schluchten-Talsperre

Quelle: https://prezi.com/uoyiedks1b_s/die-drei-schluchten-talsperre/

Der Damm des Wasserkraftwerks ist 185 Meter hoch und der Stausee ist 2335 Meter lang. Die installierte Gesamtleistung des Drei-Schluchten-Wasserkraftwerks beträgt 22,5 Millionen Kilowatt und die jährliche Stromerzeugung beträgt 107,3 Milliarden Kilowatt. 32 Turbinen mit 700 Megawatt und 2 Turbinen mit 50 Megawatt werden installiert²⁶.

3.3.4 Vor- und Nachteile Von Wasserkraftwerken

Vorteile von Wasserkraft:

- Sicher, sauber und umweltfreundlich
- relativ gleichmäßige Leistungsabgabe
- geringer Wartungsaufwand und die lange Lebensdauer
- Hochwasser verhindern und Schifffahrt verbessern

²⁶ Yuexian Ma: Verteilung von Wasserkraftwerken in China, Baidu-Bibliothek



Abbildung 3-23: Drei-Schluchten-Talsperre; Quelle: Baidu

Nachteile von Wasserkraft:

- ✧ eingeschränkte Verfügbarkeit
- ✧ großer Flächenbedarf für Stauraum: Der Damm der Drei-Schluchten-Talsperre ist 185 Meter hoch und der Stausee ist 2335 Meter lang.
- ✧ notwendige Umsiedlung von Bewohnern: Wegen Drei-Schluchten-Projekt müssen mehr als 1,2 Millionen²⁷ Menschen ihre Häuser verlassen.
- ✧ Lebensräume von Fischen und Wasserpflanzen beeinflussen: Viele Fische und Wasserpflanzen sind durch die Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit und Temperatur bedroht.

²⁷ Daten stammen von Yuexian Ma: „Verteilung von Wasserkraftwerken in China“, Baidu-Bibliothek

4 Energie und Umwelt

Energie ist die Grundlage des menschlichen Lebens und der menschlichen Entwicklung. Alle Aspekte des menschlichen Lebens wie industrielle Produktion, Transport usw. sind untrennbar mit dem Energieverbrauch verbunden. Bei der Entwicklung und Nutzung von Energie wurden jedoch große Umweltschäden verursacht.

Der Einfluss von Energie auf die Umwelt:

- Luftverschmutzung

Während des Prozesses der Primärenergienutzung wurde eine große Menge an Kohlendioxid (CO_2), Schwefeldioxid (SO_2), Nitriden, Schwebstoffen usw. erzeugt, die die Stadtluft stark verschmutzen. Die Luftverschmutzung ist die Hauptursache für Sauren Regen, und bedroht die menschliche Gesundheit.

- Treibhauseffekt

Seit der industriellen Revolution ist die Menschheit auf fossile Brennstoffe wie Erdöl und Kohle angewiesen. Die Verbrennung von Treibhausgasen wie Kohlendioxid, die von diesen fossilen Energieträgern ausgestoßen werden, ist der Hauptgrund für die Zunahme des Treibhauseffekts und des globalen Klimawandels. Die Treibhausgase, die durch die Verbrennung dieser fossilen Brennstoffe entstehen, ist die Hauptursache für die Zunahme der Treibhausgase und den globalen Klimawandel.

- Saurer Regen

Saurer Regen wird durch Luftverschmutzung (CO_2, SO_2) verursacht. Saurer Regen zerstört die Umwelt und ist die Hauptursache für Waldsterben.

- Atommüll

Tausende Tonnen Atommüll wurden weltweit produziert. Ihre radioaktiven Gefahren werden noch Hunderte von Jahren bestehen.

4.1 Gründe für Energiewende

1. Fossile Brennstoffe wie Erdöl und Erdgas sind begrenzt.

Fossile Brennstoffe entstehen durch den Abbau toter Tiere und Pflanzen im Untergrund. Dieser Prozess dauert normalerweise Hunderte von Millionen von Jahren. Sie sind nicht erneuerbare Ressourcen. Fossile Brennstoffe umfassen hauptsächlich Kohle, Erdöl und

Erdgas. Derzeit werden rund 80% des globalen Primärenergieverbrauchs mit fossilen Energieträgern gedeckt²⁸.

Die Weltenergiesreserven haben insgesamt eine Reichweite von etwa 100 Jahren. Erdöl besitzt eine Reichweite von etwa 40 Jahren, Erdgas von etwa 60 Jahren und Kohle rein rechnerisch von über 200 Jahren²⁹.

2. Deutschland ist stark abhängig von Energieimporten

Die Höhe der deutschen Importabhängigkeit verdeutlicht Abb. 4.1. Deutschland ist zu 70% auf ausländische Energieimporte angewiesen, Erdgas zu mehr als 84%, Erdöl zu mehr als 97%, und Uran zur Kernenergienutzung sogar zu 100%³⁰.

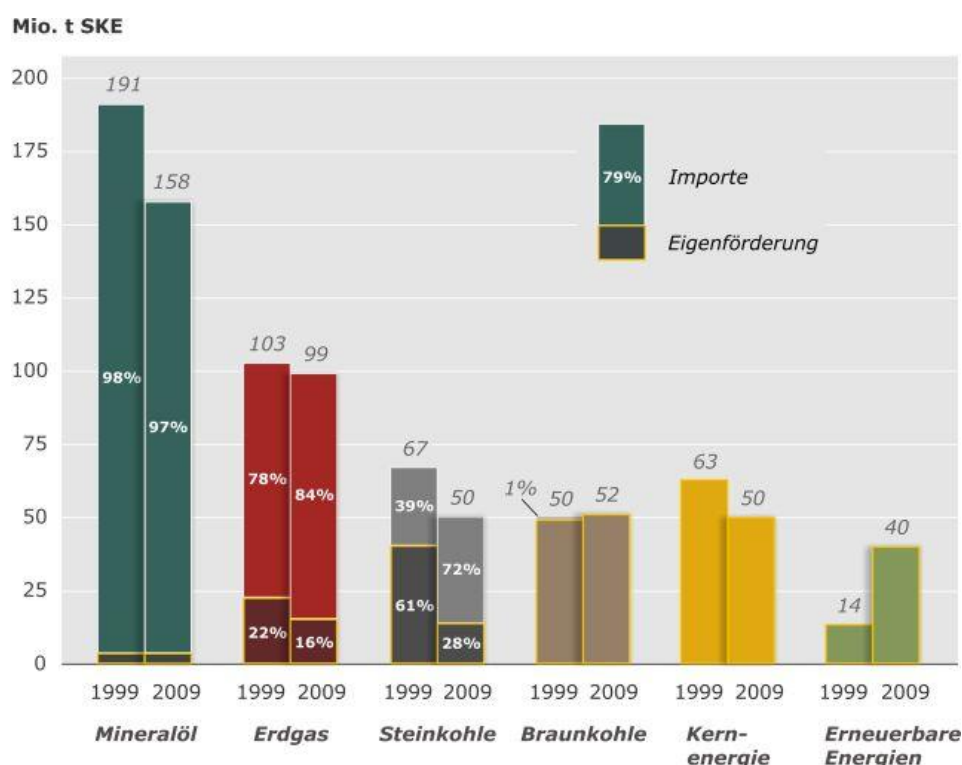


Abbildung 4-1: Importabhängigkeit und Selbstversorgungsgrad Deutschlands in den Jahren 1999 und 2009

Quelle: AGEB 2010, BGR-Datenbank

3. Der Energiebedarf und die Energiekosten werden in den nächsten Jahren weiter erheblich steigen.

²⁸ Data stammt von BGR Energiestudie 2018; 2017

²⁹ Daten stammen von Bernd Hillemeier (Hrsg.): „Die Zukunft der Energieversorgung in Deutschland“, Fraunhofer IRB Verlag; 21.10.2006

³⁰ Daten stammen von AGEB 2010, BGR-Datenbank

Die globale Energienachfrage wird bis zum Jahr 2035 um rund 30 Prozent steigen. Jedes Jahr gehe der Bedarf um 1,4 Prozent nach oben³¹. Besonders wachse sie in den beiden bevölkerungsreichsten Ländern China und Indien stark.

Energy consumption by region

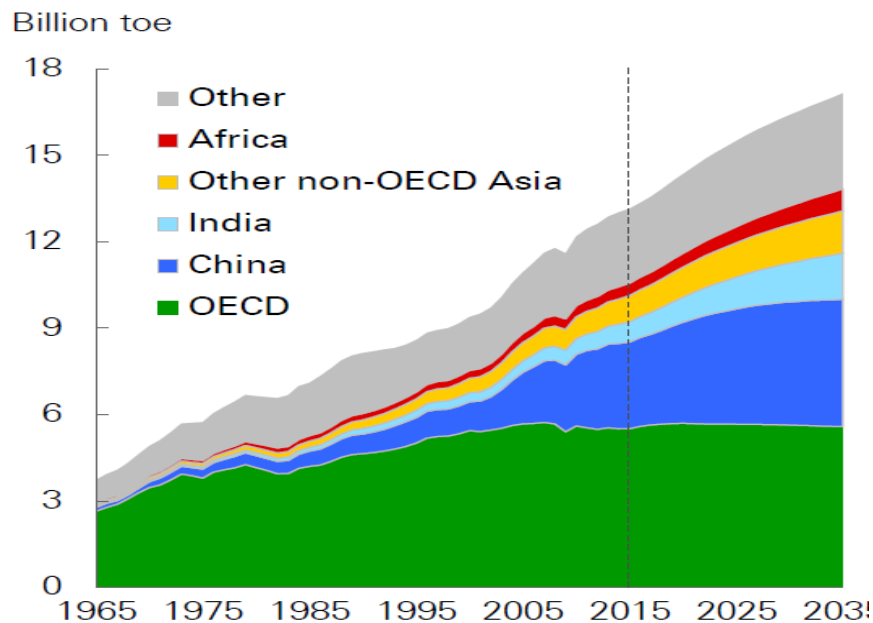


Abbildung 4-2: Energieverbrauch nach Regionen

Quelle: BP Energy Outlook 2017

4. Der Klimawandel bedroht unsere Gesellschaften

Die Verbrennung fossiler Brennstoffe ist die Hauptursache für Treibhausgase, was zur globalen Erwärmung führt. Der Energieverbrauch macht etwa 80% aller Treibhausgasemissionen aus.

Die Klimaerwärmung kann zu einer Reihe von Problemen führen, wie z. B. steigende Meeresspiegel, schmelzende Gletscher, extremes Wetter, Aussterben einiger Pflanzen und Tiere usw. Um eine Klimaerwärmung zu vermeiden, muss auf fossile Brennstoffe weitgehend verzichtet werden.

³¹ Daten stammen von BP Europa SE: "BP Energy Outlook 2035", Bereich Presse & Externe Kommunikation Deutschland, 2017



Abbildung 4-3: In der Arktis wird das Eis immer dünner

Quelle: Colourbox

4.2 Problem bei der Energiewende

Die Energiewende verläuft nicht immer reibungslos und es gibt viele Probleme beim Umwandlungsprozess.

- Die Kosten für die Energiewende sind zu hoch

Die hohen und steigenden Umwandlungskosten sind das Hauptproblem für gegenwärtige deutsche Energiewende. Die direktesten Kosten sind hauptsächlich die Subventionskosten für erneuerbare Energien. Die Einzelhandelspreise für Strom umfassen EEG Umlage, Großhandelspreise, Netznutzungsentgelte, Mehrwertsteuer, CO₂-Steuern und andere Faktoren. Der Erneuerbare-Energien-Zuschlag gleicht die Differenz zwischen der Einspeisetarife („Feed-in Tariff“ (FiT)) der Erneuerbaren Energien und dem Großhandelspreis des Marktes aus, der hauptsächlich von deutschen Staatsbürgern geteilt wird.

Düsseldorfer Institut für Wettbewerbsökonomik („DICE“) hat die direkten und indirekten Gesamtkosten der Energiewende bis 2015 berechnet und die weiteren Kosten bis 2025 geschätzt. Die Energiewende hat zwischen 2000 und 2015 bereits rund 150 Milliarden Euro gekostet. In den Jahren 2000 bis 2025 müssen geschätzt rund 520 Milliarden Euro (nominal, einschließlich der Netzausbaukosten) für die Energiewende im Bereich der Stromerzeugung³².

³² Daten stammen von Justus Haucap, Ina Loeber, Susanne Thorwarth: „Kosten der Energiewende“, DICE Consult GmbH, S3, S4

So viel hat die Energiewende bis heute gekostet

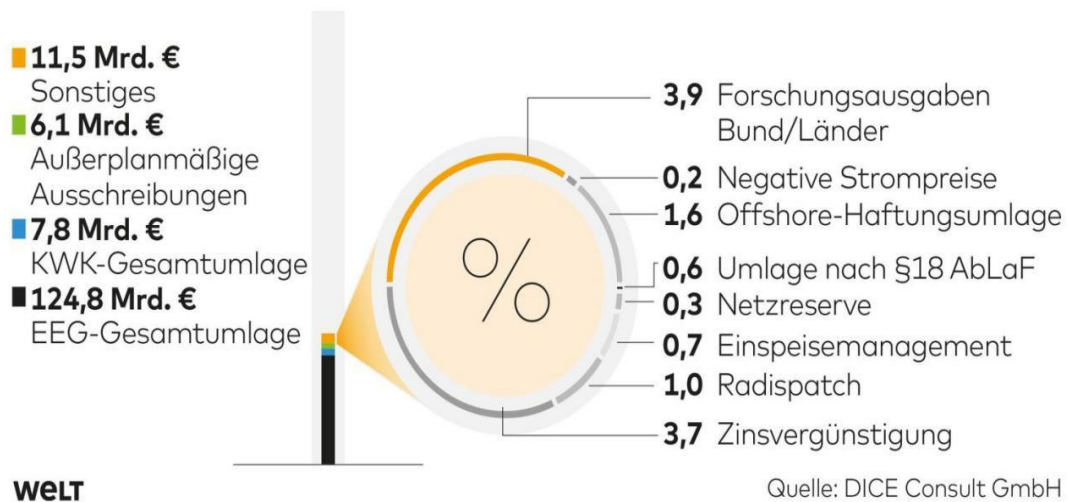


Abbildung 4-4: So viel hat die Energiewende bis heute gekostet

Quelle: DICE Consult GmbH

- EE-Technologien haben noch Probleme.

Technologien für Wellenenergie, Osmose sind nicht ausgereift. Sie sind noch im Forschungsstadium. Technologien für Wasser, Biogas und Geothermie sind bereits ausgereift, aber sie haben nur begrenzte Ausbaupotenziale. Solar- und Windenergie sind die günstigsten Technologien und gleichzeitig haben das größte Potenzial. Aber sie sind auch fluktuierende EE. Stromerzeugung durch Sonnen- und Windkraft ist schnell fluktuierend. Daher sind geeignete Speichertechnik und Stromnetze notwendig. Windkraft und PV sind die beiden Säulen der Energiewende. Wind und PV werden zur Basis der Stromversorgung und die meisten Kraftwerke werden nur in Zeiten von wenig Sonne und Wind gebraucht³³.

- Der Atomausstieg führt zu höheren CO₂-Emissionen.

Deutschland hat im Jahre 2011 sieben Kernkraftwerke stillgelegt. Bis spätestens Ende 2022 werde Deutschland komplett aus der Kernenergie aussteigen. Um den reduzierten Strom zu kompensieren, wird mehr Kohlekraft eingesetzt. In den nächsten Jahren haben die CO₂-Emissionen zugenommen.

- Energiewende führt zu höheren Strompreisen.

³³ Agora Energiewende: „12 Thesen zur Energiewende“, 2012, S9

Deutsche Privathaushalte zahlen aktuell 30,8 Cent pro Kilowattstunde und damit 46,6 Prozent mehr als ihre europäischen Nachbarn. Die Industriestrompreise liegen 14,8 Prozent über dem europäischen Durchschnitt³⁴.

Die Hauptursachen für die hohen Strompreise in Deutschland sind die immensen Kosten der Energiewende und die steigenden Umlagen, Steuern und Abgaben.

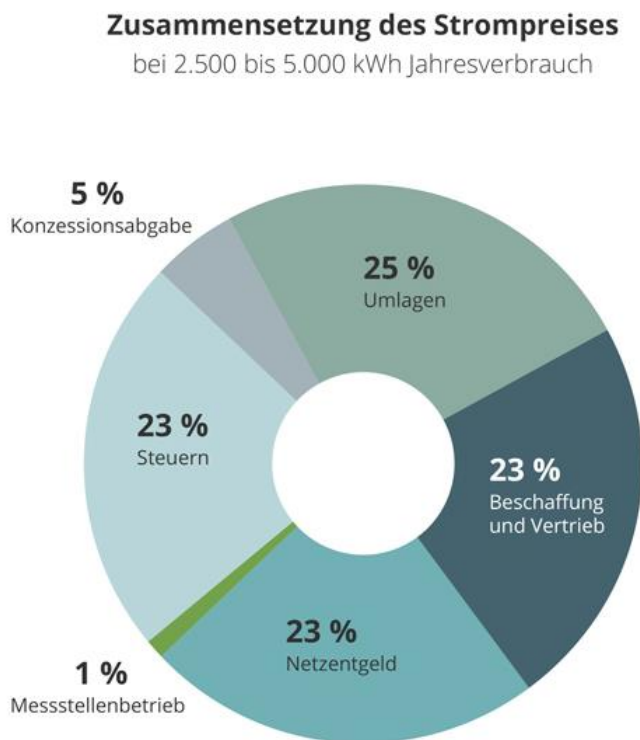


Abbildung 4-5: Zusammensetzung des Strompreises
Quelle: Bundesnetzagentur/ Bundesartellamt (Stand: 21.10.2018)

4.3 Ergebnisse der bisherigen Energiewende

Die Energiewende hat bemerkenswerte Ergebnisse erzielt. Der Fortschritt der Energiewende wird im Hinblick auf die Entwicklung erneuerbarer Energien, Energieeffizienz und Treibhausgasemissionen diskutiert.

- Der Anteil erneuerbarer Energien hat sich deutlich erhöht.³⁵

³⁴ McKinsey & Company, Report: Fostering Effective Energy Transition 2018

³⁵ Daten stammen von AGEE-Stat: Indikator: Erneuerbare Energien, <https://www.umweltbundesamt.de/indikator-erneuerbare-energien#textpart-1>

Der Anteil der erneuerbaren Energien am Stromverbrauch stieg zwischen 2000 und 2018 von 6,3% auf 37,8%. Damit ist das Ziel von 35% für das Jahr 2020 bereits vorzeitig erreicht.

- ✧ Der Anteil der Windkraft an der gesamten Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien beträgt 49 %, und stieg um 5,6% gegenüber 2017. Die Windenergie leistete den größten Beitrag zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien.
 - ✧ Der Anteil der Photovoltaik an der gesamten Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien liegt bei gut 18 %, und stieg gegenüber 2017 um über 17%. Der Anteil der Photovoltaik wächst rasant.
- Treibhausgas-Emissionen sinken deutlich³⁶.

Treibhausgase umfassen Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Distickstoffoxid (N₂O), Schwefelhexafluorid (SF₆), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW/PFC), und teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW/HFC)

In Deutschland konnten die Treibhausgas-Emissionen seit dem Jahr 1990 deutlich reduziert werden. Die Gesamt-Emissionen sind bis 2017 um 27,5% gesunken.

- ✧ Die Emissionen aus der Stromproduktion sanken gegenüber 1990 um ca. 20 %.
- ✧ Die Emissionen aus der Industrieprozesse sanken gegenüber 1990 um 33,4 %.
- ✧ Die Emissionen aus der Landwirtschaft sanken gegenüber 1990 nur um ca. 16 %.

Ein Ziel der Energiewende ist eine Reduktion von Treibhausgasemissionen bis 2020 um 40%. Aus den aktuellen Daten ist das Ziel schwer zu erreichen.

- Die Energieeffizienz hat sich erhöht³⁷.
- ✧ Die Endenergieproduktivität ist Zwischen 1990 und 2017 um c.a.49% gestiegen.
 - ✧ Die Bundesregierung plant eine Steigerung der Energieproduktivität um 2,1% pro Jahr ab 2008.
 - ✧ Tatsächlich lag der durchschnittliche jährliche Anstieg mit 1,15% von 2008 bis 2017, was deutlich unter dem Ziel von jährlich 2,1% lag.

³⁶ Daten stammen von Umweltbundesamt: Treibhausgas-Emissionen in Deutschland:
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#textpart-1>,
25.04.2019

³⁷ Daten stammen von Umweltbundesamt: Indikator: Energieproduktivität:
<https://www.umweltbundesamt.de/indikator-energieproduktivitaet>, 16.02.2018

Die Energieproduktivität ist ein Indikator für die Energieeffizienz. Die Verbesserung der Energieeffizienz ist ebenso wichtig wie der Ausbau erneuerbarer Energien.

- Energieverbrauch hat sich verringert³⁸.
 - ✧ Im Jahr 2017 ist der Primärenergieverbrauch gegenüber 2008 insgesamt um 5,5% gesunken.
 - ✧ Im Jahr 2018 ist der Primärenergieverbrauch nach einer Schätzung gegenüber 2017 um 4,6% gesunken.
- ✧ Aber nach Ziele der Energiewende soll bis 2020 der Verbrauch gegenüber 2008 um 20 % und bis 2050 um 50 % reduziert werden. Der aktuelle Trend reicht nicht aus, um die Ziele der Energiewende im Jahr 2020 zu erreichen.

³⁸ Daten stammen von Umweltbundesamt: Indikator: Energieverbrauch, <https://www.umweltbundesamt.de/indikator-energieverbrauch>, 26.02.2019

5 Zusammenfassung und Ausblick

Deutschland hat eine Reihe von Gesetzen erlassen, um die Energiewende reibungslos auszuführen. Deutschland hat bei dem Ausbau der erneuerbaren Energien, der Reduktion von Treibhausgasemissionen, der Verbesserung der Energieeffizienz und dem Ausbau des Netzes große Fortschritte erzielt. Aber um das Ziel der Energiewende zu erreichen muss Deutschland härter arbeiten. Neben den Indikator für erneuerbare Energien sind andere Indikatoren schwierig, die gesetzten Ziele zu erreichen.

Die beiden Säulen der Energiewende sind Wind- und Sonnenenergie. Laut Bundesnetzagentur werden Windkraft und PV im Jahr 2022 70% des Stroms aus EE erzeugen. Aber Die Volatilität und Regionalität der Sonnen- und Windenergie stellen die Energiewende vor große Herausforderung. Sie haben sich die Kosten und die technischen Schwierigkeiten der Energiewende stark erhöht.

Doch Wind- und Sonnenenergie können sich ergänzen. Im Winter ist der Wind stark und im Sommer ist das Licht Stark. Zudem weht normalerweise der Wind bei ohne Sonne und umgekehrt. In den nächsten Jahren wird der Anteil von Photovoltaik- und Offshore-Kraftwerken stark ansteigen. Das zukünftige Energiesystem wird von Wind- und Sonnenenergie dominiert.

Aus dem aktuellen Trend sind die Ziele bei der Treibhausgas-Emissionen, der Energieeffizienz und dem Energieverbrauch schwer zu erreichen

Die Energiewende ist nicht optimistisch. Und es gibt auch Fragen zu den Perspektiven der Energiewende in der Welt. Deutschland setzt sich jedoch nach wie vor für die Energiewende ein. Um die Stromlücke nach dem Atomausstieg zu schließen und die Volatilität der Stromerzeugung aus Wind- und Sonnenenergie zu beseitigen, wird die Bundesregierung auch die Zusammenarbeit mit den EU-Mitgliedstaaten zur Förderung des Integrationsprozesses des europäischen Strommarktes beschleunigen.

Index

1. Green City-Studie: Die Mehrheit der Deutschen bevorzugt Solarstrom

<https://www.sonnenseite.com/de/energie/green-city-studie-die-mehrheit-der-deutschen-bevorzugt-solarstrom.html>, 03.04.2019

2. Merit-Order

<https://de.wikipedia.org/wiki/Merit-Order>, 19. 06. 2019

3. Umweltbundsamt „Indikator: Erneuerbare Energien“

<https://www.umweltbundesamt.de/indikator-erneuerbare-energien#textpart-1>, 15.03.2019

4. Umweltbundsamt: Indikator: Energieverbrauch

<https://www.umweltbundesamt.de/indikator-energieverbrauch>, 26.02.2019

5. Umweltbundesamt: Treibhausgas-Emissionen in Deutschland

<https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#textpart-1>, 25.04.2019

6. Umweltbundsamt: Indikator: Energieproduktivität,

<https://www.umweltbundesamt.de/indikator-energieproduktivitaet#textpart-1>, 16.02.2018

7. Was ist ein „Smart-Grid“?

<https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/was-ist-ein-smart-grid>: 03.08.2013

Literatur

1. Agora Energiewende: „12 Thesen zur Energiewende“, Oktoberdruck, Berlin, November 2012
2. BP Europa SE: „BP Energy Outlook 2035“, Bereich Presse & Externe Kommunikation Deutschland, 2017
3. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): „Fünfter Monitoring-Bericht zur Energiewende“, Zarbock GmbH & Co. KG, Frankfurt, Dezember 2016
4. McKinsey & Company: Report: Fostering Effective Energy Transition 2018, 2019
5. Umwelt Bundesamt: „Erneuerbare Energien in Deutschland Daten zur Entwicklung im Jahr 2018“, 05.2019
6. Andruleit, Harald/ Franke, Dieter/ Ladage, Stefan/ Lutz, Rüdiger/ Pein, Martin: „Daten und Entwicklungen der deutschen und globalen Energieversorgung“, BGR Energiestudie 2018, 03.2019

Schiffer, Hans-Wilhelm: „Energiamarkt Deutschland“, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019
7. Bernd Hillemeier (Hrsg.): „Die Zukunft der Energieversorgung in Deutschland“, Fraunhofer IRB Verlag, 21.10.2006

Wesselak & Voswinckel: „Photovoltaik“, Springer Fachmedien Wiesbaden; 2012

8. Fricke, J.: „Die Nutzung der Windenergie“, Phys. Unserer Zeit 12(6), 164 (1981). Wiley-VCH Verlag, Weinheim
9. Haucap, Justus/ Loebert, Ina/ Thorwarth, Susanne, „Kosten der Energiewende“
10. Heier, Siegfried: „Windenergieanlagen“, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018
11. Ma, Yuexian: „Verteilung von Wasserkraftwerken in China“, Baidu-Bibliothek
12. Oeding, Dietrich und Oswald, Bernd Rüdiger: „Elektrische Kraftwerke und Netze“, Springer Fachmedien Wiesbaden, 13.01.2017
13. Reich, Gerhard und Reppich, Marcus: „Regenerative Energietechnik“, Springer Fachmedien Wiesbaden; 2018
14. Staab, Jürgen: „Erneuerbare Energien in Kommunen“, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018

Anlagen

Teil 1 A-I

Teil 2 A-III

Anlagen, Teil 1

Eine CD-ROM mit Bachelorarbeit

Anlagen, Teil 2

Tabelle 2.1: Quantitative Ziele der Energiewende und Status quo (2015)

	2015	2020	2030	2040	2050
Treibhausgasemissionen					
Treibhausgasemissionen (gegenüber 1990)	-27,2 %*	mindestens -40 %	mindestens -55 %	mindestens -70 %	-80 % bis -95 %
Erneuerbare Energien					
Anteil am Bruttoendenergieverbrauch	14,9 %	18 %	30 %	45 %	60 %
Anteil am Bruttostromverbrauch	31,6 %	mindestens 35 %	mindestens 50 % EEG 2025: 40 bis 45 %	mindestens 65 % EEG 2035: 55 bis 60 %	mindestens 80 %
Anteil am Wärmeverbrauch	13,2 %	14 %			
Anteil im Verkehrsbereich	5,2 %	10 %**			
Effizienz und Verbrauch					
Primärenergieverbrauch (gegenüber 2008)	-7,6 %	-20 %	 -50 %		
Endenergieproduktivität (2008–2050)	1,3 % pro Jahr (2008–2015)	2,1 % pro Jahr (2008–2050)			
Bruttostromverbrauch (gegenüber 2008)	-4,0 %	-10 %	 -25 %		
Primärenergiebedarf Gebäude (gegenüber 2008)	-15,9 %	 -80 %			
Wärmebedarf Gebäude (gegenüber 2008)	-11,1 %	-20 %			
Endenergieverbrauch Verkehr (gegenüber 2005)	1,3 %	-10 %	 -40 %		

Quelle: Eigene Darstellung BMWi 12/2016

* vorläufiger Wert für 2015

** Ziel gemäß EU-Richtlinie 2009/28/EG

Quelle: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): „Fünfter Monitoring-Bericht zur Energiewende“, S7

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 23.08.2019

Xinjing Hu