

Hochschule  
für Technik  
Stuttgart

**SS 2012**

# Möglichkeiten der alternativen Energiegewinnung in Baden- Württemberg

**Studiengang**

**Infrastrukturmanagement**

Christian Wyrich

SS 2012/005



# Hochschule für Technik Stuttgart

## **Möglichkeiten der alternativen Energiegewinnung in Baden-Württemberg**

### **BACHELOR THESIS**

erstellt von:	Christian Wyrich
Matrikelnummer:	251470
Bachelor Thesis Nr.:	SS 2012/005
Betreuer/Prüfer:	Herr Prof. Dr.-Ing. Schmitt
Zweitprüfer:	Herr Prof. Repnik
Beginn:	28.03.2012
Abgabe:	29.06.2012

## Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, Christian Wyrich, geboren am 19.06.1986 in Zaisersweiher, ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind auch als solche kenntlich gemacht.

Des Weiteren bin ich mir bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen mit sich bringen.

Maulbronn, den 29.06.2012

Christian Wyrich

## Danksagung

Zu aller Erst möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Schmitt für die Betreuung meiner Bachelor Thesis bedanken. Durch die flexiblen Rahmenbedingungen und Freiheiten die mir zugestanden wurden, konnte ich diese Bachelor-Thesis mit den folgenden Resultaten absolvieren.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Herrn Prof. Repnik, der mir als zweiter Betreuer zu Verfügung stand.

Ein weiterer Dank gilt der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), speziell dem Herrn Müller, der Frau Pecina und der Frau Walter. Ohne die Hilfsbereitschaft und die Bereitstellung verschiedener Informationen in Form von Kartenmaterial, wäre es mir nicht möglich gewesen, gewisse Teile dieser Arbeit zu erstellen.

Zu guter Letzt danke ich meinen Eltern, die mir mein Studium erst ermöglicht haben. Meinen Freunden und Kommilitonen möchte ich auch danken, diese haben mich während des Studiums immer wieder motiviert.

# Inhaltsverzeichnis

<b><u>SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG.....</u></b>	<b><u>IV</u></b>
<b><u>DANKSAGUNG .....</u></b>	<b><u>V</u></b>
<b><u>INHALTSVERZEICHNIS.....</u></b>	<b><u>VI</u></b>
<b><u>1 EINLEITUNG.....</u></b>	<b><u>1</u></b>
1.1 VORWORT .....	1
1.2 WUNSCHBILD DER ENERGIEVERSORUNG .....	2
1.3 REALISIERUNG DES WUNSCHBILDES .....	3
<b><u>2 ENERGIEGEWINNUNGSARTEN.....</u></b>	<b><u>4</u></b>
2.1 SONNENENERGIE .....	5
2.1.1 STANDORT .....	5
2.1.2 PHOTOVOLTAIK .....	6
2.1.3 AUSBLICK.....	7
2.2 WINDENERGIE .....	9
2.2.1 WINDENTSTEHUNG.....	9
2.2.2 KENNDATEN DES WINDES .....	10
2.2.3 STANDORT .....	11
2.2.4 WIND ZU ENERGIE.....	12
2.2.5 ARTEN VON WINDENERGIEANLAGEN .....	12
2.2.6 AUFBAU UND FUNKTION EINER WINDKRAFTANLAGE.....	14
2.2.7 EINSATZGEBIETE UND REPOWERING.....	15
2.3 WASSERKRAFT.....	17
2.3.1 WASSERENTSTEHUNG .....	17
2.3.2 STANDORT .....	18
2.3.3 WASSERKRAFTWERKE .....	19
2.3.4 TURBINEN.....	21

2.3.5 AUSWIRKUNGEN.....	25
<b>2.4 BIOENERGIE .....</b>	<b>26</b>
2.4.1 STROMERZEUGUNG.....	27
2.4.3 STANDORT .....	29
2.4.4 VOR- UND NACHTEILE.....	30
<b>2.5 GEOTHERMIE .....</b>	<b>31</b>
2.5.1 AUFBAU DER ERDE.....	31
2.5.2 STANDORT .....	32
2.5.3 TIEFE GEOTHERMIE (GEOTHERMISCHE STROMERZEUGUNG).....	34
2.5.4 AUSBLICK DER GEOTHERMISCHEN STROMERZEUGUNG .....	36
<b>2.6 SPEICHERTECHNOLOGIEN.....</b>	<b>38</b>
<b>2.7 KOMBIKRAFTWERK .....</b>	<b>42</b>
<b>2.8 SMART GRID .....</b>	<b>43</b>
<b><u>3 POTENZIALE IN BADEN-WÜRTTEMBERG.....</u></b>	<b><u>45</u></b>
3.1 IST-ZUSTAND.....	45
3.2 SOLL-ZUSTAND.....	49
<b><u>4 ERMITTLUNGEN DER POTENZIALE.....</u></b>	<b><u>52</u></b>
<b>4.1 PHOTOVOLTAIK .....</b>	<b>52</b>
4.1.1 THEORETISCHES POTENZIAL .....	53
4.1.2 SOLARE EFFIZIENZ AUF HAUSDÄCHERN .....	54
4.1.3 STROMERZEUGENDES POTENZIAL DER PHOTOVOLTAIK .....	56
4.1.4 AUSBLICK.....	59
<b>4.2 WINDENERGIE .....</b>	<b>61</b>
4.2.1 THEORETISCHES POTENZIAL .....	61
4.2.2 TECHNISCHES POTENZIAL.....	61
4.2.4 VERGLEICHSTUDIE .....	76
4.2.4 AUSBLICK.....	78
<b>4.3 WASSERKRAFT.....</b>	<b>79</b>
4.3.1 POTENZIALBEGRIFF .....	79

---

4.3.2 POTENZIALE DER WASSERKRAFT IN BADEN-WÜRTTEMBERG.....	79
4.3.3 AUSBLICK.....	83
<b>4.4 BIOENERGIE .....</b>	<b>84</b>
4.4.1 THEORETISCHES POTENZIAL .....	84
4.4.2 RESTSTOFFE AUS LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT .....	85
4.4.3 ANBAUBIOMASSE (SILOMAIS) .....	88
4.4.4 BIOGENE REST- UND ABFALLSTOFFE .....	90
4.4.5 ZUSAMMENFASSUNG .....	92
4.4.6 VERGLEICH BIOMASSEAKTIONSPLAN JANUAR 2010.....	93
4.4.7 AUSBLICK .....	95
<b>4.5 GEOTHERMIE .....</b>	<b>96</b>
<b><u>5 ZUSAMMENFASSUNG .....</u></b>	<b><u>99</u></b>
<b><u>6 SCHLUSSBETRACHTUNG.....</u></b>	<b><u>100</u></b>
<b><u>QUELLENVERZEICHNIS .....</u></b>	<b><u>102</u></b>
<b><u>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....</u></b>	<b><u>111</u></b>
<b><u>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</u></b>	<b><u>113</u></b>
<b><u>TABELLENVERZEICHNIS .....</u></b>	<b><u>116</u></b>
<b><u>ANHANG.....</u></b>	<b><u>118</u></b>



# 1 Einleitung

## 1.1 Vorwort

Alternative Energien, welche auch unter den Synonymen „regenerative“ oder „erneuerbare“ Energien bekannt sind, sind durch die im März 2011 vorgefallene Kernschmelze in Fukushima noch mehr in den Fokus der Gesellschaft gerückt. Seither stellt sich im Energie- und Umweltsektor immer häufiger dieselbe Frage: „Inwieweit ist es möglich Strom durch erneuerbare Energien zu erzeugen und auf konventionelle Energieerzeugung zu verzichten?“

In dieser Bachelor Thesis werden die Möglichkeiten und Potenziale der alternativen Energien in Baden-Württemberg aufgezeigt. Das Ziel dieser Arbeit ist es die stromerzeugenden Potenziale der einzelnen alternativen Energieträger durch Zahlen zu verdeutlichen. Zu aller Erst wird ein Überblick über die einzelnen stromerzeugenden erneuerbaren Energien gewährt, z.B. welche Alternativen es überhaupt gibt und welche Eigenschaften diese aufweisen. Zudem wird eine Gegenüberstellung des IST-Zustandes mit den Daten des Jahrs 2010 und von der Landesregierung gewollten bzw. prognostizierten Daten dargelegt. In der Schlussbetrachtung wird ein selbsteinschätzender Ausblick prognostiziert.

Da es in dieser Branche diverse Experten gibt, infolgedessen mehrere literarische Werke und Studien auf dem Markt kursieren und das florieren der Technik in diesem Segment nicht außer Acht gelassen werden darf, berücksichtigt die Literaturwahl zum großen Teil aktuelle Quellen.

---

„Es kommt nicht darauf an, die Zukunft vorherzusagen, sondern es kommt darauf an, auf die Zukunft vorbereitet zu sein.“

- Perikles griechischer Staatsmann (500-429 v. Chr.)-

---

## 1.2 Wunschbild der Energieversorgung

Das Wunschbild der Energieversorgung ist mittlerweile überall verbreitet, ein Paradigmenwechsel weg mit den konventionellen Energieträgern, her mit den Alternativen. Grandios wäre es, den gesamten benötigten Strom komplett über die erneuerbaren Energien erzeugen zu können. Stand des heutigen Wissens ist sicher, dass dies momentan und in den nächsten Jahren nicht so schnell umsetzbar sein wird, aber trotzdem auf diese Idealvorstellung hingearbeitet werden muss. Das von der Bundesregierung ins Leben gerufene Erneuerbare Energien Gesetz – EEG (Gesetz für den Vorrang erneuerbarer Energien), welches das Stromeinspeisungsgesetz ablöste, bietet die Rahmendbedingungen für die Realisierung dieser Idealvorstellung. Das seit dem 1. April 2000 in Kraft getretene EEG und bis heute des Öfteren novellierte beinhaltet folgenden Zweck:

- Interesse des Klima- und Umweltschutzes an einer nachhaltigen Entwicklung der Energieversorgung,
- volkswirtschaftliche Kosten zu verringern,
- fossile Energieressourcen zu schonen,
- und die Weiterentwicklung von Technologien zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien zu fördern.

Um diese vier Punkte zu realisieren, verfolgt das Gesetz eine Gesamtstrategie, d.h. den Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromversorgung in vier Etappen zu erhöhen:

- 35 Prozent bis zum Jahr 2020,
- 50 Prozent bis zum Jahr 2030,
- 65 Prozent bis zum Jahr 2040,
- 80 Prozent bis zum Jahr 2050

und die Integration der Strommengen in das Elektrizitätsversorgungssystem zu tätigen. (siehe Anhang)

## 1.3 Realisierung des Wunschbildes

Die Realisierung soll mit der so genannten Energiewende von statten gehen, mit Hilfe des Energiekonzepts der Bundesregierung. Die „Energiewende“ bedeutet den Aufbruch in ein neues Zeitalter der regenerativen Energien, der Energieeffizienz und die des Energiesparens, sozusagen die Realisierung einer nachhaltigen Energieversorgung. Dies ist natürlich mit einem hohen Aufwand verbunden, da ein prinzipieller Umbau der Energieversorgungssysteme und Ausbau der erneuerbaren Energien erfolgen muss, was mit einer technischen und ökonomischen Herausforderung einhergeht. Zentrum der Energiewende sind das Erneuerbare Energien-Gesetz (EEG), das Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) und das Netzausbaubeschleunigungsgesetz (NABEG), das EEG z.B. bietet günstige gesetzliche Rahmenbedingungen wie die Förderregelungen (z.B. die Einspeisevergütung), was unterstützend dazu beiträgt und Anreize bietet auf erneuerbare Energien zurückzugreifen. [1], [2], [3]

Ein weiterer Punkt ist die Energieerzeugung, welche nicht mehr überwiegend zentral erfolgt, sondern teilweise dezentralisiert wird, da der Ausbau der erneuerbaren Energien in privaten Bereichen (Eigenverbrauch oder Netzeinspeisung) möglich ist bzw. zu nimmt, d.h. die Energie wird auch von kleineren Stromproduzenten bereitgestellt und nicht wie bisher von wenigen großen Kraftwerken. Weitere Anforderungen ergeben sich in der Speichertechnologie und der Netzinfrastruktur bzw. Netzausbau, welche es noch weiterzuentwickeln gilt. In den Punkten „2.6 Speichertechnologien“, „2.7 Kombikraftwerk“ und „2.8 Smart Grid“ wird darauf näher eingegangen. [4]

## 2 Energiegewinnungsarten

Die Erde stellt drei erneuerbare Primärenergiequellen, die genutzt werden können, zur Verfügung. Diese basieren auf:

- der Kernfusion der Sonne,
- dem Isotopenzerfall im Erdinneren,
- und der Gravitation der Himmelskörper,

die in einer natürlichen Energieumwandlung auftreten, z.B. Verdunstung und Niederschlag, Wellenbewegung, et cetera. Um diese Primärenergien zu nutzen bedarf es einer technischen Energieumwandlung zur nutzbaren Sekundärenergie („Veredelte Primärenergie“ z.B. Elektrizität). [4]

In der folgenden Abbildung 1 sind die unterschiedlichen „alternativen Energien“ aufgeführt. Diese zeigt die einzelnen Bestandteile dieser Gruppierung und was sie erzeugen.

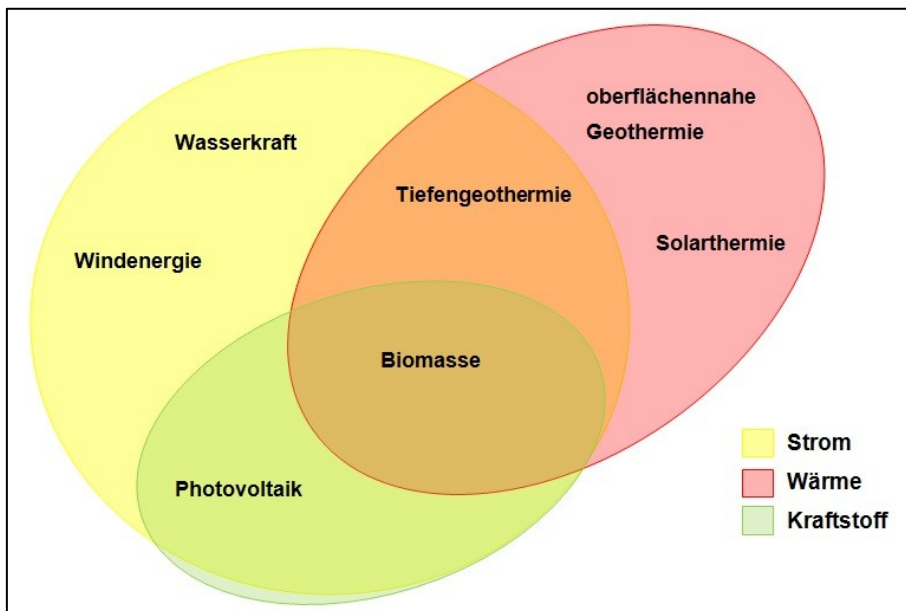


Abbildung 1 - erneuerbare Energien und ihre Anwendungen; eigene Darstellung nach Schmidt [5]

Im Anschluss wird auf die erneuerbaren Energien eingegangen, wobei nur die stromerzeugenden Energien erläutert werden.

## 2.1 Sonnenenergie

Die Sonne ist die mit Abstand größte erneuerbare Energiequelle. Die auf die Erde auftreffenden Sonnenstrahlen sind sowohl durch solarthermische Anlagen als auch durch photovoltaische Anlagen direkt nutzbar. Sie gibt jährlich eine Energiemenge von  $1,08 \cdot 10^{18}$  kWh/m<sup>2</sup> auf unseren Planeten ab, das ist im Vergleich zu dem Energiebedarf unserer Welt das 10.000-fache an benötigter Energie. Deutschland hat eine durchschnittliche Sonneneinstrahlung von 1.000 kWh/m<sup>2</sup>, wo hingegen die Sahara ca. 2.000 kWh/m<sup>2</sup> aufweist. Dies spiegelt sich auch automatisch in den Sonnenstunden, in Deutschland sind es ca. 1.000 h/a und in der Sahara sind es 2.000 h/a. [6]

### 2.1.1 Standort

Für die Standortwahl sind folgende Faktoren ausschlaggebend:

- Ausreichend große Fläche
- Begünstigte Topographie
- Geeignete Infrastruktur (naheliegende Einspeisemöglichkeit, Erreichbarkeit)
- Bebaubarer Untergrund
- Hohe Globalstrahlung (Ermittlung durch: PVGIS Einstrahlungskarten und Solarkataster)
- Günstiger Einstrahlwinkel (20° - 60° ist gut bis sehr gut geeignet)
- Meidung von Feuchtgebieten (Nebelbildung)
- Vermeidung von Verschattung (z.B. angrenzende Wälder und Gebäude)
- Keine landwirtschaftliche Flächen
- Berücksichtigung der Forderungen des Umwelt- und Naturschutzes, des Landschaftsschutzes sowie der Denkmalpflege

Beispiele für geeignete Standortflächen: Abfalldeponien, brachliegende Flächen, versiegelte Flächen, geeignete Dachflächen, et cetera. Im nachfolgenden Punkt wird ausschließlich die Photovoltaik behandelt, da Solarwärmekraftwerke als Stromerzeugungsmöglichkeit für Deutschland und Baden-Württemberg irrelevant sind, da Deutschland sich nicht auf dem 35. nördlichen und südlichen Breitengrad befindet,

sondern zwischen dem 47. und dem 55. und hier die dafür benötigte Solareinstrahlung nicht gegeben ist. [7]

## 2.1.2 Photovoltaik

Photovoltaik sind mehrere Solarzellen, die solare Strahlungsenergie direkt in elektrische Energie umwandeln. Hierbei wird in Halbleitermaterialien ein Licht induzierter Spannungsaufbau herbeigeführt. Die Halbleiter-Solarzelle besteht aus einer p-Schicht und einer n-Schicht, beide sind mit lichtempfindlichen Materialien überzogen. Das Sonnenlicht, welches auf die n-Schicht einstrahlt, setzt positive Ladungsträger frei, diese wandern dann in Richtung p-Schicht. Zur n-Schicht wandern die negativen Ladungsträger. In der Zelle sind die p-, und n-Schichten voneinander getrennt. Die Bildung eines elektrischen Feldes geht an der Grenzschicht von statten. Die beiden Schichten sind jeweils über einen elektrischen Leiter verbunden, so kann dann auch der Stromfluss entstehen. Das Verhältnis von Lichteinstrahlung und Gleichstromerzeugung ist proportional zueinander, d.h. je höher die Lichteinstrahlung, desto höher die Gleichstromerzeugung. Bekannt als der photovoltaische Effekt. Simpel ausgedrückt: „Erzeugung von Strom aus Licht“. [8]

Für die Solarzellen wird hauptsächlich Silizium als Halbleiter Material verwendet. Aufgrund ihrer Beschaffenheit wird in folgende Solarzellen Typen unterschieden:

- Zellen mit monokristalliner Struktur (einheitliche orientierte Siliziumkristalle): Sie sind von allen die teuersten haben jedoch den besten Wirkungsgrad (< 20 Prozent)
- Solarzellen mit polykristalliner Struktur (viele Siliziumkristalle unterschiedlicher Struktur)
- Dünnschichtzellen, diese bestehen vorwiegend aus amorphen Silizium. Diese haben im Gegensatz zu den monokristallinen Zellen einen sehr viel geringeren Wirkungsgrad, sind aber günstiger. [8]

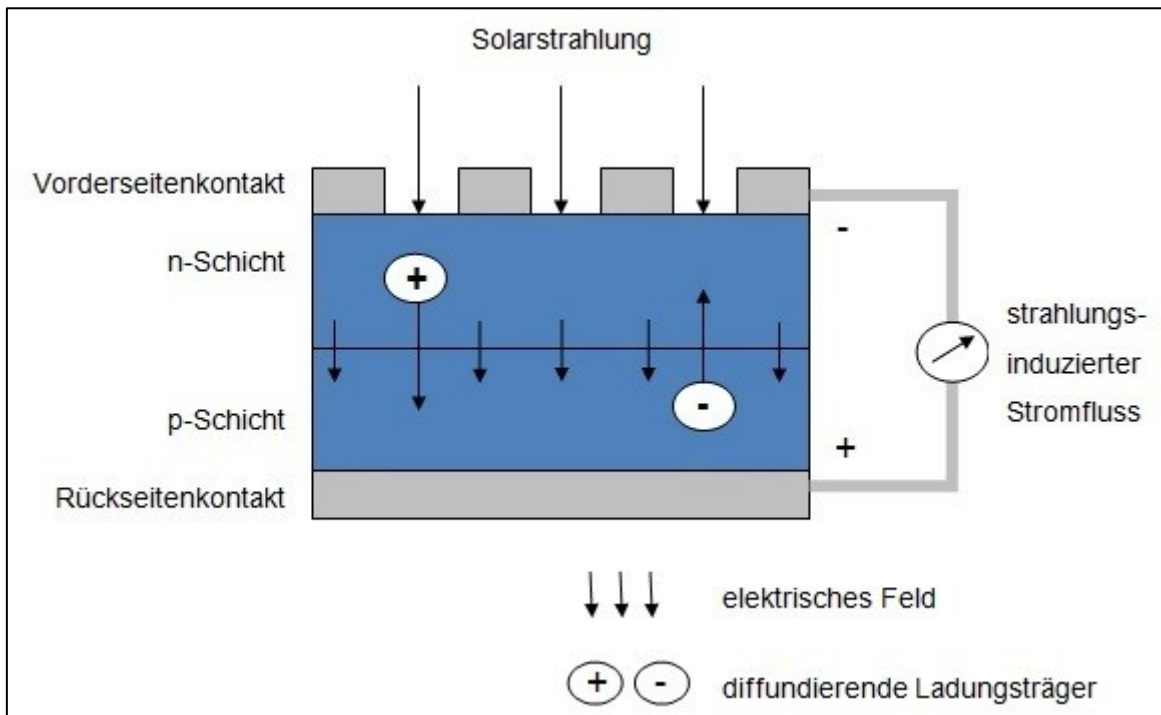


Abbildung 2 - Grundprinzip der photovoltaischen Stromerzeugung; eigene Darstellung nach Krimmling [8]

### 2.1.3 Ausblick

Die Photovoltaik ist sehr klimaverträglich und fast überall einsetzbar. Es entsteht weder Lärm noch werden Luftschadstoffe bei der Stromherstellung freigesetzt und die Entsorgung alter Silizium-Solarzellen stellen kein Problem dar. Zudem ist der Rohstoff Silizium häufig in der Erdkruste zu finden. Weitere Punkte, wie die lange Lebensdauer (25 - 30 Jahre), Integrierbarkeit in baulichen Strukturen, dezentrale Stromversorgung, „kurze“ Amortisationszeiten, geringer Wartungsaufwand, Recyclebarkeit sollten auch noch genannt werden. [9], [10]

Hinzukommend ist die Photovoltaik stark abhängig von der Sonne, kann also naturgemäß nachts keine Energie herstellen. Zudem schmälert der Jahreszeitenwechsel den Ertrag, durch weniger Sonnenstunden aufgrund von Schlechtwetter, das mit Bewölkung einhergeht. Dies stellt wiederum ein Problem beim Einbau in die elektrischen Versorgungsnetze dar, da keine kontinuierliche Einspeisung erfolgt. Weiterhin haben die Silizium Zellen keinen entsprechend hohen Wirkungsgrad. Andere Arten sind nicht erschwinglich, da die Kosten in der Herstellung äußerst hoch

---

sind. Des Weiteren sind Umwandlungsverluste des Gleichstroms in Wechselstrom durch einen Wechselrichter für die Netzeinspeisung festzustellen. [10]



## 2.2 Windenergie

Die Windenergie ist eine fast unbegrenzte Form der Energiegewinnung. Leider weist diese Form der Energiegewinnung Probleme in der Wirtschaftlichkeit und Konkurrenzfähigkeit auf. Dennoch schreitet die Entwicklung der Windkrafttechnik mit leistungsstärkeren und effizienten Produkten voran. Aufgrund der allgemeinen Ressourcenknappheit und die damit verbundenen steigenden Rohstoffpreise ist es sehr wahrscheinlich, dass die Windkraft im Vergleich zu den brennstofflastigen Verfahren an Wirtschaftlichkeit zunimmt. Sie könnte in der Zukunft eine der wichtigsten Energiequellen werden. [11]

### 2.2.1 Windentstehung

Die Windenergie ist eine Sekundärform der Sonnenenergie. Durch die Sonne werden Gebiete ungleichmäßig bestrahlt, d.h. in einem unterschiedlichen Winkel und somit mit divergierender Intensität, dementsprechend sind Temperaturunterschiede die Folge. Die Luft welche sich am Äquator befindet, wärmt sich durch die rege Sonneneinstrahlung stark auf, aufgrund der Brownschen Molekularbewegung dehnt die Luft sich aus und steigt in die oberen Schichten der Atmosphäre auf. Die Luft an den Polen hingegen ist um einiges kälter und dichter und befindet sich demnach im Bodenbereich. Dadurch entstehen Hochdruck- und Tiefdruckgebiete, d.h. es gibt Druckunterschiede. Da die Natur nach wie vor ein Gleichgewicht verfolgt, wird dieser Druckunterschied ausbalanciert, d.h. die Luft mit dem höheren Druck strömt stets in die Richtung des tieferen Drucks, die sogenannten Ausgleichsströme. Ein ständiger Kreislauf entsteht. Dieser Kreislauf, welcher auch im Volksmund als Wind, in der Fachliteratur hingegen als Luftstrom bezeichnet wird, ist nun in Form von Windkraftanlagen technisch nutzbar. Neben den globalen Druckunterschieden kommt es verstärkt in Küstengebieten zu lokalen Windsystemen. Am Tage kommt es zu Ausgleichströmungen in Richtung Festland und nachts, in die andere Richtung. [6], [12], [4]

## 2.2.2 Kenndaten des Windes

Die Kenndaten des Windes bestehen aus drei wesentlichen Punkten:

1. Die Windrichtung wird nach dem Polarwinkel Azimut bzw. einer Windrose bestimmt. Für die Richtungsangabe wird die 360° Skala des Kreises verwendet, d.h. Ost = 90°, Süd = 180°, West = 270° und Nord 0° bzw. 360°. Die Angabe erfolgt im Uhrzeigersinn. [13]
2. Die Windgeschwindigkeit wird im Abstand von 10 m Höhe über der Geländeoberkante festgestellt, prinzipiell wird das Mittel aus 10 Minuten als Durchschnittswert gewählt. Die Windgeschwindigkeit wird mit „v“ bezeichnet und mit den SI-Einheiten [m/s], [km/h] oder Knoten [kn] angegeben. [14]
3. Die Windstärke gibt die auf Gegenstände wirkende Kraft des Windes an. Diese ist in der Beaufortskala in Form des Beaufortgrades der von 0 bis 12 reicht, einsehbar, wie in der Tabelle 1 zu erkennen ist. [6]

Beaufort-grad	v in m/s	Bezeichnung	Auswirkung
0	0...0,2	Windstille	Rauch steigt gerade empor
1	0,3...1,5	leiser Zug	Windrichtung nur am Rauch erkennbar
2	1,6...3,3	leichter Wind	Wind fühlbar, Blätter säuseln
3	3,4...5,4	schwacher Wind	Blätter und dünne Zweige bewegen sich
4	5,5...7,9	mäßiger Wind	Wind bewegt Zweige und dünne Äste, hebt Staub
5	8,0...10,7	frischer Wind	kleine Bäume beginnen zu schwanken
6	10,8...13,8	starker Wind	starke Äste in Bewegung, pfeifen an Drahtleitungen
7	13,9...17,1	steifer Wind	starke Äste in Bewegung, fühlbare Hemmung beim Gehen
8	17,2...20,7	stürmischer Wind	Wind bricht Zweige von den Bäumen
9	20,8...24,4	Sturm	kleine Schäden an Haus und Dach
10	24,5...28,4	schwerer Sturm	Wind entwurzelt Bäume
11	28,5...32,6	orkanartiger Sturm	schwere Sturmschäden
12	≥32,7	Orkan	schwere Verwüstungen

Tabelle 1 - Einteilung der Windgeschwindigkeiten nach der Beaufortskala; eigene Darstellung nach Quaschnig [6]

Die Tabelle 1 zeigt die Gegenüberstellung der Beaufortskala mit den Windgeschwindigkeitswerten. Deutschland, welches sich in der Westwindzone befindet, weist in 10 m Höhe eine mittlere Windgeschwindigkeit von ungefähr 4 m/s auf, demnach ein Beaufortgrad von 3. [14]

### 2.2.3 Standort

Der Standort für die Windenergie ist das ausschlaggebende Kriterium, aufgrund von Reibungseffekten nimmt die Windgeschwindigkeit in höheren Lagen zu. Der Energiegehalt des Windes steigt mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit. [14]

Um einen geeigneten Standort zu identifizieren werden des Öfteren Häufigkeitsverteilungen, um das Jahresangebot der Windenergie zu ermitteln, angewandt. Diese können über Vergleichsmessungen oder statische Parameter in Form von Tabellen oder Windatlanten ermittelt werden. Die Häufigkeitsverteilungen können zum einen tabellarisch oder zum anderen als eine statische Funktion dargestellt werden. Ferner sollte ein akkreditiertes Windgutachten durchgeführt werden, um eine optimale Nutzung zu gewährleisten. [6]

Weitere Punkte wie die Entfernung der Anbindung an das Mittelspannungsnetz, Genehmigungen, Abstandsflächen aufgrund von Lärm-Emissionen, Landnutzungsrechte, Umweltverträglichkeitsprüfungen und ob das Gebiet gut erschlossen ist und wie die Geländeverhältnisse dort sind um den Windpark kostengünstig zu realisieren, sollten auch noch beachtet werden. Nicht zu übergehen ist, dass Hügel, Anhöhen, Bodenungleichheiten und Bergkuppen Windgeschwindigkeit abbremesen. [15]

Z.B. bieten die Küstengebiete, Offshore Bereiche, Mittel – und Hochgebirgslagen die besten Bedingungen. Gebiete die im Geschwindigkeitsmittel schneller als 4,5 m/s wehen, sind als rentabel anzusehen. [6]

## 2.2.4 Wind zu Energie

Die Dichte der Luft ist ausschlaggebend für den erzeugenden Ertrag. Je dichter die Luft, umso kälter ist es und umso geringer ist der Luftdruck, die Dichte verhält sich proportional zum Luftdruck. Bei z.B. einer Windgeschwindigkeit von 30 m/s und einer Temperatur von 10° C beträgt die Leistung 16,6 kW/m<sup>2</sup>. Dagegen beträgt die Leistung einer Windgeschwindigkeit von 1 m/s lediglich 1 W/m<sup>2</sup>. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass für den Ertrag einer Windkraftanlage hohe mittlere Windgeschwindigkeiten ausschlaggebend sind.

Um die Windkraft zu nutzen, ist dem Wind die Leistung zu entziehen. Dies kann beispielsweise durch eine Windturbine von statten gehen, indem bei der Windturbine eine Drosselung der Windgeschwindigkeit stattfindet, infolgedessen der damit entstehende Leistungsunterschied verwendet wird. [6]

## 2.2.5 Arten von Windenergieanlagen

Es wird unterschieden zwischen Widerstandsläufer und Auftriebsläufer.

Der **Widerstandsläufer** besitzt eine vertikale Achse. Nach dem Widerstandsprinzip entzieht er dem Wind Leistung und setzt den Rotor in Bewegung. [16] Mit dieser Art können maximal 12 Prozent der Strömungsenergie erzielt werden. Der geringe Wirkungsgrad kommt durch die gebremste Drehbewegung der Rotorblätter zustande, da diese gegen den Wind zurückgeführt werden müssen. Die Widerstandsläufer sind gegenwärtig nur noch in Sonderanwendungen in Gebrauch, da diese auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht gegen Rotoren mit horizontaler Drehachse konkurrieren können.

Der **Auftriebsläufer** besitzt eine horizontale Achse. Er weist hierbei einen deutlich höheren (theoretisch) Maximalwirkungsgrad von 59 Prozent auf. Der Auftriebsläufer nutzt die aerodynamischen Auftriebskräfte einer Flügelform zur Schaffung einer rotierenden Bewegung. [17], [18]

Windenergieanlagen mit horizontaler Drehachse werden unterschieden in Lee- und Luv Läufer. In der folgenden Abbildung werden diese dargestellt.

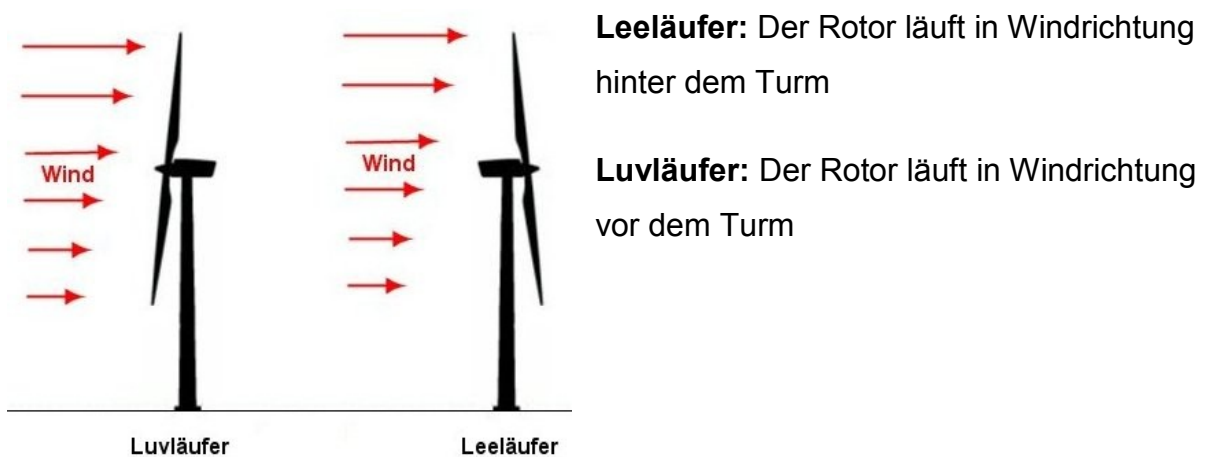


Abbildung 3 - Luv- und Leeläufer [16]

Die Leeläufer haben den Vorteil, dass eine Tangierung des Rotorblattes mit dem Turm unwahrscheinlicher ist, sie haben sich jedoch nicht durchgesetzt, da z.B. durch den Turmschatten eine geringere Leistung des Leeläufers im Vergleich zum Luvläufer zu verzeichnen ist. [19]

Die Windenergieanlagen werden in Klassen unterteilt, die sich nach der Leistung richten:

- Kleinst- Windenergieanlagen im Leistungsbereich einiger kW,
- kleine Windenergieanlagen mit Rotordurchmessern bis 16 m und bis 50 kW elektrische Leistung,
- mittlere Windenergieanlagen bis 45 m Durchmesser und 500 kW Leistung und
- große Windenergieanlagen bis über 100 m Durchmesser und mit mehreren MW Leistung.

In der Tabelle 2 wird der Fortschritt in Bezug auf die Leistung, die Größe und den Ertrag deutlich. Die neueren Anlagen sind um einiges größer und leistungsfähiger als die aus den 80er Jahren. Die energetische Amortisationszeit beträgt heutzutage noch ca. 4-7 Monate. [17]

Jahr	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2008
Nennleistung [kW]	30	80	250	600	1500	3000	6000
Rotordurchmesser [m]	15	20	30	46	70	90	126
Nabenhöhe [m]	30	40	50	78	100	105	135
Jahresenergieertrag [MWh]	35	95	400	1250	3500	6900	≈20000

Tabelle 2 - Windkraftanlagen im Wachstum; eigene Darstellung nach BWE [16]

## 2.2.6 Aufbau und Funktion einer Windkraftanlage

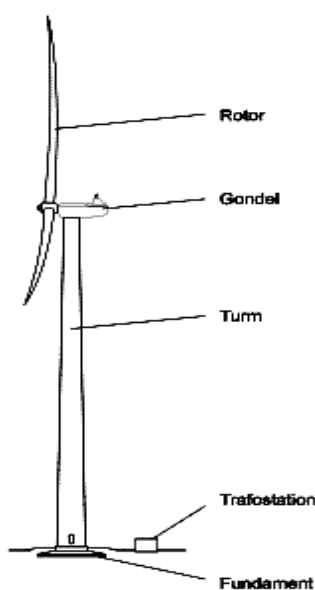


Abbildung 4 - Aufbau einer Windkraftanlage [20]

Eine Windkraftanlage besteht aus vier Hauptkomponenten:

- Fundament
- Turm
- Gondel
- Rotor

Die Windenergieanlagen mit horizontaler Achse sind nach der Windrichtung auszurichten, um eine optimale Windkraftnutzung zu gewährleisten. Es wird zwischen passiven und aktiven Systemen differenziert. Bei der passiven Variante werden zwei Vorgehensweisen unterschieden, der selbständige Nachlauf von Leeläufern und für die Luvläufer die Windfahnen. Aktive Systeme sind hauptsächlich

in modernen Anlagentypen wiederzufinden, diese werden mit Azimutantrieben automatisch nachgeführt. [16]

3-4 m/s beträgt die Anlaufgeschwindigkeit einer Windenergieanlage. Die Nennleistung (Maximalleistung) wird bei einer Nenngeschwindigkeit von ungefähr 12-16 m/s erreicht. Bei einer Windstärke von 10, gemäß Beaufortskala ca. 25 m/s, wird die Drehzahl des Rotor abgebremst, sogar gestoppt oder die Blätter werden aus dem Wind gedreht, um einer Überlastung des elektrischen Generators vorzubeugen. [17]

Die Leistungsbegrenzung erfolgt über zwei Varianten, entweder die Stall-Regelung oder die Pitch-Regelung.

- Bei der Stall-Regelung findet kein aktiver Eingriff statt. Der Stall-Effekt tritt bei Erreichen von Nenndrehzahl und Nennleistung automatisch durch konstruktionsbedingten Strömungsabriss (engl.: stall) an den Blättern ein, d.h. die Drehzahl wird begrenzt. Der Blatteinstellwinkel bleibt gleich. Bei Stall-regelten Anlagen geht die Leistung nach Erreichung der Maximalleistung wieder zurück und bleibt nicht auf einem gleichbleibenden Niveau. [6], [17]
- Die Pitch-Regelung wird häufig bei größeren Anlagen angewandt, hierbei können die Blattflügel elektromotorisch um ihre eigene Achse gedreht werden, das sogenannte „pitchen“. Dadurch ist es möglich, dass jederzeit der richtige Winkel für den temporär wehenden Wind einstellbar ist. Der technische Aufwand ist als deutlich höher anzusehen. [6]

## 2.2.7 Einsatzgebiete und Repowering

Es gibt drei verschiedene Einsatzgebiete der Windkraftanlagen:

1. Onshore, bei dieser Art handelt es sich um Windparkanlagen die auf dem Festland gebaut und betrieben werden.
2. Offshore, ist die Nutzung der Windenergie auf dem Meer. Diese Art der Energiegewinnung ist wesentlich kostenintensiver und aufwändiger, z.B. aufgrund der Meerestiefen und dem Stromtransport. Wie in Punkt „2.2.3

Standort“ schon als Beispiel aufgezeigt, weht der Wind dort kontinuierlicher und stärker. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten sollten die Anlagen mindestens 5 MW an elektrischer Leistung aufweisen.

3. Nearshore, bezeichnet die Nutzung der Windenergie in Ufernähe. Die erste deutsche Nearshore Anlage befindet sich bei Emden bei der Ems mit einer Leistung von 6 MW. [12]

Unter **Repowering** versteht man, Windenergieanlagen der ersten Generation durch modernere, effizientere Turbinen zu ersetzen. Die Vorteile des Repowering sind klar ersichtlich:

- Sie lassen sich besser in das elektrische Netz integrieren,
- die Anlagenanzahl lässt sich reduzieren,
- mit aktueller Technik haben sie geringere Drehzahlen,
- sie sind emissionsarmer, als die älteren Anlagen,
- Naturschutzproblematiken können bei Neuplanungen ebenfalls gelöst werden,
- niedrigere Betriebskosten, da sie wartungsärmer und zuverlässiger sind [21]



Abbildung 5 - Repowering [22]

Bei einer Halbierung der Windenergieanlagen und Ersetzen dieser älteren Modelle mit neueren Anlagen kann eine Verdopplung der Leistung und eine Verdreifachung des Ertrages erzielt werden. [21]



## 2.3 Wasserkraft

Die Wasserkraft stellt die weltweit wichtigste regenerative Energiequelle dar. Sie ist eine der Arten der Energiegewinnung die auch grundlastfähig ist. Ein Wasserkraftwerk kann bis zu 90 Prozent der enthaltenen Energie im Wasser umwandeln. Die Wasserkraft geht aus einem natürlichen Kreislauf hervor, der sich ständig erneuert, die Energieerzeugung mit Wasserkraftwerken ist emissionsfrei, sauber und umweltfreundlich. Viele Länder besitzen geeignete geographische Gegebenheiten um die Wasserkraft zur Energiegewinnung einzusetzen, z.B. deckt Norwegen fast den gesamten Elektrizitätsbedarf durch Wasserkraft. Die Wasserkraft birgt viele Vorteile, aber auch einige Nachteile, worauf später noch näher eingegangen wird. [6], [23]

### 2.3.1 Wasserentstehung

Die Sonne hat einen starken Einfluss auf die Entstehung des Wassers. Durch sie ist das Wasser zu 98 Prozent im flüssigen Aggregatzustand, ohne die Sonne hingegen, wäre unser Planet eine reine Eiswüste. Im Jahresmittel ist eine Verdunstung durch die Wärme der Sonne von ungefähr 980 l/m<sup>2</sup> Wasser und insgesamt 500.000 km<sup>3</sup>/a zu verzeichnen. Zu 71 Prozent ist die Erde mit Wasser bedeckt, davon sind 97,4 Prozent Salzwasser und ein geringer Teil von 2,6 Prozent Süßwasser. Der Süßwasseranteil steckt ungefähr zu Dreiviertel in Polareis, Meereis und Gletschern, der kleinere Anteil hauptsächlich im Grundwasser und der Bodenfeuchte. Seen und Flüsse haben nur einen Anteil des weltweiten Vorkommens von 0,02 Prozent. [6]

---

Vom Himmel kommt es,  
zum Himmel steigt es,  
und wieder nieder zur Erde muss es,  
ewig wechselnd

-Johann Wolfgang von Goethe-

---

Wie Johann Wolfgang von Goethe schon erkannte, ist der Kreislauf der Wasserentstehung immer derselbe. In der folgenden Abbildung 6 wird dieser nochmals genauer beschrieben.

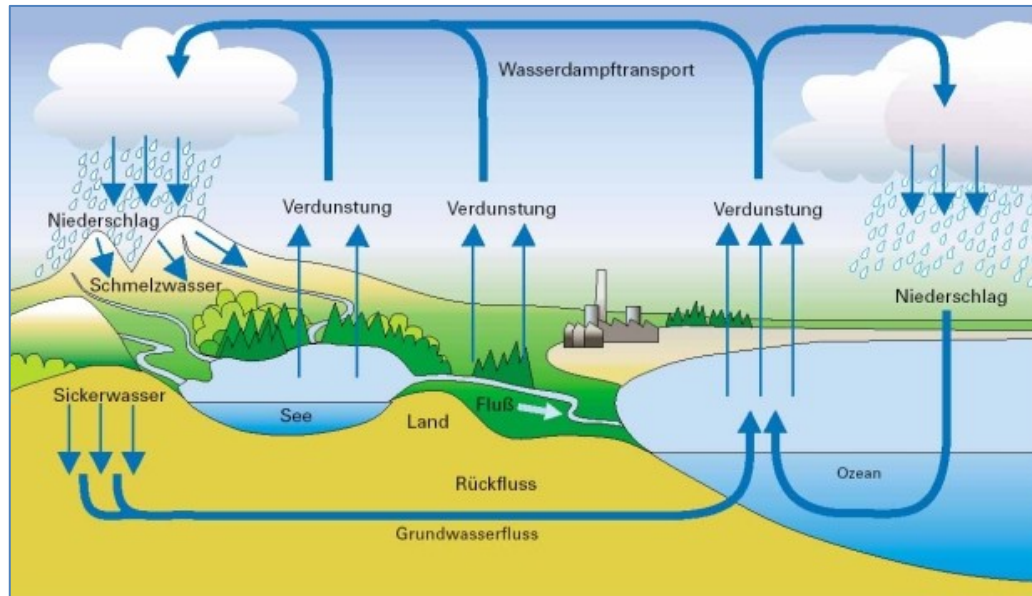


Abbildung 6 - Wasserkreislauf [24]

Die Sonne lässt das Wasser verdunsten, d.h. das Wasser wird in Wasserdampf umgewandelt, dieser steigt darauf in die Luft. Teile des Wasserdampfs kondensieren und landen dann in Form von Niederschlag und / oder Schnee auf der Erde oder wieder im Meer. Bekannterweise fließt das Wasser immer von oben nach unten, infolgedessen fließt das Wasser aufgrund der Höhenunterschiede vom Land über die Flüsse in das Meer. Dieser Kreislauf wiederholt sich ständig, wie es auf der oberen Abbildung 6 zu erkennen ist. Das über die Flüsse abfließende Wasser kann nun als nutzbare Energie verwendet werden. [4]

### 2.3.2 Standort

Für den Einsatz von Wasserkraftanlagen muss ein geeigneter Standort gefunden werden. Für das Wasserkraftpotenzial und die erzeugbare Energiemenge sind die geografischen Faktoren die Hauptkriterien, wie z.B. die Fallhöhe und die Abflussmenge. Demgemäß ist die Nutzung der Wasserkraft hauptsächlich in Seen, Gebirgsflüssen und Mittelgebirgen am häufigsten zu finden. [25]

Aufgrund der Stilllegung vieler kleiner Wasserkraftanlagen in den 80er Jahren, sind diese alten deutschen Standorte für eine neue Anlageninstallation prädestiniert. Für diesen Zweck wird mit Unterstützung von Computerprogrammen auf Grundlage der Standortfaktoren die realistische erzeugbare Jahresenergiemenge in einem sogenannten Leistungsplan ermittelt. Diese Punkte gilt es zu beachten [23]:

- Befund der wasserbaulichen Anlagen (Wehr, Kanäle,...)
- Befund der technischen Bestandteile (Turbine, Generator, ...)
- Bauplatzuntergrund
- Möglich vorhandene Hochschutzwasserbereiche
- Qualität des Wasser (Verunreinigungen, Geschiebe, ...)
- Grundwasserstände
- Grundstückbeschaffenheit (Eigentumsverhältnisse, Wasserrechte, ...)
- Vorschriften oder Forderungen in Bezug auf den Natur- und Landschafts-schutz [23]

### 2.3.3 Wasserkraftwerke

Im Allgemeinen wird bei Wasserkraftanlagen zwischen drei Typen differenziert:

- Laufwasserkraftwerk
- Speicherwasserkraftwerk
- Pumpspeicherkraftwerk

Des Weiteren können sowohl im Ozean als auch in Küstengebieten Wellenkraftwerke, Meeresströmungskraftwerke und Gezeitenkraftwerke installiert werden.

**Laufwasserkraftwerke** bzw. Flusswasserkraftwerke sind, wie man aus dem Name ableiten kann, an Flussläufen gebaut. Flüsse die übers Jahr betrachtet allgemein eine große Menge an Wasser beinhalten, sind besonders dafür geeignet, da der Stromertrag mit dem Pegel des Flusses einhergeht. Dieser Kraftwerkstyp gehört zu den Niederdruck- und Mitteldruckkraftwerken und ist sowohl grundlast- als auch mittellastfähig. Sie sind bei Fallhöhen >15 m bis 50 m einsetzbar, diese ist als der

Höhenunterschied zwischen dem Wasserspiegel oberhalb der Turbine (Oberwasser) und dem Wasserspiegel hinter der Turbine (Unterwasser) definiert. [12]

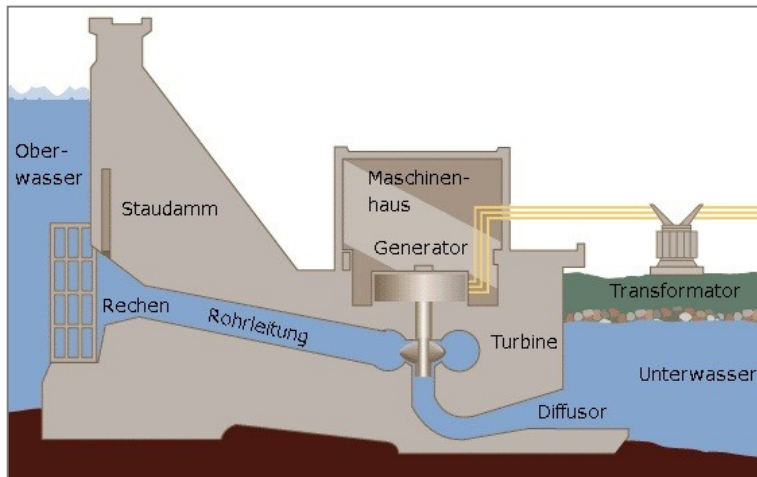


Abbildung 7 - Funktionsprinzip Laufwasserkraftwerk [12]

Zunächst wird anhand eines Rückstaus aufgrund eines Wehrs (Abbildung 7 „Staudamm“) ein Höhenunterschied der Wasseroberflächen vor und hinter dem Wasser gebildet, die sogenannte Fallhöhe.

Das abfallende Wasser wird durch eine (oder mehrere) Turbine geführt, die Turbine ihrerseits treibt dadurch einen elektrischen Generator an. Die letztendlich gewünschte Netzspannung wird von einem Transformator erzeugt, welcher die Spannung des Generators umwandelt. [6]

Im Gegensatz zu den Flusskraftwerken, die fast keine Speichermöglichkeiten haben und die Stromerzeugung stark dargebotsabhängig ist, sind **Speicherwasserkraftwerke** zum Ausgleich von natürlichen Schwankungen des Wasserangebots fähig. Dieser Typ ist eher in den Bereichen der Mittel- und Hochdruckanlagen kategorisiert und ist zur Deckung der elektrischen Grundlast, Mittellast als auch zur Spitzenlastabdeckung einsetzbar. Die Fallhöhen reichen von ca. 15 m bis 2.000 m. Das Speicherwasserkraftwerk ist stets an einem künstlich angelegten oder natürlichen See beheimatet und von einem natürlichen Zufluss gespeist. Durch eine Stauung des Oberwassers wird eine Wasserstandserhöhung erzeugt, daraus resultierend ergeben sich der nötige Druck und ein gleichmäßiger Wasserfluss. Bedarfsgeführt mündet das Wasser durch Rohrleitungen über ein Gefälle zur tiefer gelegenen Turbine und wird darauffolgend in das Unterbecken abgeleitet. Teilweise ist das Unterbecken gleichermaßen ein Stausee, der logischerweise wieder als Oberbecken für weitere Turbinen fungiert. [6], [12]

**Pumpspeicherkraftwerke** dienen zur Speicherung von Energie. Sie sind im Bereich der Hochdruckkraftwerke anzusiedeln, die auf die Spitzenlastdeckung abzielen und Fallhöhen zwischen 50 m und 2.000 m aufweisen. [12]

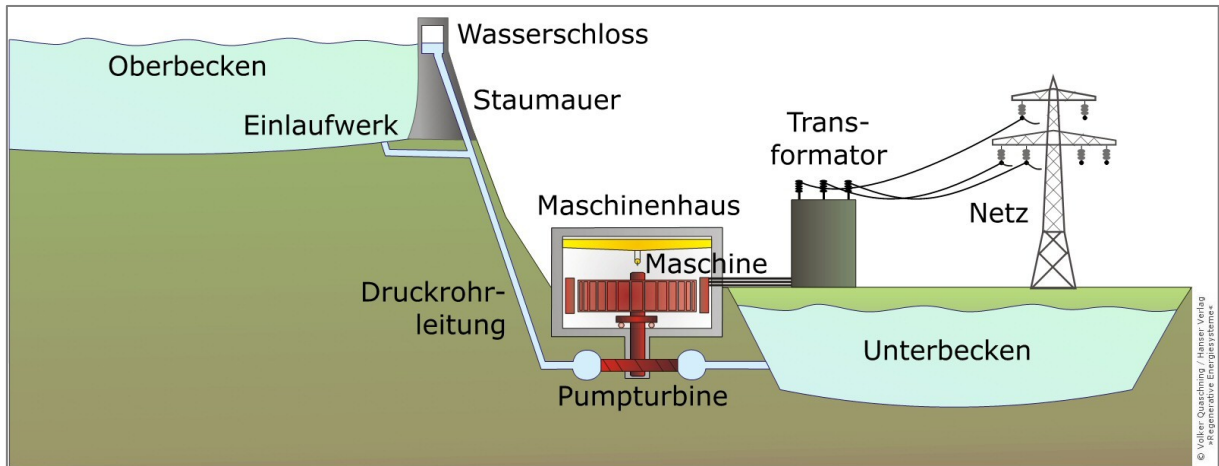


Abbildung 8 - Funktionsprinzip Pumpspeicherkraftwerk [6]

Das Pumpspeicherkraftwerk arbeitet in zwei Varianten.

1. Variante: Wenn ein Überangebot an Energie vorhanden ist, wird eine Pumpe angetrieben, die das Wasser vom Unterbecken ins Oberbecken pumpt.
2. Variante: Bei einer Stromnachfrage wird das Wasser vom Oberbecken in das Unterbecken über eine Druckrohrleitung geleitet, wodurch eine Turbine angetrieben wird und das Wasser wieder in das Unterbecken zurückfließt. Infolgedessen wird der nachgefragte Strom produziert. [12]

## 2.3.4 Turbinen

Die Turbine ist einer der wichtigsten Bausteine einer Wasserkraftanlage, sie wandelt die Bewegungsenergie des Wassers in mechanische Arbeit um, welche dann über einen angekoppelten Generator in elektrische Energie umgewandelt wird.

Die folgende Abbildung 9 zeigt die Einsatzgebiete der verschiedenen Turbinentypen.

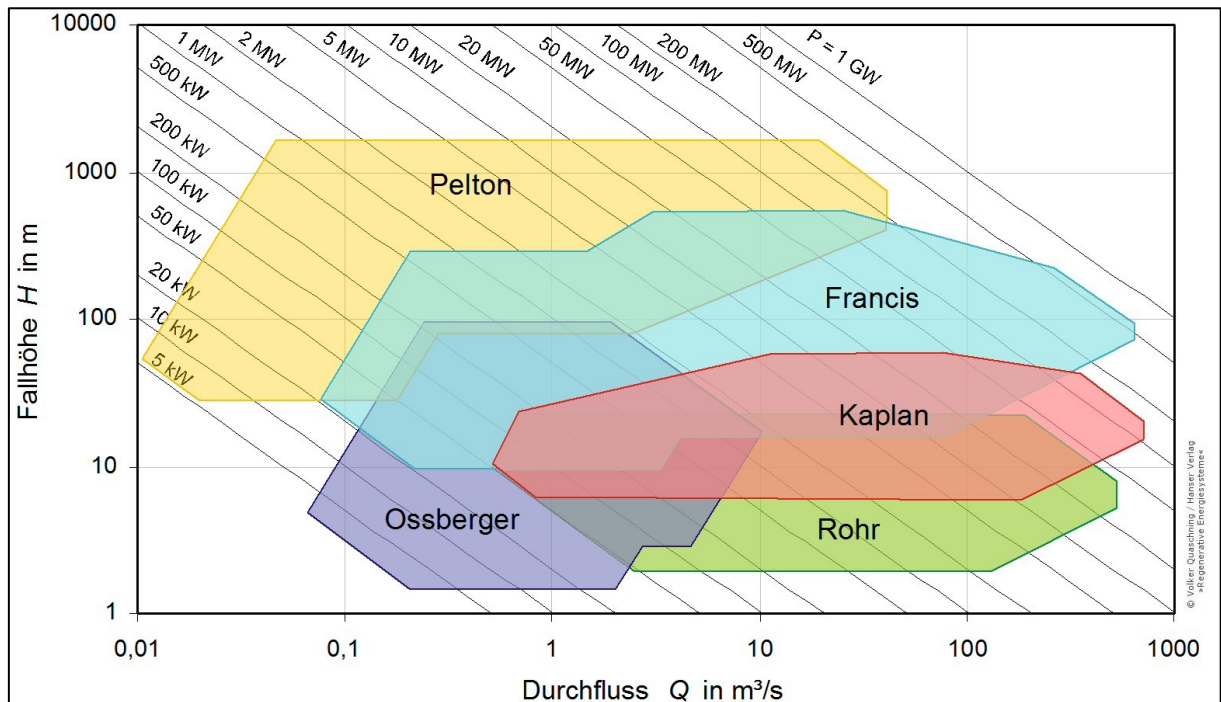


Abbildung 9 - Einsatzgebiete der Wasserturbinen in Abhängigkeit von Fallhöhe und Abfluss [6]

Auf der Abbildung ist zu erkennen, dass jede Turbinenart für ein bestimmtes Einsatzgebiet prädestiniert ist. Hierbei ist festzustellen, dass die Fallhöhe und der Durchfluss (Wassermenge) ausschlaggebend sind. In den häufigsten Fällen werden Kaplan-, Francis- und Pelton-turbinen eingesetzt. Des Weiteren gibt es sogenannte Wasserkraftschnecken, diese sind für geringe Fallhöhen und kleine Leistungen vorgesehen. [12], [27]

Die einzelnen Turbinen lassen sich in Gleich- und Überdruckturbinen kategorisieren. Die Gleichdruckturbinen verwenden ausschließlich die Bewegungsenergie des Wassers und werden ohne Druck des Wassers umströmt, zu denen gehören die Pelton- und Ossbergerturbine (Durchströmturbine). Die Überdruckturbinen (Kaplan-, Francis-, Rohr- und Propellerturbinen) sind hingegen völlig durchströmt. Hierbei ist vor dem Turbineneinlass ein höherer Wasserdruck zu verzeichnen als am Auslass. Die Turbinen setzen darauf die Druckänderung und die damit entstehende potenzielle Energie in Bewegungsenergie um. [26], [6]

Erwähnenswert ist noch das **Projekt Hylow**, das 2009 ins Leben gerufen wurde und dieses Jahr beendet wird. Das Projekt Hylow hat den Auftrag Wasserkraftwandler, unter der Voraussetzung, dass sie wirtschaftlich und ökologisch verträglich sind, zu

entwickeln. Diese sollen für Fallhöhen von unter 2,50 m eingesetzt werden, da hier noch ein weitgehend ungenutztes Potenzial erneuerbarer Energien zu verzeichnen ist. Wasserkraftwandler sollen Leistungen im Bereich von 50 bis 1000 kW Anwendung finden, die Anlage solle schwimmen und Energie aus freier Strömung erzeugen. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Fischverträglichkeit und der Sedimentsdurchgang. Stand 2012 ist die Entwicklung der neuen Wasserdruckmaschine für Fallhöhen von 1 bis 2,50 m und ein Wasserkraftwandler für freie Strömungen, welche zwei Prototypen besitzen. Einsatzorte der Prototypen sind in Nordbayern mit einer 5 kW Anlage und am Fluss Iskar in Bulgarien mit 12 kW. Gesamtwirkungsgrade (hydraulisch zu elektrisch) von 62 bis 64 Prozent wurden gemessen, sie sind sedimentsdurchgängig und haben eine niedrige Fischsterberate im Vergleich zur Wasserkraftschnecke und sie scheinen nach ersten Analysen wirtschaftlich zu sein. [28], [29]

Im Folgenden wird kurz auf die drei häufigsten genutzten Turbinentypen eingegangen.

Die **Francis-Turbine** wurde im Jahr 1849 von J.B. Francis entwickelt.

Fallhöhe	Leistung	Wirkungsgrad	Einsatzgebiet
bis zu 800 m	bis zu 750 MW	bis zu 90 %	hauptsächlich Speicherkraftwerke

Tabelle 3 - Kenndaten Francis-Turbine [4]

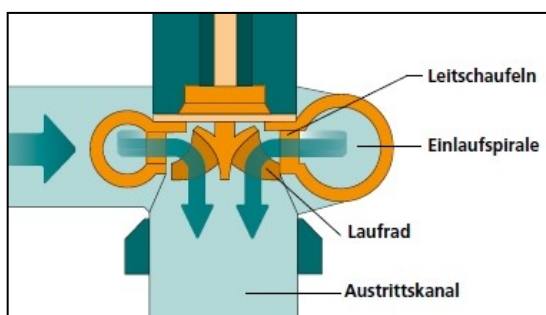


Abbildung 10 - Francis-Turbine [30]

Durch ein Spiralgehäuse fließt das Wasser in ein starres Leitrad mit verstellbaren Leitschaufeln die das Wasser weiterleiten in ein Laufrad, auf die sich dadurch rotierenden Laufschaufeln. Infolgedessen dreht sich der Rotor des Generators und erzeugt Strom. Das Wasser gelangt dann durch den Austrittskanal in das Unterbecken. [30]

Die **Kaplan-Turbine** wurde im Jahr 1912 von Viktor Kaplan aus der Francis-Turbine weiterentwickelt.

Fallhöhe	Leistung	Wirkungsgrad	Einsatzgebiet
bis zu 200 m	bis zu 125 MW	bis zu 95 %	hauptsächlich Flusskraftwerke

Tabelle 4 - Kenndaten Kaplan-Turbine [4]

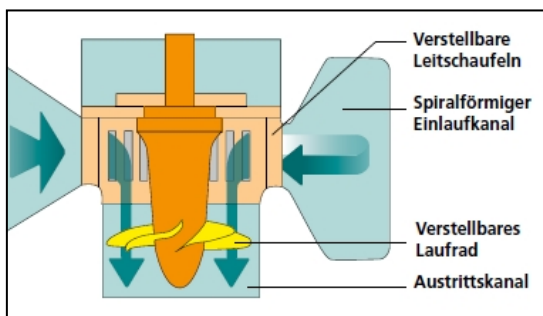


Abbildung 11 - Kaplan-turbine [30]

Das Prinzip der Kaplan-turbine ist von der Francis-Turbine abgeleitet. Das Wasser gelangt über ein Spiralgehäuse auf die verstellbaren Leitschaufeln und wird weitergeleitet, nicht wie bei der Francis-Turbine ins Innere Laufrad, sondern in das in sich weiter unten befindende, verstellbare Laufrad und treibt dadurch dann den Generator an. [30]

Die **Pelton-Turbine** wurde im Jahr 1880 von Lester Allen Pelton entwickelt.

Fallhöhe	Leistung	Wirkungsgrad	Einsatzgebiet
bis zu 2.000 m	bis zu 500 MW	bis zu 95 %	Speicherkraftwerke

Tabelle 5 - Kenndaten Pelton-Turbine [4]

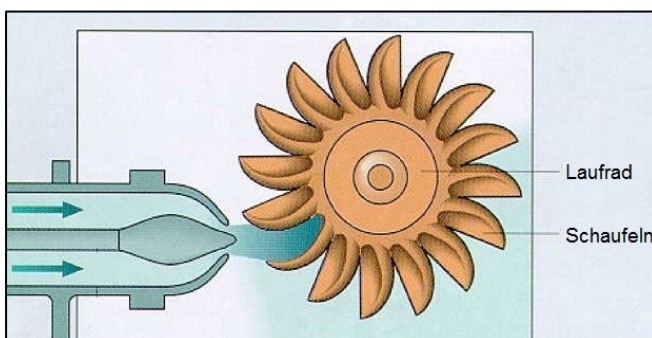


Abbildung 12 - Pelton-Turbine [31]

Über die Druckfallrohre wird das Wasser der Turbine zugeführt. Mit hohem Druck strömt dann das Wasser durch eine Düse auf die Schaufeln, dadurch fängt das Laufrad an sich zu drehen. [31], [6]



## 2.3.5 Auswirkungen

Im Folgenden werden die wichtigsten vorteilhaften Aspekte genannt:

Der kostenlose Rohstoff Wasser hat einen beständigen Kreislauf auf dem „blauen Planeten“ und ist deshalb jederzeit verfügbar und dadurch kann die grundlastfähige Wasserkraft, die mit einem sehr hohen Wirkungsgrad bei der Energieumwandlung verbunden ist, kontinuierlich Strom produzieren. Zudem haben Wasserkraftanlagen eine sehr lange Lebensdauer, vorausgesetzt das Wartung und Instandhaltung gegeben sind, dadurch wird eine gute Amortisation ermöglicht. Des Weiteren fallen keine Emissionen an, somit gilt die Wasserkraft als „saubere“ Energiequelle. Punkte wie der Hochwasserschutz und die Schiffbarkeit sollten zudem nicht außer Acht gelassen werden. Das Wasser kann in wasserreicheren Zeiten zurückgehalten und dosiert abgegeben werden. Die Schiffbarkeit kann entscheidend verbessert werden, da die Wasserkraftwerke den Wasserfluss beruhigen.

Den Vorteilen stehen natürlich auch einige nennenswerte Nachteile entgegen:

Der Bau von Wasserkraftanlagen kann zu ökologischen Veränderungen führen, d.h. es kann ein Fisch- und Pflanzensterben auftreten, die Fische können ihre Laichplätze nicht mehr erreichen, die Natur und die Landschaft können beeinträchtigt werden. Deshalb müssen bei der Planung neuer Wasserkraftwerke alle Aspekte und potenzielle Folgen für Mensch und Umwelt mit einbezogen werden, z.B. „Fischtreppe“, um die Wanderung der Fische sicherzustellen. Hinzukommend sind Umsiedlungen ganzer Ortschaften, Hochwasserbildung und die Zerstörung des natürlichen Fließgewässers nicht auszuschließen. [23], [12]

## 2.4 Bioenergie

Bioenergie ist eine Energiegewinnungsart aus Biomasse, der sowohl für die Strom- und / oder Wärmeerzeugung als auch der Treibstoffherzeugung fungiert. Die Bioenergieträger werden hierbei in die drei Aggregatzustandsformen differenziert:

- Biogene Festbrennstoffe
- Biogene Flüssigbrennstoffe
- Biogas, zuzüglich Deponiegas, Klärgas

Die Biomasse ist zudem noch zu unterteilen in welche die direkt durch die Sonneneinstrahlung und der damit einhergehender Photosynthese entstehen. Z.B. Pflanzenmasse, d.h. land- und forstwirtschaftliche Produkte aus dem Energiepflanzenanbau, Rückstände von Pflanzen und Nebenprodukte aus der Land- und Forstwirtschaft oder der Weiterverarbeitungsindustrie (Wald-, Industrieholz, Stroh). Zudem indirekte Stoffe, die ihre Energie nur indirekt von der Sonne erhalten, d.h. die beim Abbau oder Umbau organischer Substanzen in höheren Organismen hervorgerufen werden (z.B. tote Zoomasse, Gülle, Klärschlamm). Zuzüglich ist Wasser auch von großer Bedeutung, da Pflanzen ohne Wasser keinen Wachstum aufweisen. Je nach Verwendung ist es empfehlenswert oder sogar erforderlich (feste) Biomasse durch Umwandlungs- (Aufbereitungs-) prozesse, wie zum Beispiel vergären, verbrennen und vergasen, begünstigend weiterzuverarbeiten. Dies hat zur Folge, dass die Biomasse als Ganzes gesehen ein „all-round-talent“ ist. Im Folgenden ist dies nochmals bildlich dargestellt. [8], [32], [25]

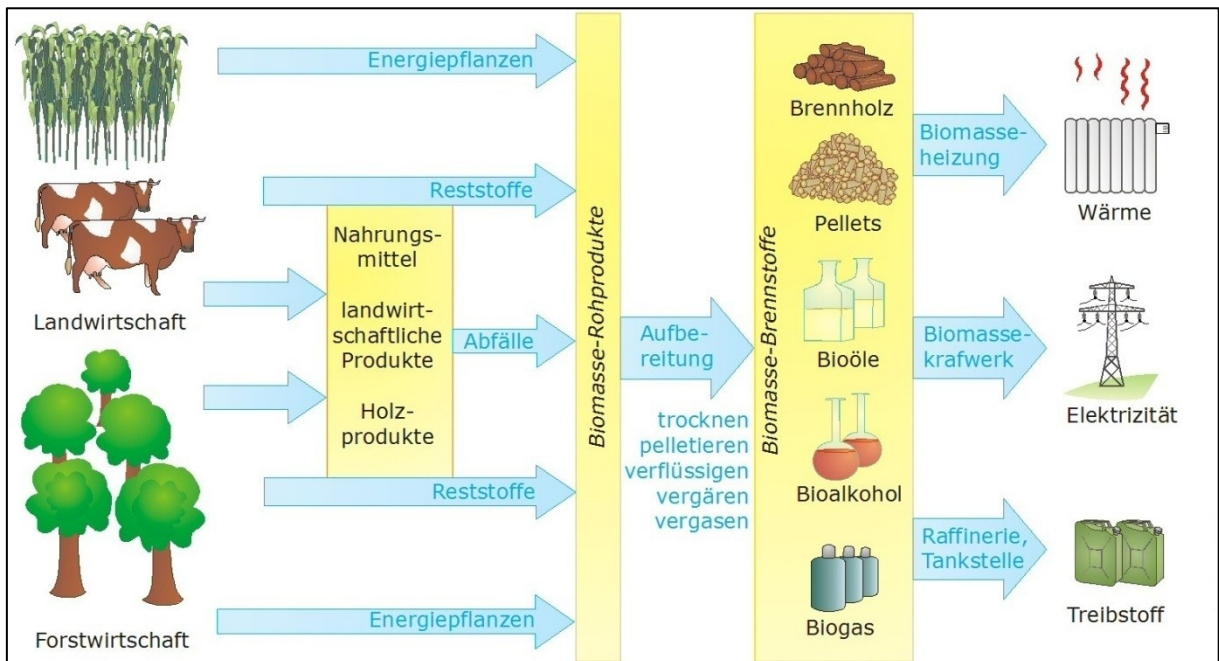


Abbildung 13 - Möglichkeiten zur Nutzung der Biomasse [6]

Die Biomasse wird primär für die Wärmeerzeugung eingesetzt, deshalb wird der folgende Punkt nur kurz erläutert.

## 2.4.1 Stromerzeugung

Um Strom aus Biomasse zu erzeugen sind Biomassekraftwerke prädestiniert. Neben dem Strom wird auch gleichzeitig (Ab-) Wärme produziert, d.h. dass sich diese Kraftwerke den Kraft-Wärme-Kopplung Prozess zu Nutze machen, dadurch entstehen höhere Wirkungsgrade. Hierbei werden beispielsweise Holz und Stroh benutzt um einen Dampfkessel zu erhitzen, wodurch das Wasser verdampft und die Dampfturbine mechanische Energie abgibt, welche wiederum einen elektrischen Generator antreibt. Die dabei entstehende Abwärme kann nun genutzt werden, z.B. zur Einspeisung in ein Nahwärmenetz. Solch ein Kraftwerk kann bedarfsorientiert gefahren werden, d.h. die nötigen Brennstoffe können je nach Bedarf hinzugegeben werden. Das Bild 14 stellt die einzelnen Möglichkeiten der Stromerzeugung und deren elektrischen Wirkungsgrade dar. [33]

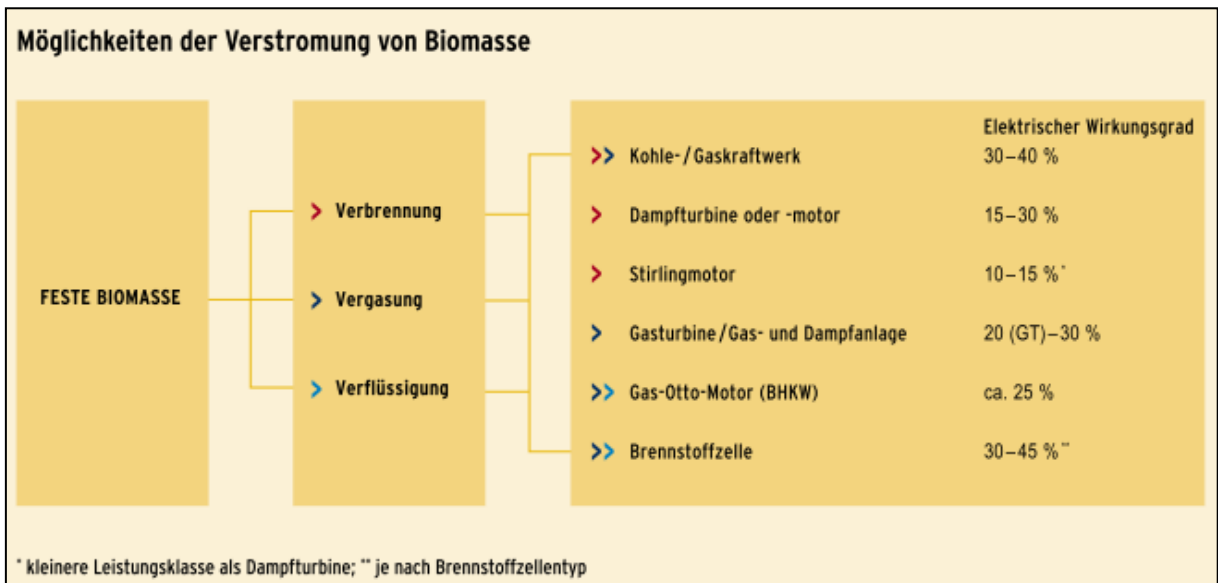


Abbildung 14 - Möglichkeiten der Verstromung von Biomasse [9]

Ein weiteres Stromerzeugungsinstrument ist Biogas, dabei wird z.B. Gülle in vier Phasen in Methan, Kohlendioxid und Wasser umgewandelt. Das Biogas eignet sich für Biogasanlagen bzw. für den Betrieb von Blockheizkraftwerken (BHKW). Über Verbrennungsmotoren können Wärme als auch Strom erzeugt werden. Die nächste Abbildung 15 verdeutlicht dies. [34], [4]

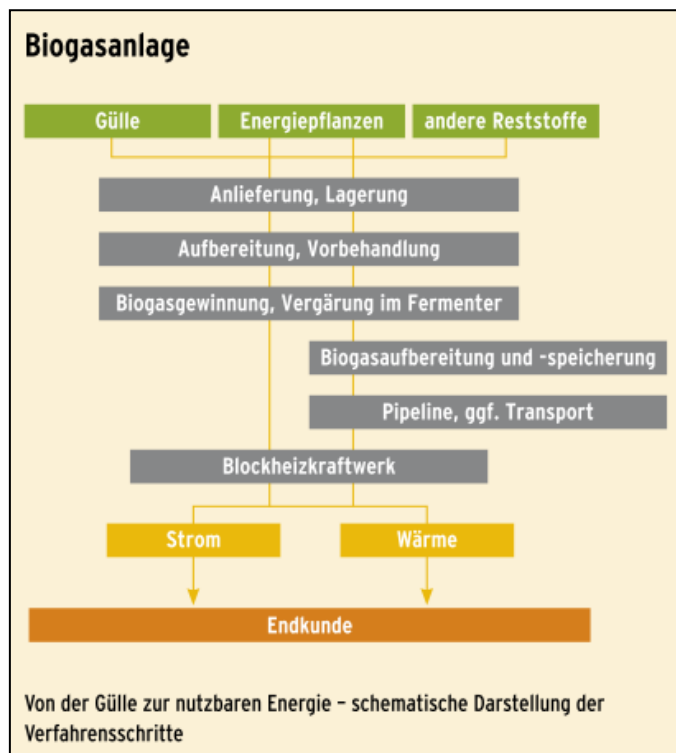


Abbildung 15 - Schematische Verfahrensschritte der Gülle [9]

### 2.4.3 Standort

Anlagenstandorte einer Biomasseanlage sind in der Nähe von landwirtschaftlichen Betrieben vorteilhaft. Des Weiteren ist ein lokal befindliches Nahwärmenetz begünstigend, da bei der Verstromung von Biomasse ca. dreiviertel der Energie in Wärme umgewandelt wird. [27]

Für einen geeigneten Standort der Energiepflanzen sollten gewisse Bedingungen gegeben sein, d.h. eine mittlere Sonneneinstrahlung von ca. 1.000 kWh/m<sup>2</sup>, ausreichend Wasser z.B. in Form von Niederschlag, günstige klimatische Bedingungen als auch zweckmäßige Böden. Diese Standorte sollten auch die gesetzlichen Rahmenbedingungen berücksichtigen, z.B. den Natur- und Bodenschutz. [35]

In Deutschland weist Holz den größten Anteil zur energetischen Nutzung von Biomasse auf. Restholz aus dem Wald eignet sich dafür, da es für eine stoffliche Weiterverarbeitung, z.B. in der Industrie, nicht mehr benötigt werden kann. Hierbei sollte dennoch beachtet werden, dass die Holzentnahme nicht die Neubildung übersteigen darf. Weitere Holzquellen, wie nicht mehr verwendbares Holz aus Sägewerken, Papier und Spannplattenindustrie sowie anderer Holzverarbeitender Industrie. Altholz bietet noch eine weitere energetische Nutzung. Neben Holz kann auch auf Stroh und gezielte angebaute Energiepflanzen zurückgegriffen werden. [9]

## 2.4.4 Vor- und Nachteile

In der Tabelle 6 werden hierfür Vorteile und Nachteile genannt.

Vorteile	Nachteile
dezentrale Energieerzeugung möglich (ökologischer, ökonomischer Kreislauf) [23]	Konkurrent im Nahrungsmittelanbau
mehrere Energieträger einsetzbar	Anstieg der Nahrungsmittelpreise
Erschaffung neuer Arbeitsplätze	eventuelle Abhängigkeit von der Landwirtschaft
kontinuierliche Stromproduktion möglich (weniger Wetterabhängig im Vergleich zu Windkraft- und PV-Anlagen)	Grundwasserverschmutzung durch das einsetzen chemischer Düngemittel
geringere Umweltbelastung durch Kohlenstoffdioxid	Landschaftsbildbeeinträchtigung durch Abholzung der Wälder

Tabelle 6 - Vor- und Nachteile Bioenergie

## 2.5 Geothermie

Die Geothermie ist die gespeicherte Energie in Form von Wärme im Erdinneren. Dabei handelt es sich sowohl um gespeicherte Solarenergie als auch um Wärmenergie aus dem Erdkern, größtenteils liegt der Ursprung der gespeicherten Wärmemengen in der Zerfallsenergie natürlicher radioaktiver Isotope (Atomkerne mit sich veränderter Neutronenanzahl und gleichbleibender Protonenanzahl). Die Erdwärme ist grundsätzlich jederzeit und überall verfügbar, d.h. sie ist geradezu unerschöpflich. Kraftwerke, auf die im Folgenden noch eingegangen wird, sind daher als grundlastfähig anzusehen. Die Nutzung der Geothermie lässt sich differenzieren in oberflächennahe Geothermie und tiefe Geothermie. Im weiteren Verlauf wird nur auf die tiefe Geothermie eingegangen, da sich die Oberflächen Geothermie nicht für eine produktive Stromerzeugung eignet, aufgrund zu geringer Temperaturen. [36], [6], [12]

### 2.5.1 Aufbau der Erde

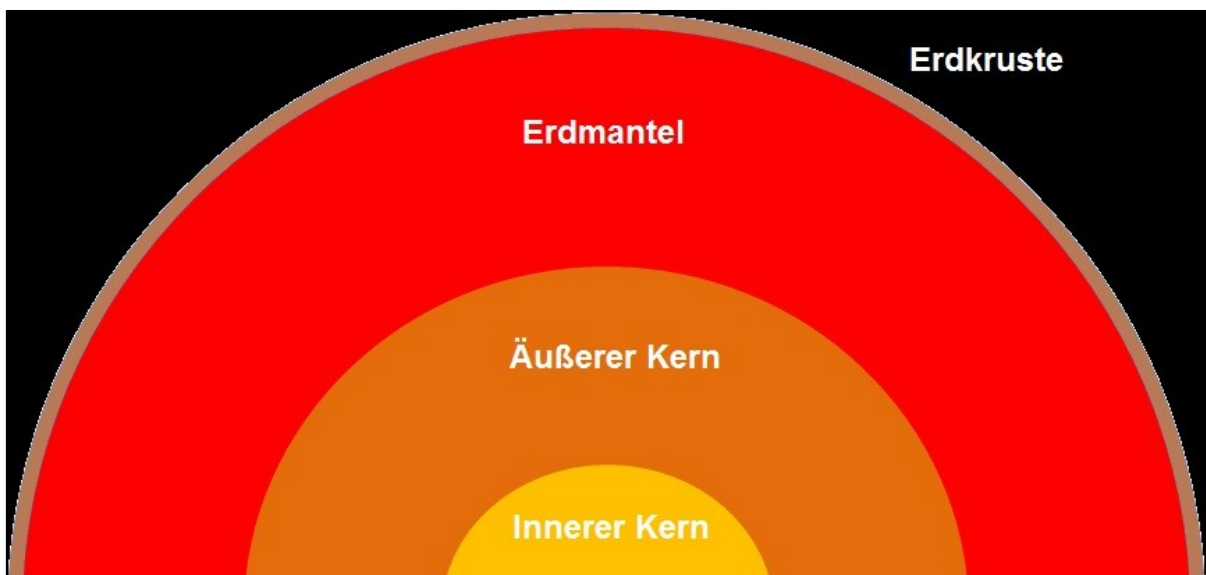


Abbildung 16 - Aufbau der Erde; eigene Darstellung nach Stober [36]

Schicht	Schichtmächtigkeit	Temperatur
Erdkruste	5...40 km	0...1000 °C
Erdmantel	40...2900 km	500...3000 °C
Äußerer Kern	2900...5150 km	3000...4500 °C
Innerer Kern	5150...6370 km	4500...6500 °C

Tabelle 7 - Kenndaten und Aufbau der Erde [36]

Die Erde hat einen schalenförmigen Aufbau. Sie ist wie in der Abbildung 16 zu erkennen ist aus mehreren Schichten aufgebaut, dem Erdkern, dem Erdmantel und der Erdkruste. Der Erdkern weist das dichteste und somit schwerste Material auf, die Erdkruste hingegen die geringste Dichte mit dem leichtesten Material. Dazwischen liegt der Erdmantel mit einer mittleren Dichte. Der äußere Erdkern ist prinzipiell eine flüssige Eisenschmelze und Ursache des magnetischen Feldes der Erde, d.h. durch das Zusammenwirken der Erdrotation und seiner elektrischen Leitfähigkeit. Der Innere ist aufgrund des hohen Druckes fest, er besteht aus einer Eisen-Nickel-Legierung mit Drucken von bis zu vier Millionen Bar. Die Erde ist zu 99 Prozent wärmer/heißer als 1.000 °C, die restlichen ein Prozent sind jedoch immer noch zu 90 Prozent heißer als 100 °C. Bei einer Tiefe von 20 bis 30 m beträgt die Temperatur ca. 10 °C darunter nimmt sie stetig zu, pro 100 m etwa 3 °C. Natürlich ist dies wiederum standortabhängig, es soll nur dem prinzipiellen Verlauf Ausdruck verleihen. Für die Geothermie ist jedoch nur die Erdkruste relevant, da es aus technischen Gründen nicht möglich ist, tieferes Vordringen zu realisieren. [8], [6], [36]

## 2.5.2 Standort

Für die grundsätzliche Bestimmung von Standorten werden die Erdkruste und der obere Erdmantel betrachtet, die sogenannte Lithosphäre. Diese bestehen sowohl aus großen als auch aus kleinen Platten. Erdbeben sowie vermehrter Vulkanismus führen auf das aneinander reiben dieser Platten zurück, an diesen Stellen der Platten sind höhere Temperaturen in geringerer Tiefe zu verzeichnen. Deutschland befindet sich auf der Eurasischen Platte, weder bedroht von Erdbeben, Vulkanismus oder anderen Folgen von aufeinander reibenden Platten, was bedeutet, dass tiefere Bohrungen von Nöten sind, um an die benötigte heiße Temperatur zu gelangen. [18]

In den folgenden zwei Bildern (Abbildung 17) sind die Temperaturgegebenheiten von Deutschland in 1.000 und 3.000 m Tiefe dargestellt. Die Divergenz zwischen den zwei Tiefen ist deutlich zu erkennen, in dem Gebiet zwischen Frankfurt und Stuttgart (Oberrheingraben) bieten sich in 3.000 m Tiefe die besten Gegebenheiten, diese sind rötlich eingefärbt und bieten 150 °C und mehr (max. 174 °C).



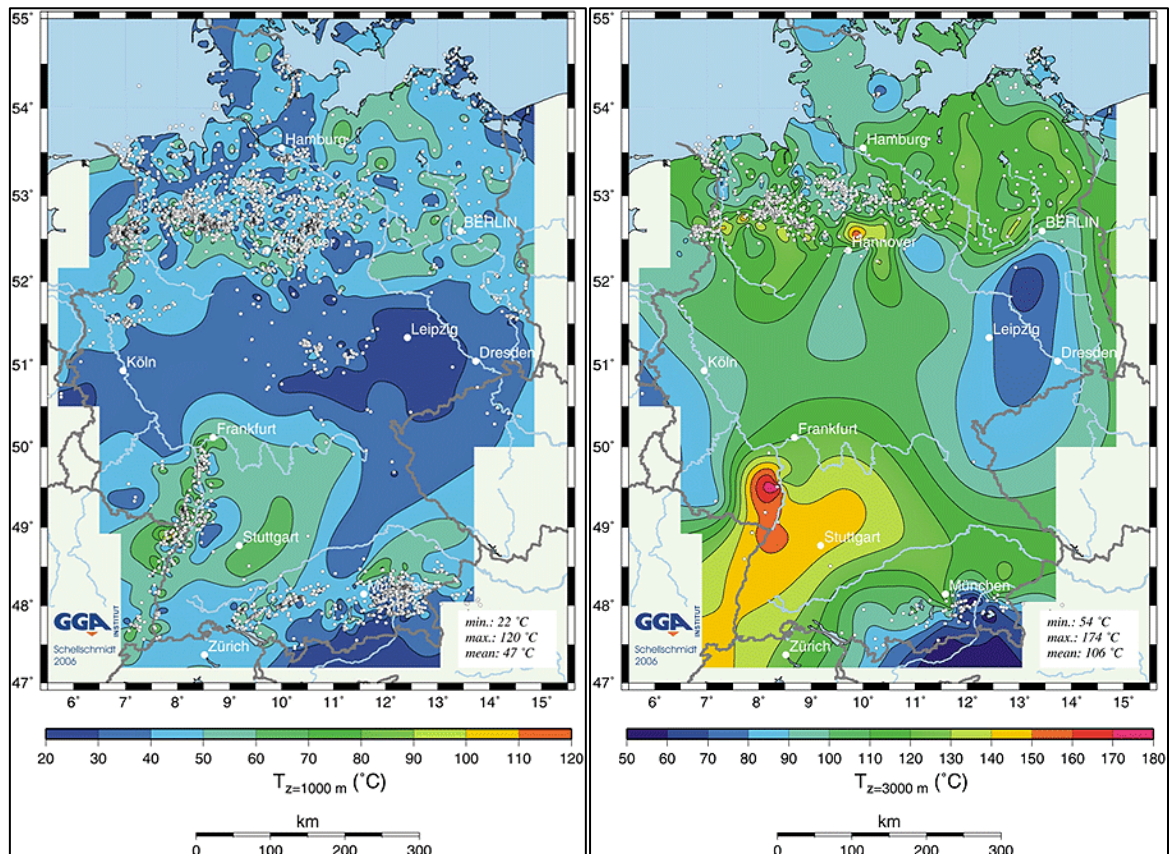


Abbildung 17 - Geothermie in 1000 und 3000 m Tiefe [37]

Für die Nutzung der Tiefengeothermie sind noch weitere Untersuchungen über den tieferen Untergrund zu tätigen um den Standort näher zu beleuchten:

- Die Schichtenabfolge (Gesteinsverbreitung im Untergrund),
- die Untersuchung des Grundwasserstands und der Fließverhältnisse,
- die Lage von Störungen (z.B. tektonische Vorgänge),
- die wesentlichen thermischen und hydraulischen Eigenschaften,
- sowie die hydromechanischen Eigenschaften von tiefen Gewässern,
- Anzeige- und Genehmigungsverfahren,
- Beachtung der Lage von Wasser- und Naturschutzgebieten.

### 2.5.3 Tiefe Geothermie (geothermische Stromerzeugung)

Die tiefe Geothermie wird unterschieden in direkte Nutzung der Erdwärme und in indirekte Nutzung der Erdwärme, d.h. die Wärmeenergie wird in elektrischen Strom umgewandelt. Bei einer Tiefe von ca. 400 m wird von Tiefengeothermie gesprochen. Um diese Tiefen zu erreichen bedarf es einen großen Aufwand in Form von Bohrungen. Das geothermische Energieangebot wird in drei Arten differenziert: [8], [12]

- Heiße Gesteinsformationen („Hot Dry Rock“)
- Thermalwasserfelder
- Heiße, unter Druck stehende Wasserlagerreservoirs (Heißdampflagerstätten)

Die geothermische Stromerzeugung ist im Vergleich zur Heizwärmebereitstellung um einiges komplexer, hierfür werden verschiedene Kraftwerke wie folgt eingesetzt:

- Direktdampfnutzung
- Flash-Kraftwerke
- ORC-Kraftwerke (Organic-Ranking-Cycle)
- Kalina-Kraftwerke
- HDR-Kraftwerke („Hot Dry Rock“)

Bei der **Direktdampfnutzung** sollte das Tiefenthalwasser sehr heiß ( $< 150\text{ °C}$ ) sein und unter hohem Druck stehen. Bei dem Anbohren solch eines Reservoirs, tritt das heiße Wasser an die Oberfläche und ändert dort seinen Aggregatzustand, dieser Dampf wird dann in einer Dampfturbine zur Stromerzeugung genutzt. [8]

Falls nicht genügend Dampf gegeben ist, wird die **Flash-Prozess Technik** eingesetzt. Durch eine Entspannungsstufe wird das heiße, unter Druck stehende Tiefenthalwasser verdampft und kann nun durch eine Dampfturbine Strom erzeugen. Des Weiteren gibt es noch einen so genannten „Double Flash Prozess“ hierbei werden zwei Entspannungsstufen aufeinanderfolgend geschaltet, dadurch wird eine leichte Erhöhung des Wirkungsgrades erzielt. [6]

Der **ORC-Prozess** wird bei Temperaturen ab  $80\text{ °C}$  eingesetzt. Hier weist das Wasser keine Verdampfung auf. Diese Systemtechnologie verwendet gewöhnlich

Kohlenwasserstoff oder Fluorkohlenstoff-Verbindungen als Arbeitsmedium, welche eine deutlich geringere Siedetemperatur gegenüber dem Wasser aufweisen. Im Verdampfer und Vorwärmer wird die aus der Tiefe gewonnene Wärme an das Arbeitsmedium weitergegeben, welches verdampft und hierdurch die Turbine angetrieben wird. Darauffolgend muss der überhitzte Dampf abkühlen und wird dann, mittels eines Kondensators, kondensiert. Nach dem Auskühlen wird der Druck wieder aufgebaut und das wieder flüssige Arbeitsmedium in den Verdampfer und Vorwärmer gepumpt, wodurch es wieder siedet und die Turbine antreibt. [6], [4]

Der **Kalina-Prozess** stellt eine Weiterentwicklung des ORC-Prozesses dar und hat im Vergleich zur ORC Technik höhere Wirkungsgrade bei niedrigeren Temperaturen. Hierfür wird wieder ein Arbeitsmedium eingesetzt, meist ein Ammoniak-Wasser-Gemisch, welches wieder einen niedrigeren Siedepunkt als Wasser aufweist. Bei der Verdampfung und Kondensation dieses Gemisches wird ein starker Temperaturanstieg bewirkt, dies bietet einen Vorteil der thermodynamischen Prozesseigenschaften im Vergleich zum ORC-Prozess. [6], [4]

In Deutschland kommen bei Tiefen bis zu 5.000 m, bei denen weder heißes Wasser noch Wasserdampf vorhanden ist, das Gestein aber hohe Temperaturen aufweist, die **HDR-Technologie**, welches auch petrothermale Geothermie genannt wird, zum Einsatz. Es werden künstliche Hohlräume geschaffen mit Hilfe von zuerst kaltem Wasser, welches mit hohem Druck durch eine Injektionsbohrung gepresst wird, sich in der Tiefe durch die Hitze erwärmt und ausdehnt und in Folge dessen Hohlräume bildet. Die Wärme des Gesteins wird durch das Erhitzen des Wassers auf bis zu 200°C sinnvoll zu Nutzen gemacht. Der so entstandene Wasserdampf wird durch eine weitere Produktionsbohrung wieder an die Oberfläche befördert, gelangt dort in einen Wärmetauscher und steht dann dem gewöhnlichen Stromerzeugungsprozess zur Verfügung. Es besteht die Möglichkeit durch die Kraft-Wärme-Kopplung die Effektivität zu vervielfachen, indem die Abwärme der angetriebenen Turbinen weiter verwendet wird. Die Abbildung 18 veranschaulicht den Prozess. [4]

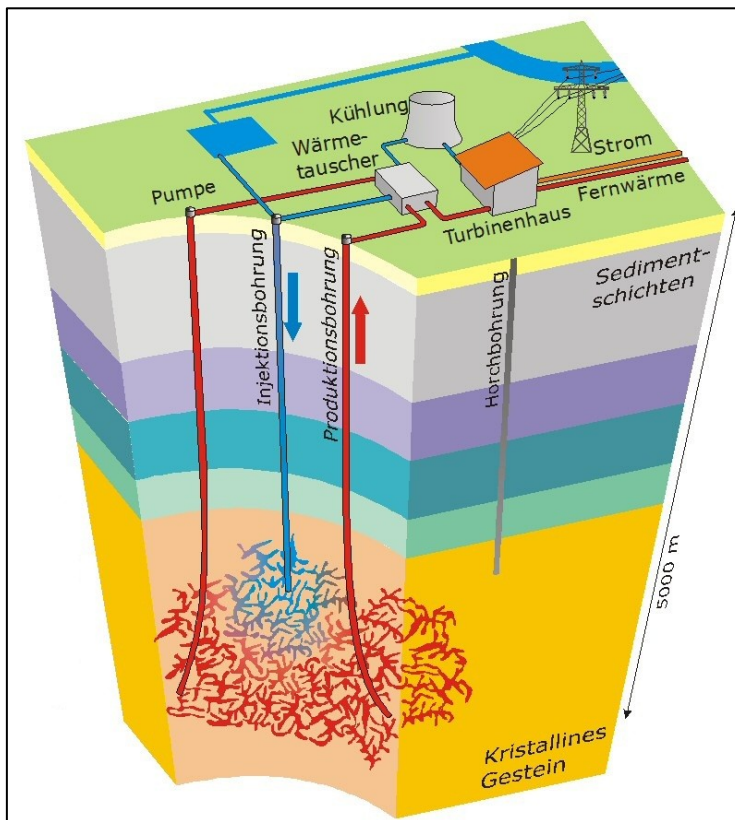


Abbildung 18 - Hot-Dry-Rock Verfahren [6]

## 2.5.4 Ausblick der geothermischen Stromerzeugung

Bei der geothermischen Stromerzeugung ist bei Temperaturen unter  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  ein eher niedrigerer Wirkungsgrad zu verzeichnen, deshalb ist es effektiver, aus ökonomischer und ökologischer Sicht, die direkte Wärmenutzung zu wählen. Falls sich in den Sommermonaten ein eventuelles Überangebot an Wärme darbietet, wäre es in diesem Zeitraum als sinnvoll zu erachten geothermischen Strom zu erzeugen. [6]

Die tiefe Geothermie weist sehr hohe Kosten auf, gerade bei den Bohrungen, weil z.B. das im Untergrund schlummernde Potenzial nicht das verspricht, von welchem ausgegangen wurde und der Aufwand für die Bohrungen vergeblich waren. Deshalb ist diese Energiegewinnung gegenüber den konventionellen nicht als konkurrenzfähig anzusehen. Des Weiteren haben viele Regionen in Deutschland nicht die nötigen Gegebenheiten, wie auf dem Bild 17 zu erkennen ist. Aber im Vergleich zu Windkraft und Photovoltaik ist sie nicht an das jeweilige Dargebot gebunden, deshalb

---

stellt die Geothermie eine wichtige Energiequelle für das Vorantreiben der alternativen Energieversorgung dar. [6]

## 2.6 Speichertechnologien

Teilweise ist die Stromerzeugung aus erneuerbarer Energien sehr schwankungsintensiv und unkontrollierbar, die besten Beispiele sind hierfür die Windkraft und die Photovoltaik (Blasen des Windes, Sonnenschein), deswegen sind Speichertechniken für elektrische Energie unabdingbar, da das Stromnetz keinen Strom speichert. Es muss ein gewisses Gleichgewicht herrschen zwischen Produktion bzw. Einspeisung und der Entnahme, sozusagen zwischen Nachfrage und Angebot, sonst ist ein Netzzusammenbruch die Folge. [38], [39]

Als Stromspeicher werden Energiespeicher bezeichnet in die durch einen Stromfluss elektrische Energie (gegeben falls über einen Energiewandler und in eventuell einer anderen Energieform) geladen werden. Hierbei werden vier Systeme differenziert:[39]

- Direkte Speicherung, welche nur mit Kondensatoren und Spulen durchführbar ist
- Indirekte Speicherung, die Umwandlung der elektrischen Energie in mechanische Energie
- Indirekte Speicherung, in Form von elektrochemischer Energie, d.h. sowohl durch Batterien als auch die Speicherung von Wasserstoff. Des Weiteren gibt es die Möglichkeit der Methanisierung
- Indirekte Speicherung, welche in der thermischen Energie gespeichert werden kann

Der indirekte Speicherprozess geht mit Umwandlungsverlusten der zugeführten Energie einher. [39]

In der folgenden Tabelle 8 werden die verschiedenen gegenwärtig genutzten Speichertypen charakterisiert und verglichen.

Speichersystem	Einsatz	Entladezeit	Art der Speicherung	max. Speicherkapazität	Wirkungsgrad
Kurzzeitspeicher	Netzstabilisierung, Netzaufrechterhaltung	< 1 Sekunde bis wenige Minuten	Spulen SMES	30 kWh	90 %
			Kondensatoren/Super Caps	52 kWh	90 %
			Schwungspeicher	5 MWh	80 %
Langzeitspeicher	Spitzenbedarfsdeckung	2 bis 24 Stunden	Druckluftspeicher	580 MWh	45 %
			Pumpspeicher	8,5 GWh	65 %
Elektrochemische Speicher	Reservespeicher, Elektromobilität	1 Stunde bis mehrere Tage	Lithium-Ionen-Akkus	50 kWh	90 %
			Redox-Flow-Batterien	5 MWh	65 %
			Blei-Säure-Akkus	40 MWh	70 %

Tabelle 8 - Speicherarten [39]

Wie schon erwähnt geht beim Speicherprozess Energie verloren, welches sich auf den Wirkungsgrad auswirkt, sowohl die Kurzspeicher als auch die Lithium-Ionen-Akkus weisen die geringsten Verluste auf, ausgenommen die Schwungspeicher, diese weisen einen deutlich höheren Verlust von 15 Prozent auf.

Wasserstoff der als Reserve-, Langzeitspeicher dienen könnte, bietet auch ein großes Potenzial, der Vorteil dieser Stromspeicherung liegt vor allem in der großen Energiedichte, jedoch sind die bisherigen Wirkungsgrade (20 – 40 Prozent) und die bestehende Sicherheitsprobleme zu berücksichtigen und deshalb sind die Wasserstoffspeicher als noch nicht marktreif bzw. energiewirtschaftlich attraktiv anzusehen.

[39]

Eine weitere Möglichkeit der Stromspeicherung bietet zudem die Umwandlung elektrischer Energie in synthetisches Methangas. Es kann für die kurzfristige Spitzenabdeckung in Betracht gezogen und als Langzeitspeicher genutzt werden, zur Speicherung des Gases dienen die unterirdischen Kavernen (Erdgasspeicher). Das Methangas bietet auch eine Alternative in der Nutzung, es kann, anstatt einer Verstromung, auch über Erdgaspipelines und Erdgasspeicher in z.B. Erdgas- und Biogas-Blockheizkraftwerken oder in gasbetriebenen Fahrzeugen Anwendung finden. Der Gesamtwirkungsgrad ist ähnlich gering wie bei den Wasserstoffspeichern, aber dafür weist sie Flexibilität und Skalierbarkeit auf. Diese Speichermöglichkeit steht

jedoch noch ziemlich am Anfang. In Stuttgart-Vaihingen ist eine Pilotanlage installiert, welche eine Leistung von 25 kW bringt. [47]

Des Weiteren gibt es Konzepte, wie die des Ringwallspeichers und die des Projektes ADELE (adiabates Druckluftspeicherverfahren).

Der **Ringwallspeicher** ist ein Konzept, welches von Herrn Dr.-Ing. Matthias Popp entwickelt wurde. Ein Ringwallspeicher folgt dem gleichen Prinzip eines Pumpspeicherkraftwerks, es ist jedoch möglich sie in flachen Landschaften oder im Meer zu bauen. Im Folgenden ist eine Grafik (Abbildung 19) eines Ringwallspeichers dargestellt, welches zu einem Hybridkraftwerk weiterentwickelt wurde.



Abbildung 19 - Ringwallspeicher-Hybridkraftwerk

Das in der Grafik enthaltene Ringwallspeicher-Hybridkraftwerk hat einen Durchmesser von 11,4 km. Der Ringwall besitzt eine Höhe von 215 m, welcher das Oberbecken mit einem Durchmesser von 6 km umfasst. Es soll 3,2 GW Spitzenleistung und 2 GW Durchschnittsleistung liefern, in Kombination mit ca. 2.000 großen Windkraftanlagen in der Region, Solarenergieanlagen im Oberbecken und auf den Dächern des Versorgungsgebiets. Damit können zwei Kernkraftwerke ersetzt werden. Detaillierte Informationen zu dem Konzept Ringwallspeicher sind in der Dissertation



„Speicherbedarf bei einer Stromversorgung mit erneuerbaren Energien“ von Herrn Dr.-Ing. Matthias Popp zu finden. [40]

Das Projekt ADELE mit dem **adiabaten Druckluftspeicher** soll ab 2013 auf einem Areal östlich von Neu-Staßfurt auf einer Fläche von 20.000 m<sup>2</sup> realisiert werden. Das Projekt-ADELE soll wie folgt zum Einsatz kommen. Bei einem hohen Stromangebot soll Luft komprimiert werden, die dabei entstandene Wärme wird dabei in Wärmespeichern zwischengespeichert, die Luft wird in Kavernen gepresst, die sich unter der Erdoberfläche befinden. Bei anwachsender Stromnachfrage wird diese Druckluft, unter simultaner Rückgewinnung der Wärme zur Stromerzeugung, in einer Turbine genutzt. Das adiabate Verfahren, welches kein Verlust von Wärme bei der verdichteten Luft aufweist, stattdessen im Prozess erhalten bleibt und für die Erzeugung von Strom genutzt werden kann, unterscheidet sich von den bestehenden Druckluftspeichern primär durch die deutlichen höheren Wirkungsgrade (ca. 70 Prozent), zudem erfolgt die Erwärmung nicht durch den Einsatz von Erdgas. [41]

Ein weiterer Ansatzpunkt ist das der **erneuerbaren Elektromobilität**, es beschreibt die Kombinationen von Elektrofahrzeugen und Strom aus alternativen Energien. Die Elektroautos sollen dann Strom tanken, wenn er am häufigsten verfügbar ist, d.h. nachts oder in der Mittagspause, da dort viel Strom aus Wind und Sonne bereitsteht. Des Weiteren dienen die Elektroautos auch als Stromeinspeicher, im Falle eines Strombedarfs wird der gespeicherte Strom aus der Batterie ins Netz zurück eingespeist, sozusagen eine mobile Speichertechnologie. [42]

## 2.7 Kombikraftwerk

Eines der Hauptprobleme liegt an der divergierenden und deshalb schlecht planbaren Bereitstellung von erneuerbarer Energie, da diese bekannter Weise zum größten Teil Wetter abhängig und somit nicht beständig sind. Forscher arbeiten seit 2007 an einem sogenannten Kombikraftwerk bzw. virtuellen Kraftwerk um den Zweck einer stabilen Stromversorgung aus alternativen Energien zu gewährleisten. Ein Kombikraftwerk ist ein Bündnis verschiedener dezentraler Kraftwerke, die gemeinsam eine Energiebereitstellung haben, wie ein derzeitiges Großkraftwerk. Das Pilotprojekt, welches von den Unternehmen Schmack AG, Solar World AG und der Enercon GmbH getestet wurde, besteht aus elf Windenergieanlagen, 20 Solaranlagen, vier Biogasanlagen und zuletzt einem Pumpspeicherkraftwerk. Diese Anlage weist eine installierte Leistung von 22,1 MW auf, davon hat Wind 12,6 MW, Solar 5,5 MW und Biogas 4,0 MW. Um einen stabilen Betrieb zu gewährleisten kann nicht, wie derzeit, auf einen sogenannten Kraftwerkfahrplan zurück gegriffen werden, in dem für jedes Großkraftwerk fest gehalten wird, wann es wie viel Strom zur Verfügung stellen muss. Sondern wird der tatsächliche Strombedarf, auch Lastprofil genannt, im Minutentakt als Ausgangsgröße für jedes Kraftwerk genutzt. Dieser Bedarf an Strom wird dann an eine zentrale Steuereinheit weitergeleitet, zudem werden die Prognosen des Deutschen Wetterdienstes an die zentrale Steuereinheit gesendet, diese enthält die Voraussagen der Windstärke und der Sonnenstunden. Die Zentrale Steuereinheit stellt einen Vergleich zwischen möglicher Einspeisung und dem Strombedarf her und steuert somit die unterschiedlichen Kraftwerksarten. Falls die fluktuierende Stromerzeugung den Bedarf nicht decken kann, werden die Kapazitäten der Biogaskraftwerke freigesetzt bzw. hochgefahren. Falls eine Überproduktion von Strom besteht, wird dieses verwendet um das Pumpspeicherkraftwerk zu füllen. Bei Spitzenlastzeiten findet eine Entleerung des Pumpspeicherkraftwerks statt, um Strom zu produzieren. Das Kombikraftwerk hat gezeigt, dass eine Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien möglich ist. Durch dieses Kraftwerk ist eine Versorgung von in etwa 12.000 Haushalten möglich. Des Weiteren wird angedacht die Verbraucher ebenso wie die Erzeuger mehr in das System zu integrieren. Eine Idee ist es das manche Elektrogeräte wie z.B. Waschmaschinen und Spülmaschinen automatisch

angestellt werden und zwar dann wenn Strom im Überfluss zur Verfügung steht und folglich der Stromverbrauch auch günstiger ist. Im Ansatz existiert so etwas bereits in Form eines Smart Meter. Dies ist ein elektronischer Messzähler welcher dem Energieverbraucher Daten über den derzeitigen Energieverbrauch und den damit entstehenden Kosten übermittelt. [4]

## 2.8 Smart Grid

Das Smart Grid Konzept ergänzt das Kombikraftwerk in einem wesentlichen Punkt. Was für ein wesentlicher Punkt das ist, kristallisiert sich nun im Verlaufe heraus.

Wie schon bei dem Punkt Kombikraftwerke erklärt wurde ist es Stand heute noch der Fall, dass die Stromerzeugung über wenige Großkraftwerke zentral gesteuert wird, was bedeutet, dass das derzeitige Stromnetz sehr unflexibel auf Schwankungen reagiert, was daher rührt das diese Eigenschaft bisher keine Relevanz auf wies.

Jedoch darf die Weiterentwicklung des Stromnetzes den technischen Fortschritten der Energiegewinnung in nichts nachstehen. Das Stromnetz muss an die neuen Gegebenheiten, wie zum Beispiel höhere Flexibilität aufgrund der entstehenden dezentralen Energieversorgung, angepasst werden.

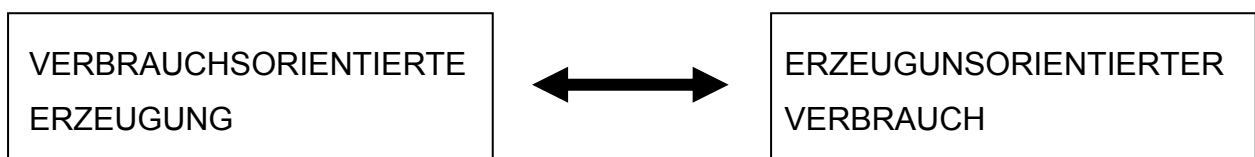
Das „neue Stromnetz“ muss zukünftig in der Lage sein „mit zu denken“. Es muss viele kleine Erzeugungseinheiten, sowie mehrere dezentrale Offshore-Windparks zusammenfassen können, sowie auf kleinere Energieerzeugungsschwankungen flexibel und vor allem schnell reagieren können. [43]

### VORGEHENSWEISE ZUR NEUEN NETZENTWICKLUNG

Um eine neue Version des Stromnetzes zu entwickeln muss zu allererst von der negativen Denkweise Abstand genommen werden. Als negativ wird derzeit noch die volatile Stromerzeugung mit erneuerbarer Energie angesehen. Ein neuer Ansatz ergibt sich indem die „Nachteile“ zu Vorteilen gemacht werden. Flexibilität ist die Eigenschaft die das neue Stromnetz auf weisen MUSS um zu funktionieren. Dies wird mit Hilfe eines Kombikraftwerkes gewährleistet, denn ein solches Kraftwerk ist dafür ausgelegt auf Stromerzeugungsschwankungen schnell und flexibel reagieren zu

können. Bei einer Überproduktion kann temporär gespeichert werden und Versorgungslücken so gemieden werden. Ein Smart Grid soll die Aufgabe übernehmen die Stromversorgung transparenter zu machen, für den Erzeuger, aber vor allem und insbesondere für den VERBRAUCHER, welcher bisher bei den Kombikraftwerken außer Acht gelassen wurde.

Durch das Smart Grid soll ein Gleichgewicht zwischen produziertem und benötigtem Strom, so gesehen zwischen Angebot und Nachfrage geschaffen werden.



Der Verbraucher übernimmt in dem Smart Grid Konzept eine tragende Rolle, er muss sich am Stromangebot orientieren bzw. den gegebenen Stromschwankungen anpassen, was begünstigt werden kann durch die Preisbildung. Bei Angebotsüberhang sinken die Preise was die Verbraucher zur Stromverbrauch anreizt und umgekehrt.

Was nicht vernachlässigt werden darf, ist, dass die ständige Stromversorgung auch weiterhin gegeben ist, der Verlust davon würde ein Rückschritt bedeuten. Ein Smart Meter soll hier Abhilfe leisten. Wie bereits erwähnt vermittelt er dem Verbraucher wann es am sinnvollsten ist Strom zu beziehen um somit eine ständige Bereitstellung von Strom zu gewährleisten.

Damit die Transparenz für den Verbraucher gegeben ist, muss der momentane Energieverbrauch bzw. das momentane Energieangebot ersichtlich sein, nur so kann das Smart Grid Konzept greifen und in der Realität umgesetzt werden. [43]

## 3 Potenziale in Baden-Württemberg

In den folgenden Unterpunkten wird eine Gegenüberstellung des Ist-Zustandes und des „geforderten“ Soll-Zustandes vollzogen, hierbei werden z.B. die prozentuale Stromerzeugung der jeweiligen alternativen Energien gezeigt und was Baden-Württemberg in Zukunft an Strom aus alternativen Energien erzeugen möchte.

Der Umwelt- und Energieminister von Baden-Württemberg Franz Untersteller erklärte am 8. Mai 2012 in Stuttgart: „Ein Jahr nach der Reaktorkatastrophe in Fukushima und dem Ausstieg aus der Atomenergie sowie ein Jahr nach dem Regierungsantritt von Grün-Rot sind wir auf gutem Kurs, Baden-Württemberg zur führenden Energie- und Klimaschutzregion zu machen.“ [44]

### 3.1 IST-Zustand

Der Ist-Zustand ist deshalb von Nöten damit eine fundierte Ausgangslage geschaffen wird, um die in der Zukunft gesetzten Ziele zu verwirklichen.

Das Landesamt für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft stellt mit der EEG-Stromkarte den Status des Jahres von 2007 bis 2010 zu Verfügung. Bei den Werten der EEG-Stromkarte, handelt es sich um die Strommengen, die von den Netzbetreibern gemeldet wurden und eine Förderung nach dem EEG erhalten haben. Diese Karte bietet Möglichkeiten, z.B. die Anzahl und die installierte Leistung der regenerativen Anlagen in Landes-, Kreis- und Gemeindeebene darzustellen. Die Auszüge aus der EEG-Strom Karte für das Jahr 2010, die oben erwähnte Anzahl und installierte Leistung der Anlagen, erneuerbare Energien Stromertrag und die prozentuale Stromerzeugung der erneuerbaren Energien im Verhältnis zum Gesamtverbrauch sind im Folgenden dargestellt. [45]



Abbildung 20 - Anzahl der Anlagen und installierte Leistung [45]

Das erste Bild (Abbildung 20) zeigt, dass in Baden-Württemberg im Jahr 2010, 190.497 Anlagen mit einer installierten Leistung von 4.919.570 kW vorhanden waren. Des Weiteren ist der Gesamt-Stromverbrauch von 81.100.000 MWh und einer Gesamt Stromproduktion der erneuerbaren Energien von 10.534.941 MWh aufgeführt. Der nächste Auszug stellt die Stromproduktion für jede Art der erneuerbaren Energien genauer dar. [45]

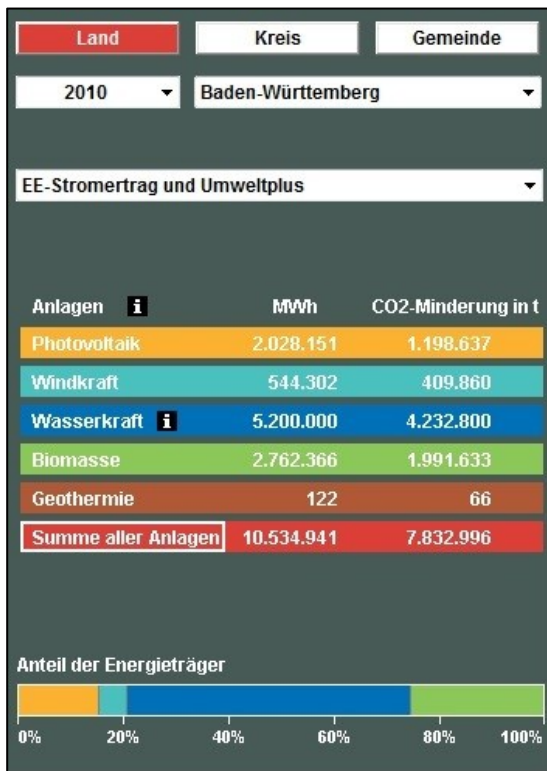


Abbildung 21 - EE-Stromertrag und Umweltplus [45]

Wie oben erwähnt stellt dieser Auszug die jeweiligen erneuerbaren Energien dar und wie viel Strom sie im Jahr 2010 jeweils produziert haben. Zudem ist noch die CO2-Minderung aufgeführt, die in Tonnen angegeben wird. Durch die Windkraft wurde z.B. eine Minderung von 409.860 Tonnen CO2 verzeichnet. [45]

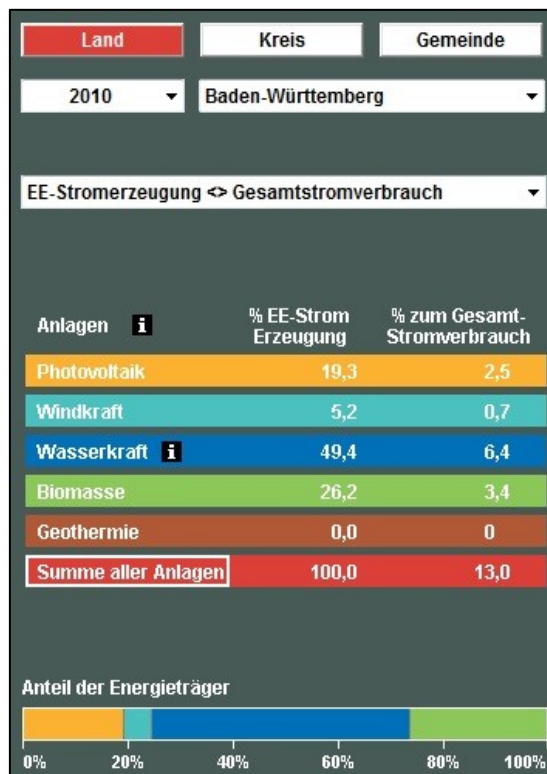


Abbildung 22 - EE-Stromerzeugung <=> Gesamtstromverbrauch [45]

In diesem Auszug ist die prozentuale Verteilung der jeweiligen erneuerbaren Energien zu erkennen und daneben der Gesamtstromverbrauch, der den Anteil der Energien zum Gesamtstromverbrauch in das Verhältnis setzt. [45]

Es ist deutlich geworden, dass die Wasserkraft den höchsten Anteil von 49,4 Prozent der Stromerzeugung der erneuerbaren Energien aufweist, gefolgt von der Biomasse mit 26,2 Prozent, der Photovoltaik mit 19,3 Prozent. Die beiden Schlusslichter Windkraft und Geothermie weisen zum einen 5,2 Prozent und zum anderen Null Prozent auf. [45]

Auf dem nächsten Auszug ist der Zuwachs von 2007- 2010 der erneuerbaren Energien Stromerzeugung im Verhältnis zum Gesamtstromverbrauch dargestellt.

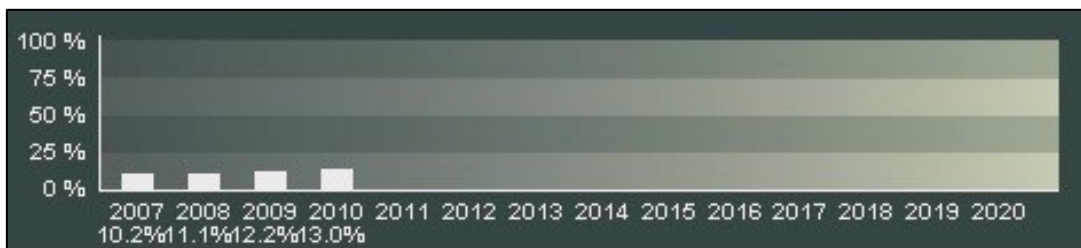


Abbildung 23 - erneuerbare Energien 2007 bis 2010 [45]

Zwischen 2007 und 2010 ist ein Zuwachs von 1,8 Prozent der erneuerbaren Energien Stromerzeugung im Verhältnis zum Gesamtstromverbrauch zu verzeichnen.

Aufgrund von teilweise divergierenden Zahlen im Vergleich mit dem statistischen Landesamt, vor allem bei der Biomasse, wird mit weiterem Vorgehen die vorläufige Bruttostromerzeugung im Jahr 2010 nach den Zahlen des statistischen Landesamtes Baden-Württemberg übernommen.

Jahr	Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern		Wasserkraft		Photovoltaik		Windkraft		Biomasse		Sonstige	
	[TWh]	%	[TWh]	%	[TWh]	%	[TWh]	%	[TWh]	%	[TWh]	%
2010	11,364	17,22	5,132	7,78	2,085	3,16	0,541	0,82	3,402	5,15	0,204	0,31

Tabelle 9 - Bruttostromerzeugung Baden-Württemberg 2010; eigene Darstellung nach statistischem Landesamt BW [46]

Die gesamte Bruttostromerzeugung im Jahr 2010 beläuft sich auf 66,001 TWh.



## 3.2 SOLL-Zustand

Die Ziele wurden am 09. Januar 2012 von Umweltminister Franz Untersteller an einer Pressekonferenz bekannt gegeben. Es sollen im Jahr 2020 38 Prozent des Bruttostroms in Baden-Württemberg durch Wind, Sonne, Wasser und Biomasse erzeugt werden. Hauptaugenmerk wird auf die Windenergie und Photovoltaik gelegt, da hier ein besonders großes Ausbaupotenzial von jährlich fast 14 TWh gesehen wird. Wasserkraft und Bioenergie stoßen laut des Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) mit 9 TWh pro Jahr an ihre Grenzen. [44]

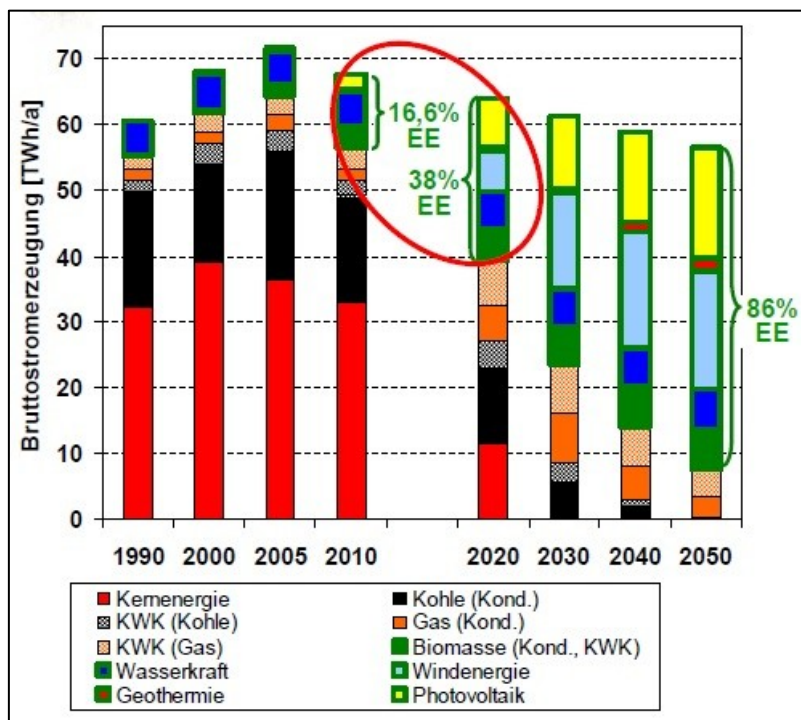


Abbildung 24 - Entwicklungsszenario Bruttostromerzeugung in BW [70]

Die Grafik von dem ZSW verdeutlicht nochmal den Sprung bis zum Jahr 2020 auf 38 Prozent (ca. 24 TWh) bei 64 TWh Gesamtbruttostromerzeugung in Baden-Württemberg. Im Jahr 2050 soll ein Zuwachs stattfinden, d.h. 86 Prozent erneuerbarer Energien sind an der Bruttostromerzeugung beteiligt. Dadurch wird weitestgehend Strom aus erneuerbare Energien erzeugt. Der Importstromanteil ist in dieser Grafik nicht aufgeführt, soll jedoch weitgehend unverändert gegenüber dem Jahr 2010 mit 14 TWh bleiben. Dieser basiert zunehmend auf erneuerbare Energien. [70]

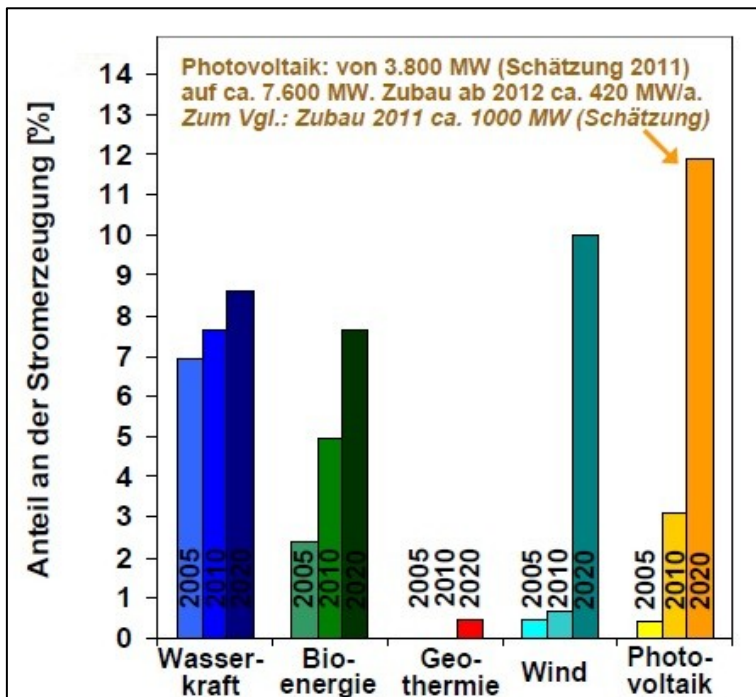


Abbildung 25 - Ausbau erneuerbarer Energien bis 2020 [70]

In dieser Grafik, Abbildung 25, der ZSW wird der Anteil der einzelnen erneuerbaren Energien der Stromerzeugung nochmal verdeutlicht. Es ist zu erkennen, dass die Wasserkraft, die Bioenergie als auch die Geothermie mit einem schwächeren Zuwachs gegenüber den fluktuierenden Energien prognostiziert wird. Die Wasserkraft- und Bioenergiepotenziale gelten als weitestgehend ausgeschöpft. [70]

Zudem gab Franz Untersteller am 11. Mai 2012 bekannt:

„Umbau zu erneuerbaren Energien, Steigerung der Energieeffizienz und Energiesparen – das sind die drei wichtigsten Handlungsfelder, um der Energiewende zum Erfolg zu verhelfen. Und dazu brauchen wir moderne ausgebaute Leitungsnetze und ausreichend Speicherkapazitäten. Besonders bei den Netzen warten wir dringend darauf, dass der Bund die nötigen Voraussetzungen schafft.“ [44]

Speziell im Bereich der Windkraft ist durch die Novelle des Landesplanungsgesetzes und der Verabschiedung des Windenergieerlasses ein weiterer Baustein gesetzt worden um den Ausbau der Windkraft voranzutreiben, um bis zum Jahr 2020, 10 Prozent des Stromes durch Windenergie in Baden-Württemberg zu produzieren. Um diese Ziel umzusetzen bedarf es einer Erweiterung der Windenergieanlagen um

1.200 mit einer Anlagenleistung von 3 MW zu errichten, hierbei wäre dann eine Strombereitstellung von 7 TWh/a möglich. Durch den Windatlas hat das Land Baden-Württemberg eine Basis für die Nutzung der Windenergie bereitgestellt, dieser hilft zur Identifikation geeigneter Standorte. [44], [71]

In der Novelle des **Landesplanungsgesetzes** heißt es, dass es in den Regionalplänen künftig keine Ausschlussgebiete, sondern nur noch Vorrang Gebiete geben soll. Weitere Punkte wie, dass die planerische Steuerung der Windkraftnutzung durch Städte, Gemeinden und kommunale Planungsträger möglich ist. Zudem kann die Planung auf zwei Planungsträger gestützt werden, d.h. Regionalverbände, Städte und Gemeinden. Zum 1. Januar 2013 werden die bestehenden Ausschluss- und Vorranggebiete aufgehoben. [47]

Der **Windenergieerlass**, der am 30. Mai 2012 in Kraft tritt, eröffnet allen Fachstellen, Behörden, Kommunen, Bürgerinnen und Bürgern als auch Investoren die an Verfahren zur Planung, Genehmigung, und Bau von Windkraftanlagen beteiligt sind eine anforderungsgerechte Hilfe und Leitlinie. Planerische und rechtliche Anforderungen für den Bau von Windkraftanlagen werden dort zusammengefasst und abgesehen davon fungiert er als Richtschnur für vorhandene Auslegungsspielräume. Ferner beinhaltet er die frühzeitige Einbeziehung von Bürgern und Bürgerinnen, allen relevanten Interessengruppen und Verbänden, über z.B. Bürgerinformationsveranstaltungen werden sie bereits in den frühen Planungsphasen informiert und können sich gegebenenfalls finanziell an dem Ausbau der Windenergie beteiligen. Der Erlass ist für die Behörden verbindlich, z.B. für Immissions- und Naturschutzbehörden. Prinzipiell ist der Windenergieerlass als Hilfestellung für die Träger der Regionalplanung, Kommunen und sonstige Träger der Bauleitplanung anzusehen. [44], [48], [71]

Desweiteren gibt es z.B. Förderprogramme wie die des „Bioenergie Wettbewerbs“ welcher 2007 vom Wirtschaftsministerium hervorgebracht wurde oder die Leuchtturmprojekte des Umweltministeriums, welches Projekte zur Solar-, Windenergie, Biomasse, Geothermie und Wasserkraft birgt. Beide zielen auf Innovationen der Technik erneuerbarer Energien ab.

## 4 Ermittlungen der Potenziale

Um eine Abschätzung der Potenziale der erneuerbaren Energien in Baden-Württemberg zu treffen, werden verschiedene Potenzialberechnungen eingesetzt. Ein Potenzial zeigt eine noch nicht realisierte Möglichkeit auf und gibt somit die Erreichbarkeit eines Ziels an. [49]

- **Theoretisches Potenzial:** Dies umfasst innerhalb einer gegebenen Region zu einer bestimmten Zeit das physikalische Angebot, sozusagen das gesamte Potenzial einer Energieressource. [34]
- **Technisches Potenzial:** Dies beherbergt den Anteil des theoretischen Potenzials, welches unter Berücksichtigung der technischen Randbedingungen nutzbar ist. [34]
- **Wirtschaftliches Potenzial:** Dies beschreibt den Teil des technischen Potenzials, welcher unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten nutzbar ist. [34]
- **Erschließbares Potenzial:** Dieses definiert den Teil des wirtschaftlichen Potenzials, welches unter politischen Aspekten durchgeführt werden kann. [34]

Für die Abschätzungen werden jedoch nur das theoretische und das technische stromerzeugende Potenzial berücksichtigt. Jedoch ist die Abgrenzung in gewissen Teilen der Arbeit schwer zu treffen und zudem die Angaben in der Literatur zum technischen Potenzial variierend. [34] Deshalb wird zum Teil der Begriff des „stromerzeugenden Potenzials“ verwendet.

### 4.1 Photovoltaik

Zu Beginn wird das theoretische Potenzial abgeschätzt. Der nächste Punkt beschreibt die Methodik und den Status quo der zum Teil ermittelten Dachflächen (Solare Effizienz auf Hausdächern). Darauf folgend werden die stromerzeugenden Potenziale der Photovoltaik auf Basis der ermittelten Zahlen des ZSW berechnet. Zum Schluss wird ein Ausblick prognostiziert.

## 4.1.1 Theoretisches Potenzial

Um das **theoretische Potenzial** abzuschätzen, wird die mittlere jährliche Solareinstrahlung auf einer horizontalen Fläche hinzugezogen, die Daten werden von der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz (LUBW) online bereitgestellt.

Auf der folgenden Karte sind die Werte von Baden-Württemberg einsehbar. Es ist zu erkennen, dass die südlich gelegenen Gebiete eine höhere mittlere jährliche Solareinstrahlung aufweisen. Deswegen wird bei der folgenden Berechnung der etwaige Mittelwert der solaren Einstrahlung angenommen. Dieser beträgt 1.121 [kWh/m<sup>2</sup>].

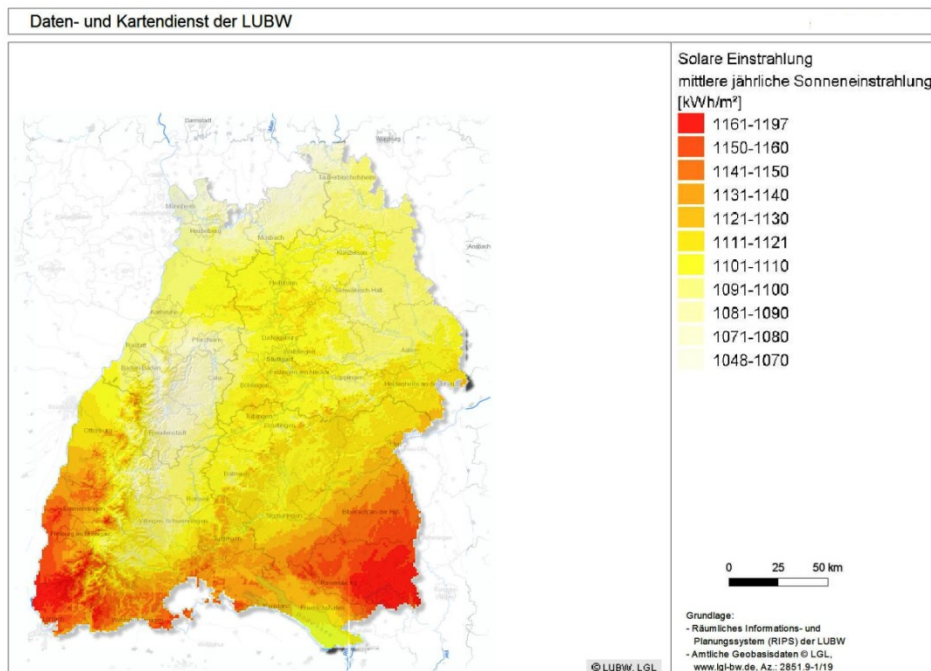


Abbildung 26 – Solare Einstrahlung Baden-Württemberg [50]

Für das theoretische Potenzial ist zudem noch die Fläche von Baden-Württemberg von Nöten, welche mit der Solareinstrahlung multipliziert wird. Die Fläche wird von dem statistischen Landesamt Baden-Württemberg zu Verfügung gestellt.

### Theoretisches Potenzial im Jahr:

[Jährliche Bestrahlung: 1121 kWh/m<sup>2</sup>] \* [Fläche BW: 3575144\*10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>] ≈ 4\*10<sup>13</sup> kWh

Tabelle 10 - Theoretisches Potenzial Solarenergie; eigene Berechnung nach Quaschnig [34]

Das theoretische Potenzial im Jahr der Solarenergie in Baden-Württemberg liegt somit bei 40.000 TWh.

In Baden-Württemberg war im Jahr 2010 eine installierte Leistung von 2.932.216 kW an Photovoltaik (siehe 3.1 IST-Zustand) vorhanden. Wird davon ausgegangen, dass normale Module durchschnittlich  $10 \text{ m}^2/\text{kW}_p$  benötigen, ist von einer Modulfläche von  $29.322.160 \text{ m}^2$  ( $29,32 \text{ km}^2$ ) in Baden-Württemberg auszugehen. Dies entspricht in etwa 4.890 Fußballfeldern, die eine Fläche von 100 m Länge auf 60 m Breite aufweisen. [51]

Welche Gegebenheiten und Expositionen die Photovoltaikanlagen aufweisen sollen, sind in Punkt „2.1.1 Standort“ erläutert worden, deshalb wird in diesem Punkt der Arbeit auf eine erneute Erwähnung verzichtet.

Um eine genaue Angabe des Potenzials der gesamten Dachflächen in Baden-Württemberg durchzuführen, wäre eine Analyse mit Hilfe von Geobasisdaten, wie z.B. der automatisierten Liegenschaftskarte (ALK) um die Gebäudegrundrisse zu bestimmen, Digitale Orthophotos und Höhendaten nötig.

### 4.1.2 Solare Effizienz auf Hausdächern

Die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden Württemberg (LUBW) stellt solare Potenzialflächen auf Hausdächern in einer groben Klassifizierung, auf einem Rechenmodell basierend, in ihrem Daten- und Kartendienst dar. Hierbei wird der potenzielle bzw. theoretisch erreichbare Solarertrag auf Hausdächern aufgezeigt. Durch das Luftbild ist zu erkennen, ob ein Hausdach aufgrund der Lage, Ausrichtung und Dachneigung für die Nutzung der Solarenergie prädestiniert ist. Diese Daten sollen aber mehr als Orientierungsinformation dienen. Die Ergebnisse weisen drei Kategorien auf, „sehr gut geeignet“, „gut geeignet“ oder „vor Ort zu prüfen“ und sind jeweils farblich dargestellt. Des Weiteren kann z.B. die mögliche solare Einstrahlung in  $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  durch anklicken des Hausdachs abgerufen werden. Im folgenden Auszug ist dies exemplarisch dargestellt. Die Untersuchungen sind derzeit nur auf gewissen Teilen der Landesfläche durchgeführt. [52]

Der erste Auszug zeigt die Übersichtskarte von Baden-Württemberg mit den untersuchten Gebieten bzw. Gebieten in denen noch keine Daten vorhanden sind. In der Legende sind die umschlossenen **untersuchten Gebiete** und die gefüllten **nicht untersuchten Landesflächen** aufgeführt.

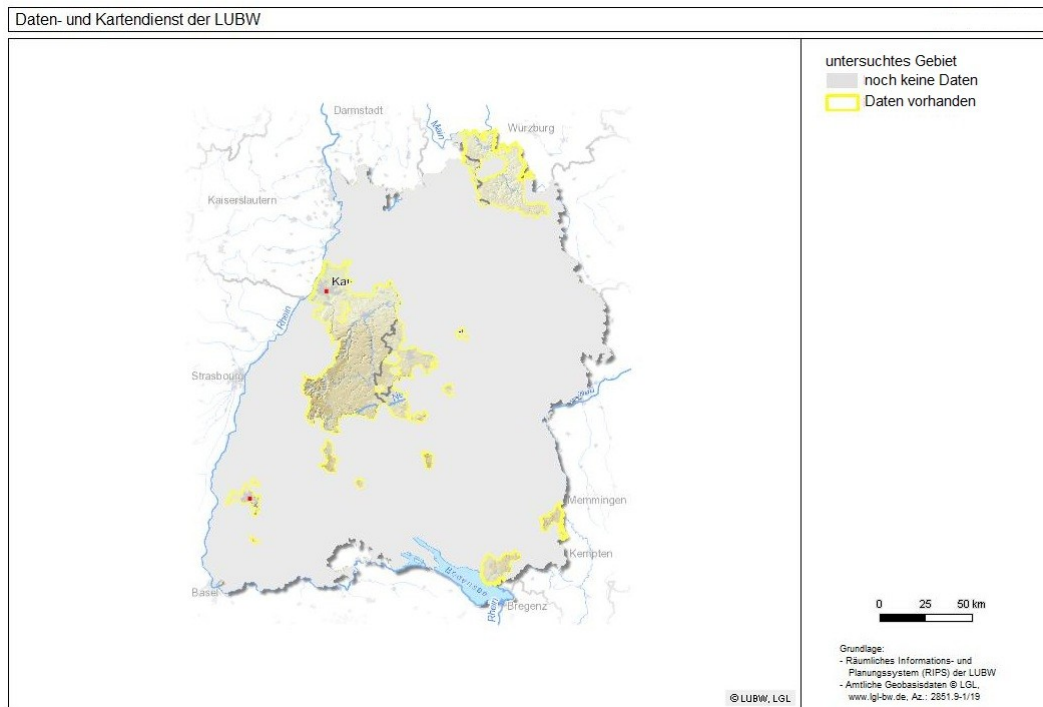


Abbildung 27 - Solare Effizienz auf Hausdächern [53]

Auf dem nächsten Auszug ist mit Hilfe der Zoom Funktion, die es ermöglicht Gebiete näher zu betrachten, ein Beispielgebiet dargestellt. Die Legende rechts auf dem Auszug zeigt die Eignung jeder einzelnen Dachfläche.

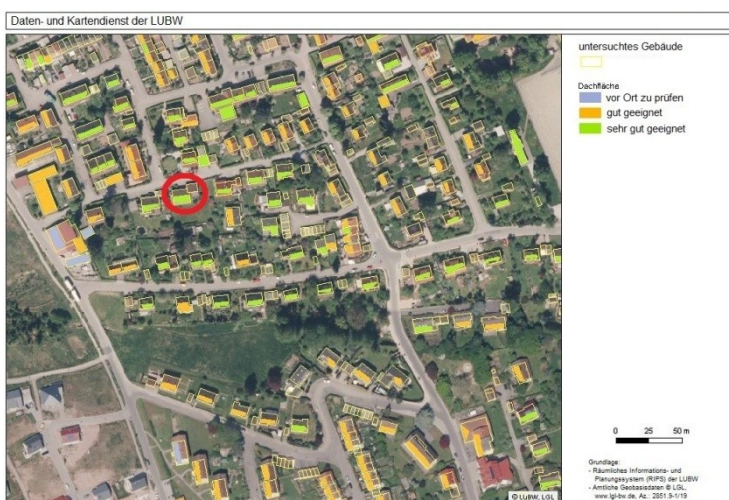
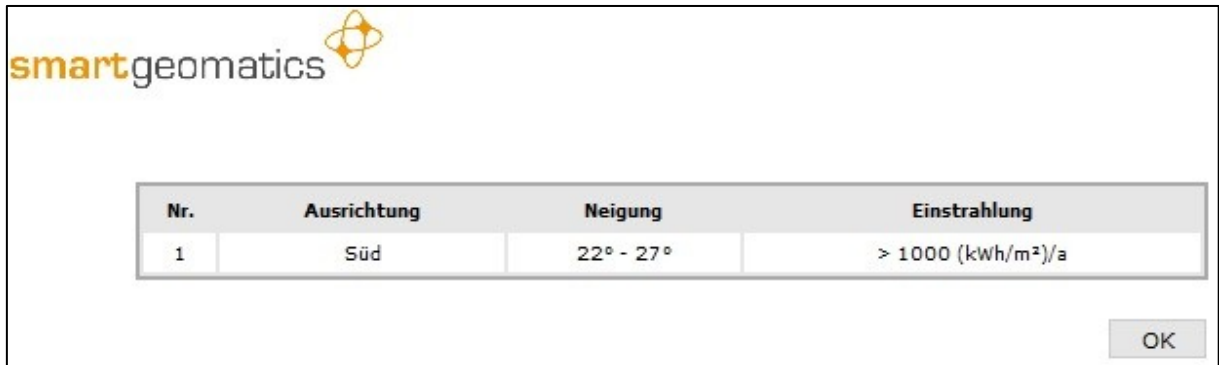


Abbildung 28 - Auszug Beispielgebiet Solare Effizienz [53]

Wie oben beschrieben gibt es drei Kategorien an Dachflächen „sehr gut geeignete“; „gut geeignete“ und die „vor Ort zu prüfenden“. Durch anklicken der Dachfläche im rot umrahmten Kreis werden folgende Informationen abgerufen.

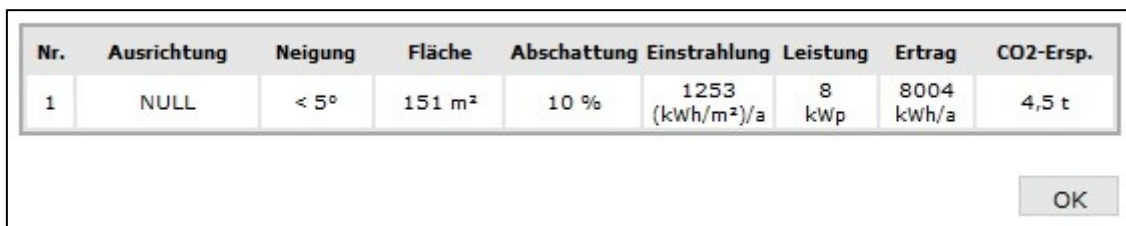


Nr.	Ausrichtung	Neigung	Einstrahlung
1	Süd	22° - 27°	> 1000 (kWh/m²)/a

OK

Abbildung 29 - Informationen Dachfläche [53]

Zum einen die Ausrichtung der Dachfläche, zum anderen die Neigung und die Einstrahlung pro Jahr.



Nr.	Ausrichtung	Neigung	Fläche	Abschattung	Einstrahlung	Leistung	Ertrag	CO2-Ersp.
1	NULL	< 5°	151 m²	10 %	1253 (kWh/m²)/a	8 kWp	8004 kWh/a	4,5 t

OK

Abbildung 30 - Detaillierte Informationen Dachfläche [53]

In der Region Freiburg im Breisgau sind zum Beispiel schon sehr umfangreiche Informationen abrufbar. Von der Abschattung bis zum jährlichen Ertrag und zusätzlich noch die CO2-Ersparung.

### 4.1.3 Stromerzeugendes Potenzial der Photovoltaik

Das ZSW hat 157,3 km<sup>2</sup> geeignete Dachflächen für die Solarnutzung in Baden-Württemberg ermittelt. Die geeigneten Dachflächen beinhalten eine bis zu 180° C Südabweichung, d.h. es sind auch Dächer mit einer West- oder Ostorientierung inbegriffen. West- und Ostexponierte Gebäude erweisen einen weniger zu erwartenden Ertrag auf, da aber keine nachvollziehbare Abschätzung möglich ist, werden diese in die Berechnung so übernommen. Für die Freiflächen haben sich 106,6 km<sup>2</sup> als geeignet herausgestellt, diese sind nach ihrer geografischen Lage und Beschaffen-



heit für die Nutzung solarer Strahlungsenergie eingestuft. Das ergibt eine Gesamtfläche von 263,9 km<sup>2</sup>. [5]

Um das stromerzeugende Potenzial der Dachflächen zu ermitteln, bedarf es einiger Annahmen:

- Modul-Wirkungsgrad ( **$\eta$** ): 15 Prozent
- Performance Ratio (**PR**): 25 Prozent stellen den Verlust von Gleichstrom in Wechselstrom dar
- Nutzungsfaktor (**NF**): 70 Prozent, dieser gibt an wie viel Fläche für Photovoltaik verwendet wird (Nutzungskonkurrenz Solarthermie)
- Mittlere jährliche solare Bestrahlung (**SB**): 1.121 kWh/(m<sup>2</sup>\*a)
- Dachfläche (**AD**): 157,3 km<sup>2</sup>

Somit ergibt sich folgende Formel:

**Strompotenzial Dachfläche im Jahr:**

$$P_{\text{Solar Dachfläche}} = [(SB * AD) * \eta * PR] * NF$$

$$P_{\text{Solar Dachfläche}} = [(1121 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}) * 157.300.000 \text{ m}^2) * 15 \% * 75 \%] * 70 \%$$

$$P_{\text{Solar Dachfläche}} \approx \mathbf{13.886.247.375 \text{ kWh/a}}$$

**Tabelle 11 - Strompotenzial Dachfläche; eigene Berechnung nach Klärle et al. [27]**

Somit beträgt das jährliche stromerzeugende Potenzial auf Dachflächen in etwa 13,89 TWh.

Um das stromerzeugende Potenzial der Freiflächen zu ermitteln, bedarf es ebenso einiger Annahmen:

- Modul-Wirkungsgrad ( $\eta$ ): 15 Prozent
- Performance Ratio ( $P_R$ ): 25 Prozent stellen den Verlust von Gleichstrom in Wechselstrom dar
- Nutzungsfaktor ( $N_F$ ): 70 Prozent, dieser gibt an wie viel Fläche für Photovoltaik verwendet wird (Nutzungskonkurrenz Solarthermie)
- Mittlere jährliche solare Bestrahlung ( $S_B$ ): 1.121 kWh/(m<sup>2</sup>\*a)
- Freifläche ( $A_F$ ): 106,6 km<sup>2</sup>
- Flächenfaktor ( $F_F$ ): 30 Prozent, dieser berücksichtigt, dass bei der Aufständigung der Module gewisse Abstände eingehalten werden müssen

Dadurch ergibt sich folgende Formel:

**Strompotenzial Freifläche im Jahr:**

$$P_{\text{Solar Freifläche}} = [(S_B * A_F) * F_F * \eta * P_R] * N_F$$

$$P_{\text{Solar Freifläche}} = [(1121 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}) * 106.600.000 \text{ m}^2) * 70 \% * 15 \% * 75 \%] * 70 \%$$

$$P_{\text{Solar Freifläche}} \approx 6.587.360.325 \text{ kWh/a}$$

**Tabelle 12 - Strompotenzial Freifläche; eigene Berechnung nach Klärle et al. [27]**

Das jährliche stromerzeugende Potenzial liegt bei ca. 6,59 TWh.

## 4.1.4 Ausblick

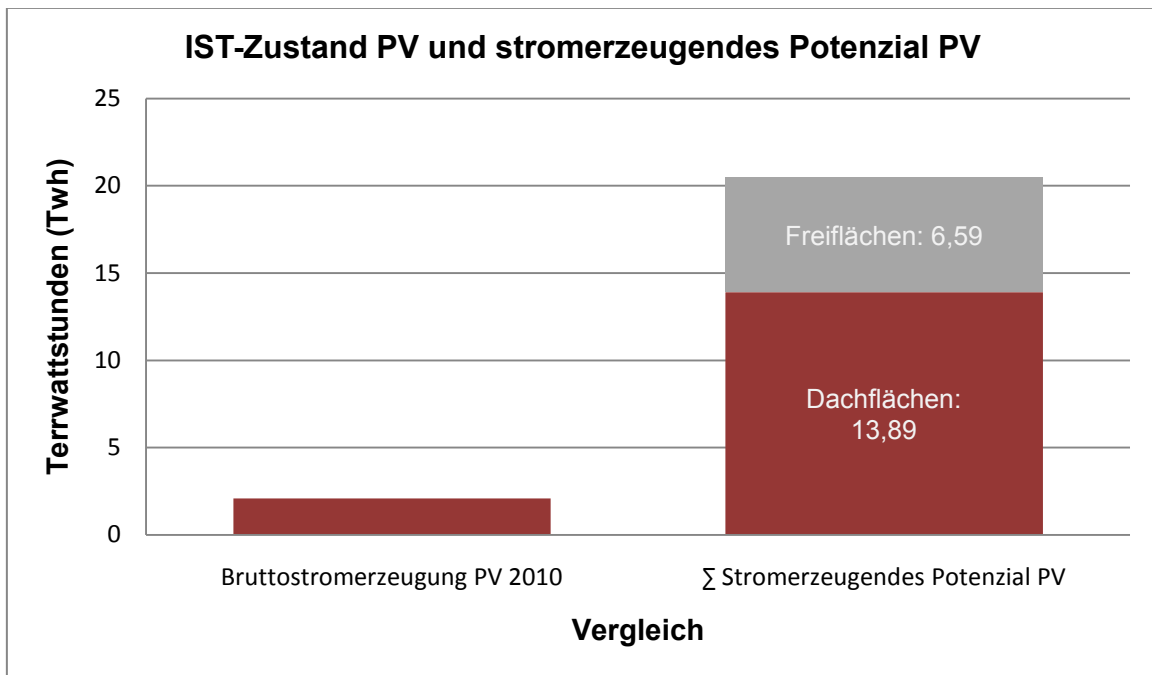


Tabelle 13 - IST-Zustand PV und stromerzeugendes Potenzial PV; eigene Darstellung

Dieses Diagramm enthält eine Gegenüberstellung des IST-Zustandes 2010, laut statistischen Landesamts Baden-Württemberg mit einer Bruttostromerzeugung von 2,805 TWh und der möglichen ermittelten Stromausbeute. Wie zu erkennen ist, ist nach oben hin noch reichlich Kapazität vorhanden. [46]

Die ZSW hat das Potenzial der Photovoltaiknutzung um einiges höher abgeschätzt. Die Rahmenbedingungen sind, dass 70 Prozent der geeigneten Flächen der Photovoltaik zur Verfügung stehen. Des Weiteren ist der Wirkungsgrad mit 20 Prozent angegeben, welcher nach heutigem Stand deutlich zu hoch angenommen ist. Somit wurde ein theoretisches stromerzeugendes Potenzial von 16,5 TWh für die Freiflächen und 24,2 TWh auf den Dächern ermittelt. [5]

Das ZSW prognostiziert bis 2020 einen Zuwachs auf 7 TWh, was durchaus möglich ist, da genügend Potenzial zur Verfügung steht. Bis zum Jahr 2050 sollen bis zu 30 TWh erzeugt werden. [54] Dies ist nach derzeitiger Sicht anzuzweifeln, bei Betrachtung der ermittelten Ergebnisse. Durch Innovationen in der Technik, welche natürlich voranschreitet, könnten z.B. Module mit höheren Wirkungsgraden entwickelt werden (siehe auch 2.1.3). Dass es ausreichend Potenzial auf den Dachflächen gibt, ist ein-

---

fach nachvollziehbar, aber es stellt sich die Frage, ob diese auch genutzt werden können, da sich die Dachflächen zu großen Teilen in Privateigentum befinden und keine Verpflichtung diesbezüglich besteht.

## 4.2 Windenergie

Zu Beginn wird für Baden-Württemberg das theoretische Potenzial ermittelt und als nächster Schritt das technische Potenzial in 140 m Höhe. Um einen etwaigen Vergleich zu bekommen, werden die Ergebnisse verglichen, dafür wird eine Studie des Bundesverbands Windenergie e.V. herangezogen, wobei diese Potenzialstudie unter anderen Rahmenbedingungen erstellt wurde, z.B. Windverhältnisse in 100 m Höhe. Zum Schluss wird ein Ausblick gewährt, wie die Ergebnisse zu deuten bzw. zu interpretieren sind.

### 4.2.1 Theoretisches Potenzial

Um das theoretische Potenzial der Windenergie zu ermitteln sind von einer ca. zwei prozentigen Umwandlung der Sonnenenergie in Windenergie auszugehen.

**Theoretisches Potenzial im Jahr:**

[Theoretisches Potenzial im Jahr der Solarenergie:  $4 \cdot 10^{13}$  kWh] \* [Umwandlung: 2 %]  $\approx 8 \cdot 10^{11}$  kWh

Tabelle 14 - Theoretisches Potenzial Windenergie; nach Quaschnig [34]

Bei der Windenergie ist somit ein theoretisches Potenzial im Jahr von 800 TWh zu verzeichnen.

### 4.2.2 Technisches Potenzial

Die **technische Potenzialermittlung** ist um einiges aufwändiger. Zu Beginn werden die zu Verfügung stehenden Flächen ermittelt, mit Hilfe eines Geoinformationssystems (GIS) und den bereitgestellten digitalen Karten von der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW). Die digitalen Karten sind zum Teil im digitalen Landschaftsmodell (DLM-25-BW), welches z.B. Informationen zu Siedlungs-, Infrastrukturflächen und anderer Gebietstypen beinhaltet, aufgeführt und aus dem Räumlichen Informations- und Planungssystem (RIPS).

Die Ermittlung der Flächen und der Potenziale wird in mehreren Schritten durchgeführt und bauen aufeinander auf. In der folgenden Tabelle wird dies aufgezeigt.

Schritte	Vorgang
<b>Schritt 1</b>	Kriterien der Ausschlussflächen festlegen
<b>Schritt 2</b>	Bestimmung nutzbarer Flächen für die Windenergie in Baden-Württemberg
<b>Schritt 3</b>	Gebietstypen der nutzbaren Flächen ausweisen
<b>Schritt 4</b>	Winddaten mit Gebietstypen überschneiden
<b>Schritt 5</b>	Windanlage festlegen
<b>Schritt 6</b>	Berechnung der Volllaststunden mittels Weibullverteilung und Leistungskurve
<b>Schritt 7</b>	Turbinendichte bestimmen
<b>Schritt 8</b>	Eignung der Gebietstypen
<b>Schritt 9</b>	Installierbare Leistung bestimmen
<b>Schritt 10</b>	Feldwirkungsgrad bestimmen (Verluste)
<b>Schritt 11</b>	Energieerträge berechnen (Zusammenführung der Ergebnisse aus den vorherigen Schritten)

Tabelle 15 - Vorgehensweise zur Berechnung des technischen Potenzials; eigene Darstellung und Strukturierung in Anlehnung an Gantenbein [54]

Zu Beginn werden von der gesamten Fläche Baden-Württembergs, aufgrund rechtlicher Gegebenheiten, z.B. die Siedlungsgebiete, die Naturraumgebiete sowie die Verkehrs- und Infrastrukturflächen ausgeschlossen, zusätzlich müssen Abstände zu gewissen Gebietstypen beachtet werden. Um die erhaltene Potenzialfläche näher zu charakterisieren, werden die übrig gebliebenen Gebiete des digitalen Landschaftsmodells mit der Potenzialfläche zusammengeführt und darauffolgend mit dem Windatlas in 140 m Höhe überschritten. Des Weiteren wird eine Windanlage festgelegt, welche als Input für die Berechnung der Volllaststunden mittels der Weibullverteilung und der entsprechenden Leistungskurve der Anlage dient. Nach Bestimmung der Turbinendichte wird eine prozentuale Eignung für jedes Gebiet vergeben und die jeweilige installierbare Leistung bestimmt. Gegen Ende werden die Verluste in Form des Feldwirkungsgrades dargestellt. Die Ergebnisse werden zum Schluss zusammengeführt, so dass der Energieertrag für jedes ausgewiesene Gebiet errechnet wird.

## Schritt 1: Kriterien der Ausschlussflächen festlegen

Bezüglich der bereitgestellten digitalen Karten der LUBW wird ein Kriterienkatalog aufgebaut. Die Kriterien der Ausschlussflächen sind im Windenergieerlass aufgeführt. Zudem wird noch der Kriterienkatalog des Regionalverbands Bodensee-Oberschwaben vom Mai 2011 (siehe Anhang) hinzugezogen, da der Windenergieerlass in manchen Punkten keine spezifischen Abstandsflächen ausweist. Beispielsweise weist der Windenergieerlass bei den Siedlungsgebieten ein Vorsorgeabstand als Orientierungshilfe von 700 m aus, kleinere Abstände müssen die maßgeblichen Immissionsrichtwerte der TA Lärm einhalten. Da laut Windenergieerlass zu anderen Gebietstypen wie z.B. Industriegebiete ein weniger großer Abstand eingehalten werden muss, wird hier der Kriterienkatalog des Regionalverbandes Oberschwaben ergänzend hinzugezogen. Um es transparenter zu gestalten, werden die Kriterien des Regionalverbandes Oberschwaben orange eingefärbt. Da keine Informationen zu Vorranggebieten für den Naturschutz und Landschaftspflege, regionalen Grünstreifen und Grünstreifen, militärischen Belangen, (z.B. Radaranlagen zur Luftverteidigung) und behördlichen und privaten Richtfunkstrecken bestehen, werden diese nicht weiter beachtet. Des Weiteren blieben (Haupt-) Wirtschaftswege, Über- und Unterföhrungselemente ebenso unberücksichtigt. Die Industrie und Gewerbegebiete sind im digitalen Landschaftsmodell zusammen ausgewiesen und deshalb ist der Abstand von 300 m anzunehmen. Aufgrund der Größe wird der Kriterienkatalog jedoch nur Auszugsweise in Form der Wasserwirtschaft dargestellt, der restliche Teil befindet sich im Anhang.

Ausschlussflächen	Abstand	rechtliche Begründung
<b>Wasserwirtschaft</b>		
Gewässerrandstreifen	10 m	§ 68b WG
Schutzzonen 1 und 2 Wasserschutzgebiete und Heilquellenschutzgebiete	-	§ 7 VwV-WSG BW
Überschwemmungsgebiete	-	§ 77 WG
Gewässer 1. Ordnung	50 m	NatSChG

Tabelle 16 – Auszug Ausschlusskriterien Windenergie; eigene Darstellung nach Windenergieerlass und Regionalverband Bodensee-Oberschwaben [71], [56]

## Schritt 2: Bestimmung nutzbarer Flächen für die Windenergie

Zu Anfang wird das Land Baden-Württemberg als Polygon im GIS dargestellt, in den Attributen weist es eine Fläche von 35.749,04 km<sup>2</sup> auf.

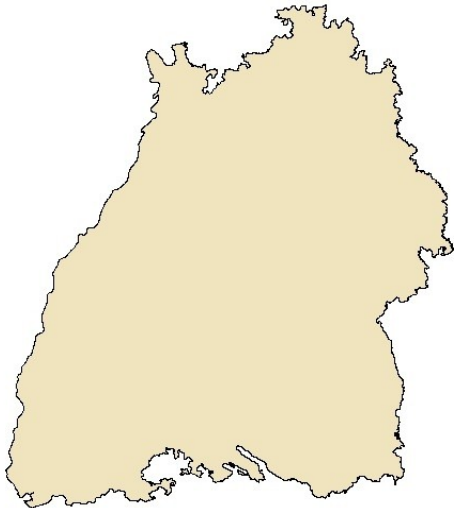


Abbildung 31 - Fläche Baden-Württemberg; eigene Darstellung aus RIPS [50]

Um den Vorgang transparenter und verständlicher zu gestalten zeigt die folgende Abbildung das Biosphärengebiet (gelb) und Waldschutzgebiet (grün) mit einem Puffer von 200 m auf der Fläche Baden-Württembergs. Das Biosphärengebiet und Waldschutzgebiet wird von der LUBW als shape-Datei zur Verfügung gestellt.

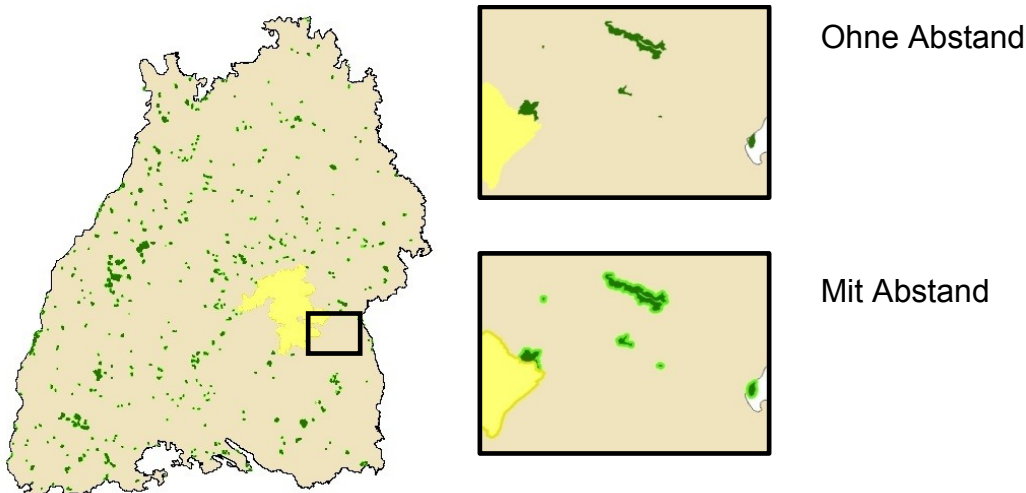


Abbildung 32 - Fläche BW mit Biosphäre- und Waldschutzgebiet; eigene Darstellung aus RIPS [50]



Die Gebiete die nicht bebaut werden dürfen, werden mit Hilfe des GIS Programms entfernt, d.h. die Fläche Baden-Württembergs wird um die Fläche der oben genannten Gebietstypen inklusive Abstands-Puffer reduziert und eine neue Flächengröße von 34.228,77 km<sup>2</sup> entsteht.

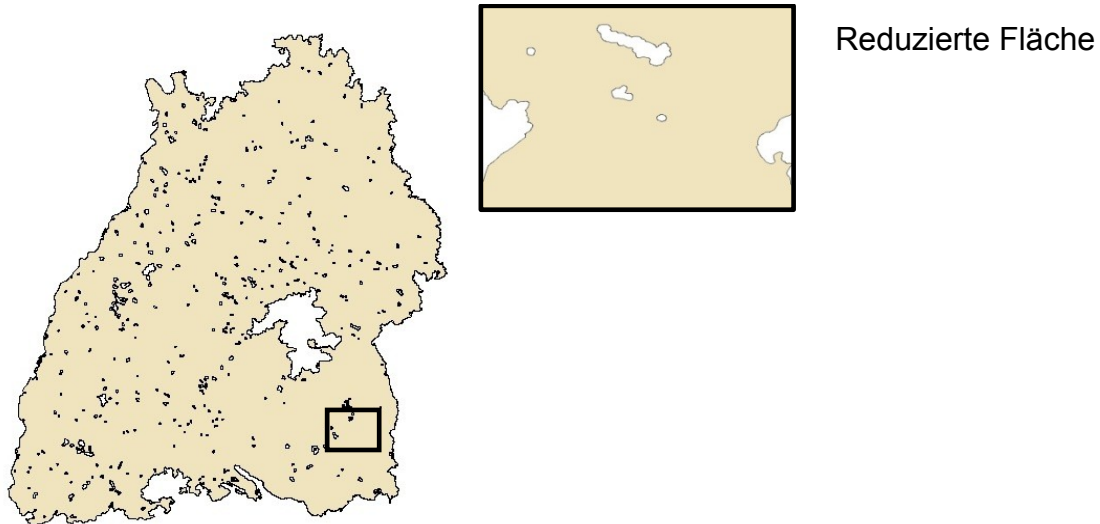


Abbildung 33 - Fläche BW unter Abzug von Biosphäre- und Waldschutzgebiet; eigene Darstellung aus RIPS [50]

Die vier folgenden Abbildungen zeigen die jeweiligen Flächen, eingeteilt nach den Kriterienkatalog. Die linke Abbildung zeigt die Siedlungsgebiete und die Rohstoff-sicherung und die Rechte den Verkehr, die Eisenbahnen und den Luftverkehr mit den jeweiligen Abstandsflächen.

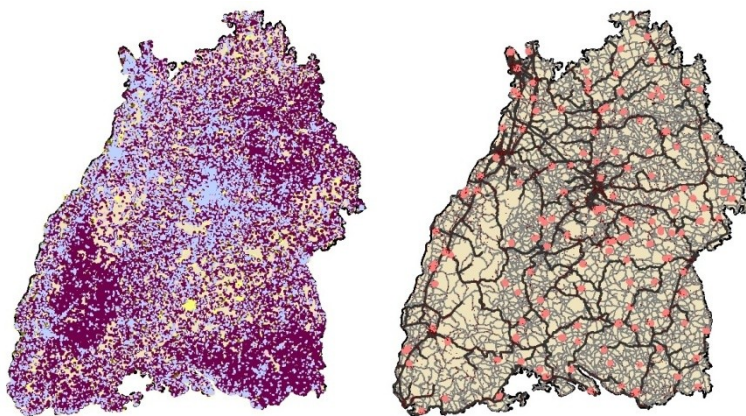


Abbildung 34 - Siedlungsgebiete und Verkehr, Eisenbahnen und Luftverkehr; eigene Darstellung aus DLM-25-BW

Die zwei folgenden Bilder stellen, mit den Abstandsflächen aus dem Kriterienkatalog, die Freileitungen (rechts) und die Wassergebiete (links) dar.

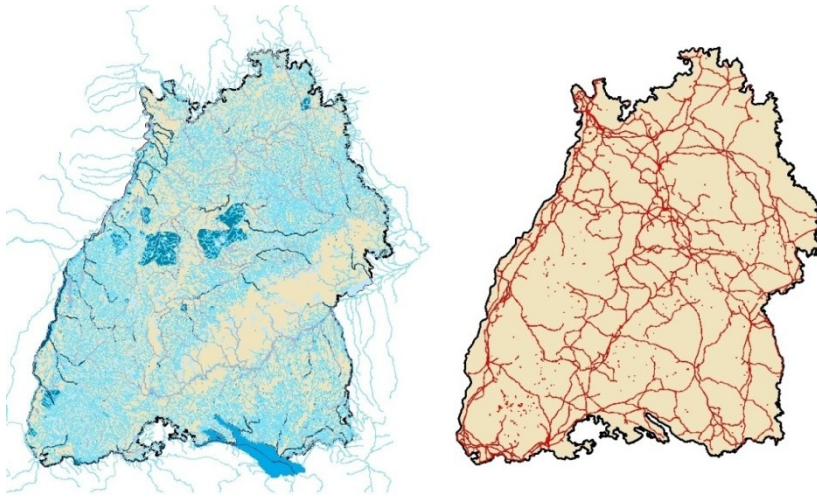


Abbildung 35 - Wassergebiete und Freileitungen; eigene Darstellung aus DLM-25-BW und RIPS [50]

Zuletzt sind die Naturschutzgebiete mit den Abstandsflächen aus dem Kriterienkatalog dargestellt.

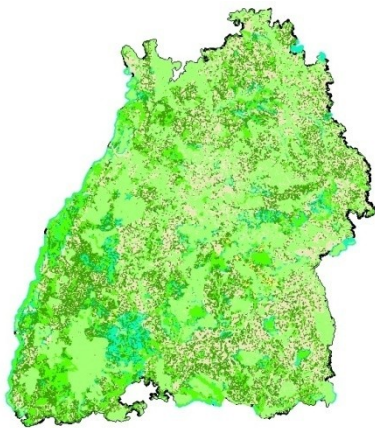


Abbildung 36 - Naturschutzgebiete; eigene Darstellung aus RIPS [50]

Nach Abzug aller genannten Gebiete ist eine Restfläche von 2.263,25 km<sup>2</sup> für die Nutzung der Windenergie in Baden-Württemberg übrig. Das sind 6,33 Prozent der Gesamtfläche Baden-Württembergs.

### Schritt 3: Gebietstypen der nutzbaren Flächen ausweisen

Darauf folgend wird die Restfläche im GIS mit den verschiedenen Gebietstypen überschritten, diese basieren auf den digitalen Karten der LUBW. (Bild 37). (Die einzelnen Karten der jeweiligen Gebietstypen befinden sich im Anhang). Diese teilt sich wie folgt auf:

- **Waldgebiete** mit einer Fläche von 1.527 km<sup>2</sup>,
- **Grünland und Heide** mit einer Fläche von 123,05 km<sup>2</sup>,
- **Acker- und Gartenland** mit einer Fläche von 584,88 km<sup>2</sup>,
- **Sumpf- und Mooregebiete** mit einer Fläche von 2,39 km<sup>2</sup>,
- „**nicht definiertes Gebiet**“ mit einer Fläche von 25,93 km<sup>2</sup>.

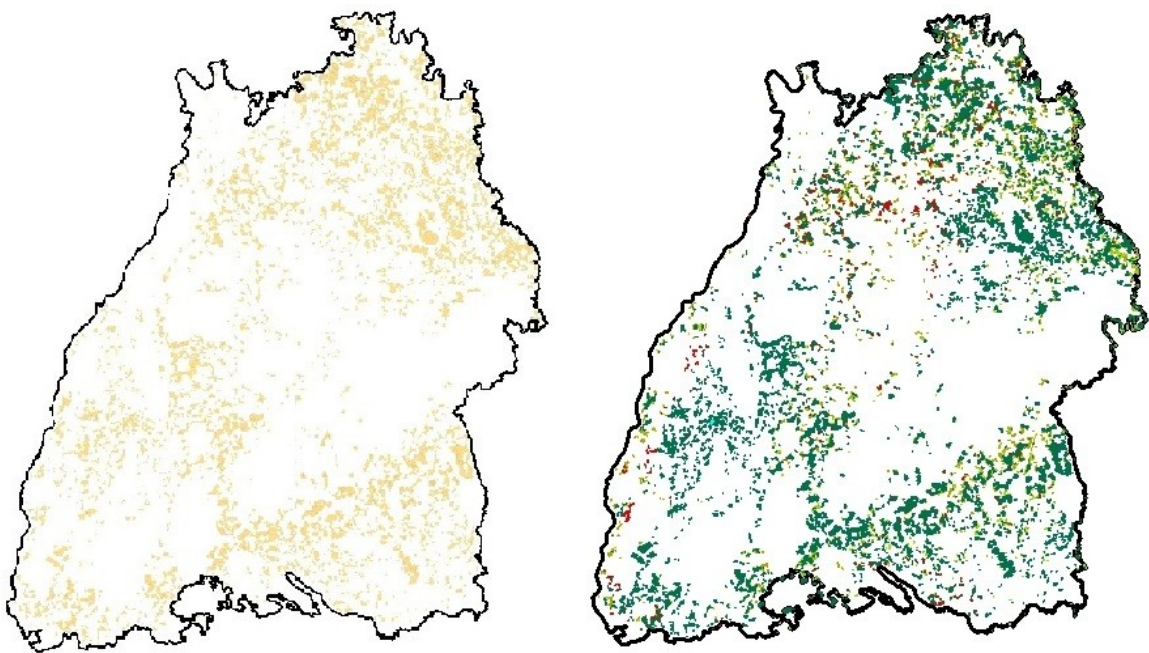


Abbildung 37 - Potenzialfläche und Potenzialfläche nach Gebietstypen; eigene Darstellung aus DLM-25-BW und RIPS [50]

#### Schritt 4: Winddaten mit Gebietstypen überschneiden

Um die Potenziale aufzuzeigen, wird der Windatlas Baden-Württemberg mit Windgeschwindigkeiten in 140 m Höhe über Grund dargestellt.

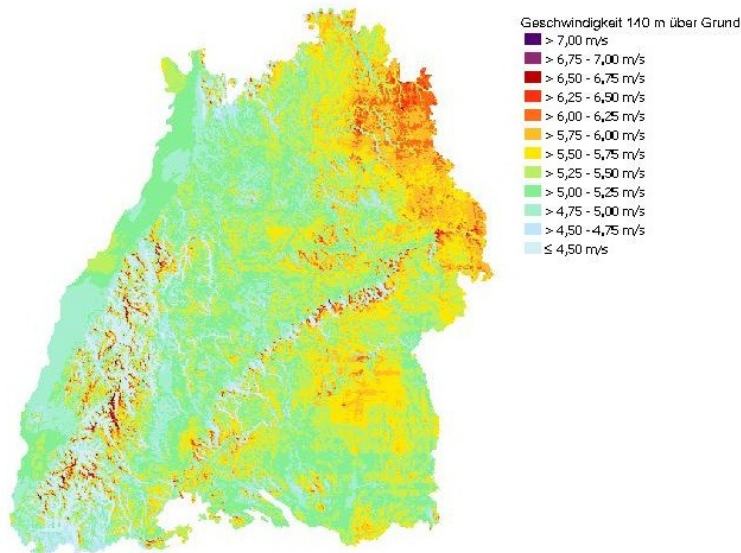


Abbildung 38 - Windatlas in 140 m Höhe über Grund; eigene Darstellung aus RIPS [50]

Darauffolgend wird er mit der Potenzialfläche Baden-Württembergs überschritten, dieses wird im nächsten Auszug aufgezeigt.

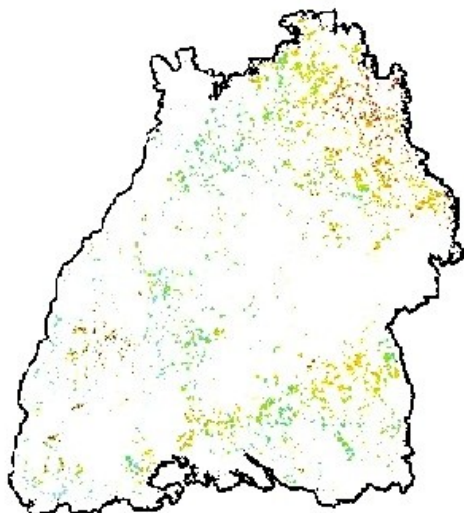


Abbildung 39 - Windatlas in 140 m Höhe über Grund auf ausgewiesener Potenzialfläche; eigene Darstellung aus DLM-25-BW und RIPS [50]

Auf Basis des Windatlas Baden-Württemberg werden nun die Geschwindigkeiten der Flächenanteile Baden-Württembergs zugeordnet. Somit ergibt sich folgende Tabelle:

Geschwindigkeits- klasse in 140 m Höhe	Waldgebiet	Grünland / Heide	Acker-/ Gar- tenland	Sumpf-/ Moorgebiete	„nicht de- finiertes Gebiet“
[m/s]	[km <sup>2</sup> ]				
4,50 – 4,75	42,99	2,74	2,98	0,01	0,56
4,75 – 5,00	117,26	9,56	35,74	0,12	4,08
5,00 – 5,25	293,79	22,32	91,51	0,67	8,75
5,25 – 5,50	397,45	30,56	140,08	0,86	7,84
5,50 – 5,75	324,32	30,46	138,68	0,73	3,16
5,75 – 6,00	213,32	20,76	114,76	-	1,12
6,00 – 6,25	80,02	4,50	52,12	-	0,25
6,25 – 6,50	19,30	0,40	7,73	-	0,02
6,50 – 6,75	5,31	0,08	0,30	-	-
6,75 – 7,00	1,88	0,02	-	-	-
>7,00	1,01	0,08	-	-	-

Tabelle 17 - Flächenanteil der Geschwindigkeitsklassen in 140 m Höhe über Grund des jeweiligen Gebietstyps; eigene Berechnung mit ArcGIS

### Schritt 5: Windanlage festlegen

Um nun das Potenzial von ganz Baden-Württemberg in 140 m Höhe zu ermitteln, bedarf es einer Windenergieanlage. Hierbei wird die Vestas V112-3.0 MW als Anlage gewählt. Sie wird als eine leistungsstarke und zuverlässige Windenergieanlage ausgewiesen. Sie ist für Onshore Standorte mit niedrigen bis mittleren Windgeschwindigkeiten prädestiniert. Laut der Homepage von Vestas, erzeugt sie mehr Strom als andere Anlagen in der 3 MW Klasse. In der folgenden Tabelle werden die Eigenschaften dieser Anlage aufgeführt. [57]

Nennleistung	Nabenhöhe	Rotordurch- messer	Einschaltge- schwindigkeit	Abschaltge- schwindigkeit
[MW]	[m]	[m]	[m/s]	[m/s]
3	84,94 /119	112	3	25

Tabelle 18 - Eigenschaften Windanlage [57]

Die Vestas V-112 existiert nicht mit der erforderlichen Nabenhöhe, dies bleibt mit weiterem Vorgehen unberücksichtigt.

## Schritt 6: Berechnung der Volllaststunden

Um den jährlichen Energieertrag zu erhalten wird nun das Programm „WASP Wind Turbine Editor“ eingesetzt. Dafür werden die Parameter der Weibull-Verteilung und die Leistungskurve der Vestas V-112 in Form von einer (.wtg) Datei verwendet. [58]

Die Weibull-Verteilung der Windgeschwindigkeit „ $v$ “ bestimmt sich aus einem Formparameter „ $k$ “ und einem Skalierungsfaktor „ $Z$ “:

$$f_{\text{Weibull}}(v) = \frac{k}{Z} * \left(\frac{v}{Z}\right)^{k-1} * \exp\left(-\left(\frac{v}{Z}\right)^k\right)$$

Die typische Kenngröße des Formparameter „ $k$ “ für Baden-Württemberg liegt bei 2,0. Durch einsetzen von „ $Z$ “ und  $k=2$  wird die Rayleigh-Verteilung erhalten. Der Skalierungsfaktor „ $Z$ “ errechnet sich mit der mittleren Windgeschwindigkeit „ $V$ “: [59], [6]

$$f_{\text{Rayleigh}}(v) = \frac{\pi}{2} * \frac{v}{V^2} * \exp\left(-\frac{\pi}{4} * \frac{v^2}{V^2}\right)$$

$$Z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} * V$$

Tabelle 19 - Weibull- und Rayleigh-Verteilung [6]

Mit Hilfe eines Screenshot wird ein Einblick in die Funktion des „WASP Wind Turbine Editor“ Programms verschafft. Der Skalierungsfaktor wird in diesem Programm mit „ $A$ “ angegeben, da in dieser Arbeit das „ $A$ “ für die Fläche steht, wird der Skalierungsfaktor mit „ $Z$ “ versehen. Die mittlere Windgeschwindigkeit wird mit dem Durchschnittswerten der einzelnen Geschwindigkeitsklassen ermittelt, bei z.B. der Klasse „> 5,00 – 5,25 m/s“ ergibt sich eine mittlere Windgeschwindigkeit von 5,125 m/s. Die Windgeschwindigkeiten unter 4,50 m/s weisen keine Relevanz auf, da hier der Durchschnittswert bei 2,25 m/s liegt und wie schon in Kapitel „2.2.3 Standort“ erwähnt, als nicht wirtschaftlich eingestuft wird. Zudem liegt die Einschaltgeschwindigkeit der Vestas V112-3.0 MW bei 3 m/s. Bei der Geschwindigkeitsklasse „> 7 m/s“ liegt die obere Grenze bei 12 m/s, somit ergibt sich eine mittlere Geschwindigkeit von 9,5 m/s. [59], [55]

Als Beispiel dient hierzu die mittlere Windgeschwindigkeit von 5,125 m/s, durch das Einsetzen dieser, wird ein Skalierungsfaktor von 5,783 erhalten. Das Programm

weist leichte Ungenauigkeiten auf, d.h. der Skalierungsfaktor „Z“ bzw. „A“ wird nach Eingabe nur mit einer Dezimalstelle nach dem Komma übernommen.

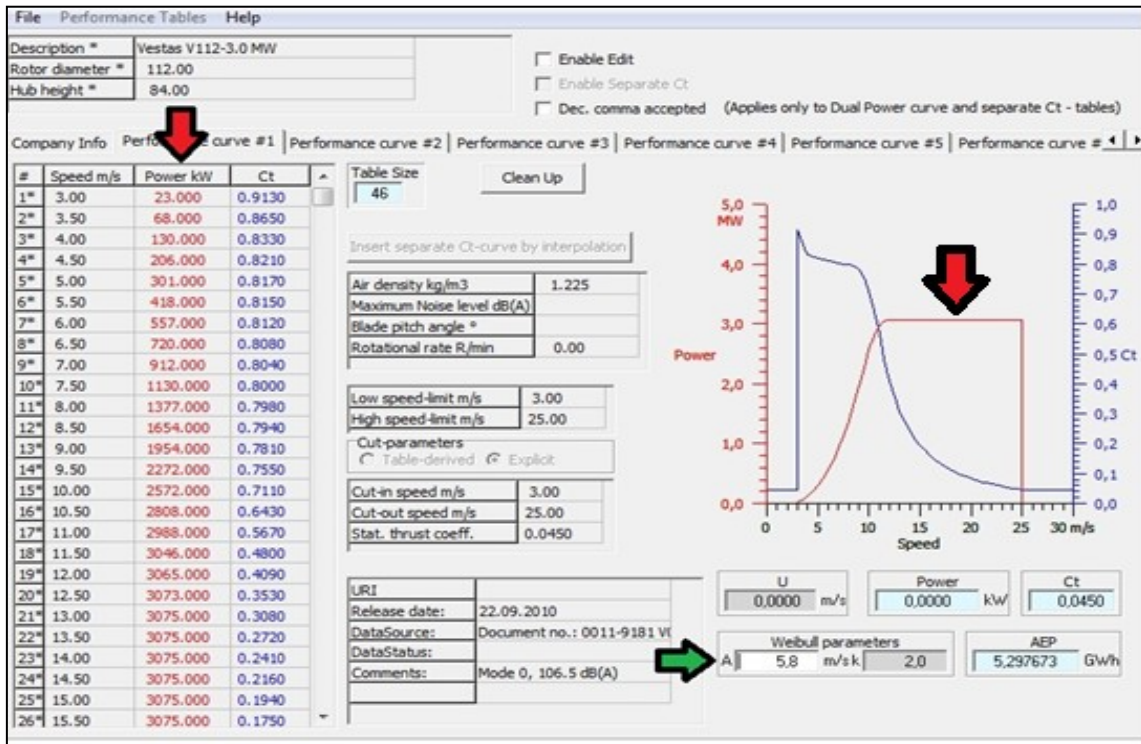


Abbildung 40 - WAsP Wind Turbine Editor mit Vestas V-112 mit einem Skalierungsfaktor 5,783 (5,8) und der mittleren Windgeschwindigkeit von 5,125 m/s

Der rote Pfeil markiert die Leistungskurve und der Grüne die Parameter der Weibull-Verteilung. Nach dem Input der Leistungskurve und der Weibull-Parameter berechnet das Programm den jährlichen Energieertrag. Dieser liegt bei 5,297673 GWh. Die Volllaststunden ergeben sich, wenn der Ertrag durch die Nennleistung dividiert wird. Somit sind ca. 1.766 Volllaststunden zu verzeichnen. Die Tabelle 20 fasst diese für alle mittleren Windgeschwindigkeiten zusammen:

Geschwindigkeitsklasse in 140 m Höhe	Vollaststunden
[m/s]	[h]
4,50 – 4,75	1.131,57
4,75 – 5,00	1.536,38
5,00 – 5,25	1.765,89
5,25 – 5,50	2.001,27
5,50 – 5,75	2.160,09
5,75 – 6,00	2.399,32
6,00 – 6,25	2.637,80
6,25 – 6,50	2.873,65
6,50 – 6,75	3.105,32
6,75 – 7,00	3.331,53
>7,00	5.105,30

Tabelle 20 - Vollaststunden in 140 m Höhe über Grund mit Vestas V-112; eigene Berechnung nach Gantenbein [55]

### Schritt 7: Turbinendichte bestimmen

Anhand der nächsten Abbildung wird die Fläche pro Anlage ermittelt.

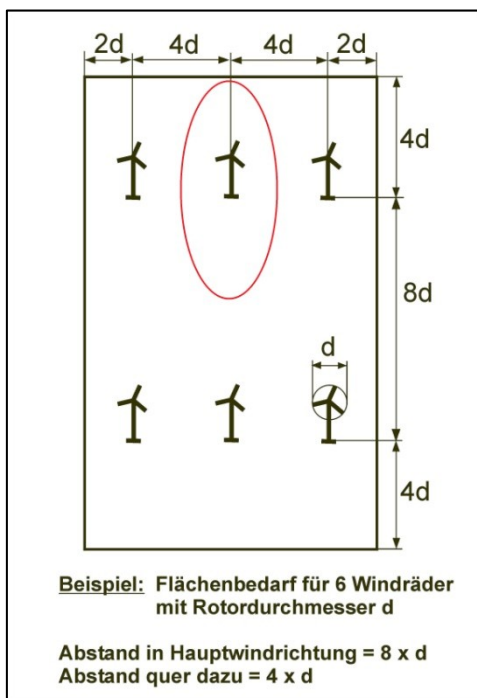


Abbildung 41 - Rotorabstandsflächen; eigene Darstellung [60]

Da bei der Ermittlung kein definierter Rand besteht, wird die Fläche einer Ellipse berechnet. Die Formel für eine Ellipse lautet wie folgt:



**Flächeninhalt einer Ellipse:**

$$A = \pi * a * b$$

$$A = \pi * 4 * 112 \text{ m} * 2 * 112 \text{ m}$$

$$A \approx 31,5 \text{ ha}$$

Das entspricht 10,5 ha/MW

**Tabelle 21 - Flächeninhalt einer Ellipse mit Rotordurchmesser der Vestas V-112; eigene Berechnung**

Somit wird pro Windenergieanlage des Typs Vestas V-112 eine Fläche von 31,5 ha benötigt. Dividiert durch die Nennleistung ergeben sich 10,5 ha/MW (0,105 km<sup>2</sup>/MW).

Um die Installierbare Leistung von Baden-Württemberg zu berechnen, werden die Potenzialflächen mit den Windgeschwindigkeitsklassen der einzelnen ausgewiesenen Flächen herangezogen und mit der Turbinendichte von 9,52 MW/km<sup>2</sup> multipliziert. Die Potenzialflächen gilt es nun näher zu betrachten, d.h. es findet eine prozentuale Verteilung für die Eignung jeder Potenzialfläche statt, wie in „2.2.3 Standort“ sind hierbei Faktoren wie beispielsweise die Erschließbarkeit von Relevanz. Die Potenzialflächen werden darauf mit einer prozentualen Verteilung multipliziert und eine neue kleinere Fläche entsteht.

### **Schritt 8: Eignung der Gebietstypen**

In Anlehnung an den Punkt „2.2.3 Standort“ werden drei Kategorien zu Hilfe genommen, die Geländebeziehungen, die Erschließbarkeit und Nutzungskonkurrenz. [55]

- Bei dem Acker- und Gartenland wird eine Verringerung von 20 Prozent festgelegt, aufgrund der Nutzungskonkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion.
- Sowohl Grünland und Heide als auch das „nicht definierbare Gebiet“ weisen eine niedere Nutzungskonkurrenz auf, deshalb wird eine prozentuale Eignung von ca. 95 Prozent angenommen.
- Waldgebiete stellen bei der Erschließung einen größeren Aufwand dar und die Geländebeziehungen werden auch eher „schlecht“ eingestuft, darauf basierend wird eine 60 prozentige Eignung der Fläche angesetzt.

- Sumpf- und Mooregebiete sind durch die geologische Beschaffenheit weniger brauchbar und weisen nach der Flächenermittlung einen zu geringen Flächenanteil auf. Deshalb werden diese nicht weiter betrachtet.

Anhand des Waldgebiets werden die Berechnungen im Schritt 9 demonstriert, die restlichen Ermittlungen des verschiedenen Gebietstypen befinden sich im Anhang, werden hier aber verkürzt dargeboten.

### Schritt 9: Installierbare Leistung bestimmen

<b>Waldgebiet</b>				
<b>Geschwindigkeits- klasse in 140 m Höhe</b>	<b>Potenzial- fläche</b>	<b>Eignung</b>	<b>Turbinen- dichte</b>	<b>installierbare Leistung</b>
<b>[m/s]</b>	<b>[km<sup>2</sup>]</b>	<b>[%]</b>	<b>[MW/km<sup>2</sup>]</b>	<b>[MW]</b>
4,50 – 4,75	42,99	60	9,52	245,56
4,75 – 5,00	117,26	60	9,52	669,79
5,00 – 5,25	293,79	60	9,52	1.678,13
5,25 – 5,50	397,45	60	9,52	2.270,23
5,50 – 5,75	324,32	60	9,52	1.852,52
5,75 – 6,00	213,32	60	9,52	1.218,48
6,00 – 6,25	80,02	60	9,52	457,07
6,25 – 6,50	19,30	60	9,52	110,24
6,50 – 6,75	5,31	60	9,52	30,33
6,75 – 7,00	1,88	60	9,52	10,74
>7,00	1,01	60	9,52	5,77
-	<b>1.496,65</b>	-	-	<b>8.548,86</b>

Tabelle 22 - Installierbare Leistung Waldgebiet; eigene Berechnung in Anlehnung an Gantenbein [55]

### Schritt 10: Feldwirkungsrad bestimmen (Verluste)

Zur Vervollständigung wird nun der Feldwirkungsgradverlust hinzugezogen. Der Feldwirkungsgrad gibt die Berücksichtigung der Abschattungseffekte der Konverter untereinander an, d.h. bei hintereinander stehenden Anlagen kann ein optimales Anströmen der Anlagen verhindert werden und den Energieertrag mindern. Um es sich besser vorstellen zu können, veranschaulicht dies die vorherige Abbildung 41. Laut Quaschnig ist die Berechnung des Feldwirkungsgrades mit einem großen

Aufwand verbunden und kann nur mit gewissen Analysewerkzeugen bestimmt werden. Wenn ein genauer Wert nicht zur Verfügung steht, kann der Feldwirkungsgrad hier grob abgeschätzt werden. Dieser wird mit 90 Prozent angepriesen und so auch übernommen. [61]

### Schritt 11: Berechnung der Energieerträge

In der folgenden Schluss Tabelle 23 sind nun die Geschwindigkeitsklassen in 140 m Höhe, die installierbare Leistung und die Volllaststunden (Schritt 6) aufgeführt. Durch diese lässt sich, unter Einbeziehung des Feldwirkungsgradverlustes, der jährliche Ertrag berechnen.

<b>Waldgebiet</b>				
<b>Geschwindigkeitsklasse in 140 m Höhe</b>	<b>installierbare Leistung</b>	<b>Volllaststunden</b>	<b>Feldwirkungs- grad</b>	<b>Ertrag</b>
<b>[m/s]</b>	<b>[MW]</b>	<b>[h]</b>	<b>[%]</b>	<b>[GWh]</b>
4,50 – 4,75	245,56	1.131,57	90	250,08
4,75 – 5,00	669,79	1.536,38	90	926,15
5,00 – 5,25	1.678,13	1.765,89	90	2.667,05
5,25 – 5,50	2.270,23	2.001,27	90	4.089,01
5,50 – 5,75	1.852,52	2.160,09	90	3.601,45
5,75 – 6,00	1.218,48	2.399,32	90	2.631,17
6,00 – 6,25	457,07	2.637,80	90	1.085,09
6,25 – 6,50	110,24	2.873,65	90	285,11
6,50 – 6,75	30,33	3.105,32	90	84,76
6,75 – 7,00	10,74	3.331,53	90	3,00
>7,00	5,77	5.105,30	90	3,00
<b>∑ Summe</b>	<b>8.548,86</b>			<b>15.625,87</b>

Tabelle 23 - Energieertrag der Vestas V-112 des Gebietstyps Wald; eigene Berechnung nach Gantenbein [55]

In der folgenden Tabelle 24 werden nun die Potenziale zusammengefasst. Die Sumpf- und Mooregebiete werden wie erwähnt, aufgrund der zu kleinen Flächenanteile herausgestrichen.

Gebietstyp	installierbare Leistung	Ertrag
	[MW]	[GWh]
Waldgebiet	8.548,86	15.625,87
Grünland und Heide	1.098,65	2.016,24
Acker- und Gartenland	4.446,99	10.486,58
„nicht definierte Gebiete“	233,15	392,92
<b>∑ Summe</b>	<b>14.327,65</b>	<b>28.521,61</b>

Tabelle 24 - Energieerträge der einzelnen Gebietstypen und Gesamtertrag für BW mit Vestas V-112; eigene Berechnung

Somit ergibt sich ein Ertrag von etwa 28,52 TWh und ca. 1.990 durchschnittlichen Volllaststunden.

#### 4.2.4 Vergleichsstudie

In der Potenzialstudie des Bundesverbands WindEnergie e.V. vom Mai 2011 „Studie zum Potenzial der Windenergienutzung an Land“ wird von einer Standardturbine der drei MW Klasse ausgegangen mit einer Nabenhöhe von 100 m und einem Verhältnis der Rotorfläche zur Generatorleistung von 2,6 m<sup>2</sup>/kW (100 m Rotordurchmesser). Bei nicht Erreichung von 1.600 Volllaststunden wird eine Turbine mit einer Nabenhöhe von 150 m und einem Rotor zu Generator Verhältnis von 3,5 m<sup>2</sup>/kW (115 m Rotordurchmesser) verwendet. Falls beide Anlagen keine 1.600 Volllaststunden erreichen wird an diesem Standort keine Anlage installiert.

Die Abstände der Turbinen werden mit vier Rotordurchmessern bemessen. Aerodynamische Verluste werden berücksichtigt in Form einer Minderung des Ertrags um zehn Prozent. Die technische Nichtverfügbarkeit wird mit einem drei prozentigen Abzug mit einberechnet.

Baden-Württemberg weist bei der Flächenermittlung 7.500 km<sup>2</sup> als nutzbar aus. Hierbei handelt es sich um restriktionslose Flächen, nutzbarer Wald ohne Schutzgebiet und nutzbare Schutzgebiete. Den größten Anteil weisen die nutzbaren Schutzgebiete auf. Die nächste Abbildung 42 verdeutlicht dies.

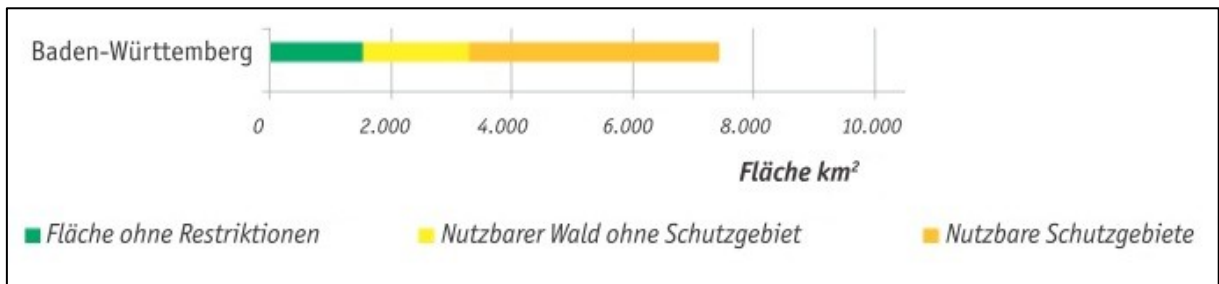


Abbildung 42 – Nutzbare Fläche in km<sup>2</sup> nach Bundesland; eigene Darstellung [16]

Es wird davon ausgegangen, dass nicht alle theoretisch ermittelten nutzbaren Flächen genutzt werden können, Punkte wie:

- Besitzfragen
- Einzelgebäude
- Störungen des Bundeswehrradars
- Seltene Tierarten
- Einzelfallentscheidungen

Deshalb wird davon ausgegangen, dass nur zwei Prozent der Bundesfläche für die Windenergie genutzt werden kann.

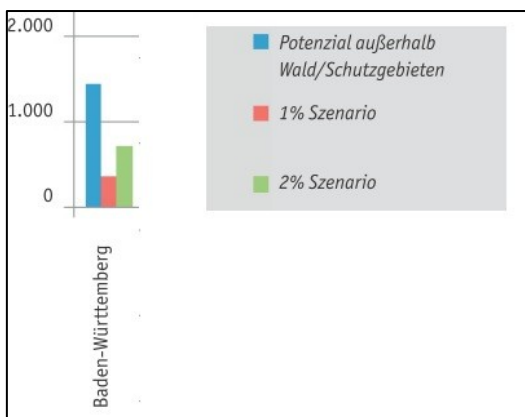


Abbildung 43 - Nutzbare Flächen in den Bundesländern für verschieden Szenarien in km<sup>2</sup>; eigene Darstellung [16]

Bei der Nutzung von einem Prozent der Fläche wurden ein Ertrag von 23 TWh und 1.953 Volllaststunden ermittelt. Bei zwei Prozent der Landesfläche 45 TWh. [16]

## 4.2.4 Ausblick

Im Vergleich zu der Studie ist eine weniger große Fläche als nutzbar ausgewiesen, damit einhergehend ein niedrigerer Ertrag. Wobei die Vorgehensweise in bestimmten Punkten anders ist und sich die jeweiligen Ausschlussflächen unterscheiden und keine spezifische Eignung der jeweiligen Potenzialflächen stattfand.

Nach statistischem Landesamt Baden-Württemberg lag die Bruttostromerzeugung bei 0,541 TWh (vorläufig). <sup>[46]</sup> Das Potenzial wird bis 2020 auf 6,5 TWh (10 Prozent Ziel) abgeschätzt und als Potenzialgrenze werden, laut des ZSW, 20,2 TWh bis 2050 ausgewiesen. <sup>[5]</sup> In Anbetracht des technischen Potenzials und der Vergleichsstudie und unter Vorraussetzung, dass die Potenziale erschließbar sind, wäre dies möglich.

## 4.3 Wasserkraft

Bei der Wasserkraft wird zu Anfang der Potenzialbegriff definiert und zu Schluss die sich ergebenden Potenziale in Baden-Württemberg.

### 4.3.1 Potenzialbegriff

Um Potenziale zu ermitteln, wird das Linienpotenzial herangezogen, darauf aufbauend das technische Potenzial.

Das **Linienpotenzial** (Abflusslinienpotenzial), zeigt die Arbeit, die durchschnittlich im Verlauf eines Jahres an dem Gewässer durch die Nutzung der Wasserkraft erfolgen kann. Das Linienpotenzial legt das Produkt aus Gefälle und Abfluss fest, ohne Berücksichtigung von Verlusten jeglicher Art. [26]

Das **Technisches Potenzial**, aufbauend auf dem Linienpotenzial werden dem technisch nutzbaren Potenzial weitere Faktoren hinzugefügt. Es gibt eine Zusammenfassung aller möglichen Wasserkraftstandorte eines Flusslaufs wieder. Hierbei gehen Informationen unter Zugrundelegung des aktuellen technischen Standes für den Standort vorgesehene Technik und unter Berücksichtigung den geltenden gesetzlichen Rahmenbedingungen ein. Zudem beinhaltet dies die ökologischen Randbedingungen. [23]

### 4.3.2 Potenziale der Wasserkraft in Baden-Württemberg

Laut des ZSW gelten die Potenziale des Rheins als weitgehend erschlossen. An dem Neckar, der Jagst und der Donau sind Kleinanlagen möglich. [5] Als Beispiel dient hierzu die nachfolgende Studie:

Im Rahmen der Potenzialermittlung wird die Studie vom Mai 2011 „Ausbaupotenzial der Wasserkraft bis 1.000 kW im Einzugsgebiet des Neckars unter Berücksichtigung ökologischer Bewirtschaftungsziele ohne Bundeswehrstraße Neckar“ hinzugezogen. Der Auftraggeber dieser Studie ist das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. Die Bearbeitung erfolgte durch die Fichtner GmbH & Co. KG, das Büro Gewässer & Fisch und das Büro am Fluss. [72]

In der Potenzialstudie wurde das Ausbaupotenzial an bereits genutzten Wasserkraftstandorten abgeschätzt und das Neubaupotenzial an noch nicht genutzten Querbauwerken ermittelt.

Untersucht wurden diese jeweils in zwei Szenarien:

- Das technisch-ökonomisch-ökologische Potenzial unter Berücksichtigung der Orientierungswerte des Wasserkrafterlasses Baden-Württembergs.
- Das technisch-ökonomisch-ökologische Potenzial unter Berücksichtigung spezifischer ökologischer Abflüsse gemäß Wasserkrafterlass Baden-Württemberg.

Theoretische Linienpotenziale sind nicht ermittelt worden.

Die Potenziale mussten mindestens 8 kW aufweisen, was einer Fallhöhe von in etwa einem Meter entspricht, bei einem Abfluss von 1 m<sup>3</sup>/s.

Der folgende Auszug zeigt das betrachtete Neckareinzugsgebiet, welches rot umrahmt ist.



Abbildung 44 – Neckareinzugsgebiet Baden-Württemberg [53]



Um einen Überblick der derzeitig installierten Wasserkraftanlagen zu bekommen, werde diese in der Abbildung 45 dargestellt.

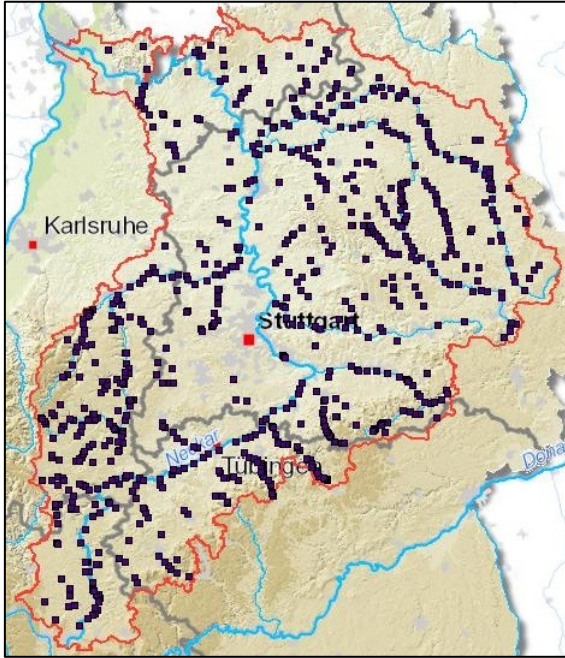


Abbildung 45 – Neckareinzugsgebiet, bestehende Wasserkraftanlagen [53]

In dieser Abbildung sind die Neubaupotenziale der nicht genutzten Querbauwerke (links) und das Ausbaupotenzial bestehender Wasserkraftstandorte (rechts) dargestellt.

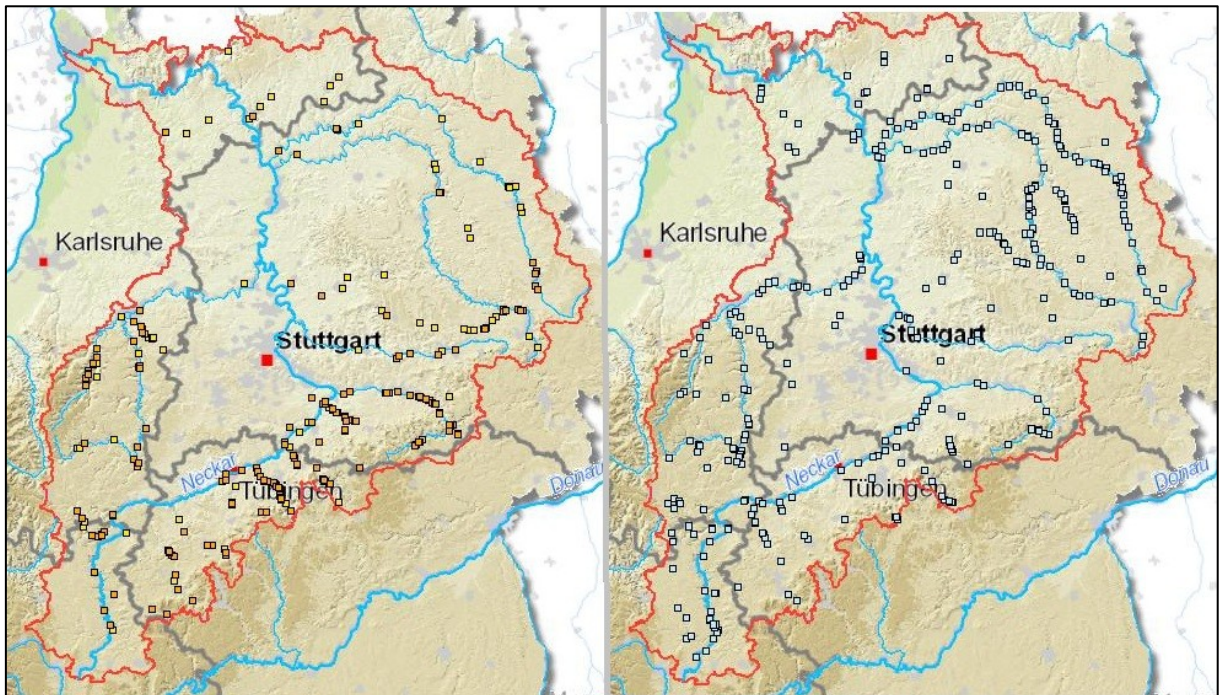


Abbildung 46 - Neckareinzugsgebiet, Neubau Wehre und Sohlenbauwerke mit Ausbau Wasserkraftanlagen [53]

Bei der Ermittlung des Ausbaupotenzials wurden 1.473 Standorte berücksichtigt. Davon werden 787 Standorte bereits zur Wasserkrafterzeugung genutzt, zudem 347 Regulationsbauwerke ohne zugeordnete Wasserkraftanlagen als auch 339 Sohlenbauwerke mit einem theoretischen Potenzial von mindestens 8 kW.

Neubaupotenziale für eine Wasserkraftanlage wurden an 600 Standorte erwogen. An 626 Standorten ein Ausbau der gegenwärtigen Nutzung. An 247 Standorten wurden keine Potenziale ermittelt.

Im Einzugsgebiet des Neckars ohne Bundeswehrstraße Neckar in Baden-Württemberg ergibt sich ein theoretisches Gesamtpotenzial von 98,4 MW, dies beinhaltet ein technisches Potenzial von 32,7 MW. Aufgrund von der Lage in FFH-Gebieten unterliegen ca. 14 MW ökologischen Restriktionen.

Im **Szenario 1** ergibt sich ein technisch-ökonomisch-ökologisches Ausbaupotenzial von 27,4 MW bzw. 120,7 GWh zusätzliches Regelarbeitsvermögen. 51,3 GWh sind Standorten zugeordnet, die in FFH-Gebieten liegen und gegebenenfalls mit strengeren ökologischen Auflagen bergen. Aus ökonomischer Sicht sind zwölf Standorte attraktiv, was mit einem Potenzial von 9,6 GWh einhergeht.

Im **Szenario 2** ergibt sich ein technisch-ökonomisch-ökologisches Ausbaupotenzial von 25,05 MW bzw. 103,3 GWh zusätzliches Regelarbeitsvermögen. 44 GWh sind Standorten zugeordnet, die in FFH-Gebieten liegen und gegebenenfalls mit strengeren ökologischen Auflagen bergen. Aus ökonomischer Sicht sind sieben Standorte attraktiv, was mit einem Potenzial von 2,8 GWh einhergeht. [72]

### 4.3.3 Ausblick

Das statistische Landesamt Baden-Württemberg weist im Jahr 2010 eine vorläufige Bruttostromerzeugung von 5,132 TWh aus. [46] Das Potenzial wird laut des ZSW bis 2020 auf 5,5 TWh abgeschätzt und bis 2050 auf 6,4 TWh. [54] Wie in dieser Studie untersucht kann davon ausgegangen werden, dass sich der Ausbau auf Kleinanlagen beschränken wird und sich eventuelle Modernisierungsmaßnahmen bei älteren Anlagen ergeben. Diese werden laut des ZSW am Neckar, der Jagst und der Donau gesehen. Die prognostizierten Werte sind demnach als umsetzbar zu betrachten. [5]

## 4.4 Bioenergie

Zu Anfang wird das theoretische Potenzial der Landwirtschafts- und Waldfläche ermittelt. Darauffolgend werden die stromerzeugenden Potenziale in drei verschiedenen Kategorien untersucht, welche allesamt in Kraft-Wärme-Kopplung verstromt werden. Darauf basierend werden im nächsten Punkt die ermittelten Potenziale zusammengefasst dargestellt. Im späteren Verlauf wird eine Gegenüberstellung mit dem Biomasseaktionsplan 2010 vollzogen. Am Ende wird anhand der Ergebnisse und Erkenntnisse ein Ausblick getroffen.

### 4.4.1 Theoretisches Potenzial

Um eine Abschätzung des theoretischen Potenzials der Biomasse zu erhalten werden dafür die Hauptkomponenten, d.h. die **Landwirtschafts- und Waldfläche**, berücksichtigt. Unter der Annahme, dass ca. 0,3 Prozent der eintreffenden Solareinstrahlung in chemisch gebundene Energie (Biomasse) umgewandelt wird. [34]

Nach den Zahlen des statistischen Landesamtes Baden-Württemberg hat Baden-Württemberg eine Landwirtschaftsfläche von  $1.641.968 \cdot 10^4 \text{ m}^2$  und eine Waldfläche von  $1.367.585 \cdot 10^4 \text{ m}^2$ . Hier wird wieder der etwaige Mittelwert der solaren Einstrahlung angenommen. Dieser beträgt  $1.121 \text{ [kWh/m}^2\text{]}$ . [50]

#### Theoretisches Potenzial im Jahr:

[Jährliche Bestrahlung:  $1121 \text{ kWh/m}^2 \cdot 0,3 \%$ ] \* [Fläche Landwirtschaft:  $1641968 \cdot 10^4 \text{ m}^2$  + Fläche Wald:  $1367585 \cdot 10^4 \text{ m}^2$ ]  $\approx 1 \cdot 10^{11} \text{ kWh}$

Tabelle 25 - Theoretisches Potenzial Bioenergie; eigene Berechnung nach Quaschnig [34]

Die Biomasse bietet im Jahr ein theoretisches Potenzial von etwa 100 TWh.

## 4.4.2 Reststoffe aus Land- und Forstwirtschaft

Bei den Reststoffen aus Land- und Forstwirtschaft werden die tierischen Exkremamente, das Waldrestholz und das Grünland untersucht.

### Tierische Exkremamente

Um das stromerzeugende Biomassepotenzial der tierischen Exkremamente abzuschätzen, bedarf es Daten des statistischen Landesamtes Baden-Württemberg. Hierbei werden die Tierbestände in Großvieheinheiten umgerechnet. Als Basis dient hierzu ein 500 kg Rind, welches einer Großvieheinheit entspricht. In der folgenden Tabelle sind die einzelnen Tierarten aufgeführt.

Tierart	Viehbestand 2010	Großvieheinheit pro Vieh	Großvieheinheit
Schweine	2.132.799	0,2	426.560
Rinder	1.027.469	0,7	821.975
<b>∑ Summe</b>	<b>3.160.268</b>	<b>-</b>	<b>1.248.535</b>

Tabelle 26 - Großviehbestand 2010 und Großvieheinheiten in BW; eigene Berechnung in Anlehnung an Energieagentur Lippe [63]

Die Nutzung bezieht sich auf den Anteil, der für die Düngung der Felder dienen soll, d.h. unter Annahme, dass 40 Prozent für die Vergasung bereitgestellt werden. Die Gasausbeute wird ebenso angenommen. Bei einer Großvieheinheit Schwein und einem Rind werden ca. 450 m<sup>3</sup>/a produziert, das entspricht ca. 1,23 m<sup>3</sup>/d. Biogas weist im Schnitt einen Heizwert von ca. 6 kWh/m<sup>3</sup> (60 prozentiger Methananteil) auf.

[64]

Tierart	Großvieheinheit	Nutzung [%]	Biogasertrag im Jahr [m <sup>3</sup> /a]	Energiepotenzial im Jahr [kWh/a]
Schweine	426.560	40	76.780.800	460.684.800
Rinder	821.975	40	147.955.500	887.733.000
<b>∑ Summe</b>	<b>1.248.535</b>	<b>-</b>	<b>224.736.300</b>	<b>1.348.417.800</b>

Tabelle 27 - Jährlicher Biogasertrag und Energiepotenzial aus dem Viehbestand; eigene Berechnung in Anlehnung an Energieagentur Lippe [63]

Da sich die Berechnungen nur auf Strom beziehen, wird ein elektrischer Wirkungsgrad von 38 Prozent des Energiepotenzials berücksichtigt. Der elektrische Prozessenergiebedarf wird mit 8 Prozent angesetzt. [62] Somit ergibt sich ein stromerzeugen-

des Energiepotenzial über ein BHKW von in etwa 0,47 TWh/a in Baden-Württemberg.

### Waldrestholz und Grünland

Potenziale des Waldes in Form von **Waldrestholz** dürfen zudem nicht unberücksichtigt bleiben. Die Flächenanteile des Waldes von Baden-Württemberg werden wieder in einem GIS Programm dargestellt, dieser weist eine Fläche von 14.517 km<sup>2</sup> auf. Abzüglich der Naturschutzgebiete, Landschaftsschutzbestandteile, Naturdenkmale, FFH-Gebiete wird eine neue nutzbare Waldfläche erhalten, diese hat eine Fläche von 7.256 km<sup>2</sup>. [27]

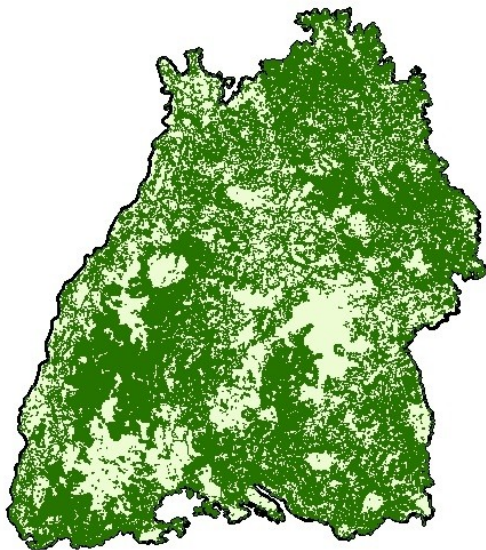


Abbildung 47 - Waldfläche BW abzgl. Schutzgebiete; eigene Darstellung aus RIPS und DLM-25-BW [50]

Des Weiteren wird ein Energiefaktor eingesetzt, dieser gibt an, wie viel Energie auf einem Hektar Fläche pro Jahr gewonnen werden kann. Bei dem untersuchten Waldrestholz beläuft er sich auf 5 MWh/ha im Jahr. [27]

Das Waldökosystem funktioniert nach dem Prinzip des geschlossenen Nährstoffkreislaufs. Da es häufig vorkommt, dass mit dem Restholz anhängendes Reisig oder Laub mit entnommen wird, werden automatisch potenzielle Nährstoffe des Waldes entzogen. Dadurch kann es zur Mangelversorgung und nachfolgenden Mindererträgen führen. Deswegen wird eine Flächennutzung von 80 Prozent bestimmt. Des Weiteren wird für die Verstromung 25 Prozent festgelegt. [27]

Somit ergibt sich folgende Formel:

**Strom Potenzial im Jahr:**

$$P_{\text{Bio}} = [(Nutzbare\ Fläche * \text{Energiefaktor}) * \text{Flächennutzung}] * \text{Stromfaktor}$$

$$P_{\text{Bio}} = [(725.700\ \text{ha} * 5\ \text{MWh}/(\text{ha} * \text{a})) * 80\ %] * 25\ %$$

$$P_{\text{Bio}} = 725.700\ \text{MWh/a}$$

Tabelle 28 - Strompotenzial Waldrestholz; eigene Berechnung nach Klärle et al. [27]

Demnach ist bei Waldrestholz ein jährliches stromerzeugendes Potenzial von 0,73 TWh zu erzielen.

Im **Grünland** ergeben sich Potenziale die nachfolgend dargelegt sind. Das Grünland hat einer Fläche von 6.047 km<sup>2</sup>. Abzüglich der Naturschutzgebiete, Landschaftsschutzbestandteile, Naturdenkmale, FFH-Gebiete wird eine neue nutzbare Grünlandfläche erhalten, diese hat eine Fläche von 3.528 km<sup>2</sup>, davon sind 7,29 km<sup>2</sup> Laub- und Nadelholz, 36,64 km<sup>2</sup> Laubholz, 0,9 km<sup>2</sup> Nadelholz, 40,4 km<sup>2</sup> Büsche und Sträube und eine nicht definierte Fläche von 3.442,75 km<sup>2</sup>. Die nicht definierte Fläche wird als reines Grünland angenommen. [27]

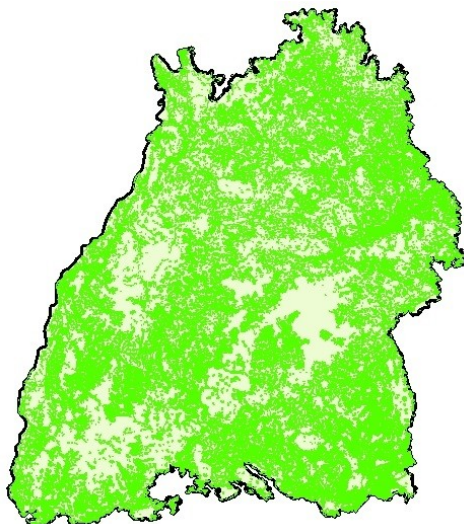


Abbildung 48 - Grünlandfläche BW abzgl. Schutzgebiete; eigene Darstellung aus RIPS und DLM-25-BW [50]

Zudem wird ein Energiefaktor eingesetzt, dieser gibt an, wie viel Energie auf einem Hektar Fläche pro Jahr gewonnen werden kann. Da die Energieerträge der Pflanzen (Wiesen, Rasen, usw.) stark variieren wird bei dem untersuchten Grünland ein Durchschnittswert von 30 MWh/a festgelegt. Da dieses Grünland auch als Grundfutterquelle für Nutztiere dient, werden lediglich 50 Prozent der Grünlandfläche berücksichtigt. [27]

#### Strom Potenzial im Jahr:

$$P_{\text{Bio}} = [( \text{Nutzbare Fläche} * \text{Energiefaktor} ) * \text{Flächennutzung}] * \text{Stromfaktor}$$

$$P_{\text{Bio}} = [(172.137,5 \text{ ha} * 30 \text{ MWh}/(\text{ha} * \text{a}) ) * 50 \%] * 25 \%$$

$$P_{\text{Bio}} = 645.516 \text{ MWh/a}$$

Tabelle 29 - Strompotenzial Grünlandfläche; eigene Berechnung nach Klärle et al. [27]

Infolgedessen ist ein Strompotenzial von 0,65 TWh pro Jahr zu erzielen.

### 4.4.3 Anbaubiomasse (Silomais)

Um geeignete **Energiepflanzen** zur Erzeugung von Biogas zu ermitteln, ist das Potenzial zur Bildung von Biomasse bei gegebenen Klima- und Standortbedingungen abhängig. Hierfür ist in den mitteleuropäischen Klimaverhältnissen Silomais geeignet. Als C4-Pflanze ist Mais in der Lage, die eingestrahlte Lichtenergie sehr gut auszunutzen, unter den Rahmenbedingungen einer günstigen Temperatur. Der Methan-gehalt des Biogases ist entscheidend, welcher die Qualität des Gasgemischs bestimmt, dieser wird von den vorliegenden Anteilen an Eiweißen, Kohlenhydraten und Fetten in den Gärstoffen beeinflusst. Zudem liegt Mais an der Spitze der Ertragsleistungen. [65] Zusammengefasst ist Silomais als Energiepflanze besonders prädestiniert. Das statistische Landesamt Baden-Württemberg weist eine Ackerlandfläche (2011) von 831.600 ha aus, darunter den Anbau von Silomais mit 107.700 ha, das entspricht knapp 13 Prozent der Ackerlandfläche, mit einem Ernteertrag von 48,48  $t_{\text{FM}}/(\text{ha} * \text{a})$ . [46] Der spezifische Gasertrag beläuft sich auf 660  $\text{m}^3/\text{t}(\text{oTS})$  und der Heizwert des Biogases beläuft sich auf 6  $\text{kWh}/\text{m}^3$ . Da der Mais auch als Futter für Wiederkäuer dient, werden nur 40 Prozent zur Nutzung von Biogas berücksichtigt. [66]



Spezifische Erträge		
FM-Ertrag	$t_{FM}/(ha*a)$	48,48
Trockensubstanzgehalt	% TS	33
TM-Ertrag	$t_{TM}/(ha*a)$	16
oTS-Gehalt	% oTS	96
oTS-Ertrag	$t_{oTS}/(ha*a)$	15,36
Gesamtertrag und Energiepotenzial (107.700 * 40 %)		
Gesamtertrag	$t_{oTS}/a$	661.708,8
Spezifischer Gasertrag	$m^3/t_{oTS}$	660
Gesamter Gasertrag	$m^3/a$	436.727.808
Heizwert Biogas	$kWh/m^3$	6
Energiepotenzial	$kWh/a$	2.620.366.848

Tabelle 30 - Gasertrag und Energiepotenzial Silomais; eigene Berechnung nach Fahl et al. [62]

Strombereitstellungspotenzial Silomais in Biogasanlagen		
elektr. Wirkungsgrad	%	38
elektr. Prozessenergiebedarf	%	8
<b>Strompotenzial über (BHKW)</b>	<b>TWh/a</b>	<b>0,92</b>

Tabelle 31 - Strompotenzial Silomais; eigene Berechnung nach Fahl et al. [62]

#### 4.4.4 Biogene Rest- und Abfallstoffe

Bei den biogenen Rest- und Abfallstoffen werden die Haushaltsbioabfälle, das Altholz und das Deponiegas untersucht.

##### Bioabfälle

Weitere Potenziale ergeben sich bei den organischen Abfällen wie Bio- und Grünabfälle unter der Kategorie Haushaltsabfälle, diese können ebenso in Biogasanlagen mittels BHKW verstromt werden. Das statistische Landesamt gibt im Jahr 2010 ein Gesamtaufkommen beider von 1.294.900 Tonnen an. Das Bioabfallaufkommen wird mit 40 kg pro Einwohner angegeben, mit dem Vermerk, dass es sich um keine ganzjährige bzw. flächendeckende Erfassung handelt. Das Gesamtaufkommen von Bioabfällen beträgt 439.600 Tonnen. Die energetische Verwertung der Bio- und Grünabfälle wird nicht getrennt aufgezeigt und beträgt insgesamt 191.300 Tonnen, der überwiegende Teil von 1.103.400 Tonnen wird als „zur Verwertung“ und „zu sonstiger Behandlung“ ausgegeben. Bei einem prozentualen Vergleich des Gesamtaufkommens der Bio- und Grünabfälle ergeben sich für die Bioabfälle einen in etwa 33 prozentigen Anteil. Dieser prozentuale Anteil wird auf die energetische Verwertung übernommen, so dass 63.129 Tonnen Bioabfall zur energetischen Verwertung bereitstehen. [46]

Der Biogasertrag wird mit  $100 \text{ m}^3/\text{t}_{\text{FM}}$  angenommen und dadurch ergibt sich eine Biogasausbeute von  $6.321.900 \text{ m}^3$ . Der Heizwert liegt bei  $6 \text{ kWh}/\text{m}^3$  und der elektrische Wirkungsgrad des BHKW's wird wieder mit 38 Prozent angesetzt. Der elektrische Prozessenergiebedarf wird wieder mit 8 Prozent angenommen. [62] Dadurch werden  $0,013 \text{ TWh}/\text{a}$  bereitgestellt.

Bei der Annahme, dass von dem Gesamtaufkommen der Bioabfälle 80 Prozent energetisch verwertet werden in Form einer Biogasanlage mittels eines BHKW's, wäre eine potenzielle Strombereitstellung von  $0,074 \text{ TWh}/\text{a}$  zu erzielen.

## Altholz

Das anfallende Altholz gilt es ebenfalls zu betrachten. Im Jahr 2008 war in Baden-Württemberg ein Altholzaufkommen von 865.000 Tonnen. Die energetische Verwertung belief sich auf 78 Prozent. [66] Bei einer Annahme des Wassergehalts von 13 Gew. Prozent ergeben sich hieraus 586.989 t<sub>atro</sub>/a. [62] Um es übersichtlicher zu gestalten werden die Werte und Berechnungen tabellarisch aufgeführt.

Altholz		
Altholzaufkommen (2008)	t/a	865.000
energetische Verwertung (78 %)	t/a	674.700
Wassergehalt	Gew. %	13
absolute Holz trockenmasse	t <sub>atro</sub> /a	586.989
technisch nutzbarer Anteil	%	80
Nutzbares Holz	t <sub>atro</sub> /a	469.591
spezifischer Energiegehalt	GJ/t	18,5
Nutzbares Energiepotenzial	GJ/a	8.687.434
Strombereitstellungspotenzial in KWK-Anlagen		
Nutzungsgrad KWK-Anlagen	%	65
elektrischer Wirkungsgrad	%	35
<b>Strombereitstellungspotenzial über KWK-Anlagen</b>	<b>TWh/a</b>	<b>0,55</b>

Tabelle 32 - Strompotenzial Altholz; eigene Berechnung nach Fahl et al. [62]

## Deponiegas

Das Deponiegas vom Jahr 2010 weist laut statistischen Landesamts Baden-Württemberg 70 Deponien mit einem Gasaufkommen von 54.091.400 m<sup>3</sup> aus. Bei Betrachtung der Vorjahreszahlen ist eine erhebliche Minderung des Deponiegas im Laufe der letzten 15 Jahre von statten gegangen. Im Jahr 1996 wurde mit 60 Anlagen, dass 3-fache an Deponiegas produziert. Der Eigenverbrauch lag 2010 bei 21.804.600 m<sup>3</sup> und die Abfackelung des Gases bei 9.327.200 m<sup>3</sup>, Somit ergibt sich eine Abgabe von 22.959.600 m<sup>3</sup>. [46]

Aus einem m<sup>3</sup> Deponiegas, unter Voraussetzung eines 50-prozentigen Methananteils, werden 5 kWh Energie gewonnen. [67] Der elektrische Wirkungsgrad des BHKW's wird mit 38 Prozent angesetzt. Der elektrische Prozessenergiebedarf wird wieder mit acht Prozent angenommen. Folglich werden 0,04 TWh/a Strom bereitgestellt.

#### 4.4.5 Zusammenfassung

Die einzelnen untersuchten Arten, werden in der folgenden Abbildung zusammengefasst.

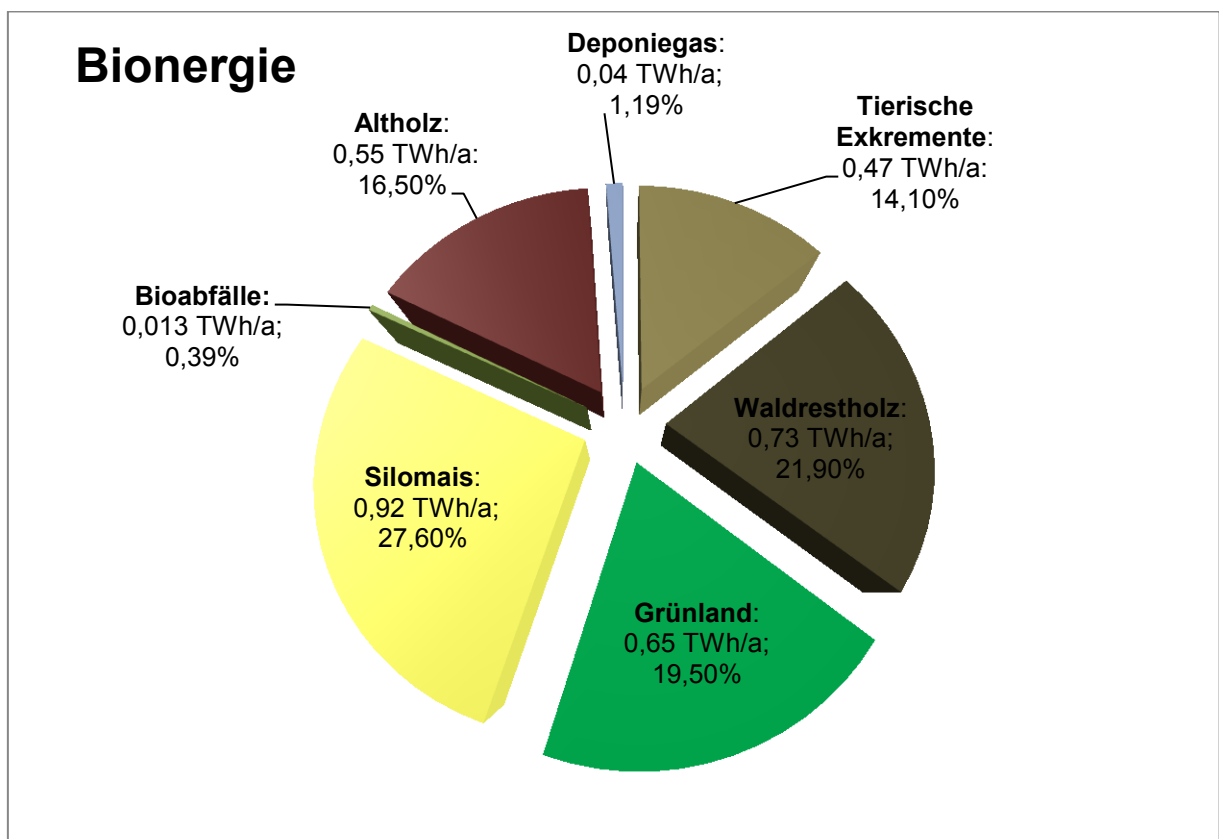


Tabelle 33 - Zusammenfassung der untersuchten Bioenergiepotenziale

Summa Summarum ergibt sich bei den untersuchten Potenzialen eine Stromerzeugung von 3,373 TWh/a. Im folgenden Punkt „Vergleich Biomasseaktionsplan Januar 2010“ werden die eigenen Ermittlungen des Energiepotenzials und die des Biomasseaktionsplans gegenübergestellt. Bei der ermittelten Stromausbeute ist zu berücksichtigen, dass diese immer in Kraft-Wärme-Kopplung berechnet und nicht alle Gebiete untersucht wurden, deshalb ist die Ausbeute geringer als die Bruttostromerzeugung.

gung der Bioenergie im Jahr 2010. Diese beträgt nach statistischem Landesamt Baden-Württemberg vorläufig 3,402 TWh. [46]

#### 4.4.6 Vergleich Biomasseaktionsplan Januar 2010

Die technischen Potenziale des Biomasseaktionsplans in der Tabelle 34 beinhalten Restriktionen für anderweitige vorrangige Nutzungen. Beispielsweise sind bei dem Waldrestholz nur die Mengen bei einer nachhaltigen Bewirtschaftung dargestellt. Das Dauergrünland stellt die Potenziale, unter Berücksichtigung der rückläufigen Tierzahlen, welches mit einer Minderung der Nahrungsnutzung einhergeht, dar. [68]

Herkunft	Biomassefraktion	Technisches Potenzial [PJ/a]	Potenziale unter eigenen Annahmen [PJ/a]
<b>Reststoffe aus Land- und Forstwirtschaft, Natur, Freiflächen</b>	Wald- und Schwachholz, Waldrestholz	30 – 50	13,6 (Waldrestholz)
	Stroh	11 – 16	
	Dauergrünland	12 – 15	9,3
	Landschaftspflege, Naturschutz, Siedlungen, Straßen	9 – 22	
	Tierische Exkrememente	6 – 12	4,85
	Landwirtschaftliche Reststoffe aus Verarbeitung	2	
<b>Anbaubiomasse</b>	Energiepflanzen, nachwachsende Rohstoffe	14 – 34	9,43 (Silomais)
<b>Biogene Rest- und Abfallstoffe aus Siedlung, Gewerbe und Industrie</b>	Industrieholz, Sägennebenprodukte	7 – 17	
	Alt- und Gebrauchtholz	13	8,7
	Papierschlämme	3	
	Klärschlamm	3	
	Biogener Anteil Müll	8	
	Biomüll	2	0,13 (Haushaltsabfälle)

	Grünabfälle	5	
	Klärgas	2 – 3	
	Deponiegas	1	0,41
<b>Σ Summe</b>		<b>128 - 206</b>	<b>46,62</b>

Tabelle 34 - Technische Potenziale für eine energetische Nutzung verfügbarer Energieträger in BW im Vergleich mit eigenen Annahmen; eigene Darstellung nach Biomasseaktionsplan [68]

Bei der Gegenüberstellung in Tabelle 34 gilt es zu beachten, dass die Berechnungsverfahren und die Annahmen in dieser Arbeit verschieden durchgeführt wurden. Folglich ist ein direkter Vergleich eher fraglich.

Um die Tabelle 34 ein wenig transparenter dazustellen, wird ein Auszug des Biomasseaktionsplans 2010 hinzugezogen. Dieser zeigt die energetisch genutzten (dunklen Balken) Potenziale und welche noch nicht genutzt (helle Balken) sind. Die gestrichelten Linienbalken veranschaulichen, dass das Holz aus der Forstwirtschaft, die Energiepflanzen und der Import vorstellbare höhere Potenziale bergen.

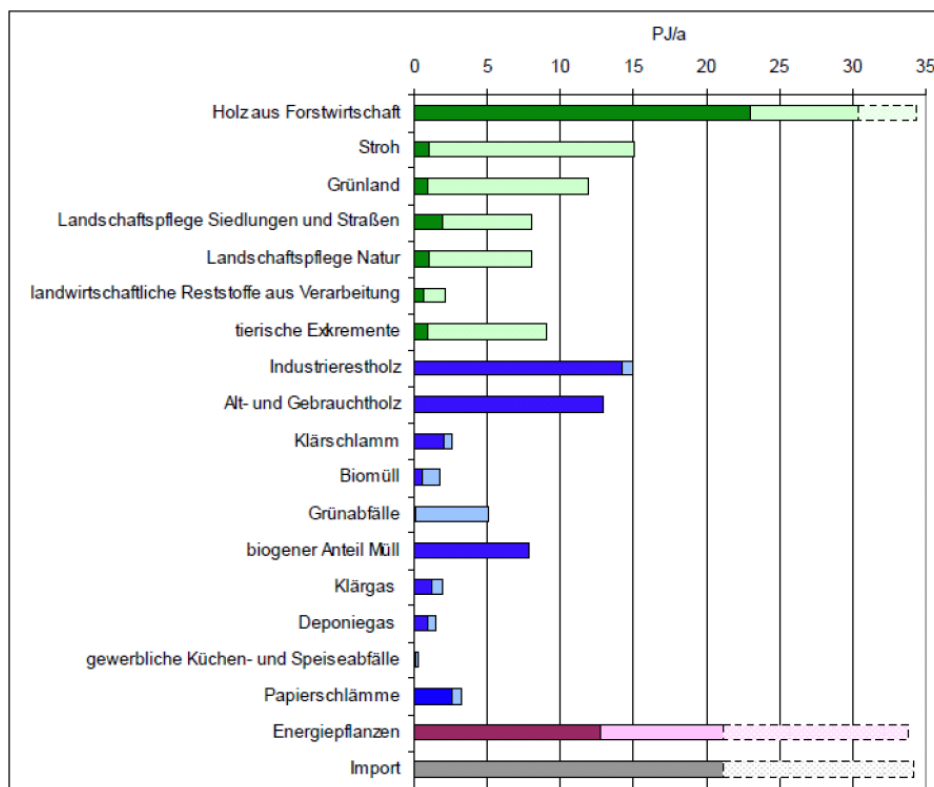


Abbildung 49 - Genutzte und freie Potenziale der energetisch nutzbaren Biomassefraktion [68]

Der größte energetische Betrag wird im Wärmesektor erbracht. Hierbei werden vor allem feste Biogene Brennstoffe, hauptsächlich Holz, für die Wärmeerzeugung eingesetzt. [68]

Bei der Stromerzeugung gewinnen neben festen biogenen Brennstoffen, hauptsächlich Alt- und Gebrauchtholz, ansteigend Biogas und biogene flüssige Rohstoffe an Essenzen. Die Rohstoffe zur Biogaserzeugung stammen vollständig aus Baden-Württemberg, dem entgegen sind sowohl die flüssigen Brenn- und Treibstoffe als auch die Rohstoffe zu ihrer Herstellung zu großen Teilen aus anderen Bundesländern wie auch aus dem Ausland. [68]

Wie in den Berechnungen schon eingegangen wurde, spielt die Nutzungskonkurrenz der einzelnen Energieträger bei der Bioenergie die größte Rolle. Bei den land- bzw. forstwirtschaftlichen genutzten Flächen sind es zum Beispiel:

- Anbau von Nahrungs- und Futtermitteln auf landwirtschaftlich genutzten Flächen,
- stoffliche Nutzung des Waldholzes (z.B. Bau- und Möbelholz, Papier, usw.) und die energetische Nutzung des Waldrestholzes auf der forstwirtschaftlichen genutzten Fläche,
- der Anbau von nachwachsenden Rohstoffen auf der landwirtschaftlichen Fläche zur stofflichen Nutzung (z.B. Pflanzen für chemische Industrie, Heilpflanzen, Öle),
- Energiepflanzenanbau,
- Flächenbedarf für Land- und Naturschutz. [68]

#### 4.4.7 Ausblick

Um das stromerzeugende Potenzial der Bioenergie zu quantifizieren, wird nach dem ZSW das stromerzeugende Potenzial auf 4,7 TWh bis 2020 abgeschätzt, bis 2050 werden 7,1 TWh prognostiziert. Aufgrund der sich ergebenden Potenziale ist dies als durchführbar anzusehen. [5], [54]

## 4.5 Geothermie

Bei Betrachtung der Tiefengeothermie in Baden-Württemberg ergeben sich Potenziale im Oberrheingraben (schwarze Ellipse links) und süddeutschen Molassebecken (schwarze Ellipse rechts), durch das im Untergrund befindliche Heißwasser eröffnet sich der Weg zur Stromerzeugung. [36]

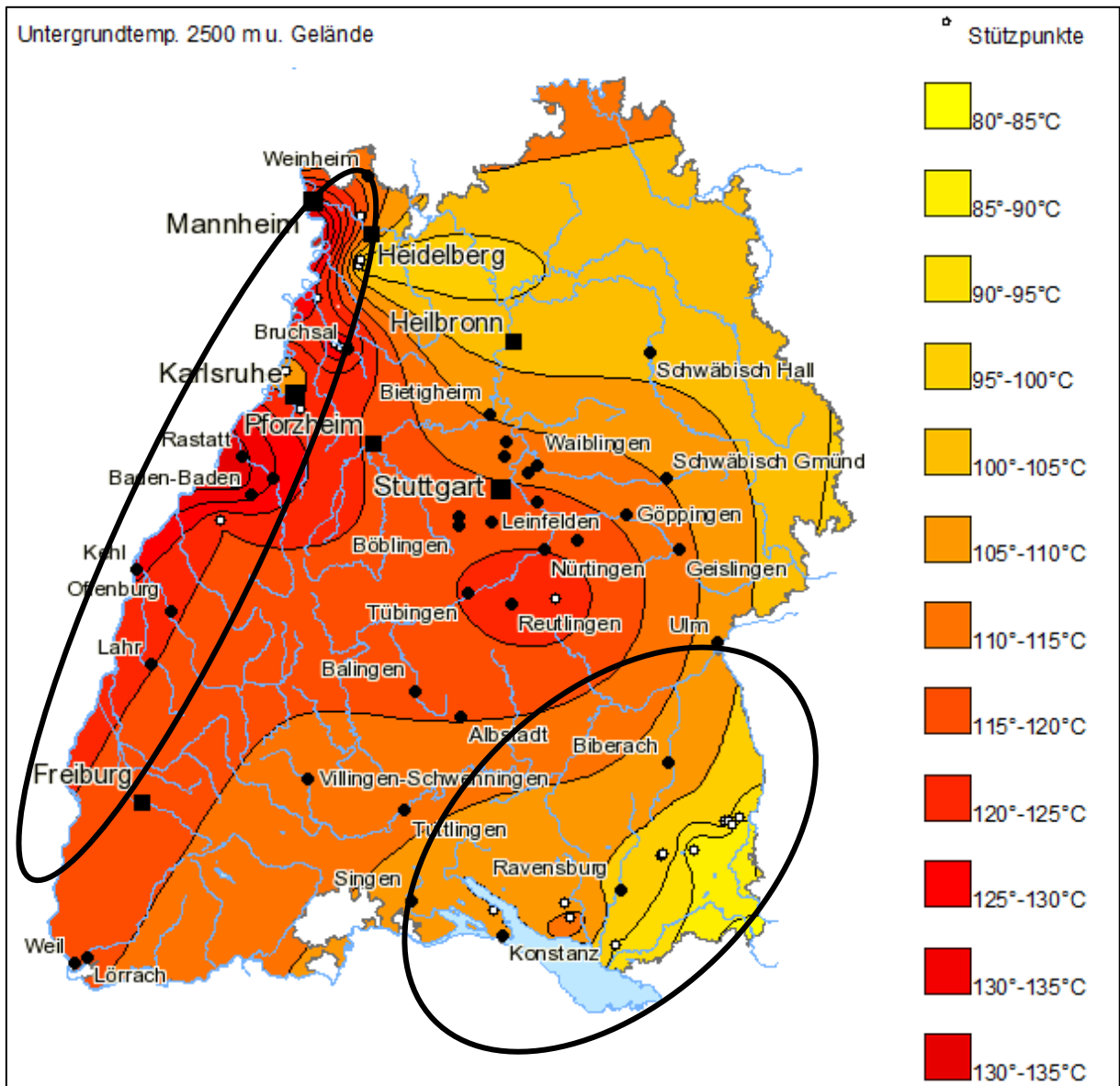


Abbildung 50 - Untergrundtemperaturen in 2.500 m unter Gelände [69]

Die Konstruktion der Karte erfolgte mit einem Interpolationsverfahren. Es stehen 21 Messwerte für die Karte in 2.500 m Tiefe zur Verfügung, durch Bohrungen mit Temperaturinformationen. In 500 m Tiefe sind es 390 Messwerte. Die Datendichte nimmt



mit der Tiefe deutlich ab, dadurch auch die Aussagekraft und Güte der Karte. [36] Die Bohrungen bzw. vorhandene Messdaten sind als weißer Punkt auf der Karte gekennzeichnet.

Potenziale, in Form von tiefen Grundwasserleitern, die heiße Wässer enthalten und sich deshalb für eine hydrothermale Nutzung eignen, ergeben sich sowohl im Oberrheintalgraben als auch im voralpinen Molassebecken (südöstlich der Donau). Besonders im Oberrheintalgraben werden Grundwasserleiter mit entsprechender Durchlässigkeit und Temperaturen erhofft, die eine Verstromung wirtschaftlich lohnend erscheinen lassen. Jedoch gibt es dort kaum mehr freie Flächen, aufgrund bereits vieler vergebener Konzessionen. [36]

Anlagen zur Nutzung der Tiefengeothermie versorgen ihre Umgebung mit Strom und Wärme, sind deshalb als Energiezentralen anzusehen. Die Nutzung der Tiefengeothermie ist prinzipiell überall möglich, jedoch muss beachtet werden dass bestimmte Voraussetzungen gegeben sein müssen, um eine sinnvolle und nachhaltige Nutzung zu gewährleisten. Eine solche Voraussetzung ist zum Beispiel, dass die ganzjährig anfallende Wärme auch Verwendung findet, was mit einer geeigneten Abnehmerstruktur einhergeht. Dadurch ist das technisch-wirtschaftliche Potenzial deutlich geringer als das Theoretische. Es macht aber eher weniger Sinn anhand von Potenzialbewertungen den Stellenwert der geothermischen Energienutzung bestimmen zu wollen, d.h. eine konkrete Umsetzung von Projekten muss sich immer an der technisch-wirtschaftlichen Sachlage des Einzelfalls ausrichten. [36]

Die geothermische Energie dient hauptsächlich als Wärmenergielieferant. 250° C sind in Baden-Württemberg derzeit die höchsten Temperaturen die erschlossen wurden, mit diesen Temperaturen ist es kein Problem Strom zu erzeugen, aber die Wirkungsgrade für die Strombereitstellung sind bei dem Energiewandlungsprozess noch sehr gering. Erzielbar sind hierbei ca. 15 - 20 Prozent. [36]

Im November 2009 wurde das Geothermikraftwerk mit Stromerzeugung in Bruchsal in den Probebetrieb genommen. Die installierte elektrische Leistung beträgt 0,55 MW und soll jährlich 4,5 Gigawattstunden Strom produzieren. Im Jahr 2010 konnte die Anlage jedoch nicht die Erwartungen bezüglich der Stromerzeugung erfüllen, da es

---

technische Probleme gab. Deshalb betrug die Stromerzeugung im Jahr 2010 ca. 40 MWh. [54]

Letztendlich sind Forschungs- und Entwicklungsarbeit von Nöten und bestehende Technologien weiterzuentwickeln oder neue petrothermale Verfahren anzuwenden, besonders für das Hot-Dry-Rock Verfahren. Des Weiteren auch die Kombination mit anderen Energieträgern, wie etwa Biogas (Hybrid Kraftwerk Neuried) [54]

Das ZSW schätzt das Potenzial unter Berücksichtigung der technischen Weiterentwicklung auf eine TWh bis 2050. [5]

## 5 Zusammenfassung

Um es kurz zusammenzufassen, werden hier die Potenziale der einzelnen Energien nochmals nach dem möglichen Entwicklungsszenario des ZSW dargestellt. In Anlehnung an Punkt 4: „Ein Potenzial zeigt eine noch nicht realisierte Möglichkeit auf und gibt somit die Erreichbarkeit eines Ziels an“. Potenziale sind Potenziale und noch längst nicht realisiert.

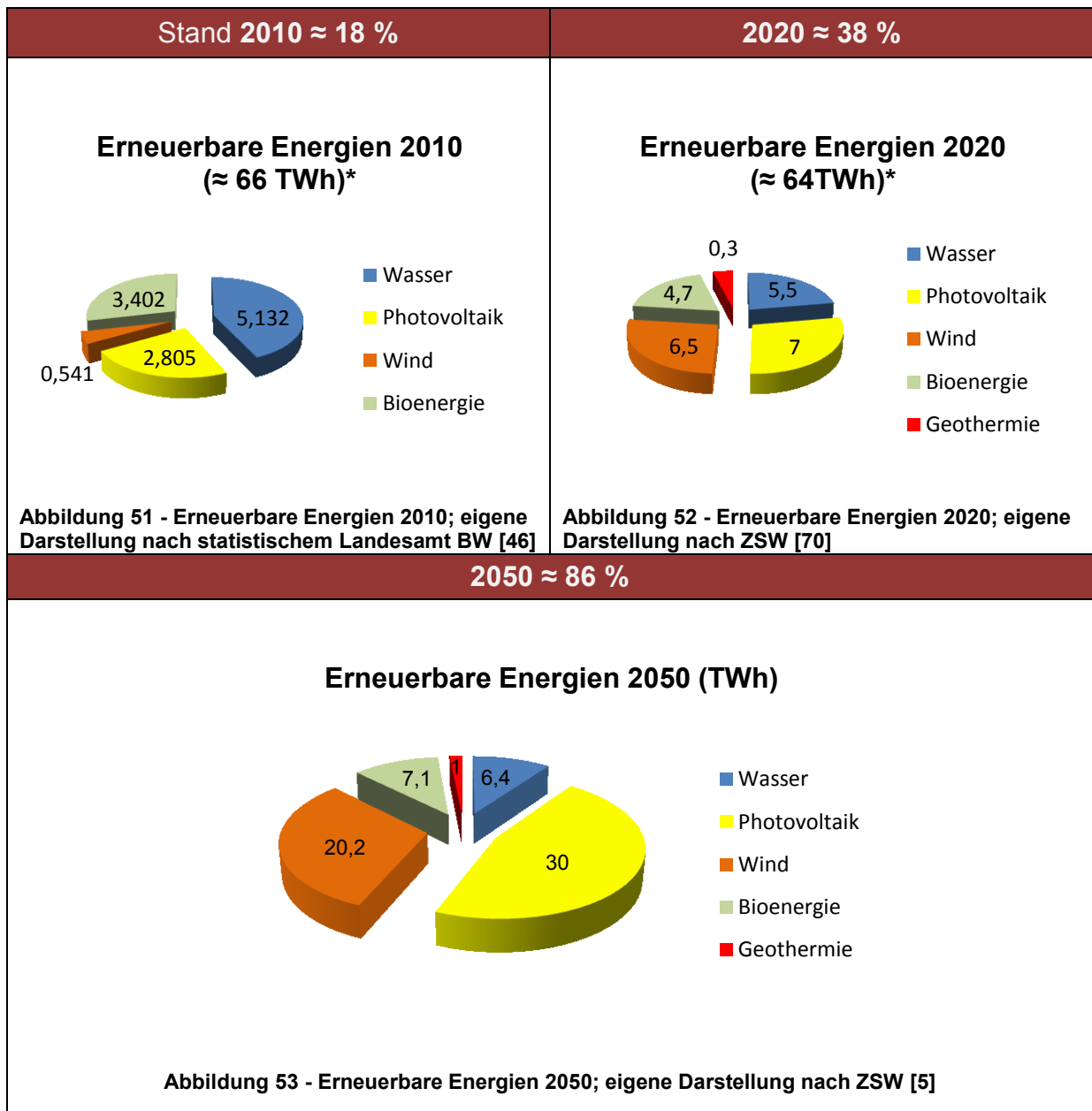


Tabelle 35 - Entwicklungsszenario bis 2050; eigene Darstellung in Anlehnung an ZSW

\*Bruttostromerzeugung in Baden-Württemberg

## 6 Schlussbetrachtung

Schlussfolgernd lässt sich beurteilen, dass das Land Baden-Württemberg große Potenziale im Bereich der alternativen Energien birgt.

Bei den fluktuierenden Energien, Windenergie und Photovoltaik, sind die Potenziale enorm vorhanden, wobei die Photovoltaik einer kritischen Betrachtung unterzogen werden sollte. Vor allem in der Potenzialkategorie „Dachflächen“ ist ein beträchtliches Potenzial zu verzeichnen, jedoch kann nicht davon ausgegangen werden, dass jeder Hauseigentümer das Verlangen nach einer Photovoltaikanlage hegt. Bei der Windenergie geben die Potenziale ausreichend Aufschluss den Schritt des „10-Prozent Ziels“ bis 2020 zu realisieren. Durch den verabschiedeten Windenergieerlass ist eine wichtige Voraussetzung erfolgt.

Die Wasserkraft und die Bioenergie werden aus heutiger Sicht an ihre Grenzen stoßen. Bei der Bioenergie bedarf es eines Mittelweges, d.h. eine nachhaltige Bewirtschaftung der Wälder und eine sinnvolle Ausnutzung der Reststoffe aus Land- und Forstwirtschaft sowie der biogenen Rest- und Abfallstoffe, um so Diskriminierungen, z.B. zur Nahrungsmittelproduktion oder des Naturkreislaufs des Waldes vorzubeugen. Bei der Wasserkraft ist ersichtlich geworden, dass sich der Neu- und Ausbau auf kleinere Wasserkraftanlagen beschränken wird, da unter anderem auch der Ökologie Rechnung getragen werden muss.

Die Tiefengeothermie befindet sich noch in den Kinderschuhen, jedoch schlummern im Land Baden-Württemberg große Potenziale in dem Oberrheingraben und dem Molassebecken, berücksichtigt werden sollte, dass mögliche Erschließungen mit sehr hohen Kosten einhergehen und erhebliche Zeitaufwände mit sich bringen.

Da sich im Verlauf dieser Thesis herauskristallisiert hat, dass die Windkraft und die Photovoltaik den höchsten Anteil an der Stromerzeugung haben werden, ist es wichtig diesen Strom unter Kontrolle zu bringen, da dieser nicht kontinuierlich in das Netz einspeist, sondern mit Schwankungen behaftet ist und eventuelle Überproduktionen folgen könnten, hierfür ist eine Stromspeicherung essenziell. Die Stromspeicher

bilden eine wichtige Schlüsselfigur in der Energiewende und sollten deshalb besonders gefördert werden, um eine technische Weiterentwicklung voranzutreiben.

Da in Zukunft die Stromerzeugung bzw. Einspeisung dezentral verlaufen wird, ist ein erheblicher Netzausbau erforderlich. Daher sollte von dem Gedankengut der zentralen Versorgung weniger großer Kraftwerke Abstand genommen werden und sich darauf basierend der typische Lastverlauf zwangsläufig ändern wird. Dies bedarf eines intelligenteren Netzes, Stromspeicher und eine Senkung des Stromverbrauchs (Effizienzmaßnahmen) und die Zusammenschaltung verschiedener dezentraler Erzeuger zu virtuellen Kraftwerken, was mit einem immensen Aufwand in der Informations- und Kommunikationstechnologie einhergeht. Unter diesen Voraussetzungen und weiteren, wie Förderprogramme (Innovation der Technik), begünstigende Förderregelungen um Anreize zu setzen (politische bzw. gesetzliche Rahmenbedingungen), ausreichend verfügbare finanzielle Mittel und eine hohe Akzeptanz in der Bevölkerung, wäre eine fast vollkommene Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Baden-Württemberg möglich.

## Quellenverzeichnis

- [1] **Mautz, R.; Byzio, A.; Rosenbaum, W. (2008):** Auf dem Weg zur Energiewende - Die Entwicklung der Stromproduktion aus erneuerbaren Energien in Deutschland, Universitätsverlag Göttingen. S. 148, 149. Internetdokument:  
<http://webdoc.sub.gwdg.de/univerlag/2008/energiewende.pdf>. Abrufdatum: 2012-05-12
- [2] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Oktober 2011):** Kurzinfo Energiewende. Internetdokument:  
<http://www.bmu.de/energiewende/kurzinfo/doc/print/47889.php>. Abrufdatum: 2012-05-12
- [3] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (September 2011):** Fragen und Antworten zur Energiewende. Internetdokument:  
[http://www.bmu.de/energiewende/fragen\\_und\\_antworten/doc/47498.php#1](http://www.bmu.de/energiewende/fragen_und_antworten/doc/47498.php#1). Abrufdatum: 2012-05-12
- [4] **Dannenberg, M.; Duracak, A.; Hafner, M.; Kitzing, S. (2012):** Energien der Zukunft – Sonne, Wind, Wasser, Biomasse, Geothermie. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt. S. 7, 9-10, 23, 76, 97, 100-101, 120, 134-136, 148
- [5] **Schmidt, M. (März 2011):** Potenziale Erneuerbarer Energien in Baden-Württemberg. S. 3, 5-7, 9, 11 Internetdokument:  
[http://download.zollernalbkreis.de/EAG/PotentialeEEnergieinBW\\_Dipl.-Wirt.-Ing.MaikeSchmidt.pdf](http://download.zollernalbkreis.de/EAG/PotentialeEEnergieinBW_Dipl.-Wirt.-Ing.MaikeSchmidt.pdf). Abrufdatum: 2012-05-01
- [6] **Quaschnig, V. (2009):** Regenerative Energiesysteme – Technologie-Berechnung-Simulation. 6. Auflage, Hanser Verlag, München. S. 49, 59, 235, 237-238, 240-241, 243, 256-257, 290-291, 295, 297, 301, 304, 310-319, 329
- [7] **Günnewig, D.; Sieben, A.; Püschel, M.; Bohl, J.; Mack, M. (November 2007):** Leitfaden zur Berücksichtigung von Umweltbelangen bei der Planung von PV-Freiflächenanlagen. Hannover. S. 44-45. Internetdokument: [http://www.erneuerbare-Energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/pv\\_leitfaden.pdf](http://www.erneuerbare-Energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/pv_leitfaden.pdf). Abrufdatum: 2012-05-04
- [8] **Krimmling, J. (2009):** Erneuerbare Energien – Einsatzmöglichkeiten-Technologien-Wirtschaftlichkeit. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG, Köln. S. 44-45, 47-50

- [9] **Pehnt, M.; Brischke, L.A.; Jacobsen S. Dr. Reinhardt, G.; Fehrenbach, H.; Vogt, R.; Walter, J. (Oktober 2011):** Erneuerbare Energien – Innovationen für eine nachhaltige Energiezukunft. 8. Auflage, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin. S. 88, 108-109, 112. Internetdokument: [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ee\\_innovationen\\_energiezukunft\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ee_innovationen_energiezukunft_bf.pdf). Abrufdatum: 2012-05-03
- [10] **Fechner, H.; Lugmaier, A.; arsenal research; Geschäftsfeld Erneuerbare Energietechnologien (August 2007):** Technologie-Roadmap für Photovoltaik in Österreich. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien. S. 4-5. Internetdokument: [http://www.energiezukunft.at/edz\\_pdf/0728\\_pv-roadmap.pdf](http://www.energiezukunft.at/edz_pdf/0728_pv-roadmap.pdf). Abrufdatum: 2012-05-04
- [11] **Bauer, W. (März 2009):** Windenergie und ihre Nutzung. S. 2. Internetdokument: <http://www.pa.msu.edu/~bauer/Energie/PDFs/Windenergie.pdf>. Abrufdatum: 2012-04-22
- [12] **Theiß, E. (2008):** Regenerative Energietechnologien – Anlagenkonzepte, Anwendungen, Praxistipps. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart. S. 69-70, 241-242, 245, 247, 261, 272
- [13] **Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen:** Windrichtung. Internetdokument: <http://www.klimaatlas.nrw.de/site/nav2/Wind.aspx?P=3&M=2>. Abrufdatum: 2012-04-26
- [14] **Waller G.:** Einführung in die Windenergie-technik. S. 1-3. Internetdokument: <http://rzefalbala.rz.e-technik.fh-kiel.de/~waller/ftp/Windenergie/Windenergie02.pdf>. Abrufdatum: 2012-04-27
- [15] **Frühwald, O.; Ulrich, C. (Januar 2007):** Leitfaden zur Errichtung von Windkraftanlagen in der Steiermark. LandesEnergieVerein Steiermark, Graz. S. 23 ff. Internetdokument: [http://www.lev.at/download/Leitfaden\\_Windkraft\\_2007.pdf](http://www.lev.at/download/Leitfaden_Windkraft_2007.pdf). Abrufdatum: 2012-04-28
- [16] **Bundesverband WindEnergie e.V.:** Widerstandsläufer, Windenergieanlagen mit horizontaler Achse, Technik, Windnachführung. Internetdokument: <http://www.windenergie.de/infocenter/technik/funktionsweise/widerstandslaeufer>, <http://www.windenergie.de/infocenter/technik/funktionsweise/leelaeufer>, <http://www.windenergie.de/infocenter/technik>, <http://www.windenergie.de/infocenter/technik/funktionsweise/windrichtungsnachfuehrung>, [http://www.windenergie.de/sites/default/files/download/publication/studie-zum-potenzial-der-windenergienutzung-land/bwe-potenzialstudie\\_final.pdf](http://www.windenergie.de/sites/default/files/download/publication/studie-zum-potenzial-der-windenergienutzung-land/bwe-potenzialstudie_final.pdf). Abrufdatum: 2012-04-28
- [17] **Hennick, P.; Fishedick, M. (2007):** Erneuerbare Energien: Mit Energieeffizienz zur Energiewende. C.H. Beck oHG, München. S. 48, 50-51

- [18] **Bührke, T.; Wengenmayer, R. (2007):** Erneuerbare Energie – Alternative Energiekonzepte für die Zukunft. 1. Auflage, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. S. 52
- [19] **Schauer, M. (September 2007):** Numerische Simulation von Offshore Windkraftanlagen mit Berücksichtigung der Wellenabstrahlung in den Baugrund. Diplomarbeit, Technische Universität Carolo Wilhelmina zu Braunschweig. S. 23. Internetdokument: <http://www.infam.tu-bs.de/infam2/include/Studium/stuDipl/dipl2007-SchauerMarco.pdf>. Abrufdatum: 2012-05-01
- [20] **Agri Consult GmbH:** Internetdokument: <http://www.agriconsult-gmbh.de/images/windkraft2.gif>. Abrufdatum: 2012-04-28
- [21] **Grotz, C.; Jensen, B.; Schroth, G. (März 2010):** Repowering von Windenergieanlagen – Effizienz, Klimaschutz, regionale Wertschöpfung. Bundesverband Windenergie e.V., Berlin. S. 8. Internetdokument: [http://www.windenergie.de/sites/default/files/download/publication/repowering-von-windenergieanlagen/bwe\\_repowering-broschuere\\_05-2011.pdf](http://www.windenergie.de/sites/default/files/download/publication/repowering-von-windenergieanlagen/bwe_repowering-broschuere_05-2011.pdf). Abrufdatum: 2012-04-28
- [22] **GEW Energie GmbH:** Repowering. Internetdokument: <http://gew-energie.de/index.php?s=repowering>. Abrufdatum: 2012-04-29
- [23] **Deutsche Energie Agentur GmbH:** Vor- und Nachteile der Wasserkraft, Wasserkraftnutzung, Vor- und Nachteile Wasserkraftnutzung, Vor- und Nachteile von Biomasse. Internetdokument: <http://www.thema-energie.de/energie-erzeugen/erneuerbare-energien/wasserkraft/grundlagen/vor-nachteile-der-wasserkraft.html>, <http://www.thema-energie.de/energie-erzeugen/erneuerbare-energien/wasserkraft/grundlagen/voraussetzungen-fuer-die-wasserkraftnutzung.html>, <http://www.thema-energie.de/energie-erzeugen/erneuerbare-energien/wasserkraft/grundlagen/vor-nachteile-der-wasserkraft.html>, <http://www.thema-energie.de/energie-erzeugen/erneuerbare-energien/biomasse/grundlagen/vorteile-nachteile-von-biomasse.html>, <http://www.thema-energie.de/energie-erzeugen/erneuerbare-energien/wasserkraft/grundlagen/voraussetzungen-fuer-die-wasserkraftnutzung.html>. Abrufdatum: 2012-04-29
- [24] **Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten Rheinland Pfalz:** Wasserkreislauf. Internetdokument: <http://wasser.rlp.de/servlet/is/2032/WKL.jpg>. Abrufdatum: 2012-05-01
- [25] **Agentur für Erneuerbare Energien e.V.:** Potenziale der Wasserkraft; Bioenergie. Internetdokument: <http://www.unendlich-viel-energie.de/de/wasserkraft/detailansicht/article/97/potenziale-der-wasserkraft.html>; <http://www.unendlich-viel-energie.de/de/bioenergie.html>. Abrufdatum: 2012-04-29



- [26] **Giesecke, J.; Marx, W.; Brommundt, J.; Eisner, A.; Kohler, B.; Zöllner, F.; Lorinser, B. (Juli 2010):** Wasserkraft in Baden-Württemberg. 2. Auflage, Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Stuttgart. S. 97, 26
- [27] **Buchholz, D.; Klärle, M. (März 2011):** Potenzialanalyse für Erneuerbare Energien – Ein Leitfaden für Kommunen und Landkreise. FH FFM, Frankfurt am Main. Internetdokument: [https://www.fh-frankfurt.de/fileadmin/de/Fachbereiche/FB1/Ansprechpartner/ProfessorInnen/Klaerle/ErneuerbarKomm\\_erneuerbarkomm\\_leitfaden\\_web.pdf](https://www.fh-frankfurt.de/fileadmin/de/Fachbereiche/FB1/Ansprechpartner/ProfessorInnen/Klaerle/ErneuerbarKomm_erneuerbarkomm_leitfaden_web.pdf). Abrufdatum: 2012-05-08
- [28] **Müller G. (07.01.2009):** Neuer Wasserkraftwandler für niedrigste Fallhöhen unter 2 m – das Projekt HYLOW. RWTH Aachen. Internetdokument: [http://www.iww.rwth-aachen.de/fileadmin/internet/iwasa/vortraege2009/IWASA2009\\_Mueller.pdf](http://www.iww.rwth-aachen.de/fileadmin/internet/iwasa/vortraege2009/IWASA2009_Mueller.pdf). 2012-05-11
- [29] **Hylow (30.01.2012):** Neue Entwicklung im Bereich Kleinwasserkraft. Internetdokument: <http://www.hylow.eu/kleinwasserkraft-seminar>. Abrufdatum: 2012-05-11
- [30] **Verband der Wasserwerksbetreiber Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.:** Die Francis Turbine. Internetdokument: <http://www.wasserkraftverband.de/wissenswertes-uber-wasserkraft/francis-turbine/>. Abrufdatum: 2012-05-11
- [31] **Siemens AG (1993):** Standpunkt – Zeitschrift zu Energie und Umweltfragen. 6. Jg., Nr.4, Siemens AG. Internetdokument: [http://www.igw-nrw.de/media/archive1/pdf\\_datein/documente/reglungen\\_nrw/wasserkraftpotentiale\\_mk.pdf](http://www.igw-nrw.de/media/archive1/pdf_datein/documente/reglungen_nrw/wasserkraftpotentiale_mk.pdf). S. 5. Abrufdatum: 2012-05-11
- [32] **Kaltschmitt, M; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (2009):** Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg. S. 2-3
- [33] **Quaschnig, V. (2008):** Erneuerbare Energien und Klimaschutz: Hintergründe, Techniken, Anlagenplanung, Wirtschaftlichkeit. Carl Hanser Verlag, München. S. 275
- [34] **Quaschnig, V. (2000):** Systemtechnik einer klimaverträglichen Elektrizitätsversorgung in Deutschland für das 21. Jahrhundert. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 6, Nr. 437, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf. S. 39 – 42, 43
- [35] **Popp, M. (2010):** Speicherbedarf bei einer Stromversorgung mit erneuerbaren Energien. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg. S. 49

- [36] **Stober, I.; Lorinser, B. (April 2008):** Wärme ist unter uns – Geothermie in Baden-Württemberg. 2. Auflage, Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Stuttgart. S. 10, 14, 43, 45, 49, 50
- [37] **Hurter, S.; Schellschmidt, R. (2003):** Atlas of geothermal resources of Europe. Geothermics, 32, 4-6. Internetdokument: [http://www.iphweimar.de/images/karte\\_3\\_gross.gif](http://www.iphweimar.de/images/karte_3_gross.gif), [http://www.iphweimar.de/images/karte\\_1\\_gross.gif](http://www.iphweimar.de/images/karte_1_gross.gif). Abrufdatum: 2012-05-12
- [38] **Auer, J.; Keil, J (Dezember 2012):** Moderne Stromspeicher – Unverzichtbare Bausteine der Energiewende. Deutsche Bank – DB Research. S. 2. Internetdokument: [http://www.dbresearch.de/PROD/DBR\\_INTERNET\\_DE-PROD/PROD000000000284196/Moderne+Stromspeicher%3A+Unverzichtbare+Bausteine+der+Energiewende.pdf](http://www.dbresearch.de/PROD/DBR_INTERNET_DE-PROD/PROD000000000284196/Moderne+Stromspeicher%3A+Unverzichtbare+Bausteine+der+Energiewende.pdf). Abrufdatum: 2012-05-13
- [39] **Mahnke, E.; Mühlenhoff, J. (Februar 2012):** Renew's Spezial – Strom speichern. Ausgabe 57, Agentur für Erneuerbare Energien e.V. S. 4, 6-8, 21-22. Internetdokument: [http://www.unendlich-viel-energie.de/uploads/media/57\\_Renews\\_Spezial\\_Strom\\_speichern\\_mar12\\_online.pdf](http://www.unendlich-viel-energie.de/uploads/media/57_Renews_Spezial_Strom_speichern_mar12_online.pdf). Abrufdatum: 2012-05-13
- [40] **Popp, M. (März 2012):** Rinwallspeicher – ein essentieller Beitrag der Geotechnik zur Energiespeicherung. Technische Universität München. S. 16. Internetdokument: [http://www.poppware.de/Veranstaltungen/Matthias\\_Popp\\_Ringwallspeicher\\_Geotechnik\\_Tag\\_Muenchen\\_2012.pdf](http://www.poppware.de/Veranstaltungen/Matthias_Popp_Ringwallspeicher_Geotechnik_Tag_Muenchen_2012.pdf). Abrufdatum: 2012-05-13
- [41] **RWE Power AG (Januar 2010):** ADELE – Der adiabate Druckluftspeicher für die Elektrizitätsversorgung. Essen, Köln. Internetdokument: <http://www.rwe.com/web/cms/mediablob/de/365512/data/365478/1/rwe/innovationen/stromerzeugung/energiespeicherung/druckluftspeicher/projekt-adele/ADELE-Der-adiabate-Druckluftspeicher-fuer-die-Elektrizitaetsversorgung.pdf>. Abrufdatum: 2012-05-14
- [42] **Mühlenhoff, J. (April 2010):** Renew's Spezial – Erneuerbare Elektromobilität. Ausgabe 30, Agentur für Erneuerbare Energien e.V. Internetdokument: [http://www.unendlich-viel-energie.de/uploads/media/30\\_Renews\\_Spezial\\_Erneuerbare\\_Elektromobilitaet\\_april10\\_online.pdf](http://www.unendlich-viel-energie.de/uploads/media/30_Renews_Spezial_Erneuerbare_Elektromobilitaet_april10_online.pdf). Abrufdatum: 2012-05-14
- [43] **Katharina Garus (Juli 2010):** Gehirnschmalz fürs Netz. Im Fokus – Sonne, Wind und Wärme. Seite 44-46. Internetdokument: [http://www.e-energy.de/documents/07052010\\_Sonnewindwaerme\\_fokus\\_smartgrid.pdf](http://www.e-energy.de/documents/07052010_Sonnewindwaerme_fokus_smartgrid.pdf). Abrufdatum: 2012-05-14

- [44] **Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft BW:** Auf gutem Kurs – ein Jahr grün-rote Energiepolitik für Baden-Württemberg, Wind und Sonne sind Träger der Energiewende, Ein-Jahresbilanz des Umweltministeriums, Windenergieerlass Baden-Württemberg. Internetdokument: <http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/94041/>, <http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/89900/>, <http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/94192/>, <http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/94185/>. Abrufdatum: 2012-06-06
- [45] **Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg:** EEG-Strom Karte. Internetdokument: <http://www.bw-co2.de/eeg-bw/eegbw.php>. Abrufdatum: 2012-06-06
- [46] **Statistisches Landesamt Baden-Württemberg:** Internetdokument: <http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/>. Abrufdatum: 2012-06-19
- [47] **Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg:** Landesplanungsgesetz. Internetdokument: <http://www.mvi.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/103219/>. Abrufdatum: 2012-06-01
- [48] **Rechtsportal juris:** Windenergieerlass Baden-Württemberg. Internetdokument: <https://www.juris.de/jportal/portal/page/homerl.psml?nid=jnachr-JUNA120501462&cmsuri=%2Fjuris%2Fde%2Fnachrichten%2Fzeigenachricht.jsp>. Abrufdatum: 2012-05-28
- [49] **Beer, M.; Grobmaier, T.; Köll, L.; Corradini R. (Oktober 2009):** CO<sub>2</sub>-Verminderung in Deutschland. 3. überarbeitete Auflage, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., München. S. 9. Internetdokument: [http://www.ffe.de/download/langberichte/FfE\\_CO2-Endbericht\\_komplett.pdf](http://www.ffe.de/download/langberichte/FfE_CO2-Endbericht_komplett.pdf). Abrufdatum: 2012-06-14
- [50] **Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz BW:** RIPS-Metadaten-Auskunft. Internetdokument: <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/44882/>. Abrufdatum: 2012-06-15
- [51] **Solar Versicherung:** Berechnungen zur Photovoltaik, SBS Bausoftware. Internetdokument: <http://www.solar.bgp-online.de/berechnungen.html>. Abrufdatum: 2012-06-06
- [52] **Müller, M; Walter, M. (Juni 2011):** Ermittlung der solaren Eignung von Hausdächern in Baden-Württemberg. Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz (LUBW). Internetdokument: <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/16134/LeitfadenSolareEignung.pdf?command=downloadContent&filename=LeitfadenSolareEignung.pdf>. Abrufdatum: 2012-06-02

- [53] **Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz BW:** Daten- und Kartendienst der LUBW. Internetdokument: <http://brsweb.lubw.baden-wuerttemberg.de/>. Abrufdatum: 2012-06-07
- [54] **Vogel-Sperl, A.; Schmidt, M.; Staiß, F. (September 2011):** Erneuerbare Energien und Energieeffizienz in Baden-Württemberg – Sachstand und Entwicklungsperspektiven. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), Stuttgart. S. 2, 31, 33, 42, 46. Internetdokument: [http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/90045/ZSW-Studie\\_ErneuerbareEnergien\\_Energieeffizienz.pdf?command=downloadContent&filename=ZSW-Studie\\_ErneuerbareEnergien\\_Energieeffizienz.pdf](http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/90045/ZSW-Studie_ErneuerbareEnergien_Energieeffizienz.pdf?command=downloadContent&filename=ZSW-Studie_ErneuerbareEnergien_Energieeffizienz.pdf). Abrufdatum: 2012-06-22
- [55] **Gantenbein, S. (Dezember 2011):** Ermittlung von Kosten-Potential-Kurven für Windenergie in Baden-Württemberg. Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz (LUBW), Karlsruhe. S. 3, 17, 22, 30, 31, 34,37. Internetdokument: [http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/101883/bachelorarbeit\\_gantenbein.pdf?command=downloadContent&filename=bachelorarbeit\\_gantenbein.pdf](http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/101883/bachelorarbeit_gantenbein.pdf?command=downloadContent&filename=bachelorarbeit_gantenbein.pdf). Abrufdatum: 2012-06-20.
- [56] **Regionalverband Bodensee-Oberschwaben (Mai 2011):** Kriterienkatalog Bodensee-Oberschwaben. S. 1, 2, 3. Internetdokument: [http://www.bodensee-oberschwaben.de/10\\_Home\\_de.RVBO](http://www.bodensee-oberschwaben.de/10_Home_de.RVBO). Abrufdatum: 2012-06-17
- [57] **Vestas Wind Systems A/S:** V112-3.0 MW – Eine Windenergieanlage für die Welt. S. 18. Internetdokument: [http://www.vestas.com/Files%2FFiler%2FDE%2FBrochures%2FVestas\\_V112\\_web\\_DE.pdf](http://www.vestas.com/Files%2FFiler%2FDE%2FBrochures%2FVestas_V112_web_DE.pdf). Abrufdatum: 2012-05-28
- [58] **Kopp, S.:** Windenergie im Binnenland – Leistungskurven. Internetdokument: <http://windenergie-im-binnenland.de/powercurve.html>. Abrufdatum: 2012-05-28
- [59] **Zirngibl, T.; Meier, H.; Hunner, M. (Juni 2011):** Windatlas Baden-Württemberg. 1. Auflage, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Stuttgart. S. 31, 45
- [60] **Solarenergie-Förderverein Deutschland e.V. (SFV):** Flächenbedarf Windenergieanlagen. Internetdokument: <http://www.sfv.de/fotos//windjpg.jpg>. Abrufdatum: 2012-06-15.
- [61] **Quaschnig, V. (2002):** Windpark-Ertragsanalyse, Info: Feldwirkungsgrad. Internetdokument: <http://www.volker-quaschnig.de/software/windertrag/info1.html>. Abrufdatum: 2012-06-20

- [62] **Fahl, U.; Sippel, M.; Blesl, M.; Kruck, C. Härdtlein, M.; Eltrop, L.; Schelle, R.; Lambauer, J.; Heyden, E. (Januar 2011):** Integriertes Klimaschutz- und Energiekonzept für Ludwigsburg. Stadt Ludwigsburg. S. 170, 171, 174, 175, 178. Internetdokument: <http://www.ludwigsburg.de/site/Ludwigsburg-Internet/get/699838>. Abrufdatum: 2012-06-08
- [63] **Energie Agentur Lippe (2002):** CO<sub>2</sub>-Minderungskonzept Ostalbkreis. Oerlinghausen. S. 101, 111
- [64] **Mitterleitner (2008):** Faustzahlen für die Biogaserzeugung. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. Internetdokument: [http://www.lla-bayreuth.de/files/1\\_Aktuelles/infos/datei/Vergleichszahlen.pdf](http://www.lla-bayreuth.de/files/1_Aktuelles/infos/datei/Vergleichszahlen.pdf). Abrufdatum: 2012-06-10
- [65] **Aumüller, C.:** Biogas aus Mais als Energiepflanze. Bonn. Internetdokument: [http://www.agasaat-mais.de/downloads/biogas/Biogas\\_aus\\_Mais.pdf](http://www.agasaat-mais.de/downloads/biogas/Biogas_aus_Mais.pdf). Abrufdatum: 2012-06-10
- [66] **Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz (Februar 2012):** Altholz wird immer häufiger energetisch verwertet. Internetdokument: <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/48900/>. Abrufdatum: 2012-06-07
- [67] **Rytec GmbH (April 2005):** Deponiegasfassung und- verwertung. Frankfurt am Main. S. 6. Internetdokument: [http://www.rytec.ch/files\\_upl/refpdf\\_KurzDoku\\_Deponie.pdf](http://www.rytec.ch/files_upl/refpdf_KurzDoku_Deponie.pdf). Abrufdatum: 2012-06-01.
- [68] **Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg (Januar 2010):** Biomasse-Aktionsplan Baden-Württemberg. 1. Fortschreibung, Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Stuttgart. S. 7, 8, 11, 13
- [69] **Regierungspräsidium Freiburg:** Geothermische Übersichtskarte. Internetdokument: [http://www.lgrb.uni-freiburg.de/lgrb/lgrb\\_mapserver/mapserver](http://www.lgrb.uni-freiburg.de/lgrb/lgrb_mapserver/mapserver). Abrufdatum: 2012-06-12
- [70] **Staiß, F.; Schmidt, M. (Januar 2012):** Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Baden-Württemberg. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg. S. 3, 6, 42. Internetdokument: <http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/89900/Anlage.pdf?command=downloadContent&filename=Anlage.pdf>. Abrufdatum: 2012-06-23

- [71] **Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft; Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz; Ministerium für Verkehr und Infrastruktur; Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg (Mai 2012):** Windenergieerlass Baden-Württemberg. Internetdokument: <http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/94185/Windenergieerlass.pdf?command=downloadContent&filename=Windenergieerlass.pdf>. Abrufdatum: 2012-06-15
- [72] **Heimerl, S.; Dußling, U.; Reiss, J. (Mai 2011):** Ausbaupotenzial der Wasserkraft bis 1000 kW im Einzugsgebiet des Neckars unter Berücksichtigung ökologischer Bewirtschaftungsziele ohne Bundeswasserstraße Neckar. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft. Internetdokument: <http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/77833/>. Abrufdatum: 2012-05-25
- [73] **Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2009):** Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch, Rheingebiet, Teil 1. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. Internetdokument: [http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/213325/dgj\\_2009.pdf?command=downloadContent&filename=dgj\\_2009.pdf](http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/213325/dgj_2009.pdf?command=downloadContent&filename=dgj_2009.pdf). Abrufdatum: 2012-06-12

## Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
<	kleiner als
>	größer als
§	Paragraph
°	Grad
°C	Grad Celsius
a	anno (Jahr)
A	Fläche
abzgl.	abzüglich
ALK	Automatisierte Liegenschaftskarte
BHKW	Blockheizkraftwerk
BW	Baden-Württemberg
BWE	Bundesverband Wind Energie e.V.
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CO <sub>2</sub>	chemische Formel (Kohlenstoffdioxid)
d	Durchmesser
d	day (Tag)
d.h.	das heißt
DLM	digitales Landschaftsmodell
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
MJ, GJ, TJ, PJ, EJ	Megajoule, Gigajoule, Terajoule, Petajoule, Exajoule
GV	Großvieheinheit
h	Stunde
h/a	Stunden pro Jahr
ha/MW	Hektar pro Megawatt
HDR	Hot-Dry-Rock
kg, t	Kilogramm, Tonne
km <sup>3</sup> /a	Kubikkilometer pro Jahr
W, kW, MW	Watt, Kilowatt, Megawatt
kWh, MWh, GWh, TWh	Kilowattstunde, Megawattstunde, Gigawattstunde, Terawattstunde, usw.
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
kWp	Kilowatt-Peakleistung
l	Liter
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz BW
m, km	Meter, Kilometer
m/s, km/h, kn	Meter pro Sekunde, Kilometer pro Stunde, Knoten
m <sup>2</sup> , ha, km <sup>2</sup>	Quadratmeter, Hektar, Quadratkilometer

m <sup>3</sup>	Kubikmeter
NABEG	Netzausbaubeschleunigungsgesetz
n-Schicht	negative Schicht
ORC	Organic Rankine Cycle
oTS	organische Trockensubstanz
p-Schicht	positive Schicht
PV	Photovoltaik
RIPS	Räumliches Informations- und Planungssystem
SI-(Einheiten)	Internationales Einheitssystem
t(atro)	Tonnen absolute Trockenmasse
t(FM)	Tonnen Frischmasse
t(oTS)	Tonnen organischer Trockensubstanz
t(TM)	Tonnen Trockenmasse
usw.	und so weiter
v	(Wind-) Geschwindigkeit
Z	Skalierungsfaktor
z.B.	zum Beispiel
ZSW	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg

Tabelle 36 - Abkürzungsverzeichnis



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - erneuerbare Energien und ihre Anwendungen; eigene Darstellung nach Schmidt [5].....	4
Abbildung 2 - Grundprinzip der photovoltaischen Stromerzeugung; eigene Darstellung nach Krimmling [8].....	7
Abbildung 3 - Luv- und Leeläufer [16] .....	13
Abbildung 4 - Aufbau einer Windkraftanlage [20].....	14
Abbildung 5 - Repowering [22] .....	16
Abbildung 6 - Wasserkreislauf [24].....	18
Abbildung 7 - Funktionsprinzip Laufwasserkraftwerk.....	20
Abbildung 8 - Funktionsprinzip Pumpspeicherkraftwerk [6] .....	21
Abbildung 9 - Einsatzgebiete der Wasserturbinen in Abhängigkeit von Fallhöhe und Abfluss [6] .....	22
Abbildung 10 - Francis-Turbine [30].....	23
Abbildung 11 - Kaplan-turbine [30].....	24
Abbildung 12 - Pelton-Turbine [31] .....	24
Abbildung 13 - Möglichkeiten zur Nutzung der Biomasse [6] .....	27
Abbildung 14 - Möglichkeiten der Verstromung von Biomasse [9] .....	28
Abbildung 15 - Schematische Verfahrensschritte der Gülle [9] .....	28
Abbildung 16 - Aufbau der Erde; eigene Darstellung nach Stober [36] .....	31
Abbildung 17 - Geothermie in 1000 und 3000 m Tiefe [37] .....	33
Abbildung 18 - Hot-Dry-Rock Verfahren [6] .....	36
Abbildung 19 - Ringwallspeicher-Hybridkraftwerk.....	40
Abbildung 20 - Anzahl der Anlagen und installierte Leistung [45].....	46
Abbildung 22 - EE-Stromerzeugung <> Gesamtstromverbrauch [45] .....	47
Abbildung 21 - EE-Stromertrag und Umweltplus [45] .....	47
Abbildung 23 - erneuerbare Energien 2007 bis 2010 [45] .....	48
Abbildung 24 - Entwicklungsszenario Bruttostromerzeugung in BW [70].....	49
Abbildung 25 - Ausbau erneuerbarer Energien bis 2020 [70].....	50
Abbildung 26 – Solare Einstrahlung Baden-Württemberg [50] .....	53
Abbildung 27 - Solare Effizienz auf Hausdächern [53].....	55
Abbildung 28 - Auszug Beispielgebiet Solare Effizienz [53] .....	55
Abbildung 29 - Informationen Dachfläche [53].....	56
Abbildung 30 - Detaillierte Informationen Dachfläche [53].....	56
Abbildung 31 - Fläche Baden-Württemberg; eigene Darstellung aus RIPS [50] .....	64
Abbildung 32 - Fläche BW mit Biosphäre- und Waldschutzgebiet; eigene Darstellung aus RIPS [50]	64
Abbildung 34 - Siedlungsgebiete und Verkehr, Eisenbahnen und Luftverkehr; eigene Darstellung aus DLM-25-BW.....	65

Abbildung 33 - Fläche BW unter Abzug von Biosphäre- und Waldschutzgebiet; eigene Darstellung aus RIPS [50] .....	65
Abbildung 35 - Wassergebiete und Freileitungen; eigene Darstellung aus DLM-25-BW und RIPS [50] .....	66
Abbildung 36 - Naturschutzgebiete; eigene Darstellung aus RIPS [50].....	66
Abbildung 37 - Potenzialfläche und Potenzialfläche nach Gebietstypen; eigene Darstellung aus DLM-25-BW und RIPS [50] .....	67
Abbildung 38 - Windatlas in 140 m Höhe über Grund; eigene Darstellung aus RIPS [50].....	68
Abbildung 39 - Windatlas in 140 m Höhe über Grund auf ausgewiesener Potenzialfläche; eigene Darstellung aus DLM-25-BW und RIPS [50] .....	68
Abbildung 40 - WAsP Wind Turbine Editor mit Vestas V-112 mit einem Skalierungsfaktor 5,783 (5,8) und der mittleren Windgeschwindigkeit von 5,125 m/s .....	71
Abbildung 41 - Rotorabstandsflächen; eigene Darstellung [60].....	72
Abbildung 42 – Nutzbare Fläche in km <sup>2</sup> nach Bundesland; eigene Darstellung [16].....	77
Abbildung 43 - Nutzbare Flächen in den Bundesländern für verschieden Szenarien in km <sup>2</sup> ; eigene Darstellung [16] .....	77
Abbildung 44 – Neckareinzugsgebiet Baden-Württemberg [53] .....	80
Abbildung 45 – Neckareinzugsgebiet, bestehende Wasserkraftanlagen [53] .....	81
Abbildung 46 - Neckareinzugsgebiet, Neubau Wehre und Sohlenbauwerke mit Ausbau Wasserkraftanlagen [53] .....	82
Abbildung 47 - Waldfläche BW abzgl. Schutzgebiete; eigene Darstellung aus RIPS und DLM-25-BW [50].....	86
Abbildung 48 - Grünlandfläche BW abzgl. Schutzgebiete; eigene Darstellung aus RIPS und DLM-25-BW [50].....	87
Abbildung 49 - Genutzte und freie Potenziale der energetisch nutzbaren Biomassefraktion [68].....	94
Abbildung 50 - Untergrundtemperaturen in 2.500 m unter Gelände [69].....	96
Abbildung 51 - Erneuerbare Energien 2010; eigene Darstellung nach statistischem Landesamt BW [46].....	99
Abbildung 52 - Erneuerbare Energien 2020; eigene Darstellung nach ZSW [70] .....	99
Abbildung 53 - Erneuerbare Energien 2050; eigene Darstellung nach ZSW [5] .....	99
Abbildung 54 - EEG in konsolidierter Fassung des Gesetzestextes in der ab 1. Januar 2012 geltenden Fassung (Änderungen fett-kursiv).....	118
Abbildung 55 - Kriterienkatalog Regionalverband Oberschwaben-Bodensee 1 [56].....	121
Abbildung 56 - Kriterienkatalog Regionalverband Oberschwaben-Bodensee 2 [56].....	122
Abbildung 57 - Kriterienkatalog Regionalverband Oberschwaben-Bodensee 3 [56].....	123
Abbildung 58 - Potenzialfläche Waldgebiet und Grünland / Heide; eigene Darstellung aus DLM-25-BW .....	124
Abbildung 59 - Potenzialfläche Acker- / Gartenland und Sumpf- / Moorgebiete; eigene Darstellung aus DLM-25-BW.....	124

---

Abbildung 60 - Potenzialfläche "nicht definiertes Gebiet"; eigene Darstellung aus DLM-25-BW ..... 125

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Einteilung der Windgeschwindigkeiten nach der Beaufortskala; eigene Darstellung nach Quaschnig [6] .....	10
Tabelle 2 - Windkraftanlagen im Wachstum; eigene Darstellung nach BWE [16] .....	14
Tabelle 3 - Kenndaten Francis-Turbine [4].....	23
Tabelle 4 - Kenndaten Kaplan-Turbine [4] .....	24
Tabelle 5 - Kenndaten Pelton-Turbine [4] .....	24
Tabelle 6 - Vor- und Nachteile Bioenergie .....	30
Tabelle 7 - Kenndaten und Aufbau der Erde [36].....	31
Tabelle 8 - Speicherarten [39].....	39
Tabelle 9 - Bruttostromerzeugung Baden-Württemberg 2010; eigene Darstellung nach statistischem Landesamt BW [46].....	48
Tabelle 10 - Theoretisches Potenzial Solarenergie; eigene Berechnung nach Quaschnig [34].....	53
Tabelle 11 - Strompotenzial Dachfläche; eigene Berechnung nach Klärle et al. [27].....	57
Tabelle 12 - Strompotenzial Freifläche; eigene Berechnung nach Klärle et al. [27].....	58
Tabelle 13 - IST-Zustand PV und stromerzeugendes Potenzial PV; eigene Darstellung.....	59
Tabelle 14 - Theoretisches Potenzial Windenergie; nach Quaschnig [34] .....	61
Tabelle 15 - Vorgehensweise zur Berechnung des technischen Potenzials; eigene Darstellung und Strukturierung in Anlehnung an Gantenbein [54].....	62
Tabelle 16 – Auszug Ausschlusskriterien Windenergie; eigene Darstellung nach Windenergieerlass und Regionalverband Bodensee-Oberschwaben [71], [56] .....	63
Tabelle 17 - Flächenanteil der Geschwindigkeitsklassen in 140 m Höhe über Grund des jeweiligen Gebietstyps; eigene Berechnung mit ArcGIS.....	69
Tabelle 18 - Eigenschaften Windanlage [57] .....	69
Tabelle 19 - Weibull- und Rayleigh-Verteilung [6].....	70
Tabelle 20 - Volllaststunden in 140 m Höhe über Grund mit Vestas V-112; eigene Berechnung nach Gantenbein [55].....	72
Tabelle 21 - Flächeninhalt einer Ellipse mit Rotordurchmesser der Vestas V-112; eigene Berechnung .....	73
Tabelle 22 - Installierbare Leistung Waldgebiet; eigene Berechnung in Anlehnung an Gantenbein [55] .....	74
Tabelle 23 - Energieertrag der Vestas V-112 des Gebietstyps Wald; eigene Berechnung nach Gantenbein [55].....	75
Tabelle 24 - Energieerträge der einzelnen Gebietstypen und Gesamtertrag für BW mit Vestas V-112; eigene Berechnung .....	76
Tabelle 25 - Theoretisches Potenzial Bioenergie; eigene Berechnung nach Quaschnig [34] .....	84

Tabelle 26 - Großviehbestand 2010 und Großvieheinheiten in BW; eigene Berechnung in Anlehnung an Energieagentur Lippe [63].....	85
Tabelle 27 - Jährlicher Biogasertrag und Energiepotenzial aus dem Viehbestand; eigene Berechnung in Anlehnung an Energieagentur Lippe [63].....	85
Tabelle 28 - Strompotenzial Waldrestholz; eigene Berechnung nach Klärle et al. [27].....	87
Tabelle 29 - Strompotenzial Grünlandfläche; eigene Berechnung nach Klärle et al. [27].....	88
Tabelle 30 - Gasertrag und Energiepotenzial Silomais; eigene Berechnung nach Fahl et al. [62].....	89
Tabelle 31 - Strompotenzial Silomais; eigene Berechnung nach Fahl et al. [62].....	89
Tabelle 32 - Strompotenzial Altholz; eigene Berechnung nach Fahl et al. [62].....	91
Tabelle 33 - Zusammenfassung der untersuchten Bioenergiepotenziale.....	92
Tabelle 34 - Technische Potenziale für eine energetische Nutzung verfügbarer Energieträger in BW im Vergleich mit eigenen Annahmen; eigene Darstellung nach Biomasseaktionsplan [68].....	94
Tabelle 35 - Entwicklungsszenario bis 2050; eigene Darstellung in Anlehnung an ZSW.....	99
Tabelle 36 - Abkürzungsverzeichnis.....	112
Tabelle 37 - Ausschlusskriterien Windenergie; eigene Darstellung nach Windenergieerlass und Regionalverband Bodensee-Oberschwaben [71], [56].....	120
Tabelle 38 - Installierbare Leistung Acker- und Gartenland; eigene Berechnung in Anlehnung an Gantenbein [55].....	126
Tabelle 39 - Energieerträge der Vestas V-112 des Gebietstyps Acker- und Gartenland; eigene Berechnung nach Gantenbein [55].....	126
Tabelle 40 - Installierbare Leistung Sumpf- und Moorgebiete; eigene Berechnung in Anlehnung an Gantenbein [55].....	127
Tabelle 41 - Energieerträge der Vestas V-112 des Gebietstyps Sumpf- und Moorgebiete; eigene Berechnung nach Gantenbein [55].....	127
Tabelle 42 - Installierbare Leistung "nicht definiertes Gebiet"; eigene Berechnung in Anlehnung an Gantenbein [55].....	128
Tabelle 43 - Energieerträge der Vestas V-112 des Gebietstyps "nicht definiertes Gebiet"; eigene Berechnung nach Gantenbein [55].....	128

## Anhang

### Zu 1.2 Wunschbild der Energieversorgung

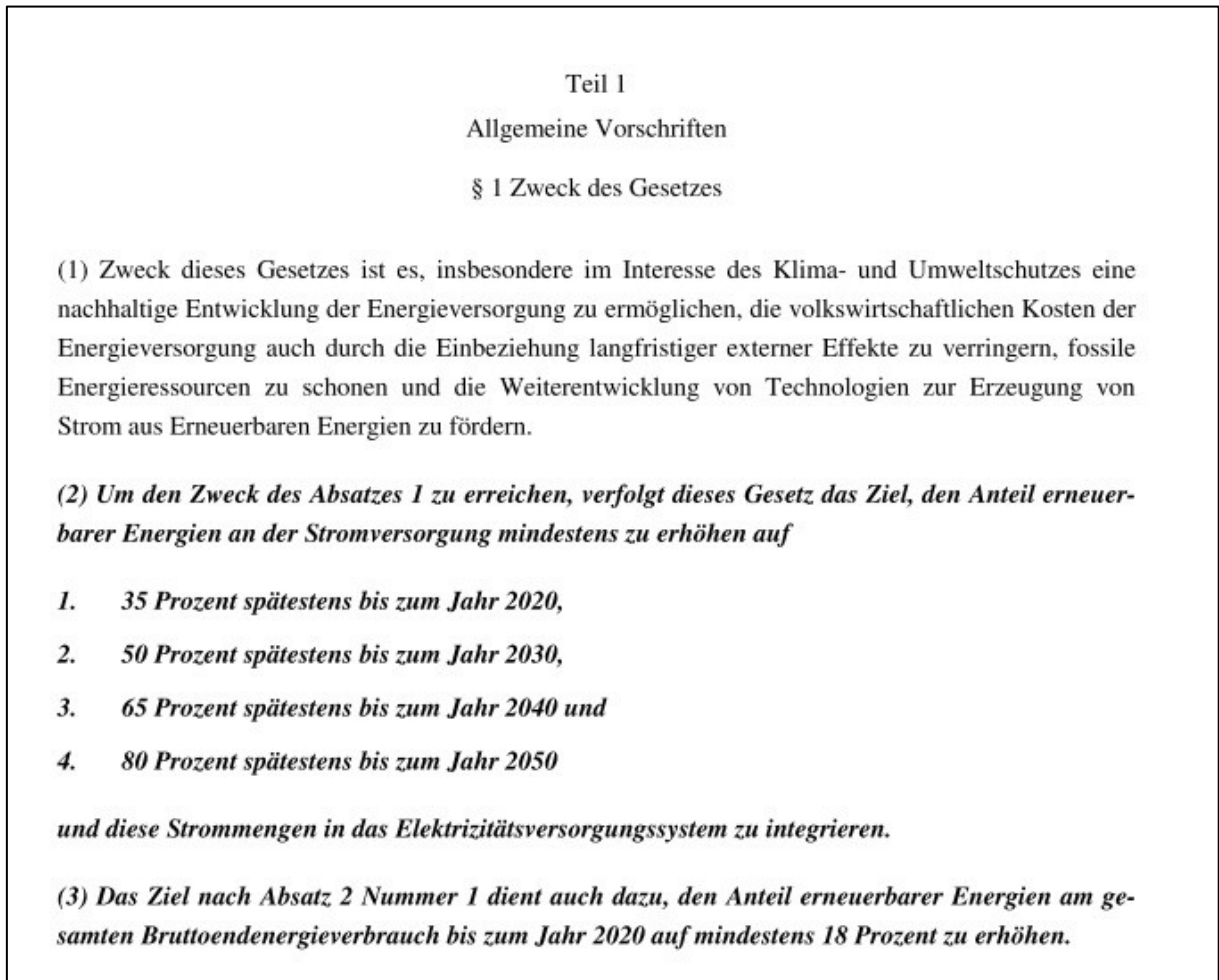


Abbildung 54 - EEG in konsolidierter Fassung des Gesetzestextes in der ab 1. Januar 2012 geltenden Fassung (Änderungen fett-kursiv)

## 4.2.2 Technische Potenziale

### Zu Schritt 1

Ausschlussflächen	Abstand	rechtliche Begründung
<b>Naturschutzbelange</b>		
Nationalparks	200 m	§ 24 BNatSchG
Nationale Naturmonumente	200 m	§ 24 Abs. 4 BNatSchG
Naturschutzgebiete	200 m	§ 23 BNatSchG
Biosphäregebiete	200 m	§ 25 BNatSchG
Waldschutzgebiete (Bann- und Schonwälder)	200 m	§ 32 LWaldG
Biotope	-	§ 30 BNatSchG, § 32 NatSchG, § 30a LWaldG
Naturdenkmale	-	§ 28 BNatSchG
Vogelschutzgebiete	700 m	VSG-VO vom 05.02.2010
Landschaftsschutzgebiete	-	§ 26 BNatSchG
FFH-Gebiete	-	§ 34 BNatSchG
<b>Wasserwirtschaft</b>		
Gewässerrandstreifen	10 m	§ 68b WG
Schutzzonen 1 und 2 Wasserschutzgebiete und Heilquellenschutzgebiete	-	§ 7 VwV-WSG BW
Überschwemmungsgebiete	-	§ 77 WG
Gewässer 1. Ordnung	50 m	NatSchG
<b>Siedlungsgebiete</b>		
Fläche besonderer funktionaler Prägung	1000 m	TA-Lärm- Nachtwert 35 dB(A)
Wohnbauflächen	700 m	TA-Lärm- Nachtwert 40 dB(A)
Mischgebiete	500 m	TA-Lärm- Nachtwert 45 dB(A)
Industrie- und Gewerbegebiete	300 m	TA-Lärm- Nachtwert 50 dB(A)
Fläche für Ver- und Entsorgung (Kraftwerk, Raffinerie, Abfallbehandlungsanlage, Heizwerk Umspannwerk, Deponie, Kläranlage, Wasserwerke)	-	
Sondergebiete und Gebiete für den	300 m	TA-Lärm- Nachtwert 50 dB(A)

Gemeinbedarf (z.B. Messegelände)		
Grün- und Erholungsflächen (z.B. Friedhöfe)	-	
<b>Verkehr, Eisenbahnen und Luftverkehr</b>		
Bundesautobahnen	100 m / 200 m	§ 9 FStrG / Freihaltung der Anbauverbots- und Beschränkungszone durch Rotorfläche / Gewährleistung der Betriebssicherheit
Bundesstraßen	40 m / 200 m	§ 9 FStrG / Freihaltung der Anbauverbots- und Beschränkungszone durch Rotorfläche / Gewährleistung der Betriebssicherheit
Landesstraßen	40 m / 200 m	§ 22 StrG / Freihaltung der Anbauverbots- und Beschränkungszone durch Rotorfläche / Gewährleistung der Betriebssicherheit
Kreisstraßen	30 m / 200 m	§ 22 StrG / Freihaltung der Anbauverbots- und Beschränkungszone durch Rotorfläche / Gewährleistung der Betriebssicherheit
Sonstige Verkehrsflächen (Bahnhofsanlagen, Raststätten, Plätze, Grenzübergänge, Gemeindestraßen)	-	
Eisenbahn	50 – 500 m	§ 4 Abs. 1 Landeseisenbahngesetz BW
Luftfahrt	1600 m	§12, 17, 18 LuftVG
<b>Freileitungen</b>		
Freileitungen	100 m	Gewährleistung der Betriebssicherheit
<b>Rohstoffsicherung</b>		
Bergbaubetriebe, Tagebau, Steinbruch, Grube	-	Festlegung des Teilregionalplans Oberflächennahe Rohstoffe

Tabelle 37 - Ausschlusskriterien Windenergie; eigene Darstellung nach Windenergieerlass und Regionalverband Bodensee-Oberschwaben [71], [56]



Kriterium	Vorsorgeabstand	Begründung
<b>(1) Siedlung</b>		
Kurgebiete, Krankenhäuser, Pflegeanstalten (FNP, ALK)	1000 m	TA Lärm - Nachtwert: 35 dB(A)
allgemeine Wohngebiete (FNP) (bzw. nicht weiter differenziert)	700 m	TA Lärm - Nachtwert: 40 dB(A)
Misch-, Dorf- und Kerngebiete (FNP)	500 m	TA Lärm - Nachtwert: 45 dB(A)
wohngenutzte Einzelhäuser im Außenbereich (ALK)	500 m	TA Lärm - Nachtwert: 45 dB(A)
Gewerbegebiete (FNP) (ohne Industriegebiete)	300 m	TA Lärm - Nachtwert: 50 dB(A)
Sondergebiete (ohne SO Bund) und Gebiete für den Gemeinbedarf (FNP)	300 m	TA Lärm - Nachtwert: 50 dB(A)
Flächen für Ver- und Entsorgung, Industriegebiete (FNP)	-	
Grün- und Erholungsflächen (FNP)	-	
<b>(2) Verkehr</b>		
Bundesautobahnen	40 m / 200 m	Bauverbot gem. § 9 FStrG / Gewährleistung der Betriebssicherheit (Kipphöhe)
Bundes- und Landesstraßen	20 m / 200 m	Bauverbot gem. § 9 FStrG. und §22 StrG / Gewährleistung der Betriebssicherheit (Kipphöhe)
Kreisstraßen	15 m / 200 m	Bauverbot gem. § 22 StrG BW / Gewährleistung der Betriebssicherheit (Kipphöhe)
Schienenwege und Bahnanlagen	50 m / 200 m	Bauverbot gem. § 4 (1) Nr.1 LEisenbG / Gewährleistung der Betriebssicherheit (Kipphöhe)
Flughäfen und Verkehrslandeplätze, Sonderlandeplätze, Segelflugplätze	Bauschutzbereiche, Hindernisbegrenzungsflächen	Bauhöhenbeschränkungen gem. § 12 bzw. § 18 LuftVG
sonstige Verkehrsflächen (FNP)	-	
<b>(3) sonstige technische Infrastruktur</b>		
zivile Richtfunkstrecken	50 m	§ 35 (2) Nr.8 BauGB 2004
Elektrizitätsfreileitungen (> 110 kV)	100 m	Gewährleistung der Betriebssicherheit

Abbildung 55 - Kriterienkatalog Regionalverband Oberschwaben-Bodensee 1 [56]

Kriterium	Vorsorgeabstand	Begründung
<b>(4) Landesverteidigung</b>		
Sondergebiete Bund	-	
militärische Nachttieffluggebiete, wenn zulässige Anlagenhöhe < 150m	-	Bauhöhenbeschränkungen
Flugbeschränkungsgebiet Heuberg	-	
militärische Richtfunkstrecken	50 m	§ 35 (2) Nr.8 BauGB 2004
<b>(5) Land- und Forstwirtschaft</b>		
Bannwälder	200 m	§ 32 LWaldG / Vorsorgeabstand analog der Vorgehensweise bei den Naturschutzgebieten
Schonwälder	-	§ 32 LWaldG
Schutzwald Iller-Gries	-	§ 31 LWaldG
Forstliche Langzeitversuchsfelder	-	
<b>(6) Rohstoffsicherung</b>		
Abbaufelder (LGRB)		
Vorranggebiete für den Rohstoffabbau	-	Festlegung des Teilregionalplans Oberflächennahe Rohstoffe 2003
Vorranggebiete für die Sicherung von Rohstoffvorkommen	-	Festlegung des Teilregionalplans Oberflächennahe Rohstoffe 2003
<b>(7) Gewässerschutz</b>		
alle oberirdischen Gewässer inkl. Bodensee	10 m	Freihaltung der Gewässerfläche und Bauverbot in Gewässerrandstreifen gem. § 68b WG BW
Erholungsschutzstreifen an Gewässern 1. Ordnung	50 m	NatSchG
Überschwemmungsgebiete nach § 110 WG BW	-	Hochwasserschutz
Wasserschutzgebiete, Zone I / II	-	generelles Bauverbot gem. § 7 VwV-WSG BW
<b>(8) Arten- und Biotopschutz</b>		
Naturschutzgebiete	200 m	§ 21 NatSchG BW / "7-Punkte-Programm" des Landes BW vom November 2010
"dienende" Landschaftsschutzgebiete	-	§ 21 (5) NatSchG BW
flächenhafte Naturdenkmale	-	§ 24 NatSchG BW
geschützte Biotope	-	§ 32 NatSchG u. § 30 LWaldG

Abbildung 56 - Kriterienkatalog Regionalverband Oberschwaben-Bodensee 2 [56]

Kriterium	Vorsorgeabstand	Begründung
Europäische Vogelschutzgebiete (SPA) mit gegenüber WKA besonders empfindlichen Anhang I Arten der EU-Richtlinie	500 m	s. BfN-Studie 2004, S. 20 Mindestabstand zu Rastplätzen
FFH-Gebiete mit Fledermausarten des Anhang II der EU-Richtlinie	-	s. LRPlan/SUP HHP
Vorranggebiete für Naturschutz und Landschaftspflege	-	Festlegung des Regionalplans 1996
<b>(9) Landschaftsschutz</b>		
Landschaftsschutzgebiete	-	§ 21 (5) NatSchG BW
Regionale Grünzüge und Grünzäsuren	-	Festlegung des Regionalplans 1996

Abbildung 57 - Kriterienkatalog Regionalverband Oberschwaben-Bodensee 3 [56]

### Zu Schritt 3

Gebietstypen einzeln: Waldgebiet (links), Grünland und Heide (rechts).

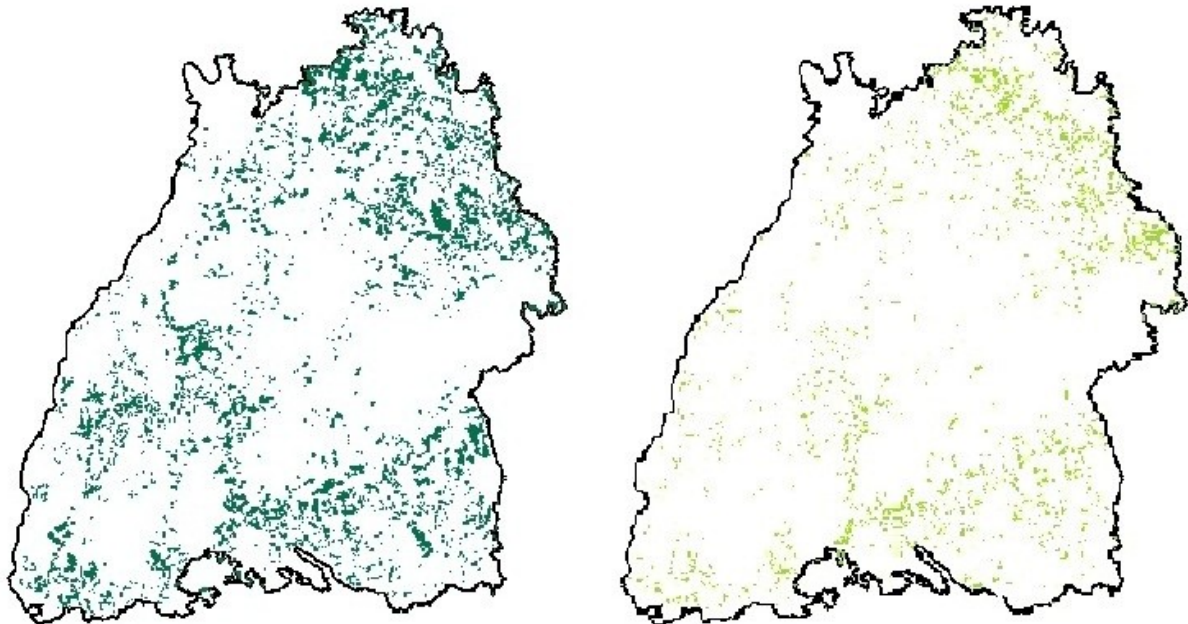


Abbildung 58 - Potenzialfläche Waldgebiet und Grünland / Heide; eigene Darstellung aus DLM-25-BW

Acker- und Gartenland (links) und die Sumpf- und Mooregebiete (rechts).

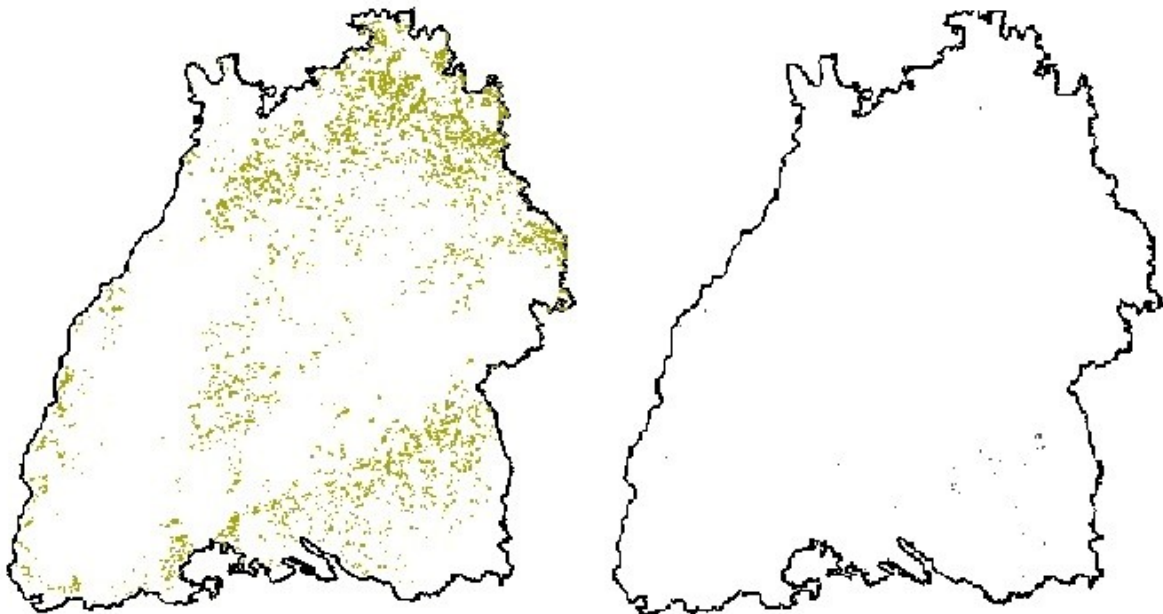


Abbildung 59 - Potenzialfläche Acker- / Gartenland und Sumpf- / Mooregebiete; eigene Darstellung aus DLM-25-BW

„nicht definiertes Gebiet“.

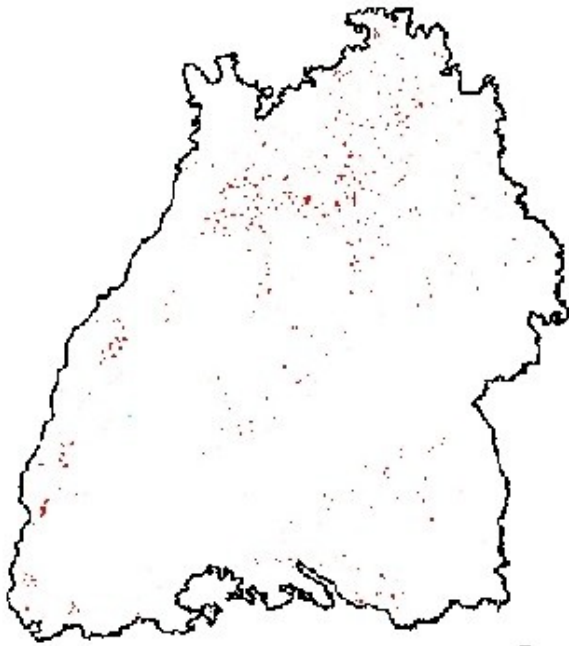


Abbildung 60 - Potenzialfläche "nicht definiertes Gebiet"; eigene Darstellung aus DLM-25-BW

## Zu Schritt 9 und 11

Acker- und Gartenland				
Geschwindigkeits- klasse in 140 m Höhe	Potenzial- fläche	Eignung	Turbinen- dichte	installierbare Leistung
[m/s]	[km <sup>2</sup> ]	[%]	[MW/km <sup>2</sup> ]	[MW]
4,50 – 4,75	2,98	80	9,52	22,70
4,75 – 5,00	35,74	80	9,52	272,20
5,00 – 5,25	91,51	80	9,52	696,94
5,25 – 5,50	140,08	80	9,52	1.066,85
5,50 – 5,75	138,68	80	9,52	1.056,19
5,75 – 6,00	114,76	80	9,52	874,01
6,00 – 6,25	52,12	80	9,52	396,95
6,25 – 6,50	7,73	80	9,52	58,87
6,50 – 6,75	0,30	80	9,52	2,28
6,75 – 7,00	-	80	9,52	-
>7,00	-	80	9,52	-
-	<b>583,90</b>	-	-	<b>4446,99</b>

Tabelle 38 - Installierbare Leistung Acker- und Gartenland; eigene Berechnung in Anlehnung an Gantenbein [55]

Acker- und Gartenland				
Geschwindigkeitsklasse in 140 m Höhe	installierbare Leistung	Volllaststunden	Feldwirkungs- grad	Ertrag
[m/s]	[MW]	[h]	[%]	[GWh]
4,50 – 4,75	22,70	1.131,57	90	23,12
4,75 – 5,00	272,20	1.536,38	90	376,38
5,00 – 5,25	696,94	1.765,89	90	1.107,65
5,25 – 5,50	1.066,85	2.001,27	90	1.921,55
5,50 – 5,75	1.056,19	2.160,09	90	2.053,32
5,75 – 6,00	874,01	2.399,32	90	1.887,33
6,00 – 6,25	396,95	2.637,80	90	942,37
6,25 – 6,50	58,87	2.873,65	90	152,25
6,50 – 6,75	2,28	3.105,32	90	6,37
6,75 – 7,00	-	3.331,53	90	-
>7,00	-	5.105,30	90	-
<b>∑ Summe</b>	<b>4446,99</b>			<b>10486,58</b>

Tabelle 39 - Energieerträge der Vestas V-112 des Gebietstyps Acker- und Gartenland; eigene Berechnung nach Gantenbein [55]

**Sumpf- und Moorgebiete**

Geschwindigkeits- klasse in 140 m Höhe	Potenzial- fläche	Eignung	Turbinen- dichte	installierbare Leistung
[m/s]	[km <sup>2</sup> ]	[%]	[MW/km <sup>2</sup> ]	[MW]
4,50 – 4,75	0,01	10	9,52	0,01
4,75 – 5,00	0,12	10	9,52	0,11
5,00 – 5,25	0,67	10	9,52	0,64
5,25 – 5,50	0,86	10	9,52	0,82
5,50 – 5,75	0,73	10	9,52	0,69
5,75 – 6,00	-	10	9,52	-
6,00 – 6,25	-	10	9,52	-
6,25 – 6,50	-	10	9,52	-
6,50 – 6,75	-	10	9,52	-
6,75 – 7,00	-	10	9,52	-
>7,00	-	10	9,52	-
-	<b>2,39</b>	-	-	<b>2,27</b>

Tabelle 40 - Installierbare Leistung Sumpf- und Moorgebiete; eigene Berechnung in Anlehnung an Gantenbein [55]

**Sumpf- und Moorgebiete**

Geschwindigkeitsklasse in 140 m Höhe	installierbare Leistung	Volllaststunden	Feldwirkungs- grad	Ertrag
[m/s]	[MW]	[h]	[%]	[GWh]
4,50 – 4,75	0,01	1.131,57	90	0,01
4,75 – 5,00	0,11	1.536,38	90	0,15
5,00 – 5,25	0,64	1.765,89	90	1,02
5,25 – 5,50	0,82	2.001,27	90	1,48
5,50 – 5,75	0,69	2.160,09	90	1,34
5,75 – 6,00	-	2.399,32	90	-
6,00 – 6,25	-	2.637,80	90	-
6,25 – 6,50	-	2.873,65	90	-
6,50 – 6,75	-	3.105,32	90	-
6,75 – 7,00	-	3.331,53	90	-
>7,00	-	5.105,30	90	-
<b>∑ Summe</b>	<b>2,27</b>			<b>4</b>

Tabelle 41 - Energieerträge der Vestas V-112 des Gebietstyps Sumpf- und Moorgebiete; eigene Berechnung nach Gantenbein [55]

**“nicht definiertes Gebiet”**

Geschwindigkeits- klasse in 140 m Höhe	Potenzial- fläche	Eignung	Turbinen- dichte	installierbare Leistung
[m/s]	[km <sup>2</sup> ]	[%]	[MW/km <sup>2</sup> ]	[MW]
4,50 – 4,75	0,56	95	9,52	5,06
4,75 – 5,00	4,08	95	9,52	36,90
5,00 – 5,25	8,75	95	9,52	79,14
5,25 – 5,50	7,84	95	9,52	70,90
5,50 – 5,75	3,16	95	9,52	28,58
5,75 – 6,00	1,12	95	9,52	10,13
6,00 – 6,25	0,25	95	9,52	2,26
6,25 – 6,50	0,02	95	9,52	0,18
6,50 – 6,75	-	95	9,52	-
6,75 – 7,00	-	95	9,52	-
>7,00	-	95	9,52	-
-	<b>25,78</b>	-	-	<b>233,15</b>

Tabelle 42 - Installierbare Leistung "nicht definiertes Gebiet"; eigene Berechnung in Anlehnung an Gantenbein [55]

**“nicht definiertes Gebiet”**

Geschwindigkeitsklasse in 140 m Höhe	installierbare Leistung	Volllaststunden	Feldwirkungs- grad	Ertrag
[m/s]	[MW]	[h]	[%]	[GWh]
4,50 – 4,75	5,06	1.131,57	90	5,15
4,75 – 5,00	36,90	1.536,38	90	51,02
5,00 – 5,25	79,14	1.765,89	90	125,78
5,25 – 5,50	70,90	2.001,27	90	127,70
5,50 – 5,75	28,58	2.160,09	90	55,56
5,75 – 6,00	10,13	2.399,32	90	21,87
6,00 – 6,25	2,26	2.637,80	90	5,37
6,25 – 6,50	0,18	2.873,65	90	0,47
6,50 – 6,75	-	3.105,32	90	-
6,75 – 7,00	-	3.331,53	90	-
>7,00	-	5.105,30	90	-
<b>∑ Summe</b>	<b>233,15</b>			<b>392,92</b>

Tabelle 43 - Energieerträge der Vestas V-112 des Gebietstyps "nicht definiertes Gebiet"; eigene Berechnung nach Gantenbein [55]