

IMPULSPAPIER

Landesflächen Baden-Württemberg

AUFWIND
DURCH NUTZUNG FÜR ERNEUERBARE ENERGIEN

Maïke Schmidt · Dirk Schindler · Almut Arneth
Sven Kesselring · Sabine Löbbe · Martin Pehnt

STAND
12.09.2024



KLIMA-SACHVERSTÄNDIGENRAT
BADEN-WÜRTTEMBERG

IMPRESSUM

Klima-Sachverständigenrat Baden-Württemberg
z. Hd. Geschäftsstelle
Kernerplatz 9
70182 Stuttgart
klima-sachverstaendigenrat@um.bwl.de

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

KLIMA-SACHVERSTÄNDIGENRAT

Dipl.-Ing. Maike Schmidt (Vorsitzende)

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)
Meitnerstr. 1, 70563 Stuttgart
E-Mail: maike.schmidt@zsw-bw.de
Telefon: +49 711 78 70-250

Professor Dr. Dirk Schindler (Stellvertretender Vorsitzender)

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Werthmannstrasse 10, 79085 Freiburg
E-Mail: dirk.schindler@meteo.uni-freiburg.de
Telefon: +49 761 203 3588

Professor Dr. Almut Arneth

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Kreuzeckbahnstraße 19, 82467 Garmisch-Partenkirchen
E-Mail: almut.arneth@kit.edu
Telefon: +49 8821 183-131

Professor Dr. Sven Kesselring

Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen (HfWU)
Parkstraße 4, 73312 Geislingen
E-Mail: sven.kesselring@hfwu.de
Telefon: +49 7331 22525

Professor Dr. Sabine Löbbe

Hochschule Reutlingen
Alteburgstraße 150, 72762 Reutlingen
E-Mail: sabine.loebbe@reutlingen-university.de
Telefon: +49 7121 271-7127

Professor Dr. Martin Pehnt

Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH (ifeu)
Wilckensstraße 3, 69120 Heidelberg
E-Mail: martin.pehnt@ifeu.de
Telefon: +49 6221 4767 0

Diese Stellungnahme beruht auch auf der sachkundigen und engagierten Arbeit unserer wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter:

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW): **Laura Liebhart**

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg: **Dr. Christopher Jung**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT): Tobias Laimer

Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen (HfWU): Rafael Labanino

Hochschule Reutlingen: Dr. André Hackbarth

Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH (ifeu): **Yanik Acker**

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
1 Einleitung	7
2 Gesetzliche Grundlagen	7
3 Status quo der baden-württembergischen Landesflächen	11
4 Potenziale erneuerbarer Energien auf Landesflächen	12
4.1 Ausgangspunkt für die Potenzialanalysen	12
4.1.1 Abschätzung von Wind- und Solarenergiepotenzialen	12
4.1.2 Abschätzung von thermischen Potenzialen	16
4.2 Ergebnisse: Windenergie	18
4.2.1 Windenergiepotenziale	19
4.2.2 Windenergieausbauszenarien	23
4.2.3 Bewertung der Schwerpunktsetzung beim Windenergieausbau unter (Kosten)Effizienz Gesichtspunkten	27
4.3 Ergebnisse: Freiflächen-Photovoltaik	29
4.4 Ergebnisse: Solarthermie	32
4.5 Ergebnisse: Tiefe Geothermie	35
4.6 Ergebnisse: Saisonale Wärmespeicher	37
4.7 Ergebnisse: Fluss-Wärmepumpen	39
5 Politische Maßnahmen: einige Anregungen	41
5.1 Vorschlag 1: Einführung einer Flächenbörse auf Ebene der Regionen und nach Möglichkeit ebenso auf kommunaler Ebene	42
5.2 Vorschlag 2: Flächenpooling	44
5.3 Vorschlag 3: Kommunalen Finanzausgleich auf erneuerbare Energien anwenden	45
5.4 Vorschlag 4: Pachtvergünstigung / kostenlose Bereitstellung von Landesflächen	46
5.5 Vorschlag 5: Bereitstellung und Ausweisung von ökologischen Ausgleichsflächen bzw. Vorrangflächen für den Naturschutz	50
6 Quellenverzeichnis	51

Zusammenfassung

Die Verfügbarkeit von Flächen ist eine wesentliche Voraussetzung für den Ausbau und die Nutzung erneuerbarer Energien. Im Eigentum des Landes Baden-Württemberg befinden sich rund 3.785 km² Fläche, was 10,8 % der gesamten Landesfläche entspricht. Davon werden 79 % als Wald und 15 % landwirtschaftlich genutzt.

Dieses Papier analysiert Potenziale und Instrumente, wie die Flächen im Landeseigentum für den Ausbau erneuerbarer Energien zur Erreichung von Klimaschutzzielen des Landes genutzt werden könnten:

- **Windenergie:** Auf etwa 9 % der Flächen besteht ein signifikantes technisches Potenzial für Windenergie. Die Kapazitätsfaktoren erreichen in Baden-Württemberg bis zu 36 %, besonders in den Höhenlagen des Schwarzwaldes, der Schwäbischen Alb sowie in den Regionen Mittlerer Oberrhein, Rhein-Neckar, Heilbronn-Franken, Ostwürttemberg und Donau-Iller. Auf den identifizierten nutzbaren Flächen könnten 1.366 Windenergieanlagen mit einem durchschnittlichen Kapazitätsfaktor von 25 % jährlich etwa 18 TWh Strom erzeugen.
- **Photovoltaik:** Das meteorologische Potenzial der Photovoltaik beträgt 605 TWh/Jahr, mit einem durchschnittlichen Kapazitätsfaktor von 11,1 %. Nach Ausschluss geographischer, naturschutzfachlicher und technischer Einschränkungen liegt das nutzbare Potenzial bei 18,6 TWh/Jahr.
- **Freiflächen-Solarthermie:** Das Potenzial von Freiflächen-Solarthermie liegt bei 28 TWh/Jahr. Zur Bereitstellung erneuerbarer Wärme muss zusätzlich die Nähe zu ausreichend großen Wärmenetzen gegeben sein, damit die erzeugte Wärme netzgebunden genutzt werden kann.
- **Tiefe Geothermie:** Diese Form der Energiegewinnung ist im Oberrheingraben und dem Süddeutschen Molassebecken von Bedeutung. Im Oberrheingraben könnten auf 5.850 ha rund 2,5 TWh/Jahr gefördert werden. Die Potenzialflächen verteilen sich auf 51 Gemeinden, von denen bereits 13 über ein Wärmenetz verfügen.
- **Flusswärmepumpen:** Für die Nutzung von Flüssen zur Wärmegewinnung bieten große Flüsse wie Rhein, Donau und Neckar ein erhebliches Potenzial. Eine visuelle Analyse identifizierte 95 potenzielle Flächen in Flussnähe mit einer Gesamtfläche von 314 ha, die für Flusswärmepumpen genutzt werden könnten.
- **Wärmespeicherung:** Neben der Erzeugung erneuerbarer Energie gewinnt die Speicherung von Wärme zunehmend an Bedeutung. Besonders saisonale Wärmespeicher sind in Wärmenetzen mit hohem Anteil an erneuerbarer Energie und Abwärme wichtig. Auf einer Fläche von 14.500 Hektar könnten Erdbeckenspeicher mit einer Kapazität von rund 36 TWh realisiert werden.

Der Klima-Sachverständigenrat schlägt vor, die Nutzbarmachung von Flächen für den Klimaschutz, durch die folgenden **politischen Maßnahmen** zu unterstützen:

- **Einrichtung einer Flächenbörse:** Auf Ebene der Regionen und Kommunen könnte eine Flächenbörse Anreize schaffen, ungenutzte oder geeignete Flächen für den Ausbau erneuerbarer Energien zur Verfügung zu stellen. Die Flächenbörse kann Anreize für Regionen und Kommunen mit vielen und guten Standorten schaffen, diese zu entwickeln und Regionen und Kommunen mit ungünstiger Flächenkulisse zur Verfügung zu stellen. Dadurch kann die Effizienz des Ausbaus der erneuerbaren Energien deutlich erhöht und die Anlagenanzahl sowie die Kosten verringert werden.

- **Flächenpooling:** Durch das Zusammenlegen von öffentlichen und gegebenenfalls auch privaten Flächen könnte eine größere zusammenhängende Fläche entstehen, was die Planung und den Ausbau erneuerbarer Energien beschleunigen würde.
- **Erneuerbare-Energien-Punkte** und **kommunaler Finanzausgleich:** Kommunen, die zusätzliche Flächen für erneuerbare Energien bereitstellen, könnten durch Punkte belohnt werden, die ihnen in Landesförderprogrammen Vorrang gewähren. Alternativ könnte der kommunale Finanzausgleich an die Bereitstellung solcher Flächen gekoppelt werden.
- **Pachtvergünstigungen** oder **kostenlose Bereitstellung von Landesflächen:** Pachtvergünstigungen oder eine kostenlose Bereitstellung von Landesflächen unter Berücksichtigung der beihilferechtlichen Regelungen auf europäischer Ebene könnten die Wirtschaftlichkeit von Projekten an Standorten erhöhen, die zwar keine optimalen Ertragsbedingungen bieten, jedoch eine hohe Akzeptanz in der Bevölkerung genießen. Für diesen Vorschlag wäre eine Änderung der Landeshaushaltsordnung (LHO) § 63 Abs. 3 (bzw. 5), erforderlich.
- **Bereitstellung von ökologischen Ausgleichsflächen:** Um Naturschutz und Klimaschutz in Einklang zu bringen, müssen bei der Nutzung von Flächen für erneuerbare Energien auch Rückzugsräume für betroffene Arten geschaffen werden. **Baden-Württemberg sollte deshalb schnellstmöglich entsprechende Naturschutzzonen verbindlich ausweisen, um diese Balance zu gewährleisten.**

1 Einleitung

Die Verfügbarkeit von Flächen ist eine grundlegende Voraussetzung für die Nutzung erneuerbarer Energiequellen. Flächen werden für die Nutzung von Sonnenenergie (Solarthermie, Photovoltaik), Windenergie, Erdwärme und für Wärmepumpen benötigt. Darüber hinaus sind Flächen für thermische und elektrische Speicher sowie für die Infrastruktur zum Transport und zur Verteilung von Strom, Wärme, Gas und Wasserstoff erforderlich.

Da Flächen, auf denen erneuerbare Energien genutzt, transportiert und verteilt werden sollen, stets in Konkurrenz mit bestehenden und alternativen Nutzungen stehen, erweist sich ihre Verfügbarkeit oft als Engpass für eine schnelle Energiewende. Gleichzeitig verfügt das Land Baden-Württemberg über erhebliche eigene Flächen.

Dieses Papier untersucht die Potenziale dieser Flächen und die Möglichkeiten des Landes, die Flächennutzung im Hinblick auf die Energiewende zu optimieren, um die Umsetzung der dringend erforderlichen Klimaschutzmaßnahmen in Baden-Württemberg zu beschleunigen und zu erweitern.

2 Gesetzliche Grundlagen

Die Bundesregierung hat für Deutschland im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) das ambitionierte Ziel gesetzt, den Anteil des Bruttostromverbrauchs aus erneuerbaren Energien bis 2030 auf mindestens 80 % zu erhöhen [EEG, 2024]. Die angestrebte Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien soll in den kommenden Jahren vor allem durch den Ausbau und die Nutzung von Windenergie auf See nach Maßgabe des Windenergie-auf-See-Gesetzes [WindSeeG, 2024], Windenergie an Land und Solarenergie (Photovoltaik, PV) erreicht werden.

Der Ausbau dieser Energien soll durch massive Steigerungen der installierten Leistungen gelingen. Die Steigerung der installierten PV-Leistung soll „auf, an oder in einem Gebäude oder einer Lärmschutzwand mindestens im Umfang des Zubaus von Freiflächenanlagen und Solaranlagen auf, an oder in einer baulichen Anlage, die weder Gebäude noch Lärmschutzwand ist, angestrebt werden“ [EEG, 2024].

Das Ziel des Windenergieflächenbedarfsgesetzes (WindBG) ist es, „im Interesse des Klima- und Umweltschutzes die Transformation zu einer nachhaltigen und treibhausgasneutralen Stromversorgung, die vollständig auf erneuerbaren Energien beruht, durch den beschleunigten Ausbau der Windenergie an Land zu fördern“ [WindBG, 2023]. Für den Ausbau und die Nutzung von Windenergie an Land gibt das WindBG den Bundesländern **verbindliche Flächenziele** (Flächenbeitragswerte) vor, die für den Ausbau der Windenergie an Land benötigt werden [WindBG, 2023], um die EEG-Ausbauziele und -Ausbaupfade zu erreichen.

Die im WindBG verbindlich festgelegten Flächenbeitragswerte sollen sicherstellen, dass jedes Bundesland, basierend auf seinen naturräumlichen Voraussetzungen, einen fairen Beitrag zum Ausbau der Windenergie in Deutschland leistet. Bei der Festlegung der Flächenbeitragswerte wurde auf unterschiedliche regionale Gegebenheiten Rücksicht genommen, um zu vermeiden, dass bestimmte Regionen übermäßig belastet werden, während andere weniger beitragen.

In der Anlage des WindBG werden die Flächenbeitragswerte der Bundesländer aufgeführt. In Baden-Württemberg ist demnach bis zum 31. Dezember 2027 ein Anteil an der Landesfläche von 1,1 % für

die Nutzung von Windenergie zu erreichen. Bis 31. Dezember 2032 steigt dieser Anteil auf 1,8 % der Landesfläche an.

Um den Ausbau der Windenergie an Land zu beschleunigen und dabei den Naturschutz zu wahren, wurde das Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) novelliert [BNatSchG, 2024]. Für artenschutzrechtliche Prüfungen, die im Rahmen von Genehmigungsverfahren für Windenergieanlagen an Land durchgeführt werden, existieren nun bundeseinheitliche Regeln. Der Betrieb von Windenergieanlagen gilt inzwischen als überragendes öffentliches Interesse, der der öffentlichen Sicherheit dient [BR, 2023].

Zur Umsetzung der Energiewende und zum Erreichen der Klimaschutzziele Deutschlands muss Baden-Württemberg mit einem massiven Ausbau und einer konsequenten Nutzung von Wind- und Solarenergie beitragen. Deshalb wurden die Vorgaben zu den Flächenbeitragswerten des WindBG im Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetz Baden-Württemberg (KlimaG BW) verankert [KlimaG BW, 2024].

Gemäß § 19 KlimaG BW soll „[z]ur Abdeckung der energiewirtschaftlichen Ausbaubedarfe und zur Erreichung der Klimaschutzziele für Baden-Württemberg [...] die Flächenverfügbarkeit für Erneuerbare-Energien-Anlagen in Baden-Württemberg sichergestellt werden.“

Der § 20 KlimaG BW legt die regionalen Teilflächenziele für den Ausbau der Windenergie gemäß § 3 des WindBG fest (Tabelle 1). Demnach sollen die zur Erreichung der regionalen Teilflächenziele notwendigen Teilpläne und sonstigen Änderungen eines Regionalplans bis spätestens 30. September 2025 als Satzung festgestellt sein.

Für den Ausbau der Freiflächen-Photovoltaik bestimmt der § 21 KlimaG BW ebenfalls, dass „[in] den Regionalplänen [...] Gebiete in einer Größenordnung von mindestens 0,2 % der jeweiligen Regionsfläche [...] für die Nutzung von Photovoltaik auf Freiflächen festgelegt werden (Grundsatz der Raumordnung). Die zur Erreichung dieses Flächenziels notwendigen Teilpläne und sonstigen Änderungen eines Regionalplans sollen bis spätestens 30. September 2025 als Satzung festgestellt werden.“

Die Erreichung der Flächenziele erfolgt nach dem im WindBG festgelegten Grundsatz der Lastenverteilung und zielt darauf ab, eine ausgewogene und gerechte Verteilung von Windenergie- und Freiflächen-Photovoltaikanlagen landesweit zu gewährleisten.

Tabelle 1: Flächenanteile in den Regionen Baden-Württembergs (Flächenbeitragswerte) nach Anlage 2 KlimaG BW (zu § 20 Absatz 1 und § 21 Satz 1). Regionale Teilflächenziele für Windenergie und Freiflächen-Photovoltaik basieren auf eigenen Berechnungen.

ID	Region	Regionsfläche bzw. baden-württembergischer Anteil (km ²)	Regionale Teilflächenziele (km ²)	
			Windenergie	Freiflächen-Photovoltaik
1	Heilbronn-Franken	4.764,76	85,77	9,53
2	Ostwürttemberg	2.138,53	38,49	4,28
3	Stuttgart	3.653,56	65,76	7,31
4	Donau-Iller	2.886,75	51,96	5,77

5	Bodensee-Oberschwaben	3.501,08	63,02	7,00
6	Südlicher Oberrhein	4.071,45	73,29	8,14
7	Hochrhein-Bodensee	2.755,76	49,60	5,51
8	Schwarzwald-Baar-Heuberg	2529,14	45,52	5,06
9	Neckar-Alb	2.529,17	45,53	5,06
10	Nordschwarzwald	2339,28	42,11	4,68
11	Mittlerer Oberrhein	2.137,03	38,47	4,27
12	Rhein-Neckar	2.441,30	43,94	4,88
	Summe	35747,81	643,46	71,50

Zur Flexibilisierung der Erreichung der in Tabelle 1 aufgeführten Regionsflächenanteile für Windenergie können gemäß § 20 KlimaG BW Absatz 3 „vertragliche Vereinbarungen geschlossen werden, mit denen sich eine Region gegenüber einer anderen Region verpflichtet, mehr Fläche als gemäß Absatz 1 erforderlich (Flächenüberhang) für die Windenergie auszuweisen.“

Die Evaluation der Photovoltaikpflichten und das Monitoring der Flächenvorgaben sind im § 32 KlimaG BW festgelegt. Demnach evaluieren und berichten das Umweltministerium und das Ministerium für Landesentwicklung und Wohnen dem Landtag jeweils zum 31. Mai der Jahre 2024, 2026 und 2029 über den Umsetzungsstand der Flächenvorgaben nach den §§ 20 und 21, insbesondere zu den erfolgten Gebietsfestlegungen für Windenergie und Photovoltaik auf Freiflächen und zu der Angabe, zu welchem Anteil diese durch Windenergie- und Freiflächen-Photovoltaikanlagen genutzt werden.

Das KlimaG BW setzt außerdem den Rahmen für weitere Pflichten zur Installation von Photovoltaikanlagen. Diese Pflichten greifen bei Neubauten und grundlegenden Dachsanierungen von Gebäuden, sofern die Dachfläche für Solarnutzung geeignet ist. Ebenso müssen Photovoltaikanlagen bei Neubauten von Parkplätzen mit mehr als 35 Stellplätzen installiert werden, wenn die Fläche dafür geeignet ist (§ 23 Pflicht zur Installation von Photovoltaikanlagen). Von dieser Pflicht kann abgewichen werden, wenn andere öffentlich-rechtliche Pflichten entgegenstehen. Für Parkplätze unmittelbar entlang öffentlicher Straßen gilt die Pflicht zur Installation von Photovoltaikanlagen nicht. Weitere Ausnahmen können aus städtebaulichen Gründen zugelassen werden.

Für Gebäude im Eigentum des Landes gilt die Pflicht zur Installation von Photovoltaikanlagen ab 2030 auch ohne Dachsanierung (§ 24 Photovoltaikpflicht auf Gebäuden im Eigentum des Landes; Photovoltaik auf Parkplätzen des Landes sowie Ladeinfrastruktur). Auf Parkplätzen des Landes müssen bis 2027 Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge installiert werden. Bis zum Ablauf des Jahres 2030 soll jeder vierte Stellplatz mit einer Ladeinfrastruktur ausgestattet sein. Der auf diesen Parkplätzen eingesetzte Strom soll möglichst aus Photovoltaikanlagen stammen.

Beim Neubau und Ausbau von Straßen und Schieneninfrastrukturen sind Photovoltaikanlagen zur Stromerzeugung vorzusehen, solange die Sicherheit nicht gefährdet wird. Bestehende Verkehrswege sollen systematisch auf ihre Eignung für Photovoltaikanlagen geprüft werden (§ 25 Photovoltaik an Verkehrswegen in Baulast des Landes sowie an Verkehrswegen der Schieneninfrastruktur). Im **Wärmesektor** ist die Situation durch andere rechtliche Instrumente geprägt. Das im Dezember 2023 verabschiedete Gesetz für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze (Wärmeplanungsgesetz, WPG) setzt das bundesweite Ziel, bis im Jahr 2030 einen Anteil von mindestens 50 % von erneuerbaren Energien, unvermeidbarer Abwärme oder einer Kombination aus beiden an der leitungsgebundenen Wärmeversorgung zu erreichen. Zu diesem Zweck liegen die Errichtung von Erzeugungsanlagen und Wärmeinfrastruktur im überragenden öffentlichen Interesse [WPG, 2024].

Zur Zielerreichung sieht das Wärmeplanungsgesetz eine schrittweise Dekarbonisierung der leitungsgebundenen Wärmeversorgung vor. Bei Bestandsnetzen muss ab 2030 der Anteil an erneuerbaren Energien und unvermeidbarer Abwärme mindestens 30 % und ab 2040 mindestens 80 % betragen. Bei neuen Wärmenetzen müssen ab dem 1. März 2025 mindestens 65 % der Nettowärmeerzeugung aus erneuerbaren Energien bzw. unvermeidbarer Abwärme bestehen. Die Biomassenutzung ist in neuen Wärmenetzen mit einer Trassenlänge über 50 km auf 25 % begrenzt. Bis 2045 soll in Deutschland die Wärmeversorgung klimaneutral sein. In Baden-Württemberg soll gemäß dem KlimaG die klimaneutrale Wärmeversorgung spätestens 2040 erreicht sein. Zur Flächenbereitstellung von Wärme aus erneuerbaren Energien gibt es keine Zielsetzungen.

3 Status quo der baden-württembergischen Landesflächen

Fläche ist für den Ausbau der erneuerbaren Energien eine entscheidende Ressource. Die Gesamtfläche Baden-Württembergs beträgt rund 35.748 km². Am Ende des Jahres 2022 entfiel der größte Flächenanteil auf landwirtschaftliche Flächen, die 16.038 km² oder 44,9 % der Gesamtfläche ausmachten (Abbildung 1). Waldflächen bedeckten 13.531 km², was 37,9 % entspricht. Siedlungsflächen nahmen 3.372 km² oder 9,4 % ein, während Verkehrsflächen 1.996 km² bzw. 5,6 % der Fläche belegten. Gewässer erstreckten sich über 394 km². Sie nehmen damit 1,1 % der Gesamtfläche ein. Der Anteil sonstiger Flächen (z. B. Gehölze, Heide, Moor, Sumpf) belief sich auf 416 km² oder 1,2 % [StaLa, 2024a, b].

Im Eigentum des Landes befinden sich rund 3.785 km² Fläche, die einen Anteil von 10,8 % an der Landesfläche ausmachen [LUBW, 2010]. Von den Flächen im Landeseigentum können den Nutzungen Landwirtschaft 15 %, Wald 79 %, Siedlung 2 %, Verkehr 0 % und Gewässer 1 % zugeschrieben werden.

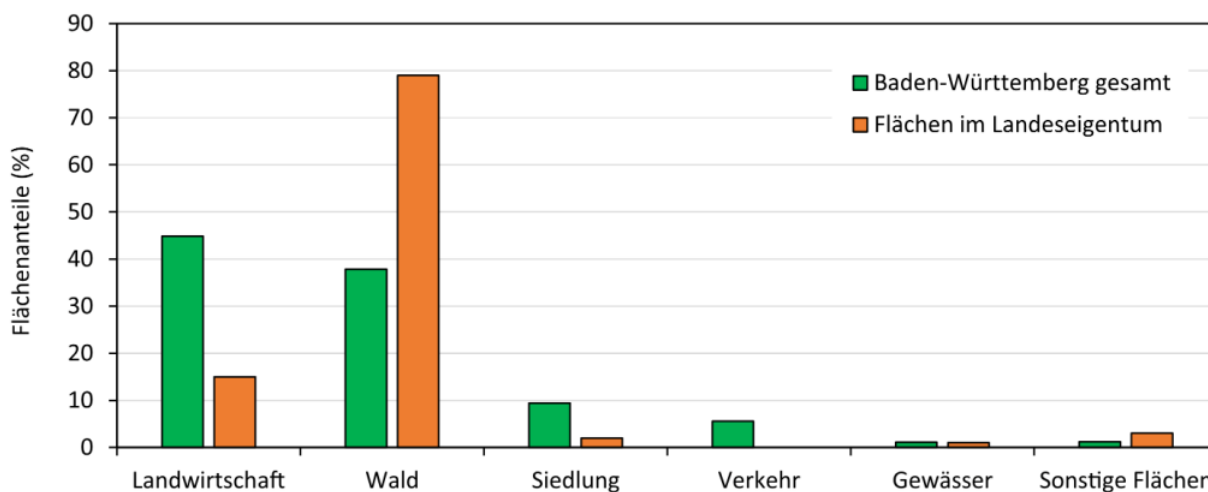


Abbildung 1: Anteile (grün) der Flächennutzung in Baden-Württemberg [StaLa, 2024a,b] und (orange) von Flächen, die sich im Landeseigentum befinden (Stand: 31.12.2010) [LUBW, 2010] nach Art der tatsächlichen Nutzung.

4 Potenziale erneuerbarer Energien auf Landesflächen

Im Folgenden wird das Potenzial für erneuerbare Energien auf landeseigenen Flächen analysiert. Es soll untersucht werden, ob das Land durch Verpachtung, Verkauf und Bereitstellung nennenswerte Flächenpotenziale bereitstellen kann. Die Untersuchung ist nach erneuerbaren Energien gegliedert und zielt darauf ab, die Größenordnung verfügbarer Potenziale zu quantifizieren.

Die aktuelle Flächennutzung wird in dieser Analyse nicht im Detail berücksichtigt, weshalb keine direkten Schlussfolgerungen für einzelne Standorte gezogen werden können. Oftmals stehen berechnete Flächennutzungen einer Verwendung für erneuerbare Energien entgegen. Dies trifft z. B. für die Nutzung landwirtschaftlicher Flächen für Freiflächen-Photovoltaikanlagen zu. Im konkreten Fall könnte der Nutzung von Solarenergie der Schutz von Flächen für die landwirtschaftliche Produktion gemäß § 16 Landwirtschafts- und Landeskultugesetz (LLG) entgegenstehen [LLG, 2024].

Eine nennenswerte Unschärfe in den folgenden Abschätzungen ergibt sich durch die Freihaltung von Hubschraubertiefflugstrecken der Bundeswehr und Radarmindestführungshöhen auf rund 8,2 % der Fläche Baden-Württembergs [Schlüter, 2024]. Diese freizuhaltenden Flächen konnten nicht räumlich explizit in die Analysen einbezogen werden, da sie dem Klima-Sachverständigenrat nicht bekannt sind.

4.1 Ausgangspunkt für die Potenzialanalysen

Der Ausgangspunkt für die in diesem Papier vorgestellten Analysen und Ergebnisse ist der Energieatlas Baden-Württemberg [Energieatlas BW, 2024]. Der Energieatlas Baden-Württemberg ist ein Online-Portal, das umfangreiche Informationen und Daten zu erneuerbaren Energien für Bürgerinnen und Bürger, Verwaltungen, Forschung und Wirtschaft in Baden-Württemberg bereitstellt.

Da das KlimaG BW vor allem Vorgaben zur Nutzung von Wind- und Solarenergie (Photovoltaik und Solarthermie) macht, werden deren Potenziale auf landeseigenen Flächen analysiert. Die Analysen werden durch Untersuchungen zu den Potenzialen von Tiefengeothermie, saisonalen Wärmespeichern und Flusswärmepumpen ergänzt.

4.1.1 Abschätzung von Wind- und Solarenergiepotenzialen

Die Verfügbarkeit und Nutzbarkeit erneuerbarer Energien werden durch eine Abstufung von Potenzialen quantifiziert, was im Folgenden exemplarisch anhand der Wind- und Solarenergie erläutert wird.

Meteorologisches Potenzial: Das ist das Referenzpotenzial, das sich auf die theoretisch verfügbare Wind- und Solarenergie bezieht. Es basiert beispielsweise auf der durchschnittlichen Windgeschwindigkeit und Sonneneinstrahlung in einem bestimmten Gebiet.

Derzeit wird in Planungsverfahren zum Ausbau der Windenergie in Baden-Württemberg das meteorologische Potenzial häufig in den Höhen von 160 m bis 180 m über dem Boden abgeschätzt. Deshalb wurde für diese Untersuchung das meteorologische Windpotenzial in 165 m Höhe über dem Boden berechnet [Jung und Schindler, 2023].

Die Berechnung des meteorologischen Freiflächen-Photovoltaikpotenzials erfolgte auf Grundlage von Satellitendaten [Sander et al., 2023], die von The Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF) bereitgestellt werden [CM SAF, 2024].

Geographisches Potenzial: Dieses Potenzial berücksichtigt nur nutzbare Flächen und wird durch Faktoren wie Hangneigung, Wasserflächen, Siedlungsgebiete und Infrastruktur beeinflusst.

Naturschutzfachliches Potenzial: Das geographische Potenzial wird durch naturschutzrechtliche Rahmenbedingungen, die beispielsweise durch Naturschutzgebiete und Natura 2000-Gebiete gesetzt werden, beeinflusst.

Technisches Potenzial: Auf Grundlage des naturschutzfachlichen Potenzials wird das technische Potenzial durch die Spezifikation von Wind- und Photovoltaikanlagen bestimmt. Je nach Anlagentyp variiert der damit erzielbare Energieertrag.

Basierend auf der Entwicklung von Windenergieanlageneigenschaften in den vergangenen 25 Jahren in Deutschland, die im Marktstammdatenregister dokumentiert sind [MaStR, 2024], wurde eine generische Leistungskennlinie erstellt. Diese basiert auf den Leistungskennlinien der vier häufig in Deutschland verwendeten und geplanten Windenergieanlagentypen Enercon E-160 EP5 E3, General Electric GE164, Vestas V162 und Nordex N163. Die Nennleistungen dieser Anlagen betragen zwischen 5,5 MW und 6,8 MW, die Nabenhöhe variiert zwischen 164 m und 167 m und der Rotordurchmesser reicht von 160 m bis 164 m.

Zur Berücksichtigung von Abschaltzeiten und Abschattungseffekten zwischen Windenergieanlagen wurde ein Reduktionsfaktor von 87 % angenommen [Sander et al., 2023]. Abschaltzeiten werden beispielsweise windenergieanlagenspezifisch zur Minimierung des Kollisionsrisikos für Fledermäuse während bestimmter Tageszeiten und Windgeschwindigkeitswerte festgelegt.

Das technische Freiflächen-Photovoltaikpotenzial wurde auf der Basis eines generischen Photovoltaikmoduls temperaturabhängig unter der Annahme einer Moduleffizienz von 23 % und einer Performance Ratio von 0,8 berechnet [Sander et al., 2023].

Steht der Wind- und Solarenergieanlagentyp fest, kann mithilfe des **Kapazitätsfaktors** eine Aussage über die Anlageneffizienz getroffen werden. Der Kapazitätsfaktor ist ein Maß für die tatsächliche Erzeugung durch eine Wind- und Solarenergieanlage im Vergleich zu ihrer theoretisch maximal möglichen Erzeugung über einen bestimmten Zeitraum. Der Kapazitätsfaktor wird berechnet, indem die tatsächlich erzeugte Energie mit der Energie normiert wird, die eine Anlage bei kontinuierlichem Betrieb mit ihrer Nennleistung hätte erzeugen können. Der Kapazitätsfaktor wird in Prozent angegeben und gibt Auskunft über die Effizienz und Auslastung von Wind- und Solarenergieanlagen. Ein höherer Kapazitätsfaktor bedeutet eine effizientere Nutzung von Wind- und Solarenergie.

Als untere Grenze für die Abschätzung des meteorologischen Potenzials der Windenergie wird ein Kapazitätsfaktor von 20 % angesetzt. Für die Abschätzung des meteorologischen Potenzials von Freiflächen-Photovoltaik wurde auf eine untere Begrenzung des Kapazitätsfaktors verzichtet.

Da § 20 KlimaG BW die regionalen Teilflächenziele gemäß § 3 des WindBG in den Regionsflächen festlegt, erfolgt die Abschätzung der Windenergie- und Freiflächen-Photovoltaikpotenziale für die in Tabelle 1 aufgeführten Regionsflächen.

Für den Ausbau der Windenergie wurden abweichend von allen anderen untersuchten Energieträgern regionsübergreifende, landesweite szenariobasierte Analysen durchgeführt (Abbildung 2):

- In Szenario 1 (S1) wurden sämtliche in Baden-Württemberg für die Windenergienutzung zugängliche Flächen und die in Tabelle 2 aufgeführten strengen Einschränkungen berücksichtigt.
- In Szenario 2 (S2) wurden Waldflächen und Erhebungen (Hügel, Kuppen, Höhenzüge des Schwarzwaldes) ausgeschlossen und die in Tabelle 2 aufgeführten strengen Einschränkungen berücksichtigt. Obwohl der vollständige Ausschluss von Waldflächen und Erhebungen auf Landesebene nicht angestrebt wird, ermöglicht dieses Szenario die Bandbreite der Auswirkungen extremer Ausbaupfade auf den Windenergieertrag abzuschätzen.
- In Szenario 3 (S3) wurden sämtliche in Baden-Württemberg für die Windenergienutzung zugängliche Flächen und die in Tabelle 2 aufgeführten schwachen Einschränkungen berücksichtigt.
- In Szenario 4 (S4) wurden Waldflächen und Erhebungen ausgeschlossen und die in Tabelle 2 aufgeführten schwachen Einschränkungen berücksichtigt.

Durch den Vergleich von S1 bis S4 können Rückschlüsse gezogen werden, welche Auswirkungen die Standortverfügbarkeit und -auswahl auf den Ausbau und Ertrag der Windenergie hat. Der Vergleich ermöglicht auch die Abschätzung der Stromgestehungskosten, die alle relevanten Kosten (z. B. Investitions-, Betriebs- und Wartungsausgaben), die mit der Erzeugung von Strom verbunden sind, ins Verhältnis zur über die gesamte Betriebsdauer erzeugten Strommenge setzt.

		Einschränkungen	
		streng	schwach
Fläche	inklusive Wald und Erhebungen	S1	S3
	exklusive Wald oder Erhebungen	S2	S4

Abbildung 2: Szenarien 1 bis 4 (S1 bis S4), mit denen die Auswirkungen der Windenergieausbaustrategie auf den Ertrag, den Kapazitätsfaktor und die Stromgestehungskosten in Baden-Württemberg abgeschätzt wurde.

Die Verteilung der Windenergieanlagen in den Regionsflächen erfolgte auf den Gemarkungen der Gemeinden in Hauptwindrichtung im Abstand des fünffachen Rotordurchmessers, quer zur Hauptwindrichtung im Abstand des dreifachen Rotordurchmessers [Fachagentur Windenergie, 2019]. Bereits bestehende Windenergieanlagenstandorte wurden nicht berücksichtigt.

Tabelle 2: Kriterien (Abstände, Grenzwerte), die für die Berechnung des geographischen und naturschutzfachlichen Potenzials in den Windenergieausbauszenarien S1 bis S4 und den Wind- und Freiflächen-Photovoltaikpotenzialanalysen angewendet wurden [Sander et al., 2023].

ID	Kategorie	Kriterium	Windenergie		Freiflächen-PV	Datenquelle
			streng	schwach		
1	Siedlungsfläche	Wohngebiete	800 m	500 m	100 m	[BKG, 2021]
2		Industrie/Gewerbe	300 m	200 m	100 m	[BKG, 2021]
3		Erholungsgebiete	400 m		100 m	[BKG, 2021]
4		Gemischte Nutzung	500 m	300 m	100 m	[BKG, 2021]
5		Bergbau	0 m	0 m	100 m	[BKG, 2021]
6		Friedhof	0 m	0 m	100 m	[BKG, 2021]
7		Krankenhaus	750 m	0 m	100 m	[BKG, 2021]
8		Militär	0 m		100 m	[BKG, 2021]
9	Infrastruktur	Flughäfen	2.000 m	1.000 m	1.000 m	[BKG, 2021]
10		Flugplätze	1.500 m	1.000 m	1.000 m	[BKG, 2021]
11		Eisenbahnen	200 m	100 m	25 m	[BKG, 2021]
12		Bundesstraßen	50 m	25 m	25 m	[BKG, 2021]
13		Landesstraßen	50 m	25 m	25 m	[BKG, 2021]
14		Autobahnen	200 m	100 m	100 m	[BKG, 2021]
15		Kreisstraßen	50 m	0 m	50 m	[BKG, 2021]
16		Seilbahnen	100 m	100 m	-	[BKG, 2021]
17		Stromleitungen	200 m	200 m	25 m	[BKG, 2021]
18	Oberflächeneigenschaften	Hangneigung	> 15°	> 17°	> 10°	[Copernicus, 2016]
19		Seen	500 m	0 m	100 m	[BKG, 2021]
20		Flüsse	100 m	0 m	50 m	[BKG, 2021]
21		Feuchtgebiete	100 m	0 m	0 m	[BKG, 2021]
22		Ödland	0 m	0 m	0 m	[BKG, 2021]
23	Naturschutz	Biosphärengebiet	0 m		0 m	[BfN, 2022]

24		Vogelschutz	500 m		0 m	[BfN, 2022]
25		FFH	0 m		0 m	[BfN, 2022]
26		Nationalparks	500		0 m	[BfN, 2022]
27		Natura 2000	0 m		0 m	[EEA, 2022]
28		Naturdenkmäler	0 m		0 m	[BfN, 2022]
29		Naturschutzgebiete	500 m		0 m	[BfN, 2022]
30		Geschützte Landschaften	0 m		0 m	[BfN, 2022]
31		Aktionsplan Auerhuhn	0 m			[FVA, 2023]
32	Sonstige	Wasserschutzgebiete	0 m		0 m	[LUBW, 2022]
33		Überflutungsflächen	0 m		0 m	[BfG, 2020]
34		Drehfunkfeuer	7.000 m			[BAF, 2022]
35		Funktürme	5.000 m			[BKG, 2021]
36		Weterradare	5.000 m			[DWD, 2018]
37		Seismologische Stationen	3.000 m			[BGR, 2017]
38		Kulturhistorische Stätten	0 m		0 m	[BKG, 2021]
39		Waldflächen			0 m	[CLC, 2018]

4.1.2 Abschätzung von thermischen Potenzialen

Neben dem Stromsektor ist auch der Wärmesektor auf eine Steigerung der Nutzung erneuerbarer Energien angewiesen. Vor allem bei der Bereitstellung größerer, räumlich konzentrierter Mengen erneuerbarer Wärme zur Einspeisung in Wärmenetze ist der Flächenbedarf ein entscheidender Faktor für die Umsetzung von Projekten.

Bei der Evaluation geeigneter Flächen werden wie bei Wind und Photovoltaik meteorologische (bei Solarthermie), geographische, naturschutzrechtliche und technische (bei allen Technologien) Einschränkungen zur Potenzialberechnung berücksichtigt.

Eine weitere Einschränkung bei der Nutzung erneuerbarer Wärme ist der Wärmeverlust beim Transport und der Verteilung über längere Strecken. Daher ist die Nähe zu Wärmesenken eine zentrale Bedingung, die durch die folgende Methodik ermittelt wurde:

- Es werden Wärmesenken räumlich verortet. Ist der Wärmebedarf in einem Gebiet hoch ($> 150 \text{ MWh}/(\text{ha} \times \text{Jahr})$) und der Abstand zur Wärmequelle gering ($< 2 \text{ km}$), wird eine Wärmequelle bzw. deren Potenzialfläche als geeignet gekennzeichnet.

- Potenzielle Wärmesenken in räumlicher Nähe von und auf Flächen im Landeseigentum werden über den ifeu-Wärmeatlas 2.0 [Blömer et al., 2019] ermittelt. Die energetische Bewertung von Wohn- und Nichtwohngebäuden erfolgt mittels des Gebäudemodells GEMOD [Mellwig et al., 2022]. Klimazonen werden gemäß DIN-V-18599 berücksichtigt und Baualtersklassen von Wohngebäuden aus der Gebäude- und Wohnungszählung 2011 verwendet. Der gebäudetypspezifische, jährliche Nutzwärmebedarf für Raumwärme und Trinkwarmwasser wird regional differenziert.
- Für die Nachfragepotenziale wird auf Nutzenergiebedarfe des Basisjahres 2016 zurückgegriffen. Unter Berücksichtigung von differenzierten Sanierungsraten wird ein Entwicklungspfad des Nutzenergiebedarfs angenommen. Für Baden-Württemberg ergibt sich, bezogen auf den Gebäudebestand, eine Reduktion der Nutzenergie um 11 % im Vergleich zu 2016.
- Für die Fernwärmeversorgung relevant ist der Endenergiebedarf eines Gebietes. Unter der Annahme eines pauschalen Jahresnutzungsgrades und Verteilverlusten im Gebäude kann die Nutzenergie in Endenergie umgerechnet werden, wobei ein Faktor von 90 % angenommen wird. Zur Evaluation eines Gebietes als potenzielles Wärmenetz-Versorgungsgebiet werden die Energiebedarfe der Gebäude auf einem Hektarraster aggregiert.
- Um potenzielle Standorte für neue Wärmenetze zu identifizieren, wurden Gebiete anhand der flächenbezogenen Wärmebedarfsdichte abgegrenzt [DWA, 2023].
- Des Weiteren wurden Bestandsnetze analysiert. Hierfür lagen Trassenverläufe und Versorgungsgebiete für die Städte Stuttgart, Karlsruhe, Reutlingen, Ludwigsburg, Mannheim, Heidelberg, Heilbronn, Pforzheim, Esslingen und Tübingen vor. Insgesamt wurden 210 Gemeinden mit Wärmenetzen verortet.

Mit dieser Methodik können Wärmenetz-Gebiete und potenzielle Wärmenetz-Gebiete in Baden-Württemberg identifiziert werden. Liegt eine Potenzialfläche im Landeseigentum mehr als 2 km von einem solchen Gebiet entfernt, wird die Fläche als ungeeignet für einen Standort zur zentralen Wärmeerzeugung klassifiziert. Große Entfernungen machen einen Erzeugungsstandort aufgrund steigender Anschlusskosten wirtschaftlich unattraktiv.

Geographische Einschränkungen für die Nutzung von tiefer Geothermie bilden das geologische Potenzial an hydrothermalen Geothermie. Weitere geographische Einschränkungen ergeben sich durch Siedlungsflächen und Infrastruktur. Hinzu kommen naturschutzfachliche Einschränkungen durch Nationalparks und Naturschutzgebiete [BfN, 2022] sowie Wasserschutzgebiete [LUBW, 2022] einschließlich erweiterter Schutzzonen.

Zur Berücksichtigung technischer Einschränkungen wurde für die Bohrung und die Heizzentrale ein Mindestflächenbedarf von 0,5 ha veranschlagt und eine Reinjektionstemperatur von mindestens 65 °C vorausgesetzt. Im Süddeutschen Molassebecken liegt die Reinjektionstemperatur bei 60 °C und damit unterhalb der Mindesttemperatur. Danach wird ein Wärmesenken-Abgleich durchgeführt.

Die Analyse von Potenzialflächen für saisonale Wärmespeicher konzentriert sich auf Erdbeckenspeicher. Zur Berechnung der Erdspeicherkapazität wurden folgende Annahmen getroffen:

- Geometrisch entspricht der Speicher einem Pyramidenstumpf.
- Das Flächen-zu-Volumen-Verhältnis (Flächenbedarf in m² pro Speichervolumen in m³) wurde als 0,073 festgelegt. Hierzu wurden fünf realisierte Erdbeckenspeicher [Xiang et al., 2022] geometrisch ausgewertet und der Mittelwert dieser Flächen-zu-Volumen-Verhältnisse verwendet.

- Die Seitenlänge des Speichers beträgt 60 % der Seitenlänge der Potenzialfläche. Die restliche Fläche wird von der Böschung in Anspruch genommen. Somit entspricht die Speicherfläche 36 % der Potenzialfläche. Dabei wurden die Geometrien der einzelnen Potenzialflächen nicht berücksichtigt, sondern als rechteckig angenommen.
- Die Wärmekapazität wurde auf 50 kWh/m³ festgelegt. Typische Werte liegen je nach Speichertemperatur und Kiesanteil im Speichermedium Wasser zwischen 30-80 kWh/m³.

4.2 Ergebnisse: Windenergie

Das meteorologische Potenzial der Windenergie ist auf 45 % der Fläche Baden-Württembergs ausreichend (Abbildung 3). Auf 39 % der Flächen im Landeseigentum ist die Windenergienutzung ebenfalls möglich. Durch die Berücksichtigung geographischer Einschränkungen wird das meteorologische Potenzial auf allen Flächen in Baden-Württemberg auf 41 % reduziert. Auf den Flächen im Landeseigentum sinkt es etwas stärker auf 32 %. Die größte Verringerung der für Windenergie nutzbaren Fläche erfolgt durch die Anwendung naturschutzfachlicher Kriterien. Dadurch reduziert sich der nutzbare Flächenanteil in Baden-Württemberg auf 26 %. Auf den Flächen im Landeseigentum bleiben nur 14 % für die Nutzung der Windenergie übrig. Durch die Verwendung des generischen Windenergieanlagentyps und der Berücksichtigung von Siedlungsflächen, Infrastruktur und weiteren Einschränkungen wird auf 12 % aller Flächen in Baden-Württemberg ein technisches Potenzial identifiziert. Auf den Flächen im Landeseigentum wird ein technisches Potenzial von 9 % abgeschätzt.

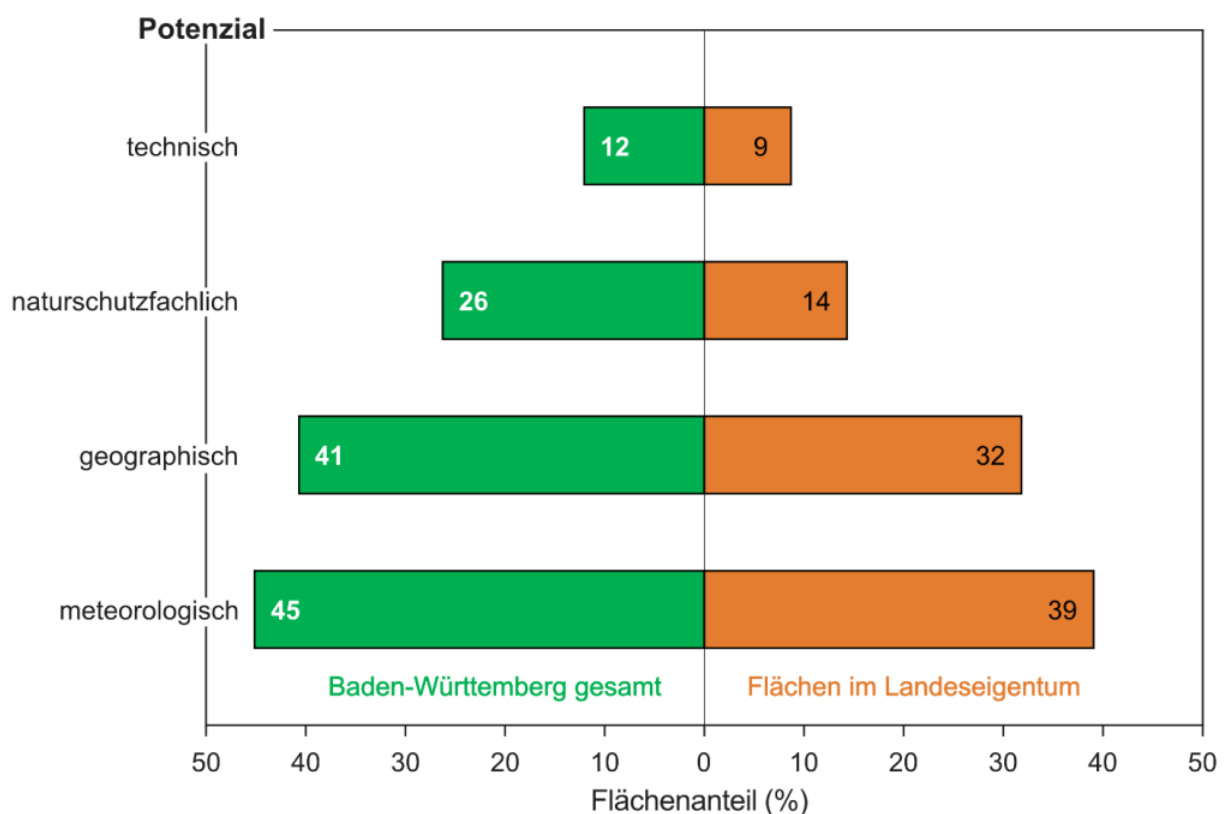


Abbildung 3: Flächenanteile des meteorologischen, geographischen, naturschutzfachlichen und technischen Windenergiepotenzials auf allen Flächen in Baden-Württemberg (grün) und auf Flächen, die sich im Landeseigentum befinden (orange).

Die Kapazitätsfaktoren variieren bei 165 m Höhe über dem Boden von unter 10 % bis über 36 % (Abbildung 4a). Besonders hohe Kapazitätsfaktoren treten in den Höhenlagen des Schwarzwaldes und der Schwäbischen Alb sowie in den Regionen Mittlerer Oberrhein, Rhein-Neckar, Heilbronn-Franken, Ostwürttemberg und Donau-Iller auf. In den Regionen Hochrhein-Bodensee, Südlicher Oberrhein, Stuttgart und Bodensee-Oberschwaben sind die Kapazitätsfaktoren über große Flächen hinweg niedrig. Im Durchschnitt beträgt der Kapazitätsfaktor in ganz Baden-Württemberg 19,9 %. Auf den Flächen im Landeseigentum variieren die Kapazitätsfaktorwerte ebenfalls von 10 % bis über 36 % (Abbildung 4b). In allen Regionen fallen durch die Lage dieser Flächen Standorte mit besonders hohen Kapazitätsfaktoren weg. Der durchschnittliche Kapazitätsfaktor beträgt 20,0 %.

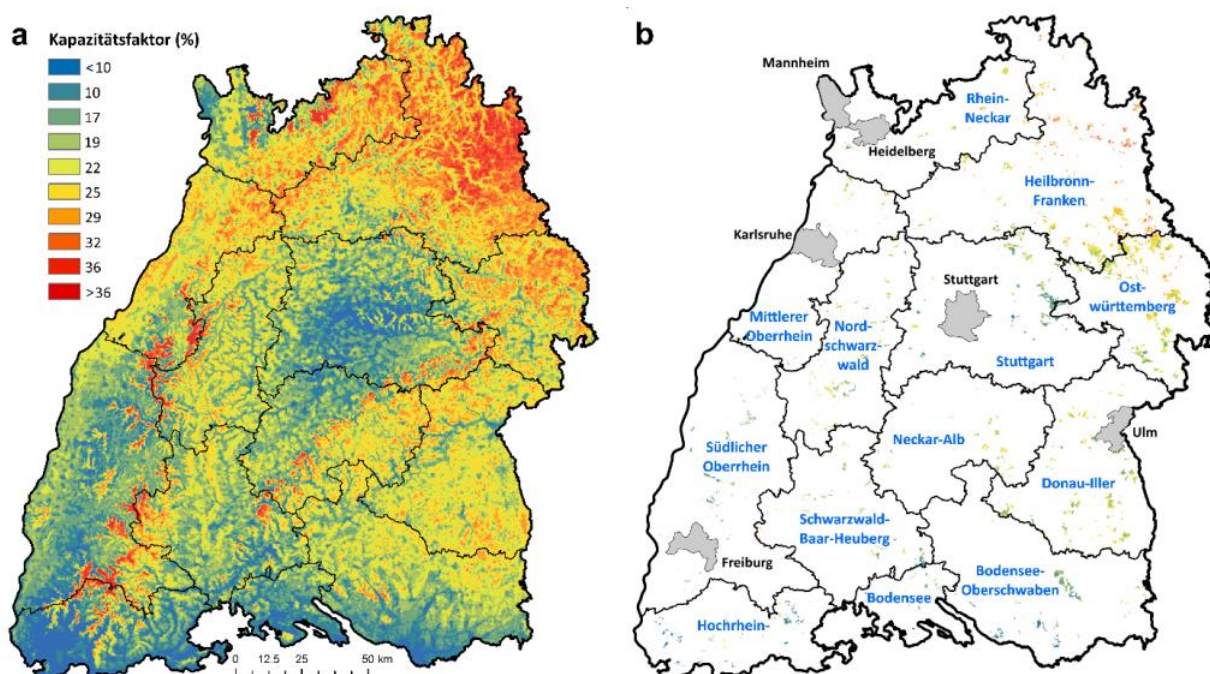


Abbildung 4: Kapazitätsfaktor (%) einer 6,0 MW Windenergieanlage in 165 m über dem Boden (a) in Baden-Württemberg (25 m × 25 m) und (b) auf Flächen im Landeseigentum, die durch keines der in Tabelle 2 aufgeführten Kriterien eingeschränkt werden. Baden-Württemberg ist in zwölf Regionen unterteilt, die mit blauer Schrift gekennzeichnet sind.

4.2.1 Windenergiepotenziale

Das meteorologische Potenzial auf landeseigenen Flächen, die einen durchschnittlichen jährlichen Kapazitätsfaktorwert von größer als 20 % aufweisen, beträgt 68,9 TWh/Jahr (Abbildung 5). Insgesamt könnten auf diesen Flächen, auf denen der durchschnittliche jährliche Kapazitätsfaktor durch den Ausschluss von ertragsarmen Standorten auf 26,0 % ansteigt, maximal weitere 5.022 Windenergieanlagen errichtet werden. Geographische Einschränkungen reduzieren das Potenzial auf 63,6 TWh/Jahr, naturschutzfachliche Einschränkungen senken das Potenzial weiter auf 29,1 TWh/Jahr ab, da nur noch 2.186 Windenergieanlagen installiert werden können. Der durchschnittliche jährliche Kapazitätsfaktor sinkt dabei auf 25 %. Das technische Potenzial beträgt

18,3 TWh/Jahr und wird durch 1.366 Windenergieanlagen mit einem durchschnittlichen jährlichen Kapazitätsfaktor von 25,0 % erreicht.

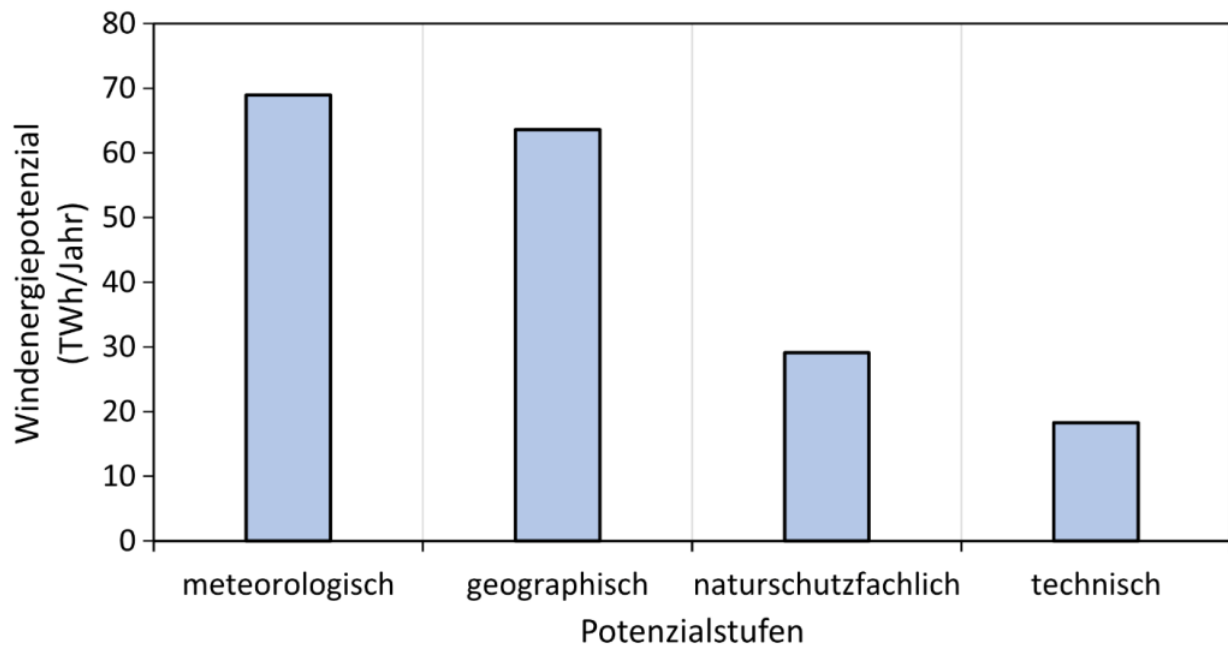


Abbildung 5: Durchschnittlicher jährlicher Windenergieertrag (TWh/Jahr) in Baden-Württemberg auf Flächen im Landeseigentum unter Berücksichtigung des (a) meteorologischen, (b) geographischen, (c) naturschutzfachlichen und (d) technischen Windenergiepotenzials.

Die Windenergiepotenziale sind in den zwölf Regionsflächen sehr ungleich verteilt (Abbildung 6). Die Potenziale der nordöstlichen Regionen sind generell höher als die der südwestlichen. In der Region Heilbronn-Franken steht das mit Abstand größte meteorologische (12,1 TWh/Jahr) und technische (6,7 TWh/Jahr) Windenergiepotenzial zur Verfügung. Durch gute Windbedingungen und geringe Einschränkungen ist dort die prozentuale Abnahme des Windenergiepotenzials über die Potenzialstufen hinweg gering.

Im Gegensatz dazu steht in der Region Hochrhein-Bodensee nur ein meteorologisches Potenzial von 2,1 TWh/Jahr zur Verfügung, das durch zahlreiche naturschutzfachliche Einschränkungen auf ein technisches Potenzial von 0,2 TWh/Jahr reduziert wird. Auch in der Region Südlicher Oberrhein ist der Rückgang des Windenergiepotenzials durch naturschutzfachliche Einschränkungen erheblich. Hier sinkt das meteorologische Potenzial von 6,8 TWh/Jahr auf ein technisches Potenzial von 0,3 TWh/Jahr.

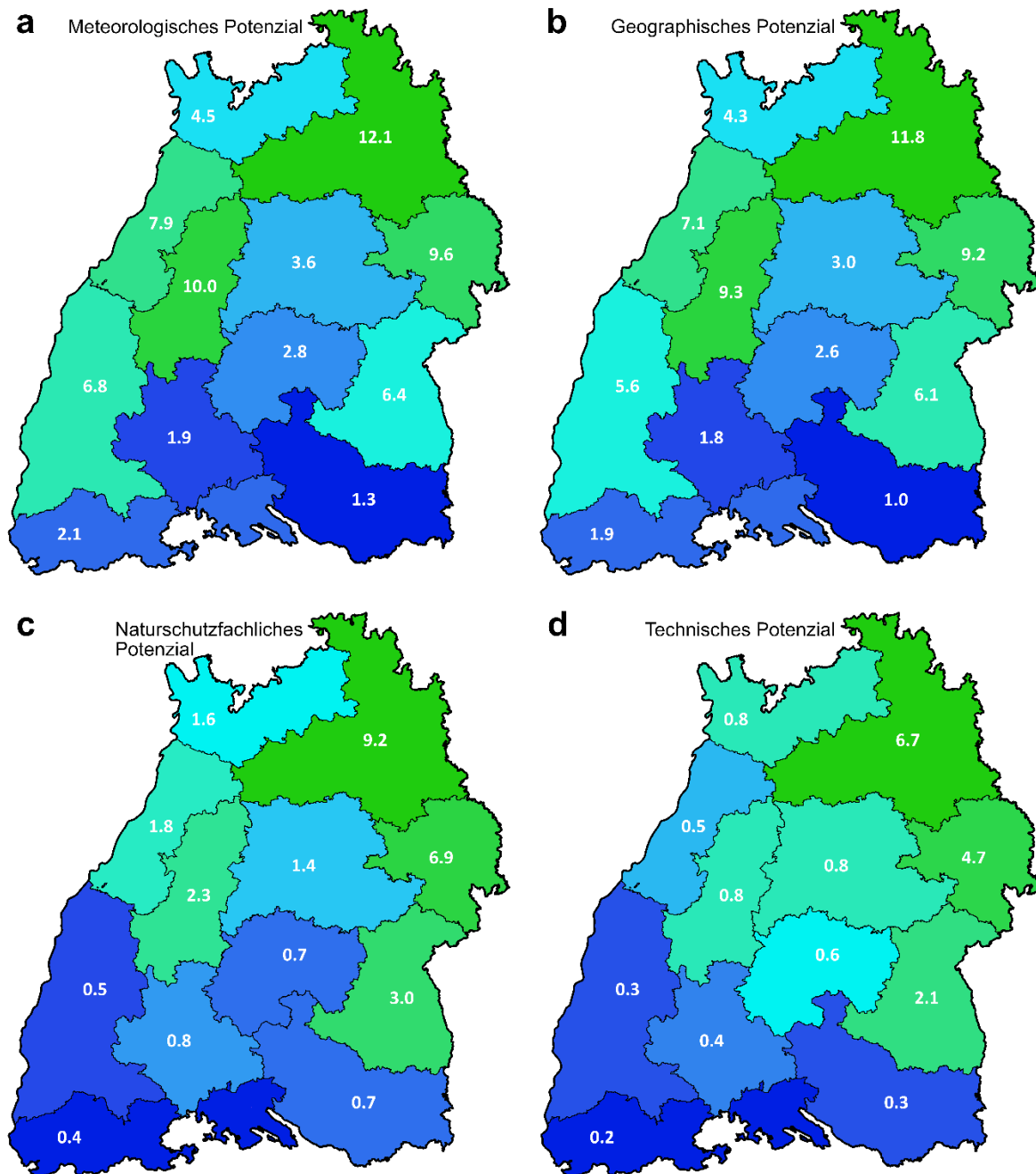


Abbildung 6: Durchschnittlicher jährlicher Windenergieertrag (TWh/Jahr) in den zwölf Regionen Baden-Württembergs auf Flächen im Landeseigentum basierend auf dem (a) meteorologischen, (b) geographischen, (c) naturschutzfachlichen und (d) technischen Potenzial.

Auch die durchschnittlichen Kapazitätsfaktorwerte unterscheiden sich auf den untersuchten Potenzialstufen zwischen den Regionen (Abbildung 7). Ein Beispiel dafür ist die Region Südlicher Oberrhein. Dort beträgt der durchschnittliche Kapazitätsfaktor verbunden mit dem geographischen Potenzial 30 %. Er sinkt auf 26 %, wenn er in Bezug zum naturschutzfachlichen Potenzial gesetzt wird. Im Gegensatz dazu steigt der durchschnittliche Kapazitätsfaktor in der Region Mittlerer Oberrhein von 27 % für das meteorologische Potenzial auf 28 % für das technische Potenzial leicht an. Dies ist

auf der Ebene der Regionen der höchste durchschnittliche Kapazitätsfaktor verbunden mit dem technischen Potenzial. Die niedrigsten durchschnittlichen Kapazitätsfaktorwerte von 20 % treten in der Region Bodensee-Oberschwaben auf. Dies deutet an, dass dort das technische Potenzial nur sehr eingeschränkt genutzt werden kann.

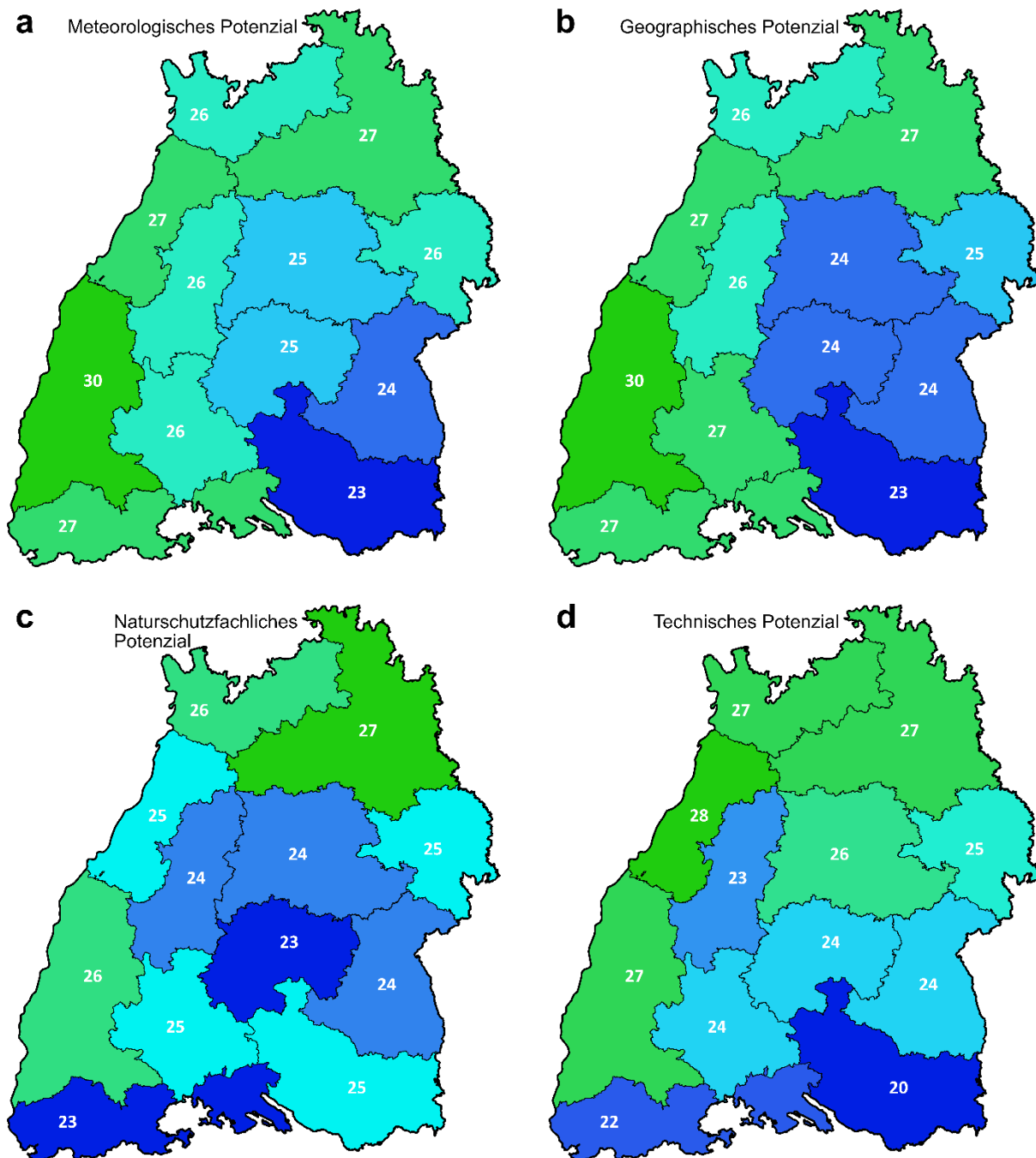


Abbildung 7: Durchschnittlicher Kapazitätsfaktor (%) in den zwölf Regionen Baden-Württembergs auf Flächen im Landeseigentum basierend auf dem (a) meteorologischen, (b) geographischen, (c) naturschutzfachlichen und (d) technischen Potenzial.

4.2.2 Windenergieausbauszenarien

Der durchschnittliche kumulierte Windenergieertrag ist stark abhängig vom angewandten Szenario (Abbildung 8a). Der höchste Ertrag wird im Szenario S3 erzielt: Schwache Einschränkungen und die Nutzung von Waldflächen und Erhebungen bei der Windenergieanlagenverteilung führen dazu, dass im günstigsten Fall bis zu 1.677 neue Windenergieanlagen in den Regionen installiert werden können.

Diese neuen Windenergieanlagen würden zusammen 26,6 TWh/Jahr produzieren. Durch die Anwendung strenger Einschränkungen, wie sie in S1 definiert wurden, würde sich der durchschnittliche kumulierte Windenergieertrag auf 24,3 TWh/Jahr reduzieren. Noch drastischer ist der Ertragsverlust durch den Ausschluss von Waldflächen und/oder Erhebungen. In S4 beträgt der durchschnittliche kumulierte Ertrag 18,6 TWh/Jahr und in S2 nur 15,1 TWh/Jahr.

Es gibt zwei Hauptgründe für die Ertragsreduktion: Erstens sinkt die Anzahl der verfügbaren Standorte, sodass in S2 und S4 deutlich weniger als 1.677 neue Windenergieanlagen installiert werden können. Zweitens ist die Windressource auf den verbleibenden Standorten, auf denen die Windenergieanlagen installiert werden, unproduktiver. Dies zeigt sich in geringeren durchschnittlichen Kapazitätsfaktoren von S2 und S4 verglichen mit S1 und S3 (Abbildung 8b).

Die höchsten durchschnittlichen Kapazitätsfaktoren werden in S3 erreicht, in dem mehr als 800 Windenergieanlagen einen durchschnittlichen Kapazitätsfaktor von mindestens 30 % aufweisen. In S1 sind es noch etwa halb so viele Windenergieanlagen. Die Szenarien S2 und S4, die Waldflächen und Erhebungen ausschließen, erlauben die Installation von lediglich rund 200 Windenergieanlagen mit einem durchschnittlichen Kapazitätsfaktor von über 30 %.

Die nachfolgende Berechnung der Stromgestehungskosten basiert auf den Annahmen in Tabelle 3. Diese Annahmen stützen sich auf der Studie „Kostensituation der Windenergie an Land 2023“ der Deutschen Windguard [Deutsche Windguard, 2023] und berücksichtigen darüber hinaus aktuelle Marktentwicklungen und Prognosen.

Tabelle 3: Annahmen zur Berechnung der Stromgestehungskosten der Windenergie in Baden-Württemberg

Anlagenleistung	6.000 kW
Nabenhöhe	165 m
Rotordurchmesser	162 m
Inbetriebnahmejahr	2024
Kalkulationsdauer	20 Jahre
Spezifische Investitionskosten	1.144 EUR/kW
Investitionsnebenkosten	3.726.000 EUR
Betriebskosten fix (1.Dekade/2.Dekade)	29 EUR/kW / 35 EUR/kW
Betriebskosten variabel (1.Dekade/2.Dekade)	0,0062 EUR/kWh / 0,0074 EUR/kWh

Angenommene EEG-Zuschlagshöhe *)	0,0735 EUR/kWh **)
EEG-Vergütungsdauer	20 Jahre
Inflationsrate	1,0 %
*) Nach Zuschlagserteilung im Rahmen der Ausschreibungen erfolgt eine standortspezifische Anpassung anhand der Gütefaktoren gemäß § 36h EEG. Gerade für Standorte in Süddeutschland kann der Korrekturfaktor bei bis zu 1,55 liegen, so dass der tatsächliche anlegbare Wert deutlich höher liegt.	***) Hier wurde der mit dem Solarpaket I für Anlagen, die ab dem 16.05.2024 in Betrieb gehen, angehobene Höchstwert für den anzulegenden Wert am Referenzstandort unterstellt. Dieser erscheint realisierbar, da aufgrund der bekannten Genehmigungssituation auch für die kommenden Ausschreibungsrunden von keinem allzu hohen Wettbewerbsniveau in den Ausschreibungen ausgegangen werden kann.

Die Stromgestehungskosten hängen stark von den Kapazitätsfaktoren ab (Abbildung 8). In S2 und S4 sind diese Kosten deutlich höher als in S1 und S3. In S4 liegen die Kosten bei etwa 700 Windenergieanlagen unter 0,08 EUR/kWh, in S1 bei rund 1.000 und in S3 bei mehr als 1.300 Anlagen.

Die höchsten Stromgestehungskosten treten in S2 auf. Aufgrund des Ausschlusses von Waldflächen und Erhebungen sowie strenger Einschränkungen können nur rund 500 Windenergieanlagen mit Kosten von 0,08 EUR/kWh betrieben werden.

Die szenariobasierten Berechnungen verdeutlichen, dass durch den Ausschluss von Waldflächen und Erhebungen

- der kumulierte Ertrag um 38,0 % (strenge Einschränkungen) bzw. 29,9 % (schwache Einschränkungen) reduziert wird,
- die Kapazitätsfaktoren der neuinstallierten Windenergieanlagen geringer sind,
- die Stromgestehungskosten höher liegen.

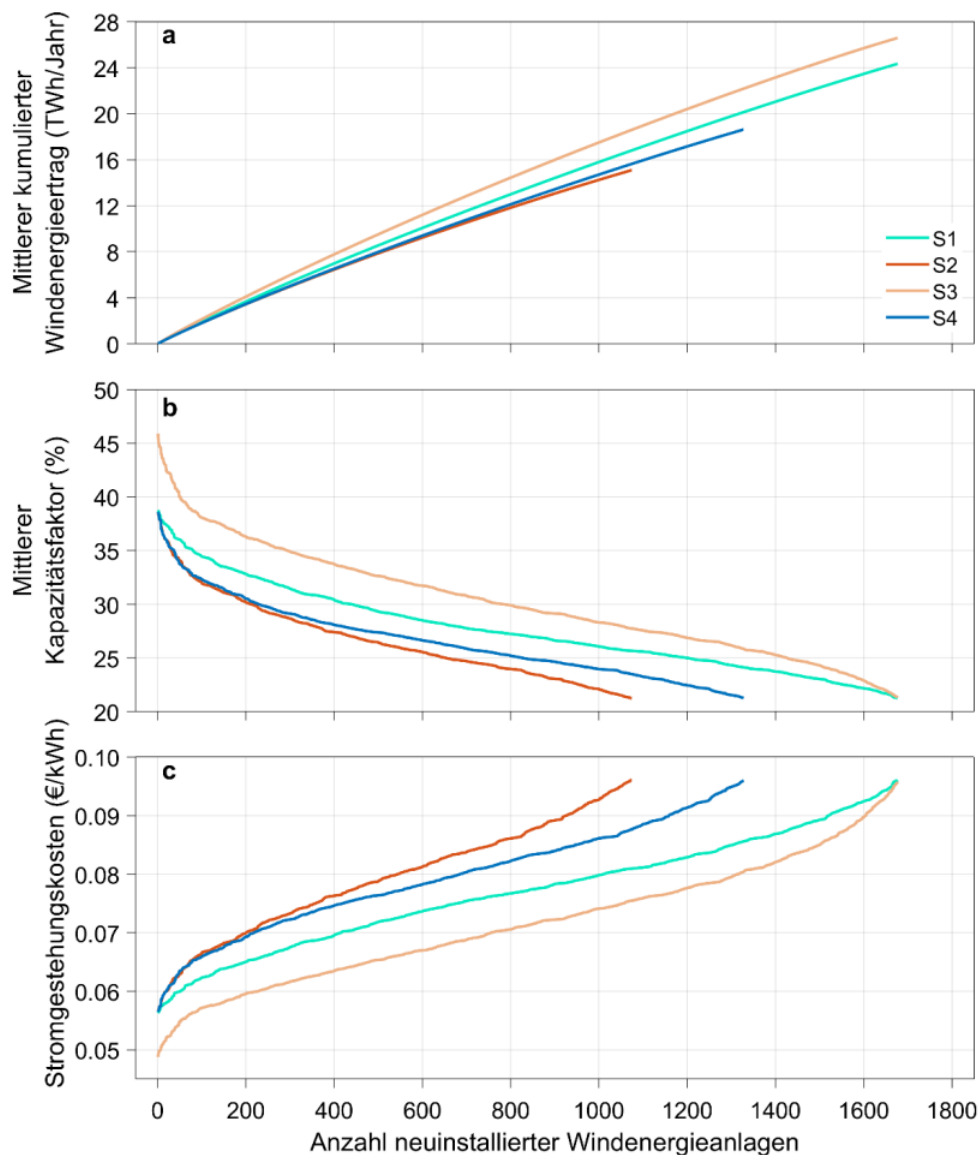


Abbildung 8: (a) Mittlerer kumulierter jährlicher Windenergieertrag, (b) mittlerer jährlicher Kapazitätsfaktor und (c) Stromgestehungskosten pro neuinstallierter Windenergieanlage auf Flächen in Baden-Württemberg in den Windenergieausbauszenarien S1 bis S4.

Die Auswirkungen der Szenarien auf den Ertrag, den Kapazitätsfaktor und die Stromgestehungskosten sind räumlich heterogen. Dies zeigt sich durch bemerkenswerte Unterschiede zwischen den Regionen. Der mit Abstand höchste kumulierte Ertrag wird in allen Szenarien in der Region Heilbronn-Franken erzielt (Abbildung 9a). Er liegt zwischen 3,5 TWh/Jahr in S2 und 3,9 TWh/Jahr in S1 und S3. Hier sind die Unterschiede zwischen den Szenarien somit gering. Anders verhält es sich in den Regionen Südlicher Oberrhein und Hochrhein-Bodensee. In S2 kann nur ein Ertrag von 0,1 TWh/Jahr erzielt werden, da potenzielle Windenergieanlagenstandorte in diesen Regionen vornehmlich auf Waldflächen und Erhebungen liegen, was sich in den deutlich höheren Erträgen in S1 und S3 zeigt.

Die durchschnittlichen Kapazitätsfaktoren unterscheiden sich ebenso, sowohl zwischen den Regionen als auch zwischen den Szenarien (Abbildung 9b). Bemerkenswert sind die hohen durchschnittlichen Kapazitätsfaktoren in den Regionen Südlicher Oberrhein und Hochrhein-Bodensee in S3 im Vergleich zu den anderen Szenarien. Sie übersteigen einen Wert von 30 %, während S2 nur einen

Wert von rund 22 % aufweist. Eine ähnlich ausgeprägte Diskrepanz der durchschnittlichen Kapazitätsfaktoren zwischen den Szenarien findet sich in den Regionen Schwarzwald-Baar-Heuberg, Neckar-Alb und Nordschwarzwald.

Entsprechend stark variieren auch die durchschnittlichen Stromgestehungskosten zwischen den Regionen und Szenarien (Abbildung 9c). Die niedrigsten Kosten liegen in der Region Heilbronn-Franken in S1 und S3 sowie in der Region Südlicher Oberrhein in S3 bei etwas über 0,06 EUR/kWh. Allerdings können die Kosten in der Region Südlicher Oberrhein auch sehr hoch sein, wenn die ertragreichen Standorte nicht genutzt werden können: In S2 steigen sie auf über 0,09 EUR/kWh.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Auswirkungen des Ausschlusses von Waldflächen und Erhebungen bei der Verteilung von Windenergieanlagen immer im Einzelfall geprüft werden sollten. In Regionen wie Heilbronn-Franken hätte der Ausschluss von Waldflächen und Erhebungen geringe Auswirkungen als in anderen Regionen wie z. B. der Region Südlicher Oberrhein.

Von einem großflächigen Ausschluss von Wäldern und Erhebungen in ganz Baden-Württemberg sollte abgesehen werden, da dies zu geringen Erträgen, Kapazitätsfaktorwerten und höheren Stromgestehungskosten führen würde. Zudem hätte es eine sehr ungleichmäßige Verteilung der Windenergieanlagenverteilung zwischen den Regionen zur Folge. Eine standortspezifische Prüfung, ob eine Windenergieanlage jedoch auch außerhalb des Waldes gebaut werden kann ist grundsätzlich zu begrüßen.

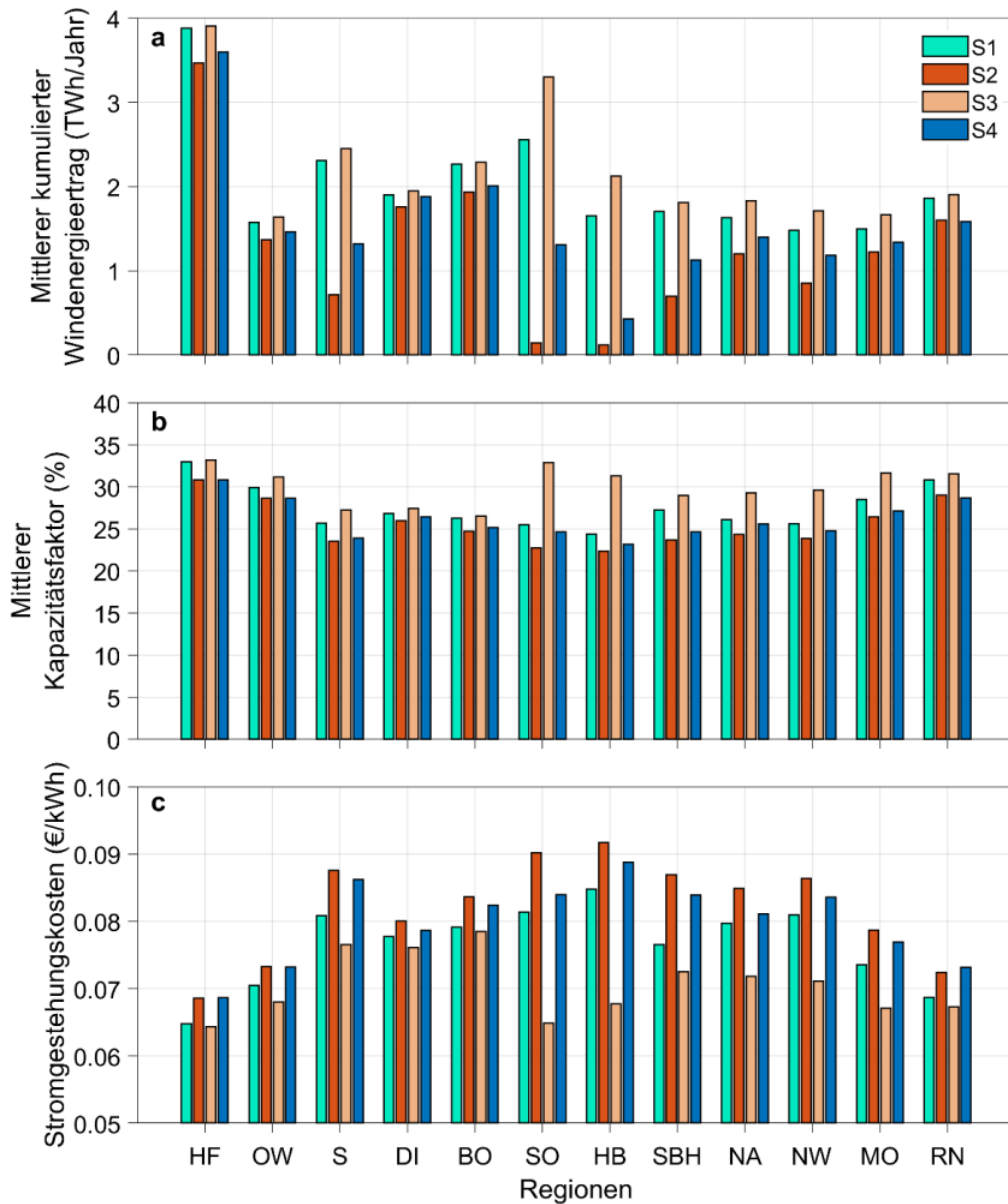


Abbildung 9: (a) Mittlerer kumulierter jährlicher Windenergieertrag, (b) mittlerer jährlicher Kapazitätsfaktor und (c) mittlere Stromgestehungskosten auf den Flächen der zwölf Regionen Heilbronn-Franken (HF), Ostwürttemberg (OW), Stuttgart (S), Donau-Iller (DI), Bodensee-Oberschwaben (BO), Südlicher Oberrhein (SO), Hochrhein-Bodensee (HB), Schwarzwald-Baar-Heuberg (SBH), Neckar-Alb (NA), Nordschwarzwald (NW), Mittlerer Oberrhein (MO) und Rhein-Neckar (RN) in den Windenergieausbauszenarien S1 bis S4.

4.2.3 Bewertung der Schwerpunktsetzung beim Windenergieausbau unter (Kosten)Effizienz Gesichtspunkten

Um die Kostenunterschiede verschiedener Schwerpunktsetzungen beim Ausbau der Windenergie zu vergleichen, wurden die Ausbauverteilung und die jeweiligen Konsequenzen für die Stromgestehungskosten für drei unterschiedliche Konstellationen der Windenergieanlagenverteilung in Baden-Württemberg analysiert.

Im ersten Fall wurde der Windenergieausbau unabhängig von bestehenden Planungsvorhaben ausschließlich nach dem Windenergieertrag optimiert. Es würden zuerst die Flächen mit der höchsten Standortgüte genutzt und dann in absteigender Reihenfolge die jeweils schlechteren Standorte hinzugenommen. Hieraus ergibt sich eine Konzentration der Anlagenstandorte in den Regionen, mit den höchsten Windgeschwindigkeitswerten. Gleichzeitig werden mit 6,28 ct/kWh im Schnitt die niedrigsten Stromerzeugungskosten erzielt.

Im zweiten Fall wurden die regionsspezifischen Flächenvorgaben aus dem KlimaG BW unterstellt, jedoch innerhalb der einzelnen Regionen die ertragreichsten Standorte zuerst genutzt. In absteigender Reihenfolge folgenden dann die weiteren Standorte, um das vorgegebene regionsspezifische Flächenziel zu erfüllen. Die Stromgestehungskosten liegen in diesem Fall bei durchschnittlich 7,11 ct/kWh und damit rund 13 % über einer allein nach Kosteneffizienz-Gesichtspunkten gewählten Anlagenverteilung.

Im dritten Fall wurden ebenfalls die regionsspezifischen Flächenvorgaben unterstellt, allerdings wurde hier die Nutzung von Waldflächen und Erhebungen zusätzlich ausgeschlossen. Dieses Vorgehen spiegelt die aktuellen Widerstände der Bevölkerung gegen Windausbauvorhaben, die insbesondere bei Wald- und Bergstandorten besonders ausgeprägt sind. Würde man dem nachgeben, lägen die Stromgestehungskosten bei durchschnittlich 7,63 ct/kWh und damit nochmal rund 7 % höher. Ein solcher Ausbau wäre damit mit rund 21 % höheren Stromgestehungskosten verbunden (Abbildung 10), als die rein nach Stromertrag optimierte Variante ganz ohne Vorgaben. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass mangels Datengrundlage in die Berechnung keine Mehrkosten für Wald- und Bergstandorte aufgenommen werden konnten. Diese werden zwar oftmals angeführt, jedoch fehlen belastbare, dokumentierte Zahlenwerke, anhand derer man eine seriöse Berechnung durchführen könnte.

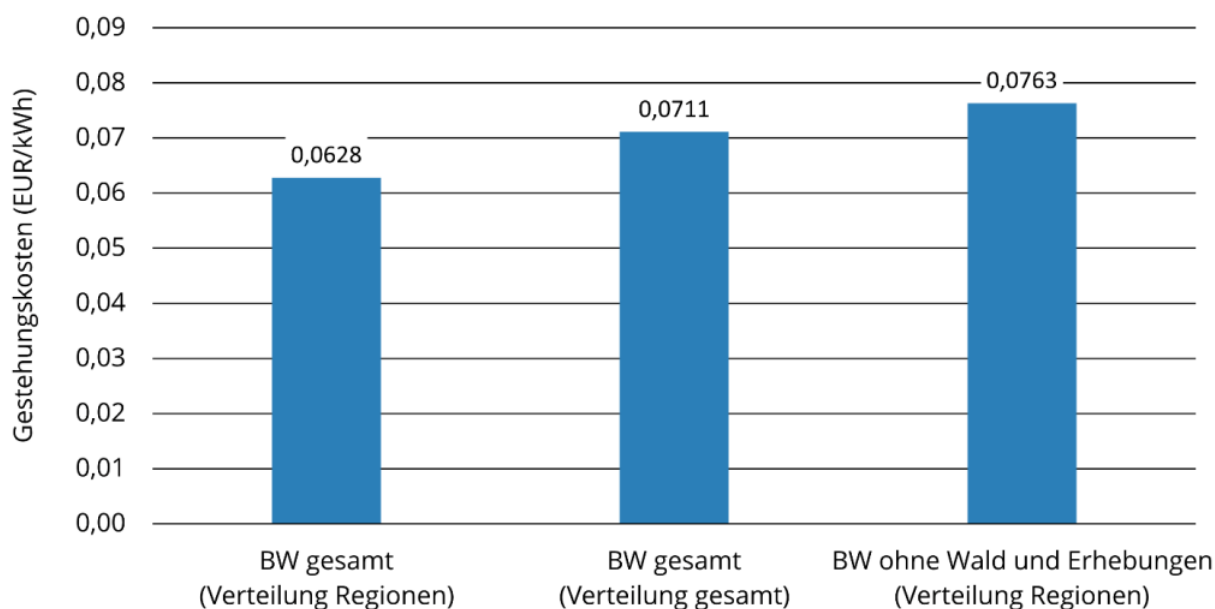


Abbildung 10: Stromgestehungskosten in den Verteilungsfällen Baden-Württemberg. BW gesamt (Verteilung gesamt), BW gesamt (Verteilung Region) und BW ohne Wald und Erhebungen (EUR/kWh).

4.3 Ergebnisse: Freiflächen-Photovoltaik

Die Kapazitätsfaktoren der Freiflächen-Photovoltaik variieren überwiegend zwischen 10,8 % und 11,6 % (Abbildung 11). Diese Schwankungen sind deutlich geringer als bei der Windenergie. Die höchsten Kapazitätsfaktorwerte finden sich im Süden Baden-Württembergs, insbesondere in den Regionen Südlicher Oberrhein, Hochrhein-Bodensee und Bodensee-Oberschwaben. Die niedrigsten Werte treten in den Hochlagen des Schwarzwaldes und der Schwäbischen Alb sowie im Nordosten Baden-Württembergs auf. Der durchschnittliche Kapazitätsfaktor liegt bei 11,2 %.

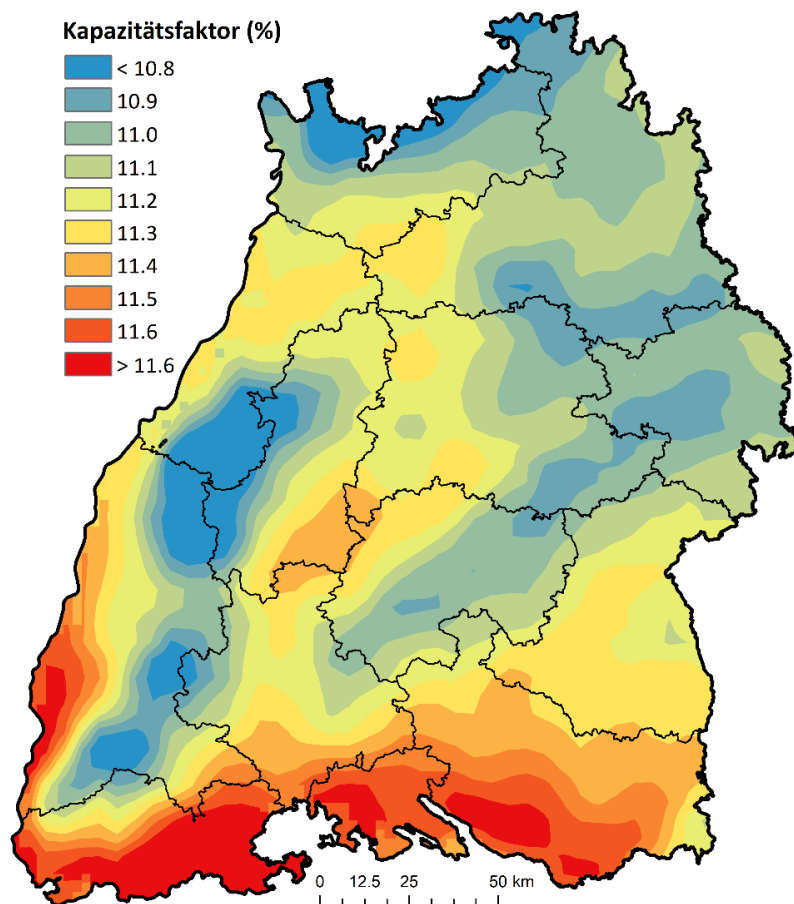


Abbildung 11: Durchschnittlicher jährlicher Kapazitätsfaktor (%) eines generischen Photovoltaikmoduls in Baden-Württemberg (räumliche Auflösung: $0,05^\circ \times 0,05^\circ$).

Das meteorologische Potenzial der Freiflächen-Photovoltaik auf landeseigenen Flächen beträgt 605,4 TWh/Jahr (Abbildung 12) bei einem durchschnittlichen Kapazitätsfaktor von 11,1 %. Geographische Einschränkungen reduzieren dieses Potenzial um 35,1 % auf 392,9 TWh/Jahr. Das naturschutzfachliche Potenzial liegt bei 202,1 TWh/Jahr. Das technische Potenzial beträgt 18,6 TWh/Jahr. Die durchschnittlichen Kapazitätsfaktorwerte bleiben dabei nahezu unverändert.

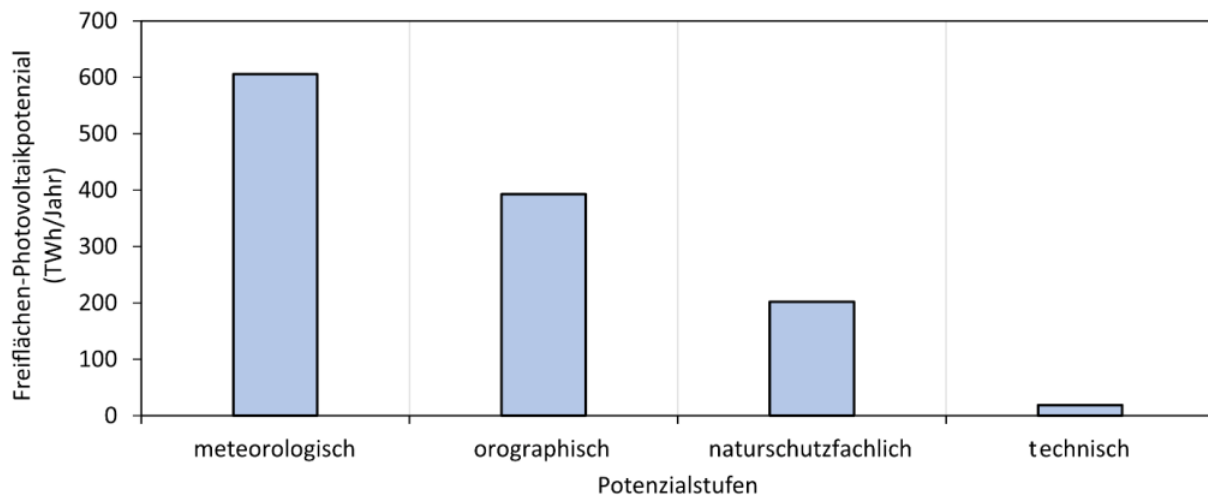


Abbildung 12: Durchschnittliches jährliches Freiflächen-Photovoltaikpotenzial in Baden-Württemberg auf Flächen im Landeseigentum unter Berücksichtigung des (a) meteorologischen, (b) geographischen, (c) naturschutzfachlichen (d) und technischen Potenzials.

Abbildung 13 zeigt den durchschnittlichen Photovoltaikertrag auf vier Potenzialstufen, aufgeteilt nach Regionen. Das meteorologische Potenzial ist in der Region Nordschwarzwald mit 91,4 TWh/Jahr am höchsten, während es in der Region Schwarzwald-Baar-Heuberg mit 23,9 TWh/Jahr am geringsten ist. Das geographische Potenzial ist in den südwestlichen Regionen niedriger als in den nordöstlichen. Am höchsten ist es mit 48,3 TWh/Jahr in der Region Ostwürttemberg. Die naturschutzfachlichen Einschränkungen reduzieren das Potenzial insbesondere in den südwestlichen Regionen erheblich. In der Region Neckar-Alb beträgt das Freiflächen-Photovoltaikpotenzial 6,1 TWh/Jahr, während es in den nordöstlichen Regionen nur geringfügig sinkt.

Da Waldflächen, die einen sehr hohen Anteil an den Flächen im Landeseigentum haben, ein Ausschlusskriterium für Freiflächen-Photovoltaik darstellen, ist das technische Potenzial deutlich geringer als naturschutzfachliche Potenzial. In den Regionen Mittlerer Oberrhein und Bodensee-Oberschwaben liegt es jeweils bei 2,2 TWh/Jahr, während es in der Region Schwarzwald-Baar-Heuberg nur 0,7 TWh/Jahr beträgt.

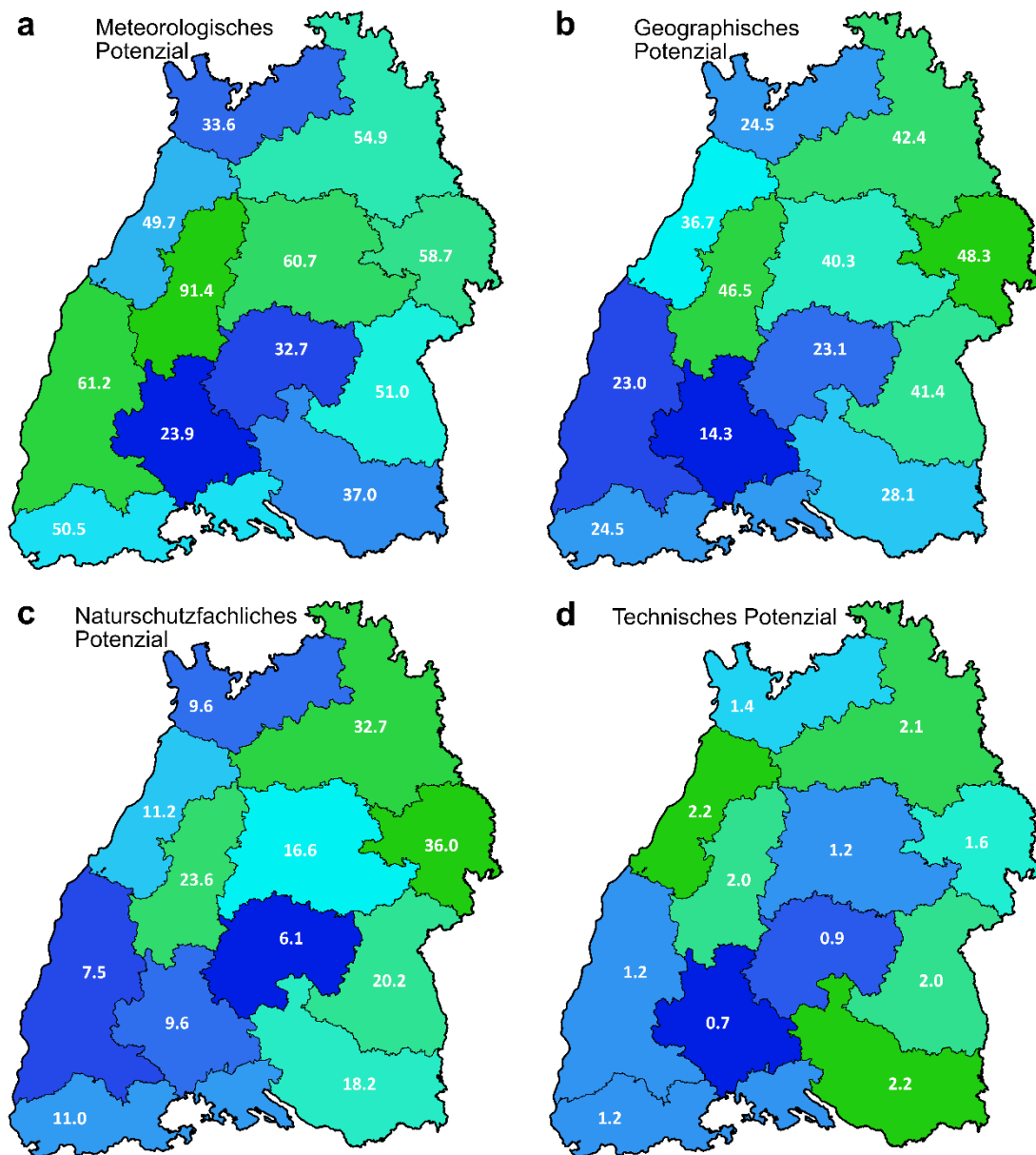


Abbildung 13: Durchschnittliches jährliches Freiflächen-Photovoltaikpotenzial (TWh/Jahr) in den zwölf Regionen Baden-Württembergs auf Flächen im Landeseigentum unter Berücksichtigung des (a) meteorologischen, (b) geographischen, (c) naturschutzfachlichen und (d) technischen Potenzials.

Die Abbildung 14 zeigt die Kapazitätsfaktorwerte, die mit den durchschnittlichen jährlichen Potenzialen in den zwölf Regionen verbunden sind. Auf den vier Potenzialstufen unterscheiden sich die durchschnittlichen Kapazitätsfaktoren sowohl in ihrem Wert als auch in ihrer räumlichen Verteilung nur geringfügig. Die höchsten durchschnittlichen Kapazitätsfaktorwerte finden sich in den Regionen Hochrhein-Bodensee und Bodensee-Oberschwaben mit rund 11,5 %. Die niedrigsten durchschnittlichen Kapazitätsfaktorwerte liegen in den nördlichen Regionen bei etwa 11,0 %. Diese räumliche Verteilung hat kaum Einfluss auf die Potenzialverteilung. Daher ist die Flächenverfügbarkeit der wichtigste Faktor für das Freiflächen-Photovoltaikpotenzial, im Gegensatz zum Windenergiepotenzial, für das die Ressourcenverfügbarkeit das wichtigste Kriterium ist.

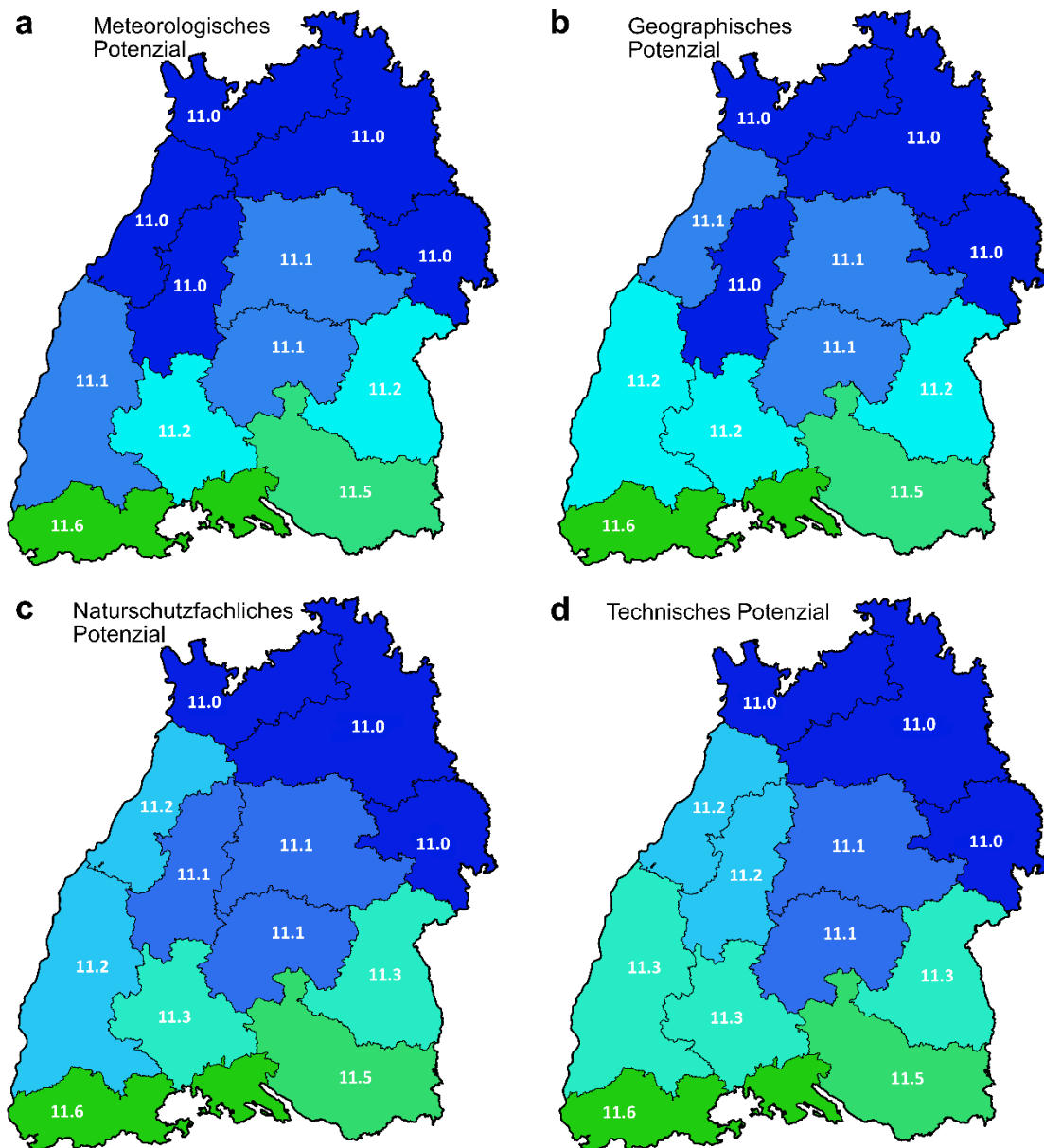


Abbildung 14: Durchschnittlicher Kapazitätsfaktor (%) für Freiflächenphotovoltaik in den zwölf Regionen Baden-Württembergs auf Flächen im Landeseigentum basierend auf dem (a) meteorologischen, (b) geographischen, (c) naturschutzfachlichen und (d) und technischen Potenzial.

4.4 Ergebnisse: Solarthermie

Solarenergie kann neben der Verstromung über Photovoltaik, durch die Nutzung von Solarthermieanlagen auch in Wärme umgewandelt werden. Für Freiflächen-Solarthermie kommen dabei dieselben Potenzialflächen wie bei der Freiflächen-Photovoltaik in Betracht und die produzierte Wärme wird in Wärmenetze (anstatt Strom in Stromnetze) eingespeist. Im Unterschied zum Strom muss jedoch zusätzlich die Nähe zu einem Wärmenetz oder zu geeigneten Wärmesenken vorhanden sein.

Zur Berechnung der geographischen und naturschutzrechtlichen Potenzialflächen werden analog die Kriterien wie bei Photovoltaik angesetzt (Abbildung 15).

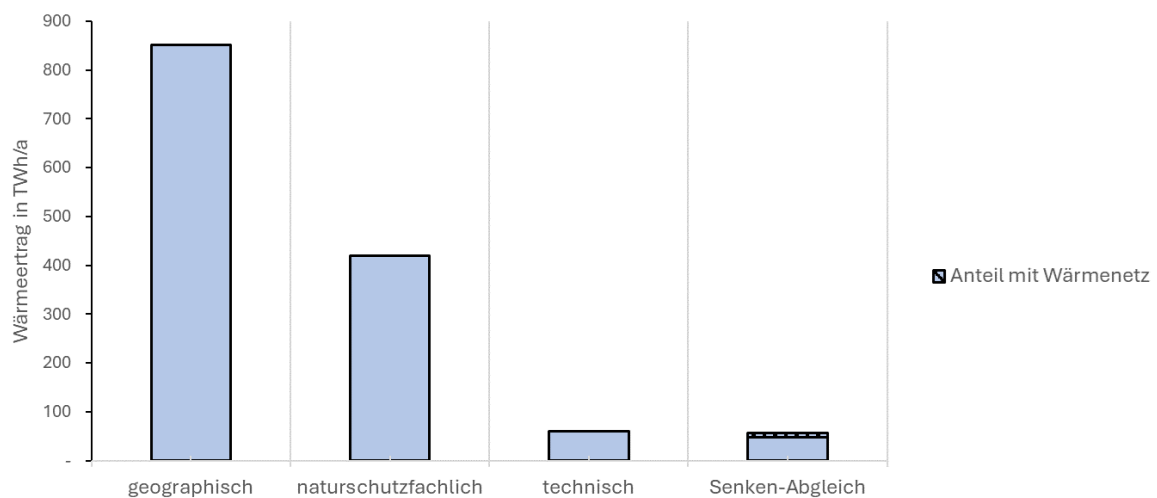


Abbildung 15: Durchschnittlicher jährlicher Solarthermieertrag (TWh/Jahr) in Baden-Württemberg auf Flächen im Landeseigentum unter Berücksichtigung des (a) geographischen, (b) naturschutzfachlichen, (c) technischen und (d) technischen Potenzials ohne Waldflächen sowie (e) nach einem Senken-Abgleich.

Ergänzend zu den bereits getroffenen Annahmen wird für die technischen Potenzialflächen eine Mindestfläche von 2.000 m² Bodenfläche angenommen, um eine ausreichend große Wärmeenerzeugung zu gewährleisten. Der Abgleich mit nahegelegenen Wärmesenken und -netzen in einem Radius von maximal 2 km erfolgt durch die in 4.1.2 beschriebene Methodik. Zur Abschätzung des auf diesen Flächen erreichbaren Wärmepotenzials wird eine Wärmebereitstellung von 400 kWh/m² Kollektorfläche [Peters et al., 2021] und ein Verhältnis von Bodenfläche zu Kollektorfläche von 2:1 [UM, 2019] angenommen. **Nach dem Abgleich mit nahegelegenen Wärmesenken verbleibt noch ein Potenzial von 28 TWh/Jahr, wovon 4 TWh/Jahr auf Flächen verortet sind, welche weniger als 2 km von einem bestehenden Wärmenetz entfernt sind.** Die Verteilung der Potenzialflächen ist in Abbildung 16 dargestellt.

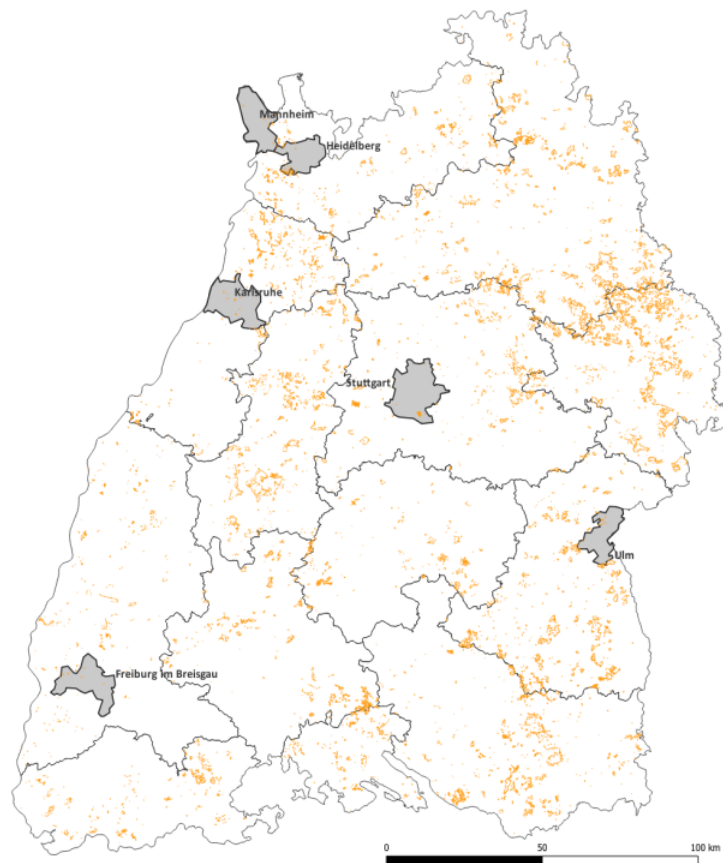


Abbildung 16: Potenzielle Standorte für Freiflächen-Solarthermie (gelb) auf landeseigenen Flächen nach dem Senken-Abgleich.

Ein Beispiel für eine Freiflächen-Solarthermie Nutzung ist die in Abbildung 17 dargestellte Fläche von 3,8 ha am Rand eines Universitätscampus. Auf dieser Fläche könnte durch die Installation von Solarthermieranlagen und die Nähe zu einer bereits bestehenden Heizzentrale eine effiziente Wärmeversorgung realisiert werden. Entsprechend der getroffenen Annahmen ergibt sich auf dieser Fläche ein Wärmebereitstellungspotenzial von 11 GWh/Jahr. Alternativ könnte die Fläche auch mit Photovoltaik belegt werden und zur Eigenstromversorgung des Campus oder auch einer Großwärmepumpe verwendet werden. Positiv lässt sich an diesem Beispiel bewerten, dass sich in der Nähe eine Kläranlage befindet, an der zusätzlich eine Wärmepumpe installiert werden könnte.



Abbildung 17: Beispielfläche mit einer Größe von 3,8 ha zur Bereitstellung von 11 GWh/Jahr Wärme durch Freiflächen-Solarthermie oder alternativ zur Belegung mit Freiflächen-Photovoltaik.

4.5 Ergebnisse: Tiefe Geothermie

Unter tiefer Geothermie versteht man die Nutzung von unterirdischen Wärmereservoirien ab einer Tiefe von 400 m. Man unterscheidet hier zwischen hydrothermalen und petrothermalen Geothermie. Hydrothermale Geothermie nutzt zirkulierendes Thermalwasser als Wärmereservoir, während petrothermale Geothermie die im Tiefengestein gespeicherte Wärmeenergie, z. B. über geschlossene Verbundsysteme oder verbesserte geothermale Systeme, nutzt.

Hydrothermale Geothermie wird in Deutschland bereits vielfach, beispielsweise im Molassebecken um München durch viele hydrothermale Geothermie-Kraftwerke, zur Wärmenutzung eingesetzt. Petrothermale Geothermie hingegen ist weitaus weniger praxiserprobt und deutlich aufwändiger. Im Rahmen dieser Flächenanalyse wird daher der Fokus auf die hydrothermale Geothermie gelegt. Für hydrothermale Geothermie konzentrieren sich die Potenziale in Baden-Württemberg auf zwei Gebiete: Auf den Oberrheingraben und das Süddeutsche Molassebecken, wo heiße Thermalgewässer vorhanden sind.

Neben der Berechnung der Gesamtfläche wurde auch eine Verteilung der Potenzialflächen auf Gemeinden untersucht. Von einer geografischen Potenzialfläche von fast 21.000 Hektar verteilt auf 160 Gemeinden verbleibt nach naturschutzfachlichen, technischen Restriktionen und dem Senken-Abgleich eine Fläche von 5.850 ha, verteilt auf 52 Gemeinden. In 13 dieser Gemeinden existiert bereits ein Wärmenetz (Abbildung 18).

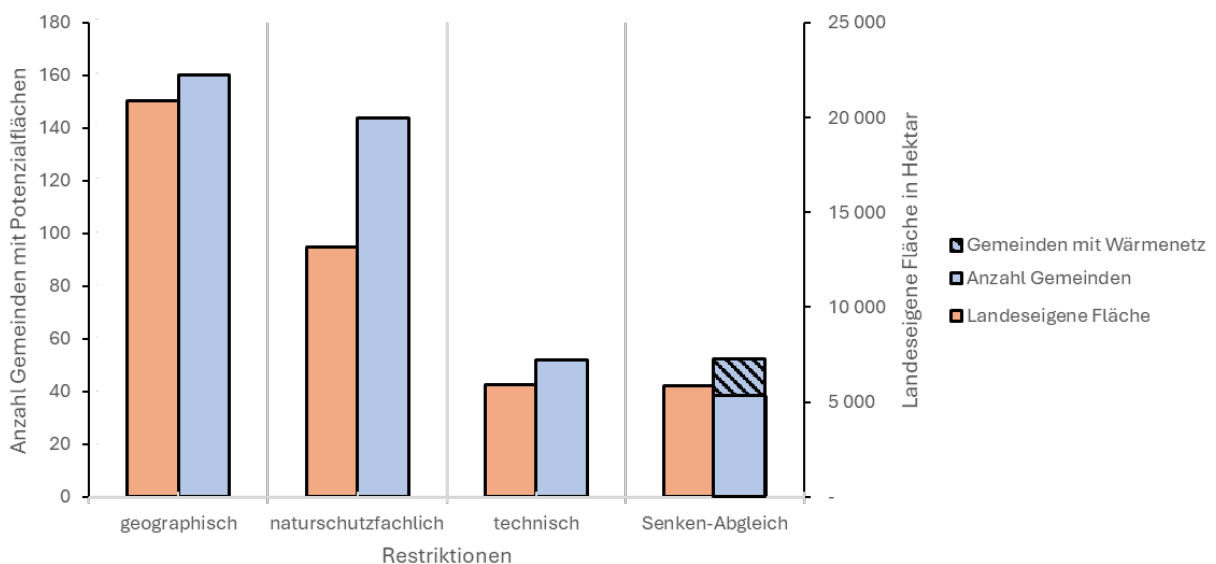


Abbildung 18: Anzahl an Gemeinden in Baden-Württemberg mit Flächen in Landeseigentum, welche zur Nutzung von tiefer Geothermie nach Anwendung (a) geographischer, (b) naturschutzfachlicher, (c) technischer Einschränkungen und (d) nach einem Senken-Abgleich in Frage kommen.

Die geeigneten Potenzialflächen im Landeseigentum sind in Abbildung 19b in dunkelgrün dargestellt und befinden sich überwiegend im nördlichen Oberrheingraben. Zusätzlich sind auch Gemeinden mit geeigneten Potenzialflächen in hellgrün auf der Karte markiert.

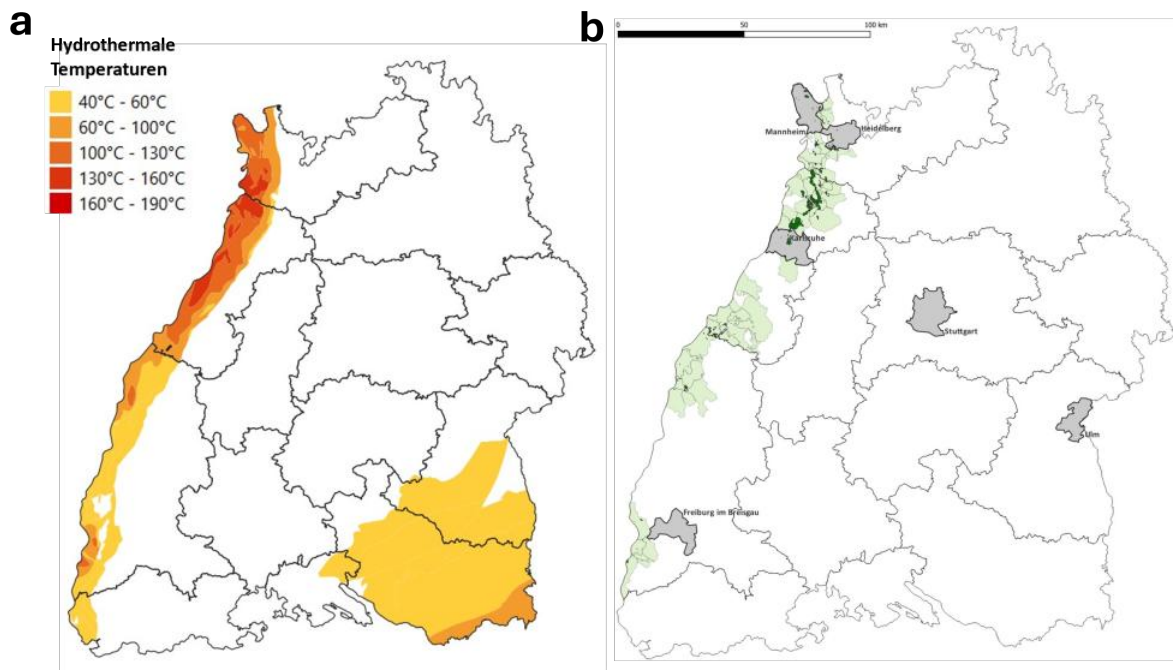


Abbildung 19: (a) Hydrothermale Temperaturen in Baden-Württemberg [LIAG, 2020]. (b) Potenzialflächen in Landeseigentum nach einem Senken-Abgleich (dunkelgrün) und Gemeinden, in welchen potenzielle Wärmesenken zur Versorgung liegen (hellgrün).

Die Fläche allein ist jedoch kein gut geeigneter Prädiktor für die Wärmeleistung, welche durch tiefe Geothermie erschlossen werden kann. Es kann beispielsweise von einer kleinen Oberfläche ein großes Wärmereservoir erschlossen werden. Vielmehr ist auch die Wärmenachfrage ein entscheidender Faktor für die Abschätzung der nutzbaren Wärmeleistung. Zur Abschätzung der erschließbaren Wärmeleistung wird angenommen, dass in jeder der 52 Gemeinden mit geeigneten Potenzialflächen eine Bohrung auf der Fläche durchgeführt wird, welche das größte geothermische Entzugspotenzial besitzt. Dieses berechnet sich aus der Schüttung¹, der spezifischen Wärmekapazität von Wasser und der Temperaturspreizung von Förderwasser und Reinjektionswasser [Ortner et al., 2021].

Unter diesen Annahmen könnte auf landeseigenen Flächen eine geothermische Entzugsleistung von 624 MW bereitgestellt werden. Unter der Annahme von 4.000 Vollaststunden pro Jahr ergibt sich ein jährliches Angebotspotenzial von 2,5 TWh. Zusätzlich kann durch eine geringere Rücklauf-temperatur in Wärmenetzen oder durch eine Temperaturanhebung mittels Wärmepumpe die Reinjektionstemperatur abgesenkt werden und somit ein größeres Potenzial erschlossen werden.

Ein Beispiel für die mögliche Nutzung einer Fläche im Landeseigentum zeigt Abbildung 20. Es geht dabei um die exemplarische Ableitung einer Größenordnung von energetischen Potenzialen, weshalb weitere Gründe für den Flächenausschluss außer Acht gelassen wurden. Basierend auf einer Studie zur tiefen Geothermie im Oberrheingraben [Sandrock et al., 2020] wurde eine Entzugstemperatur von 145 °C, eine Reinjektionstemperatur von 65 °C, eine Schüttungsrate von 50 l/s, eine

¹ Die Schüttung (Liter pro Sekunde) ist regional unterschiedlich. Für Den Oberrheingraben wird eine Schüttung von 50 l/s und für das Süddeutsche Molassebecken eine Schüttung von 99 l/s anhand von Mittelwerten bestehender Anlagen abgeschätzt.

Thermalwasserdichte von 1.048 kg/m^3 und einer spezifischen Wärmekapazität von $3.741 \text{ J}/(\text{kg} \times \text{K})$ angenommen. Daraus ergibt sich eine geothermische Leistung von $15,7 \text{ MW}$ und ein jährliches Angebotspotenzial von 63 GWh .



Abbildung 20: Beispielfläche mit einer Größe von $1,2 \text{ ha}$ zur Bereitstellung von 63 GWh Wärme durch tiefe Geothermie.

4.6 Ergebnisse: Saisonale Wärmespeicher

In Wärmenetzen mit einem hohen Anteil an erneuerbarer Wärme und unvermeidbarer Abwärme können Wärmespeicher eine wichtige Rolle spielen. Bei saisonalen Wärmespeichern kann der Wärmeüberschuss aus den Sommermonaten in die kältere Saison mit einem höheren Wärmebedarf transferiert werden.

Dabei gibt es mehrere Varianten der Realisierung:

- Erdbecken-Speicher sind eine etablierte Option, wobei es sich um Erdbecken handelt, die in der Regel mit Wasser oder einem Wasser-Kies-Gemisch gefüllt sind und bis zu 95 °C Wärme speichern können. Diese Speicheroption hat je nach Bauart einen hohen Flächenbedarf. Voraussetzungen dafür sind ein grundwasserfreier Boden und die räumliche Nähe zu einem Wärmenetz.
- Neben Erdbecken-Speichern können Aquifere als saisonale Speicher zum Einsatz kommen. Aquifer-Speicher sind im Untergrund vorhandene und mit Wasser gefüllte Hohlräume., die unter geeigneten geologischen Voraussetzungen Wärme mit geringen Verlusten über einen langen Zeitraum speichern können. Geeignete Potenzialflächen sind in den Gebieten zu finden, welche auch ein hydrothermales Potential aufweisen. In Baden-Württemberg ist das im Oberrheingraben der Fall. Ein großer Teil der Landesfläche ist für Aquifer-Speicher allerdings nicht geeignet [Stemmler et al., 2022].
- Eine dritte Variante von saisonalen Wärmespeichern sind Erdsonden-Speicher. Diese nutzen ebenfalls den Untergrund als Speichermedium, jedoch in oberflächennaher Tiefe, die durch zahlreiche Erdsonden erschlossen wird. Die erreichbare Temperatur der gespeicherten Wärme ist dadurch geringer als bei Aquifer-Speichern, weshalb Erdsonden-Speicher vor allem für Wärmenetze mit niedrigen Vorlauftemperaturen geeignet sind. Basis dafür ist, dass die Fläche bohrbar ist und über geeignete geologische Voraussetzungen, wie eine hohe Wärmekapazität und -leitfähigkeit bei einer geringen hydraulischen Leitfähigkeit, verfügt.

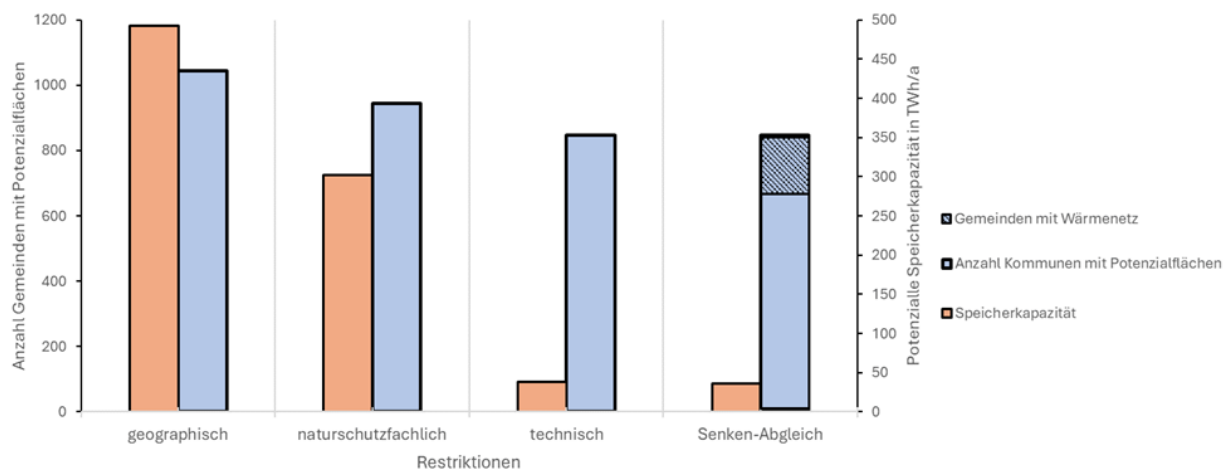


Abbildung 21: Anzahl an Gemeinden in Baden-Württemberg mit Flächen in Landeseigentum, welche zur Nutzung von saisonalen Wärmespeichern (Fokus auf Erdbeckenspeichern) nach der Anwendung (a) geographischer, (b) naturschutzfachlicher, (c) technischer Einschränkungen und (d) nach einem Senken-Abgleich in Frage kommen sowie die damit einhergehende potenzielle Speicherkapazität (TWh/Jahr).

Die Flächenanalyse vorliegende Flächenanalyse orientiert sich an Erdbecken-Speichern, welche die geringsten geologischen Restriktionen aufweisen, und durch die Flächenverfügbarkeit limitiert sind. Als geographische Einschränkungen auf den Flächen im Landeseigentum wurden die siedlungsbedingten, infrastrukturellen und physikalischen Restriktionen aus Tabelle 2 verwendet. Unter Beachtung des Naturschutzes sinkt die verfügbare Fläche auf unter 10 % der geographisch verfügbaren Fläche. Des Weiteren wird als technische Bedingung eine Minimalfläche von 1.000 m² vorausgesetzt und ein maximaler Abstand von 2 km zu geeigneten Wärmesenken angenommen. Die damit ermittelte Fläche von etwa 14.500 ha verteilt sich auf 846 Gemeinden, wovon 177 bereits über ein Wärmenetz verfügen. Die Anzahl der Gemeinden mit potenziellen Flächen im Landeseigentum unter Berücksichtigung der angeführten Kriterien ist in Abbildung 21 dargestellt.

Ebenfalls in der Abbildung enthalten ist die damit einhergehende Wärmespeicherkapazität. Diese bezieht sich auf Erdbecken-Speicher, welche auf einer Fläche von insgesamt 14.500 ha aufgestellt werden können, wobei die unter 4.1.2 getroffenen Annahmen als Grundlage der Berechnung dienen.

Durch diese grobe Abschätzung ergibt sich eine durchschnittliche Speicherkapazität von 36 TWh auf landeseigenen Flächen in Baden-Württemberg. Die räumliche Verteilung der errechneten Potenzialgebiete in Baden-Württemberg zeigt Abbildung 22.

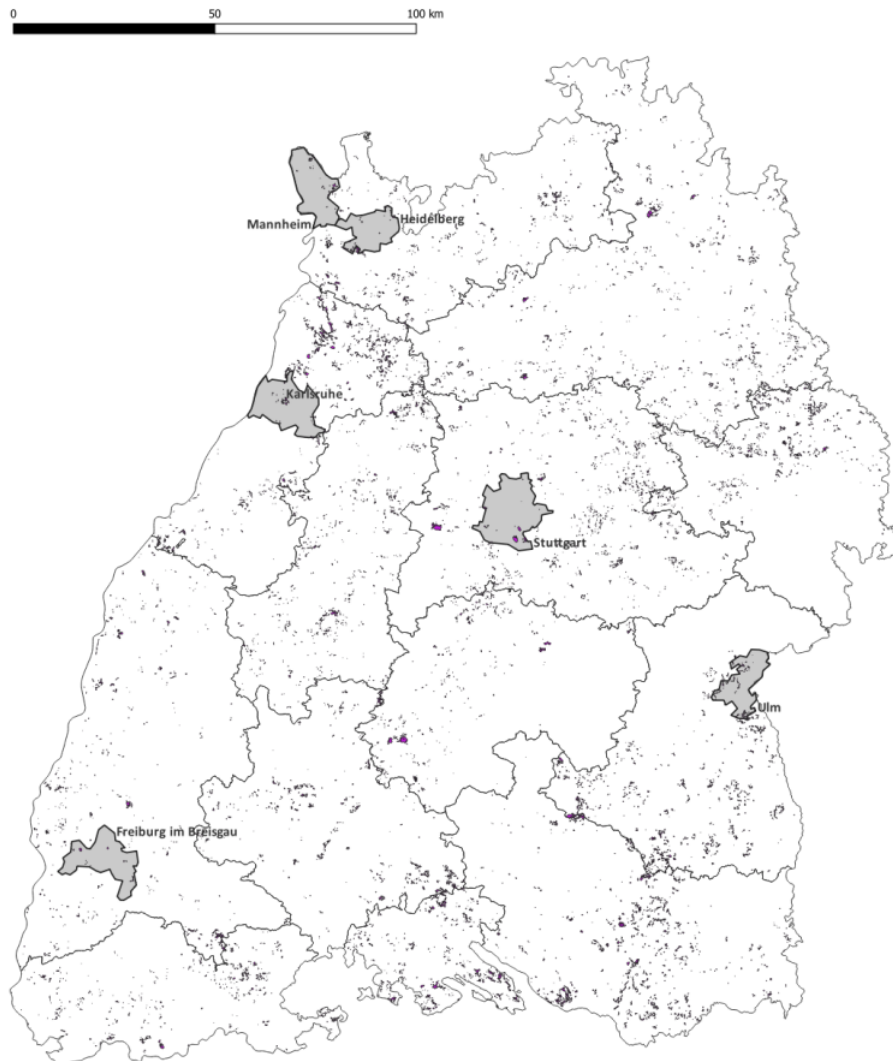


Abbildung 22: Potenzialflächen für saisonale Wärmespeicher (violett) auf Flächen im Landeseigentum nach einem Senken-Abgleich.

4.7 Ergebnisse: Fluss-Wärmepumpen

Zur Wärmenutzung von Oberflächengewässern (Seen, Flüssen) ist generell immer eine Einzelprüfung erforderlich bei der die Nähe zu (potenziellen) Wärmenetzen, eine ausreichende Wassermenge und verfügbare Flächen zu betrachtende Parameter sind. Nach einer Augenscheinprüfung wurden Erholungs- bzw. Parkflächen ausgeschlossen und eine Mindestentfernung zum nächsten (potenziellen) Wärmenetz von 2 km, sowie eine Mindestfläche von 0,5 ha angenommen.

Grundsätzlich bieten die großen Flüsse in Baden-Württemberg ausreichend große Durchflusswerte und viele Städte mit Wärmenetzen oder für netzgebundene Wärmeversorgung, die ausreichende Wärmebedarfe liefern, liegen unmittelbar an diesen Flüssen. In Abbildung 23 werden drei solche Beispielflächen an Rhein, Donau und Neckar gezeigt.



Abbildung 23: Beispielflächen in Eigentum des Landes Baden-Württembergs an Rhein, Donau und Neckar, die als Standorte für eine Fluss-Wärmepumpe in Frage kommen könnten.

Es wurden an allen untersuchten Flüssen 95 Flächen mit einer Gesamtgröße von 307 ha, und somit eine Vielzahl an Flächen, identifiziert. Davon liegen 56 Flächen entlang der Donau, 14 Flächen entlang des Rheins und 25 Flächen entlang des Neckars. Im Rahmen von Detailprüfungen müsste zusätzlich geklärt werden, ob die identifizierten Flächen tatsächlich als Standorte für Fluss-Wärmepumpen in Frage kämen oder ob ein Teil dieser Flächen auch als Überflutungsflächen genutzt werden.

Als Beispiel für die Nutzung von Flusswärme wird die Wärmeversorgung einer Kleinstadt am Neckar herangezogen, die mit einer Fläche in der Größe von 7 ha ausreichend Platz für die Installation einer Fluss-Wärmepumpe und Heizzentrale bietet (Abbildung 24). Zur Abschätzung des Angebotspotenzials wurde der Niedrigwasser-Durchfluss an der Messstelle mit $41,7 \text{ m}^3/\text{s}$ verwendet [LUBW, 2024]. Von diesem Durchfluss sollen 1 % für den Wärmeentzug genutzt werden, was eine konservative Annahme im Vergleich zu anderen Studien ist, die bis zu 15 % ansetzen [von Oehsen, 2021].

Die ganzjährig über $5 \text{ }^\circ\text{C}$ liegende Flusstemperatur [LUBW, 2024] ermöglicht eine Abkühlung des Wassers um 1 K, wobei dieser Wert ebenfalls konservativ gewählt ist, da Abkühlungen von bis zu 3 K möglich und zulässig sind [Abel, 2018].

Mit einer Jahresnutzungszahl der Wärmepumpe von 2,8 [DWA, 2023] und ganzjährigem Betrieb ergibt sich eine Entzugsleistung von 1,7 MW und ein Wärmeertrag von 23 GWh/Jahr. Dies könnte den Wärmebedarf der anliegenden Gemeinden sogar unter den konservativen Annahmen zu 85 % decken. Bei einem höheren Wärmeentzug oder höherer Abkühlung könnte der Wärmeertrag gesteigert werden und die Kommune theoretisch komplett mit Flusswärme versorgt werden.



Abbildung 24: Beispielfläche mit einer Größe von 7 ha zur Bereitstellung von 23 GWh/Jahr Wärme durch eine Fluss-Wärmepumpe.

5 Politische Maßnahmen: einige Anregungen

Klimaschutz durch den Ausbau und die Nutzung erneuerbarer Energien erfordert eine transformative Dynamik, die in vielen Bereichen unmittelbar von der Verfügbarkeit von Flächen abhängt. Dabei ist es wichtig zu betonen, dass nicht alle Flächen, die für den Klimaschutz genutzt werden, vollständig ihrer bisherigen Funktion entzogen werden müssen. Unter Windenergieanlagen kann weiterhin Landwirtschaft und Forstwirtschaft stattfinden. Auch unter Freileitungen und im Umfeld von Wasserstoff- oder Wärmeleitungen kann bei Einhaltung der notwendigen Sicherheitsabstände die ursprüngliche Nutzung fortgesetzt werden.

Die Umnutzung von Flächen zur Förderung des Klimaschutzes sollte nicht als Verlust betrachtet werden, denn ein konsequenter Klimaschutz bringt Vorteile für alle Bereiche der baden-württembergischen Gesellschaft sowie für die Ökosysteme und Schutzgüter des Landes. Flächenknappheit darf die Transformation Baden-Württembergs hin zur Klimaneutralität nicht ausbremsen.

Der Klima-Sachverständigenrat möchte mit seiner Analyse nicht nur generelle Impulse für eine beschleunigte Flächenbereitstellung geben, sondern zeigen, dass selbst kleinere landeseigene Flächen Potenziale zur Strom- oder Wärmebereitstellung bieten. Diese Potenziale sollten geprüft und bei positiver Bewertung schnellstmöglich zur Unterstützung der Energiewende zur Verfügung gestellt werden.

Der Klima-Sachverständigenrat empfiehlt der Effizienz bei der Standortsuche eine hohe Bedeutung beizumessen.

Dies gilt für alle Anwendung, in besonderen Maße aber für die Windenergie. Denn hier ist die Orientierung an der Nutzung der ertragreichsten Standorte im Land aufgrund der räumlich sehr unterschiedlich ausgeprägten Windressource besonders wichtig. Die Analyse bezüglich der Standortgüte der Windenergie verdeutlicht, dass die im KlimaG BW verankerte Gleichverteilung der Flächenziele auf alle Regionen und die damit induzierte Gleichverteilung der durch die Nutzung der Windenergie empfundenen Lasten wie Lärmbelastung, Sichtbarkeit oder Störung des Landschaftsbilds innerhalb Baden-Württembergs bereits eine Zielabwägung darstellt. Würde man den erforderlichen Windenergieausbau rein unter Effizienzgesichtspunkten optimieren und ausschließlich die ertragreichsten Standorte in Baden-Württemberg nutzen, könnte die für das Erreichen der Klimaschutzziele des Landes erforderliche Strommenge in Summe mit weniger Anlagen an weniger Standorten auf weniger Fläche zu geringeren Kosten erzeugt werden.

Der in Kapitel 4.2.3 gezeigte exemplarische Vergleich von drei Ausbauvarianten verdeutlicht, dass unabhängig von anderen Variablen, die die Flächenbereitstellung zweifelsohne beeinflussen, **der Effizienz bei der Standortfindung eine hohe Bedeutung beigemessen werden sollte, um auch zukünftig eine möglichst kostengünstige Stromversorgung zu gewährleisten.** Dies gilt aus Sicht des Klima-Sachverständigenrat auch unter den im KlimaG BW festgelegten Bedingungen gemäß § 20.

Im folgenden Abschnitt werden daher **Vorschläge unterbreitet, wie die bevorzugte Nutzung besonders effizienter Standorte zukünftig unterstützt werden** könnte. Die Vorschläge zielen nicht nur auf landeseigene Flächen, sondern auf eine generelle Ausweitung der Flächenverfügbarkeit, um den Klimaschutz deutlich zu beschleunigen.

Bei allen Bestrebungen, den Umbau der Energieversorgung so effizient wie möglich zu gestalten, darf nicht außer Acht gelassen werden, dass der Faktor Zeit mit Blick auf das Erreichen der Klimaschutzziele bis 2030 möglicherweise noch stärker zu gewichten ist. Daher sollten alle wirtschaftlich sinnvollen Vorhaben, die zügig realisierbar sind, schnellstmöglich zur Umsetzung gebracht werden, unabhängig davon, welche Standortgüte sie aufweisen. In Anbetracht der Ausbauvorhaben nach 2030, um das Ziel der Netto-Treibhausgasneutralität bis 2040 zu erreichen, muss Effizienz jedoch stärker Berücksichtigung finden, um die notwendigen Anteile der Windenergie an der Stromerzeugung zu den geringstmöglichen Kosten und mit der geringstmöglichen Anlagenzahl realisieren zu können.

5.1 **Vorschlag 1: Einführung einer Flächenbörse auf Ebene der Regionen und nach Möglichkeit ebenso auf kommunaler Ebene**

In § 20 KlimaG BW erfolgt die Festlegung der regionalen Teilflächenziele gemäß § 3 WindBG für Baden-Württemberg. Die Adressaten sind die Regionen, die bis zum 30. September 2025 die notwendigen Teilpläne zur Umsetzung der Vorgabe zur Ausweisung von mindestens 1,8 % der Regionsfläche bzw. der anteiligen Regionsfläche in Baden-Württemberg als Satzung festgelegt haben müssen. Ähnliches legt § 21 KlimaG BW für die Ausweisung regionaler Teilflächenziele von mindestens 0,2 % der Regionsfläche für die Freiflächen-Photovoltaik ebenfalls zum 30. September 2025 fest. Zum 01. Januar 2024 haben zehn von zwölf Regionalverbänden ihre Entwürfe zur Planung der zur Windenergienutzung bereits offengelegt; bei der Photovoltaik waren es zum Stichtag 01. Januar 2024 neun von zwölf.

Eine erste Auswertung ergab dabei, dass alle **Regionen** mit ihren Planungen **deutlich über den geforderten Mindestzielen** liegen. Bei der Windenergie liegen die aktuellen Planungen in einer Bandbreite zwischen 2,3 % und 4,6 % der jeweiligen Regionsfläche und bei der Photovoltaik in einer Bandbreite von 0,2 % bis 0,7 % der jeweiligen Regionsfläche. **Der Klima-Sachverständigenrat begrüßt dies ausdrücklich**, wird doch hierdurch die Notwendigkeit der späteren „Nachausweisung“, wenn nicht alle ausgewiesenen Flächen vollständig bebaut werden können, deutlich reduziert.

Diese vermeintliche Übererfüllung des Minimums eröffnet zudem Spielräume, insbesondere zur Nutzung von § 20 Abs. 3 KlimaG BW. Hier heißt es: Es können vertragliche Vereinbarungen geschlossen werden, mit denen sich eine Region gegenüber einer anderen Region verpflichtet, mehr Fläche als gemäß Absatz 1 erforderlich (Flächenüberhang) für die Windenergie auszuweisen. Sobald entsprechende Gebietsfestlegungen getroffen wurden, kann der Flächenüberhang der einen Region auf der Grundlage der vertraglichen Vereinbarung nach Satz 1 der anderen Region für die Zielerreichung nach Absatz 1 angerechnet werden. Dies ermöglicht eine kostenoptimale Windenergienutzung in Baden-Württemberg an den bestgeeigneten Standorten

Der Klima-Sachverständigenrat regt daher an, eine **Flächenbörse** zu etablieren, die einen unkomplizierten Austausch zwischen Regionen ermöglicht. Diese Flächenbörse soll Transparenz über verfügbare Flächen schaffen, Musterverträge für Regionen bereitstellen und generell einen Anreiz bieten, über das Mindestziel hinaus ausgewiesene Flächen anderen Regionen für eine effiziente Zielerreichung anzubieten.

Auch wenn Regionen die einzige über das KlimaG BW zur Flächenausweisung verpflichtete Planungsebene darstellen, sind sie nicht die einzige Planungsebene im Prozess der Flächenbereitstellung. Auch auf kommunaler Ebene existieren Planungsinstrumente, um den Ausbau der erneuerbaren Energien voranzutreiben. Seit im Jahr 2012 die bestehende Regionalplanung zu den Vorrangflächen für die Windenergienutzung, die über eine sogenannte Schwarz-Weiß-Planung Windenergieanlagen außerhalb von Vorranggebieten vollständig ausgeschlossen hatte, aufgehoben wurde, greift hier insbesondere § 35 BauGB zur Privilegierung von Windenergieanlagen im Außenbereich. Seither können Kommunen unabhängig von Vorranggebieten Windenergieanlagen planen und nach entsprechender Prüfung, ob öffentliche Belange und/oder Belange der Regionalplanung entgegenstehen, im Rahmen eines Zielabweichungsverfahrens, auch realisieren. Daran ändert auch die aktuell laufende Regionalplanung nichts, so dass Kommunen unter den genannten Bedingungen auch weiterhin Flächen für Windenergieanlagen zur Verfügung stellen bzw. ausweisen können. Sobald die Regionalplanung abgeschlossen ist bzw. das Flächenziel entsprechend erreicht ist – nach KlimaG BW soll dies am 30. September 2025 der Fall sein –, gilt insofern wieder eine faktische Schwarz-Weiß-Planung, dass nur in den ausgewiesenen Vorranggebieten sichergestellt sein wird, dass einer Windenergienutzung keine anderen raumplanerischen Belange entgegenstehen. Dennoch können auch nach dem 30. September 2025 Kommunen im Rahmen der Bauleitplanung mehr und zusätzliche Flächen zur Windenergienutzung ausweisen bzw. selbst Planungen aufstellen, beispielsweise wenn keine Flächen der Kommune in einem Vorranggebiet liegen. In diesem Fall sind jeweils Einzelfallbewertungen notwendig, um sicherzustellen, dass keine regionalplanerischen Belange entgegenstehen.

Die für die regionale Ebene vorgeschlagene Flächenbörse könnte somit auf die kommunale Ebene ausgeweitet werden, gerade auch um **interkommunale Zusammenarbeit** zu erleichtern, Flächenausweisungen auch kommunenübergreifend zu ermöglichen und damit wiederum die Nutzung der geeignetsten und ertragreichsten Flächen zu unterstützen.

Ein wesentliches Argument für die Einführung und Unterstützung einer solchen Flächenbörse ist die **Steigerung der Effizienz des Windenergieausbaus**. Erfolgt der Ausbau überwiegend an den ertragreichen Standorten, ist der erzeugte Windstrom insgesamt kostengünstiger und es werden weniger Anlagen benötigt, um die gleiche Strommenge zu erzeugen. Die Auswertungen des Klimasachverständigenrats unterstreichen die vorhandenen großen regionalen Unterschiede nicht nur in Bezug auf die Flächenverfügbarkeit, sondern gerade auch mit Blick auf die Standorteignung. Insbesondere die Windenergie weist sehr stark divergierende Kapazitätsfaktoren auf. Sie liegen zwischen 10 % und 36 %, was dazu führt, dass in manchen Regionen die Ausweisung von 1,8 % der Regionsflächen für Windenergieanlagen mit ertragreichen Standorten allein gar nicht erreicht werden kann, wohingegen andere Regionen sehr ertragreiche Standorte auf deutlich mehr Fläche aufweisen als die gesetzlich verankerten Ziele fordern. Auch bei der Photovoltaik sind Abweichungen beim Kapazitätsfaktor zwischen 10,8 % und 11,6 % erkennbar, was allerdings wesentlich geringere Effekte auf die Effizienz des Ausbaus hat als bei der Windenergie. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt auch die Studie „100 % klimaneutrale Energieversorgung – der Beitrag Baden-Württembergs und seiner zwölf Regionen“ [Koch et al., 2022].

Das aufgezeigte Ungleichgewicht könnte durch den Handel von Flächen über die skizzierte Flächenbörse zumindest teilweise kompensiert werden, wenn es gelingt, über die Flächenbörse Anreize für Regionen und Kommunen mit vielen und guten Standorten zu schaffen, diese zu entwickeln und Regionen und Kommunen mit ungünstiger Flächenkulisse zur Verfügung zu stellen.

Bei intensiver Nutzung dieser Austauschoption durch die Regionen und Kommunen könnte die Effizienz des Ausbaus der erneuerbaren Energien durch die Nutzung der besten Standorte deutlich erhöht, die Kosten verringert, die Anzahl der erforderlichen Windenergieanlagen reduziert und der Ausbau durch die Schaffung von mehr Transparenz in Sachen Flächenverfügbarkeit beschleunigt werden. Die Möglichkeiten der Flächenbörse sollten allerdings nicht auf die Windenergienutzung beschränkt bleiben. Auch für die anderen aufgezeigten Anwendungsfelder sollten gerade auf der kommunalen die Vorteile eines solchen Instruments gerade auch unter Transparenzgesichtspunkten aktiv genutzt werden.

5.2 Vorschlag 2: Flächenpooling

Neben dem Vorschlag der Etablierung einer Flächenbörse kann das Instrument des Flächenpoolings ebenso dazu beitragen, **Flächen möglichst effizient auszuweisen** und für Windenergieanlagen zur Verfügung zu stellen, um damit die gesetzlichen Flächenziele zu erreichen. Generell basiert der Ansatz darauf, dass alle teilnehmenden Eigentümerinnen und Eigentümer oder Akteurinnen und Akteure mit Flächen im Landes- und Kommunalbesitz, sich zu einer **Flächenpooling-Gemeinschaft** zusammenschließen.

Durch das Pooling werden Einzelflächen zu einer größeren **zusammenhängenden Fläche** aggregiert, wodurch eine **effizientere Belegung** und **gerechtere Verteilung** der Wertschöpfung möglich ist. Dabei sollten nicht nur die Flächen, auf denen potenziell Windenergieanlagen errichtet werden können, einbezogen werden, sondern auch erforderliche Nachbarflächen, z. B. für Zuwegungen und Leitungen, aber auch die benötigten Abstandsflächen. Mit Berücksichtigung der speziellen kommunalen Rahmenbedingungen [Püttner et. al, 2024] ist es denkbar und sinnvoll ein kommunenübergreifendes Flächenpooling anzustreben und somit Flächenpotenziale gemarkungsüberschreitend zu nutzen.

In der Pooling-Gemeinschaft werden nach dem Zusammenschluss gemeinsame Rahmenbedingungen für den künftigen Windenergieanlagenbau (und gegebenenfalls auch Betrieb) festgelegt. Darunter fallen Bestimmungen zur Verteilung der Pachteinahmen, Mindestabstände zu anderen baulichen Anlagen oder auch die Möglichkeit einer finanziellen Beteiligung. Oftmals übernimmt in dieser Konstellation eine Kommune die Organisation, da sie für die Daseinsvorsorge verantwortlich ist und als neutraler Akteur fungieren kann. Es ist aber auch nicht unüblich, dass eine Kommune schon als Flächeneigentümer (z. B. im Stadt- und Gemeindewald) direkt als Akteur im Pooling involviert ist. Der Kommune werden damit, im Falle des kommunalen Flächenpoolings, grundsätzliche Steuerungsmöglichkeiten an die Hand gegeben.

Die Vorteile des Flächenpoolings unter der Federführung eines öffentlichen Akteurs liegen zum einen darin, dass die ausgearbeiteten Verträge die Besonderheiten der Akteure beachten können, aber im Ergebnis trotzdem alle die **gleichen Vertragsbedingungen** haben. Es ist davon auszugehen, dass die Kommune die Interessen der Eigentümerinnen und Eigentümer gut vertreten kann. Vor allem aber besteht durch das kommunale Flächenpooling mit Steuerungshoheit in der Hand der Kommune (oder des Landes), im Vergleich zur „gängigen“ Flächensicherung und Projektentwicklung die Chance, dass die Akzeptanz in der Bevölkerung, durch eine faire Aufteilung der Erlöse und erhöhte lokale Wertschöpfung, gesteigert wird.

Flächenpooling-Gemeinschaften finden sich in verschiedensten Formen in der ganzen Bundesrepublik. Konkret in Baden-Württemberg haben sich die Stadt Bruchsal und ForstBW nach einem intensiven Abstimmungsprozess für ein gemeinsames Flächenpooling entschieden und demonstrieren damit auch eine erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen Land und Kommunen. Gemeinsam stellen Bruchsal und ForstBW 210 ha für die Windenergie zur Verfügung; 135 ha davon sind Staatswald und 75 ha Stadtwald. Projektierer können sich in einem diskriminierungsfreien Verfahren ab dem 20. August 2024 über die Vermarktungsoffensive von ForstBW bewerben [MLR, 2024; UM 2024].

Der Klima-Sachverständigenrat unterstützt derartige Aktivitäten ausdrücklich, wenn sie als Instrument zur Steigerung der effizienten Flächennutzung bzw. Belegung und der Akzeptanz durch die Generierung von Wertschöpfung vor Ort genutzt werden. Dabei sollte die Nutzung dieses Instruments nicht auf die Windenergie beschränkt bleiben, wenn es in anderen Nutzungsbereichen ähnliche Vorteile bietet.

5.3 Vorschlag 3: Kommunalen Finanzausgleich auf erneuerbare Energien anwenden

Um **Kommunen tatsächlich Anreize zu bieten**, aktiv Flächen für die Nutzung durch erneuerbare Energien zur Verfügung zu stellen bzw. auszuweisen, bedarf es mehr als nur einer Flächenbörse. Hier bietet es sich an, **den kommunalen Finanzausgleich** (FZA) zu nutzen. Rechtlich gesehen ist das Land Baden-Württemberg gem. Art. 73 Abs. 1 der Landesverfassung (LV) verpflichtet, den Gemeinden und Gemeindeverbänden eine ausreichende Finanzausstattung zur Verfügung zu stellen, damit diese ihre Aufgaben erfüllen können. Die hierzu zwischen dem Land und den Gemeinden fließenden Mittel bilden zusammen den kommunalen Finanzausgleich. Dabei steht den Gemeinden nach Art. 73 Abs. 2 LV das Recht zu, teilweise eigene Steuern und öffentliche Abgaben zu erheben. Diese Einnahmen werden durch Zuweisungen aus dem kommunalen Finanzausgleich ergänzt. Werden Elemente wie die für erneuerbaren Energien bereitgestellten Flächen pro Einwohner oder deren Anteile an der Gesamtfläche der jeweiligen Kommune als zusätzliche Bemessungsgröße in die Bestimmung der Höhe der über den kommunalen Finanzausgleich für die jeweilige Kommune zur Verfügung gestellten Mittel aufgenommen, könnte dies eine **neue Dynamik bei der Bereitstellung von Flächen** auslösen, wenn die Kommunen finanziell bessergestellt werden, die mehr und zusätzliche Flächen für den Ausbau der erneuerbaren Energien ausweisen. So könnte der FZA zu einem monetären Anreizinstrument weiterentwickelt werden, um vermehrt Impulse für Kommunen zu geben, sich stärker für den Ausbau erneuerbarer Energien einzusetzen und gezielt Flächen über das gesetzlich für die Regionen verankerte Flächenziel hinaus auszuweisen.

Der Klima-Sachverständigenrat empfiehlt eine detaillierte Ausarbeitung unter Abwägung verschiedener Ausgestaltungsoptionen und deren jeweiliger Lenkungswirkung und Berücksichtigung sämtlicher rechtlicher Aspekte. Diese sollte explizit eine spätere ggf. schrittweise Ausweitung auf weitere Klimaschutzmaßnahmen außerhalb der Flächenbereitstellung mitbetrachten, um von vornherein ein schlagkräftiges Instrument zur Beschleunigung des gesamten kommunalen Klimaschutzes zu entwickeln.

Eine andere Möglichkeit, Kommunen einen Anreiz für die Ausweisung zusätzlicher Flächen für erneuerbare Energien oder andere für die Energiewende und den Klimaschutz erforderliche Anwendungen zu bieten, ist die Einführung von **Erneuerbare-Energien-Punkten**. Dieser Vorschlag, der erstmals am 07. Februar 2022 vom Gemeindetag unterbreitet wurde, geht davon aus, dass die Flächennutzung durch EE-Anlagen vor allem in den ländlichen Räumen stattfinden wird und empfiehlt, dass Gemeinden, die überobligationsmäßig Flächen für die Energiewende bereitstellen, dadurch Erneuerbare-Energien-Punkte (Verteilungsmaßstab basierend auf erzeugter Energie oder installierter Leistung) sammeln kann, die dann einen Fördervorrang in bestehenden Programmen oder einen Finanzierungsvorrang bei begrenzten Haushaltsmitteln des Landes begründen. Dies könnte alternativ zum Kommunalen Finanzausgleich Kommunen den notwendigen Anreiz zur zusätzlichen Flächenbereitstellung bieten.

5.4 Vorschlag 4: Pachtvergünstigung / kostenlose Bereitstellung von Landesflächen

In die Analyse der Wirtschaftlichkeit von Projekten zur Nutzung von erneuerbaren Energien zur Strom- oder Wärmebereitstellung geht der Faktor Fläche vor allem über die Höhe der für die in Anspruch genommene Fläche erforderlichen Pachtzahlungen ein. Der Einfluss der Pachtzahlungen dürfte bei Windenergieanlagen am stärksten zu Buche schlagen, weshalb die Analyse beispielhaft für die Windenergienutzung durchgeführt wird.

Als Ausgangsbasis für die Wirtschaftlichkeitsanalyse wurden die Stromgestehungskosten für eine exemplarische Anlage, deren Charakteristika in Tabelle 2 angegeben sind, für vier unterschiedliche Standorte berechnet. Diese unterscheiden sich nach ihrer Standortgüte. So wurden Rechnungen für Standorte mit den Kapazitätsfaktoren 20 %, 25 %, 30 % und 35 % durchgeführt. Den errechneten Stromerzeugungskosten werden die für die jeweilige Standortgüte durchschnittlich zu erwartenden anlegbaren Werte aus dem EEG (korrigiert anhand der Gütefaktoren gemäß § 36 h EEG) gegenübergestellt, um zu prüfen, ob ein wirtschaftlicher Betrieb unter den gegebenen Rahmenbedingungen erwartet werden kann (Abbildung 25).

Abbildung 25 zeigt sehr deutlich, dass sich gerade durch die im Rahmen des Solarpakets I beschlossene Erhöhung des Höchstwerts für den anzulegenden Wert am Referenzstandort auf 0,0735 EUR/kWh für Anlagen, die nach dem 16. Mai 2024 in Betrieb genommen werden, die wirtschaftliche Situation für den Anlagenbetrieb an allen Standorten erheblich verbessert hat. Mit den gewählten Parametern dieser Beispielrechnung könnten Anlagen an allen Standorten wirtschaftlich betrieben werden, wenn sie im Rahmen der Ausschreibungen einen Zuschlag zum Höchstwert erhalten. Auch in einem stärker wettbewerblich geprägten Umfeld würden die kalkulierten Stromerzeugungskosten gewisse Spielräume lassen. Allerdings wägen Projektierer und Investoren in einem stark wettbewerblich geprägten Umfang vermutlich neben den Renditechancen noch nach weiteren Kriterien ab, beispielsweise nach der geschätzten Realisierungsdauer.

Hier sollte trotz der durch das Solarpaket I verbesserten wirtschaftlichen Rahmenbedingungen frühzeitig nach Optionen gesucht werden, die dabei helfen, die Wettbewerbsfähigkeit der Windenergiestandorte in Baden-Württemberg dauerhaft zu sichern, insbesondere, weil Baden-Württemberg noch am Anfang der Ausbaudynamik steht. Der Einflussparameter "Pacht für die benötigte Fläche" soll deshalb diese im Folgenden näher beleuchtet werden.

Auch wenn die genaue Höhe der Pachtzahlungen in der Regel als Geschäftsgeheimnis nicht transparent offengelegt wird, soll die Thematik anhand verfügbarer Daten beispielsweise aus dem EEG-Erfahrungsbericht zur Windenergie an Land näher beleuchtet werden [Deutsche Windguard, 2023].

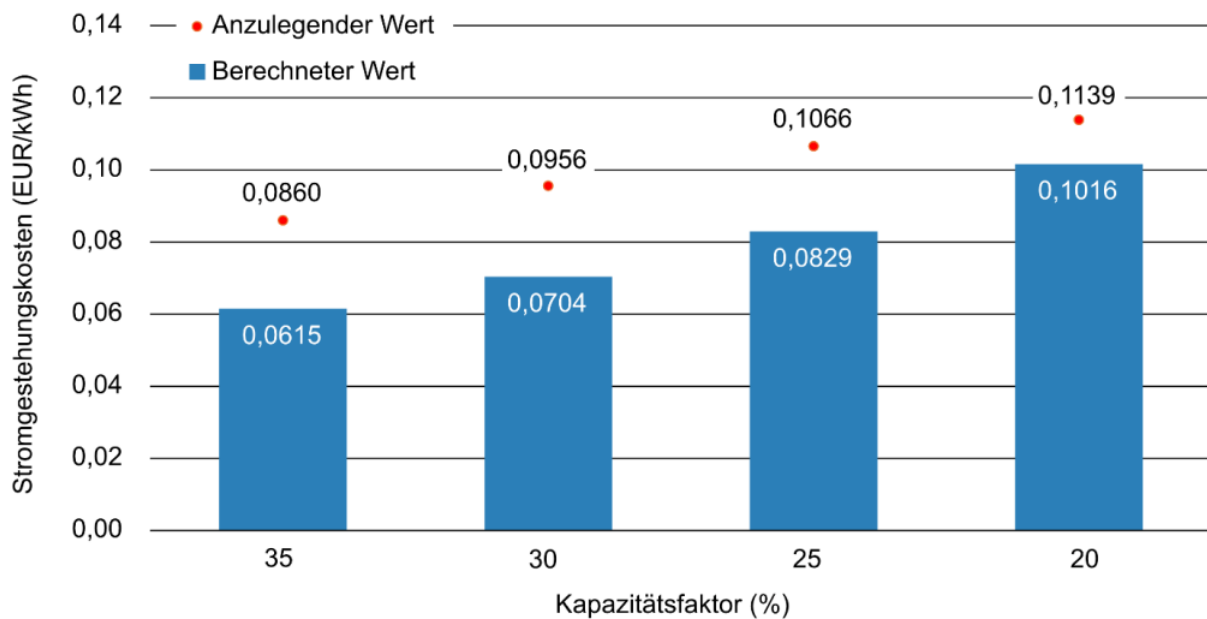


Abbildung 25: Stromerzeugungskosten der Windenergie in Baden-Württemberg an Standorten unterschiedlicher Güte.

Da die Höhe der Pachtzahlungen auch für andere Technologien ein wichtiger Faktor sein kann, dürften die Analyse und die darauf basierenden Schlussfolgerungen übertragbar sein.

Da gerade zu Pachtzahlungen für Windenergieanlagen in Baden-Württemberg weder für Referenzstandorte noch für Waldstandorte konkrete Informationen vorliegen, erfolgt zunächst eine generelle Analyse der verschiedenen Pachtmodelle und deren Einordnung anhand von auf Bundesebene verfügbaren Daten.

Zunächst ist festzuhalten, dass der Kostenpunkt „Pacht“ die Wirtschaftlichkeit von Windenergieanlagen als Teil der Betriebskosten beeinflusst. Dabei sind laut Presseberichten die Pachten für Flächen für Windenergieanlagen in den letzten Jahren kontinuierlich gestiegen [WiWo, 2023], wodurch deren Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit bzw. die Berechnung der Stromerzeugungskosten zugenommen hat. In dem Bericht „Kostensituation der Windenergie an Land Stand 2023“ [Deutsche Windguard, 2023] werden Pachtzahlungen von 15 EUR/kW installierter Leistung in der ersten Dekade des Betriebs der Windenergieanlagen angegeben, was 35 % der Betriebskosten in diesem Zeitraum entspricht. In der zweiten Dekade werden 16 EUR/kW installierter Leistung angegeben, was dann allerdings wegen der deutlich höheren Wartungs- und Instandhaltungskosten in der zweiten Dekade der Betriebszeit einer Windenergieanlage nur noch 30 % der Betriebskosten entspricht.

Im Jahr 2024 weisen typische Neuanlagen für die Stromerzeugung aus Windenergie im Schnitt eine Anlagenleistung von 6 MW auf. Daraus lassen sich jährliche Pachtzahlungen von 90.000 EUR pro Anlage in der ersten Dekade und 96.000 EUR pro Anlage in der zweiten Dekade ableiten. **Die Pachtzahlungen** stellen somit mit 35 % bzw. 30 % neben den Wartungs- und Instandhaltungskosten mit 28 % bzw. 32 % der Betriebskosten den **größten Kostenblock innerhalb der Betriebskosten** dar.

Generell existieren verschiedene Pachtmodelle und auch Mischformen mit Elementen aus mehreren Modellen, um die Zahlungen zwischen Flächeneigentümer und Anlagenbetreiber zu regeln. So existieren beispielsweise unterschiedliche **Fixpreismodelle**, die entweder eine jährliche Zahlung einer festen Pacht je Anlage in EUR/Jahr oder die jährliche Zahlung einer festen Pacht in Abhängigkeit der installierten Leistung je kW in EUR/Jahr umfassen können. Letztere bilden auch die Grundlage für die von der Deutschen Windguard für 2023 berichteten Durchschnittswerte [Deutsche Windguard 2023]. Bei ca. 90.000 EUR/Jahr für die erste Betriebsdekade und ca. 96.000 EUR/Jahr für die zweite Betriebsdekade einer 6 MW Anlage und angenommenen Erlösen von 1,48 Mio. EUR/Jahr an einem Standort mit dem Kapazitätsfaktor 30 entspricht dies ca. 6,0 % bis 6,5 % der jährlichen Erlöse. An einem Standort mit dem Kapazitätsfaktor 20 und einem fiktiven Erlös von 1,18 Mio. EUR entspräche die Fixpacht ca. 7,5 % bis 8,0 % der jährlichen Erlöse.

Ein anderes Modell sind **erlösabhängige Pachtzahlungen**. Hier bezahlt der Anlagenbetreiber einen vorab vertraglich vereinbarten Prozentsatz vom finanziellen Ertrag der Anlage an den Flächeneigentümer. In windschwachen Jahren oder bei Anlagenausfall fällt die Pacht somit geringer aus, weil sie unmittelbar an die Performance der Anlage gebunden ist.

Bundesweite Auswertungen der Fachagentur Wind geben für diese Art der Pachtverhältnisse Pachthöhen in einer Spanne von 5 % bis 14 % des Ertrags der Windenergieanlage an. Unterstellt man für Neuanlagen wiederum eine Leistungsklasse von 6 MW [Deutsche Windguard 2023], kann man an einem Standort mit einem Kapazitätsfaktor von 30 etwa 15,5 MWh Strom im Jahr produzieren. Mit einer EEG-Vergütung von 0,09555 EUR/kWh (Höchstwert 0,0735 EUR/kWh × Korrekturfaktor 1,3 nach Referenzertragsmodell) könnte an diesem Standort ein Erlös von ca. 1,48 Mio. EUR pro Jahr erzielt werden. Daraus ließe sich ein theoretischer Pachtanspruch zwischen 74.000 EUR (5 %) und 207.200 EUR (14 %) ableiten. Mit der gleichen Anlage lassen sich an einem Standort mit dem Kapazitätsfaktor 20 nur etwa 10,3 MWh Strom erzeugen. Bei einer EEG-Vergütung von 0,11395 EUR/kWh (Höchstwert 0,0735 EUR/kWh × Korrekturfaktor 1,55 nach Referenzertragsmodell) würde der Erlös mit knapp 1,17 Mio. EUR deutlich geringer ausfallen und somit auch die anfallende Pacht auf Werte zwischen 58.500 EUR (5 %) und 163.800 EUR (14 %) fallen.

Oftmals werden in der Praxis das erlösabhängige Modell als variable Pachtkomponente mit einer jährlichen Fixzahlung in Abhängigkeit der Anlagenleistung als fixe Pachtkomponente kombiniert. Weitere Mischformen sind ebenso denkbar wie die Möglichkeit, die Pachtzahlung als Einmalzahlung am Anfang der Vorhabenslaufzeit abzuwickeln. Hierzu liegen allerdings keine belastbaren Daten zur Nutzung des Modells und den jeweiligen Konditionen vor.

Wie diese Kurzanalyse zeigt, hat die Höhe der Pacht für die Bereitstellung der Fläche durchaus einen **Einfluss auf die Erlössituation und die Wirtschaftlichkeit** der Anlage, da sie sich in einer Größenordnung von immerhin einem **Drittel der Betriebskosten** bewegt.

In Abbildung 26 ist exemplarisch dargestellt, welchen Einfluss die Pacht auf die Höhe der Stromerzeugungskosten hat. Hierfür wurde aus den in Abbildung 10 gezeigten Stromerzeugungskosten die Pachten herausgerechnet und die Stromerzeugungskosten um diesen Anteil reduziert, so dass hier die Stromerzeugungskosten für den fiktiven Fall, dass die Flächen pachtfrei zur Verfügung gestellt würden, den tatsächlichen Stromerzeugungskosten gegenübergestellt sind. Gerade für die Anlagen auf den Flächen mit den schlechtesten Windbedingungen, könnte ein Pachterlass erforderlich werden, wenn der Wettbewerb im Rahmen des Ausschreibungsregimes des EEG zeitnah steigen sollte.

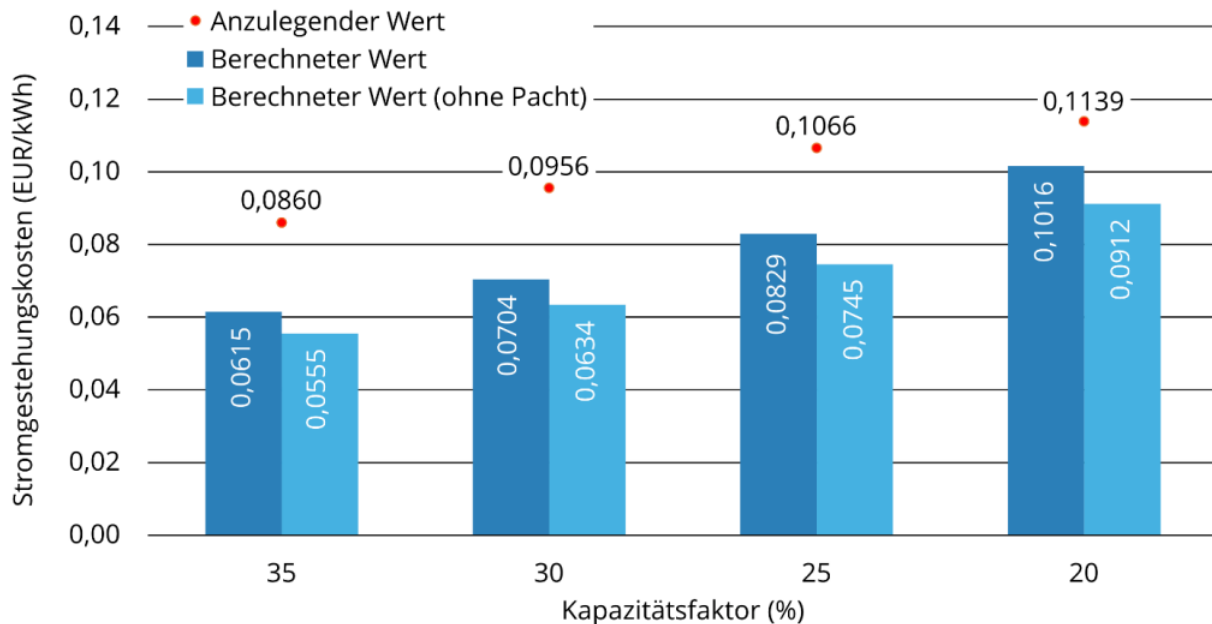


Abbildung 26: Stromerzeugungskosten der Windenergie in Baden-Württemberg an Standorten unterschiedlicher Güte mit und ohne Pacht.

Erkenntnisse aus der Innovationsdiffusionsforschung weisen zudem darauf hin, dass es gerade zu Beginn einer Entwicklung erforderlich sein kann, höhere Anreize zu setzen. Daher könnte es kurzfristig zur **Beschleunigung des Ausbaus der Windenergie** und ggf. auch für andere erneuerbare Energien und mittelfristig zur Aufrechterhaltung der Wettbewerbsfähigkeit baden-württembergischer Standorte im Vergleich zu anderen Standorten innerhalb Deutschlands und Europas eine Option sein, dass das Land Baden-Württemberg verstärkt geeignete Landesflächen mit **vergünstigten Pachtbedingungen oder auch vollständig kostenfrei** zur Verfügung stellt. So könnten auch Standorte sehr attraktiv werden, an denen keine optimalen Ertragsbedingungen herrschen, weil sie beispielsweise bzgl. der Windhöflichkeit **nicht ideal geeignet erscheinen**, dafür aber eine hohe Akzeptanz in der Bevölkerung genießen.

Eine Pachtvergünstigung könnte auch die Flächen im Staatswald noch attraktiver machen und die Umsetzung der Projekte beschleunigen helfen, indem hierdurch die höheren Kosten der Waldstandorte beispielsweise für die spezifischere Planung, Zuwegung etc. kompensiert werden könnten.

Für die Umsetzung dieses Vorschlags wäre eine **Änderung der Landeshaushaltsordnung LHO § 63 Abs. 3 (bzw. 5)** unter Beachtung der europäischen beihilferechtlichen Regelungen, erforderlich. So könnte beispielsweise die folgende oder eine ähnlich lautende Formulierung aufgenommen werden: „Vermögensgegenstände dürfen nur zu ihrem vollen Wert veräußert werden. Ausnahmen können im Haushaltsplan zugelassen werden. Abweichend hiervon dürfen Vermögensgegenstände zu einem niedrigeren Wert veräußert werden, wenn dies dem Zweck des Klimaschutzes dient.“ Auch die Aufnahme einer entsprechenden Verpflichtung in das KlimaG BW wäre zu prüfen, um die Bedeutung für das Erreichen des Klimaschutzziels herauszustellen.

Bei der Bereitstellung der Flächen durch das Land ist im Vorfeld die Erfüllung **ökologischer Kriterien** sicherzustellen, so dass möglichst konfliktarme Flächen zur Verfügung gestellt werden.

5.5 Vorschlag 5: Bereitstellung und Ausweisung von ökologischen Ausgleichsflächen bzw. Vorrangflächen für den Naturschutz

Mit der EU-Notfallverordnung als Reaktion auf den völkerrechtswidrigen Angriff Russlands auf die Ukraine wurden zur Beschleunigung des Ausbaus der erneuerbaren Stromerzeugung zunächst temporär artenschutzrechtliche Erleichterungen für die Genehmigungsverfahren von Windenergieanlagen vorgesehen. Mit der auf Bundesebene umzusetzenden Renewable Energy Directive III (RED III) sollen diese Regelungen in sogenannten Beschleunigungsgebieten für erneuerbare Energien weiterhin gelten. Die Mitgliedsstaaten müssen diese Beschleunigungsgebiete im Rahmen der Umsetzung der RED III zeitnah ausweisen. Dabei sollen gemäß RED III zunächst „Gebiete, in denen keine erheblichen Umweltauswirkungen zu erwarten sind“ ermittelt werden (Art. 15c Absatz 1 a) Satz 1 und iii) Satz 1). Anschließend sind Maßnahmen vorzusehen, um „möglichen nachteiligen Umweltauswirkungen“ entgegenzuwirken (Art. 15c Absatz 1b). Für eine schnelle Umsetzung in die Praxis sind hier zunächst noch Klarstellungen und Begriffsdefinitionen erforderlich, ohne die eine abschließende Bewertung der Konsequenzen für den Umwelt- und Artenschutz noch nicht möglich erscheint. Das Land sollte sich auf Bundesebene für eine zeitnahe Umsetzung dieser Aspekte einsetzen.

Der Klima-Sachverständigenrat möchte an dieser Stelle betonen, dass Klimaschutz und Naturschutz Hand in Hand gehen müssen und nicht gegeneinander ausgespielt werden dürfen. Wenn in Beschleunigungsgebieten naturschutzrechtliche Erleichterungen gewährt werden, müssen gleichzeitig an anderer Stelle Rückzugsflächen für die betroffenen Arten geschaffen werden, auf denen keine anderweitige Nutzung möglich ist. **Das Land Baden-Württemberg sollte daher schnellstmöglich entsprechende Naturschutzzonen verbindlich ausweisen** und sich für die Umsetzung von Aufwertungsmaßnahmen einsetzen. Nur so kann der Populationsschutz für gefährdete Arten gewährleistet und gleichzeitig der Ausbau der erneuerbaren Energien beschleunigt werden. Diese Zonen sind nach Eignung für den Artenschutz zu wählen, unabhängig von den Eigentumsverhältnissen der jeweiligen Flächen.

Um hier auch in diesem Bereich der Vorbildfunktion des Landes gerecht zu werden, sollten neben der verbindlichen Ausweisung dieser Zonen, die sämtliche Flächen innerhalb eines Gebiets umfassen, unabhängig davon, ob diese in Landeseigentum, in kommunalem Eigentum oder im Privateigentum stehen, die enthaltenen Flächen im Eigentum des Landes identifiziert und deren Bewirtschaftung explizit unter Naturschutzaspekten optimiert werden.

6 Quellenverzeichnis

Abel L 2018. Evaluation und systematische Erfassung von Wärmepumpen-Systemen in Fließgewässern. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft Technische Universität Darmstadt; Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/8626/1/BachelorThesis_LukasAbel.pdf.

AGFW (Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.) 2021. AGFW - Hauptbericht 2020. Frankfurt am Main. Zuletzt abgerufen am 15.07.2024; abrufbar unter: https://www.agfw.de/securedl/sdl-eyJ0eXAiOiJKV1QiLCJhbGciOiJIUzI1NiJ9.eyJpYXQiOiJlE3MjEwNDY1NTYsImV4cCI6MTcyMTEzNjU1Ni-widXNlciI6MCwiZ3JvdXBzIjpbMCwtMV0sImZpbGUiOiJmaWxlYWRTaW4vdXNlcl91cGxvYWQvWm-FobGVuX3VuZF9TdGF0aXN0aWtI9WZXJzaW9uXzFfSElyMDIwLnBkZiIsInBhZ2UiOiJQzNn0.vA-HDCpw8l1FBwn-UHPg6w44vPYKXdIpFVdCg6qVLopk/Version_1_HB2020.pdf

BAF (Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung) 2022. Anlagenschutzbereiche nach §18a LuftVG. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: https://www.baf.bund.de/DE/Service/Anlagenschutz/InteraktiveKarte/interaktivekarte_node.html

BfG (Bundesanstalt für Gewässerkunde) 2020. Überflutungsflächen-DE, Hochwasserrisikomanagement-RL 2. Zyklus 2016-2021. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: <https://geoportal.bafg.de/smartfinder-Client/?lang=de#/datasets/iso/6b2ebfe3-d47f-464d-93ff-b848ab55de05>

BfN (Bundesamt für Naturschutz) 2022. Schutzgebiete in Deutschland. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: <https://geodienste.bfn.de/schutzgebiete?lang=de>

Blömer S, Ochse S, Huber B 2019. Wärmeatlas 2.0 - GIS-Modell des Nutzenergiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser im deutschen Gebäudebestand. Heidelberg, Leimen. S. 14. Zuletzt abgerufen am 21.07.2024; abrufbar unter: <https://www.geomer.de/unternehmen/aktuelles/artikel/waermeatlas-deutschland-20-hochauf-geloeste-waermebedarfsdaten.html>

BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) 2017. INSPIRE: Deutsches seismisches Regionalnetz (GRSN). Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: <https://geoportal.bgr.de/mapapps/resources/apps/geoportal/index.html?lang=de#/datasets/portal/881c035f-7734-47d7-9e65-2144f1b35cbe>

BKG (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie) 2021. Digitales Landschaftsmodell 1:250 000 (Ebenen) (DLM250). Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/catalog/product/view/id/759/s/digitales-landschaftsmodell-1-250-000-ebenen-dlm250-ebenen/category/8/?__store=default

BNatSchG (Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege) 2024. Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/bnatschg_2009/

BR (Bundesregierung) 2023. Die Bundesregierung – Aktuelles. Windkraftanlagen und Naturschutz. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/bundesnaturschutzgesetz-aktualisiert-2052452>

CM SAF (The Satellite Application Facility on Climate Monitoring) 2024. The Satellite Application Facility on Climate Monitoring. Surface radiation products. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: <https://wui.cmsaf.eu/safira/action/viewProduktSearch>

Copernicus 2016. European Digital Elevation Model (EU-DEM), version 1.0. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem/eu-dem-v1-0-and-derived-products/eu-dem-v1.0>

CLC (Corine Land Cover) 2018. CORINE Land Cover 2018 (vector/raster 100 m), Europe, 6-yearly. Zuletzt abgerufen am, 12.06.2024; abrufbar unter: <https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover/clc2018>

Deutsche Windguard 2023. Kostensituation der Windenergie an Land Stand 2023 – Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichtes gemäß § 97 Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2017) zum spartenspezifischen Vorhaben Windenergie an Land. Zuletzt abgerufen am, 12.06.2024; abrufbar unter: https://www.google.de/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/eeg-eb-wal-kostensituation-20231123.pdf%3F__blob%3Dpublication-File%26v%3D6&ved=2ahUKEwju7aXokNaGAXWWhf0HHXL5B1IQFnoECCoQAQ&usg=AOvVaw3LtSZTU-Dizyxjmwv4q0uAe

DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall) 2023. Abwasserwärme aus dem Auslauf von Kläranlagen. Lokalisierung von Standorten in Baden-Württemberg. In: Abwasserwärmenutzung. Zuletzt abgerufen am 17.10.2023; abrufbar unter: <https://www.abwasserwaerme-bw.de>

DWD (Deutscher Wetterdienst) 2018. Metadaten zu den Radaren des Radarverbunds des DWD. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: https://www.dwd.de/DE/derdwd/messnetz/atmosphaerenbeobachtung/_functions/HaeufigGesucht/koordinaten-radarverbund.pdf

EEA (Europäische Umweltagentur) 2022. Nature 2000 data – the European network of protected sites. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/natura-13>

EEG (Erneuerbare-Energien-Gesetz) 2024. Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/

Fachagentur Windenergie (Fachagentur Windenergie an Land) 2019. Anlagenhöhe - Flächenbedarf - Turbinenanzahl. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/Faktenpapiere/FA_Wind_Hoehenbegrenzungen_Wind-an-Land_03-2019.pdf

Fachagentur Windenergie (Fachagentur Windenergie an Land) 2023. Entwicklung der Windenergie im Wald - Ausbau, planerische Vorgaben und Empfehlungen für Windenergiestandorte auf Waldflächen in den Bundesländern. 8. Auflage, 2023. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Windenergie_im_Wald/FA-Wind_Analyse_Wind_im_Wald_8Auflage_2023.pdf

Energieatlas BW 2024. Energieatlas Baden-Württemberg. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: <https://www.energieatlas-bw.de/>

ISE (Fraunhofer ISE 2021). Stromgestehungskosten Erneuerbare Energie. Zuletzt abgerufen am 12.06.2024; abrufbar unter: https://www.google.de/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2021_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf&ved=2ahUKEwju7aXokNaGAXWWhf0HHXL5B1IQFnoECBEQAQ&usg=AOvVaw29O5WIVTr_z-Fgodlr4v7I

FVA (Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg) 2023. Aktionsplan Auerhuhn - Maßnahmenplan 2023-2028. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: <https://www.fva-bw.de/daten-tools/geodaten/open-data>

Jung C, Schindler D 2023. Introducing a new wind speed complementarity model. Energy 265, 126284. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126284>

KlimaG BW (Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetz Baden-Württemberg) 2024. Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetz Baden-Württemberg (KlimaG BW). Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: <https://www.landesrecht-bw.de/bsbw/document/jlr-KlimaSchGBW2023rahmen>

Koch M, Ganai I, Flachsbarth F, Winger C, Vogel M, Bürger V, Bauknecht D (Ökoinstitut e.V.) 2022. 100% klimaneutrale Energieversorgung – der Beitrag Baden-Württembergs und seiner zwölf Regionen. Zuletzt abgerufen am 15.07.2024; abrufbar unter: https://www.bund-bawue.de/fileadmin/bawue/Dokumente/Themen/Klima_und_Energie/BUND_Studie_klimaneutrale_Energieversorgung_Baden-Wuerttemberg_v8_MIT_DECKBLATT.pdf

Landtag BW 2023. Gesetz zum Erlass eines Klimaschutz und Klimawandelanpassungsgesetzes und zur Verankerung des Klimabelangs in weiteren Rechtsvorschriften. Drucksache 17/4015. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: https://www.landtag-bw.de/files/live/sites/LTBW/files/dokumente/WP17/Drucksachen/4000/17_4015_D.pdf

LIAG (Leibnitz Institut für angewandte Geowissenschaften) 2020. Geothermisches Informationssystem GeotIS. Zuletzt abgerufen am 21.07.2024; abrufbar unter: <https://www.geotis.de/geotisapp/geotis.php>

LLG (Landwirtschafts- und Landeskulturgesetz) 2024. Landwirtschafts- und Landeskulturgesetz (LLG) vom 14. März 1972. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: https://www.landesrecht-bw.de/bsbw/document/jlr-Lw_KultGBWrahmen

LUBW (Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg) 2010. Flächen im Landeseigentum. Daten aus dem Umweltinformationssystem (UIS) der LUBW, Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg.

LUBW (Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg) 2022. Wasserschutzgebiete. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: <https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/public/index.xhtml>

LUBW (Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg) 2024. Niedrigwasser-Informationszentrum Baden-Württemberg. Zuletzt abgerufen am 24.06.2024; abrufbar unter <https://niz.baden-wuerttemberg.de/>

MaStR (Marktstammdatenregister) 2024. Marktstammdatenregister. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: <https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR/>

Mellwig et al. 2022. Gebäudemodell (GEMOD). In: Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH. Zuletzt abgerufen am 10.07.2024; abrufbar unter: <https://www.ifeu.de/methoden-tools/modelle/gebaeudemodell/>.

MLR (Ministerium für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg) 2024. ForstBW und Stadt Bruchsal stellen gemeinsame Flächen für Windkraft zur Verfügung. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: <https://mlr.baden-wuerttemberg.de/de/unsere-service/presse-und-oeffentlichkeitsarbeit/pressemitteilungen/pressemitteilung/pid/forstbw-und-stadt-bruchsal-stellen-gemeinsame-flaechen-fuer-windkraft-zur-verfuegung>

Ortner S, Pehnt M, Blömer S, Auberger A, Steinbach J, Deurer J, Popovski E, Lösch O, Langreder N, Thamling N, Sahnoun M Rau D 2021. Analyse des wirtschaftlichen Potenzials für eine effiziente Wärme- und Kälteversorgung: Beitrag zur Berichtspflicht EnEff-RL, Artikel 14 Anhang VIII. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2021-08-05_cc_54-2021_effiziente_waerme-kaelteversorgung.pdf

Peters M, Steidle T, Böhnisch H 2021. Kommunale Wärmeplanung. Handlungsleitfaden. Stuttgart: KEA Klimaschutz und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH (KEA-BW). Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: https://www.kea-bw.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/094_Leitfaden-Kommunale-Waermeplanung-022021.pdf

Püttner A, Liebhart L, Wolf P, Jaschek C, Léon C, Wassermann S, Wegner N, Klug K, Otto J 2024. SyKonaS - Projektbericht. Nr. 4, Entwicklung und Anpassung von Instrumenten zur Konfliktbearbeitung im Rahmen der Energiewende. Zuletzt abgerufen am 09.07.2024; abrufbar unter: <http://dx.doi.org/10.18419/opus-14085>

Sander L, Jung C, Schindler D 2023. New concept of renewable energy priority zones for efficient onshore wind and solar expansion. Energy Conversion and Management 294, 117575. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117575>

Sandrock M, Maaß C, Weisleder S, Westholm H, Schulz W, Löschan G, Baisch C, Kreuter H, Reyer D, Mangold D, Riegger M, Köhler C 2020. Kommunaler Klimaschutz durch Verbesserung der Effizienz in der Fernwärmeversorgung mittels Nutzung von Niedertemperaturwärmequellen am Beispiel tiefeingeothermischer Ressourcen (Endbericht). Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. S. 357. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_10_21_climate_change_31_2020_kommunaler_klimaschutz_durch_verbesserung_der_effizienz_abschlussb_0.pdf.

Schlüter S 2024. Windkraft - Ministerin beklagt militärische Restriktionen. Staatsanzeiger – Wochenzeitung für Wirtschaft, Politik und Verwaltung in Baden-Württemberg. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: <https://www.staatsanzeiger.de/nachrichten/politik-und-verwaltung/ministerin-beklagt-militaerische-restriktionen/>

StaLa (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg) 2024a. Flächennutzung detailliert seit 2000 nach Nutzungsartenschlüssel. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: <https://www.statistik-bw.de/Bevoelk-Gebiet/GebietFlaeche/GB-FINutzung-AdV.jsp>

StaLa (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg) 2024b. 44,9 % der Gesamtfläche Baden-Württembergs gehören zur Landwirtschaftsfläche - Die bedeutendsten Nutzungsarten sind Ackerland und Grünland. Pressemitteilung 40/2024. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: <https://www.statistik-bw.de/Presse/Pressemitteilungen/2024040>

Stemmler R, Hammer V, Blum P, Menberg K 2022. Potential of low-temperature aquifer thermal energy storage (LT-ATES) in Germany. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: <https://doi.org/10.1186/s40517-022-00234-2>.

UM (Umweltministerium Baden-Württemberg) 2019. Freiflächensolarthermie Handlungsleitfaden. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; Abrufbar unter: <http://www.um.baden-wuerttemberg.de>.

UM (Umweltministerium Baden-Württemberg) 2024. Waldflächen bei Bruchsal für Windkraft bereitgestellt. Pressemitteilung vom 04.07.2024. Zuletzt abgerufen am 09.07.2024; abrufbar unter: <https://www.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/waldflaechen-bei-bruchsal-fuer-windkraft-bereitgestellt>

von Oehsen A 2021. Potenzialstudie Klimafreundliche Fernwärme ohne GKM 2030. BUND Heidelberg & Heidelberg kohlefrei. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: https://www.bund-heidelberg.de/fileadmin/heidelberg/Materialien/Waermewende_in_Heidelberg/2021-Fernwaerme_Klimaschutzpotenziale_Studie_Teil1.pdf.

WindBG (Windenergieflächenbedarfsgesetz) 2023. Gesetz zur Festlegung von Flächenbedarfen für Windenergieanlagen an Land. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/windbg/>

WindSeeG (Gesetz zur Entwicklung und Förderung der Windenergie auf See) 2024. Gesetz zur Entwicklung und Förderung der Windenergie auf See. Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/windseeg/>

WiWo (Wirtschaftswoche) 2023. Pachtpreise für Windrad-Standorte vervierfacht: "Da ist die Gier ausgebrochen". Zuletzt abgerufen am 12.06.2024; abrufbar unter: <https://www.wiwo.de/my/unternehmen/mittelstand/windraeder-pachtpreise-fuer-windrad-standorte-vervierfacht-da-ist-die-gier-ausgebrochen/29474102.html>

WPG (Gesetz für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze) 2024. Gesetz für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze. Zuletzt abgerufen am 15.07.2024; abrufbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/wpg/>

Xiang Y, Xie Z, Furbo S, Wang D, Gao M, Fan J 2022. A comprehensive review on pit thermal energy storage: Technical elements, numerical approaches and recent applications. Journal of Energy Storage 55. Zuletzt abgerufen am 15.07.2024; abrufbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X22017042>

ZSW (Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg) 2022. Sektorziele 2030 und klimaneutrales Baden-Württemberg 2040. Teilbericht Sektorziele 2030 Zuletzt abgerufen am 20.07.2024; abrufbar unter: https://www.zsw-bw.de/fileadmin/user_upload/PDFs/SYS_Projekte/2022-06-24_Teilbericht_Sektorziele_BW.pdf

MEHR INFORMATIONEN

Klima-Sachverständigenrat Baden-Württemberg
Kernerplatz 9 · 70182 Stuttgart
E-Mail: klima-sachverstaendigenrat@um.bwl.de



**KLIMA-SACHVERSTÄNDIGENRAT
BADEN-WÜRTTEMBERG**