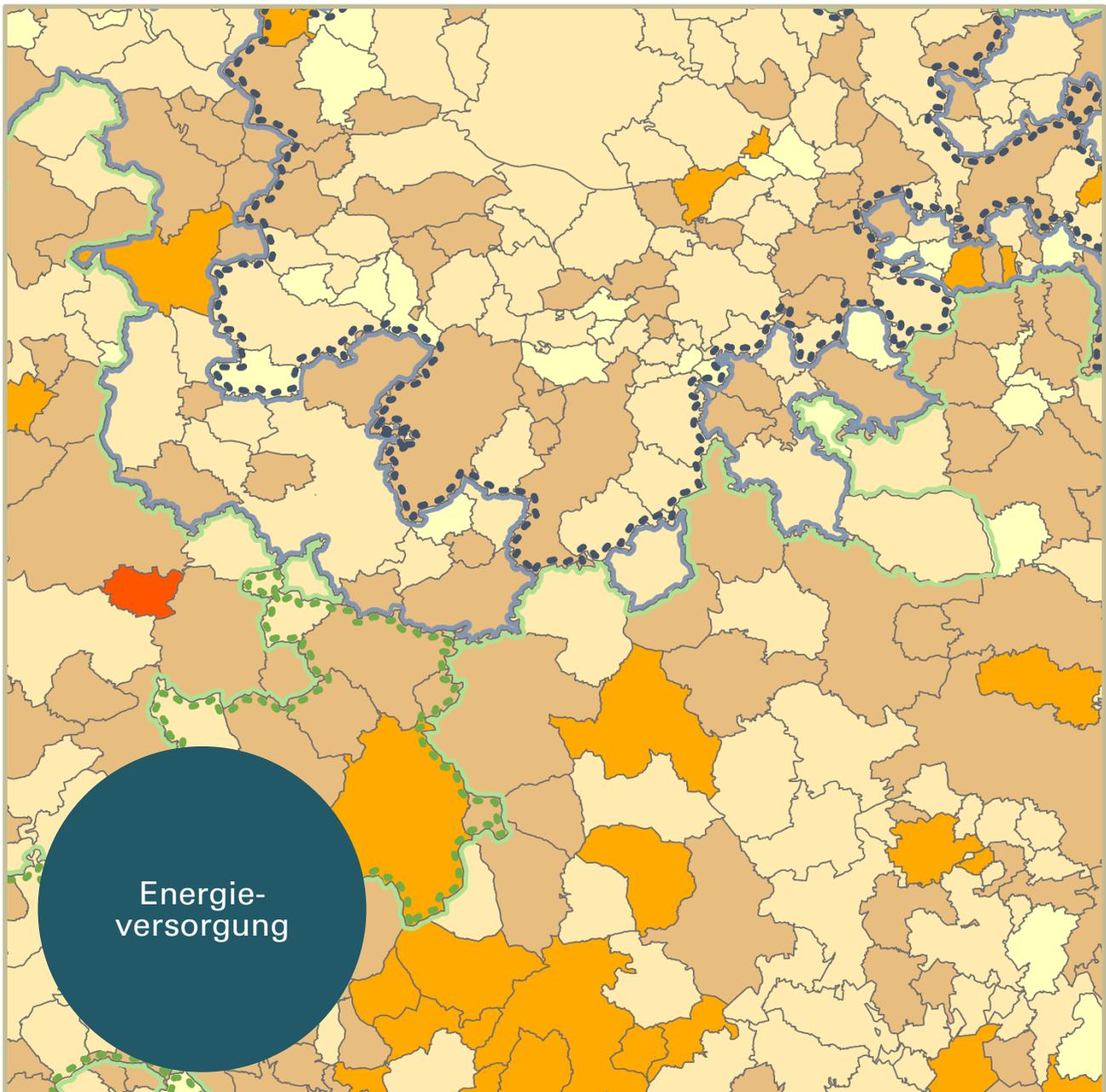


Raumanalyse Baden-Württemberg: Energieversorgung

Kurzbericht Nr. 13



Ludger Eltrop, Ulrich Fahl (2025)

Zahlen, Daten und Fakten sind eine wichtige Grundlage für die Landesentwicklungsplanung und Raumentwicklung. Im Rahmen der Neuaufstellung des Landesentwicklungsplans hat das Ministerium für Landesentwicklung und Wohnen Baden-Württemberg Gutachten zur Erstellung einer umfassenden Raumanalyse in Auftrag gegeben. Hierin nehmen die Gutachter die aktuellen räumlichen Strukturen in Baden-Württemberg sowie die Raumentwicklung seit dem Jahr 2000 und zukünftige Trends in den Blick. Die Inhalte werden in verschiedenen Berichten zur Raumanalyse Baden-Württemberg festgehalten und bilden eine Grundlage für die Berichterstattung im Rahmen der Raumb Beobachtung Baden-Württemberg. Soweit für die Raumordnung relevant fließen sie neben vielen weiteren Erkenntnissen in den Abwägungsprozess bei der Neuaufstellung des Landesentwicklungsplans ein.

Raumanalyse Baden-Württemberg (2025): Energieversorgung
Kurzbericht Nr. 13

Autoren/innen: Dr. Ludger Eltrop, Dr. Ulrich Fahl (IER)

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. habil. Jörn Birkmann (IREUS)

Federführung des Berichts

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER)
Universität Stuttgart
Heßbrühlstrasse 49a, 70565 Stuttgart
+49 (0)711 685 87816
+49 (0)711 685 87883
ludger.eltrop@ier.uni-stuttgart.de
www.ier.uni-stuttgart.de

Der Bericht wurde im Auftrag des Landes Baden-Württemberg vertreten durch das Ministerium für Landesentwicklung und Wohnen erstellt. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Stuttgart, Mai 2025

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
1 Einführung.....	4
1.1 Zielsetzungen und Strategien für Energie und Klimaschutz.....	4
1.2 Raumbedeutsamkeit und Flächenbedarf für Energie und Klimaschutz.....	7
1.3 Kritische Infrastrukturen der Energieversorgung.....	8
1.4 Spezifischer Flächenbedarf für Energietechnologien und Erneuerbare Energien	10
1.5 Flächeninanspruchnahme für den Anbau von Energiepflanzen	12
1.6 Entwicklung der Flächeninanspruchnahme für erneuerbare Energien	14
2 Vorgehensweise und Methodik	16
2.1 Energieatlas Baden-Württemberg	16
2.2 Portal des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg	17
2.3 Marktstammdatenregister	19
2.4 Transformationsatlas der Energiewende.....	19
3 Aktuelle Situation der Energieversorgung in Baden-Württemberg.....	21
3.1 Gesamtdarstellung.....	21
3.2 Energieerzeugung mit erneuerbaren Energien.....	24
3.2.1 Solarenergie.....	28
3.2.2 Windenergie	42
3.2.3 Bioenergie.....	49
3.2.4 Geothermie und Umweltwärme	63
3.2.5 Wasserkraft	72
3.3 (Konventionelle) Erzeugungs- und Umwandlungsanlagen, u.a. Kraftwerke.....	76
3.4 Energieverteilung, Netze und sonstige Energieinfrastrukturen in Baden-Württemberg	80
3.4.1 Wärmenetze	81
3.4.2 Stromnetze	81
3.4.3 Stromladesäulen für die E-Mobilität	84
3.4.4 Gasnetz – Ferngasnetz und Verteilnetze.....	86
3.4.5 Netze für flüssige Energieträger – Mineralölwirtschaft	89
4 Zukünftige Entwicklung des Energiesystems in Baden-Württemberg	91
4.1 Energiebedarf in Baden-Württemberg	91
4.2 Ausbauziele der Energieerzeugungsanlagen in Baden-Württemberg	94

5	Potenziale erneuerbarer Energien in Baden-Württemberg	96
5.1	Potenziale Solarenergie.....	96
5.1.1	Solar-Potenzial Dachflächen und Gebäude.....	96
5.1.2	Solarpotenzial Freifläche.....	101
5.1.3	Solarpotenzial auf Sonderflächen - Deponien und Baggerseen.....	105
5.2	Potenziale Windenergie	109
5.3	Potenziale Bioenergie.....	115
5.4	Wasserkraft-Potenzial	119
5.5	Geothermie-Potenzial	120
5.5.1	Oberflächennahe Geothermie und Erdwärmesonden	120
5.5.2	Tiefe Geothermie	121
5.6	Potenziale erneuerbarer Energien – Gesamtschau.....	123
5.7	(Konventionelle) Erzeugungs- und Umwandlungsanlagen, u.a. Kraftwerke.....	126
5.8	Energieverteilung, Netze und Energieinfrastruktur	127
5.8.1	Wärmenetze.....	127
5.8.2	Stromnetze.....	128
5.8.3	Gasnetze.....	131
5.8.4	Wasserstoff-Infrastruktur	132
6	Flächeninanspruchnahme Erneuerbare Energien – Übersicht	135
7	Schlussfolgerungen	150
8	Literaturverzeichnis	151
9	Anhang.....	157
9.1	BSI-KritisV.....	157
9.2	Aufbereitungsanlagen für Biogas zu Biomethan und Einspeisung in das Erdgasnetz. Quelle: Energieatlas Baden-Württemberg. (Datenquelle: dena, Stand: 2015).....	159
9.3	Geothermische Anlagen in Baden-Württemberg zur Nutzung als Thermalbad bzw. Gebäudeheizung	160
9.4	Ladepunkte und Ladestationen für die E-Mobilität in Baden-Württemberg, die öffentlich zugänglich sind, aufgeschlüsselt nach Landkreisen	162
9.5	Stand der Umsetzung von Netzausbauvorhaben des Bundesbedarfsplangesetzes im Verant- wortungsbereich der TransnetBW GmbH und durch andere Übertragungsnetzbetreiber durchzu- führende Maßnahmen in Baden-Württemberg, (Stand 10/2024).....	164

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Pfad der Treibhausgasemissionen in Baden-Württemberg im Zielszenario 2030/2040 der Landesregierung Baden-Württemberg mit Unterteilung in einzelne Sektoren (LULUCF = Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft). Quelle: (ZSW und Partner 2023)...	5
Abb. 2: Spezifischer Flächenbedarf für erneuerbare Energien-Anlagen in Bezug auf ihre Leistung (in ha/MW); diverse Quellen, u.a. (UBA 2023) und Annahmen; für neu gebaute Anlagen 2024; Flächenbedarf für Energiepflanzen nicht berücksichtigt.....	12
Abb. 3: Flächeninanspruchnahme für neue PV-Freiflächenanlagen nach Inbetriebnahme; aus (UBA 2022)	15
Abb. 4: Der Energieatlas Baden-Württemberg: beispielhafte Daten- und Informationsdarstellungen. Oben links: bestehende Windenergieanlagen, oben rechts: Solarpotenzial auf Dächern, unten links: Wärmebedarfsdichte von Wohngebäuden, unten rechts: Steckbriefe Wärmenetze. Quelle: https://www.energieatlas-bw.de	17
Abb. 5: Dashboard „Ausbau und Potenzial Photovoltaik“ aus dem Daten- und Kartendienst Online 4.0 der LUBW. Es werden verschiedene Elemente angezeigt z. B. die Leistungskennzahlen oben links und rechts, der Jahresverlauf des Ausbaus im Verhältnis zur Zielsetzung (oben Mitte) oder der Zubau in Städten und Kreisen, hier auch unterschieden in PV-Freifläche und PV auf Gebäuden. Auszug vom 7.10.2024. Quelle: https://umweltdaten.lubw.baden-wuerttemberg.de/workbooks/3O2yt6w4Toa4mOn4TDIu,hash=tm3505tUvMvLnM0NbakjxFpkMiglRwjFjD93Z7AzRzEPK08U--9RAvuyO-o=/worksheets/3GQfbRTDS4CfzEozj-VY	18
Abb. 6: Beispielhafte Darstellungen aus dem Transformationsatlas der Energiewende: links: Strombilanz getrennt nach Erzeugung und Verbrauch (Inlet mit Ausschnitt für Baden-Württemberg), rechts: Bilanz aus Leistungserzeugung und -verbrauch je Netzknoten in Baden-Württemberg für 2045 im Szenario 2045 AriadneSued PV+V2'; Kreisgröße repräsentiert die Gesamtbilanz in MW (Bildausschnitt Baden-Württemberg).....	20
Abb. 7: Energieflussbild 2022 für Baden-Württemberg [in PJ] (vorläufig; Energieverbrauchswerte enthalten teilweise Schätzungen, insbesondere bei den Energieträgern Mineralöle und Mineralölprodukte. Abweichungen in der Summe durch Runden der Zahlen. Datenquelle: Energiebericht 2024, Stand August 2024. Statistisches Landesamt Baden-Württemberg. Quelle: (UM BW 2024a.....)	23
Abb. 8: Bruttostromerzeugung in Baden-Württemberg nach Energieträgern und Bruttostromverbrauch in Baden-Württemberg. Quelle: (UM BW 2024c).....	24
Abb. 9: Installierte Erzeugungsleistung erneuerbarer Energien in Baden-Württemberg zur Stromerzeugung nach Energieträgern. Der Anteil gesicherter Leistung (gelbe Linie) bezeichnet den Anteil an Energie, auf den man zu jeder Zeit in vollem Umfang zugreifen kann. Er ist eine rechnerische Größe aus mehreren Kenndaten und berücksichtigt vor allem die Volatilität bzw. Profile der natürlichen Energiequellen wie Solarstrahlung, Wind oder Wasserverfügbarkeit. Quelle: (UM BW 2024c).....	25

Abb. 10: Erzeugte Endenergie zur Wärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien in Baden-Württemberg nach Energieträgern. Der Anteil am Endenergieverbrauch (blaue Linie) liegt für 2023 bei 18%. Quelle: (UM BW 2024d).....	26
Abb. 11: Anteile erneuerbarer Energien an der Energieversorgung in Baden-Württemberg (in %). (Datenquelle: (UM BW 2024c); Darstellung IER).....	27
Abb. 12: Stromerzeugung in GWh und installierte Leistung in MWp aus Photovoltaik in Baden-Württemberg. Quelle: (UM BW 2024c).....	29
Abb. 13: Gebäude-PV-Anlagen in Baden-Württemberg im Verhältnis zur Raumkategorie gemäß LEP 2002; Quelle: MStR 2023, Analyse und Darstellung IER.....	31
Abb. 14: Spezifische Leistungsdichte für PV-Dachanlagen in kW/km ² und ihre Verteilung auf die Landkreise in Baden-Württemberg; Quelle: Marktstammdatenregister 2023 und eigene Analyse.....	32
Abb. 15: Jährliche Neuinstallation bzw. Anlagenbestand nach Zubaujahr von PV-Anlagen in Baden-Württemberg aufgeteilt nach Dach- und Freiflächenanlagen; Quelle: (UM BW 2024c)	34
Abb. 16: Freiflächen-PV-Anlagen in Baden-Württemberg im Verhältnis zur Raumkategorie gemäß LEP 2002; Quelle: MStR 2023, eigene Analyse	36
Abb. 17: Spezifische Leistungsdichte für PV-Freiflächenanlagen in kW/km ² und ihre Verteilung auf die Landkreise in Baden-Württemberg; Quelle: MStR 2023, eigene Analyse.....	37
Abb. 18: Wärmeerzeugung in GWh und installierte Kollektorfläche in m ² aus solarthermischen Kollektoranlagen in Baden-Württemberg. Quelle: (UM BW 2024c).....	38
Abb. 19: Anlagen zur Nutzung solarer Nah- und Fernwärme; Ausschnitt Baden-Württemberg aus Deutschlandkarte; rot: in Betrieb, grau: in Planung; Quelle UM BW 2024d (Datenquelle: Solites, Stand: Mai 2024).....	39
Abb. 20: Stromerzeugung aus Windenergie in Baden-Württemberg. Quelle: UM BW 2024c	44
Abb. 21: Jährlicher Zubau an Windenergie-Leistung in Baden-Württemberg [MW]. Quelle: UM BW 2024c.....	45
Abb. 22: Windenergieanlagen in Baden-Württemberg 2022 - räumliche Verteilung der Anlagenstandorte mit Raumkategorien gemäß LEP 2002 (Karte: IER, Daten: Marktstammdatenregister 2023)	47
Abb. 23: Biogasanlagen in Baden-Württemberg; Anlagenanzahl, Zubau und installierte elektrische Leistung. Quelle: LEL Baden-Württemberg und eigene Analyse.....	50
Abb. 24: Stromerzeugung aus Biogas in Baden-Württemberg. Installierte Leistung (MW) als rote Linie und produzierte Energie (GWh) als grüne Balken; Quelle: UM BW 2024c.....	52
Abb. 25: Stromerzeugung aus fester Biomasse in Baden-Württemberg. Quelle: UM BW 2024c.....	53

Abb. 26: Wärmeerzeugung aus fester Biomasse (Einzelfeuerstätten und Zentral-Heizungen und Heiz(kraft)werke (HKW) in Baden-Württemberg. Quelle: UM BW 2024c	54
Abb. 27: Wärmeerzeugung aus gasförmiger Biomasse (Biogas, Deponie- und Klärgas) in Baden-Württemberg. Quelle: UM BW 2024c	55
Abb. 28: Biogasanlagen in Baden-Württemberg Stand 2022; räumliche Anordnung. Quelle: Marktstammdatenregister; eigene Analyse	58
Abb. 29: Biogasanlagen (Anzahl) in den Landkreisen Baden-Württembergs (Stand 2021); (Quelle: www.lwlweb.de/app/ds/lwl/a3/Online_Kartendienst_extern/Karten/51148/index.html)	59
Abb. 30: Biogas-Aufbereitungsanlagen in Baden-Württemberg (Stand 2022); (Quelle: Marktstammdatenregister)	61
Abb. 31: Stromerzeugungsanlagen auf Basis Biomasse in Baden-Württemberg (Stand 2022); (Quelle: Marktstammdatenregister). Jeder Punkt repräsentiert eine Einheit. In einer Anlage können ggf. auch mehrere Einheiten gebündelt sein.	62
Abb. 32 a und b: Beispielhafte Darstellung der Temperaturverhältnisse im Untergrund in Baden-Württemberg. Vorhergehende Seite (a): in 300 m Tiefe, diese Seite: in 2.500 m Tiefe (Daten: LGRB, Darstellung IER)	66
Abb. 33: Ausschnitt von geologisch und geothermisch relevanten Daten aus dem geothermischen Informationssystem GEOTIS; Auswahl: Untersuchungswürdige Gebiete für Geothermie und für CO ₂ -Einlagerung, Standorte Stromerzeugung und Gebäudeheizung, Geothermisches Reservoir Oberjura (T/H Malm), Bohrungen zur Exploration, Störungszonen und topographische Grenzen und Siedlungsfläche; (Quelle: GEOTIS, www.geotis.de/geotisapp/).....	67
Abb. 34: Stromerzeugung aus Geothermie in Baden-Württemberg. Quelle: UM BW 2024c.....	68
Abb. 35: Wärmebereitstellung aus tiefer Geothermie in Baden-Württemberg. Quelle: UM BW 2024c.....	69
Abb. 36: Wärmebereitstellung aus Umweltwärme in Baden-Württemberg. Quelle: UM BW 2024c	70
Abb. 37: Stromerzeugung aus Wasserkraft in Baden-Württemberg. Quelle: UM BW 2024c.....	73
Abb. 38: Ausbau des Flusssystem Hoch- und Oberrhein mit Wasserkraftanlagen. Quelle: Neue Energie, Ausgabe Okt. 2010.....	75
Abb. 39: Struktur des bisherigen, fossil-basierten Energiesystems	77
Abb. 40: Kraftwerksstandorte (Erdgas, Steinkohle und Mineralölanlagen) in Baden-Württemberg innerhalb der Raumkategorien. Stand 2022 (Datenquellen: MaStR und BNetzA Kraftwerkliste; Darstellung IER)	79
Abb. 41: Strom-Übertragungsnetze und Umspannwerke der Transnet BW GmbH in Baden-Württemberg (in rot) und Netze der Amprion GmbH (in grün). (Quelle: Transnet BW GmbH, 2023; Amprion GmbH 2023).....	83

Abb. 42: E-Ladepunkte in Baden-Württemberg – jährlich installierte Einheiten (blaue Balken, linke Skala) und kumulierte Anzahl (rote Linie, rechte Skala). Stand: 10/2024. Quelle: Bundesnetzagentur.....	85
Abb. 43: Ferngasleitungen und Erdgas-Infrastruktur in Baden-Württemberg mit Gasnetzausbauvorhaben der terranets BW GmbH. Quelle: UM BW.....	87
Abb. 44: Gas Versorgungsgebiete und Gas-Verteilnetzbetreiber in Baden-Württemberg. (Quelle: Energieatlas Baden-Württemberg, Daten: ene't GmbH)	88
Abb. 45: Raffinerien und Pipelines in Baden-Württemberg und in Bayern. (Quelle: en2x https://en2x.de/positionen/raffinerien-und-produktion/).....	89
Abb. 46: Streckenverlauf (ungefähr) des Central European Pipeline System CEPS in Baden-Württemberg; Quelle: (IMI e.V. 2012)	90
Abb. 47: Entwicklung des Energieverbrauchs (Endenergie) in Baden-Württemberg bis 2040 im Zielszenario nach Sektoren. Quelle: (ZSW und Partner 2022)	92
Abb. 48: Entwicklung des Energieverbrauchs (Endenergie) in Baden-Württemberg bis 2040 im Zielszenario nach Energieträgern. Quelle: (ZSW und Partner 2022).....	93
Abb. 49: Dachflächenpotenzial für Gebäude-Photovoltaik in Baden-Württemberg in km ² (bei einer durchschnittlichen Leistung von 215 Wp/m ² entspricht 1 km ² einer Leistung von etwa 200 MW); Verteilung auf Landkreise. Quelle: Energieatlas BW.....	98
Abb. 50: Aktuell verfügbares Ausbaupotenzial (Differenz zwischen Potenzial und derzeit installierter Anlagenleistung) für Gebäude-Photovoltaik in Landkreisen in Baden-Württemberg in MW, Stand 2022, (Datenquellen für Potenziale: Energieatlas Baden-Württemberg, für PV-Anlagen: Marktstammdatenregister; Darstellung: IER).	100
Abb. 51: Benachteiligte Gebiete in Baden-Württemberg gemäß EEG- Definition. Quelle: Energieatlas Baden-Württemberg.....	101
Abb. 52: Potenzialflächen für Freiflächen-Photovoltaik auf benachteiligten Gebieten in Baden-Württemberg; Datenquelle: Energieatlas BW; Darstellung: IER	104
Abb. 53: Potenzialflächen für Freiflächen-Photovoltaik in Baden-Württemberg auf Sonderflächen – hier Deponien; Datenquelle: Energieatlas BW; Darstellung: IER	106
Abb. 54: Potenzialflächen für Freiflächen-Photovoltaik in Baden-Württemberg auf Sonderflächen – hier Baggerseen bzw. ‚Floating‘ PV, herangezogen wurde das Szenario 45 % BD Max aus dem Energieatlas Baden-Württemberg; Stand 2021, Datenquelle: Energieatlas BW; Darstellung: IER	108
Abb. 55: Windpotenzialflächen in Baden-Württemberg gemäß Windatlas 2019 mit einer mittleren gekappten Windleistungsdichte von 215 Wp/m ²); Datenquelle: Energieatlas Baden-Württemberg; Darstellung: IER.	110

Abb. 56: Windenergie-Potenzial in Landkreisen in Baden-Württemberg in km ² ; Datenquelle: Energieatlas Baden-Württemberg. Darstellung: IER	112
Abb. 57: Verfügbares Ausbaupotenzial für Windenergie (Differenz zwischen Potenzial und bereits errichteten Windenergieanlagen) in den Landkreisen Baden-Württembergs Stand 2018; Datenquelle: Energieatlas Baden-Württemberg und Marktstammdatenregister; Darstellung: IER	114
Abb. 58: Flächennutzung in Baden-Württemberg, inklusive Maisanbau und die Anteile für die Bioenergie. Quelle: (AEE 2013).....	117
Abb. 59: Räumliche Verteilung der Biomassepotenziale in Baden-Württemberg, links Waldfläche (Energieholz), rechts Energiepflanzen auf landwirtschaftlichen Flächen. Quelle: (AEE 2013). 118	
Abb. 60: Räumliche Verteilung der Biomassepotenziale in Baden-Württemberg, links Stroh, rechts tierische Exkremete. Quelle: (AEE 2013).....	119
Abb. 61: Geothermische Potenzialabschätzung und Anwendungseignung (Wärme- oder Stromerzeugung) aufgrund der Temperaturverteilung in 1.000 m Tiefe im Oberrheingraben; Kartenausschnitt nördlicher Teil. (Quelle: Abschlussbericht Teil 4 - GeORG-Projektteam; 2013)	122
Abb. 62: Geothermische Potenzialabschätzung und Anwendungseignung (Wärme- oder Stromerzeugung) aufgrund der Temperaturverteilung in 2.500 m Tiefe im Oberrheingraben; Kartenausschnitt nördlicher Teil. (Quelle: Abschlussbericht Teil 4 - GeORG-Projektteam; 2013).....	123
Abb. 63: Der Ausbau der Stromnetze und die genehmigten bzw. in Bau gegangenen Trassenkilometer bis Stand 2024. Quelle: www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/netzausbau-suedlink-2222762	129
Abb. 64: Netzausbauplan der Übertragungsnetzbetreiber für Baden-Württemberg. Quelle: LUBW	130
Abb. 65: Ausbaupläne für das deutsche Wasserstoffnetz bis 2032 und seine Anbindung an das Europäische Wasserstoffnetz (European Hydrogen Backbone - EHB). Quelle: www.h2-fuer-bw.de bzw. FNB Gas: https://fnb-gas.de	133
Abb. 66: Wasserstoff-Pipelineprojekt „H2 GeNeSiS“ in der Region Stuttgart. Umsetzung 2024; Anbindung an die SEL 2030. Quelle: https://h2genesis.region-stuttgart.de	134
Abb. 67: Visualisierung der räumlichen Verteilung und Dichte (Anlagen pro Fläche) von Solar-Freiflächenanlagen in Baden-Württemberg; Stand 2022; Datenquelle: Marktstammdatenregister 2023; Darstellung: IE.....	R139
Abb. 68: Visualisierung der räumlichen Verteilung und Dichte (Anlagen pro Fläche) von Windenergieanlagen in Baden-Württemberg; Stand 2022; Datenquelle: Marktstammdatenregister 2023; Darstellung: IER.....	141

Abb. 69: Visualisierung der räumlichen Verteilung und Dichte (Anlagen pro Fläche) von Biomasseanlagen zur Stromerzeugung in Baden-Württemberg als „heat map“; Stand 2022; Datenquelle: Marktstammdatenregister 2023; Darstellung: IER.....143

Abb. 70: Visualisierung der räumlichen Verteilung und Dichte (Anlagen pro Fläche) von Wasserkraftanlagen in Baden-Württemberg; Stand 2022; Datenquelle: Marktstammdatenregister 2023; Darstellung: IER..... 145

Abb. 71: Visualisierung der räumlichen Verteilung von Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien in Baden-Württemberg; Stand 2022; Datenquelle: Marktstammdatenregister 2023; Darstellung: IER.....147

Tabellenverzeichnis:

Tab. 1: Sektorzielvorgaben 2030 für Klimaschutz in Baden-Württemberg gemäß KlimaG BW 2023.4

Tab. 2: Zusammenfassung der Kategorien und Schwellenwerte für die Bewertung von Energieversorgungsanlagen als kritische Infrastruktur gemäß BSI-Gesetz bzw. BSI-KritisV (Bundesamt für Justiz 2016) 9

Tab. 3: Einschätzung des IER von Energieerzeugungs- und Energieinfrastrukturanlagen als kritische Infrastruktur gemäß BSI-Gesetz bzw. BSI-KritisV (IER-eigene Einschätzung)..... 10

Tab. 4: Intensität der Landnutzung (in m²/MWh) verschiedener Energieformen und -technologien als Mittelwert aus Anlagen in Europa und USA. (Quelle: verändert nach (UNCCD United Nations Convention to Combat Desertification 2017)) 11

Tab. 5: Flächeninanspruchnahme 2020/2024 für den Anbau von Energiepflanzen in Baden-Württemberg 14

Tab. 6: PV-Dachanlagen in den zwölf Regionen Baden-Württembergs aufgeteilt auf die Raumkategorien gemäß LEP 2002 (Raumkategorien: I: nicht kategorisiert, II: Ländlicher Raum im engeren Sinne, III: Randzonen um die Verdichtungsräume; IV: Verdichtungsgebiete im Ländlichen Raum, V: Verdichtungsgebiete); Stand: 2022 Quelle: MStR 1.4.2023 und eigene Analyse; in Raumkategorie I gibt es keine Einträge. 30

Tab. 7: PV-Freiflächenanlagen in den zwölf Regionen Baden-Württembergs aufgeteilt auf die Raumkategorien gemäß LEP 2002 (Raumkategorien: I: nicht kategorisiert, II: Ländlicher Raum im engeren Sinne, III: Randzonen um die Verdichtungsgebiete; IV: Verdichtungsgebiete im Ländlichen Raum, V: Verdichtungsgebiete); Da in Kat. I keine Anlagen verzeichnet sind, ist diese Kategorie nicht dargestellt. Quelle: MStR 2023 und eigene Analyse..... 35

Tab. 8: Windenergieanlagen in den zwölf Regionen Baden-Württembergs aufgeteilt auf die Raumkategorien gemäß LEP 2002 (Raumkategorien: I: nicht kategorisiert, II: Ländlicher Raum im engeren Sinne, III: Randzonen um die Verdichtungsgebiete; IV: Verdichtungsgebiete im Ländlichen Raum, V: Verdichtungsgebiete); Quelle: MStR 2023 und eigene Analyse. 46

Tab. 9: Pumpspeicherkraftwerke in Baden-Württemberg. Quelle: Wikipedia; https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Pumpspeicherkraftwerken#Deutschland) 74

Tab. 10: Kraftwerkliste BNA: Elektrische Netto-Nennleistung des konventionell-fossil betriebenen Kraftwerkspark in Baden-Württemberg in [MW_{gesamt}] für Anlagen mit einer Leistung größer als 10 MW und Einträge zu erneuerbaren Energien. Quelle: Bundesnetzagentur, Datenquelle: Marktstammdatenregister (MaStR) Stand: 15. April 2024 78

Tab. 11: Strom-Ladepunkte und -Stationen für E-Mobilität in Baden-Württemberg (gesamt). Quelle: Bundesnetzagentur (BNetzA), Stand: 17. Oktober 2024 84

Tab. 12: Prognose der installierten Leistung in GW zur Stromerzeugung für das Zielszenario Baden-Württemberg und nötiger Zubau zw. 2020 und 2040. Quelle: (ZSW und Partner 2022) 94

Tab. 13: Stromerzeugung in TWh gemäß der Ausbauziele für (erneuerbare) Energien in Baden-Württemberg für den Klimaschutzpolitischen Zielkorridor bis 2040; Datengrundlage: (ZSW und Partner 2022) und (Landtag von Baden-Württemberg 30.09.2022).....	95
Tab. 14: Potenzial für Dachflächen-Photovoltaik (PV) in Baden-Württemberg (Quelle: Energieatlas Baden-Württemberg) und installierte Leistung für 2022 (Quelle: UM BW 2023b)	97
Tab. 15: Potenzial Freiflächen-PV in Baden-Württemberg (eigene Rechnung nach Energieatlas Baden-Württemberg)	103
Tab. 16: Potenzial (wirtschaftlich erschließbar) für Photovoltaik auf Sonderflächen - Wasserflächen in Baden-Württemberg 2020 für 3 Szenarien. Quelle: Energieatlas Baden-Württemberg	107
Tab. 17: Übersicht Potenziale Windenergie. Quelle: Energieatlas Baden-Württemberg	111
Tab. 18: Technisches Potenzial Bioenergie (in PJ/a) für verschiedene Biomassen in zwei Szenarien (Basis und Nachhaltig) in Baden-Württemberg für das Jahr 2020, Quelle: (Reinhardt et al. 2005)	115
Tab. 19: Zukünftig (2050) nachhaltig erschließbares Biomasse-Potenzial in Baden-Württemberg (Technisches Primärenergieträgerpotenzial in PJ/a), Quelle: (Brellocks et al. 2013).....	116
Tab. 20: Bioenergie-Potenzial in Baden-Württemberg (Technisches Brennstoffpotenzial in PJ/a), Quelle: (AEE 2013)	117
Tab. 21: Technisches Bereitstellungspotenzial für eine Wärmeversorgung aus hydrothermaler Geothermie in Baden-Württemberg bzw. im Oberrheingraben (ORG) und süddeutschen Molassebecken (gesamt), (Quelle: (UBA 2020)).....	121
Tab. 22: Potenziale zur Stromerzeugung in Baden-Württemberg aus erneuerbaren Energien, a) allgemein als gut verfügbar anzusehen und maximale Potenziale aus jeweiligen Szenarioanalysen. Quellen: UM BW, Energieatlas Baden-Württemberg, Fluri et al. 2024, IER,	124
Tab. 23: Gut verfügbare Potenziale zur Stromerzeugung in Baden-Württemberg aus erneuerbaren Energien und aktuelle politische Zielsetzung zur Potenzialausnutzung. Quelle: (Fluri et al. 2024)	125
Tab. 24: Mögliche Kategorien der Flächeninanspruchnahme durch erneuerbare Energien und Energieinfrastrukturen mit Beispielen.	135

Abkürzungsverzeichnis

BGA	Biogasanlagen
BNetzA	Bundesnetzagentur
CSP	Concentrated Solar Power (Konzentrierendes Solarkraftwerk)
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EEV	Endenergieverbrauch
FFPV-Anlagen	Freiflächen-PV-Anlagen
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
GIS	Geographisches Informationssystem
HKW	Heizkraftwerk
IEKK	Integriertes Energie- und Klimaschutzkonzept (Baden-Württemberg)
IT & TK	Informationstechnologie und Telekommunikation
KKW	Kernkraftwerk
KMR	Klima-Maßnahmen-Register (Baden-Württemberg)
KritisV	Verordnung zur Bestimmung Kritischer Infrastrukturen nach dem BSI-Gesetz
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KW	Kraftwerk
kW/MW/GW/TW	Kilo-/Giga-, Mega- bzw. Terrawatt (Maß für Leistung)
kWh/MWh/GWh/TWh	Kilo-/Giga-, Mega- bzw. Terrawattstunden (Maß für Arbeit)
KUP / SRC	Kurzumtriebsplantage / Short Rotation Coppice
LEP	Landesentwicklungsplan
LPIG	Landesplanungsgesetz
LULUCF	Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft
MaStR	Marktstammdatenregister
Nawaro	Nachwachsende Rohstoffe
ORG	Ober rheingraben
PEV	Primärenergieverbrauch
PtG, PtL, PtH	Power-to-Gas, Power-to-Liquid, Power-to-Heat (Konversionstechnologien für Gas, Kraftstoffe und Wärme mit Hilfe von elektrischem Strom)
PV	Photovoltaik
SMB	Süddeutsches Molassebecken
WP	Wärmepumpen
ZSW	Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoffforschung

Zusammenfassung

Im Rahmen der vielfältigen Anforderungen an die Flächennutzung einer Raumeinheit wie dem Land Baden-Württemberg spielt Energie und ihre Bereitstellung und Nutzung eine große Rolle. Die große Bedeutung ergibt sich daraus, dass Energie lebensnotwendig für alles Leben und Wirtschaften ist und für ihre Erzeugung, Verteilung und Nutzung vielerlei Ressourcen, unter anderem Fläche benötigt werden.

Das Land Baden-Württemberg möchte den Landesentwicklungsplan (LEP) neu aufstellen und hat hierfür das Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart beauftragt, eine Raumanalyse für den Bereich Energie für Baden-Württemberg zu erstellen. Die Ergebnisse dieser Analyse werden im vorliegenden Bericht vorgestellt. Damit sollen auch Grundlagen gelegt werden für die weitergehende Entwicklung und Planung der zukünftigen Flächennutzung in Baden-Württemberg und ganz besonders der mit der Energieversorgung einhergehenden Flächennutzung.

Die Ausarbeitung ist in drei größere Abschnitte eingeteilt.

In Abschnitt I werden zunächst in der Einleitung (Kapitel 1) grundlegende Voraussetzungen und Rahmenbedingungen für die Energieversorgung und für die Raumwirksamkeit von Energietechnologien und -infrastrukturen vorgestellt. Dazu werden die Zielsetzungen und Rahmenbedingungen der Energie- und Klimaschutzpolitik, weitere politische Rahmensetzungen wie z.B. für kritische Infrastrukturen (Kritis) und auch spezifische Flächenbedarfe einzelner Energietechnologien dargelegt. Im Kapitel 2 wird die Methodik der Analyse vorgestellt.

Im Abschnitt II werden die Entwicklung und der Flächenbedarf von Energieversorgungstechnologien und -infrastrukturen mit dem aktuellen Stand 2023 vorgestellt und kurz in Bezug auf Stand und Perspektiven eingeordnet (Kapitel 3). Ein besonderes Augenmerk wird auf die erneuerbaren Energien gelegt, da diese in Baden-Württemberg energiewirtschaftlich und energie- und klimapolitisch eine große Bedeutung haben und in den letzten Jahren bereits stark ausgebaut wurden. Auch die konventionellen Energietechnologien und Energieinfrastrukturen wie die Gas- und Stromnetze werden betrachtet, da diese im Rahmen der Energiewende und der Klimaschutzmaßnahmen in Baden-Württemberg wichtige Funktionen übernehmen sollen, z.B. für die Elektrifizierung oder die Wasserstoffwirtschaft.

Im Abschnitt III wird der Blick auf zukünftige Entwicklungen, Potenziale und Perspektiven gerichtet. Hierzu werden zunächst Energiebedarfsprognosen und der daraus resultierende Bedarf an Energieversorgungsanlagen skizziert (Kapitel 4) und die Potenziale erneuerbarer Energien in Baden-Württemberg und die daraus folgende Flächeninanspruchnahme analysiert (Kapitel 5).

Schließlich wird in Kapitel 6 ein Fazit und Ausblick gegeben und die gegenwärtige Situation der Energieversorgung für Baden-Württemberg und ihrer Potenziale für die Zukunft zusammengefasst.

Im Ergebnis kann festgehalten werden, dass in Baden-Württemberg bereits ein starker Ausbau von Energieversorgungsanlagen und -infrastrukturen besteht, der - nach einer Verminderung der

Ausbaudynamik in den Jahren 2012 bis 2018 – seit 2019 wieder deutlich zugenommen hat. Es entstanden insbesondere viele Solarenergieanlagen – sowohl auf Dächern und an Gebäuden, insbesondere in den Verdichtungsräumen, als auch größere Freilandanlagen, vornehmlich im Ländlichen Raum. Darüber hinaus wurden eine Reihe von Windenergieanlagen errichtet, die überwiegend im Ländlichen Raum verortet sind.

Der Energiebedarf bzw. die Energieversorgungsstruktur werden sich zukünftig deutlich verändern. Im Zentrum der Entwicklungen stehen die Bemühungen um Klimaschutz und Klimaneutralität. Auch eine verstärkte Energieautonomie (teilweise als Autarkie bezeichnet), also mehr eigene Energieerzeugung, sowohl in Stadt, im Land, in Deutschland oder auch im eigenen Haus bzw. Grundstück sind dabei von verstärktem Interesse. Dies bedingt eine Abkehr von Erdgas und Öl und einen sehr hohen Ausbau der Energieerzeugung aus erneuerbaren Energien, besonders aus Wind- und Solarenergie. Damit einher gehen eine stark räumlich verteilte Verortung dieser Anlagen und zugehörigen Infrastrukturen, u.a. der Netze, allgemein häufig als ‚Dezentralisierung‘ bezeichnet. Der fluktuierende Charakter von Solar- und Windenergie bringt darüber hinaus den Bedarf an Bereitstellung von flexibel einsetzbaren Energien mit sich. Hierfür sind als regenerative Option besonders Biomasse, Geothermie, Speicher und – später- („grüner“) Wasserstoff relevant. Aktuell werden hierzu auch Gas-Kraftwerke gezählt, die für den Betrieb mit Wasserstoff vorbereitet sein müssen (H₂-ready). Hierfür müssen ausreichend Standorte und Möglichkeiten für die Ansiedlung solcher Kraftwerkstypen und -infrastrukturen bereitgehalten werden.

Die Analyse der Potenziale für die Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien zeigt, dass diese in ausreichendem Umfang, aber für die einzelnen Energietechnologien unterschiedlich vorhanden sind. Sie zeigen eine breite räumliche Verteilung, die die gesamte Landesfläche in unterschiedlichem Maße und für jeweils unterschiedliche Technologien in Anspruch nehmen. Die ermittelten Potenziale sind durch die aktuell bestehenden Energieanlagen bei weitem nicht ausgeschöpft. Für das Ziel Baden-Württembergs zur Treibhausgasneutralität bis 2040 müssen und können die erneuerbaren Energien dementsprechend weiter stark ausgebaut werden. Für diese Zielerreichung ist auch eine stärkere Ausbaurate als in den vergangenen zehn Jahren erforderlich. Dies betrifft besonders die Solar- und Windenergie. Biomasse und Wasserkraft sind teils energiewirtschaftlich zwar bedeutsam, aber mit keinem großen zukünftigen Ausbaupotenzial mehr verbunden. Der Flächenbedarf für erneuerbare Energien ist dabei teilweise groß bis sehr groß. Gegenwärtig wird bereits mehr als 10 km² Freifläche des Landes Baden-Württemberg für den Betrieb von Energieerzeugungsanlagen (Solar-Freiflächenanlagen und Windenergie, ohne Energiepflanzenanbau) mittel- und unmittelbar in Anspruch genommen. Hinzu kommt ein Mehrfaches durch Infrastrukturen wie Stromnetze und Betriebsgebäude. Viele Anlagen werden jedoch auf Siedlungsflächen (z.B. Gebäude-PV) oder anderen bebauten Strukturen (Gebäuden, Deponien o.ä.) errichtet, so dass der Ausbau nicht notwendigerweise mit einem hohen zusätzlichen Flächenbedarf einhergeht. Neue Entwicklungen – zum Beispiel zur ‚Floating PV‘ – zeigen aber auch neue Inanspruchnahme für Flächen, in diesem Fall Wasserflächen, die für eine Energiewirtschaft von Bedeutung sind. Andere Energietechnologien können z.B. durch Doppelnutzungen wie ‚Agri-PV‘ eine einseitige Flächeninanspruchnahme von landwirtschaftlichen Flächen mindern.

Durch die starke räumliche Verteilung von neuen Energieanlagen und Infrastrukturen entwickelt sich keine auffällige Struktur der Räume in Baden-Württemberg, die für die Energieproduktion besonders bevorteilt wäre (Energieregionen). Jede Energieform nimmt für sich genommen in bestimmten Räumen Baden-Württembergs einen besonders großen Raum und damit eine Sonderstellung ein. Dies ist z.B. für Biomasse in Oberschwaben der Fall, für die Windenergie die windhöffigen Räume in der Hohenlohe, der Schwäbischen Alb und Oberschwaben sowie für die Tiefengeothermie der Oberrheingraben oder die baden-württembergischen Teile des süddeutschen Molassebeckens. Für eine Einschätzung besonders geeigneter Räume für bestimmte Energietechnologien wird eine Eignungseinteilung (hoch – mittel - niedrig) entlang von Clusterräumen in Baden-Württemberg entwickelt.

Viele Energieformen und -technologien müssen unter der planerischen und organisatorischen Verantwortung der Städte und Gemeinden (kommunale Bauleitplanung) entwickelt werden. Bei der Windenergie, der Freiflächen-Photovoltaik und besonders bei den großen Energieinfrastrukturen (fossile Kraftwerke, Netze etc.) hat die Raumordnung in Baden-Württemberg inklusive der Regionen eine Steuerung zu übernehmen.

Entscheidend für die zukünftige Entwicklung der Energieversorgung in Baden-Württemberg ist, dass große punktuelle Infrastrukturen zunehmend durch kleinere räumlich verteilte Strukturen ersetzt werden. Diese sind, besonders im Hinblick auf ihre Einordnung als kritische Infrastruktur im Sinne der KritisV als weniger sensibel einzuschätzen. Der Umstieg auf erneuerbare Energien geht also hier mit einer Risikominderung einher.

Die neue Energiewelt ist mit verstärkten Anforderungen an Energietransport und -verteilung verbunden, so werden Strom- und Gasnetze (letztere im Hinblick auf eine spätere Umnutzung für Wasserstoff) in Zukunft verstärkt ausgebaut. Hier ist für die weitere Entwicklung eine Vorausschau über möglichst konfliktfreie Anbindungsmöglichkeiten an überregionale Strukturen (SüdLink: Nord-Südtrasse Strom, Wasserstoff-Kernnetz) wichtig.

1 Einführung

Eine ausreichende Energieversorgung und Energieversorgungssicherheit im Regel- wie im Krisenfall sind Grundvoraussetzungen unserer modernen Gesellschaft. Die Energiebereitstellung in der erforderlichen Menge, am richtigen Ort und zum richtigen Zeitpunkt erfordern erhebliche Anstrengungen. Die Bereitstellung und Nutzung von Energie führen aber auch zu erheblichen Wirkungen auf Umwelt, Gesundheit und Gesellschaft. Im Umweltbereich sind besonders der Ausstoß von klimaschädlichen Emissionen wie Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Lachgas (N₂O) und anderen zu nennen. Eine wesentliche Auswirkung ist auch der Flächenbedarf z.B. für die Bereitstellung von Brennstoffen wie Kohle oder Biomasse oder auch für Standorte von Energieversorgungseinrichtungen (u.a. Kraftwerke, Windenergieanlagen, Netze) oder besondere Eignungs- bzw. Lagerstätten (z.B. geothermische Felder, Wasserflächen, Wälder etc.).

1.1 Zielsetzungen und Strategien für Energie und Klimaschutz

Die EU, die Bundesregierung, die Landesregierung Baden-Württemberg als auch kommunale Aufgabenträger wollen die Emission klimaschädlicher Gase zurückführen. Darüber hinaus sollen auch Anpassungen an die sich verändernden Umweltbedingungen (Adaptation), und für nicht reduzierbare Emissionen ggf. auch „Kompensationen“ erfolgen, da dieses Ziel in vollem Umfang nur schwer zu erreichen ist. Mit der Transformation zu einem klimaneutralen Energiesystem ist in jedem Fall ein starker Ausbau erneuerbarer Energien, besonders der Solar- und Windenergie, verbunden. Für Baden-Württemberg ist hierfür besonders das Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetz Baden-Württemberg (KlimaG BW)¹ relevant, das seit dem 8. Februar 2023 in Kraft gesetzt ist. Zentrales Element dieses Gesetzes ist das Ziel, bis 2030 die Treibhausgasemissionen des Landes im Vergleich zu 1990 um mindestens 65 Prozent zu reduzieren und bis 2040 klimaneutral zu werden. Im KlimaG BW (§10 Absatz 2 und § 14 Absatz 2 Satz 1 Nummer 1) sind für das Jahr 2030 auch Klimaschutzziele für einzelne Sektoren, z.B. für die Energiewirtschaft, Industrie oder Verkehr, und damit konkrete Einsparvorgaben beim Treibhausgasausstoß vorgesehen (Tab. 1).

Tab. 1: Sektorzielvorgaben 2030 für Klimaschutz in Baden-Württemberg gemäß KlimaG BW 2023

Sektor	Zielsetzung 2030*
Energiewirtschaft	75%
Industrie	62%
Verkehr	55%
Gebäude	49%
Landwirtschaft	39%
Abfallwirtschaft und Sonstiges	88%
Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft	- 4,4 Mio. t CO ₂ -Äquiv.

*) für die verschiedenen Sektoren in % im Vergleich zu 1990; für den Sektor ‚Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft‘ als Senkenleistung in Mio. Tonnen CO₂-Äquivalent

¹ <https://www.landesrecht-bw.de/perma?d=jlR-KlimaSchGBW2023rahmen>

Auf der Basis des Forschungsvorhabens „Sektorziele 2030 und klimaneutrales Baden-Württemberg 2040“ wurde für Baden-Württemberg ein Pfad aufgezeigt, wie es innerhalb von weniger als 20 Jahren klimaneutral werden kann (Abb. 1). Zentrale Aussagen dieses Vorhabens für den Bereich Energiewirtschaft sind (ZSW und Partner 2023):

1. Der Kohleausstieg bis 2030 ist für das 2030-Ziel zwingend erforderlich.
2. Aufgrund der erforderlichen Elektrifizierung im Gebäudesektor, der Industrie und im Verkehrssektor ist eine deutliche Erhöhung des Strombedarfs von 72 TWh in 2019 auf 88 TWh in 2030 sowie 111 TWh in 2040 notwendig.
3. Es braucht weiter einen drastisch steigenden Anteil erneuerbarer Energien an der Bruttostromerzeugung (von 82% bis 2030 auf 98% bis 2040).

Treibhausgasemissionen [Mio. t CO₂-Äq.]

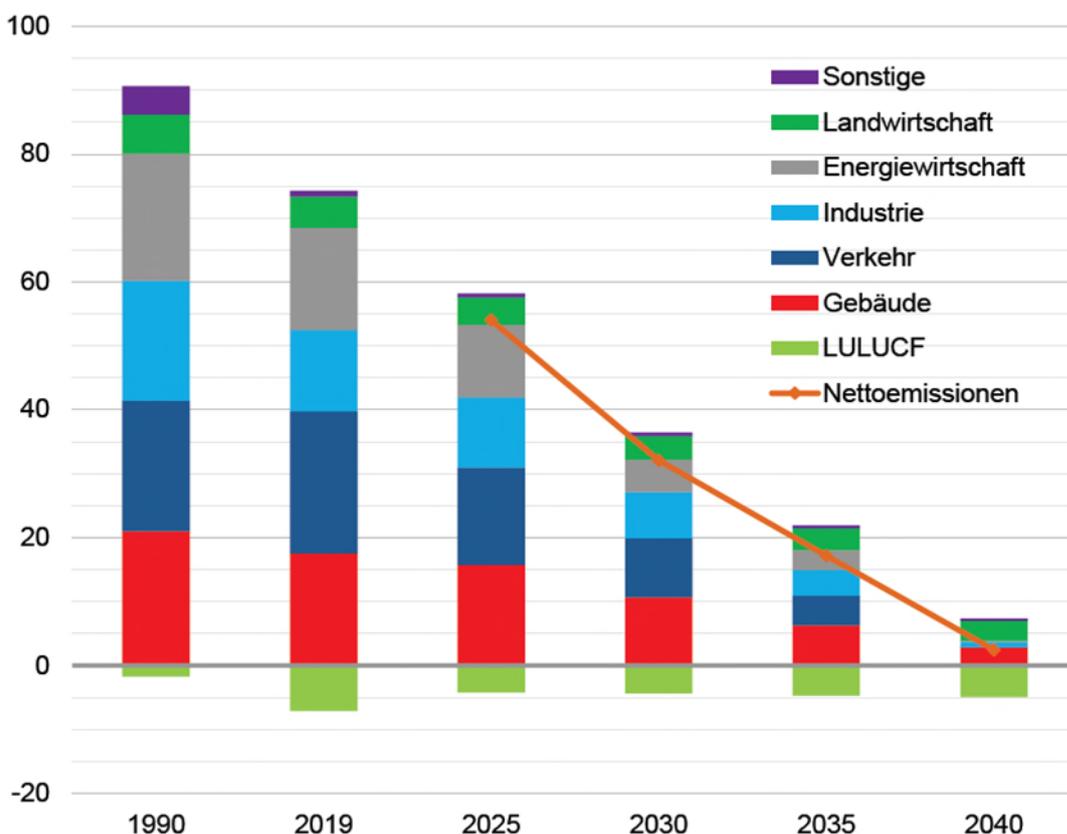


Abb. 1: Pfad der Treibhausgasemissionen in Baden-Württemberg im Zielszenario 2030/2040 der Landesregierung Baden-Württemberg mit Unterteilung in einzelne Sektoren (LULUCF = Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft). Quelle: (ZSW und Partner 2023)

Auf dieser Basis wurde auch der in Tab 12 dargestellte Ausbau der Energieversorgung und die damit verbundene zukünftige Entwicklung der erneuerbaren Energien errechnet. Für die Stromerzeugung aus Windkraft und Photovoltaik wird bis 2030 ein Anstieg um 9,5 bzw. 16,2 TWh und bis 2040 um 25,2 bzw. 37,2 TWh gegenüber der Stromerzeugung in 2021 erforderlich. Die Stromerzeugung aus Biomasse und Wasserkraft soll im Laufe der Zeit eher konstant gehalten werden, wobei sie auch als Flexibilitätsoptionen und Reservequellen und nicht als Hauptträger der Energieerzeugung betrachtet werden können (Brellocks et al. 2013) (Landtag von Baden-Württemberg 30.09.2022). Erst für die Zeit ab 2030 sieht der Fahrplan neben dem Ausbau der erneuerbaren Energien eine

Schlüsselrolle für die Stromerzeugung aus grünem Wasserstoff vor, die sich bis 2040 und darüber hinaus fortsetzt. Im Einklang mit den Klimaschutzziele sieht der Plan neben dem vollständigen Ausstieg aus der Kohleverstromung bis 2030 auch die Verringerung der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen vor, was zum Ausstieg aus der Stromerzeugung mit Erdgas führt.

Baden-Württemberg hat sich auch der Umsetzung der Energiewende verpflichtet. Dies wird vor allem in dem im August 2024 aktualisierten Energiekonzept deutlich (UM BW 2024b), das die Dringlichkeit des Konzepts vor allem unter der Herausforderung der Bekämpfung des Klimawandels und der strategischen Neuaufstellung nach dem völkerrechtswidrigen Angriff Russlands gegen die Ukraine herausstellt. Ursprünglich wurden vom Umweltministerium sieben Ziele als Rahmen für die Umsetzung der Energiewende formuliert²

1. Energie bewusster verbrauchen – Energiesparen und Energieeffizienz
2. Erneuerbare Energien als Schlüssel einer zukunftsfähigen Energieversorgung
3. Treibhausgasemissionen bis 2040 auf Netto-Null reduzieren
4. Versorgungssicherheit zu jeder Zeit
5. Energie bezahlbar halten und stabile Preise gewähren
6. Gemeinsame Gestaltung im offenen Dialog
7. Vereinbarkeit von Energiewende, Klima- und Naturschutz gewährleisten

Im neuen Energiekonzept (UM BW 2024b) werden darüber hinaus im Rahmen des energiepolitischen Zielvierecks (Umweltverträglichkeit, Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Sozialverträglichkeit) vier übergeordnete Zielindikatoren festgehalten:

1. Energieeffizienz steigern mit dem Ziel „efficiency first“
2. Ausbau der erneuerbaren Energien
3. Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft
4. Aus- und Umbau verlässlicher Infrastrukturen

Zudem wird eine *„integrierte Systembetrachtung mit expliziter Berücksichtigung der Rückkopplungen und Wechselwirkungen“* als zentrale Aufgabe herausgestellt.

Seit 2021 hat das Land auch ein Sofortprogramm Klimaschutz und Energiewende beschlossen³. Hier sind 17 Maßnahmen hinterlegt, die vor allem den Ausbau der Erneuerbaren Energien fördern, die Preisgestaltung für Energie beeinflussen (z.B. durch Einführung eines CO₂-Schattenpreises bei landeseigenen Investitionsvorhaben), die (Ab-)Wärmenutzung, die Förderung besonderer Programme oder auch die Einbindung von Stakeholdern (Kommunen, Kreislaufwirtschaft etc.) regeln.

Darüber hinaus wurde im Klimaschutzgesetz (KlimaG Baden-Württemberg) ein Flächenziel von mindestens 1,8% der Landesfläche für Windenergieanlagen und 0,2% für Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) festgelegt, die für Windenergieanlagen als Vorranggebiete und für Photovoltaik-Freiflächenanlagen als Vorrang- oder Vorbehaltsgebiete in den jeweiligen

² Siehe <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/energie/energiewende/unsere-kernziele>

³ Siehe <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/klima/klimaschutz-in-bw/sfortprogramm-klimaschutz-und-energiewende>

Regionalplänen gesichert werden sollen (Regionale Planungsoffensive). Damit werden neben der landesrechtlichen Umsetzung des im Windenergieflächenbedarfsgesetzes (WindBG) des Bundes festgelegten Flächenbeitragswerts für Windkraft zusätzlich ein Flächenziel für Photovoltaik-Freiflächenanlagen definiert. Die Flächenziele beziehen sich auf die Gesamtfläche der Vorranggebiete und nicht auf einzelne Anlagen bzw. Anlagenparks und sind als „Mindestziel“ zu verstehen. Die entsprechenden Teilpläne bzw. Änderungen der Regionalpläne sollen gemäß §20 KlimaG Baden-Württemberg bis spätestens 30. September 2025 als Satzung festgestellt werden und nicht wie im WindBG bis 31. Dezember 2027 (1,1% Flächenbeitragswert für Windkraftanlagen) bzw. 31. Dezember 2032 (1,8% Flächenbeitragswert für Windkraftanlagen). Würde diese Ausweisung bis zu dem genannten Zeitpunkt nicht erfüllt werden, entfällt eine regional- und bauleitplanerische Steuerungsmöglichkeit durch die Regionen und Städte und Gemeinden. Als Rechtsfolge könnten Anlagen dann – soweit keine anderen Rechtlichen Regelungen entgegenstehen – überall gebaut werden (=Super-Privilegierung nach § 249 Baugesetzbuch - BauGB), da die Steuerung durch Regional- und Flächennutzungsplanung entfällt. Die Verfahren der Träger der Regionalplanung befinden sich Stand Juli 2025 in vollem Lauf.

1.2 Raumbedeutsamkeit und Flächenbedarf für Energie und Klimaschutz

Die Transformation des bestehenden Energiesystems zu mehr Nachhaltigkeit und der Bau von Anlagen für die Nutzung erneuerbarer Energien sind unweigerlich mit einem Bedarf an Fläche verbunden. Durch die verteilte Aufstellung der erneuerbaren Energien im Raum ist zukünftig mit einer verstärkten Flächeninanspruchnahme durch das Energiesystem zu rechnen. Sie ist teils wenig auffällig (wie z.B. bei der Geothermie), teils offensichtlich und signifikant (wie bei der Windenergie oder bei Freiflächen-Solaranlagen), insgesamt aber auf jeden Fall bedeutsam. Die leitungsgebundenen Energieinfrastrukturen wie Netze (Strom, Gas, zukünftig Wasserstoff) oder Umspannwerke stellen weitere raumbedeutsame Bestandteile des Energiesystems mit zunehmendem Flächenbedarf dar.

Die mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien und weiterer Energieinfrastrukturen einhergehende Flächeninanspruchnahme muss aber im Kontext des Grundsatzes einer flächensparenden Entwicklung gesehen werden. So fordert das Baugesetzbuch in §1a Abs. 2 dazu auf, mit Grund und Boden sparsam und schonend umzugehen. Der Bund hat sich vor diesem Hintergrund das Ziel gesetzt, die Flächeninanspruchnahme und besonders den Zuwachs der Siedlungs- und Verkehrsfläche bis zum Jahr 2020 auf 30 Hektar pro Tag zu minimieren. Gegenwärtig (2022) beträgt der tägliche Zuwachs der Siedlungs- und Verkehrsfläche im Land noch 5,1 ha⁴. Auch wenn das Ziel insbesondere auf die Siedlungs- und Verkehrsflächen im Sinne von neuen Siedlungsgebieten und Verkehrsinfrastrukturen abzielt, bleibt die Energiewirtschaft davon nicht unberührt, da viele Energieinfrastrukturen Flächen im Freiraum, vornehmlich landwirtschaftlich genutzt, in Anspruch nehmen. Dies wird durch die im KlimaG Baden-Württemberg gesetzlich

⁴ Stat. LA: siehe: <https://www.statistik-bw.de/BevoelkGebiet/GebietFlaeche/GB-FV-LR.jsp>

festgeschriebene Flächenziele für Windenergie und Freiflächenphotovoltaik (siehe Kapitel 1.1) noch einmal verdeutlicht.

Im vorliegenden Bericht werden vor diesem Hintergrund die Raumbedeutsamkeit der Energieinfrastruktur in Baden-Württemberg analysiert und Trends aufgezeigt. Hierbei werden sowohl erneuerbare Energien und konventionell-fossile Energieträger als auch die Energieinfrastruktur (Verteilssysteme, Netze, Transformatoren, Speicher etc.) berücksichtigt.

1.3 Kritische Infrastrukturen der Energieversorgung

Energie und Wasser gehören zu den grundsätzlichen Voraussetzungen für Leben und Arbeit überhaupt. In einer modernen Welt sind sie auch essentiell für die Wirtschaftsentwicklung und fast jeglichen Lebensbereich (Wohnung, Bildung, Arbeiten etc.). Im allgemeinen Sinne gehört die Energieversorgung sicher zu den kritischen Infrastrukturen (KRITIS). Insbesondere größere Anlagen oder Anlagenparks sind hier besonders schutzbedürftig und als kritische Infrastruktur besonders gefährdet. Allerdings führen nicht jeder Ausfall oder Schadensfall zu einer Gefährdung oder gar bedrohlichen Situation. Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien zeigen durch ihre zumeist kleine Größe und räumlich verteilte Aufstellung ein geringes Risiko und geringere Schutzbedürftigkeit. Allerdings stellt sich dies für größere Anlagenparks wie z.B. für die Windenergie oder auch für große Solarenergie- und Biomasseanlagen durchaus anders da. Da sie häufig eine Versorgungsfunktionen für größere Gebiete, z.B. Städte oder Stadtteile, haben, kann ein gewaltsames Ereignis (Naturkatastrophe oder Anschlag) durchaus nennenswerte Folgen haben, z.B. den Ausfall der Wärmeversorgung von ganzen Stadtgebieten. Insofern sind auch erneuerbare Energien als kritische Infrastrukturen aufzufassen und ggf. entsprechend zu schützen.

Der Begriff der „kritischen Infrastruktur“ ist rechtlich in der Kritis-Rechtsverordnung (BSI-KritisV) definiert, die sich auf das BSI-Gesetz bezieht. Das BSI-Gesetz reguliert die Sicherheit Kritischer Infrastrukturen und legt Pflichten, Aufgaben und Befugnisse von Betreibern und Staat fest. Die BSI-KritisV definiert Schwellenwerte und Anlagen bei Betreibern. Das KRITIS-Dachgesetz soll als zusätzliche KRITIS-Regulierung die physische Sicherheit und Resilienz von Betreibern stärken, wohingegen das BSI-Gesetz die Krisenvorsorge unter dem Aspekt der Cybersicherheit betrachtet.

Nach der BSI-KritisV und gemäß Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) sind kritische Infrastrukturen (KRITIS) *„[...] Organisationen oder Einrichtungen mit wichtiger Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen, bei deren Ausfall oder Beeinträchtigung nachhaltig wirkende Versorgungsengpässe, erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit oder andere dramatische Folgen eintreten würden“*.

Zu den kritischen Infrastrukturen wird hierbei (neben Sektoren wie Transport & Verkehr, Wasser, Ernährung, Abfallentsorgung, IT & Telekommunikation, Gesundheit etc.) wegen ihrer besonderen Bedeutung für das Funktionieren des Gemeinwesens auch die „Energie“ explizit genannt. In der BSI-KritisV wird der Bereich Energie untergliedert in:

1. Versorgung der Allgemeinheit mit Elektrizität (Stromversorgung);
2. Versorgung der Allgemeinheit mit Gas (Gasversorgung);
3. Versorgung der Allgemeinheit mit Kraftstoff und Heizöl (Kraftstoff- und Heizölversorgung);
4. Versorgung der Allgemeinheit mit Fernwärme (Fernwärmeversorgung).

Für die Einstufung von Energieeinrichtungen als kritische Infrastruktur ist weiterhin entscheidend, dass sie bestimmten Kategorien zuzuordnen sind (BSI-KritisV Anhang 1 Teil 3 Spalte B) und bestimmte Schwellenwerte erreichen oder überschreiten (angegeben in BSI KritisV Anhang 2 Teil 3 Spalte D). Tab. 2 fasst die wichtigsten Schwellenwerte für Energieversorgungsanlagen im Sinne des vorliegenden Berichtes zusammen.

Tab. 2: Zusammenfassung der Kategorien und Schwellenwerte für die Bewertung von Energieversorgungsanlagen als kritische Infrastruktur gemäß BSI-Gesetz bzw. BSI-KritisV (Bundesamt für Justiz 2016)

Nr.	Anlagenkategorie	Bemessungskriterium	Schw.-wert
1.1.1	Erzeugungsanlage (Strom) oder System zur Steuerung/ Bündelung elektr. Leistung	Installierte Netto-Nennleistung (elektr.) in MW	104
		Als Schwarzstartanlage ⁵ kontrahiert in MW	0
		Zur Primärregelleistung präqualifiziert in MW	36
1.2.1	Strom-Übertragungsnetz	durch Letztverbraucher und Weiterverteiler entnommene Jahresarbeit in GWh/a	3.700
1.3.1	Strom-Verteilnetz		3.700
1.4.1	Zentrale Anlage od. System für den Stromhandel	Abgewickeltes Handelsvolumen in TWh/a	3,7
2	Gasversorgungsanlagen u. Einrichtungen zur Gas-Förderung, -Transport und -Handel	In GWh/a	5.190
3	Kraftstoff- und Heizölversorgung	Unterschiedliche Schwellenwerte in T/a (siehe BSI-KritisVAnhang Teil 2)	63.750
4	Fernwärmeversorgung und Heiz(kraft)werke	ausgeleitete Wärmeenergie GWh/a angeschlossene Haushalte	2.300 250.000

Die einzelnen Anlagenkategorien sind mit einem Bemessungskriterium und einem Schwellenwert versehen, die meist als Leistung (z.B. MW) oder Arbeit (z.B. TWh) angegeben sind. Mit Erreichen dieses Schwellenwertes wird eine Einzelanlage dann als kritische Infrastruktur eingestuft. Unterhalb des Schwellenwertes liegt eine solche Charakterisierung nicht vor. Der Anhang Teil 2 (Anlagenkategorien und Schwellenwerte) ist im Anhang 9.1 beigefügt.

Auf Basis der Kategorien und Schwellenwerte können die in Baden-Württemberg bestehenden bzw. geplanten Energieanlagen in Bezug auf ihre Eigenschaft als kritische Infrastruktur gemäß Tab. 3 folgendermaßen eingestuft werden (IER-eigene Einschätzung):

⁵ Eine schwarzstartfähige Energieerzeugungsanlage kann nach Ausfall aller Systeme („Blackout“) selbständig autonom den Betrieb wieder aufnehmen und benötigt hierfür keine externe oder zusätzliche Unterstützung.

Tab. 3: Einschätzung des IER von Energieerzeugungs- und Energieinfrastrukturanlagen als kritische Infrastruktur gemäß BSI-Gesetz bzw. BSI-KritisV (IER-eigene Einschätzung)

Anlage / Kategorie	Grundlage (heute & Zukunft)	Einstufung als BSI-Kritis Anlage (Quelle: IER)
Windenergieanlagen	Onshore Anlagen deutlich < 10 MW Anlagenparks häufig über 100 MW	Einzelanlagen: nein Anlagenparks: ja
PV-Anlagen Dach	Auf Industriedächern max. einige MW	Nein
PV-Anlagen Freiland	deutlich unter 100 MW, aktuell größte Anlage mit 42 MWp (Wertheim)	Durchschn. Anlagen eher: nein; Große Anlagen ggf.: ja
Biomasse – Holz/Biogas	Deutlich unter 100 MW und meist nicht für Schwarzstart od. Primärregelung vorgesehen	Nein
Wasserkraft- und Pumpspeichieranlagen	z.B. Iffezheim, Säckingen, Wehr, Witznau	häufig ja
Abfall-Heizkraftwerk (HKW)	Im allg. größere Anlagen über 100 MW, z.B. Stuttgart-Münster, oder Böblingen	ggf. ja Abfallbehandlung ges.: ja
Konventionelle und mit fossilen Energien betriebene Kraftwerke und Heizkraftwerk (HKW)	z.B. Steinkohle-Kraftwerke Altbach, Heilbronn, Karlsruhe oder Mannheim z.B. Öl-KW Walheim z.B. Gas-KW Rheinhafen Karlsruhe	Ja
Kernkraft (KKW)	Neckarwestheim (Betriebsende 15.4.23) Philippsburg (Betriebsende 31.12.19)	Ja
Höchst- und Hochspannungs-Stromnetze	Übertragungsnetze u.a. der Transnet BW; auch Umspannwerke	Ja
Mittel- und Niederspannungs-Stromnetze	Verteilnetze u.a. der Netze BW oder vieler Stadtwerke, meist eher kleiner, nur Ausnahmefälle	eher nein im Einzelfall ggf. ja, z.B. bei zentralen Leitwarten
Gasnetze und Gas-Verdichterstationen	Ferngasnetz u. zugehörige Infrastruktur u.a. der Terranetz BW z.T. auch landübergreifend	ja
Gasnetze Wasserstoffnetze	Hochdruckleitungsnetze und Kernnetz Wasserstoff sind zentrale Versorgungsadern, Verteilnetze auf regionaler und kommunaler Ebene, v.a. Stadtwerke	eher ja eher nein
Energie- bzw. Stromhandel	Die Energiehandelsstelle der EnBW in Karlsruhe kann unter diese Regelung fallen	ggf. ja
Wasserstofferzeugungsanlage z.B. Elektrolyseur	Einzelanlagen überwiegend kleiner und eher räumlich verteilt aufgestellt; Großanlagen eher selten	eher nein Große Anlagen ggf.: ja
Geothermieranlagen	Oberflächennahe G.-Anlagen klein bis sehr klein, Tiefengeothermie größer aber dennoch kaum auffällig, energiesystemisch eher weniger bedeutsam.	nein

1.4 Spezifischer Flächenbedarf für Energietechnologien und Erneuerbare Energien

Jede Energieform und alle Energieerzeugungsanlagen benötigen Fläche. Die spezifische Flächeninanspruchnahme und damit auch die in Anspruch genommene Fläche für die erzeugte Energie hängt von vielen Randbedingungen ab (z.B. Technologie, Größe, Alter).

Die spezifische Flächeninanspruchnahme von Energieerzeugungstechnologien bzw. Anlagen zur Nutzung von (erneuerbaren) Energien wurde in verschiedenen Publikationen ermittelt, z.B. (Koschker 2015), (UNCCD United Nations Convention to Combat Desertification 2017; Fthenakis und

Kim 2009; Ioannidis und Koutsoyiannis 2020) oder (BMVI 2015). Aufgrund sehr unterschiedlicher Annahmen über die zu berücksichtigenden Faktoren, die für die Anlage bzw. den Anlagenbetrieb in Ansatz zu bringen sind, haben diese Werte eine große Spannbreite. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Intensität der Landnutzung in m² je MWh für die Stromerzeugung und Erzeugung von Kraftstoffen im Verhältnis zur Windenergie (als 1,0 gesetzt) gemäß UNCCD (UNCCD United Nations Convention to Combat Desertification 2017).

Tab. 4: Intensität der Landnutzung (in m²/MWh) verschiedener Energieformen und -technologien als Mittelwert aus Anlagen in Europa und USA. (Quelle: verändert nach (UNCCD United Nations Convention to Combat Desertification 2017))

Energieform, -technologie		Intensität
Strom	Kernenergie	0,1
	Erdgas	0,2
	Steinkohle (untertage)	0,2
	Kohle ⁶ Tagebau (Tagebau - open cast)	5,0
	Wind	1,0
	Geothermie	2,5
	Wasserkraft (große Staudämme)	10
	Solar PV	10
	Solar CSP	15
	Biomasse – mit Energiepflanzen	500
Kraftstoff	Erdöl	0,4
	Biokraftstoff (Bioethanol) – Mais	230
	Biokraftstoff (Bioethanol) – Zuckerrohrsaft	250
	Biokraftstoff (Bioethanol) – Zuckerrohr Reststoffe	0,1
	Biokraftstoff (Biodiesel) – Soja	400
	Biokraftstoff (Bioethanol) – Cellulose (SRC)	500
	Biokraftstoff (Bioethanol) – Cellulose (Reststoffe)	0,1

Die Ermittlung spezifischer Werte für die Flächeninanspruchnahme von Energietechnologien führt bei einer Literaturrecherche zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen, wiederum mit einer großen Bandbreite an Werten. Unter anderem haben (BMVI 2015), (UBA 2023) vergleichende Daten für die spezifische Flächeninanspruchnahme von erneuerbaren Energien dargestellt. Zudem gibt es auch technologiespezifische Studien, beispielsweise zu Solar-Freiflächenanlagen in (ZSW und Bosch und Partner GmbH 2023)) oder zur Windenergie in (UBA 2019). Ein Grund für die nicht immer einheitlichen Werte ist u.a. auch der Zeitpunkt der Datenbasis. Durch die Technologieentwicklung, z.B. Effizienzsteigerungen durch bessere Windturbinen, ist der spezifische Flächenbedarf je nach Installationszeitpunkt unterschiedlich. So zeigt (ZSW und Bosch und Partner GmbH 2023), dass die spezifische Flächeninanspruchnahme von PV-Freiflächenanlagen von 2004 bis 2022 von 3,6 auf 1,0 Hektar pro MW deutlich abgenommen hat. In einem Anlagenpark mit Anlagen unterschiedlicher

⁶ Braunkohle / Lignite

Installationszeitpunkte ist also auch die spezifische Flächeninanspruchnahme nicht einheitlich. Hinzu kommen methodische Unterschiede in der Ermittlung der Flächeninanspruchnahmen.

Daher sind die der vorliegenden Arbeit zugrunde liegenden Flächenannahmen für verschiedene erneuerbare Energien aufgrund von Literaturangaben und eigenen Annahmen vergleichend für das Referenzjahr 2024 ermittelt worden und in Abb. 2 dargestellt. Es ist zu beachten, dass hier unmittelbare, durch die Anlage in Anspruch genommene Flächenwirkungen, und nicht indirekte Wirkungen, berücksichtigt sind.

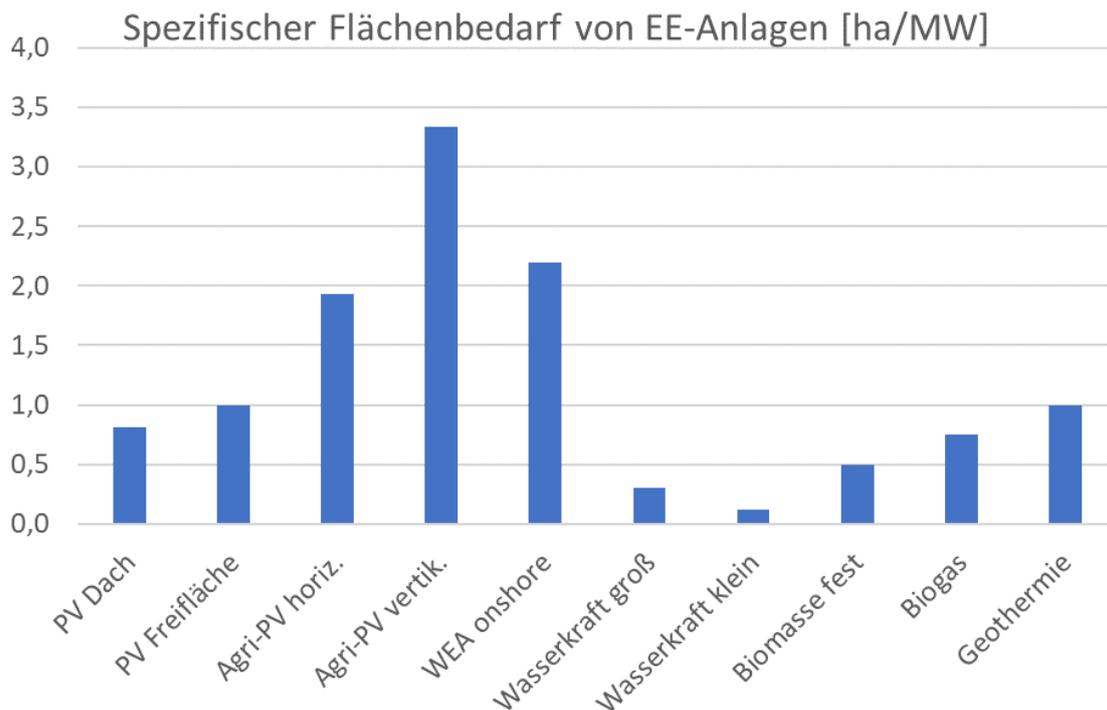


Abb. 2: Spezifischer Flächenbedarf für erneuerbare Energien-Anlagen in Bezug auf ihre Leistung (in ha/MW); diverse Quellen, u.a. (UBA 2023) und Annahmen; für neu gebaute Anlagen 2024; Flächenbedarf für Energiepflanzen nicht berücksichtigt

1.5 Flächeninanspruchnahme für den Anbau von Energiepflanzen

Der Anbau von Energiepflanzen stellt eine besondere Kategorie der Flächeninanspruchnahme für Energie dar. Er wird überwiegend auf regulären Anbauflächen der Landwirtschaft (Acker- oder Grünlandflächen) betrieben. Hier könnten ggf. auch alternative Nutzungen erfolgen, z.B. eine Nahrungs- oder Futtermittelproduktion. Der Flächenbedarf für diesen Teil der Energieversorgungsstruktur ist für Baden-Württemberg beim Statistischen Landesamt (StaLa BW) jedoch verlässlich dokumentiert⁷.

In Baden-Württemberg bewirtschaftet die Landwirtschaft insgesamt 45% (1,603 Mio. ha) der Gesamtfläche von 3,575 Mio. ha. Hierbei sind aktuell (2024) 799.100 ha Ackerfläche und 544.100

⁷ Siehe unter anderem Stala BW, <https://www.statistik-bw.de/Landwirtschaft/Bodennutzung/>

ha Dauergrünland⁸. Wald bedeckt (2022) ca. 1,352 Mio. ha⁹ und damit 38% der Gesamtfläche in Baden-Württemberg.

Die für die Erzeugung von Bioenergie notwendige Anbau-Biomasse stammt überwiegend aus der heimischen land- und forstwirtschaftlichen Erzeugung sowie von biogenen Rest- und Abfallstoffen. Zukünftig soll die Biomasse zur energetischen Nutzung verstärkt aus Rest- und Abfallstoffen gewonnen und die Nutzung von Energiepflanzen zurückgeführt werden. Für diesen Teil der Flächeninanspruchnahme sind nachfolgend dargestellte Energiepflanzen besonders relevant:

	Energiepflanze	Vorwiegende Verwendung in der Bioenergie	Kurzcharakterisierung
1.	Kurzumtriebsplantagenholz (KUP-Holz)	Verbrennung in Biomasse Heiz- oder Heizkraftwerken	Nutzung landwirtschaftlicher Flächen für die Biomasseproduktion (Holz, Lignocellulose); Mehrjährige Kultur, geringer Pflegeaufwand. rel. teuer
2.	Chinaschilf, Miscanthus	Verbrennung in Biomasse Heiz- oder Heizkraftwerken	
3.	Winterraps	Kraftstoffherstellung	Verbreitete Kultur für Rapsöl und Biodiesel
4.	Silomais	Biogasanlagen	Wichtige Substrate für die Biogas-Erzeugung, hohe Erträge vom Acker und vom Grünland
5.	Gras/Kleegras	Biogasanlagen	

Sie stammen sowohl von Ackerflächen (KUP-Holz, Miscanthus, Winterraps und Silomais) als auch von Grünlandflächen (Gras, Kleegras). Die aktuellen Anbauflächen (gesamt) für diese Sortimente sind beim Statistischen Landesamt Baden-Württemberg registrierter¹⁰. Zukünftig wird die Entwicklung der Anbaufläche für Energiepflanzen eher rückläufig sein, da die Förderung bzw. Berücksichtigung der Nutzung von Energiepflanzen z.B. in Biogasanlagen in letzter Zeit zunehmend kritisch gesehen wird und auch politisch kontrovers diskutiert¹¹ wird.

Der Flächenbedarf für den Energiepflanzenanbau ist statistisch nicht exakt erfasst und wurde daher für den aktuellen Stand gemäß folgenden Kriterien abgeschätzt.

1. Für Kurzumtriebsplantagen (KUP) sind die Anbauflächen in Baden-Württemberg seit Jahren konstant. Es wird angenommen, dass der Flächenbedarf und die Erträge bis 2040 (siehe Kartendienst LEL) gleichbleiben.
2. Für Chinaschilf gilt Ähnliches. Es wird angenommen, dass die Anbauflächen und spezifischen Erträge längerfristig gleichbleiben (Daten: LEL – Kartendienst).
3. Der Anbau von Winterraps in Baden-Württemberg ist ab 2010 von ca. 65.000 ha zunächst etwas zurück gegangen und seit 2020 mit 41.000 ha wieder gestiegen. Er betrug 2024 ca. 51.000 ha (Daten gemäß StaLa BW). Für die Bioenergie und die Kraftstoffnutzung über

⁸ <https://www.statistik-bw.de/Landwirtschaft/Bodennutzung/LF-NutzngKultFrucht.jsp>

⁹ <https://www.statistik-bw.de/Landwirtschaft/Agrarstruktur/Forstbetriebe-LR.jsp>

¹⁰ <https://www.statistik-bw.de/Landwirtschaft/Bodennutzung/LF-NutzngKultFrucht.jsp>

¹¹ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/bioenergie#Anbaubiomasse>

Biodiesel wurden von der Gesamt-Anbaufläche 2/3 der Bioenergie zugeordnet (s. a. Böhm 2023).

4. Silomais ist das Hauptsubstrat aus Energiepflanzen für Biogasanlagen, es ist ebenso ein wesentlicher Baustein für die Erzeugung von Tierfutter zur Fleischproduktion. Für die Berechnung wurde angenommen, dass 50% der Mais-Anbaufläche der Tier- respektive Nahrungsmittelproduktion zuzurechnen ist. 50% dienen der Bioenergie.
5. Klee gras bzw. Gras von Grünlandflächen wird in der Biogasbranche gern als (Co-)Substrat eingesetzt. Es ist aber auch Haupt-Futtermittel der heimischen Milchviehwirtschaft. Daher wird für die Bioenergie mit einem Anteil von 10% der Gesamtfläche in Baden-Württemberg von 546.729 ha als Anteil gerechnet.

Die danach abgeschätzte Flächeninanspruchnahme für den Energiepflanzenanbau ist in Tab. 5 zusammengefasst.

Tab. 5: Flächeninanspruchnahme 2020/2024 für den Anbau von Energiepflanzen in Baden-Württemberg

Energiepflanzen	Einheit	2020	2024
KUP (Weide, Erle)	ha	323	300
Miscanthus/Chinaschilf	ha	346	346
Winterraps	ha	24.300	34.000
Silomais	ha	67.187	65.950
Gras/Klee gras	ha	54.673	54.673
Gesamt	ha	156.341	155.269
Anteil an Landesfläche ges. Baden-Württemberg	%	4,4	4,4

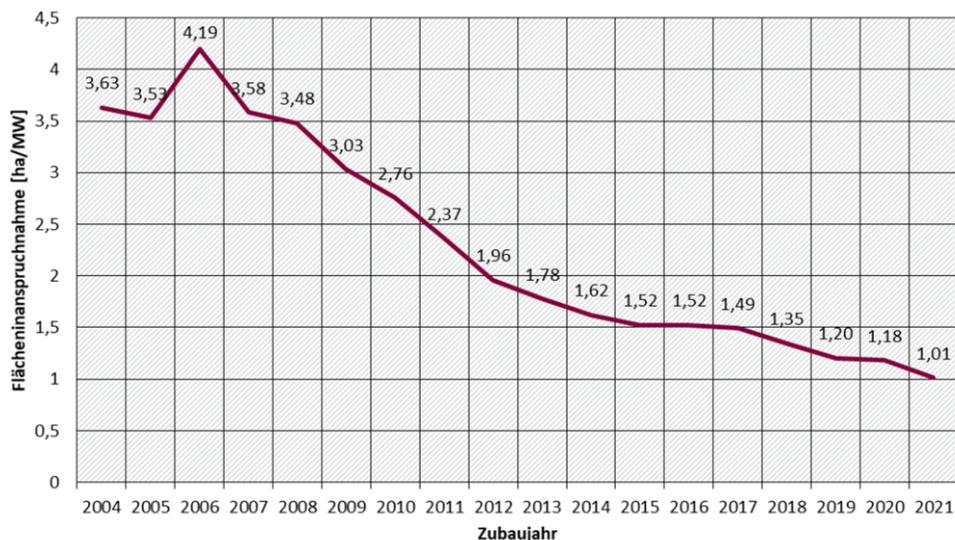
1.6 Entwicklung der Flächeninanspruchnahme für erneuerbare Energien

Die Parameter für den Flächenbedarf für einzelne Technologien können sich über die Zeit entsprechend dem technologischen Fortschritt entwickeln. Beispielhaft ist dies in Abb. 3 für den spezifischen Flächenbedarf von Freiflächen-Photovoltaikanlagen aufgezeigt, für die das ZSW in (UBA 2022) eine von 2004 bis 2021 reichende Aufstellung der Flächeninanspruchnahme (in ha/MW) von Freiflächenanlagen erstellt hat.

Für die Berechnung der Flächeninanspruchnahme von Anlagenparks ist ein durchschnittlicher Wert aller Anlagen, also derjenigen im Bestand und auch im Neubau anzusetzen. Dadurch entsteht eine durchschnittliche Flächeninanspruchnahme des gesamten Anlagenparks mit einem Mix an Altersklassen und zugehörigen Flächenbedarfen.

Wichtig für die Beurteilung des Flächenverbrauchs – oder besser der Flächeninanspruchnahme durch erneuerbare Energien – ist die Tatsache, dass sich in Konstellationen mit Photovoltaik vielfach die Möglichkeit zur Mehrfachnutzung von Fläche ergibt. So können z.B. in Verbindung mit PV-Solaranlagen folgende Nutzungsmöglichkeiten parallel zum Einsatz kommen:

- Nutzung von Dächern mit PV-Anlagen und Gründächern
- Nutzung von Freiflächen-Solaranlagen für die Beweidung mit Nutztieren, v.a. Schafen und Ziegen,
- Nutzung von Freiflächen-Solaranlagen in Verbindung mit der Kultur von Blümmischungen für Insekten und Bienen. Hierdurch wird v.a. die Biodiversität gefördert
- Nutzung von landwirtschaftlichen Nutzflächen zusammen mit Photovoltaikanlagen, die hoch horizontal aufgeständert werden (Agri-PV-Anlagen). Unter ihnen kann eine landwirtschaftliche Nutzung z.B. als Grünland oder für die Pflanzenproduktion stattfinden. Dies erlaubt z.B. auch den Anbau von Nutzpflanzen, die für hohe Lichtintensitäten nicht/weniger geeignet sind. Horizontal hoch über den Kulturen errichtete PV-Module ermöglichen u.a. auch einen Hagelschutz, z.B. im Obstbau
- Alternativ: landwirtschaftliche Nutzflächen mit vertikal aufgeständerten PV-Modulen mit bifazialer Technik¹², die eine Nutzung und Bewirtschaftung der landwirtschaftlichen Fläche zwischen den Modulreihen erlaubt. Diese Anordnung ist auch insofern attraktiv, da nur eine niedrige, weniger kostenintensive Aufständering nötig ist und die Bearbeitung mit größeren Maschinen zwischen den Reihen deutlich erleichtert ist. Die Stromerträge haben ggf. einen bi-diurnalen Rhythmus, zeigen also zwei Erzeugungsspitzen über den Tagesverlauf und sind insofern gut angepasst an übliche Strombedarfsprofile mit ebenfalls zwei Spitzen am Morgen und Abend. Weitere Möglichkeiten sind denkbar. Entscheidend hierbei ist die Tatsache, dass damit nur eine geringe zusätzliche Flächeninanspruchnahme verbunden ist.



Quelle: eigene Darstellung, ZSW 2022

Abb. 3: Flächeninanspruchnahme für neue PV-Freiflächenanlagen nach Inbetriebnahme; aus (UBA 2022)

¹² PV-Module, die auf beiden Seiten, der Vorder- und Rückseite, eine photovoltaisch aktive Schicht haben

2 Vorgehensweise und Methodik

Die vorliegende Analyse zu den räumlichen Strukturen sowie der aktuellen und zukünftigen Entwicklung des Energiesystems in Baden-Württemberg konzentriert sich insbesondere auf folgende Fragestellungen:

1. Wie ist der Stand der Energieerzeugung in Baden-Württemberg heute und wie stellt sich die Raumnutzung und der Flächenbedarf gegenwärtig dar?
2. Welche Dynamik hat die räumliche Entwicklung der Energieversorgung in den vergangenen Jahren gehabt?
3. Welche Perspektiven für die Inanspruchnahme von Fläche können für die geplanten Klima- und Energieziele, besonders den Ausbau erneuerbarer Energien, gemacht werden?

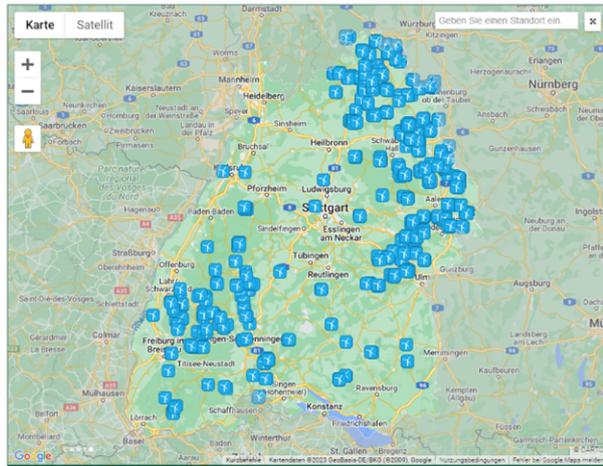
Dazu werden die verschiedenen Energieformen und Energieinfrastrukturen zunächst in ihrer gegenwärtigen energiewirtschaftlichen Bedeutung charakterisiert und ihre Verteilung im Raum und ihre Flächennutzung analysiert. Im zweiten Schritt kommt die Analyse der Entwicklung der Energieinfrastruktur über die vergangenen Jahre hinzu. Hierfür wurde ein Zeitraum von 10 Jahren gewählt. Im dritten Schritt werden Szenarien zur Flächennutzung für die Energieinfrastruktur erarbeitet, die die klimapolitischen Ziele und die energiewirtschaftlichen Ausbauziele von Baden-Württemberg zur Grundlage nehmen.

Im Folgenden werden mit dem Energieatlas Baden-Württemberg, dem Marktstammdatenregister (MaStR) und dem Transformationsatlas der Energiewende drei zentrale Datengrundlagen der vorliegenden Analyse vorgestellt und auf die Methodik und Vorgehensweise bei der Potenzialermittlung eingegangen.

2.1 Energieatlas Baden-Württemberg

Im Energieatlas Baden-Württemberg hat die Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg eine Fülle von Daten und Informationen zu erneuerbaren Energien vorwiegend auch kartografisch zusammengestellt. In einem erweiterten Daten- und Kartenangebot werden zusätzlich detaillierte Informationen und Auswertemöglichkeiten zur Verfügung gestellt. Damit ist der Energieatlas Baden-Württemberg der zentrale Daten- und Kartenpool zu den raumrelevanten Eigenschaften des Energiesystems Baden-Württembergs. Die Datensätze lassen sich teils bis auf Kreis- und Gemeindeebene, teils bis auf Objektebene (z.B. Solarpotenzial) ortsabhängig darstellen. In Abb. 4 sind einige typische Datensätze und Grafiken des Energieatlas Baden-Württemberg dargestellt.

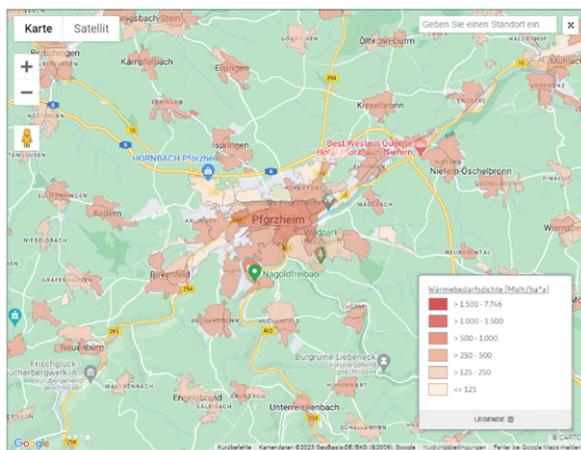
Bestehende Windenergieanlagen



Solarpotenzial auf Dachflächen



Wärmebedarfsdichte von Wohngebäuden



Wärmenetze Steckbriefe

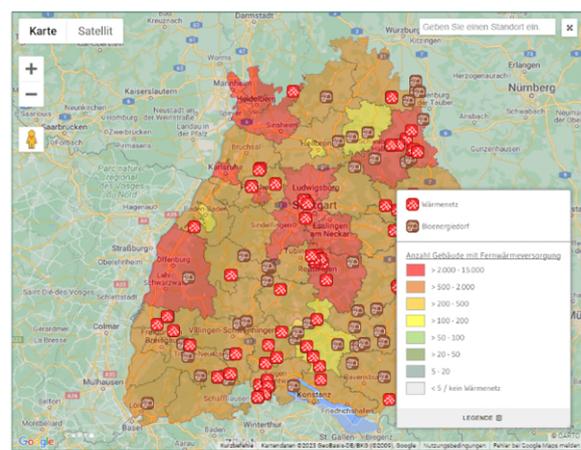


Abb. 4: Der Energieatlas Baden-Württemberg: beispielhafte Daten- und Informationsdarstellungen. Oben links: bestehende Windenergieanlagen, oben rechts: Solarpotenzial auf Dächern, unten links: Wärmebedarfsdichte von Wohngebäuden, unten rechts: Steckbriefe Wärmenetze. Quelle: <https://www.energieatlas-bw.de>

Aus dem Energieatlas Baden-Württemberg lassen sich auch numerische Daten und Tabellen herunterladen.

2.2 Portal des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg

Das UM BW hält auf seiner Internetseite <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/startseite> viele aktuelle Informationen zu Energiethemen in Baden-Württemberg bereit. Es gibt auch regelmäßige Publikationen mit statistischen Daten zur Energiesituation heraus, z.B. den „Energiebericht“ (letzte Fassung „Energiebericht 2024“ vom Juli 2024 (UM BW 2024a)), „Monitoring der Energiewende in Baden-Württemberg“ (letzte Fassung „Statusbericht 2023“ vom Nov. 2023 (UM BW 2023c)), oder „Erneuerbare Energien in Baden-Württemberg“ (letzte Fassung zum Stand 2022 vom Oktober 2023 (UM BW 2023b)). Seit August 2024 steht auch eine Broschüre zum neuen „Energiekonzept für Baden-Württemberg“ zur Verfügung (UM BW 2024b).

In der aktuellen Version des Online-Angebotes (Umwelt-Daten und -Karten Online 4.0) ist auch ein neues Informationsportal mit aktuellen Daten und Informationen zu erneuerbaren Energien entstanden (Dashboard Photovoltaik und Dashboard Windenergie, siehe <https://um.baden->

wuerttemberg.de/de/klima-energie/energiewende/erneuerbare-energien). Ein Beispiel für das Dashboard ist für den Ausbau und Potenziale der Photovoltaik in Abb. 5 dargestellt.

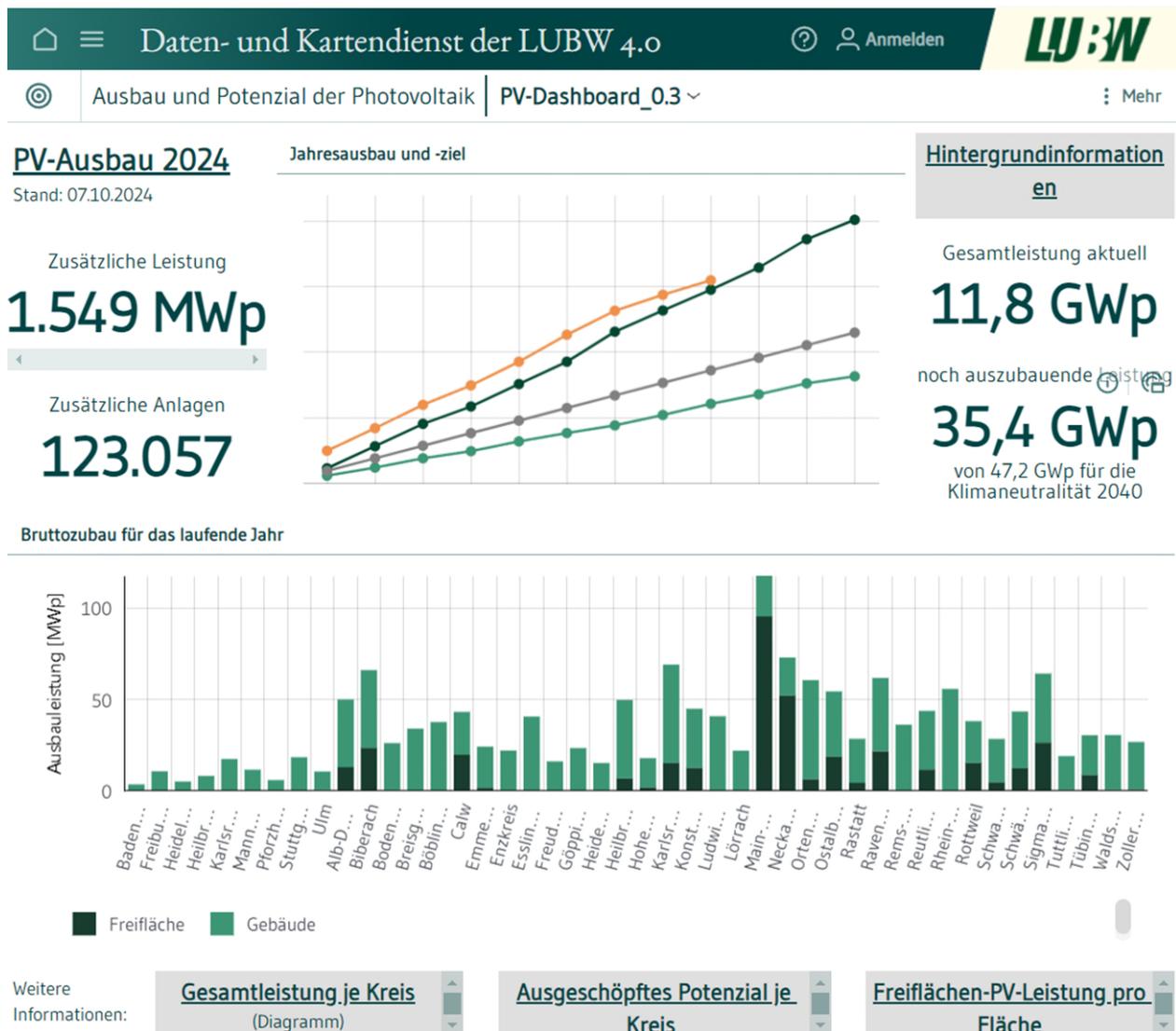


Abb. 5: Dashboard „Ausbau und Potenzial Photovoltaik“ aus dem Daten- und Kartendienst Online 4.0 der LUBW. Es werden verschiedene Elemente angezeigt z. B. die Leistungskennzahlen oben links und rechts, der Jahresverlauf des Ausbaus im Verhältnis zur Zielsetzung (oben Mitte) oder der Zubau in Städten und Kreisen, hier auch unterschieden in PV-Freifläche und PV auf Gebäuden. Auszug vom 7.10.2024. Quelle: <https://umweltdaten.lubw.baden-wuerttemberg.de/workbooks/3O2yt6w4Toa4mOn4TDIu,hash=tm3505tUvMvLnM0NbakjxFpkMigIRwjFjD93Z7AzRzEPK08U--9RAvuyO-o=/worksheets/3GQfbRTDS4CfzEozj-VY>

Hier werden teils hochaktuelle Informationen zum Ausbau und Stand erneuerbarer Energien – momentan vorwiegend Windenergie und Photovoltaik – zur Verfügung gestellt, die in Printmedien nicht zur Verfügung stehen. Sie sind auch verräumlicht dargestellt und stehen auf unterschiedlichen Raumebenen (Regierungspräsidium, Kreise, Städte & Gemeinden) kartographisch zur Verfügung. Diese Daten werden, wie der Energieatlas Baden-Württemberg, ebenfalls von der LUBW und ihrem Kartendienst bereitgestellt. Auch aus dem Kartendienst Online 4.0 lassen sich Daten, Tabellen und Karten für die eigene Nutzung herunterladen.

2.3 Marktstammdatenregister

Das Marktstammdatenregister (MaStR) (www.marktstammdatenregister.de/MaStR) ist das Register für den deutschen Strom- und Gasmarkt der Bundesnetzagentur (BNetzA). Im MaStR werden Informationen und Daten zu Strom- und Gaserzeugungsanlagen sowie Anlagenbetreibern, Netzbetreibern und Energielieferanten registriert. Die öffentlich einsehbaren Daten, z.B. zu Standorten, Leistungswerten oder Inbetriebnahmen, können als analysierbare Datentabellen exportiert und verarbeitet werden. Die Datensätze enthalten unter anderem auch georeferenzierte Standortdaten und können so in einem Geographischen Informationssystem (GIS) dargestellt und analysiert werden. Die Daten sind von allen Anlagenbetreibern selbst einzutragen und müssen auch aktuell gehalten werden. Dadurch ergibt sich einerseits ein immer aktueller Datenbestand. Andererseits sind aber eine Reihe von Maßnahmen zur genauen Qualifizierung und Qualitätskontrolle der Daten erforderlich, bevor sie genutzt werden können.

2.4 Transformationsatlas der Energiewende

Der Transformationsatlas der Energiewende (<https://maps.iee.fraunhofer.de/trafo-atlas/>) ist ein Portal des Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE), Kassel¹³, in dem Wechselwirkungen und Zusammenhänge zwischen Energieerzeugung, Strommarkt und dem Übertragungsnetz veranschaulicht werden. In Abb. 6 sind Beispiele für Daten und Darstellungen aus dem Transformationsatlas der Energiewende dargestellt.

Das Portal ist Bestandteil des Projektes DeV-KopSys-2, aus dem für Projektionen auch verschiedene Szenarien beigesteuert werden. Das Portal stellt Daten aus dem Strommarkt als auch aus dem Stromnetz räumlich und numerisch dar und verfügt über eine weitgehend bis auf die Ebene der Bundesländer hinunter gehende räumliche Auflösung. Der Transformationsatlas kann damit als Instrument zur Analyse verschiedener Szenariooptionen gesehen werden, bei dem Baden-Württemberg im Zusammenspiel mit seinen umgebenden Bundesländern integriert betrachtet werden kann. Hierbei wird auch ein Blick über den Tellerrand auf Verhältnisse in anderen Bundesländern und seine Rückwirkungen auf Baden-Württemberg ermöglicht.

¹³ Fraunhofer IEE, Joseph-Beuys-Straße 8, 34117 Kassel, Deutschland, Internet: www.iee.fraunhofer.de

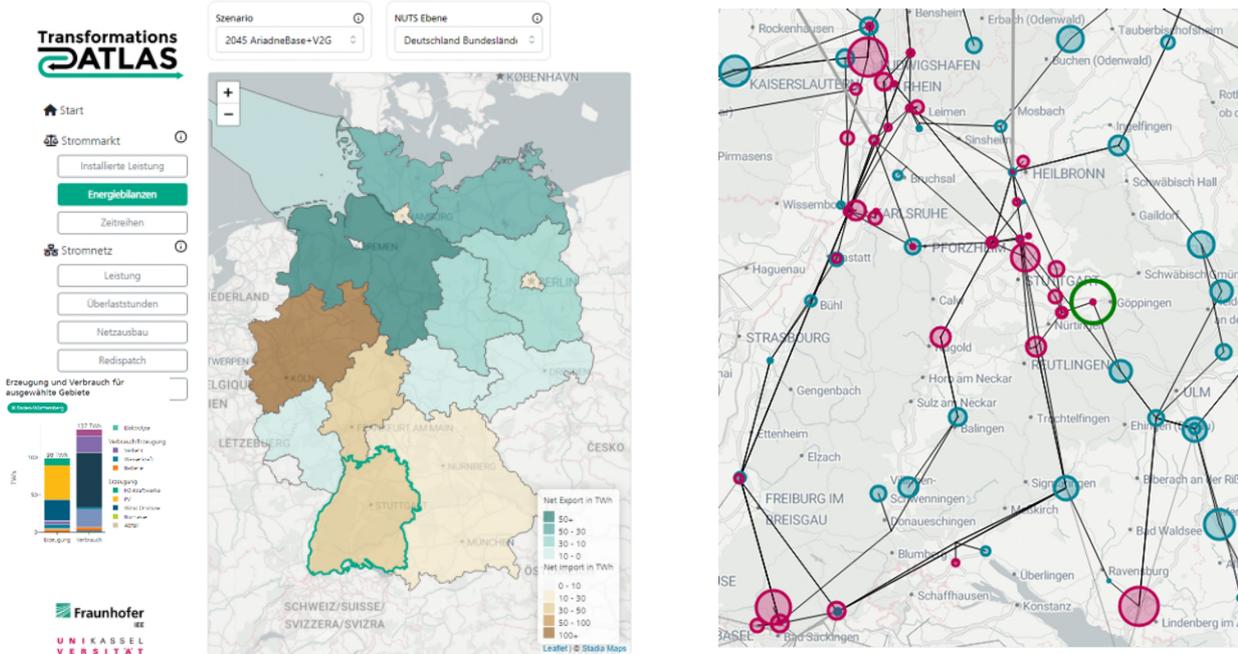


Abb. 6: Beispielhafte Darstellungen aus dem Transformationsatlas der Energiewende: links: Strombilanz getrennt nach Erzeugung und Verbrauch (Inlet mit Ausschnitt für Baden-Württemberg), rechts: Bilanz aus Leistungserzeugung und -verbrauch je Netzknoten in Baden-Württemberg für 2045 im Szenario 2045 AriadneSued PV+V2'; Kreisgröße repräsentiert die Gesamtbilanz in MW (Bildausschnitt Baden-Württemberg)

3 Aktuelle Situation der Energieversorgung in Baden-Württemberg

Im Folgenden werden die Analysen zu den verschiedenen Energieformen, -technologien und -infrastrukturen im Einzelnen dargestellt. Dabei wird zunächst auf die Darstellung des gegenwärtigen Status Quo fokussiert. Damit soll möglich gemacht werden, die Perspektiven für ihre zukünftige Entwicklung besser abschätzen zu können. Weiter werden der Stand der Anlagen und die Potenziale für den Ausbau zu einem möglichst aktuellen Zeitraum in Form von Karten dargestellt (raumrelevante Analyse). Damit soll deutlich werden, welche raumstrukturellen Eigenarten mit der Energieinfrastruktur einhergehen.

3.1 Gesamtdarstellung

Die Energieversorgungssituation in Baden-Württemberg ist in verschiedenen Publikationen und Online-Angeboten gut dokumentiert. Hierzu gehören neben zahlreichen Einzelpublikationen zu Technologien (z.B. Photovoltaik) auch Gesamtdarstellungen der Energieversorgungssituation u.a. mit jeweils aktuellen Ausgaben von:

1. Monitoring der Energiewende in Baden-Württemberg – Statusbericht 2023 (UM BW 2023c)
2. Erneuerbare Energien in Baden-Württemberg 2022 (UM BW 2023b)
3. Energiebericht bzw. Energiebericht kompakt, letzte Fassung 2024 (UM BW 2023a)
4. Online-Portale des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft (UM BW) bzw. der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW).

Die aktuelle Energieversorgungssituation in Baden-Württemberg lässt sich in Kurzform mit folgenden Parametern charakterisieren(UM BW 2024a, 2023b, 2023c):

1. Der Primärenergieverbrauch (PEV) liegt in 2022 mit 1.289 Petajoule (PJ) geringer als in den Vorjahren. Gegenüber dem Vorjahr waren es etwa 2% weniger. 2023 sank er gegenüber 2022 noch einmal um 11,1% auf 1.145 PJ ab. Temperaturbereinigt ist 2022 hingegen ein Anstieg des PEV um ca. 2% gegenüber 2021 festzustellen. 2005 waren es noch 1.682 PJ.
2. Der Endenergieverbrauch lag 2023 mit 969 PJ etwa 2,5% niedriger als im Vorjahr und betrug etwa 84,6% des Primärenergieeinsatzes.
3. Pro-Kopf lag 2023 der Verbrauch an Primärenergie in Baden-Württemberg mit 101 GJ deutlich unter dem Wert bundesweit, der bei 127 GJ lag.
4. Der Verbrauch an Steinkohle ist 2022 gegenüber dem Vorjahr erneut gestiegen. Nachdem dieser Anstieg 2021 bereits bei 57% lag, stieg er 2022 um weitere 15% (!). 2022 betrug er 156 PJ. Dies waren 12,1% des Gesamt-Primärenergieverbrauches.
5. Der Verbrauch an Erdgas ist 2022 mit 254 PJ gegenüber 2020 (264 PJ) hingegen zurückgegangen.
6. Erneuerbare Energien machen 2023 am Verbrauch von Primärenergie mit 210 PJ einen Anteil von 18,3% aus. 2022 lag dieser mit 202 PJ bei 15,7%. Er ist in den letzten 10 Jahren kontinuierlich gestiegen.

7. Den höchsten Anteil unter den erneuerbaren Energieträgern am PEV (nach WG-Methode) hatte 2023 die Biomasse (11,3%), darauf folgten die Solarenergie (3,1%), Klär- und Deponiegas und sonstige erneuerbare Energieträger (1,4%) sowie die Wasserkraft (1,4%). Die Windenergie hatte mit 1,2% hierunter den geringsten Anteil. (UM BW 2024c)
8. Der Endenergieverbrauch im Bergbau und beim verarbeitenden Gewerbe schwankt seit vielen Jahren zwischen 244 und 295 PJ. Die Energieintensität (Energieverbrauch bezogen auf die preisbereinigte Bruttowertschöpfung) des verarbeitenden Gewerbes verzeichnet durch den Anstieg der Bruttowertschöpfung gegenüber 1991 ein Rückgang um 37%.
9. Der Endenergieverbrauch der privaten Haushalte in Baden-Württemberg lag 2022 bei 313,29 PJ (UM BW 2024a, S. 35). Etwa die Hälfte des gesamten Endenergieverbrauches (94,46 PJ). Knapp über 30% hiervon werden durch Erdgas abgedeckt. Erneuerbare Energien machen hier mit 141,2 PJ einen Anteil von 45% aus. Der Endenergieverbrauch verminderte sich 2022 gegenüber dem Vorjahr deutlich (Corona!).
10. Im Verkehrssektor wurden 2022 insgesamt 303 PJ an Endenergie – 90% davon Otto- und Dieselmotoren - verbraucht. Dies ist gegenüber 1990 ein Anstieg um 5%. Biokraftstoffe machen einen Anteil von 6% aus (18 PJ).
11. 2023 wurden in Baden-Württemberg 37,3 TWh Strom erzeugt. Im Jahr 2022 waren dies noch 53,9 TWh, also ca. 44% mehr. Entsprechend stieg die Menge des importierten Stromes von 14 auf 29 TWh. Insgesamt lag der Bruttostromverbrauch 2023 bei 66 TWh (2022: 68 TWh). Damit war das Jahr 2023 im Vergleich zu den Vorjahren ein besonderes Jahr.
12. Der Anteil erneuerbarer Energien an der Bruttostromerzeugung in Baden-Württemberg lag 2023 bei 20,4 TWh und damit bei ca. 53,6%. Er ist seit 2011 deutlich gestiegen (+20 Prozentpunkte). In Baden-Württemberg wurden 2023 ca. 56,5% des Stromverbrauchs selbst produziert. 2023 ergeben sich gegenüber dem Vorjahr 2022 starke Änderungen, da die Bruttostromerzeugung deutlich von 53,9 auf 37,3 TWh gesunken war.
13. In Baden-Württemberg wird mehr Strom ans Ausland abgegeben als eingeführt. Der größte Anteil des Stromaustausches mit dem Ausland erfolgt mit Frankreich. Hier wurden 2023 4,5 TWh importiert und 4,3 TWh exportiert. Mit Österreich wurden 0,9 TWh importiert und 2,9 TWh exportiert. Insgesamt wurden 5,6 TWh importiert und 8,2 TWh exportiert. In 2022 waren dies noch 5,7 TWh Einfuhr und 18,2 TWh Ausfuhr.
14. Der Anteil der erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch lag 2023 insgesamt bei 18,0%. Gegenüber dem Vorjahr ist dies eine Steigerung um 1,1%-Punkte. Der Anteil an der Bruttostromerzeugung lag 2023 bei 54,8%, an der Wärmebereitstellung bei 18% und beim Verkehr bei 5,9%. Der Anteil der erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch hat sich in den vergangenen 15 Jahren fast verdoppelt.
15. Die installierte Leistung zur Stromerzeugung in Baden-Württemberg lag 2023 bei insgesamt 13,8 GW (Wasser-, Wind-, Solarenergie und Biomasse). Darunter waren 5,319 GW Leistung für KWK-Anlagen. Die installierte Leistung von Anlagen für die Wärmeerzeugung lag bei 8,947 GW.
16. Die konventionelle Netto-Kraftwerksleistung (> 10 MW) ist vor allem durch den Wegfall der Kernenergieleistung im April 2023 gekennzeichnet. Sie liegt inkl. Pumpspeicherleistung Ende 2023 bei ca. 9.500 MW. Hierin eingerechnet ist auch eine Netzreserve in Höhe von ca. 2.000 MW.

Die Energieversorgungssituation in Baden-Württemberg 2022 ist als Flussdiagramm in Abb. 7 dargestellt.

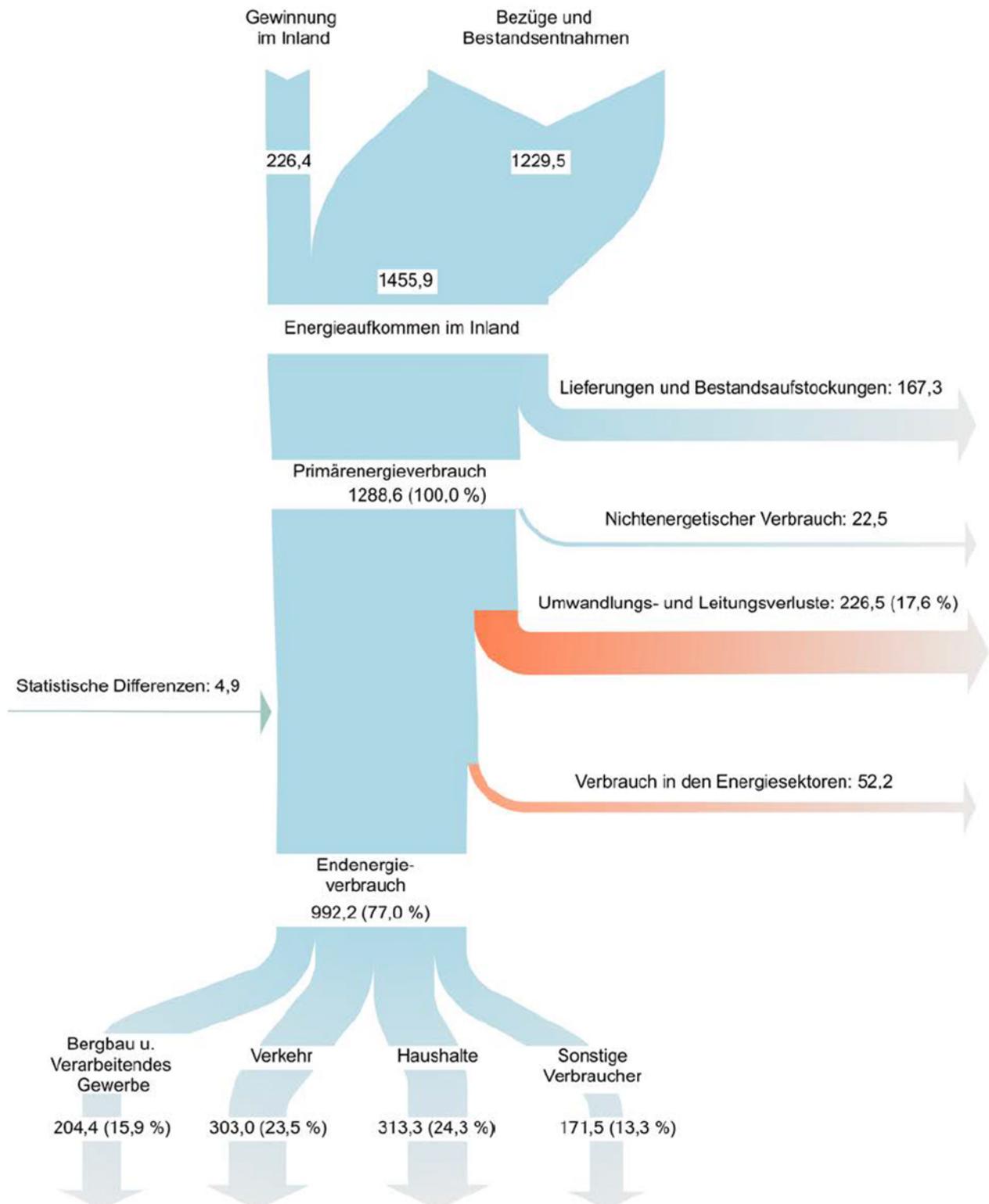


Abb. 7: Energieflussbild 2022 für Baden-Württemberg [in PJ] (vorläufig; Energieverbrauchswerte enthalten teilweise Schätzungen, insbesondere bei den Energieträgern Mineralöle und Mineralölprodukte. Abweichungen in der Summe durch Runden der Zahlen. Datenquelle: Energiebericht 2024, Stand August 2024. Statistisches Landesamt Baden-Württemberg. Quelle: (UM BW 2024a)

3.2 Energieerzeugung mit erneuerbaren Energien

Erneuerbare Energien werden in Baden-Württemberg in allen Bereichen (Strom, Wärme, Verkehr) genutzt. Bundesweite Zahlen zeigen, dass die Erneuerbaren Energien im Strombereich inzwischen die dominante Energieform darstellen (54% des Stromverbrauchs).

Die Brutto-Stromerzeugung in Baden-Württemberg liegt 2023 bei 37,3 TWh. Damit liegt sie aber um gut 17 TWh niedriger als im Vorjahr 2022, wo sie bei 55 TWh lag (Abb. 8).

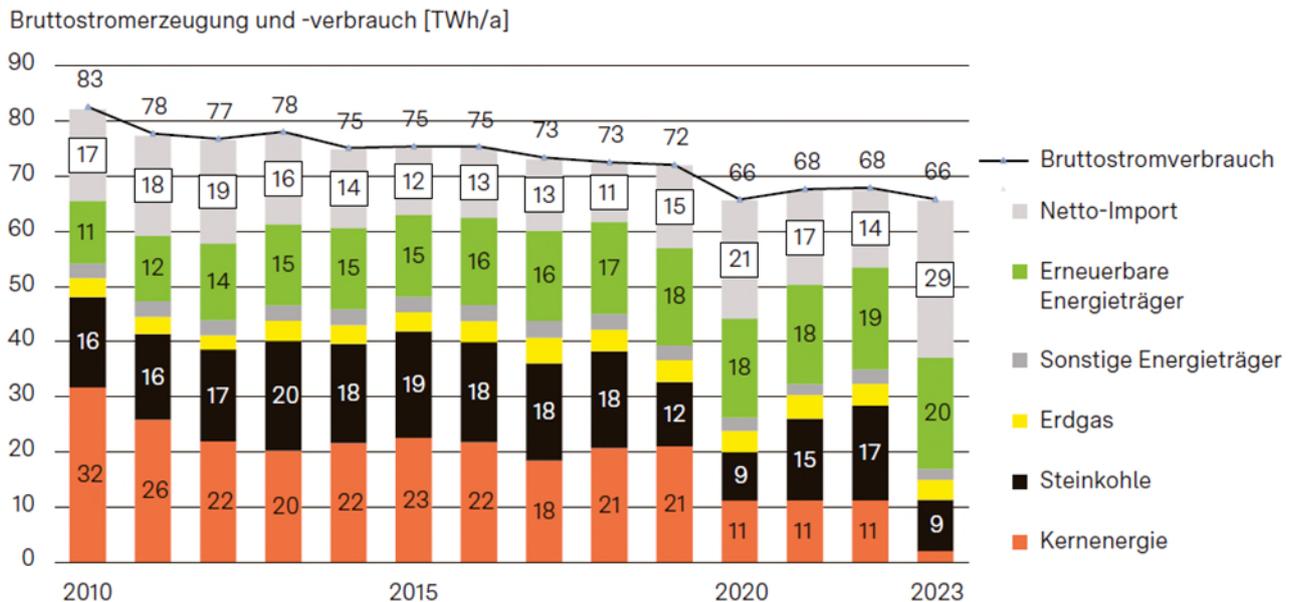


Abb. 8: Bruttostromerzeugung in Baden-Württemberg nach Energieträgern und Bruttostromverbrauch in Baden-Württemberg. Quelle: (UM BW 2024c)

Diese deutliche Reduktion der selbst erzeugten Elektrizität in Baden-Württemberg hatte verschiedene Gründe. Zum einen war die Erzeugung durch den Kernenergieausstieg um 9 TWh vermindert, auch die Kohleverstromung war deutlich reduziert. Erneuerbare Energien haben ihren Anteil weiter auf 20% gesteigert und haben nun einen Anteil von 56% an dem in BW erzeugten Strom, aber nur einen Anteil von 30% am Bruttostromverbrauch in Baden-Württemberg (UM BW 2024d).

Die installierte Leistung aus Erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung ist in den vergangenen Jahren kontinuierlich gestiegen. Dies ist insbesondere auf den Ausbau der Photovoltaik zurückzuführen (siehe Abb. 9).

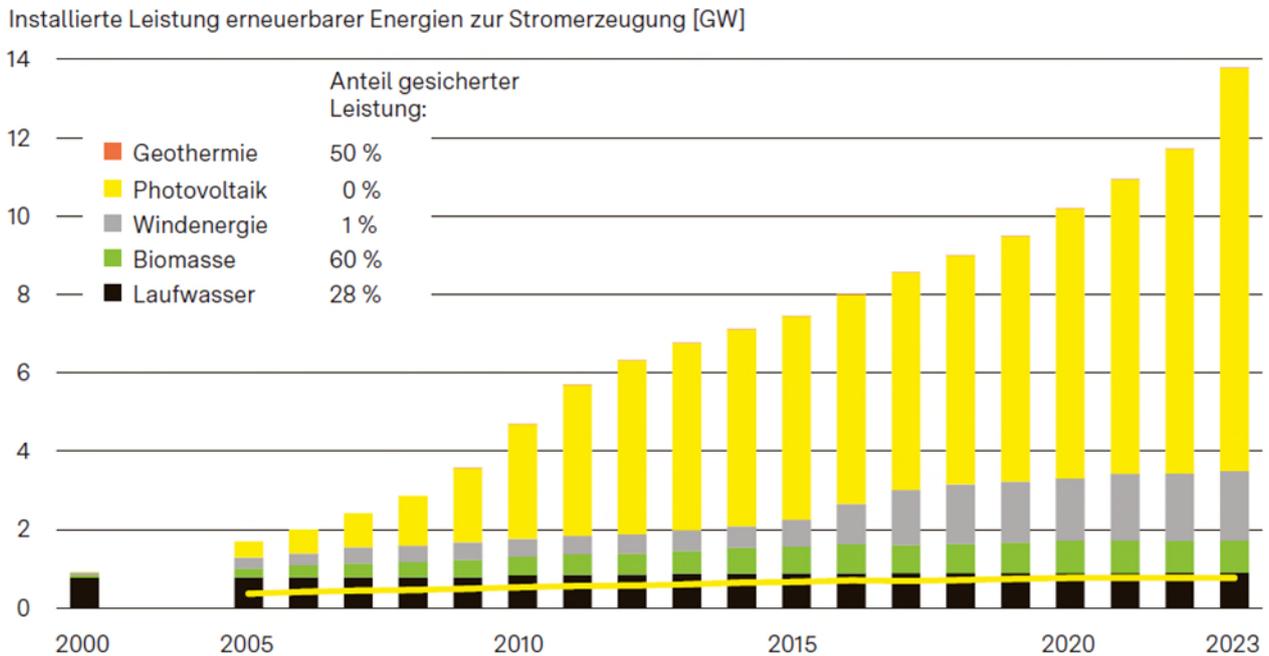


Abb. 9: Installierte Erzeugungslleistung erneuerbarer Energien in Baden-Württemberg zur Stromerzeugung nach Energieträgern. Der Anteil gesicherter Leistung (gelbe Linie) bezeichnet den Anteil an Energie, auf den man zu jeder Zeit in vollem Umfang zugreifen kann. Er ist eine rechnerische Größe aus mehreren Kenndaten und berücksichtigt vor allem die Volatilität bzw. Profile der natürlichen Energiequellen wie Solarstrahlung, Wind oder Wasserverfügbarkeit. Quelle: (UM BW 2024c)

Die Photovoltaik leistungsmäßig mit 10,258 GW (2023) den höchsten Anteil an den Erneuerbaren Energien einnimmt. Der Zuwachs lag 2023 bei 2,0 GW. Der Anteil der Windenergie an der installierten Leistung lag 2023 bei 1,766 GW, dies war ein Zuwachs zum Vorjahr (2022) von 55 MW. Der Anteil an Biomasse-Anlagen ist seit ein paar Jahren konstant, die feste Biomasse (vorwiegend Holz) liegt bei 175 MW, Biogas bei ca. 630 MW.

Im Bereich der Wärmeerzeugung ist der Anteil erneuerbarer Energien in den letzten Jahren auf 18% deutlich gestiegen (Abb. 10).

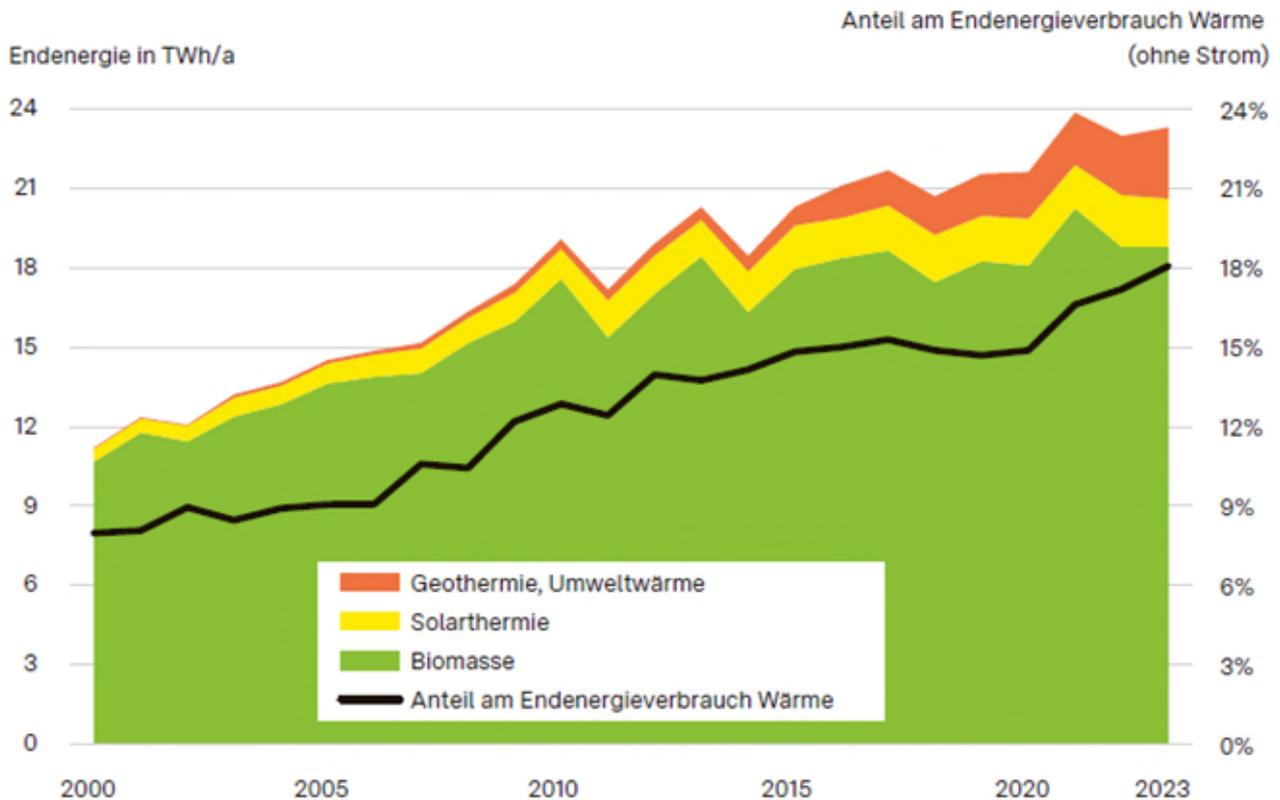


Abb. 10: Erzeugte Endenergie zur Wärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien in Baden-Württemberg nach Energieträgern. Der Anteil am Endenergieverbrauch (blaue Linie) liegt für 2023 bei 18%. Quelle: (UM BW 2024d)

Die Nutzung erneuerbarer Energien wird hierbei wesentlich vom Einsatz von Biomasse, insbesondere in Feuerungsanlagen für Holz, dominiert. Insgesamt werden hier 2023 18.700 GWh Wärme bereitgestellt, davon wurde fast die Hälfte aus Heiz(kraft)werken und modernen Zentralheizungen gewonnen (8.905 GWh), ein weiterer großer Anteil kam aus Einzelfeuerstätten (7.277 GWh). Aus Biogasanlagen wurden nur ca. 2.043 GWh Wärme bereitgestellt, dies macht einen Anteil von ca. 12% aus.

Im Bereich der Wärmeerzeugung kommen Anlagen zur Nutzung solarer Strahlungsenergie (solarthermische Kollektoranlagen) hinzu. Dort entstehen über die Kleinanlagen an Häusern hinaus auch zunehmend industrielle Großanlagen. In Baden-Württemberg waren 2023 Solarthermieanlagen mit knapp 4,7 Mio. m² Kollektorfläche verzeichnet (UM BW 2024c), die für die Nah- und Fernwärmeversorgung genutzt werden. Weitere 40.500 m² sind in Baden-Württemberg in Planung (UM BW 2023c).

Umweltwärme (Geothermie, Luft etc.) wird für die Wärmebereitstellung immer wichtiger. 2023 wurden hieraus bereits 2.575 GWh bereitgestellt. Dieser Teil hat sich seit 2018 praktisch verdoppelt.

Die unterschiedlichen Anteile der erneuerbaren Energien an der Energieversorgung in Baden-Württemberg sind in Abb. 11 dargestellt.

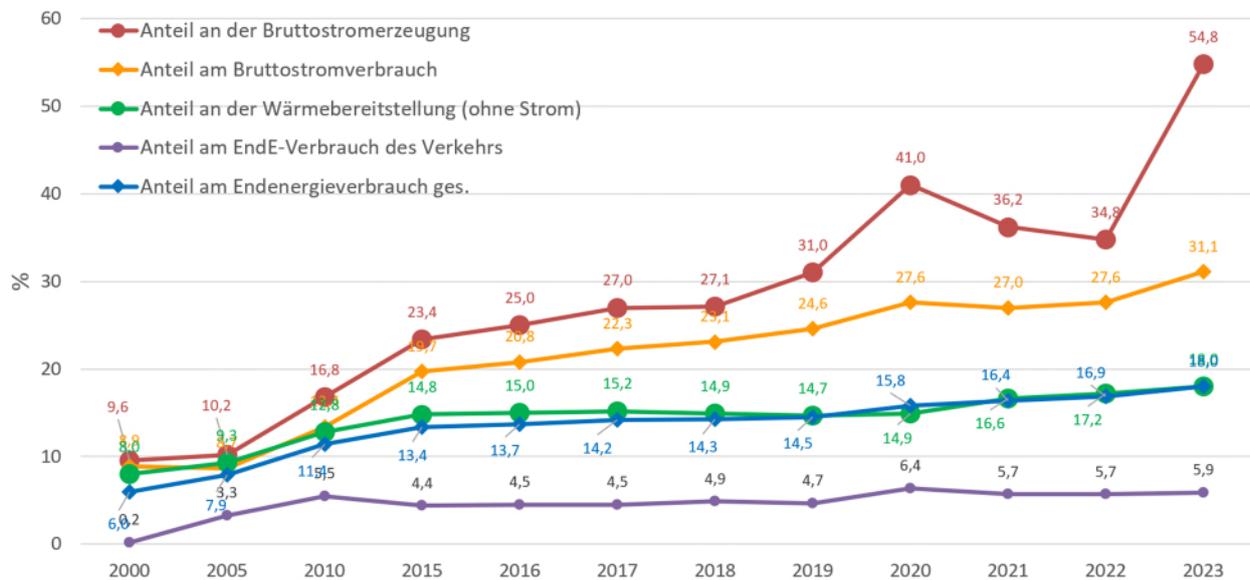


Abb. 11: Anteile erneuerbarer Energien an der Energieversorgung in Baden-Württemberg (in %). (Datenquelle: (UM BW 2024c); Darstellung IER).

Danach ist der aktuelle Stand für 2023 zur Erzeugung und Nutzung erneuerbarer Energie in Baden-Württemberg folgendermaßen:

- Anteil an der Bruttostromerzeugung: 54,8%
- Anteil am Bruttostromverbrauch: 31,1%
- Anteil an der Wärmebereitstellung: 18,0%
- Anteil am Endenergieverbrauch Verkehr: 5,9%
- Anteil am Endenergieverbrauch: 18,0%

Damit liegen die Anteile immer noch auf sehr niedrigem Niveau und müssen z.B. für das Ziel „einen Großteil der Energie in Baden-Württemberg aus erneuerbaren Energien“ zu gewinnen (Kernziele des UM BW¹⁴) weiter deutlich zunehmen. Die Anteile am Endenergieverbrauch haben sich z.B. von 2015 bis 2023 von 13,7% auf 18% nur sehr langsam gesteigert, im Durchschnitt waren es 0,49%-Punkte pro Jahr. Für den Bereich der Stromerzeugung hat sich von 2015 bis 2022 eine deutlichere Steigerung ergeben (von 23,4 auf 34,8%), das sind 1,78%-Punkte pro Jahr. 2023 gab es hier aber einen sehr großen Sprung auf 54,8%, was mit dem deutlichen Rückgang der Bruttostromerzeugung in Baden-Württemberg zusammenhängt. Vor dem Hintergrund der Zielsetzung Baden-Württembergs zur Klimaneutralität bis 2040 ist daher für die Umstellung auf erneuerbare Energien weiter ein starker Ausbau notwendig. Nachfolgend ist der Stand des Ausbaus und der Nutzung für einzelne Energieträger dargestellt.

¹⁴ <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/energie/energiewende/unsere-kernziele>

3.2.1 Solarenergie

Die Solarenergie ist unverzichtbarer Bestandteil einer modernen Energieversorgung. Für Baden-Württemberg sind Photovoltaik (PV) für die Stromerzeugung und solarthermische (STh) Kollektorsysteme für die Wärmerzeugung von Bedeutung. Solarthermische Kraftwerke sind für Baden-Württemberg aufgrund des geringen Anteils solarer Direktstrahlung nicht relevant.

Der Betrieb von Solaranlagen ist dadurch, dass kein Brennstoff oder Substrat benötigt wird, besonders ressourcen- und emissionsarm, auch wenn auch für diese Solartechnik wie für andere energietechnische Anlagen gilt, dass für die Produktion der Technologie ein nennenswerter Material- und Energieeinsatz erforderlich ist. Dieser hat aber in den letzten Jahren deutlich abgenommen.

Als sog. „volatile“ oder „fluktuierende“ Technologien sind Solaranlagen (PV und Solarthermie) wesentlich von natürlichen Wetter- und Umweltbedingungen und ihren Erscheinungsformen und -profilen (zeitlich, räumlich) abhängig. Die Solarenergie – hier am Beispiel der Photovoltaik - geht daher mit 0% in die gesicherte Leistung (siehe auch Abb. 9) ein und muss für die Versorgungssicherheit entsprechend mit gesicherter Leistung (Backup) hinterlegt werden.

Durch den Trend zur Sektorkopplung (Sektorintegration) lassen sich mit dem Strom (aus Photovoltaik, Windenergie etc.) auch Anwendungen in der Mobilität (z.B. synthetische Kraftstoffe oder E-Mobility) und auch in der Wärmeversorgung (z.B. durch Wärmepumpen) abdecken.

Erklärter Wille der Landes- und Bundespolitik ist es, die Solarenergie stark auszubauen. Dies wird auch durch den Krieg in der Ukraine und den Wunsch zur Abkehr von Gas (u.a. für die Stromerzeugung) verstärkt. Als südliches Flächenland mit Mittelgebirgscharakter bietet Baden-Württemberg für die Solarenergie große Potenziale, v.a. auf Hausdächern (Wohngebäude und Gewerbe), aber auch für Freiflächenanlagen, z.B. als Agri-Photovoltaik oder auch ‚floating‘ PV auf Baggerseen.

Photovoltaik (PV)

In Baden-Württemberg waren Ende 2023 rund 10,28 GW Leistung an Photovoltaik installiert und es wurden 7.858 GWh an Strom erzeugt (UM BW 2024c). Im Bundesländervergleich auf die Fläche bezogen steht Baden-Württemberg hier mit 231,8 kWp pro km² an 3. Stelle, der Spitzenreiter ist das Saarland mit 273,3 kWp/m² gefolgt von Bayern mit 263,9 kWp/m² (AEE 2023). Abb. 12 zeigt den Verlauf der installierten Leistung und produzierten Arbeit aus Photovoltaik in Baden-Württemberg über 20 Jahre (2003-2023). Erkennbar ist, dass der Ausbau besonders in den Jahren zwischen 2009 und 2012 stark zugenommen und sich danach bis ca. 2019 deutlich verlangsamt hat. Seit 2020 nehmen installierte Leistung und auch Stromerzeugung aus PV wieder stärker zu.

In Deutschland waren 2023 insgesamt 82,759 GW PV-Leistung installiert und es wurden 63.576 GWh an Strom produziert (UBA 2024). Dies waren im Vergleich zum Vorjahr 2022 ein Zubau von 15 GW und eine Steigerung der Stromerzeugung von etwa 2,6 TWh.

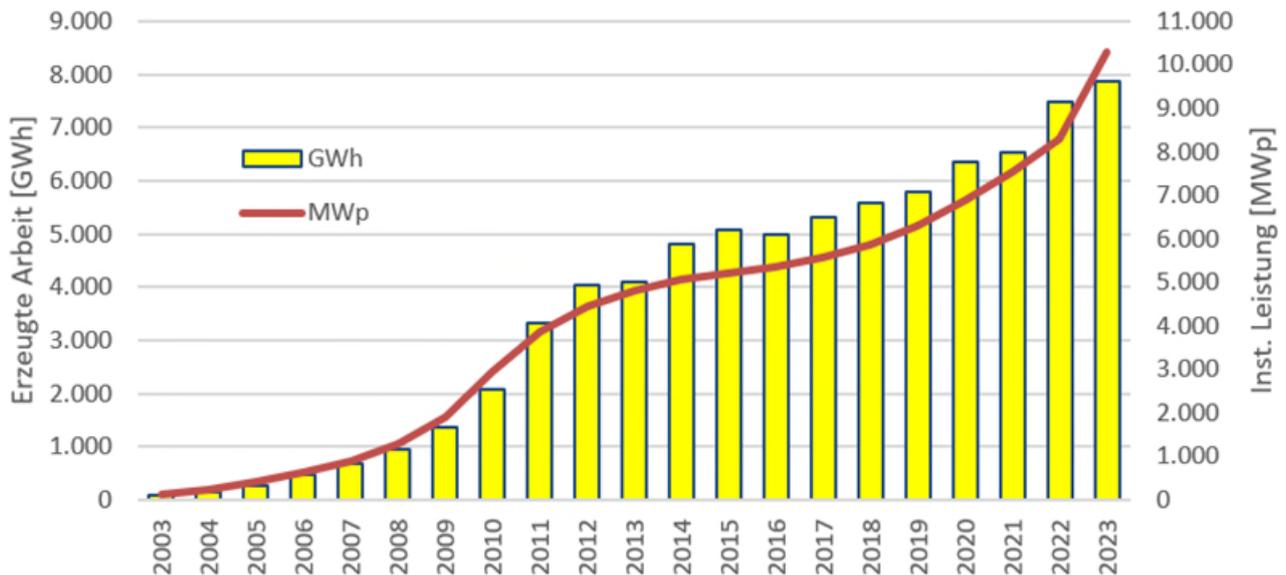


Abb. 12: Stromerzeugung in GWh und installierte Leistung in MWp aus Photovoltaik in Baden-Württemberg. Quelle: (UM BW 2024c)

2023 wurden in Baden-Württemberg insgesamt 2 GW an PV-Leistung zugebaut (2022: 780 MW, 2021: 620 MW) und in einem schlechten Solarjahr schließlich knapp 380 GWh (2022: 1.334 GWh) mehr Strom erzeugt als im Vorjahr. Bundesweit belegt das Land hinter Nordrhein-Westfalen und Bayern Platz 3. 2022 war in Bezug auf die Stromerzeugung und 2023 in Bezug auf die installierte Leistung ein gutes Solarjahr für Baden-Württemberg. Die Anlagen wurden hauptsächlich als Hausdachanlagen errichtet (1,696 GW), zunehmend entstehen aber auch Solar-Freiflächenanlagen. 2023 lag der Zubau von Freiflächenanlage bei 303 MW. Dies sind 15,15% vom Gesamtzubau von 2 GW.

Dabei hat sich beim Ausbau eine besondere Dynamik in den Jahren 2008 bis 2014 gezeigt, die 2015 bis 2019 aber nachgelassen hatte. In den letzten Jahren zeigt sich wieder ein stärkerer Anstieg, vor allen Dingen in 2023 mit 2 GW. Dies ist sicher auch durch politische Förderung verursacht. So wurde bundesweit in 2023 und voraussichtlich auch darüber hinaus die Mehrwertsteuer für Anlagen unter 30 kW komplett erlassen und auch die Regelungen zur Installation von sogenannten Balkon-Solaranlagen wurde erleichtert. Es ist davon auszugehen, dass die Ausbau-Dynamik weiter anhält.

Der Ausbaustand 2023 bei PV entspricht etwa 9,6% am Strombedarf und 12,9% an der Stromerzeugung in Baden-Württemberg. Bis 2030 soll der Ausbau von Solar-PV-Anlagen bundesweit um 22 GW pro Jahr steigen auf insgesamt rund 215 GW.

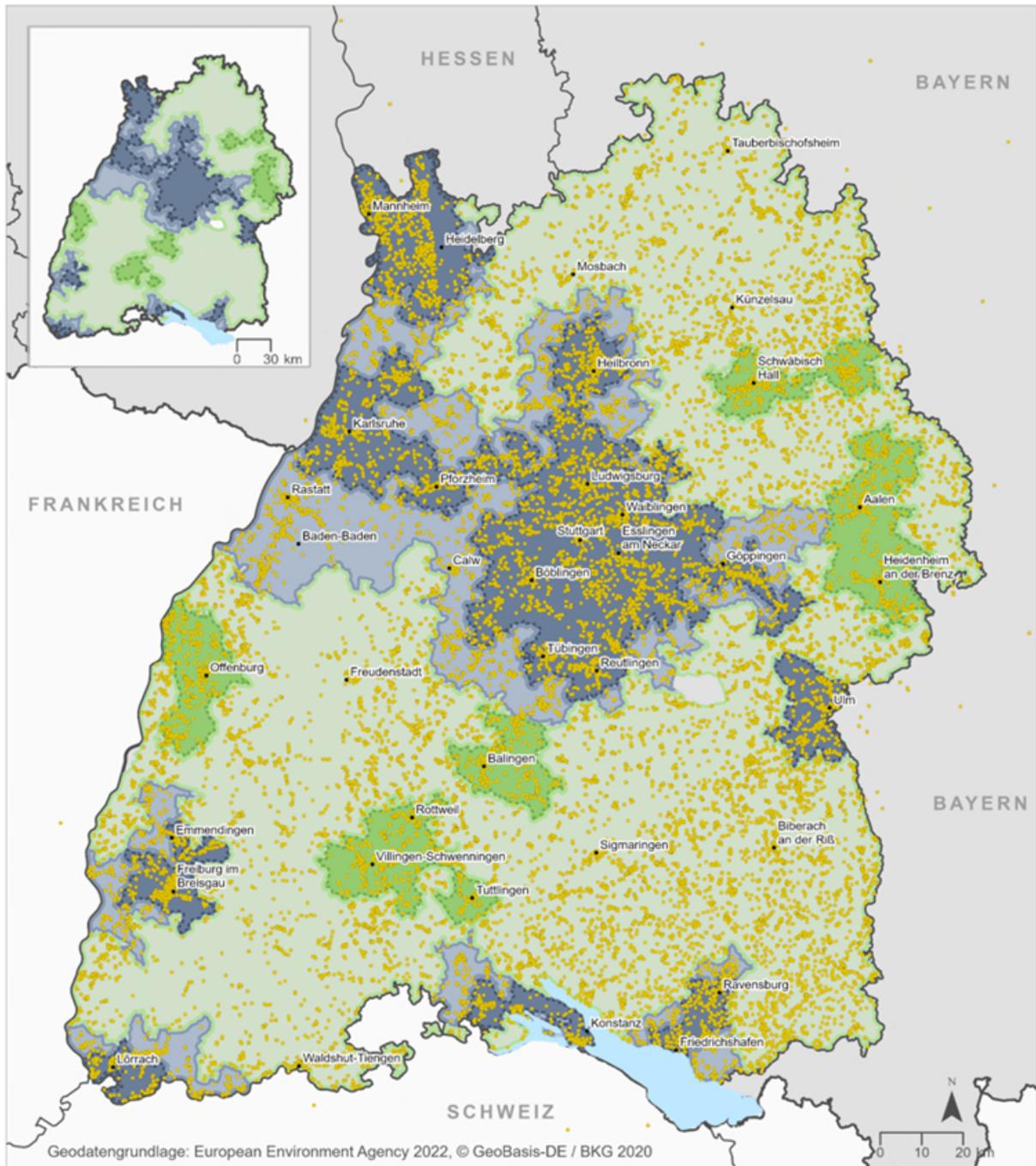
Gebäude PV-Anlagen

In Baden-Württemberg sind im Marktstammdatenregister 2022 mehr als 29.500 PV-Dachanlagen registriert. Die Verteilung der Anlagen auf die Raumkategorien gemäß LEP 2002 in den zwölf Regionen in Baden-Württemberg zeigt Tab. 6.

Tab. 6: PV-Dachanlagen in den zwölf Regionen Baden-Württembergs aufgeteilt auf die Raumkategorien gemäß LEP 2002 (Raumkategorien: I: nicht kategorisiert, II: Ländlicher Raum im engeren Sinne, III: Randzonen um die Verdichtungsräume; IV: Verdichtungsgebiete im Ländlichen Raum, V: Verdichtungsräume); Stand: 2022 Quelle: MStR 1.4.2023 und eigene Analyse; in Raumkategorie I gibt es keine Einträge.

	II	III	IV	V	Gesamt
Bodensee-Oberschwaben	2.762	324		374	3.460
Donau-Iller	2.607			464	3.071
Heilbronn-Franken	2.773	470	527	477	4.247
Hochrhein-Bodensee	811	469		415	1.695
Mittlerer Oberrhein	142	1.030		659	1.831
Neckar-Alb	702	350	349	540	1.941
Nordschwarzwald	516	477		339	1.332
Ostwürttemberg	731	174	686		1.591
Rhein-Neckar	772	115		1.089	1.976
Schwarzwald-Baar-Heuberg	1.139		652		1.791
Stuttgart	335	428		2.873	3.636
Südlicher Oberrhein	1.478	385	577	492	2.932
Gesamt	14.768	4.222	2.791	7.722	29.503

Die Verteilung der Gebäude-PV-Anlagen in Baden-Württemberg und die Raumkategorien gemäß LEP 2002 sind in Abb. 13 kartographisch dargestellt.



Gebäude-PV-Anlagen nach Raumkategorien
Stand 2022 – 29.579 Anlagen

● Gebäude-PV-Anlagen

Raumkategorien LEP 2002

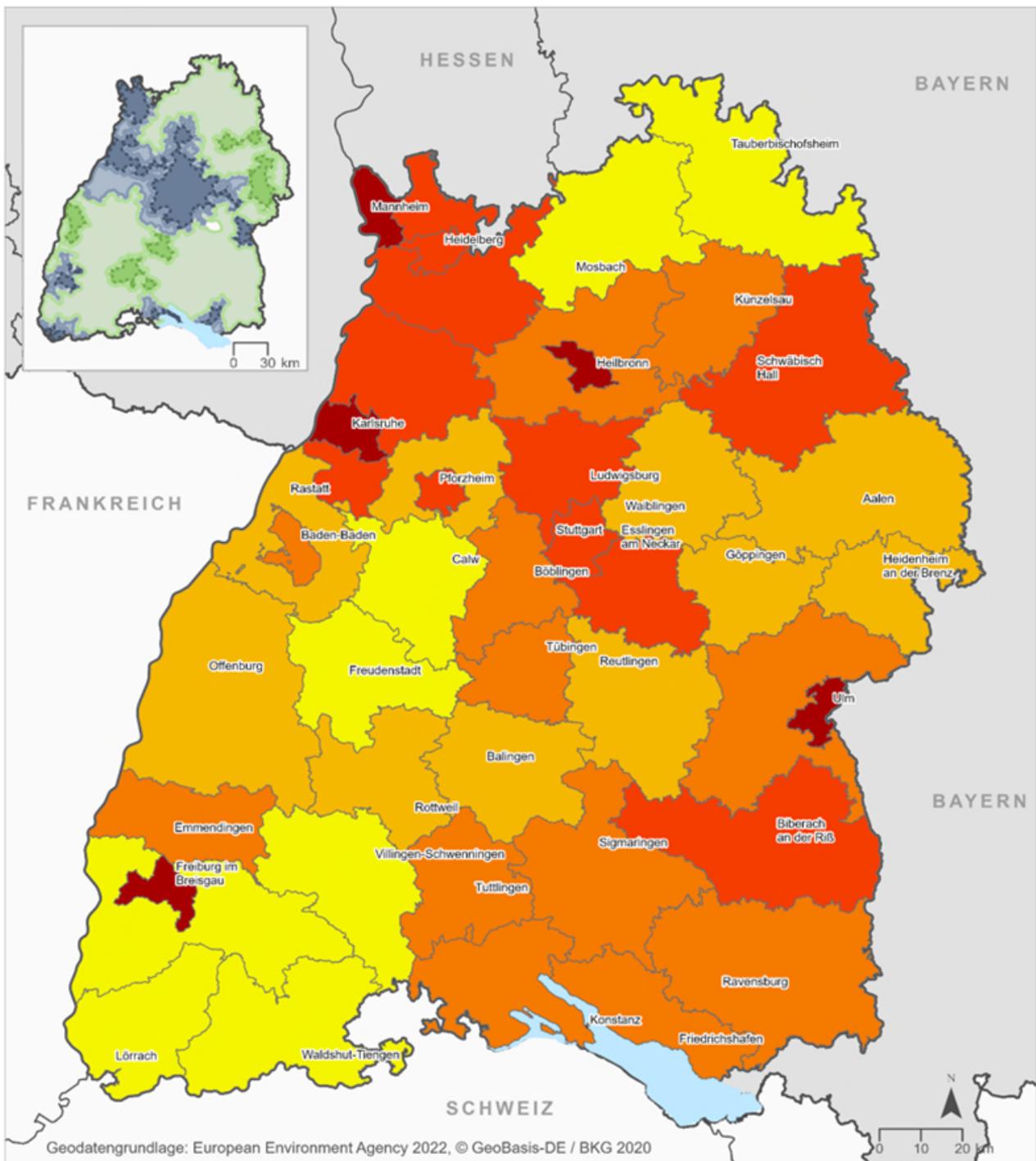
- Ländlicher Raum im engeren Sinne
- Verdichtungsbereiche im Ländlichen Raum
- Randzonen um die Verdichtungsräume
- Verdichtungsräume
- Gemeindefreies Gebiet

Datengrundlage: Marktstammdatenregister



Abb. 13: Gebäude-PV-Anlagen in Baden-Württemberg im Verhältnis zur Raumkategorie gemäß LEP 2002; Quelle: MStR 2023, Analyse und Darstellung IER

Die spezifische Leistungsdichte in Leistung pro Fläche (kW/km^2) ist in Abb. 14 für die Landkreise in Baden-Württemberg grafisch dargestellt.



**Installierte Leistung pro Fläche für Gebäude-PV-Anlagen 2022
in [kWp/km²]**

- 45 – 70
- 70 – 90
- 90 – 110
- 110 – 150
- 150 – 315

Datengrundlage: Marktstammdatenregister 2023

Raumkategorien LEP 2002

- Ländlicher Raum im engeren Sinne
- Verdichtungsgebiete im Ländlichen Raum
- Randzonen um die Verdichtungsgebiete
- Verdichtungsgebiete
- Gemeindefreies Gebiet



Abb. 14: Spezifische Leistungsdichte für PV-Dachanlagen in kW/km² und ihre Verteilung auf die Landkreise in Baden-Württemberg; Quelle: Marktstammdatenregister 2023 und eigene Analyse

Aus der Analyse der Verteilung auf die Raumkategorien wird deutlich, dass der Hauptteil der Anlagen im Ländlichen Raum errichtet wurde. In den sehr urban geprägten Regionen wie in der Region Stuttgart sind die meisten Anlagen in der Kategorie „Verdichtungsraum“ errichtet. Dies zeigt, dass die Dynamik des Ausbaus zwar eher in verdichteten Räumen stattfindet, aber der Großteil der Anlagen doch auch in Randzonen oder auch in ländlichen Bereichen zu finden ist.

Die Karte mit der Darstellung der spezifischen Leistungsdichte der PV-Dachanlagen verdeutlicht, dass in den Landkreisen sehr unterschiedliche Dichte-Werte vorliegen, insbesondere aber Stadtkreise wie Karlsruhe, Ulm, Freiburg, Stuttgart oder Mannheim hohe installierte Kapazitäten pro Fläche aufweisen.

PV-Freiflächenanlagen

PV-Freiflächenanlagen haben den Vorteil einer recht freien Ausrichtung der Module, gute Wirtschaftlichkeit und einer Fülle alternativer Konstruktionsmerkmale, die z.B. auch eine Mehrfachnutzung (unter oder neben den Modulen) zulässt. Dadurch können Flächenkonkurrenzen gemildert werden und Synergieeffekte entstehen. So haben sogenannte Agri-PV-Anlagen, bei denen eine Kombination einer energetischen Nutzung und eine gleichzeitige landwirtschaftliche Nutzung möglich ist, in letzter Zeit eine große Aufmerksamkeit erlangt, siehe z.B. (FhG ISE 2024a). Agri-PV-Anlagen können unterschiedlich angeordnet sein und erhebliche Vorteile in der Mehrfachnutzung und Synergien von landwirtschaftlicher Nutzung und Energieerzeugung aufweisen (siehe hierzu auch Kap. 1.5). Gleichwohl haben sie im Vergleich zu standardisierten Freiflächen-PV-Anlagen höhere Kosten, da die Aufständigung ggf. deutlich teurer ist – auch wenn der finanzielle Ertrag der darunter liegenden landwirtschaftlichen Bewirtschaftung mitgerechnet wird. Besondere Potentiale von Agri-PV liegen deshalb auch in einer Kombination mit Sonderkulturen, z.B. im Obstbau, wo Synergieeffekte u.a. durch einen zusätzlichen Hagelschutz durch die PV-Module erzielt werden können.

PV-Freiflächenanlagen sind seit Anfang 2023 auch im Außenbereich privilegiert (Baugesetzbuch § 35, Abs. 1 Nr. 8 b), soweit sie „auf einer Fläche längs von aa) Autobahnen oder bb) Schienenwegen des übergeordneten Netzes im Sinne des § 2b des allgemeinen Eisenbahnnetzes mit mindestens zwei Hauptgleisen und in einer Entfernung von diesen von bis zu 200 Metern, gemessen vom äußeren Rand der Fahrbahn“ errichtet werden. Dies bedeutet, dass kein aufwändiges Bebauungsplanverfahren mehr erforderlich ist, sondern nur noch ein Bauantrag gestellt werden muss. Weiterhin kann gemäß §9 Abs. 2c Bundesfernstraßengesetz (FStrG) das bisherige Verbot, die Randstreifen innerhalb von 40 Metern zur Autobahn hin zu bebauen, mit einer Ausnahmegenehmigung aufgehoben werden.

Darüber hinaus ist im EEG 2023 (§37 Abs. 1c) geregelt, dass PV-Freiflächenanlagen auf einem 500 Meter breiten Korridor entlang von Autobahnen und Schienenwegen an der Ausschreibung im EEG teilnehmen dürfen. Dies trifft gemäß EEG 2023 auch zu auf i) Gewässerflächen, die künstlich oder erheblich verändert wurden (Floating-PV) (§37 Abs. 3f) ii) Ackerflächen, die kein Moorboden,

Naturschutzgebiet oder Nationalpark sind, sofern auf der gleichen Fläche weiterhin ein- oder mehrjährige Nutzpflanzen bzw. Dauerkulturen angebaut werden (§37 Abs. 3e), iii) Dauergrünland, wenn die Fläche kein Moorboden, Naturschutzgebiet oder Nationalpark ist (§37 Abs. 3a+b), iv) Parkplatzflächen (§37 Abs. 3d), und auf v) entwässerten und landwirtschaftlich genutzten Moorböden, wenn diese im Zusammenhang mit der Solaranlage dauerhaft wieder vernässt werden. Zusätzliche Flächen können die Bundesländer über eine Freiflächenöffnungsverordnung freigeben. Diese Möglichkeit hat Baden-Württemberg ergriffen und im März 2017 große Solarflächenanlagen über 750 kWp und bis 10 MW auch auf Acker- und Grünlandflächen in sogenannten „benachteiligten Gebieten“¹⁵ zugelassen. Zur Vermeidung einer übergroßen Konkurrenz zur landwirtschaftlichen Nutzung ist das jährliche Zubauvolumen auf 500 MW begrenzt. Diese Grenze wurde 2017 von 100 MW auf 500 MW angehoben.

Zum Jahresende 2022 waren in Baden-Württemberg insgesamt 800 MW PV-Freiflächenanlagen installiert. Der Zubau betrug 2022 ca. 130 MW. Der Zubau von PV- bzw. PV-Freiflächenanlagen war in den letzten Jahren jedoch großen Schwankungen unterworfen (siehe Abb. 15). Einen hohen Zubau von PV-Anlagen mit insgesamt 1.034 MW gab es 2010, der niedrigste Zubau wurde 2016 mit 145 MW registriert. In 2022 erreichte der Zubau 820 MW (UM BW 2023b) und 2023 fast 1,9 GW¹⁶. PV-Freiflächenanlagen haben 2022 am PV-Gesamtzubau in Baden-Württemberg leistungsmäßig einen Anteil von knapp 16% (Deutschland 25%).

Anlagenbestand von Photovoltaikanlagen nach Inbetriebnahmejahren in MW

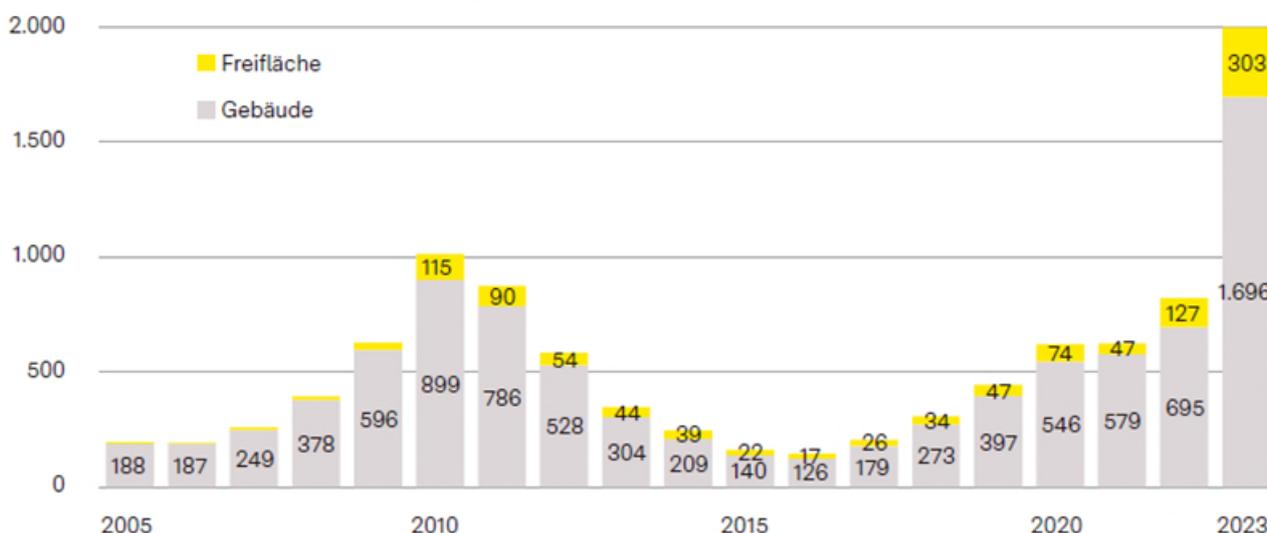


Abb. 15: Jährliche Neuinstallation bzw. Anlagenbestand nach Zubaujahr von PV-Anlagen in Baden-Württemberg aufgeteilt nach Dach- und Freiflächenanlagen; Quelle: (UM BW 2024c)

¹⁵ „Benachteiligte Gebiete“ sind landwirtschaftliche Flächen, die sich schwer bewirtschaften lassen z.B. weil die klimatischen Bedingungen ungünstig sind, die Bodenqualität schlecht ist, oder die Bewirtschaftung an steilen Berghängen mit besonderen Schwierigkeiten verknüpft ist. Benachteiligte Gebiete sind im EU-Recht definiert und im Rahmen des Erneuerbare-Energien-Gesetz 2017 (EEG 2017) für erneuerbare Energien geöffnet worden. Aktuell sind rund 50 Prozent der landwirtschaftlichen Nutzfläche in Deutschland als benachteiligte Gebiete ausgewiesen.

¹⁶ <https://www.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/rekordjahr-beim-ausbau-der-photovoltaik-im-land>

Die Aufteilung der PV-Freiflächenanlagen auf die Raumkategorien gemäß LEP 2002 in den zwölf Regionen Baden-Württembergs ist in Tab. 7 dargestellt.

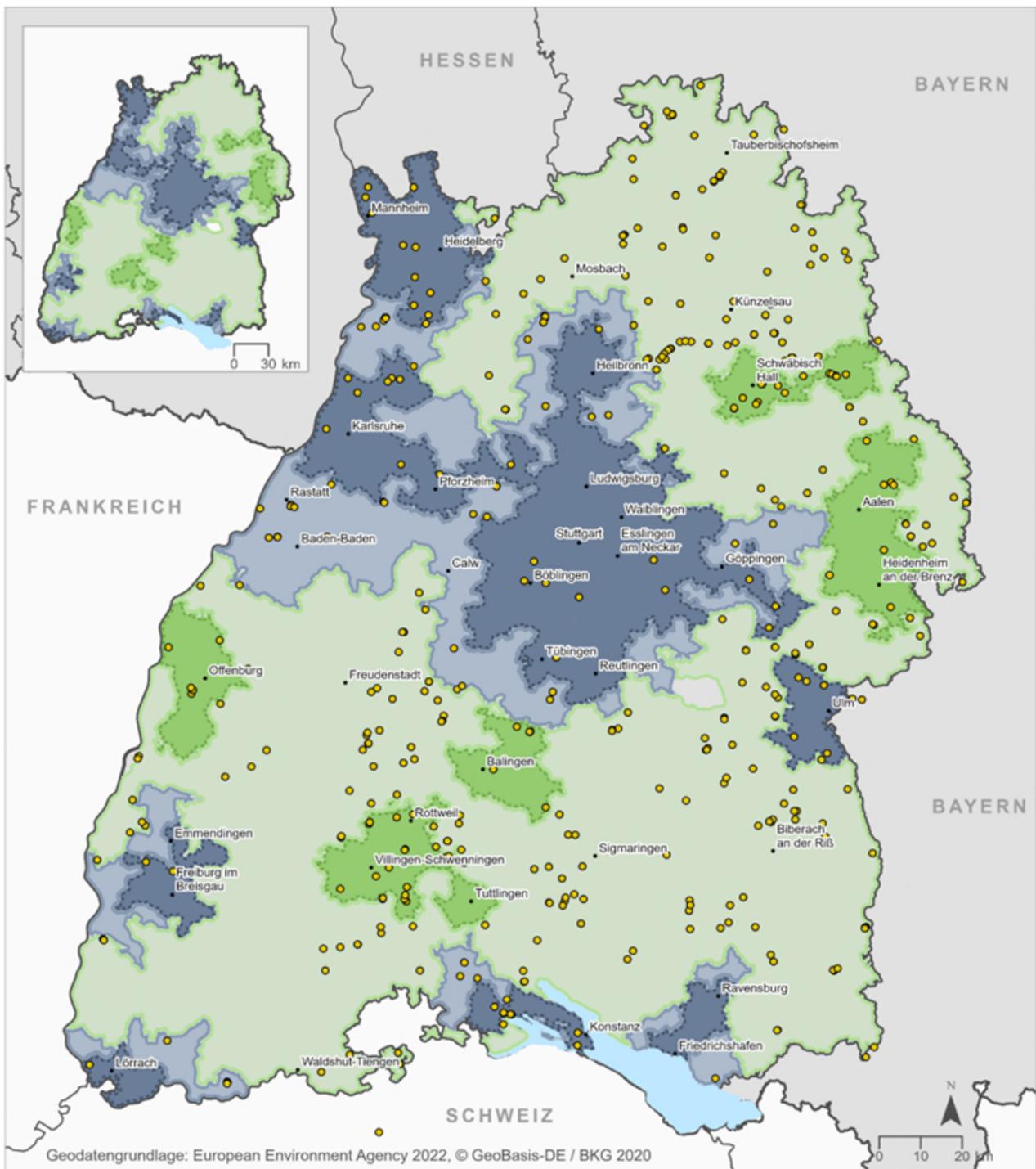
Tab. 7: PV-Freiflächenanlagen in den zwölf Regionen Baden-Württembergs aufgeteilt auf die Raumkategorien gemäß LEP 2002 (Raumkategorien: I: nicht kategorisiert, II: Ländlicher Raum im engeren Sinne, III: Randzonen um die Verdichtungsräume; IV: Verdichtungsgebiete im Ländlichen Raum, V: Verdichtungsräume); Da in Kat. I keine Anlagen verzeichnet sind, ist diese Kategorie nicht dargestellt. Quelle: MStR 2023 und eigene Analyse.

	II	III	IV	V	Gesamt
Bodensee-Oberschwaben	40	1		0	41
Donau-Iller	51			7	58
Heilbronn-Franken	79	11	18	0	108
Hochrhein-Bodensee	12	9		12	33
Mittlerer Oberrhein	0	23		6	29
Neckar-Alb	7	2	11	1	21
Nordschwarzwald	26	7		3	36
Ostwürttemberg	32	1	10		43
Rhein-Neckar	19	1		10	30
Schwarzwald-Baar-Heuberg	31		16		47
Stuttgart	4	2		14	20
Südlicher Oberrhein	20	1	6	3	30
Gesamt	321	58	61	56	496

Die Verteilung der Freiflächen-PV-Anlagen in Baden-Württemberg im Verhältnis zur Raumkategorie ist auch in der Karte in Abb. 16 dargestellt.

Hier wird deutlich, dass die überwiegende Anzahl der PV-Freiflächenanlagen in der Raumkategorie „Ländlicher Raum im engen Sinne“ errichtet worden ist. Dies ist auch folgerichtig, da es sich fast ausnahmslos um im Vergleich zu Dachanlagen größere PV-Anlagen (> 30 kWp) handelt, für die es vornehmlich im Ländlichen Raum entsprechenden Flächenpotenziale gibt. Weitere Anlagen, die in den Raumkategorien der Verdichtungsgebiete errichtet sind, gehören zu den infrastrukturbegleitenden Einrichtungen, z.B. entlang von Straßen oder auf Deponien.

Außerdem zeigt sich, dass diese an bestimmten Stellen auf der Landesfläche in hoher Anzahl bzw. Fläche hervortretend, vor allem im Nordosten, im Osten und mittleren Süden des Landes. Dies sind besonders die Landkreise Karlsruhe und Rhein-Neckar, Heilbronn, Hohenlohe und Schwäbisch Hall, Alb-Donau-Kreis, Rottweil, Freudenstadt und auch Konstanz. Insbesondere im Südschwarzwald, im Bodenseekreis und in der Region Stuttgart sind nur sehr wenige Anlagen vertreten.



Freiflächen-PV-Anlagen nach Raumkategorien
Stand 2022 – 506 Anlagen

● Freiflächen-PV-Anlagen

Raumkategorien LEP 2002

- Ländlicher Raum im engeren Sinne
- Verdichtungsbereiche im Ländlichen Raum
- Randzonen um die Verdichtungsräume
- Verdichtungsräume
- Gemeindefreies Gebiet

Datengrundlage: Marktstammdatenregister



Abb. 16: Freiflächen-PV-Anlagen in Baden-Württemberg im Verhältnis zur Raumkategorie gemäß LEP 2002; Quelle: MStR 2023, eigene Analyse

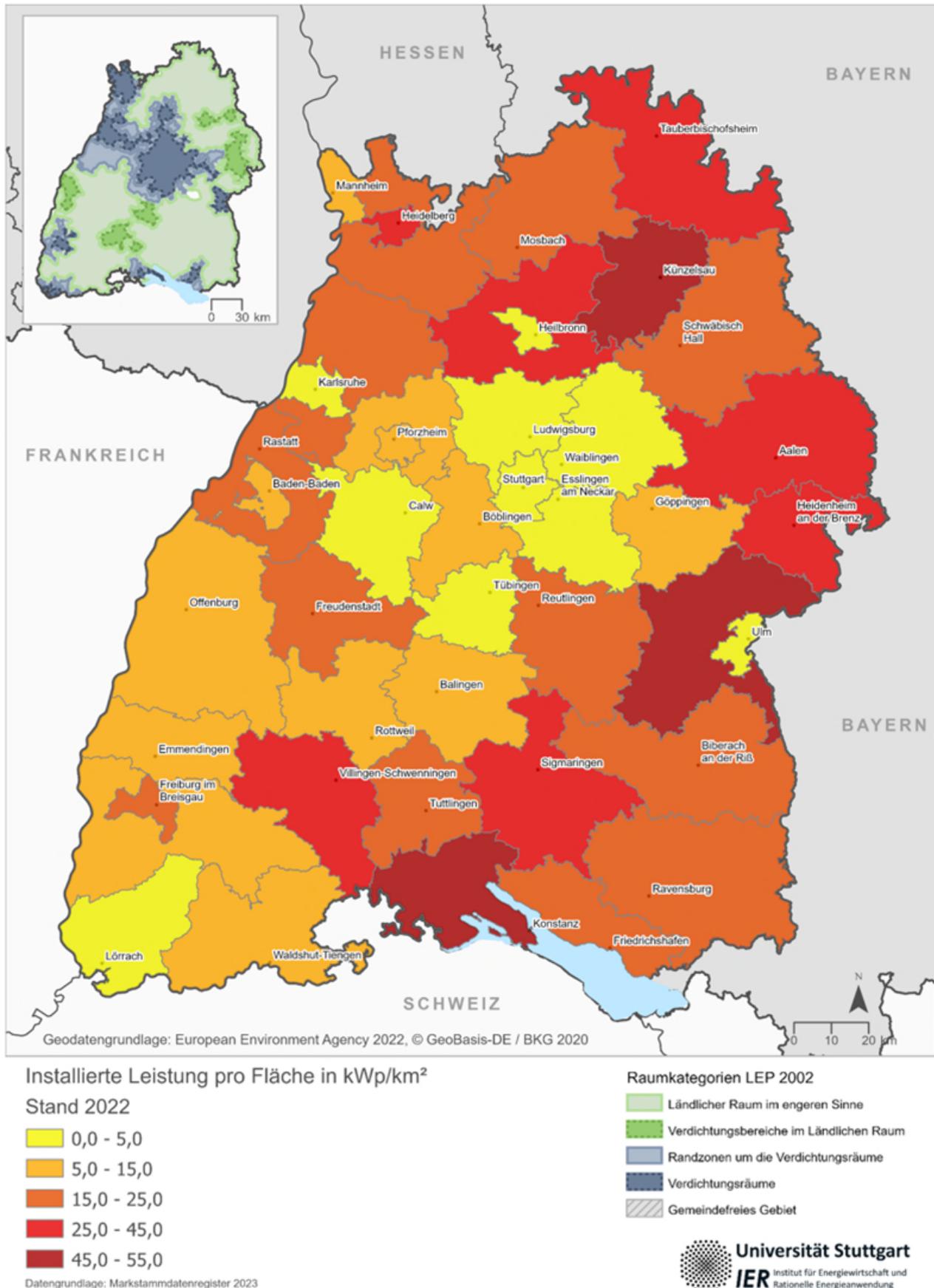


Abb. 17: Spezifische Leistungsdichte für PV-Freiflächenanlagen in kW_p/km² und ihre Verteilung auf die Landkreise in Baden-Württemberg; Quelle: MStR 2023, eigene Analyse

Die spezifische Leistungsdichte in Leistung pro Fläche (kW/km^2) ist in Abb. 17 für die Landkreise in Baden-Württemberg grafisch dargestellt. Hieraus wird ersichtlich, dass die größten Leistungsdichten in den ländlichen Gebieten, der Schwäbischen Alb, Oberschwaben sowie in (Nord-) Ostwürttemberg zu finden sind. Besonders die verdichteten Kreise um Stuttgart und Karlsruhe zeigen hingegen eine sehr geringe Leistungsdichte an PV-Freiflächenanlagen.

Solarthermische Kollektoranlagen zur Wärmeerzeugung

Solarthermische Kollektoranlagen zur Wärmebereitstellung sind in Deutschland und Baden-Württemberg für die Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung weit entwickelt und verfügbar. Die verschiedenen Technologien haben einen hohen technischen Stand erreicht und sind bis hin zu Temperaturen von 120°C einsetzbar. In Deutschland sind Ende 2023 thermische Solaranlagen mit einer Gesamtkollektorfläche von 22,4 Mio. m^2 und damit genauso viel wie 2022 installiert (AGEE-Stat.; März 2024¹⁷). Insgesamt trug die Solarthermie 2023 mit 9,1 TWh aufgrund der geringen Solarstrahlung im Jahr etwa 6 Prozent weniger Energie bei als 2022, wo die produzierte Menge noch bei 9,7 TWh lag.

In Baden-Württemberg sind 2022 4,671 Mio. m^2 Solarkollektorfläche mit einer geschätzten Gesamterzeugung von 1.922 GWh Wärme pro Jahr verzeichnet (Abb. 18).

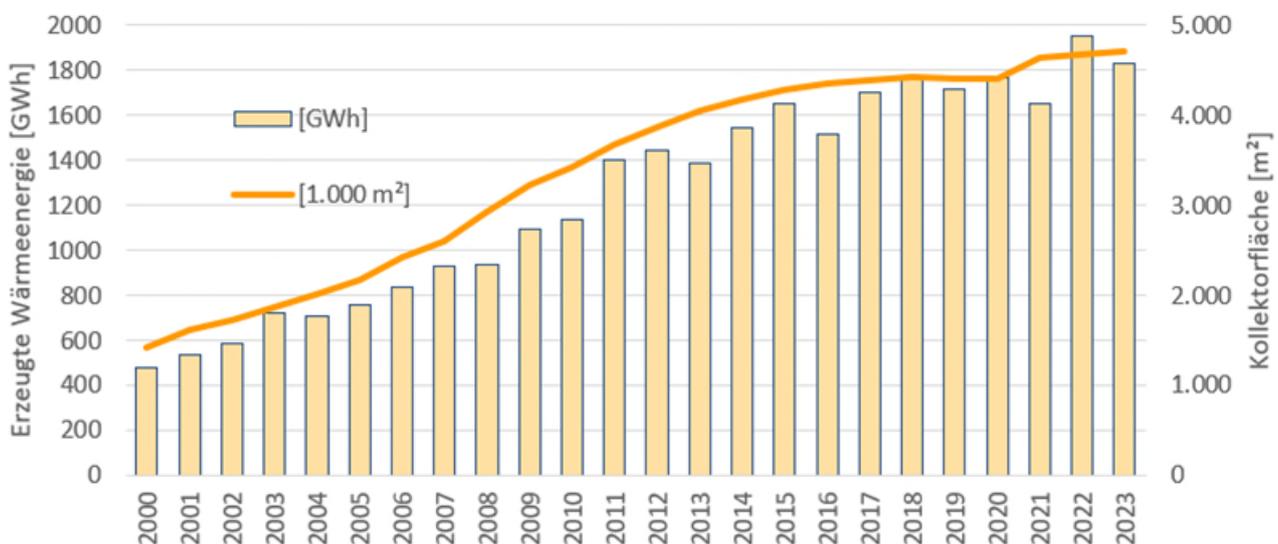


Abb. 18: Wärmeerzeugung in GWh und installierte Kollektorfläche in m^2 aus solarthermischen Kollektoranlagen in Baden-Württemberg. Quelle: (UM BW 2024c)

Dies entspricht 1,45% des Gesamt-Endenergieverbrauchs zur Wärmeerzeugung (2022: 132 TWh) und 0,54% des Gesamt-Primärenergieverbrauchs (2022: 1.289 PJ) in Baden-Württemberg. Die Ausbaudynamik der solarthermischen Kollektoranlagen ist seit ca. 2016 deutlich zurückgegangen und hat quasi stagniert. Es ist zu vermuten, dass die Solarthermie gegenüber der Photovoltaik auf den Dächern der Häuser ins Hintertreffen gerät. Dies kann auch damit begründet werden, dass auch

¹⁷ www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/2024_uba_hg_erneuerbareenergien_dt.pdf

mit PV-Anlagen eine Wärmeversorgung sichergestellt werden kann, da insbesondere Überschussstrom mit Hilfe von Heizstäben in (Wasser-)speichern zur Wärmeerzeugung genutzt werden kann bzw. Wärmepumpen damit betrieben werden können.

Solarthermische Kollektoranlagen etablieren sich zunehmend auch als Großanlagen. In Baden-Württemberg sind 2022 solaren Großanlagen mit knapp 60.000 m² Kollektorfläche verzeichnet. Weitere 40.500 m² sind in Baden-Württemberg in Planung (UM BW 2023c). Diese Anlagen werden für die Nah- und Fernwärmeversorgung genutzt. Das Steinbeis Forschungsinstitut Solites weist für Baden-Württemberg 22 solare Wärmenetze aus (Abb. 19). Für ganz Deutschland sind 52 Anlagen in Betrieb, 8 Anlagen in der Planung und weitere 68 Anlagen in der Planungsvorbereitung.

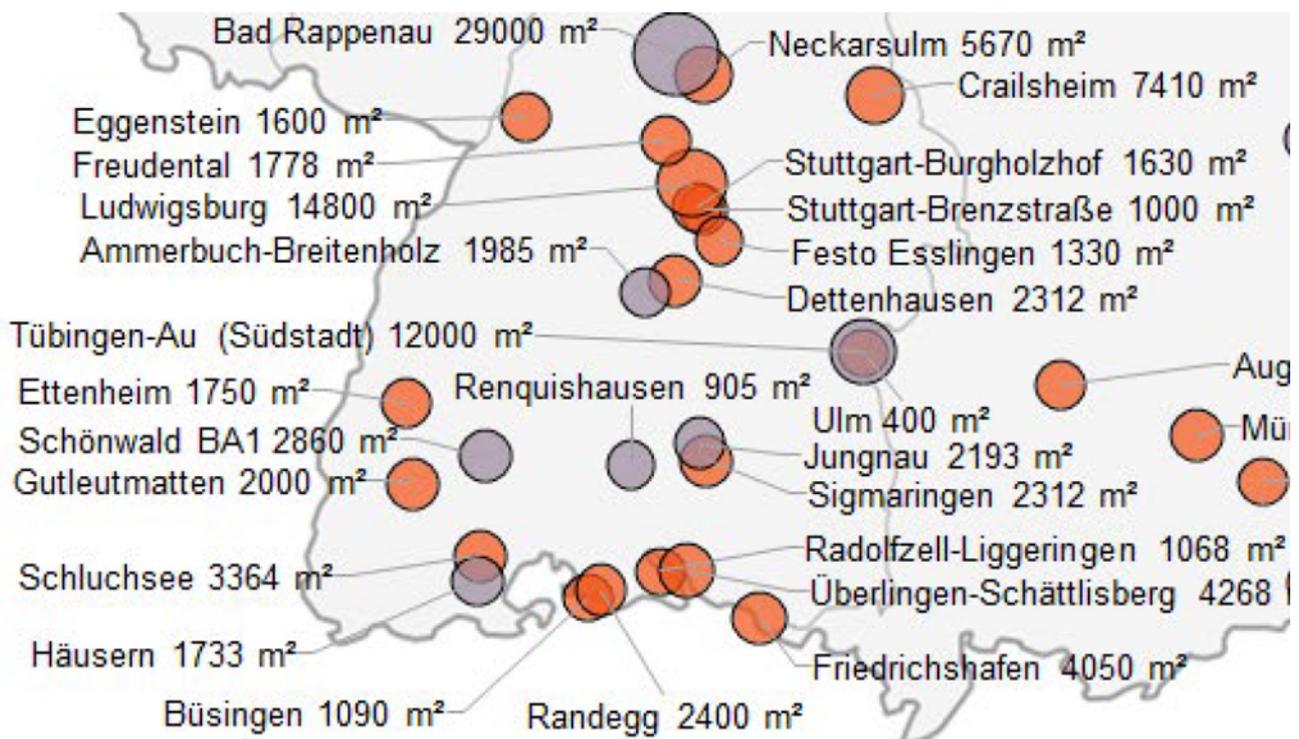


Abb. 19: Anlagen zur Nutzung solarer Nah- und Fernwärme; Ausschnitt Baden-Württemberg aus Deutschlandkarte; rot: in Betrieb, grau: in Planung; Quelle UM BW 2024d (Datenquelle: Solites, Stand: Mai 2024)

Raumrelevante Aspekte von Solarenergieanlagen

Sowohl in der Photovoltaik als auch bei solarthermischen Kollektorsysteme werden vorzugsweise Dachanlagen auf Gebäuden (Haushalte, Industrie und Gewerbe) errichtet. Diese Systeme betreffen daher in erster Linie die kommunale Energieplanung. In letzter Zeit werden für beide Systeme aber auch kraftwerks- bzw. industrieähnliche Freiflächenanlagen errichtet. Solarthermische Kollektor-Freiflächenanlagen sind meist (kommunalen) Heiz(kraft)werken zugeordnet und daher weniger relevant für die Landesplanung. Hingegen werden PV-Anlagen vielfach und z.T. großflächig auf landwirtschaftlich genutzten Flächen, Konversionsflächen (z.B. Brachflächen, stillgelegte Deponien) und gestörten Flächen (z.B. Lärmschutzwälle) sowie Wasserflächen (z.B. Baggerseen) errichtet. Das Potenzial für Freiflächen-PV-Anlagen ist in Baden-Württemberg hoch, im Energieatlas Baden-Württemberg (<https://www.energieatlas-bw.de/sonne/freiflaechen/potenzialanalyse>) wird mit

einem Gesamtpotenzial für diesen Bereich von 690.000 ha gerechnet. Die Flächenpotenziale ohne harte Ausschlusskriterien belaufen sich auf immer noch 385.000 ha (3.850 km²). Im Szenariorahmen für den Netzentwicklungsplan Strom 2037/2045 Version 2025 (50Hertz Transmission GmbH et al. 2024) ist eine installierte Erzeugungsleistung für Freiflächen-PV-Anlagen für Baden-Württemberg von 11,8 (Szenario C 2037) bis zu 17,4 GW (Szenario C 2045) vorgesehen.

Das Land Baden-Württemberg hat im Klimaschutzgesetz (KlimaG Baden-Württemberg) ein Flächenziel für die Nutzung von Solar- und Windenergie in Baden-Württemberg festgelegt (§ 20 und 21). Dort wurde festgelegt, dass in den Regionen Baden-Württembergs ein Flächenanteil von 1,8% der jeweiligen Regionsfläche als verbindliche regionale Teilfläche für die Windenergie (§ 20 Abs. 1) und weitere 0,2% für die Nutzung von Photovoltaik auf Freiflächen (§21) ausgewiesen werden soll (siehe dazu auch Kapitel 1.6). Dieses wird aber als „Mindestziel“ verstanden. Im neuen Landesplanungsgesetz (LPIG) vom Sept. 2022 wird zudem gefordert, die in den jeweiligen Regionalplänen festgelegten Regionalen Grünzüge für Windenergie- und Freiflächenphotovoltaikanlagen zu öffnen.

Für den Ausbau der FFPV-Anlagen hat das Land Baden-Württemberg einen Leitfaden mit Hinweisen für die kommunalen Planungsträger ausgegeben (UM BW 2019). Die Aufgabe der regionalen Planungsträger zur Festlegung von Standorten für Erneuerbare Energien (§11 LPIG) umfasst auch regionalbedeutsame Freiflächen-PV-Anlagen. Da es in Baden-Württemberg kaum Freiflächen gibt, die nach dem EEG für PV-FFA erlaubt sind, hat Baden-Württemberg von der Länderöffnungsklausel Gebrauch gemacht und Ackerflächen und Grünland für max. 500 MW PV-Anlagen in ‚benachteiligten Gebieten‘ (siehe Energieatlas Baden-Württemberg) geöffnet.

Für die Erleichterung der Errichtung von Freiflächen-PV-Anlagen wurde auch das Baurecht im Baugesetzbuch (BauG) geändert. Mit Wirkung zum 11.01.2023 wurde im § 35 Abs. 1 Nr. 8 Buchst. b BauGB ein neuer Privilegierungstatbestand geschaffen, der eine Errichtung von Freiflächen-PV-Anlagen im Nahbereich bestehender Verkehrsinfrastrukturen ermöglicht¹⁸. Diese Erweiterung der Privilegierungstatbestände für Anlagen im Außenbereich wird damit begründet, dass die Flächen entlang von Autobahnen und Schienenwegen ohnehin durch verschiedene (z.B. optische und akustische) Belastungen vorgeprägt sind, sodass PV-Anlagen auch ohne die Durchführung eines Bebauungsplanverfahrens errichtet werden können. Die Anwendung der Vorschrift ist jedoch durch die Begrenzung auf Autobahnen (vgl. § 1 Abs. 1 Nr. 1 FStrG) und Schienenwegen des übergeordneten Netzes mit mindestens zwei Hauptgleisen eingeschränkt. Somit trifft dieser Tatbestand auf Bundesstraßen und Landesstraßen nicht zu. Die Schienenwege des übergeordneten Netzes müssen zunächst über die vom Eisenbahnbundesamt gemäß § 2c Abs. 5 AEG veröffentlichte Liste

¹⁸ § 35 BauG „(1) Im Außenbereich ist ein Vorhaben nur zulässig, wenn öffentliche Belange nicht entgegenstehen, die ausreichende Erschließung gesichert ist und wenn es (...) der Nutzung solarer Strahlungsenergie dient (...) b) auf einer Fläche längs von ii) Autobahnen oder iii) Schienenwegen des übergeordneten Netzes im Sinne des § 2b des Allgemeinen Eisenbahngesetzes mit mindestens zwei Hauptgleisen und in einer Entfernung zu diesen von bis zu 200 Metern, gemessen vom äußeren Rand der Fahrbahn.“

identifiziert werden. Ob die Strecke auch zwei Hauptgleise hat und der Privilegierungstatbestand greift, ist aus der Liste jedoch nicht ersichtlich. Um dies herauszufinden, muss eine Abfrage bei der DB Netz AG oder eine eigene Recherche über das Infrastrukturregister (ISR) der DB Netz AG erfolgen.

Floating PV-Anlagen

„Floating“ PV-Anlagen sind PV-Freiflächenanlagen, die auf künstlichen oder „durch den Menschen in ihrem Wesen physikalisch erheblich veränderten“ Gewässern (also Baggerseen, ehemalige Sandgruben oder Stauseen) errichtet werden. Die PV-Module sind dabei an Schwimmkörpern befestigt, die ihrerseits am Gewässergrund verankert sind. Durch die Kühlung der Module über das Gewässer weisen Floating-PV-Anlagen gesteigerte Erträge im Vergleich zu konventionellen PV-Freiflächenanlagen auf. Die Anlagen müssen einen Abstand zum Ufer von mind. 40 Meter haben und dürfen max. 15% der Gewässeroberfläche (WHG §36 Abs. 3 Nr.2) bedecken.

Die Vorteile dieses Anlagentyps liegen darin, dass sie u.a. die Flächeninanspruchnahme an Land mindern, eine erhöhte Stromerzeugung durch den Kühlungseffekt aufweisen und auch die Wasserverdunstung des Gewässers reduzieren. Andererseits besteht ein erhöhter Montage- und Serviceaufwand, die Anlage muss wasserbeständig und ökologisch unbedenklich ausgelegt sein und auch starker Strömung, Wellengang oder Wasserspiegelschwankungen widerstehen können.

Als Anwendungsfälle kommen in Deutschland geflutete Tagebauflächen, Kiesseen und Stauseen in Betracht. Die erste Floating-PV-Anlage Deutschlands wurde Ende Mai 2019 auf einem Baggersee bei Renchen/Baden mit einer Leistung von knapp 750 kWp ans Netz gebracht.

Der Energieatlas Baden-Württemberg ermittelt für Baden-Württemberg in drei Flächenbelegungs-szenarien mit 71 betrachteten aktiven Baggerseen ein Potenzial für die Floating PV zwischen 0,28 GW_p (10% der Seefläche engräumig mit PV belegt) und 1,45 GW_p (45% der Seefläche mit PV engräumig belegt). Für die Möglichkeit die Seenfläche weiträumig, aber zu 100% mit PV zu belegen, errechnet der Energieatlas ein Potenzial von 1,13 GW_p.

Für Deutschland hat das Fraunhofer-ISE ein Potenzial von bis zu 44 GWp für „Schwimmende Photovoltaik“ ermittelt¹⁹.

Fazit Solarenergie-Anlagen in Baden-Württemberg

Status: Solarenergie wird gegenwärtig überwiegend auf Dachflächen genutzt, entweder mithilfe stromerzeugender PV-Technologien oder auch über wärmeerzeugende solarthermische Kollektoranlagen. Zunehmend werden auch großflächige Freilandanlagen errichtet, bevorzugt als PV-Anlage, gelegentlich auch als Solarkollektoranlagen, die meist in größere Anlagenkonfigurationen, z.B. kombiniert mit einem Biomasse-Heizkraftwerk, integriert sind. Für die PV-Freiflächenanlagen bestehen vielfältige Aufstellungsmöglichkeiten, z.B. als PV-Kraftwerk, entlang von Autobahnen und Schienentrassen, als Agri-PV oder auch als

¹⁹ <https://www.ise.fraunhofer.de/de/leitthemen/integrierte-photovoltaik/schwimmende-photovoltaik-fpv.html>

Schwimmende Anlagen (Floating PV) auf Gewässern. Sie ermöglichen meist auch Mehrfachnutzungen, z.B. für die Tierproduktion (Schafweide), Biodiversität (Blühwiese) oder land- oder gewässerwirtschaftliche Nutzungen. Die Ausbaupotenziale für die Solarenergie in Baden-Württemberg sind hoch und noch weitgehend ungenutzt.

Trend: Die Solarenergie steht vor einem weiteren anhaltenden Ausbau-, 'Boom', sowohl auf Dächern als auch im Freiland. Die Fülle an möglichen Technologien (z.B. organische Zellen, Perowskit, Mehrfachzellen, Dünnschicht etc., u.a. zur Steigerung der Effizienz) und Aufstellarten (u.a. Agri-PV, vertikale bifaziale Konfigurationen etc.) ist in der Praxis noch lange nicht ausgeschöpft. Die Kosten sind niedrig bzw. sinken durch Skalierungseffekte in der Produktion weiter. Es gibt aktuell eine gute Förderung bzw. fördernde Rahmenbedingungen. Die Bundes- und die Landesregierung Baden-Württemberg wollen für die Solarenergie ambitionierte Ausbaupläne umsetzen. Der notwendige Flächenbedarf für die Solarenergie wird weiter steigen.

3.2.2 Windenergie

Technisch-energiewirtschaftlicher Stand

Die Windenergie ist wesentlicher Bestandteil einer modernen, nachhaltigen Energieversorgung. Wie auch die Solarenergie benötigt der Betrieb keine Brennstoffe oder Substrate, nur für Wartung, Instandhaltung und die Produktion der Anlagen sind Aufwendungen an Material und Energie nötig. Daher ist der Betrieb sehr ressourcen- und emissionsarm. Als sog. „volatile“ oder „fluktuierende“ Technologie ist sie wie die Solarenergie von natürlichen Wetter- und Umweltbedingungen und deren Erscheinungs- und Erzeugungsprofilen (zeitlich, räumlich) abhängig. Der Anteil an „gesicherter Leistung“ wird als gering eingeschätzt, (UM BW 2023c) setzt ihn mit 1% an.

Moderne Windenergieanlagen an Land (onshore) liefern pro Anlage eine Leistung von etwa 3-5 MW (Bestandsanlagen). Aktuell werden in Baden-Württemberg Anlagen mit einer Leistung von mehr als 5 MW pro Anlage geplant. So will RWE im Landkreis Sigmaringen einen Anlagenpark mit 8 Anlagen und 54 MW bzw. im Landkreis Rottweil mit 4 Anlagen und 27 MW²⁰ errichten. Dies entspricht einer durchschnittlichen Leistung pro Anlage von 6,75 MW. Onshore-Windenergieanlagen werden mit 2.000 Volllaststunden und mehr genutzt (Deutsche Windguard 2020). Bis 2030 soll dieser Wert auf bis zu 2.700 Volllaststunden steigen. Onshore Neuanlagen in Deutschland haben (Stand 2022) 2.150 Volllaststunden, der bestehende Windpark in Deutschland weist 1.718 Volllaststunden aus (BMU 2024).

Die Stromgestehungskosten von Windenergieanlagen an Land (onshore) liegen in 2024 zwischen 4,3 und 9,2 €Cent/kWh (FhG ISE 2024b). Diese Werte basieren auf spezifischen Anlagenkosten von 1.300 bis 1.900 EUR/kW. Die Gestehungskosten liegen damit in der sogenannten Einsatzreihenfolge

²⁰ <https://www.rwe.com/presse/rwe-renewables-europe-australia/2024-07-17-rwe-entwickelt-in-baden-wuerttemberg-zwei-windparks/>

von Stromerzeugungseinheiten am Strommarkt („Merit order“) sehr weit vorne, werden also prioritär eingesetzt und senken die durchschnittlichen Kosten der Stromerzeugung insgesamt. Windenergieanlagen offshore liegen bei den Gestehungskosten bei 5,5 - 10,3 €Ct/kWh (FhG ISE 2024b). Sie kommen für Baden-Württemberg wegen seiner Lage fernab vom Meer aber nicht in Frage. Die Windenergie trägt im Bereich der Stromerzeugung erheblich zur Reduzierung von Treibhausgasen bei.

Durch die Trends zur Sektorenkopplung lassen sich mit dem Strom aus Windenergie (und anderer Stromerzeugungstechnologien) auch Anwendungen in der Mobilität (z.B. Wasserstoff, Synthetische Kraftstoffe oder E-Mobility) und auch Wärmeversorgung (z.B. durch Wärmepumpen) abdecken.

Mit dem Windatlas Baden-Württemberg (AL-PRO 2019) wurde 2019 ein neuer Bewertungsparameter für die Beurteilung von windhöffigen Standorten eingeführt, die sogenannte „mittlere gekappte Windleistungsdichte“. Sie wird in der Einheit Watt pro Quadratmeter (W/m^2) ausgedrückt. Dadurch wurden im Vergleich zum vorherigen Windatlas von 2011 teils deutlich veränderte Potenziale festgestellt. Die mittlere gekappte Windleistungsdichte berücksichtigt neben der Windgeschwindigkeit auch die Luftdichte und die Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit am Standort. Um der Erzeugungsgrenze einer Windenergieanlage bei Nennwind (Windgeschwindigkeit, bei der eine WEA ihre Nennleistung erreicht) Rechnung zu tragen, wird die mittlere Windleistungsdichte beim Wert des Nennwindes „gekappt“. Hieraus errechnet sich dann die „mittlere gekappte Windleistungsdichte“, die damit einen sehr realitätsnahen Wert für das Erzeugungspotenzial am gegebenen Standort darstellt.

Das Anlagensegment von Windenergie-Kleinanlagen für den gewerblichen oder häuslichen Bereich führt ein Schattendasein und ist wenig verbreitet. Einer weiten Verbreitung stehen geringe Leistungswerte, hohe spezifische Investitionen und eine Fülle von technischen und regulatorischen Hemmnissen (Turbulenzanfälligkeit, Vibrationen, Sichtbarkeit, Schall- und Lichtreflexionen im städtischen Umfeld) entgegen. Daher wird dieses Anlagensegment hier nicht weiter besprochen.

Stand des Ausbaus in Baden-Württemberg

Abb. 20 zeigt die Stromerzeugung aus Windkraft in Baden-Württemberg von 2003 bis 2023. Sie ist 2023 mit 3.772 GWh im Vergleich zur Solarenergie, die 2023 insgesamt 7.858 GWh an Strom erzeugt hat, verhältnismäßig niedrig. 2023 hat die Windenergie in Baden-Württemberg eine Anlagenleistung von 1,77 GW und trägt mit 13,6 PJ Primärenergieäquivalent und 3.772 GWh Endenergie zur Energieerzeugung bei (UM BW 2024c). Dies sind 5,7% am Bruttostromverbrauch, 10,1% an der Bruttostromerzeugung (UM BW 2022) und 1,2% am Primärenergieverbrauch (PEV) in Baden-Württemberg. Mit einem Zubau an Windenergieleistung von 55 MW in 2023 (AEE 2013, 2023)²¹ lag Baden-Württemberg (ohne die Stadtstaaten Berlin, Bremen, Hamburg) im Ranking der Agentur für Erneuerbare Energien für 2022 an vorletzter Stelle der Bundesländer, nur das Saarland hatte einen geringeren Zubau. Den höchsten Zubau 2022 hatte Schleswig-Holstein mit 469,1 MW. 2023 hat sich

²¹ Zahlen differieren gegenüber der Statistik des Landes Baden-Württemberg (UM BW 2023b.)

Baden-Württemberg im Bundesländer-Ranking verbessert. Mit 59 MW registriertem Zubau belegt Baden-Württemberg den 9. Platz und liegt damit z.B. vor den Flächenländern Sachsen (10. Platz) und Bayern (12. Platz) (Quentin 2024; Lüers 2024).

In Bezug auf die Landesfläche betrug die installierte Leistung 2022 in Baden-Württemberg 49,4 kW/km². 2023 stieg die spezifische installierte Leistung für Baden-Württemberg auf 50 kW/km². Damit lag Baden-Württemberg nach Bayern und Berlin an drittletzter Stelle (AEE 2023 und Strom-Report²²). Die Spitzenreiter Bremen und Schleswig-Holstein haben eine für die Fläche spezifische installierte Windenergieleistung von 480 bzw. 471 kW pro km².

In Deutschland wurden im Jahr 2023 insgesamt 118,2 TWh Strom aus Windenergie onshore erzeugt. Dies entspricht einem Anteil von 22,5% an der gesamten Energieerzeugung aus erneuerbaren Energien 2023. Es waren insgesamt fast 61 GW Windenergieanlagenleistung onshore und 8,3 GW offshore installiert. Der jährliche Zubau an Leistung für Wind onshore lag in Deutschland 2022 bei 2,1 GW und 2023 bei 3, GW. Für Wind offshore waren es 2022 0,342 GW und für 2023 0,258 GW (UBA Febr. 2024).

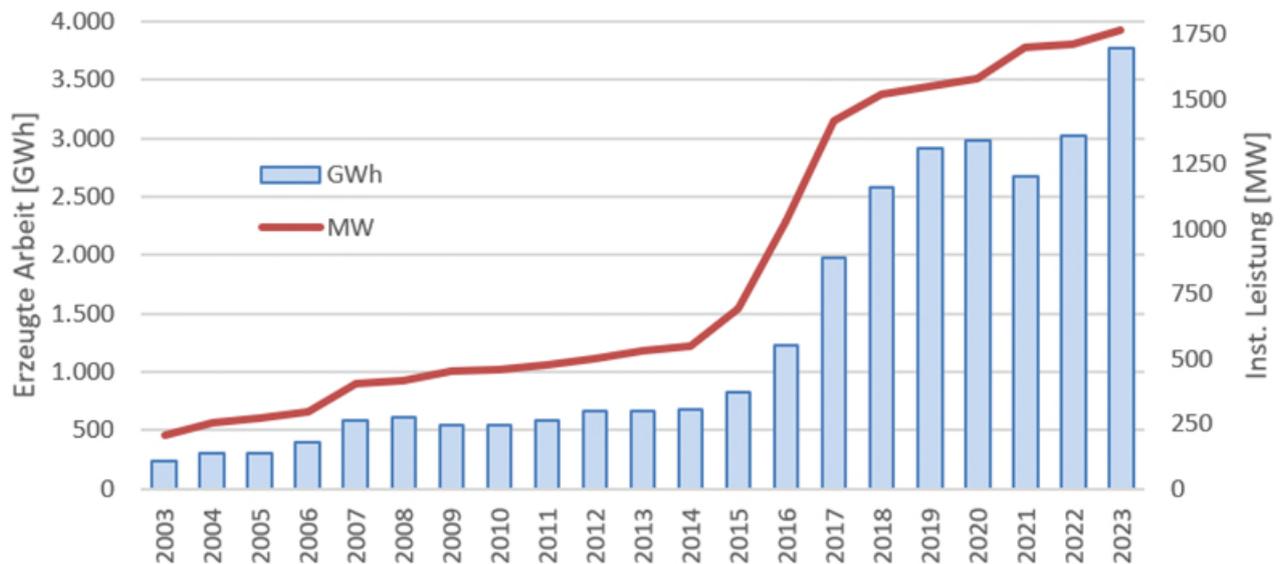


Abb. 20: Stromerzeugung aus Windenergie in Baden-Württemberg. Quelle: UM BW 2024c

2023 wurde nach Angaben des Ministeriums für Umwelt und Energiewirtschaft (UM BW 2023b und Dashboard Windenergie²³) in Baden-Württemberg 16 WEA mit einer Anlagenleistung von 63 MW Leistung neu errichtet (Abb. 21), 2022 waren dies fünf Anlagen mit 13 MW gewesen. 2023 wurden 49 neue Windkraftanlagen genehmigt (2022: 41). Im Vergleich: Niedersachsen: 196 neue Anlagen, Nordrhein-Westfalen: 184). Die in den Jahren von 2003 bis 2014 erkennbare niedrige Ausbaurrate hatte sich in den Jahren 2015 bis 2018 deutlich beschleunigt, anschließend aber wieder abgenommen. Zur Erreichung der Klimaziele in Baden-Württemberg müssten nach Berechnung von (ZSW und Partner 2022) und Aussagen der Plattform EE Baden-Württemberg von 2020 - 2040 ca.

²² <https://strom-report.com/windenergie/>

²³ <https://umweltdaten.lubw.baden-wuerttemberg.de/>

530 MW an Windenergieleistung jährlich errichtet werden.

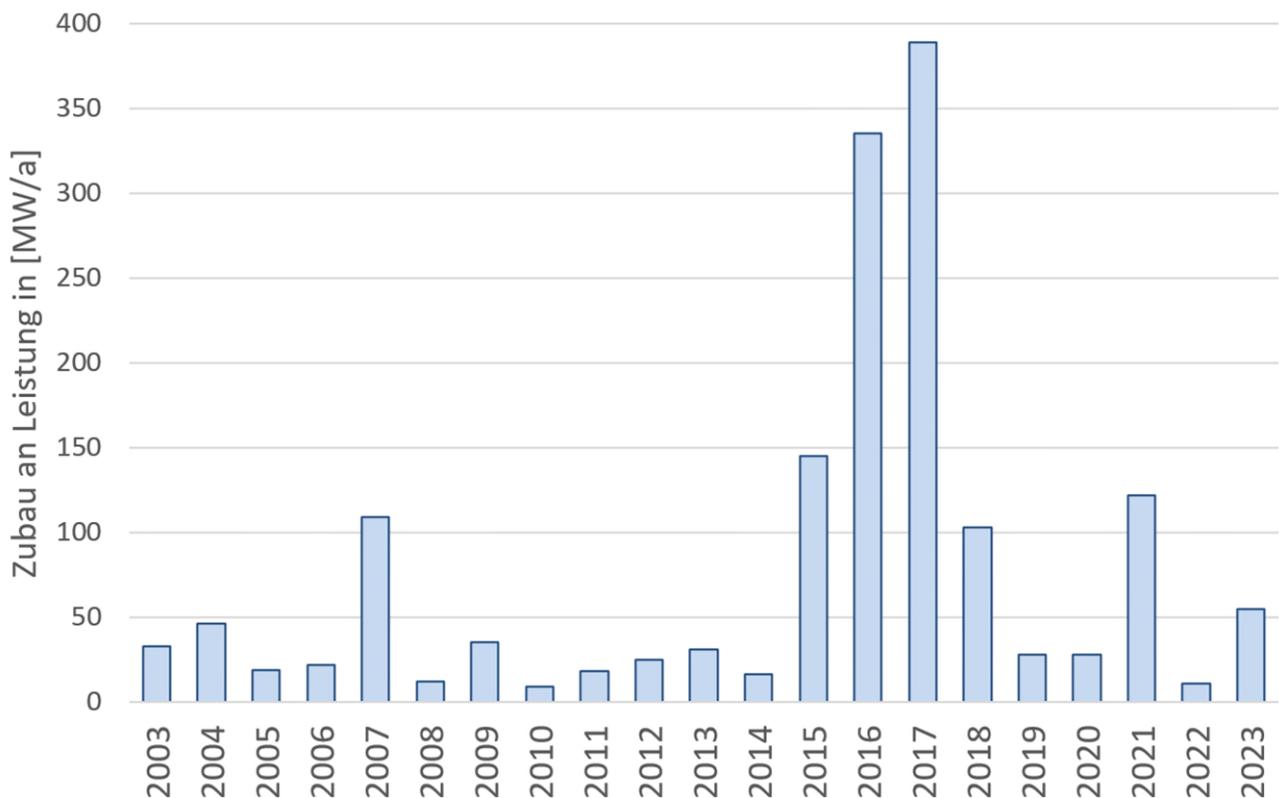


Abb. 21: Jährlicher Zubau an Windenergie-Leistung in Baden-Württemberg [MW]. Quelle: UM BW 2024c

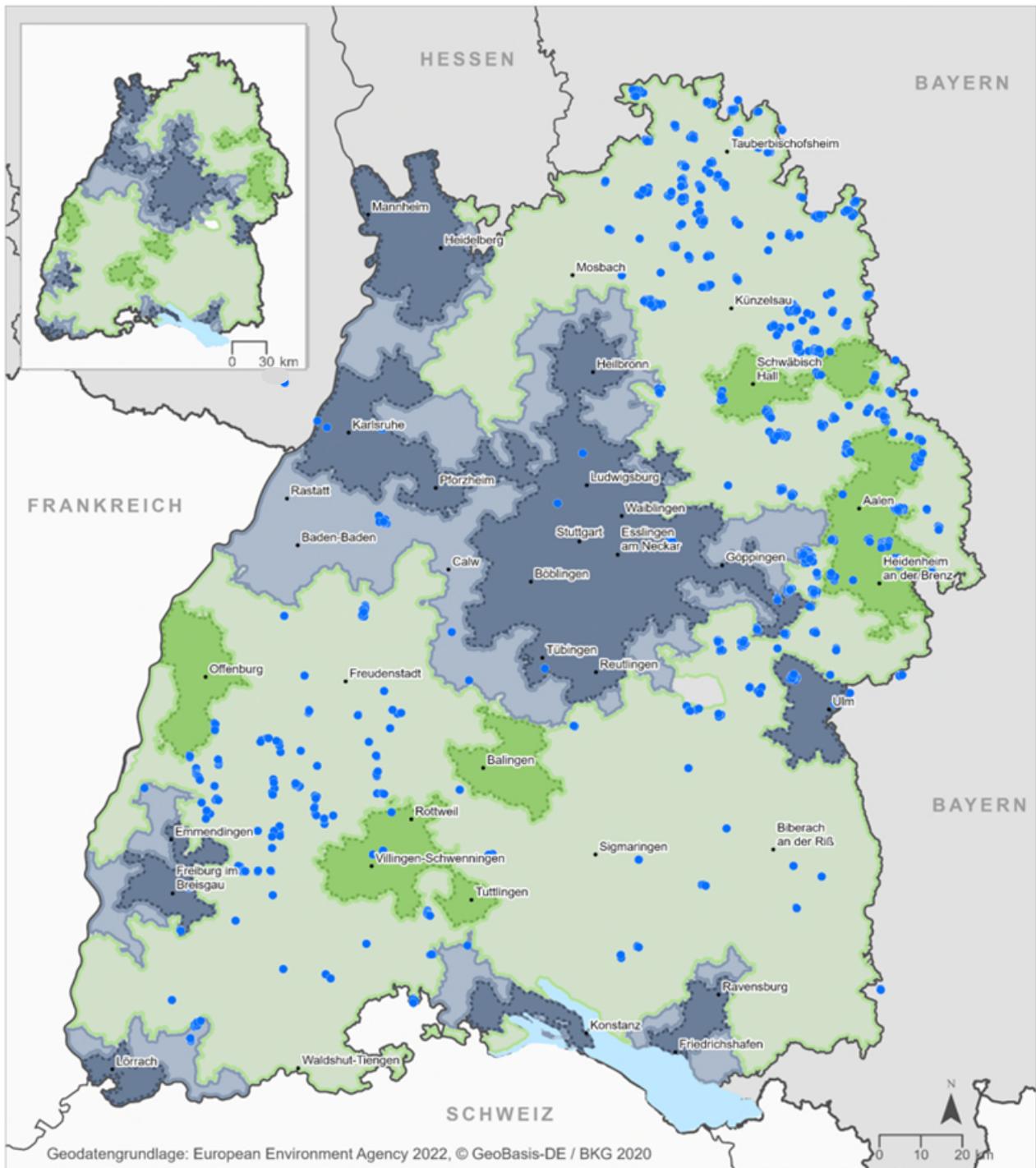
Es ist erklärter Wille der Landes- als auch der Bundesregierung, die Windenergie auszubauen (onshore und offshore). Dieser Trend wird durch den Krieg in der Ukraine und die bisherige Abhängigkeit vom russischen Erdgas für die Stromerzeugung noch verstärkt. Als südliches Flächenland mit Mittelgebirgscharakter, aber auch vielen Landschaftsschutzgebieten und Naturreservaten, bietet Baden-Württemberg für die Windenergie teils schwierige Rahmenbedingungen. Der Ausbau der Wind- und Solarenergie soll aber deutlich schneller vorstättengehen, weshalb auf Bundes- und Landesebene gesetzliche Regelungen den Ausbau beschleunigen sollen (siehe Kapitel 1.5). Die Windenergieanlagen in Baden-Württemberg mit Stand 2022 sind in der Karte in Abb. 22 dargestellt.

Die Verteilung der 2022 in Baden-Württemberg vorhandenen Windenergieanlagen zeigt ebenfalls Abb. 22. Sie ist auch in Tab. 8 dargestellt.

Tab. 8: Windenergieanlagen in den zwölf Regionen Baden-Württembergs aufgeteilt auf die Raumkategorien gemäß LEP 2002 (Raumkategorien: I: nicht kategorisiert, II: Ländlicher Raum im engeren Sinne, III: Randzonen um die Verdichtungsräume; IV: Verdichtungsgebiete im Ländlichen Raum, V: Verdichtungsräume); Quelle: MStR 2023 und eigene Analyse.

	II	III	IV	V	Gesamt
Bodensee-Oberschwaben	12				12
Donau-Iller	37			15	52
Heilbronn-Franken	271	1	11		283
Hochrhein-Bodensee	6	9			15
Mittlerer Oberrhein				3	3
Neckar-Alb	10			1	11
Nordschwarzwald	24	13			37
Ostwürttemberg	69		63		132
Rhein-Neckar	38				38
Schwarzwald-Baar-Heuberg	46		3		49
Stuttgart	37	3		16	56
Südlicher Oberrhein	59	1	4	6	70
Gesamt	609	27	81	41	758

Windkraftanlagen in Baden-Württemberg befinden sich vorwiegend im Nordosten des Landes. Hier sind fast 50% des erzeugten Windstroms in Baden-Württemberg verortet und ebenfalls fast 50% der installierten Windleistung. An erster Stelle liegt der Kreis Schwäbisch Hall. Dort ist eine Leistung von 307 MW installiert und es wurden 571 GWh Strom erzeugt. Im Main-Tauber-Kreis ist dies eine Leistung von 274 MW und 455 GWh Stromerzeugung, im Ostalbkreis 242 MW und 447 GWh.



Windenergieanlagen nach Raumkategorien
Stand 2022

● Windenergieanlagen

Raumkategorien LEP 2002

- Ländlicher Raum im engeren Sinne
- Verdichtungsgebiete im Ländlichen Raum
- Randzonen um die Verdichtungsgebiete
- Verdichtungsgebiete
- Gemeindefreies Gebiet

Datengrundlage: Marktstammdatenregister 2023



Abb. 22: Windenergieanlagen in Baden-Württemberg 2022 - räumliche Verteilung der Anlagenstandorte mit Raumkategorien gemäß LEP 2002 (Karte: IER, Daten: Marktstammdatenregister 2023)

Außerhalb des Nordostens sind es vor allem der mittlere Schwarzwald und der Ortenaukreis, in denen hohe Anlagenzahlen und hohe Stromerträge zu verzeichnen sind.

Danach wird deutlich, dass die meisten Anlagen in den Regionen in der Raumkategorie „Ländlicher Raum“ (Kategorien II und III) verortet sind. Eine Ausnahme stellt hier die Region Mittlerer Oberrhein dar, in der alle dort existierenden drei Anlagen der Raumkategorie „Verdichtungsraum“ zugeordnet sind.

Raumrelevante Eigenschaften

Die Bundesregierung hat im „Wind an Land Gesetz“ bis 2032 ein Flächenziel von mindestens 1,8% (bis 2027 1,4%) für die Windenergie festgelegt. Das Land Baden-Württemberg hat die ursprünglich landesgesetzlich verankerten Flächenziele von 2% für Windenergie und PV-Freiflächenanlagen im KLimaG Baden-Württemberg entsprechend konkretisiert, so dass auf 1,8% der Landesfläche für Windenergieanlagen und 0,2% für PV-Freiflächenanlagen in den Regionalplänen Gebiete für die jeweilige Nutzung festgelegt werden sollen.

Die Umsetzung der Flächenziele ist jedoch durch große Standort-Kontroversen geprägt. Für die Windenergie wurde z.B. mehr Flächen im Staatswald zugesagt. Im neuen Landesplanungsgesetz-LPIG wird zudem gefordert, die in den jeweiligen Regionalplänen festgelegten Regionalen Grünzüge für Windenergie- und Freiflächenphotovoltaikanlagen zu öffnen. Beide Regelungen erfahren teils deutliche Widerstände in der Bürgerschaft.

Die Windenergie kann eine Störwirkung gegenüber der Natur, bes. gegenüber Tieren (Roter Milan, Fledermäuse, Singvögel etc.), entwickeln. Flächen wie Nationalparks, Naturschutzgebiete und Kernzonen von Biosphärengebieten gelten für Windenergieanlagen daher als Tabubereiche.

Grundsätzlich bietet die Windenergie aber eine relativ hohe Energieleistungsdichte pro Flächeneinheit. Diese ist nach (UNCCD United Nations Convention to Combat Desertification 2017) im Verhältnis 1:10 höher als für Solarenergie (Photovoltaik). Auf die Windenergie kann also im Sinne eines möglichst hohen Anteils selbst erzeugten Stroms aus erneuerbaren Energien kaum verzichtet werden.

Fazit Windenergie-Anlagen in Baden-Württemberg

Status: Windenergie ist ein Schwergewicht unter den erneuerbaren Energien, auf das im Rahmen der Energiewende nicht verzichtet werden kann. Der Beitrag der Windenergie zur Stromversorgung in Baden-Württemberg ist mit 3,77 TWh (2022: 3,02 TWh) und einem Anteil von 5,7% des Bruttostromverbrauches aber noch relativ gering. Er war auch in seiner Ausbaudynamik in den letzten Jahren sehr schwankend (Zuwachs 2023: 63 MW, 2022: 13 MW). Windenergieanlagen stehen überwiegend im Ländlichen Raum (Raumkategorien). Die Potenziale sind bedeutend, aber noch weitgehend ungenutzt. Mangelnde Wirtschaftlichkeit, lange Genehmigungszeiträume und Konflikte mit dem Natur- und Denkmalschutz verhinderten bislang einen zügigeren Ausbau.

Trend: Die Windenergie in Baden-Württemberg soll künftig deutlich stärker ausgebaut werden. Es ist vielfach erklärter politischer Wille, diese Energietechnologie auch in relativ windschwachen Regionen und Ländern wie Baden-Württemberg stark auszubauen. Hierzu wurden u.a. konkrete Flächenziele (1,8% für Windenergie) für jede der zwölf Regionen in Baden-Württemberg vereinbart. Hierfür werden aktuell Vorranggebiete identifiziert und planerisch gesichert. Zunehmend sollen auch alternative Standorte (z.B. in Waldgebieten) in Anspruch genommen werden.

3.2.3 Bioenergie

Technisch-energiewirtschaftlicher Stand

Bioenergie ist der „Alleskönner“ unter den erneuerbaren Energien – bundesweit und auch in Baden-Württemberg. Bei der Wärmeerzeugung und der Erzeugung von Kraftstoffen ist sie die wichtigste Energieform, bei der Stromerzeugung liegt sie nach der Windenergie und PV-Solarenergie an dritter Stelle. Die Bioenergie hat erhebliche Beschäftigungs- und Einkommenseffekte für die Land- und Forstwirtschaft und ist wichtiges Standbein einer regionalen und lokalen Wertschöpfung.

Die Bioenergie ist mit dem Rohstoff Biomasse eine sehr verlässlich einsetzbare Energieform und wird daher auch als komplementäre bzw. flexible Energietechnologie im Vergleich zu Solar- und Windenergie betrachtet. Eine Einschränkung ergibt sich aus den begrenzten Rohstoffpotenzialen, die aus verschiedenen Gründen – u.a. begrenzte natürliche Ressourcen und eine starke Konkurrenz mit der Nahrungsmittelerzeugung und weiteren wichtigen Naturraum-Dienstleistungen – nur einen deutlich eingeschränkten Anteil an der Gesamt-Energieversorgung von Strom, Wärme und Kraftstoffen zulassen. In der Stromerzeugung wird die Biomasse mit einem Anteil von 60% als „gesicherte Leistung“ betrachtet (UM BW 2023c).

Die Bioenergie wird in Fachkreisen und auch in der Öffentlichkeit sehr kontrovers diskutiert. Beispielhafte Stichworte sind hier die sog. „Teller-Tank-Diskussion“, „Vermaisung“ oder auch „Feinstaubemissionen“. Dieser Stimmungslage ist der weitere Ausbau der Bioenergie anzupassen.

Die Bioenergie-Technologien lassen sich in drei große Bereiche unterteilen:

1. Technologien zur Nutzung von feuchter Biomasse aus ländlichen Reststoffen und Energiepflanzen. Hier geht es vor allem um die Biogastechnologie, die gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung und die Biogasaufbereitung zu Biomethan, das sich auch in öffentlichen Gasnetzen oder als Kraftstoff im Verkehrsbereich nutzen lässt.
2. Technologien zur Nutzung trockener Biomasse - vorwiegend naturbelassenes Holz aus der Forst- und Landwirtschaft und aus der Landschaftspflege. Hier geht es vor allem um öffentliche Heiz- oder Heizkraftwerke in der kommunalen und gewerblichen Energiewirtschaft mit Holzhackschnitzeln, und auch Holzheizungen (Pellets, Scheitholz) für die Wärmebereitstellung (private Haushalte und Gewerbe), und
3. Technologien zur Nutzung von (feuchten) Bio-Abfällen aus den Abfallsammlungen und ggf. Abwasserbehandlungsanlagen. Hier sind Kompost- und auch Biogasanlagen weit verbreitet

und meist in kommunaler Hand (Gemeinden oder Kreise). Diese Anlagen unterliegen dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) und können nicht nach dem Erneuerbaren Energien Gesetz (EEG) eine Vergütung in Anspruch nehmen.

Stand des Ausbaus

Biogas

Landwirtschaftliche Biogasanlagen bilden den Großteil der Bioenergie in Baden-Württemberg. In Baden-Württemberg gab es Ende 2021 (letzter Stand) insgesamt 1.003 landwirtschaftliche Biogasanlagen (LEL 2022) mit einer Gesamtleistung aller Anlagen in Baden-Württemberg von 341,38 MW und einer durchschnittlichen Leistung der Anlagen von 340 kW. Abb. 23 zeigt die Entwicklung der Anlagenanzahl und installierten elektrischen Leistung der Biogasanlagen (BGA) in Baden-Württemberg seit 1999.

Es wird deutlich, dass die Anzahl der Anlagen besonders in den Jahren zwischen 2005 und 2012 angewachsen ist. Dies hängt auch mit den veränderten Regelungen für Biogasanlagen in den jeweils novellierten Fassungen von 2004 und 2009 des Erneuerbare Energien Gesetzes (EEG) zusammen. Im EEG 2012 wurden restriktivere Regelungen – insbesondere eine stärkere Orientierung an Marktbedingungen – für Biogasanlagen gefordert. Dies machte sich in einer Verlangsamung der Ausbaudynamik dieser Anlagen bemerkbar. Seit 2014 ist der Ausbau deutlich zurück gegangen und liegt derzeit bei wenigen neuen Anlagen (< 5) pro Jahr.

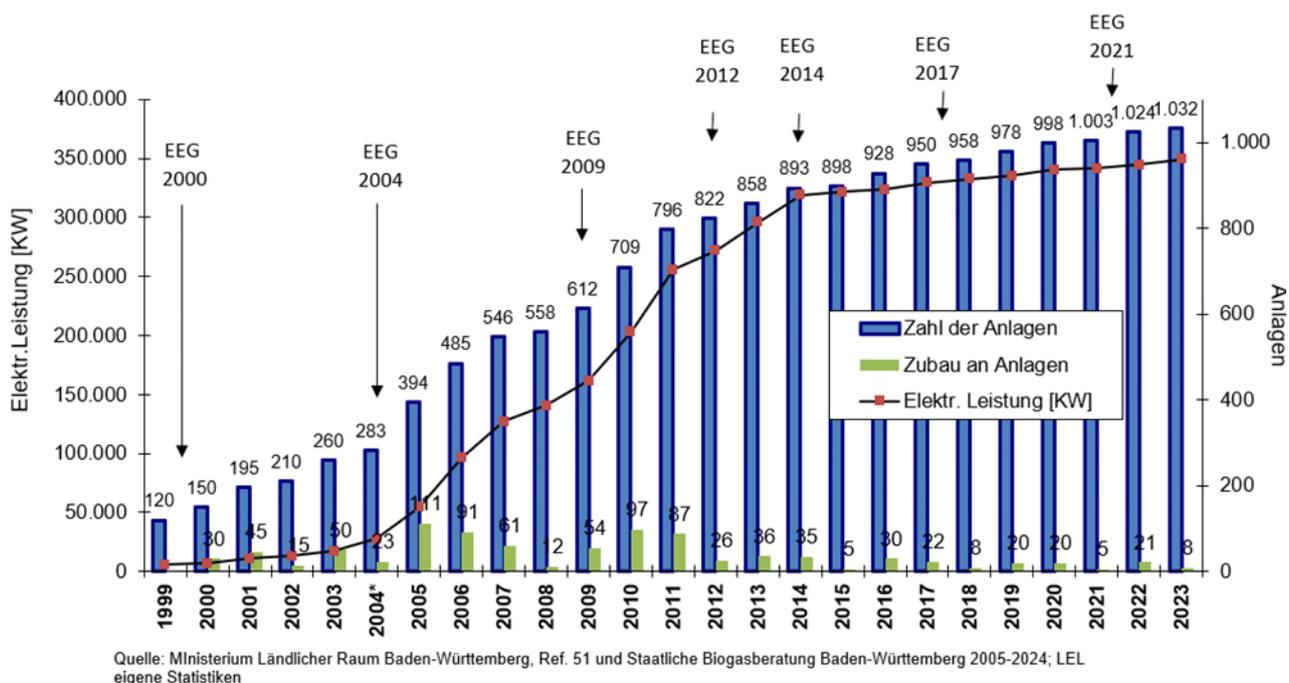


Abb. 23: Biogasanlagen in Baden-Württemberg; Anlagenanzahl, Zubau und installierte elektrische Leistung.
Quelle: LEL Baden-Württemberg und eigene Analyse

Biogasanlagen können in verschiedene Segmente eingeteilt werden, die jeweils unterschiedliche Entwicklungen genommen haben und nehmen werden.

- I. Biogas-Kleinanlagen, die größtenteils landwirtschaftliche Reststoffe wie Gülle nutzen, umfassen das Anlagensegment im Leistungsbereich von 75 – 150 kW. Hier gibt es in Baden-Württemberg etwa 311 Anlagen (Stand 2019). Dieses Anlagensegment erfährt weiter ein hohes Interesse, da es ein Entsorgungsproblem für Wirtschaftsdünger (Gülle und Mist) in der Landwirtschaft lösen hilft. Kleine Anlagen sind allerdings auch mit erhöhten Kosten verbunden, was die Wirtschaftlichkeit erschwert.
- II. Im mittleren Anlagensegment der Leistungsklasse von 150 – 500 kW gibt es in Baden-Württemberg insgesamt 478 Anlagen (Quelle: LEL). Sie nutzen zum überwiegenden Anteil Energiepflanzen, teils aber auch gemischt mit Wirtschaftsdüngern.
- III. Das Segment von größeren Anlagen über 500 kW nutzt ebenfalls überwiegend Energiepflanzen. Es umfasst 189 Anlagen.

Baden-Württemberg hat eine im Vergleich mit anderen Bundesländern eher kleinräumige Landwirtschaftsstruktur. Daher besteht der Anlagenpark hier auch überwiegend aus kleineren Leistungsklassen unter 1 MW.

Der massebezogene Substrateinsatz für Biogasanlagen in Deutschland sieht gemäß der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), dem Projektträger des Bundes-Landwirtschaftsministeriums, 2022 folgendermaßen aus:

- | | |
|---|-----|
| • Nachwachsende Rohstoffe | 45% |
| • Wirtschaftsdünger (Gülle, Mist etc.) | 49% |
| • Reststoffe aus Industrie, Gewerbe, Landwirtschaft | 3% |
| • Kommunale Bioabfälle | 3% |

Im Anbaujahr 2022 waren deutschlandweit beim Maisanbau 36% (0,89 Mio. ha) der Biogaserzeugung zuzuschreiben, 64% des Maisanbaus (ges. 1,59 Mio. ha) sind der Futter- bzw. Tier- und Fleischproduktion zuzuordnen (FNR, 2023).

Für Baden-Württemberg liegen keine konkreten Zahlen vor. Hier dürfte der Anteil an Wirtschaftsdünger aber noch etwas größer sein als in anderen Teilen Deutschlands (v.a. in Niedersachsen und anderen großen Flächenländern).

In den landwirtschaftlichen Biogasanlagen wird die Nutzung von Energiepflanzen (z.B. Mais) für die Biogasproduktion kritisch gesehen, sie wird zunehmend abgelöst durch eine Mischung aus verschiedenen Energiepflanzen, u.a. die durchwachsene Silphie oder Wildblumenmischungen, und der Nutzung von Rest- und Abfallstoffen, die überwiegend aus der Landwirtschaft und Nahrungsmittelindustrie kommen.

Die Stromerzeugung aus Biogas in Baden-Württemberg ist in Abb. 24 dargestellt.

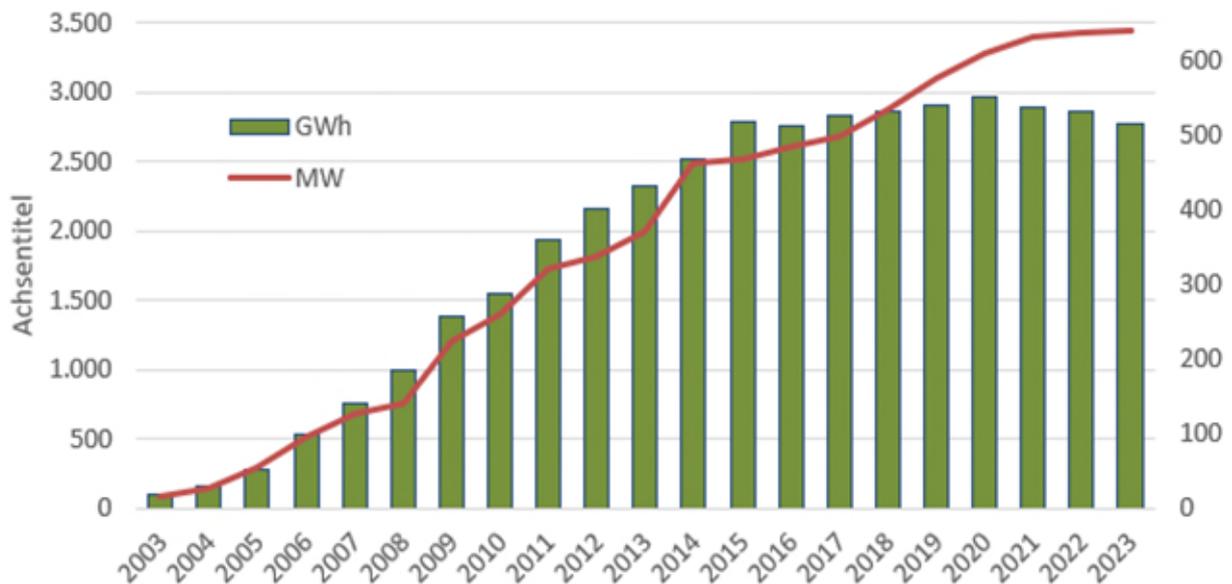


Abb. 24: Stromerzeugung aus Biogas in Baden-Württemberg. Installierte Leistung (MW) als rote Linie und produzierte Energie (GWh) als grüne Balken; Quelle: UM BW 2024c

Es ist ersichtlich, dass die Stromerzeugung aus Biogas zwischen 2004 und 2015 eine starke Zunahme erfahren hat. Dies korrespondiert mit der gestiegenen Anlagenzahl und installierten Leistung. Seit 2015 stagniert der Bestand an Anlagen in Bezug auf den erzeugten Strom, wohingegen die installierte Leistung weiter zugenommen hat (Abb. 23). Dies liegt an der Ausprägung der Anlagen nach dem EEG 2012, in dem eine zunehmende Orientierung der Anlagen auf den Strommarkt durch Direktvermarktung und Flexibilisierung verlangt wird. Dies äußert sich in einer größeren installierten Leistung (Überbauung) bei gleichzeitig geringeren Volllaststunden. Die gesamte erzeugte Leistung bleibt demnach gleich, die Leistungsbereitstellung kann sich aber den Lastsituationen im Netz anpassen (Flexibilisierung), was mit verringerten Betriebs- und Volllaststunden einhergeht. Die Wärmeauskopplung aus Biogasanlagen und ihr Anschluss an ein (kommunales oder gewerbliches) Wärmenetz sind weiter sehr schwach ausgeprägt, ihre Lage im ländlichen Raum macht eine solche Anbindung häufig nur sehr schwierig umsetzbar.

Die Stromerzeugung aus fester Biomasse (überwiegend Holz) in Baden-Württemberg ist in Abb. 25 dargestellt.



Abb. 25: Stromerzeugung aus fester Biomasse in Baden-Württemberg. Quelle: UM BW 2024c

Es zeigt sich, dass die Stromerzeugung aus fester Biomasse (Holz, Stroh etc.) vorwiegend in den frühen 2000er Jahren eine Steigerung erfahren hat, die meisten Heiz- oder Heizkraftwerke mit Biomasse (Holzhackschnitzel) wurden vor 2005 errichtet. Seither stagniert die installierte Leistung bei ca. 190 MW und die erzeugte Arbeit bei etwa 1.100 GWh, in den letzten Jahren eher noch darunter. Anders als Biogasanlagen werden Heiz- oder Heizkraftwerke nicht oder kaum „flexibel“ gefahren. Daher laufen installierte Leistung und erzeugte Arbeit parallel. Viele Anlagen sind in kommunale Energiesysteme eingebunden, werden wärmegeführt – also entlang des Wärmebedarfs und damit auch vorwiegend im Winter – gefahren und sind an ein Wärmenetz angeschlossen.

Die Wärmeerzeugung aus fester Biomasse in Einzelfeuerstätten, Zentralheizungssystemen und Heiz(kraft)werken in Baden-Württemberg ist in Abb. 26 dargestellt.

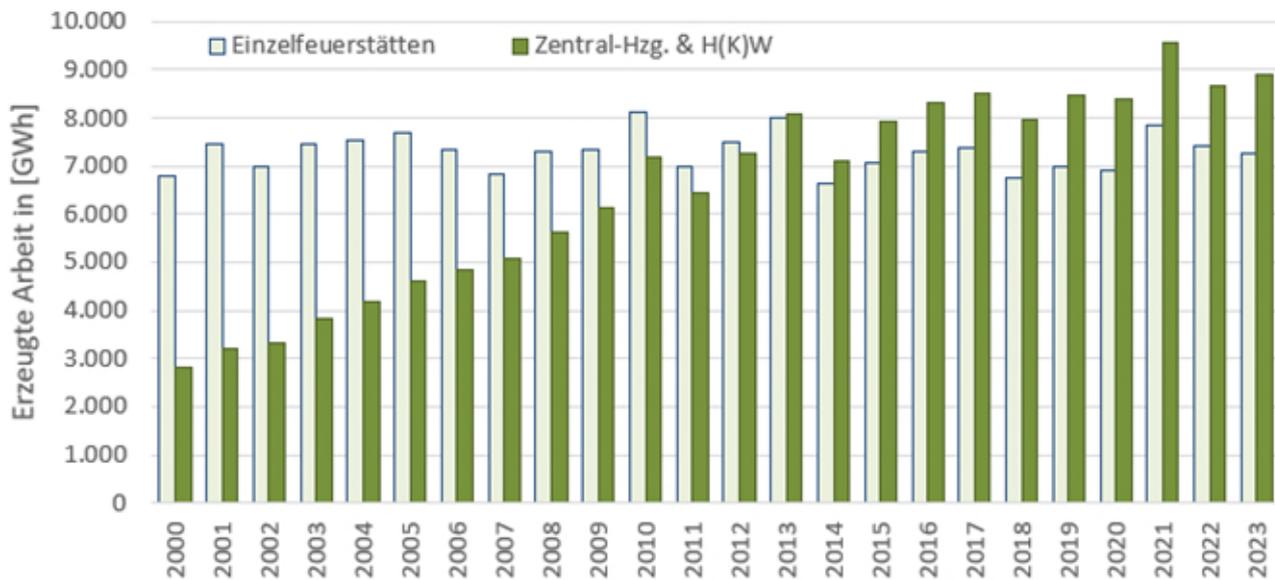


Abb. 26: Wärmeerzeugung aus fester Biomasse (Einzelfeuerstätten und Zentral-Heizungen und Heiz(kraft)werke (HKW) in Baden-Württemberg. Quelle: UM BW 2024c

Die Wärmeerzeugung aus Biomasse hat sehr früh eingesetzt bzw. ist seit langem etabliert. Aus der Statistik ist ersichtlich, dass schon vor dem Jahr 2000 eine große Anzahl an Einzelfeuerstätten (Kaminöfen etc.) installiert war. Zentralheizungen z.B. mit Pellets und auch Heizkraftwerke haben für die Wärmeerzeugung seit 2000 kontinuierlich zugenommen und werden auch heute noch weiter genutzt. Der Zubau hat allerdings seit etwa 2017 stark nachgelassen.

Im Vergleich zum Gesamt-Endenergieverbrauch zur Wärmeerzeugung in Baden-Württemberg von 132 TWh (2022) macht die Biomasse mit einer Erzeugung von 19,1 TWh (ohne biogenem Anteil des Abfalls) mit 14,5% nur einen geringen Anteil aus, die Erneuerbaren Energien mit insgesamt 23,8 TWh und einem Anteil von 18% am Endenergieverbrauch für Wärme liegen geringfügig höher, da auch die Umweltwärme als einzige weitere erneuerbare Energiequelle noch einen geringen Anteil ausmacht und der Beitrag der Geothermie verschwindend gering ist.

Die Wärmeerzeugung aus Biogas und Deponie- und Klärgas in Baden-Württemberg ist in Abb. 27 dargestellt.

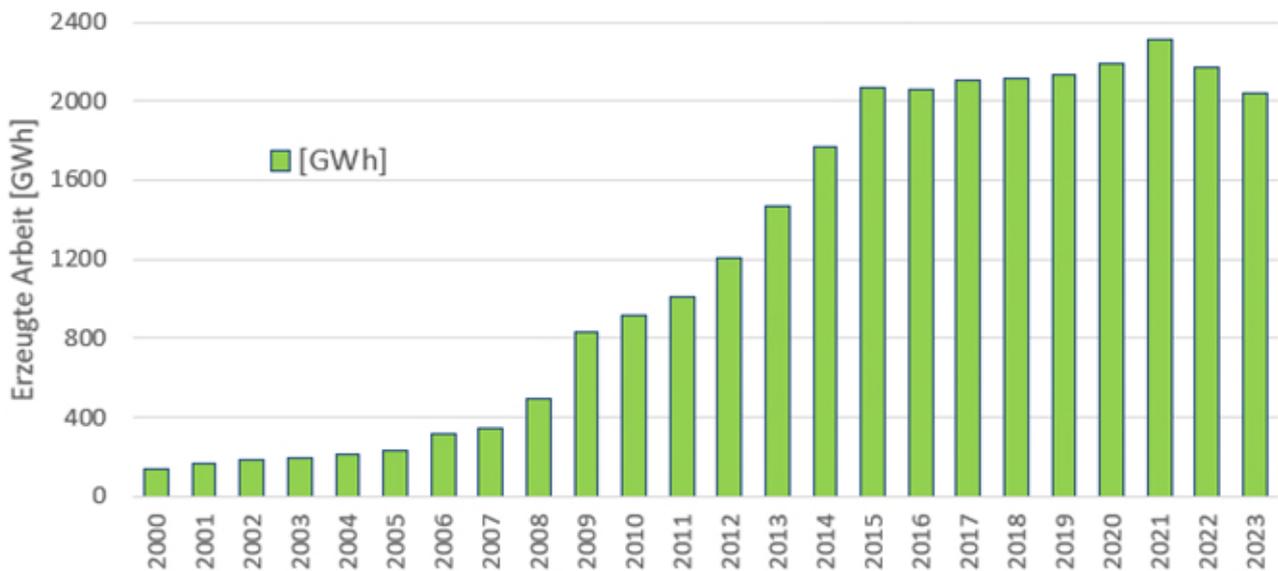


Abb. 27: Wärmeerzeugung aus gasförmiger Biomasse (Biogas, Deponie- und Klärgas) in Baden-Württemberg. Quelle: UM BW 2024c

Die Darstellung verdeutlicht, dass in diesem Segment eine ähnliche Dynamik besteht wie in den anderen Bioenergiebereichen. Nach einem starken Anstieg der Wärmeerzeugung in den Jahren zwischen 2008 und 2015 stagniert seither der weitere Ausbau. Dies hängt u.a. mit einer weitgehenden Sättigung und Ausnutzung der technischen und wirtschaftlichen Potenziale in diesem Bereich zusammen. Auch wenn die Wärmeauskopplung aus Biogasanlagen gering ausgeprägt ist, ist eine Ausweitung mit hohen Investitionen (Wärmenetzausbau und -anschluss) verbunden und daher nicht ohne größere Aufwendungen zu erreichen.

Die Wärmenutzung aus allen Bioenergiebereichen (Holz, Biogas, Deponie- und Klärgas) liegt aktuell bei ca. 18,4 TWh pro Jahr. Angesichts eines Endenergie-Wärmebedarfs in Baden-Württemberg von insgesamt 132 TWh in 2022 (Quelle: UM BW) sind dies knapp 14% des Gesamtbedarfs. Im Wärmesektor besteht also noch großer Nachholbedarf für erneuerbare Energien, wenn die Klimaziele für Baden-Württemberg erreicht werden sollen.

Für die Bioenergie wird sowohl im land- als auch im forstwirtschaftlichen Bereich die Frage nach Nachhaltigkeit vermehrt gestellt. Im Biogasbereich steht die Substratfrage im Vordergrund. Die Nutzung von Energiepflanzen (wie z.B. Mais) steht sehr in der Kritik. Eine weitere Nutzung wird politisch nicht weiter unterstützt. So wurde mit dem EEG 2021 ein sogenannter „Maisdeckel“ eingeführt, nach dem neue Biogasanlagen nicht mehr als 40% (Masse) Mais als Substrat einsetzen dürfen, um noch eine Förderung zu bekommen (§39 (1) EEG 2021). Eine verschärfte Forderung nach einem reduzierten Energiepflanzen- bzw. Maisanteil ist mit der Teilnahme von Biogasanlagen an

Ausschreibungen verbunden, die für eine Förderung in einem zweiten Vergütungszeitraum im EEG verbunden ist. In den Jahren 2024 und 2025 darf der Anteil von Mais und Getreidekorn 35%, im Zeitraum 2026-2028 maximal 30% betragen.

Auch stellt sich aktuell für viele im EEG geförderte Bioenergie-Anlagen die Frage, wie ein Betrieb nach Auslaufen der 20-jährigen ersten Förderperiode zukünftig weiterlaufen kann (die sogenannte „Post-EEG Frage“). Da viele Anlagen in den Jahren 2002-2009 gebaut wurden, läuft die Förderperiode im ersten EEG in den nächsten Jahren für viele Anlagen aus. Ein Weiterbetrieb, der technisch über mehr als 20 Jahre durchaus möglich ist, über die Teilnahme an einer Ausschreibung oder einen Umstieg auf die Aufbereitung von Biogas zu Biomethan ist sehr aufwendig und unter derzeitigen Rahmenbedingungen (günstiges Erdgas) wenig wirtschaftlich. Dies wird nach allgemeiner Auffassung (z.B. DBFZ) bis 2030 zu einer deutlichen Reduktion der Anlagenzahl (und Leistung) führen. Diese Entwicklung und Reduktion der Anlagenzahl ist auch für Baden-Württemberg anzunehmen.

Auch die Holzenergie muss sich der Bewältigung weiterer Unsicherheiten und Perspektiven widmen. Umweltbundesamt und Bundesregierung schätzen z.B. die vermehrte Holzernte im Wald u.a. auch angesichts von Klimawandelfolgen im Wald etc. als bedenklich ein²⁴. Luftreinhaltevorschriften besonders in Städten führen häufig bereits zu Verboten für Holzpellet-Heizungen. Insofern ist davon auszugehen, dass auch in diesem Bereich in den kommenden Jahren eine Neuorientierung stattfindet.

Privilegierung der Biomassenutzung im Außenbereich

Nach dem Baugesetzbuch (§ 35 Abs. 1 Nr. 6) sind Biomasseanlagen, wie z.B. Biogasanlagen, privilegiert und können im Außenbereich errichtet werden. Im November 2023 (17.11.) hat der Bundestag im „Gesetz zur kommunalen Wärmeplanung“ (Wärmeplanungsgesetz) u.a. neue Privilegierungstatbestände für die Biomassenutzung im Außenbereich eingeführt. Damit soll die energetische Nutzung von Biomasse im Außenbereich planungsrechtlich erleichtert werden, nicht zuletzt vor dem Hintergrund der energiepolitischen Herausforderungen, ausgelöst durch den Ukrainekrieg. Hierzu wurde im § 246d BauGB neue Privilegierungstatbestände eingeführt, die über den § 35 Absatz 1 BauGB Anwendung finden. Zum einen werden damit Vorhaben zur energetischen Nutzung von Biomasse im Rahmen von bestehenden, noch vor 2013 privilegierten gewerblichen Tierhaltungsbetrieben privilegiert und der Kreis möglicher Herkunftsbetriebe auf bestehende Betriebe aller Art in einem Umkreis von 50 Kilometern erweitert. Zum anderen sind zukünftig Vorhaben privilegiert, „die der Aufbereitung von Biogas zu Biomethan, einschließlich des Anschlusses an das öffentliche Versorgungsnetz dienen“. Dazu müssen diese Vorhaben aber in einem „räumlich-funktionalen Zusammenhang“ mit einer zulässigerweise nach § 35 Abs. 1 Nr. 6 BauGB errichteten Biomassenlage stehen und keine größere Grundfläche in Anspruch nehmen als

²⁴ Siehe z.B. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/emissionen-von-luftschadstoffen/quellen-der-luftschadstoffe/holzheizungen-schlecht-fuer-gesundheit-klima#undefined>

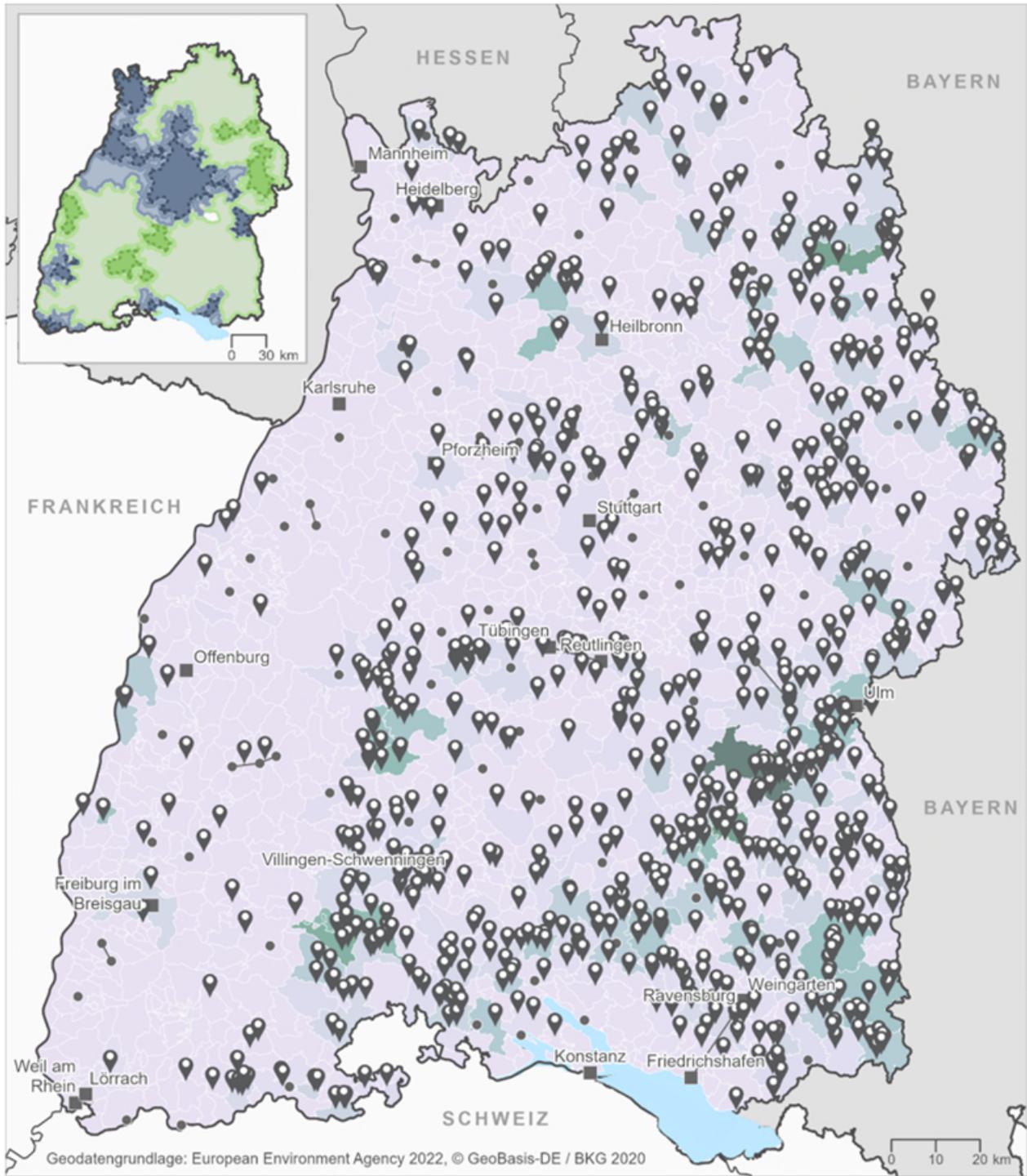
diese selbst. Darüber hinaus sind Blockheizkraftwerke (BHKW) privilegiert, „die der Erzeugung von Strom einschließlich dessen Einspeisung in das öffentliche Netz sowie der Erzeugung von Wärme zur Einspeisung in ein bestehendes lokales Wärmenetz oder zur Wärmeversorgung von zulässigerweise errichteten Gebäuden in räumlicher Nähe zum Vorhaben dienen“. BHKWs müssen auch in einem räumlichen-funktionalem Zusammenhang mit der Hauptanlage stehen. Der Gesetzgeber stellt aber auch fest, dass der Begriff der räumlichen Nähe der mit Wärme versorgten Gebäude „sich nicht abstrakt festlegen“ lässt, sondern „im Interesse des Außenbereichsschutz enger verstanden werden kann als das Merkmal der ‘nahegelegenen Betriebe‘“. Denn für die Wärmeversorgung sind bauliche Maßnahmen, z.B. Wärmeleitungen erforderlich. Die Neuerungen dieser Tatbestände traten im Januar 2024 in Kraft und sind zunächst bis Dezember 2028 befristet (Quelle: Bundestags-Drucksache 20/9344 vom 15. Nov. 2023 (Bundestag 2023)).

Raumrelevante Eigenschaften der Bioenergie

Von den aktuell in Baden-Württemberg bestehenden 1.013 Biogasanlagen ist der Großteil im Ländlichen Raum lokalisiert. Sie können als landwirtschaftliche Biogasanlage charakterisiert werden. Eine Ausnahme bilden kommunale Abfall-Biogasanlagen, die häufig im urbanen oder suburbanen Raum angesiedelt sind.

In Abb. 28 ist die räumliche Verteilung der Biogas-Anlagen in Baden-Württemberg (2021) dargestellt.

Es wird deutlich, dass eine Anhäufung von Anlagen im süd- und nordöstlichen Landesteil von Baden-Württemberg zu verzeichnen ist. Besonders in Oberschwaben im Südosten des Landes lässt sich ein Schwerpunkt identifizieren. Dies ist eine Landschaft mit besonders viel Grünland und Viehhaltung, aus der eine große Anzahl an Biogasanlagen mit Substrat versorgt werden können. Aber auch im Rest des Landes Baden-Württemberg ist eine Reihe von Anlagen verteilt, die Schwerpunkte liegen aber eindeutig eher in den östlichen Landesteilen. Deutlich wird u.a. auch die Situation im Schwarzwald, wo sich einerseits wesentlich weniger Anlagen finden, andererseits bedeutende Potenziale für Holzenergie sind. Diese Rohstoffpotenziale im Schwarzwald werden tatsächlich eher für die Wärmebereitstellung genutzt. Daher sind im Westen des Landes hier auch keine Schwerpunkte ersichtlich.



Biogasanlagen Bestand 2022
506 Anlagen

- Mittelzentrum
- Oberzentrum

Raumkategorien LEP 2002

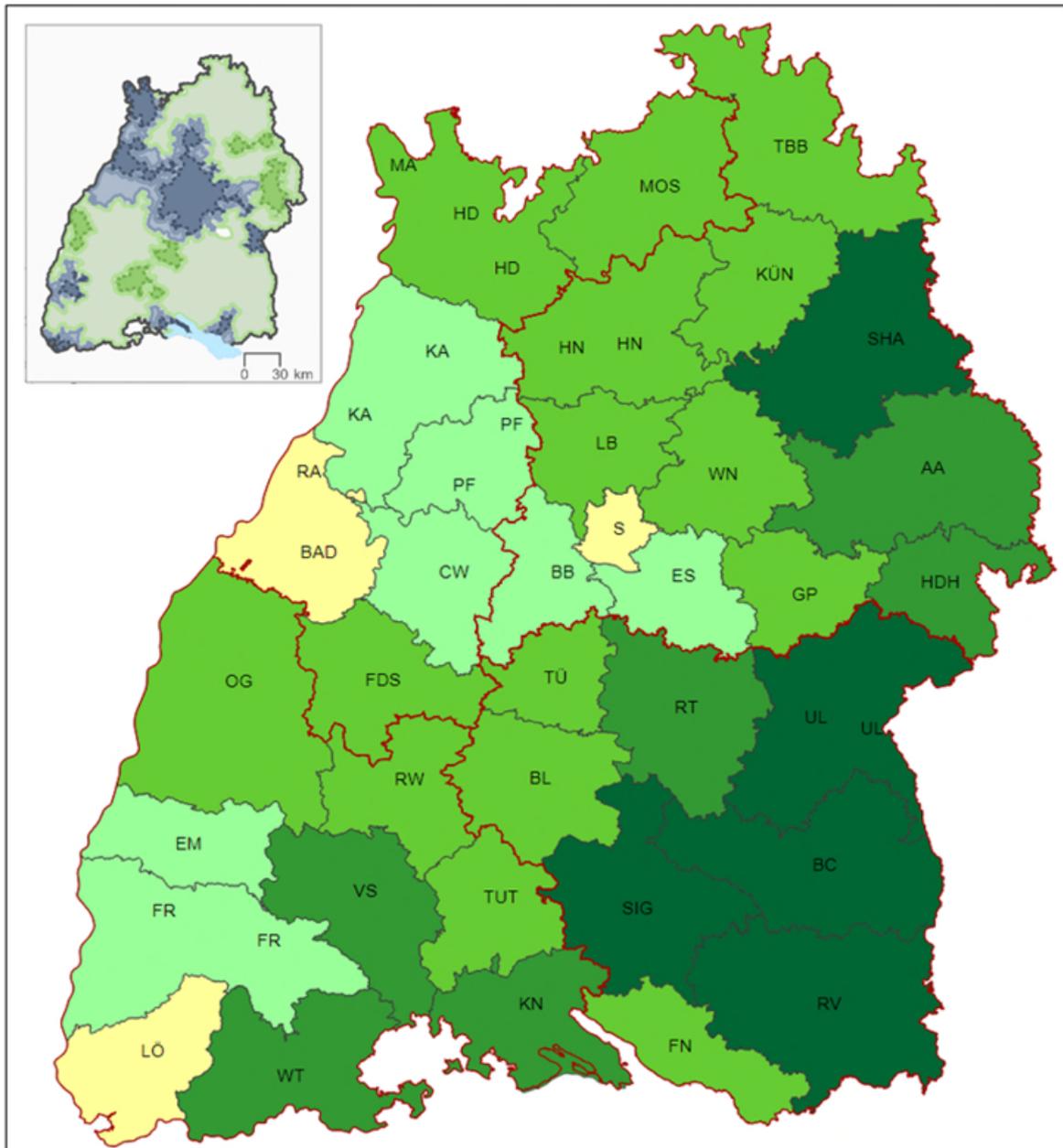
- Ländlicher Raum im engeren Sinne
- Verdichtungsbereiche im Ländlichen Raum
- Randzonen um die Verdichtungsräume
- Verdichtungsräume
- Gemeindefreies Gebiet

Datengrundlage: Marktstammdatenregister 02/2023

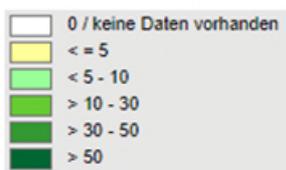


Abb. 28: Biogasanlagen in Baden-Württemberg Stand 2022; räumliche Anordnung. Quelle: Marktstammdatenregister; eigene Analyse

Die räumliche Verteilung der Biogasanlagen und Zuordnung zu Landkreisen sind in Abb. 29 dargestellt. Dies ist eine Abbildung, die die LEL Baden-Württemberg auf ihrem Webserver bzw. Online-Kartendienst zur Verfügung stellt. Hier sind auch für jeden Landkreis Detaildaten über Anlagenanzahl und installierte Leistung (elektrische Bemessungsleistung und durchschnittliche elektrische Leistung je Anlage) zu erhalten.



Biogasanlagen Bestand 2021 pro Landkreis
506 Anlagen



Datengrundlage/Quelle: LEL BW

Raumkategorien LEP 2002

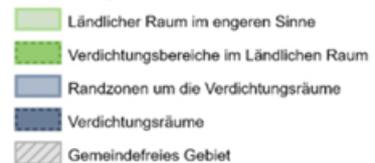


Abb. 29: Biogasanlagen (Anzahl) in den Landkreisen Baden-Württembergs (Stand 2021); (Quelle: www.lelweb.de/app/ds/lel/a3/Online_Kartendienst_extern/Karten/51148/index.html)

Auch hier wird die hohe Anlagenanzahl in Oberschwaben und besonders auch im Landkreis Schwäbisch Hall erkennbar, wo jeweils mehr als 50 Anlagen verortet sind. Sehr wenige Anlagen gibt es in den Kreisen Lörrach und Rastatt (einschließlich des Stadtkreises Baden-Baden).

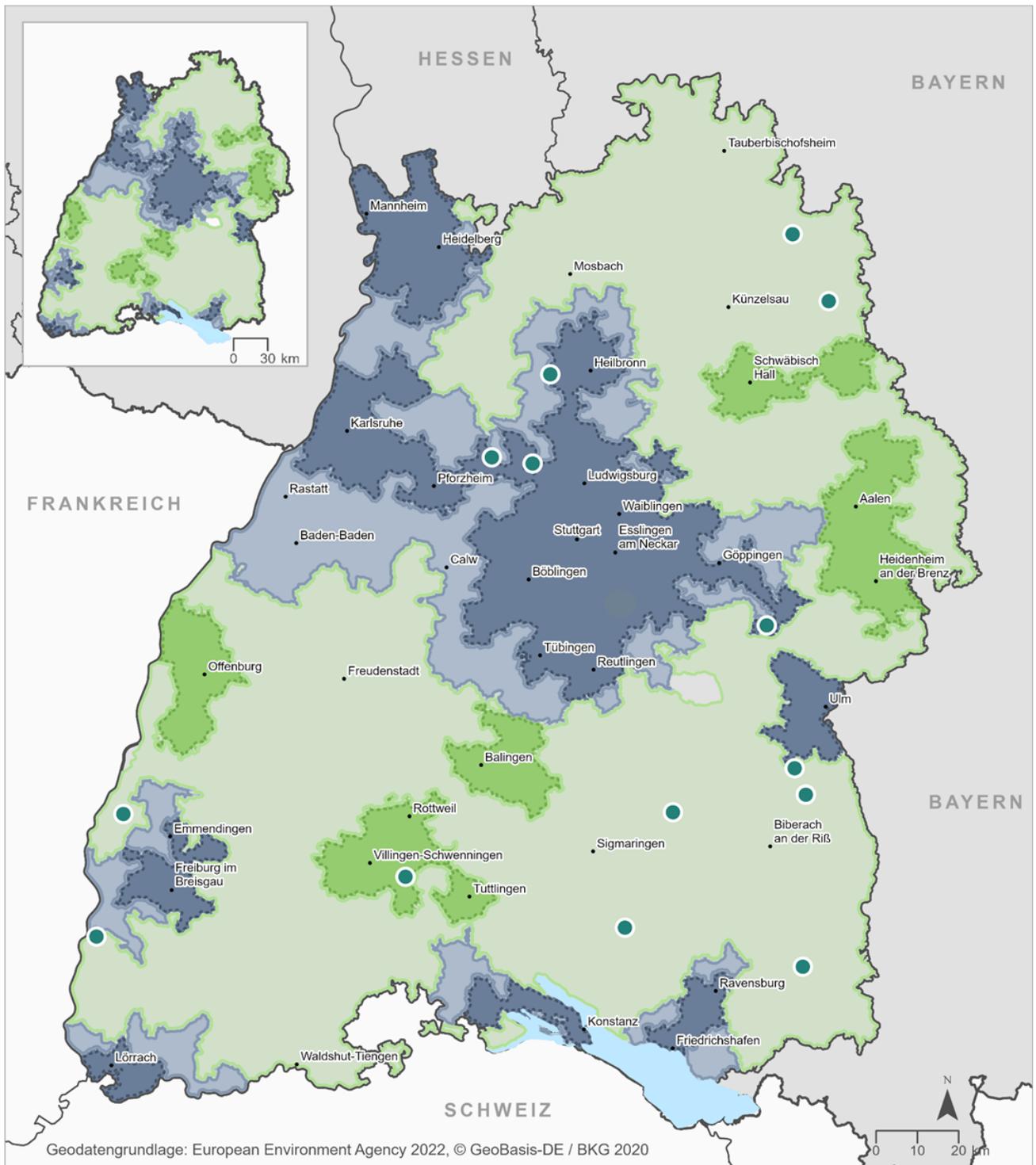
In Baden-Württemberg gibt es aktuell gemäß Marktstammdatenregister außerdem noch 13 Anlagen für die Aufbereitung von Biogas zu Biomethan und dessen Einspeisung ins Gasnetz. Der Energieatlas Baden-Württemberg weist hierzu für den Stand 2015 insgesamt 14 Anlagen aus. Im Anhang 9.2 sind Daten zu den Biogas-Aufbereitungsanlagen für Biomethan und die Einspeisung ins Erdgasnetz tabellarisch dargestellt (Datenquelle: dena, Stand: 2015).

Die räumliche Verteilung der Biogas-Aufbereitungs- und Einspeise-Anlagen ist in Abb. 30 dargestellt. Hierbei ist kein deutliches oder von der Verteilung der Biogasanlagen abweichendes räumliches Muster erkennbar. Die Anlagen sind vorwiegend im Süd- und Nordosten des Landes lokalisiert.

Anlagen zur Verarbeitung und Nutzung von Holz sind entweder als Anlagen zur reinen Wärmeerzeugung (Heizwerke oder Heizzentralen) oder als Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen für kommunale Versorgungsaufgaben konfiguriert. Auch Anlagen für gewerbliche Nutzungen, besonders in Sägereien oder Pellethersteller stehen teils walddah. Sie sind ebenfalls nach § 35 BauGB privilegiert.

Einen Überblick über alle stromerzeugenden Anlagen auf der Basis von Biomasse gibt Abb. 31.

Die große Anzahl von Biogasanlagen im Süd- und Nordosten Baden-Württembergs dominiert hier das Bild. Im Schwarzwald und Oberrheingebiet zeigen sich hier aber auch zusätzliche Anlagen, die auch der Holzenergie (KWK-Anlagen) zugeordnet werden können.



Biogasaufbereitungsanlagen

Stand 2022 – 14 Einheiten

● Biogasaufbereitungsanlagen

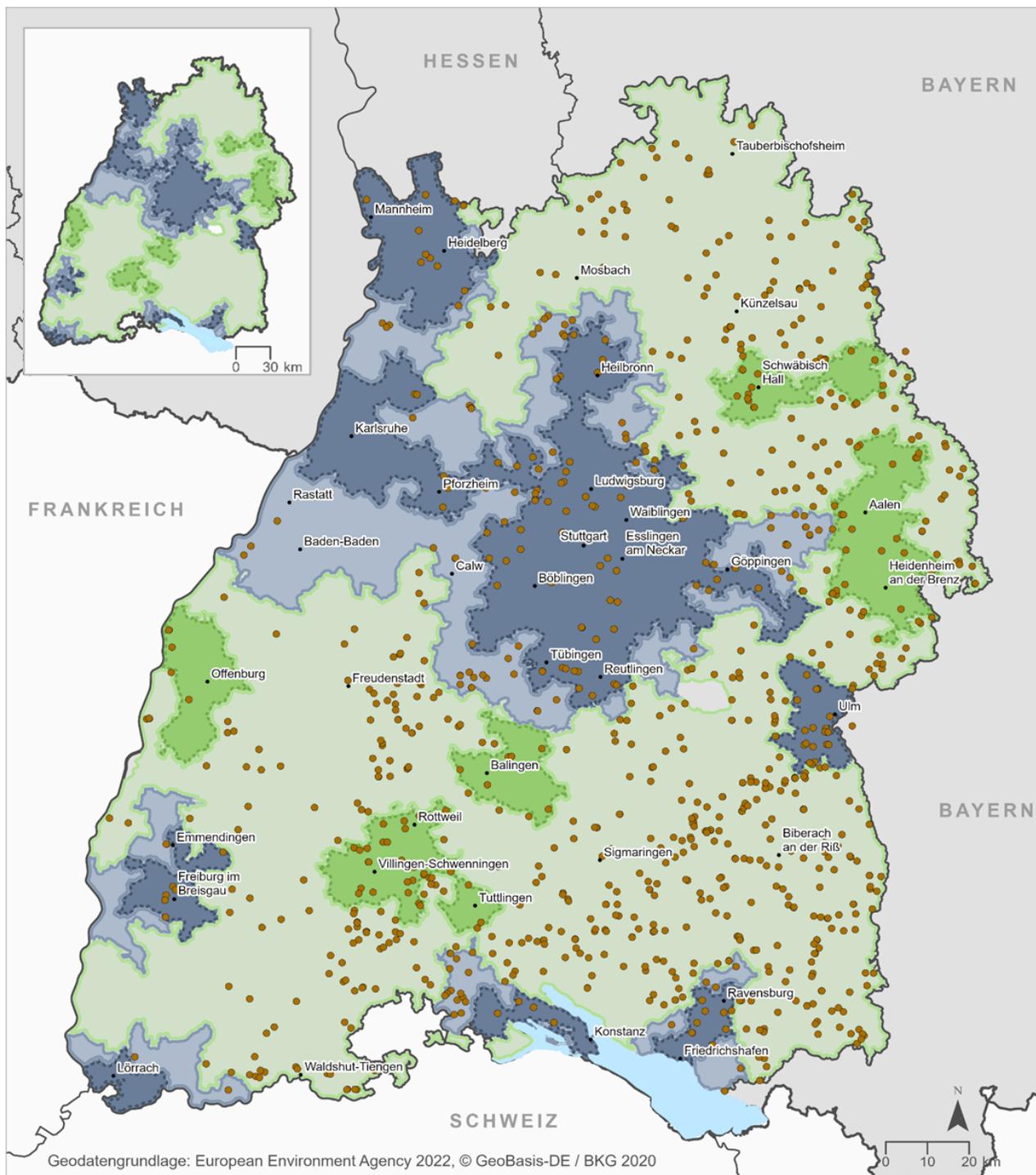
Raumkategorien LEP 2002

- Ländlicher Raum im engeren Sinne
- Verdichtungsgebiete im Ländlichen Raum
- Randzonen um die Verdichtungsgebiete
- Verdichtungsgebiete
- Gemeindefreies Gebiet

Datengrundlage: Marktstammdatenregister 2023



Abb. 30: Biogas-Aufbereitungsanlagen in Baden-Württemberg (Stand 2022); (Quelle: Marktstammdatenregister 2023)



Biomasse Stromerzeugungseinheiten
Stand 2022 - 2.433 Einheiten

● Biomasse Stromerzeugungseinheiten

Raumkategorien LEP 2002

- Ländlicher Raum im engeren Sinne
- Verdichtungsgebiete im Ländlichen Raum
- Randzonen um die Verdichtungsgebiete
- Verdichtungsgebiete
- Gemeindefreies Gebiet

Datengrundlage: Marktstammdatenregister 2023



Abb. 31: Stromerzeugungsanlagen auf Basis Biomasse in Baden-Württemberg (Stand 2022); (Quelle: Marktstammdatenregister). Jeder Punkt repräsentiert eine Einheit. In einer Anlage können ggf. mehrere Einheiten gebündelt sein.

Fazit Bioenergie-Anlagen in Baden-Württemberg

Status: Bioenergie hat quantitativ eine bedeutende Rolle unter den erneuerbaren Energien in Baden-Württemberg. Sie wird genutzt sowohl für die Bereitstellung von Wärme, Strom und Kraftstoffen.

Die wichtigste Technologie sind die Biogasanlagen, von denen über 1.000 Anlagen in Baden-Württemberg in Betrieb sind – überwiegend im Ländlichen Raum. Die Anlagen werden mehrheitlich zur Stromerzeugung eingesetzt, nur in wenige Anlagen wird Biogas auf Biomethan aufgereinigt und in das Gasnetz eingespeist. Die Wärmeauskopplung ist eher noch gering ausgeprägt, kann aber über einen Anschluss an ein kommunales Wärmenetz technisch erprobt und vielfach umgesetzt werden. Ein Schwerpunkt der Bioenergieanlagen liegt im Südosten (Oberschwaben) von Baden-Württemberg und besonders im Kreis Schwäbisch Hall.

Holzenergieanlagen befinden sich vorwiegend als Wärmeerzeuger oder in Form von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen in kommunalen Energiesystemen. Auch Einzelhaus-Wärmeanlagen auf Basis von Biomasse (Pellets, Scheitholz) sind weit verbreitet.

Trend: Die Nutzung von Energiepflanzen und nachwachsenden Rohstoffen für die Bioenergie ist umstritten. Die Nutzung von Bioenergie verlagert sich deutlich zu Reststoffen und integrierten energetisch-stofflichen Nutzungen (Bioökonomie). Der Flächenbedarf für die Erzeugung von Biomasse stagniert eher oder wird durch diesen Trend auch insgesamt tendenziell abnehmen. Die Bioenergie ist einem deutlichen Druck zu mehr Umweltfreundlichkeit – geringere Emissionen (u.a. Treibhausgase, Stickstoff), weniger Düngereinsatz, mehr Biodiversität etc. – ausgesetzt. Die Diskussion um „Teller oder Tank“ ist in der öffentlichen Wahrnehmung präsent. Hieraus entsteht ein Druck zu mehr Vielfältigkeit auch im Bereich der Energienutzung (Blühwiesen, ökologischer Landbau, Fruchtfolgen, Humusbildung, Wasserhaushalt) in den kommenden Jahren. Dies gilt auch für den Bereich der Holznutzung, wo unter anderem Anforderungen nach niedrigeren Emissionen aus Feinstaub und Stickoxiden umgesetzt werden müssen. Insgesamt wird davon ausgegangen, dass die zukünftige Entwicklung eher stagnierend bis leicht abnehmend ist.

3.2.4 Geothermie und Umweltwärme

Geothermie - technisch-energiewirtschaftlicher Stand

Die Geothermie wird zu den „flexibel“ einsetzbaren und planerisch verlässlichen erneuerbaren Energien gezählt. Es wird zwischen oberflächennaher Geothermie (bis 400 m Tiefe) und Tiefengeothermie (> 400 m) unterschieden.

Die **oberflächennahe Geothermie** wird durch Erdsonden oder ggf. Erdkollektoren erschlossen und ist zur Wärmeversorgung im Gebäude- und Industriebereich bereits weit verbreitet und – bei Vorliegen geeigneter geologischer, hydrologischer und technischer Gegebenheiten – auch zügig und

breit ausbaubar. Eine wesentliche Einschränkung ist das Vorliegen von Anhydrid und das Risiko von Erdanhebungen durch Wassereindringung und Aufquellen des Anhydrids zu Gips (Beispiele: Schadensfälle Stauffen oder Böblingen).

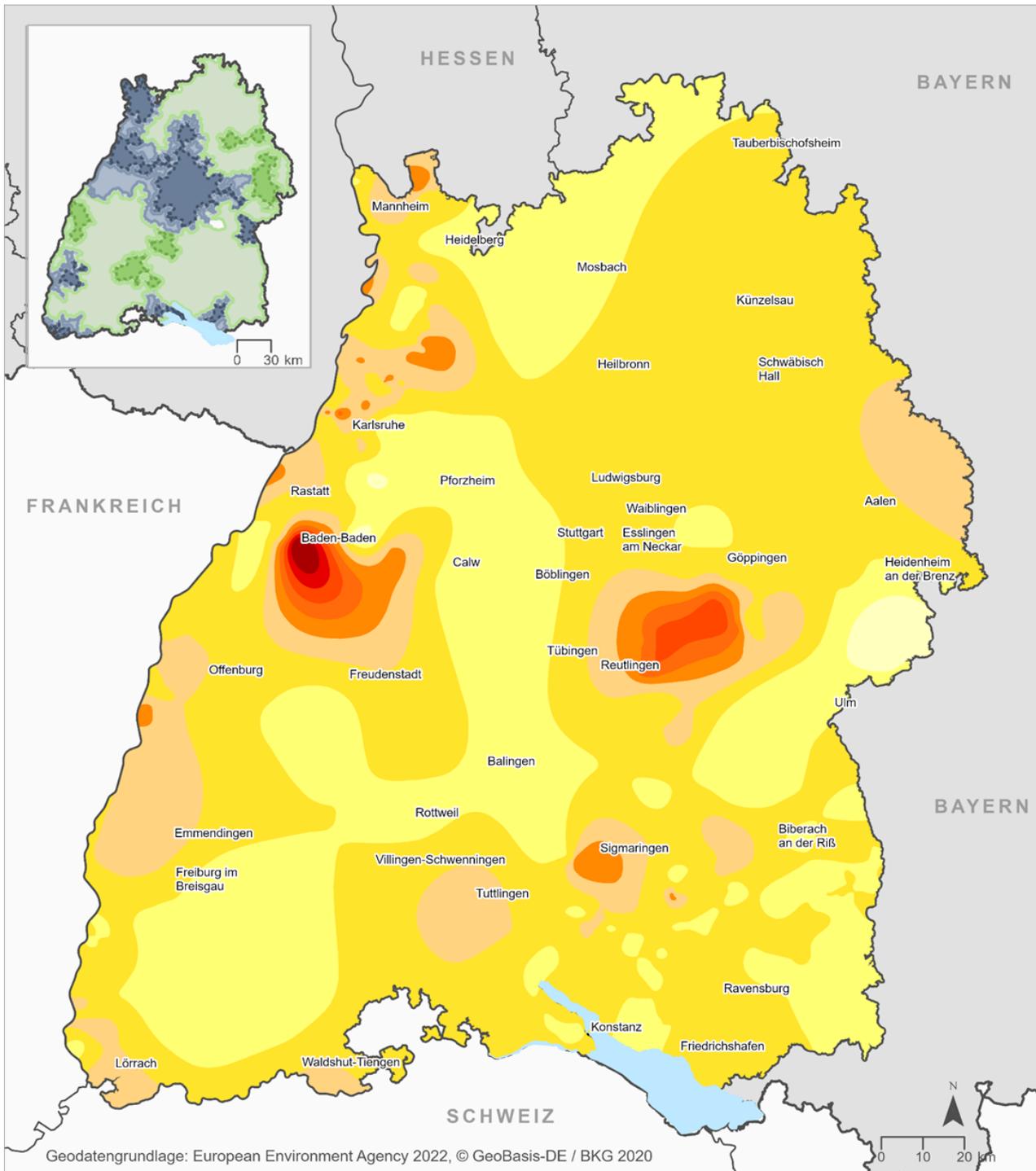
Für die oberflächennahe Geothermie und geplante Standorte für Erdwärmesonden stellt das Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) im Informationssystem „ISONG“ eine Bewertung der durchteuften Schichtenfolge im Hinblick auf den sicheren Einsatz von Erdwärmesonden zur Verfügung. Hier kann für eine Auflösung von teils wenigen Metern (nicht alle Gebiete in Baden-Württemberg sind gleichermaßen erkundet) die Eignung des geologischen Untergrundes für geothermische Sonden ermittelt werden.

Die oberflächennahe Geothermie bzw. geothermische Wärmepumpenanlagen werden teils mit luftgestützten Wärmepumpenanlagen mit dem Begriff „Umweltwärme“ zusammengefasst. Da die Wärmequelle aber eine völlig andere ist und auch die Technologie weitgehend anders ist, sind sie streng genommen zu trennen.

Die **Tiefengeothermie** kann für die Wärme- und Stromerzeugung genutzt werden, sofern ausreichende Temperatur- und Schüttungsverhältnisse (in wasserführenden Aquiferen) vorliegen (hydrothermale Geothermie). Hier werden tiefe Bodenschichten über 400 m Tiefe erschlossen, viele Gebiete liegen auch einige tausend Meter tief (3 – 5.000 m). Die in diesem Bereich geförderten Tiefengewässer sind meist sehr salzhaltig. Sie wurden in letzten Jahren auch als aussichtsreiche Quellen für Lithium-Salze – wichtige Rohstoffe für die moderne Batterietechnik – entdeckt.

Auch ‚trockene‘ Gesteinsformationen sind grundsätzlich für die Tiefengeothermie nutzbar (petrothermale Geothermie). In der Regel wird dabei die geologische Gesteinsformation mittels künstlicher Stimulation aktiviert (Enhanced Geothermal Systems EGS). Durch die Notwendigkeit, die Wegbarkeit im Untergrund hydraulisch oder chemisch durch das Verpressen von Flüssigkeiten zu verbessern („Fracking“), können in der Folge Erdbeben induziert werden. Dadurch ist die Technik in Kritik geraten und in Baden-Württemberg gegenwärtig nicht anwendbar. Eine andere Technik im Bereich der petrothermalen Geothermie sind die tiefen Erdwärmesonden mit einem sogenannten Closed-Loop-System. Hierbei lässt man das Wärmeträgermedium in einem geschlossenen Kreislauf zirkulieren und benötigt keine Aktivierung des Untergrundes. So werden keine seismische Aktivitäten ausgelöst. Die erste weltweit wirtschaftlich betriebene Anlage wird aktuell in der Umgebung von München (Geretsried) errichtet.

In Baden-Württemberg liefern sowohl der Oberrheingraben und die baden-württembergischen Teile des süddeutschen Molassebeckens als auch einige geologische Anomalien, z.B. im Gebiet Bad Urach, besonders günstige Nutzungsmöglichkeiten für die hydrothermale Tiefengeothermie. Die Nutzungsmöglichkeit ist stark von den geologischen Verhältnissen vor Ort (Gesteinstyp, Wasserführung, Störungszonen etc.) und besonders von den Temperaturverhältnissen abhängig. Diese Informationen sind bei der Landesanstalt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) bezugsfähig <https://lgrbwissen.lgrb-bw.de/geothermie/tiefe-geothermie>. Beispielhaft sind in Abb. 32 die Temperaturverhältnisse in Baden-Württemberg in 300 m und in 2.500 m Tiefe dargestellt.



Untergrundtemperatur (Verteilung bei 300 m)
Stand 2023 - Normaltemperatur in °C



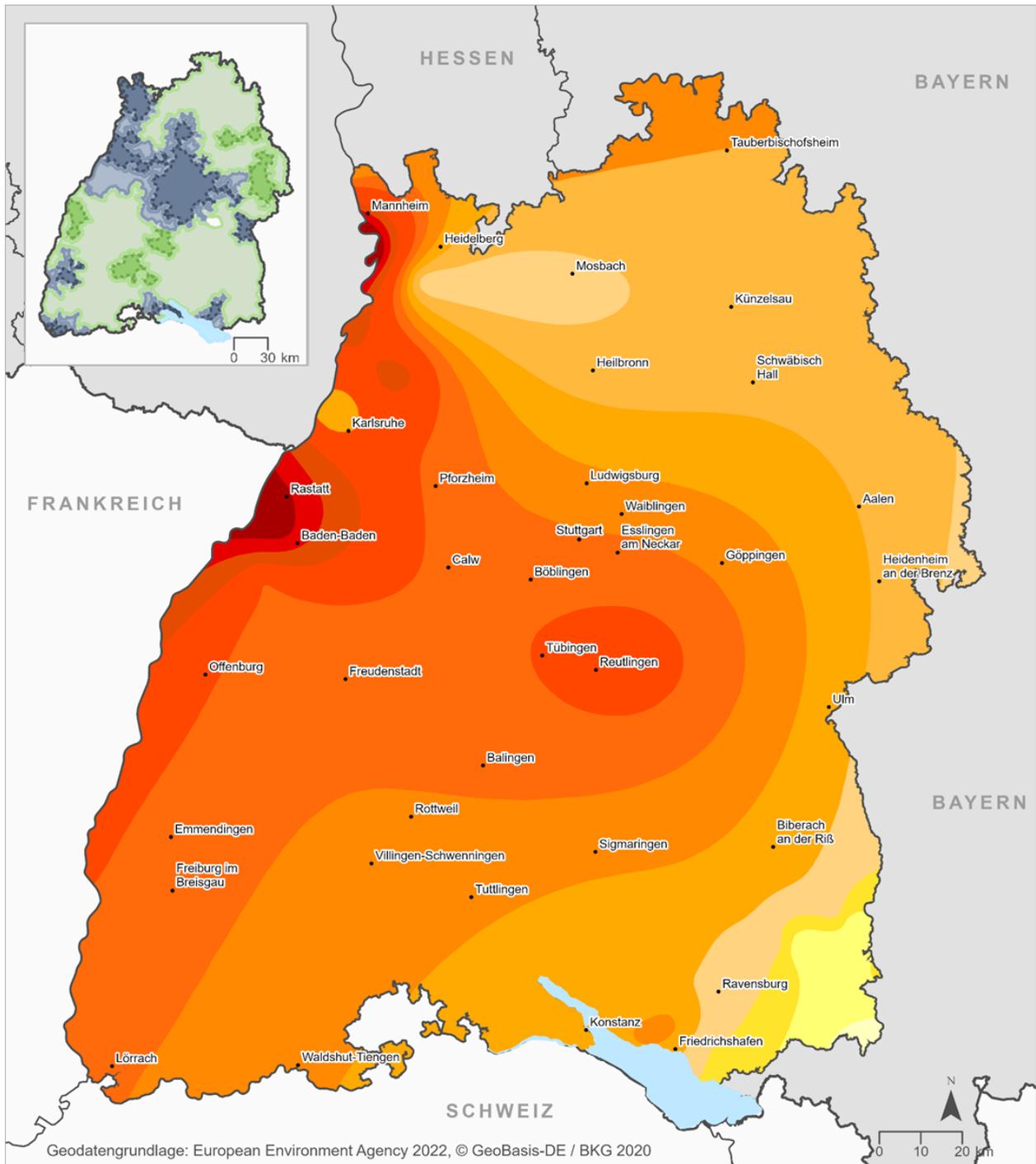
Raumkategorien LEP 2002

- Ländlicher Raum im engeren Sinne
- Verdichtungsgebiete im Ländlichen Raum
- Randzonen um die Verdichtungsgebiete
- Verdichtungsgebiete
- Gemeindefreies Gebiet

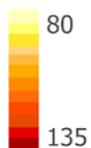
Datengrundlage: LGRB, Landesamt für Geologie, Rohstoff und Bergbau 2023



Abb. 32 a: Beispielhafte Darstellung der Temperaturverhältnisse im Untergrund in Baden-Württemberg in 300 m Tiefe. (siehe Legende nachfolgende Seite)



Untergrundtemperatur (Verteilung bei 2500 m)
Stand 2023 - Normaltemperatur in °C



Raumkategorien LEP 2002

- Ländlicher Raum im engeren Sinne
- Verdichtungsgebiete im Ländlichen Raum
- Randzonen um die Verdichtungsgebiete
- Verdichtungsgebiete
- Gemeindefreies Gebiet

Datengrundlage: LGRB, Landesamt für Geologie, Rohstoff und Bergbau 2023



Abb. 32 a und b: Beispielhafte Darstellung der Temperaturverhältnisse im Untergrund in Baden-Württemberg. Vorhergehende Seite (a): in 300 m Tiefe, diese Seite: in 2.500 m Tiefe (Daten: LGRB, Darstellung IER)

Das Leibniz-Institut für angewandte Geophysik (LIAG) betreibt den Server „Geothermisches Informationssystem“ (GEOTIS) (www.geotis.de/homepage/GeotIS-Startpage). In ihm sind geothermische Potenziale und Standorte analysiert und können kartographisch und anderweitig dargestellt werden. Nachfolgend ist in Abb. 33 für Baden-Württemberg ein Ausschnitt aus den Darstellungs- und Analysemöglichkeiten in GEOTIS dargestellt.

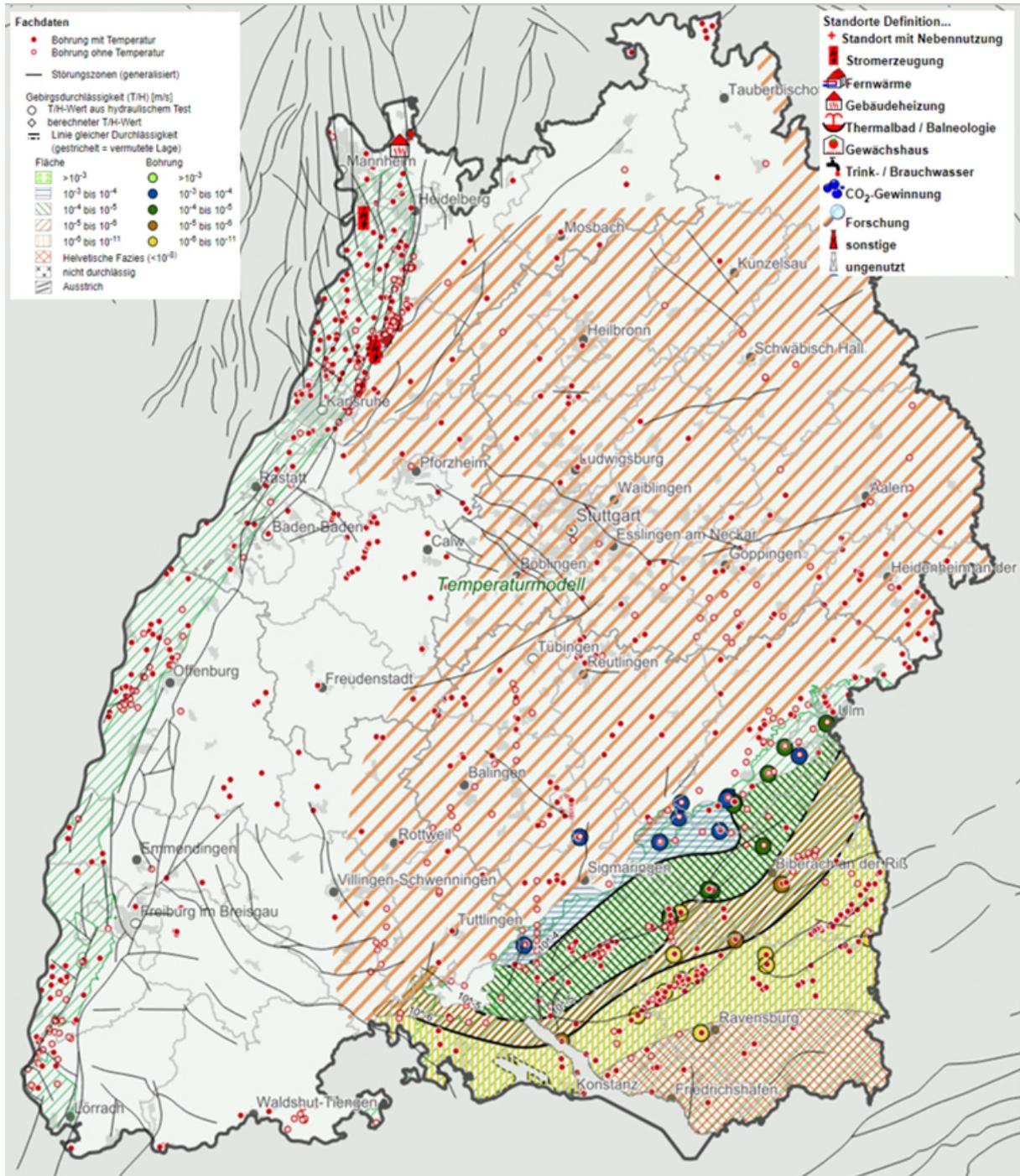


Abb. 33: Ausschnitt von geologisch und geothermisch relevanten Daten aus dem geothermischen Informationssystem GEOTIS; Auswahl: Untersuchungswürdige Gebiete für Geothermie und für CO₂-Einlagerung, Standorte Stromerzeugung und Gebäudeheizung, Geothermisches Reservoir Oberjura (T/H Malm), Bohrungen zur Exploration, Störungszone und topographische Grenzen und Siedlungsfläche; (Quelle: GEOTIS, www.geotis.de/geotisapp/)

Energiebereitstellung aus Geothermie

Die Energieerzeugung aus Geothermie ist in Baden-Württemberg noch wenig praktisch umgesetzt. Im Bereich Stromerzeugung weist das GEOTIS Portal gegenwärtig für Baden-Württemberg lediglich eine Anlage im aktiven Betrieb – das Kraftwerk in Bruchsal – mit folgenden Kenndaten aus:

Hauptnutzung:	Stromerzeugung
Nebennutzung:	Fernwärme
Temperatur der Schüttung:	131 °C
Fließrate:	31 l/s
Teufe:	2450 m
Geotherm. Wärmeleistung:	1,2 MW _{th}
Leistung (elektr.)	0,5 MW _{el}

Der jährlich erzeugte Strom aus Geothermie in Baden-Württemberg seit 2003 ist in Abb. 34 dargestellt.

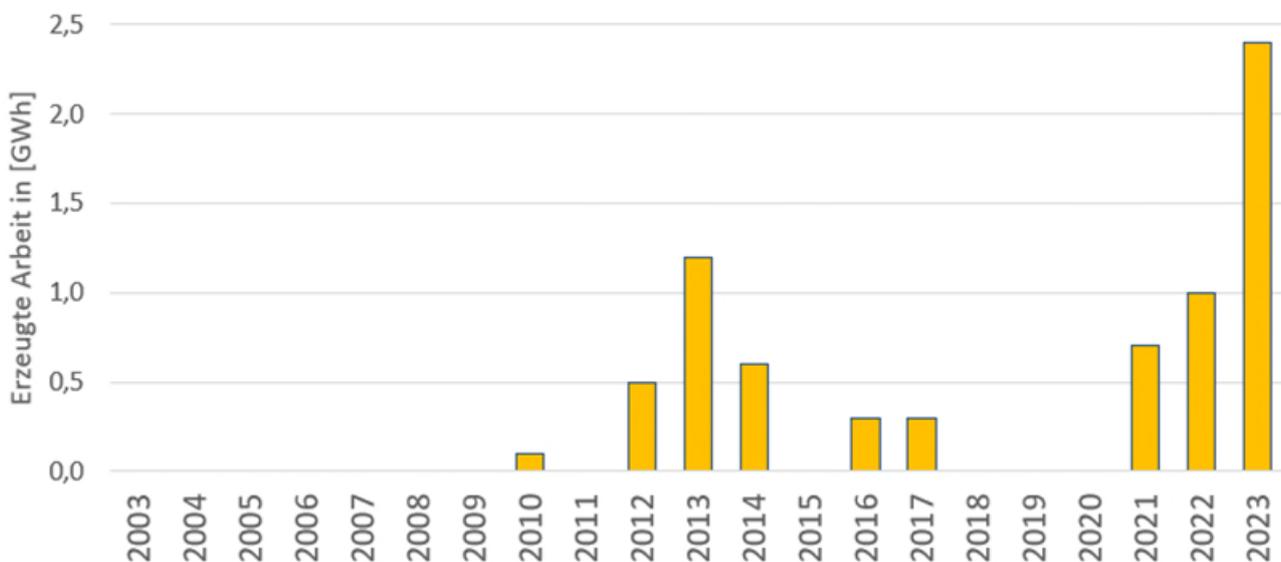


Abb. 34: Stromerzeugung aus Geothermie in Baden-Württemberg. Quelle: UM BW 2024c

Es ist ersichtlich, dass die Stromerzeugung sehr unterschiedlich ausfällt. 2022 steuert die Geothermie 0,7 GWh zur Stromerzeugung in Baden-Württemberg bei, 2023 war dies mit ca. 2,3 GWh zwar deutlich mehr, aber dennoch eine geringe Menge. Dieser niedrige Stand liegt daran, dass das Geothermiekraftwerk in Bruchsal nur sehr unzureichend läuft und geringe Betriebsstunden hat. Dies hängt mit dem Pilot- bzw. Demonstrationsstand der Stromerzeugung aus Geothermie zusammen, die teils nur punktuell je nach Verfügbarkeit der entsprechenden Anlagen funktioniert. Ein echter Beitrag zur Stromversorgung ist für Baden-Württemberg aus der Geothermie gegenwärtig nicht zu erkennen. Perspektivisch besteht aber ein sehr großes Potenzial (siehe Kap. 5.5).

Für die Wärmebereitstellung aus tiefer Geothermie ist in der Aufstellung aus GEOTIS für Baden-Württemberg ebenfalls nur eine Anlage verzeichnet, nämlich die Anlage Pfullendorf zur Fern-

wärmebereitstellung für einen Bundeswehrstandort. Das bedeutet auch hier, dass eine energiewirtschaftlich relevante Bedeutung nicht vorliegt. Dennoch sind die grundsätzlichen Potenziale hoch und können bei entsprechend vorliegenden Voraussetzungen nutzbar gemacht werden. Daher wird der Anlagentypus hier erwähnt.

Die Anlage in Pfullendorf hat nachfolgende Kenndaten:

Hauptnutzung:	Fernwärme
Temperatur der Schüttung:	75 °C
Fließrate:	25 l/s
Teufe:	1.530 m

In Abb. 35 ist der zeitliche Verlauf der Wärmebereitstellung aus tiefer Geothermie in Baden-Württemberg dargestellt.

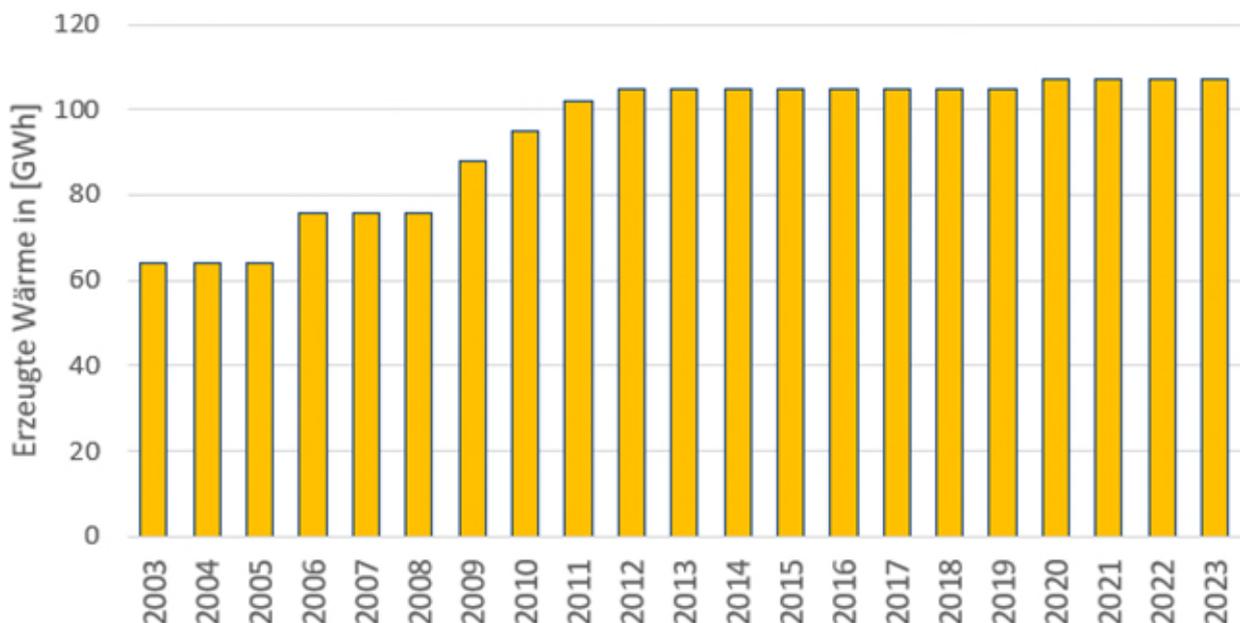


Abb. 35: Wärmebereitstellung aus tiefer Geothermie in Baden-Württemberg. Quelle: UM BW 2024c

Aus tiefer Geothermie werden 2023 ca. 107 GWh geliefert (oberflächennahe Geothermie nicht einbezogen). Hier ist in den letzten Jahren eine konstante Bereitstellung an Wärmeenergie erkennbar. Diese hat sich nach einem Anstieg in den Jahren bis 2010 auf dem Niveau von ca. 110 GWh pro Jahr stabilisiert. Die Menge ist im Vergleich zum Gesamt-Wärmebedarf in Baden-Württemberg (132 TWh/a) vernachlässigbar gering.

Umweltwärme - Nutzung für die Wärmebereitstellung

Unter Umweltwärme wird hier die Wärmeenergie aus Luft, Grundwasser und oberflächennaher Geothermie verstanden. Sie wird im Allgemeinen durch Wärmepumpen genutzt. Diese benötigen eine Antriebsenergie, die entweder elektrisch (gegenwärtig der häufigste Fall) oder thermisch

bereitgestellt werden kann. Als Leistungskennzahl wird der COP (Coefficient of Performance) – ermittelt in einem standardisierten Prüfstandverfahren – oder die Jahresarbeitszahl (JAZ) als die über den Jahresbetrieb gemittelte Betriebskennzahl im Verhältnis zur benötigten Antriebsenergie angegeben. Der COP kann folglich eher als theoretisch maximal erzielbare Effizienz und die Jahresarbeitszahl als praktisch im Alltagsbetrieb erzielbarer Wert angesehen werden. Die Jahresarbeitszahl liegt für Luft/Wasser-Wärmepumpen bei etwa 3,0 für Wasser/Wasser-Wärmepumpen und Sole/Wasser-Wärmepumpen bei etwa 3,8 und für Gas-Wärmepumpen bei 1,4. Die regenerativ erzeugte Wärme wird aus der Heizwärmemenge abzüglich des primärenergetisch bewerteten Strom- beziehungsweise Erdgaseinsatzes berechnet.

Mit Stand vom Juni 2024 gibt es in Baden-Württemberg 55.248 Bohrungen für Erdwärmesonden (LGRB 2024²⁵). Die mittlere Endteufe der Bohrungen liegt bei 93,64 m. Insgesamt sind 5.173.245 Bohrmeter für Erdwärmesondenbohrungen niedergebracht worden. Im Jahr 2023 wurden in Baden-Württemberg etwa 2.550 Bohrungen registriert. Dies lag etwa auf dem Niveau der vergangenen 10 Jahre (seit 2013). In den Jahren 2006-2011 hatte es bereits eine deutlich höhere Anzahl von Bohrungen gegeben, sie lag bei bis zu 4.700 Bohrungen pro Jahr (2008) (LGRB 2024).

In Abb. 36 ist die Nutzung von Umweltwärme für die Wärmebereitstellung in Baden-Württemberg dargestellt.

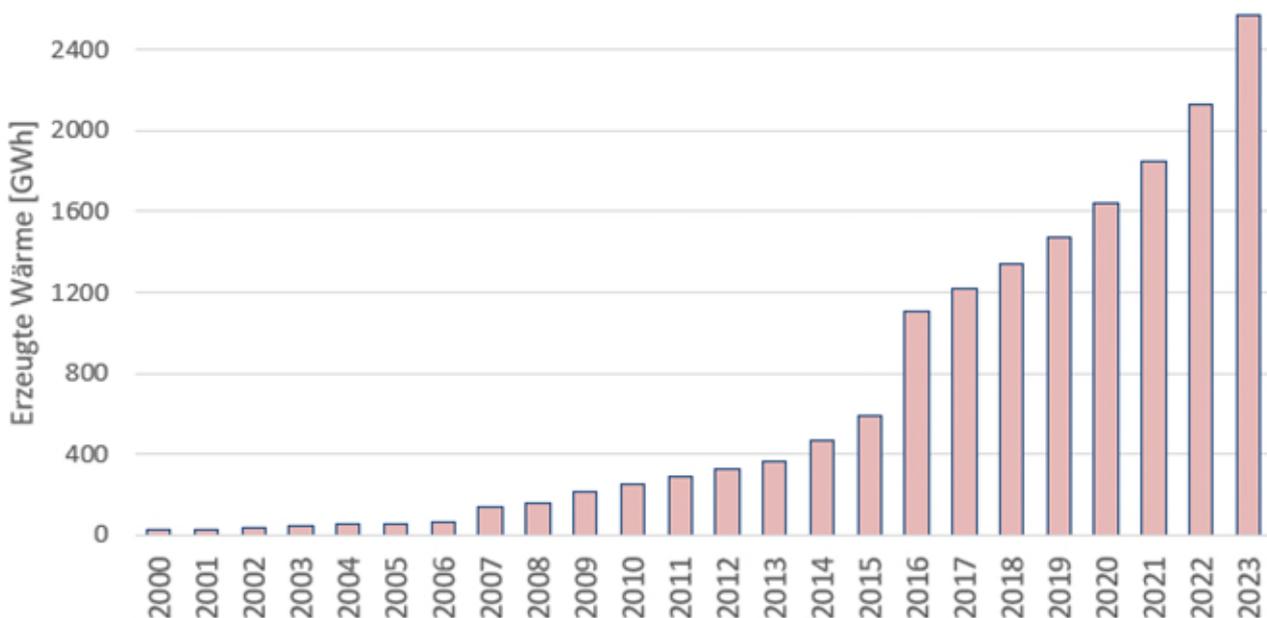


Abb. 36: Wärmebereitstellung aus Umweltwärme in Baden-Württemberg. Quelle: UM BW 2024c

Die erzeugte Wärme in diesem Sektor liegt danach 2023 bei 2.575 GWh. Es wird deutlich, dass sich die Nutzung von Umweltwärme in den vergangenen Jahren wesentlich beschleunigt hat. Während 2010 die Umweltwärme noch 253 GWh an Wärme beisteuerte, lag dieser Wert zehn Jahre später in 2023 bei 2.575 GWh, also beim 10-fachen. Wenn man die ca. 110 GWh aus der Tiefengeothermie

²⁵ <https://www.lgrb-bw.de/geologischer-dienst/geothermie-baden-wuerttemberg>

(Abb. 35) in Anrechnung bringt, bleiben für alle anderen Formen der Wärmepumpen in diesem Bereich ein Erzeugungsvolumen in Höhe von ca. 2.450 GW.

Raumrelevante Eigenschaften

Die **oberflächennahe Geothermie** mit Umweltwärmesonden und -kollektoren ist überwiegend auf einzelne Bauvorhaben bzw. Gebäude und Quartiere konzentriert und liegt damit schwerpunktmäßig im Bereich der kommunalen Handlungsebene. Für die oberflächennahe Geothermie ist das Land Baden-Württemberg weitgehend kartiert und in Bezug auf geologische Schichtlagerungen, Hydrogeologie, Einschränkungen und Bohrrisiken zur Nutzung der Geothermie bekannt.

So liegen z.B. Standortinformationen zu Erdwärmesonden und -kollektoren im Informationssystem Oberflächennahe Geothermie für Baden-Württemberg (ISONG)²⁶ beim Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) mit Stand März 2023 vor. Die registrierten Erdwärmesondenbohrungen als auch Grundwasser-Wärmepumpen können dabei aus einer oder mehreren Bohrungen bestehen.

Die Grundlagenkarten aus ISONG lassen erkennen, dass Bohrungen für Erdwärmesonden grundsätzlich in sehr vielen Bereichen Baden-Württembergs durchgeführt werden können. Nur wenige Landschaften sind ausgenommen wie einige Bereiche des (Hoch-)Schwarzwaldes und der Höhenzug der Schwäbischen Alb. Die Grundwasser-Wärmepumpen verteilen sich stärker auf den Oberrheingraben zwischen Basel und Offenburg, Oberschwaben, die Region Stuttgart und Heilbronn und einige Bereiche des Schwäbischen Waldes.

Für die Nutzung der **Tiefengeothermie** gelten teils strikte Regelungen für die jeweiligen Anlagenstandorte. Diese beziehen sich wesentlich auf die unterirdische Ausprägung des Gesteinshorizontes bzw. des Vorhandenseins von bestimmten Bodenschichten, Aquiferen oder geothermisch relevanten geologischen Besonderheiten.

Der Bundesverband Geothermie mit Partnern gibt regelmäßig ein Kartenwerk mit Darstellung der Projekte und Planungsvorhaben zur tiefen Geothermie heraus. Dieses Kartenwerk, auf dem eine Fülle von Informationen und Aktivitäten zur tiefen Geothermie untergebracht sind – auch für Baden-Württemberg – lässt sich unter der Webadresse www.geothermie.de/geothermie/geothermische-technologien/tiefe-geothermie herunterladen.

In Anlage 9.3 sind die für Baden-Württemberg verzeichneten geothermischen Anlagen in Baden-Württemberg zur Nutzung als Thermalbad bzw. Gebäudeheizung in einer Tabelle verzeichnet.

Status: Anlagen zur Nutzung der oberflächennahen Geothermie, insbesondere Erdwärmepumpen, haben in Baden-Württemberg bereits eine weite Verbreitung gefunden. Als regenerative Technologie für die Bereitstellung von Gebäudewärme wird sie perspektivisch einen großen Ausbau erfahren. Ihre Flächenwirkung hat sie vor allem innerhalb von Ortschaften bzw. zu

²⁶ <https://isong.lgrb-bw.de>

individuellen Gebäuden und ist daher vordringlich Gegenstand von städtischen Planungs- und Genehmigungsvorgängen.

Die tiefe Geothermie ist hingegen wenig ausgebaut. Ihre Beiträge zur Strom- und Wärmebereitstellung sind derzeit insgesamt sehr gering. Die bestehenden Potenziale, z.B. im Oberrheingraben, sind aber durchaus bedeutend. Der weitere Ausbau der tiefen Geothermie wird aktuell besonders durch hohe Kosten beschränkt, die durch hohe Aufwendungen für Erkundung, Exploration und Risikoabsicherung bedingt sind.

Trend: Energiewirtschaftlich werden mittelfristig v.a. oberflächennahe Systeme mit Erdwärmesonden und -kollektoren stark ausgebaut und damit einen Beitrag vorwiegend zur Wärmeversorgung liefern. Die tiefe Geothermie wird angesichts enormer Herausforderungen noch Zeit zum Ausbau benötigen. Die Möglichkeit aus Tiefenwässern Lithium als wichtigem Rohstoff für die moderne Batterieproduktion zu gewinnen, hat der tiefen Geothermie wieder einen Auftrieb gegeben.

3.2.5 Wasserkraft

Technisch-energiewirtschaftlicher Stand

Die Wasserkraft ist die klassische erneuerbare Energie, die seit Jahrzehnten, teils seit über einem Jahrhundert bereits vielfältig genutzt wird. In Baden-Württemberg werden 67 Anlagen mit einer Leistung von mehr als 1 MW betrieben und damit zur großen Wasserkraft gezählt (Energieatlas Baden-Württemberg²⁷). Weitere rund 1.700 Anlagen sind in Betrieb, die eine Leistung unter 1 MW haben und zur ‚kleinen‘ Wasserkraft zählen. Mit einer Gesamtleistung von 892 MW und einer Produktion von 4.140 GWh hat sie einen Anteil von 7,6% an der Bruttostromerzeugung 2022 in Baden-Württemberg (Energieatlas Baden-Württemberg). Damit gehört die Wasserkraft zu den bedeutendsten erneuerbaren Energien im Land. Im Vergleich dazu werden in Deutschland insgesamt rund 7.300 Wasserkraftanlagen betrieben (Bundesverband Deutscher Wasserkraftwerke). Diese haben zusammen eine installierte Leistung von 5.600 Megawatt (MW). 6.900 Anlagen, also etwa 94% haben eine installierte Leistung von kleiner als 1 MW und gelten dementsprechend als Kleinwasserkraftanlagen. Der durch Kleinwasserkraft beigetragene Anteil an der Stromproduktion beträgt dabei nur etwa 14%. Das Gros von 17,5 TWh/a wird von Anlagen mit einem Leistungsvermögen von über 1 MW erzeugt.

Die jährliche Entwicklung der Stromerzeugung aus Wasserkraft in Baden-Württemberg seit 2003 ist in Abb. 37 dargestellt.

²⁷ <https://www.energieatlas-bw.de/wasser>

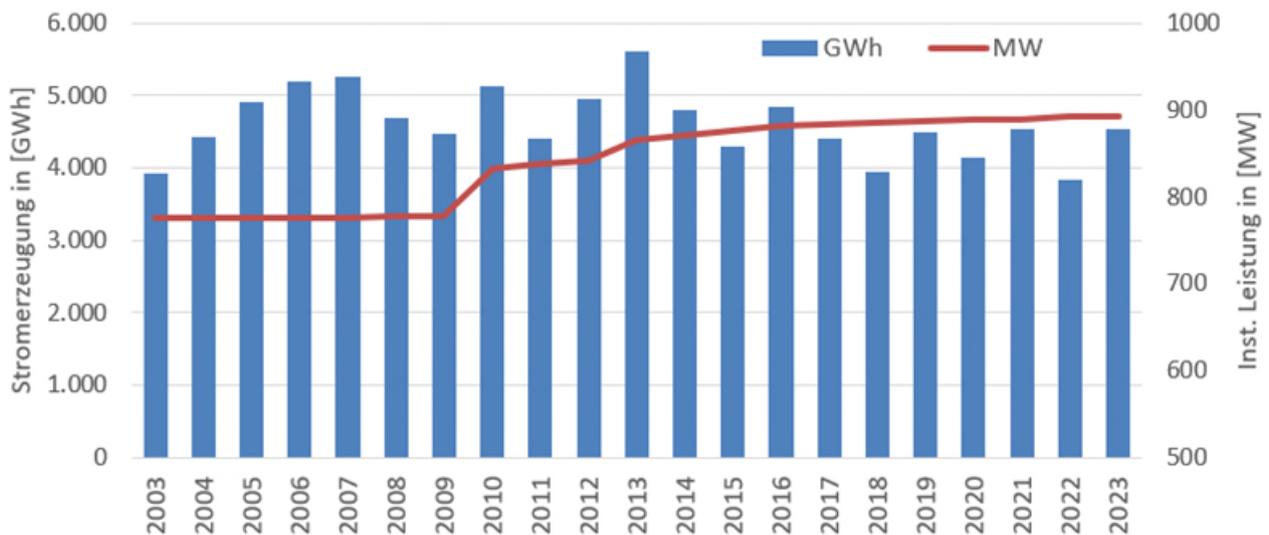


Abb. 37: Stromerzeugung aus Wasserkraft in Baden-Württemberg. Quelle: UM BW 2024c

Bei den Wasserkraftwerken wird grundsätzlich zwischen Laufwasser- und Speicherkraftwerken unterschieden. Bei Laufwasserkraftwerken wird Flusswasser genutzt und das Wasser dabei durch eine oder mehrere Turbinen geleitet, die einen Generator zur Stromerzeugung antreiben. Bei Speicherkraftwerken wird das Wasser in einem hoch gelegenen Speicher, z.B. einer Talsperre gespeichert. Das Potenzialgefälle zwischen Speicherebene und Turbinenebene wird zur Stromproduktion genutzt. Die Leistung hängt entscheidend von der Fallhöhe ab. Dieser Kraftwerkstyp kann auch als Regelbauwerk genutzt werden, in dem überschüssiger Strom gespeichert wird und bei Strommangel kurzfristig zum Ausgleich erzeugt wird.

Laufwasserkraftwerke sind Wasserkraftwerke, bei denen der Zufluss oberhalb des zugehörigen Stauwehrs und der Abfluss unterhalb des Kraftwerks im Regelbetrieb stets gleich ist. Es wird also kein Wasser zur ökonomischeren Nutzung bei Verbrauchs- und Zuflussschwankungen gespeichert. Bei **Flusskraftwerken** wird der zur Energiegewinnung genutzte Abfluss unmittelbar unterhalb des Querbauwerks wieder in das Gewässerbett zurückgeführt. Es bestehen keine oder nur geringe fischökologische Einschränkungen, soweit Fischauf- und -abstiegshilfen vorhanden sind. Bei **Ausleitungskraftwerken** wird hingegen oberhalb des Bauwerks Wasser aus dem Fließgewässer abgeleitet und unterhalb zum Bauwerk zurückgeführt. Dabei entsteht im Flussbett eine fischökologisch eingeschränkte Gewässerstrecke mit verringerter Restwasserführung. Insofern ist das Flusskraftwerk hinsichtlich der Ökologie günstiger zu bewerten.

Pumpspeicherkraftwerke als eine Form der Speicherkraftwerke sind Wasserkraftwerke, die Wasser in Form von potentieller Energie (Lageenergie) in einem Stausee speichern und für die Stromerzeugung nutzen. Das Wasser kann hier als Stromspeicher genutzt werden, es wird dabei durch elektrische Pumpen in den Speicher gehoben, um wieder für den Antrieb von Turbinen zur Stromerzeugung benutzt zu werden. Damit kann in nachfrageschwacher Zeit ein mögliches Überangebot an elektrischer Energie im Stromnetz aufgenommen und bei Spitzenlast wieder abgegeben werden. **Kavernenkraftwerke** sind Wasserkraftwerke, bei dem die Maschinenanlagen (Turbinen, Pumpen, Generatoren, Transformatoren usw.) in einen Felsen

(Kaverne) gesprengt sind. Die Wasserzuleitungen und -ableitungen verlaufen meist vollständig unterirdisch als Stollen oder Rohrleitungen.

Große Wasserkraft (> 1 MW)

In Baden-Württemberg hat sich der Bestand an großen Wasserkraftwerken (> 1 MW) in den letzten Jahren kaum verändert. Das Bundesland verfügt über knapp 20% der in Deutschland installierten Leistung (ca. 3,4 GW) im Bereich der großen Wasserkraft. Hierbei handelt es sich meist um Laufwasserkraftwerke an den großen Flüssen wie dem Rhein oder Neckar. In Baden-Württemberg sind zusätzlich acht Pumpspeicher-Kraftwerke (häufig als Kavernen-KW) registriert (Einsiedel, Schwarzbach, Glems, Wehr, Säckingen, Häusern, Witznau und Waldhut), die eine Gesamtleistung von 2.021 MW haben (Trianel 2015).

Die Pumpspeicherkraftwerke in Baden-Württemberg sind in Tab. 9 angegeben.

Tab. 9: Pumpspeicherkraftwerke in Baden-Württemberg. Quelle: Wikipedia;
https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Pumpspeicherkraftwerken#Deutschland)

	Leistung [MW]	Kapazität [MWh]	Inbetrieb- nahme
Schluchseewerk: Kraftwerk Wehr	980	6.073	1975
Schluchseewerk: Kavernenkraftwerk Bad Säckingen	370	2.064	1967
Schluchseewerk: Kraftwerk Witznau	220	626	1950
Schluchseewerk: Kraftwerk Waldshut	160	402	
Schluchseewerk: Kraftwerk Häusern	90	463	1931
Metzingen-Glems	90	560	
Forbach - Schwarzenbach-Kraftwerk	44	198	1926
Naturstromspeicher Gaildorf (in Komb. mit Windkraft)	16	70	2024
Kirchentellinsfurt (Ortsteil Einsiedel)	1,3	6	1926
gesamt	1.971,3	10.462	

Planungen: Forbach: Die EnBW möchte gemeinsam mit der Stadt Baden-Baden das Pumpspeicherwerk Forbach im Rudolf-Fettweis-Werk erweitern. Die Turbinenleistung soll um 10 MW gesteigert werden. Der Start der Bauarbeiten war für frühestens Herbst 2023 geplant²⁸. Aktuell gibt die EnBW an, dass am 27. Juni 2024 mit dem Bau des Zufahrtstollens zur Kraftwerkskaverne offiziell der Bau des neuen Pumpspeicherkraftwerk gestartet wurde und dass die Inbetriebnahme des Kraftwerks für Herbst 2027 geplant ist.

Für das Flusssystem Oberrhein sind in Abb. 38 die Kenndaten der Wasserkraft angegeben.

²⁸ <https://www.enbw.com/unternehmen/presse/pressemappe/pressemappe-forbach.html>

Dabei sind die Wasserkraftanlagen auch auf die drei Länder Deutschland, Frankreich und Schweiz aufgeteilt (Quelle: Neue Energie, Ausgabe Okt. 2010), und zwar

- Hochrhein: Schaffhausen bis Basel: Leistung: 801 MW davon ca. 320 MW in Deutschland, Erzeugung: 5.036 GWh/a davon ca. 2.160 GWh/a in Deutschland
- Oberrhein: Basel bis Straßburg: Leistung: 1.203 MW und Erzeugung: 7.298 GWh/a alles in Frankreich
- Oberrhein: Straßburg bis Iffezheim: Leistung: 204 MW davon 102 MW in Deutschland, Erzeugung: 1.390 GWh/a davon 695 GWh/a in Deutschland



Abb. 38: Ausbau des Flussystems Hoch- und Oberrhein mit Wasserkraftanlagen. Quelle: Neue Energie, Ausgabe Okt. 2010

Kleine Wasserkraft (< 1 MW)

Bei der kleinen Wasserkraft (< 1MW) sind im Energieatlas Baden-Württemberg der LUBW Wasserkraftanlagen in den baden-württembergischen Einzugsgebieten Neckar, Donau, Hochrhein, Bodensee/ Alpenrhein, Main und Oberrhein erfasst. Insgesamt sind im Energieatlas derzeit rund 2.100 Wasserkraftanlagen erfasst.

Raumrelevante Eigenschaften

Mit Bezug auf Flüsse, Seen und andere wasserführende Oberflächen, wie z.B. Baggerseen, hat die Wasserkraft eine bedeutende Rolle. Es gibt kaum einen Wasserkörper, der nicht entweder energie- oder wasserwirtschaftlich genutzt wird.

Die Flächeninanspruchnahme für die Errichtung von Wasserkraftanlagen und der Eingriff in den Naturhaushalt und das Landschaftsbild haben zu einem großen Widerstand der Bevölkerung gegen Neuanlagen geführt. So wurde z.B. das geplante Pumpspeicherkraftwerk Atdorf von dem damaligen Betreiber (Schluchseewerke AG) zunächst 2014 und nach der Übernahme anschließend 2017 auch von der EnBW aufgegeben. Projektgegner hatten befürchtet, dass viele seltene Tier- und Pflanzenarten zerstört würden.

Status: Die bekannten Potenziale zur Neuerrichtung von Wasserkraftanlagen in Baden-Württemberg sind weitgehend ausgebaut. Potenziale bei bestehenden Anlagen durch Repowering können noch ausgeschöpft werden. Aufgrund möglicher bedeutender Umweltwirkungen bestehen teils große Widerstände in der Bevölkerung für einen weiteren Aus- und ggf. Neubau.

Trend: Durch Repowering alter Anlagen und Turbinen bestehen energiewirtschaftlich noch Ausbaupotenziale. Aus raumordnerischer Sicht sind keine bis wenige Neustandorte absehbar. Die Bedeutung für die Energiewirtschaft (Erzeugung regenerativer Energie, Speicherkapazität zur Systemstabilität etc.) bleibt weiter hoch.

3.3 (Konventionelle) Erzeugungs- und Umwandlungsanlagen, u.a. Kraftwerke

In der Vergangenheit beruhte das Energiesystem in Baden-Württemberg im Wesentlichen auf der Nutzung fossiler Energieträger. Entsprechend einfach gestalteten sich die Verflechtungen im Energiesystem (siehe Abb. 39). Zu diesen konventionellen Energieversorgungsstrukturen bzw. peripheren Anlagen der Energieversorgung gehören u.a.

- Kraftwerke und Heizkraftwerke
- Kraftwerksperipherie wie z.B. Kohlelager
- Raffinerien und Ölpipelines
- Gasgewinnung und Rohstofflager- und -abbaustätten (z.B. Quarz für Photovoltaik, Lithium für Batterien)

Anlagen der (konventionellen) Energieinfrastruktur sind in Baden-Württemberg vielerorts zu finden und gleichzeitig sind sie über weitere Infrastrukturkomponenten und im Energiesystem stark miteinander vernetzt.

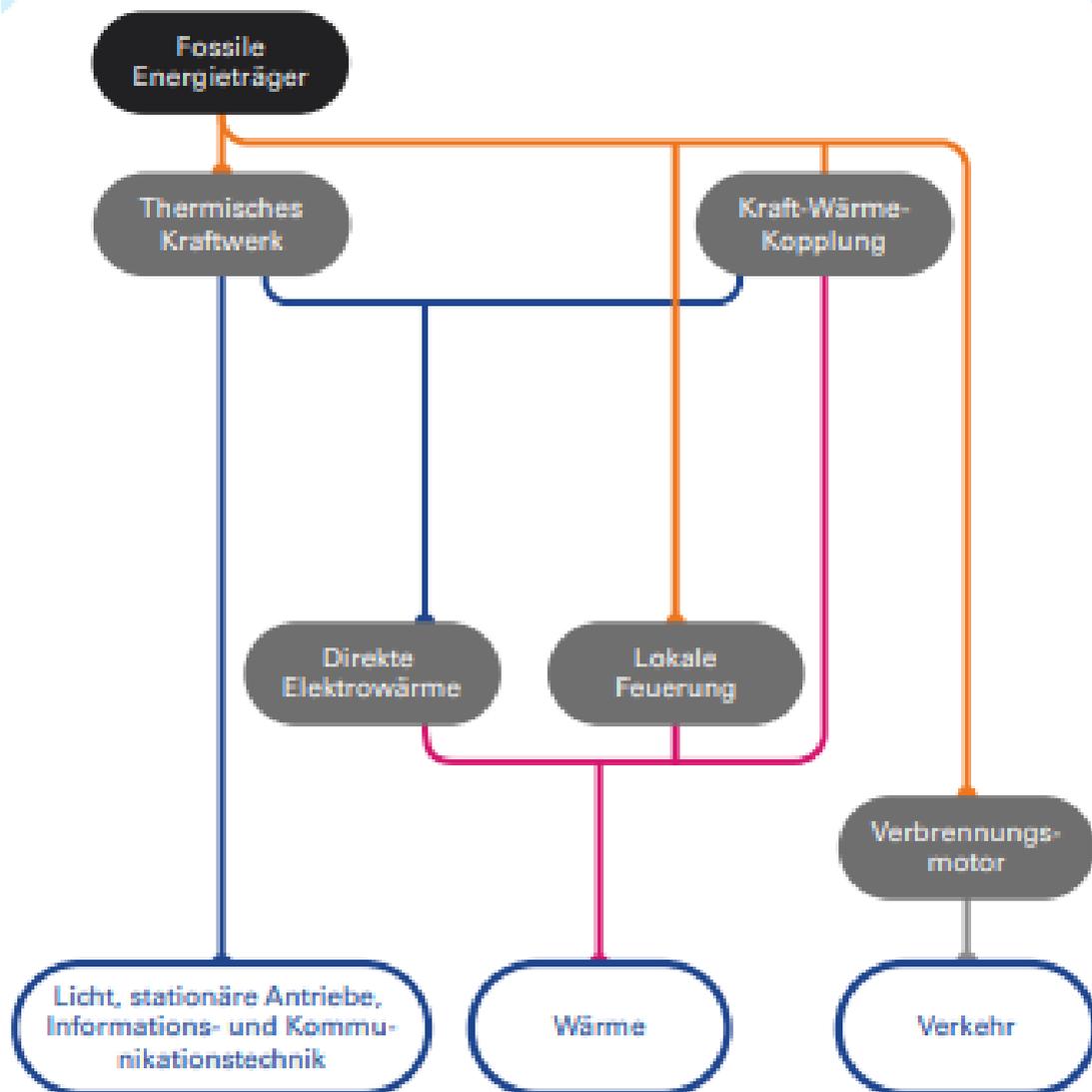


Abb. 39: Struktur des bisherigen, fossil-basierten Energiesystems

Für die konventionellen Anlagen gibt es im Marktstammdatenregister²⁹ bzw. mit der Kraftwerksliste bei der Bundesnetzagentur (Kraftwerksliste > 10 MW)³⁰ ausreichende Übersichten über den Anlagenbestand und ihre räumliche Zuordnung. In Tabelle 10 ist der konventionell und fossil betriebene Kraftwerkspark größer als 10 MW für Baden-Württemberg aggregiert dargestellt.

In Summe hat die Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur mit Stand 15. April 2024 für Baden-Württemberg insgesamt 199 Einträge mit 24.255 MW_{el} Einspeiseleistung. Zu beachten ist, dass in der Kraftwerksliste Erzeugungseinheiten registriert sind und keine Anlagenstandorte. So sind z.B.

²⁹ <https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR> 719

³⁰ <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/E1898lektrizitaetundGas/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/start.html>

für das Kraftwerk Altbach (Deizisau, Region Stuttgart) 6 Einheiten registriert, zwei Einheiten mit Steinkohle und je 433 und 323 MW_{el} Netto-Nennleistung und 4 Einheiten mit Erdgas bzw. Erdölgas mit zwischen 45 und 81 MW_{el} Nennleistung.

Tab. 10: Kraftwerksliste BNA: Elektrische Netto-Nennleistung des konventionell-fossil betriebenen Kraftwerkspark in Baden-Württemberg in [MW_{gesamt}] für Anlagen mit einer Leistung größer als 10 MW und Einträge zu erneuerbaren Energien. Quelle: Bundesnetzagentur, Datenquelle: Marktstammdatenregister (MaStR) Stand: 15. April 2024

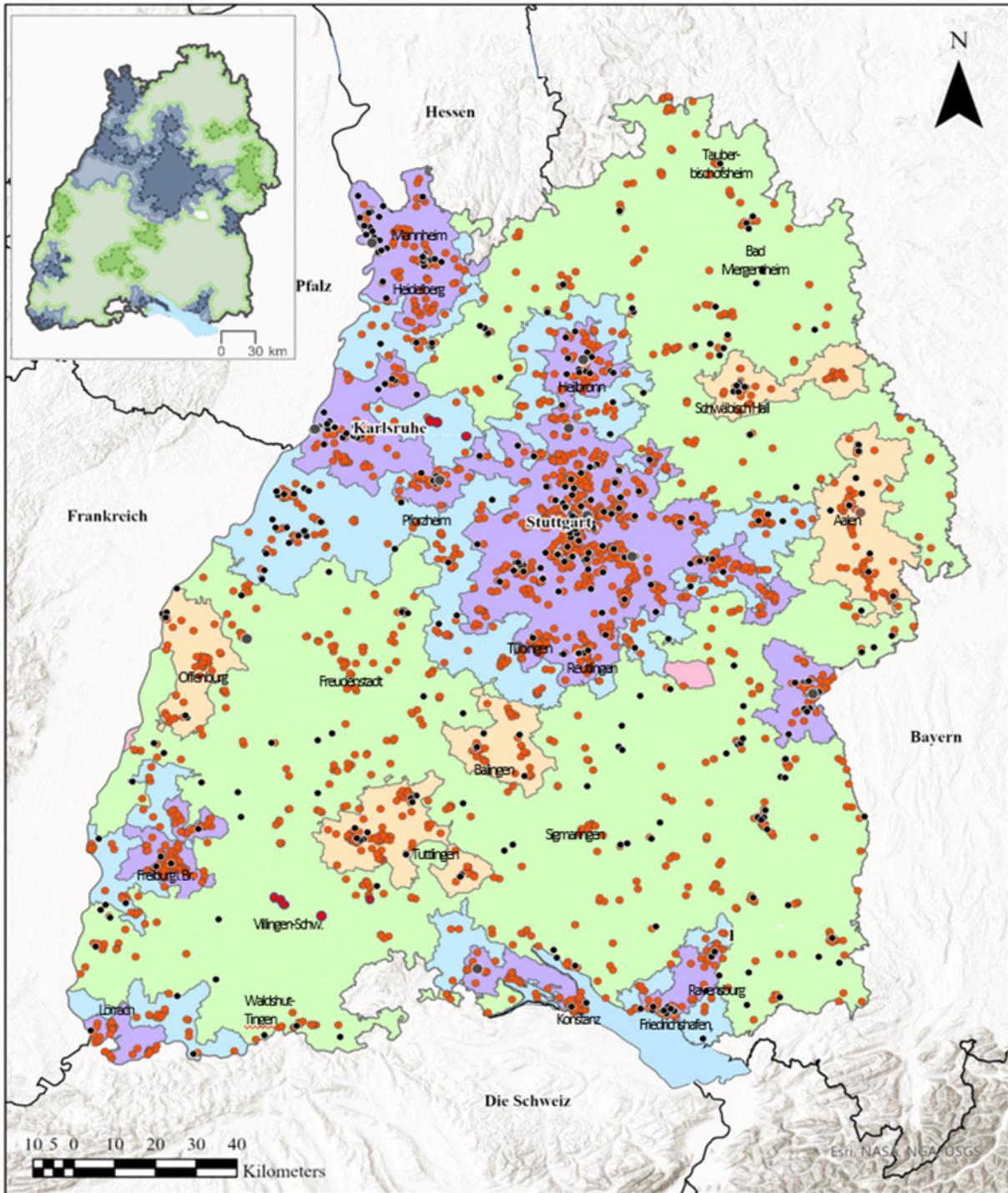
Energie / Ressource / Technologie	Netto-Nennleistung in MW _{elektr.}
Abfall	87
Erdgas	1.240
Kernenergie	0
Mineralölprodukte	378
Pumpspeicher	1.898
Steinkohle	5.465
Wärme	116
Sonstige Energieträger (nicht erneuerbar)	23
Summe	9.207

Zur Kenntnisnahme: Einträge zu Erneuerbaren Energien

Energie / Ressource / Technologie	Netto-Nennleistung in MW _{elektr.}
Biomasse	1.009
Geothermie	1
Solare Strahlungsenergie	10.251
Wasser	1.991
Windenergie (Onshore Anlage)	1.796
Summe	15.048

Vom gesamten Kraftwerkspark in Baden-Württemberg sind gemäß der Kraftwerksliste 9.207 MW_{el} dem konventionell-fossilen Kraftwerkspark zuzurechnen (Tab. 9) und 15.048 MW_{el} den erneuerbaren Energien. Auf der fossilen Seite haben mit Steinkohle befeuerte Kraftwerke mit 5.465 MW_{el} den größten Anteil. Pumpspeicherkraftwerke, die hier dem konventionellen Teil zugerechnet sind, haben mit 1.898 MW den zweitgrößten Anteil, gefolgt von Erdgas mit 1.240 MW.

Die mit fossilen Brennstoffen betriebenen Anlagen in Baden-Württemberg verteilen sich räumlich über alle Landesteile (Abb. 41). Entlang des Oberrheins und der städtischen Ballungsräume liegt eine gewisse Konzentration vor. Dies ist besonders im Raum Stuttgart - Heilbronn erkennbar, aber auch entlang der Achsen Pforzheim – Karlsruhe oder Konstanz - Friedrichshafen. Im Schwarzwald, vor allem Süd-Schwarzwald und auch in Oberschwaben und im Schwäbischen Wald sind deutlich weniger Standorte vorhanden.



Kraftwerkstandorte mit fossilen Brennstoffen 2022

3.785 Einheiten

- Steinkohle-Anlagen
- Erdgas-Anlagen
- Mineralöl-Anlagen

Raumkategorien LEP 2002

- Ländlicher Raum im engeren Sinne
- Verdichtungsgebiete im Ländlichen Raum
- Randzonen um die Verdichtungsgebiete
- Verdichtungsgebiete
- Gemeindefreies Gebiet

Quelle: Marktstammdatenregister und Kraftwerksliste Bundesnetzagentur 2023



Abb. 40: Kraftwerksstandorte (Erdgas, Steinkohle und Mineralölanlagen) in Baden-Württemberg innerhalb der Raumkategorien. Stand 2022 (Datenquellen: MaStR und BNetzA Kraftwerksliste; Darstellung IER)

Bei den diskutierten Anlagen der (konventionellen) Energieinfrastruktur handelt es sich immer um ortsgebundene Anlagen, so dass zunächst die Gemeinden und Städte Planungshoheit haben. Allerdings ist aus energiewirtschaftlicher Sicht und unter Beachtung der Ziele des Klimaschutzes eine System- und damit auch Raumrelevanz generell festzustellen. Hierfür ist das energiepolitische Zieldreieck aus Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Bezahlbarkeit sowie Umwelt- und Klimaschutz die Leitschnur. Entsprechend gilt es, für die Standorte derartiger Anlagen und der weiter benötigten Infrastruktur Vorsorge zu tragen und sie in ihrer räumlichen Verortung über die Gemeinde- bzw. Stadtgrenzen hinweg zu planen.

Status: Die mit fossilen Energieträgern, vor allem Kohle, Erdöl und Erdgas, betriebenen Energieerzeugungsanlagen in Baden-Württemberg sind durch einen sehr breiten politischen Konsens deutlich auf dem Rückzug. Das letzte in Deutschland betriebene Kernkraftwerk, Neckarwestheim II in Baden-Württemberg, wurde im April 2023 abgeschaltet. Die Bundesregierung hat im Herbst 2024 Entwürfe für ein neues Strommarktdesign vorgelegt. Hier kann es mittel- bis langfristig zu neuen Weichenstellungen kommen, so dass z.B. Kraftwerksstandorte gesichert werden müssen, um wichtige Funktionen, z.B. für die Systemsicherheit, übernehmen zu können, oder auch auf neue Energieträger wie Erdgas oder auch Wasserstoff (H₂-ready) umgerüstet (repowered) zu werden, z.B. in Altbach, Stuttgart.

Trend: Das Ziel, Klimaneutralität in Deutschland bis 2045 zu schaffen, fördert Entwicklungen zu mehr Stilllegungen im konventionellen Kraftwerkspark auf breiter Basis. Bestimmte Standorte werden über Einzelentscheidungen neue Aufgaben übernehmen, von der Systemsicherheit bis zur Energieversorgung mit CO₂-neutraleren Kraftstoffen (z.B. Wasserstoff). Die weitere Nutzung und Entwicklung fossiler Energieversorgungsanlagen hängt stark von den politischen Rahmenbedingungen ab. Für den Kohleausstieg gibt es einen Ausstiegsplan mit dem Zieljahr 2038, der jedoch immer wieder auf dem Prüfstand steht, da die Bundesregierung die Umsetzung des Kohleausstiegs auf das Jahr 2030 vorziehen will.

3.4 Energieverteilung, Netze und sonstige Energieinfrastrukturen in Baden-Württemberg

Das Energiesystem einer modernen Gesellschaft wie in Deutschland wird in hohem Maße von der Frage bestimmt, wie die Energie verteilt und zwischen Erzeugung und Bedarf ausgetauscht wird. Diese Aufgabe wird im Wesentlichen durch unterschiedliche Netze (Wärme, Strom- und Gasnetze) übernommen, die das Rückgrat einer modernen Energie-Infrastruktur darstellen. Neben den Energienetzen übernehmen auch Kommunikationsnetze eine wesentliche Rolle.

Die zentralen Verteilungseinrichtungen der Energieinfrastruktur in Baden-Württemberg – Wärme-, Strom- und Gasnetze mit dazu gehörenden Einrichtungen – werden nachfolgend kurz vorgestellt und auf ihre Raumwirksamkeit untersucht.

3.4.1 Wärmenetze

Nah- und Fernwärmenetze sind zusammen mit Wärmespeichern Teil einer Energieinfrastruktur, die der Versorgung der Bevölkerung mit Wärmeenergie dient. Sie bietet den Vorteil einer professionell und effizient gemanagten Infrastruktur, die zugleich flexibel mit unterschiedlichen (und regenerativen) Energieerzeugungsanlagen ausgestattet werden kann. Damit ist die Nah- und Fernwärmeversorgung ein zentrales Element der Energiewende und für den Weg zur Klimaneutralität.

Der AGFW, der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.³¹, erstellt Berichte über den Anlagen- und Netzbestand seiner Mitglieder. Im öffentlichen verfügbaren AGFW-Hauptbericht 2022 (AGFW 2023) erfolgte neben einer Mitgliederbefragung erstmals auch eine Hochrechnung. Danach beziffert sich die Trassenlänge der Wärmenetze in Baden-Württemberg im Jahr 2020 auf insgesamt knapp 4.200 km, die sich auf 828 Wärmenetze verteilen. Dies entspricht einem Anteil von 13,4% an der bundesweit verbauten Trassenlänge. Damit ist nur in Nordrhein-Westfalen mehr Trassenlänge verbaut. Bezogen auf die Einwohnerzahl liegt die Trassenlänge der Wärmenetze in Baden-Württemberg mit 0,38 Meter pro Einwohner (Stand 2020) gleichauf mit dem Bundeswert. Aufgrund bestehender Fördermaßnahmen im Rahmen des Marktanreizprogrammes (MAP) und der KWKG-Förderung wurden zwischen 2009 und 2021 rund 1.900 Trassenkilometer Wärmenetze in Baden-Württemberg neu gebaut.

Die meisten Nah- und Fernwärmenetze sind auf die Versorgung einzelner Kommunen bzw. Quartiere ausgelegt und haben auf Landesebene keine unmittelbare Raumbedeutsamkeit. Zwei Ausnahmen sind jedoch von Belang, zum einen die sog. Fernwärme-Schienen in Mannheim / Heidelberg und in Plochingen / Stuttgart. Zudem bestehen anderen interkommunale Ansätze im Zusammenhang der Entwicklung von interkommunalen Siedlungsquartieren, wie z.B. Pattonville, die militärische Konversionsfläche auf der Gemarkung von Ludwigsburg und Kornwestheim. Hier machen die ober- oder unterirdisch verlegten Wärmenetze mit den Speichern nicht an den kommunalen Grenzen Halt. Flächen für die Netze und Speicher werden über die kommunalen Grenzen hinweg geplant und müssen vorgehalten werden.

Die Wärmenetze in Baden-Württemberg sind im Energieatlas Baden-Württemberg in Form von Steckbriefen und Gebietsübersichten³² hinterlegt.

3.4.2 Stromnetze

Stromnetze sind das Rückgrat unserer Energieversorgung und entscheidende Bestandteile unseres Energiesystems. Zu einem modernen Netzwerk für Strom gehören neben den elektrischen Leitungen (Freileitungen oder Erdkabel) auch Umspann- oder Schaltwerke oder auch Speicher sowie aktuell auch vermehrt Stromladeeinrichtungen für die E-Mobilität („Strom-Tankstellen“). Die

³¹ <https://www.agfw.de/>

³² <https://www.energieatlas-bw.de/waermenetze>

eigentlichen Stromnetze unterscheiden sich nach der Spannungsebene (Höchst-, Hoch-, Mittel-, Niederspannungsnetze) und nach ihrer Funktion (Übertragungs- bzw. Verteilnetze).

Neben den Netzbetreibern, in Baden-Württemberg auf Ebene der Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) die TransnetBW GmbH und die Amprion GmbH sowie ca. 110 Verteilnetzbetreibern (VNB), gibt es eine Reihe von Sondernutzungen, wie z.B. die Stromversorgungseinrichtungen der Deutschen Bahn, die aber überwiegend der Bahn gehören und nicht durch ÜNB oder VNB betrieben werden.

Die TransnetBW GmbH betreibt in Baden-Württemberg 220- und 380-kV-Stromkreise mit 3.111 km Länge und deckt damit eine Fläche von 34.600 km² ab. 35 Kuppelstellen integrieren das Netz von TransnetBW in das nationale und europäische Verbundnetz. Etwa 80 Transformatoren verbinden das Übertragungsnetz mit den Verteilnetzen in Baden-Württemberg³³.

Der größte Verteilnetzbetreiber in Baden-Württemberg sind die Netze BW GmbH, die ein 95.379 km langes Stromnetz im Hoch-, Mittel- und Niederspannungsbereich planen, betreiben und warten³⁴.

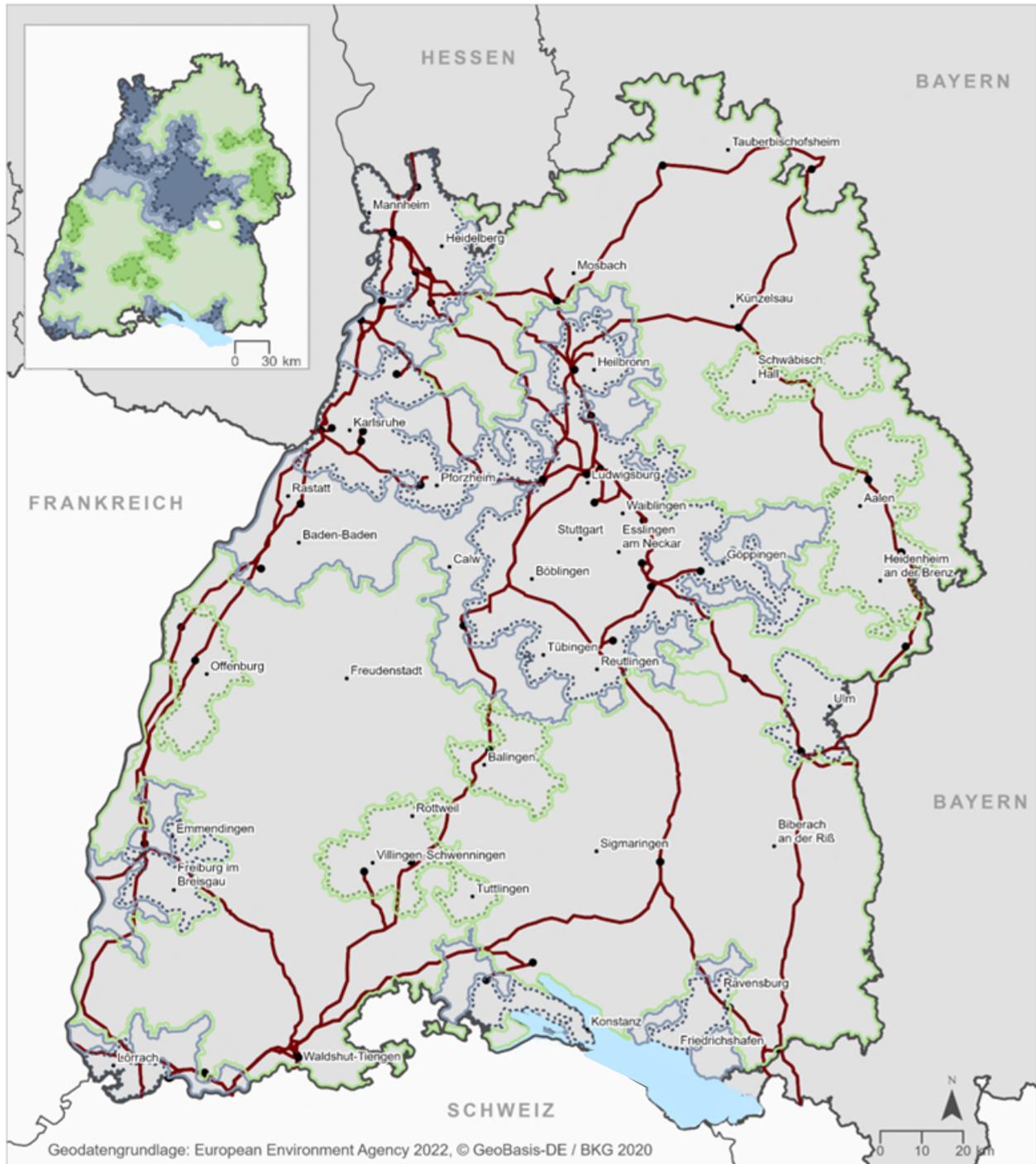
Das Bundesbedarfsplangesetz sieht einen deutlichen Ausbau der Stromnetze für Deutschland, aber auch für Baden-Württemberg vor. Hintergrund ist vor allem die ungleiche Verteilung der regenerativen Energieerzeugungsanlagen, v.a. Windenergie in Norddeutschland, und die bessere Verteilung in die Strombedarfszentren, die besonders im Süden Deutschland, u.a. auch Baden-Württemberg liegen. Der Stand der Umsetzung von Netzausbauvorhaben nach dem Bundesbedarfsplangesetzes im Verantwortungsbereich der TransnetBW GmbH in Baden-Württemberg ist in Anlage 9.5 in einer Übersicht dargestellt.

Stromnetze haben eine sehr offensichtliche Raumwirkung, insbesondere die Freileitungen der Übertragungsnetze. Aber auch für die Verteilnetze auf Ortsebene, soweit sie oberirdisch verlaufen kann eine Raumwirkung festgehalten werden. Im Bereich des Energieleitungsbaus ist ein Trend zur Erdverkabelung festzustellen. Für die Bundesfachplanung wurde mit dem im Dezember 2015 in Kraft getretenen "Gesetz zur Änderung von Bestimmungen des Rechts des Energieleitungsbaus"³⁵ für die großen „Stromautobahnen“ (Höchstspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitungen (HGÜ)) ein Vorrang für die Erdverkabelung eingeführt. Seither werden Gleichstromleitungen bevorzugt als Erdkabel statt als Freileitung umgesetzt. Für Wechselstromleitungen ist im Gesetz eine Erweiterung der Möglichkeiten zur Teilverkabelung verankert. Aus technischen Gründen bleibt es beim Freileitungsvorrang, allerdings können Erdverkabelungen in Pilotprojekten ausprobiert und die technische Entwicklung vorangetrieben werden.

³³ <https://www.transnetbw.de/de/transparenz/marktdaten/strukturdaten>

³⁴ <https://www.netze-bw.de/unternehmen/ueber-uns#1-1>

³⁵ <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Gesetz/gesetz-zur-aenderung-von-bestimmungen-des-rechts-des-energieleitungsbaus.html>



Höchstspannungsleitungen und Umspannwerke (Amprion und TransnetBW)

Stand 2023

- Leitungen
- Knoten

Raumkategorien - LEP2002

- Ländlicher Raum im engeren Sinne
- Verdichtungsgebiete im Ländlichen Raum
- Randzonen um die Verdichtungsgebiete
- Verdichtungsgebiete
- Gemeindefreies Gebiet

Datengrundlage: Amprion und TransnetBW 2024



Abb. 41: Strom-Übertragungsnetze und Umspannwerke der Transnet BW GmbH und Netze der Amprion GmbH in Baden-Württemberg. (Quelle: Transnet BW GmbH, 2023; Amprion GmbH 2023).

3.4.3 Stromladesäulen für die E-Mobilität

Einen besonderen Aufschwung als Teil der Strominfrastruktur hat in den vergangenen Jahren der Aufbau von öffentlichen E-Ladesäulen im Zuge des Ausbaus der Elektromobilität erfahren. Die Ladesäulen sind auch im Energieatlas Baden-Württemberg³⁶ verzeichnet, dieser ist wiederum mit dem Ladesäulenregister des BDEW³⁷ verknüpft. Betreiber von Ladepunkten haben der Regulierungsbehörde (Bundesnetzagentur - BNetzA) die Inbetriebnahme und die Außerbetriebnahme von Ladepunkten elektronisch anzuzeigen. Die Bundesnetzagentur betreibt hierzu einen Meldepunkt zum Ladesäulenregister. Hier sind die aktuellen Daten zur Ladeinfrastruktur erhältlich und auch als EXCEL-Datensammlung verfügbar. Gegenwärtig (Stand Okt. 2024) sind hier die in Tab. 10 dargestellten Einträge für Baden-Württemberg verzeichnet.

Tab. 11: Strom-Ladepunkte und -Stationen für E-Mobilität in Baden-Württemberg (gesamt). Quelle: Bundesnetzagentur (BNetzA), Stand: 17. Oktober 2024

Normal-Ladepunkte			Schnell-Ladepunkte		
Anzahl LP	Nenn-Leistung ges. [kW]	Ø Nenn-Leistung pro Ladepunkt	Anzahl LP	Nenn-Leistung ges. [kW]	Ø Nenn-Leistung pro Ladepunkt
21.047	335.261	15,9	4.021	391.567	93,4
Ladepunkte- und -stationen gesamt					
Anzahl LP		Nenn-Leistung [kW] ges.	Ø Nenn-Leistung pro Ladepunkt		Anzahl Ladestationen
25.068		726.829	30,5		12.899

Es wird deutlich, dass die überwiegende Anzahl der installierten Einheiten Normal-Ladepunkte darstellen, dies sind ca. 84% der Gesamt-Einheiten. Die Schnell-Ladepunkte machen etwa 16% der Gesamt-Ladepunkte aus. Die durchschnittliche Nennleistung der Ladepunkte ist deutlich verschieden, die Schnell-Ladepunkte sind im Vergleich mit den Normal-Ladepunkten mit einer ca. 6-fachen Leistung ausgestattet.

Eine Aufschlüsselung der Ladepunkte auf einzelne Landkreise findet sich im Anhang 9.4. Hier zeigt sich, dass besonders die Stadtkreise bzw. die Städte Stuttgart und Heilbronn, aber auch die Region Stuttgart (LK Böblingen, LK Esslingen) bzw. der Landkreis Rhein-Neckar überproportional gut ausgestattet sind mit Ladepunkten. Die gegenwärtige Anzahl an Ladepunkten entspricht rechnerisch eine Dichte von etwa 0,7 Ladepunkten pro km². Die Verteilung ist jedoch eher unregelmäßig mit einer starken Konzentration in den Städten und Ortschaften. Zudem ist das Verhältnis von öffentlich zugänglichen Lademöglichkeiten zur Anzahl der E-Fahrzeuge und zur Straßeninfrastruktur in Deutschland und in Baden-Württemberg derzeit noch sehr gering, wie eine Studie von Siemens Financial Services (SFS) zeigt. Für den weiteren Aufbau eines dichteren Netzes von Lade-

³⁶ <https://www.energieatlas-bw.de/netze/ladesaeulen>

³⁷ (<https://ladesaeulenregister.de/>)

stationen bestehen Förderprogramme sowohl auf Landesebene (Charge@BW) als auch auf Bundesebene („Öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland“ (2021-2025)), die den Ausbau weiter befördern sollen.

Die Analyse der Installationszeitpunkte für die Ladestationen für die vergangenen Jahre seit 2002 ist in Abb. 42 dargestellt. Es zeigt sich, dass ein signifikanter Zubau erst seit ca. 2018 begonnen hat. Seither hat sich die Geschwindigkeit des Zubaus und der installierten Einheiten deutlich beschleunigt. Aktuell werden pro Jahr (Stichjahr 2023) ca. 6.500 Einheiten zugebaut. Aktuell (Okt. 2024) sind im Ladeverzeichnis insgesamt 25.068 Ladepunkte an 12.899 Ladestationen verzeichnet. Gemäß Koalitionsvertrag will die Landesregierung Baden-Württemberg bis 2030 insgesamt 2 Mio. Ladepunkte zur Verfügung haben, in denen aber auch privat zugängliche Ladepunkte enthalten sind. In einer Bedarfsplanung wird von ca. 60.000 bis 100.000 öffentlichen Ladepunkten bis 2030 ausgegangen. In Siedlungs- und Gewerbegebieten soll beispielsweise der nächste öffentlich zugängliche Ladepunkt möglichst fußläufig erreichbar und die nächste Schnellladesäule maximal fünf Kilometer entfernt sein. Alle öffentlich zugänglichen Ladepunkte und Schnellladesäulen sollen einheitlich zugänglich gemacht werden.

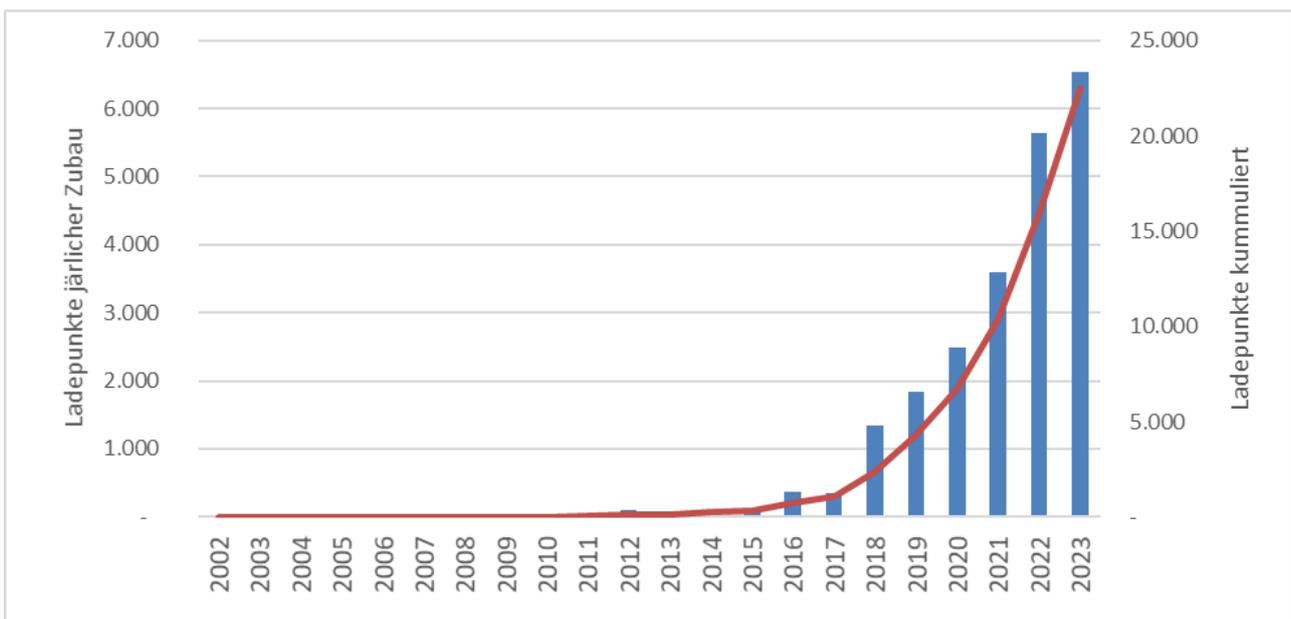


Abb. 42: E-Ladepunkte in Baden-Württemberg – jährlich installierte Einheiten (blaue Balken, linke Skala) und kumulierte Anzahl (rote Linie, rechte Skala). Stand: 10/2024. Quelle: Bundesnetzagentur

Dieses Ziel ist mit dem aktuellen Stand und Zubau von 6.500 Einheiten pro Jahr nur schwer einzuhalten. Unter der Annahme eines Zielwertes von 60.000 Ladepunkten bis 2030 muss der Zubau in den verbleibenden 5 Jahren jährlich leicht auf ca. 6.900 Ladesäulen zunehmen. Unter der Annahme, dass 100.000 Ladepunkte erforderlich sind, müsste er auf knapp 15.000 Einheiten pro Jahr steigen.

3.4.4 Gasnetz – Ferngasnetz und Verteilnetze

Gasnetze auf der Basis von Erdgas sind in den letzten Jahren verstärkt ausgebaut worden, da Erdgas als relativ umweltfreundliche Alternative (Übergangstechnologie) zur Wärmeversorgung galt. Die Ferngasversorgung (aus den Erzeugungsregionen inkl. Verdichterstationen und Speicher) und auch die Gasverteilnetze vor Ort sind gut entwickelt. Einspeisungen von Biogas bzw. Ersatzgasen (Substitute Natural Gas - SNG) wie Biomethan (aufgereinigtes Biogas) sind möglich, zudem sind Flüssiggasnutzungen an vielen Stellen verbreitet. In Baden-Württemberg operieren verschiedene Gasnetzbetreiber wie die terranets BW GmbH, Open Grid Europe (OGE) und die Fluxys Deutschland GmbH. Das Gasleitungsnetz der terranets BW GmbH ist rund 2.750 km lang und reicht von Niedersachsen bis an den Bodensee. Aus über 45 Einspeisepunkten wird Gas aus den Transportnetzen weiterer Fernleitungsnetzbetreiber übernommen, über rund 300 Netzkopplungspunkte sind etwa 60 Netzbetreiber sowie 23 Industriekunden direkt an das Gashochdrucknetz angeschlossen. Mit diesen Ferngasnetzen ist Baden-Württemberg mit den Lieferländern bzw. Anlieferungspunkten von Gas außerhalb des Landes verknüpft. Sie stellen damit wesentliche Infrastrukturen für die Versorgungssicherheit von Baden-Württemberg dar.

In nachfolgender Grafik ist das Ferngasnetz in Baden-Württemberg einschließlich wichtiger Infrastrukturen (Bezugsstationen, Speicher) und auch wichtiger Abnehmer z.B. aus der Industrie dargestellt (Abb. 43). Neben dem Ferngasnetz selbst sind hierin insbesondere die beiden Gasverdichterstationen, 1) in Scharenstetten, Betriebsaufnahme 1988, und 2) in Rheinstetten, dessen Inbetriebnahme kurz bevorsteht, von Bedeutung. Hinzu kommen noch die beiden unterirdischen Erdgasspeicher (Untergrundspeicher), einer im badischen Sandhausen und einer im oberschwäbischen Wilhelmsdorf. Letzterer ist nach Aussage aus dem UM BW aber seit dem 1. Oktober 2024 stillgelegt.

Die Ferngasversorgerin terranets bw GmbH baut gegenwärtig das in Abb. 43 dargestellte Ferngasnetz bedarfsgerecht aus. Damit soll dem steigenden Kapazitätsbedarf von Gas begegnet werden. Nach der Gaskrise 2022 und dem Überfall von Russland auf die Ukraine werden diese Pläne vielfach überdacht. Die Ausbaumaßnahmen im Ferngasnetz dienen aber in Teilen auch dem Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur, speziell dem sogenannten Wasserstoff-Kernnetz. Damit sollen die bisherigen Gasleitungen für die Zukunft für Wasserstoff umgerüstet werden. Für Baden-Württemberg enthält der Netzentwicklungsplan Gas 2020-2030 (FNB Gas 2020) umfassende Informationen zu den geplanten Auslegungsvarianten. Daher wurde auch darauf verzichtet im bereits veröffentlichten Netzentwicklungsplan 2022-2032 (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) 2012; FNB Gas 2024) erneut darauf einzugehen. Die im Vergleich zum früheren Netzentwicklungsplan Gas zusätzlichen Maßnahmen stehen größtenteils im Zusammenhang mit der Versorgung von Baden-Württemberg, der Anbindung der LNG-Anlagen (Flüssig-Erdgas, Liquefied Natural Gas) und den erforderlichen Ausbaumaßnahmen für Grüne Gase. Baden-Württemberg nimmt als industriereiches Land im Rahmen dieses Entwicklungsplanes für Gas also eine besondere Rolle ein. Das Umweltministerium Baden-Württemberg zeigt die Hintergründe und Maßnahmen der

Gasnetzausbauvorhaben der terranet bw in Baden-Württemberg auf einer gesonderten Internetseite³⁸.

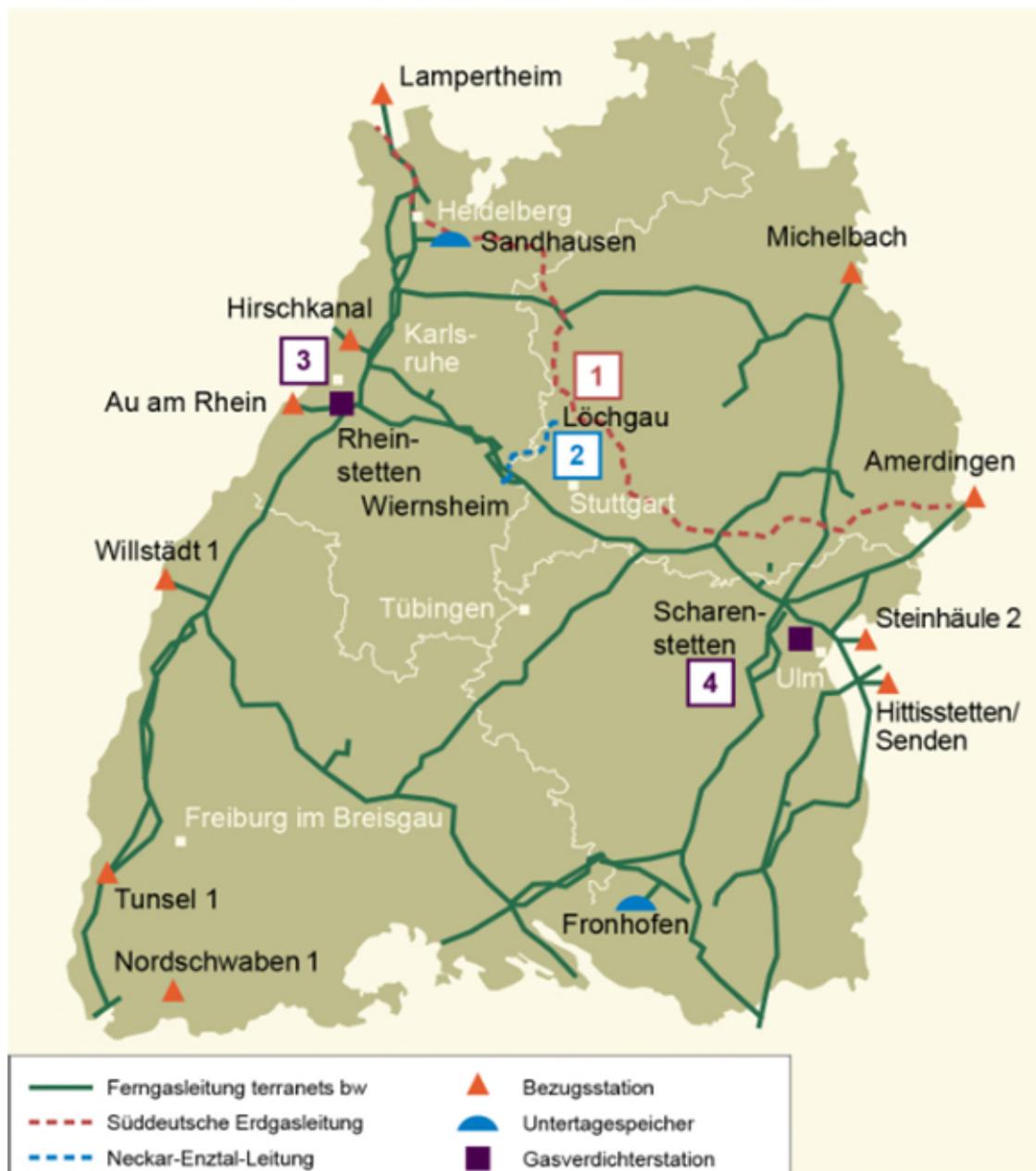


Abb. 43: Ferngasleitungen und Erdgas-Infrastruktur in Baden-Württemberg mit Gasnetzausbauvorhaben der terranets BW GmbH. Quelle: UM BW

Das Gasverteilnetz als Niederdrucknetz bildet die unterste Stufe des Gasnetzes und verteilt das Gas an die Endverbraucher im Land. Eine Karte der Versorgungsgebiete und Gas-Verteilnetzbetreiber ist im Energieatlas Baden-Württemberg³⁹ dargestellt. Es wird deutlich, dass es in Baden-Württemberg eine Vielzahl an Gasversorgungsgebieten mit einer ebenso großen Vielzahl an Gasnetzbetreibern

³⁸ <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/klima-energie/energiewende/versorgungssicherheit/netzausbau/netzausbauvorhaben-in-bw>

³⁹ <https://www.energieatlas-bw.de/netze/verteilnetzbetreiber-gas>

auf der Niederdruckebene gibt. Sie sind die direkten Ansprechpartner für die Gasversorgung der Endkunden aus Industrie, Gewerbe, Kommunen und Bürgerinnen und Bürger.

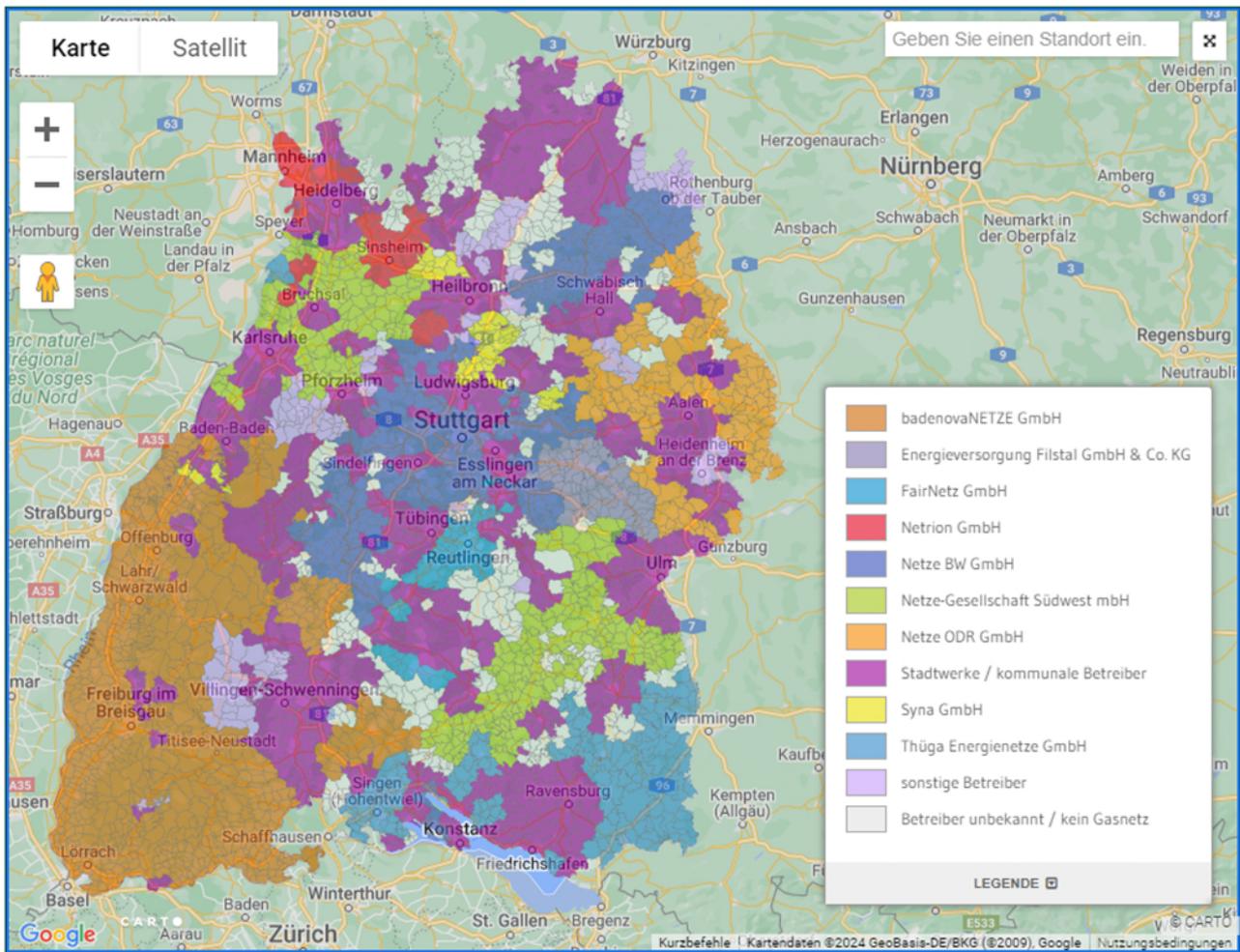


Abb. 44: Gas Versorgungsgebiete und Gas-Verteilnetzbetreiber in Baden-Württemberg. (Quelle: Energieatlas Baden-Württemberg, Daten: ene't GmbH)

Gasnetze sind in ihrer Raumrelevanz weniger offensichtlich, da sie überwiegend in mehr als 1 Meter Tiefe verbaut sind, sie stellen gleichwohl aber eine sehr entscheidende Energieinfrastruktur dar. Gasverteilnetze auf Ortsebene sind in Baden-Württemberg weit verteilt, insofern ist es offensichtlich, dass diese aus den Speichern und Erzeugungs- bzw. Verarbeitungsquellen her herantransportiert und verteilt werden müssen. Dies resultiert in wichtigen und größeren überörtlichen Transportnetzen, die auch eine Reihe von kritischen Elementen, wie z.B. Verdichtungsstationen, haben. Nicht zuletzt durch ihre potenzielle Gefährdung durch Entzündung und Explosivität stellen Gasnetze und Gasspeicher auch eine wichtige und kritische Infrastruktur (KRITIS) dar, da „bei deren Ausfall oder Beeinträchtigung nachhaltig wirkende Versorgungsengpässe, erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit oder andere dramatische Folgen eintreten würden.“ (Definition der Bundesregierung von Kritischen Infrastrukturen (KRITIS)).

3.4.5 Netze für flüssige Energieträger - Mineralölwirtschaft

Darüber hinaus gibt es auch Verteilnetze bzw. Pipelines für flüssige Energieträger. Eine davon ist die **Transalpine Ölleitung (TAL)** (Abb. 45). Hierbei handelt es sich um eine Erdöl-Pipeline vom Hafen Triest über Ingolstadt bis nach Karlsruhe. Sie ist eine von vier zentralen Ölversorgungslinien Deutschlands. Die seit 1967 betriebene Leitung führt von Ingolstadt kommend unterirdisch einmal quer durch Baden-Württemberg bis nach Karlsruhe. Der Streckenabschnitt in Baden-Württemberg beginnt nordöstlich der Gemeinde Goldburghausen und verläuft durch den Ostalbkreis, den Rems-Murr-Kreis, den Landkreis Ludwigsburg, den Enzkreis sowie den Stadt- und Landkreis Karlsruhe und durchquert dabei insgesamt 44 Städte und Gemeinden (Abb. 45). Endpunkt der TAL ist die MIRO, die Mineralö Raffinerie in Karlsruhe, die Raffinerie mit der höchsten Destillationskapazität in Deutschland.

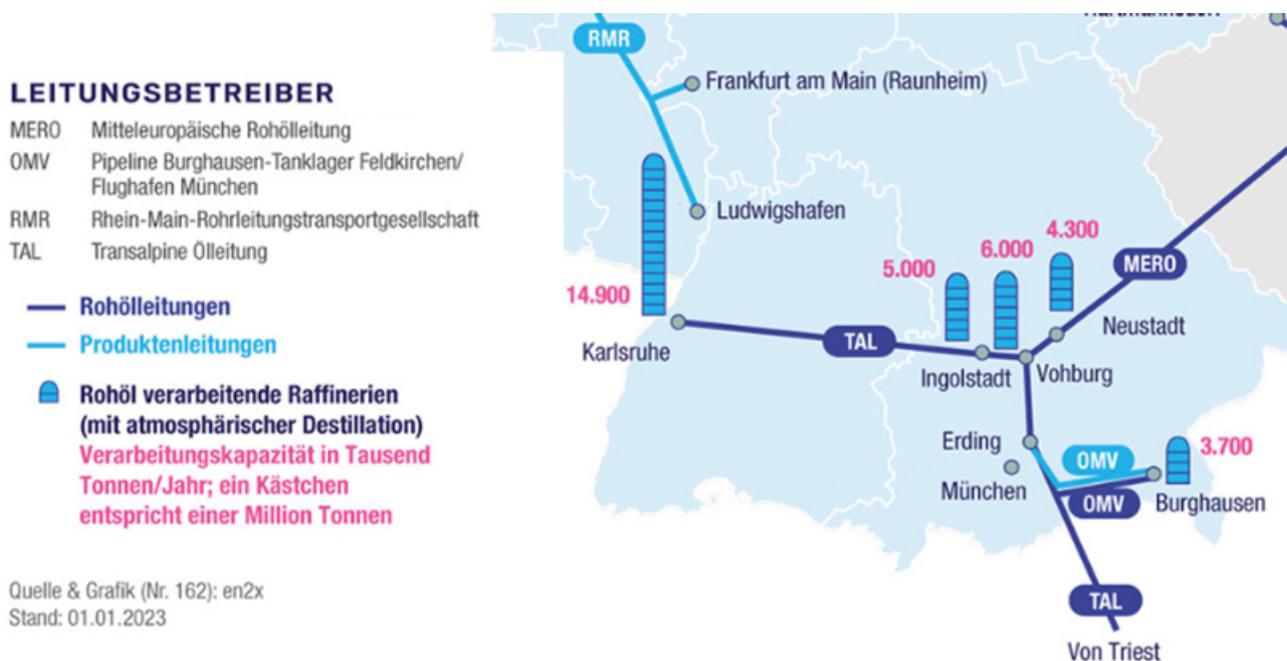


Abb. 45: Raffinerien und Pipelines in Baden-Württemberg und in Bayern. (Quelle: en2x <https://en2x.de/positionen/raffinerien-und-produktion/>)

Zum Pipelinenetz für flüssige Energieträger gehört auch das in den 1950er Jahren erbaute Central Europe Pipeline System (CEPS), das Teil eines ganz West-, Nord- und Südeuropa überspannenden militärischen Pipeline-Netzes der NATO darstellt (Abb. 46). CEPS liefert Flugzeugtreibstoffe von Tanklagern und Häfen in Frankreich zu Armeebasen und zivilen Flughäfen in ganz Europa, auch für den Frankfurter Flughafen. Nach Zusammenbruch der Sowjetunion wurde das Netz aufrechterhalten und in Teilstrecken sogar erneuert. Die Strecke verläuft meist unterirdisch. Es gab immer wieder Proteste gegen die Pipeline und vereinzelt Anschläge Mitte der 1980er Jahre. Der Transport von hochgiftigen Treibstoffen wie Kerosin oder dem noch giftigeren NATO Universaltriebstoff JP8 birgt erhebliche Gefahren für die Umwelt entlang der Strecke. Bedenklich ist, dass die Pipeline auch durch Wasserschutzgebiete (z.B. bei Bodelshausen) verläuft.

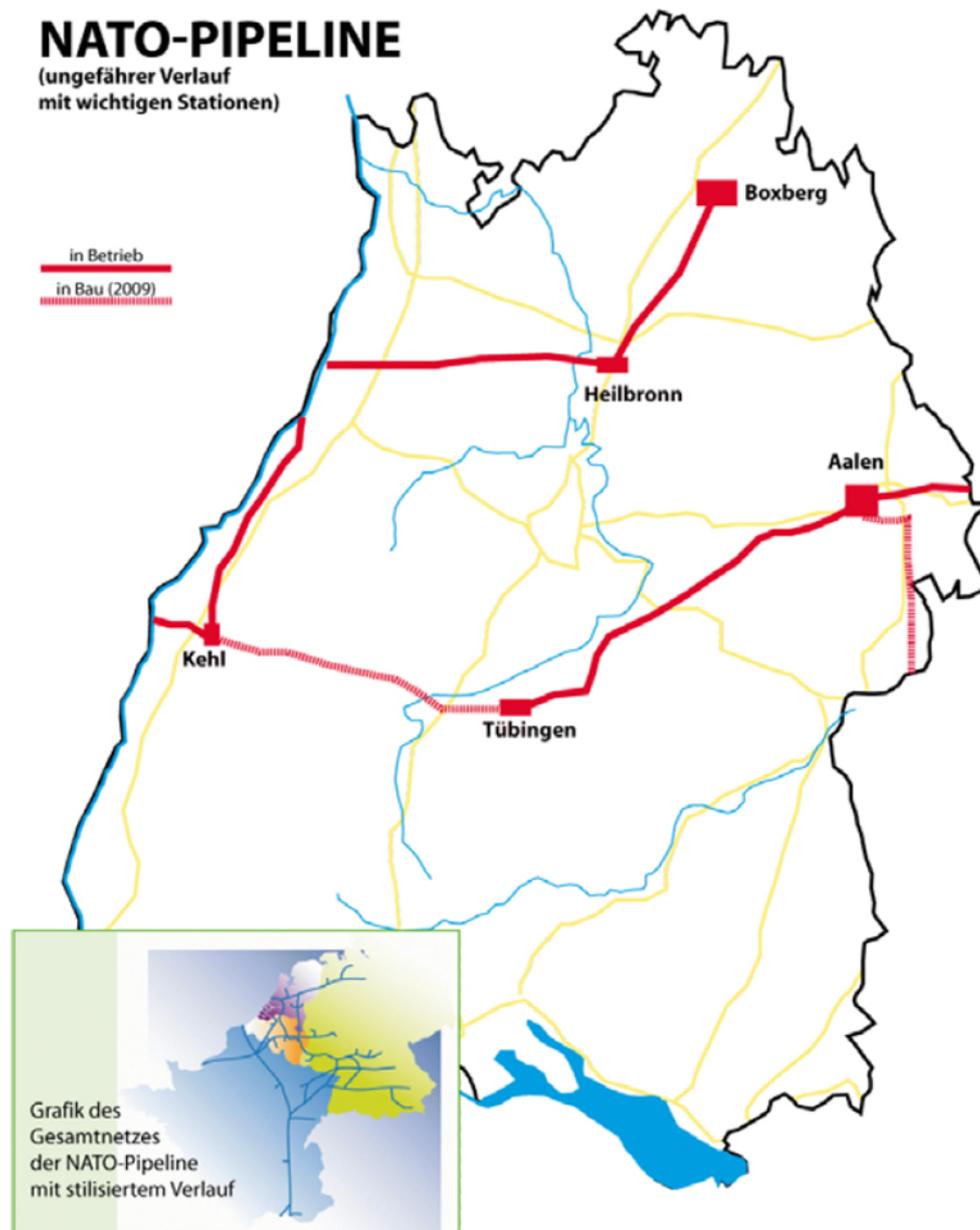


Abb. 46: Streckenverlauf (ungefähr) des Central European Pipeline System CEPS in Baden-Württemberg; Quelle: (IMI e.V. 2012)

4 Zukünftige Entwicklung des Energiesystems in Baden-Württemberg

Mit der Energiewende haben sich Deutschland und Baden-Württemberg vorgenommen, das bisherige Energiesystem in ein klimaneutrales Energiesystem umzubauen. Basis sollen die erneuerbaren Energien sein. Klare Weichenstellungen gibt es im Kraftwerksbereich. Hier ist der Ausstieg aus der Kernenergie und der Kohlenutzung beschlossen. Der verstärkte Einsatz erneuerbarer Energien – besonders der fluktuierenden Energien Solar- und Windenergie - führt zu einer stärkeren Notwendigkeit für einen Ausgleich in den Zeiten zu sorgen, in denen Sonne und Wind nicht ausreichend sind oder gar vollständig fehlen („Dunkelflaute“). Dies soll durch regelbare Energien, Technologie bzw. Mechanismen erfolgen wie Reservekraftwerke (mit Biomasse, Erdgas oder anderen, vor allem regenerativen Energieträgern wie Biomethan, Wasserstoff etc.) oder weiteren Flexibilitätsoptionen wie Speichern, Abregelungen oder Export/Import.

Der Weg zur Klimaneutralität bringt weitere Rahmensetzungen mit sich, z.B. im Bereich der Energieeffizienz. Weitere Zukunftsperspektiven für die Nutzung fossiler und auch regenerativer Ressourcen und die Vermeidung von prozessbedingten Emissionen bietet „Carbon Capture and Storage“ (CCS), „Carbon Capture and Use“ (CCU) bzw. eine Kombination aus beidem. Gerade im Bereich CCS/CCU wurden aktuell von der Bundesregierung neue Weichenstellungen auf den Weg gebracht und Hürden für die Nutzung von CCS beseitigt. Darüber hinaus besteht besonders bei der Speicherung von CO₂ aus biogenen Quellen die Möglichkeit, CO₂ aus der Atmosphäre zu entnehmen und damit zu einer Emissionsminderung bzw. CDR-Maßnahme (Carbon Dioxide Removal Technologie) beizutragen (Stichwort: Negative Emissionen).

4.1 Energiebedarf in Baden-Württemberg

Ausgangspunkt jeder Analyse und Planung für die zukünftige Energieversorgung und Energieinfrastruktur ist eine Abschätzung des zukünftig zu erwartendem Energiebedarf. Dieser ist von vielen Faktoren abhängig. Im Folgenden werden Daten aus Szenarioanalysen bzw. Abschätzungen vorgestellt. Die Projektionen gehen dabei grundsätzlich von einer Vielzahl von Antriebsfaktoren und Trends aus. Hierzu sollten insbesondere auch sogenannte Megatrends – also langanhaltenden, ggf. systemverändernden Entwicklungen mit großräumiger, teils globaler Dimension – betrachtet werden, da sie nahezu alle Lebensbereiche betreffen und sich dabei in veränderten Konsummustern, Wertvorstellungen oder Technologien ausprägen können.

Folgende Faktoren bzw. Erwartungswerte spielen im Bereich der Antriebsfaktoren für die Energieversorgung – auch im Kontext der aktuellen Weltlage (Klimawandel, Globalisierung, geopolitische Lage etc.) – eine besondere Rolle:

- Die Bevölkerungsentwicklung
- Die wirtschaftliche Entwicklung, auch differenziert nach Sektoren und Bereichen, besonders zu Industrie, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD), Verkehr, Haushalte
- Die Entwicklungen (technische, sozioökonomisch etc.) in Bezug auf Energieeinsparung und Energieeffizienz

- Die Entwicklung stromintensiver Anwendungen (Elektrifizierung), u.a. in den Bereichen E-Mobilität, Wärmepumpen, Wasserstoffherzeugung, Industrieanwendungen
- Die Entwicklungen und Technologien zur Wärmebereitstellung
- Die Entwicklungen und Technologien im Bereich Mobilität und Transport
- Der Bedarf und die Aufteilung an Energieträgern, u.a. Öl, Gas, Wasserstoff

Für das Ziel der Landesregierung Baden-Württemberg zur Minderung der THG-Emissionen bis 2040 (siehe Erläuterung a.a.O.: unter anderem mit 65% Emissionsreduktion bis 2030 ggü. 1990, Netto-Null-Emissionen 2040; Kernenergieausstieg und Kohleausstieg gemäß Gesetzeslage, Basisjahr 2019) hat ein Forschungskonsortium unter Leitung des Zentrum für Solarenergie und Wasserstoffforschung ein Szenario des Energieverbrauchs vorgelegt (ZSW und Partner 2022, ZSW und Partner 2023).

Der Endenergieverbrauch bis 2040 gemäß diesem Zielszenario ist in Abb. 47 (nach Sektoren) und in Abb. 48 (nach Energieträgern) grafisch dargestellt.

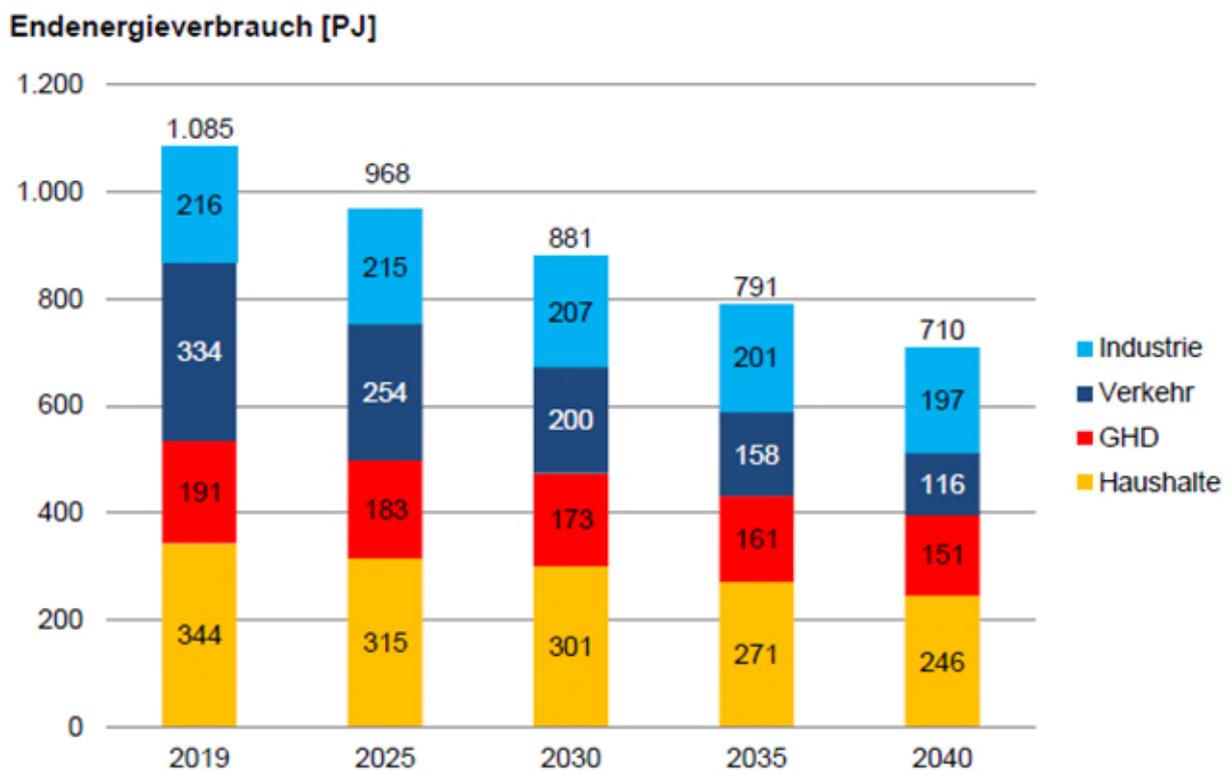


Abb. 47: Entwicklung des Energieverbrauchs (Endenergie) in Baden-Württemberg bis 2040 im Zielszenario nach Sektoren. Quelle: (ZSW und Partner 2022)

Endenergieverbrauch [PJ]

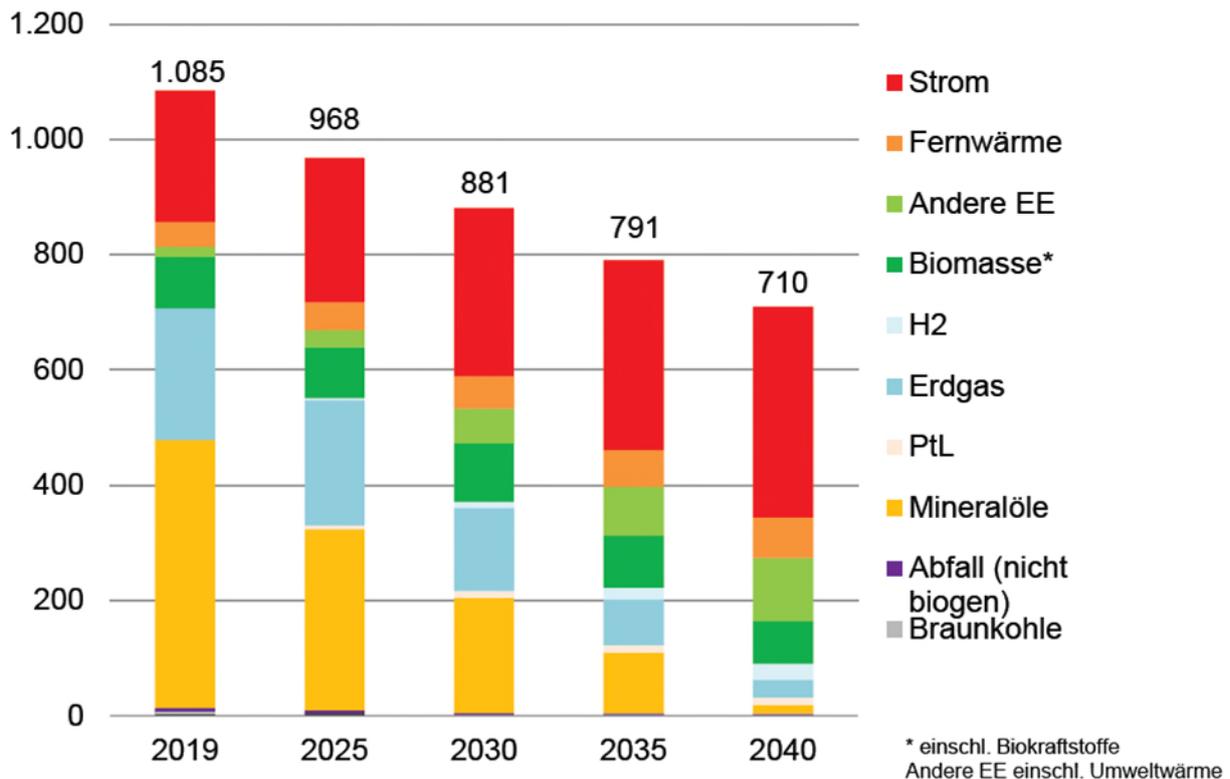


Abb. 48: Entwicklung des Energieverbrauchs (Endenergie) in Baden-Württemberg bis 2040 im Zielszenario nach Energieträgern. Quelle: (ZSW und Partner 2022)

Danach ist für dieses Szenario erkennbar, dass:

- Der Endenergieverbrauch bis 2030 mit -20% insgesamt deutlich absinken soll, von 1.085 PJ (2019) bis auf 710 PJ (2040). 2022 lag der Endenergieverbrauch bei 982 PJ bzw. 273 TWh (UM BW 2023b).
- Für die Absenkung des Energieverbrauchs vorwiegend der Bereich Haushalte (über die Gebäudesanierung) und der Verkehr, v.a. durch verstärkte Elektrifizierung, herangezogen werden sollen.
- Besonders der Mineralölverbrauch bis 2030 einen deutlich geringeren Anteil am Endenergiebedarf ausmachen und annähernd halbiert werden soll
- Der Stromverbrauch bis 2030 mit + 20% und bis 2040 um insgesamt etwa + 50% deutlich steigen wird
- Der Gasverbrauch (ohne Anteil zur Stromerzeugung) bis 2030 deutlich absinken soll, auch darüber hinaus bis 2040
- Der Wasserstoffverbrauch erst ab 2030 stärker steigen wird

Die Frage wie hoch der Bedarf an (grünem) Wasserstoff in Baden-Württemberg zu welchem Zeitpunkt sein wird, ist Gegenstand vieler Diskussionen. Der Bedarf ist dabei u.a. vom zukünftigen Preis bzw. weiteren teils weltwirtschaftlichen Rahmenbedingungen abhängig. Zum Bedarf an Wasserstoff in Baden-Württemberg hat eine in 2023 erstellte Studie⁴⁰ ermittelt, dass er zwischen

⁴⁰ <https://www.plattform-h2bw.de/h2-bedarf>

2025 und 2040 bereits doppelt so hoch sein soll wie zwei Jahre zuvor angenommen. Er soll 2032 bei 52 TWh, 2035 bei 73 TWh und 2040 schon bei 91 TWh liegen. Mit 40 TWh (2035) und 53 TWh (2040) soll der Energiesektor dabei der größte Wasserstoffverbraucher sein. Der Bedarf im Verkehrssektor wird im Vergleich dazu begrenzt sein - vor allem bei schweren Nutzfahrzeugen. Diese Ergebnisse werden gestützt durch die Arbeiten zum Netzentwicklungsplan Strom (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) 2012; FNB Gas 2024; 50Hertz Transmission GmbH et al. 2019; 50Hertz GmbH und Partner 2023), der für Deutschland ebenfalls eine Abnahme des (End-)Energiebedarfs, eine Zunahme des Strombedarfs und einen erst nach 2030 zunehmenden starken Bedarf an Wasserstoff annimmt.

4.2 Ausbauziele der Energieerzeugungsanlagen in Baden-Württemberg

Aufbauend auf den energiewirtschaftlichen und klimapolitischen Vorgaben ist in der Studie von (ZSW und Partner 2022) auch der erforderliche Ausbau der Energieversorgungsanlagen in Baden-Württemberg abgeschätzt worden. Danach sollen für die Stromerzeugung bis zum Zieljahr der Netto-Null-Emissionen 2040 insgesamt 47,5 GW an Photovoltaik-Leistung und 12,1 GW an Windleistung (onshore) installiert sein (ZSW und Partner 2022). Insgesamt soll danach der Anlagenpark zur Stromerzeugung bis 2030 eine Leistung von 39,1 und bis 2040 eine Leistung von 68,5 GW bereitstellen.

Die prognostizierte Leistung der einzelnen Technologien und Energieversorgungsalternativen sind in Tab. 12 dargestellt.

Tab. 12: Prognose der installierten Leistung in GW zur Stromerzeugung für das Zielszenario Baden-Württemberg und nötiger Zubau zw. 2020 und 2040. Quelle: (ZSW und Partner 2022)

[GW]	2019	2020	2025	2030	2035	2040	Zubau- rate/a**
Kernenergie	2,7	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	-
Kohle	5,5	5,5	4,1	0,0	0,0	0,0	-
Erdgas/Wasserstoff *	2,6	2,6	2,4	4,6	5,3	5,4	0,14
Windenergie	1,6	1,6	2,9	6,1	9,5	12,1	0,53
Photovoltaik	6,3	6,9	12,1	24,6	36,6	47,2	2,02
Wasserkraft	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,00
Biomasse	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,8	0,00
davon Biogasanlagen	0,58	0,62	0,64	0,57	0,51	0,45	-0,01
davon Holzheizkraftwerke	0,20	0,20	0,20	0,35	0,35	0,35	0,01
Geothermie	0,0	0,0	0,01	0,05	0,08	0,10	0,01
Sonstige	2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9	-0,01
Summe	22,3	21,6	25,3	39,1	55,2	68,5	2,35

* einschließlich Mineralöl

** IER eigene Berechnung für 2020 – 2040 in GW pro Jahr

Auch im Netzentwicklungsplan Strom 2037/2045 (Version 2023) der Übertragungsnetzbetreiber (50Hertz GmbH und Partner 2023 bzw. 50Hertz Transmission GmbH et al. 2024 (Stand 2025)) ist im Szenariorahmen (Kap. 2) der Ausbaupfad für Energietechnologien für alle Bundesländer berechnet.

Für Baden-Württemberg kommt der NEP Strom in den verschiedenen Szenarien auf folgende Ausbauleistungen für PV, Wind onshore, Biomasse und Erdgas/Wasserstoff (in GW):

Szenario	A 2037 / B 2037	A2045 / B 2045	C 2045
PV	47,1	54,9	61,2
Wind onshore	9,9	10,1	12,2
Biomasse	0,5	0,2	0,2
Erdgas/ Wasserstoff	3,8	3,2	3,2

Beide Quellen kommen damit zu ähnlichen Größenordnungen und so kann der Ausbaukorridor für die Photovoltaik bis 2045 bei 50- 60 GW (ggf. auch darüber) und für die Windenergie bei ca. 12 GW gesetzt werden.

Die installierte Leistung und erzeugte Energie lassen sich über die Vollaststunden miteinander verrechnen. Die Zielsetzung für den erzeugten Strom sind nachfolgend in Tab. 12 dargestellt.

Tab. 13: Stromerzeugung in TWh gemäß der Ausbauziele für (erneuerbare) Energien in Baden-Württemberg für den Klimaschutzpolitischen Zielkorridor bis 2040; Datengrundlage: (ZSW und Partner 2022) und (Landtag von Baden-Württemberg 30.09.2022)

[TWh]	2019	2020	2025	2030	2035	2040
Kernenergie	21	11,1	0	0	0	0
Kohle	11,7	8,8	6,7	0	0	0
Erdgas	3,9	3,9	5,3	7	4,5	0
Mineralöl	0,4	0,4	0,2	0,2	0,1	0
Abfall	0,5	0,5	0,7	0,6	0,4	0,2
Sonstige	1,9	1,6	2,7	3	3,1	3,1
Gesamt fossile Energieträger	39,4	26,3	15,6	10,8	8,1	3,3
Wasserstoff	0	0	0	0,9	3,7	7,5
Windenergie	2,9	3	5	12,5	21	28,2
Photovoltaik	5,7	6,4	11,1	22,6	34	43,6
Wasserkraft	4,5	4,1	4,5	4,5	4,5	4,5
Biomasse	4,6	4,7	3,8	3,8	3	2,4
Gesamt Erneuerbare Energien*	17,7	18,2	24,4	44,3	66,2	86,2
Netto Stromimporte	14,9	21,4	35,6	32,8	25,4	21,5
Gesamt Erzeugung in Baden-Württemberg	57,1	44,5	40,0	55,1	74,3	89,5
Gesamt Erzeugung und Importe	72	65,9	75,6	87,9	99,7	111

*Ohne Geothermie, deren Beitrag als vernachlässigbar angesehen wird

5 Potenziale erneuerbarer Energien in Baden-Württemberg

Die Potenziale von Energieerzeugungssystemen werden üblicherweise unterteilt in a) theoretische, b) technische, c) ökonomische und d) erschließ- oder mobilisierbare bzw. nachhaltige Potenziale⁴¹. Der Begriff des technischen Potenzials – der in dieser Ausarbeitung auch verwendet wird - ist dabei am verlässlichsten, da zur Ermittlung relativ stabile technische Parameter verwendet werden, die wenig schwankend und volatil sind.

Die technischen Potenziale erneuerbarer Energien hängen im Wesentlichen ab von

- a) den Eigenschaften der Naturphänomene, auf denen sie basieren (Wind, Solarstrahlung, geothermische Wärmestrahlung etc.)
- b) den technischen Parametern von Technologien und Systemen zur Energie-Sammlung (Kollektoren), Umwandlung (Konversion) und ggf. auch Nutzung

Die Angaben zu den technischen Potenzialen von Energietechnologien liefern damit sozusagen den erreichbaren Korridor für den Ausbau und die Entwicklung der jeweiligen Energieform, und – soweit auch dynamische Angaben über die zukünftigen technischen Entwicklungsmöglichkeiten (z.B. Steigerung des Wirkungsgrades) eingerechnet sind, auch die Schwelle bzw. den Zielkorridor bis zu dem eine Technologie oder Energieform zukünftig ausgebaut werden kann. Grundsätzlich basiert die Angabe des technischen Potenzials auch auf technischen Grundlagen und Annahmen für die zukünftige Entwicklung (z.B. des Wirkungsgrades). Diese können bei Potenzialstudien bereits ausreichend berücksichtigt sein, insofern besteht meist keine unmittelbare Notwendigkeit, die Potenzialstudien laufend zu aktualisieren. Auch ältere Studien mit guten Annahmen über die zukünftige technische Entwicklung sind häufig weiter und langfristig gültig bzw. nutzbar.

Die Potenziale für erneuerbare Energien wurden von der Landesanstalt für Umwelt und im Rahmen des Energieatlas Baden-Württemberg zusammengestellt und sind auch unter www.energieatlas-bw.de einsehbar. Sie sind räumlich teils bis auf Gemeindeebene aufgegliedert.

Im Folgenden sind die Potenziale erneuerbarer Energien jeweils für jede Energietechnologie zusammenfassend und in Form von Kartenwerken, die die Verteilung und Raumnutzung der Potenziale zeigen, dargestellt.

5.1 Potenziale Solarenergie

5.1.1 Solar-Potenzial Dachflächen und Gebäude

Dachflächen und Gebäude haben hervorragende Voraussetzungen zur Nutzung von Solarenergie. Solarthermie und Photovoltaik konkurrieren hier aber ggf. um dieselbe Fläche. Die Ausrichtung (nach Süden) spielt heute nicht mehr die allein entscheidende Rolle. Auch West- oder Ostausrichtung sind günstig, da damit das Nutzungsprofil der Bewohnenden und Nutzenden – also der zeitliche Verlauf der Energienutzung über einen Tag – häufig besser abgebildet wird als bei einer

⁴¹ Siehe z.B. in Martin Kaltschmitt, Andreas Wiese, Wolfgang Streicher (Hrsg.) (2003): Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte; 3. Auflage; Berlin, Heidelberg, New York.

strikten Südausrichtung. Vorteile bestehen dort, wo eine hohe Gleichzeitigkeit von Erzeugung mit der PV-Anlage und Verbrauch des erzeugten Stromes vorliegt und damit auch eine geringe Notwendigkeit für eine Speicherung oder Abregelung der Erzeugung – insgesamt also eine wirtschaftlich günstige technische Konfiguration. Für Solaranlagen auf und an Gebäuden können sowohl Dächer als auch Fassaden eine Rolle spielen. Industriedächer bieten häufig ein hohes Potenzial durch große zusammenhängende Flächen. Die Methodik zur Erhebung der Potenziale von Gebäude-Solarenergie ist im Energieatlas Baden-Württemberg ausführlich beschrieben⁴².

Mit Stand Dezember 2020 weist der Energieatlas Baden-Württemberg für die Stromerzeugung aus Photovoltaik auf Dachflächen ein Potenzial von 61,5 GW aus (Tab. 14). Dach- und Fassaden-Anlagen sind hierbei nicht explizit unterschieden. Die installierte Leistung liegt bei 6,332 GW. Damit sind ca. 10% der möglichen Potenziale ausgenutzt und es ist ein hohes weiteres Ausbaupotenzial vorhanden.

Tab. 14: Potenzial für Dachflächen-Photovoltaik (PV) in Baden-Württemberg (Quelle: Energieatlas Baden-Württemberg) und installierte Leistung für 2022 (Quelle: UM BW 2023b)

Kategorie	Einheit	Potenzial [GWp]
Dachflächenpotenzial	GWp	61,5
Installierte Leistung 2022	GWp	8,3 (13,5%)
Verbleibendes Potenzial	GWp	53,2 (86,5%)
Anteile des Potenzials für Wohngebäude, öffentliche Gebäude, Industriegebäude	% (Anzahl)	60, 2, 10

Die Anteile des Potenzials für Wohngebäude, öffentliche Gebäude, Industriegebäude liegt (nach Abschätzung der Anzahl an Gebäuden) gemäß Energieatlas Baden-Württemberg bei 60% für Wohngebäude, 2% für öffentliche Gebäude und 10% für Industriegebäude. In Bezug auf die Leistung sieht diese Verteilung anders aus, da Industriegebäude in der Regel recht groß sind und entsprechend größere Anlagen unterbringen können.

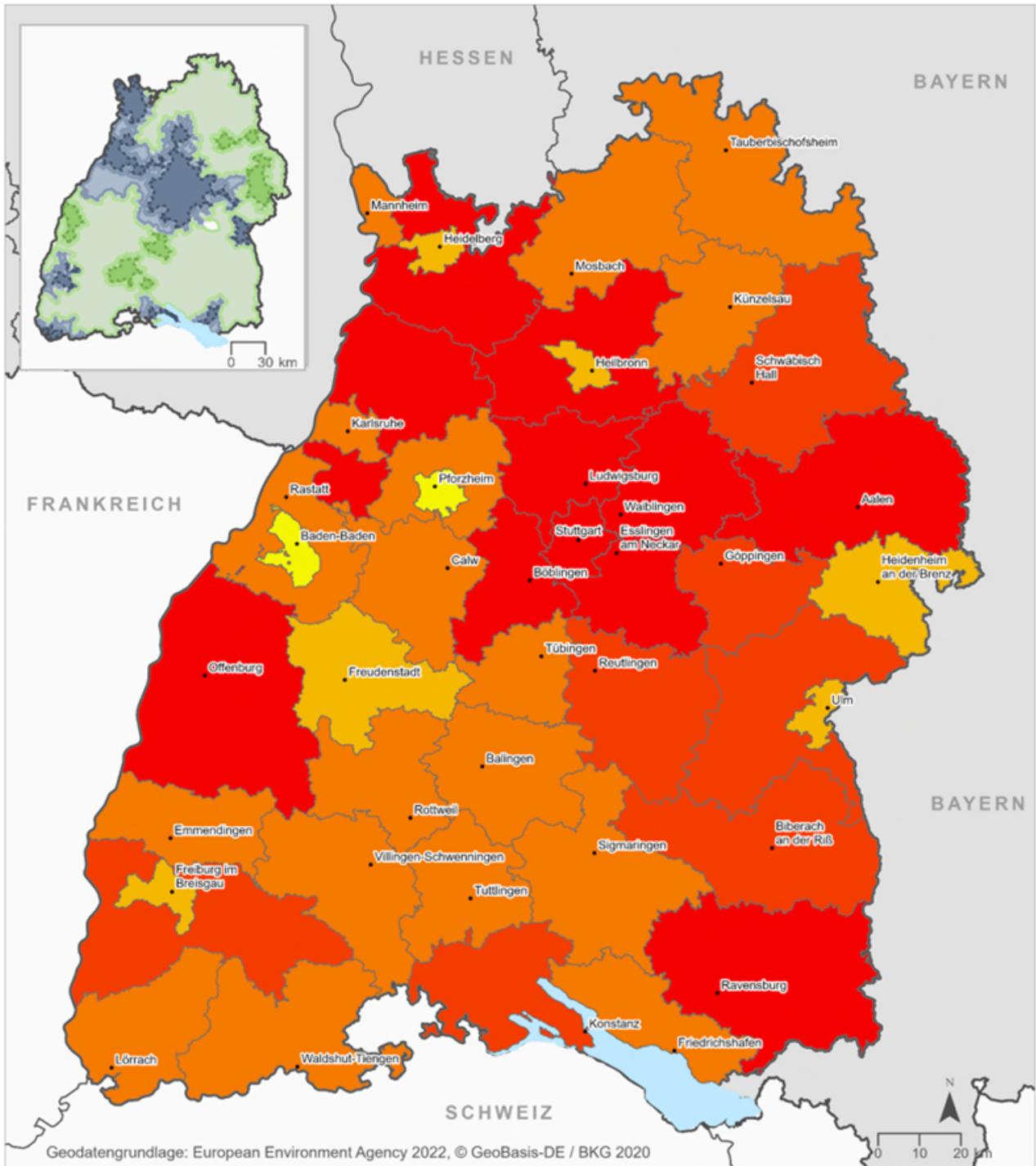
(Fluri et al. 2024) ermitteln in Ihrer Stromstudie für Baden-Württemberg ähnliche Ergebnisse. Bezugnehmend auf den Energieatlas BW kommen Sie zu einem Potenzial von 59,9 GW gesamt und einen möglichen Ertrag von 54.900 GWh. Über aktualisierte Randbedingungen sehen sie aber noch ein zusätzliches Potenzial von fast 20 GW und kommen auf ein Gesamtpotenzial von 79,8 GW mit 77 TWh Erzeugungspotenzial.

Die räumliche Verteilung der Potenziale in Baden-Württemberg hängt ab von der Verteilung der Solarstrahlung⁴³ und der Verteilung, Ausrichtung und Dichte der Bebauung.

In Abb. 49 ist die räumliche Verteilung der Potenziale nach Landkreisen unterteilt dargestellt.

⁴² Siehe <https://www.energieatlas-bw.de/sonne/dachflachen/potenzialanalyse/daten-und-berechnungsgrundlagen>

⁴³ Siehe <https://www.energieatlas-bw.de/sonne/dachflachen/hintergrundinformationen/solare-einstrahlung>



PV - Dachflächenpotenzial
Stand 2022 - km²

- 0 - 5
- 5 - 10
- 10 - 15
- 15 - 20
- 20 - 35

Datengrundlage: Energieatlas Baden-Württemberg 2023

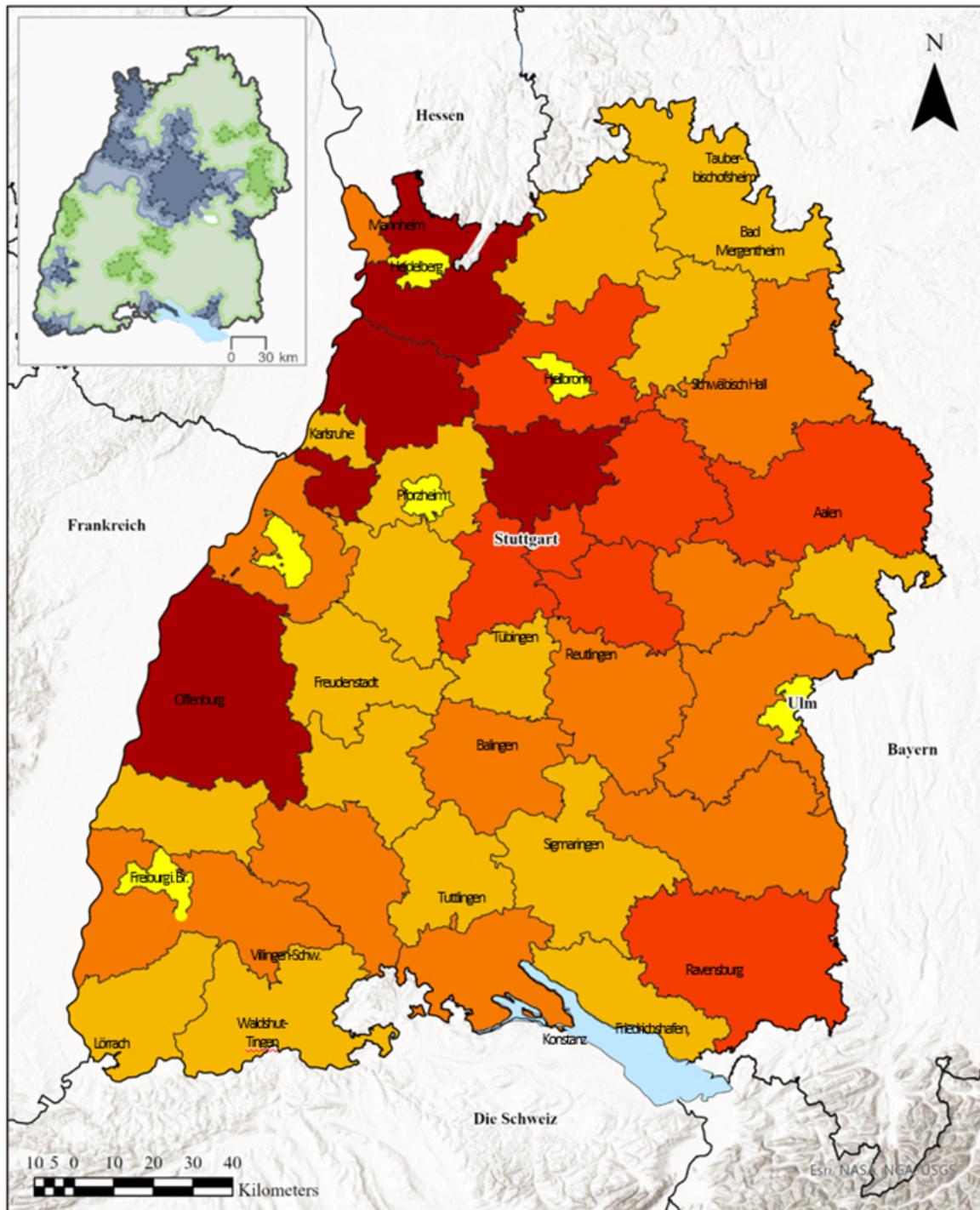
Raumkategorien LEP 2002

- Ländlicher Raum im engeren Sinne
- Verdichtungsbereiche im Ländlichen Raum
- Randzonen um die Verdichtungsräume
- Verdichtungsräume
- Gemeindefreies Gebiet

Universität Stuttgart
IER Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung

Abb. 49: Dachflächenpotenzial für Gebäude-Photovoltaik in Baden-Württemberg in km² (bei einer durchschnittlichen Leistung von 215 Wp/m² entspricht 1 km² einer Leistung von etwa 200 MW); Verteilung auf Landkreise. Quelle: Energieatlas BW.

Es wird deutlich, dass große Flächenpotenziale in den Kreisen rund um Stuttgart und Karlsruhe, am sonnenreichen Oberrhein (Ortenaukreis, Breisgau), im Ostalbkreis und auch in Oberschwaben (im Kreis Ravensburg) vorliegen. Die Unterschiede sind jedoch nicht sehr ausgeprägt. So können in allen Kreisen noch entsprechend bedeutende Potenziale gehoben und mehr Photovoltaik auf Dachflächen oder an Häusern installiert werden.



Ausbaupotenzial Gebäude-PV 2022
(Potenzial abzgl. aktuell inst. Leistung) in [MW]

- 1000 - 2000
- 2000 - 3000
- 3000 - 4000
- 4000 - 5000
- > 5000

Quelle: Marktstammdatenregister 04/2023

Raumkategorien LEP 2002

- Ländlicher Raum im engeren Sinne
- Verdichtungsgebiete im Ländlichen Raum
- Randzonen um die Verdichtungsgebiete
- Verdichtungsgebiete
- Gemeindefreies Gebiet

Universität Stuttgart
IER Institut für Energiewirtschaft und
Rationelle Energieanwendung

Abb. 50: Aktuell verfügbares Ausbaupotenzial (Differenz zwischen Potenzial und derzeit installierter Anlagenleistung) für Gebäude-Photovoltaik in Landkreisen in Baden-Württemberg in MW, Stand 2022, (Datenquellen für Potenziale: Energieatlas Baden-Württemberg, für PV-Anlagen: Marktstammdatenregister; Darstellung: IER).

Für PV auf Gebäuden ist die Differenz zwischen Potenzial und derzeit installierter Anlagenleistung in Abb. 50 für die Landkreise in Baden-Württemberg dargestellt (Datenquellen für Potenziale: Energieatlas Baden-Württemberg, für PV-Anlagen: Marktstammdatenregister; Darstellung: IER). Hiernach wird deutlich, dass in den vorgenannten Landkreisen bzw. Stadtkreisen Stuttgart, Karlsruhe, Ortenaukreis, Breisgau, Ostalbkreis und auch im Kreis Ravensburg die größten Potenziale für den weiteren Ausbau der PV-Anlagen an Gebäuden bestehen.

5.1.2 Solarpotenzial Freifläche

Bedingt durch den hohen Bedarf an erneuerbarer Energie ist es notwendig, die Solarenergie auch im Freiland auszubauen. Da keine Flächen in Anspruch genommen werden sollen, die dem Naturschutz vorbehalten sind oder eine besonders gute Qualität (Bodenwert) haben, ist im aktuellen EEG die Flächenkulisse für Freiflächenanlagen auf Konversionsflächen, Seitenrandstreifen entlang von Autobahnen und Schienenstrecken beschränkt. Jedoch sind auch sogenannte benachteiligte Gebiete gemäß EEG 2023 §3 Nr. 7 (zur Definition siehe Fußnote 11 und Kap. 3.2.1; Darstellung siehe Abb. 51) für die Nutzung von Freiflächen-Photovoltaik geeignet und möglich.

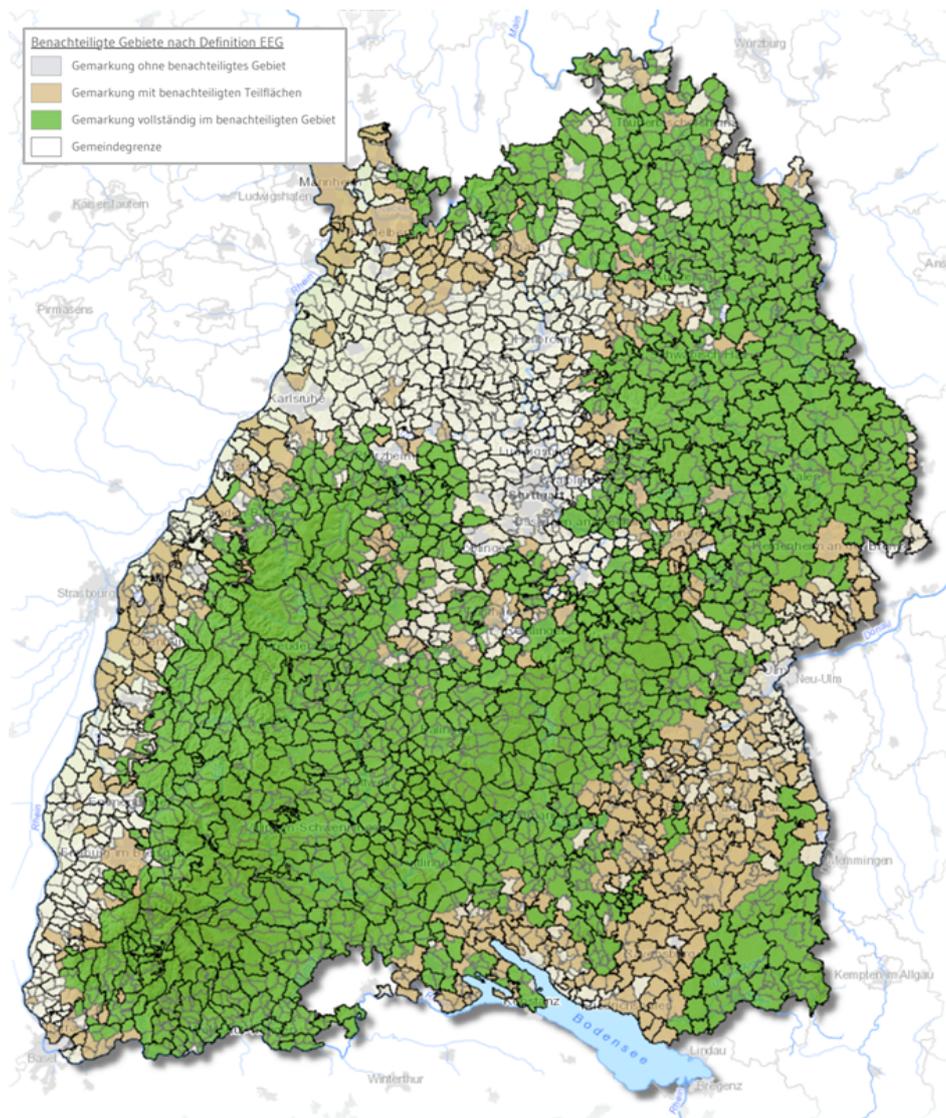


Abb. 51: Benachteiligte Gebiete in Baden-Württemberg gemäß EEG- Definition. Quelle: Energieatlas Baden-Württemberg

In Baden-Württemberg wurde durch die Freiflächenöffnungsverordnung (FFÖ-Vo) bei den benachteiligten Gebieten ein Zubau pro Jahr von bis zu 500 MW zugelassen (ca. 600 ha/a). Eine verbindliche Auskunft, welche Flurstücke zu den benachteiligten Gebieten in der Kulisse von 1986/1997 gehören, können jedoch ausschließlich die jeweils zuständigen Landratsämter erteilen. Der Energieatlas Baden-Württemberg unterscheidet hierzu in geeignete und bedingt geeignete Flächen. Bedingt geeignete Flächen sind potenziell geeignete Flächen, die von weichen Restriktionsflächen überlagert sind. Alle Flächen, die keine Überlagerung mit Restriktionsflächen haben, werden als geeignet bezeichnet. Unter weichen Restriktionsflächen werden u.a. verstanden:

- Biosphäregebiete
- Biotopverbundgebiete
- Generalwildwegeplan
- Landschaftsschutzgebiete
- Natura 2000 FFH und SPA-Gebiete
- Wasserschutzgebietszonen II

Weiterhin gibt es in Baden-Württemberg auch Sonderflächen, auf denen PV-Freiflächenanlagen unter bestimmten Bedingungen möglich sind. Hierzu zählen Baggerseen und Deponien.

Mit Stand der Erhebung von 2018 weist der Energieatlas Baden-Württemberg für das Segment der PV-Freiflächenanlagen ein Flächenpotenzial innerhalb weicher Restriktionsflächen von 304.509,3 ha (8,5% der Landesfläche) und insgesamt ein Flächenpotenzial von 689.423,61 ha (19,3% der Landesfläche) aus. Bei einer möglichen Leistungsdichte der Erzeugung von Solarstrom in PV-Freiflächenanlagen von durchschnittlich 450.000 kWh pro ha⁴⁴ entspräche dies bei vollständiger Flächennutzung einem theoretischen Erzeugungspotenzial von 137 TWh (bzw. 310 TWh für das gesamte Flächenpotenzial). Bei einer durchschnittlichen Belegungsdichte von 20%⁴⁵ dieser Fläche (Anteil der Bruttofläche, die mit PV-Modulen belegt sind), wären dies 27,4 TWh. Dies entspricht (bei angenommenen 1.000 Vollaststunden) einer Leistung von 27,4 GW. Mit dieser installierten PV-Leistung wären 55,8% der erforderlichen Gesamt-PV-Anlagenleistung zur Erfüllung des Zielszenarios Baden-Württemberg (siehe Tab. 12) abgedeckt.

Das Potenzial an Freiflächen-PV-Anlagen in Baden-Württemberg auf benachteiligten Gebieten bzw. Seitenrand- und Konversionsflächen ist in Tab. 15 dargestellt.

⁴⁴ Siehe <https://solarenergie.de/photovoltaikanlage/arten-von-pv-anlagen/photovoltaik-freiflaechenanlagen>

⁴⁵ Eigene Annahme

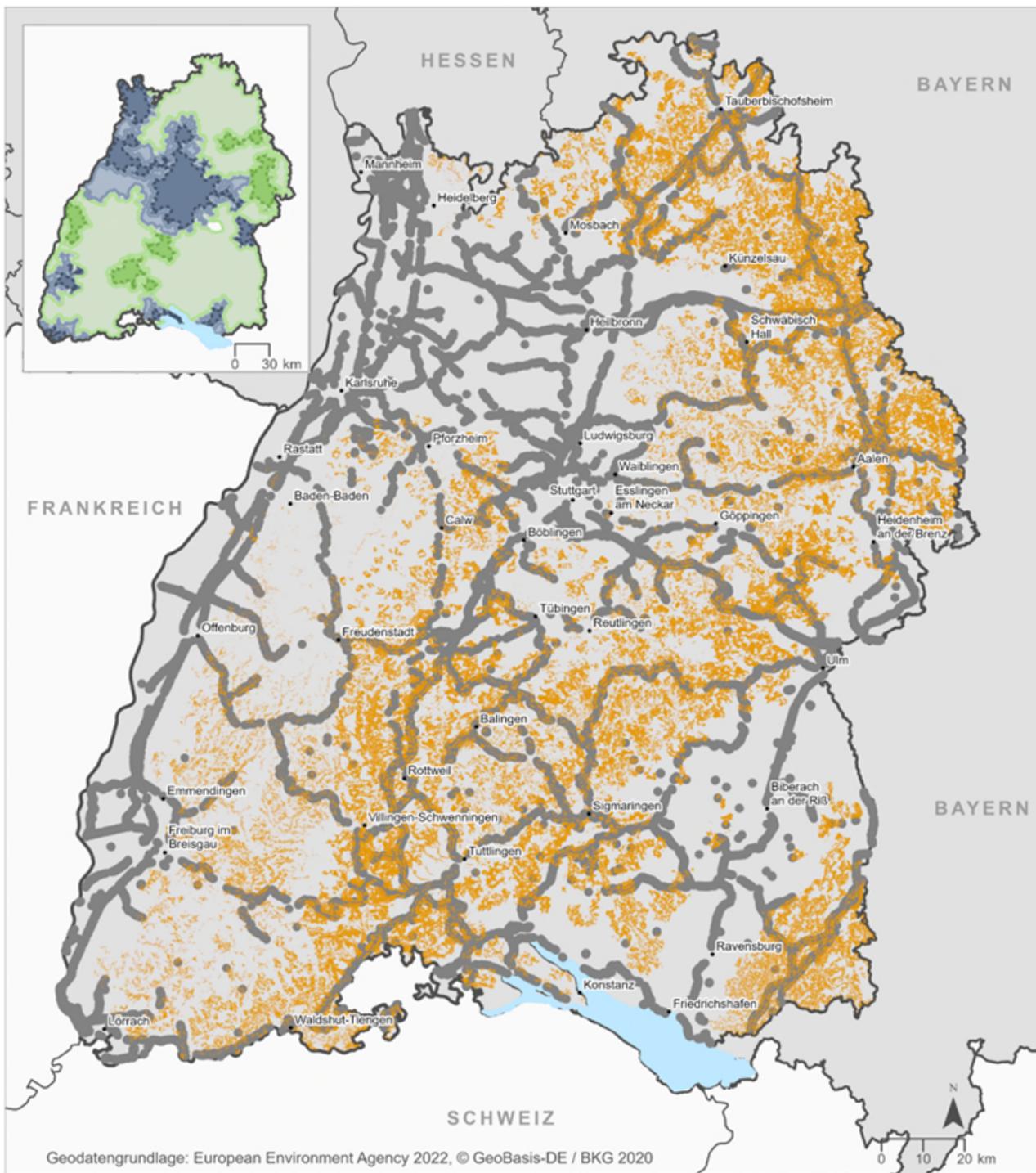
Tab. 15: Potenzial Freiflächen-PV in Baden-Württemberg (eigene Rechnung nach Energieatlas Baden-Württemberg)

	Einh.	Gesamt geeign. Fläche	Davon mit weichen Restriktionen	Davon ohne Restriktionen
Freiflächenpotenzial - PV (FFPV)	ha	689.423	304.509	384.914
Davon geeignet auf Ackerland in benachteiligten Gebieten	ha	380.560 (55,2%)	130.330 (42,8%)	250.232 (65,1%)
Davon geeignet auf Grünland in benachteiligten Gebieten	ha	281.974 (40,9%)	162.912 (53,5%)	119.062 (30,9%)
Davon geeignet für Seitenrandstreifen	ha	26.198 (3,8%)	11.267 (3,7%)	14.931 (3,8%)
Davon geeignet für Konversionsflächen	ha	689 (0,1%)	305 (0,1%)	385 (0,1%)
Gesamt Energiepotenzial bei 20% Ausnutzung	TWh	620	274	346
Gesamt Energie-Leistungspotenzial	MWp	62.000	27.400	34.600

Grundsätzlich steht also ein sehr großes Potenzial an Flächen für die Errichtung von PV-Freiflächenanlagen zur Verfügung. Rein praktisch ist diese Fläche durch viele andere Faktoren begrenzt, insbesondere eine landwirtschaftliche Nutzung z.B. als Streuobstwiesen, die Überlassung als Fläche für vielfältige Naturschutzbelange; Grünland und Anderes. Es soll aber auch berücksichtigt sein, dass es für die Ansiedlung von PV-Freiflächenanlagen in der Bevölkerung nicht überall uneingeschränkte Zustimmung gibt und der Landschaftsschutz ein wichtiges Ziel darstellt.

(Fluri et al. 2024) sehen für PV-Freiflächenanlagen in Baden-Württemberg insgesamt ein Potenzial von 827 GW Leistung und von 827.000 GWh Erzeugungskapazität. Der größte Anteil hiervon wird beim Potenzial auf Acker-/Grünland gesehen, und zwar in der Größenordnung von 827 GWp (und 827 TWh Erzeugung). Dieses Potenzial wird in der vorliegenden Studie deutlich kleiner eingeschätzt und zwar in der Größenordnung von 20% der verfügbaren Fläche (s.o.). Daher wird vorliegend mit 27,4 GW_p innerhalb weicher Restriktionsfaktoren und 62 GW_p Gesamtpotenzial gerechnet.

Die Verteilung des Potenzials für PV-Freiflächenanlagen in Baden-Württemberg ist in Abb. 52 dargestellt. Es wird deutlich, dass große Freiflächenpotenziale vor allem im Nordosten und im mittleren Süden des Landes vorliegen. Bei den Konversionsflächen und Seitenrandstreifen liegt das größte Potenzial (> 12 – 15 km²) in den Kreisen Ortenaukreis, Karlsruhe, Rhein-Neckar, Schwäbisch Hall und Ravensburg. Bei den Acker- und Grünlandflächen liegen die höchsten Potenziale in Schwäbisch Hall, Ostalb, in das südliche Baden von Schwarzwald-Baar bis Ravensburg.



**PV-Freiflächenpotenzial
Stand 2018**

- PV Freiflächenpotenzial benachteiligte Gebiete
- PV Freiflächenpotenzial Seitenrandstreifen

Raumkategorien LEP 2002

- Ländlicher Raum im engeren Sinne
- Verdichtungsbereiche im Ländlichen Raum
- Randzonen um die Verdichtungsräume
- Verdichtungsräume
- Gemeindefreies Gebiet

Datengrundlage: Energieatlas Baden-Württemberg 2023



Abb. 52: Potenzialflächen für Freiflächen-Photovoltaik auf benachteiligten Gebieten und Seitenrandstreifen in Baden-Württemberg; Datenquelle: Energieatlas BW; Darstellung: IER

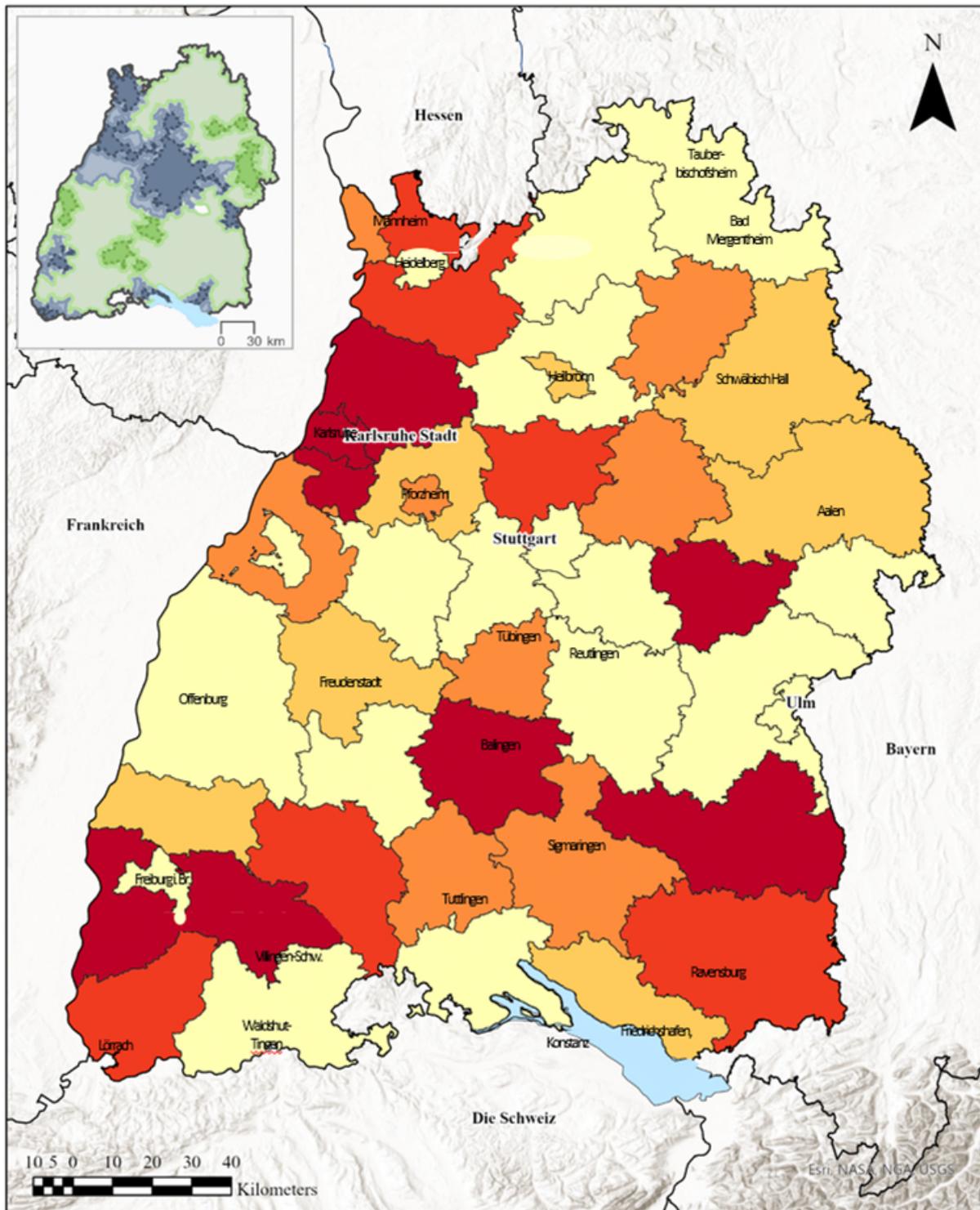
Siedlungsnaher Bereiche aus der Flächenkulisse können hierbei, sofern ein Wärmenetz in der Nähe ist, auch für Solarthermie-Freiflächenanlagen geeignet sein

5.1.3 Solarpotenzial auf Sonderflächen - Deponien und Baggerseen

Über die oben dargestellten PV-Freiflächenanlagen hinaus sind in den letzten Jahren auch PV-Anlagen auf Sonderflächen wie Deponien und Baggerseen in den Blick genommen worden.

Deponien

Aus der Aufstellung des Energieatlas gehen insgesamt 44 ehemalige, nicht anderweitig genutzte Deponiestandorte in Baden-Württemberg hervor. Die Verteilung der Potenzialflächen auf die Kreise ist in Abb. 53 dargestellt.



PV-Potenzial auf Sonderflächen - hier Deponien
Stand 2022, in [m²]

- 0 – 7.500
- 7.500 – 25.000
- 25.000 – 40.000
- 40.000 – 75.000
- 75.000 – 125.000

Quelle: Energieatlas Baden-Württemberg

Raumkategorien LEP 2002

- Ländlicher Raum im engeren Sinne
- Verdichtungsbereiche im Ländlichen Raum
- Randzonen um die Verdichtungsräume
- Verdichtungsräume
- Gemeindefreies Gebiet

Universität Stuttgart
IER Institut für Energiewirtschaft und
Rationelle Energieanwendung

Abb. 53: Potenzialflächen für Freiflächen-Photovoltaik in Baden-Württemberg auf Sonderflächen – hier Deponien; Datenquelle: Energieatlas BW; Darstellung: IER

Sie machen zusammen eine geeignete Potenzialfläche von 1,243 km² aus. Der Energieatlas Baden-Württemberg ermittelt für die Deponien ein wirtschaftlich erschließbares Potenzial von 280 MW_p (minimal) bis 1.130 MW_p (maximal). Danach wird deutlich, dass die Potenziale in Baden-Württemberg ungleich verteilt sind. Deponien stehen danach für Freiflächen-PV-Anlagen vorwiegend im Süden und im Nordwesten des Landes zur Verfügung.

Baggerseen

Weitere PV-Freiflächenanlagen können auf Baggerseen als Sonderflächen errichtet werden.

Der Energieatlas Baden-Württemberg ermittelt für Baggerseen, die sich in aktiver Auskiesung ohne begonnene oder vollzogene Renaturierung befinden, ein wirtschaftlich-praktisch erschließbares Gesamtpotenzial für folgende Szenarien auf Kreisebene berechnet:

- Szenario 100 % BD Min: Installation von FPV auf der gesamten Potenzialfläche des Baggersees mit einer Belegungsdichte (BD) von 0,6 MW_p/ha
- Szenario 10 % BD Max: Flächenbelegung von 10 % der Seefläche mit einer Belegungsdichte (BD) von 1,2 MW_p/ha
- Szenario 45 % BD Max: Flächenbelegung von 45 % der Seefläche mit einer Belegungsdichte (BD) von 1,2 MW_p/ha

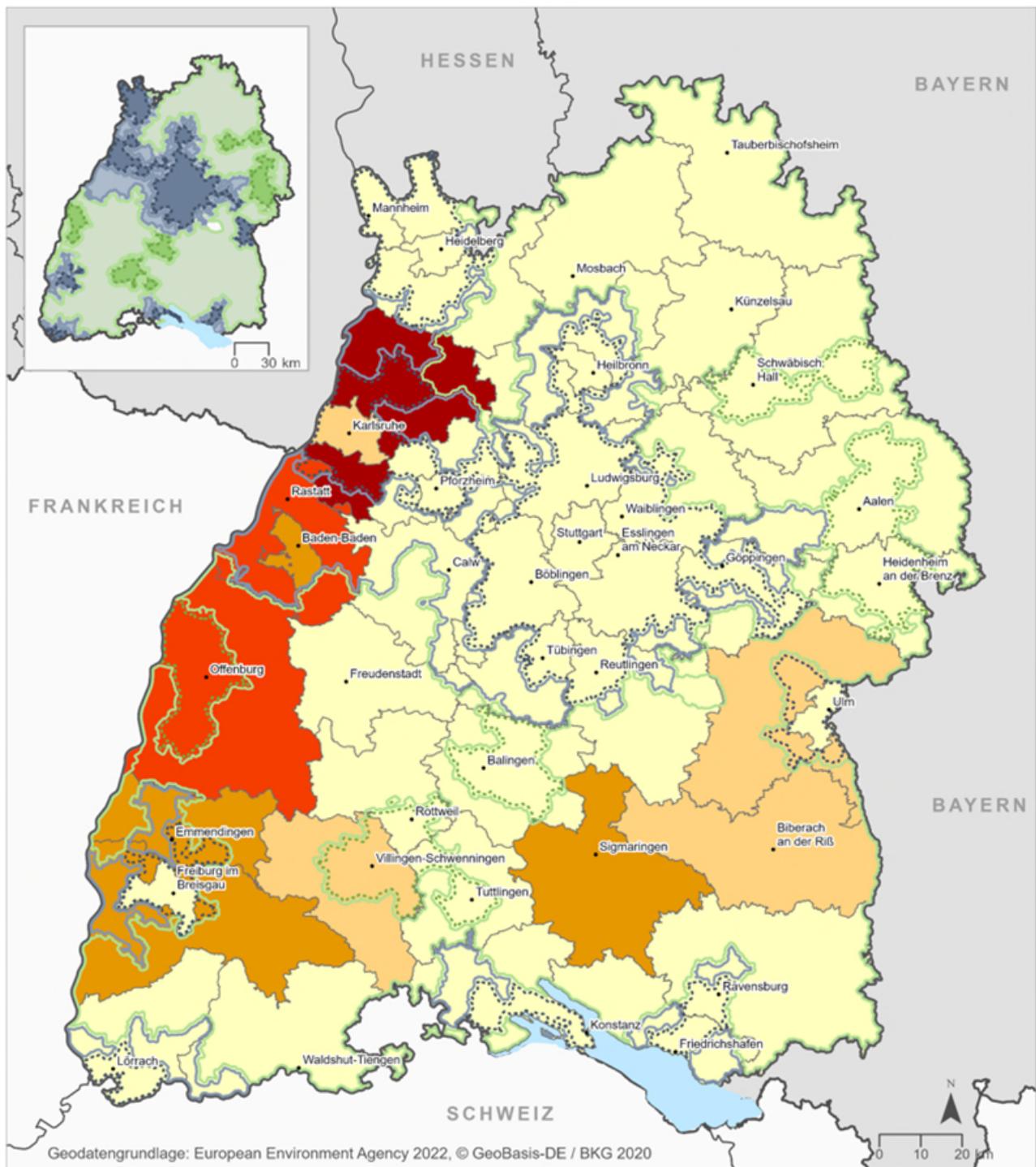
Dabei handelt es sich um das Gesamtpotenzial für Schwimmende PV-Anlagen (sog. Floating-PV- oder FPV-Anlagen) als Summe der geeigneten und bedingt geeigneten Baggerseen. Geeignete Baggerseen erfüllen im Vergleich zu bedingt geeigneten Baggerseen auch weiche Restriktionen (Einschränkungen). Zu den weichen Restriktionskriterien zählt eine Anzahl von Faktoren wie z.B. zum Schutz von Flora und Fauna (FFH-Gebiete, Pflege- und Entwicklungszonen o.ä.), hydrologische Kriterien (Quellenschutzgebiete, Überschwemmungsflächen) oder auch zur Vorbeugung von Nutzungskonflikten (u.a. für touristische und freizeitliche Nutzung).

Das Potenzial [in MW] ist in Tab. 16 und als Verteilung auf die Kreise in Abb. 54 dargestellt.

Tab. 16: Potenzial (wirtschaftlich erschließbar) für Photovoltaik auf Sonderflächen - Wasserflächen in Baden-Württemberg 2020 für 3 Szenarien. Quelle: Energieatlas Baden-Württemberg

Gewässerflächen	Einheit	Szenario		
		100% BD Min	45% BD Max	10% BD Max
Potenzial Gesamt	MW _p	1.070	1.130	280
Potenzial auf bedingt geeigneten Gewässerflächen	MW _p	880	920	220
Potenzial auf geeigneten Gewässerflächen	MW _p	190	210	60

Insgesamt ergibt sich eine große Bandbreite and Ergebnissen je nach Szenario. Das Gesamtpotenzial liegt zwischen 280 und 1070 MW_p. Im Verhältnis zum Potenzial auf regulären Freiflächen (siehe oben) ist es jedoch relativ gering.



Gesamtes Floating PV-Potenzial Szenario 45% BD Max
Stand 2021- [MWp]

- 0 - 5
- 5 - 25
- 25 - 65
- 65 - 300
- 300 - 400

Datengrundlage: Energieatlas Baden-Württemberg 2023

Raumkategorien LEP 2002

- Ländlicher Raum im engeren Sinne
- Verdichtungsbereiche im Ländlichen Raum
- Randzonen um die Verdichtungsräume
- Verdichtungsräume
- Gemeindefreies Gebiet



Abb. 54: Potenzialflächen für Freiflächen-Photovoltaik in Baden-Württemberg auf Sonderflächen – hier Baggerseen bzw. ‚Floating‘ PV, herangezogen wurde das Szenario 45 % BD Max aus dem Energieatlas Baden-Württemberg; Stand 2021, Datenquelle: Energieatlas BW; Darstellung: IER

Die räumliche Verteilung zeigt, dass die Hauptpotenziale entlang des Rheins liegen, vom LK Breisgau-Hochschwarzwald bis Karlsruhe. Dies liegt an vielen Baggerseen, die es dort aufgrund der geologischen Verhältnisse gibt. Sie entstanden auch im Zuge der Industrialisierung und machen heute mehr als 600 Baggerseen aus. Ebenso gibt es noch erhöhte Potenziale auf Baggerseen bzw. Seenflächen in den Kreisen Sigmaringen, Biberach und Alb-Donau-Kreis.

Parkplätze

Ein großes Potenzial für Photovoltaik besteht auch auf Parkplätzen. Diese sind eher im innerstädtischen Bereich angesiedelt und daher nicht bevorzugt Gegenstand der vorliegenden Zusammenstellung. (Fluri et al. 2024) haben dieses Potenzial analysiert und eine Größenordnung von insgesamt 2,617 GW Leistung ermittelt, was einer Stromerzeugung von 2.617 GWh entspricht.

Eine räumliche Analyse erfolgt für dieses Segment in der vorliegenden Auswertung nicht.

5.2 Potenziale Windenergie

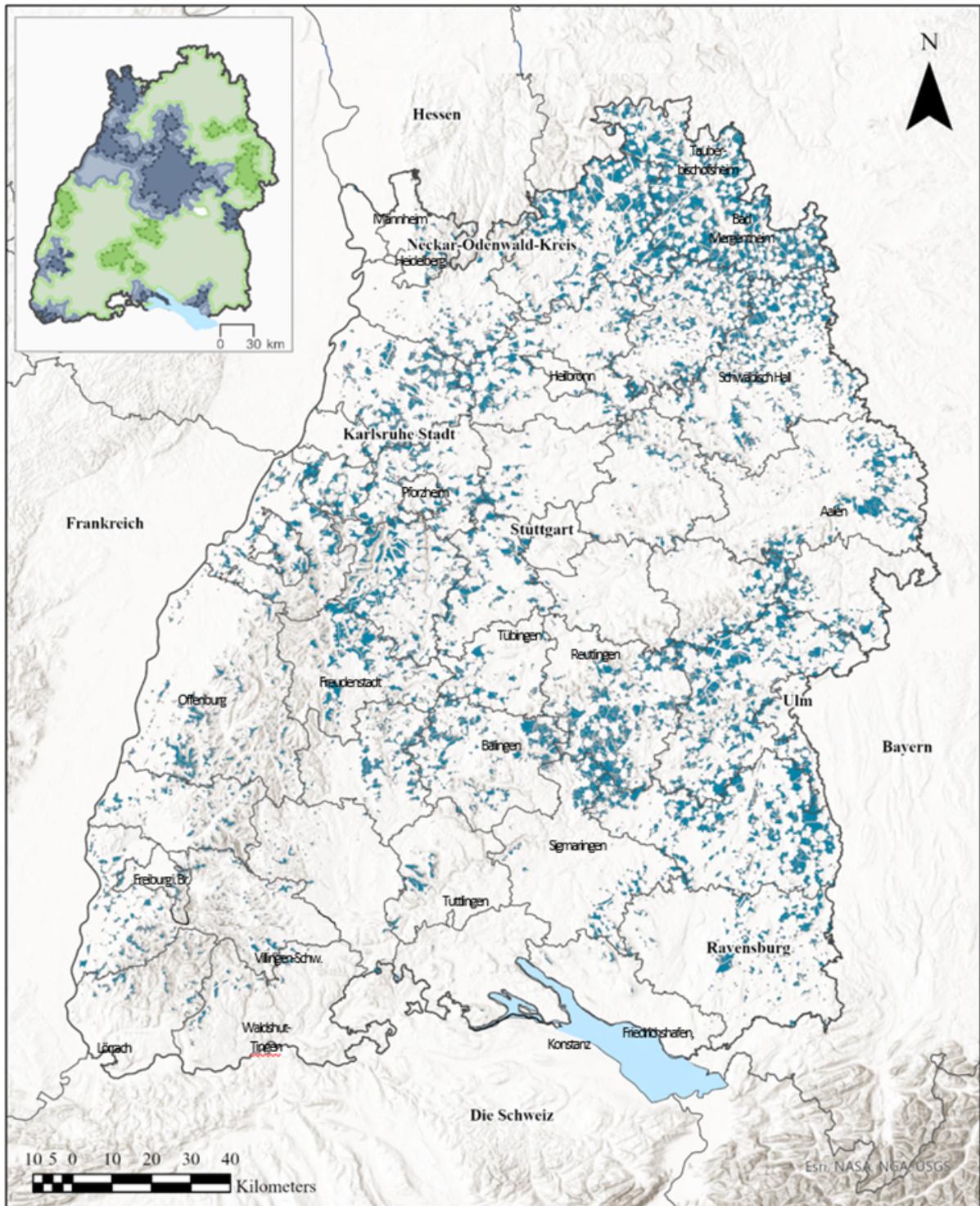
Die Windenergie stellt eine Schlüsselenergie für die Energiewende dar. Die Potenziale für Windenergie werden allgemein über die spezifische Windhöffigkeit an einem gegebenen Standort (Schritt 1) und eine Analyse der Standorteignung für die Windenergie (Schritt 2) ermittelt.

Wurde in früherer Zeit die Windhöffigkeit (Schritt 1) allein über die spezifische Windgeschwindigkeit am Standort ermittelt, wurde diese Grundlage im Jahre 2019 in Baden-Württemberg mit Hilfe des Windatlas Baden-Württemberg neu erarbeitet (AL-PRO 2019) und eine neue Methodik angewendet. Das zu erwartende durchschnittliche Windaufkommen, die "Windhöffigkeit", bei der ein wirtschaftlicher Betrieb neu zu errichtender Windenergieanlagen möglich ist, wurde dabei als „mittlere gekappte Windleistungsdichte“ definiert (siehe AL-PRO 2019, Kap. 0). Als geeignete Flächen wurden danach alle Bereiche Baden-Württembergs definiert, die eine mittlere gekappte Windleistungsdichte von mindestens 215 W/m² in 160 m Höhe über Grund haben.

Für die Potenzialermittlung (Schritt 2) wurden weitere technische, infrastrukturelle, rechtliche, wirtschaftliche und ökologische Vorgaben und Annahmen berücksichtigt (Kriterienkatalog). Hierbei werden geeignete Flächen von bedingt geeigneten Flächen unterschieden. Geeignete Flächen haben eine ausreichende Windleistungsdichte von größer als 215 W/m² in 160 m Höhe über Grund und liegen nicht in Ausschluss- und Restriktionsflächen. Bedingt geeignete Flächen haben zwar die ausreichende Windleistungsdichte (215 W/m² in 160 m Höhe über Grund) liegen aber innerhalb von Flächen die eine geringe oder nur bedingte Eignung an anderen Kriterien aufweisen. Die Nutzung dieser Flächen für Windenergieanlagen kann dennoch über eine Prüfung bekannter Flächenrestriktionen im Einzelfall hergestellt werden. Die genaue Methodik ist im Energieatlas Baden-Württemberg⁴⁶ und im Windatlas Baden-Württemberg (AL-PRO 2019) beschrieben.

Die Potenzialflächen für Windenergie sind in Abb. 55 in ihrer räumlichen Anordnung für Baden-Württemberg dargestellt.

⁴⁶ <https://www.energieatlas-bw.de/wind/potenzialanalyse>



Wind-Potenzialflächen gemäß Windatlas 2019
Stand 2018

■ Windpotenzialflächen

Raumkategorien LEP 2002

- Ländlicher Raum im engeren Sinne
- Verdichtungsbereiche im Ländlichen Raum
- Randzonen um die Verdichtungsräume
- Verdichtungsräume
- Gemeindefreies Gebiet

Quelle: Energieatlas Baden-Württemberg

 **Universität Stuttgart**
Institut für Energiewirtschaft und
Rationelle Energieanwendung

Abb. 55: Windpotenzialflächen in Baden-Württemberg gemäß Windatlas 2019 mit einer mittleren gekappten Windleistungsdichte von 215 Wp/m²); Datenquelle: Energieatlas Baden-Württemberg; Darstellung: IER.

Insgesamt ergeben sich rechnerisch Windpotenzialflächen in Höhe von 419.000 ha, die keinen harten Ausschlusskriterien unterliegt. Dies macht 20.000 Anlagenstandorte möglich und hat gemäß einer Referenzenergieberechnung ein jährliches Stromerzeugungspotenzial von 210.000 GWh (Quelle: Energieatlas Baden-Württemberg). Die Fläche entspricht insgesamt ca. 11,8% der Landesfläche Baden-Württemberg. Von dieser Gesamtfläche sind ca. 220.000 ha als windhöffig und geeignet charakterisiert, das sind 6,2% der Landesfläche. 199.000 ha – 5,6% der Landesfläche – sind, was die Windhöffigkeit anbetrifft, als Flächen mit Flächenrestriktionen charakterisiert (siehe auch Tab. 17).

Tab. 17: Übersicht Potenziale Windenergie. Quelle: Energieatlas Baden-Württemberg

	Einheit	Geeignete Flächen	bedingt geeignete Flächen (mit Flächeneinschränkungen)
Fläche	ha	220.000	199.000
Mögliche Anlagenstandorte	Anzahl	12.000	8.000
Netto-Jahresstromertrag	GWh	125.000	85.000

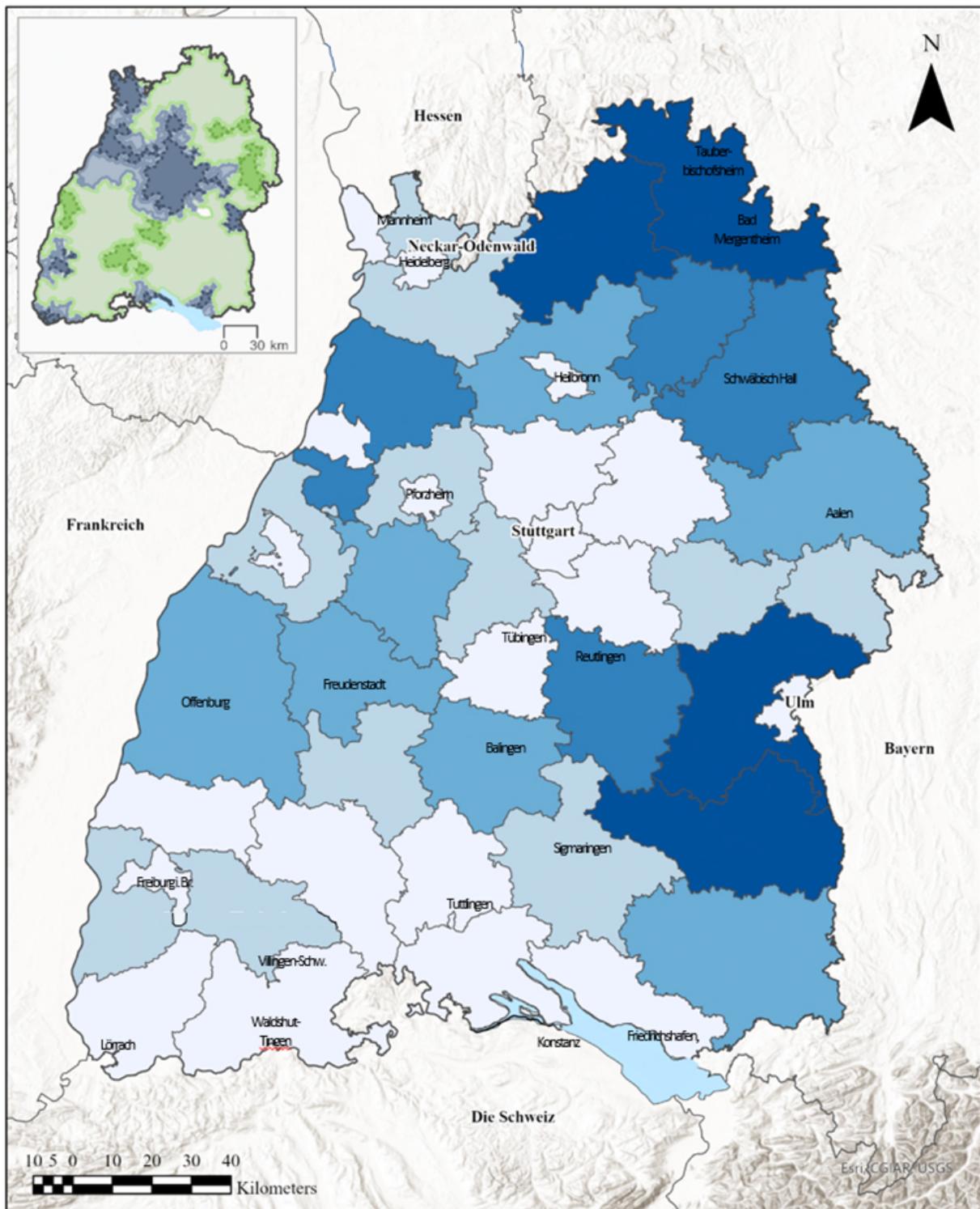
Dabei wurde angenommen, dass auf einem km² eine Leistung von etwa 20 MW und eine Stromerzeugung von knapp 60 GWh möglich ist.

Insgesamt korrespondiert diese Potenzialaufstellung mit (Fluri et al. 2024), die mit einem Potenzial von 210,4 TWh pro Jahr auf fast gleiche Stromerzeugung kommen wie in der vorliegenden Studie. (Fluri et al. 2024) gehen hierbei auch von 20.079 Windkraftanlagen aus. Bei einer angenommenen Größenordnung von 4,2 MW wäre dies ein Leistungspotenzial von 84 GW.

Im KlimaG Baden-Württemberg wurden für die Windenergie im Rahmen der Regionalen Planungsoffensive Flächenziele für den Ausbau der Windenergie festgelegt (siehe Kapitel 1.1).

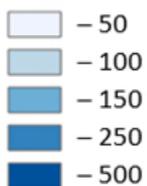
Die Ausweisung dieser Vorranggebiete erfolgt für die Windenergie zumeist durch eine Überlagerung der gemäß Potenzialatlas Baden-Württemberg (2019) identifizierten Potenzialflächen mit einer Windleistungsdichte (Windhöffigkeit) von 215 W/m² in 160 m Höhe über Grund und rechtlich sowie planerischen Ausschlusskriterien. Zu diesen gehören flächenhafte Situationen, die der Windenergie entgegenstehen wie Siedlungs- und Verkehrsflächen, geschützte Bereiche wie Naturschutzgebiete, Mindestabstandsflächen zu bestimmten Nutzungen, oder Vorrangflächen z.B. für Wohnungsbau oder Rohstoffabbau. Die Abstandsflächen zur Wohnbebauung liegen je nach Diskussionsstand in den Regionen zwischen 700 bis 1000 m.

Die Potenziale der Windenergie sind in nachfolgender Karte differenziert für die Landkreise in Baden-Württemberg dargestellt. Eine tabellarische Darstellung jeder einzelnen Fläche mit Angabe zu Größe und ggf. vorhandenen Flächenrestriktionen kann im Angebot der LUBW des Energieatlas bezogen werden.



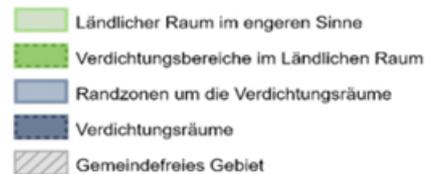
Windenergie-Potenzial pro Landkreis in [km²]

Stand 2018



Quelle: Energieatlas Baden-Württemberg

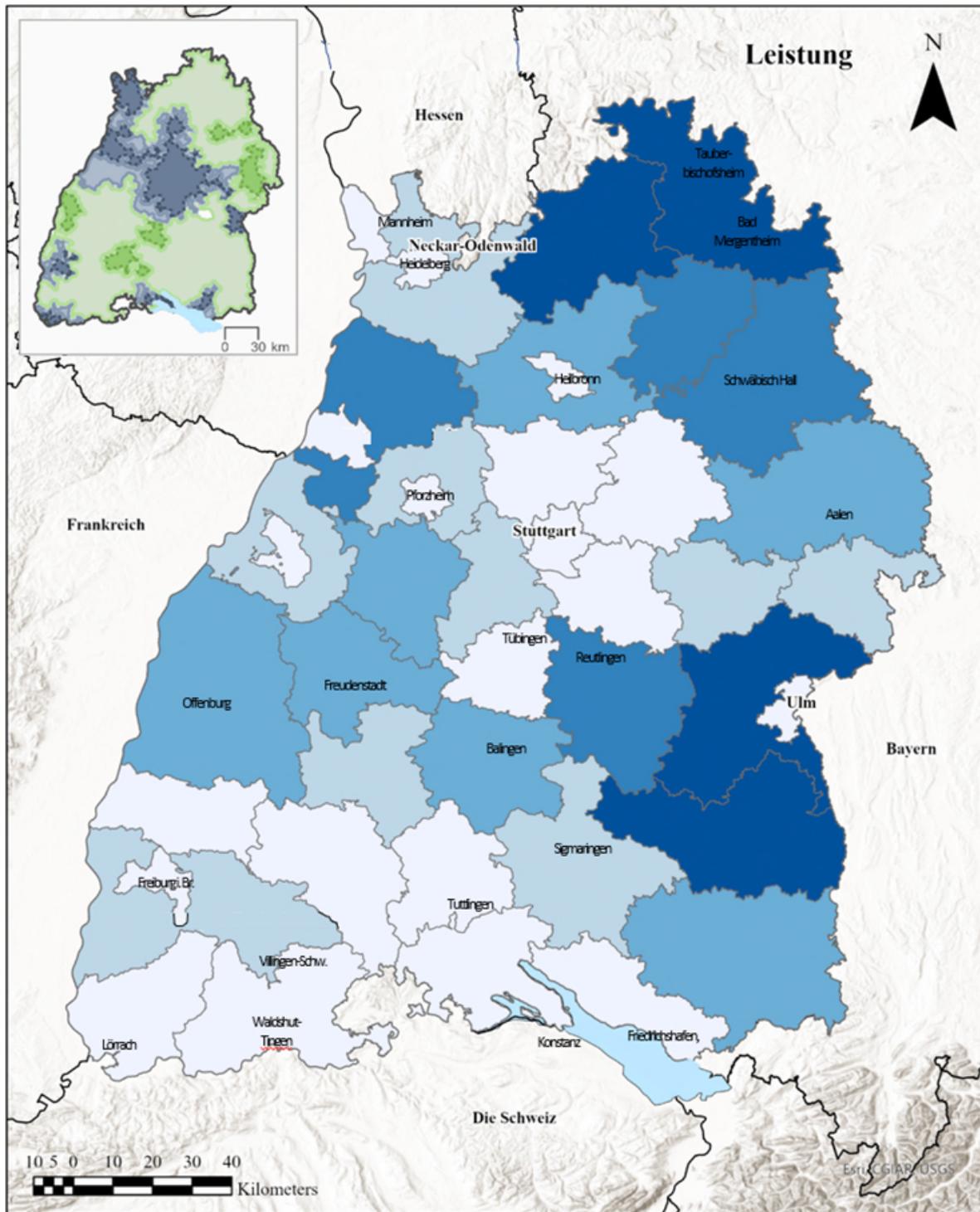
Raumkategorien LEP 2002



Universität Stuttgart
IER Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung

Abb. 56: Windenergie-Potenzial in Landkreisen in Baden-Württemberg in km²; Datenquelle: Energieatlas Baden-Württemberg. Darstellung: IER

Es wird deutlich, dass die größten Windenergiepotenziale im Nordosten Baden-Württembergs bestehen (Main-Tauber-Kreis, Schwäbisch Hall, Hohenlohe). Ebenso sind große Potenziale auf der Schwäbischen Alb (Alb-Donau-Kreis, Ostalb) sowie in Oberschwaben bis nach Ravensburg festzustellen. Auch der (Nord)Schwarzwald hat von Karlsruhe und dem Enzkreis bis über Calw und Ortenau erhebliche Potenziale zu verzeichnen.



Ausbaupotenzial Windenergie 2022
(Potenzial abzgl. aktuell inst. Leistung) in [km²]

- 25
- 50
- 80
- 140
- 240

Quelle: Energieatlas Baden-Württemberg

Raumkategorien LEP 2002

- Ländlicher Raum im engeren Sinne
- Verdichtungsbereiche im Ländlichen Raum
- Randzonen um die Verdichtungsräume
- Verdichtungsräume
- Gemeindefreies Gebiet

 **Universität Stuttgart**
Institut für Energiewirtschaft und
Rationelle Energieanwendung

Abb. 57: Verfügbares Ausbaupotenzial für Windenergie (Differenz zwischen Potenzial und bereits errichteten Windenergieanlagen) in den Landkreisen Baden-Württembergs Stand 2018; Datenquelle: Energieatlas Baden-Württemberg und Marktstammdatenregister; Darstellung: IER

Wenn die Potenziale mit den Kapazitäten der bestehenden Windenergieanlagen verglichen werden, wird deutlich, dass an den Standorten mit hohem Windenergiepotenzial auch bereits die meisten Windenergieanlagen errichtet wurden. Die Analyse der Differenzpotenziale zwischen bestehenden Anlagen und dem festgestellten Potenzial zeigt aber, dass auch dort noch weitere große Ausbaupotenziale bestehen (Abb. 57).

5.3 Potenziale Bioenergie

Das Potenzial für die energetische Nutzung der Biomasse hängt sehr stark von den gewählten Randbedingungen ab. Maßgebliche Potenzialstudien für Baden-Württemberg wurden von (Brellocks et al. 2013) und (Reinhardt et al. 2005) erstellt, die jeweils auch Nachhaltigkeitsanforderungen bzw. den technologischen Fortschritt (bis 2050) berücksichtigen. Für 2020 haben (Reinhardt et al. 2005) auf der Basis von Nachhaltigkeitszielen ein technisches Potenzial für Bioenergie in Baden-Württemberg gemäß nachfolgender Aufstellung ermittelt:

Tab. 18: Technisches Potenzial Bioenergie (in PJ/a) für verschiedene Biomassen in zwei Szenarien (Basis und Nachhaltig) in Baden-Württemberg für das Jahr 2020, Quelle: (Reinhardt et al. 2005)

Sortiment	Basisszenario	Nachhaltigkeitsszenario
Festbrennstoffe aus Reststoffen	67,8	90,5
Biogas aus Reststoffen	13,8	14,0
Gesamt Reststoffe ohne Energiepflanzen	82	104
Energiepflanzen max. (100% Festbrennstoffe, optional)	43,9	6,1
Energiepflanzen min. (100% Biokraftstoffe, optional)	22,5	3,1
Gesamt (mit Energiepflanzen max.)	126	110

Beim Basisszenario wurde weitgehend die bestehenden Technologien und politisch-ökologischen Vorgaben des Erstellungsjahres der Studie (2005) ohne darüber hinaus gehende steuernde Maßnahmen angenommen. Beim Nachhaltigkeitsszenario wurden eine Reihe an Nachhaltigkeitszielen aus den Bereichen des Natur-, Boden- und Gewässerschutzes sowie der Land- und Forstwirtschaft angenommen und dadurch die verfügbaren Ressourcenpotenziale limitiert.

Das Potenzial von Reststoffen liegt demnach im stärker durch Nachhaltigkeitsanforderungen eingeschränkten Szenario höher als im Basisszenario. Dahingegen liegen die Potenziale für Energiepflanzen im Nachhaltigkeitsszenario wesentlich niedriger als im Basisszenario. Dieser Trend ist in der aktuellen Debatte um die Bioenergie auch schon deutlich zu erkennen. Energiepflanzen sollen aktuell nicht mehr in dem Maße eingesetzt werden, wie in den vergangenen Jahren.

Das nachhaltig erschließbare Biomasse-Potenzial für 2050 (techn. Primärenergieträgerpotenzial) wurde auch von (Brellocks et al. 2013) abgeschätzt (Tab. 19).

Tab. 19: Zukünftig (2050) nachhaltig erschließbares Biomasse-Potenzial in Baden-Württemberg (Technisches Primärenergieträgerpotenzial in PJ/a), Quelle: (Brellocks et al. 2013)

Biomasse-Sortimente	PJ/a
Trockene Biomasse-Sortimente	150
Energieholz (KUP)	31
Getreidestroh	23
Waldrestholz	42
Holz- u. halmgutartige (trockene) Biomasse aus Landschaftspflege- und Naturschutzflächen, inkl. extensiv bewirtschaftetes Überschussgrünland	14
Altholz	20
Industrie- und Sägereestholz	20
Feuchte Biomasse-Sortimente	62
Energiepflanzen (Mais, GPS etc.)	24
Tierische Exkrememente	6,5
Intensiv bewirtschaftetes Überschussgrünland	5,5
Halmgutartige (feuchte) Biomasse aus Landschaftspflege- und Naturschutzflächen, inkl. extensiv bewirtschaftetes Überschussgrünland	4
Organische Abfälle (Industrie, Siedlung, Gewerbe)	3
Klär-, Deponiegas, Klärschlamm	7
Reststoffe aus Verarbeitung/Industrie	12
GESAMT	212

Im Vergleich beider Literaturquellen kommen Brellocks et al zu insgesamt höheren Potenzialen. Die meisten der Biomasse-Sortimente sind allerdings Reststoffe, die keinen Flächenbedarf mit sich bringen. Bei der Potenzialabschätzung für Energiepflanzen, die entsprechende landwirtschaftliche Produktionsflächen benötigen, liegen beide Quellen bei etwa ähnlichen Annahmen, nämlich ein Potenzial bei 22 – 40 PJ/a. Dies entspricht einem Energiepflanzenpotenzial von 6,1 - 11,1 TWh und einem Flächenbedarf für den Anbau von ca. 146.000 – 265.000 ha, was etwa 8,9 - 16,2% der landwirtschaftlichen Nutzfläche in Baden-Württemberg entspricht.

Hieraus wurde von (Brellocks et al. 2013) ein regeneratives Kohlenstoff-Potenzial – bestehend aus Biomasse und Kohlenstoff-haltigen Recyclingabfällen – abgeleitet, das zwischen 72,6 und 62,3 TWh/a je nach Szenario liegt.

Die Agentur für erneuerbare Energien hat in ihrem Potenzialatlas für Baden-Württemberg 2013 (Agentur für Erneuerbare Energien 2013) für die Bioenergie in Baden-Württemberg ein Gesamtpotenzial von 123 PJ errechnet (Tab. 20). Grundsätzlich ist hierbei zu unterscheiden, dass es sich um die Primärenergieträgerpotenziale handelt, die jeweils sowohl für die Strom- und auch Wärmeherzeugung (oder als Basis für C-haltige Kraftstoffe) genutzt werden können und damit entsprechend ihrer energetischen Wertigkeit sehr unterschiedliche Energiepotenziale (für Wärme, Strom und Kraftstoffe) haben.

Tab. 20: Bioenergie-Potenzial in Baden-Württemberg (Technisches Brennstoffpotenzial in PJ/a),
Quelle: (AEE 2013)

	Potenzial Baden-Württemberg [PJ]	Potenzial Deutschland [TJ]
Energieholz	76,4	511,4
Altholz	12,8	111,6
Energiepflanzen Ackerfläche zzgl. Grünland	31,6 0,8	521,5 22,4
Stroh	7,5	103,1
Tierische Exkremente	5,5	87,7
Bio- und Grünabfälle	3,0	22,5
Gesamt	137,6	1.380,2

Damit liegen die von (AEE 2011) ermittelten Potenziale Biomasse im Bereich von (Reinhardt et al. 2005).

Die Agentur für Erneuerbare Energien hat auch die Flächeninanspruchnahme für die Bioenergie und die räumliche Verteilung analysiert. Demnach waren ca. 116.000 ha an landwirtschaftlich genutzter Fläche (8,2%) der Bioenergie und ihrer Produktion an Bioenergieträgern (Mais, Energiepflanzen) zuzuschreiben (Abb. 58). Von 182.000 ha Fläche mit Maisanbau in Baden-Württemberg wurden 83.000 ha für die Substratversorgung von Biogasanlagen genutzt. Mais für Biogasanlagen belegte also nur 5,9% der landwirtschaftlich genutzten Fläche. Der Hauptteil des Maisanbaus geht in die Futtermittelproduktion Tierproduktion.

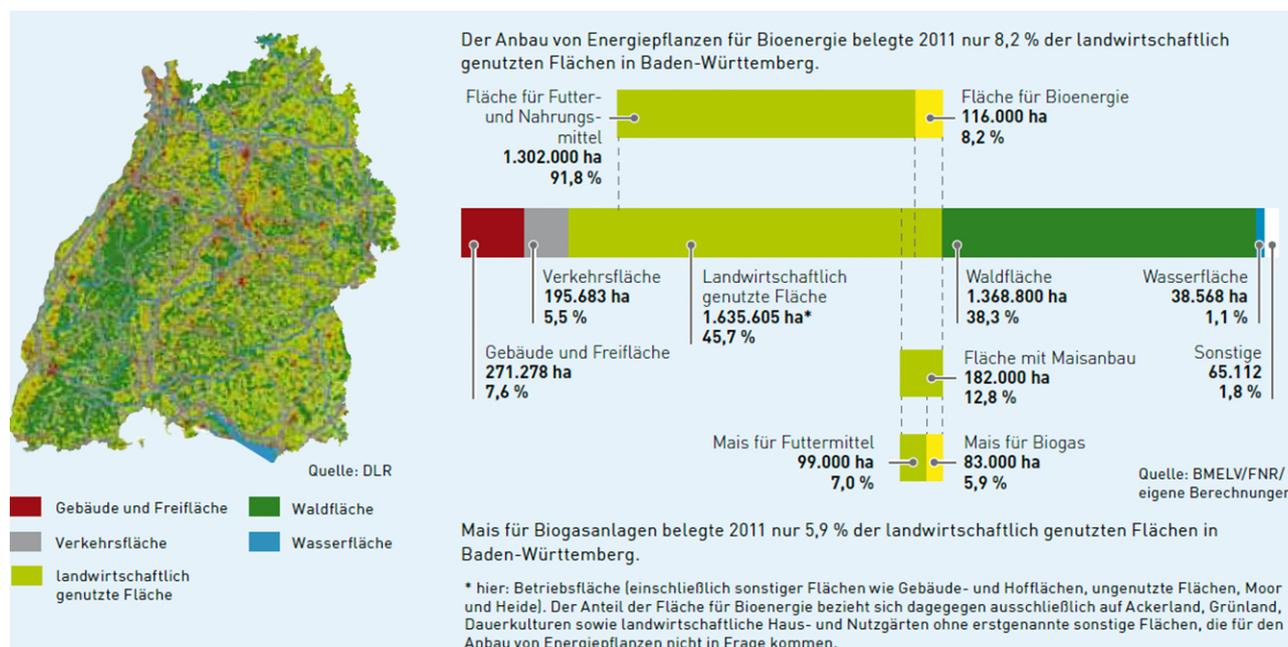


Abb. 58: Flächennutzung in Baden-Württemberg, inklusive Maisanbau und die Anteile für die Bioenergie. Quelle: (AEE 2013).

Die räumliche Verteilung der Rohstoffpotenziale verschiedener Biomassefraktionen sind ebenfalls in (AEE 2013) analysiert. In Abb. 59 sind das Energieholz (auf Basis der Waldflächenverteilung) und die Energiepflanzen auf landwirtschaftlichen Flächen dargestellt.

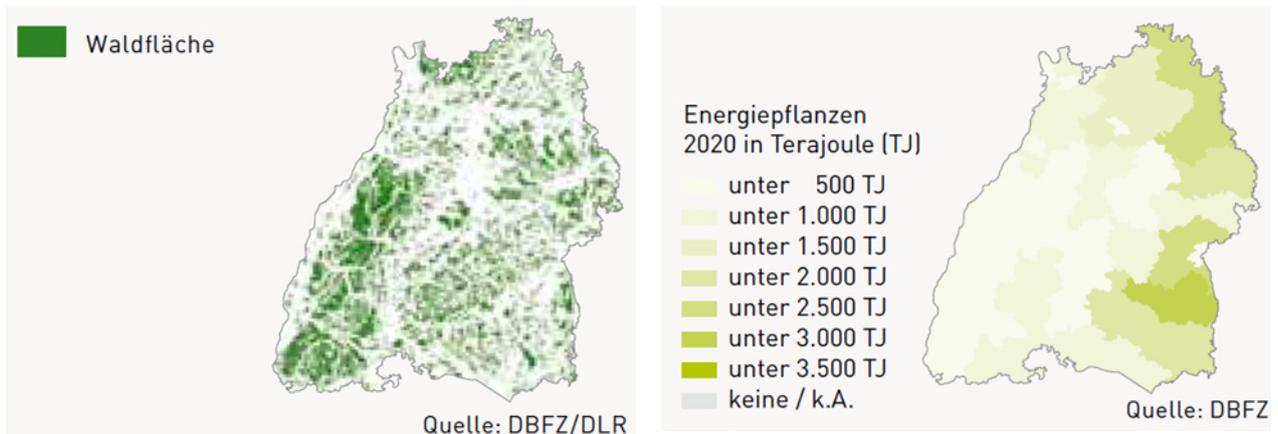


Abb. 59: Räumliche Verteilung der Biomassepotenziale in Baden-Württemberg, links Waldfläche (Energieholz), rechts Energiepflanzen auf landwirtschaftlichen Flächen. Quelle: (AEE 2013).

Energieholz: Das Potenzial der forstwirtschaftlichen Biomasse (Holz) ist eng mit dem Vorhandensein von Wald verknüpft. Die Potenziale lassen sich unterscheiden nach energetisch zur Verfügung stehendes Waldholz, insbesondere Scheitholz aus dem Wald, und dem bei der Holzernte und Durchforstung anfallenden Waldrestholz. Auch der ungenutzte Holzzuwachs, der jährlich nachwächst, aber weder stofflich noch energetisch genutzt wird hinzugezählt. Räumlich ist ersichtlich, dass die größten Potenziale in den waldreichen Gebieten des Schwarzwaldes, der Schwäbischen Alb oder dem Schwäbischen Wald vorliegen. Trotz der Schwerpunkte sind die Holz- bzw. Energieholzpotenziale in Baden-Württemberg relativ gleichmäßig verteilt.

(Fluri et al. 2024) haben das Biomassepotenzial im Hinblick auf Energieholz und die Stromerzeugung abgeschätzt. Sie kommen unter der Annahme, dass zukünftig ca. 80% des Holzes mit einem Heizwert von 4.000 GWh in Holzvergaser-BHKW genutzt wird auf ein Potenzial für die Stromerzeugung aus Energieholz von ca. 400 MW_{elektrisch} und eine Erzeugungskapazität von 2.000 GWh.

Biogas: Das Potenzial für Energiepflanzen umfasst den möglichen Ertrag eines spezifischen Anbaumixes von ertragreichen Energiepflanzen wie Mais und schnellwachsenden Hölzern aus Kurzumtriebsplantagen (KUP) sowie von Getreide, Raps, Zuckerrüben und Sonnenblumen in Abhängigkeit der verfügbaren Flächen und der örtlichen Anbaubedingungen. Hier konzentrieren sich die Flächen räumlich sehr stark auf Regionen, in denen Nahrungsmittelproduktion auf landwirtschaftlichen Flächen stattfinden. Es kommt hier ggf. zu einer Konkurrenz der Bioenergie mit der Nahrungsmittelproduktion.

In Abb. 60 sind die räumliche Verteilung von Stroh und tierischen Exkrementen (Substrat für die Biogasproduktion) dargestellt.

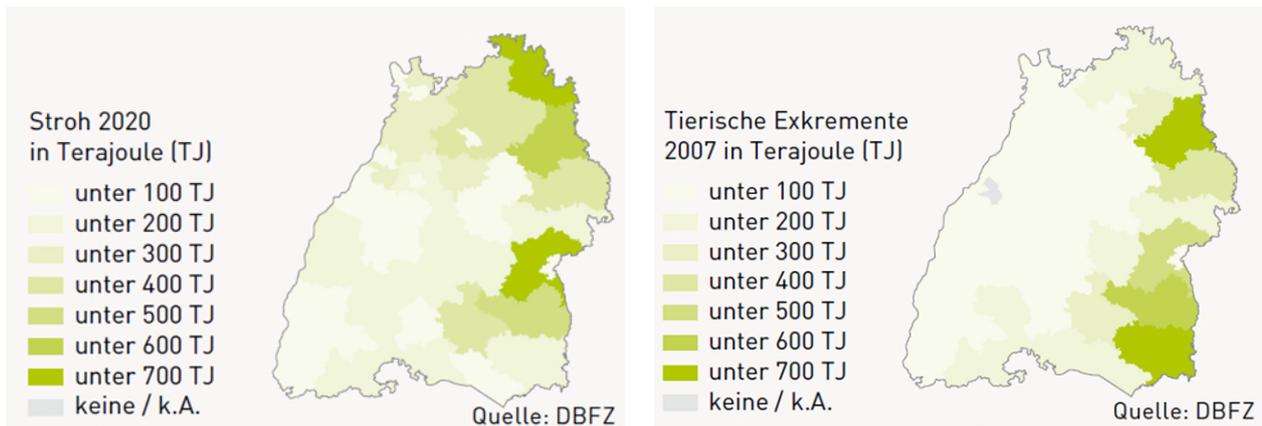


Abb. 60: Räumliche Verteilung der Biomassepotenziale in Baden-Württemberg, links Stroh, rechts tierische Exkrememente. Quelle: (AEE 2013).

Das Potenzial von Stroh umfasst – abhängig von den örtlichen Anbauflächen, Anbaubedingungen und dem Anbaumix – die Ernterückstände von Getreide und Raps, die für eine energetische Nutzung übrigbleiben. Dieses Potenzial ist wertvoll, da hier Reststoffe einer anderen Nutzungsform (beispielsweise Getreideanbau für die Brotherstellung) genutzt und eine Konkurrenz vermieden wird. Die räumliche Verteilung konzentriert sich ebenfalls auf Flächen, auf denen eine Nahrungsmittelproduktion stattfindet, also die landwirtschaftlichen Ackerflächen besonders im Norden und Südosten von Baden-Württemberg.

Das Potenzial tierischer Exkrememente fasst die Gülle von Rindern, Schweinen und Hühnern sowie Mist zusammen und hängt maßgeblich von der Zahl der vor Ort gehaltenen Nutztiere ab. Diese sind wiederum abhängig von den Produktionsmöglichkeiten für Futtermittel, die sich hauptsächlich auf Ackerflächen und Grünflächen konzentriert. Sie liegen ebenfalls im Nord- und Südosten Baden-Württembergs.

5.4 Wasserkraft-Potenzial

Das Energiepotenzial aus Wasserkraft (Bestand plus Zubau/Repowering) wurde von der LUBW im Energieatlas Baden-Württemberg bestimmt. Es unterteilt sich im Wesentlichen in:

- Neubaupotenziale der großen Wasserkraft und von Pumpspeicher-Kraftwerken
- Neubaupotenziale der kleinen Wasserkraft z.B. von Regelungsbauwerken ohne bislang zugeordneter Wasserkraftanlagen inkl. Sohlenbauwerke⁴⁷
- Ausbaupotenziale und Repowering bestehender Kraftwerke bzw. bereits genutzter Standorte der großen und kleinen Wasserkraft

Die „kleine“ Wasserkraft besteht aus Anlagen mit einer Leistung von < als 1 MW, die „große“ Wasserkraft aus Anlagen mit einer Leistung darüber.

⁴⁷ Sohlenbauwerke sind Bauwerke, die beim Gewässerausbau quer zur Fliessrichtung und über die gesamte Breite eines Gewässers angeordnet sind. Damit wird die Gewässersohle zur Vermeidung von Erosionserscheinungen befestigt (Sohlensicherung). Sohlenbauwerke gliedern sich in Sohlstufen und Schwellen.

Die Potenzialangaben für die große Wasserkraft sind häufig nicht scharf abgetrennt von der kleinen Wasserkraft. (Fluri et al. 2024) stellen die Potenzialberechnungen für zwei Szenarien neu zusammen und kommen zum Ergebnis, dass das erschließbare Gesamtpotenzial bis 2040 bei ca. 1.000 MW und einer Stromerzeugung von 5.000 GWh pro Jahr liegt.

Bei der großen Wasserkraft werden aktuell nur noch Ausbauprojekte bestehender Anlagen umgesetzt. Aber auch diese können gute „Repowering“-Ergebnisse erbringen. So wird von der EnBW beispielsweise aktuell das Ausbauprojekt Forbach umgesetzt. Das neue Pumpspeicherkraftwerk liegt im Berg und soll eine Leistungssteigerung um 10 MW erbringen. Das Wasser wird dazu über die Schwarzenbachtalsperre gesammelt und dann zum neuen Kavernenkraftwerk geleitet, wo sich das neue Schwarzenbachkraftwerk mit einer Pumpturbine und mit dem neuen Murgwerk als Laufwasserkraftwerk mit zwei Turbinen befinden. Durch den neuen Kavernenspeicher erhöht sich das Speichervolumen des Kraftwerks um 200.000 m³ (das bestehende Ausgleichsbecken hat ein Nutzvolumen von 204.000 m³). Die neue Unterstufe aus Kavernenspeicher und Ausgleichsbecken wird damit über eine Speicherkapazität verfügen, die 7 Stunden Turbinenbetrieb am Stück ermöglicht.

Für die Wasserkraft (klein und groß) wurde mit Stand 2017 und Datenbasis 2015/16 das Potenzial ermittelt und ist u.a. im Energieatlas Baden-Württemberg dargestellt⁴⁸. Danach beträgt die theoretisch mögliche technische Leistung insgesamt 325 MW, derzeit sind 270 MW installiert. Die technisch mögliche Jahresarbeit kann bis zu 1.304 GWh betragen, bislang liegt sie bei 1.036 GWh (2012). Dazu wird eine Betriebszeit von 5.160 Stunden pro Jahr angenommen. Als "technisch-ökonomisch-ökologisch" mögliche Jahresarbeit wurden im Energieatlas Baden-Württemberg davon 1.001 GWh zugrunde gelegt.

Die Eignung eines Standorts für ein Aus- oder Neubauvorhaben im Rahmen der Wasserkraft muss besonders mit Bezug auf die Berücksichtigung ökologischer Belange im Einzelfall geprüft werden und unterliegt somit einem Genehmigungsverfahren.

5.5 Geothermie-Potenzial

Das Energiepotenzial aus Geothermie ist für die Tiefengeothermie (Wärme- und Stromerzeugung) und die oberflächennahe Geothermie (nur Wärmeerzeugung) zu unterscheiden. Die technischen Systeme sind in Kap. 3.2.4 (Geothermie und Umweltwärme) dargestellt.

5.5.1 Oberflächennahe Geothermie und Erdwärmesonden

Von der Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg in Karlsruhe (KEA-BW) wurde 2023 das Potenzial für die oberflächennahe Geothermie bestimmt. Dazu wurden Restriktionen berücksichtigt, die auch im Informationssystem Oberflächennahe Geothermie für Baden-Württemberg ISONG des Landesamts für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) zugrunde liegen, u.a. Bohrtiefenbegrenzungen aufgrund Grundwasserschutz oder sulfatgesteinsführender

⁴⁸ <https://www.energieatlas-bw.de/wasser/potenzialanalyse>

Formationen im Untergrund, oder im Zusammenhang mit Schutzgebieten und Zustrombereichen genutzter Grundwasserfassungen (Heilquellen).

Im Ergebnis liegt das technische Wärmepotenzial bei ca. 9,3 TWh pro Jahr, das theoretische Potenzial wurde auf 34 TWh geschätzt. Diese Wärmemenge ist ausreichend zur Beheizung von ca. 300.000 Wohngebäuden und würde ca. 12% (43%) des gesamten Wärmebedarfs von Wohngebäuden in Baden-Württemberg, der bei ca. 80 TWh liegt, abdecken.

Die räumliche Verteilung der Potenziale wurden von der KEA analysiert. Dabei wurde ein maximales und ein minimales Potenzial berücksichtigt. Beim maximalen Potenzial wird eine maximale Belegung von Erdwärmesonden pro Flurstück in Ansatz gebracht und danach Entzugsleistung, maximale Wärmeentzugsleistung pro Erdwärmesondenmeter und die jährliche Arbeit bestimmt. Im minimalen Potenzial wird lediglich 1 Erdwärmesonde pro Flurstück angenommen.

5.5.2 Tiefe Geothermie

Die Potenziale für die tiefe Geothermie konzentrieren sich in Baden-Württemberg insgesamt eher auf den Oberrheingraben (ORG). Auch Teile des süddeutschen Molassebeckens (SMB) sind geeignet, hiervon liegt jedoch nur ein kleinerer Teil in Baden-Württemberg. Der größte Teil des süddeutschen Molassebeckens liegt in Bayern. Das Potenzial (Technisches Bereitstellungspotenzial) für die Tiefengeothermie wurde vom Umweltbundesamt in (UBA 2020) abgeschätzt (siehe Tab. 21). Hierzu wurden auf der Datenbasis des Geothermie-Atlas (Schulz et al. 2013) zwei Szenarien gebildet, bei denen im Szenario A besonders Heilquellengebiete und andere wasserschutzrechtlich relevante Gebiete ausgeschlossen, und im Szenario B zusätzlich Naturschutzgebiete wie FFH, Feuchtgebiete oder Landschaftsschutzgebiete ausgeschlossen sind.

Tab. 21: Technisches Bereitstellungspotenzial für eine Wärmeversorgung aus hydrothermalen Geothermie in Baden-Württemberg bzw. im Oberrheingraben (ORG) und süddeutschen Molassebecken (gesamt), (Quelle: (UBA 2020))

	Szenario A				Szenario B			
	Szenario A1		Szenario A2		Szenario B1		Szenario B2	
	[GW]	[TWh/a]	[GW]	[TWh/a]	[GW]	[TWh/a]	[GW]	[TWh/a]
ORG	5	12	8	20	3	8	5	14
SMB	11	28	24	60	9	23	20	50

Die Potenziale im Oberrheingraben liegen demnach bei 5 – 8 GW Leistung im Szenario A (3-5 GW im Szenario B) und unter Annahme von 2.500 Volllaststunden bei 8 – 20 TWh Arbeit für die Wärmeversorgung. Die Potenziale im süddeutschen Molassebecken liegen insgesamt noch höher, was jedoch mit der deutlich größeren Ausdehnung des Gebietes (größtenteils im Bundesland Bayern liegend) zu tun hat.

5.2.2

Geothermische Potenzialabschätzung auf Grundlage der Temperaturen in 1000 m unter Gelände

Classes de températures à 1000 m sous la surface

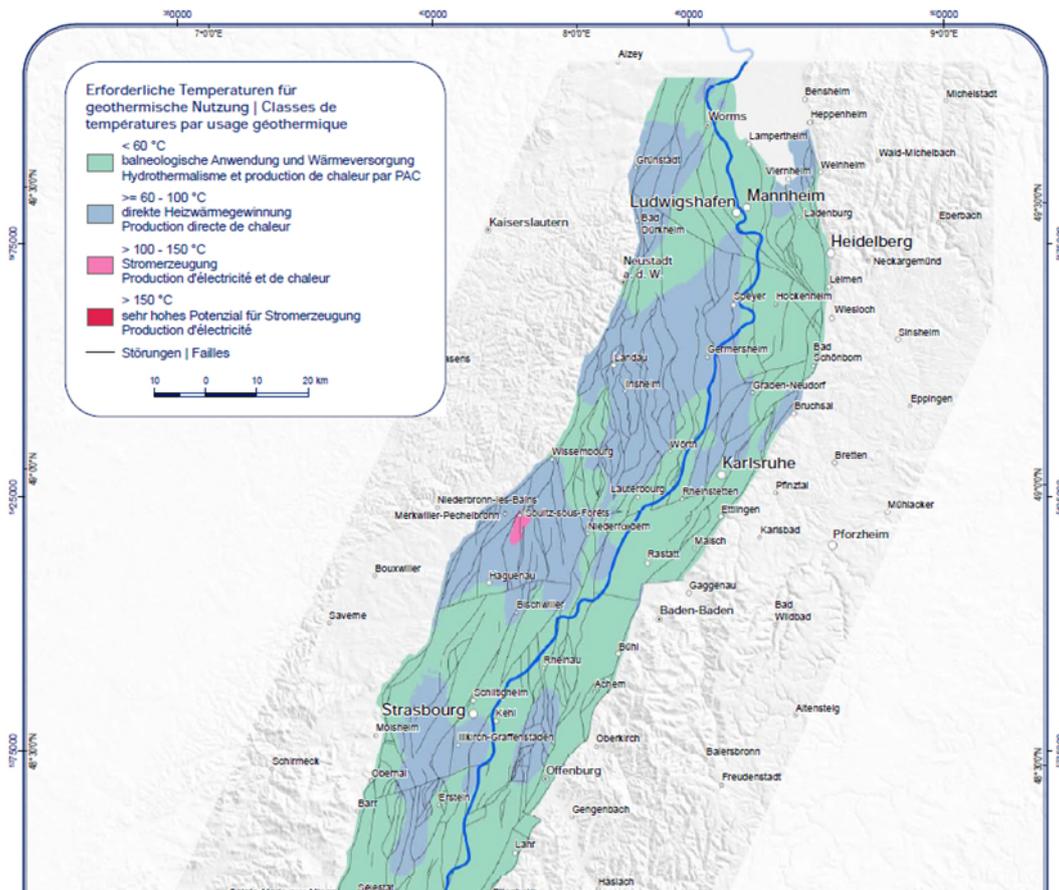


Abb. 61: Geothermische Potenzialabschätzung und Anwendungseignung (Wärme- oder Stromerzeugung) aufgrund der Temperaturverteilung in 1.000 m Tiefe im Oberrheingraben; Kartenausschnitt nördlicher Teil. (Quelle: Abschlussbericht Teil 4 - GeORG-Projektteam; 2013⁴⁹)

In einer Studie des Leibnitz-Instituts für angewandte Geophysik (LIAG) (Agemar et al. 2018) wurde das Geothermie-Potenzial für Deutschland für 2050 mit 104,5 TWh deutlich höher beziffert (Anteil am Wärmebedarf von 16,6%). Die Gründe für den Unterschied liegen an der Methodik und Szenarioauslegung.

Für die Potenzialbestimmung zur tiefen Geothermie hat das Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) vielfältige Detailinformationen zusammengetragen, u.a. im Rahmen des Projektes GeORG (Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben, EU-Programm Interreg IV)⁵⁰. Hier sind detaillierte Karten des Oberrheingrabens mit Temperaturprofilen verschiedener Horizonte (bis 300 m Tiefe) erarbeitet worden. Darauf basierend sind auch die Geothermiepotenziale, die sowohl für die Wärme- als auch die Stromerzeugung nutzbar sind, dargestellt. Beispielhaft sind in Abb. 61 und Abb. 62 Kartenausschnitte des Oberrheingrabens mit ihrem Geothermiepotenzial in 1.000 und in 2.500 m Tiefe dargestellt.

⁴⁹ www.geopotenziale.org/products/atlas/pdf/atlas_web.pdf

⁵⁰ <https://www.geopotenziale.org/home/index.html>

Geothermische Potenzialabschätzung auf Grundlage der Temperaturen in 2500 m unter Gelände Classes de températures à 2500 m sous la surface

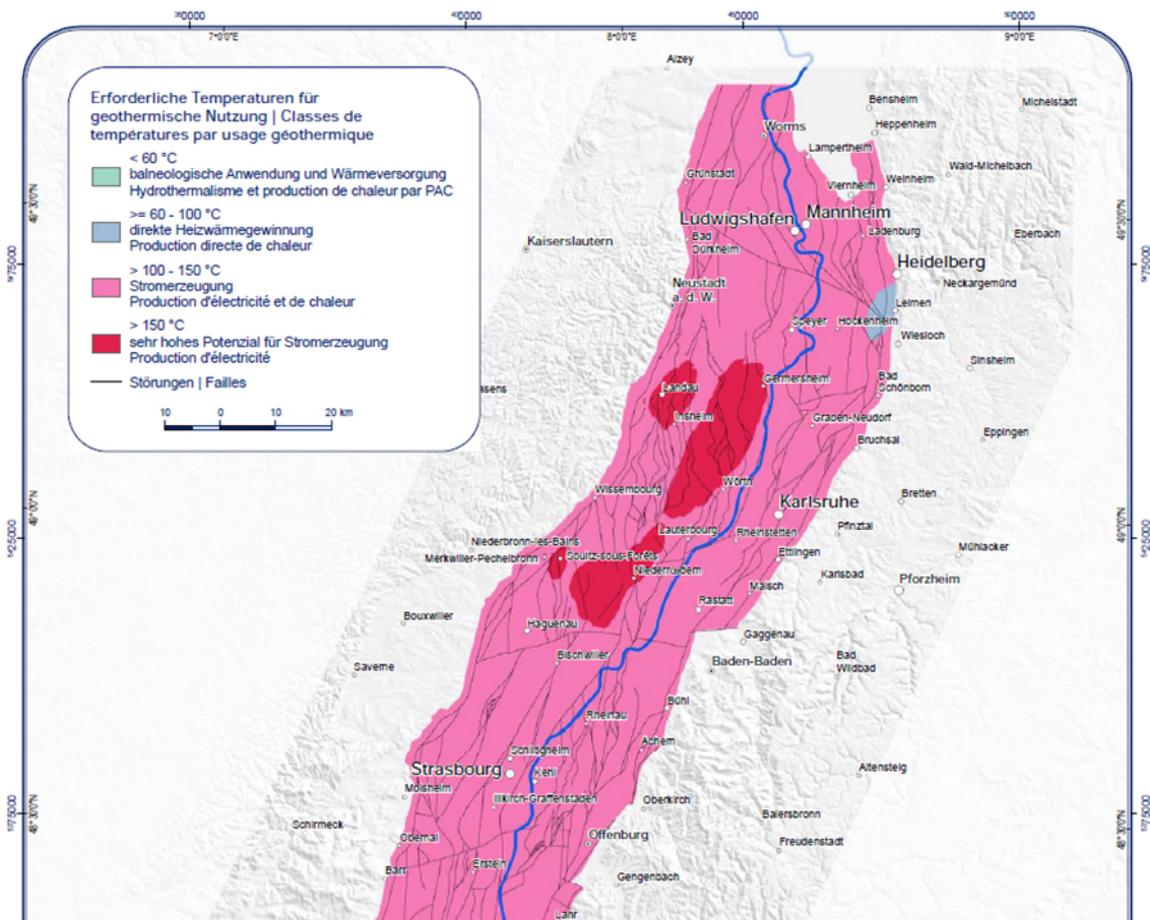


Abb. 62: Geothermische Potenzialabschätzung und Anwendungseignung (Wärme- oder Stromerzeugung) aufgrund der Temperaturverteilung in 2.500 m Tiefe im Oberrheingraben; Kartenausschnitt nördlicher Teil. (Quelle: Abschlussbericht Teil 4 - GeORG-Projektteam; 2013)

Es wird deutlich, dass in oberflächennäheren Horizonten bei 1.000 m Temperaturverhältnisse herrschen, die noch eher für eine Wärmeproduktion geeignet sind, wohingegen in 2.500 m Tiefe ausreichend hohe Temperaturen bestehen um eine Stromerzeugung geeignet erscheinen zu lassen.

5.6 Potenziale erneuerbarer Energien – Gesamtschau

Die Aufstellung der Potenziale aus erneuerbaren Energien macht deutlich, dass sie prinzipiell sehr weit reichen. Für eine anwendungsgerechte Einschätzung der Potenziale ist aber eine genaue Bezeichnung des Anwendungsfalls und der Technologie nötig (z.B. Potenziale zur Stromerzeugung, zur Wärmeerzeugung oder Kraftstoffnutzung) und welche Potenzialebene (theoretische, technische, ökonomische oder nachhaltige Potenziale) betrachtet werden.

In Tab. 22 sind die Potenziale aus den vorstehend dargestellten Zusammenstellungen zusammengefasst. Es werden nur die Potenziale zur Stromerzeugung dargestellt. Insbesondere im Bereich der Solarenergie sind die Flächen über die Photovoltaik hinaus natürlich auch für die Wärmebereitstellung nutzbar. Welcher Anteil da jeweils für welche Energie verwendet wird ist Gegenstand vieler Untersuchungen. Hierauf kann in der vorliegenden Studie nicht eingegangen

werden und es wird auf einschlägige Literatur verwiesen, unter anderem (Fluri et al. 2024) oder (Nitsch und Magosch 2021), oder auch den Energieatlas Baden-Württemberg.⁵¹

Tab. 22: Potenziale zur Stromerzeugung in Baden-Württemberg aus erneuerbaren Energien, a) allgemein als gut verfügbar anzusehen und maximale Potenziale aus jeweiligen Szenarioanalysen. Quellen: UM BW, Energieatlas Baden-Württemberg, Fluri et al. 2024, IER,

Energie	Potenziale gut verfügbar		Potenziale max.	
	Elektr. Leistung	Stromerzeugung	Elektr. Leistung	Stromerzeugung
	GW	TWh/a	GW	TWh/a
Solarpotenzial Dachflächen (Quelle: UM BW 2023b)	61,50	61,50	79,80	77,00
Solarpotenzial Freifläche (inkl. Deponien) (Quelle: Energieatlas Baden-Württemberg)	22,35	22,35	31,00	31,00
Solarpotenzial Sonderflächen/Baggerseen (Quelle: Energieatlas Baden-Württemberg)	0,71	0,71	1,13	1,13
Solarpotenzial Parkierungsflächen (Quelle: Fluri et al. 2024)	2,62	2,62	3,38	3,38
Windenergie (onshore) (Quelle: Energieatlas Baden-Württemberg)	72,76	125,00	122,24	210,00
Bioenergie feste Brennstoffe (Energieholz) (Fluri et al. 2024; AEE 2013)	0,40	2,00	0,40	2,00
Biogas Quellen: (Fluri et al. 2024; AEE 2013)	0,65	3,00	0,65	3,00
Wasserkraft groß (Quelle: Fluri et al. 2024)	0,675	4,00	0,675	4,00
Wasserkraft klein (Quelle: Fluri et al. 2024)	0,325	1,00	0,325	1,00
Geothermie (für Strom nicht betrachtet)	-	-	-	-
Gesamt	161,98	222,173	239,60	332,51

Für die Wärme kann zumindest das technische Potenzial der Geothermie (oberflächennah und tiefe Geothermie) zusätzlich zu den o.a. Stromerzeugungs-Potenzialen herangezogen werden, ohne doppelt zu rechnen. Dies liegt gemäß Kap. 5.5 für die oberflächennahe Geothermie bei 9,3 TWh und die tiefe Geothermie bei 14,0 TWh, insgesamt also ca. 23,3 TWh.

⁵¹ <https://www.energieatlas-bw.de>

Insgesamt zeigt sich, dass es im Bereich Stromerzeugung (Fluri et al. 2024) zu erhöhten Werten kommt, da besonders die Potenziale der Freiflächen-Photovoltaikanlagen bedeutend höher eingeschätzt werden. Im Vergleich zu den 306 TWh Erzeugungspotenzial von (Fluri et al. 2024) kommt die gegenwärtige Zusammenstellung auf 222 TW. In fast allen anderen Bereichen liegen die Zusammenstellungen des vorliegenden Berichtes sehr nah beieinander.

Im Vergleich zu der in (Fluri et al. 2024) als Zusammenfassung der politischen Ziele und Ergebnissen andere Studien zur Erreichung der Klimaneutralität errechneten Potenzialausnutzung von 92 TWh liegen die Potenziale also noch deutlich darüber, und zwar um fast das 2,5-fache. Nimmt man das maximal ausgewiesene Potenzial zum Vergleich, dann steht im Verhältnis zu den Zielwerten sogar das 3,6-fache an Potenzial zur Verfügung. In der Praxis lassen sich aber aufgrund weiterer Restriktionen voraussichtlich nur ein Teil der Potenziale wird sich tatsächlich realisieren.

5.7 (Konventionelle) Erzeugungs- und Umwandlungsanlagen, u.a. Kraftwerke

Mit der Energiewende sowie dem bereits vollzogenen Kernenergieausstieg und dem beschlossenen Kohleausstieg in der deutschen Stromversorgung wird sich zukünftig ein Wandel in Richtung erneuerbare Energieträger vollziehen, auf Basis derer sich ein neues Energiesystem entwickeln wird, das noch viel stärker auf eine gut ausgebaute Infrastruktur angewiesen sein wird, um die energiepolitischen Ziele erfüllen zu können. Der letzte Kernkraftwerksblock wurde in Baden-Württemberg Mitte April 2023 stillgelegt (Neckarwestheim-2), nachdem bereits zuvor Obrigheim (2005), Philippsburg-1 und Neckarwestheim-1 (2011) und Philippsburg-2 (2019) abgeschaltet worden waren. Für den Kohleausstieg gibt es einen Ausstiegsplan mit dem Zieljahr 2038, der jedoch immer wieder auf dem Prüfstand steht, da die Bundesregierung die Umsetzung des Kohleausstiegs auf das Jahr 2030 vorziehen will. Werden entsprechende Rahmenbedingungen gesetzt, dann sollen die Kohleblöcke der EnBW bereits bis 2028 stillgelegt werden, inklusive dem Großkraftwerk Mannheim (GKM).

Um für den Kohleausstieg 2030 gewappnet zu sein, bedarf es jedoch der Bereitstellung sogenannter Backup-Kapazitäten, die die TransnetBW für Baden-Württemberg auf rund 6,5 GW schätzt, das entspricht 10 bis 15 größeren Kraftwerken. Der Energiekonzern EnBW etwa hat im Frühjahr in Stuttgart mit dem Bau des ersten von drei neuen Gaskraftwerken begonnen und will so bis 2026 die Stromerzeugung aus Kohle im mittleren Neckarraum beenden. Die Anlagen sollen spätestens 2035 mit grünem - also mithilfe von erneuerbaren Energien hergestellten - Wasserstoff betrieben werden. Ähnliches gilt auch für die derzeitigen Kohlekraftwerksstandorte in Karlsruhe, Heilbronn und Mannheim.

Auch im Raffineriesektor zeichnet sich ein starker Wandel ab. Hier muss die Mineralölraffinerie Oberrhein (MIRO) eine entsprechende Rolle finden und eine Neuausrichtung erfahren. Schrittweise ist fossiles Rohöl durch erneuerbare Rohstoffe zu ersetzen – mit dem Ziel, in wachsendem Umfang treibhausgasarme Produkte herzustellen. Zu den neuen Ressourcen zählen Biomasse, Rest- und Abfallstoffe sowie die Nutzung von CO₂ als Rohstoff und für viele Prozesse CO₂-neutraler

Wasserstoff. Wichtig ist auch die Ausrichtung auf eine branchenübergreifende Zusammenarbeit, in deren Mittelpunkt die Entwicklung und Anwendung CO₂-armer Technologien stehen. Über die Kraftstoffversorgung hinaus liefern die Raffinerien bereits heute mehr als 70 Prozent der Grundstoffe für die organische chemische Industrie. Vernetzte Strukturen wie die Chemiedreiecke in Bayern (Raffineriestandort Burghausen), in Mitteldeutschland (Raffineriestandort Leuna) oder im Rhein-Ruhrgebiet (Raffineriestandorte Gelsenkirchen/Marl und Köln/Wesseling) zeigen beispielhaft die wichtige Rolle der Raffinerien für die industriellen Wertschöpfungsketten. Der Aufbau von Wasserstoff-Netzen zur Versorgung dieser Industrien ist eine wichtige Aufgabe für die kommenden Jahre, z.B. im Verbund der MIRO zusammen mit der Maxauer Papierfabrik GmbH.

5.8 Energieverteilung, Netze und Energieinfrastruktur

5.8.1 Wärmenetze

Fern- und Nahwärmenetze werden zukünftig an Bedeutung gewinnen, um den Weg Richtung Klimaneutralität zu ermöglichen. Wesentlicher Treiber dafür ist die Kommunale Wärmeplanung Baden-Württemberg, für die auf Basis des Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetzes das Land Baden-Württemberg allen Gemeinden die Chance eröffnet, einen kommunalen Wärmeplan zu erstellen und fortzuschreiben. Nah- und Fernwärmelösungen spielen hierin eine zentrale Rolle. Alleine im Entwurf des kommunalen Wärmeplans für die Landeshauptstadt Stuttgart ergeben sich 8 bestehende Wärmenetze, die verdichtet und in 6 weitere Gebiete erweitert werden müssen, 26 Wärmenetzeignungsgebiete, von denen 17 bereits in vertiefter Untersuchung sind sowie 13 Gebiete, die aufgrund ihrer jeweiligen Gegebenheiten besonders herausfordernd sind, grundsätzlich aber ebenfalls mit einem Wärmenetz versorgt werden müssen. Kooperationen über kommunale Grenzen hinweg erleichtern darüber hinaus den Auf- und Ausbau von Wärmenetzen.

Aktuelle Entwicklungen laufen zudem darauf hinaus, mit Wärmenetzen auch umweltfreundlich Niedertemperaturanwendungen bedienen zu können (Wärmenetze 4.0⁵²) bzw. in Richtung der „kalten“ Nahwärme (Netze 5.0⁵³). Diese müssen technisch deutlich anders aussehen, als die gegenwärtig genutzten Wärmenetze. Zudem gehen die Entwicklungen in Richtung einer „Grünen Fern-/Nahwärme“, die auf der Nutzung von erneuerbaren Energien, insbesondere Bio- und Solarenergie sowie Geothermie, und von (Groß-) Wärmepumpen, wie z.B. in Mannheim oder in Stuttgart-Münster, (grünem) Wasserstoff sowie Abwärme abzielt. Damit ist die Entwicklung von Wärmenetzen eng mit den Potenzialen der erneuerbaren Energien verbunden.

⁵² Die Wärmenetze 4.0 zeichnen sich durch einen hohen Anteil erneuerbarer Wärme bzw. Abwärme, geringe Vorlauftemperaturen, Senkung der Netzverluste, eine Vielzahl von Einspeisern, die Erschließung lokaler Wärmequellen, Sektorenkopplung und den Einsatz von Langzeitspeichern aus.

⁵³ Wärmenetze der 5. Generation sind Wärmenetze auf sehr geringem Temperaturniveau, welches erfordert, dass in den Gebäuden zusätzlich Wasser-Wasser-Wärmepumpen installiert werden.

5.8.2 Stromnetze

Der Trend zur „Elektrifizierung der Energieversorgung“ bedeutet eine Steigerung der Stromanwendungen und des benötigten Stroms. Auch die sogenannte „Sektorkopplung“ oder „Sektorintegration“ bringt mit Power-to-X mehr strombasierte Energieservices hervor. Da witterungsabhängige erneuerbare Energien zunehmend steuerbare Kraftwerke aus dem Markt verdrängen, wird die Stromerzeugungsseite insgesamt volatiler. Die zur Strombedarfsdeckung in Baden-Württemberg nicht ausreichend verfügbaren Potenziale der erneuerbaren Stromerzeugung machen einen Ausbau des Stromverbundes in Deutschland und mit den europäischen Nachbarländern notwendig. Die Entwicklung der räumlich verteilten erneuerbaren Energien und der Trend zur E-Mobilität sowie zum verstärkten Einsatz von Wärmepumpen bringt zudem die Notwendigkeit einer Stärkung der lokalen Stromnetze im Verteilnetz mit sich. Insgesamt zeichnet sich der Trend ab, die Stromnetzplanung in eine Gesamtenergiesystemplanung zu überführen, gemeinsam mit Gas, Wasserstoff, Fernwärme und weiteren leitungsgebundenen Energieträgern.

Grundlage für den notwendigen Netzausbau ist der Netzentwicklungsplan Strom (50Hertz GmbH und Partner 2023), der aktuell in der Version 2025 (50Hertz Transmission GmbH et al. 2024), der von den Übertragungsnetzbetreibern aufgestellt wird. Nach dessen Bestätigung durch die Bundesnetzagentur bildet er die Basis für die im Bundesbedarfsplangesetz (BBPlG) gesetzlich festgestellten Netzausbaumaßnahmen. Das Gesetz ist erstmalig im Juli 2013 in Kraft getreten und seitdem mehrmals geändert worden ist, zuletzt am 16. Juli 2024. Der aktuelle Bedarfsplan enthält eine Fülle von Leitungsbauvorhaben – zum Teil landesübergreifend – in Baden-Württemberg, die umgesetzt werden sollen (siehe den NEP 2023 in (50Hertz GmbH und Partner 2023) auf den Seiten 204-282 oder auch <https://www.netzausbau.de/Vorhaben/uebersicht/liste/liste.html>). Etwa drei Viertel des gesetzlich vorgeschriebenen Höchstspannungsnetzausbaus stehen jedoch noch am oder vor Beginn der Bauphase (im oder vor dem Genehmigungsverfahren). Darüber hinaus werden im aktuellen Netzentwicklungsplan Strom 2037/2045 (Version 2023) weitere Maßnahmen genannt, unter anderem zwei weitere länderübergreifende Gleichstromprojekte, die aber bisher noch keinen Eingang in das Bundesbedarfsplangesetz gefunden haben.

In Abb. 63 ist der aktuelle Ausbaustand der Trassenkilometer für die letzten drei Jahre seit 2021 und die Prognose bis 2024 dargestellt.

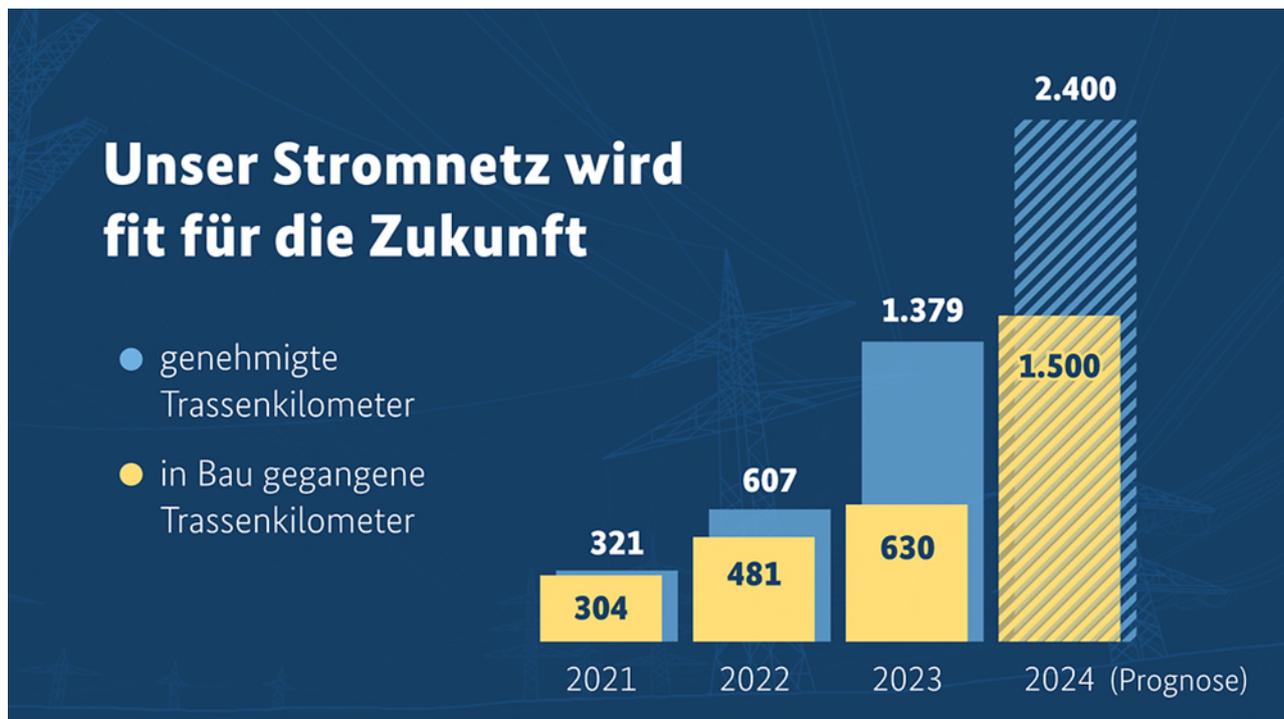


Abb. 63: Der Ausbau der Stromnetze und die genehmigten bzw. in Bau gegangenen Trassenkilometer bis Stand 2024. Quelle: www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/netzausbau-suedlink-2222762

Es fällt auf, dass in den nächsten Jahren ein deutlicher Ausbau vorgesehen ist.

In Abb. 64 sind die Netzausbauvorhaben der Übertragungsnetzbetreiber für Baden-Württemberg dargestellt. Sie können auch im rips Kartendienst der LUBW (<https://rips-metadaten.lubw.de>) räumlich disaggregiert dargestellt werden.

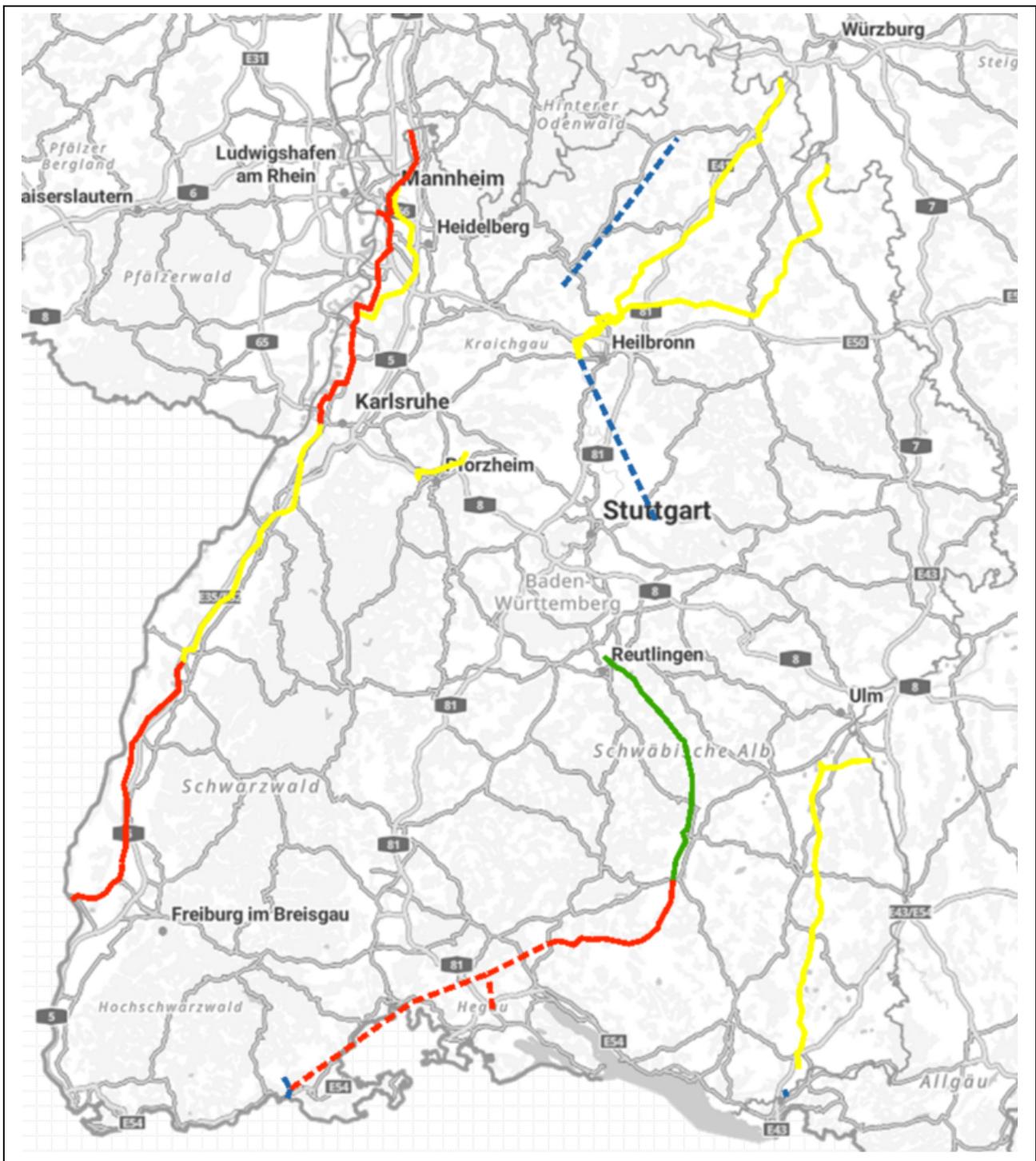


Abb. 64: Netzausbauplan der Übertragungsnetzbetreiber für Baden-Württemberg. Quelle: LUBW⁵⁴

Die hauptsächlich zuständige TransnetBW muss danach einen hohen Anteil der Ausbauplanung stemmen. Die Transleitungen der Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ), mit denen Strommengen aus den nördlichen Bundesländern nach Baden-Württemberg übertragen werden

⁵⁴

https://rips-metadaten.lubw.de/kartendienste?lang=de&topic=Geobasiskarten&bgLayer=sgx_geodatenzentrum_de_de_baseapde_web_raster_grau&layers=4335fc3811795811bd03b89b80bbdd8d&E=422932.28&N=5415565.86&zoom=3

sollen, enden für die HGÜ-Trasse „SuedLink“ in Großgartach, westlich von Heilbronn, und für die HGÜ-Trasse „Ultranet“ in Philippsburg, südlich von Mannheim/Heidelberg.

Für die Ebene der Stromverteilnetze präsentierte beim Netzausbaugipfel Baden-Württemberg Dr. Christian Wagner von der ef.Ruhr GmbH in seinem Vortrag am 15. September 2023⁵⁵ den derzeit absehbaren Ausbaubedarf in Baden-Württemberg. Es wird im Bereich der Verteilnetze alleine in Baden-Württemberg bei einem Ausbaubedarf auf Nieder- und Mittelspannungsebene von ca. 160.000 Leitungskilometern und etwa 100.000 Transformatoren mit einem Investitionsvolumen von 1,1 – 2,2 Mrd. € pro Jahr gerechnet. Bei der Netze-BW rechnet man hier mit notwendigen Maßnahmen in der Größenordnung von 24 neu zu bauenden Umspannwerken und bei 32 bestehenden Umspannwerken wurde ein Erweiterungsbedarf festgestellt.

5.8.3 Gasnetze

Der im März 2024 von der Bundesnetzagentur bestätigte Netzentwicklungsplan Gas listet für Baden-Württemberg insgesamt folgende Gasnetzausbauvorhaben auf:

- Ausbaumaßnahme 449-02/612-01/614-01 Süddeutsche Erdgasleitung (SEL) von Lampertheim (Hessen) über Mannheim – Hüffenhardt – Siegelsbach – Esslingen – Bissingen (Bayern)
- Ausbaumaßnahme 626-01 Leitung Aalen – Essingen
- Ausbaumaßnahme 112-03 Leitung Wiernsheim – Löchgau (im Bau)
- Ausbaumaßnahme 06 Leitung Tannenkirch – Hüsing (im Bau)
- Ausbaumaßnahme 603-01 Leitung Schwarzach – Eckartsweiler (im Bau)
- Ausbaumaßnahme 602-02 Leitung Schwanheim – Au am Rhein (im Bau)
- Ausbaumaßnahme 554-01 Leitung Hügelheim – Tannenkirch (im Bau)

Entscheidend für die zukünftigen Entwicklungen beim Gastransport in Baden-Württemberg sind neben der schrittweisen Umstellung der Ferngasnetze auf den Transport von Wasserstoff auch die Planungen im Kraftwerkssektor und welche Rolle hierbei Gaskraftwerke als Brückentechnologie einnehmen werden. Dies hat direkte Konsequenzen im Gastransportnetz.

Aktuelle geopolitische Entwicklungen und der Wunsch nach einer deutlichen Senkung der Klimagasemissionen bringen eine Neuausrichtung beim Ausbau der Gasinfrastruktur mit sich. Der weitere Ausbau der Gasverteilnetze ist zu hinterfragen. Ein aktuelles Ideenpapier des BMWK geht davon aus, dass deutschlandweit die Länge der Gasverteilnetze von derzeit über 500.000 km stark zurückgehen wird. Dies trifft sicherlich in ähnlichem Maße auch auf Baden-Württemberg zu.

In diesem Zusammenhang ist auch die Planung des Übergangs vom fossilen Erdgas zu neuen/grünen Gasen voranzutreiben, insbesondere hinsichtlich Biogas bzw. Biomethan, synthetischen Gasen (SynGas) und Wasserstoff. Dabei hat sowohl die Beimischung ins Gasnetz als auch der Aufbau einer

⁵⁵ <https://assets.ctfassets.net/xytfb1vrn7of/3LNpCP2MXQDfXwJZ5YX9DO/63d392fc625d27f9d6f33af719dae47d/praesentation-netzausbaugipfel-20230915-abschaetzung-netzausbaubedarf-in-baden-wuerttemberg.pdf>

neuen bzw. die Umrüstung der bestehenden Gasnetzinfrastruktur für Wasserstoff eine zentrale Bedeutung. So können heutige Gasnetze technisch bereits ausreichend mit einem Anteil an Wasserstoff umgehen, der nach vielfacher Auffassung bei 5 bis 7% liegt, teils auch bis zu 25% - siehe z.B. in Erprobungen im Pilotprojekt in Öhringen - liegen kann. Die technischen Anforderungen sind jedoch höher und gehen in Richtung einer erdgasfreien Versorgung. Insgesamt zeichnet sich der Trend ab, die Netzplanung für Gas und Wasserstoff in eine Gesamtenergiesystemplanung zu überführen, gemeinsam mit Strom, Fernwärme und weiteren leitungsgebundenen Energieträgern.

5.8.4 Wasserstoff-Infrastruktur

Im Zuge des Klimaschutzes und der Energiewende sowie den allgemeinen geopolitischen Veränderungen findet in Baden-Württemberg auch der Umstieg auf Wasserstoff statt. Der Ausbau der Verdichterstationen, von Elektrolyseuren, von Gas- und Wasserstoffspeichern und der Verteilnetze hat einen konkreten Ortsbezug und bezieht sich vielfach auf Gemeinden und Städte. Aufgrund der Vernetzung, des notwendigen Umbaus in Richtung Wasserstoff, SynGas und der Notwendigkeit eines stabilen Systembetriebs, u.a. auch in Wintermonaten, sind jedoch energiewirtschaftliche Notwendigkeiten nicht zu vernachlässigen, die zum Teil eine Beobachtung dieser Komponenten über die Gemeinde/Stadt hinaus bedingen. Die Raumrelevanz ist jedoch bei der Umstellung und Ergänzung des Transportnetzes bzw. beim auf Wasserstoff bezogenen Netzneubau viel stärker gegeben.

Detaillierte Informationen über den prognostizierten Wasserstoffbedarf, die integrierte WasserstoffNetz-Planung und weitere Aspekte des Ausbaus der Wasserstoff-Infrastruktur gibt u.a. die Internetseite der terranets bw <https://www.h2-fuer-bw.de/> oder der Gastransportunternehmen bei FNB Gas <https://fnb-gas.de/> und auch des Umweltministeriums Baden-Württemberg unter <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/klima-energie/energiewende/wasserstoffwirtschaft>.

Im November 2023 haben die deutschen Ferngasnetzbetreiber die Planung eines rund 9.700 km umfassenden Wasserstoff-Kernetzes an BMWK und BNetzA übergeben, das bis zum Jahr 2032 realisiert werden soll. Hierbei will die terranets BW Wasserstoff für Baden-Württemberg über verschiedene Transportrouten verfügbar machen u.a.:

- Als Bestandteil des 1.100 km umfassenden Projekts **Flow - making hydrogen happen** soll
 - die Region Rhein-Neckar und der Großraum Stuttgart ab **2030** über die Umstellung der **Süddeutschen Erdgasleitung (SEL) auf Wasserstoff** angebunden werden,
 - die **Erweiterung der SEL** bis nach Bayern bis **2032** den Transport von Wasserstoff in den Süden Deutschlands weiter vorantreiben,
 - mit der **Umstellung** einer bestehenden Gasleitung Wasserstoff bis an den Bodensee und Oberschwaben transportiert werden.
- Ab **2028** soll mit dem Projekt **RHYN Interco** der Badenova das erste H₂-Netz in Baden-Württemberg geschaffen werden mit einer grenzüberschreitenden Verbindung nach Frankreich. RHYN Interco soll ab 2028 auch Industriekunden bei Freiburg i. B. anbinden.

In Abb. 65 sind diese Leitungsvorhaben in Baden-Württemberg und Deutschland inklusive der Anschlussleitungen ins Ausland zusammenfassend dargestellt.



*gem. Genehmigung vom 22.10.2024

Abb. 65: Ausbaupläne für das deutsche Wasserstoffnetz bis 2032 und seine Anbindung an das Europäische Wasserstoffnetz (European Hydrogen Backbone - EHB). Quelle: www.h2-fuer-bw.de bzw. FNB Gas: <https://fnb-gas.de>

Das in Deutschland entstehende Wasserstoffkernnetz soll ca. 9.000 km betragen (terrane**ts** bw⁵⁶, und FNB Gas 2024) und wird zu rund 60% bestehende Gasleitungen nutzen. Gegenwärtig sind aber erst 709 km genehmigt (Persönliche Kommunikation UM BW). Das Kernnetz soll zentrale Verbrauchsschwerpunkte in Baden-Württemberg anbinden wie z.B. den Großraum Stuttgart, die Region Rhein-Neckar, die Ostalb, Oberschwaben, den östlichen Bodenseeraum, den Hochrhein und die Region Mannheim/Karlsruhe.

Als ein Beispiel einer überörtlich und regional geplanten Wasserstoff-Infrastruktur kann das Wasserstoff-Pipelineprojekt „H2 GeNeSiS“ in der Region Stuttgart gelten (Abb. 66). Das Vorhaben, das auch im Rahmen der Landesinitiative Baden-Württemberg „Wasserstoffregionen“ gefördert wird, zieht sich entlang des Neckars von der Landeshauptstadt Stuttgart bis in den Landkreis Esslingen mit Anschlussprojekten auch in den Landkreisen Rems-Murr und Göppingen. Hier sollen mit Hilfe einer Pipeline Erzeuger und Verbraucher von Wasserstoff optimal integriert werden. Daher ist die Fertigstellung auch als von den Plänen der Ferngasnetzbetreiber isolierte Infrastruktur bereits für 2024 vorgesehen. Die GeNeSiS Leitung soll dann 2030 auch an die Süddeutsche Erdgasleitung (SEL) angeschlossen werden (siehe hierzu [https://www.terrane**ts**-sel.de](https://www.terranets-sel.de)).



Abb. 66: Wasserstoff-Pipelineprojekt „H2 GeNeSiS“ in der Region Stuttgart. Umsetzung 2024; Anbindung an die SEL 2030. Quelle: <https://h2genesis.region-stuttgart.de>

6 Flächeninanspruchnahme Erneuerbare Energien – Übersicht

Die Wirkung von Energieversorgungsanlagen auf die Fläche bzw. die Inanspruchnahme von Fläche ist je nach Technologie sehr unterschiedlich und kann auch innerhalb einer Technologie sehr unterschiedliche Ausprägungen haben. Eine pauschale Gesamtbewertung ist kaum möglich. Die Wirkung erneuerbarer Energien können in fünf verschiedenen Kategorien eingeteilt werden (Tab. 24).

Tab. 24: Mögliche Kategorien der Flächeninanspruchnahme durch erneuerbare Energien und Energieinfrastrukturen mit Beispielen.

Nr.	Kategorie	Beschreibung	Beispiele
I	Anlagen auf vorge-nutzten Flächen	Die Anlage ist auf vorgenutzten Flächen errichtet, die bereits zuvor eine Landschafts- und Nutzungsänderung mit sich gebracht hat.	1. PV-Dachanlagen 2. (PV-Anlagen an Autobahnen; hier nicht eigens unterschieden)
II	Anlagen(teile), die Flächen versiegeln	Die Anlage wird errichtet und nimmt hierfür Fläche in Anspruch, die zu einer kompletten Versiegelung des Bodens führt und für andere Nutzungen nicht mehr verfügbar ist.	3. Fundamente von Windenergieanlagen 4. Fundamente von Stromleitungsmasten 5. Fundamente von PV-Freiflächenanlagen 6. Betriebsgebäude in Freiflächen inkl. Kuppelstellen und Umspannanlagen 7. Anlagengebäude und -betriebsflächen 8. oberirdische technische Einrichtungen z.B. Geothermiebohrungen oder Gas-leitungsanzeigen (hier nicht betrachtet)
III	Freiflächenanlagen mit Option für Doppel- bzw. Mehr-fachnutzungen	Umwandlungsflächen, die unmittelbar durch den Anlagenbau und -betrieb dauerhaft in Anspruch genommen werden; aber mit Option für Doppel- und Mehrfachnutzung.	9. PV-Freiflächenanlagen 10. Windenergie-Freiflächen 11. Windenergie-Waldumwandlungsfläche 12. Stromleitungstrassen
IV	Anlagen-Abstandsflächen mit eingeschränkter baulicher oder landwirtschaftlicher Nutzung	Flächen, die um erneuerbare Energieanlagen im weiteren Abstand liegen und dadurch eingeschränkte bauliche und landwirtschaftliche Nutzungsmöglichkeiten haben.	13. Abstandsflächen Windenergie-Anlagenpark 14. Abstandsflächen für Stromleitungstrassen
V	Biomasse-Anbau-flächen	Anbau von Energiepflanzen für Biogasanlagen, Kraftstoffherstellung oder Holzenergie, u.a. Mais, Raps, KUP	15. Anbauflächen Mais für Energie 16. Anbauflächen Raps für Energie 17. Anbauflächen KUP für Energie

Windenergieanlagen sind aufgrund ihrer Größe und Höhe - die Anlagenhöhe inklusive der Flügel heute gebauter Anlagen kann bei mehr als 250 m liegen – weithin sichtbar und üben so eine deutliche Flächenwirkung aus, ohne dass die Anlagen selbst notwendigerweise eine hohen Flächeninanspruchnahme haben. Von Bedeutung können auch Sichtbeziehungen und Fernblicke

sein, die die Qualität der Sicht oder des Flächeneindrucks beeinflussen. Für die Windenergieanlagen liegt die unmittelbare Flächeninanspruchnahme vor allem beim Fundament des Anlagenturms, für das Fläche mit Beton versiegelt wird. Hinzu kommen bei der Errichtung die Kranstellfläche und die Zuwegungen, die teils lediglich für die Errichtungsphase benötigt und später teils wieder rückgebaut werden. Weiterhin sind Abstandsflächen zu berücksichtigen, z.B. zu Siedlungen, aber auch zu sicherheitstechnisch bedeutsamen Anlagen wie z.B. Flughäfen oder auch zur Vermeidung von Abschattungseffekten von Anlagen untereinander. Der Flächenbedarf für die Realisierung von Windparkprojekten geht jedoch über die für den Bau der Anlagen unmittelbar benötigte Fläche hinaus. Die für den ordnungsgemäßen Betrieb eines Windturms erforderliche Fläche kann mit Hilfe von Gleichungen berechnet werden, damit Nachlaufeffekte zwischen einzelnen Windturbinen im Parkverbund vermieden werden. So können die Auswirkungen der Störung der Windströmung innerhalb eines Windparks verringert werden. Die Veränderung des Landschaftsbildes oder die Angst vor Lärmemissionen sind weitere Wirkungen von Windenergieanlagen, die oftmals der Grund sind, weshalb sich Bürger gegen Windenergieanlagen wehren. Für den Schutz von Vögeln gibt es inzwischen technische Lösungen, wie z.B. Antikollisionssysteme oder auch Abschaltvorrichtung bei Annäherung, bei denen sich die Anlagen auf den Artenschutz einstellen können.

Das Vorkommen und die Verteilung von **Solaranlagen** sind vorwiegend an die Bevölkerungsdichte gebunden, da Gebäude-gebundene Anlagen – also PV-Anlagen auf Dächern oder an Fassaden – überwiegen. Eine große Anzahl an Solaranlagen auf Dächern kann aber den Charakter von Landschaften und von Siedlungen oder Dörfern deutlich beeinflussen.

Eine deutliche Flächenwirkung bzw. Flächeninanspruchnahme wird vorwiegend durch **Solar-Freiflächenanlagen** ausgeübt, nicht zuletzt weil technische Anlagen in der Freifläche häufig subjektiv als störendes Element wahrgenommen werden (HHP Hage + Hoppenstedt Partner 2016). Die Flächenwirkung ist vordergründig bedeutsam, so sind z.B. Photovoltaik-Parks optisch sehr präsent. Allerdings gibt es eine Fülle von Möglichkeiten, den Betrieb von Freiflächensolaranlagen mit anderen Nutzungsmöglichkeiten zu kombinieren und so eine Doppel- oder Mehrfachnutzung zu ermöglichen. Beispiele für solche Kombinationen lassen sich vor allem für Agri-Photovoltaikanlagen finden, aber auch unter ‚normalen‘ PV-Anlagenparks lassen sich blühintensive und bienenfreundliche Pflanzenmischungen aussäen oder auch Schafe weiden und so eine Mehrfachnutzung realisieren.

Biomasseanlagen stellen in Baden-Württemberg den bedeutendsten Anteil am regenerativen Anlagenpark dar. Sie sind im Landschaftsbild auch deutlich wahrzunehmen, einmal über ihre technischen Einrichtungen, wie z.B. Biogasanlagen, und zum anderen über ihre Wirkung auf die landwirtschaftliche Nutzung, speziell z.B. den hohen Anteil an Energiepflanzen, wie z.B. Mais oder Raps.

Es ist also wichtig festzuhalten, dass sich trotz der Inanspruchnahme von Landschaft und Fläche durch Solar- oder Windenergieanlagen, nachhaltige landwirtschaftliche Aktivitäten oder regionale Unternehmen entwickeln können. Dieser multifunktionale Ansatz optimiert die Landnutzung, mindert negative Auswirkungen und fördert Synergien zwischen der Erzeugung erneuerbarer Energien und anderen lokalen Wirtschaftstätigkeiten. In diesem Zusammenhang ist eine

strategische Planung von entscheidender Bedeutung, um ein harmonisches Gleichgewicht zwischen der Entwicklung der Energieinfrastruktur und der Erhaltung der Umwelt und der traditionellen Aktivitäten in der Region zu erreichen.

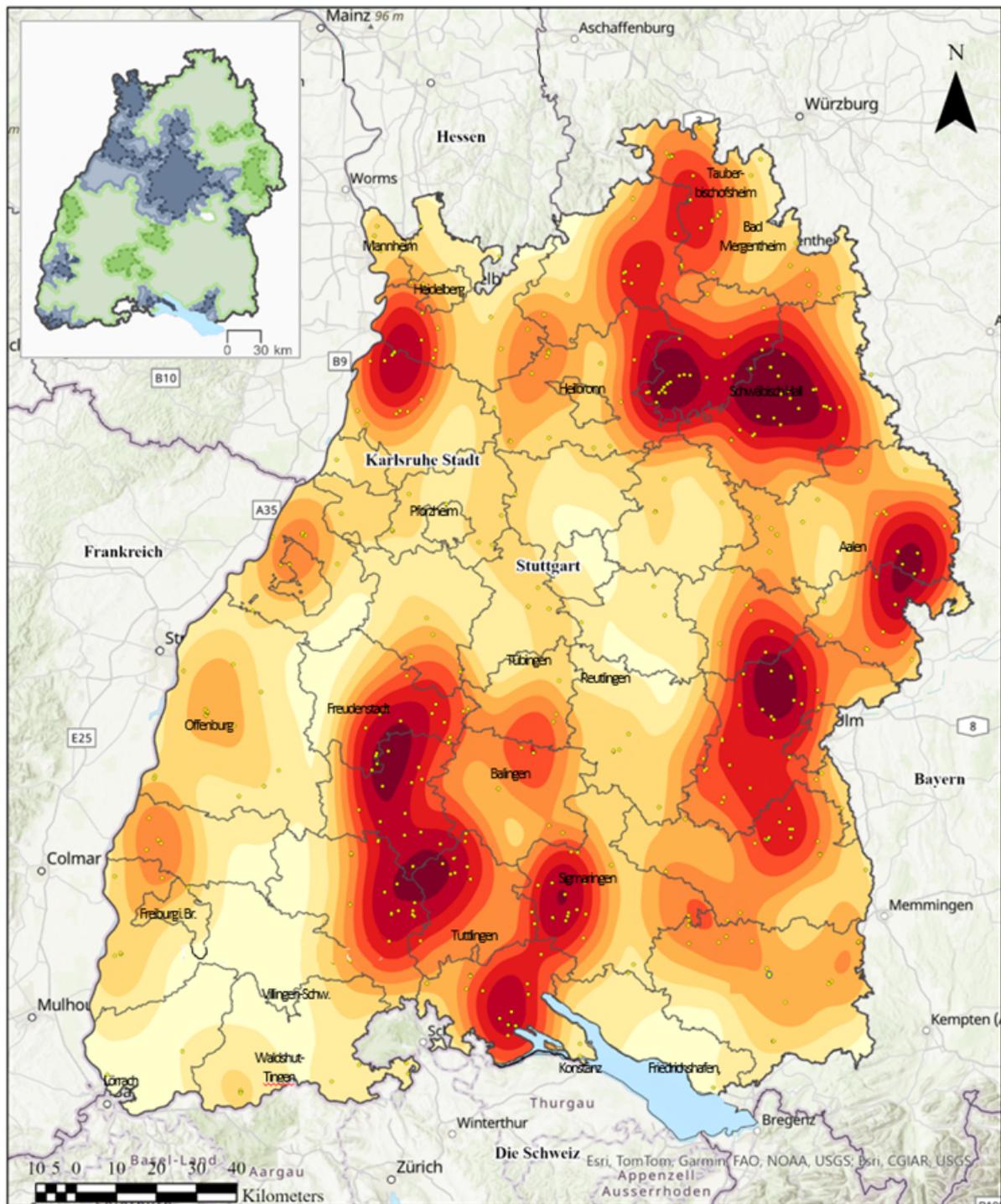
Baden-Württemberg ist bei der Erreichung seines Klimaschutzziels in den letzten Jahren ein gutes Stück vorangekommen und hat seine Treibhausgasemissionen von 1990 bis 2020 um fast 27% gesenkt. Als Reaktion auf die rechtlichen Entwicklungen zum Klimaschutz, u.a. der Entscheidung des Bundesverfassungsgerichts zum Bundesklimaschutzgesetz vom April 2021⁵⁷, hat Baden-Württemberg beschlossen, seine Ambitionen beim Klimaschutz noch einmal zu erhöhen (Baden-Württemberg 2022). So wurde im Februar 2023 das Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetz Baden-Württemberg verabschiedet und damit die Gesetzesnovellen von 2013 und 2020/21 noch einmal fortentwickelt. Mit der Novellierung wird auch herausgestrichen, dass Maßnahmen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels verstärkt werden müssen. Ebenso wird die Vorgabe des Bundesverfassungsgerichtes aufgegriffen, dass auch die Länder zum Klimaschutz verpflichtet werden, da „die Klimaschutzziele des Bundes ohne Durchführungsmaßnahmen und eigene Gesetzgebung in den Bundesländern gar nicht zu erreichen“ sind. Zentrales Element des Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetzes Baden-Württemberg sind neue Klimaschutzziele für die Jahre 2030 und 2040. Die Treibhausgasemissionen im Land sollen im Vergleich zu den Emissionen 1990 bis 2030 um mindestens 65% reduziert werden. Bis 2040 soll über eine schrittweise Minderung Netto-Treibhausgasneutralität („Klimaneutralität“) erreicht sein. Dazuhin wird das 2030-Ziel für einzelne Sektoren wie zum Beispiel die Energiewirtschaft, die Industrie oder den Verkehr durch „Sektor-Ziele“ konkretisiert (Tab. 1). Um die Ziele zu erreichen, wurde das Instrument des „Klima-Maßnahmen-Registers“ entwickelt, in dem die Maßnahmen der Landesregierung zum Schutz des Klimas einheitlich, übergeordnet und fortlaufend geführt werden.

Beim Klimaschutz kommt es nach Aussage der Landesregierung „ganz wesentlich auf den Ausbau und die Nutzung der erneuerbaren Energien an“. Im Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetz werden daher Flächenziele für den Ausbau der Windenergie und der Freiflächen-Photovoltaik in Baden-Württemberg bestimmt. Diese stellen eine Mindestvorgabe dar und können im Interesse des Klimaschutzes auch überschritten werden. Die Bundesregierung hatte in ihrem Windenergieflächenbedarfsgesetz (WindBG) verankert, dass 2% der Fläche Deutschlands für die Windenergie auszuweisen ist (bis 2032). Das Umweltbundesamt hatte errechnet, dass dieses Flächenziel ausreicht, um die Ausbauziele für die Windenergie an Land für den Bund zu erreichen (UBA 2023). Den Bundesländern wurden Vorgaben gemacht, welchen Anteil ihrer Landesfläche sie bis Ende 2027 und Ende 2032 planerisch für die Windenergie an Land ausweisen müssen (Anlage 1 WindBG). Fast alle Länder mussten demnach mehr Flächen bereitstellen als bisher geplant worden war.

⁵⁷ <https://www.bundesverfassungsgericht.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2021/bvg21-031.html>

Schon vor der gesetzlichen Verankerung der vom Bund vorgegebenen Flächenziele hatte das Land Baden-Württemberg eine Regionale Planungsoffensive mit den zwölf Regionalverbänden auf den Weg gebracht.

In diesem Zusammenhang wurden im vorliegenden Projekt die Anlagenstandorte und Potenzialkarten für erneuerbare Energien in Baden-Württemberg auf räumliche Schwerpunkte für die verschiedenen Energieformen oder Energieanlagen untersucht. Sie sind für die Solarfreiflächenanlagen und Windenergie (fluktuierende Energien) in Abb. 67 und 68 und für die Bioenergie und Wasserkraft in Abb. 69 und 70 dargestellt. Bei diesen als „Heat Maps“ bezeichneten Karten handelt es sich um Visualisierungen, die erkennen lassen, wo Schwerpunkte der Projektentwicklung vorhanden sind, ohne dass unmittelbar genaue Einzel-Standorte sichtbar gemacht werden. Solar-Gebäudeanlagen sind hierbei nicht berücksichtigt, da sie unmittelbar mit den Standorten von Gebäuden verbunden sind und keinen zusätzlichen Freiraum beanspruchen.



„Heat map“ der Dichteverteilung von Freiflächen-Solaranlagen 2022 in [Anzahl/km²]



Quelle: Marktstammdatenregister

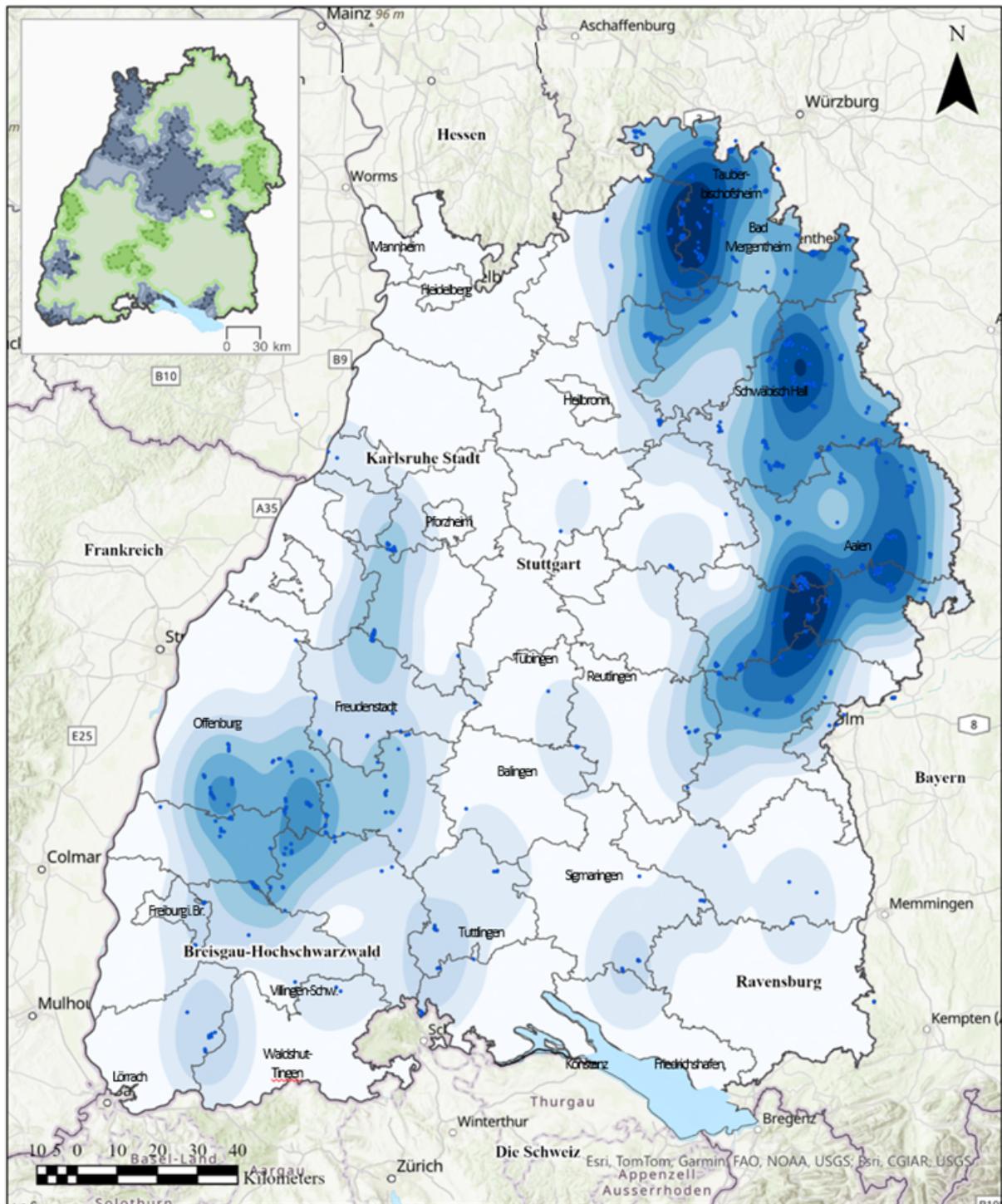
Raumkategorien LEP 2002

- Ländlicher Raum im engeren Sinne
- Verdichtungsbereiche im Ländlichen Raum
- Randzonen um die Verdichtungsräume
- Verdichtungsräume
- Gemeindefreies Gebiet



Abb. 67: Visualisierung der räumlichen Verteilung und Dichte (Anlagen pro Fläche) von Solar-Freiflächenanlagen in Baden-Württemberg; Stand 2022; Datenquelle: Marktstammdatenregister 2023; Darstellung: IER

In Abb. 67 ist die Verteilung von Freiflächenphotovoltaikanlagen in Baden-Württemberg als ‚Heat map‘ dargestellt. Es wird deutlich, dass diese an bestimmten Stellen auf der Landesfläche in hoher Anzahl bzw. Fläche hervortreten, vor allem im Nordosten, im Osten und mittleren Süden des Landes. Dies sind besonders die Landkreise Karlsruhe und Rhein-Neckar, Heilbronn, Hohenlohe und Schwäbisch Hall, Alb-Donau-Kreis, Rottweil, Freudenstadt und auch Konstanz. Insbesondere im Südschwarzwald, am Bodenseekreis und in der Region Stuttgart sind nur sehr wenige Anlagen vertreten. Trotz der im Vergleich zu den Windkraftanlagen (Abb.68) geringerer Anlagedichte ist die direkte Flächeninanspruchnahme (Überbauung) von Freiflächen-Photovoltaikanlagen größer.



„Heat map“ der Dichteverteilung von Windenergieanlagen 2022 in [Anzahl/km²]

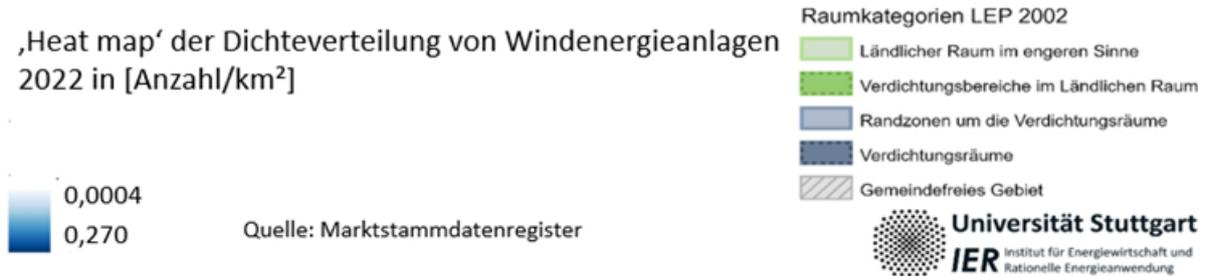
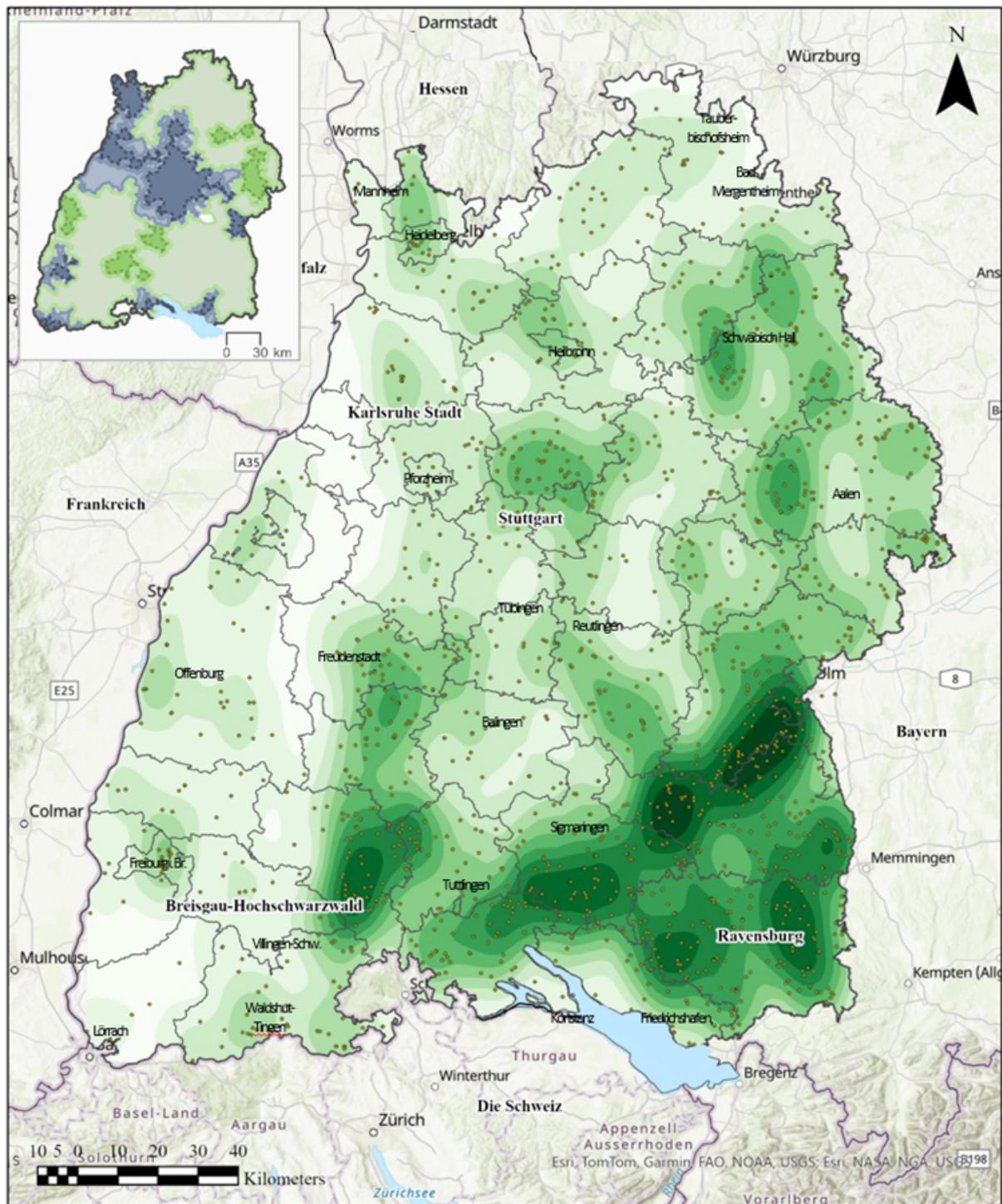


Abb. 68: Visualisierung der räumlichen Verteilung und Dichte (Anlagen pro Fläche) von Windenergieanlagen in Baden-Württemberg; Stand 2022; Datenquelle: Marktstammdatenregister 2023; Darstellung: IER

In Abb. 68 ist die Verteilung von Windenergieanlagen in Baden-Württemberg als ‚heat map‘ dargestellt. Im Bereich Windenergie sieht die Verteilung der Anlagen auf der Landesfläche anders aus als bei den Freiflächen-PV-Anlagen. Hier konzentrieren sich Anlagen vorwiegend im Nordosten vom Main-Tauber-Kreis, Schwäbisch Hall bis Ostalb und Heidenheim, Göppingen und Alb-Donau-Kreis. Weitere Schwerpunktbereiche finden sich im Schwarzwald, vom Kreis Calw über Freudenstadt, Rottweil und der südliche Ortenaukreis.

Abbildung 69 zeigt die Anlagenverteilung in Baden-Württemberg für Bioenergieanlagen zur Stromerzeugung - vorwiegend Biogas.



„Heat map“ der Dichteverteilung von Biomasse-Anlagen 2022 in [Anzahl/km²]



Quelle: Marktstammdatenregister

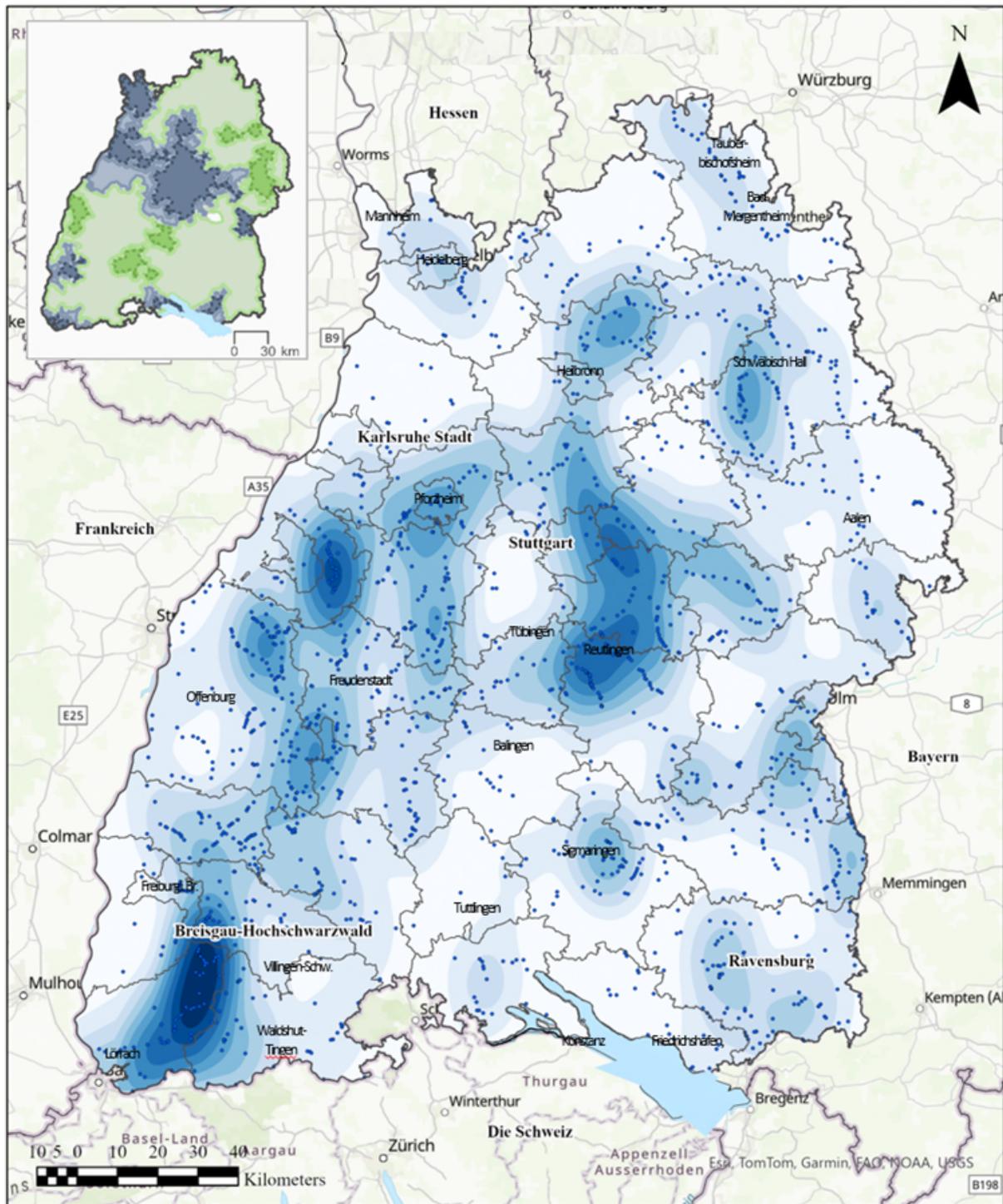
Raumkategorien LEP 2002

- Ländlicher Raum im engeren Sinne
- Verdichtungsbereiche im Ländlichen Raum
- Randzonen um die Verdichtungsräume
- Verdichtungsräume
- Gemeindefreies Gebiet

Universität Stuttgart
IER Institut für Energiewirtschaft und
 Rationelle Energieanwendung

Abb. 69: Visualisierung der räumlichen Verteilung und Dichte (Anlagen pro Fläche) von Biomasseanlagen zur Stromerzeugung in Baden-Württemberg als „heat map“; Stand 2022; Datenquelle: Marktstammdatenregister 2023; Darstellung: IER

Die Anlagenverteilung zeigt ebenfalls deutliche Schwerpunkte. Für die Bioenergie lässt sich ein großer Schwerpunkt in Oberschwaben im Südosten des Landes identifizieren. Dies ist eine Landschaft mit besonders viel Grünland und Viehhaltung, aus der eine große Anzahl an Biogasanlagen mit Substrat versorgt werden können. Aber auch im Rest des Landes Baden-Württemberg ist eine Reihe von Anlagen verteilt, die Schwerpunkte liegen aber eindeutig eher in den östlichen Landesteilen. Deutlich wird u.a. auch, dass im Schwarzwald, wo sich bedeutende Potenziale für Holzenergie befinden, wenig Strom aus Biomasse erzeugt wird. Diese Rohstoffpotenziale im Schwarzwald werden tatsächlich eher für die Wärmebereitstellung genutzt. Daher sind im Westen des Landes hier auch keine Schwerpunkte ersichtlich.



„Heat map“ der Dichteverteilung von Wasserkraft-Anlagen 2022 in [Anzahl/km²]



Quelle: Marktstammdatenregister

Raumkategorien LEP 2002

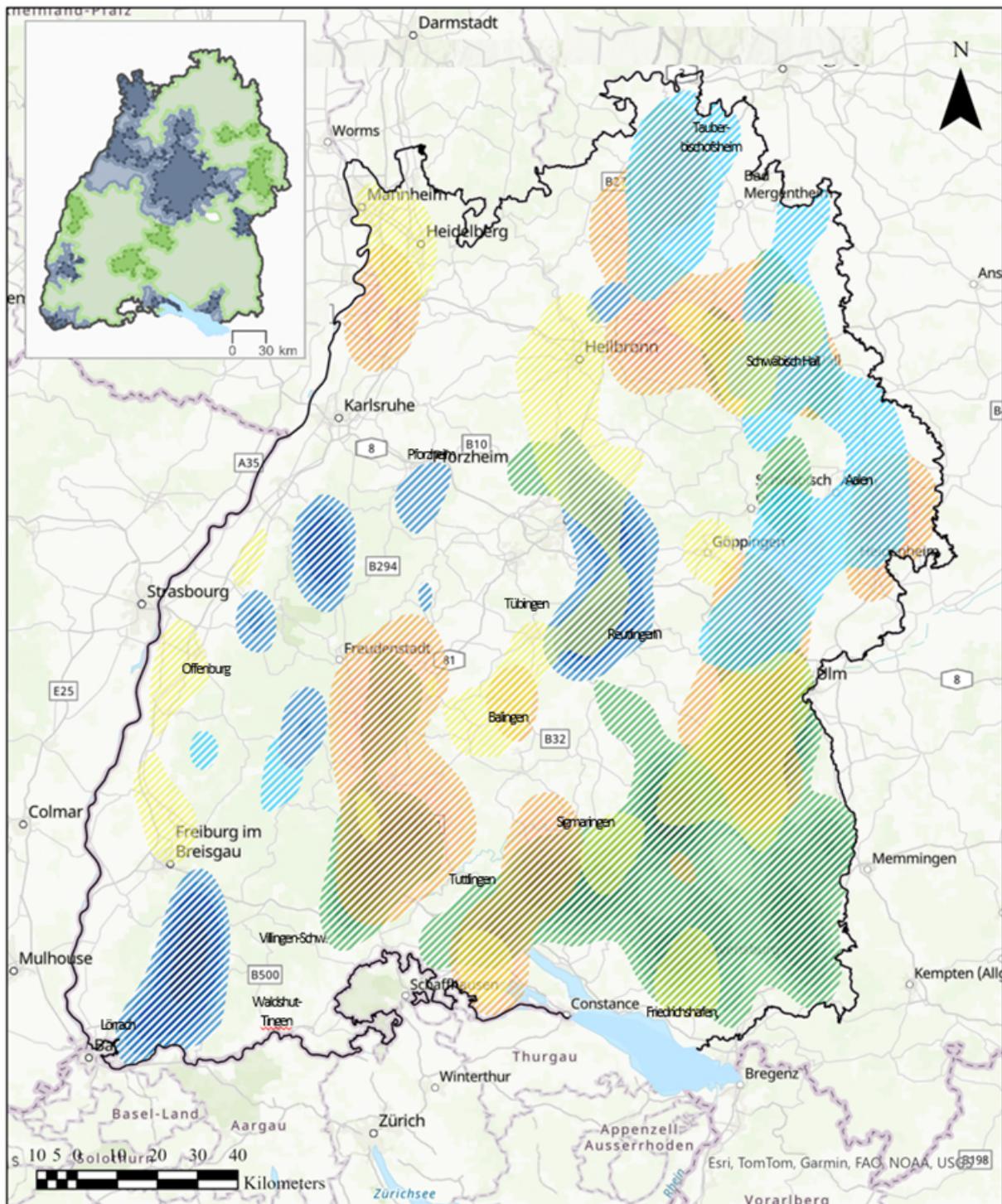
- Ländlicher Raum im engeren Sinne
- Verdichtungsgebiete im Ländlichen Raum
- Randzonen um die Verdichtungsgebiete
- Verdichtungsgebiete
- Gemeindefreies Gebiet

Universität Stuttgart
IER Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung

Abb. 70: Visualisierung der räumlichen Verteilung und Dichte (Anlagen pro Fläche) von Wasserkraftanlagen in Baden-Württemberg; Stand 2022; Datenquelle: Marktstammdatenregister 2023; Darstellung: IER

Für die Wasserkraft (Abb. 70 ist ein Schwerpunkt von Anlagen eher im Zentrum entlang des Neckar, im Südwesten und im nördlichen Schwarzwald (Kreise Karlsruhe, Rastatt und Enzkreis) zu erkennen. Die Anlagen sind hier stark linear an den Verlauf der Gewässer bzw. Flüsse gebunden.

Aus dieser Einzelaufstellung wird zusammenfassend deutlich, dass jede Energieform bzw. Energietechnologie eine spezifische räumliche Verteilung aufweist. Die Verschneidung der räumlichen Verteilung aller betrachteten Energien ist in Abb. 71 dargestellt. Hierbei sind Solaranlagen auf und an Gebäuden, Freiflächensolaranlagen, Windenergieanlagen und Biomassekraftwerke und Wasserkraftanlagen berücksichtigt. Es ist wie oben dargestellt zu erkennen, dass jede Energietechnologie eigene Schwerpunktbereiche an Flächen belegt. In der Gesamtschau aller Energien lassen sich vor allem im Osten des Landes Baden-Württemberg, von Nord-Württemberg bis Oberschwaben, Schwerpunkte für die Nutzung erneuerbarer Energien erkennen. Dennoch wird deutlich, dass es kaum Gebiete gibt, an denen es keine erneuerbare Energien Anlagen gibt.



„Heat map“ der Dichteverteilung von Erneuerbare Energien-Anlagen 2022 in [Anzahl/km²]

- Freiflächen PV Anlagen
- Gebäude PV Anlagen
- Windenergieanlagen
- Wasserkraftanlagen
- Biomasse Stromerzeugungseinheiten

Quelle: Marktstammdatenregister

Raumkategorien LEP 2002

- Ländlicher Raum im engeren Sinne
- Verdichtungsbereiche im Ländlichen Raum
- Randzonen um die Verdichtungsräume
- Verdichtungsräume
- Gemeindefreies Gebiet



Abb. 71: Visualisierung der räumlichen Verteilung von Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien in Baden-Württemberg; Stand 2022; Datenquelle: Marktstammdatenregister 2023; Darstellung: IER

Wie Abb. 67 bis Abb. 71 deutlich machen, lassen sich für einzelne Energieversorgungstechnologien schon heute landesweite Raumstrukturen in Bezug auf die Energieversorgung erkennen, z.B.

- Bioenergie-Regionen wie die Bioenergie-Region Hohenlohe-Odenwald-Tauber
- Bioenergiedörfer: siehe Liste von Bioenergiedörfern im Energieatlas Baden-Württemberg
- Biogasanlagen: hohe Anlagendichte in Oberschwaben
- Geothermie: Oberrheingraben; Region Bad Urach, Mineralquellengebiete (z.B. Stuttgart)
- Windenergie: Schwarzwald, Ostalb, Schwäbischer Wald
- Solarenergiepotenzial (Globalstrahlung): Südlicher Oberrhein, Allgäu

In der Zusammenschau lassen sich so nur schwer Energieregionen in Baden-Württemberg identifizieren, die eine besondere Ausprägung als „Energiewirtschaftslandschaft“ oder „Energiewirtschaftsregion“ mit breitem Energieportfolio erkennen lassen. Die bestehenden Energieregionen zeichnen sich zudem häufig nur dadurch aus, dass politisch ein Zusammenschluss von Kommunen oder Institutionen angestrebt bzw. umgesetzt wird. Die Definition als „Energiewirtschaftsregion“ beruht also eher weniger auf landestypischen Raummerkmalen, sondern auf politischen Willensbekundungen. Für einzelne Technologien/Energien lassen sich durchaus Schwerpunktregionen finden.

Für Deutschland hat (BBSR 2023) eine Studie erstellt, in der die räumliche Verteilung erneuerbarer Energien in Deutschland in räumliche Cluster aufgeteilt und die Potenziale erneuerbarer Energien jeweils für die Cluster herausgearbeitet wurden. In Anlehnung hieran lässt sich dies auch für Baden-Württemberg trotz der ausgesprochenen Vielfalt der Naturräume entlang der geographischen Eigenschaften machen, da die naturräumlichen Rahmenbedingungen ja die Grundvoraussetzung für die Nutzung erneuerbarer Energien darstellen.

Sinnvollerweise könnten hier folgend Clusterräume identifiziert werden:

- Cluster 1: der Nordwestliche Teil Baden-Württembergs, die Gäulandschaften und baden-württembergischen Teile des Odenwalds inklusive der Verdichtungsräume Stuttgart, Karlsruhe, Heidelberg und Mannheim
- Cluster 2: der Nordöstliche Landesteil mit dem Keuperbergland, der Hohenloher Ebene, dem Kraichgau und Teilen der Ostalb
- Cluster 3: der Südöstliche Teil von Baden-Württemberg mit der Schwäbischen Alb, dem Donautal und dem Alpenvorland von Oberschwaben, inkl. dem Bodenseegebiet
- Cluster 4: der Schwarzwald als dedizierter Teil von Baden-Württemberg mit seinen Bergrücken und der hohen Walddichte
- Cluster 5: Der Oberrheingraben mit seiner charakteristischen schmalen Ausprägung entlang des Oberrheins bis nach Mannheim (ggf. geringe Überschneidungen mit Cluster 1)

Die Schwerpunkte und Potenziale der Nutzung erneuerbarer Energien für Baden-Württemberg werden hier wie nachfolgend dargestellt beurteilt:

Cluster	Solar-dächer	Solar-FFA	Wind-energie	Holz-energie	Biogas	Geothermie oberfl.-nah	Geothermie tief
1	Hoch	Mittel	Mittel	Niedrig	Mittel	Hoch	Hoch
2	Niedrig	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel	Hoch	Niedrig
3	Niedrig	Hoch	Hoch	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
4	Mittel	Niedrig	Hoch	Hoch	Niedrig	Hoch	Niedrig
5	Hoch	Mittel	Mittel	Niedrig	Mittel	Hoch	Hoch

Die dargestellten Einschätzungen beruhen auf einer Analyse der durchschnittlichen Einsatzmöglichkeiten für die einzelnen Technologien im jeweiligen Cluster, nicht aber auf dem entsprechend mobilisierbaren Potenzial. So wird die Einsatzmöglichkeit für oberflächennahe Geothermie für alle Teile Baden-Württembergs als hoch eingeschätzt, da sie in praktisch allen Landesteilen und auch Anwendungen eingesetzt werden kann und mit etwa gleichen Vor- und Nachteilen bzw. Einschränkungen verbunden ist, auch wenn das Energiepotenzial insgesamt nur begrenzt ist.

Grundsätzlich spiegelt dies Einschätzung die geographische Vielfalt des Landes Baden-Württemberg wieder, die zur Folge hat, dass in fast allen Landesteilen eine große Bandbreite an Technologien prinzipiell gut einsetzbar ist.

7 Schlussfolgerungen

Die energiewirtschaftliche Situation in Deutschland und ganz besonders auch in Baden-Württemberg als sehr energieintensives und industrialisiertes Bundesland ist durch die Energiewende, die Folgen des Klimawandels und durch die geopolitischen Verwerfungen sowie den russischen Angriffskrieg auf die Ukraine geprägt. Unter verschiedenen Aspekten wie dem demographischen Wandel und dem Klimawandel bezeichnen auch (HHP Hage + Hoppenstedt Partner 2016) die Umgestaltung der Energieerzeugung als einen der wesentlichen Triebkräfte, die den Wandel unserer (Kultur-)Landschaft vorantreiben. In der Folge werden insbesondere die erneuerbaren Energien ausgebaut, Erdgas zunehmend sehr kritisch gesehen bzw. auch Erdgasnetze zumindest teilweise stillgelegt⁵⁸. Die Energiewende lässt sich bereits heute an weithin sichtbaren Windenergieparks und auch industriell aufgestellten Photovoltaikanlagen oder großflächigen Maisfeldern ablesen. In der Zukunft sind jedoch noch größere Veränderungen zu erwarten. Wenn die energiepolitischen Ziele umgesetzt werden sollen, werden größere Anteile der Oberfläche unseres Landes für energietechnische Anlagen in Anspruch genommen werden. Aussagen zu flächenhaften und landschaftlichen Auswirkungen lassen sich aber nur schwer pauschal treffen, sie sind entscheidend vom konkreten Standort und von der Art und Weise der Bereitstellung und Nutzung der Ressourcen und erneuerbaren Energien abhängig.

Dies bedeutet in jedem Fall – bei aller Unsicherheit über die weitere Entwicklung – verschiedene Trends für die Zukunft und Auswirkungen auf den Flächenbedarf, insbesondere:

1. Klimaschutz und die Erreichung der Klimaziele aus dem Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetz Baden-Württemberg stehen weit im Vordergrund. Es ist daher zu erwarten, dass der weitere Ausbau erneuerbarer Energien auch in Zukunft mit hoher Priorität vorangetrieben wird. Mit der Regionalen Planungsoffensive für Solar- und Windenergie (1,8% Wind, mind. 0,2% PV-Freiflächenanlagen) werden bereits aktuell (Ziel 2025) Flächenziele planungsrechtlich gesichert.
2. eine starke räumliche Verteilung der Energieversorgungsstrukturen insbesondere für (kleinere) erneuerbare Energien (Dezentralität); sie werden sich weniger konzentrieren, stärker in die Fläche ausbreiten und mehr Fläche in Anspruch nehmen; Baden-Württemberg hat hier als inländisches Flächenland einen besonderen Nachholbedarf, da onshore-Windenergieanlagen insgesamt einen geringeren Ertrag erbringen.
3. einen großen Mix an verschiedenen Energietechnologien und -anlagen; Diversität an erneuerbaren Energien glättet die zeitlichen Profile einzelner Technologien, mindert die Kosten und Marktpreise und steigert die Versorgungssicherheit.
4. einen Ausbau von Energieverteilungsanlagen, besonders Netze;

⁵⁸ Siehe z.B. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/gas-erdgasversorgung-in-deutschland.html>

- a) Wärmenetze werden zukünftig ausgebaut und müssen in Richtung von Niedertemperaturnetzen umgebaut werden; niedrige Wärmebedarfsdichten in Wohngebieten durch hoch isolierte Gebäude mindern hingegen eher den Ausbau
 - b) Erdgasnetze werden vornehmlich im Hinblick auf Ihren zukünftigen Umbau zu Wasserstoffnetzen umgerüstet und für die Industrie genutzt; ggf. werden die Netze sogar stillgelegt.
5. eine deutliche Fokussierung der energiepolitischen Bemühungen auf mehr Autonomie und Eigenversorgung bei der Energieversorgung für Deutschland, d.h. mehr eigene Energieversorgungsanlagen und einen höheren Eigenversorgungsgrad, tendenziell bedeutet dies einen höheren Flächenbedarf für Energieversorgungsanlagen und -strukturen in Deutschland bzw. Baden-Württemberg.

Im Bereich der konventionellen fossilen Energieversorgungsstrukturen, z.B. Kraftwerke, Strom- und Gasnetze lassen sich spezifische Regionen identifizieren, die eine hohe Dichte an Energieinfrastrukturen aufweisen. Dies ist besonders der Fall in energieintensiven Industrieregionen wie z.B. die Wärmeregion Mannheim-Heidelberg.

Diese energiewirtschaftliche Situation und Entwicklung hat große Auswirkungen auf die Land- und Flächennutzung. Die Vielfalt und die benötigte Zahl an Anlagen zur Bereitstellung und Nutzung von Energie bedingt auch in Zukunft eine entsprechend hohe Flächeninanspruchnahme (siehe die Diskussion um den Ausbau von Windenergie oder Freiflächen-Solaranlagen). Die Verteilung dieses Flächenbedarfs ist allerdings häufig kleinräumig und wird daher voraussichtlich dem kommunalen Planungsbereich zuzuordnen sein (z.B. über das Baurecht). Auf Städte und Gemeinden kommt daher zukünftig für den Bereich Energieversorgung eine höhere Verantwortung zu.

8 Literaturverzeichnis

50Hertz GmbH und Partner (Hg.) (2023): Netzentwicklungsplan Strom 2037 mit Ausblick 2045, Version 2023. Zweiter Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber. 50Hertz Transmission GmbH; Amprion GmbH; TenneT TSO GmbH; TransnetBW GmbH. Online verfügbar unter www.netzentwicklungsplan.de.

50Hertz Transmission GmbH; Amprion GmbH; TenneT TSO GmbH; TransnetBW GmbH (Hg.) (2019): Netzentwicklungsplan Strom 2030. Version 2019. Zweiter Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber. Online verfügbar unter https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/NEP_2030_V2019_2_Entwurf_Teil1.pdf, zuletzt geprüft am 23.04.2020.

50Hertz Transmission GmbH; Amprion GmbH; TenneT TSO GmbH; TransnetBW GmbH (Hg.) (2024): Szenariorahmen zum Netzentwicklungsplan Strom 2037/2045, Version 2025. Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber. Online verfügbar unter <https://www.bundesnetzagentur.de/1018446#Szenariorahmen>, zuletzt geprüft am 1.2.25.

AEE (2013): Potenzialatlas Bioenergie in den Bundesländern. Unter Mitarbeit von Philipp Vohrer. Agentur für Erneuerbare Energien (AEE). Berlin. Online verfügbar unter www.unendlich-viel-energie.de, zuletzt geprüft am 19.03.2020.

AEE (Hg.) (2023): Strommix in den Bundesländern. Unter Mitarbeit von Claudia Kunz. Berlin (Renews Kompakt, Ausgabe 63). Online verfügbar unter https://www.unendlich-viel-energie.de/media/file/6111.AEE_RenewsKompakt_Strom.pdf.

Agemar, Torsten; Suchi, Evelyn; Moeck, Inga (2018): Die Rolle der tiefen Geothermie bei der Wärmewende. Wie Deutschland 60 % erneuerbare Wärme bis 2050 schaffen könnte. Hg. v. Leipzig-Institut für angewandte Geophysik. Hannover (LIAG Archiv, 0135181).

Agentur für Erneuerbare Energien (Hg.) (2013): Potenzialatlas Bioenergie in den Bundesländern. Teilkapitel: Baden-Württemberg. Berlin. Online verfügbar unter www.unendlich-viel-energie.de, zuletzt geprüft am 15.01.2024.

AGFW (2023): AGFW Hauptbericht 2022. Unter Mitarbeit von Johannes Dornberger. Hg. v. Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V. (AGFW). Frankfurt a.M. Online verfügbar unter <https://www.agfw.de/zahlen-und-statistiken/agfw-hauptbericht>, zuletzt geprüft am 15.4.2024.

AL-PRO (2019): Windatlas Baden-Württemberg 2019. Unter Mitarbeit von Carsten Albrecht, Dr Raimund Pauen, Christoph Bloch und Tina Kemmerich. Hg. v. AL-PRO und Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM BW). Großheide. Online verfügbar unter <https://www.energieatlas-bw.de/documents/24384/139536/Endbericht+Windatlas+BW+2019>, zuletzt geprüft am 2.4.24.

Baden-Württemberg, Umweltministerium (2022): Monitoring der Energiewende in Baden-Württemberg. Statusbericht 2022. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM BW). Online verfügbar unter https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Energie/Monitoring-der-Energiewende-in-Baden-Wuerttemberg-Statusbericht-2022.pdf, zuletzt geprüft am 08.01.2024.

BBSR (Hg.) (2023): Klimawandel und Energiewende gestalten. Vorbereitungsstudie Raumordnungsbericht 2024. Unter Mitarbeit von Andrea Hartz, Sascha Saad, Katja Reichert, David Frey und Buchholz, Anna (agl). Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung; Deutschland, (BBSR). Bonn.

BMVI (2015): Räumlich differenzierte Flächenpotentiale für erneuerbare Energien in Deutschland. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (BMVI-Online-Publikation, 08/2015).

Böhm, Jonas (2023): Vergleich der Flächenenergieerträge verschiedener erneuerbarer Energien auf landwirtschaftlichen Flächen – für Strom, Wärme und Verkehr. In: *Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft* (Band 101, Ausgabe 1).

Brellocks, Jochen; Specht, Michael; Oechsner, Hans; Schüle, Rafael; Eltrop, Ludger; Härdtlein, Marlies; Henßler, Martin (2013): Konzeption für die (Neu-)Ausrichtung der energetischen Verwertung von Biomasse und der Bioenergie-Forschung in Baden-Württemberg. Hg. v. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) Stuttgart und IER-Uni Stuttgart Uni Hohenheim. Stuttgart. Online verfügbar unter www.zsw-bw.de/fileadmin/user_upload/PDFs/Studien/Biomasse-Strategie_Studie_2013.pdf, zuletzt geprüft am 08.01.2024.

Bundesamt für Justiz (2016): BSI-Kritisverordnung zur Bestimmung Kritischer Infrastrukturen nach dem BSI-Gesetz (BSI Kritisverordnung - BSI-KritisV). Zuletzt geändert durch Art. 1 V v. 29.11.2023 I Nr. 339. Anhang 1 - Anlagenkategorien und Schwellenwerte im Sektor Energie. Hg. v. BMJ. Bonn. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/bsi-kritisv/BJNR095800016.html>, zuletzt geprüft am 15.01.2024.

Bundestag, Deutscher (2023): Beschlussempfehlung und Bericht des Ausschusses für Wohnen, Stadtentwicklung, Bauwesen und Kommunen. zum Gesetzentwurf der Bundesregierung - Drucksache 20/80654. Drucksache 20/9344. Deutscher Bundestag. Online verfügbar unter <https://dserver.bundestag.de/btd/20/093/2009344.pdf>, zuletzt geprüft am 04.04.2024.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (2012): 2. Internationale Fachtagung Strohenergie. 29./30. März 2012, Berlin. 1. Aufl. Gülzow-Prüzen: FNR (Gülzower Fachgespräche, 38). Online verfügbar unter https://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/g/f/gfg_band_38_etagungsband_fachtagung_strohenergie_v05_1.pdf.

FhG ISE (2024a): Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende. Ein Leitfaden für Deutschland. Unter Mitarbeit von Dr. Max Trommsdorff et al. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE). Freiburg. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/agri-photovoltaik-chance-fuer-landwirtschaft-und-energiewende.html>, zuletzt geprüft am 03.04.2024.

FhG ISE (Hg.) (2024b): Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien. Unter Mitarbeit von Christoph Kost, Paul Müller, Schweiger Jael, Verena Fluri und Jessica Thomsen. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen.html>, zuletzt geprüft am 17.10.24.

Fluri, Verena; Connor Thelen; Bin Xu-Sigurdsson; Cristina Balmus; Markus Kaiser; Tobias Reuther et al. (2024): Stromstudie für Baden-Württemberg. Versorgungssituation bis zum Jahr 2040. Hg. v. Baden-Württembergischer Industrie- und Handelskammertag und Fraunhofer ISE. Freiburg im Breisgau. Online verfügbar unter

https://www.bw.ihk.de/_Resources/Persistent/3a12bedd3720e05c28f539c5ad3edbeb3dbc96d7/BWIHK-Stromstudie_Ba-Wue_V03_190124.pdf, zuletzt geprüft am 01.04.2024.

FNB Gas (Hg.) (2020): Netzentwicklungsplan Gas 2020-2030. Konsultation. Die Fernleitungsnetzbetreiber (FNB Gas). Berlin. Online verfügbar unter https://www.fnb-gas.de/media/2020_04_30_fnb_gas_2020_nep_konsultation_de.pdf, zuletzt geprüft am 05.05.2020.

FNB Gas (Hg.) (2024): Netzentwicklungsplan Gas 2022-2032. Unter Mitarbeit von Nils von Ohlen. Fernleitungsnetzbetreiber. Berlin. Online verfügbar unter https://fnb-gas.de/wp-content/uploads/2024/03/2024_03_20_NEP-2022_Gas_FINAL_DE.pdf, zuletzt geprüft am 19.10.2024.

Fthenakis, Vasilis; Kim, Hyung Chul (2009): Land use and electricity generation: A life-cycle analysis. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (6-7), S. 1465–1474. DOI: 10.1016/j.rser.2008.09.017.

HHP Hage + Hoppenstedt Partner (2016): Den Kulturlandschaftswandel gestalten. Vergleich der Flächenenergieerträge verschiedener erneuerbarer Energien auf landwirtschaftlichen Flächen – für Strom, Wärme und Verkehr. Hg. v. LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. HHP Hage + Hoppenstedt Partner; TU Dresden. Online verfügbar unter <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/10096>, zuletzt geprüft am 15.04.2024.

IMI e.V. (2012): Rüstungsatlas Baden-Württemberg. Unter Mitarbeit von Roland Blach, Manfred Dietenberger, Dirk Eckert, Michael Haid und Claudia Haydt. Hg. v. Informationsstelle Militarisierung (IMI) e.V. und Deutsche Friedensgesellschaft - Vereinigte KriegsdienstgegnerInnen. Online verfügbar unter <https://www.imi-online.de/>, zuletzt geprüft am 15.04.2024.

Ioannidis, Romanos; Koutsoyiannis, Demetris (2020): A review of land use, visibility and public perception of renewable energy in the context of landscape impact. In: *Applied Energy* 276, S. 115367. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115367.

Koschker, Susanne (2015): Wieviel Boden braucht unser Strom? Bürgerenergie für die Region - egNEOS. Umundu, 17.10.2015. Online verfügbar unter https://egneos.de/wp-content/uploads/2015/10/flaechenverbrauch_umundu_egneos.pdf, zuletzt geprüft am 19.12.2023.

Landtag von Baden-Württemberg (30.09.2022): Strombedarf und -versorgung in Baden-Württemberg. Stellungnahme des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft zum Antrag des Abg. Tobias Vogt u.a. CDU (Drucksache 17/3291). Online verfügbar unter https://www.landtag-bw.de/files/live/sites/LTBW/files/dokumente/WP17/Drucksachen/3000/17_3291_D.pdf, zuletzt geprüft am 19.12.2023.

Lüers, Silke (2024): Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland – Jahr 2023. Hg. v. Deutsche WindGuard. Varel. Online verfügbar unter https://windenergie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/pressemitteilungen/2024/20240116_Status_des_Windenergieausbaus_an_Land_Jahr_2023.pdf.

Nitsch, Joachim; Magosch, Magdalena (2021): Baden-Württemberg Klimaneutral 2040: Erforderlicher Ausbau der Erneuerbaren Energien. Unter Mitarbeit von Franz Pöter. Hg. v. Plattform Erneuerbare Energien Baden-Württemberg (PEEBW). Stuttgart. Online verfügbar unter <https://erneuerbare-bw.de/de/sparten/studie-ee-ausbau-in-bw-bis-2040>, zuletzt geprüft am 4.7.24.

Quentin, Jürgen (2024): Ausbauentwicklung der Windenergie im Jahr 2023. Auswertung windenergiespezifischer Daten im Marktstammdatenregister für den Zeitraum Januar bis Dezember 2023. Hg. v. FA Windenergie an Land e.V. Online verfügbar unter www.fachagentur-windenergie.de, zuletzt geprüft am 5.7.24.

Reinhardt, Guido; Scheuerlen, Karl; Gärtner, Sven (2005): Nachhaltige Biomassepotenziale in Baden-Württemberg. Kurzgutachten. Hg. v. IFEU- Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. Heidelberg. Online verfügbar unter <https://www.ifeu.de/projekt/biomassepotenziale/>, zuletzt geprüft am 08.01.2024.

Schulz, Rüdiger; Dittmann, Jan; Suchi, Evelyn; Knopf, Stefan (2013): Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie. Hg. v. Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) und Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover. Online verfügbar unter <https://www.geotis.de>, zuletzt geprüft am 11.04.2024.

UBA (Hg.) (2019): Analyse der kurz- und mittelfristigen Verfügbarkeit von Flächen für die Windenergienutzung an Land. Kurztitel: Flächenanalyse Windenergie an Land. Unter Mitarbeit von Marian Bons, Michael Döring, Corinna Klessmann, Jonas Knapp, Silvana Tiedemann. Dessau-Roßlau (Climate Change, 38/2019).

UBA (2020): Kommunaler Klimaschutz durch Verbesserung der Effizienz in der Fernwärmeversorgung mittels Nutzung von Niedertemperaturwärmequellen am Beispiel tiefergeothermischer Ressourcen. Abschlussbericht. Hg. v.

Umweltbundesamt (UBA). HIC Hamburg Institut Consulting GmbH, Hamburg; GeoThermal Engineering GmbH, Karlsruhe; Solites Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme, Stuttgart (Climate Change, 31/2020).

UBA (Hg.) (2022): Endbericht - Umweltverträgliche Standortsteuerung von Solar-Freiflächenanlagen. Unter Mitarbeit von D. Günnewig und Esther Johannwerner. Bosch & Partner, GmbH, Hannover; ZSW; Stiftung Umweltenergierecht. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/>, zuletzt geprüft am 31.07.2024.

UBA (2023): Flächenverfügbarkeit und Flächenbedarfe für den Ausbau der Windenergie an Land. Abschlussbericht. Unter Mitarbeit von Marian Bons, Martin Jakob und Thobias Sach. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau (Climate Change, 32/2023). Online verfügbar unter www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/32_2023_cc_flaechenverfuegbarkeit_un_d_flaechenbedarfe_fuer_den_ausbau_der_windenergie_an_land_0.pdf, zuletzt geprüft am 15.04.2024.

UBA (Hg.) (Febr. 2024): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). Unter Mitarbeit von Engelhardt. Umweltbundesamt (UBA); AGEE-stat. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#uberblick>.

UM BW (Hg.) (2019): Freiflächensolaranlagen. Handlungsleitfaden. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. Stuttgart. Online verfügbar unter <http://www.um.baden-wuerttemberg.de>, zuletzt geprüft am 3.4.2024.

UM BW (Hg.) (2023a): Energiebericht kompakt 2023. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM BW); Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (StaLa BW). Stuttgart.

UM BW (2023b): Erneuerbare Energien in Baden-Württemberg 2022. Unter Mitarbeit von Tobias Kelm und Marion Walker. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM BW). Stuttgart.

UM BW (Hg.) (2023c): Monitoring der Energiewende in Baden-Württemberg. Statusbericht 2023. 300. Aufl. Unter Mitarbeit von Tobias Kelm, Laura Liebhart, Marcel Klingler, Henning Jachmann und Patrick Wolf. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) Stuttgart. Stuttgart. Online verfügbar unter <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/presse-service/publikation/did/monitoring-der-energiewende-in-baden-wuerttemberg-statusbericht-2023>, zuletzt geprüft am 03.04.2024.

UM BW (Hg.) (2024a): Energiebericht 2024. Unter Mitarbeit von Statistisches Landesamt Baden-Württemberg. UM BW. Stuttgart. Online verfügbar unter <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/presse-service/publikationen>, zuletzt geprüft am 16.10.24.

UM BW (Hg.) (2024b): Energiekonzept für Baden-Württemberg. Online verfügbar unter <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/presse-service/publikationen>, zuletzt geprüft am 16.10.24.

UM BW (Hg.) (2024c): Erneuerbare Energien in Baden-Württemberg 2023. Unter Mitarbeit von Tobias Kelm, Dr. Peter Bickel. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg; Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) Stuttgart. Stuttgart. Online verfügbar unter um.baden-wuerttemberg.de, zuletzt geprüft am 22.1.25.

UM BW (Hg.) (2024d): Monitoring der Energiewende in Baden-Württemberg. Statusbericht 2024. Unter Mitarbeit von Tobias Kelm, Laura Liebhart, Marcel Klingler, Henning Jachmann, Patrick Wolf. Umweltministerium Baden-Württemberg. Stuttgart. Online verfügbar unter <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/presse-service/publikationen>, zuletzt geprüft am 22.1.25.

UN Environment Programme (Hg.) (2020): 2020 Global Status Report for Buildings and Construction. Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector and construction sector. Nairobi, zuletzt geprüft am 24.09.2021.

UNCCD United Nations Convention to Combat Desertification (2017): Global Land Outlook. First Edition. Unter Mitarbeit von Ian Johnson und Alexanderm Sasha. Bonn. Online verfügbar unter https://www.uncclearn.org/wp-content/uploads/library/glo_full_report_low_res.pdf, zuletzt geprüft am 08.01.2024.

ZSW; Bosch und Partner GmbH (Hg.) (2023): Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß §97 EEG. Teilvorhaben solare Strahlungsenergie. Unter Mitarbeit von Tobias Kelm, Henning Jachmann und Stefan Fidaschek, Laura Liebhart, Dieter Günnewig, Esther Johannwerner. Stuttgart. Online verfügbar unter

www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/P-R/pv-zwischenbericht-230630.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 9.10.24.

ZSW und Partner (2022): Sektorziele 2030 und klimaneutrales Baden-Württemberg 2040. Teilbericht Sektorziele 2030. Unter Mitarbeit von Tobias Kelm. Hg. v. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) Stuttgart, IFEU-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Ökoinstitut e.V., Fraunhofer ISI, Karlsruhe und Hamburg Institut Research gGmbH, (HIR). Online verfügbar unter https://www.zsw-bw.de/fileadmin/user_upload/PDFs/Pressemitteilungen/2022/220624_Teilbericht_Sektorziele_BW.pdf, zuletzt geprüft am 21.12.2023.

ZSW und Partner (2023): Sektorziele 2030 und klimaneutrales Baden-Württemberg 2040. Teilbericht Instrumente und Maßnahmen. Hg. v. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) Stuttgart, IFEU- Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Ökoinstitut e.V., Fraunhofer ISI, Karlsruhe und Hamburg Institut Research gGmbH, (HIR). Online verfügbar unter https://www.zsw-bw.de/fileadmin/user_upload/Endbericht_Sektorziele_Klimaneutralitaet_BW_Juli23.pdf, zuletzt geprüft am 21.12.2023.

9 Anhang

9.1 BSI-KritisV

Ausschnitt: Anhang 1 (zu § 1 Nummer 4 und 5, § 2 Absatz 5 Nummer 1 und 2) Teil 3
Anlagenkategorien und Schwellenwerte

Nr.	Anlagenkategorie	Bemessungskriterium	Schwellenwert
1	Stromversorgung		
1.1	Stromerzeugung		
1.1.1	Erzeugungsanlage	Installierte Nettonennleistung (elektrisch oder direkt mit Wärmeauskopplung verbundene elektrische Wirkleistung bei Wärmenennleistung ohne Kondensationsanteil) in MW oder	104
		installierte Nettonennleistung in MW, wenn die Anlage als Schwarzstartanlage nach § 3 Absatz 2 des Beschlusses der Bundesnetzagentur vom 20. Mai 2020, Aktenzeichen BK6-18-249 kontrahiert ist, oder	0
		installierte Nettonennleistung in MW, wenn die Anlage zur Erbringung von Primärregelleistung nach § 2 Nummer 8 StromNZV präqualifiziert ist	36
1.1.2	Anlage oder System zur Steuerung/Bündelung elektrischer Leistung	Installierte Nettonennleistung (elektrisch) in MW oder	104
		installierte Nettonennleistung in MW, wenn die Anlage als Schwarzstartanlage nach § 3 Absatz 2 des Beschlusses BK6-18-249 kontrahiert ist, oder	0
		installierte Nettonennleistung in MW, wenn die Anlage zur Erbringung von Primärregelleistung nach § 2 Nummer 8 StromNZV präqualifiziert ist	36
1.2	Stromübertragung		
1.2.1	Übertragungsnetz	Durch Letztverbraucher und Weiterverteiler entnommene Jahresarbeit in GWh/Jahr	3 700
1.3	Stromverteilung		
1.3.1	Stromverteilernetz	Durch Letztverbraucher und Weiterverteiler entnommene Jahresarbeit in GWh/Jahr	3 700
1.4	Stromhandel		
1.4.1	Zentrale Anlage oder System für den Stromhandel	Abgewickelter Handelsvolumen in TWh/Jahr	3,7
2	Gasversorgung		
2.1	Gasförderung		
2.1.1	Gasförderanlage	Energie des geförderten Gases in GWh/Jahr	5 190
2.1.2	Anlage zur zentralen standortübergreifenden Steuerung	Energie des geförderten Gases in GWh/Jahr	5 190
2.2	Gastransport und -speicherung		
2.2.1	Fernleitungsnetz	Durch Letztverbraucher und Weiterverteiler entnommene Jahresarbeit in GWh/Jahr	5 190
2.2.2	Gasgrenzübergabestelle	Durchgeleitete Arbeit in GWh/Jahr	5 190
2.2.3	Gasspeicher	Entnommene Arbeit in GWh/Jahr	5 190
2.2.4	LNG-Anlage	Technische Regasifizierungskapazität in GWh/Jahr	5 190
2.3	Gasverteilung		
2.3.1	Gasverteilernetz	Entnommene Arbeit in GWh/Jahr	5 190
2.4	Gashandel		

Projekt Raumanalyse BW – Bericht Energieversorgung

2.4.1	Gashandelssystem	Energie der gehandelten Gasmengen oder -kapazitäten in GWh/Jahr	5 190
3	Kraftstoff- und Heizölversorgung		
3.1	Erdölförderung und Produktenherstellung		
3.1.1	Ölförderanlage	Gefördertes Erdöl in Tonnen/Jahr	4 400 000
3.1.2	Raffinerie	Erzeugter Kraftstoff in Tonnen/Jahr oder	420 000 (≈ 420 Millionen Liter)
		erzeugter Flugkraftstoff in Tonnen/Jahr oder	63 750
		erzeugtes Heizöl in Tonnen/Jahr	620 000
3.1.3	Anlage zur zentralen standortübergreifenden Steuerung	Gefördertes Rohöl in Tonnen/Jahr oder	4 400 000
		erzeugter Kraftstoff in Tonnen/Jahr oder	420 000
		erzeugter Flugkraftstoff in Tonnen/Jahr oder	63 750
		erzeugtes Heizöl in Tonnen/Jahr	620 000
3.2	Erdöltransport und -lagerung		
3.2.1	Mineralölferrleitung	Transportierte entnommene Rohölmenge in Tonnen/Jahr oder	4 400 000
		transportierte Kraftstoffmenge in Tonnen/Jahr oder	420 000
		transportierte Flugkraftstoffmenge in Tonnen/Jahr oder	63 750
		transportierte Heizölmenge in Tonnen/Jahr	620 000
3.2.2	Erdöl- und Erdölproduktenlager	Umgeschlagenes Rohöl in Tonnen/Jahr oder	4 400 000
		umgeschlagener Kraftstoff in Tonnen/Jahr oder	420 000
		umgeschlagener Flugkraftstoff in Tonnen/Jahr oder	63 750
		umgeschlagenes Heizöl in Tonnen/Jahr	620 000
3.2.3	Anlage zur zentralen standortübergreifenden Steuerung	Gesamtmenge des transportierten Rohöls und der transportierten Ölprodukte in Tonnen/Jahr oder	4 400 000
		umgeschlagenes Rohöl in Tonnen/Jahr oder	4 400 000
		umgeschlagener Kraftstoff in Tonnen/Jahr oder	420 000
		umgeschlagener Flugkraftstoff in Tonnen/Jahr oder	63 750
		umgeschlagenes Heizöl in Tonnen/Jahr	620 000
3.3	Kraftstoff- und Heizölverteilung		
3.3.1	Anlage oder System von Aggregatoren zum Vertrieb von Kraftstoff und Heizöl	Verteilter Kraftstoff in Tonnen/Jahr oder	420 000
		verteilter Flugkraftstoff in Tonnen/Jahr oder	63 750
		verteilt es Heizöl in Tonnen/Jahr	620 000
3.3.2	Tankstellennetz	Verteilter Kraftstoff in Tonnen/Jahr oder	420 000
		verteilter Flugkraftstoff in Tonnen/Jahr	63 750
3.3.3	Anlage zur zentralen standortübergreifenden Steuerung	Verteilter Kraftstoff in Tonnen/Jahr oder	420 000
		verteilter Flugkraftstoff in Tonnen/Jahr oder	63 750
		verteilt es Heizöl in Tonnen/Jahr	620 000
3.4	Mineralölhandel		
3.4.1	Anlagen oder Systeme zur zentralen kommerziellen Steuerung	Abgewickelt es Erdöl in Tonnen/Jahr oder	4 400 000
		abgewickelter Kraftstoff in Tonnen/Jahr oder	420 000
		abgewickelter Flugkraftstoff in Tonnen/Jahr oder	63 750
		abgewickelt es Heizöl in Tonnen/Jahr	620 000
4	Fernwärmeversorgung		
4.1	Erzeugung von Fernwärme		
4.1.1	Heizwerk	Ausgeleitete Wärmeenergie in GWh/Jahr	2 300
4.1.2	Heizkraftwerk	Ausgeleitete Wärmeenergie in GWh/Jahr	2 300
4.2	Verteilung von Fernwärme		
4.2.1	Fernwärmenetz	Angeschlossene Haushalte	250 000
4.3	Steuerung und Überwachung		
4.3.1	Anlage zur zentralen standortübergreifenden Steuerung	Angeschlossene Haushalte oder	250 000
		ausgeleitete Wärmeenergie in GWh/Jahr	2 300

9.2 Aufbereitungsanlagen für Biogas zu Biomethan und Einspeisung in das Erdgasnetz. Quelle: Energieatlas Baden-Württemberg. (Datenquelle: dena, Stand: 2015)

Gemeinde	Betreiber	Rohstoff / Substrat	Gasaufbereiter / Gasnetz-betreiber	Inbetriebnahme	Rohbiogas	Biomethan-Einspeisung	
						Einheit	
Achstetten / Laupheim	k.A.	NawaRo	Erdgas-Südwest	2012	350	300	1,6
Blaufelden – Emmertsbühl	Sales & Solutions GmbH (EnBW)	Gülle, NawaRo	Sales & Solutions GmbH / EnBW	2010	500	260	2,2
Burgrieden / Laupheim	k.A.	NawaRo	Erdgas-Südwest	2008	600	350	2,1
	k.A.	NawaRo	Erdgas-Südwest	2011	600	350	2,1
Forchheim	Binder & Söhne GbR	Grassilage, Mais-silage, CCM Mais, GPS Roggen, Triticale, Zuckerrüben	BADENOVA	2010	900	530	4,2
Geislingen a.d. Steige	Sales & Solutions GmbH (EnBW)	Abfälle der Nahrungsmittelproduktion und Lebensmittelreste	Sales & Solutions GmbH / EnBW	2014	0	550	4,6
Kißlegg-Rahmhaus	k.A.	Speisereste, überlagerte Lebensmittel	Thüga Energie GmbH	2010	0	300	2,5
Mühlacker	SW Mühlacker, Biomethan Mühlacker	Mais, Gras, Sudan-gras, Getreide	SW Mühlacker	2007	1000	500	4,4
Neuenburg am Rhein	k.A.	NawaRo, Mais-silage, Rück-stände aus der Mostherstellung	BADENOVA	2012	1100	500	5,0
Nürtingen	SW Nürtingen / ReFood	Lebensmittelreste	SW Nürtingen	k.A.	0	350	
Oberriexingen	Bioenergie Oberriexingen GmbH & Co. KG	Gülle, Rindermist, Schweinemist, Pferdemist, Maissilage, Grassilage und Stroh	Stadtwerke Bietigheim-Bissingen / EnBW	2012	950	350	3,2
Ostrach	Energiepark Hahnennest GmbH & Co. KG	Gülle, Gras, Mais, Grünroggen	Energiepark Hahnennest GmbH & Co. KG terranets bw	2012	700	350	2,7
Riedlingen-Daugendorf	k.A.	NawaRo	Erdgas-Südwest	2012	1200	600	5,0
Schwaigern	Söhnergy GmbH & Co. KG, Biomethan Schwaigern GmbH	NawaRo	Biomethan Schwaigern GmbH Heilbronner Versorgungs- GmbH	2014	650	350	3,0

9.3 Geothermische Anlagen in Baden-Württemberg zur Nutzung als Thermalbad bzw. Gebäudeheizung

(Quelle: GEOTIS <https://www.geotis.de/geotisapp/templates/locationall.php?bula=BW>)

Name	Temperatur °C	Fließrate l/s	Teufe m	Geotherm. Leistung MW _{th}	Gesamt Leistung MW _{th}	Produktion GWh/a
Weinheim (Miramar)	65	10	1150	1,1	4	5,65
Aalen, TB I u, II	36,4	4,5	650,4	0,18	0,18	1,56
Aulendorf	54	4,8	2076	0,5	0,5	4,36
B, Peterstal, Br, 1, Parkpl,	20,5	0,2	438,5	< 0,01	< 0,01	< 0,01
B, Teinach, Otto-Therme II	20	0,83	460			
Bad Bellingen Markusquelle	36,45	5	650	0,34	0,34	3,01
Bad Bellingen, Leodegar	37,9	8	650	0,6	0,6	5,24
Bad Bellingen, QU III	39,8	8	1194	0,66	0,66	5,8
Bad Buchau 1	45,7	5	795	1,13	1,13	9,9
Bad Buchau 2	44,4	5	852,5	0,51	0,51	4,47
Bad Ditzenbach, Canisius I	45,7	14,03	560,7	1,19	1,19	10,45
Bad Herrenalb I	28,3	2,5	599	0,09	0,09	0,76
Bad Herrenalb IV	20,6		536			
Bad Krozingen TB 2	38,1	0,8	596	0,06	0,06	0,53
Bad Krozingen TB 3	39,4	20	610	0,15	0,15	1,35
Bad Krozingen TB 4	37,6	12	580	0,12	0,12	1,03
Bad Liebenzell (summarisch)	23	6	250	0,06	0,06	0,55
Bad Mingolsheim, St, Rochus I	25,8	3,5	214	0,06	0,06	0,51
Bad Säckingen, Badquelle	31	15	600,3	0,06	0,06	0,56
Bad Säckingen, Fridolinquelle	28,3	8	505	0,28	0,28	2,43
Bad Schönborn, Karl Sigel	48,5	6,25	607	0,25	0,25	2,19
Bad Schönborn, Lambertus,	43,5	6,5	636	0,64	0,64	5,59
Bad Schönborn, St, Vitus	28	2	208	0,07	0,07	0,59
Bad Überkingen, Ottotherme I	40,8	2,76	1020	0,22	0,22	1,9
Bad Überkingen, Ottotherme II	43,2	11,6	1051	0,31	0,31	2,71
Bad Urach (TB1, TB2)	54	10	770	1	1	1,5
Bad Waldsee 1	31	6,6	1825	0,44	0,44	0,96
Bad Waldsee 2	69	3,4	1925	0,27	0,27	2,33
Bad Wurzach	33,7	3	800	0,02	0,02	0,15
Baden-Baden (summarisch)	60	9	552	1,49	1,49	13,04
Badenweiler	26,2	11,4	364	0,3	0,3	2,59
Beuren TB I	48,7	8	755	0,24	0,24	2,1
Beuren TB II	38	2,5	398	0,15	0,15	1,32
Böblingen, TB II	33,6	3	775	0,17	0,17	1,49
Boll - Bad Boll, TB	45,6	11,7	467	1,07	1,07	9,37

Projekt Raumanalyse BW – Bericht Energieversorgung

Bonlanden	24	0,3	365	< 0,01	< 0,01	0,04
Esslingen, Merkelsches Bad	31,3	100	184	0,09	0,09	0,83
Freiburg Mooswald 1	45,3	8,5	858	0,9	0,9	7,87
Freiburg Mooswald 2	30,1	2,2	545	0,09	0,09	0,81
Friedrichshafen 1	30,2	3	710,3	0,13	0,13	1,12
Göppingen	26	5,5	512	0,05	0,05	0,44
Hubbad, Ottersweier	36	1,2	23	0,08	0,08	0,7
Jordanbad, Biberach	48,4	10	1036	1,17	1,17	0,8
Kißlegg, Otto, B12	31,2	4,9	944	0,23	0,23	2,01
Kißlegg, Otto, B13	33,3		944			
Konstanz	26	7	625	0,62	0,62	2
Meersburg	26	4	501	0,1	0,1	0,88
Saulgau TB I, TB II	40,9	12,5	639	1,09	1,09	9,57
S-Bad Cannstatt, Hofr, Seyffer Qu,	21,8	2,9	477	< 0,01	< 0,01	0,02
Schliengen Schlossquelle	35	3	739	0,19	0,19	1,65
Steinenstadt, Georgsquelle	28	3,7	487	0,12	0,12	1,08
Tuttlingen I	45,3	10	644,3	0,32	0,32	2,78
Überlingen, Bodensee-Therme	36,8	4	1006	0,14	0,14	1,23
Waldbronn, 2, R	25,3	0,85	2000	0,02	0,02	0,16
Wildbad I-VI	37,7	13	200,7	0,96	0,96	8,43
Reutlingen Romina B 11	24,8		370			
Reutlingen Romina RR 16	28,3		405			
Reutlingen Romina RR 23	24,6		315			

9.4 Ladepunkte und Ladestationen für die E-Mobilität in Baden-Württemberg, die öffentlich zugänglich sind, aufgeschlüsselt nach Landkreisen

(Quelle: www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/E-Mobilitaet/start.html)

Land- bzw. Stadtkreise	Normal-Ladepunkte (LP)			Schnell-Ladepunkte (LP)		
	Anzahl	Nenn-Leistung ges. [kW]	Ø Nenn-Leistung /LP	Anzahl	Nenn-Leistung ges. [kW]	Ø Nenn-Leistung /LP
Alb-Donau-Kreis	581	10.456	18,0	99	13.600	137,4
LK Biberach	202	3.115	15,4	53	4.484	84,6
LK Böblingen	1.406	26.627	18,9	152	17.068	112,3
Bodenseekreis	459	7.686	16,7	77	8.008	104,0
LK Breisgau-Hochschwarzwald	512	7.322	14,3	83	8.731	105,2
LK Calw	301	5.923	19,7	24	1.369	57,0
LK Emmendingen	187	2.700	14,4	42	4.938	117,6
Enzkreis	258	4.707	18,2	43	2.913	67,7
LK Esslingen	793	13.791	17,4	153	17.534	114,6
LK Freudenstadt	185	2.839	15,3	47	3.407	72,5
LK Göppingen	527	6.520	12,4	69	6.285	91,1
LK Heidenheim	131	2.297	17,5	63	8.098	128,5
LK Heilbronn	787	10.658	13,5	195	19.766	101,4
LK Hohenlohe	312	4.898	15,7	90	12.106	134,5
LK Karlsruhe	639	10.661	16,7	131	14.788	112,9
LK Konstanz	331	4.914	14,8	119	10.917	91,7
LK Lörrach	359	5.816	16,2	91	9.769	107,4
LK Ludwigsburg	703	10.367	14,7	178	11.859	66,6
Main-Tauber-Kreis	259	4.553	17,6	64	5.002	78,2
Neckar-Odenwald-Kreis	200	2.848	14,2	47	3.053	65,0
Ortenaukreis	779	10.442	13,4	243	28.278	116,4
Ostalbkreis	456	6.448	14,1	75	5.027	67,0
LK Rastatt	424	7.047	16,6	61	3.137	51,4
LK Ravensburg	535	8.536	16,0	162	15.380	94,9
LK Rems-Murr	600	8.984	15,0	140	13.996	100,0
LK Reutlingen	416	6.151	14,8	73	6.631	90,8
LK Rhein-Neckar	534	8.534	16,0	251	25.202	100,4
LK Rottweil	120	1.798	15,0	58	6.027	103,9
LK Schwäbisch Hall	380	6.966	18,3	42	3.613	86,0
LK Schwarzwald-Baar	352	5.761	16,4	77	6.835	88,8
LK Sigmaringen	143	1.839	12,9	36	2.612	72,6
LK Tübingen	463	8.624	18,6	71	7.349	103,5
LK Tuttlingen	227	3.329	14,7	45	3.554	79,0
LK Waldshut	298	4.657	15,6	70	4.301	61,4
Zollernalbkreis	212	3.152	14,9	58	3.879	66,9
StK Baden-Baden	95	1.716	18,1	30	3.934	131,1
StK Freiburg i. Br.	445	6.928	15,6	75	6.872	91,6
StK Heidelberg	404	6.700	16,6	40	3.296	82,4
StK Heilbronn	692	9.391	13,6	66	4.610	69,8
StK Karlsruhe	351	4.119	11,7	84	6.812	81,1
StK Mannheim	305	4.933	16,2	124	13.870	111,9
StK Pforzheim	219	4.440	20,3	35	3.425	97,8
StK Stuttgart	3.103	49.368	15,9	164	14.762	90,0
StK Ulm	362	6.700	18,5	121	14.473	119,6

Projekt Raumanalyse BW – Bericht Energieversorgung

Gesamt	21.047	335.261	15,9	4.021	391.567	93,4
--------	--------	---------	------	-------	---------	------

Land- bzw. Stadtkreise	Ladepunkte gesamt			Ladestationen
	Anzahl	Nenn-Leistung ges. [kW]	Ø Nenn-Leistung/LP	Anzahl
Alb-Donau-Kreis	680	502	24.056	35,4
LK Biberach	255	130	7.599	29,8
LK Böblingen	1.558	806	43.694	28,0
Bodenseekreis	536	298	15.694	29,3
LK Breisgau-Hochschwarzwald	595	277	16.053	27,0
LK Calw	325	188	7.292	22,4
LK Emmendingen	229	112	7.638	33,4
Enzkreis	301	158	7.620	25,3
LK Esslingen	946	475	31.325	33,1
LK Freudenstadt	232	122	6.245	26,9
LK Göppingen	596	287	12.805	21,5
LK Heidenheim	194	105	10.395	53,6
LK Heilbronn	982	491	30.424	31,0
LK Hohenlohe	402	204	17.004	42,3
LK Karlsruhe	770	387	25.449	33,1
LK Konstanz	450	218	15.831	35,2
LK Lörrach	450	216	15.585	34,6
LK Ludwigsburg	881	434	22.226	25,2
Main-Tauber-Kreis	323	155	9.555	29,6
Neckar-Odenwald-Kreis	247	133	5.901	23,9
Ortenaukreis	1.022	484	38.720	37,9
Ostalbkreis	531	259	11.475	21,6
LK Rastatt	485	234	10.184	21,0
LK Ravensburg	697	395	23.916	34,3
LK Rems-Murr	740	399	22.980	31,1
LK Reutlingen	489	248	12.782	26,1
LK Rhein-Neckar	785	400	33.736	43,0
LK Rottweil	178	90	7.825	44,0
LK Schwäbisch Hall	422	202	10.579	25,1
LK Schwarzwald-Baar	429	199	12.596	29,4
LK Sigmaringen	179	92	4.451	24,9
LK Tübingen	534	286	15.973	29,9
LK Tuttlingen	272	133	6.883	25,3
LK Waldshut	368	174	8.958	24,3
Zollernalbkreis	270	146	7.031	26,0
StK Baden-Baden	125	82	5.650	45,2
StK Freiburg i. Br.	520	284	13.800	26,5
StK Heidelberg	444	231	9.996	22,5
StK Heilbronn	758	352	14.001	18,5
StK Karlsruhe	435	202	10.931	25,1
StK Mannheim	429	226	18.803	43,8
StK Pforzheim	254	126	7.864	31,0
StK Stuttgart	3.267	1.668	64.130	19,6
StK Ulm	483	289	21.173	43,8
Gesamt	25.068	12.899	726.829	30,5

9.5 Stand der Umsetzung von Netzausbauvorhaben des Bundesbedarfsplangesetzes im Verantwortungsbereich der TransnetBW GmbH und durch andere Übertragungsnetzbetreiber durchzuführende Maßnahmen in Baden-Württemberg, (Stand 10/2024).

(Quelle: <https://www.netzausbau.de/Vorhaben/uebersicht/liste/liste.html>)

Nr.	Vorhaben aus dem Bundesbedarfsplangesetz (BBPIG)	Vorhaben Träger	Zuständige Behörde
2	HGÜ-Verbindung Korridor A Osterath-Philippsburg „Ultranet“ (Abschnitt B1)	TransnetBW	BNetzA
	„Ultranet“ (Abschnitt A1)	Amprion	
3	HGÜ-Verbindung Korridor C Brunsbüttel-Großgartach „SuedLink“ (Abschnitte E2+E3)	TransnetBW	BNetzA
	Konverter Leingarten (Großgartach)	TransnetBW	LRA HB
19	380-kV-Netzverstärkung Weinheim-Daxlanden	TransnetBW	BNetzA
20	380-kV-Netzverstärkung Rittershausen-Kupferzell	TransnetBW	BNetzA
	Kupferzell-Großgartach	TransnetBW	BNetzA
21	380-kV-Netzverstärkung Daxlanden-Kuppenheim-Bühl-Eichstetten	TransnetBW	RP KA und RP FB
22	380-kV-Netzverstärkung Großgartach-Endersbach	Transnet BW	RP ST
23	380-kV-Netzverstärkung Herbertingen-Waldshut/ Tiengen mit Abzweig Kreis Konstanz und Abzweig Beuren	Amprion / Transnet BW	RP FR / TÜ
24	380-kV-Netzverstärkung Rommelsbach-Herbertingen	Amprion	RP TÜ
25	380-kV-Netzverstärkung Wullenstetten-Niederwangen	Amprion	BNetzA
35	380-kV-Netzausbau Birkenfeld-Mast 115 A	TransnetBW	RP KA
40	380-kV-Netzverstärkung Punkt Neuravensburg – Punkt Bundes- grenze (AT)	TransnetBW, Amprion	BNetzA
68	380-kV-Netzverstärkung Höpfingen-Hüffenhardt	Transnet BW	RP KA
72	380-kV-Netzverstärkung Eichstetten – Bundesgrenze FR	Transnet BW	BNetzA
99	380-kV-Netzverstärkung Waldshut/Tiengen – Bundesgrenze CH	Transnet BW	RP FR

Bericht zur Raumanalyse
Teilbericht 13 „Energieversorgung“
an das Ministerium für Landesentwicklung
und Wohnen Baden-Württemberg

Universität Stuttgart
Institut für Energiewirtschaft
und Rationelle Energieanwendung (IER)
