

100% klimaneutrale Energieversorgung – der Beitrag Baden-Württembergs und seiner zwölf Regionen

Studie im Auftrag des BUND Landesverband Baden-Württemberg Freiburg, 05.10.2022

Autorinnen und Autoren

Dr. Matthias Koch
Irina Ganal
Franziska Flachsbarth
Christian Winger
Moritz Vogel
Dr. Veit Bürger
Prof. Dierk Bauknecht

Kontakt

info@oeko.de
www.oeko.de

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Borkumstraße 2
13189 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	10
Glossar	12
Vorwort des BUND Landesverbandes Baden-Württemberg	13
1 Executive Summary	14
1.1 Kernbotschaften	14
1.2 Zielstellung	15
1.3 Methodik der Regionalisierung	15
1.4 Ergebnisse der Skalierung auf Baden-Württemberg für das klimaneutrale Zieljahr 2040	16
1.5 Ergebnis der Regionalisierung auf die zwölf baden-württembergischen Regionen	19
1.5.1 Stromnachfrage und Wärmenachfrage für Raumwärme und Warmwasser	19
1.5.2 Erzeugungskapazitäten zur Stromerzeugung	21
1.5.3 Nah- und Fernwärme	22
1.6 Maßnahmenplan für eine klimaneutrale Energieversorgung in Baden-Württemberg	24
1.6.1 Reduktion des Energieverbrauchs	24
1.6.2 Stromversorgung	25
1.6.3 Gebäudewärmeversorgung	27
2 Hintergrund und Zielstellung	30
3 Plausibilisierung eines klimaneutralen Zielbildes für Deutschland und für Baden-Württemberg	32
3.1 Übersicht zu bestehenden Studien auf nationaler Ebene	32
3.2 Auswahl geeigneter Zielszenarien für eine klimaneutrale Energieversorgung in Deutschland	32
3.2.1 Allgemeine Charakterisierung der Szenarien	32
3.2.2 Stromnachfrage und Stromerzeugung	37
3.2.3 Nachfrage und Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser	40
3.3 Skalierung der klimaneutralen Zielszenarien auf Baden-Württemberg	42
3.3.1 Anpassung des Zieljahres und weitere Verwendung der Szenario-Namen	42
3.3.2 Regionale Verteilschlüssel	42

3.3.3	Stromnachfrage	45
3.3.4	Stromerzeugungskapazitäten	46
3.3.5	Wärmenachfrage für Gebäude	49
4	Regionalisierung der plausibilisierten Zielbilder auf die zwölf Regionen in Baden-Württemberg	51
4.1	Verteilschlüssel für die Regionalisierung auf die zwölf Regionen in Baden-Württemberg	51
4.1.1	Stromnachfrage	51
4.1.2	Wärmenachfrage für Raumwärme und Warmwasser in den Sektoren Haushalte und GHD	51
4.1.3	Windenergie	51
4.1.4	PV-Dachanlagen	55
4.1.5	PV-Freiflächenanlagen	56
4.1.6	PV-Sonderanlagen: Agri-PV und PV-Parkplatzüberdachungen	58
4.1.7	Laufwasser und Biomasse	60
4.1.8	Wasserstoff-Kraftwerke	61
4.1.9	Regionalisierung der Nah- und Fernwärmenachfrage	62
4.2	Ergebnisse der Regionalisierung auf die zwölf Regionen in Baden-Württemberg	64
4.2.1	Installierte Erzeugungskapazitäten zur Stromerzeugung	64
4.2.2	Energieträgerspezifische Endenergienachfrage für Raumwärme und Warmwasser in den Sektoren Haushalte und GHD	68
4.2.3	Potenziale und installierte Erzeugungskapazitäten zur Nah- und Fernwärmeerzeugung	71
4.2.4	Technologie- und Brennstoffmix der Nah- und Fernwärmeerzeugung	75
4.2.5	Sektorspezifische Stromnachfrage	80
4.2.6	Energieträgermix der Stromerzeugung	81
4.2.7	Regionale Bilanzierung der jährlichen Stromimporte und -exporte	83
5	Maßnahmenplan für Baden-Württemberg	86
5.1	Handlungsfeld „Reduktion des Energieverbrauchs“	86
5.1.1	Maßnahme 1: „Effizienzmaßnahmen zur Reduzierung des Stromverbrauchs“	87
5.1.2	Maßnahme 2: „Energetische Gebäudesanierung“	88
5.1.3	Maßnahme 3: „Etablierung einer suffizienten Lebens- und Wirtschaftsweise“	89
5.2	Handlungsfeld „Stromversorgung“	93
5.2.1	Maßnahme 4: „Ausweisung von mind. 3 % der Landesfläche für Windenergieanlagen und PV-Freiflächenanlagen“	93

5.2.2	Maßnahme 5: „Beschleunigung der Genehmigungsverfahren für Windenergieanlagen und PV-Freiflächenanlagen“	95
5.2.3	Maßnahme 6: „Verbesserung der Förderbedingungen für PV- und Windenergieanlagen in Baden-Württemberg“	96
5.2.4	Maßnahme 7: „Bessere Beteiligung und Teilhabe von Kommunen und Anwohner*innen an EE-Anlagen“	96
5.3	Handlungsfeld „Gebäudewärmeversorgung“	100
5.3.1	Maßnahme 9: „Kommunale Wärmeplanung“	100
5.3.2	Maßnahme 10: „Wärmepumpen-Offensive“	101
5.3.3	Maßnahme 11: „Ausbauoffensive für Nah- und Fernwärmenetze und deren Dekarbonisierung“	102
5.4	Zusammenfassung der Maßnahmen entlang der Entscheidungs- und Umsetzungsebenen in Baden-Württemberg	104
5.4.1	Landesregierung Baden-Württemberg	104
5.4.2	Regionalverbände, Regierungspräsidien und regionalen Energieagenturen in Baden-Württemberg	105
5.4.3	Kommunen in Baden-Württemberg	106
6	Literaturverzeichnis	107
7	Anhang	114
7.1	Exkurs: Berücksichtigung des Strombedarfs für Wasserstoff aus der Elektrolyse und der Kohlenstoffabscheidung aus der Atmosphäre für deren stoffliche Nutzung	114
7.1.1	Substitution von Koks- und Braunkohle in der Primärstahlerzeugung	114
7.1.2	Substitution von Erdgas in der Ammoniaksynthese	115
7.1.3	Substitution von Erdgas oder Schweröl in der Methanolsynthese	115
7.1.4	Substitution von erdölbasiertem Naphtha in der Kunststoffherstellung	116
7.1.5	Fazit zur stofflichen Nutzung von Wasserstoff aus der Elektrolyse und Kohlenstoff aus der Atmosphäre	116
7.2	Exkurs: Unterschiedliche Konzepte für die Wärmeerzeugung und ihre Auswirkungen auf die Endverbraucherpreise	117
7.2.1	Betrachtete Heizsystemkombinationen für den Wirtschaftlichkeitsvergleich	117
7.2.2	Annahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verschiedener Heizsystemkombinationen	118
7.2.3	Ergebnisse des Wirtschaftlichkeitsvergleichs verschiedener Heizsystemkombinationen	119
7.3	Daten und Ergebnisse zur Regionalisierung	122
7.3.1	Potenzialflächen und Verteilschlüssel	122

7.3.2	Installierte Erzeugungskapazitäten zur Stromerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs	125
7.3.3	Energieträgerspezifische Endenergienachfrage für Raumwärme und Warmwasser in den Sektoren Haushalte und GHD	129
7.3.4	Installierte Erzeugungskapazitäten zur Nah- und Fernwärmeerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs	133
7.3.5	Technologie- und Brennstoffmix der Nah- und Fernwärmeerzeugung	136
7.3.6	Sektorspezifische Stromnachfrage	139
7.3.7	Energieträgermix der Stromerzeugung	144
7.3.8	Regionale Bilanzierung der jährlichen Netto-Stromimporte	147

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Sektorspezifische Stromnachfrage in Baden-Württemberg im Jahr 2019 sowie im klimaneutralen Zieljahr 2040	17
Abbildung 1-2: Energieträgerspezifische Stromerzeugungskapazitäten für Baden-Württemberg in den Jahren 2019 und 2020 sowie im klimaneutralen Zieljahr 2040	18
Abbildung 1-3: Gebäudewärmeerzeugung in Baden-Württemberg nach Energieträgern im Jahr 2019 sowie im klimaneutralen Zieljahr 2040	19
Abbildung 1-4: Sektorspezifische Stromnachfrage in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Agora-Szenario-BW-2040	20
Abbildung 1-5: Installierte Erzeugungskapazitäten zur Stromerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Agora-Szenario-BW-2040	22
Abbildung 1-6: Energieträgermix zur Nah- und Fernwärmeerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Ariadne-Szenario-BW-2040	23
Abbildung 1-7: Energieträgermix für die Fernwärmeerzeugung in Baden-Württemberg im Jahr 2019 sowie in den klimaneutralen Zielszenarien für das Jahr 2040	24
Abbildung 3-1: Endenergieverbrauch in Deutschland nach Energieträgern in den Jahren 2019 und 2020 sowie in den drei ausgewählten Zielszenarien jeweils für das klimaneutrale Zieljahr	34
Abbildung 3-2: Primärenergieverbrauch in Deutschland in den Jahren 2019 und 2020 sowie in den drei ausgewählten Zielszenarien (jeweils für das klimaneutrale Zieljahr)	35
Abbildung 3-3: Herkunft von Wasserstoff und E-Fuels sowie deren Verbrauch in Deutschland in den drei ausgewählten Zielszenarien (jeweils für das klimaneutrale Zieljahr)	36
Abbildung 3-4: Stromverbrauch in Deutschland nach Sektoren in den Jahren 2019 und 2020 sowie in den drei ausgewählten Zielszenarien (jeweils für das klimaneutrale Zieljahr)	38
Abbildung 3-5: Energieträgerspezifische Stromerzeugung in Deutschland in den Jahren 2019 und 2020 sowie in den drei ausgewählten Zielszenarien (jeweils für das klimaneutrale Zieljahr)	39
Abbildung 3-6: Installierte Kapazitäten zur Stromerzeugung in Deutschland nach Energieträgern in den Jahren 2019 und 2020 sowie in den drei ausgewählten Zielszenarien (jeweils für das klimaneutrale Zieljahr)	40
Abbildung 3-7: Gebäudewärmeerzeugung in Deutschland nach Energieträgern in den Jahren 2019 und 2020 sowie in den drei ausgewählten Zielszenarien (jeweils für das klimaneutrale Zieljahr)	41
Abbildung 3-8: Sektorspezifische Stromnachfrage in Baden-Württemberg im Jahr 2019 sowie im klimaneutralen Zieljahr 2040	45
Abbildung 3-9: Energieträgerspezifische Stromerzeugungskapazitäten für Baden-Württemberg in den Jahren 2019 und 2020 sowie im klimaneutralen Zieljahr 2040	46

Abbildung 3-10: Gebäudewärmeerzeugung in Baden-Württemberg nach Energieträgern im Jahr 2019 sowie im klimaneutralen Zieljahr 2040	50
Abbildung 4-1: Potenzialflächen für Windenergie basierend auf dem Energieatlas Baden-Württemberg	53
Abbildung 4-2: Verbleibende Potenzialflächen für Windenergie in Baden-Württemberg bei Ausschluss eines „hohen“ bzw. „sicheren“ Konfliktrisikos für windkraftsensible Vogelarten und Fledermäuse	54
Abbildung 4-3: Regionale Verteilung des Potenzials für PV-Dachanlagen in Baden-Württemberg	56
Abbildung 4-4: Regionale Verteilung des Flächenpotenzials für PV-Freiflächenanlagen in Baden-Württemberg	57
Abbildung 4-5: Regionale Verteilung des Potenzials für Agri-PV-Anlagen und PV-Parkplatzüberdachungen in Baden-Württemberg	59
Abbildung 4-6: Anlagenbestand für Laufwasser und Biomasse in Baden-Württemberg	60
Abbildung 4-7: Räumliche Verteilung der Wärmenachfragen (Wärmedichte) in Baden-Württemberg	63
Abbildung 4-8: Verdichtung bestehender und Zubau neuer Wärmenetze in Baden-Württemberg für das Agora-Szenario-BW-2040	64
Abbildung 4-9: Installierte Erzeugungskapazitäten zur Stromerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Ariadne-Szenario-BW-2040	65
Abbildung 4-10: Installierte Erzeugungskapazitäten zur Stromerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Agora-Szenario-BW-2040	66
Abbildung 4-11: Installierte Erzeugungskapazitäten zur Stromerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das UBA-Szenario-BW-2040	67
Abbildung 4-12: Energieträgerspezifische Endenergienachfrage für Raumwärme und Warmwasser in den Sektoren Haushalte und GHD in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Jahr 2019	68
Abbildung 4-13: Endenergienachfrage für Raumwärme und Warmwasser in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Ariadne-Szenario-BW-2040	69
Abbildung 4-14: Endenergienachfrage für Raumwärme und Warmwasser in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Agora-Szenario-BW-2040	70
Abbildung 4-15: Endenergienachfrage für Raumwärme und Warmwasser in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das UBA-Szenario-BW-2040	71
Abbildung 4-16: Erzeugungskapazitäten zur Nah- und Fernwärmeerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Ariadne-Szenario-BW-2040	72
Abbildung 4-17: Erzeugungskapazitäten zur Nah- und Fernwärmeerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württemberg für das Agora-Szenario-BW-2040	73

Abbildung 4-18: Erzeugungskapazitäten zur Nah- und Fernwärmeerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württemberg für das UBA-Szenario-BW-2040	74
Abbildung 4-19: Energieträgermix für die Fernwärmeerzeugung in Baden-Württemberg im Jahr 2019 sowie in den klimaneutralen Zielszenarien für das Jahr 2040	76
Abbildung 4-20: Energieträgermix zur Nah- und Fernwärmeerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Ariadne-Szenario-BW-2040	77
Abbildung 4-21: Energieträgermix zur Nah- und Fernwärmeerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Agora-Szenario-BW-2040	78
Abbildung 4-22: Energieträgermix zur Nah- und Fernwärmeerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das UBA-Szenario-BW-2040	79
Abbildung 4-23: Sektorspezifische Stromnachfrage in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Ariadne-Szenario-BW-2040	80
Abbildung 4-24: Energieträgermix zur Stromerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Ariadne-Szenario-BW-2040	81
Abbildung 4-25: Energieträgermix zur Stromerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Agora-Szenario-BW-2040	82
Abbildung 4-26: Energieträgermix zur Stromerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das UBA-Szenario-BW-2040	83
Abbildung 4-27: Jährliche Stromimporte und -exporte in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Ariadne-Szenario-BW-2040	84
Abbildung 4-28: Jährliche Stromimporte und -exporte in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Agora-Szenario-BW-2040	85
Abbildung 7-1: Durchschnittliche Wärmegestehungskosten und Kapitalwerte für unterschiedliche Heizsysteme und Sanierungszustände eines typischen Einfamilienhauses	120
Abbildung 7-2: Durchschnittliche Wärmegestehungskosten und Kapitalwerte für unterschiedliche Heizsysteme und Sanierungszustände eines typischen Mehrfamilienhauses	121
Abbildung 7-3: Sektorspezifische Stromnachfrage in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Agora-Szenario-BW-2040	140
Abbildung 7-4: Sektorspezifische Stromnachfrage in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das UBA-Szenario-BW-2040	142
Abbildung 7-5: Jährliche Stromimporte und -exporte in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das UBA-Szenario-BW-2040	150

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Verteilschlüssel für die Skalierung der Zielszenarien von Deutschland auf Baden-Württemberg hinsichtlich des Stromverbrauchs	42
Tabelle 3-2: Verteilschlüssel für die Skalierung der Zielszenarien von Deutschland auf Baden-Württemberg im Bereich der Gebäudewärmeversorgung	43
Tabelle 3-3: Verteilschlüssel für die Skalierung der Zielszenarien von Deutschland auf Baden-Württemberg hinsichtlich der Stromerzeugungskapazitäten	44
Tabelle 4-1: Angenommene Wasserstoff-Kraftwerke in Baden-Württemberg in den skalierten Zielszenarien	61
Tabelle 7-1: Gebäudemerkmale und energetische Kennwerte der Typgebäude	117
Tabelle 7-2: Geeignete und bedingt geeignete Potenzialflächen für Windenergie in Baden-Württemberg in Kombination mit einem „geringen“ (KR 1) bzw. „mittleren“ (KR 2) Konfliktrisiko für windkraftsensible Vogelarten und Fledermäuse sowie der daraus abgeleitete Verteilschlüssel	122
Tabelle 7-3: Potenzialflächen für PV-Freiflächenanlagen auf Seitenrandstreifen und benachteiligten landwirtschaftlichen Gebieten sowie die daraus abgeleiteten Verteilschlüssel	123
Tabelle 7-4: Verteilschlüssel für PV-Dachanlagen und PV-Sonderanlagen	124
Tabelle 7-5: Installierte Erzeugungskapazitäten zur Stromerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Ariadne-Szenario-BW-2040	125
Tabelle 7-6: Installierte Erzeugungskapazitäten zur Stromerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Agora-Szenario-BW-2040	126
Tabelle 7-7: Installierte Erzeugungskapazitäten zur Stromerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das UBA-Szenario-BW-2040	127
Tabelle 7-8: Flächenanteile für Windenergieanlagen und PV-Freiflächenanlagen in den zwölf Regionen Baden-Württembergs	128
Tabelle 7-9: Endenergienachfrage für Raumwärme und Warmwasser in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Jahr 2019	129
Tabelle 7-10: Endenergienachfrage für Raumwärme und Warmwasser in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Ariadne-Szenario-BW-2040	130
Tabelle 7-11: Endenergienachfrage für Raumwärme und Warmwasser in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Agora-Szenario-BW-2040	131
Tabelle 7-12: Endenergienachfrage für Raumwärme und Warmwasser in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das UBA-Szenario-BW-2040	132
Tabelle 7-13: Anlagenpark zur Nah- und Fernwärmeerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württemberg für das Ariadne-Szenario-BW-2040	133

Tabelle 7-14: Anlagenpark zur Nah- und Fernwärmeerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Agora-Szenario-BW-2040	134
Tabelle 7-15: Anlagenpark zur Nah- und Fernwärmeerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das UBA-Szenario-BW-2040	135
Tabelle 7-16: Nah- und Fernwärmeerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Ariadne-Szenario-BW-2040	136
Tabelle 7-17: Nah- und Fernwärmeerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Agora-Szenario-BW-2040	137
Tabelle 7-18: Nah- und Fernwärmeerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das UBA-Szenario-BW-2040	138
Tabelle 7-19: Sektorspezifische Stromnachfrage in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Ariadne-Szenario-BW-2040	139
Tabelle 7-20: Sektorspezifische Stromnachfrage in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Agora-Szenario-BW-2040	141
Tabelle 7-21: Sektorspezifische Stromnachfrage in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das UBA-Szenario-BW-2040	143
Tabelle 7-22: Energieträgermix zur Stromerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Ariadne-Szenario-BW-2040	144
Tabelle 7-23: Energieträgermix zur Stromerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Agora-Szenario-BW-2040	145
Tabelle 7-24: Energieträgermix zur Stromerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das UBA-Szenario-BW-2040	146
Tabelle 7-25: Regionale Bilanzierung der jährlichen Netto-Stromimporte in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Ariadne-Szenario-BW-2040	147
Tabelle 7-26: Regionale Bilanzierung der jährlichen Netto-Stromimporte in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Agora-Szenario-BW-2040	148
Tabelle 7-27: Regionale Bilanzierung der jährlichen Netto-Stromimporte in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das UBA-Szenario-BW-2040	149

Glossar

Abkürzung	Erläuterung
Agri-PV	Photovoltaik auf noch landwirtschaftlich genutzten Flächen (z.B. Obst- und Gemüseanbau oder Grünlandnutzung)
BHKW	Blockheizkraftwerk (Motorenkraftwerk)
BW	Baden-Württemberg
COP	Coefficient of Performance (Verhältnis von Nutzwärme zur eingesetzten elektrischen Energie), zeigt die Effizienz von Wärmepumpen an
DE	Deutschland
EE	Erneuerbare Energien
EFH	Einfamilienhaus
E-Fuels	Strombasierte Kraftstoffe als Folgeprodukt aus der Wasserstoff-Elektrolyse
GHD	Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung, d.h. die gleichzeitige Erzeugung von Strom und Wärme in einem Kraftwerk
LUBW	Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
MFH	Mehrfamilienhaus
MIV	motorisierten Individualverkehr
NEP	Netzentwicklungsplan
PKW	Personenkraftwagen (Auto)
PV	Photovoltaik
RL	Rücklauf (bei Heizungssystemen)
VL	Vorlauf (bei Heizungssystemen)
WindBG	Windenergieflächenbedarfsgesetz
WP	Wärmepumpe

Vorwort des BUND Landesverbandes Baden-Württemberg

Baden-Württemberg hat sich angesichts des dramatisch voranschreitenden Klimawandels zum Ziel gesetzt, bis 2040 klimaneutral zu sein. Die vorliegende Studie konkretisiert dieses Ziel und die erforderlichen Maßnahmen für eine klimaneutrale Energieversorgung in unserem Bundesland. Erforderliche und auch mögliche Beiträge der zwölf politischen Verwaltungsregionen Baden-Württembergs werden daraus abgeleitet. Grundlage der vorliegenden Studie sind drei orientierende Szenarien der Denkfabrik Agora Energiewende, des Forschungsverbunds Ariadne und des Umweltbundesamts. Diese zeigen jeweils konkrete Wege auf, wie Deutschland Klimaneutralität bis zum Jahr 2045 bzw. 2050 erreichen kann. Das Herunterbrechen dieser unterschiedlichen Szenarien bis auf die Ebene der zwölf baden-württembergischen Regionen ermöglicht erstmals eine transparente Debatte vor Ort.

Die im Auftrag des BUND Baden-Württemberg erstellte Studie leistet somit den Lückenschluss zu einer angemessenen Klimaschutzstrategie im Südwesten.

Die Ausarbeitungen zur Windenergie machen deutlich, dass insbesondere die Regionen Heilbronn-Franken, Donau-Iller und Nordschwarzwald über große WindausbauPotenziale verfügen. Diese liegen weit über den aktuellen Vorgaben der Landesregierung zum Ausbau – und müssen genutzt werden. Denn Alternativen zu einer konsequenten Nutzung dieser Potenziale sind hohe internationale Abhängigkeiten in Form von Strom-, Wasserstoff- und E-Fuel- Importen oder ein massiver Ausbau der Offshore-Windkapazitäten in Nord- und Ostsee. Ein Vergleich der gewählten Grundscenarien zeigt diese Konsequenzen leicht nachvollziehbar auf. Es ist somit eindeutige Aufgabe Baden-Württembergs, einen ambitionierten und gleichzeitig naturverträglichen Wind- und Freiflächen-Photovoltaik-Ausbau vor Ort voranzutreiben.

Die Studie veranschaulicht ebenso, welchen wichtigen Hebel Effizienz- und Suffizienzmaßnahmen darstellen. Die Umsetzung des Szenarios des Umweltbundesamts für Baden-Württemberg setzt hier die ambitioniertesten Ziele, was dazu führt, dass weniger Erzeugungskapazitäten für Strom und Wärme erforderlich sind als in den anderen beiden Szenarien. Auch wenn der Fokus der vorliegenden Studie auf dem Ausbau der regenerativen Stromversorgung und der klimaneutralen Wärmenetze liegt, wird deutlich, wie wichtig veränderte Lebensweisen und eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft für das Erreichen der Klimaneutralitätsziele sind.

Machen wir uns gemeinsam auf den Weg in die Klimaneutralität unseres Landes!

Sylvia Pilarsky-Grosch

Fritz Mielert

Dr. Michael Jantzer

Landesvorsitzende

Umweltreferent

Sprecher AG Energie

1 Executive Summary

1.1 Kernbotschaften

- Das Ziel, einer klimaneutralen Strom- und Wärmeversorgung bis zum Jahr 2040 zu erreichen, ist sehr ambitioniert und erfordert sowohl auf der Nachfrageseite als auch der Erzeugungsseite eine erhebliche Steigerung und Ausweitung der bisherigen Aktivitäten.
- Eine zentrale Rolle für das Erreichen von Klimaneutralität ist das Thema „Energieeinsparung“, wofür sowohl Effizienzmaßnahmen (z.B. im Bereich der energetischen Gebäudesanierung) als auch Suffizienzmaßnahmen (z.B. durch einen bewussteren Lebensstil) erforderlich sind.
- Für eine klimaneutrale Stromversorgung muss der Ausbau von Windenergie und Photovoltaik massiv erhöht und deutlich beschleunigt werden. Im Vergleich zu den letzten zehn Jahren bedeutet dies für Windenergie und PV-Freiflächenanlagen eine deutliche Steigerung um den Faktor fünf bis zehn.
- Der Flächenbedarf für Windenergie und PV-Freiflächenanlagen liegt in den Zielszenarien für Baden-Württemberg bei 1,8 % bis 3,1 %. Das derzeitige Landesziel in Höhe von 2 % reicht dafür nicht aus und sollte auf mindestens 3 % erhöht werden.
- Die geeigneten Flächen für Windenergie und Photovoltaik sind dabei regional unterschiedlich verteilt. Die Landesregierung sollte zusammen mit den Regionalverbänden ein geeignetes Verfahren entwickeln, um regionalspezifische Flächenziele auszuweisen.
- Um die Genehmigungsprozesse für Windenergie und PV-Freiflächenanlagen zu beschleunigen, sollten die Empfehlungen der entsprechenden Task Force umgesetzt und verstetigt werden. Zudem sollten die Kommunen finanziell an den Erträgen der bei ihnen angesiedelten EE-Anlagen beteiligt werden.
- Zentrale Bestandteile einer klimaneutralen Gebäudewärmeversorgung sind neben der energetischen Gebäudesanierung der Wärmepumpenhochlauf in der Objektversorgung sowie der Aus- und Umbau der Nah- und Fernwärmenetze. Wasserstoff spielt für eine klimaneutrale Wärmeversorgung lediglich im Bereich der Fernwärmeerzeugung eine Rolle.
- Notwendig ist ein sehr schneller Markthochlauf bei Wärmepumpen. Hierfür ist die anvisierte 65 % Anforderung, nach der ab dem 01.01.2024 bei jedem Heizungstausch mindestens 65 % erneuerbare Wärmeenergien eingesetzt werden müssen, eine wichtige Maßnahme.
- Im Bereich der Wärmenetze kommt den Regionen Stuttgart, Rhein-Neckar und Mittlerer Oberrhein eine wichtige Rolle zu, da dort knapp zwei Drittel der Wärmenetznachfrage lokalisiert sind. Wichtig ist dabei die Einbindung erneuerbarer Wärmequellen in die Wärmenetze, insbesondere von Geothermie, Abwärme, Solarthermie und Großwärmepumpen.
- Der Erfolg der Energiewende hängt dabei auch an ausreichend verfügbaren und adäquat qualifizierten Fachkräften. Dies betrifft nicht nur die energetische Gebäudesanierung, sondern auch den Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung sowie den Umbau der energiewenderelevanten Infrastrukturen.

1.2 Zielstellung

In den letzten Jahren sind zahlreiche Studien mit klimaneutralen Zielszenarien für Deutschland erschienen, die jeweils unterschiedliche Schwerpunkte bei den Dekarbonisierungsstrategien setzen und damit auch verschiedene Transformationspfade beschreiben. Die räumliche Auflösung beschränkt sich dabei überwiegend auf Deutschland, sodass eine regionale Konkretisierung und Veranschaulichung dieser Zielbilder bislang fehlen.

Die hier vorliegende Studie verfolgt daher das Ziel, verschiedene deutschlandweite klimaneutrale Zielszenarien für Baden-Württemberg und seine zwölf Regionen zu konkretisieren. Dafür wurden drei Szenarien ausgewählt, die sich in relevanten Eingangsgrößen und Annahmen unterscheiden (Abschnitt 3.2):

- Das Ariadne-Szenario „Technologie-Mix“ erreicht Klimaneutralität bis 2045 und setzt dabei stark auf Elektrifizierung. Es weist im Vergleich der Szenarien sowohl den höchsten Stromverbrauch als auch die größte Stromerzeugung durch Wind onshore auf. Biomasse wird vorrangig für die Erzeugung von Flüssigkraftstoffen verwendet.
- Das Agora-Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2045“ ist durch die im Vergleich zu den anderen Szenarien höchste Stromerzeugung aus Wind offshore und Wasserstoff geprägt. Der Stromverbrauch liegt im mittleren Bereich und Biomasse wird vor allem in der Industrie und in privaten Haushalten zur Wärmeerzeugung eingesetzt.
- Das UBA-Szenario „GreenSupreme“ erreicht Klimaneutralität bis 2050 und fokussiert von den drei ausgewählten Szenarien am stärksten auf Suffizienz und Verhaltensänderungen. Entsprechend ist der Strom- und Wärmeverbrauch in diesem Szenario am geringsten ausgeprägt. Biomasse wird vorrangig stofflich genutzt.

Neben der Regionalisierung dieser Deutschlandszenarien auf Baden-Württemberg und seine zwölf Regionen werden zum Abschluss der Studie Maßnahmen formuliert, die jetzt vorrangig umgesetzt werden sollten, um eine klimaneutrale Energieversorgung in Baden-Württemberg zu ermöglichen.

Diese Studie fokussiert dabei auf die Bereiche „Stromversorgung“ und „Gebäudewärmeversorgung“. Der dann noch verbleibende nicht-elektrische Energiebedarf in den Sektoren Industrie und Verkehr (v.a. Wasserstoff und E-Fuels) wird in dieser Studie nicht behandelt.

1.3 Methodik der Regionalisierung

Als Ausgangspunkt für die Regionalisierung werden jeweils die klimaneutralen Zieljahre 2045 bzw. 2050 der oben genannten Szenarien verwendet. Da sich Baden-Württemberg das Ziel gesetzt hat, bis zum Jahr 2040 Klimaneutralität zu erreichen, bedeutet dies, dass sich die Transformationsgeschwindigkeit im Vergleich zu den Deutschlandszenarien erhöht. Darüber hinaus werden die in den Deutschlandszenarien unterstellten Volllaststunden für Wind offshore, Wind onshore und Photovoltaik (PV) vereinheitlicht, damit die installierten Leistungen miteinander vergleichbar sind.

Die Regionalisierung von Deutschland auf die baden-württembergischen Regionen erfolgt dann in zwei Schritten:

- Im ersten Schritt werden die Ausgangswerte für Deutschland mit Hilfe geeigneter Verteilschlüssel auf Baden-Württemberg skaliert. Die verwendeten Verteilschlüssel werden überwiegend aus den (Energie-)Statistiken des Bundes und des Landes Baden-Württemberg

abgeleitet oder sind aus der Literatur übernommen (z.B. Szenariorahmen zum Netzentwicklungsplan Strom 2037 für Windenergie und PV-Freiflächenanlagen). Der aus der Skalierung resultierende Szenariorahmen für Baden-Württemberg wird abschließend in die verfügbare Literatur eingeordnet und plausibilisiert (Abschnitt 0).

- Im zweiten Schritt wird der Szenariorahmen für Baden-Württemberg ebenfalls mit Hilfe spezifischer Verteilschlüssel auf die zwölf baden-württembergischen Regionen verteilt. Die verwendeten Verteilschlüssel werden dafür teilweise mittels räumlicher Verschneidung und Aggregation GIS-gestützt gebildet (z.B. mit Daten aus dem Windenergieatlas und dem Solardachkataster der LUBW, zu windkraftsensiblen Vogelarten und Fledermäusen sowie zur Wärmedichte), oder aus landkreisspezifischen Daten abgeleitet. Ein wesentlicher Bestandteil der verwendeten Verteilschlüssel sind Flächenangaben (Abschnitt 4.1).

Um die auf Baden-Württemberg für das klimaneutrale Zieljahr 2040 skalierten Szenarien von den Originalszenarien auch sprachlich zu unterscheiden, werden die skalierten Zielszenarien im Folgenden nun „Ariadne-Szenario-BW-2040“, „Agora-Szenario-BW-2040“ und „UBA-Szenario-BW-2040“ genannt.

1.4 Ergebnisse der Skalierung auf Baden-Württemberg für das klimaneutrale Zieljahr 2040

Nach der Skalierung auf Baden-Württemberg ergibt sich ein Strombedarf von 84 TWh (UBA-Szenario-BW-2040), 102 TWh (Agora-Szenario-BW-2040) bzw. 134 TWh (Ariadne-Szenario-BW-2040) (Abbildung 1-1). Aktuelle Studien mit Fokus auf Baden-Württemberg gehen für Klimaneutralität von einem Stromverbrauch in Höhe von 92 TWh bis 119 TWh aus. Im Vergleich zur Literatur liegt das Ariadne-Szenario-BW-2040 über dem oberen Rand und das UBA-Szenario-BW-2040 unter dem unteren Rand, während das Agora-Szenario-BW-2040 im Mittelfeld des in der Literatur aufgespannten Bereichs liegt. Für den Sektor Industrie weist die Studie des VfEW einen Stromverbrauch in der Größenordnung von 35 TWh bis 45 TWh aus. Das Ariadne-Szenario-BW-2040 und das Agora-Szenario-BW-2040 liegen innerhalb dieses Korridors und das UBA-Szenario-BW-2040 liegt darunter.

Im Bereich der Stromerzeugungskapazitäten wird deutlich, dass zukünftig Windenergie und Photovoltaik die mit Abstand größten Erzeugungskapazitäten in Baden-Württemberg aufweisen werden. Die auf Baden-Württemberg skalierte elektrische Leistung beträgt für Windenergie 11 GW im Agora-Szenario-BW-2040, 16 GW im UBA-Szenario-BW-2040 und 22 GW im Ariadne-Szenario-BW-2040. Bei Photovoltaik liegt die auf Baden-Württemberg skalierte elektrische Leistung, aufsummiert über alle PV-Kategorien, zwischen 17 GW (UBA-Szenario-BW-2040) und 41 GW (Ariadne-Szenario-BW-2040) bzw. 42 GW (Agora-Szenario-BW-2040). Die installierte Leistung von Wasserstoffkraftwerken liegt im Bereich von 1 GW (UBA-Szenario-BW-2040), 4 GW (Ariadne-Szenario-BW-2040) und 7 GW (Agora-Szenario-BW-2040) (Abbildung 1-2).

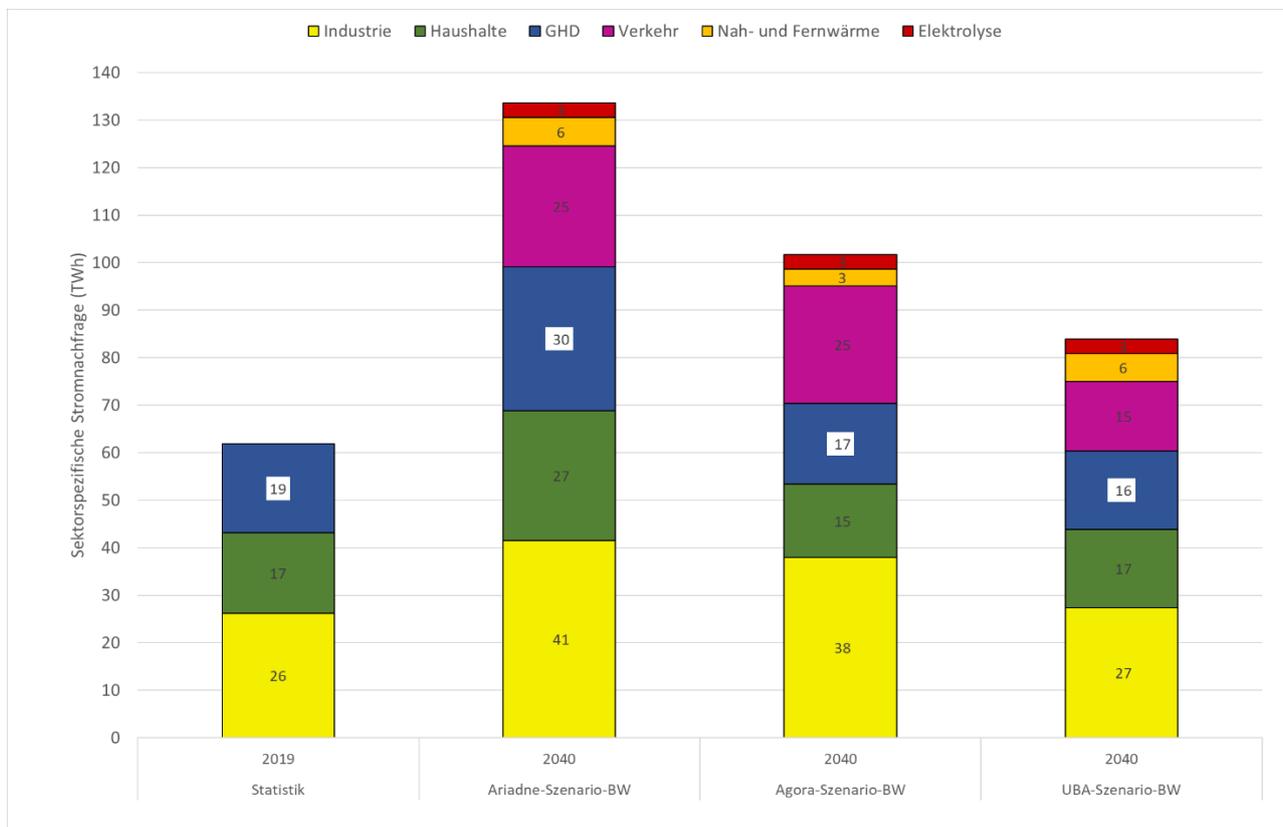
Im Vergleich zu Studien mit Fokus auf Baden-Württemberg liegt die installierte Leistung für Windenergie in den skalierten Zielszenarien eher im hohen (UBA-Szenario-BW-2040) bis sehr hohen (Ariadne-Szenario-BW-2040) Bereich. Die sich ergebene installierte Leistung für Windenergie im Agora-Szenario-BW-2040 entspricht der Leistung, wie sie auch in der PEE-Studie¹ und der Sektorziel-Studie² ausgewiesen wird. Studien im Bereich der Netzplanung weisen mit 5 GW bis 7 GW

¹ Plattform Erneuerbare Energien Baden-Württemberg e.V. (2021): Baden-Württemberg Klimaneutral 2040, Erforderlicher Ausbau der erneuerbaren Energien

² Kelm et al (2022): Sektorziele 2030 und klimaneutrales Baden-Württemberg 2040

deutlich geringere Kapazitäten für Windenergie in Baden-Württemberg aus. Vor diesem Hintergrund kann das Ariadne-Szenario-BW-2040 als ein Extremszenario für Windenergie an Land eingeordnet werden.

Abbildung 1-1: Sektorspezifische Stromnachfrage in Baden-Württemberg im Jahr 2019 sowie im klimaneutralen Zieljahr 2040



Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

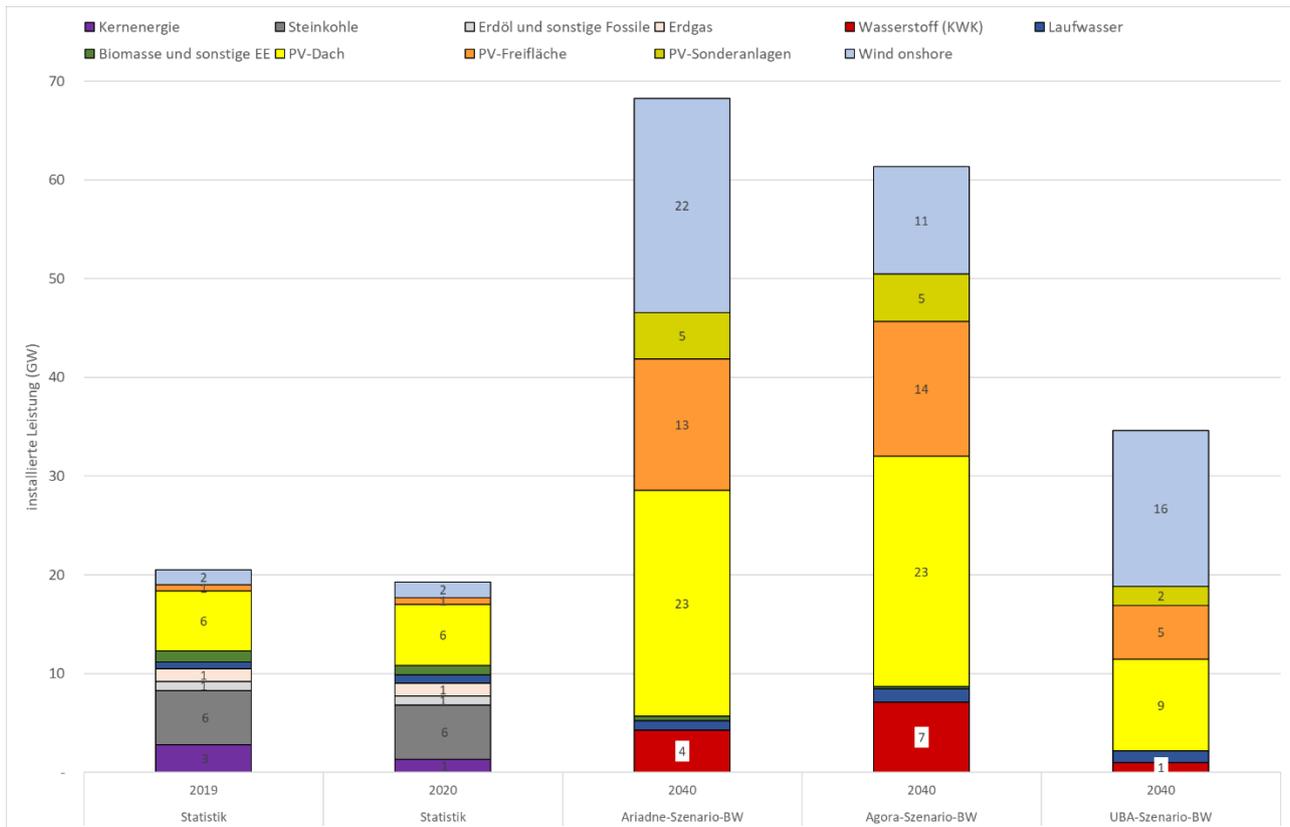
Bei Photovoltaik liegt die installierte Leistung im UBA-Szenario-BW-2040 deutlich unter dem im in der Literatur ausgewiesenen Bereich zwischen 33 GW und 49 GW. Das Agora-Szenario-BW-2040 und das Ariadne-Szenario-BW-2040 liegen im Mittelfeld, eingerahmt von der PEE-Studie (39 GW) und der Sektorziel-Studie (47 GW).

Studien mit Fokus auf Baden-Württemberg gehen von einer installierten Leistung von Gaskraftwerken, welche im klimaneutralen Zielbild nur noch mit Wasserstoff betrieben werden, von 3 GW bis 5,5 GW aus. Während das Ariadne-Szenario-BW-2040 mit 4 GW im Mittelfeld dieses Bereichs liegt, liegen das UBA-Szenario-BW-2040 deutlich darunter und das Agora-Szenario-BW-2040 darüber.

Baden-Württemberg ist in allen drei skalierten Zielszenarien auf Stromimporte angewiesen, um seine Stromnachfrage zu decken. Die jährlichen Nettostromimporte belaufen sich dabei auf etwa 20 TWh bis 30 TWh. Im Jahr 2019 beliefen sich die Nettostromimporte nach Baden-Württemberg auf rund 15 TWh³.

³ <https://www.statistik-bw.de/Energie/ErzeugVerwend/EN-BS-LR.jsp> und <https://www.statistik-bw.de/Energie/Energiebilanz/LRt1001.jsp>

Abbildung 1-2: Energieträgerspezifische Stromerzeugungskapazitäten für Baden-Württemberg in den Jahren 2019 und 2020 sowie im klimaneutralen Zieljahr 2040



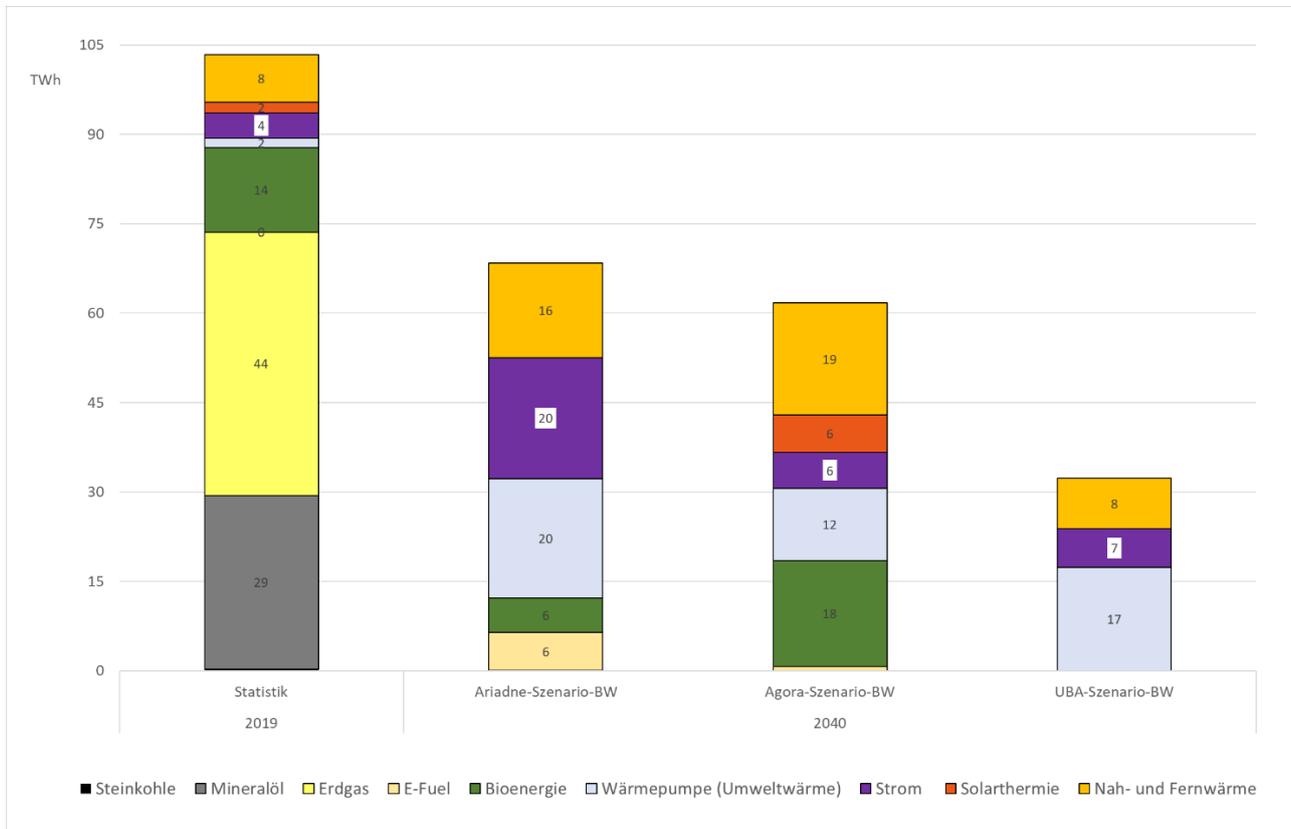
Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

Im Bereich der Gebäudewärme ergibt die Skalierung der klimaneutralen Zielszenarien auf Baden-Württemberg einen Wärmebedarf von 32 TWh (UBA-Szenario-BW-2040), 62 TWh (Agora-Szenario-BW-2040) und 68 TWh (Ariadne-Szenario-BW-2040). Im Vergleich zu 2019 entspricht das einer Reduktion von 69 % (UBA-Szenario-BW-2040), 40 % (Agora-Szenario-BW-2040) und 34 % (Ariadne-Szenario-BW-2040). Im Vergleich zur Sektorziel-Studie, die für das Jahr 2040 von einem Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser in Höhe von 82 TWh ausgeht (Kelm et al. 2022, S. 16), wird deutlich, dass alle drei Szenarien für den Bereich der Gebäudewärmeversorgung von einer ambitionierteren Sanierungsaktivität im Gebäudebestand (d.h. sowohl hinsichtlich der Sanierungstiefe als auch der Sanierungsgeschwindigkeit) und hohen Effizienzstandards für Neubauten ausgehen. Die sehr hohe Reduktion der Gebäudewärmenachfrage im UBA-Szenario-BW-2040 ergibt sich aufgrund der dort getroffenen Suffizienz-Annahmen (v. a. Reduktion der Pro-Kopf-Wohnfläche, Reduktion der Raumtemperatur).

Die drei auf Baden-Württemberg skalierten Szenarien weisen zudem auch einen unterschiedlichen Energieträger- und Technologiemitmix bei der Gebäudewärmeerzeugung auf. Während das Agora-Szenario-BW-2040 mit 29 % den höchsten Anteil an Biomasse aufweist, wird im UBA-Szenario-BW-2040 überhaupt keine Biomasse mehr für die dezentrale Wärmebereitstellung eingesetzt. Im Ariadne-Szenario-BW-2040 sind es noch 8 %. Die Elektrifizierung der Gebäudewärmeerzeugung mittels Wärmepumpen und Stromdirektanwendungen ist im UBA-Szenario-BW-2040 (74 %) und im Ariadne-Szenario-BW-2040 (65 %) deutlich höher ausgeprägt als im Agora-Szenario-BW-2040 (29 %). Im Ariadne-Szenario-BW-2040 werden zudem auch E-Fuels in Heizungen eingesetzt (9 %),

im Agora-Szenario-BW-2040 beläuft sich deren Anteil nur auf 1 %. Solarthermie wird ausschließlich im Agora-Szenario-BW-2040 für die dezentrale Gebäudewärmeerzeugung berücksichtigt.

Abbildung 1-3: Gebäudewärmeerzeugung in Baden-Württemberg nach Energieträgern im Jahr 2019 sowie im klimaneutralen Zieljahr 2040



Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

Hinsichtlich des relativen Anteils der Wärmebereitstellung mittels Wärmenetzen liegen alle drei Szenarien in einem ähnlich hohen Bereich von 23 % (Ariadne-Szenario-BW-2040), 26 % (UBA-Szenario-BW-2040) und 30 % (Agora-Szenario-BW-2040). Die Sektorziel-Studie weist diesbezüglich einen Anteil von 17 % aus (Kelm et al. 2022, S. 16), die PEE-Studie geht von einer Steigerung des Wärmenetzanteils auf 30 % bis 2040 aus (Nitsch und Magosch 2021, S. 21).

1.5 Ergebnis der Regionalisierung auf die zwölf baden-württembergischen Regionen

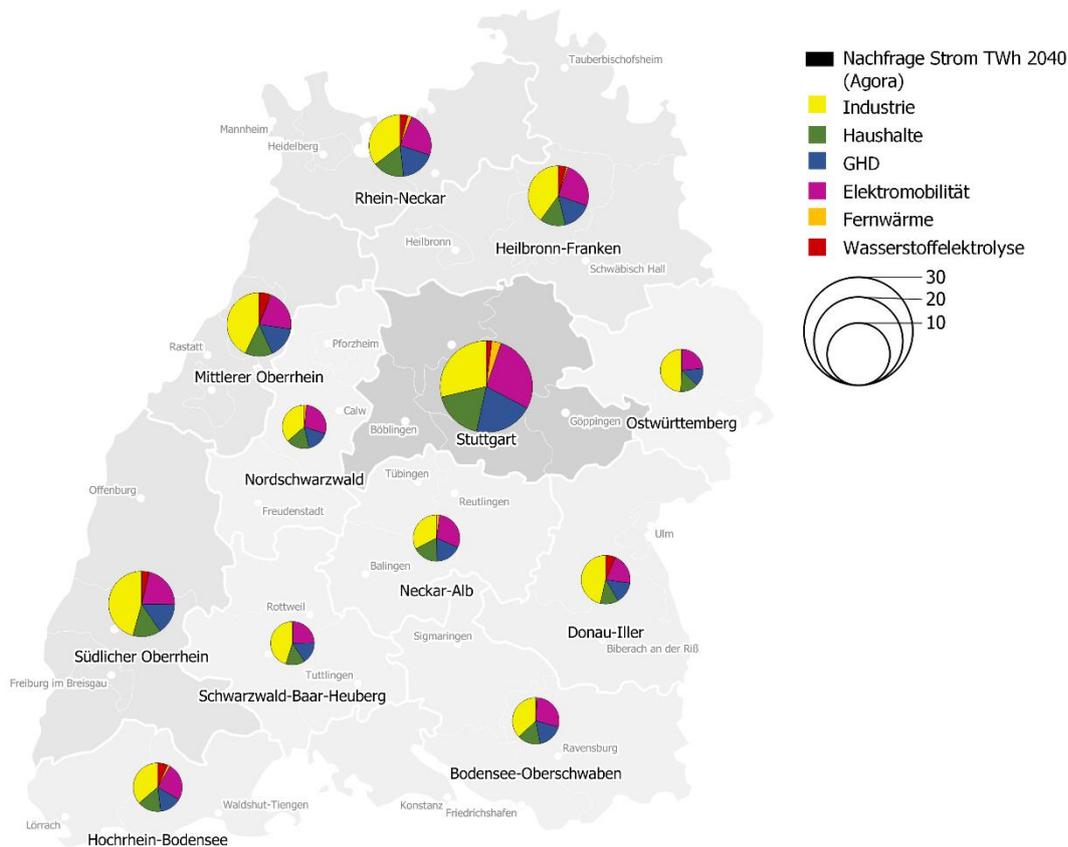
1.5.1 Stromnachfrage und Wärmenachfrage für Raumwärme und Warmwasser

Für die räumliche Verteilung der Stromnachfrage auf die zwölf Regionen in Baden-Württemberg werden für jede Unterpositionen jeweils spezifische räumliche Verteilschlüssel angewendet. Die Stromnachfrage der Industrie wird proportional zum „Energieverbrauch der Industrie in Baden-Württemberg 2019 nach Stadt- und Landkreisen (Stromverbrauch)“ verteilt. Für die Stromnachfrage im Sektor GHD wird der Verteilschlüssel „Erwerbstätige am Arbeitsort 2019“ herangezogen. Die Verteilung der Stromnachfrage von Haushalten erfolgt analog zur Bevölkerungsverteilung im Jahr 2020.

Als Verteilschlüssel für die Stromnachfrage von Elektrofahrzeugen dient der Fahrzeugbestand 2021 (Kraftfahrt-Bundesamt 2021).

Der Verteilschlüssel für Elektrolyseure basiert auf einer sehr groben und eher indikativ zu verstehenden Abschätzung möglicher Standorte für Onsite-Elektrolyseure⁴ und sieht Elektrolyseure entlang eines zukünftigen Wasserstofffernleitungsnetzes (z. B. entlang des Oberrheingrabens und von Mannheim kommend durch die Region Stuttgart und weiter nach Ulm) sowie in der Nähe von EE-Stromerzeugungsanlagen (z. B. in der Region Heilbronn-Franken) vor. Die räumliche Verteilung der Stromnachfrage für die elektrische Erzeugung von Nah- und Fernwärme mittels Wärmepumpen ergibt sich aus der Einsatzmodellierung in den einzelnen Nah- und Fernwärmenetzen. Abbildung 1-4 zeigt exemplarisch die sektorspezifische Stromnachfrage in den baden-württembergischen zwölf Regionen für das skalierte Agora-Szenario-BW-2040. Die regionale Verteilung der Stromnachfrage ist in allen drei Zielszenarien nahezu identisch: rund 22 % der Stromnachfrage sind in der Region Stuttgart lokalisiert, gefolgt von den Regionen Südlicher Oberrhein, Rhein-Neckar, Mittlerer Oberrhein und Heilbronn-Franken mit jeweils rund 9 % bis 11 %. Auf die verbleibenden sieben Regionen entfallen jeweils rund 5 % bis 6 % der Stromnachfrage von Baden-Württemberg.

Abbildung 1-4: Sektorspezifische Stromnachfrage in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Agora-Szenario-BW-2040



Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnungen)

⁴ Direkt am Standort einer industriellen Wasserstoffnachfrage, z. B. bei der MIRO Raffinerie in Karlsruhe oder an Chemiestandorten im Landkreis Lörrach.

Die Wärmenachfrage für Raumwärme und Warmwasser hängt vom Sanierungszustand und dem individuellen Verhalten der Gebäudenutzer*innen ab. Innerhalb Baden-Württembergs und seiner zwölf Regionen gibt es keinen Hinweis auf strukturelle Unterschiede der energetischen Gebäudezustände oder des Heizverhaltens bzw. des Warmwasserbedarfs. Die Verteilung der Wärmenachfrage der drei klimaneutralen Szenarien auf die zwölf Regionen innerhalb Baden-Württembergs erfolgt daher analog zur Bevölkerungsverteilung.

1.5.2 Erzeugungskapazitäten zur Stromerzeugung

Die installierten Erzeugungskapazitäten zur Stromerzeugung in den zwölf Regionen ergeben sich aus dem zugrundeliegende Szenariorahmen für Baden-Württemberg und den gewählten Verteilschlüsseln für die einzelnen Technologien und Energieträger. Die dominierenden Energieträger zur Stromerzeugung sind in den klimaneutralen Zielszenarien Windenergie und Photovoltaik.

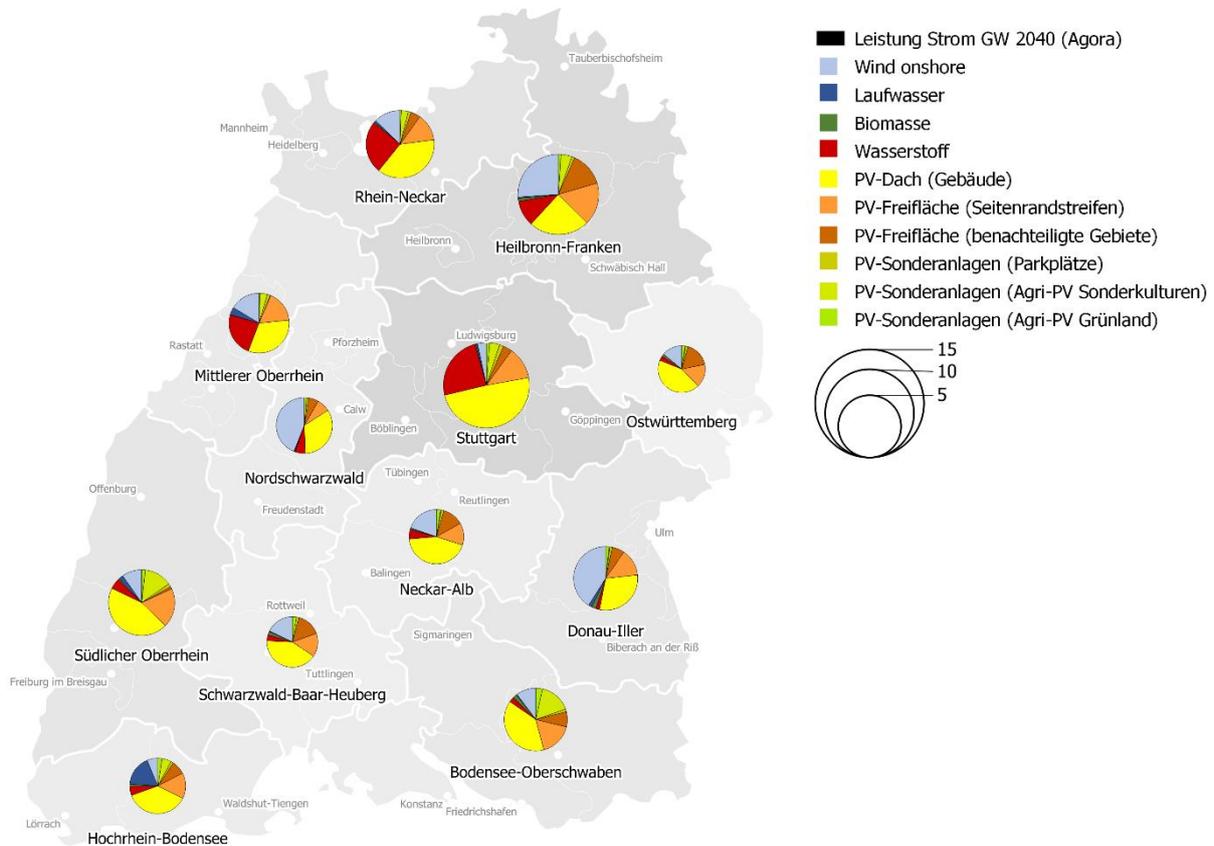
Der regionale Verteilschlüssel für Windenergie basiert auf dem Windpotenzialatlas der LUBW und Daten des NABU zu windkraftsensiblen Vogelarten und Fledermäusen. Der daraus resultierende Verteilschlüssel weist größere regionale Unterschiede auf, so dass auf die Regionen Heilbronn-Franken (20 %), Donau-Iller (20 %) und Nordschwarzwald (16 %) gut die Hälfte der Windenergie entfallen.

Im Gegensatz dazu dominiert bei PV-Dachanlagen die Region Stuttgart (20 %). Bei Agri-PV entfällt knapp die Hälfte des Potenzials auf die Regionen Bodensee-Oberschwaben (24 %) und Südlicher Oberrhein (21 %). Die Region Heilbronn-Franken weist mit 19 % zudem das größte Potenzial für PV-Freiflächenanlagen auf. Laufwasserkraftwerke befinden sich entlang von Rhein, Neckar und Donau. Biomassekraftwerke sind vor allem in den ländlich geprägten Regionen von Baden-Württemberg lokalisiert.

Die gebildeten Verteilschlüssel für die einzelnen erneuerbaren Energien basieren überwiegend auf Daten aus dem Energieatlas Baden-Württemberg. Für die räumliche Verteilung von Wasserstoff-Kraftwerken werden sowohl bestehende Pläne und Annahmen für Wasserstoff-Kraftwerke als KWK-Ersatzinvestition an den bisherigen Standorten von Steinkohlekraftwerken berücksichtigt als auch Angaben zu kleineren KWK-Anlagen bzw. BHKW-Motorenkraftwerke aus dem genehmigten Szenariorahmen des Netzentwicklungsplans Strom 2037/2045. Die daraus resultierende elektrische Leistung zur Stromerzeugung zeigt exemplarisch Abbildung 1-5 für das **Agora-Szenario-BW-2040**.

Eine gängige Kennzahl für die Regionalisierung von Windenergie und PV-Freiflächenanlagen ist zudem der spezifische Flächenanteil, der sich aus der ausgewiesenen Potenzialfläche im Verhältnis zur Gesamtfläche der Region ergibt. Bei Windenergie ergibt sich im Agora-Szenario-BW-2040 eine Bandbreite von 0,4 % bis 3,4 % (Landesdurchschnitt 1,4 %), im UBA-Szenario-BW-2040 von 0,6 % bis 4,9 % (Landesdurchschnitt 2,0 %) und im Ariadne-Szenario-BW-2040 von 0,8 % bis 6,7 % (Landesdurchschnitt 2,7 %). Der räumliche Verteilschlüssel für PV-Freiflächenanlagen ist hingegen deutlich ausgeglichener und es resultiert eine gleichmäßigere Flächeninanspruchnahme zwischen den Regionen. Sie schwankt zwischen 0,1 % und 0,2 % im UBA-Szenario-BW-2040 und 0,2 % und 0,5 % im Ariadne-Szenario-BW-2040 bzw. Agora-Szenario-BW-2040.

Abbildung 1-5: Installierte Erzeugungskapazitäten zur Stromerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Agora-Szenario-BW-2040



Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnungen)

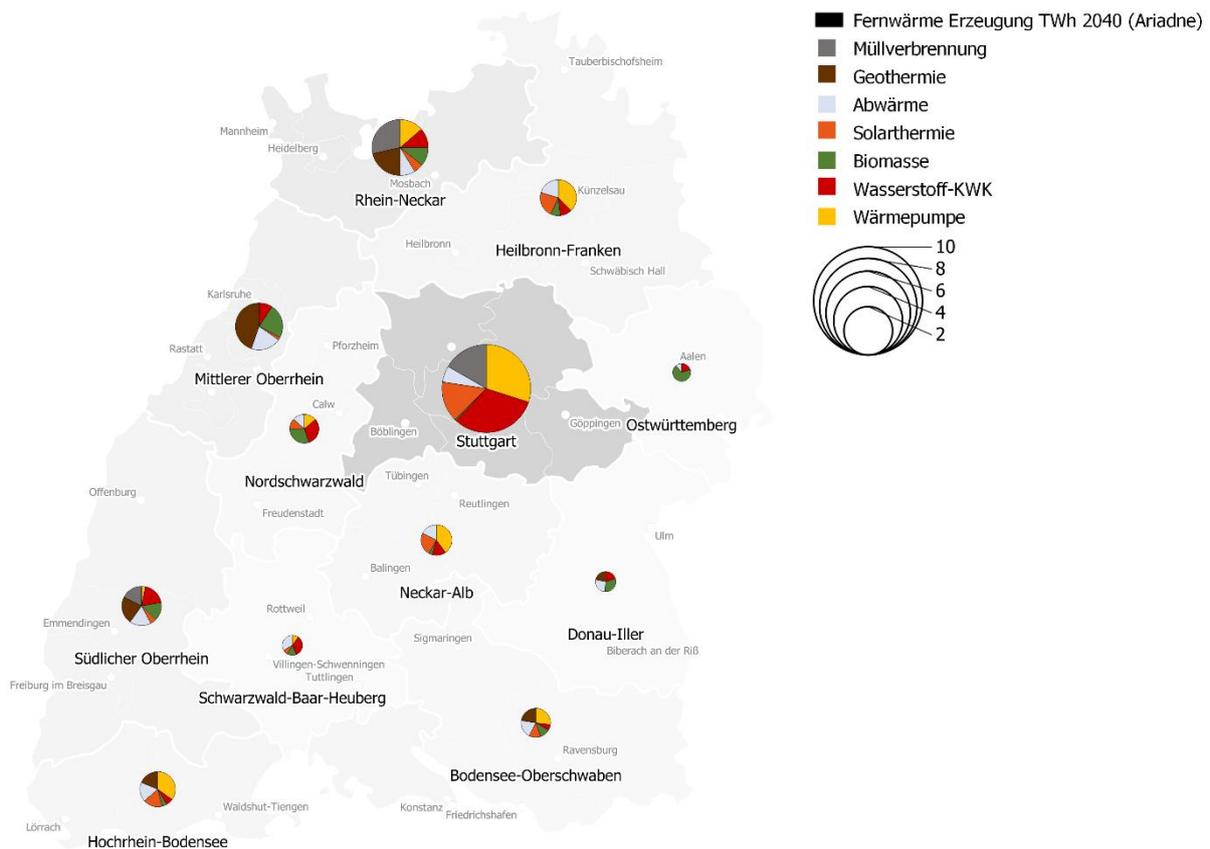
1.5.3 Nah- und Fernwärme

Für die Regionalisierung der Nah- und Fernwärmenachfrage auf die zwölf Regionen Baden-Württembergs wird ein GIS-basiertes Modell des Öko-Instituts angewendet. Mit Hilfe geographischer Daten zu existierenden Nah- und Fernwärmenetze sowie zur Wärmedichte werden mögliche Nah- und Fernwärmegebiete identifiziert und die zukünftige Nah- und Fernwärmenachfrage räumlich verteilt. Dabei wird sowohl die Verdichtung und der Ausbau bestehender Netze als auch der Bau neuer Netze modelliert. Die drei dominierenden Regionen für Wärmenetze sind Stuttgart, Rhein-Neckar und Mittlerer Oberrhein. Auf diese drei Regionen entfällt rund zwei Drittel der Nah- und Fernwärmenachfrage in Baden-Württemberg.

Darüber hinaus wird deutlich, dass die bislang genutzten fossilen Energieträger Erdgas und Steinkohle für eine klimaneutrale Fernwärmeversorgung durch Geothermie, Solarthermie und Abwärme sowie durch Wärmepumpen (Strom und Umweltwärme) und Wasserstoff (KWK-Kraftwerke) ersetzt werden. Der Energieträgermix wird somit heterogener und unterschiedliche Technologien müssen in einen Wärmenetzverbund integriert werden. Um Solarthermie in einem größeren Umfang nutzen zu können, ist zudem auch ein saisonaler Wärmespeicher erforderlich.

Die Verfügbarkeit der erneuerbaren Energieträger ist dabei regional unterschiedlich. Regionen mit größeren Flüssen (v. a. entlang des Rheins) weisen beispielsweise ein größeres Potenzial für die Nutzung von Fluss-Wärmepumpen auf, wobei Regionen mit größeren Städten ein größeres Potenzial für Abwasser-Wärmepumpen haben. See-Wärmepumpen gibt es entlang des Bodensees in den Regionen Hochrhein-Bodensee und Bodensee-Oberschwaben. Das größte geothermische Potenzial liegt entlang des Oberrheingraben und in den Ausläufern des Molassebeckens.

Abbildung 1-6: Energieträgermix zur Nah- und Fernwärmeerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Ariadne-Szenario-BW-2040



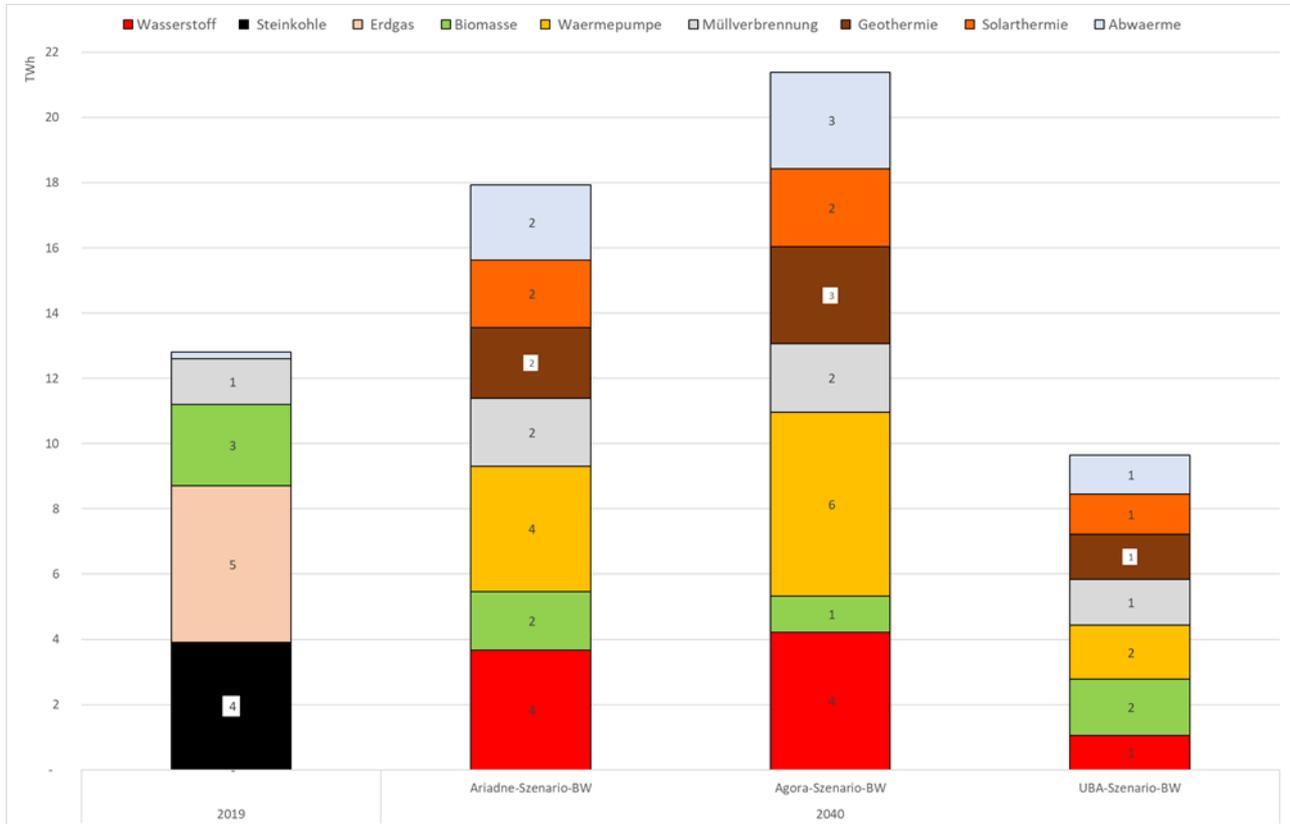
Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnungen)

Abbildung 1-6 zeigt den Energieträgermix zur Nah- und Fernwärmeerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das **Ariadne-Szenario-BW-2040**. Dabei wird deutlich, dass in den Regionen Stuttgart, Rhein-Neckar und Mittlerer Oberrhein ein Großteil der Wärmenetznachfrage lokalisiert ist. In den fünf Regionen Rhein-Neckar, Südlicher Oberrhein, Hochrhein-Bodensee, Donau-Iller und Bodensee-Oberschwaben werden rund 20 % der Nah- und Fernwärme mittels Geothermie erzeugt, in der Region Mittlerer Oberrhein sind es sogar 45 %. In den Regionen Stuttgart, Nordschwarzwald und Schwarzwald-Baar-Heuberg basiert rund ein Drittel der Nah- und Fernwärmeerzeugung auf Wasserstoff, wobei auf die Region Stuttgart knapp 60 % des gesamten Wasserstoffeinsatzes für die Nah- und Fernwärmeerzeugung in Baden-Württemberg entfällt.

Der für Baden-Württemberg resultierende Energieträgermix der Fernwärmeerzeugung in den drei klimaneutralen Zielszenarien zeigt Abbildung 1-7. Dabei entfallen im Durchschnitt rund 50 % der Fernwärmeerzeugung auf Müllverbrennung, Geothermie, Abwärme und Solarthermie (die

spezifischen Anteile liegen jeweils bei rund 12 % bis 13 %). Die restlichen 50 % werden von den besser bedarfsgerecht einsetzbaren Energieträgern Biomasse, Wasserstoff und Wärmepumpen gedeckt.

Abbildung 1-7: Energieträgermix für die Fernwärmeerzeugung in Baden-Württemberg im Jahr 2019 sowie in den klimaneutralen Zielszenarien für das Jahr 2040



Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Darstellung), Daten für 2019 aus (Kelm et al. 2022, S. 90)

1.6 Maßnahmenplan für eine klimaneutrale Energieversorgung in Baden-Württemberg

Um das Ziel einer 100 % klimaneutralen Energieversorgung in Baden-Württemberg zu erreichen, wird ein Maßnahmenplan vorgeschlagen, der sich auf die Handlungsfelder „Reduktion des Energieverbrauchs“, „Stromversorgung“ und „Gebäudewärmeversorgung“ konzentriert und die jetzt auf Landesebene angegangen werden sollten.

1.6.1 Reduktion des Energieverbrauchs

Auf die Reduktion des Energieverbrauchs zielen Maßnahme 1 „Effizienzmaßnahmen zur Reduzierung des Stromverbrauchs“, Maßnahme 2 „Energetische Gebäudesanierung“ und Maßnahme 3 „Etablierung einer suffizienten Lebens- und Wirtschaftsweise“.

Um den **klassischen Stromverbrauch** zu reduzieren, ist es wichtig, Wissen zum Thema Energieeffizienz bei den Stromverbrauchern zu verankern, beispielsweise durch die Ausweitung des Stromspar-Checks für private Haushalte oder die aufsuchende Energie(einspar)beratung für Quartiere.

Die Landesregierung und die Kommunen können darüber hinaus auch selbst aktiv werden, indem sie die Beleuchtung, Klimatisierung und Beheizung der landeseigenen und kommunalen Gebäude entsprechend optimieren und ggf. auch reduzieren (z. B. durch eine Änderung der Arbeitsstättenrichtlinie). Dies gilt auch für die Beleuchtung von Straßen, Fassaden und Denkmälern.

Um die Elektrifizierung als Effizienz- und Dekarbonisierungsstrategie im Bereich der Wärmeerzeugung und im Sektor Mobilität zu fördern, ist es wichtig, steuerliche Vorteile und direkte Subventionen von fossilen Energieträgern abgebaut werden und die CO₂-Bepreisung auf ein angemessenes Niveau angehoben wird, um externe Kosten und Schäden zu internalisieren. Dafür kann sich die Landesregierung auf Bundesebene einsetzen. Darüber hinaus sollten Land und Kommunen beim Aufbau einer öffentlichen Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge aktiv werden. Für die neuen Stromverbraucher ist zudem wichtig, dass der Anstieg des Stromverbrauchs möglichst gering ausfällt und durch Suffizienzmaßnahmen begrenzt wird.

Eine sehr wichtige Rolle nehmen Land und Kommunen zudem im Bereich der Beratung und Information für die **energetische Gebäudesanierung** ein. Die aktuelle Energiekrise führt zu einer deutlichen Zunahme an Beratungsnachfrage. Ordnungsrechtliche Regelungen wie die 65%-Anforderung werden diese Nachfrage signifikant erhöhen. Wichtig ist eine erhebliche Ausweitung der Beratungskapazitäten sowie die Sicherstellung einer qualitativ hochwertigen Beratung.

Ein wichtiger Baustein besteht auch in der energetischen Sanierung der landeseigenen Liegenschaften. Um ihrer Vorbildfunktion gerecht zu werden, muss die Landesregierung dafür sorgen, dass die Sanierung der landeseigenen Gebäude schneller vorangeht (Steigerung der Sanierungsrate) und dabei zielkompatible Sanierungsstandards erreicht werden. Die dafür notwendigen Mittel sind in den Haushalt einzustellen. Das gleiche gilt für die öffentlichen Gebäude in den Kommunen.

Suffizienzstrategien wirken in den persönlichen Lebensbereich hinein, setzen bei der Änderung von Konsummustern an und sind auf eine Reduktion des Konsums ausgerichtet. Das Emissionsminderungspotenzial ist groß, und anders als die Effizienzsteigerungen ist auch die Gefahr von Rebound-Effekten geringer, da Suffizienzstrategien das Wirtschaftswachstum infrage stellen.

1.6.2 Stromversorgung

Im Handlungsfeld „Stromversorgung“ besteht die zentrale Herausforderung darin, bis 2040 ausreichend erneuerbare Stromerzeugungskapazitäten aufzubauen. Das dafür erforderliche Maßnahmenbündel setzt zunächst an der Ausweisung von ausreichend Flächen für Windenergie- und PV-Freiflächenanlagen an (Maßnahme 4 „Ausweisung von mind. 3 % der Landesfläche für Windenergieanlagen und PV-Freiflächenanlagen“). Darüber hinaus ist eine Beschleunigung der Genehmigungsverfahren von hoher Bedeutung, da in kurzer Zeit eine hohe Stromerzeugungsleistung zugebaut werden muss (Maßnahme 5 „Beschleunigung der Genehmigungsverfahren für Windenergieanlagen und PV-Freiflächenanlagen“). Um auch einen ausreichenden finanziellen Anreiz bei Investoren, Bürger*innen und Kommunen zu schaffen, sind die Maßnahme 6 „Verbesserung der Förderbedingungen für PV- und Windenergieanlagen in Baden-Württemberg“ und Maßnahme 7 „Bessere Beteiligung und Teilhabe von Kommunen und Anwohner*innen an EE-Anlagen“ relevant.

In den auf Baden-Württemberg skalierten Zielszenarien beläuft sich der Flächenbedarf für Windenergie- und PV-Freiflächenanlagen auf 1,8 % (Agora-Szenario-BW-2040), 2,1 % (UBA-Szenario-BW-2040) und 3,1 % (Ariadne-Szenario-BW-2040) der Landesfläche. Ausgehend von diesem Flächenbedarf und aufgrund der Tatsache, dass die Flächenplanung nicht zu knapp ausfallen sollte, weil nicht alle geplanten Flächen dann auch tatsächlich realisiert werden können, sollte auf

Landesebene das Klimaschutzgesetz Baden-Württemberg deshalb dahingehend novelliert werden, dass das Flächenziel auf mindestens 3 % angehoben wird. Darüber hinaus sollten durch die Landesregierung oder auf Ebene der **Regionalverbände** im Rahmen eines koordinierten Prozesses Teilflächenziele festgelegt und entsprechende Regionalpläne aufgestellt werden.

Im Rahmen der Genehmigungsverfahren für Windenergieanlagen und PV-Freiflächenanlagen müssen Daten für die naturschutzrechtliche Prüfung häufig anlagenspezifisch neu erhoben werden, was zeitintensiv ist. Durch den Aufbau eines entsprechenden Datenbestandes ließe sich an dieser Stelle des Genehmigungsverfahrens Zeit einsparen. Hier können auch die Naturschutzverbände einbezogen werden, die über viel Detailwissen zu den Naturschutzbelangen vor Ort verfügen.

Die Task Force zur Beschleunigung des Ausbaus der erneuerbaren Energien soll zudem hier in Baden-Württemberg entsprechende Maßnahmen einleiten⁵, wie zum Beispiel eine stärkere Digitalisierung des Verfahrens, die Einrichtung der Stabsstellen Energiewende bei den Regierungspräsidien und die Erstellung eines Verfahrensleitfadens. Mit den vorgesehenen Maßnahmen werden wesentliche Best Practice Empfehlungen umgesetzt, wie sie beispielsweise auf EU-Ebene formuliert worden sind⁶. Hilfreich wäre zudem auch, wenn die Rechtsgrundlage zum Zeitpunkt der Antragstellung beibehalten bliebe, so dass laufende Verfahren nicht wieder neu begonnen werden müssen (Zimmer et al. 2022).

Die wesentliche Herausforderung besteht nun darin, die Maßnahmen auch tatsächlich effektiv zu implementieren. Gleichzeitig ist sicherzustellen, dass die Anstrengungen und die implementierten Maßnahmen dauerhaft bestehen bleiben, um auch den mittel- und langfristig notwendigen Ausbau zu gewährleisten. Dafür ist auch eine ausreichende personelle Ausstattung der in den Genehmigungsprozess involvierten Behörden und Gerichte nötig. Wichtig ist in diesem Zusammenhang auch, den für den EE-Ausbau zuständigen Institutionen und Personen eine ausreichende politische Rückendeckung und Unterstützung zu geben.

Insbesondere bei den Förderbedingungen für PV-Anlagen gibt es nach wie vor Handlungsbedarf. Die Landesregierung sollte sich auf Bundesebene dafür einsetzen, dass der Degressionsmechanismus neu justiert wird. Dazu gehört eine Anpassung der Basisdegression an die Kostenentwicklung, da die Kosten für PV-Anlagen zuletzt eher gestiegen als gesunken sind und momentan eine hohe Inflationsrate besteht. Zudem sollte die Basisdegression für einen relativ großen Bereich bei einer Überschreitung des Zielwerts gelten. Bei einer Unterschreitung des Zielzubaues sollten die Vergütungssätze angemessen erhöht werden, um den Zubau wieder stärker anzureizen.

Beim Finanzierungsrahmen für Windenergieanlagen besteht generell weniger Handlungsbedarf. Aus baden-württembergischer Sicht verbessern die Anpassung des Referenzertragsmodells und die Einführung der Südquote die hiesige Wettbewerbssituation.

Eine prozedurale Beteiligung und finanzielle Teilhabe von Anwohner*innen sind Grundlage für akzeptable EE-Projekte, die von Bürger*innen als gerecht wahrgenommen werden. Ohne diese Beteiligungsformen ist es schwer, geeignete Flächen zu finden und die lokale Unterstützung der Bevölkerung zu erreichen. Eine prozedurale Beteiligung beginnt bereits bei der Standortfindung, so dass im Idealfall Konflikte an besonders relevanten Orten bereits im Vorfeld minimiert werden können. Eine direkte und indirekte finanzielle Teilhabe lässt Anwohner*innen oder Kommunen an den

⁵ <https://stm.baden-wuerttemberg.de/de/themen/task-force-energiewende/#c136902>

⁶ <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/0e9db9fa-d653-11ec-a95f-01aa75ed71a1/language-en>

Erträgen erneuerbarer Projekte teilhaben. Die Landesregierung sollte dafür ein Gesetz vorbereiten, welches Verteilungsgerechtigkeit zwischen Anlagenbetreibern, Anwohner*innen und Kommunen beim Ausbau erneuerbarer Energien durch eine verpflichtende finanzielle Teilhabe anstrebt. Zur Orientierung kommen dafür das *Gesetz zur Zahlung einer Sonderabgabe an Gemeinden im Umfeld von Windenergieanlagen* in Brandenburg und das *Gesetz über die Beteiligung von Bürgerinnen und Bürgern sowie Gemeinden an Windparks* in Mecklenburg-Vorpommern in Frage.

Baden-Württemberg ist in den untersuchten Zielszenarien ein Netto-Stromimporteur in der Größenordnung von 17 TWh/a (UBA-Szenario-BW-2040), 23 TWh/a (Agora-Szenario-BW-2040) und 29 TWh/a (Ariadne-Szenario-BW-2040) (vgl. Abschnitt 4.2.7). Darüber hinaus ist Baden-Württemberg auch Stromtransitland in Richtung Frankreich sowie Schweiz und Italien. Damit sind sowohl Baden-Württemberg als auch seine europäischen Nachbarn auf **ausreichend ausgebaute Stromnetze** angewiesen, um erneuerbare Energien (v.a. Windenergie) aus Norddeutschland nach Süddeutschland zu transportieren. Wichtig ist in diesem Kontext auch, dass der Ausbau der erneuerbaren Energien möglichst lastnah stattfindet und vor allem in Süddeutschland forciert wird, um das bestehende Nord-Süd-Gefälle zumindest abzuschwächen.

1.6.3 Gebäudewärmeversorgung

Im Handlungsfeld „Gebäudewärmeversorgung“ besteht die Schlüsselherausforderung darin, den Gebäudebestand in den kommenden 20 Jahren auf Klimaneutralität zu trimmen. Dabei geht es darum, durch Sanierungsaktivitäten den sektoralen Wärmeverbrauch deutlich zu reduzieren sowie die heute durch Erdgas und Heizöl dominierte Wärmeversorgung durch klimafreundliche Energieträger zu ersetzen. Die notwendigen Sanierungsaktivitäten umfassen vor allem den Wärmeschutz der Gebäudehülle sowie die Eindämmung der Lüftungswärmeverluste (z. B. durch moderne Lüftungstechnik) (vgl. Maßnahme 2 „Energetische Gebäudesanierung“). Im Bereich der Wärmeversorgung müssen die bestehenden, mit fossilen Brennstoffen betriebenen Heizungsanlagen durch einen Mix aus dezentralen EE-Anlagen und Nah- und Fernwärmeanschlüssen ersetzt werden. Die Nah- und Fernwärmeversorgung ist natürlich ebenfalls zügig zu dekarbonisieren. Neubauvorhaben sollten schon heute ohne fossile Brennstoffe auskommen und möglichst ressourcenschonend realisiert werden.

Die Instrumentierung des Handlungsfelds wird sehr stark durch Bundesinstrumente geprägt. In einigen Bereichen (z. B. bei den energetischen Mindestanforderungen für Neubau und Bestandssanierungen) sind die Regelungen sogar als abschließende Bundesregelungen formuliert, so dass die Länder gar keine Möglichkeit haben, strengere Vorgaben durchzusetzen. Dennoch können die Länder in einigen Bereichen durch eigene Instrumente sehr wirkmächtige Impulse setzen bzw. dafür sorgen, dass Bundesinstrumente (z. B. ordnungsrechtliche Vorgaben, Förderprogramme) auf Landesebene ihre volle Wirkung entfalten können.

Die **Kommunale Wärmeplanung** ist dabei ein Schlüsselinstrument. Die im Klimaschutzgesetz geregelten Konnexitätszahlungen reichen i. d. R. aus, die Erstellung eines ersten Wärmeplans extern zu vergeben. Sie reichen allerdings weder aus, innerhalb der Kommunen personelle Strukturen für die dauerhafte Verankerung dieser neuen Aufgabe aufzubauen noch Maßnahmen umzusetzen, die der materiellen Umsetzung der Wärmeplanung dienen. Eine Erhöhung der Zahlungen würde die Kommunen in die Lage versetzen, in den Verwaltungen die für die Umsetzung der Kommunalen Wärmeplanung notwendigen personellen Kapazitäten und Kompetenzen aufzubauen. Ferner sollte die Verpflichtung zum Einstieg in eine Kommunale Wärmeplanung nach und nach auf kleinere Kommunen ausgeweitet werden.

Verpflichtete Kommunen müssen ihre Wärmepläne dem zuständigen Regierungspräsidium vorlegen. Dieser Prüfauftrag sollte weiter konkretisiert werden. Ferner sollten Kommunen unterstützt werden, den möglichen Flächenbedarf zur Wärmeerzeugung und -speicherung (z. B. für Freiflächen-Solarkollektoranlagen, Großwärmespeicher, Zugang zu Gewässern bei Großwärmepumpen) planerisch zu sichern.

Die untersuchten Szenarien sehen Wärmepumpen und dekarbonisierte Wärmenetze als Schlüsseltechnologien der Wärmewende. Ein breiter Markthochlauf von Wärmepumpen wird dazu führen, dass die Gasnachfrage in einzelnen Verteilnetzsträngen nach und nach zurückgeht und Teile des Verteilnetzes überflüssig werden. Gleiches gilt in Gebieten, für die die Kommunale Wärmeplanung einen Ausbau der Nah- und Fernwärme oder eine Verdichtung der Anschlussraten in bestehenden Wärmenetzversorgungsgebieten als Vorzugsvariante vorsieht. Die (Teil-)Stilllegung der Gasverteilnetzinfrastruktur ist in Deutschland regulatorisches Neuland. Baden-Württemberg sollte hierfür einen Länderdialog initiieren, der darauf abzielt, den Regulierungsrahmen für die Gasverteilnetze an den Zielen der Wärmewende auszurichten. Dabei sollen bestehende Fehlanreize des heutigen Regulierungsrahmens (z. B. Anschlussverpflichtung im Energiewirtschaftsrecht, Konzessionsrecht, Berücksichtigung späterer Stilllegungskosten in den Netzentgelten) beseitigt und Regelungen ergänzt werden, den Ausstieg aus der Gasversorgung sozial abzufedern.

Wärmepumpen kommen derzeit hauptsächlich in Einfamilienhäusern zum Einsatz. Notwendig ist die gezielte Förderung von Demonstrationsprojekten im Bereich bisheriger Nischenanwendungen, z. B. im Rahmen eines eigens dafür aufgelegten Landesförderprogramms. Beispielsweise müssen Wärmepumpen zukünftig auch flächendeckend in Mehrfamilienhäusern installiert werden. Dies gilt insbesondere für Quartiere, in denen auch mittelfristig keine wärmenetzgestützte Wärmeversorgung möglich ist. Hier besteht die Herausforderung oftmals in der Erschließung der Wärmequelle. Wichtig sind beispielsweise auch Wärmepumpen-Lösungen für Gebäude mit Etagenheizungen. Hilfreich wäre auch die Einrichtung regionaler Kompetenzzentren, die als Informations-Hub und Vernetzungsportal dienen.

In den auf Baden-Württemberg skalierten klimaneutralen Zielszenarien kommt dem **Ausbau der Nah- und Fernwärmeversorgung** eine wichtige Rolle zu. Um die Nah- und Fernwärme klimaneutral zu erzeugen, müssen die heute noch dominierenden Energieträger Steinkohle und Erdgas vollständig ersetzt werden. Zukünftig setzt sich der Energieträgermix in der Nah- und Fernwärmeversorgung aus Müllverbrennung, Geothermie und Abwärme sowie aus Fluss-, See- und Abwasserwärmepumpen zusammen. Darüber hinaus ergänzen Solarthermieanlagen in Kombination mit einem saisonalen Wärmespeicher die Nah- und Fernwärmeversorgung. Nur zur Deckung der Spitzenlast im Winter bzw. bei einem unzureichenden Angebot an den zuvor genannten Energieträgern werden Biomasse, Wasserstoff und Elektroheizkessel eingesetzt.

Die finanzielle Förderung der Transformation der Wärmenetze soll zukünftig über die Bundesförderung effiziente Wärmenetze (BEW) erfolgen. Auf Landesebene gibt es noch ein eigenes Förderprogramm, dessen Zukunft allerdings offen ist.⁷ Ein Förderbaustein der BEW ist die Erstellung von Dekarbonisierungsfahrplänen für Wärmenetze. Dekarbonisierungsfahrpläne könnten auf eine rechtliche Grundlage gestellt werden. Beispielsweise verpflichtet das Hamburger Klimaschutzgesetz die Wärmenetzbetreiber, den zuständigen Behörden solche Pläne vorzulegen.

⁷ Verwaltungsvorschrift über die Förderung von energieeffizienten Wärmenetzen, Förderbaustein 3 verlängert bis 20.06.2023 (<https://um.baden-wuerttemberg.de/de/energie/informieren-beraten-foerdern/foerderprogramme/energieeffiziente-waermenetze/>)

Ein Ausbau der Nah- und Fernwärme erfordert ein starkes Vertrauen seitens der Verbraucher. Hierzu ist es notwendig, die Transparenz über Preise und Qualitäten zu erhöhen. Vergleichbar mit anderen europäischen Ländern sollte auch in Deutschland die Einführung einer Preisregulierung in Erwägung gezogen werden. Gleichzeitig müssen bestehende Netzanschlusschürden wie beispielsweise in der Wärmelieferverordnung (WärmeLV) behoben werden.

Bei den erneuerbaren Wärmeeinspeisern geht es um eine gezielte „Zuförderung“ ausgewählter Technologieoptionen (z. B. Flusswasser-Wärmepumpen, Geothermieeinbindung, saisonale Großwärmespeicher), bei der Erschließung tiefergeothermischer Wärme um eine Absicherung des Fündigkeitsrisikos. Hilfreich wäre auch eine landesweite Potenzialerhebung für die Tiefengeothermie.

Neben den erneuerbaren Wärmepotenzialen spielt auch industrielle Abwärme eine zentrale Rolle. Es bedarf größerer Anreize oder regulatorischer Vorgaben, um mehr Abwärme in die Nah- und Fernwärmenetze zu bekommen. Aus der Perspektive der Netzbetreiber geht es auf Ebene der Abwärmquellen zum einen um die Identifizierung geeigneter Abwärmeströme, zum anderen um eine Absicherung des energiewirtschaftlichen Risikos der Abwärmelieferung.

Für das Gelingen der Wärmewende ist auch der Aufbau komplett neuer Wärmenetze notwendig. Hilfreich wäre die finanzielle Unterstützung für die Neugründung von Genossenschaftsmodellen, um die Wärmewende auch institutionell auf eine möglichst breite gesellschaftliche Basis zu stellen.

2 Hintergrund und Zielstellung

Die Europäische Union hat sich das absolut notwendige, aber auch ambitionierte Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2050 eine klimaneutrale Wirtschafts- und Lebensweise zu erreichen. Deutschland hat als Zieljahr 2045 und Baden-Württemberg 2040 gesetzlich verankert. Die Landeshauptstadt Stuttgart hat im Juli 2022 das Jahr 2035 als neues Klimaneutralitätsziel (territoriale Energiebilanz) beschlossen.

Eine wesentliche Voraussetzung dafür ist der zügige Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung, da die direkte Elektrifizierung in den Sektoren Gebäude, Industrie und Mobilität einen entscheidenden Beitrag zu deren Dekarbonisierung leistet. Auch die Erzeugung von grünem Wasserstoff als weitere Schlüsselkomponente beruht auf erneuerbarer Stromerzeugung, so dass der Stromverbrauch zukünftig ansteigen wird.

Umso wichtiger ist deshalb auch, dass bisherige Stromanwendungen ihr Effizienzpotenzial möglichst vollständig ausschöpfen. Gleiches gilt für die Wärmeversorgung, wo neben der Dekarbonisierung der Wärmeerzeugung insbesondere der Reduzierung des Wärmebedarfs eine entscheidende Bedeutung zukommt. Neben Effizienzmaßnahmen sind dafür auch Suffizienzstrategien erforderlich, um den Energieverbrauch dauerhaft zu senken.

Die Transformation hin zu einer klimaneutralen Energieversorgung muss jedoch nicht nur in allen Sektoren stattfinden, auch alle Bundesländer und Regionen müssen einen angemessenen Beitrag zur Erreichung der nationalen Ziele leisten. Dabei gilt es, regionale Strukturmerkmale und geographische Besonderheiten zu berücksichtigen.

In den letzten Jahren sind zahlreiche Studien mit klimaneutralen Zielszenarien für Deutschland erschienen, die jeweils unterschiedliche Schwerpunkte bei den Dekarbonisierungsstrategien setzen und damit auch verschiedene Transformationspfade beschreiben. Die räumliche Auflösung beschränkt sich dabei überwiegend auf Deutschland, so dass eine regionale Konkretisierung und Veranschaulichung dieser Zielbilder bislang fehlen.

Die hier vorliegende Studie verfolgt daher das Ziel, verschiedene deutschlandweite klimaneutrale Zielszenarien auf Baden-Württemberg und seine zwölf Regionen zu konkretisieren. Die Studie fokussiert dabei auf die Bereiche „Stromversorgung“ und „Gebäudewärmeversorgung“. Der dann noch verbleibende nicht-elektrische Energiebedarf in den Sektoren Industrie und Verkehr (v.a. Wasserstoff und E-Fuels) wird in dieser Studie nicht behandelt.

Die Durchführung der Studie umfasst folgende Arbeitsschritte:

- Definition möglicher klimaneutraler Zielbilder für Deutschland und für Baden-Württemberg im Rahmen einer Literaturlauswertung.
- Regionalisierung der klimaneutralen Zielbilder auf die zwölf Regionen in Baden-Württemberg mit Hilfe spezifischer Verteilungsschlüssel. Die Ergebnisse der Regionalisierung werden mittels thematischer Karten veranschaulicht und über einen tabellarischen Datenanhang verfügbar gemacht.
- Ergänzende Modellierung für die klimaneutrale Nah- und Fernwärmeversorgung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs.

- Erstellung eines Katalogs mit den wichtigsten Maßnahmen auf dem Weg zur Zielerreichung für die Handlungsfelder „Reduktion des Energieverbrauchs“, „Stromversorgung“ und „Gebäudewärmeversorgung“.
- Regelmäßige Diskussion der (Zwischen-)Ergebnisse mit dem Projektbeirat.

Die (Zwischen-)Ergebnisse der Studie wurden regelmäßig mit dem Projektbeirat diskutiert. Der Beirat leistete wertvolle Beiträge und Anregungen, stellte richtungsweisende Fragen und brachte damit die Arbeiten an der Studie maßgeblich voran.

Die breitgefächerte Expertise des Beirats und die unterschiedlichen Perspektiven der Beiratsmitglieder bereicherten den Austausch zu der bestehenden Themenstellung und lieferten einen wichtigen Input zu den Ergebnissen der Studie.

Der Projektbeirat setzte sich aus den folgenden Personen zusammen (in alphabetischer Reihenfolge):

- Gudrun Heute-Bluhm, Geschäftsführendes Vorstandsmitglied, Städtetag Baden-Württemberg
- Torsten Höck, Geschäftsführender Vorstand, Verband für Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (VfEW)
- Prof. Dr.-Ing. Martina Hofmann, stellv. Vorsitzende des NABU-Landesverbandes Baden-Württemberg
- Dr.-Ing. Volker Kienzlen, Geschäftsführer, Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH
- Magdalena Magosch, Plattform Erneuerbare Energien
- Dr. Ulrich Maurer, Leiter Abteilung Energiewirtschaft, Umweltministerium Baden-Württemberg
- Dr. Sara Ortner, ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH
- Maike Schmidt, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg

Die Autorinnen und Autoren und der BUND Landesverband Baden-Württemberg danken den Mitgliedern des Beirats für die interessanten und konstruktiven Diskussionen und die kompetente Beratung. Die Verantwortung für die Inhalte der Studie liegt dessen ungeachtet allein bei den Autorinnen und Autoren der Studie.

3 Plausibilisierung eines klimaneutralen Zielbildes für Deutschland und für Baden-Württemberg

3.1 Übersicht zu bestehenden Studien auf nationaler Ebene

In den letzten Jahren sind zahlreiche Systemstudien auf nationaler Ebene veröffentlicht worden, die sich mit der Transformation Deutschlands in Richtung Klimaneutralität beschäftigen:

- Kopernikus Projekt Ariadne: „Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich“ (Luderer et al. 2021)
- Studie im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende: „Klimaneutrales Deutschland 2045“ (Prognos et al. 2021)
- Langfristszenarien 3 des BMWi: „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ (Consentec; Fraunhofer ISI; TU Berlin Fachgebiet E&R; ifeu 2021)
- Dena-Leitstudie „Aufbruch Klimaneutralität“ (Deutsche Energie-Agentur (dena) 2021)
- BDI-Studie „Klimapfade 2.0“ (Boston Consulting Group 2021)
- Studie des Fraunhofer ISE „Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem“ (Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme 2021)
- RESCUE-Studie des Umweltbundesamts „Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität“ (Umweltbundesamt 2021)

Alle Studien erreichen Klimaneutralität im Zeitraum 2045 bis 2050, setzen zur Zielerreichung jedoch in unterschiedlichem Maße auf Elektrifizierung, den Einsatz von Wasserstoff und E-Fuels, den Import von Energieträgern sowie auf Suffizienz und einen veränderten Lebensstil. Einige Studien bilden verschiedene Schwerpunktsetzungen auch mit Hilfe von Szenarien ab, zum Beispiel „Elektrifizierung“ versus „Wasserstoff“. Fünf der oben genannten Studien wurden zudem im Rahmen einer eigenen Meta-Studie bezüglich relevanter Parameter und Ergebnisse miteinander verglichen (Lübbers et al. 2022).

In einem Exkurs wurde zudem eine Literaturanalyse hinsichtlich des Strombedarfs für Wasserstoff aus der Elektrolyse und der Kohlenstoffabscheidung aus der Atmosphäre für deren stoffliche Nutzung durchgeführt (Abschnitt 7.1).

3.2 Auswahl geeigneter Zielszenarien für eine klimaneutrale Energieversorgung in Deutschland

3.2.1 Allgemeine Charakterisierung der Szenarien

Aus den vorliegenden Studien und Szenarien werden für die nachfolgende Skalierung auf Baden-Württemberg drei Szenarien für ein **klimaneutrales Zieljahr** ausgewählt:

- Projekt Ariadne, Szenario „Technologie-Mix“, Modell REMIND
- Agora-Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2045“

- UBA-Szenario „GreenSupreme“

Das **Ariadne-Szenario „Technologie-Mix“** erreicht Klimaneutralität bis zum Jahr 2045 und weist bezüglich der Technologie-Ausrichtung einen ausgewogenen Technologiemitmix auf und nutzt ein gemischtes Portfolio an Energieträgern für den Endenergieverbrauch an Strom, Wasserstoff und E-Fuels (Luderer et al. 2021, S. 2). Dabei werden alle wirtschaftlichen Potenziale zur direkten Elektrifizierung erschlossen (Lübbers et al. 2022, S. 9). Im Vergleich der drei ausgewählten Zielszenarien weist das Ariadne-Szenario „Technologie-Mix“ den höchsten Stromverbrauch auf (vgl. Abbildung 3-1 und Abbildung 3-4). Dieser wird überwiegend durch Windenergie an Land gedeckt, so dass im Gegenzug weniger Windenergie auf See ausgebaut werden muss (vgl. Abbildung 3-6).

Die Bevölkerungsentwicklung verläuft weitgehend konstant (im klimaneutralen Zieljahr 2045 leben 80 Millionen Menschen in Deutschland). Das Bruttoinlandsprodukt steigt von 2015 bis 2050 um rund 46 % an, was einem durchschnittlichen Anstieg von jährlich 1,1 % entspricht (Luderer et al. 2021, Auszug aus Kopernikus Datenbank).

Der Endenergieverbrauch geht von 2019 bis 2045 um rund 38 % zurück (dies entspricht einer durchschnittlichen jährlichen Reduktion von 1,8 %). Kohle, fossile Kraftstoffe, Heizöl und Erdgas werden nahezu vollständig durch Strom, Wasserstoff und E-Fuels substituiert. Strom wird zum dominierenden Endenergieträger und der Stromeinsatz steigt im gleichen Zeitraum um 90 % an (Abbildung 3-1). Die direkte Elektrifizierung und damit einhergehende Substitution von Verbrennungsprozessen ist dabei eine wesentliche Effizienzstrategie und maßgeblich für die Minderung der Endenergienachfrage verantwortlich. Das Thema Suffizienz wird lediglich in einzelnen Unterszenarien für den Gebäudesektor thematisiert (Luderer et al. 2021, S. 101) und wird in dem sektorübergreifenden Szenario „Technologie-Mix“ nicht explizit angesprochen.

Der Primärenergieverbrauch geht von 2019 bis 2045 um rund 55 % zurück (dies entspricht einer durchschnittlichen jährlichen Reduktion von 3,1 %). Kohle, Mineralöl, Erdgas und Kernenergie werden sowohl durch erneuerbaren Strom substituiert (Abbildung 3-2), als auch durch den Import von 150 TWh Wasserstoff und 140 TWh E-Fuels (siehe nächster Absatz). Der Primärenergieverbrauch an Biomasse steigt auf rund 420 TWh an und wird vor allem für die Erzeugung von Flüssigkraftstoffen verwendet (rund 360 TWh Biomasse für Flüssigkraftstoffe) (Luderer et al. 2021, Auszug aus Kopernikus Datenbank).

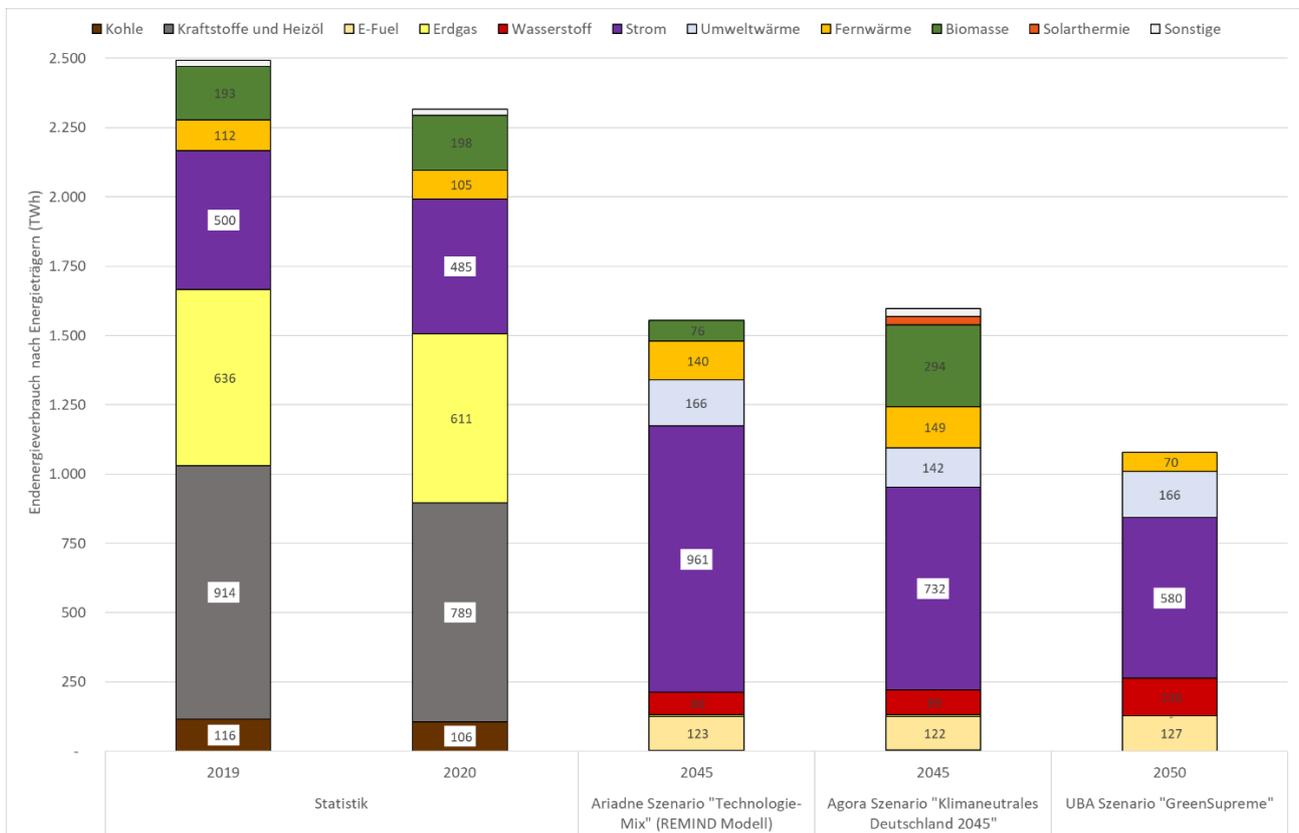
Darüber hinaus werden noch 210 TWh Wasserstoff verbraucht. Etwa 90 TWh werden für die Stromerzeugung und rund 40 TWh für die Erzeugung von E-Fuels eingesetzt. Weitere 80 TWh Wasserstoff werden als Endenergieträger, vor allem von der Industrie, nachgefragt. Etwa 60 TWh Wasserstoff werden in Deutschland produziert und 150 TWh Wasserstoff werden nach Deutschland importiert, so dass sich eine Importquote von etwa 70 % ergibt. Der Verbrauch an E-Fuels beläuft sich auf rund 180 TWh, der größtenteils nach Deutschland importiert wird (Luderer et al. 2021, Auszug aus Kopernikus Datenbank). Die Importquote für Wasserstoff und E-Fuels liegt zusammen genommen bei 73 % (Abbildung 3-3).

Auch das **Agora-Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2045“** erreicht Klimaneutralität bis zum Jahr 2045 und setzt auf eine starke Klimapolitik und einen beschleunigten Einsatz klimafreundlicher Technologien mit Fokus auf Wirtschaftlichkeit. Dabei werden Maßnahmen mit geringen CO₂-Vermeidungskosten bevorzugt und Investitionszyklen berücksichtigt. Verhaltensänderungen in Form von Konsumeinschränkungen werden explizit nicht unterstellt (Prognos et al. 2021, 1-2). Das Szenario erreicht als einziges der drei ausgewählten Szenarien das Ausbauziel der amtierenden Bundesregierung für Windenergie auf See (vgl. Abbildung 3-6).

Die Bevölkerungsentwicklung verläuft weitgehend konstant (im klimaneutralen Zieljahr 2045 leben 80 Millionen Menschen in Deutschland). Das Bruttoinlandsprodukt steigt von 2016 bis 2050 um etwa 58 % an, was einem durchschnittlichen Anstieg von jährlich 1,4 % entspricht (Prognos et al. 2021, S. 25)

Der Endenergieverbrauch geht von 2019 bis 2045 um 36 % zurück (dies entspricht einer durchschnittlichen jährlichen Reduktion von 1,7 %). Kohle, fossile Kraftstoffe, Heizöl und Erdgas werden nahezu vollständig durch Strom, Wasserstoff und E-Fuels substituiert. Strom wird zum dominierenden Endenergieträger und der Stromeinsatz steigt im gleichen Zeitraum um 46 % an (Abbildung 3-1). Im Gebäudesektor werden Effizienzverbesserungen vor allem bei Elektrogeräten und bei der Beleuchtung sowie durch den Ersatz von Nachtspeicherheizungen und Elektroboilern erzielt. Effizienzverbesserungen bei Querschnittstechnologien (z.B. Ventilatoren oder Pumpen) sind vor allem für die Sektoren Industrie und GHD relevant (Prognos et al. 2021, S. 29–31). Das Thema Suffizienz wird im Agora-Szenario weitestgehend ausgeklammert: im Bereich der Strom- und Wärmeversorgung werden Verhaltensänderung explizit nicht berücksichtigt und auch ein Nachfrage- und Produktionsrückgang von energieintensiven Gütern (z.B. bei Zement, Stahl und Kunststoffen) wird nicht betrachtet. Lediglich im Bereich Ernährung wird von einer steigenden Nachfrage nach pflanzlichen und synthetischen Ersatzprodukten für Fleisch und Milch ausgegangen (Prognos et al. 2021, S. 9–11).

Abbildung 3-1: Endenergieverbrauch in Deutschland nach Energieträgern in den Jahren 2019 und 2020 sowie in den drei ausgewählten Zielszenarien jeweils für das klimaneutrale Zieljahr

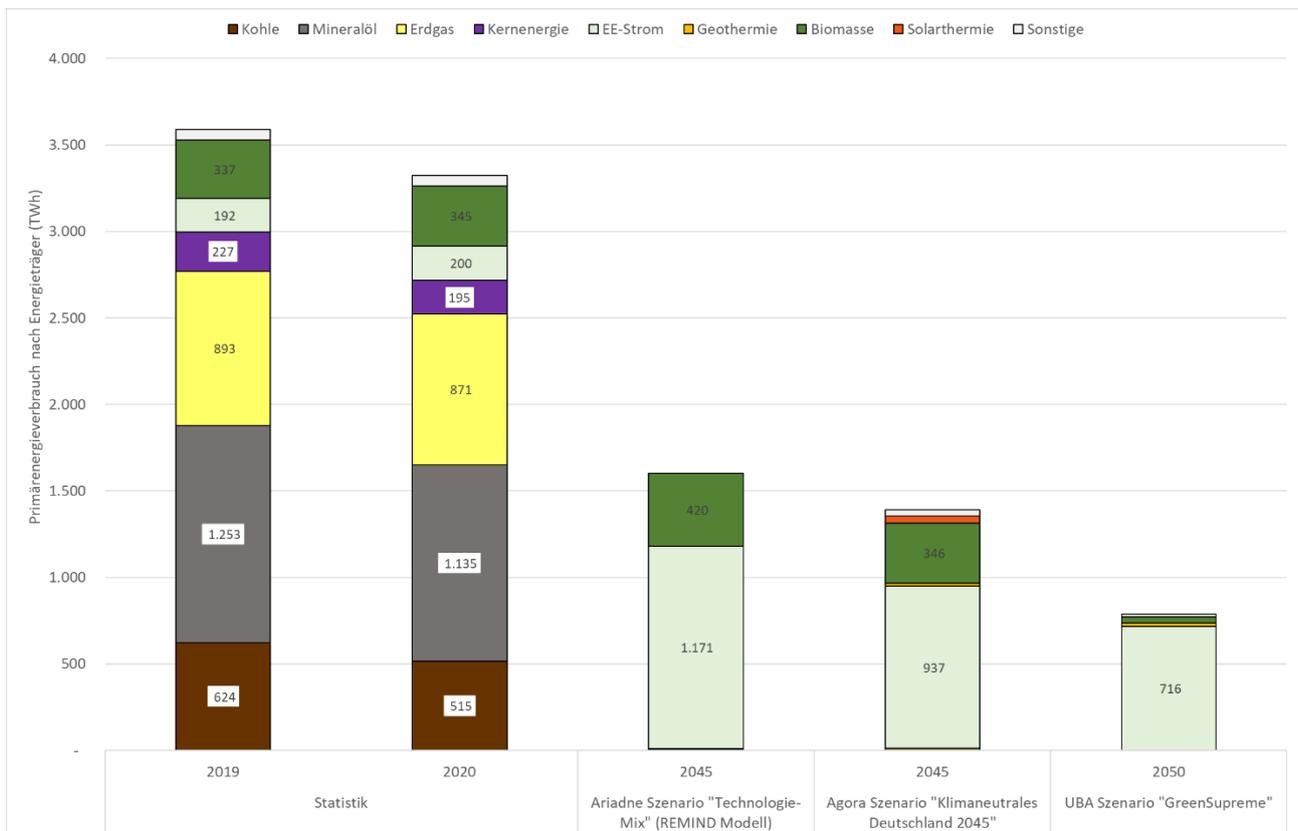


Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Darstellung), Daten aus Luderer et al. (2021), Prognos et al. (2021) Umweltbundesamt (2021) sowie BMWi Energiedaten 2021

Der Primärenergieverbrauch geht von 2019 bis 2045 um rund 61 % zurück (dies entspricht einer durchschnittlichen jährlichen Reduktion von 3,6 %). Kohle, Mineralöl, Erdgas und Kernenergie werden sowohl durch erneuerbaren Strom substituiert (Abbildung 3-2), als auch durch den Import von rund 170 TWh Wasserstoff und rund 160 TWh E-Fuels (siehe nächster Absatz). Der Primärenergieverbrauch an Biomasse bleibt mit rund 350 TWh auf heutigem Niveau und wird vor allem in der Industrie und in privaten Haushalten zur Wärmeerzeugung eingesetzt (Prognos et al. 2021, S. 95–98). Ein Großteil des Biomasseangebots ist feste Biomasse, vor allem aus Kurzumtriebsplantagen, Waldholz und Altholz.

Darüber hinaus werden noch 265 TWh Wasserstoff verbraucht. Etwa 150 TWh werden für die Stromerzeugung und rund 40 TWh für den Straßengüterverkehr eingesetzt. Weitere 75 TWh Wasserstoff werden als Endenergieträger, vor allem von der Industrie, nachgefragt. Etwa 95 TWh Wasserstoff werden in Deutschland produziert und 170 TWh Wasserstoff werden nach Deutschland importiert, so dass sich eine Importquote von etwa 65 % ergibt. Der Verbrauch an E-Fuels beläuft sich auf rund 160 TWh, der vollständig nach Deutschland importiert und überwiegend für den internationalen Luft- und Schiffsverkehr eingesetzt wird (Prognos et al. 2021, S. 105). Die Importquote für Wasserstoff und E-Fuels liegt zusammen genommen bei 77 % (Abbildung 3-3).

Abbildung 3-2: Primärenergieverbrauch in Deutschland in den Jahren 2019 und 2020 sowie in den drei ausgewählten Zielszenarien (jeweils für das klimaneutrale Zieljahr)



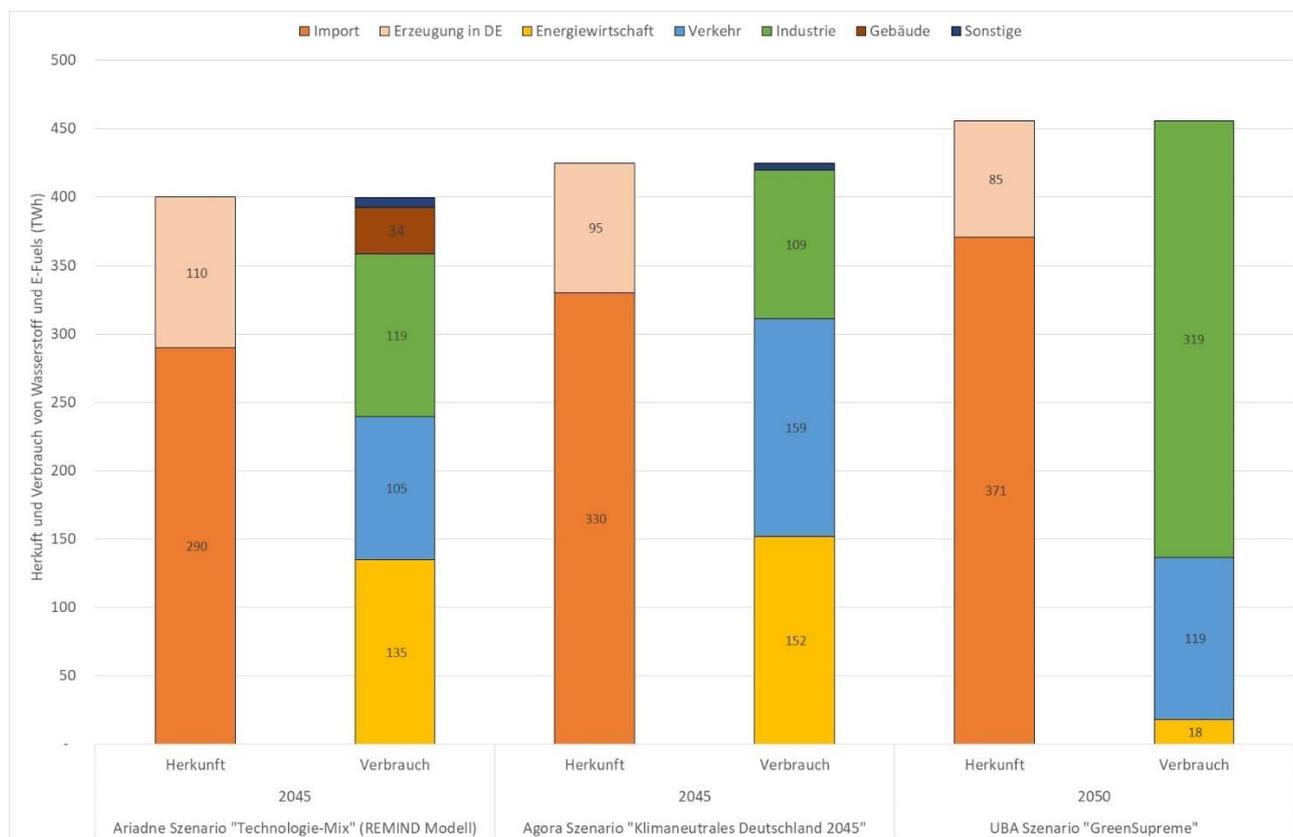
Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Darstellung), Daten aus Luderer et al. (2021), Prognos et al. (2021) und (Umweltbundesamt 2020) sowie BMWi Energiedaten 2021

Das **UBA-Szenario „GreenSupreme“** erreicht Klimaneutralität bis zum Jahr 2050 und fokussiert von den drei ausgewählten Szenarien am stärksten auf Suffizienz und Verhaltensänderungen. Das

Wirtschaftswachstum geht bis zum Jahr 2030 auf null zurück und verbleibt so bis zum Jahr 2050 („Wachstumsbefreiung“). Auch die Bevölkerungsentwicklung ist rückläufig und für das Jahr 2050 werden nur noch 72 Millionen Einwohner in Deutschland unterstellt. Eine weitere Besonderheit des UBA-Szenarios „GreenSupreme“ ist auch die Berücksichtigung der globalen Rohstoffversorgung: Ohne Suffizienzmaßnahmen lässt sich beispielsweise der weltweite Bedarf an Basis- und Technologiemetallen nicht decken, wenn auch für bislang weniger stark entwickelte Länder ein entsprechender Nachfrageanstieg unterstellt wird (Umweltbundesamt 2020, S. 45).

Entsprechend geht der Endenergieverbrauch von 2019 bis 2050 um rund 57 % zurück (dies entspricht einer durchschnittlichen jährlichen Reduktion von 2,7 %) (Abbildung 3-1). Kohle, fossile Kraftstoffe, Heizöl und Erdgas werden vollständig durch Strom, Wasserstoff und E-Fuels substituiert. Strom wird zum dominierenden Endenergeträger, der Stromeinsatz steigt im gleichen Zeitraum allerdings nur um 16 % an (Abbildung 3-1).

Abbildung 3-3: Herkunft von Wasserstoff und E-Fuels sowie deren Verbrauch in Deutschland in den drei ausgewählten Zielszenarien (jeweils für das klimaneutrale Zieljahr)



Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Darstellung), Daten aus Luderer et al. (2021), Prognos et al. (2021) und (Umweltbundesamt 2020)

Der Primärenergieverbrauch geht von 2019 bis 2045 um rund 78 % zurück (dies entspricht einer durchschnittlichen jährlichen Reduktion von 4,8 %). Kohle, Mineralöl, Erdgas und Kernenergie werden sowohl durch erneuerbaren Strom substituiert (Abbildung 3-2), als auch durch den Import von

rund 370 TWh E-Fuels⁸ (siehe nächster Absatz). Primärbiomasse wird ab 2030 ausschließlich stofflich genutzt. Für die energetische Nutzung stehen im Jahr 2050 nur noch biogene Abfälle in der Größenordnung von knapp 38 TWh zur Verfügung (v. a. Waldrestholz und Altholz) (Umweltbundesamt 2020, S. 46–47).

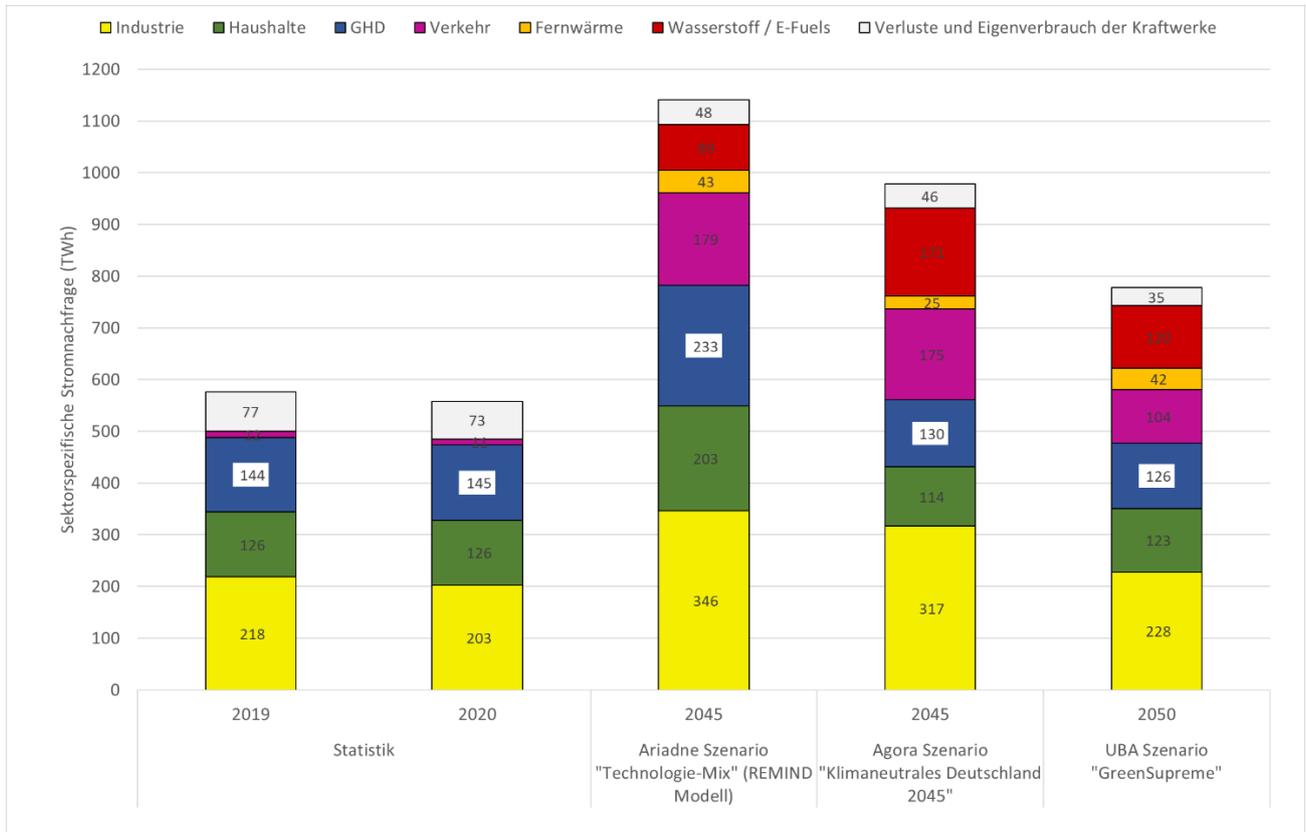
Der Verbrauch an E-Fuels beläuft sich auf rund 460 TWh, wobei mit etwa 290 TWh der Großteil von der Industrie als Rohstoffe nachgefragt wird. Etwa 100 TWh E-Fuels entfallen auf den Verkehrssektor. Die restlichen 70 TWh werden für die Erzeugung von Prozesswärme in der Industrie sowie für die Stromerzeugung eingesetzt. Etwa 85 TWh E-Fuels werden in Deutschland produziert und 370 TWh E-Fuels werden nach Deutschland importiert (Umweltbundesamt 2020, S. 93–94). Die Importquote für E-Fuels liegt bei 81 % (Abbildung 3-3).

3.2.2 Stromnachfrage und Stromerzeugung

Die Stromnachfrage nimmt in allen Zielszenarien im Vergleich zu 2019 deutlich zu (Abbildung 3-4). In den Verbrauchssektoren Industrie, Haushalte, GHD und Verkehr beeinflussen zwei gegenläufige Entwicklungen die Stromnachfrage: während Effizienz und Suffizienz die Stromnachfrage reduzieren, führt die zusätzliche Elektrifizierung (v.a. durch Wärmepumpen und Elektrofahrzeuge) zu einer Erhöhung der Stromnachfrage in diesen Sektoren. Als neue Verbrauchssektoren kommen zudem noch die elektrische Nah- und Fernwärmeerzeugung sowie die Elektrolyse von Wasserstoff und Synthese von E-Fuels hinzu.

⁸ Im UBA-Szenario werden sowohl gasförmige als auch flüssige strombasierte Kraftstoffe in einer gemeinsamen Position ausgewiesen („PtG/L“). Deshalb ist eine spezifische Ausweisung von Wasserstoff nicht möglich.

Abbildung 3-4: Stromverbrauch in Deutschland nach Sektoren in den Jahren 2019 und 2020 sowie in den drei ausgewählten Zielszenarien (jeweils für das klimaneutrale Zieljahr)

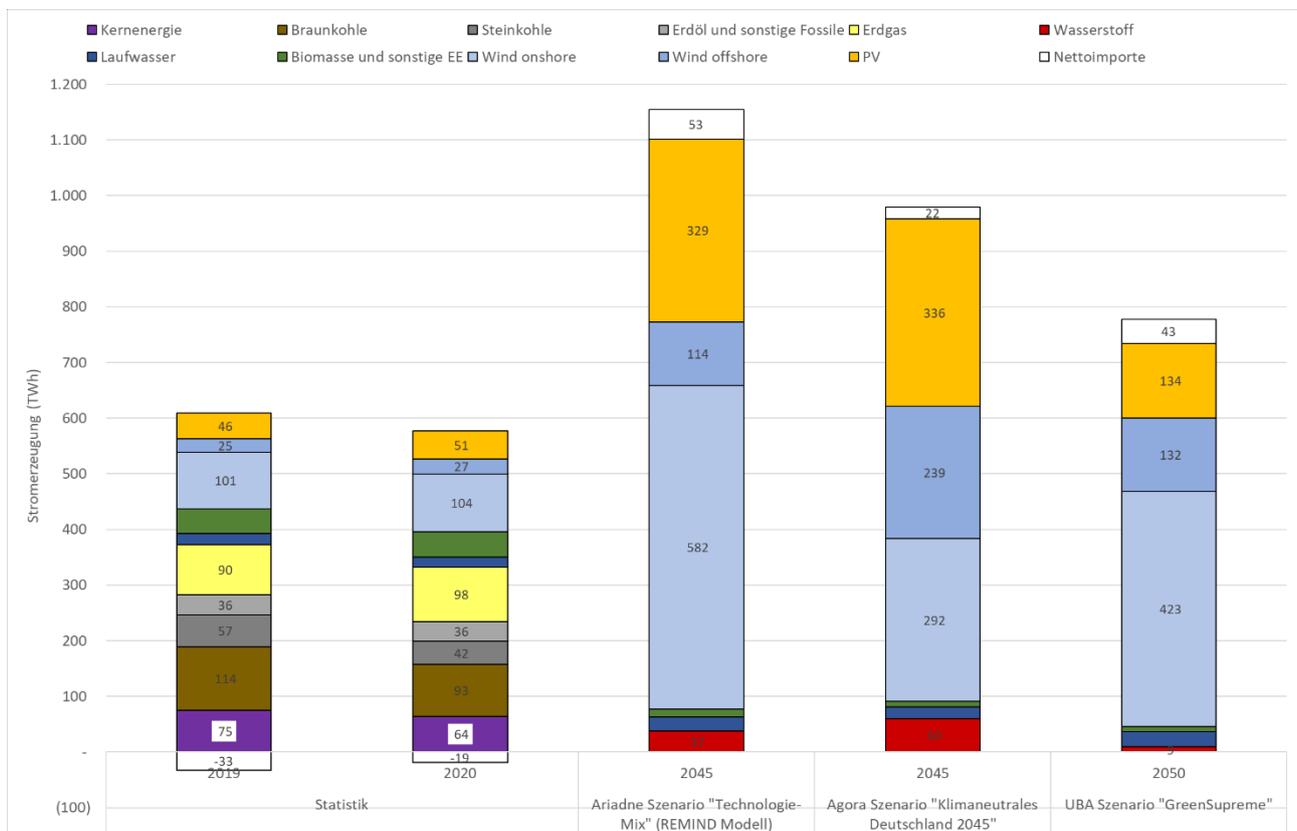


Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Darstellung), Daten aus Luderer et al. (2021), Prognos et al. (2021) und Umweltbundesamt (2021) sowie BMWi Energiedaten 2021

In Abbildung 3-5 wird deutlich, dass ein klimaneutrales Stromsystem in Deutschland im Wesentlichen auf den Energieträgern Wind offshore, Wind onshore und Photovoltaik beruht. Es fällt auf, dass das Ariadne-Szenario „Technologie-Mix“ und das Agora-Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2045“ in etwa gleich viel PV-Stromerzeugung aufweisen. Das UBA-Szenario „GreenSupreme“ beinhaltet hingegen vergleichsweise wenig Stromerzeugung aus Photovoltaik.

Beim Mix aus Wind onshore und Wind offshore setzt vor allem das Ariadne-Szenario „Technologie-Mix“ sehr stark auf Wind onshore (Verhältnis in etwa 5 : 1), während im Agora-Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2045“ das Verhältnis zwischen Wind onshore und Wind offshore nahezu ausgeglichen ist. Im UBA-Szenario „GreenSupreme“ dominiert ebenfalls Wind onshore den windinternen Energieträgermix (Verhältnis in etwa 3 : 1). Das Agora-Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2045“ und das UBA-Szenario „GreenSupreme“ weisen beide annähernd rund 550 TWh Windstromerzeugung auf.

Abbildung 3-5: Energieträgerspezifische Stromerzeugung in Deutschland in den Jahren 2019 und 2020 sowie in den drei ausgewählten Zielszenarien (jeweils für das klimaneutrale Zieljahr)



Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Darstellung), Daten aus Luderer et al. (2021), Prognos et al. (2021) und Umweltbundesamt (2021) sowie BMWi Energiedaten 2021

Biomasse und Laufwasser spielen in allen drei klimaneutralen Zielszenarien nur noch eine untergeordnete Rolle im Energieträgermix für die Stromerzeugung. Die Stromerzeugung aus Wasserstoff beläuft sich auf 9 TWh (UBA-Szenario „GreenSupreme“), 37 TWh (Ariadne-Szenario „Technologie-Mix“) und 60 TWh (Agora-Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2045“).

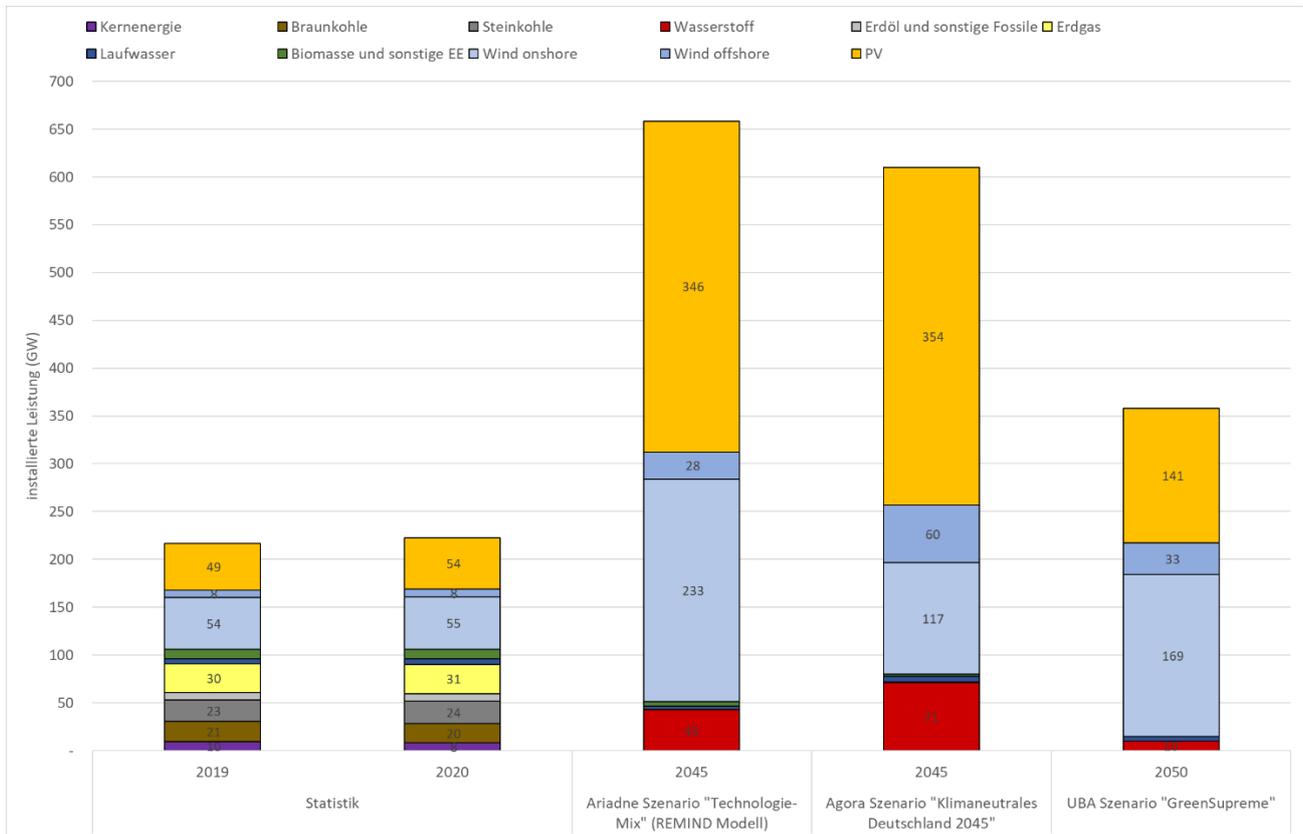
Alle drei klimaneutralen Zielszenarien weisen in der Jahresbilanz Nettostromimporte auf. Im Ariadne-Szenario „Technologie-Mix“ liegen sie bei 53 TWh (ca. 5 % der Bruttostromnachfrage), im Agora-Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2045“ bei 22 TWh (ca. 2 % der Bruttostromnachfrage) und im UBA-Szenario „GreenSupreme“ bei 43 TWh (ca. 6 % der Bruttostromnachfrage).

Die ausgewählten Zielszenarien unterstellen für die dominierenden Energieträger Wind onshore, Wind offshore und PV jedoch zum Teil deutlich abweichende mittlere Volllaststunden⁹. Um diesen verzerrenden Effekt auszuschließen, wird die installierte Kapazität zur Stromerzeugung nicht direkt aus den Studien übernommen, sondern mit Hilfe einheitlicher Volllaststunden aus der in den Studien ausgewiesenen energieträgerspezifischen Stromerzeugung abgeleitet. Als Volllaststunden werden dafür 4.000 h für Wind offshore, 2.500 h für Wind onshore und 950 h für Photovoltaik verwendet. Im

⁹ Wind offshore: 3.400 h – 4.200 h, Wind onshore: 2.000 h – 3.300 h, Photovoltaik: 880 h – 1.030 h

Ergebnis zeigen sich in Abbildung 3-6 die abgeleiteten installierten Kapazitäten zur Stromerzeugung.

Abbildung 3-6: Installierte Kapazitäten zur Stromerzeugung in Deutschland nach Energieträgern in den Jahren 2019 und 2020 sowie in den drei ausgewählten Zielszenarien (jeweils für das klimaneutrale Zieljahr)



Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Darstellung), Daten aus Luderer et al. (2021), Prognos et al. (2021) und Umweltbundesamt (2021) sowie BMWi Energiedaten 2021. Die Kapazitäten für Wind und PV wurden für die Zielszenarien mit Hilfe einheitlicher Volllaststunden aus der energieträgerspezifischen Stromerzeugung abgeleitet.

3.2.3 Nachfrage und Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser

Im Vergleich zu 2019 geht die Gebäudewärmeerzeugung um rund ein Drittel bis zwei Drittel zurück (Abbildung 3-7). Zum einen werden effizientere Technologien zur Wärmeerzeugung eingesetzt, zum anderen sinkt der Wärmebedarf vor allem durch einen besseren energetischen Zustand der Gebäude aufgrund von Sanierungen.

Von den ausgewählten Szenarien weist das **Ariadne-Szenario**¹⁰ im Zielerreichungsjahr mit rund 510 TWh den höchsten Gebäudewärmebedarf auf. Im Vergleich zu 2019 ergibt sich eine Reduktion des Gebäudewärmebedarfs von 28 %. Die Gebäudewärme wird überwiegend elektrisch erzeugt, Biomasse wird nur in geringem Umfang zur Gebäudewärmeerzeugung eingesetzt. Im Ariadne-Szenario werden zudem auch synthetische Energieträger zur dezentralen Erzeugung von

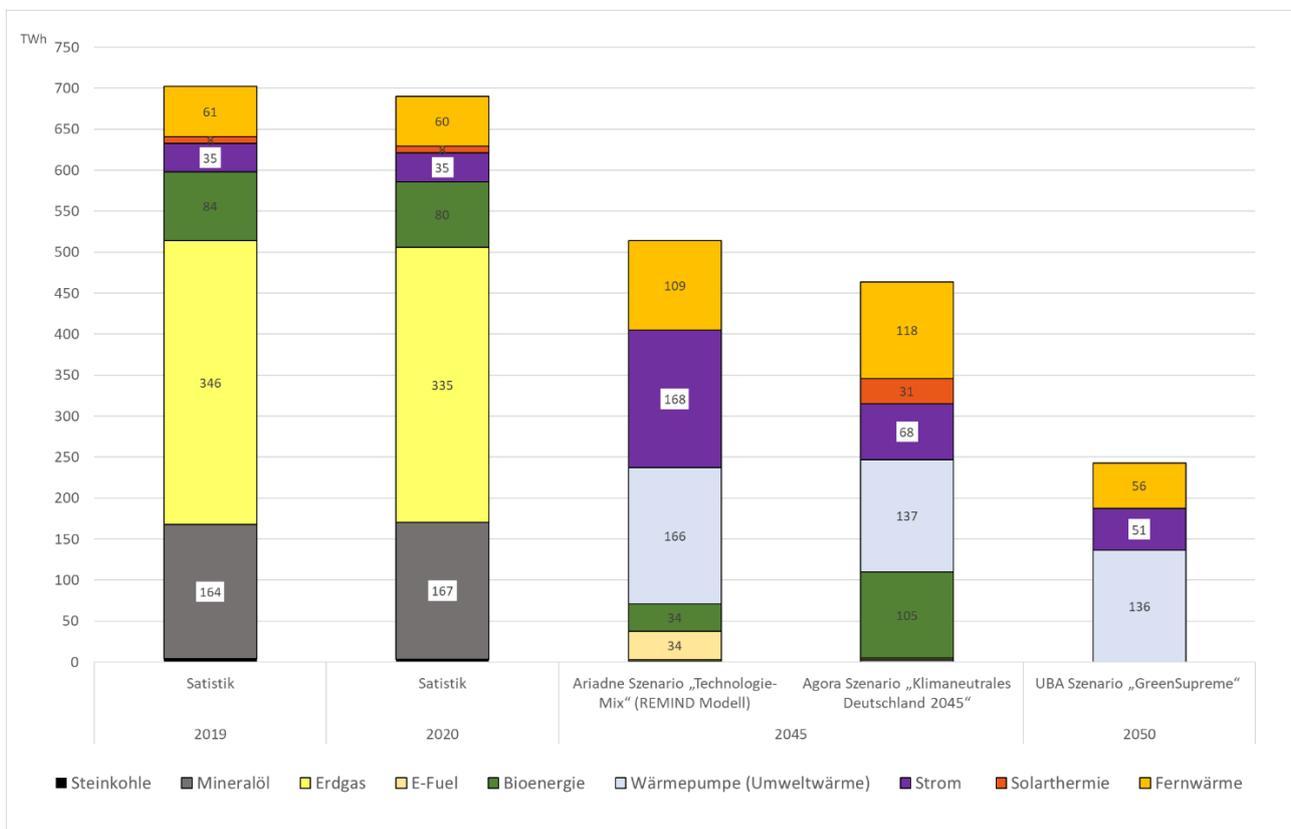
¹⁰ Das Leitmodell für den Gebäudesektor im Ariadne Projekt ist das REMOD-Modell des Fraunhofer ISE. Um Konsistenz zwischen allen Parametern zu gewährleisten, haben wir auch für den Gebäudesektor die Ergebnisse aus dem REMIND-Modell des Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) verwendet, welches das Leitmodell für das Energiesystem ist.

Raumwärme und Warmwasser in Heizungen eingesetzt. Die Position Umweltwärme wird in dem veröffentlichten Datensatz zum Ariadne-Szenario nicht explizit ausgewiesen, sodass diese in Rücksprache mit dem PIK nachträglich ergänzt wurde.

Der gesamte Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser liegt im **Agora-Szenario** bei etwa 460 TWh, was einem Rückgang von 35 % im Vergleich zu 2019 entspricht. Die Gebäudewärme wird vor allem von Wärmepumpen und Nah- und Fernwärme, gefolgt von Biomasse und Solarthermie gedeckt.

Im **UBA-Szenario** wird aufgrund der Annahmen bezüglich Effizienz und Suffizienz der kleinste Wärmebedarf im Zieljahr erreicht und es ergibt sich im Vergleich zu 2019 eine Reduktion des Gebäudewärmebedarfs von 66 %. Die Wärme wird ausschließlich mit dezentralen Wärmepumpen und durch Nah- und Fernwärme bereitgestellt.

Abbildung 3-7: Gebäudewärmeerzeugung in Deutschland nach Energieträgern in den Jahren 2019 und 2020 sowie in den drei ausgewählten Zielszenarien (jeweils für das klimaneutrale Zieljahr)



Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Darstellung), Daten aus Luderer et al. (2021), Prognos et al. (2021) und Umweltbundesamt (2021) sowie BMWi Energiedaten 2021

In einem Exkurs wurden zudem unterschiedliche Konzepte für die Wärmeerzeugung und ihre Auswirkungen auf die Endverbraucherpreise analysiert (Abschnitt 7.2).

3.3 Skalierung der klimaneutralen Zielszenarien auf Baden-Württemberg

3.3.1 Anpassung des Zieljahres und weitere Verwendung der Szenario-Namen

Da Baden-Württemberg bereits im Jahr 2040 Klimaneutralität erreichen möchte, werden für die Skalierung auf Baden-Württemberg jeweils die klimaneutralen Zieljahre 2045 (Ariadne-Szenario „Technologie-Mix“ und Agora-Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2045“) bzw. 2050 (UBA-Szenario „GreenSupreme“) ausgewählt. Dies bedeutet, dass sich die Transformationsgeschwindigkeit im Vergleich zu den Deutschlandszenarien erhöht.

Für die Reduktion des Endenergieverbrauchs ergibt sich nach der Beschleunigung eine durchschnittliche Minderung von 1,7 %/a (Agora-Szenario), 2,1 %/a (Ariadne-Szenario) und 2,7 %/a (UBA-Szenario). Der durchschnittliche Rückgang des Verbrauchs an Gebäudewärme beläuft sich auf 1,7 %/a (Agora-Szenario), 2,5 %/a (Ariadne-Szenario) und 3,1 %/a (UBA-Szenario). Der mittlere jährliche Anstieg des Stromverbrauchs beträgt 4,7 %/a (Ariadne-Szenario), 3,3 %/a (Agora-Szenario) und 1,7 %/a (UBA-Szenario).

Um einerseits deutlich zu machen, dass es sich nun um adaptierte Zielszenarien handelt, aber auch um eine bessere Lesbarkeit der Studie zu erreichen, werden im weiteren Verlauf die Kurznamen „Ariadne-Szenario-BW-2040“, „Agora-Szenario-BW-2040“ und „UBA-Szenario-BW-2040“ verwendet.

3.3.2 Regionale Verteilschlüssel

Die einzelnen Parameter aus den drei ausgewählten Zielszenarien für Deutschland werden mit Hilfe spezifischer Verteilschlüssel auf Baden-Württemberg skaliert. Die verwendeten Verteilschlüssel hinsichtlich des Stromverbrauchs sind in Tabelle 3-1 dargestellt.

Tabelle 3-1: Verteilschlüssel für die Skalierung der Zielszenarien von Deutschland auf Baden-Württemberg hinsichtlich des Stromverbrauchs

Parameter / Position	Art des Verteilschlüssels	Ermittelter Anteil für Baden-Württemberg	Quelle
Industrie	Sektorspezifischer Stromverbrauch 2019	12,0 %	Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2021); AG Energiebilanzen (2022)
GHD		13,0 %	
Haushalte		13,4 %	
Elektromobilität	Fahrzeugbestand 2021	14,1 %	Kraftfahrt-Bundesamt (2021)
Nah- und Fernwärme	AGFW Hauptbericht 2020: Wärmenetzeinspeisung	14,0 %	AGFW (2021)
Wasserstoffelektrolyse	Onsite Elektrolyseure nach NEP	6,0 %	50 Hertz; Amprion; TenneT; TransnetBW (2022)

Quelle: Zusammenstellung durch Öko-Institut e.V., Einzelnachweise in Spalte „Quelle“

Die verwendeten Verteilschlüssel im Bereich der Gebäudewärmeversorgung zeigt Tabelle 3-2.

Tabelle 3-2: Verteilschlüssel für die Skalierung der Zielszenarien von Deutschland auf Baden-Württemberg im Bereich der Gebäudewärmeversorgung

Parameter / Position	Art des Verteilschlüssels	Ermittelter Anteil für Baden-Württemberg	Quelle
Wärmeverbrauch für Gebäude			
GHD (Raumwärme und Warmwasser)			
Haushalte (Raumwärme und Warmwasser)	Einwohner*innen	13,3 %	Destatis (2021)
Wärmeerzeugung für Gebäude			
Nah- und Fernwärme	szenarioabhängig	14,5 % – 15,9 %	Eigene Modellergebnisse
Biomasse	Bundeslandspezifischer Anteil 2019	16,9 %	Kelm et al. 2020
Solarthermie		20,3 %	
E-Fuel	Bundeslandspezifischer Anteil für Mineralöl 2019	17,8 %	Statistisches Landesamt Baden-Württemberg
Strom und Umweltwärme	szenarioabhängig	8,8 % - 12,7 %	Schließt die Differenz zwischen Bedarf und EE-Erzeugung

Quelle: Zusammenstellung durch Öko-Institut e.V., Einzelnachweise in Spalte „Quelle“

Die verwendeten Verteilschlüssel im Bereich der Stromerzeugungskapazitäten sind in Tabelle 3-3 dargestellt. Für Photovoltaik werden jeweils spezifische Verteilschlüssel PV-Dachanlagen, PV-Freiflächenanlagen, Agri-PV auf Sonderkulturen, Agri-PV auf Grünland und PV-Parkplatzüberdachungen berücksichtigt. Die PV-interne Aufteilung der in den Deutschlandszenarien ausgewiesenen Gesamtleistung für Photovoltaik erfolgt dabei folgendermaßen: 55 % PV-Dachanlagen, 35 % PV-Freiflächenanlagen, 5 % Agri-PV auf Sonderkulturen, 2,5 % Agri-PV auf Grünland und 2,5 % PV-Parkplatzüberdachungen.

Tabelle 3-3: Verteilschlüssel für die Skalierung der Zielszenarien von Deutschland auf Baden-Württemberg hinsichtlich der Stromerzeugungskapazitäten

Parameter / Position	Art des Verteilschlüssels	Ermittelter Anteil für Baden-Württemberg	Quelle
Wind	NEP Potenzialanalyse für 2 % Flächenziel ¹¹	9,3 %	50 Hertz; Amprion; TenneT; TransnetBW (2022, S. 72)
PV-Dachanlagen	NEP Potenzialanalyse	12,0 %	50 Hertz; Amprion; TenneT; TransnetBW (2022, S. 72)
PV-Freiflächenanlagen	NEP Potenzialanalyse ¹²	11,0 %	50 Hertz; Amprion; TenneT; TransnetBW (2022, S. 72)
Agri-PV (Sonderkulturen)	Fläche für Beeren, Kernobst, Steinobst und Gemüse 2020	16,5 %	Statistisches Bundesamt ¹³ und Statistisches Landesamt ¹⁴
Agri-PV (Grünland)	Fläche für Grünland 2020	11,2 %	Umweltbundesamt ¹⁵ und Statistisches Landesamt ¹⁶
PV-Parkplatzüberdachungen	Siedlungs- und Verkehrsfläche 2019	10,1 %	Umweltbundesamt ¹⁷
Biomasse	Bundeslandspezifische Leistung nach NEP	10,0 %	50 Hertz; Amprion; TenneT; TransnetBW (2022, S. 72)
Laufwasser	Bundeslandspezifische Leistung nach NEP	23,1 %	50 Hertz; Amprion; TenneT; TransnetBW (2022, S. 72)
Wasserstofffähige Kraftwerke	Gas- Kraftwerkspark nach NEP	10,0 %	50 Hertz; Amprion; TenneT; TransnetBW (2022, S. 72)

Quelle: Zusammenstellung durch Öko-Institut e.V., Einzelnachweise in Spalte „Quelle“

¹¹ 2 % der Landesfläche. Die Umrechnung in Leistung erfolgt anhand spezifischer Flächenbedarfe für Windenergie je Bundesland.

¹² Relative Verteilung nach Fläche mit Gewichtungsfaktor

¹³ <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Obst-Gemuese-Gartenbau/Tabellen/baumobstanbau-bundeslaender.html>, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Obst-Gemuese-Gartenbau/Tabellen/betriebe-anbau-erntemenge-gemuese.html>, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Obst-Gemuese-Gartenbau/Tabellen/strauch-beerenanbau.html>

¹⁴ <https://www.statistik-bw.de/Landwirtschaft/Ernte/Beeren.jsp>, <https://www.statistik-bw.de/Landwirtschaft/Ernte/Gemueseernte-LR.jsp>,

¹⁵ <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-gruenlandflaeche#die-wichtigsten-fakten>

¹⁶ <https://www.statistik-bw.de/Landwirtschaft/Bodennutzung/LF-NutzngKultFrucht.jsp>

¹⁷ <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/flaeche/struktur-der-flaechen-nutzung>

3.3.3 Stromnachfrage

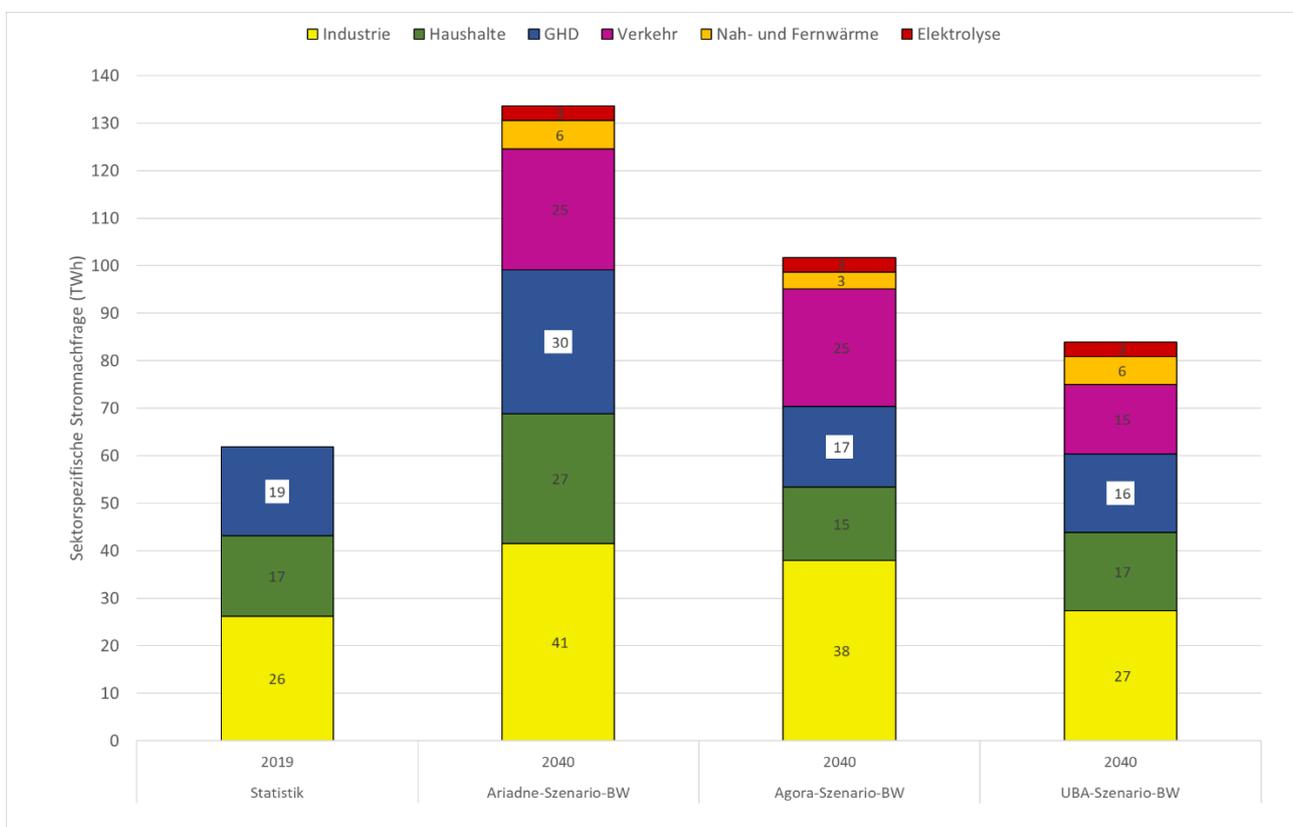
Nach Skalierung auf Baden-Württemberg ergibt sich ein Strombedarf für das klimaneutrale Zieljahr 2040 in Höhe von 88 TWh bis 136 TWh (Abbildung 3-8). Im Vergleich zum Jahr 2019 erhöht sich der Stromverbrauch in Baden-Württemberg um rund 40 % im UBA-Szenario-BW-2040, um rund 70 % im Agora-Szenario-BW-2040 sowie um rund 115 % im Ariadne-Szenario-BW-2040.

Aktuelle Studien mit direktem Fokus auf Baden-Württemberg gehen für das Jahr 2040 von einem Stromverbrauch in Höhe von 92 TWh (Nitsch und Magosch 2021, S. 7) bzw. 102 TWh (Kelm et al. 2022, S. 84) aus. Im Netzentwicklungsplan Strom 2035 wird im Szenario C 2037 ein Stromverbrauch von 107 TWh und im Szenario B/C 2045 von 119 TWh ausgewiesen (50 Hertz; Amprion; TenneT; TransnetBW 2022, S. 32, 45 und 50). In der Studie „Stromnetz 2050“ wird für das Jahr 2050 ein Stromverbrauch von 108 TWh unterstellt (Lotze et al. 2020, S. 28).

Für den Sektor Industrie weist die Studie des VfEW einen Stromverbrauch bis zum Jahr 2045 in der Größenordnung von 35 TWh im Maßnahmenkombinationsszenario und von bis zu 45 TWh im Szenario mit umfassender Elektrifizierung aus (Perner et al. 2021, S. 9).

Im Vergleich zu den zitierten Studien mit direktem Fokus auf Baden-Württemberg bildet das Ariadne-Szenario-BW-2040 den oberen Rand des Stromverbrauchs ab (vor allem wegen der starken Elektrifizierung) und das UBA-Szenario-BW-2040 den unteren Rand (aufgrund des dort gesetzten Fokus auf Suffizienz).

Abbildung 3-8: Sektorspezifische Stromnachfrage in Baden-Württemberg im Jahr 2019 sowie im klimaneutralen Zieljahr 2040



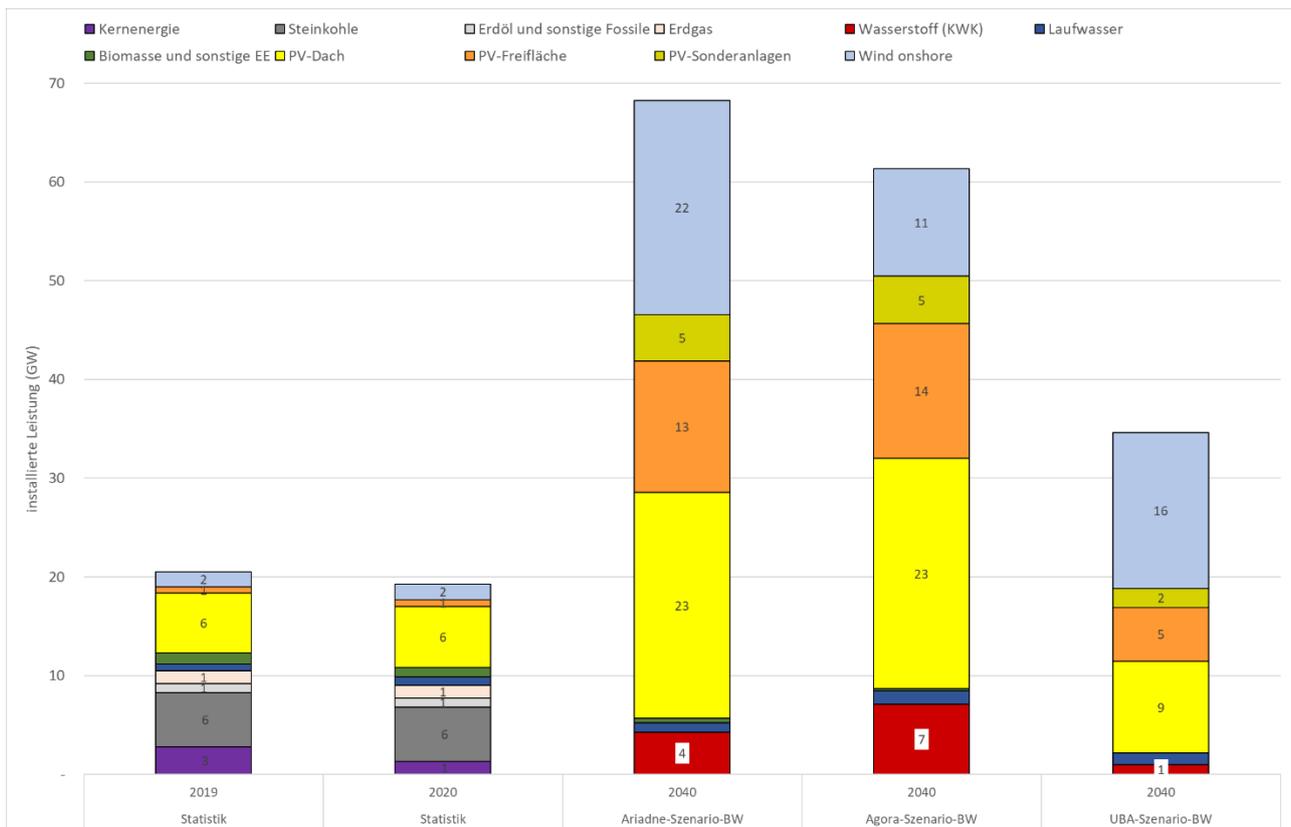
Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

3.3.4 Stromerzeugungskapazitäten

Die aus der Skalierung der Szenarien auf Baden-Württemberg resultierenden energieträgerspezifischen Stromerzeugungskapazitäten zeigt Abbildung 3-9. Es wird deutlich, dass zukünftig Wind und Photovoltaik die mit Abstand größten Erzeugungskapazitäten aufweisen werden und dass sich die Stromerzeugungskapazitäten in Baden-Württemberg im Vergleich zum Istzustand deutlich erhöhen müssen.

Der Bedarf an installierter Erzeugungsleistung hängt dabei auch stark von den erzielten Stromeinsparungen ab: je geringer die zu deckende Stromnachfrage in Baden-Württemberg ist, desto kleiner fällt der Zubaubedarf für Wind und PV aus – und desto wahrscheinlicher wird es auch, den erforderlichen Ausbaubedarf zu erreichen. Dies verdeutlicht, wie wichtig es ist, dass die Themen Suffizienz und Effizienz politisch adressiert werden. Darüber hinaus besteht auch eine Wechselwirkung zum Stromimportbedarf, der ebenfalls von der Höhe des regionalen EE-Ausbaus und der Entwicklung der Stromnachfrage abhängt.

Abbildung 3-9: Energieträgerspezifische Stromerzeugungskapazitäten für Baden-Württemberg in den Jahren 2019 und 2020 sowie im klimaneutralen Zieljahr 2040



Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

Windenergie

Die auf Baden-Württemberg skalierte elektrische Leistung beträgt für Windenergie 11 GW im Agora-Szenario-BW, 16 GW im UBA-Szenario-BW und 22 GW im Ariadne-Szenario-BW.

Bisher wurden in Baden-Württemberg nur wenig Windenergieanlagen gebaut: Baden-Württemberg startet mit einem Anlagenbestand von knapp 2 GW (750 Windenergieanlagen). Um das Ausbauziel bis 2040 zu erreichen, ist szenarioabhängig ein jährlicher durchschnittlicher Nettozubau zwischen 0,5 und 1 GW erforderlich. Das bisherige Maximum beim Windenergieausbau wurde im Jahr 2017 mit rund 400 MW realisiert (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2021, S. 17).

Im Vergleich zu anderen aktuellen Studien mit Fokus auf Baden-Württemberg liegt die installierte Leistung für Windenergie in den skalierten Zielszenarien eher im hohen (UBA-Szenario-BW) bis sehr hohen (Ariadne-Szenario-BW) Bereich. Die PEE-Studie und die Studie „Sektorziele 2030 und klimaneutrales Baden-Württemberg 2040“ entsprechen mit 11 GW (Nitsch und Magosch 2021, S. 7) und 12 GW (Kelm et al. 2022, S. 43) dem Agora-Szenario-BW. Die TransnetBW Studie „Stromnetz 2050“ und der Szenariorahmen zum NEP Strom 2037 weisen mit 5 GW (Lotze et al. 2020, S. 28) bzw. 5 GW bis 7 GW (50 Hertz; Amprion; TenneT; TransnetBW 2022, S. 32, 45 und 50) deutlich geringere Kapazitäten für Windenergie in Baden-Württemberg aus. Vor diesem Hintergrund kann das Ariadne-Szenario-BW als ein Extremszenario für Windenergie an Land eingeordnet werden.

Der Flächenbedarf für Windenergieanlagen beläuft sich im Agora-Szenario auf 1,4 % der Landesfläche, im UBA-Szenario auf 2,0 % und im Ariadne-Szenario auf 2,7 % der Landesfläche. Für die Berechnung der benötigten Landesfläche wurde ein spezifischer Flächenbedarf von 4,5 ha/MW unterstellt (18 Hektar pro Windenergieanlage bei einer mittleren Anlagenleistung von 4 Megawatt). Der benötigte Flächenbedarf liegt dabei unterhalb der in Abschnitt 4.1.3 ermittelten Flächenpotenziale in Höhe von 3,3 % der Landesfläche. Das Windenergieflächenbedarfsgesetz¹⁸ (WindBG) weist für Baden-Württemberg einen Flächenbeitragswert von 1,8 % aus, der bis zum 31.12.2032 für Windenergieanlagen auszuweisen ist. Dabei handelt es sich um einen Mindestwert für das Jahr 2032 auf dem Transformationspfad in Richtung Klimaneutralität. Auf 1,8 % der Landesfläche ließen sich mit dem o.g. spezifischen Flächenbedarf rund 14 GW Windenergie installieren.

Photovoltaik

Die auf Baden-Württemberg skalierte elektrische Leistung liegt für Photovoltaik zwischen 17 GW (UBA-Szenario-BW) und 41 GW (Ariadne-Szenario-BW) bzw. 42 GW (Agora-Szenario-BW).

Ende 2020 waren in Baden-Württemberg Photovoltaikanlagen mit einer installierten Leistung von 6,9 GW in Betrieb, der überwiegende Teil davon sind PV-Dachanlagen mit 6,3 GW (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2021, S. 17). Trotz der im Bundesvergleich sehr guten solaren Einstrahlung sind in Baden-Württemberg bislang vergleichsweise wenig PV-Freiflächenanlagen errichtet worden (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2019, S. 8). Ende 2020 waren in Baden-Württemberg rund 0,6 GW PV-Freiflächenanlagen auf einer Fläche von rund 1.100 ha installiert (Ministerium für Umwelt, Klima und

¹⁸ https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Gesetz/entwurf-eines-gesetzes-zur-erhoehung-und-beschleunigung-ausbaus-windenergieanlagen-an-land.pdf?__blob=publicationFile&v=12

Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2021, S. 17). Auf 0,2 % der Landesfläche¹⁹ ließen sich bei einem spezifischen Flächenbedarf von 1 ha/MW rund 7,1 GW PV-Freiflächenanlagen errichten.

Um das PV-Ausbauziel bis 2040 zu erreichen, ist szenarioabhängig ein jährlicher durchschnittlicher Nettozubau zwischen 0,5 und 1,7 GW/a erforderlich. Das bisherige Maximum beim PV-Ausbau wurde im Jahr 2010 mit rund 1 GW realisiert (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2021, S. 17).

Die ausgewiesenen PV-Ausbauziele liegen deutlich unterhalb der in verschiedenen Studien ermittelten Potenzialgrenzen: Der Szenariorahmen zum NEP Strom 2037 weist mit einem Potenzial für PV-Dachanlagen in Höhe von 34 GW und für PV-Freiflächenanlagen in Höhe von 28 GW ein vergleichsweise geringes Potenzial aus. Im aktualisierten Energieatlas Baden-Württemberg wird bereits für PV-Dachanlagen ein Potenzial von 62 GW²⁰ ausgewiesen. Hinzu kommt noch das Potenzial für PV-Freiflächenanlagen und PV-Sonderanlagen wie Agri-PV und PV-Parkplatzüberdachungen (vgl. Abschnitt 4.1.5 und 4.1.6).

Die Studie der Plattform Erneuerbare Energie Baden-Württemberg geht für das Jahr 2040 von einer installierten PV-Leistung von 39 GW aus (Nitsch und Magosch 2021, S. 7). Die Studie „Sektorziele 2030 und klimaneutrales Baden-Württemberg 2040“ unterstellt mit 47 GW Photovoltaik für das Jahr 2040 einen höheren PV-Ausbau (Kelm et al. 2022, S. 43). Der Szenariorahmen zum NEP Strom 2037 geht von einer zu installierenden PV-Leistung zwischen rund 33 GW und 49 GW aus (50 Hertz; Amprion; TenneT; TransnetBW 2022, S. 32, 45 und 50).

Im Vergleich zu den zitierten Studien mit Fokus auf Baden-Württemberg liegt die installierte Leistung für PV im UBA-Szenario mit 17 GW in einem sehr niedrigen Bereich. Das Agora-Szenario und das Ariadne-Szenario liegen in der Mitte der in der Literatur ausgewiesenen PV-Leistung.

Wasserstoff

Die installierte Leistung von Gaskraftwerken, die in klimaneutralen Zielszenarien nur noch mit Wasserstoff betrieben werden, liegt in den ausgewählten Szenarien in einem Bereich von 1 GW (UBA-Szenario-BW) bis 7 GW (Agora-Szenario-BW). Das Ariadne-Szenario-BW liegt mit 4 GW in einer Größenordnung, wie sie auch im Szenariorahmen des NEP Strom 2037 für Baden-Württemberg (rund 3 GW) (50 Hertz; Amprion; TenneT; TransnetBW 2022, S. 32, 45 und 50) bzw. in der Studie der Plattform Erneuerbare Energie Baden-Württemberg (rund 4 GW) ausgewiesen wird (Nitsch und Magosch 2021, S. 7). Die TransnetBW Studie „Stromnetz 2050“ geht von einer Kraftwerksleistung für Gaskraftwerke in Höhe von 5 GW aus (Lotze et al. 2020, S. 28). Die Studie „Sektorziele 2030 und klimaneutrales Baden-Württemberg 2040“ unterstellt eine gesicherte Leistung durch Wasserstoffkraftwerke in Höhe von 5,5 GW (Kelm et al. 2022).

¹⁹ Bei einem Flächenziel von 2 % für EE-Anlagen, wovon 1,8 % für Windenergieanlagen auszuweisen sind, verbleiben 0,2 % für PV-Freiflächenanlagen.

²⁰ <https://www.energieatlas-bw.de/sonne/dachflächen/solarpotenzial-auf-dachflächen>

3.3.5 Wärmenachfrage für Gebäude

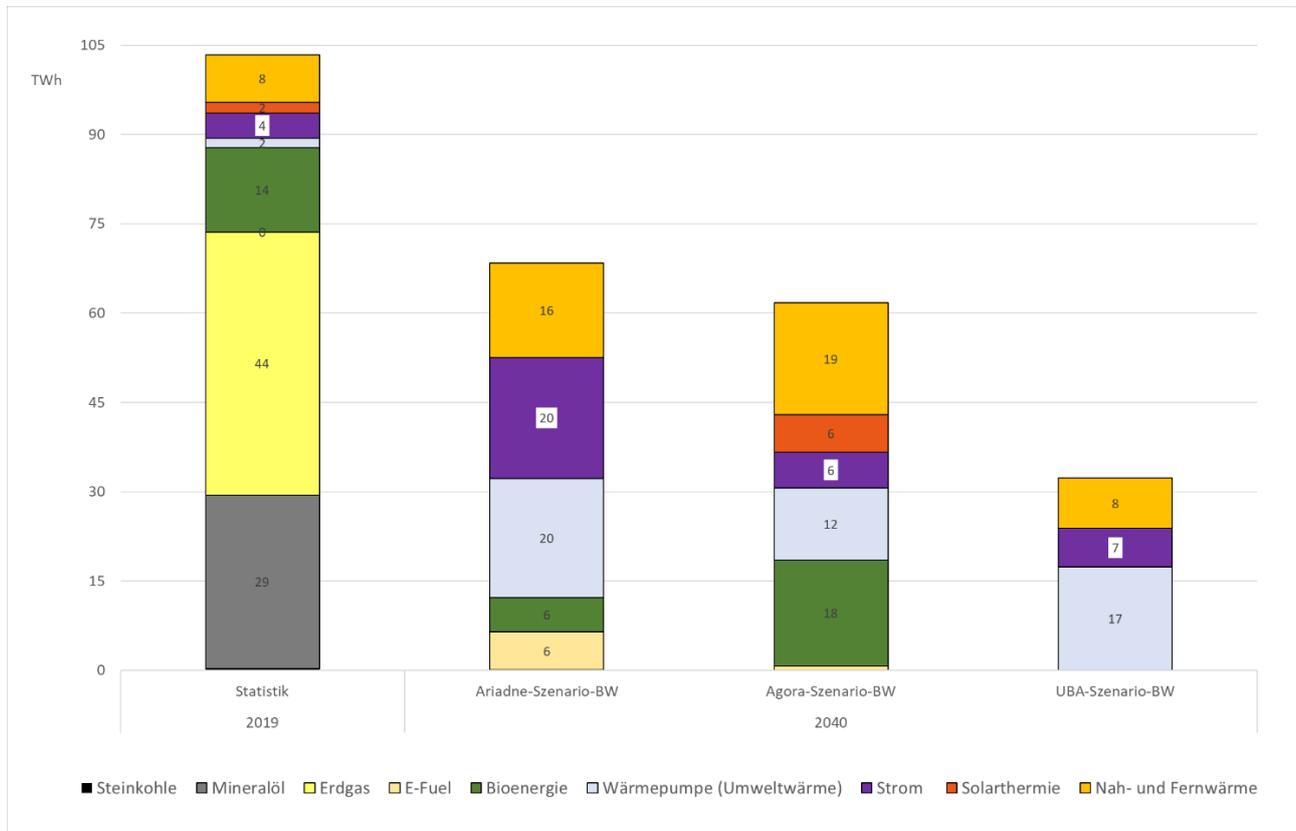
Die Skalierung der klimaneutralen Zielszenarien auf Baden-Württemberg zeigt, dass der Gebäudewärmebedarf bis zum Jahr 2040 auf 32 TWh bis 68 TWh sinkt (Abbildung 3-10). Im Vergleich zu 2019 entspricht das einer Reduktion von 69 % (UBA-Szenario-BW), 40 % (Agora-Szenario-BW) und 34 % (Ariadne-Szenario-BW). Im Vergleich zur Sektorziel-Studie, die für das Jahr 2040 von einem Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser in Höhe von 82 TWh ausgeht (Kelm et al. 2022, S. 16), wird deutlich, dass alle drei Szenarien für den Bereich der Gebäudewärmeversorgung von einer ambitionierteren Sanierungsaktivität im Gebäudebestand (d.h. sowohl hinsichtlich der Sanierungstiefe als auch der Sanierungsgeschwindigkeit) und hohen Effizienzstandards für Neubauten ausgehen. Die sehr hohe Reduktion der Gebäudewärmenachfrage im UBA-Szenario-BW ergibt sich aufgrund der dort getroffenen Suffizienz-Annahmen (v. a. Reduktion der Pro-Kopf-Wohnfläche, Reduktion der Raumtemperatur).

Die drei auf Baden-Württemberg skalierten Szenarien weisen zudem auch einen unterschiedlichen Energieträger- und Technologiemitmix bei der Gebäudewärmeerzeugung auf. Während das Agora-Szenario-BW mit 29 % den höchsten Anteil an Biomasse aufweist, wird im UBA-Szenario-BW überhaupt keine Biomasse mehr für die dezentrale Wärmebereitstellung eingesetzt. Im Ariadne-Szenario-BW sind es noch 8 %. Die Elektrifizierung der Gebäudewärmeerzeugung mittels Wärmepumpen und Stromdirektanwendungen ist im UBA-Szenario-BW (74 %) und im Ariadne-Szenario-BW (65 %) deutlich höher ausgeprägt als im Agora-Szenario-BW (29 %). Im Ariadne-Szenario-BW werden zudem auch in nennenswertem Umfang E-Fuels in Heizungen eingesetzt (9 %), im Agora-Szenario-BW beläuft sich deren Anteil nur auf 1 %. Solarthermie wird ausschließlich im Agora-Szenario-BW für die dezentrale Gebäudewärmeerzeugung berücksichtigt²¹.

Hinsichtlich des relativen Anteils der Wärmebereitstellung mittels Wärmenetzen liegen alle drei Szenarien in einem ähnlichen Bereich von 23 % (Ariadne-Szenario-BW), 26 % (UBA-Szenario-BW) und 30 % (Agora-Szenario-BW). Die Sektorziel-Studie weist diesbezüglich einen Anteil von 17 % aus (Kelm et al. 2022, S. 16), die PEE-Studie geht von einer Steigerung des Wärmenetzanteils von 15 % auf 30 % aus (Nitsch und Magosch 2021, S. 21).

²¹ Das Leitmodell für den Gebäudesektor im Ariadne Projekt ist das REMOD-Modell des Fraunhofer ISE. Um Konsistenz zwischen allen Parametern zu gewährleisten, haben wir auch für den Gebäudesektor die Ergebnisse aus dem REMIND-Modell des Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) verwendet, welches das Leitmodell für das Energiesystem ist. Das REMOD-Modell bildet den Gebäudesektor detaillierter ab und weist auch Solarthermie aus.

Abbildung 3-10: Gebäudewärmeerzeugung in Baden-Württemberg nach Energieträgern im Jahr 2019 sowie im klimaneutralen Zieljahr 2040



Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

4 Regionalisierung der plausibilisierten Zielbilder auf die zwölf Regionen in Baden-Württemberg

Die einzelnen Parameter aus den Zielszenarien für Baden-Württemberg werden mit Hilfe geeigneter Verteilschlüssel auf die zwölf Regionen räumlich verteilt.

4.1 Verteilschlüssel für die Regionalisierung auf die zwölf Regionen in Baden-Württemberg

4.1.1 Stromnachfrage

Für die räumliche Verteilung der Stromnachfrage auf die zwölf Regionen in Baden-Württemberg werden für einzelne Unterpositionen jeweils spezifische räumliche Verteilschlüssel angewendet.

Für die Stromnachfrage der Industrie wird der „Energieverbrauch der Industrie in Baden-Württemberg 2019 nach Stadt- und Landkreisen (Stromverbrauch)“ als Verteilschlüssel herangezogen. Die Stromnachfrage im Sektor GHD wird mit Hilfe der Kenngröße „Erwerbstätige am Arbeitsort 2019“ räumlich verteilt. Die Verteilung der Stromnachfrage von Haushalten erfolgt analog zur Bevölkerungsverteilung im Jahr 2020. Als Verteilschlüssel für die Stromnachfrage von Elektrofahrzeugen dient der Fahrzeugbestand 2021 (Krafftahrt-Bundesamt 2021).

Der Verteilschlüssel für Elektrolyseure basiert auf einer sehr groben und eher indikativ zu verstehenden Abschätzung möglicher Standorte für Onsite-Elektrolyseure²². Die Abschätzung sieht Elektrolyseure entlang eines zukünftigen Wasserstofffernleitungsnetzes (z. B. entlang des Oberrheingraben und von Mannheim kommend durch die Region Stuttgart und weiter nach Ulm) sowie in der Nähe von EE-Stromerzeugungsanlagen (z. B. in der Region Heilbronn-Franken) vor.

Die räumliche Verteilung der Stromnachfrage für die elektrische Erzeugung von Nah- und Fernwärme mittels Wärmepumpen ergibt sich aus der Einsatzmodellierung in den einzelnen Nah- und Fernwärmenetzen (vgl. Abschnitt 4.2.4).

4.1.2 Wärmenachfrage für Raumwärme und Warmwasser in den Sektoren Haushalte und GHD

Die Wärmenachfrage für Raumwärme und Warmwasser hängt vom Sanierungszustand und dem individuellen Verhalten der Gebäudenutzer*innen ab. Innerhalb Baden-Württembergs und seiner zwölf Regionen gibt es keinen Hinweis auf strukturelle Unterschiede der energetischen Gebäudezustände oder des Heizverhaltens bzw. des Warmwasserbedarfs. Die Verteilung der Wärmenachfrage der drei klimaneutralen Szenarien auf die zwölf Regionen innerhalb Baden-Württembergs erfolgt daher analog zur Bevölkerungsverteilung.

4.1.3 Windenergie

Die installierte Leistung von Windenergieanlagen wird anhand der verfügbaren Windpotenzialflächen in Baden-Württemberg auf die zwölf Regionen verteilt. Für die Bestimmung dieses Verteilschlüssels wurden zwei GIS-Datensätze miteinander kombiniert:

²² Direkt am Standort einer industriellen Wasserstoffnachfrage, z. B. bei der MIRO Raffinerie in Karlsruhe oder an Chemiestandorten im Landkreis Lörrach.

- Energieatlas Baden-Württemberg der LUBW (LUBW; Ministerium für Umwelt Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2022)
- Unveröffentlichte Sensibilitätskarte für windkraftsensible Vogelarten und Fledermäuse des NABU Baden-Württemberg (Hurst et al. 2021)

Der Energieatlas Baden-Württemberg weist für Windenergieanlagen rund 220.000 ha als grundsätzlich geeignete Flächen (6,2 % der Landesfläche) und rund 200.000 ha als bedingt geeignete Flächen (5,6 % der Landesfläche) aus. Alle ausgewiesenen Windpotenzialflächen erfüllen das Kriterium einer mittleren gekappten Windleistungsdichte von mindestens 215 W/m² in einer Höhe von 160 m über Grund. Darüber hinaus werden anhand eines Kriterienkatalogs²³ Ausschluss²⁴- und Restriktionsflächen²⁵ bestimmt. Die LUBW weist bezüglich des verwendeten Kriterienkatalogs darauf hin, dass dieser „im Hinblick auf mögliche Hindernisse für die Windenergienutzung nicht abschließend ist“. Alle Flächen, die weder ein Ausschlusskriterium noch ein Restriktionskriterium aufweisen, sind der Kategorie „geeignete Flächen“ zugeordnet. Flächen, die mit mindestens einem Restriktionskriterium und keinem Ausschlusskriterium belegt sind, sind der Kategorie „bedingt geeignete Flächen“ zugehörig (Abbildung 4-1).

Die Sensibilitätskarte des NABU Baden-Württemberg diene als Basis für die Einstufung des Konfliktrisikos für windkraftsensible Vogelarten und Fledermäuse in die Konfliktkategorien „gering“, „mittel“, „hoch“ und „sicher“ (Hurst et al. 2021).

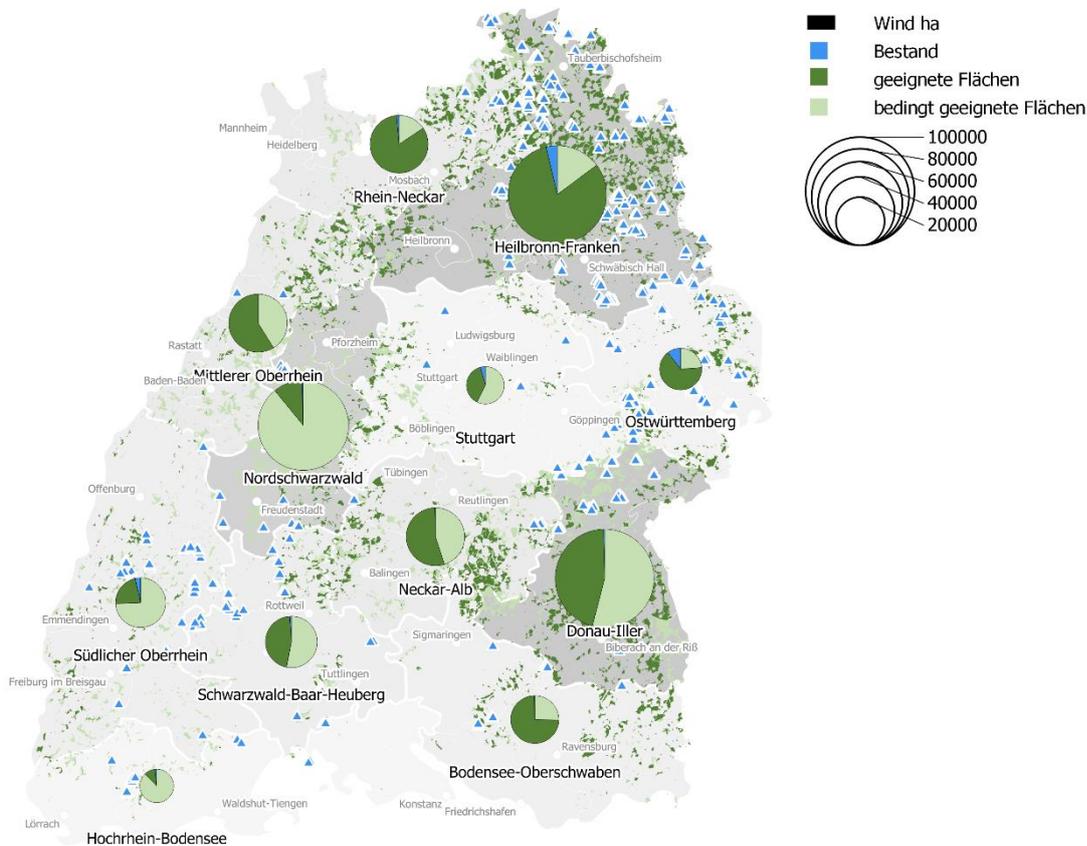
In der Zusammenschau beider Datensätze wird zunächst deutlich, dass konfliktarme Windpotenzialflächen durchaus vorhanden sind. Etwa 15.000 ha entfallen auf die ideale Kombination „geeignete Windpotenzialfläche“ und „geringes Konfliktrisiko für windkraftsensible Vogelarten und Fledermäuse“. Diese Flächen allein reichen jedoch nicht aus, um die erforderlichen Windenergieanlagen zu realisieren. Darüber hinaus zeigt sich, dass bereits bestehende Windenergieanlagen teilweise in Gebieten mit einem „hohen“ oder „sicheren“ Konfliktrisiko liegen.

²³ <https://www.energieatlas-bw.de/documents/24384/24629/Kriterienkatalog+Windpotenzial/f6d437f4-472f-4738-ba3c-b5407e58f06b>

²⁴ z. B. Siedlungsflächen (inklusive eines spezifischen Abstandspuffer für Krankenhäuser, Wohngebiete, Mischgebiete, Gewerbe- und Industriegebiete sowie Grün- und Erholungsflächen), Infrastrukturflächen (inklusive eines spezifischen Abstandspuffer für Bundesautobahnen, Bundes- und Landstraßen, Kreisstraßen, Schienenstrecken und Betriebsanlagen der Eisenbahn, Flughäfen, Verkehrslandeplätze und Segelflugplätze, Sonderflächen des Bundes, z.B. Einrichtungen der Bundeswehr, Hochspannungsfreileitungen, u.a.) und Freiraumflächen (z.B. Nationalpark, Naturschutzgebiete, Europäische Vogelschutzgebiete mit Vorkommen windkraftempfindlicher Arten, Auerhuhn-relevante Flächen der Kategorie 1, Bann- und Schonwälder, Binnen- und Fließgewässer, Biosphärengebiet – Kernzone, flächenhafte Naturdenkmale, gesetzliche geschützte Biotope).

²⁵ z. B. Pufferzonen um Infrastrukturflächen wie Flughäfen, Verkehrslandeplätze und Segelflugplätze, Pufferzonen um Freiraumflächen für Nationalpark, Naturschutzgebiete, Europäische Vogelschutzgebiete mit Vorkommen windkraftempfindlicher Arten, Bann- und Schonwälder, Biosphärengebiet – Kernzone sowie Freiraumflächen direkt (ohne Abstandspuffer) wie Auerhuhn-relevante Flächen der Kategorie 2 und 3, Biosphärengebiet – Pflegezone, Wasser- und Heilquellenschutzgebiete Zone II und Überschwemmungsgebiete, Landschaftsschutzgebiete, FFH-Gebiete / Mähwiesen, Europäische Vogelschutzgebiete ohne Vorkommen windkraftempfindlicher Arten.

Abbildung 4-1: Potenzialflächen für Windenergie basierend auf dem Energieatlas Baden-Württemberg



Quelle: eigene Darstellung, basierend auf Daten von LUBW; Ministerium für Umwelt Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2022)

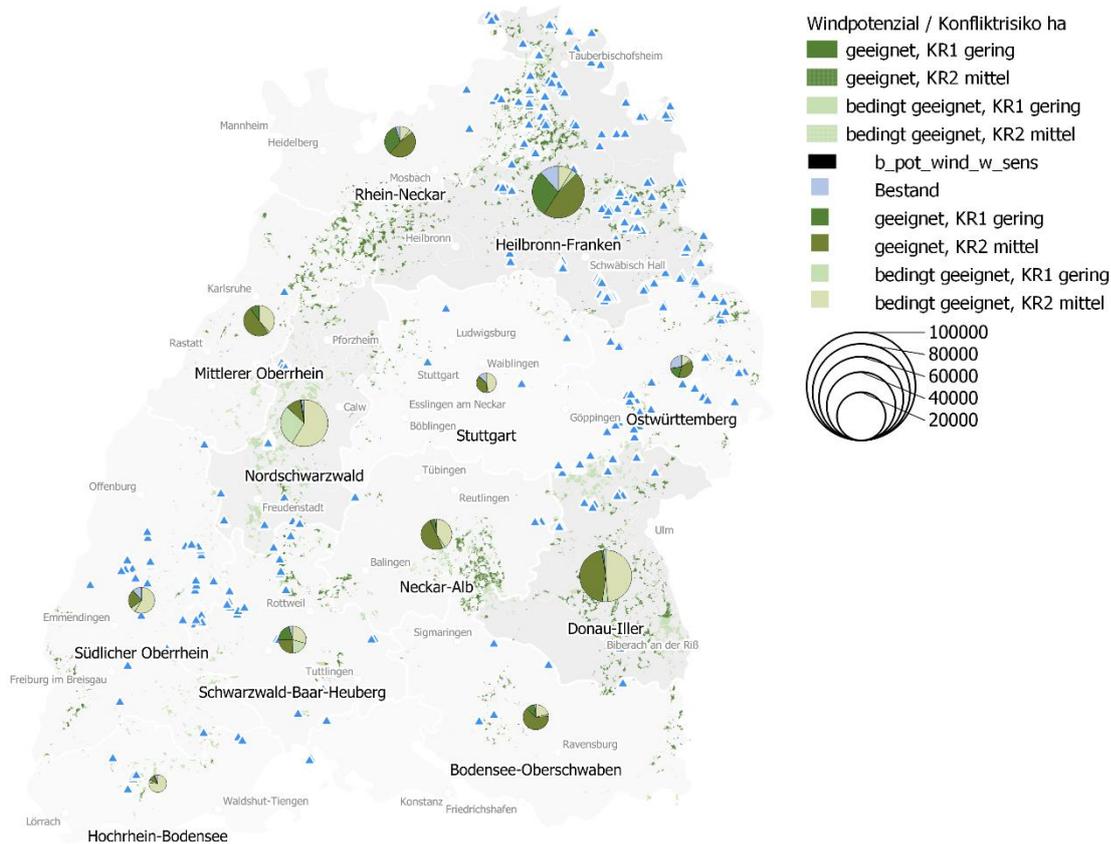
Etwa 115.000 ha der geeigneten oder bedingt geeigneten Windpotenzialflächen nach der Klassifikation der LUBW weisen gleichzeitig ein geringes oder mittleres Konfliktrisiko für windkraftsensible Vogelarten und Fledermäuse nach der Sensibilitätskarte des NABU auf. Weitere 141.000 ha entfallen auf die Kombination geeignete Flächen und Konfliktrisiko „hoch“ sowie 117.000 ha auf die Kombination bedingt geeignete Flächen und Konfliktrisiko „hoch“. Etwa 37.000 ha der geeigneten oder bedingt geeigneten Windpotenzialflächen weisen ein sicheres Konfliktrisiko aus.

Als Verteilschlüssel für die Regionalisierung der Windenergieanlagen auf die zwölf Regionen verwenden wir im weiteren Verlauf der Studie die geeigneten und bedingt geeigneten Windpotenzialflächen mit einem geringen oder mittleren Konfliktrisiko für windkraftsensible Vogelarten und Fledermäuse. Diese Flächen entsprechen rund 3,3 % der Landesfläche und reichen für die zu installierenden Windenergieanlagen in den Zielszenarien aus²⁶. Die BWE-Studie „Flächenpotenziale der Windenergie an Land 2022“ kommt als Ergebnis einer detaillierten Raumbewertung und unter

²⁶ Bei einem unterstellten Flächenbedarf von 18 Hektar pro Windenergieanlage und einer mittleren Anlagenleistung von 4 Megawatt ergibt sich ein spezifischer Flächenbedarf von 4,5 ha/MW. Damit ließen sich auf 3,3 % der Landesfläche knapp 6.400 Windenergieanlagen mit zusammen 26 GW Leistung installieren. Im Maximum werden für das Ariadne-Szenario 22 GW Windenergieanlagen räumlich verteilt.

Berücksichtigung von sechs Konfliktrisikoklassen für verschiedene Schutzgüter zu einem Flächenpotenzial von rund 3,6 % für Windenergie in Baden-Württemberg (Bons et al. 2022).

Abbildung 4-2: Verbleibende Potenzialflächen für Windenergie in Baden-Württemberg bei Ausschluss eines „hohen“ bzw. „sicheren“ Konfliktrisikos für windkraftsensible Vogelarten und Fledermäuse



Quelle: eigene Darstellung, basierend auf Daten von Hurst et al. (2021) und LUBW; Ministerium für Umwelt Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2022)

Da die dem Verteilschlüssel zugrundeliegenden Windpotenzialflächen und Konfliktgebiete für windkraftsensible Vogelarten und Fledermäuse uneinheitlich über die Landesfläche verteilt sind, ergeben sich zum Teil deutliche regionale Unterschiede. Mit dem gewählten Verteilschlüssel liegen die Schwerpunkte des für Windenergie in den Regionen Heilbronn-Franken (20 %), Donau-Iller (20 %) und Nordschwarzwald (16 %), gefolgt von den Regionen Mittlerer Oberrhein, Rhein-Neckar und Neckar-Alb mit jeweils 7 % (Abbildung 4-2 und Tabelle 7-2 im Anhang). Ein vergleichsweise geringer Anteil an dem Gesamtpotenzial für Windenergie ergibt sich für die Regionen Hochrhein-Bodensee (2 %) und Stuttgart (3 %).

Eine gängige Kennzahl für die Regionalisierung von Windenergie ist der spezifische Flächenanteil, der sich aus der ausgewiesenen Windpotenzialfläche im Verhältnis zur Gesamtfläche der Region ergibt. Bei vollständiger Erschließung des von uns gebildeten Verteilschlüssels schwankt der spezifische Flächenanteil zwischen etwa 1 % für die Regionen Stuttgart und Hochrhein-Bodensee bis etwa 8 % für die Regionen Nordschwarzwald und Donau-Iller (Tabelle 7-2), was mit zunehmender Windleistung zu größeren regionalen Unterschieden führen wird.

Dem gegenüber steht der Ansatz, für alle Regionen einen einheitlichen spezifischen Flächenanteil vorzugeben, zum Beispiel der im Windenergieflächenbedarfsgesetz (WindBG)²⁷ für Baden-Württemberg ausgewiesene und bis Ende 2032 zu erreichende Flächenbeitragswert in Höhe von 1,8 %. Damit ließe sich die Windenergie gleichmäßiger im Land verteilen, regionale Besonderheiten blieben jedoch unberücksichtigt. In der Folge müssten Regionen mit einem geringen Windenergiepotenzial auch weniger effiziente Flächen ausweisen, während besser geeignete Flächen in anderen Regionen ungenutzt blieben.

Auf Bundesebene wurden „bei der Aufteilung des Gesamtziels auf die Bundesländer ... die je nach Bundesland unterschiedlichen Voraussetzungen für den Ausbau der Windenergie an Land berücksichtigt.“²⁸ Die Flächenbeitragswerte der einzelnen Bundesländer liegen dabei für die Stadtstaaten Berlin, Hamburg und Bremen bei 0,5 % und für alle anderen Bundesländer zwischen 1,8 % und 2,2 % (Anlage 1 zu §3 des WindBG). Ähnlich dem Vorgehen auf Bundesebene sollte auch auf Landesebene ein dafür geeignetes Verfahren entwickelt werden.

4.1.4 PV-Dachanlagen

Der Energieatlas Baden-Württemberg weist ein Dachflächenpotenzial für PV-Anlagen von rund 62 GW²⁹ aus. Ende 2020 waren in Baden-Württemberg rund 6,3 GW PV-Dachanlagen installiert, so dass dies einer Potenzialausnutzung von rund 10 % entspricht.

Das größte Dachflächenpotenzial für PV-Anlagen ist in der Region Stuttgart (12 GW), gefolgt von den Regionen Südlicher Oberrhein (7 GW) und Rhein-Neckar (6 GW) (Abbildung 4-3). Die spezifische Flächeninanspruchnahme von PV-Modulen beträgt rund 0,5 ha/MW.

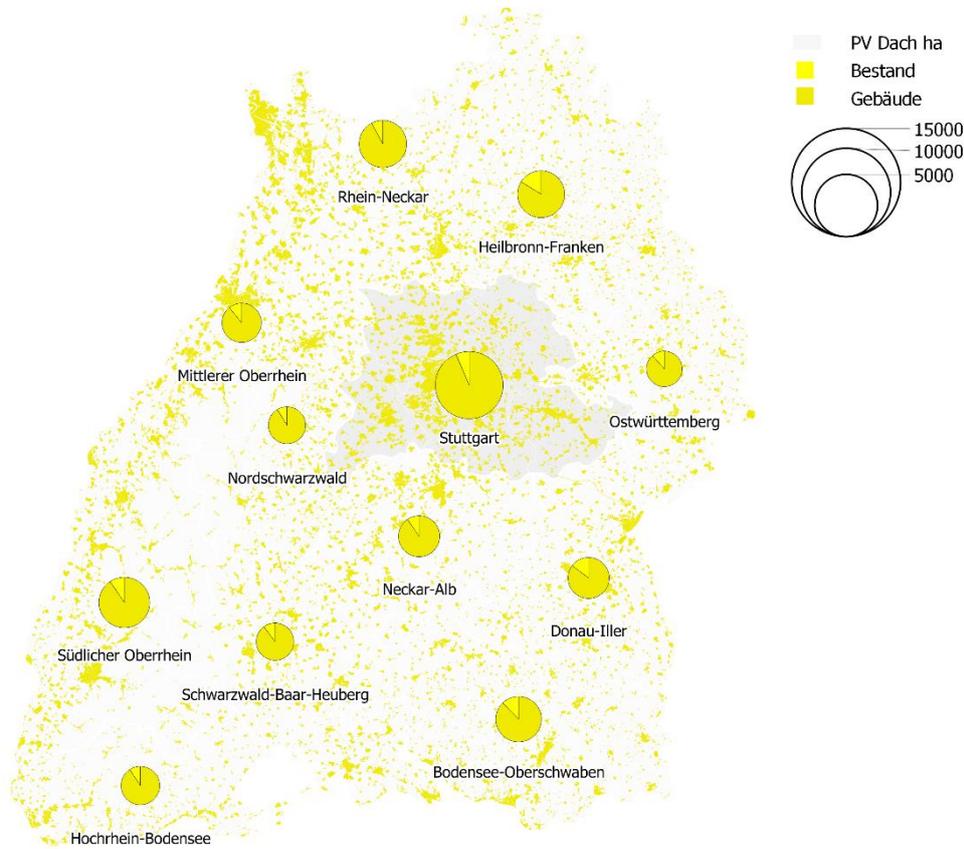
Dezentrale Solarthermieanlagen konkurrieren mit PV-Dachanlagen um die gleichen Dachflächen. Für dezentrale Solarthermieanlagen wird deshalb auch der Verteilschlüssel für PV-Dachanlagen verwendet (vgl. Tabelle 7-4 im Anhang).

²⁷ <https://www.bmwsb.bund.de/SharedDocs/gesetzgebungsverfahren/Webs/BMWSB/DE/ExterneLinks/wind-an-land-gesetz.html>

²⁸ <https://www.bmwsb.bund.de/SharedDocs/gesetzgebungsverfahren/Webs/BMWSB/DE/ExterneLinks/wind-an-land-gesetz.html>

²⁹ <https://www.energieatlas-bw.de/sonne/dachflachen/solarpotenzial-auf-dachflachen>

Abbildung 4-3: Regionale Verteilung des Potenzials für PV-Dachanlagen in Baden-Württemberg



Quelle: Öko-Institut e.V., basierend auf Daten von LUBW (2022a)

4.1.5 PV-Freiflächenanlagen

Für PV-Freiflächenanlagen kommen Seitenrandstreifen entlang von Autobahnen, Bundesstraßen und Bahnstrecken sowie Konversionsflächen als mögliche Standorte in Frage. Darüber hinaus können in begrenztem Umfang auch benachteiligte landwirtschaftliche Gebiete für PV-Freiflächenanlagen genutzt werden.

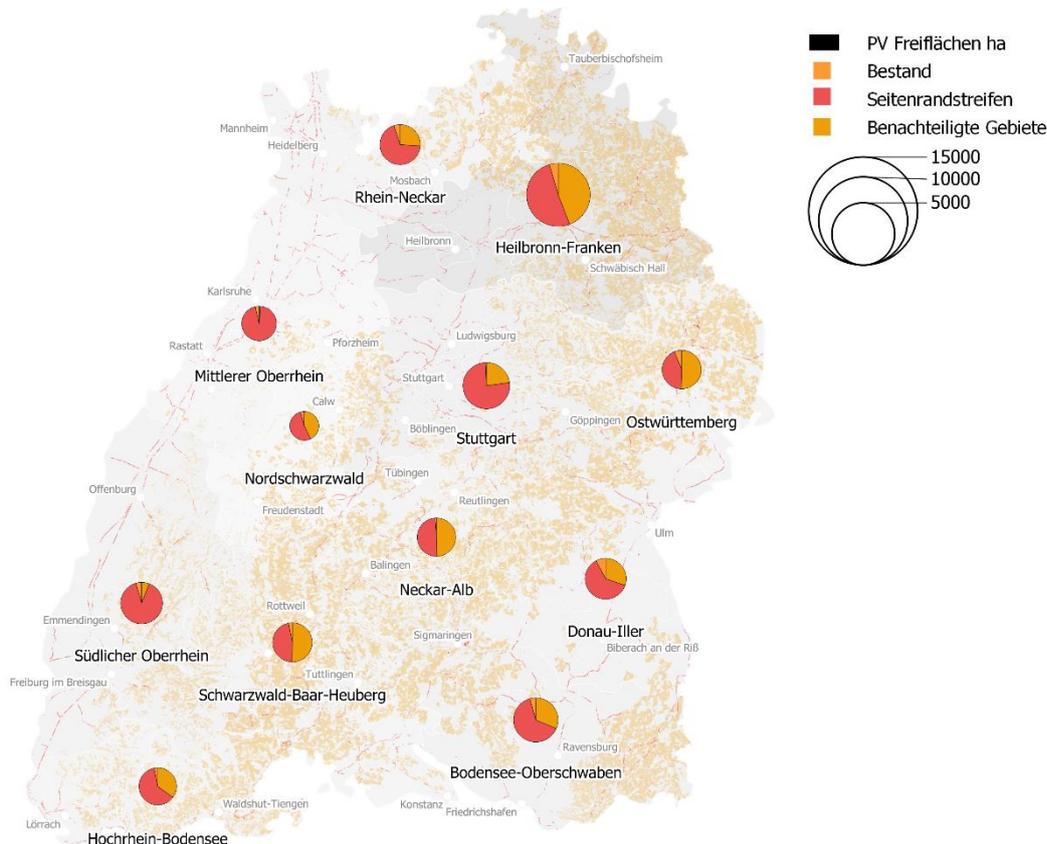
Im Energieatlas Baden-Württemberg sind rund 26.700 ha als Seitenrandstreifen oder Konversionsflächen ausgewiesen³⁰. Dies entspricht rund 0,75 % der Landesfläche. Auf dieser Fläche könnten PV-Freiflächenanlagen mit einer elektrischen Leistung von knapp 27 GW installiert werden.

Die landesspezifische Zuschlagsgrenze für PV-Freiflächenanlagen auf benachteiligten landwirtschaftlichen Gebieten beträgt gemäß der aktuell gültigen Freiflächenöffnungsverordnung 500 MW

³⁰ https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/projekte/api/processingChain?repositoryItemId=energie_sonne.Freiflaechen.energie%3Aebw_sonne_freil_potenzial.sel&conditionValues-SetHash=803FD99&selector=energie_sonne.Freiflaechen.energie%3Aebw_sonne_freil_potenzial.sel&sourceOrderAsc=false

pro Jahr³¹. In den nächsten 18 Jahren könnten somit bis zu 9 GW PV-Freiflächenanlagen auf benachteiligten landwirtschaftlichen Gebieten installiert werden. Für diese Anlagenleistung würden rund 9.000 ha Fläche³² benötigt, was rund 0,25 % der Landesfläche entspricht. Der Verteilschlüssel wird basierend auf den Daten im Energieatlas³³ Baden-Württemberg zu „geeignete Fläche auf Ackerland in benachteiligtem Gebiet“ gebildet.

Abbildung 4-4: Regionale Verteilung des Flächenpotenzials für PV-Freiflächenanlagen in Baden-Württemberg



Quelle: eigene Darstellung, basierend auf Daten von LUBW (2022b)

In Summe ergibt sich ein Flächenpotenzial für PV-Freiflächenanlagen in Höhe von einem Prozent der Landesfläche. Auf dieser Fläche ließen sich PV-Module mit einer elektrischen Leistung von rund 36 GW installieren. In den Regionen Mittlerer Oberrhein, Südlicher Oberrhein und Stuttgart dominieren vor allem Seitenrandstreifen und Konversionsflächen das PV-Freiflächenpotenzial. In den

³¹ https://www.landesrecht-bw.de/jportal/portal/t/afg/page/bsbawueprod.psml?pid=Dokumentanzeige&show-doccase=1&js_peid=Trefferliste&fromdoctodoc=yes&doc.id=jlr-PhotFFA%C3%96VBWrahmen&doc.part=X&doc.price=0.0&doc.hl=0#focuspoint

³² Die spezifische Flächeninanspruchnahme von PV-Freiflächenanlagen ist durch eine höhere Leistungsdichte der PV-Module in den letzten Jahren kontinuierlich gesunken und liegt derzeit bei 1,5 ha/MW (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2019), S. 11). Mittelfristig kann von einer spezifischen Flächeninanspruchnahme in Höhe von 1 ha/MW (Nitsch und Magosch (2021), S. 12) ausgegangen werden, die langfristig auf bis 0,7 ha/MW (Kelm et al. (2019), S. 56) absinken kann.

³³ <https://www.energieatlas-bw.de/sonne/freiflaechen/benachteiligte-gebiete-in-baden-wuerttemberg>

Regionen Heilbronn-Franken, Ostwürttemberg und Schwarzwald-Baar-Heuberg liegen die größten Flächenpotenziale für benachteiligte landwirtschaftliche Gebiete (Abbildung 4-4).

Für die räumliche Verteilung von PV-Freiflächenanlagen wird ein kombinierter Verteilschlüssel gebildet, der sich zwei Drittel aus dem Verteilschlüssel für „Seitenrandstreifen und Konversionsflächen“ und zu einem Drittel aus dem Verteilschlüssel für „benachteiligte landwirtschaftliche Gebiete (Ackerland)“ zusammensetzt. Im Ergebnis werden 19 % der PV-Freiflächenleistung in der Region Heilbronn-Franken, 11 % in der Region Stuttgart und 9 % in der Region Bodensee-Oberschwaben räumlich verteilt. Den geringsten PV-Freiflächenanteil weist die Region Nordschwarzwald mit 4 % auf. Alle anderen Regionen liegen zwischen 6 % und 8 % (siehe Tabelle 7-3 im Anhang).

4.1.6 PV-Sonderanlagen: Agri-PV und PV-Parkplatzüberdachungen

Bei einer Agri-PV-Anlage handelt es sich um eine PV-Anlage, die ergänzend zur landwirtschaftlichen Flächenbewirtschaftung installiert ist³⁴. Dadurch unterscheidet sich eine Agri-PV-Anlage von einer klassischen PV-Freiflächenanlage, bei der die landwirtschaftliche Nutzung der Fläche fehlt. Aus diesem Grund können Agri-PV-Anlagen auch dazu beitragen, die Konkurrenzen um landwirtschaftliche Flächen zu entschärfen.

Bei Agri-PV handelt es sich um ein erfolgversprechendes System, welches sich momentan in Deutschland allerdings noch in der Pilot- und Demonstrationsphase befindet. Neben der Doppelnutzung landwirtschaftlicher Flächen können sich weitere Vorteile für die darunter angebauten Kulturen ergeben. So können in Agri-PV-Anlagen auch Schutzsysteme vor mechanischen Einwirkungen (z. B. Hagel) oder zu hoher Sonnenstrahlung integriert werden. Das Mikroklima unter Agri-PV-Anlagen kann sich für die Pflanzen verbessern und Wasserdampf und Niederschlagswasser können zusätzlich gespeichert werden (ISE 2022, TFZ 2021). Agri-PV Anlagen sind deshalb vor allem an heißen oder hagelgefährdeten Standorten vorteilhaft.

Agri-PV kann sowohl im Ackerbau und in der Grünlandbewirtschaftung als auch im Obst- und Gemüsebau (sogenannte Sonderkulturen) installiert werden. In Baden-Württemberg gibt es rund 550.000 ha Grünlandflächen sowie rund 33.000 ha Sonderkulturflächen, die sich aus Flächen für Salat, Gemüse, Strauchbeeren, Erdbeeren, Kernobst und Steinobst zusammensetzen. Ackerflächen werden für Agri-PV nicht berücksichtigt, da sie größtenteils bereits im Verteilschlüssel für PV-Freiflächenanlagen auf benachteiligten landwirtschaftlichen Gebieten enthalten sind. Bei einer angenommenen spezifischen Flächeninanspruchnahme in Höhe von 4 ha/MW könnten auf Sonderkulturflächen rund 8 GW und auf Grünland zumindest theoretisch bis zu 150 GW Agri-PV-Anlagen installiert werden. Die regionalspezifischen Verteilschlüssel für Agri-PV auf Grünland und Sonderkulturen basieren auf Daten des Statistischen Landesamtes Baden-Württemberg (z.B. Rieke und Wöllpe 2018).

Neben Agri-PV-Anlagen werden auch PV-Parkplatzüberdachungen der Kategorie „PV-Sonderanlagen“ zugeordnet. Für PV-Parkplatzüberdachungen für Baden-Württemberg wird in der Literatur ein

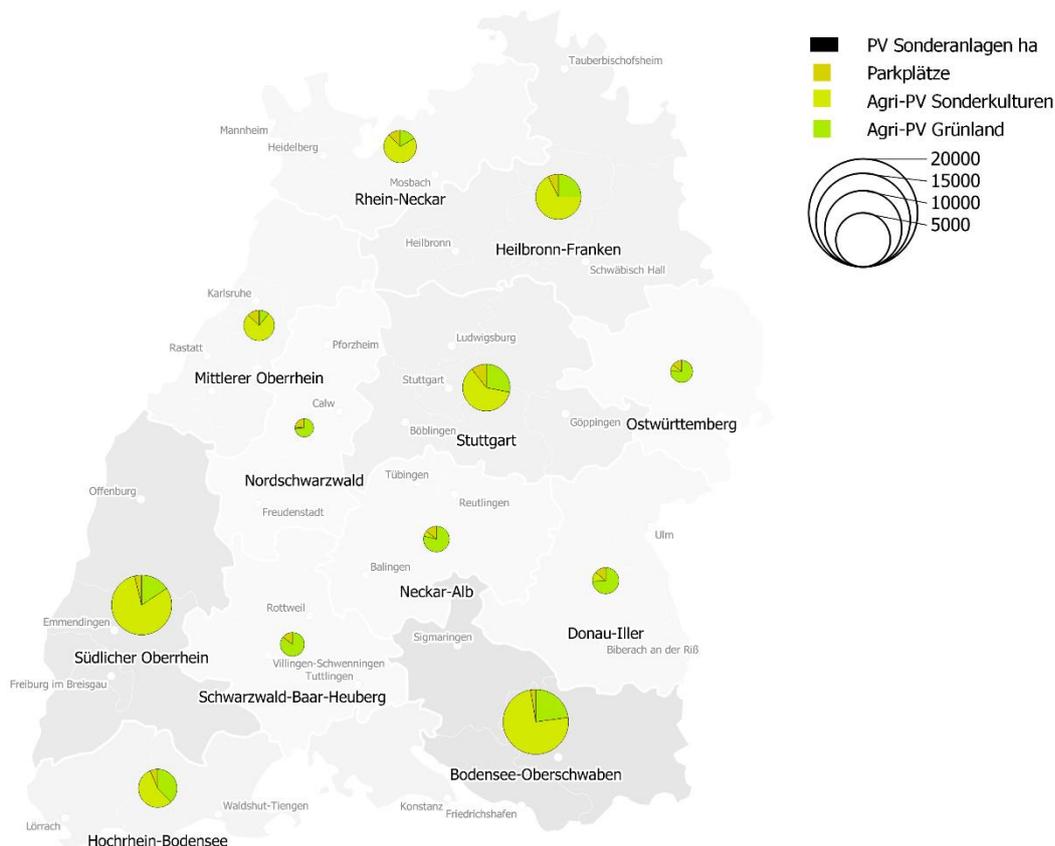
³⁴ Bei den Agri-PV-Anlagen wird grob in offene und geschlossene Systeme unterschieden. Geschlossene Systeme stellen PV-Gewächshäuser dar. Bei offenen Systemen unterscheidet sich der Bautyp in bodennahe oder hochaufgestellte Anlagen. Die hochaufgestellten Anlagen befinden sich mindestens 2,1 m über der landwirtschaftlichen Fläche und ermöglichen somit eine Nutzung unterhalb der Module (z. B. im Obst- oder Gemüseanbau). Bei bodennahen Anlagen wird hingegen die Fläche zwischen den Modulen bewirtschaftet (z. B. im Ackerbau oder bei Grünland).

Potenzial in Höhe von 2,4 GW ausgewiesen³⁵. Bei einer unterstellten spezifischen Flächeninanspruchnahme in Höhe von 1 ha/MW entspricht dies 2.400 ha Parkplatzfläche. Als Verteilschlüssel für PV-Parkplatzüberdachungen dient die Siedlungsfläche je Landkreis.

Um diese sehr unterschiedlichen Potenziale in einer Karte darstellen zu können, wird der in dieser Studie unterstellte interne Mix hinsichtlich der installierten Leistung von PV-Sonderanlagen (d.h. das Verhältnis 2 : 1 : 1 für Agri-PV auf Sonderkulturen : Agri-PV auf Grünland : PV-Parkplatzüberdachungen) zugrunde gelegt und mit der spezifischen Flächeninanspruchnahme kombiniert. Im Ergebnis resultieren 19.200 ha für Agri-PV auf Sonderkulturen, 9.600 ha für Agri-PV auf Grünland und 2.400 ha für PV-Parkplatzüberdachungen (Abbildung 4-5). Die spezifischen Verteilschlüssel für PV-Sonderanlagen sind zudem im Anhang in Tabelle 7-4 zu finden.

PV-Sonderanlagen werden vor allem in die Regionen Bodensee-Oberschwaben (22 %) und Südlicher Oberrhein (19 %) verteilt, gefolgt von den Regionen Stuttgart (13 %) und Heilbronn-Franken (11 %). Die Regionen Nordschwarzwald (2 %), Ostwürttemberg (3 %) und Schwarzwald-Baar-Heuberg (3 %) erhalten vergleichsweise wenig PV-Sonderanlagen (Abbildung 4-5).

Abbildung 4-5: Regionale Verteilung des Potenzials für Agri-PV-Anlagen und PV-Parkplatzüberdachungen in Baden-Württemberg



Quelle: Öko-Institut e.V., basierend auf Daten von LUBW; Ministerium für Umwelt Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2022)

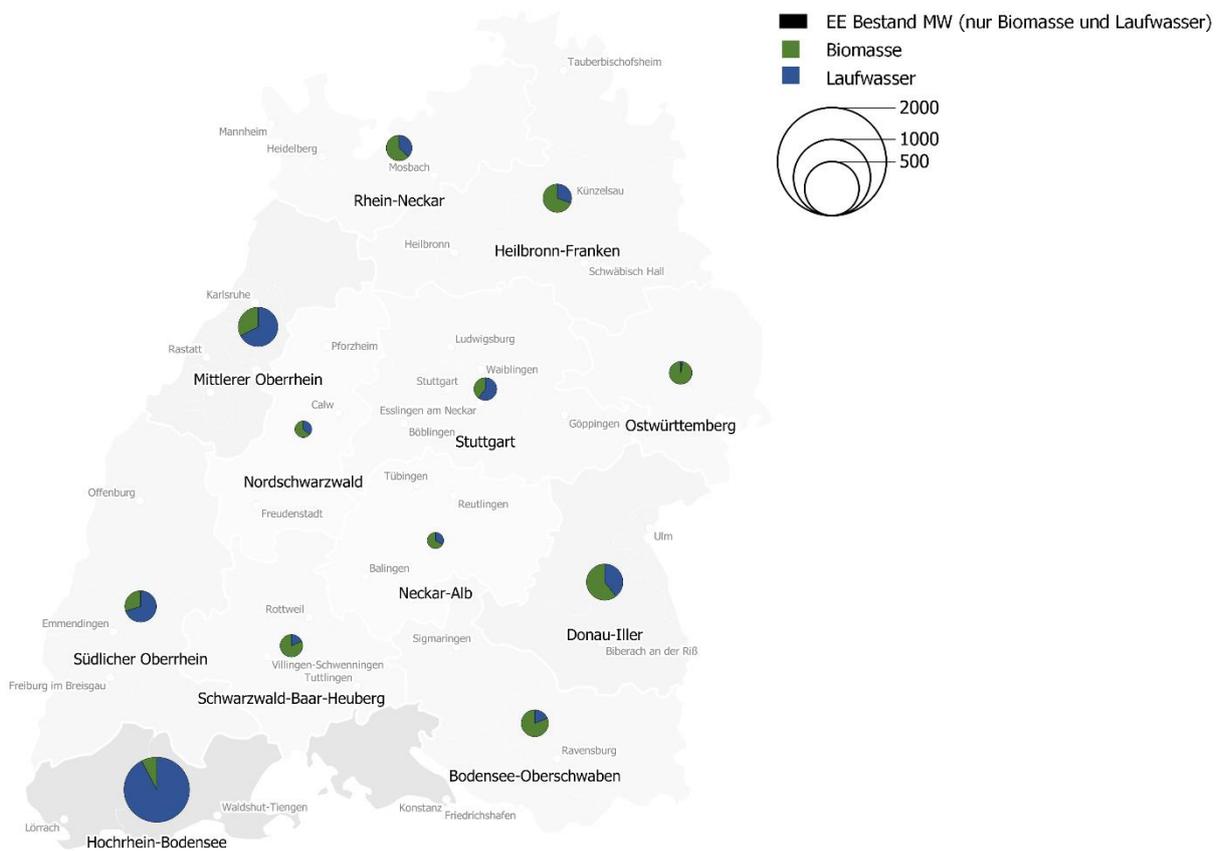
³⁵ https://solarcluster-bw.de/fileadmin/Dokumente/Aktuelles/Nachrichten/2022/2022_01_Solar_Cluster_BW_PV-Netzwerk_Faktenpapier_Photovoltaiik-Parkplaetze.pdf

4.1.7 Laufwasser und Biomasse

Ende 2020 waren in Baden-Württemberg Laufwasserkraftwerke und Biomasseanlagen mit jeweils einer elektrischen Leistung von rund 0,9 GW in Betrieb. Die Laufwasserkraftwerke befinden sich entlang von Rhein, Neckar und Donau. Biomassekraftwerke sind vor allem in den ländlich geprägten Regionen von Baden-Württemberg lokalisiert (Abbildung 4-6).

Der Verteilschlüssel für Laufwasserkraftwerke basiert auf Daten aus dem Energieatlas Baden-Württemberg³⁶ (Bestehende Wasserbauwerke). Für Biogasanlagen werden landkreisspezifische Daten aus „Erneuerbare Energien in Baden-Württemberg 2020“ (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2021, S. 30) herangezogen. Für Feuerungsanlagen mit fester Biomasse werden ebenfalls Daten aus dem Energieatlas Baden-Württemberg³⁷ verwendet („Bestehende Biomassefeuerungsanlagen“).

Abbildung 4-6: Anlagenbestand für Laufwasser und Biomasse in Baden-Württemberg



Quelle: Öko-Institut e.V., Daten aus Energieatlas Baden-Württemberg³⁸

³⁶ <https://www.energieatlas-bw.de/wasser/bestehende-wasserbauwerke>

³⁷ <https://www.energieatlas-bw.de/biomasse/bestehende-biomassefeuerungsanlagen>

³⁸ https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/projekte/api/processingChain?repositoryItemGlobalId=energie_biomasse.energie%3Aeebw_biomasse_holzfeuerung.sel&conditionValuesSetHash=5C52F7B&selector=energie_biomasse.energie%3Aeebw_biomasse_holzfeuerung.sel&sourceOrderAsc=false;
https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/projekte/api/processingChain?repositoryItemGlobalId=energie_biomasse.energie%3Aeebw_biomasse_holzfeuerung.sel&conditionValuesSetHash=5C52F7B&selector=energie_biomasse.energie%3Aeebw_biomasse_holzfeuerung.sel&sourceOrderAsc=false;

4.1.8 Wasserstoff-Kraftwerke

Für die räumliche Verteilung von Wasserstoff-Kraftwerken in Baden-Württemberg mit einer installierten Gesamtleistung von 1,0 GW_{el} (UBA-Szenario), 4,3 GW_{el} (Ariadne-Szenario) und 7,1 GW_{el} (Agora-Szenario) (vgl. Abschnitt 3.3.4) werden in einem ersten Schritt bestehende Pläne und Annahmen für Wasserstoff-Kraftwerke als KWK-Ersatzinvestition an den bisherigen Standorten von Steinkohlekraftwerken (d.h. FuelSwitch Projekte der EnBW³⁹ und Kraftwerksliste des Netzentwicklungsplans 2035⁴⁰) zusammengestellt. Diese Kraftwerke summieren sich auf eine installierte elektrische Leistung von rund 3 GW.

In einem zweiten Schritt werden noch kleinere KWK-Anlagen bzw. BHKW-Motorenkraftwerke aus dem genehmigten Szenariorahmen des Netzentwicklungsplans Strom 2037/2045 mit einer installierten elektrischen Leistung von rund 600 MW ergänzt. Die danach noch fehlende Kraftwerksleistung wird in einem abschließenden dritten Schritt proportional zur Wärmenetznachfrage hinzugefügt. Für das UBA-Szenario werden aufgrund der geringen Gesamtleistung nur kleine KWK-Anlagen unterstellt (Tabelle 4-1, Tabelle 7-5, Tabelle 7-6 und Tabelle 7-7).

Tabelle 4-1: Angenommene Wasserstoff-Kraftwerke in Baden-Württemberg in den skalierten Zielszenarien

Name / Standort des Kraftwerks	Region	Ariadne-Szenario	Agora-Szenario	UBA-Szenario
Altbach/Deizisau ⁴¹	Stuttgart	680 MW _{el} 180 MW _{th}	680 MW _{el} 180 MW _{th}	
Stuttgart-Münster ⁴²	Stuttgart	160 MW _{el} 320 MW _{th}	160 MW _{el} 320 MW _{th}	
Heilbronn ⁴³	Heilbronn-Franken	680 MW _{el} 190 MW _{th}	750 MW _{el} 190 MW _{th}	
GKM 6, 7, 8 und 9, Mannheim	Rhein-Neckar	850 MW _{el} 425 MW _{th}	850 MW _{el} 425 MW _{th}	

www.enbw.com/projekte/api/processingChain?repositoryItemGlobalId=energie_wasser.Bestehende+Wasserbauwerke.energie%3Aeebw_wasser_bestand.sel&conditionValues-SetHash=3EB57DC&selector=energie_wasser.Bestehende+Wasserbauwerke.energie%3Aeebw_wasser_bestand.sel&sourceOrderAsc=false

³⁹ <https://www.enbw.com/unternehmen/presse/enbw-grossauftrag-gud-anlagen.html>

⁴⁰ https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/Szenariorahmen_2035_Kraftwerksliste_1.pdf

⁴¹ <https://www.enbw.com/unternehmen/konzern/energieerzeugung/neubau-und-projekte/gas-und-dampfturbinenanlage-gud-altbach-deizisau/>

⁴² <https://www.enbw.com/unternehmen/konzern/energieerzeugung/neubau-und-projekte/kraftwerk-stuttgart-muenster/>

⁴³ <https://www.enbw.com/unternehmen/konzern/energieerzeugung/neubau-und-projekte/kraftwerk-heilbronn/>

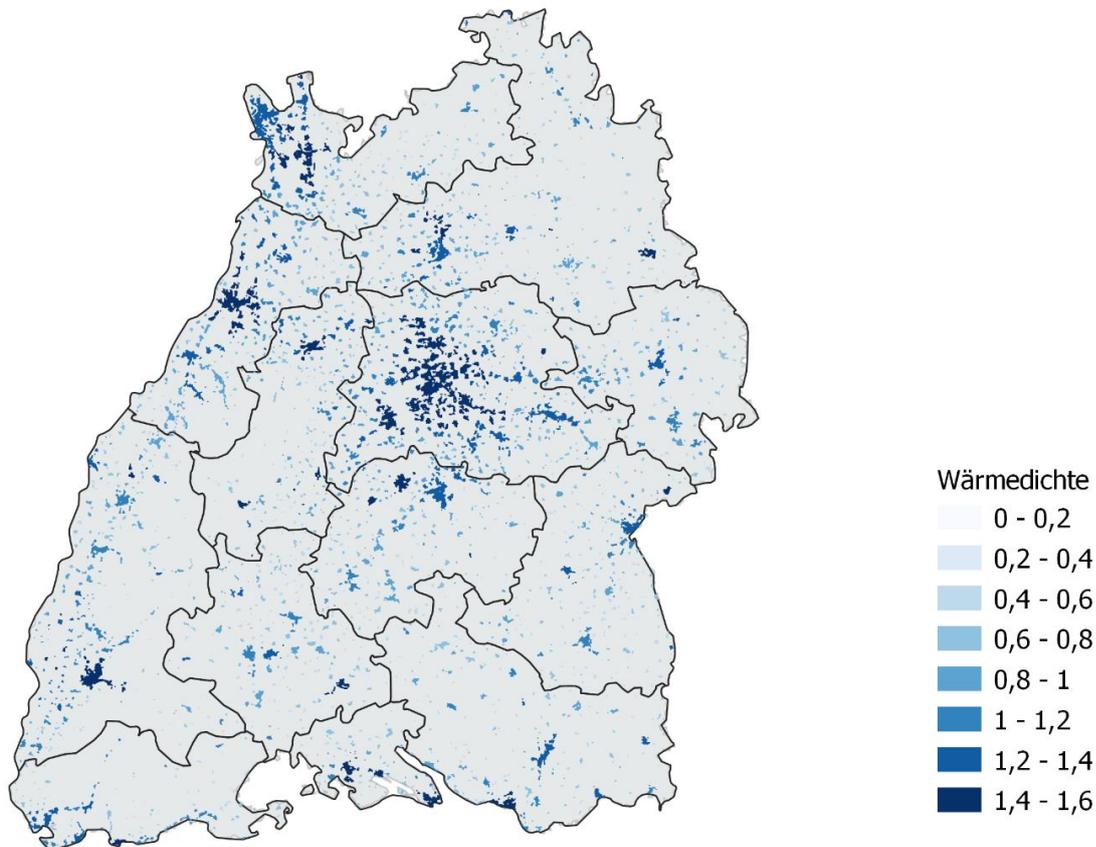
RDK 7 und 8, Karlsruhe	Mittlerer Oberrhein	675 MW _{el} 338 MW _{th}	675 MW _{el} 338 MW _{th}	
Kleine KWK-Anlagen / BHKW Motorenkraftwerke bis 50 MW _{el}	gemäß NEP Szenariorahmen 2037/2045	600 MW _{el} 600 MW _{th}	600 MW _{el} 600 MW _{th}	600 MW _{el} 600 MW _{th}
Generische KWK-Anlagen	Proportional zur Wärmenetznachfrage	655 MW _{el} 655 MW _{th}	3455 MW _{el} 3455 MW _{th}	400 MW _{el} 400 MW _{th}
Baden-Württemberg		4,3 GW_{el} 3,5 GW_{th}	7,1 GW_{el} 6,3 GW_{th}	1,0 GW_{el} 1,0 GW_{th}

Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

4.1.9 Regionalisierung der Nah- und Fernwärmenachfrage

Für die Regionalisierung der Nah- und Fernwärmenachfrage auf die zwölf Regionen Baden-Württembergs wird ein GIS-basiertes Modell des Öko-Instituts angewendet. Mit Hilfe geographischer Daten zu existierenden Nah- und Fernwärmenetze sowie zur Wärmedichte werden mögliche Nah- und Fernwärmegebiete identifiziert und die zukünftige Nah- und Fernwärmenachfrage räumlich verteilt. Dabei wird sowohl die Verdichtung und der Ausbau bestehender Netze als auch der Bau neuer Netze modelliert. Darüber hinaus werden auch Potenzialanalysen zur Wärmebereitstellung innerhalb der Wärmenetze mit erneuerbaren Energien durchgeführt (vgl. Abschnitt 4.2.3).

Abbildung 4-7: Räumliche Verteilung der Wärmenachfragen (Wärmedichte) in Baden-Württemberg

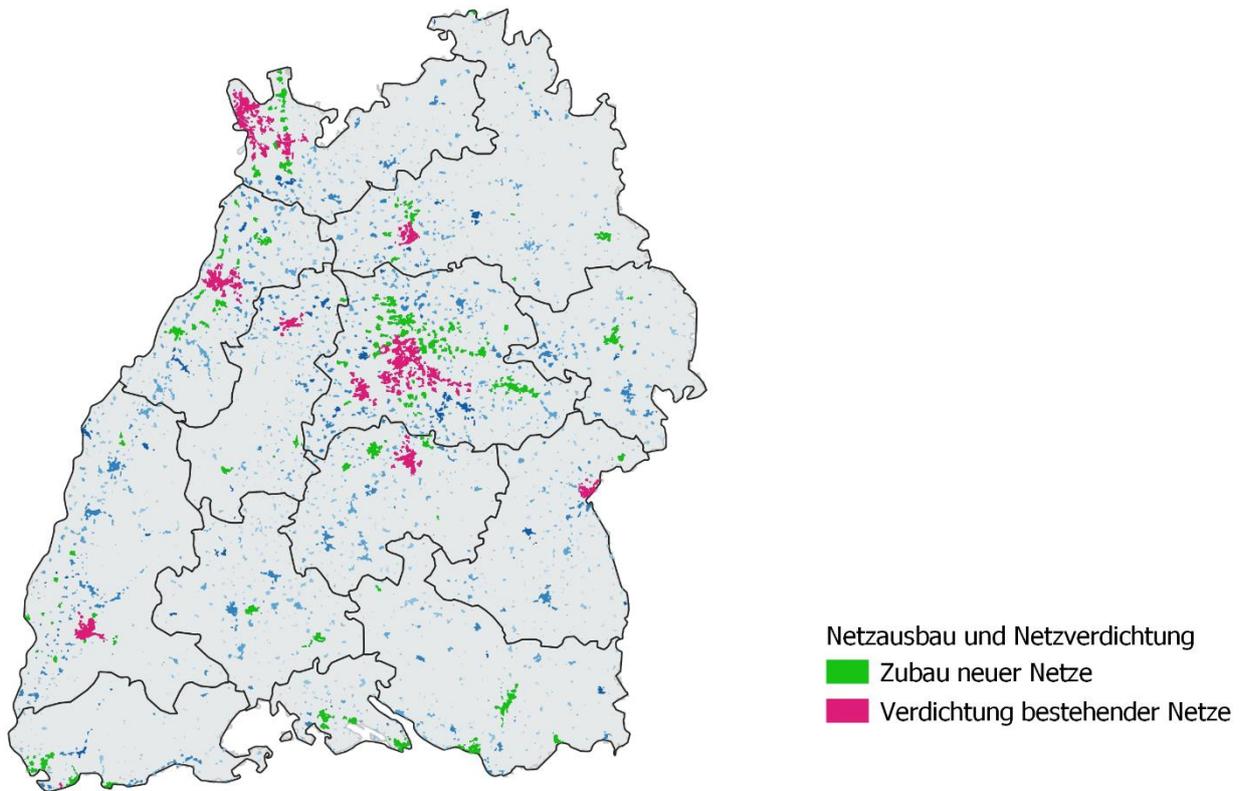


Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnungen), Einheit der Wärmedichte: [TJ/ha]

Für den wirtschaftlichen Bau und Betrieb von Wärmenetzen sind die Wärmedichten entscheidend. Zum einen können von der Leitungslänge abhängige Verluste reduziert werden, wenn auf möglichst kleiner Distanz viel Wärme nachgefragt wird. Zum anderen kann auch dann eine Wärmemindestabnahme gewährleistet werden, wenn aufgrund steigender Sanierungsaktivität die Wärmenachfrage sinkt. Durch die Berücksichtigung bestehender Netze werden auch die Potenziale erfasst, die sich mit der Anschlussverdichtung in bestehenden Versorgungsgebieten verbinden. Abbildung 4-7 zeigt die Verteilung der Wärmenachfragen für Baden-Württemberg. Je dunkler die Einfärbung ist, desto höher ist die Wärmedichte.

Bereits existierende Wärmenetze werden abhängig vom bisherigen Anschlussgrad und der Wärmedichte weiter verdichtet und ausgebaut. Neue Netze werden vor allem in Gebiete mit hohen Wärmedichten verteilt. Abbildung 4-8 zeigt das Modellergebnis für den Zubau neuer Netze und die Verdichtung bestehender Netze im Jahr 2040 für das auf Agora-Szenario-BW-2040, welches die höchste Nachfrage nach Nah- und Fernwärme in allen drei Zielszenarien für Baden-Württemberg aufweist. In Rot sind bestehende Wärmenetze dargestellt, die ausgebaut und nachverdichtet werden. Grün eingefärbt sind neu gebaute Wärmenetze.

Abbildung 4-8: Verdichtung bestehender und Zubau neuer Wärmenetze in Baden-Württemberg für das Agora-Szenario-BW-2040



Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnungen)

4.2 Ergebnisse der Regionalisierung auf die zwölf Regionen in Baden-Württemberg

4.2.1 Installierte Erzeugungskapazitäten zur Stromerzeugung

Die installierten Erzeugungskapazitäten zur Stromerzeugung in den zwölf Regionen ergeben sich aus dem zugrundeliegenden Energieträger-Mix in Baden-Württemberg (vgl. Abschnitt 3.3.4 bzw. Abbildung 3-9) und den gewählten Verteilschlüsseln für die einzelnen Technologien und Energieträger (vgl. Abschnitte 4.1.3 bis 4.1.8).

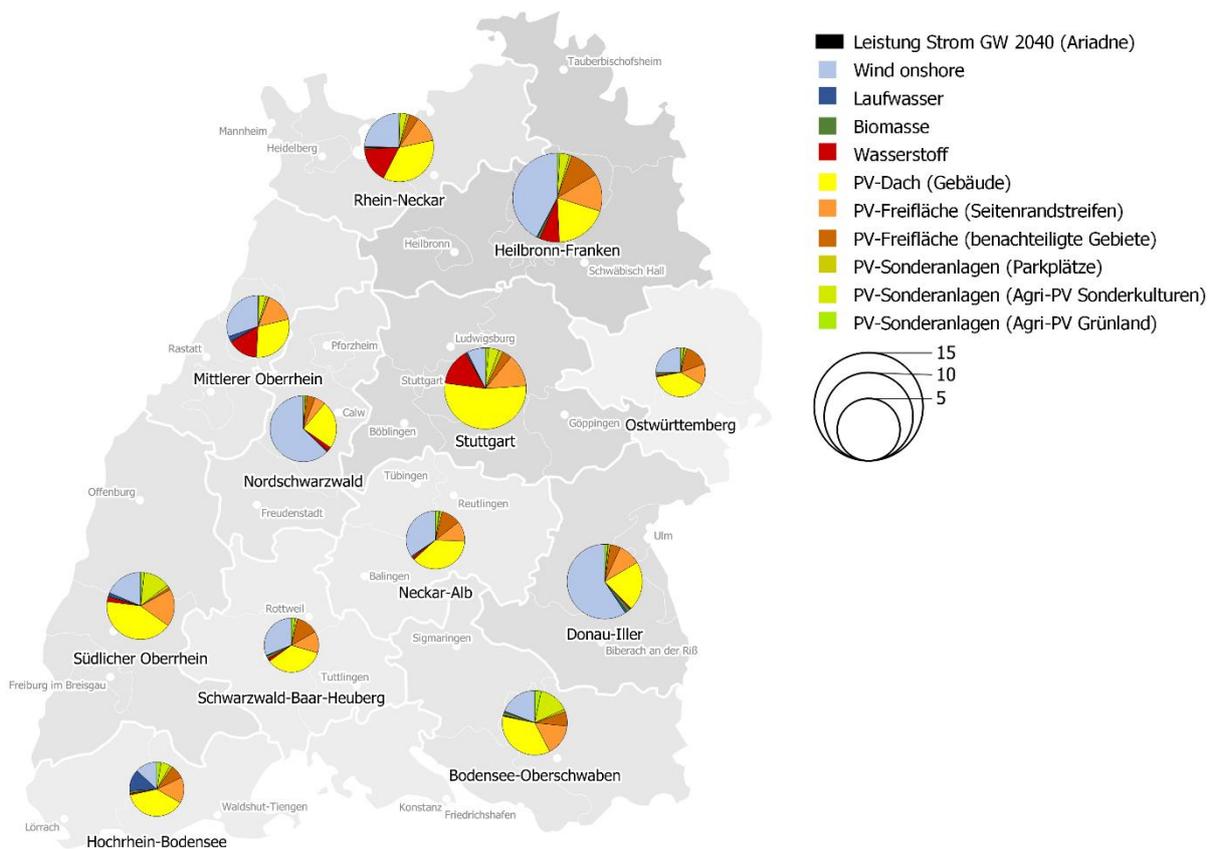
Da das **Ariadne-Szenario-BW-2040** die höchste Wind-onshore-Kapazität für Baden-Württemberg beinhaltet, sind auch die installierten Leistungen für Wind-onshore-Anlagen in den einzelnen Regionen am höchsten. Die in den jeweiligen Regionen verfügbaren Flächenpotenziale für Windenergieanlagen werden in diesem Szenario zu 84 % genutzt. Gemäß der regionalen Verteilung der Flächenpotenziale sind in den Regionen Heilbronn-Franken, Nordschwarzwald und Donau-Iller rund 60 % der installierten Kapazitäten aus Windenergieanlagen lokalisiert (Abbildung 4-9 bzw. Tabelle 7-6). Dies entspricht jeweils rund 4,3 GW in den Regionen Heilbronn-Franken und Donau-Iller sowie 3,5 GW in der Region Nordschwarzwald. In diesen Regionen sind mit 4,1 % (Region Heilbronn-Franken) bis 6,7 % (Region Nordschwarzwald) entsprechend hohe Flächenanteile für Windenergie erforderlich. Im Landesdurchschnitt werden 2,7 % der Landesfläche für Windenergieanlagen

benötigt. Auf fünf Regionen entfallen weniger als 1,8 % der Fläche für Windenergieanlagen (Stuttgart, Hochrhein-Bodensee, Südlicher Oberrhein, Bodensee-Oberschwaben und Ostwürttemberg).

Der Flächenbedarf für PV-Freiflächenanlagen beläuft sich im Ariadne-Szenario-BW-2040 auf durchschnittlich 0,4 % der Landesfläche. In den Regionen Heilbronn-Franken, Ostwürttemberg, Bodensee-Oberschwaben und Rhein-Neckar werden 0,4 % bis 0,5 % der Fläche für PV-Freiflächenanlagen genutzt. In den anderen Regionen sind es 0,3 % bis 0,4 % (Tabelle 7-8). Der räumliche Verteilungsschlüssel für PV-Freiflächenanlagen ist somit deutlich ausgeglichener als der für Windenergieanlagen.

In Summe werden 3,1 % der Landesfläche für Windenergieanlagen und PV-Freiflächenanlagen benötigt. Die Regionen Stuttgart, Hochrhein-Bodensee, Südlicher Oberrhein und Bodensee-Oberschwaben bleiben dabei sowohl unter dem Landesdurchschnitt als auch unter dem derzeitigen Landesziel von 2 % der Landesfläche. Die anderen Regionen liegen zum Teil deutlich darüber, vor allem die Regionen Donau-Iller, Nordschwarzwald und Heilbronn-Franken. Eine gleichmäßigere Flächenbereitstellung über alle Regionen ließe sich erreichen, wenn die verfügbaren Flächenpotenziale in einem regional unterschiedlichen Ausmaß genutzt würden.

Abbildung 4-9: Installierte Erzeugungskapazitäten zur Stromerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Ariadne-Szenario-BW-2040



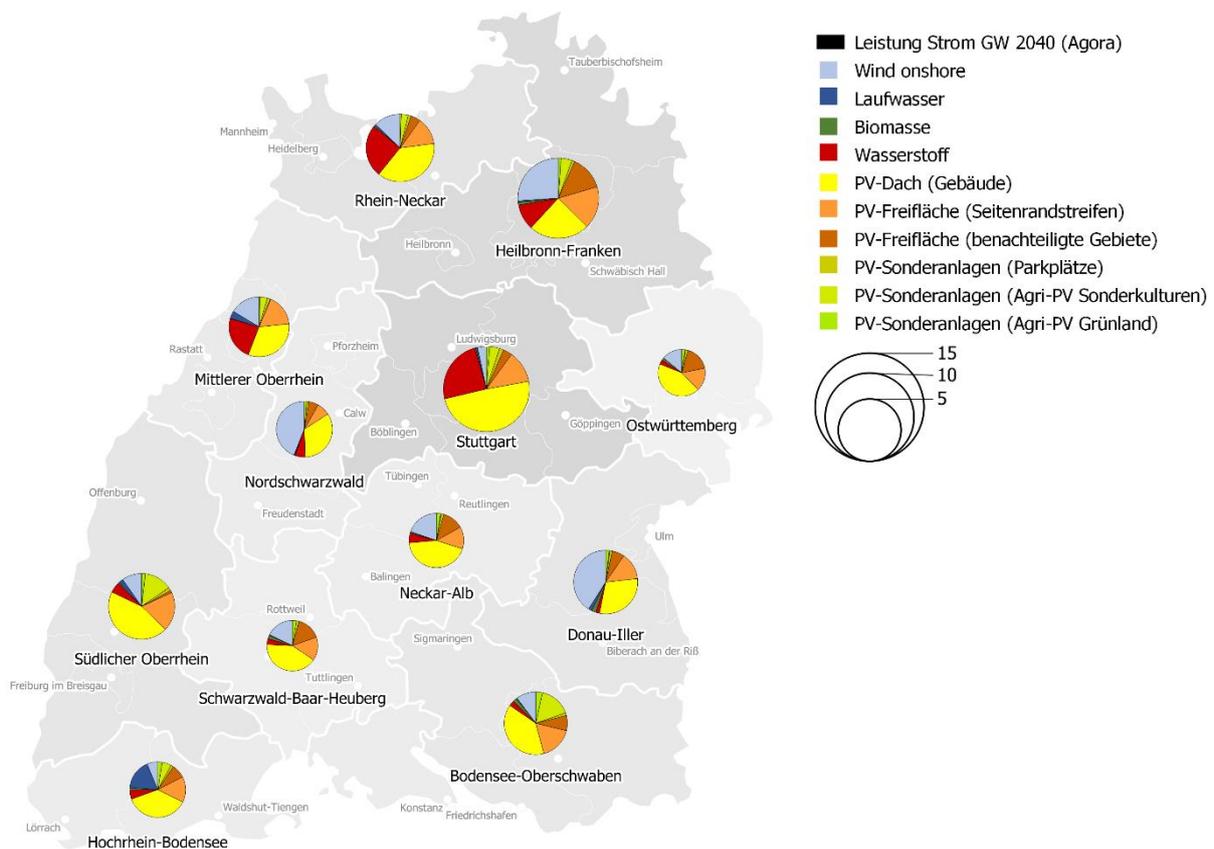
Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnungen)

Während die Regionen Donau-Iller, Nordschwarzwald und Heilbronn-Franken windgeprägt sind, weisen die Regionen Bodensee-Oberschwaben, Südlicher Oberrhein, Stuttgart und Ostwürttemberg

mit 70 % bis 80 % der installierten Kapazitäten einem hohen PV-Anteil auf. Die Wasserstoff-Kraftwerke sind vor allem in den Regionen Stuttgart, Rhein-Neckar, Mittlerer Oberrhein und Heilbronn-Franken lokalisiert.

Das **Agora-Szenario-BW-2040** weist im Vergleich zum Ariadne-Szenario-BW-2040 bei einer vergleichbaren PV-Leistung nur die Hälfte an Wind-onshore-Kapazitäten auf. Zudem beinhaltet das Agora-Szenario die höchste Leistung bei Wasserstoff-Kraftwerken (Abbildung 4-10 bzw. Tabelle 7-6). Dadurch verschiebt sich der Mix an installierten Stromerzeugungskapazitäten in Richtung PV und Wasserstoff-Kraftwerken, was sich besonders in den winddominierten Regionen aus dem Ariadne-Szenario bemerkbar macht. Die in den jeweiligen Regionen verfügbaren Flächenpotenziale für Windenergieanlagen werden im Agora-Szenario zu 42 % genutzt, was einem benötigten Flächenanteil von 1,4 % der Landesfläche entspricht.

Abbildung 4-10: Installierte Erzeugungskapazitäten zur Stromerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Agora-Szenario-BW-2040



Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnungen)

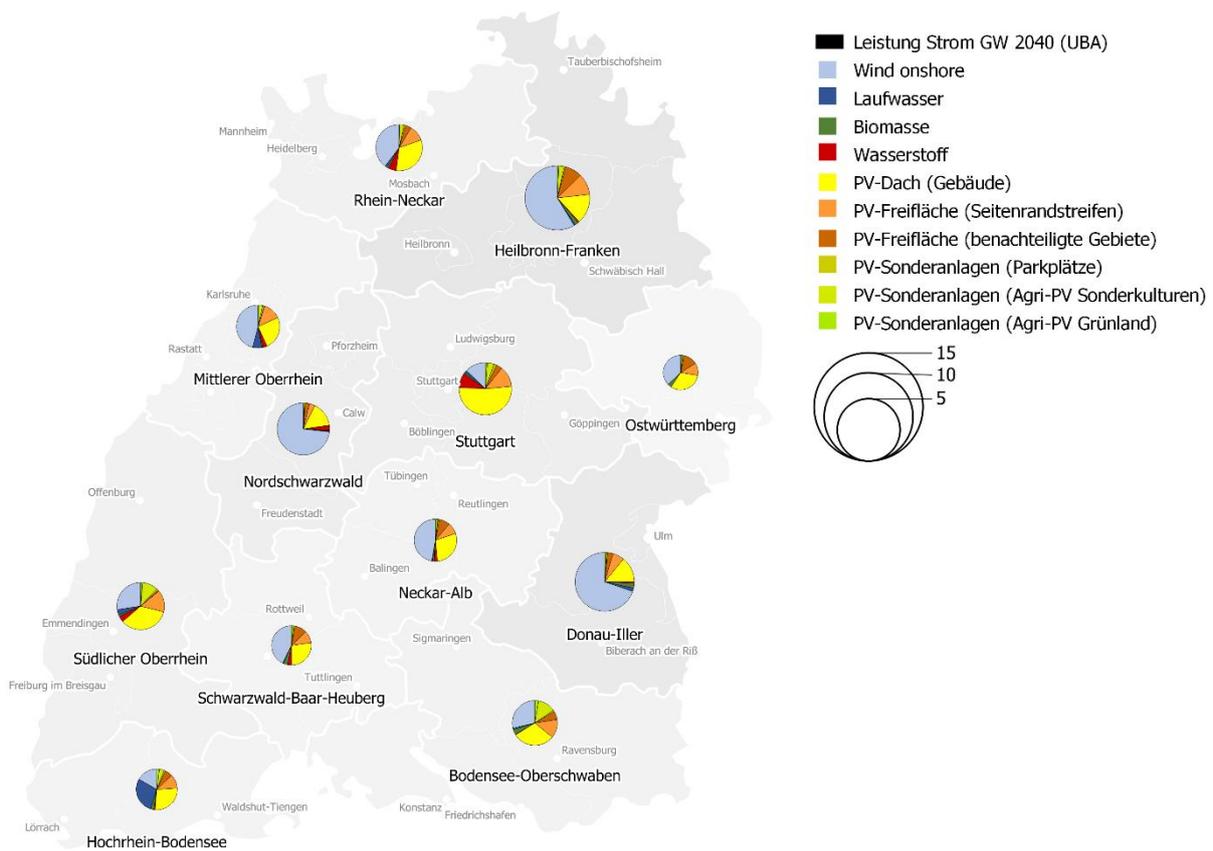
Der Flächenbedarf für PV-Freiflächenanlagen liegt, wie auch beim Ariadne-Szenario, bei 0,4 % der Landesfläche. In Summe werden somit 1,8 % der Landesfläche für Windenergie- und PV-Freiflächenanlagen genutzt. Die Regionen Donau-Iller (3,7 %), Nordschwarzwald (3,6 %), Heilbronn-Franken (2,6 %) und Mittlerer Oberrhein (2,0 %) liegen dabei über dem durchschnittlichen Flächenbedarf des Agora-Szenarios und erreichen das derzeitige Flächenziel des Landes Baden-Württemberg in Höhe von 2 % (Tabelle 7-8).

Das Agora-Szenario ist das Szenario mit der höchsten installierten Leistung von Wasserstoff-Kraftwerken. Diese sind vor allem in den Regionen Stuttgart, Rhein-Neckar, Mittlerer Oberrhein und Heilbronn-Franken lokalisiert.

Das **UBA-Szenario-BW-2040** ist dadurch gekennzeichnet, dass es die jeweils geringste installierte Leistung bei PV-Anlagen (17 GW) und bei Wasserstoff-Kraftwerken (1,0 GW) aufweist. Bei Wind-onshore-Anlagen liegt es mit 16 GW zwischen dem Ariadne-Szenario (22 GW) und dem Agora-Szenario (11 GW) (vgl. Abbildung 3-9). Entsprechend liegt auch der Flächenbedarf für Windenergieanlagen bei 2,0 % der Landesfläche, für PV-Freiflächenanlagen sind es 0,2 % (Tabelle 7-8). Das verfügbare Flächenpotenzial für Windenergieanlagen wird im UBA-Szenario zu 61 % genutzt.

Durch den hohen Wind-onshore-Anteil ergeben sich, wie auch im Ariadne-Szenario, regional unterschiedliche Flächenanteile. Während die Regionen Donau-Iller und Nordschwarzwald 5,0 % der Fläche für Windenergie- und PV-Freiflächenanlagen bereitstellen, sind es in den Regionen Stuttgart und Hochrhein-Bodensee nur 0,7 %.

Abbildung 4-11: Installierte Erzeugungskapazitäten zur Stromerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das UBA-Szenario-BW-2040



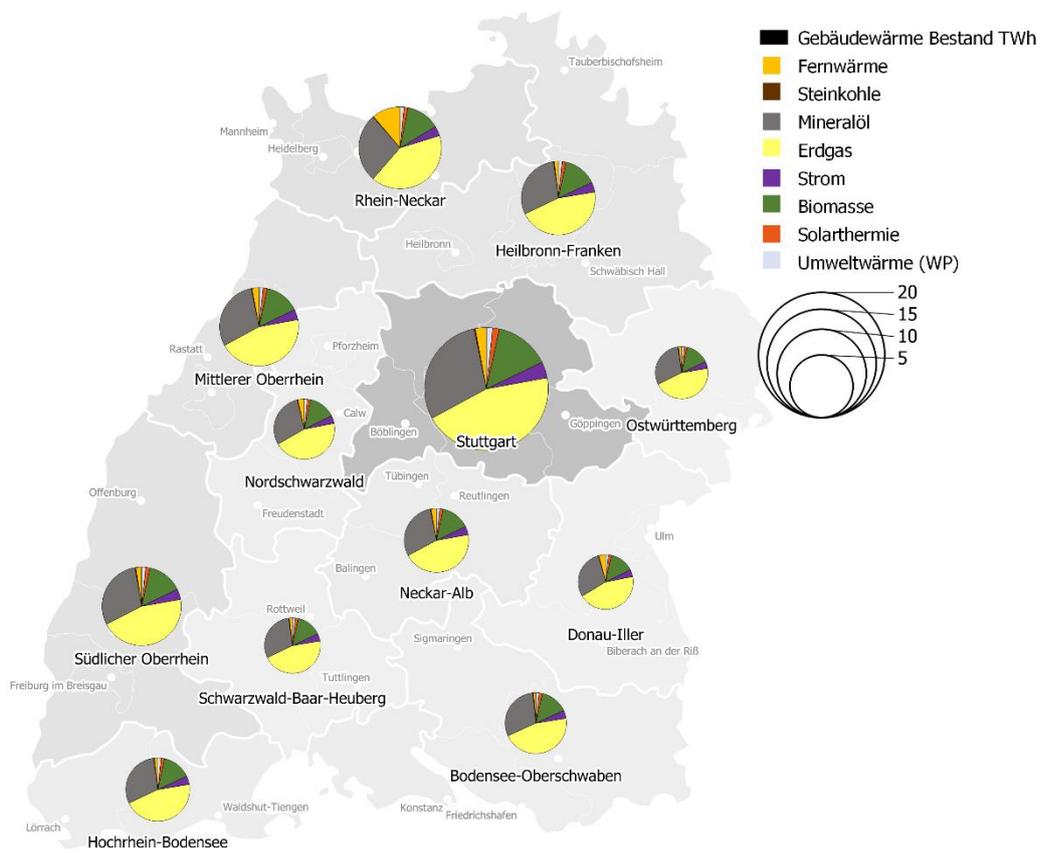
Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnungen)

Die Wasserstoff-Kraftwerke sind überwiegend in den Regionen Stuttgart, Rhein-Neckar, Südllicher Oberrhein und Nordschwarzwald lokalisiert (Abbildung 4-11 bzw. Tabelle 7-7).

4.2.2 Energieträgerspezifische Endenergienachfrage für Raumwärme und Warmwasser in den Sektoren Haushalte und GHD

Im Jahr 2019 dominierten dezentrale Gas- und Ölkessel und decken gemeinsam 71 % der Wärmenachfrage (Abbildung 4-12). Im klimaneutralen Zieljahr 2040 sind diese beiden Positionen ganz verschwunden. Regionen mit hohen Wärmedichten weisen einen größeren Anteil an Nah- und Fernwärme auf (vgl. Abschnitt 4.1.9). Vor allem diese Regionen sollten den Aus- und Neubau von Wärmenetzen vorantreiben. Regionen mit schlechteren Bedingungen für die Nutzung von Nah- und Fernwärme müssen dagegen verstärkt auf den Ausbau von Wärmepumpen in Gebäuden setzen. Biomasse kann für die Objektversorgung dort dezentral eingesetzt werden, wo weder Wärmepumpen noch Wärmenetze effizient genutzt werden können. Die Zahlenwerte zu Abbildung 4-12 sind im Anhang in Tabelle 7-9 zu finden.

Abbildung 4-12: Energieträgerspezifische Endenergienachfrage für Raumwärme und Warmwasser in den Sektoren Haushalte und GHD in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Jahr 2019



Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnungen)

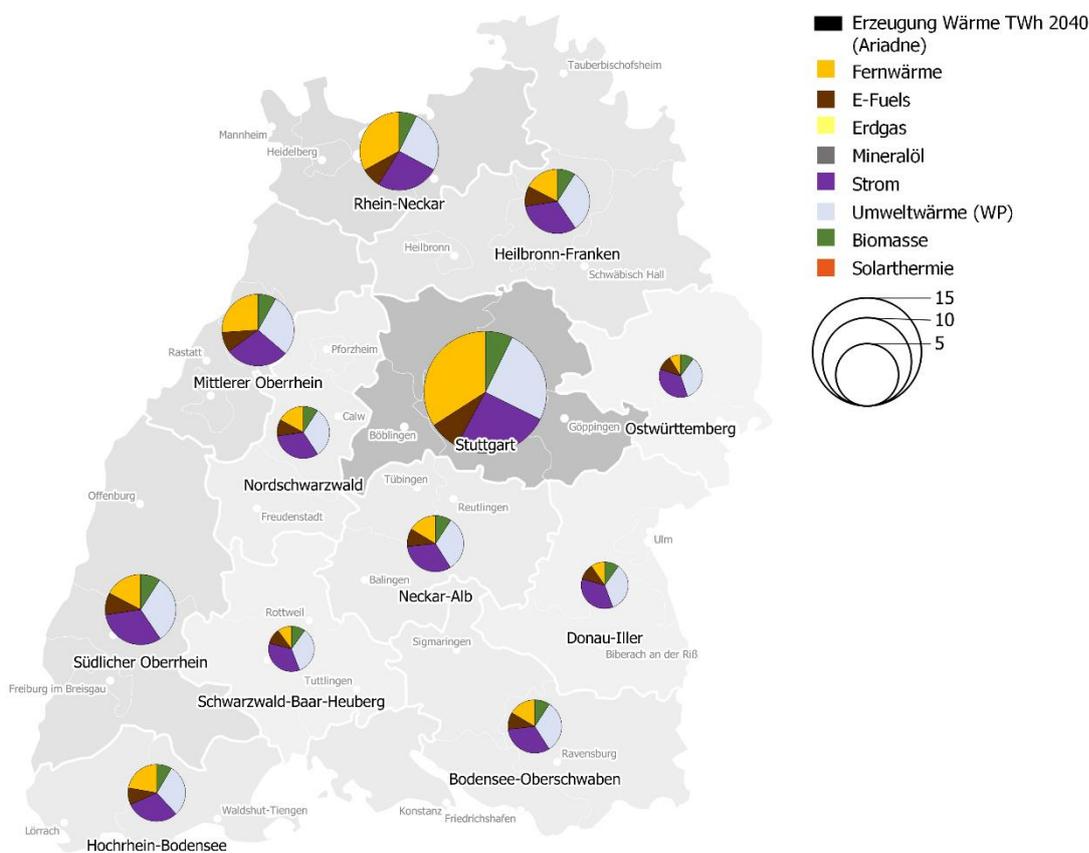
Im Vergleich zum Jahr 2019 wird zunächst deutlich, dass das **Ariadne-Szenario-BW-2040** eine um rund 34 % geringere Endenergienachfrage für Raumwärme und Warmwasser aufweist. Dies ist in erster Linie auf die energetische Sanierung der Gebäude zurückzuführen (vgl. Abschnitt 0).

Darüber hinaus ist auch der Energieträgermix ein anderer: Im Durchschnitt werden rund 60 % der Endenergienachfrage für Raumwärme und Warmwasser durch Wärmepumpen und weitere

elektrische Wärmequellen in der Objektversorgung bereitgestellt. Der Energieträger Solarthermie ist für die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser im Ariadne-Szenario-BW-2040 nicht enthalten (gleiches gilt für das UBA-Szenario-BW-2040). Besonders ausgeprägt ist der Rückgang der energetischen Biomassenutzung in der dezentralen Objektversorgung. Im Vergleich zu 2019 nimmt er im Ariadne-Szenario-BW-2040 um 60 % ab.

Nah- und Fernwärme leistet im Zieljahr im Landesdurchschnitt einen Beitrag in Höhe von rund 23 % zur Wärmeversorgung. Knapp zwei Drittel der Nah- und Fernwärmeversorgung in Baden-Württemberg sind dabei in den Regionen Stuttgart, Rhein-Neckar und Mittlerer Oberrhein lokalisiert (Abbildung 4-13 sowie Tabelle 7-10 im Anhang).

Abbildung 4-13: Endenergienachfrage für Raumwärme und Warmwasser in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Ariadne-Szenario-BW-2040



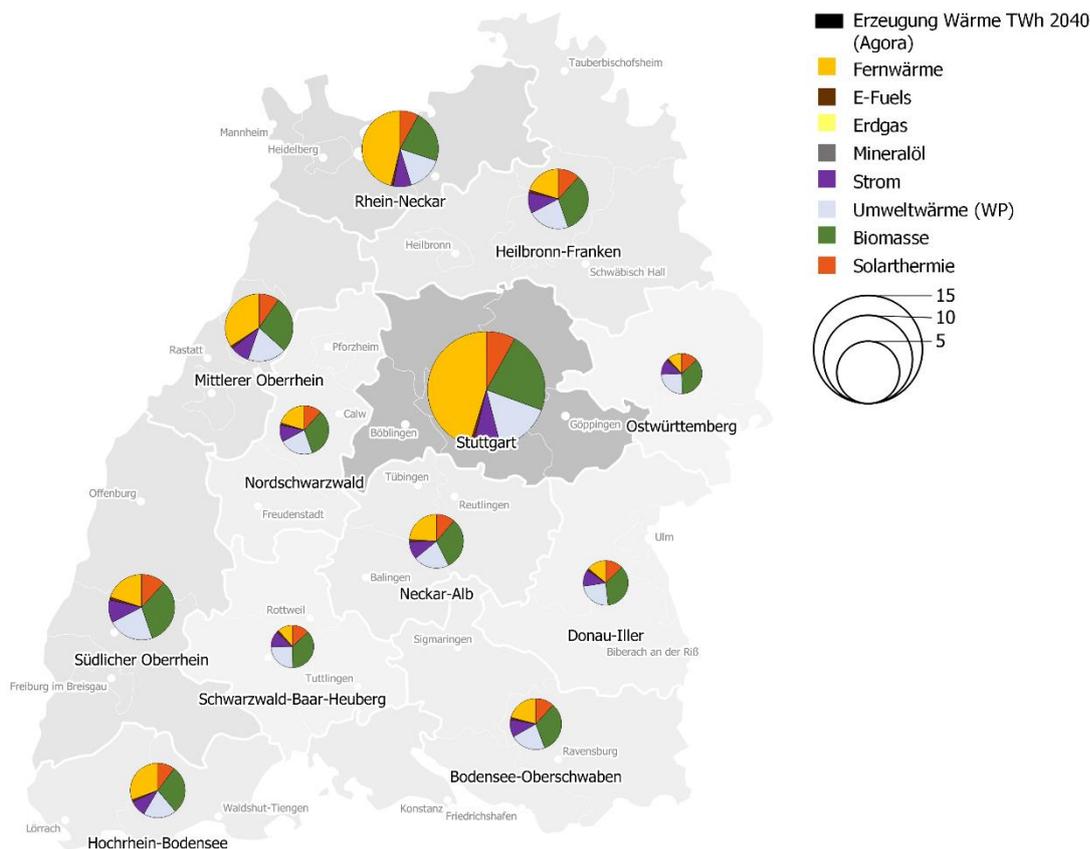
Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnungen)

Im Vergleich zum Ariadne-Szenario-BW-2040 wird deutlich, dass das **Agora-Szenario-BW-2040** eine etwas geringere Endenergienachfrage für Raumwärme und Warmwasser aufweist (Minderung um 40 % gegenüber 2019) und zudem am stärksten auf den Energieträger Biomasse zur Objektversorgung setzt (vgl. Abschnitt 0).

Nah- und Fernwärme leistet im Zieljahr im Landesdurchschnitt einen Beitrag in Höhe von rund 30 % zur Wärmeversorgung, wobei in den Regionen Stuttgart, Rhein-Neckar und Mittlerer Oberrhein knapp zwei Drittel der Nah- und Fernwärmenachfrage von Baden-Württemberg lokalisiert ist. Der Energieträgermix in den Regionen Stuttgart und Rhein-Neckar weist dabei einen Nah- und

Fernwärmeanteil von 40 % auf, in der Region Mittlerer Oberrhein sind es 34 %. Die vergleichsweise dünn besiedelten Regionen Ostwürttemberg, Schwarzwald-Baar-Heuberg und Donau-Iller haben einen Nah- und Fernwärmeanteil von jeweils rund 15 % (Abbildung 4-14 sowie Tabelle 7-11 im Anhang).

Abbildung 4-14: Endenergienachfrage für Raumwärme und Warmwasser in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Agora-Szenario-BW-2040



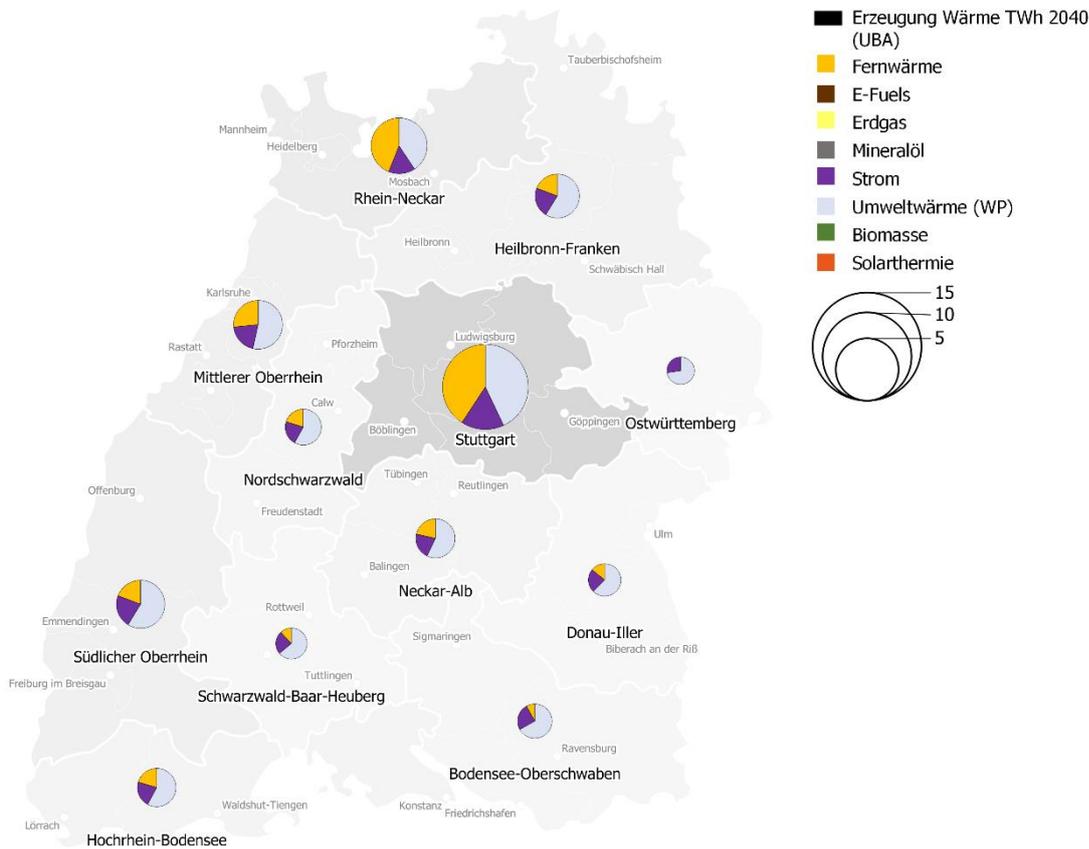
Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnungen)

Im Vergleich zu den anderen beiden Zielszenarien wird deutlich, dass das **UBA-Szenario-BW-2040** die deutlich geringste Endenergienachfrage für Raumwärme und Warmwasser aufweist und zudem am stärksten auf Wärmepumpen setzt. Diese Entwicklung steht in einem direkten Zusammenhang, da sich eine Wärmepumpe umso mehr für die Objektversorgung eignet, je geringer die Endenergienachfrage für Raumwärme und Warmwasser in den Gebäuden ist. Eine weitere Besonderheit im UBA-Szenario-BW-2040 ist zudem, dass vollständig auf den Energieträger Biomasse in der dezentralen Wärmeerzeugung verzichtet wird (vgl. Abschnitt 0). Darüber hinaus ist der Energieträger Solarthermie für die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser nicht enthalten. Entsprechend setzt sich der Energieträgermix nur aus Wärmepumpen und Nah- und Fernwärme zusammen.

Der Nah- und Fernwärmeanteil an der Endenergienachfrage für Raumwärme und Warmwasser in den Sektoren Haushalte und GHD beträgt im Landesdurchschnitt rund 26 %. Die restlichen 74 % der Wärmenachfrage werden von dezentralen Wärmepumpen in der Objektversorgung mit einem COP von 3 erzeugt. Aufgrund der geringen Nah- und Fernwärmenachfrage in Baden-Württemberg

und aufgrund der geringen Wärmedichte in der Region Ostwürttemberg werden im UBA-Szenario-BW-2040 in dieser Region keine Nah- und Fernwärmenetze gebaut (Abbildung 4-15 sowie Tabelle 7-12 im Anhang).

Abbildung 4-15: Endenergienachfrage für Raumwärme und Warmwasser in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das UBA-Szenario-BW-2040



Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnungen)

4.2.3 Potenziale und installierte Erzeugungskapazitäten zur Nah- und Fernwärmeerzeugung

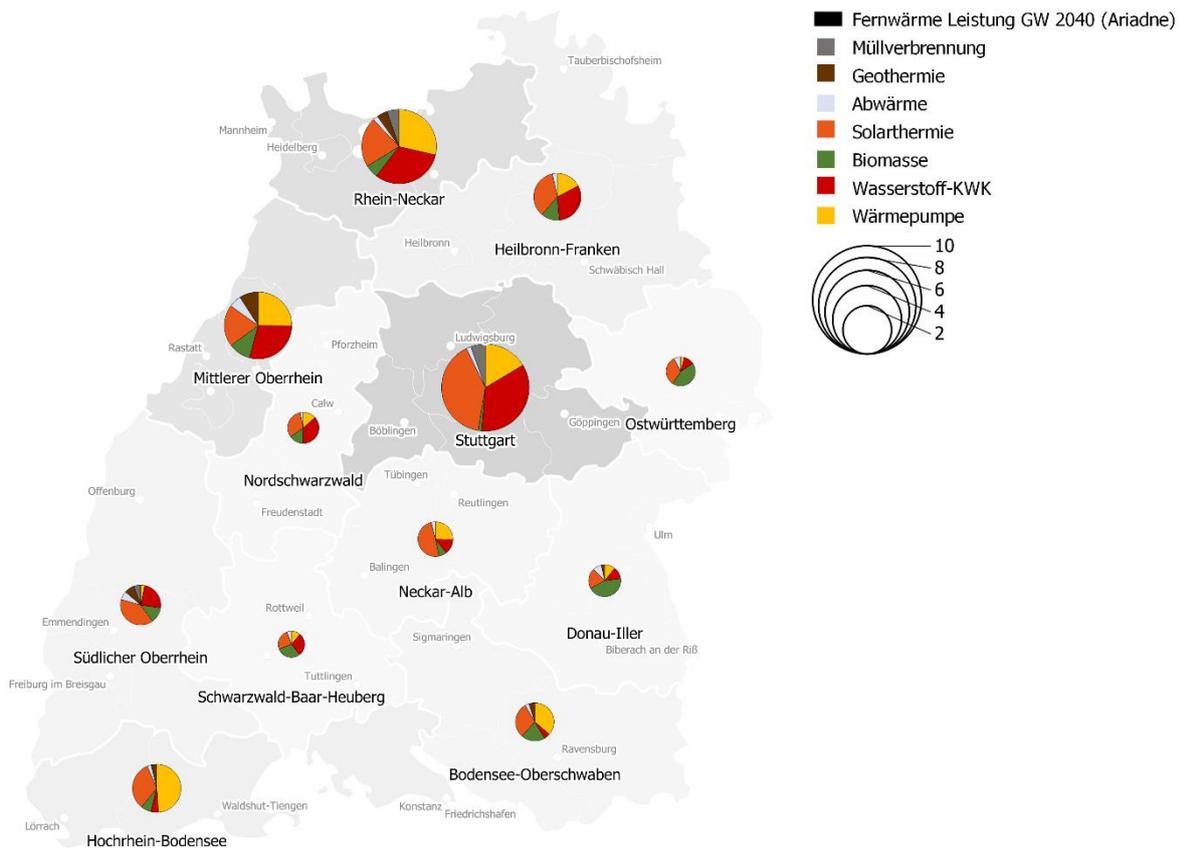
Auf der Angebotsseite stehen für die in Abschnitt 4.1.9 identifizierten Nah- und Fernwärmegebiete die von einem regionalen Angebot abhängigen Energieträger Tiefengeothermie, Freiflächen-Solarthermie, Großwärmepumpen und Abwärme zur Verfügung. Darüber hinaus werden noch die bestehenden Müllverbrennungsanlagen in Stuttgart, Mannheim, Göppingen, Böblingen und Freiburg sowie Biomasse- und Wasserstoff-Kraftwerke mit Kraft-Wärme-Kopplung berücksichtigt (der regionale Verteilschlüssel ist in den Abschnitten 4.1.7 und 4.1.8 dokumentiert).

Für die Energieträger Tiefengeothermie, Abwärme und Freiflächen-Solarthermie wird ein erschließbares Potenzial in Baden-Württemberg in Höhe von jeweils 3 TWh_{th} unterstellt. Die Bandbreite in der Literatur liegt für Tiefengeothermie bei 2,5 TWh_{th} (Kelm et al. 2022, S. 90) bis 3,7 TWh_{th} (Nitsch und Magosch 2021, S. 24). Das größte geothermische Potenzial liegt dabei entlang des Oberrheingrabens und in den Ausläufern des Molassebeckens. Für industrielle Abwärme wird in der Literatur

ein Bereich von 1,5 TWh_{th} (ifeu et al. 2019, S. 109) bis 5,4 TWh_{th} (UMBW 2020, S. 8) ausgewiesen. Bei Freiflächen-Solarthermie reicht die Bandbreite von 0,9 TWh_{th} (Kelm et al. 2022, S. 90) bis 4,3 TWh_{th} (Nitsch und Magosch 2021, S. 22).

Als installierte thermische Leistung werden für Geothermie-Anlagen 340 MW_{th}, für die Abwärmenutzung 380 MW_{th} und für Freiflächen-Solarthermie 3,2 GW_{th} berücksichtigt.

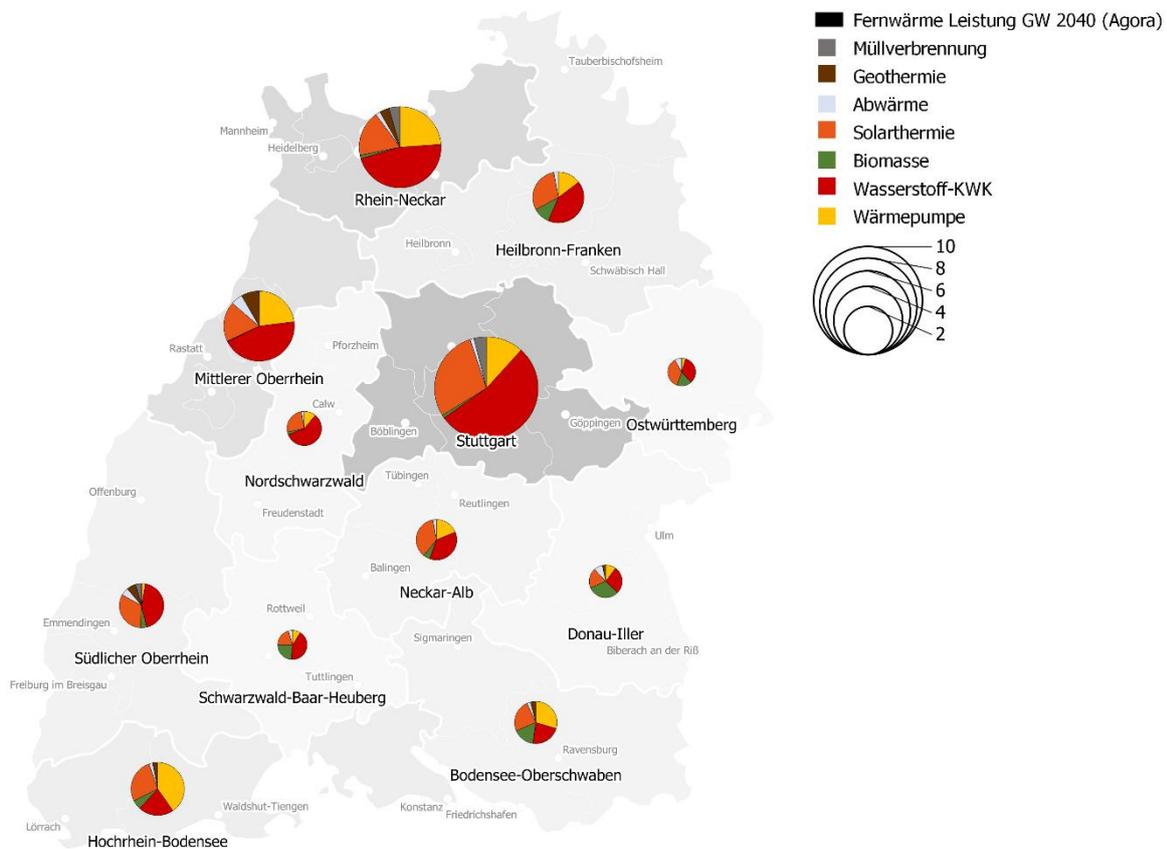
Abbildung 4-16: Erzeugungskapazitäten zur Nah- und Fernwärmeerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Ariadne-Szenario-BW-2040



Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnungen)

Darüber hinaus wurde mit einem GIS-basierten Tool des Öko-Instituts für Tiefengeothermie und Freiflächen-Solarthermie ein regionaler Verteilschlüssel gebildet und ein regional verfügbares Potenzial für Fluss-, See- und Abwasser-Wärmepumpen in Höhe von insgesamt 2,3 GW_{th} abgeschätzt. Regionen mit größeren Flüssen (v. a. entlang des Rheins) weisen dabei entsprechend auch ein größeres Potenzial für die Nutzung von Fluss-Wärmepumpen auf, wohingegen in Regionen mit größeren Städten ein größeres Potenzial für Abwasser-Wärmepumpen lokalisiert ist. See-Wärmepumpen gibt es entlang des Bodensees in den Regionen Hochrhein-Bodensee und Bodensee-Oberschwaben. Für Großwärmepumpen wird ein COP von 4 unterstellt (Ortner et al. 2021, S. 253–256).

Abbildung 4-17: Erzeugungskapazitäten zur Nah- und Fernwärmeerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württemberg für das Agora-Szenario-BW-2040



Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnungen)

Bei Biomasse unterscheiden sich die für die Nah- und Fernwärmeerzeugung verfügbaren Brennstoffmengen in den betrachteten Zielszenarien:

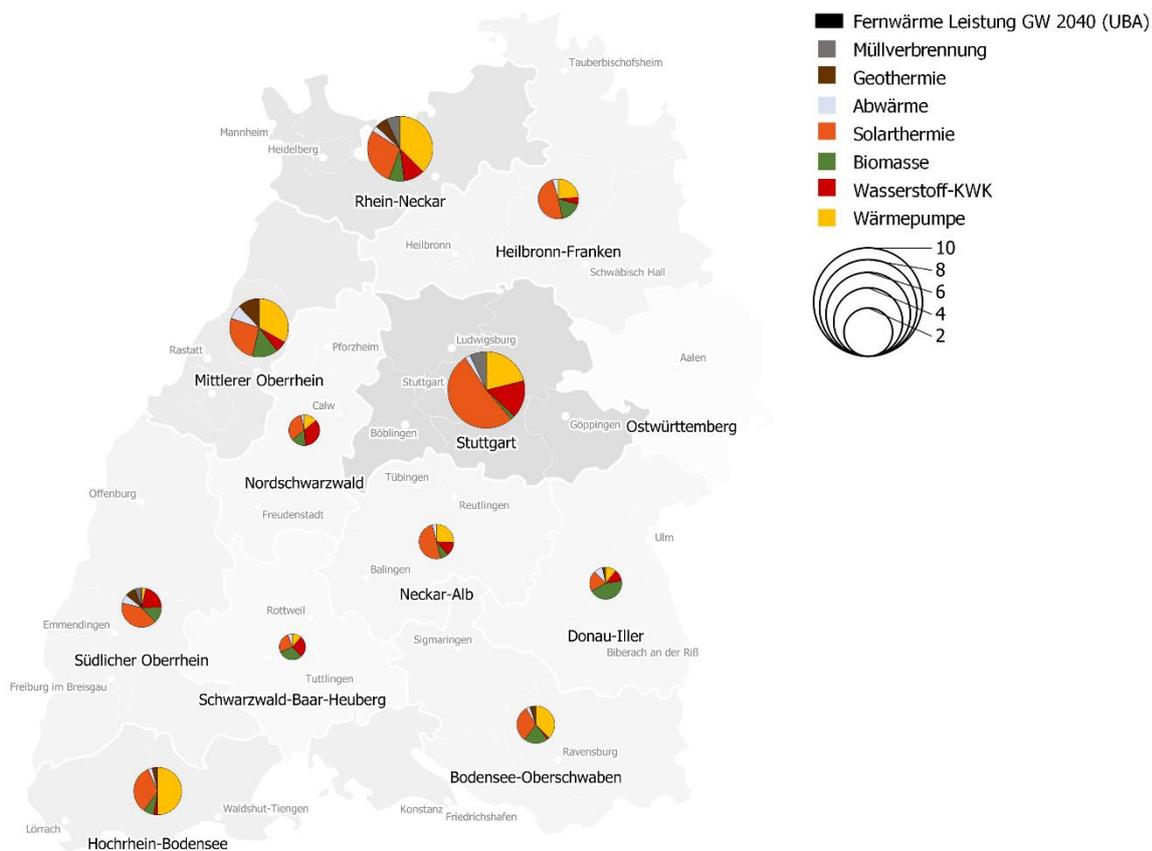
- Im Agora-Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2045“ entfallen für Deutschland rund 10 TWh Stromerzeugung und 11 TWh Nah- und Fernwärmeerzeugung auf den Energieträger Biomasse (Prognos et al. 2021, S. 32 und 37). Darüber hinaus wird feste Biomasse vorzugsweise in der Industrie und in privaten Haushalten zur Wärmeerzeugung genutzt. Aus diesem Grund wird unterstellt, dass die o. g. Strom- und Wärmemengen mit Biogas-BHKW erzeugt werden und davon 10 % auf Baden-Württemberg entfallen (d. h. rund 2,8 TWh Biogas vor Umwandlung in Strom und Wärme). Damit lassen sich 1,1 TWh Wärme aus Biomasse für Nah- und Fernwärmenetze erzeugen.
- Im Ariadne-Szenario „Technologie-Mix“ (REMIND-Modell) werden in Deutschland rund 30 TWh Primärbiomasse für die Stromerzeugung eingesetzt. Es wird unterstellt, dass davon 10 % auf Baden-Württemberg entfallen und zu einem Drittel als Biogas und zu zwei Drittel als feste Biomasse zur Verfügung stehen (d. h. 1 TWh Biogas und 2 TWh feste Biomasse vor Umwandlung in Strom und Wärme). Damit lassen sich 1,8 TWh Wärme aus Biomasse für Nah- und Fernwärmenetze erzeugen.

- Im UBA-Szenario „GreenSupreme“ werden in Deutschland rund 34 TWh Altholz und 4 TWh Biogas aus biogenen Reststoffen energetisch genutzt (Umweltbundesamt 2020, S. 47). Es wird unterstellt, dass davon 10 % auf Baden-Württemberg entfallen. Damit stehen 3,4 TWh feste Biomasse und 0,4 TWh Biogas für die Umwandlung in Strom und Wärme in Baden-Württemberg zur Verfügung. So lassen sich bis zu 2,5 TWh Wärme aus Biomasse für Nah- und Fernwärmenetze erzeugen.

Die Wärmeauskopplung aus Müllverbrennungsanlagen beläuft sich im Ariadne-Szenario-BW-2040 und im Agora-Szenario-BW-2040 auf jeweils 2,1 TWh_{th}, im UBA-Szenario-BW-2040 aufgrund von Suffizienz und Kreislaufwirtschaft auf 1,4 TWh_{th}. Die Sektorziel-Studie weist für den Zeitraum 2019 bis 2040 eine Wärmeauskopplung aus Müllverbrennungsanlagen von 1,4 TWh_{th} bis 3,1 TWh_{th} aus (Kelm et al. 2022, S. 90).

Abbildung 4-17, Abbildung 4-16 und Abbildung 4-18 zeigen den jeweils in den verschiedenen Regionen unterstellten Anlagenpark zur Nah- und Fernwärmeerzeugung für die drei ausgewählten und auf Baden-Württemberg skalierten Zielszenarien. Die Zahlenwerte zu den Kreisdiagrammen in den Karten sind in Tabelle 7-13, Tabelle 7-14 und Tabelle 7-15 zu finden.

Abbildung 4-18: Erzeugungskapazitäten zur Nah- und Fernwärmeerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württemberg für das UBA-Szenario-BW-2040



Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnungen)

4.2.4 Technologie- und Brennstoffmix der Nah- und Fernwärmeerzeugung

Der Technologie- und Brennstoffmix der Nah- und Fernwärmeerzeugung wird im Rahmen einer Einsatzoptimierung mit Hilfe des vom Öko-Institut entwickelten Strommarktmodells PowerFlex bestimmt.

PowerFlex ist ein Fundamentalmodell, welches das Stromangebot aus fluktuierenden erneuerbaren Energien sowie thermische Kraftwerke, Pumpspeicherkraftwerke, Batterien und flexible Stromverbraucher kostenminimal einsetzt, um die Stromnachfrage zu decken. Parallel dazu werden auch KWK-Kraftwerke, Heizwerke, Geothermie-Anlagen, Solarthermie-Anlagen, Großwärmepumpen, Heizkessel und Wärmespeicher kostenminimal eingesetzt, um die Nah- und Fernwärmefachfrage zu decken. Die zeitliche Auflösung beträgt eine Stunde, so dass für ein Jahr 8.760 Zeitschritte mit perfekter Voraussicht optimiert werden.

Im Rahmen dieser Studie wird für die zwölf Regionen in Baden-Württemberg jeweils ein aggregiertes Wärmenetz im Modell abgebildet. Jede Region ist dabei mit einem spezifischen Nah- und Fernwärmefachfrageprofil in stündlicher Auflösung und einem verfügbaren Anlagenpark ausgestattet (vgl. Abschnitt 4.2.3).

Für den Nah- und Fernwärmefachtransport werden Netzverluste in Höhe von 10 % der an die Endverbraucher abgegebenen Nah- und Fernwärme unterstellt. Heutige Nah- und Fernwärmefachnetze weisen rund 10 % bis 15 % Netzverluste auf (AGFW 2021), so dass für die Modellierung der Zielszenarien bereits Effizienzsteigerungen beim Nah- und Fernwärmefachtransport durch geringere Vorlaufemperaturen und bessere Isolierung der Leitungen angenommen werden.

Um den Einsatz der verschiedenen Erzeugungstechnologien möglichst flexibel zu gestalten, steht zudem in jeder Nah- und Fernwärmefachregion ein großer saisonaler Wärmefachspeicher zur Verfügung, der 10 % der dortigen jährlichen Wärmenefachnachfrage speichern kann. Der saisonale Wärmefachspeicher ist insbesondere für die Nutzung des Solarthermie-Potenzials wichtig. Die Verluste des Wärmefachspeichers werden mit einem Verlustfaktor in Höhe von 0,01 %/h abgebildet.

Wasserstoff-KWK-Anlagen und Biogas-BHKW werden mit einem elektrischen und thermischen Wirkungsgrad von jeweils 40 % in der Einsatzmodellierung abgebildet. Bei Holz(heiz)kraftwerken und Müllverbrennungsanlagen steht hingegen die Wärmefachproduktion deutlich im Vordergrund, so dass diese Anlagen mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 7 % und einem thermischen Wirkungsgrad von 70 % in die Einsatzmodellierung eingehen (vgl. (Kelm et al. 2022, S. 50)).

Eine wichtige Eingangsgröße für die Einsatzmodellierung sind die spezifischen Grenzkosten der jeweiligen Wärmefachmeerzeugungstechnologien, woraus sich die Einsatzreihenfolge ergibt (Merit-Order). In dieser Studie sind wir von folgender Einsatzreihenfolge ausgegangen, wobei sich Wärmefachpumpen bei hohen Strompreisen⁴⁴ auch hinter Biomasse-KWK-Anlagen oder Wasserstoff-KWK-Anlagen einreihen können:

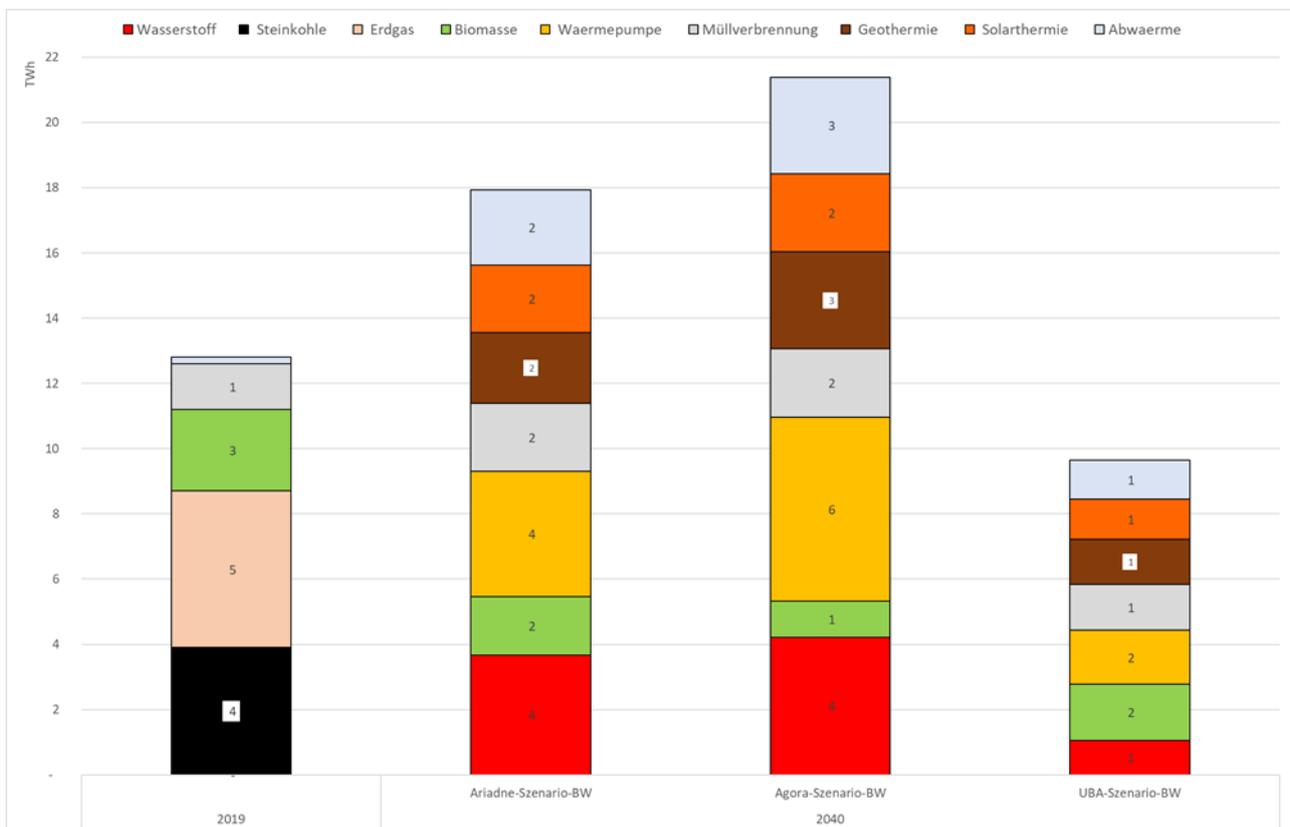
1. Müllverbrennungsanlagen
2. Geothermie
3. Abwärme

⁴⁴ Die Strompreise sind ein Modellergebnis und ergeben sich während der Einsatzmodellierung aufgrund der Merit-Order des Kraftwerksparks und der gesetzten energiewirtschaftlichen Nebenbedingungen (z.B. hinsichtlich der Stromnachfrage und der verfügbaren Flexibilitätsoptionen).

4. Solarthermie
5. Wärmepumpen
6. Biomasse-KWK-Anlagen
7. Wasserstoff-KWK-Anlagen

Der aus der Einsatzmodellierung für Baden-Württemberg resultierende Energieträgermix der Nah- und Fernwärmeerzeugung in den drei klimaneutralen Zielszenarien zeigt Abbildung 4-19. Dabei entfallen im Durchschnitt rund 50 % der Nah- und Fernwärmeerzeugung auf Müllverbrennung, Geothermie, Abwärme und Solarthermie mit einem spezifischen Anteil von jeweils rund 12 % bis 13 %. Die restlichen 50 % werden von den besser bedarfsgerecht einsetzbaren Energieträgern Biomasse, Wasserstoff und Wärmepumpen gedeckt.

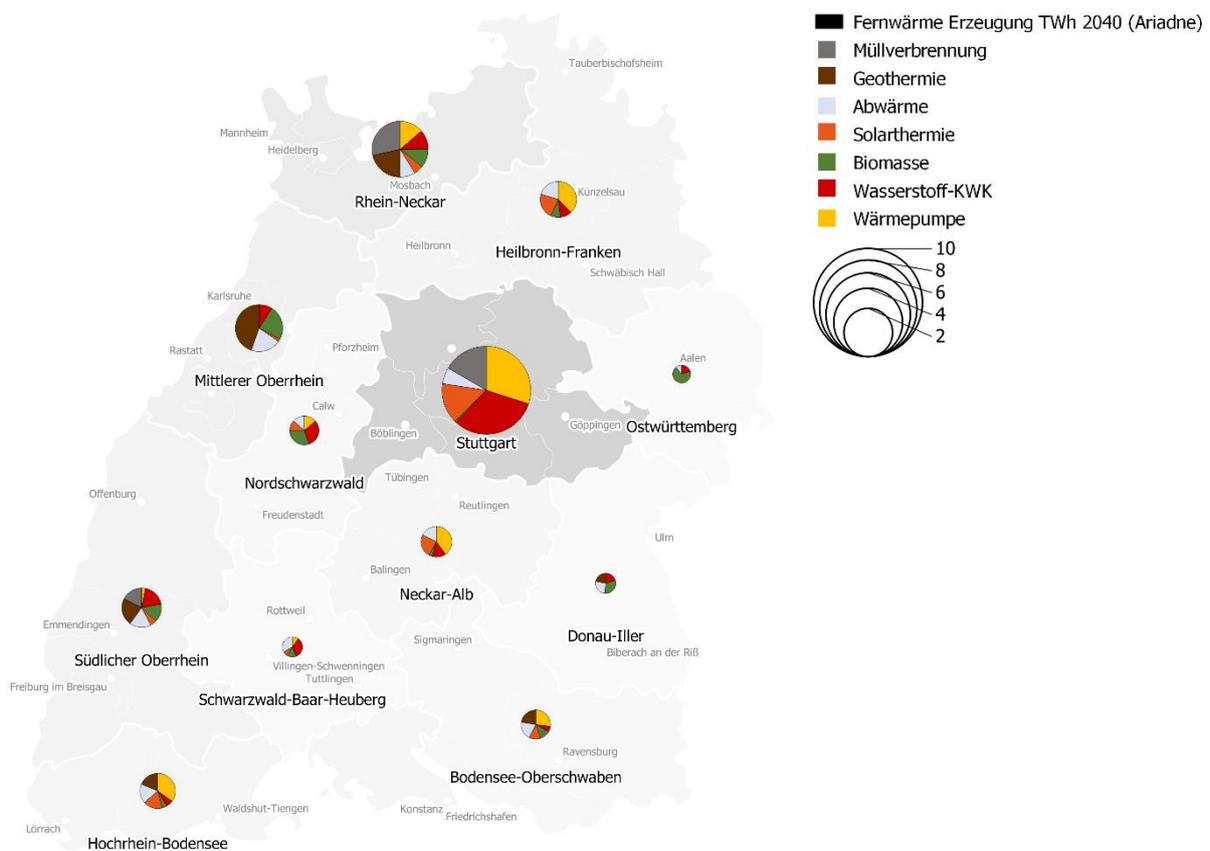
Abbildung 4-19: Energieträgermix für die Fernwärmeerzeugung in Baden-Württemberg im Jahr 2019 sowie in den klimaneutralen Zielszenarien für das Jahr 2020



Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Darstellung), Daten für 2019 aus (Kelm et al. 2022, S. 90)

Im Agora-Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2045“ entfallen für Deutschland hingegen 70 % der Fernwärmeerzeugung auf Biomasse, Wasserstoff, Wärmepumpen und Elektrokessel und nur 30 % auf Müllverbrennung, Geothermie, Abwärme und Solarthermie. Die Sektorziel-Studie weist für Baden-Württemberg im Jahr 2040 ein Verhältnis von einem Drittel (Müllverbrennung, Geothermie, Abwärme und Solarthermie) zu zwei Drittel (Biomasse, Wasserstoff, Wärmepumpen und Elektrokessel) aus (Kelm et al. 2022, S. 90). Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass die aus unserer Modellierung stammenden Ergebnisse bereits eine hohe Integration von Geothermie, Abwärme und Solarthermie beinhalten.

Abbildung 4-20: Energieträgermix zur Nah- und Fernwärmeerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Ariadne-Szenario-BW-2040



Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnungen)

Den aus der Einsatzmodellierung resultierenden regionalen Energieträgermix zur Nah- und Fernwärmeerzeugung zeigen die Abbildung 4-20 (Ariadne-Szenario-BW-2040), Abbildung 4-21 (Agora-Szenario-BW-2040) und Abbildung 4-22 (UBA-Szenario-BW-2040). Die Zahlenwerte zu den Kreisdiagrammen in den Grafiken sind im Anhang in Tabelle 7-16, Tabelle 7-17 und Tabelle 7-18 zu finden. Für die Interpretation der Zusammensetzung der regionalen Energieträgermixe ist dabei wichtig zu wissen, dass es innerhalb der optimalen Lösung für Baden-Württemberg, regional unterschiedliche Ausprägungen dieses Optimums im Sinne eines „Nullsummenspiels“⁴⁵ geben kann.

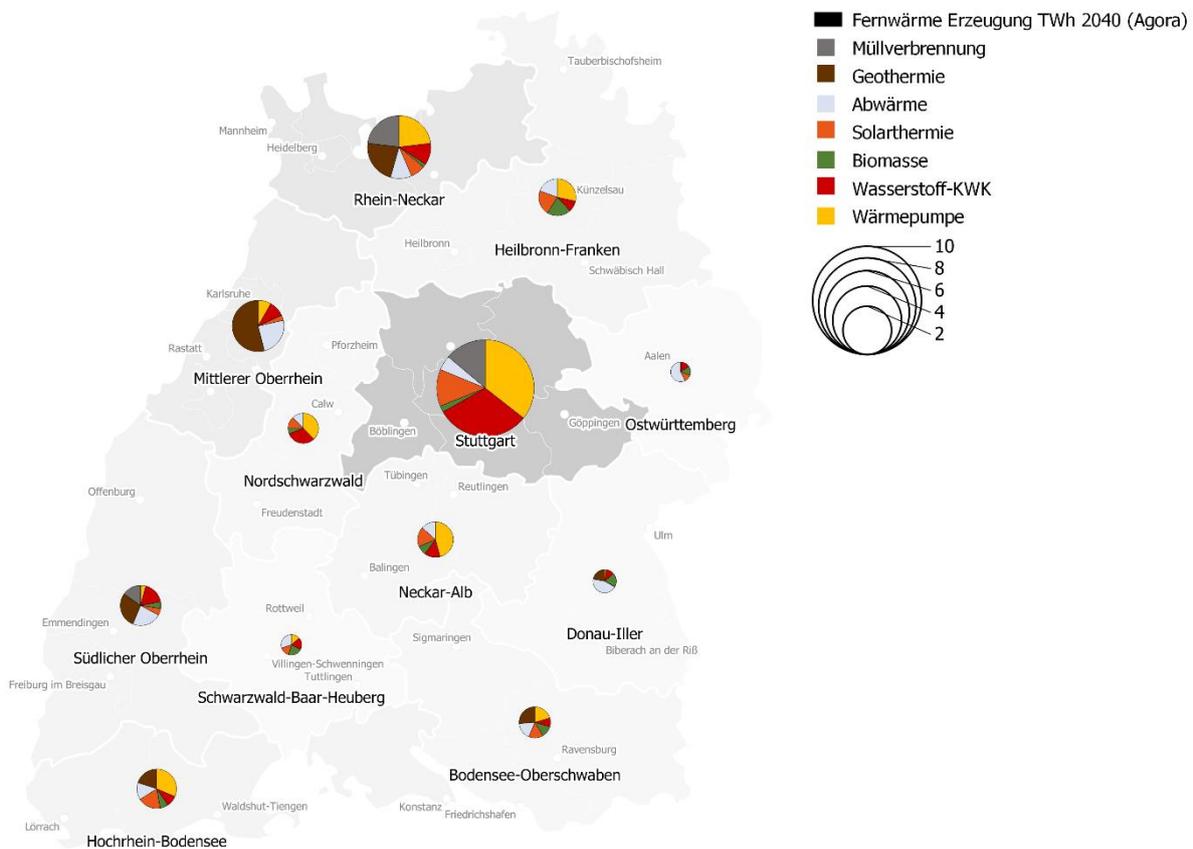
Im **Ariadne-Szenario-BW-2040** werden in den fünf Regionen Rhein-Neckar, Südlicher Oberrhein, Hochrhein-Bodensee, Donau-Iller und Bodensee-Oberschwaben rund 20 % der Nah- und Fernwärme mittels Geothermie erzeugt, in der Region Mittlerer Oberrhein sind es sogar 45 %. In den Regionen Stuttgart, Nordschwarzwald und Schwarzwald-Baar-Heuberg basiert rund ein Drittel der Nah- und Fernwärmeerzeugung auf Wasserstoff, wobei auf die Region Stuttgart knapp 60 % des gesamten Wasserstoffeinsatzes für die Nah- und Fernwärmeerzeugung in Baden-Württemberg entfällt. Die beiden anderen großen Fernwärme-Regionen Rhein-Neckar und Mittlerer Oberrhein

⁴⁵ Ist dies der Fall, so versucht der Optimierer, nach Möglichkeit auf eine Erzeugungsoption in einer Region zu verzichten.

benötigen hingegen nur rund 10 % Wasserstoff im Fernwärme-Mix, da sie über ausreichend alternative Wärmequellen verfügen (v.a. Geothermie, Abwärme und Müllverbrennung).

Die Volllaststunden der einzelnen Erzeugungstechnologien liegen für Geothermie, Abwärme und Müllverbrennung in einer Größenordnung von 6.000 h/a bis 7.500 h/a. Bei Biomasse-Anlagen sind es durchschnittlich 1.700 h/a und bei Wasserstoff-KWK-Anlagen rund 1.400 h/a. Dies verdeutlicht die in der Modellierung zugrundeliegende Einsatzreihenfolge. Wasserstoff-KWK-Anlagen stellen die teuerste Option dar und werden nur eingesetzt, wenn die anderen Optionen keine Wärme mehr bereitstellen können. Die verfügbaren Potenziale für Geothermie, Abwärme und Solarthermie werden zu rund 70 % bis 80 % genutzt. Die Netz- und Speicherverluste belaufen sich auf 13 % der Wärmenetznachfrage.

Abbildung 4-21: Energieträgermix zur Nah- und Fernwärmeerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Agora-Szenario-BW-2040



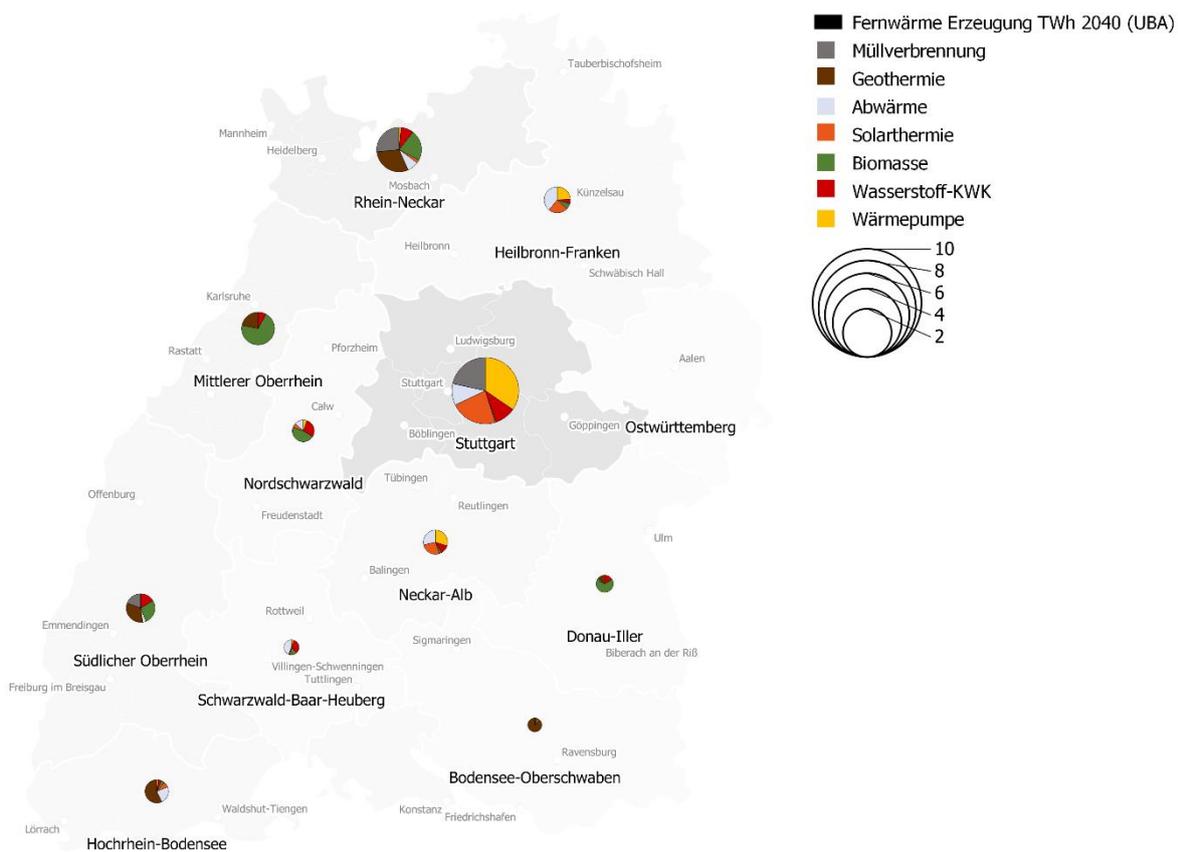
Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnungen)

Auch im **Agora-Szenario-BW-2040** fällt auf, dass die Regionen Stuttgart und Nordschwarzwald mit jeweils rund 30 % einen vergleichsweise hohen Anteil von Wasserstoff-KWK-Anlagen für die Erzeugung von Nah- und Fernwärme aufweisen. Im Landesdurchschnitt sind es nur 20 %. Die Volllaststunden der Wasserstoff-KWK-Anlagen liegen in der Region Stuttgart bei 1.300 h/a und in der Region Nordschwarzwald bei etwa 1.000 h/a. Im Landesdurchschnitt belaufen sich die Volllaststunden hingegen nur auf rund 600 h/a. Dies verdeutlicht, dass die unterstellten Wasserstoff-KWK-Anlagen im Agora-Szenario-BW-2040 überdimensioniert sind und ein Teil der Wasserstoff-Kraftwerke nicht als KWK-Anlage sondern rein für den Strommarkt laufen werden.

Die Regionen Ostwürttemberg, Rhein-Neckar, Mittlerer Oberrhein, Südlicher Oberrhein, Donau-Iller und Bodensee-Oberschwaben können zu rund 60 % bis 80 % die Nah- und Fernwärmeerzeugung mittels Geothermie, Abwärme, Solarthermie und Müllverbrennung bereitstellen. Aufgrund der insgesamt hohen Nachfrage nach Nah- und Fernwärme werden die verfügbaren Potenziale für Geothermie und Abwärme vollständig und für Solarthermie zu 80 % genutzt. Die Netz- und Speicherverluste belaufen sich auf 14 % der Wärmenetznachfrage.

Im **UBA-Szenario-BW-2040** ist die Nachfrage nach Nah- und Fernwärme so gering, dass für die Region Ostwürttemberg keine neuen Wärmenetze gebaut werden. Dies liegt daran, dass die Wärmedichte in den anderen Regionen höher ist und der Zubau an Wärmenetzen daher dort erfolgt. Aufgrund der vergleichsweise geringen Nachfrage nach Nah- und Fernwärme werden die verfügbaren Potenziale für Geothermie, Abwärme und Solarthermie im Durchschnitt nur zu 40 % bis 45 % genutzt. Dies gilt jedoch nicht für die Region Stuttgart, wo das verfügbare Abwärmepotenzial vollständig und das Solarthermiefpotenzial zu 85 % genutzt wird. Die Netz- und Speicherverluste belaufen sich auf 14 % der Wärmenetznachfrage.

Abbildung 4-22: Energieträgermix zur Nah- und Fernwärmeerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das UBA-Szenario-BW-2040



Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnungen)

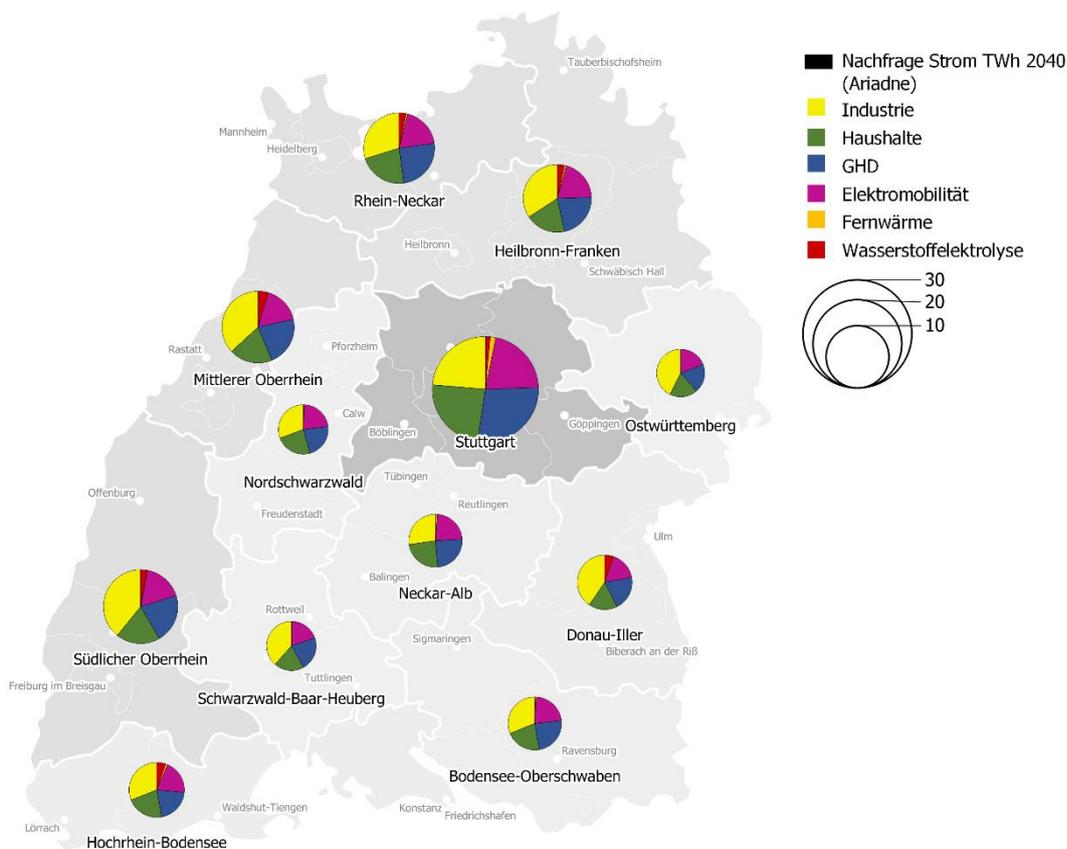
4.2.5 Sektorspezifische Stromnachfrage

Die sektorspezifische Stromnachfrage in den einzelnen Regionen ergibt sich überwiegend aus der Regionalisierung der Zielszenarien mit Hilfe sektorspezifischer Verteilschlüssel (vgl. Abschnitt 4.1.1). Der Stromverbrauch für die elektrische Nah- und Fernwärmeerzeugung mittels Großwärmepumpen ist im Gegensatz dazu ein Modellergebnis aus der Einsatzoptimierung für die Wärmenetze (vgl. Abschnitt 4.2.4).

Die regionale Verteilung der Stromnachfrage ist in allen Szenarien vergleichbar: Etwa 22 % der Stromnachfrage von Baden-Württemberg entfällt auf die Region Stuttgart, gefolgt von den Regionen Rhein-Neckar, Mittlerer Oberrhein, Südlicher Oberrhein und Heilbronn-Franken mit jeweils rund 10 %. Auf die verbleibenden Regionen Nordschwarzwald, Schwarzwald-Baar-Heuberg, Hochrhein-Bodensee, Ostwürttemberg, Neckar-Alb, Donau-Iller und Bodensee-Oberschwaben entfallen jeweils rund 5 % bis 6 % der Stromnachfrage von Baden-Württemberg (vgl. Abbildung 4-23 und Tabelle 7-19 für das **Ariadne-Szenario-BW-2040**, Abbildung 7-3 und Tabelle 7-20 für das **Agora-Szenario-BW-2040** sowie Abbildung 7-4 und Tabelle 7-21 für das **UBA-Szenario-BW-2040**).

Der Stromverbrauch für die elektrische Nah- und Fernwärmeerzeugung ist hingegen vor allem in der Region Stuttgart lokalisiert, gefolgt von den Regionen Rhein-Neckar, Heilbronn-Franken und Hochrhein-Bodensee.

Abbildung 4-23: Sektorspezifische Stromnachfrage in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Ariadne-Szenario-BW-2040



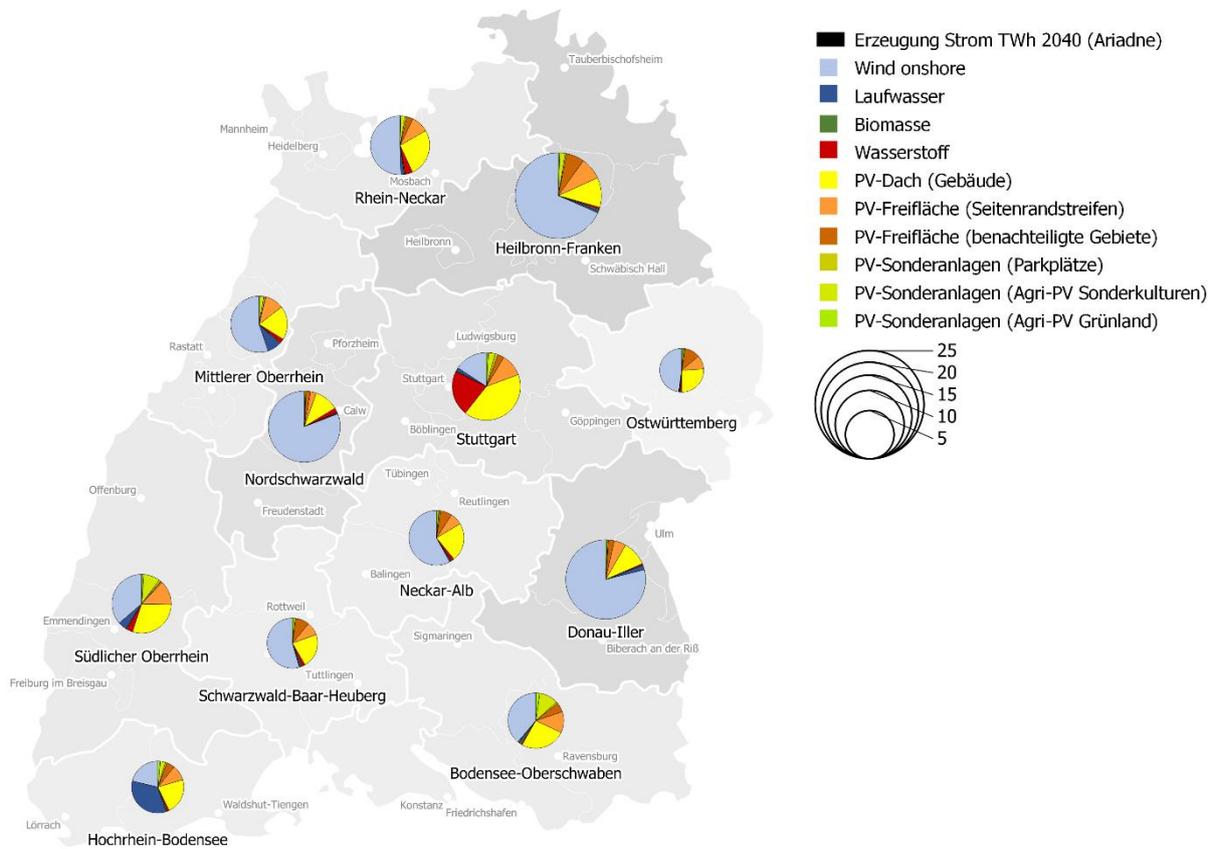
Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnungen)

4.2.6 Energieträgermix der Stromerzeugung

Der regionale Energieträgermix zur Stromerzeugung ergibt sich für die fluktuierenden erneuerbaren Energieträger aus der regionalen Verteilung der installierten Erzeugungskapazitäten und den unterstellten Volllaststunden. Für alle Regionen werden dabei jeweils einheitliche Volllaststunden für die einzelnen Energieträger und Technologien verwendet: Laufwasser 4.000 h/a, Wind onshore 2.500 h/a, PV-Freiflächenanlagen 950 h/a, PV-Sonderanlagen 900 h/a und PV-Dachanlagen 900 h/a. Für Biomasse-KWK-Kraftwerke und Wasserstoff-KWK-Kraftwerke ergeben sich individuelle Stromerzeugungsmengen aus der Einsatzmodellierung der Nah- und Fernwärmeerzeugung. Rein stromgeführte Wasserstoff-Kraftwerke sind im Energieträgermix der Stromerzeugung nicht enthalten.

Im **Ariadne-Szenario-BW-2040** ist die Stromerzeugung aus Windenergie aufgrund der hohen Ausgangszahl für Baden-Württemberg am höchsten. Durch den gewählten Verteilschlüssel für Windenergie dominiert in den Regionen Nordschwarzwald, Heilbronn-Franken und Donau-Iller die Stromerzeugung aus Windenergie. In den Regionen Stuttgart, Bodensee-Oberschwaben und Südlicher Oberrhein setzt sich die Stromerzeugung hingegen zu etwa zwei Dritteln aus Photovoltaik zusammen (Abbildung 4-24 und Tabelle 7-22).

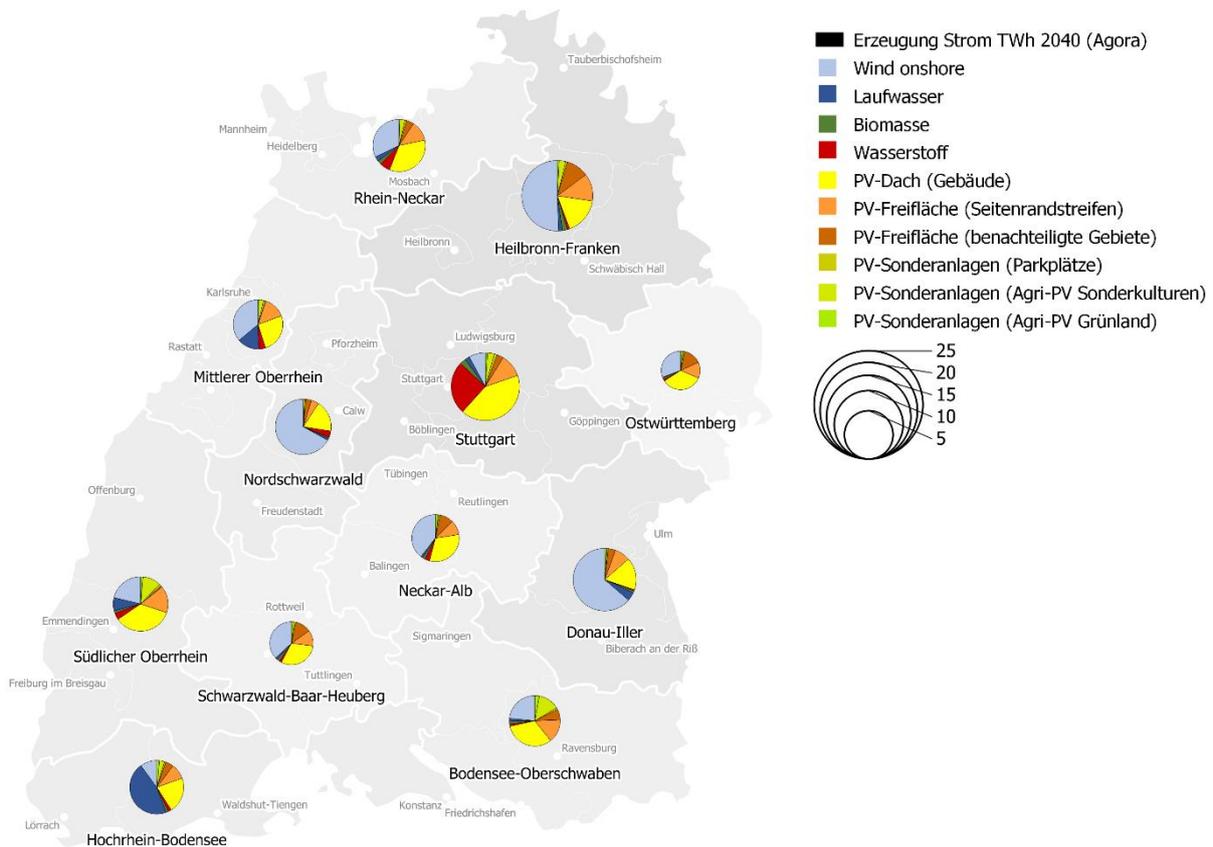
Abbildung 4-24: Energieträgermix zur Stromerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Ariadne-Szenario-BW-2040



Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnungen)

Im **Agora-Szenario-BW-2040** wird zunächst deutlich, dass im Vergleich zum Ariadne-Szenario-BW-2040 die Stromerzeugung aus Windenergie um die Hälfte abnimmt. Da sich die Stromerzeugung aus Photovoltaik zwischen diesen beiden Szenarien nur geringfügig unterscheidet, tritt nun der Photovoltaikanteil stärker in den Vordergrund. In der Region Hochrhein-Bodensee besteht die Stromerzeugung nun zu rund der Hälfte aus Wasserkraft. In der Region Stuttgart stammt rund ein Fünftel der Stromerzeugung aus Wasserstoff-KWK-Kraftwerken (Abbildung 4-25 und Tabelle 7-23).

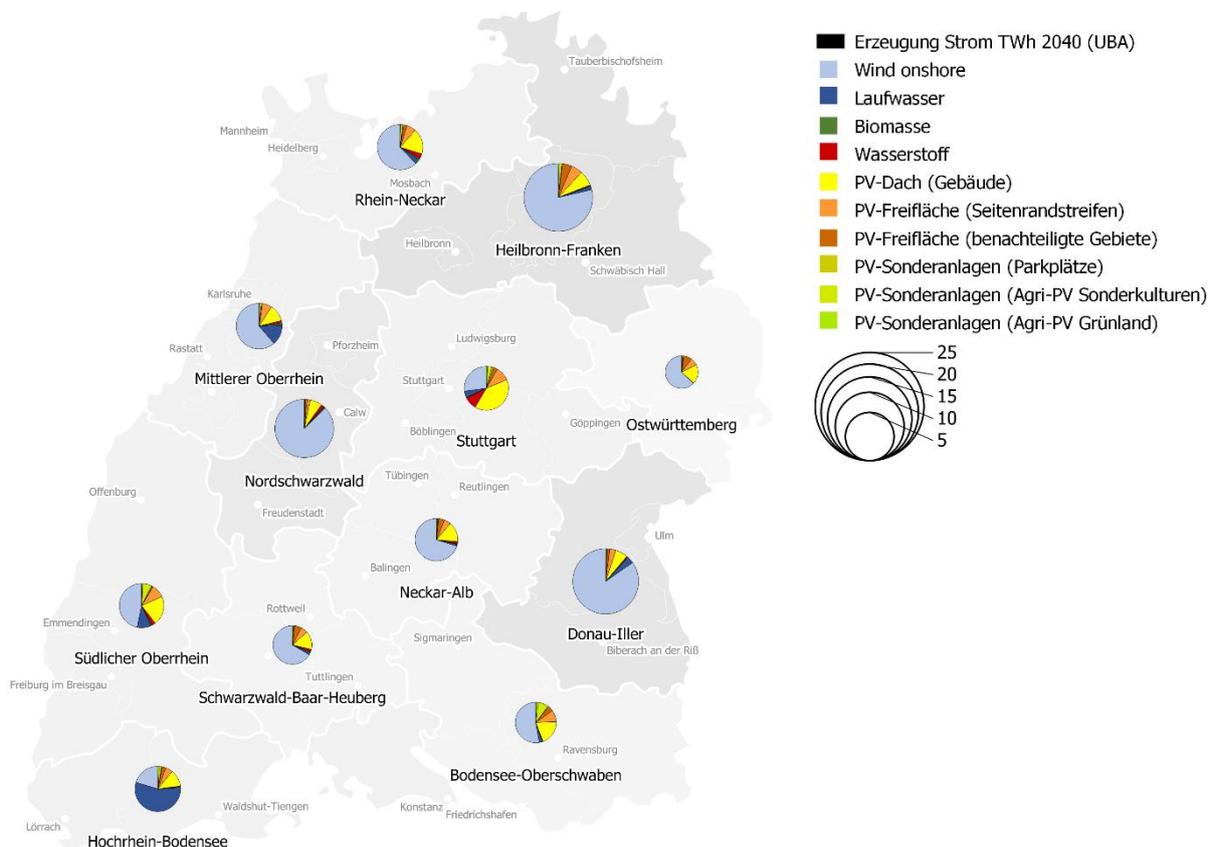
Abbildung 4-25: Energieträgermix zur Stromerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Agora-Szenario-BW-2040



Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnungen)

Durch die sehr hohe Stromerzeugung aus Windenergie im Vergleich zu Photovoltaik verschiebt sich im **UBA-Szenario-BW-2040** für die Windregionen der Strommix wieder deutlich in diese Richtung. In der Region Stuttgart setzt sich der Strommix hingegen weiterhin überwiegend aus Photovoltaik und in der Region Hochrhein-Bodensee aus Wasserkraft zusammen (Abbildung 4-26 und Tabelle 7-24).

Abbildung 4-26: Energieträgermix zur Stromerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das UBA-Szenario-BW-2040



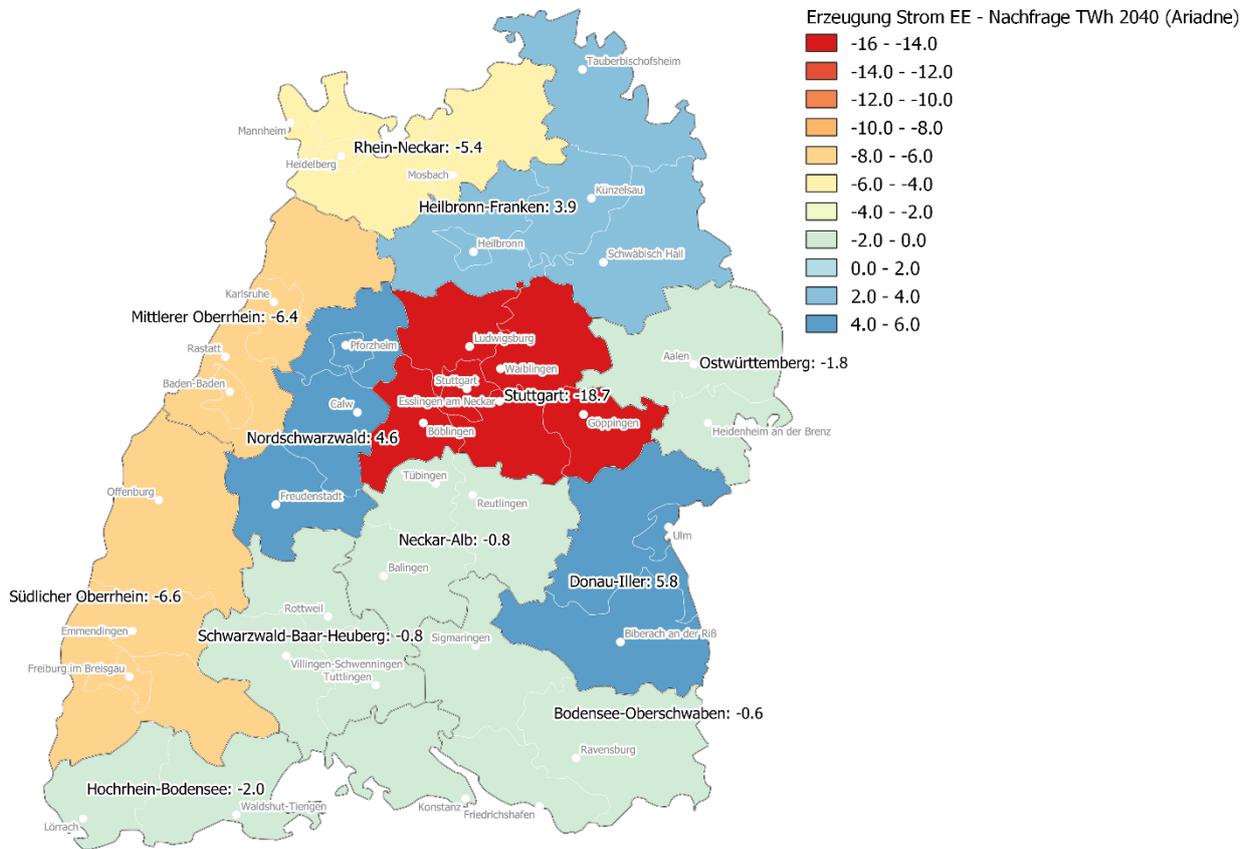
Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnungen)

4.2.7 Regionale Bilanzierung der jährlichen Stromimporte und -exporte

In der Jahresbilanz ist Baden-Württemberg in allen Szenarien ein Netto-Stromimporteuer. Die Netto-Stromimporte belaufen sich im UBA-Szenario-BW-2040 auf 18 TWh, im Agora-Szenario-BW-2040 auf 23 TWh und im Ariadne-Szenario-BW-2040 auf 29 TWh (Tabelle 7-25, Tabelle 7-26 und Tabelle 7-27). Im Jahr 2019 lagen die Nettostrombezüge von Baden-Württemberg bei 15 TWh (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, S. 30).

Im **Ariadne-Szenario-BW-2040** stellt die Region Stuttgart die Region mit dem größten Stromdefizit dar (-18,7 TWh). Dies ist neben der hohen spezifischen Stromnachfrage auch auf das geringe Potenzial für Windenergie zurückzuführen. Weitere Regionen mit einem größeren Stromdefizit sind die Regionen Rhein-Neckar, Mittlerer Oberrhein und Südlicher Oberrhein. Aufgrund des hohen Windenergieanteils im Ariadne-Szenario-BW-2040 und dem unterstellten regionalen Verteilschlüssel weisen die Regionen Heilbronn-Franken, Donau-Iller und Nordschwarzwald zusammen einen Stromüberschuss von 14,3 TWh auf. Die Regionen Ostwürttemberg, Neckar-Alb und Schwarzwald-Baar-Heuberg weisen nur ein vergleichsweise geringes Stromdefizit auf (Abbildung 4-27 und Tabelle 7-25 im Anhang).

Abbildung 4-27: Jährliche Stromimporte und -exporte in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Ariadne-Szenario-BW-2040



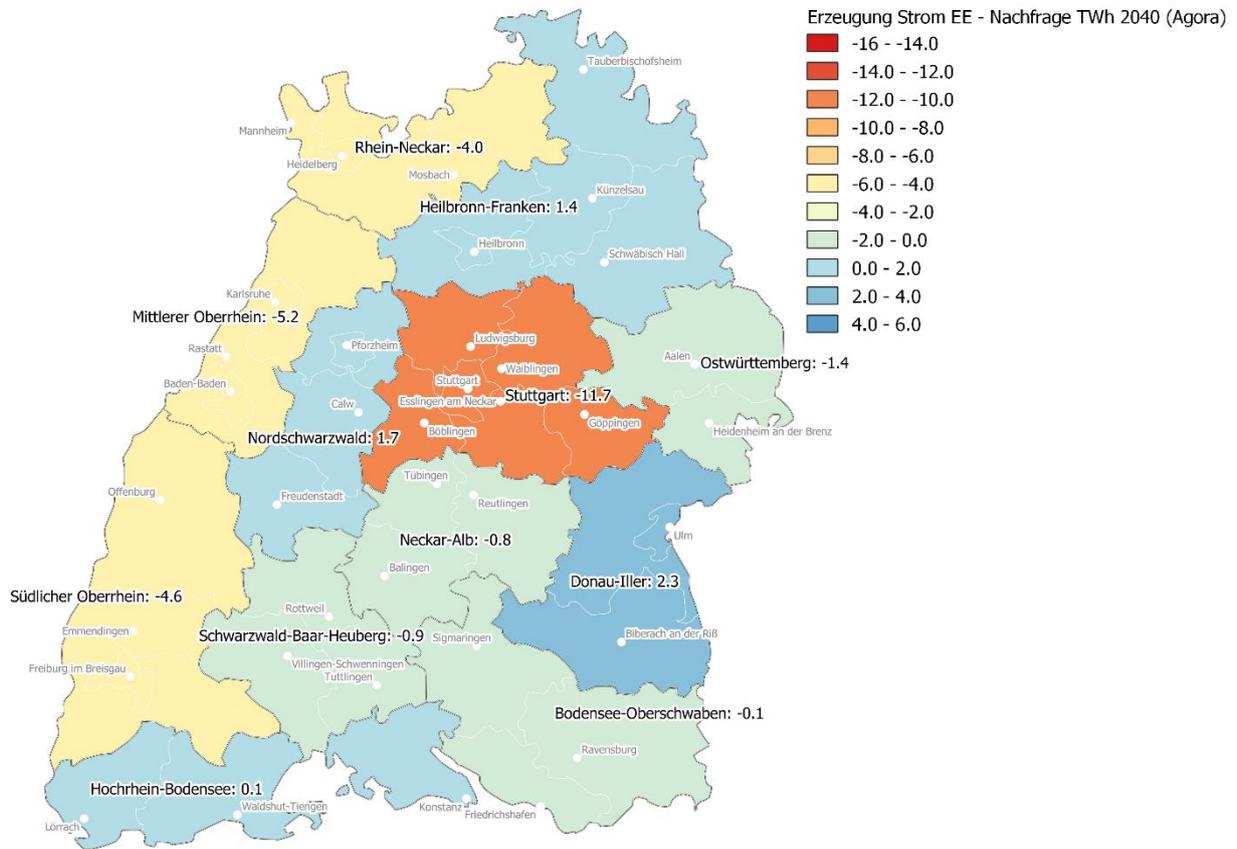
Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnungen)

Im **Agora-Szenario-BW-2040** schwächen sich die regionalen Unterschiede im Vergleich zum Ariadne-Szenario-BW-2040 ab. Dies ist sowohl auf den Rückgang der Stromnachfrage als auch den veränderten Strommix und dessen Regionalisierung zurückzuführen. Die laststarken Regionen weisen einen vergleichsweise geringen Anteil innerhalb des Verteilschlüssels für Windenergie auf. Bei Photovoltaik ist der Verteilschlüssel hingegen ausgeglichener und korreliert bei PV-Dachanlagen auch mit dem Verteilschlüssel der Stromnachfrage.

Während die Regionen Stuttgart, Rhein-Neckar, Mittlerer Oberrhein und Südlicher Oberrhein Nettostromimport-Regionen bleiben, erreicht die Region Hochrhein-Bodensee im Agora-Szenario-BW-2040 eine ausgeglichene Strombilanz (Abbildung 4-28 und Tabelle 7-26 im Anhang).

Im **UBA-Szenario-BW-2040** nehmen die regionalen Unterschiede bei der Strombilanz wieder zu. Dies ist unter anderem auf den vergleichsweise hohen Windstromanteil und dessen regionalem Verteilschlüssel zurückzuführen (siehe Abbildung 7-5 und Tabelle 7-27 im Anhang).

Abbildung 4-28: Jährliche Stromimporte und -exporte in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Agora-Szenario-BW-2040



Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnungen)

5 Maßnahmenplan für Baden-Württemberg

Um das Ziel einer 100 % klimaneutralen Energieversorgung in Baden-Württemberg zu erreichen, wird ein Maßnahmenplan vorgeschlagen, der sich auf die Handlungsfelder „Reduktion des Energieverbrauchs“, „Stromversorgung“ und „Gebäudewärmeversorgung“ konzentriert und die jetzt auf Landesebene angegangen werden sollten.

Die Maßnahmen und Instrumente sind so ausgewählt und beschrieben, dass sie einen Bezug zu den quantitativen Analysen aufweisen und dass von ihnen ein hoher Beitrag zur Zielerreichung erwartet wird. Zudem wurde darauf geachtet, dass die Maßnahmen und Instrumente auch auf Landes- oder auf kommunaler Ebene umgesetzt oder zumindest unterstützt werden können, selbst wenn es Abhängigkeiten zu Rahmenbedingungen auf Bundesebene gibt. Darüber hinaus werden bestehende Hemmnisse aufgezeigt und Möglichkeiten diskutiert, wie diese abgebaut werden können.

5.1 Handlungsfeld „Reduktion des Energieverbrauchs“

In allen Klimaneutralitätsszenarien wird von einer Reduktion des Endenergieverbrauchs ausgegangen: Im klimaneutralen Zieljahr ist der Endenergieverbrauch im Agora-Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2045“ um etwa 36 %, im Ariadne-Szenario „Technologie-Mix“ um 44 % und im UBA-Szenario „GreenSupreme“ um 57 % im Vergleich zum Jahr 2019 reduziert, vgl. Abschnitt 3.2 bzw. Abbildung 3-1. Bezogen auf den Zeitraum 2019 bis 2040 entspricht dies einem Rückgang des Endenergieverbrauchs von jährlich -1,7 % (Agora-Szenario), -2,1 % (Ariadne-Szenario) bzw. -2,7 % (UBA-Szenario).

Das Agora-Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2045“ erzielt Effizienzverbesserungen im Gebäudesektor vor allem bei Elektrogeräten und bei der Beleuchtung sowie durch den Ersatz von Nachtspeicherheizungen und Elektroboilern. Für die Sektoren Industrie und GHD sind Effizienzverbesserungen vor allem bei Querschnittstechnologien (z. B. Ventilatoren oder Pumpen) relevant (Prognos et al. 2021, S. 29–31). Das Thema Suffizienz wird im Agora-Szenario weitestgehend ausgeklammert: im Bereich der Strom- und Wärmeversorgung werden Verhaltensänderungen explizit nicht berücksichtigt und auch ein Nachfrage- und Produktionsrückgang von energieintensiven Gütern (z. B. bei Zement, Stahl und Kunststoffen) wird nicht betrachtet. Lediglich im Bereich Ernährung wird von einer steigenden Nachfrage nach pflanzlichen und synthetischen Ersatzprodukten für Fleisch und Milch ausgegangen (Prognos et al. 2021, S. 9–11).

Die direkte Elektrifizierung und damit einhergehende Substitution von Verbrennungsprozessen ist eine wesentliche Effizienzstrategie im Ariadne-Szenario „Technologie-Mix“ und maßgeblich für die Minderung der Endenergienachfrage verantwortlich. Das Thema Suffizienz wird lediglich in einzelnen Unterszenarien für den Gebäudesektor thematisiert (Luderer et al. 2021, S. 101) und ist in dem sektorübergreifenden Szenario „Technologie-Mix“ nicht explizit enthalten.

Das UBA-Szenario „Green Supreme“ setzt als einziges der drei Szenarien neben Effizienzsteigerungen auch explizit auf Suffizienz. Das Wirtschaftswachstum geht bis zum Jahr 2030 auf null zurück und verbleibt so bis zum Jahr 2050 („Wachstumsbefreiung“). Eine weitere Besonderheit des UBA-Szenarios „GreenSupreme“ ist auch die Berücksichtigung der globalen Rohstoffversorgung: Ohne Suffizienzmaßnahmen lässt sich beispielsweise der weltweite Bedarf an Basis- und Technologiemetallen nicht decken, wenn auch für bislang weniger stark entwickelte Länder ein entsprechender Nachfrageanstieg unterstellt wird (Umweltbundesamt 2020, S. 45).

Die Maßnahmen und Instrumente lassen sich (nicht immer überschneidungsfrei) unterteilen in Effizienzmaßnahmen und in Suffizienzmaßnahmen.

Energieeffizienz ist definiert als „die Bereitstellung des gleichen Nutzens mit weniger Energie-Input“, Suffizienz beinhaltet den bewussten Verzicht auf bestimmte Nutzungen (vgl. Fischer et al. 2016). Eine Energieeinsparmaßnahme (als Oberbegriff von Effizienz- und Suffizienzmaßnahmen) wird als eine technische oder verhaltensbasierte Aktivität definiert, die zu einer überprüfbaren, messbaren oder abschätzbaren Energieeinsparung führt (Fischer et al. 2016).

5.1.1 Maßnahme 1: „Effizienzmaßnahmen zur Reduzierung des Stromverbrauchs“

Die Entwicklung des Stromverbrauchs setzt sich aus zwei unterschiedlichen Komponenten zusammen: einerseits können Effizienzmaßnahmen den klassischen Stromverbrauch reduzieren. Dies betrifft vor allem Querschnittstechnologien in der Industrie (wie z. B. Pumpen, Kompressoren und Ventilatoren), Beleuchtung und Klimatisierung von Gebäuden, Beleuchtung von Straßen und Denkmälern sowie die typischen Haushaltsgeräte. Andererseits stellt die Elektrifizierung der Wärmeerzeugung (z. B. über Wärmepumpen) als auch der Mobilität (z. B. über Elektrofahrzeuge) selbst eine Effizienzmaßnahme dar, die zwar den Endenergieverbrauch insgesamt reduziert, den Stromverbrauch allerdings erhöht.

Kuhnhehn (2017) konstatiert, dass Effizienzstrategien bislang ohne signifikante Emissionsminderungen verfolgt werden: Es werden zwar signifikante Verbesserungen der Energieeffizienz erzielt, die absolute Stromnachfrage sinkt dennoch nicht. Kuhnhehn (2017) führt dies unter anderem darauf zurück, dass Effizienzstrategien an wirtschaftspolitischen Zielsetzungen und etablierten Konsummustern scheitern: Werden Effizienzsteigerungen sogleich in einer Steigerung des Outputs realisiert, so dämpft das die ursprünglich erreichte Einsparung (vgl. Zell-Ziegler und Förster 2018). Solange ein Wirtschaftswachstum angestrebt wird, werden Effizienzsteigerungen sogleich in Produktionssteigerungen verwandelt. Auf Verbraucherseite sind es dann die etablierten Konsummuster, die in Form von Rebound-Effekten zu einem Ausgleich der erzielten Energieeinsparungen führen: Erzielte Einsparungen werden durch erhöhten Konsum ausgeglichen (vgl. Fischer et al. 2013).

Um den klassischen Stromverbrauch zu reduzieren, ist es wichtig, Wissen zum Thema Energieeffizienz bei den Stromverbrauchern zu verankern, beispielsweise durch die Ausweitung des Stromspar-Checks für private Haushalte oder die aufsuchende Energie(einspar)beratung für Quartiere. Die Landesregierung und die Kommunen können darüber hinaus auch selbst aktiv werden, indem sie die Beleuchtung, Klimatisierung und Beheizung der landeseigenen und kommunalen Gebäude entsprechend optimieren und ggf. auch reduzieren (z. B. durch eine Änderung der Arbeitsstättenrichtlinie). Dies gilt auch für die Beleuchtung von Straßen, Fassaden und Denkmälern.

Um die Elektrifizierung als Effizienz- und Dekarbonisierungsstrategie im Bereich der Wärmeerzeugung und im Sektor Mobilität zu fördern, ist es wichtig, dass steuerliche Vorteile und direkte Subventionen von fossilen Energieträgern abgebaut werden und die CO₂-Bepreisung auf ein angemessenes Niveau angehoben wird, um externe Kosten und Schäden zu internalisieren. Dafür kann sich die Landesregierung auf Bundesebene einsetzen. Gleichzeitig ist dafür auch der Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung essenziell (vgl. Maßnahmen 4 bis 8).

Darüber hinaus sollten Land und Kommunen beim Aufbau einer öffentlichen Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge aktiv werden. Für die neuen Stromverbraucher ist zudem wichtig, dass der Anstieg des Stromverbrauchs möglichst gering ausfällt und durch Suffizienzmaßnahmen begrenzt wird.

5.1.2 Maßnahme 2: „Energetische Gebäudesanierung“

Die energetischen Mindestanforderungen für Bestandsgebäude setzt das Gebäudeenergiegesetz (GEG). Während die Energieeinsparverordnung (EnEV) den Bundesländern ermöglichte, durch eigene Landesregelungen strengere Anforderungen zu setzen, wurde bei Überführung der EnEV und des EEWärmeG in das GEG diese Länderöffnungsklausel ersatzlos gestrichen. Damit regelt das GEG die Mindestanforderungen abschließend. Der Großteil der finanziellen Breitenförderung kommt ebenfalls aus Bundesprogrammen (v. a. Bundesförderung effiziente Gebäude BEG).

Mit dem Koalitionsvertrag und nachfolgenden Beschlüssen hat die **Bundesregierung** weitreichende ordnungsrechtliche Verschärfungen angekündigt. Dazu gehören insbesondere die Anforderung, dass ab 01.01.2024 jede neu eingebaute Heizungsanlage auf Basis von mindestens 65 % erneuerbarer Energien betrieben werden muss (65%-Anforderung). Ferner kündigt die Bundesregierung an, die Pläne der EU-Kommission zur Einführung von Mindestenergieeffizienzstandards (MEPS) zu unterstützen. Diese sehen vor, den gesamten Gebäudebestand – ausgehend von den schlechtesten Gebäuden (worst performing buildings) – sukzessive zu sanieren.

Angesichts absehbarer Widerstände, v. a. aus Teilen der Wohnungswirtschaft, benötigen die ordnungsrechtlichen Vorhaben eine aktive Unterstützung aus der **Landesregierung**. Das Land ist zudem für den Vollzug des GEG zuständig. Mit dem Vollzug des EEWärmeG haben das Land als oberste Vollzugsbehörde, sowie die Regierungspräsidien und die Kommunen, Verfahren entwickelt (Meldewesen beim Heizungsaustausch, Einbezug Schornsteinfeger, Datenportal Statistisches Landesamt), auf die der Vollzug der 65%-Anforderung aufgebaut werden könnte. Die Evaluierung des EEWärmeG hat aber auch gezeigt, dass vielen Kommunen die Personalkapazitäten und bei kleinen Kommunen oftmals auch die Expertise fehlen, den Vollzug flächendeckend sicherzustellen (Pehnt et al. 2018). Notwendig sind deshalb eine Ausweitung der Vollzugskapazitäten in den unteren Bauaufsichtsbehörden sowie Weiterbildungsmaßnahmen für das Vollzugspersonal.

Die Breitenförderung der energetischen Gebäudesanierung erfolgt durch Bundesprogramme. Eine zusätzliche Breitenförderung des Landes (z. B. durch die Landesbank) erscheint deswegen nicht zielführend. Eine sehr wichtige Rolle nehmen **Land und Kommunen** allerdings im Bereich der Beratung und Information ein. Die aktuelle Energiekrise führt zu einer deutlichen Zunahme an Beratungsnachfrage. Ordnungsrechtliche Regelungen wie die 65%-Anforderung werden diese Nachfrage signifikant erhöhen. Wichtig ist eine erhebliche Ausweitung der Beratungskapazitäten sowie die Sicherstellung einer qualitativ hochwertigen Beratung. Notwendig sind verschiedene Beratungsformate, die von einer niederschweligen Einstiegsberatung bis zu einer umfassenden Umsetzungsberatung reichen. Vorhandene Beratungsformate wie der gebäudeindividuelle Sanierungsfahrplan (iSFP) sind auszuweiten und mit den Ergebnissen der Kommunalen Wärmeplanung zu synchronisieren (vgl. Maßnahme 9 „Kommunale Wärmeplanung“). Letztere wird dazu führen, dass die Bedeutung einer Quartiersberatung zunimmt (z. B. im Falle von Quartieren, die im Rahmen der Kommunalen Wärmeplanung als Nah- und Fernwärme-Erweiterungsgebiete identifiziert wurden). Institutionell können bei der Beratung die regionalen Energieagenturen einen sehr wichtigen Beitrag leisten. Integraler Teil der Beratung muss die Fördermittelberatung sein. Ziel muss es sein, möglichst viele Gebäudeeigentümer zu motivieren, bestehende Förderung in Anspruch zu nehmen. Mit Blick auf das aktuelle Mietrecht gilt dies insbesondere für Vermieter (da die Inanspruchnahme öffentlicher Förderung mit einer Minderung der Modernisierungsumlage einhergeht).

Ein wichtiger Baustein besteht auch in der energetischen Sanierung der landeseigenen Liegenschaften. Um ihrer Vorbildfunktion gerecht zu werden, muss die Landesregierung dafür sorgen, dass die Sanierung der landeseigenen Gebäude schneller vorangeht (Steigerung der Sanierungsrate) und

dabei zielkompatible Sanierungsstandards erreicht werden. Die dafür notwendigen Mittel sind in den Haushalt einzustellen. Das gleiche gilt für die öffentlichen Gebäude in den Kommunen.

Notwendig sind auch Aktivitäten des Landes im Bereich des Fachkräftemangels. Die Fachkräfteverfügbarkeit ist momentan eines der größten Hemmnisse für das Gelingen der Wärmewende. Die Landesregierung sollte sich auf Bundesebene u. a. dafür einsetzen, dass Fachkräfte-Einwanderungsgesetz zügig und zielstrebig umzusetzen, Berufsanerkennungsverfahren zu beschleunigen und Ausbildungsordnungen so anzupassen, dass Berufsbilder entstehen, die gezielt auf die Bedürfnisse der Wärmewende zugeschnitten sind.

5.1.3 Maßnahme 3: „Etablierung einer suffizienten Lebens- und Wirtschaftsweise“

Suffizienzstrategien wirken in den persönlichen Lebensbereich hinein, setzen bei der Änderung von Konsummustern an und sind auf eine Reduktion des Konsums ausgerichtet. Das Emissionsminderungspotenzial ist groß, und anders als die Effizienzsteigerungen ist auch die Gefahr von Rebound-Effekten geringer, da Suffizienzstrategien das Wirtschaftswachstum infrage stellen. Suffizienz kann zudem dazu beitragen, strategisch wichtige Veränderungen hin zu einer klimaverträglichen Gesellschaft zu bewirken (vgl. Zell-Ziegler und Förster 2018).

Auch aus gesellschaftlicher Sicht bieten Suffizienzstrategien Vorteile gegenüber den bisherigen Konsumstrategien. Suffizienzmaßnahmen sind oft deutlich kostengünstiger für den Einzelnen und die Gesellschaft. Aus den Verhaltensänderungen ergeben sich kaum umfangreiche Infrastrukturmaßnahmen wie den Bau von neuen Stromnetzen oder „Nebenwirkungen“ wie Biodiversitätsverluste. Damit ist eine suffiziente Lebensweise für eine Gesellschaft in diesen Bereichen prinzipiell wenig konfliktträchtig (vgl. Fischer et al. 2013).

Suffizienzmaßnahmen werden derzeit dennoch nur im Ausnahmefall in Szenarien konkret adressiert, d. h. mit Instrumenten hinterlegt und durch Wirkungsketten begründet (vgl. Samadi et al. 2017; Zell-Ziegler und Förster 2018). Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass den Suffizienzmaßnahmen eine geringe Eintrittswahrscheinlichkeit zugeordnet wird. Um nötige und wichtige Diskussionen im Bereich der Suffizienzmaßnahmen anzustoßen, ist es aber wichtig, die prinzipielle Option sichtbar zu machen (vgl. Zell-Ziegler und Förster 2018). Mit Blick auf das Ambitionsniveau von klimaneutralen Szenarien und dessen erforderliche Steigerung in Folge von langem Zögern in den letzten Jahren sollte zudem neu hinterfragt werden, ob die Etablierung von Suffizienzmaßnahmen nicht doch wahrscheinlicher ist als bislang gedacht.

Es bestehen bereits verschiedene gesellschaftliche Initiativen, die darauf zielen, den Energieverbrauch durch Suffizienz im Sinne eines klimabewussten und energie- und ressourcenschonenden Lebensstils abzusenken. Eine Übersicht über verschiedene Ansatzpunkte in den relevanten Bedürfnisfeldern Konsum, Mobilität, Wohnen, Ernährung, Arbeit, Geld und Gesellschaft verschaffen z. B. Ebinger et al. (2017) und Zell-Ziegler und Förster (2018). Im Folgenden adressiert werden die Felder „Mobilität“ und „Wohnen“. Die anderen Bedürfnisfelder werden hier nur implizit adressiert.

Mobilität

Das Bedürfnisfeld mit der höchsten Relevanz ist der Mobilitätsbereich. Im Vergleich zu den anderen Bedürfnisfeldern werden hier mehr und öfter Suffizienzmaßnahmen angenommen. Dies gilt nach Samadi et al. (2017) und Schmitt et al. (2015) auch für den internationalen und kommunalen Bereich. Zell-Ziegler und Förster (2018) folgern, dass die Schwelle, Verhaltensänderungen anzunehmen, im Mobilitätsbereich nicht so hoch ist wie in anderen Bedürfnisfeldern.

Suffizienzmaßnahmen im Mobilitätsbereich lassen sich unterteilen in

- Maßnahmen mit dem Ziel, den motorisierten Individualverkehr (MIV) zu senken und ggf. auf den öffentlichen Verkehr zu verlagern,
- Maßnahmen mit dem Ziel, die zurückzulegenden Strecken zu reduzieren und in
- Maßnahmen, welche den Bedarf an privaten und geschäftlichen Flugreisen reduzieren.

Um die Nachfrage nach MIV zu senken, stehen eine Reihe an fiskalischen Maßnahmen zur Diskussion, die darauf zielen, die externalisierten Kosten des MIV zu internalisieren. Die nachfolgend aufgeführten fiskalischen Maßnahmen werden auf Bundesebene geregelt, so dass die **Landesregierung** an dieser Stelle Einfluss nehmen sollte:

- In einigen Szenarien wird eine stärkere Besteuerung der PKW als Maßnahme hinterlegt, um den MIV zu reduzieren, vgl. z. B. Pye et al. (2015). In gleicher Art wirken würde eine Erhöhung der Energiesteuern auf fossile Brennstoffe durch Abbau der aktuellen Subventionen und Vergünstigungen.
- Die Einführung einer PKW-Maut würde die jährlich zu treffende Entscheidung über den Fixkostenblock (Maut / BahnCard / Jahreskarte) für MIV unattraktiver im Vergleich zu alternativen Angeboten machen. Eine fahrleistungsabhängige Maut, wie sie aktuell von Agora Verkehrswende vorgeschlagen wird (Greinus et al. 2022), um die Reduktion der Mineralölsteuereinnahmen durch die Elektrifizierung des Pkw-Verkehrs zu kompensieren, könnte zudem auf eine Reduktion der Fahrleistung wirken.

Zwei weitere Ansatzpunkte betreffen die Attraktivität eines PKW für Arbeitnehmer*innen, die durch die Entfernungspauschale⁴⁶ und durch das Firmenwagenprivileg⁴⁷ erzeugt werden:

- Die steuerliche Absetzbarkeit der Entfernungspauschale sollte verkehrsmittelabhängig gemacht werden, so dass beispielsweise die Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel honoriert wird (vgl. Beermann et al. (2020)), oder sie strukturell zu einem „Mobilitätsgeld“ umgewandelt (vgl. Elmer et al. (2019)).
- Das Dienstwagenprivileg sollte so geändert werden, dass Steuerneutralität zwischen Dienstwagen und privaten PKW besteht.⁴⁸ Darüber hinaus könnte eine zusätzliche CO₂-

⁴⁶ Mit der Entfernungspauschale können Arbeitnehmer*innen ihre Wegekosten (einfache Distanz zwischen Wohnort und Arbeitsstätte) unabhängig vom Verkehrsmittel mit 30-35 ct je Kilometer (Erhöhung ab dem 21. km) in der Einkommensteuererklärung als Werbungskosten geltend machen, so dass sie in der Regel zu einer Senkung des zu versteuernden Einkommens führt. Um die Klima- und Verteilungswirkung zu korrigieren, kann die Entfernungspauschale vollständig abgeschafft werden ggf. vorbehaltlich einer Härtefallregelung (Werbungskostenpauschbetrag erhöhen / Wegekosten als außergewöhnliche Belastung bei der Einkommensteuer weiterhin absetzbar), vgl. Beermann et al. (2020) .

⁴⁷ Das Problem des Dienstwagenprivilegs besteht in der Möglichkeit, anstelle der Versteuerung des tatsächlichen privaten Nutzungsanteils eines Dienstwagens eine pauschale Besteuerung in Höhe von 1 % des Bruttolistenpreises pro Monat zu wählen. Nach Harding (2014) werden durch diese Regelung durchschnittlich weniger als 40 % des tatsächlichen Vorteils der privaten Dienstwagennutzung versteuert. Dadurch entfällt der Anreiz, die km-Zahl des privat genutzten Fahrzeugs gering zu halten, und die Verkehrsmittelwahl wird zu Ungunsten beispielsweise des öffentlichen Verkehrs verzerrt, vgl. Beermann et al. (2020).

⁴⁸ In einer Modellrechnung des Öko-Instituts für Agora Verkehrswende (2018) führt die Ergänzung der Dienstwagenbesteuerung um eine fahrleistungsabhängige Komponente zu THG-Minderungen von 1,3–3,9 Mio. t pro Jahr.

Komponente in die Dienstwagenbesteuerung integriert werden, um einen Anreiz zum Kauf emissionsärmerer Fahrzeuge zu geben (vgl. Zerzawy (2020)).⁴⁹

PKW nehmen im öffentlichen Raum zudem viel Platz ein und häufig steht dieser Platz kostenlos zur Verfügung. Für Parkplätze im öffentlichen Raum sollte ein angemessener Preis erhoben werden (vgl. Zell-Ziegler und Förster (2018)). Diese Maßnahme ist auf **kommunaler Ebene** umsetzbar.

Ebenso wie die Anhebung der Kosten für den MIV kann auch die Senkung der Kosten für den ÖPNV ein Hebel sein, um den MIV zugunsten des ÖPNV zu reduzieren. Die bundesweite Einführung des 9-Euro-Tickets hat aber auch gezeigt, dass die ÖPNV-Infrastruktur entsprechend ausgebaut werden muss, um ein deutlich erhöhtes Personenaufkommen zu bewältigen. Für diese Maßnahme müssen Bund, Land und Kommunen zusammen arbeiten.

Auch der Bundesverkehrswegeplan ist ein Ansatzpunkt auf Bundesebene, um den MIV im Vergleich zu anderen Verkehrsmitteln weniger attraktiv zu gestalten: Es sollte ein stärkerer Fokus auf den Ausbau der Radwege und der Fahrstreifen für ÖPNV gelegt werden, als zusätzliche Fahrstreifen für MIV auszubauen (vgl. Held et al. (2021)).

Eine weitere Maßnahme im Mobilitätsbereich ist die generelle Einführung von Tempo 30 als Regelgeschwindigkeit innerorts. Durch die Geschwindigkeitsbegrenzung, die vor allem Kraftfahrzeuge betrifft, wird Radfahren attraktiver. Die Verlagerung vom MIV aufs Fahrrad reduziert den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen (vgl. Fischer et al. (2016)). Die Maßnahme kann auf allen administrativen Ebenen initiiert werden.

Darüber hinaus bestehen Maßnahmen, die das Ziel verfolgen, die zurückzulegenden Strecken zu reduzieren: Die höchste Klimawirksamkeit haben Maßnahmen, die das absolute Verkehrsaufkommen reduzieren. Diese Maßnahmen sind auch deshalb attraktiv, weil sie Reisezeit in Freizeit umwandeln.

Hierunter fällt die Förderung von Homeoffice. Kann von zu Hause gearbeitet werden, so entfällt das zugehörige berufsbedingte Verkehrsaufkommen. Das Potenzial dieser Maßnahme konnte zu Zeiten der Ausbreitung des Covid-Virus anschaulich erprobt werden. Kreye et al. (2022) zeigen, dass im Jahr 2021 durch Homeoffice ca. 3,7 Millionen Tonnen klimaschädliche Treibhausgase pro Jahr eingespart wurden, obwohl anstelle von ÖPNV auf MIV gesetzt wurde. Führen dagegen wieder mehr Menschen mit den öffentlichen Verkehrsmitteln, so steige der Klimaschutzbeitrag. Beispielsweise mit einem Anteil von 20 % Homeoffice könne rund eine Million Tonnen Treibhausgase eingespart werden (vgl. Kreye et al. (2022)). Homeoffice kann von den Unternehmen selbst gestützt werden. Es sind aber auch unterstützende Maßnahmen auf Bundes- oder Landesebene denkbar, wie es z.B. die Pandemie gezeigt hat.

Das bereits seit den 80er Jahren entwickelte Leitbild der Stadtplanung, eine „Stadt der kurzen Wege“ zu etablieren, beinhaltet den Aspekt, das Verkehrsbedürfnis zu verringern und trägt damit zu einer suffizienteren Lebensweise bei. In der „Stadt der kurzen Wege“ werden Bedingungen geschaffen, durch die die Entfernungen zwischen Wohnen, Arbeit / Bildung, Versorgung und Freizeitangebot gering sind. Weiteres Element der „Stadt der kurzen Wege“ ist die Bündelung familienbezogener Infrastrukturangebote und Dienstleistungen in Familienbüros, Eltern-Kind-Zentren oder

⁴⁹ Für eine CO₂-abhängige Spreizung der Absatzbarkeit von Firmenwagen und der Besteuerung von Dienstwagen modellierte das Öko-Institut THG-Minderungen von 0,6–1,9 Mio. t pro Jahr.

Mehrgenerationenhäusern (vgl. Brunsing und Frehn (1999)). Diese Maßnahme ist insbesondere auf kommunaler Ebene adressierbar.

Wesentliche Suffizienzmaßnahmen im Mobilitätsbereich bestehen aber auch in der Reduktion des Bedarfs an privaten und geschäftlichen Flugreisen⁵⁰. Geschäftliche Flugreisen können, wie während der Pandemie gezeigt, zumindest partiell durch Videokonferenzen ersetzt werden. Adressierbar ist dies von Seiten der Unternehmen.

Eine Erhöhung der Luftverkehrsteuer sowie eine Verringerung der Subvention von Kerosin sind weitere Maßnahmen, welche dazu führen könnten, dass auf geschäftliche sowie private Dienstreisen verzichtet wird oder dass auf alternative Verkehrsmittel umgeschwenkt wird⁵¹. Diese auf Bundesebene adressierbare Maßnahme unterstützt Unternehmen beim verstärkten Einsatz von Videokonferenzen.

Wohnen

Beim Wohnen sind der Rohstoffverbrauch für Beton und Stahl sowie der Energieverbrauch für Wärme und Strom die zentralen Ressourcenverbrauchsfaktoren. Suffizienz zielt in diesem Bereich also auf eine Reduktion der Wohnfläche sowie des Wärmeenergie- sowie des Stromverbrauchs ab.

Die derzeit sehr stark steigenden Kosten für Heizenergie führen bereits zu einer breiten Beschäftigung mit dem Thema Raumwärme und Warmwasser. Eine kurzfristig zu realisierende Suffizienzmaßnahme ist die Verkürzung der Duschzeit, das Vermeiden von Bädern und eine Absenkung der Raumtemperatur. Dies betrifft auch öffentliche Einrichtungen, wie Schwimmbäder, Bibliotheken oder Behörden.

Eine erst mittel- bis längerfristig realisierbare Maßnahme ist die Reduktion der Wohnfläche pro Kopf. Die Wohnfläche pro Kopf nimmt in Deutschland allerdings kontinuierlich zu und beträgt aktuell knapp 48 m²⁵². Die Ursachen werden einerseits in der zunehmenden Anzahl von Ein-Personenhaushalten gesehen, andererseits in dem Anstieg der Wohnfläche mit zunehmendem Alter: Ziehen die erwachsenen Kinder aus, so verbleiben die Eltern in dem vertrauten Wohnraum.

In Deutschland ist Wohnraum schwer an die jeweilige Lebenssituation anpassbar. Der Anreiz, die eigene Wohnsituation entsprechend zu verändern, wird z.B. durch steigende Mietpreise gehemmt. Ein Umzug von Senior*innen ist gegenwärtig oft mit einem erheblichen Anstieg der Quadratmetermiete im Vergleich zur bisherigen Wohnung verbunden⁵³. Eine staatliche Förderung zum Ausgleich der Differenz der m²-Miete könnte die Umzugsbereitschaft in kleinere Räumlichkeiten unterstützen. Weitere Maßnahmen zur Steigerung des Anreizes der Wohnraumanpassung sind bundes- oder landesweite sowie kommunale Förderprogramme zur Teilung oder zum Tausch von Wohnraum. Auch die Förderung von Formen gemeinschaftlichen Wohnens (Erwachsenen-WGs, Mehrgenerationenhäuser) könnte einen Beitrag zur Flexibilisierung von Wohnraum darstellen⁵⁴. Ein weiterer Hebel ist die Aus- und Weiterbildung von Architekt*innen und Stadtplaner*innen: Kreative Konzepte zum

⁵⁰ vgl. <https://fliegen-und-klima.de/am-boden-bleiben.html>

⁵¹ ebda.

⁵² s. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/wohnflaeche#wohnflaeche-pro-kopf-gestiegen>

⁵³ vgl. <https://www.dza.de/themen/wohnen-nachbarschaft/detailansicht/steigende-wohnenkosten-bei-aelteren-umzug-in-kleinere-wohnung-oft-keine-alternative>

⁵⁴ vgl. <https://fairmietung-hamburg.de/zukunftsmodell-mehrgenerationenhaus/>

Umbau des Gebäudebestands hin zu flexibler zu nutzenden Gebäuden sind weiterhin gefragt⁵⁵. Diese Förderungen sind auf allen administrativen Ebenen adressierbar.

Energieeinsparungen werden auch erzielt, wenn weniger Produkte hergestellt werden können: Das Teilen von Gegenständen spart Ressourcen, ebenso wie das Reparieren von Dingen oder der Gebrauchtkauf.⁵⁶ Die Schaffung von Begegnungsräumen kann den sozialen Zusammenhalt im Quartier stärken und vergrößert so auch das Potenzial, Dinge gemeinsam zu nutzen. Der Raum bietet die Möglichkeit, Workshops, Repaircafés und Tauschbörsen zu beherbergen. Ähnliche Funktionen können auch öffentliche Räume wie Parks, Spielplätze, Grillplätze usw. erfüllen, vgl. Schmitt et al. (2015). Dies ist ein Hebel auf kommunaler Ebene.

5.2 Handlungsfeld „Stromversorgung“

Im Handlungsfeld „Stromversorgung“ besteht die zentrale Herausforderung darin, bis 2040 ausreichend erneuerbare Stromerzeugungskapazitäten aufzubauen. Das dafür erforderliche Maßnahmenbündel setzt zunächst an der Ausweisung von ausreichend Flächen für Windenergie- und PV-Freiflächenanlagen an (Maßnahme 4 „Ausweisung von mind. 3 % der Landesfläche für Windenergieanlagen und PV-Freiflächenanlagen“). Darüber hinaus ist eine Beschleunigung der Genehmigungsverfahren von hoher Bedeutung, da in kurzer Zeit eine hohe Stromerzeugungsleistung zugebaut werden muss (Maßnahme 5 „Beschleunigung der Genehmigungsverfahren für Windenergieanlagen und PV-Freiflächenanlagen“). Um auch einen ausreichenden finanziellen Anreiz bei Investoren, Bürger*innen und Kommunen zu schaffen, sind die Maßnahme 6 „Verbesserung der Förderbedingungen für PV- und Windenergieanlagen in Baden-Württemberg“ und Maßnahme 7 „Bessere Beteiligung und Teilhabe von Kommunen und Anwohner*innen an EE-Anlagen“ relevant.

5.2.1 Maßnahme 4: „Ausweisung von mind. 3 % der Landesfläche für Windenergieanlagen und PV-Freiflächenanlagen“

Auf nationaler Ebene ist ein ambitionierter Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien geplant. Jetzt geht es auch darum, die nationale Planung auf Länderebene und regionaler Ebene umzusetzen. Die Regionalisierung der bundesweiten Zielszenarien ergibt für Baden-Württemberg einen Bedarf an Windenergieanlagen von 11 GW (Agora-Szenario-BW-2040 mit einer vergleichsweise hohen Stromerzeugung durch PV-Anlagen und Wind offshore) bis 22 GW (Ariadne-Szenario-BW-2040 mit einem vergleichsweise hohen Stromverbrauch und einer geringen Stromerzeugung durch Wind offshore Anlagen) (vgl. Abschnitt 3.3.4). Der erforderliche Ausbau der Windenergie in Baden-Württemberg entspricht rund 3.000 bis 5.000 Windenergieanlagen, wofür 1,4 % bis 2,7 % der Landesfläche benötigt werden.

Der Bedarf an PV-Freiflächenanlagen beläuft sich auf 5 GW (UBA-Szenario-BW-2040 mit einer vergleichsweise geringen Stromerzeugung durch PV-Anlagen bei einer insgesamt geringen Stromnachfrage und einem sehr hohen Anteil an Wind onshore) bis 14 GW (Agora-Szenario-BW-2040 mit einer vergleichsweise hohen Stromerzeugung durch PV-Anlagen bei einer insgesamt höheren Stromnachfrage und einem geringeren Anteil an Wind onshore) (vgl. Abschnitt 3.3.4). Für PV-

⁵⁵ vgl. <https://www.akbw.de/themen/nachhaltigkeit-klima/suffizienz-schluessel-zu-mehr-nachhaltigem-wohnraum>

⁵⁶ Bei der Reparatur bzw. dem Gebrauchtkauf ist der höhere Energieverbrauch des Altgerätes gegen den geringeren eines Neugerätes abzuwiegen. Um eine Bewertung der ökologischen Vorteilhaftigkeit treffen zu können, sollten die Lebenszykluskosten eines Gerätes herangezogen werden. Es sollte die Pflicht zur Ausweisung der Lebenszykluskosten sowie der Lebensdauer des Produktes bestehen.

Freiflächenanlagen werden rund 5.000 ha bis 14.000 ha benötigt, was in etwa 0,2 % bis 0,4 % der Landesfläche entspricht.

In Summe beläuft sich der Flächenbedarf auf 1,8 % (Agora-Szenario-BW-2040), 2,1 % (UBA-Szenario-BW-2040) und 3,1 % (Ariadne-Szenario-BW-2040) der Landesfläche von Baden-Württemberg für die Nutzung von Windenergie und Photovoltaik auf Freiflächen.

Im Klimaschutzgesetz Baden-Württemberg wird derzeit ein Flächenziel von mindestens 2 % für die Nutzung von Windenergie und Photovoltaik auf Freiflächen in den einzelnen Regionen vorgegeben⁵⁷. Baden-Württemberg hat die regionale Planungsoffensive begonnen, in der die Regionalverbände mit Unterstützung des Landes das 2%-Flächenziel des Landes in den Regionen umsetzen sollen. Hierzu sollen bis 2025 die Regionalpläne erstellt werden.

Auf **Bundesebene** wurde Anfang Juli 2022 das Gesetz zur Erhöhung und Beschleunigung des Ausbaus von Windenergieanlagen an Land (Wind-an-Land-Gesetz – WaLG) verabschiedet. Artikel 1 des WaLG stellt das Windflächenbeschleunigungsgesetz (WindBG) dar, wobei verbindliche Flächenziele je Bundesland vorgegeben werden. In der aktuellen Fassung entfallen auf Baden-Württemberg mindestens 1,1 % bis zum 31.12.2027 sowie mindestens 1,8 % ab dem 31.12.2032⁵⁸.

Ausgehend von dem o. g. Flächenbedarf und aufgrund der Tatsache, dass die Flächenplanung nicht zu knapp ausfallen sollte, weil nicht alle geplanten Flächen dann auch tatsächlich realisiert werden können, sollte auf **Landesebene** das Klimaschutzgesetz Baden-Württemberg deshalb dahingehend novelliert werden, dass das Flächenziel auf mindestens 3 % angehoben wird. Darüber hinaus sollten durch die Landesregierung oder auf Ebene der **Regionalverbände** im Rahmen eines koordinierten Prozesses Teilflächenziele festgelegt und entsprechende Regionalpläne aufgestellt werden.

Eine konkrete Maßnahme zur Flächenfreigabe für Onshore-Windenergieanlagen ist das Vorhaben der Landesregierung, auf den Staatswaldflächen die Potenzialflächen zu identifizieren und zur Vermarktung zu bringen. Hierfür wurden bei ForstBW entsprechende Ressourcen geschaffen. Darüber hinaus ist die Etablierung von Artenhilfsprogrammen wichtig, um Beeinträchtigungen durch den EE-Ausbau zu kompensieren.

Bis 2030 hat sich das Land zudem das Ziel gesetzt, dass alle geeigneten landeseigenen Dächer mit Photovoltaikanlagen ausgestattet sind.⁵⁹ Auch die **Kommunen** im Land sollten sich entsprechende Ziele für kommunale Gebäude und Liegenschaften (z. B. Schulen, Kindergärten, Sporthallen und Rathäuser) setzen. Nicht zuletzt als Maßnahmen gegen den Fachkräftemangel kann eine Förderung von Selbstbau-Initiativen, wie sie zum Beispiel in der Schweiz zu finden sind, eingerichtet werden.⁶⁰

Zwischenziele können bei der Umsetzung des PV-Ausbaus auf Dächern helfen und ein Monitoring ermöglichen. Mit Hilfe einer interaktiven Karte könnten zudem die bereits ausgewiesenen Flächen sowie der Ausbau und die Ziele für PV-Dachanlagen auf landeseigenen und kommunalen Gebäuden visualisiert und für alle transparent gemacht werden. Hierzu ließe sich beispielsweise der Energieatlas der LUBW um weitere Karten ergänzen.

⁵⁷ https://www.landtag-bw.de/files/live/sites/LTBW/files/dokumente/WP17/Drucksachen/0000/17_0943_D.pdf §4b

⁵⁸ https://www.bundesrat.de/SharedDocs/drucksachen/2022/0301-0400/318-22.pdf?__blob=publication-File&v=1 (S. 6)

⁵⁹ <https://fm.baden-wuerttemberg.de/de/bauen-beteiligungen/energie-und-klimaschutz/photovoltaik-auf-landesgebaeuden/>

⁶⁰ https://www.vese.ch/wp-content/uploads/Handbuch_PV_Selbstbau.pdf

5.2.2 Maßnahme 5: „Beschleunigung der Genehmigungsverfahren für Windenergieanlagen und PV-Freiflächenanlagen“

Der erforderliche jährliche Netto-Zubau von Windenergie liegt in den auf Baden-Württemberg skalierten Szenarien dabei bei 0,5 GW/a (Agora-Szenario-BW-2040), 0,7 GW/a (UBA-Szenario-BW-2040) und 1,0 GW/a (Ariadne-Szenario-BW-2040), was im Vergleich zum mittleren Netto-Zubau in den letzten zehn Jahren in Höhe von etwa 0,1 GW/a einer Verfünf- bis Verzehnfachung entspricht⁶¹. Bei PV-Freiflächenanlagen beläuft sich der erforderliche jährliche Netto-Zubau auf 0,2 GW/a (UBA-Szenario-BW-2040) bzw. 0,6 GW/a (Agora-Szenario-BW-2040 und Ariadne-Szenario-BW-2040), was im Vergleich zum mittleren Netto-Zubau in den letzten zehn Jahren in Höhe von etwa 0,05 GW/a⁶² in etwa auch einer Verzehnfachung entspricht (vgl. Abschnitt 3.3.4).

In Baden-Württemberg dauert die Genehmigung einer Windenergieanlage im Schnitt 28 Monate. Damit liegt das Land über dem Bundesdurchschnitt, der bei 23 Monaten liegt.⁶³ Dies ist insbesondere deshalb bemerkenswert, weil Baden-Württemberg mit zuletzt 13 Verfahren und einer genehmigten Leistung von 110 MW ein unterdurchschnittliches Aufkommen an Genehmigungsanfragen aufweist. Die Verzögerungen entstehen also nicht aufgrund des hohen Aufkommens an Anträgen, sondern es ist naheliegend, dass sie durch Prozessverbesserungen behoben werden können. Dies ist vor allem auch deshalb wichtig, da die Anzahl der Genehmigungsverfahren im Zuge des erforderlichen EE-Ausbaus deutlich zunehmen wird.

Häufig müssen Daten für die naturschutzrechtliche Prüfung anlagenspezifisch neu erhoben werden, was zeitintensiv ist. Durch den Aufbau eines entsprechenden Datenbestandes ließe sich an dieser Stelle des Genehmigungsverfahrens Zeit einsparen. Hier können auch die Naturschutzverbände einbezogen werden, die über viel Detailwissen zu den Naturschutzbelangen vor Ort verfügen.

Neben der o. g. Planung der benötigten Flächen geht es also auch um die Verfahren für die einzelnen Anlagen. Die Task Force zur Beschleunigung des Ausbaus der erneuerbaren Energien soll hier in Baden-Württemberg entsprechende Maßnahmen einleiten⁶⁴, wie zum Beispiel eine stärkere Digitalisierung des Verfahrens, die Einrichtung der Stabsstellen Energiewende bei den Regierungspräsidien und die Erstellung eines Verfahrensleitfadens. Mit den vorgesehenen Maßnahmen werden wesentliche Best Practice Empfehlungen umgesetzt, wie sie beispielsweise auf EU-Ebene formuliert worden sind⁶⁵. Hilfreich wäre zudem auch, wenn die Rechtsgrundlage zum Zeitpunkt der Antragstellung beibehalten bliebe, so dass laufende Verfahren nicht wieder neu begonnen werden müssen (Zimmer et al. 2022).

Die wesentliche Herausforderung besteht nun darin, die Maßnahmen auch tatsächlich effektiv zu implementieren. Gleichzeitig ist sicherzustellen, dass die Anstrengungen und die implementierten Maßnahmen dauerhaft bestehen bleiben, um auch den mittel- und langfristig notwendigen Ausbau zu gewährleisten. Dafür ist auch eine ausreichende personelle Ausstattung der in den Genehmigungsprozess involvierten Behörden und Gerichte nötig. Wichtig ist in diesem Zusammenhang auch,

⁶¹ Das bisherige Maximum des Zubaus an Windenergieanlagen war im Jahr 2017 mit 390 MW bzw. 123 Anlagen (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2021), S. 14)

⁶² Das bisherige Maximum des Zubaus an PV-Freiflächenanlagen war im Jahr 2010 mit 118 MW (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2021) S. 17)

⁶³ Fachagentur Windenergie: https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/Genehmigung/FA_Wind_Dauer_Genehmigungsverfahren_Wind_an_Land.pdf

⁶⁴ <https://stm.baden-wuerttemberg.de/de/themen/task-force-energiewende/#c136902>

⁶⁵ <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/0e9db9fa-d653-11ec-a95f-01aa75ed71a1/language-en>

den für den EE-Ausbau zuständigen Institutionen und Personen eine ausreichende politische Rückendeckung und Unterstützung zu geben.

5.2.3 Maßnahme 6: „Verbesserung der Förderbedingungen für PV- und Windenergieanlagen in Baden-Württemberg“

Insbesondere bei den Förderbedingungen für PV-Anlagen auf **Bundesebene** gibt es nach wie vor Handlungsbedarf. Mit Hilfe der PV-Förderung im EEG sollte die PV-Stromerzeugung in den letzten zehn Jahren zwar ausgebaut werden, gleichzeitig sollte der PV-Ausbau aber nicht „aus dem Ruder“ laufen. Entsprechend war die PV-Förderung von „PV-Deckeln“ geprägt: Neben dem 52-GW-Deckel, der 2020 erreicht und abgeschafft wurde, und dem von 100 MW auf 500 MW angehobenen Deckel für PV-Freiflächenanlagen auf benachteiligten landwirtschaftlichen Gebieten in Baden-Württemberg, gibt es den bundesweiten „atmenden“ Deckel, d. h. die Degression der Einspeisevergütungen für PV-Dachanlagen. Dieser soll sicherstellen, dass der vorgegebene Ausbaupfad eingehalten wird, und er ist vor allem so gestaltet, dass der Ausbaupfad nicht *überschritten* wird.

Angesichts der wichtigen Rolle, die Photovoltaik in klimaneutralen Zielszenarien für Baden-Württemberg spielt, und der ambitionierteren Ausbaupfade, wie sie auch in dieser Studie dargestellt werden, wird hier eine neue Logik notwendig: Der Mechanismus sollte so ausgestaltet werden, dass er sicherstellt, dass der tatsächliche PV-Ausbau *nicht* hinter dem vorgegebenen Ausbaupfad *zurückbleibt*. Statt eines PV-Deckels ist also eine PV-Hebebühne gefragt. Dies ist auch deshalb wichtig, weil die Kosten für PV-Anlagen zuletzt eher gestiegen als gesunken sind und momentan eine hohe Inflationsrate besteht.

Der Degressionsmechanismus sollte also neu justiert werden. Dazu gehört eine Anpassung der Basisdegression an die Kostenentwicklung. Zudem sollte die Basisdegression für einen relativ großen Bereich bei einer Überschreitung des Zielwerts gelten. Bei einer Unterschreitung des Zielbaus sollten die Vergütungssätze angemessen erhöht werden, um den Zubau wieder stärker anzureizen.

Beim Finanzierungsrahmen für Windenergieanlagen besteht generell weniger Handlungsbedarf. Aus baden-württembergischer Sicht verbessern die Anpassung des Referenzertragsmodells und die Einführung der Südquote die hiesige Wettbewerbssituation.

5.2.4 Maßnahme 7: „Bessere Beteiligung und Teilhabe von Kommunen und Anwohner*innen an EE-Anlagen“⁶⁶

Eine prozedurale Beteiligung und finanzielle Teilhabe von Anwohner*innen sind Grundlage für akzeptable EE-Projekte, die von Bürger*innen als gerecht wahrgenommen werden. Ohne diese Beteiligungsformen ist es schwer, geeignete Flächen zu finden und die lokale Unterstützung der Bevölkerung zu erreichen. Beteiligung und Teilhabe gehen dabei Hand in Hand. Eine finanzielle Teilhabe ersetzt dabei nicht eine prozedurale Beteiligung und andersherum. Die Anforderungen von Anwohner*innen und Kommunen an eine Beteiligung unterscheidet sich jedoch regional. Dem sollte bei der Umsetzung gesetzlicher Regelungen Rechnung getragen werden. Beispiele solcher Regelungen einer finanziellen Teilhabe finden sich im § 6 Erneuerbare-Energien-Gesetz, dem *Gesetz zur*

⁶⁶ Die Autoren bedanken sich bei Kathrina Baur & Nicole Lüdi (FA Wind) sowie Jonathan Metz (Landesenergie- und Klimaschutzagentur – Mecklenburg-Vorpommern) für wichtige Hinweise beim Verfassen dieses Kapitels.

Zahlung einer Sonderabgabe an Gemeinden im Umfeld von Windenergieanlagen in Brandenburg und dem Bürger- und Gemeindenbeteiligungsgesetz in Mecklenburg-Vorpommern.

Eine **prozedurale Beteiligung** beginnt bei der Standortfindung, bei der Anwohner*innen bereits dabei sein sollten. Anwohner*innen und die Öffentlichkeit können früh in einen transparenten Prozess eingebunden werden, bei dem sie über das geplante EE-Projekt informiert und einbezogen werden (FA Wind 2022a). So fließen lokale Erfahrungen in den Findungsprozess mit ein, Bedenken können geäußert und in der Planung aufgegriffen werden. Konflikte mit für Anwohner*innen besonders relevanten Orten können so a priori vermieden oder minimiert werden. Insbesondere für die Konfliktvermeidung in Bezug auf Denkmäler, touristische Orte oder besonders geschätzte Orte in der Natur hat dies eine hohe Relevanz.

Ebenso können Bedingungen für den Bau von Anlagen an diesen kritischen Standorten gefunden werden. Beispielsweise kann so eine leichte Anpassung des Standortes einer Anlage, die Interaktion mit touristischer Infrastruktur oder die Einbindung in ein touristisches Konzept erarbeitet werden. Ohne diese Maßnahmen ist es schwer, akzeptable Standorte für Windenergieanlagen zu finden. Im Optimalfall können Anwohner*innen entscheiden, wie sie hier partizipieren. Das kann etwa eine Begehung eines potenziellen Standorts sein oder aber die gemeinsame Arbeit an einer Karte zur Standortfindung. Je nach Region sind unterschiedliche Formate denkbar. In diesem Stadium kann ebenso die Beteiligung von regional ansässigen Unternehmen an der Umsetzung des Projekts geplant werden. Durch etwa das Erschließen der für die Anlage benötigten Fläche sind auch diese am Projekt beteiligt, das so zur regionalen Wertschöpfung beiträgt.

Das Bestreben von Projektierern, Anwohner*innen zu beteiligen, sollte durch die öffentliche Seite unterstützt werden. Ebenso sollte ergänzend Informationsmaterial für einen gelungenen Beteiligungsprozess zur Verfügung gestellt werden. Auch sollten Ansprechpartner*innen den Planer*innen in Beteiligungsprozessen beratend zur Seite stehen. In Baden-Württemberg existiert beispielsweise das Forum Energiedialog, das eine moderierende Funktion zwischen Stakeholdern und Planer*innen einnimmt.⁶⁷

Eine **direkte und indirekte finanzielle Teilhabe** lässt Anwohner*innen oder Kommunen an den Erträgen erneuerbarer Projekte teilhaben. Der Nutzen einer finanziellen Beteiligung entfaltet sich jedoch erst nach Inbetriebnahme einer Anlage. Somit ist eine gute, klare Kommunikation dieses Angebots bereits während der Planung zentral, damit es einen positiven Effekt entfalten kann, bevor es realisiert wird (FA Wind 2022b). Schlecht kommuniziert kann eine solche Zahlung als Bestechung verstanden werden und so einen negativen Effekt auf die Akzeptanz für ein Projekt entfalten (IÖW et al. 2020). Daher sollten einige Regeln bei der Kommunikation eines solchen Angebots befolgt werden, siehe FA Wind (2022b).

Wie auch bei der Beteiligung am Planungsprozess sollte eine Offenheit über die Form der finanziellen Teilhabe bestehen (ibd.). Dadurch, dass es regionale Unterschiede zwischen Kommunen und Anwohner*innen gibt, sind nicht überall das Bedürfnis nach oder die Anforderungen an eine Teilhabe gleich und Teilhabeformen werden unterschiedlich akzeptiert (IÖW et al. 2020). Heute wird über § 6 des EEG 2023 definiert, dass Anlagenbetreiber Kommunen in einem Radius von 2,5 km anteilig eine finanzielle Teilhabe von 0,2 Cent/kWh anbieten sollen. Stimmen anliegende Kommunen diesem Angebot zu, erhalten sie eine entsprechende Zahlung. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass es keine Zweckbindung dieser Mittel gibt. Kommunen sind somit nicht verpflichtet, die Einnahmen für akzeptanzfördernde Zwecke in Bezug auf erneuerbare Energien oder gemeinnützige Maßnahmen

⁶⁷ <http://www.energiedialog-bw.de>, letzter Zugriff am 25.07.22.

einzusetzen. Eine Zweckbindung dieser Mittel hilft jedoch dabei, dass für Bürger*innen der positive Effekt der Beteiligung der Kommune an diesen Anlagen nachvollziehbar wird (IZES et al. 2022).

Eine weitere Möglichkeit ist das Angebot eines Kaufs von Anteilen einer Betreibergemeinschaft durch Anwohner*innen. Erwirtschaftet eine Anlage Erträge, geht dann ein Teil dieser auch an Anwohner*innen, die Anteile besitzen. Allerdings tragen Bürger*innen ebenso das Risiko eines Ertragsausfalls einer Anlage, und nicht zwangsläufig verfügen alle Anwohner*innen über die finanziellen Mittel für einen Erwerb dieser Anteile (IÖW et al. 2020). Somit erscheint es sinnvoll, ebenso eine Beteiligung von Kommunen an Projekten zu ermöglichen.

Eine Alternative zur nationalen Regelung findet sich in Brandenburg (BbgWindAbgG) 2019). Das *Gesetz zur Zahlung einer Sonderabgabe an Gemeinden im Umfeld von Windenergieanlagen* verpflichtet Betreiber von Windenergieanlagen zu einer Zahlung von 10.000 € pro Anlage und Jahr anteilig an Kommunen in einem Umkreis von 3 km. Im Unterschied zur nationalen Regelung müssen diese Zahlungen durch die Kommunen für akzeptanzsteigernde Maßnahmen eingesetzt werden (§4 BbgWindAbgG). Dieses Modell ist jedoch sehr starr und lässt keine alternativen oder individuell gestalteten Modelle zu.

Darüber hinaus existiert in Mecklenburg-Vorpommern das *Gesetz über die Beteiligung von Bürgerinnen und Bürgern sowie Gemeinden an Windparks in Mecklenburg-Vorpommern*. Es verpflichtet Betreiber von Windenergieanlagen zu einem Angebot einer finanziellen Teilhabe an Anwohner*innen und Kommunen in einem Umkreis von 6 km. Dabei sollen Planende Kommunen und Anwohner*innen ein Kaufangebot von Anteilen an der Betreibergesellschaft machen. Erfahrungen in Mecklenburg-Vorpommern zeigen jedoch, dass diese Angebotspflicht einen großen Aufwand für die Projektierer erzeugt. Ein Großteil der Projektierer geht daher heute den Weg einer alternativen Regelung, die durch das Gesetz ermöglicht wird. Sie treten dabei in einen Dialog mit angrenzenden Kommunen zu den Möglichkeiten einer finanziellen Teilhabe. Es entsteht so Raum für andere Teilhabemodelle, die in einem Dialog entwickelt werden können. Eine häufig genutzte Variante ist eine Hybridvariante. Diese besteht aus der Regelung des § 6 EEG innerhalb eines 2,5 km Radius um die geplanten Anlagen. Darüber hinaus wird eine weitergehende Zahlung der Projektierer an Kommunen in einem Abstand von 2,5 bis 6 km vereinbart. Diese Kombination wird gewählt, da sich Projektierer im Rahmen des EEG die Kosten der Zahlung vom Netzbetreiber erstatten lassen können. Sie tragen damit nur die Kosten von Zahlungen an Kommunen in einer Distanz von 2,5 km bis 6 km.

Aufgrund der großen Diversität von Anwohner*innen und Kommunen in deutschen Regionen erscheint ratsam, eine Offenheit für finanzielle Beteiligungsmodelle zu schaffen, wie es in Mecklenburg-Vorpommern möglich ist. So kann regionalen Eigenheiten Rechnung getragen werden. Denn Lösungen, die für Kommunen in Brandenburg oder Mecklenburg-Vorpommern durchaus interessant sein können, sind es nicht zwangsläufig in Baden-Württemberg.

Verteilungsgerechtigkeit zwischen Anlagenbetreibern, Anwohner*innen und Kommunen beim Ausbau erneuerbarer Energien sollte in Baden-Württemberg durch eine verpflichtende finanzielle Teilhabe angestrebt werden. Im Rahmen eines Gesetzes könnte dies durch eine Pflicht zu einer finanziellen Beteiligung von Kommunen realisiert werden, die durch eine Zweckbindung ergänzt wird. In Anlehnung an die Erfahrungen in Mecklenburg-Vorpommern könnte diese einerseits eine finanzielle Teilhabe mindestens in Höhe der durch § 6 EEG festgelegten Beträge definiert werden. Diese würde in einem definierten Radius von bspw. 6 km notwendig. Darüber hinaus sollte ebenso ein Weg für eine frei gestaltete Teilhabeform ermöglicht werden, die die erste Regelung ablöst, wenn Kommunen und Projektierer gemeinsam eine alternative Teilhabeform finden konnten.

5.2.5 Maßnahme 8: „Aufbau einer ausreichenden Infrastruktur für Stromtransport (Netzausbau)“

Baden-Württemberg ist in den untersuchten Zielszenarien ein Netto-Stromimporteur in der Größenordnung von 17 TWh/a (UBA-Szenario-BW-2040), 23 TWh/a (Agora-Szenario-BW-2040) und 29 TWh/a (Ariadne-Szenario-BW-2040) (vgl. Abschnitt 4.2.7). Darüber hinaus ist Baden-Württemberg auch Stromtransitland in Richtung Frankreich sowie Schweiz und Italien. Damit sind sowohl Baden-Württemberg als auch seine europäischen Nachbarn auf ausreichend ausgebaute Stromnetze angewiesen, um erneuerbare Energien (v.a. Windenergie) aus Norddeutschland nach Süddeutschland zu transportieren.

Der schleppende Netzausbau in Deutschland hemmt bereits heute den Ausbau der erneuerbaren Energien. Für die vollständige Dekarbonisierung der Stromerzeugung in Deutschland und in Europa ist ein erheblicher weiterer Netzausbau nötig, sowohl auf Verteilnetzebene als auch auf Übertragungsnetzebene (BNetzA 2019; ENTSO-E; ENTSG 2020). Wichtig ist in diesem Kontext auch, dass der Ausbau der erneuerbaren Energien möglichst lastnah stattfindet und vor allem in Süddeutschland forciert wird, um das bestehende Nord-Süd-Gefälle zumindest abzuschwächen.

Insbesondere auf der Übertragungsnetzebene stellt der Netzausbau auch in Sachen Akzeptanz eine Herausforderung dar. Es ist nicht im Sinne der Energiewende, wenn im Norden Netzausbau und Windenergieausbau für den Süden realisiert werden, und die Anlagen dann abgeregelt werden müssen, weil es im Süden Netzengpässe gibt. Sowohl auf der Übertragungs- als auch auf der Verteilnetzebene stellt sich die Frage, wie ein Teil des Netzausbaus durch alternative Maßnahmen ersetzt werden kann und wie diese Optionen finanziert werden können. Auch hierfür sind entsprechende Rahmenbedingungen erforderlich.

Um den Netzausbau auf Übertragungsnetzebene zu erreichen, stellt einerseits die Kontinuität des Rechtsrahmens selbst eine Beschleunigungsmaßnahme für den Netzausbau dar. Wir bewerten die aktuellen Abläufe der Netzausbauplanung als grundsätzlich positiv und empfehlen deshalb, den aktuellen Rechtsrahmen beizubehalten, zumindest für die Planfeststellung der einzelnen Vorhaben. Dennoch gibt es in diesem Rahmen Optionen, die den Netzausbau beschleunigen. Zentrale Handlungsempfehlungen dabei sind⁶⁸:

- Reduktion des klassischen Netzausbaubedarfs durch Technologieoffenheit und Alternativenabwägungen (z. B. Hochtemperaturleiterseile oder dynamische Netzbetriebsmittel, die die bestehende Netzinfrastruktur besser nutzen können)
- Überarbeitung der Anreizregulierungsverordnung, die diese Abwägung für die Netzbetreiber attraktiver macht
- Verbesserung des Beteiligungsprozesses
- Verbesserung des Controllings, Transparenz und Arbeitsroutinen etablieren

Neben einer ausreichenden Infrastruktur im Bereich der Stromnetze ist Baden-Württemberg auch darauf angewiesen, dass es an ein deutschlandweites Wasserstoff-Fernleitungsnetz angeschlossen ist. Dies ist unter anderem für den Betrieb der Wasserstoff-Kraftwerke essentiell. Die Landesregierung sollte sich daher auf Bundesebene und im Bereich des Netzentwicklungsplans Gas dafür

⁶⁸ Für mehr Details siehe https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Policy-Brief_Oeko-Institut_Netzausbau.pdf

einsetzen, dass das in Norddeutschland und in Nordrhein-Westfalen im Aufbau begriffene Wasserstoff-Fernleitungsnetz entlang des Oberrheingrabens und auf der Achse Mannheim / Karlsruhe – Stuttgart – Ulm weitergeführt wird.

5.3 Handlungsfeld „Gebäudewärmeversorgung“

Im Handlungsfeld „Gebäudewärmeversorgung“ besteht die Schlüsselherausforderung darin, den Gebäudebestand in den kommenden 20 Jahren auf Klimaneutralität zu trimmen. Dabei geht es darum, durch Sanierungsaktivitäten den sektoralen Wärmeverbrauch deutlich zu reduzieren sowie die heute durch Erdgas und Heizöl dominierte Wärmeversorgung durch klimafreundliche Energieträger zu ersetzen. Die notwendigen Sanierungsaktivitäten umfassen vor allem den Wärmeschutz der Gebäudehülle sowie die Eindämmung der Lüftungswärmeverluste (z. B. durch moderne Lüftungstechnik) (vgl. Maßnahme 2 „Energetische Gebäudesanierung“). Im Bereich der Wärmeversorgung müssen die bestehenden, mit fossilen Brennstoffen betriebenen Heizungsanlagen durch einen Mix aus dezentralen EE-Anlagen und Nah- und Fernwärmeanschlüssen ersetzt werden. Die Nah- und Fernwärmeversorgung ist natürlich ebenfalls zügig zu dekarbonisieren. Neubauvorhaben sollten schon heute ohne fossile Brennstoffe auskommen und möglichst ressourcenschonend realisiert werden.

Die Instrumentierung des Handlungsfelds wird sehr stark durch Bundesinstrumente geprägt. In einigen Bereichen (z. B. bei den energetischen Mindestanforderungen für Neubau und Bestandssanierungen) sind die Regelungen sogar als abschließende Bundesregelungen formuliert, so dass die Länder gar keine Möglichkeit haben, strengere Vorgaben durchzusetzen. Dennoch können die Länder in einigen Bereichen durch eigene Instrumente sehr wirkmächtige Impulse setzen bzw. dafür sorgen, dass Bundesinstrumente (z. B. ordnungsrechtliche Vorgaben, Förderprogramme) auf Landesebene ihre volle Wirkung entfalten können.

5.3.1 Maßnahme 9: „Kommunale Wärmeplanung“

Das Klimaschutzgesetz des Landes Baden-Württemberg verpflichtet die Stadtkreise und die Großen Kreisstädte (hierbei handelt es sich i. d. R. um die Kommunen mit mehr als 20.000 Einwohner*innen), bis zum 31.12.2023 einen kommunalen Wärmeplan zu erstellen. Dieser muss spätestens alle sieben Jahre nach der Erstellung fortgeschrieben werden. Die verpflichteten Kommunen müssen in den Plänen mindestens fünf Klimaschutzmaßnahmen nennen, mit deren Umsetzung innerhalb der auf die Veröffentlichung folgenden fünf Jahre begonnen werden soll. Kleinere (nicht verpflichtete) Kommunen werden ermutigt, ebenfalls eine kommunale Wärmeplanung aufzusetzen. Hierzu hat die Landesregierung ein Förderprogramm aufgesetzt.⁶⁹

Die Landesregierung unterstützt die Kommunen bei der Umsetzung der Kommunalen Wärmeplanung durch ein breites Beratungsangebot. Dies umfasst z. B. die Bereitstellung diverser Leitfäden⁷⁰, das bei der KEA angesiedelte Kompetenzzentrum Kommunale Wärmeplanung⁷¹ sowie das Netzwerk „Regionale Beratungsstellen zur Unterstützung der kommunalen Wärmeplanung“. Für die

⁶⁹ <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/energie/informieren-beraten-foerdern/foerderprogramme/foerderprogramm-fuer-die-freiwillige-kommunale-waermeplanung/>

⁷⁰ Z. B. der Handlungsleitfaden Kommunale Wärmeplanung (<https://um.baden-wuerttemberg.de/de/service/publikation/did/handlungsleitfaden-kommunale-waermeplanung/>) oder die umfangreichen Planungsgrundlagen in Form eines Technikkatalogs (https://www.kea-bw.de/fileadmin/user_upload/Waerme-wende/Wissensportal/Technikkatalog_Tabellen_v1.zip)

⁷¹ <https://www.kea-bw.de/waermewende>

Kommunale Wärmeplanung erhalten die Kommunen Konnexitätszahlungen in gesetzlich festgelegter Höhe.

Die Kommunale Wärmeplanung ist als fortlaufender Prozess zu verstehen. Es geht nicht um die einmalige Erstellung einer Strategie in Form eines Gutachtens, sondern um eine fortlaufende Prüfung/Fortschreibung dieser Strategie sowie Umsetzung dieser im Rahmen kommunaler Entscheidungen und des Verwaltungshandelns. Die Konnexitätszahlungen reichen i. d. R. aus, die Erstellung eines ersten Wärmeplans extern zu vergeben. Sie reichen allerdings weder aus, innerhalb der Kommunen personelle Strukturen für die dauerhafte Verankerung dieser neuen Aufgabe aufzubauen noch Maßnahmen umzusetzen, die der materiellen Umsetzung der Wärmeplanung dienen. Die Zahlungen an die Kommunen sollten deswegen entsprechend erhöht werden, insbesondere um es den Kommunen zu ermöglichen, in den Verwaltungen die für die Umsetzung der Kommunalen Wärmeplanung notwendigen personellen Kapazitäten und Kompetenzen aufzubauen.

Ferner sollte die Verpflichtung zum Einstieg in eine Kommunale Wärmeplanung nach und nach auf kleinere Kommunen ausgeweitet werden. Die Kommunale Wärmeplanung ist ein Planungs- und Umsetzungsprozess, mit Hilfe dessen Kommunen ihre Wärmeversorgung und die damit verbundenen Infrastrukturen strategisch, gebietsscharf und langfristig weiterentwickeln können. Hauseigentümer und Betriebe erhalten damit Orientierung, wie sich ihre wärmerlevanten Investitionsentscheidungen am besten an dem Langfristziel einer klimaneutralen Wärmeversorgung ausrichten lassen. Diese Orientierung ist auch in kleineren Kommunen notwendig und hilfreich.

Verpflichtete Kommunen müssen ihre Wärmepläne dem zuständigen Regierungspräsidium vorlegen. Dieses prüft die Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben. Dieser Prüfauftrag sollte weiter konkretisiert werden. Gleichzeitig sollte ein Austausch zwischen den Regierungspräsidien initiiert werden. Kommunen sollten unterstützt werden, möglichen Flächenbedarf zur Wärmeerzeugung und -speicherung (z. B. für Freiflächen-Solkollektoranlagen, Großwärmespeicher, Zugang zu Gewässern bei Großwärmepumpen) planerisch zu sichern.

Wie oben dargestellt, sehen die untersuchten Szenarien Wärmepumpen und dekarbonisierte Wärmenetze als Schlüsseltechniken der Wärmenetze. Ein breiter Markthochlauf von Wärmepumpen wird dazu führen, dass die Gasnachfrage in einzelnen Verteilnetzsträngen nach und nach zurückgeht und Teile des Verteilnetzes überflüssig werden. Gleiches gilt in Gebieten, für die die Kommunale Wärmeplanung einen Ausbau der Nah- und Fernwärme oder eine Verdichtung der Anschlussraten in bestehenden Wärmenetzversorgungsgebieten als Vorzugsvariante vorsieht. Die (Teil-)Stilllegung der Gasverteilstützinfrastruktur ist in Deutschland regulatorisches Neuland. Baden-Württemberg sollte hierfür einen Länderdialog initiieren, der darauf abzielt, den Regulierungsrahmen für die Gasverteilstütznetze an den Zielen der Wärmewende auszurichten. Dabei sollen bestehende Fehlanreize des heutigen Regulierungsrahmens (z. B. Anschlussverpflichtung im Energiewirtschaftsrecht, Konzessionsrecht, Berücksichtigung späterer Stilllegungskosten in den Netzentgelten) beseitigt und Regelungen ergänzt werden, den Ausstieg aus der Gasversorgung sozial abzufedern.

5.3.2 Maßnahme 10: „Wärmepumpen-Offensive“

Neben Effizienztechniken (u. a. Wärmeschutz an der Gebäudehülle) und klimafreundlicher Nah- und Fernwärme gehören Wärmepumpen zu den Schlüsseltechniken für die Wärmewende. Der Heizungsmarkt bietet inzwischen sehr viele Geräte an, die auch in bestehenden Gebäuden effizient Wärme bereitstellen.

Im Vergleich zu den anderen Bundesländern weist Baden-Württemberg eine verhältnismäßig hohe Wärmepumpen-Dichte auf. Angesichts des notwendigen Markthochlaufs auf Bundesebene (angestrebt wird ein Marktabsatz von durchschnittlich 500.000 Wärmepumpen pro Jahr und damit eine Vervielfachung des aktuellen Marktabsatzes) müssen auch in Baden-Württemberg deutlich mehr Wärmepumpen installiert werden. Dies gilt insbesondere für bestehende Gebäude. Die dafür notwendigen ordnungsrechtlichen Leitplanken müssen durch die 65%-Anforderung (s. o.) gesetzt werden.

Wärmepumpen kommen derzeit hauptsächlich in Einfamilienhäusern zum Einsatz. Notwendig ist die gezielte Förderung von Demonstrationsprojekten im Bereich bisheriger Nischenanwendungen, z. B. im Rahmen eines eigens dafür aufgelegten Landesförderprogramms. Beispielsweise müssen Wärmepumpen zukünftig auch flächendeckend in Mehrfamilienhäusern installiert werden. Dies gilt insbesondere für Quartiere, in denen auch mittelfristig keine wärmenetzgestützte Wärmeversorgung möglich ist. Hier besteht die Herausforderung oftmals in der Erschließung der Wärmequelle. Wichtig sind beispielsweise auch Wärmepumpen-Lösungen für Gebäude mit Etagenheizungen. Hilfreich wäre auch die Einrichtung regionaler Kompetenzzentren, die als Informations-Hub und Vernetzungsportal dienen.

Ein Regulierungsrahmen für den Ausstieg aus der Gasversorgung in der Gebäudewärme wäre auch für den Markthochlauf von Wärmepumpen sehr wichtig (s. o.). Dabei geht es unter anderem um ein Kippen der Anschlusspflicht an das Erdgasnetz im Energiewirtschaftsgesetz, aber auch um ein Betriebsverbot für Gas- und Ölkessel ab spätestens 2040. Ein solches Verbot sollte frühzeitig angekündigt werden, um allen Hauseigentümern Orientierung und Planungssicherheit für ihre Investitionen im Heizungskeller zu gewährleisten. Gleichzeitig setzt es den Gasverteilnetzbetreibern einen klaren Rahmen für ihre Investitionen in das Netz.

5.3.3 Maßnahme 11: „Ausbauoffensive für Nah- und Fernwärmenetze und deren Dekarbonisierung“

In den auf Baden-Württemberg skalierten klimaneutralen Zielszenarien kommt dem Ausbau der Nah- und Fernwärmeversorgung eine wichtige Rolle zu. Die Nah- und Fernwärmenachfrage für Gebäude beläuft sich in den auf Baden-Württemberg skalierten Zielszenarien auf 9 TWh (UBA-Szenario-BW-2040), 16 TWh (Ariadne-Szenario-BW-2040) und 19 TWh (Agora-Szenario-BW-2040).

Dafür notwendig sind sowohl ein Ausbau der Nah- und Fernwärmeversorgung als auch deren Dekarbonisierung. Bei Ersterem geht es um die Erhöhung der Anschlussrate in bestehenden Netzversorgungsgebieten, die Erweiterung bestehender Wärmenetze sowie den Neubau von Netzen. Um die Nah- und Fernwärme klimaneutral zu erzeugen, müssen die heute noch dominierenden Energieträger Steinkohle und Erdgas vollständig ersetzt werden. Zukünftig setzt sich der Energieträgermix in der Nah- und Fernwärmeversorgung aus Müllverbrennung, Geothermie und Abwärme sowie aus Fluss-, See- und Abwasserwärmepumpen zusammen. Darüber hinaus ergänzen Solarthermieanlagen in Kombination mit einem saisonalen Wärmespeicher die Nah- und Fernwärmeversorgung. Nur zur Deckung der Spitzenlast im Winter bzw. bei einem unzureichenden Angebot an den zuvor genannten Energieträgern werden Biomasse, Wasserstoff und Elektroheizkessel eingesetzt.

Die Betreiber der großen Nah- und Fernwärmenetze in Baden-Württemberg entwickeln Strategien und Pläne zur Dekarbonisierung ihres Erzeugungsparks. Die von einigen Betreibern (z. B. in Heilbronn, Stuttgart, Ulm) verfolgte Strategie, Kohle durch Erdgas zu ersetzen, steht angesichts der

unsicheren Zukunft russischer Erdgaslieferungen auf dem Prüfstand. Eine einfache Substitution von Kohle durch Erdgas wäre auch mit den Klimaschutzziele nur schwer vereinbar.

Die finanzielle Förderung der Transformation der Wärmenetze soll zukünftig über die Bundesförderung effiziente Wärmenetze (BEW) erfolgen. Auf Landesebene gibt es noch ein eigenes Förderprogramm, dessen Zukunft allerdings offen ist.⁷²

Ein Förderbaustein der BEW ist die Erstellung von Dekarbonisierungsfahrplänen für Wärmenetze. Dekarbonisierungsfahrpläne könnten auf eine rechtliche Grundlage gestellt werden. Beispielsweise verpflichtet das Hamburger Klimaschutzgesetz die Wärmenetzbetreiber, den zuständigen Behörden solche Pläne vorzulegen. Darin ist darzulegen, „*wie das Ziel der nahezu klimaneutralen Wärmeversorgung bis zum Jahr 2050 erreicht werden kann und wie sichergestellt wird, dass bis zum 31. Dezember 2029 mindestens 30% der aus dem jeweiligen Netz genutzten Wärme aus erneuerbaren Energien stammt*“.⁷³ Dekarbonisierungsfahrpläne sind in Einklang mit der Kommunalen Wärmeplanung zu erstellen. Dekarbonisierungsfahrpläne und Förderung könnten so verzahnt werden, dass nur solche Maßnahmen gefördert werden, die kompatibel mit dem Plan sind. Die Förderung fossiler Wärmeerzeugungsanlagen (wie beispielsweise über das KWKG) sollte hingegen beendet werden.

Ein Ausbau der Nah- und Fernwärme erfordert ein starkes Vertrauen seitens der Verbraucher. Hierzu ist es notwendig, die Transparenz über Preise und Qualitäten zu erhöhen. Vergleichbar mit anderen europäischen Ländern sollte auch in Deutschland die Einführung einer Preisregulierung in Erwägung gezogen werden. Gleichzeitig müssen bestehende Netzanschlussrüden wie beispielsweise in der Wärmelieferverordnung (WärmeLV) behoben werden.

Bei den erneuerbaren Wärmeeinspeisern geht es um eine gezielte „Zuförderung“ ausgewählter Technologieoptionen (z. B. Flusswasser-Wärmepumpen, Geothermieeinbindung, saisonale Großwärmespeicher), bei der Erschließung tiefegeothermischer Wärme um eine Absicherung des Fündigkeitsrisikos. Hilfreich wäre auch eine landesweite Potenzialerhebung für die Tiefegeothermie.

Neben den erneuerbaren Wärmepotenzialen spielt auch industrielle Abwärme eine zentrale Rolle. Es bedarf größerer Anreize oder regulatorischer Vorgaben, um mehr Abwärme in die Nah- und Fernwärmenetze zu bekommen. Aus der Perspektive der Netzbetreiber geht es um die Einbindung der Abwärme, auf Ebene der Abwärmequellen (Industrieunternehmen) zum einen um die Identifizierung geeigneter Abwärmeströme (Volumina, Temperaturniveaus usw.), zum anderen um eine Absicherung des energiewirtschaftlichen Risikos der Abwärmelieferung (Ausfall des Abwärmestroms).

Für das Gelingen der Wärmewende ist auch der Aufbau komplett neuer Wärmenetze notwendig. Hilfreich wäre die finanzielle Unterstützung für die Neugründung von Genossenschaftsmodellen, um die Wärmewende auch institutionell auf eine möglichst breite gesellschaftliche Basis zu stellen.

⁷² Verwaltungsvorschrift über die Förderung von energieeffizienten Wärmenetzen, Förderbaustein 3 verlängert bis 20.06.2023 (<https://um.baden-wuerttemberg.de/de/energie/informieren-beraten-foerdern/foerderprogramme/energieeffiziente-waermenetze/>)

⁷³ Hamburgisches Gesetz zum Schutz des Klimas (Hamburgisches Klimaschutzgesetz - HmbKliSchG) vom 20. Februar 2020 (<https://www.landesrecht-hamburg.de/bsha/document/jlr-KlimaSchGHA2020V1IVZ>)

5.4 Zusammenfassung der Maßnahmen entlang der Entscheidungs- und Umsetzungsebenen in Baden-Württemberg

In diesem Abschnitt werden die zuvor in den einzelnen Handlungsfeldern beschriebenen Maßnahmen noch einmal entlang der Entscheidungs- und Umsetzungsebenen in Baden-Württemberg sortiert dargestellt.

5.4.1 Landesregierung Baden-Württemberg

- Initiativen und Programme zur Teilung oder zum Tausch von Wohnraum in landeseigenen Liegenschaften
- Ausweisung von mind. 3 % der Landesfläche für Windenergieanlagen und PV-Freiflächenanlagen (Novellierung des Klimaschutzgesetzes Baden-Württemberg) und Etablierung eines geeigneten Verteilschlüssels für Windenergie (vgl. §3 Windenergieflächenbedarfsgesetz)
- Flächenfreigabe für Windenergieanlagen auf den Staatswaldflächen
- Ausstattung aller geeigneten landeseigenen Dächer mit Photovoltaikanlagen sowie Definition von Zwischenzielen für die nächsten Jahre
- Erstellung einer interaktiven Karte, um die bereits ausgewiesenen Flächen für Windenergieanlagen und PV-Freiflächenanlagen sowie den Ausbau und die Ziele für PV-Dachanlagen auf landeseigenen Gebäuden zu visualisieren und transparent zu machen (z.B. Ergänzung des Energieatlas der LUBW).
- Beschleunigung der Genehmigungsverfahren für Windenergieanlagen und PV-Freiflächenanlagen: Häufig müssen Daten für die naturschutzrechtliche Prüfung anlagenspezifisch neu erhoben werden, was zeitintensiv ist. Durch den Aufbau eines entsprechenden Datenbestandes ließe sich an dieser Stelle des Genehmigungsverfahrens Zeit einsparen. Hier können auch die Naturschutzverbände einbezogen werden, die über viel Detailwissen zu den Naturschutzbelangen vor Ort verfügen.
- Task Force zur Beschleunigung des Ausbaus der erneuerbaren Energien: Neben der Umsetzung der Maßnahmen ist sicherzustellen, dass die Anstrengungen und die implementierten Maßnahmen dauerhaft bestehen bleiben, um auch den mittel- und langfristig notwendigen Ausbau zu gewährleisten. Dafür ist auch eine ausreichende personelle Ausstattung der in den Genehmigungsprozess involvierten Behörden und Gerichte nötig.
- Auf Bundesebene sicherstellen, dass der PV-Degressionsmechanismus so eingestellt wird, dass er den PV-Ausbau fördert und nicht bremst.
- Bessere Beteiligung und finanzielle Teilhabe von Kommunen und Anwohner*innen an EE-Anlagen vor Ort: Entwicklung einer landesspezifischen Regelung (z.B. Landesgesetz), basierend auf den Erfahrungen in anderen Bundesländern, wie z.B. Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern.
- Kommunale Wärmeplanung: Erhöhung der Zahlungen an die Kommunen, um es den Kommunen zu ermöglichen, in den Verwaltungen die für die Umsetzung der Kommunalen Wärmeplanung notwendigen personellen Kapazitäten und Kompetenzen aufzubauen.

- Sukzessive Ausweitung der Kommunalen Wärmeplanung auf kleinere Kommunen.
- Ausweitung der Vollzugskapazitäten in den unteren Bauaufsichtsbehörden sowie Weiterbildungsmaßnahmen für das Vollzugspersonal zur Umsetzung des Gebäudeenergiegesetzes.
- Ausweitung der Beratungskapazitäten sowie die Sicherstellung einer qualitativ hochwertigen Beratung für die energetische Gebäudesanierung.
- Schnellere und zielkonforme energetischen Sanierung der landeseigenen Liegenschaften und Bereitstellung der dafür erforderlichen finanziellen Mittel.
- Die Fachkräfteverfügbarkeit ist momentan eines der größten Hemmnisse für das Gelingen der Wärmewende. Die Landesregierung sollte sich auf Bundesebene u.a. dafür einsetzen, dass Fachkräfte Einwanderungsgesetz zügig und zielstrebig umzusetzen, Berufsanerkennungsverfahren zu beschleunigen und Ausbildungsordnungen so anzupassen, dass Berufsbilder entstehen, die gezielt auf die Bedürfnisse der Wärmewende zugeschnitten sind.
- Schaffung eines Regulierungsrahmen für den Ausstieg aus der Gasversorgung in der Gebäudewärmeversorgung, wie z.B. Kippen der Anschlusspflicht ans Erdgasnetz im Energiewirtschaftsgesetz sowie ein Betriebsverbot für Gas- und Ölkessel.
- Gezielte „Zuförderung“ ausgewählter Technologieoptionen zur Nah- und Fernwärmeversorgung (z.B. Flusswasser-Wärmepumpen, Geothermieeinbindung, saisonale Großwärmespeicher).
- Erstellung einer landesweiten Potenzialerhebung für die Nutzung von Tiefengeothermie in Nah- und Fernwärmenetzen und Absicherung des Fündigkeitsrisikos bei der Erschließung tiefengeothermischer Wärmequellen.
- Finanzielle Unterstützung für die Neugründung von Genossenschaftsmodellen in der Nah- und Fernwärmeversorgung, um die Wärmewende auch institutionell auf eine möglichst breite gesellschaftliche Basis zu stellen.

5.4.2 Regionalverbände, Regierungspräsidien und regionalen Energieagenturen in Baden-Württemberg

- Ausweisung von mind. 3 % der Fläche in den einzelnen Regionen für Windenergieanlagen und PV-Freiflächenanlagen durch eine koordinierte Erstellung von Teilflächenregionalplänen bzw. durch Unterstützung der Landesregierung bei der Etablierung eines geeigneten Verteilschlüssels für Windenergie (vgl. §3 Windenergieflächenbedarfsgesetz)
- Der Prüfauftrag der Regierungspräsidien für Kommunale Wärmepläne sollte weiter konkretisiert werden. Gleichzeitig sollte ein Austausch zwischen den Regierungspräsidien initiiert werden.
- Ausweitung der Beratungskapazitäten sowie die Sicherstellung einer qualitativ hochwertigen Beratung für die energetische Gebäudesanierung durch regionale Energieagenturen
- Einrichtung regionaler Kompetenzzentren, die als Informations-Hub und Vernetzungsportal für den Ausbau von Wärmepumpen in Gebäuden.

5.4.3 Kommunen in Baden-Württemberg

- Ausweitung des Stromspar-Checks für private Haushalte sowie aufsuchende Energie(ein-spar)beratung für Quartiere
- Einführung von Tempo 30 als Regelgeschwindigkeit innerorts.
- Leitbild „Stadt der kurzen Wege“ in der Stadtplanung
- Initiativen und Programme zur Teilung oder zum Tausch von Wohnraum in kommunalen Lie-genschaften
- Ausstattung aller geeigneten kommunalen Dächer mit Photovoltaikanlagen sowie Definition von Zwischenzielen für die nächsten Jahre.
- Schnellere und zielkonforme energetischen Sanierung der kommunalen Liegenschaften und Bereitstellung der dafür erforderlichen finanziellen Mittel.
- Kommunale Wärmeplanung: Erhöhung der personellen Kapazitäten und Aufbau von Kompe-tenzen in der kommunalen Verwaltung, die für die Umsetzung der Kommunalen Wärmeplanung notwendig sind.
- Sukzessive Ausweitung der Kommunalen Wärmeplanung auf kleinere Kommunen.

6 Literaturverzeichnis

- 50 Hertz - 50 Hertz Transmission; Amprion; TenneT - TenneT TSO; TransnetBW (Hg.) (2022): Szenariorahmen zum Netzentwicklungsplan Strom 2037 mit Ausblick 2045, Version 2023, Entwurf der Übertragungs-netzbetreiber, 2022. Online verfügbar unter https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/Szenariorahmenentwurf_NEP2037_2023.pdf, zuletzt geprüft am 18.02.2022.
- AG Energiebilanzen (Hg.) (2022): Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland, Daten für die Jahre von 1990 bis 2020. Stand: September 2021 (endgültige Ergebnisse bis 2019, vorläufige Daten für 2020), April 2022, zuletzt geprüft am 14.04.2022.
- AGFW (Hg.) (2021): Hauptbericht 2020. Unter Mitarbeit von Dornberger, J. und Schmitz, K. AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V. Frankfurt a. M., 2021, zuletzt geprüft am 18.01.2022.
- Agora Energiewende (Hg.) (2020): Klimaneutrale Industrie, Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement, August 2020. Online verfügbar unter https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/164_A-EW_Klimaneutrale-Industrie_Studie_WEB.pdf, zuletzt geprüft am 28.09.2021.
- BbgWindAbgG) (2019): Landtag Brandenburg. Gesetz zur Zahlung einer Sonderabgabe an Gemeinden im Umfeld von Windenergieanlagen (Windenergieanlagenabgabengesetz - Bbg-WindAbgG), BbgWindAbgG). Online verfügbar unter <https://bravors.brandenburg.de/gesetze/bbgwindabgg>, zuletzt geprüft am 25.07.2022.
- Beermann, A.-C.; Fiedler, S.; Meyer, M.; Runkel, M.; Schrems, I.; Zorzawy, F. (2020): Zehn klimaschädliche Subventionen im Fokus, Wie ein Subventionsabbau den Klimaschutz voranbringt und den Bundeshaushalt entlastet. Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft (FÖS) im Auftrag von Greenpeace (Hg.). Berlin, 2020. Online verfügbar unter https://www.greenpeace.de/publikationen/2020-11-11_greenpeace-studie_10_klimaschaedliche_subventionen_im_fokus.pdf, zuletzt geprüft am 03.08.2022.
- BKI - Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern (2021): BKI Baukosten Positionen Neubau, Statistische Kostenkennwerte für Positionen - Neubau (Teil 3).
- BNetzA - Bundesnetzagentur (Hg.) (2019): Bedarfsermittlung 2019-2030, Bestätigung Netzentwicklungsplan Strom. Bonn, 16.12.2019.
- Böhmer, M.; Limbers, J. (2020): Klimapolitische Herausforderungen der Stahlindustrie in Deutschland, Im Auftrag der Wirtschaftsvereinigung Stahl. Prognos AG (Hg.). Freiburg, September 2020, zuletzt geprüft am 19.01.2022.
- Bons, M.; Jakob, M.; Sach, T.; Klessmann, C.; Pape, C.; Zink, C.; Geiger, D.; Häckner, B.; Wegner, N.; Benz, S.; Peters, W.; Schicketanz, S.; Thylmann, M. (2022): Analyse der Flächenverfügbarkeit für Windenergie an Land post-2030, Ermittlung eines Verteilungsschlüssels für das 2%-Flächenziel auf Basis einer Untersuchung der Flächenpotenziale der Bundesländer. Erstellt im Auftrag vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik; Stiftung Umweltenergie recht; Bosch & Partner. Guidehouse (Hg.). Berlin, 2022. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/analyse-der-flachenverfuegbarkeit-fur-windenergie-an-land-post-2030.pdf?__blob=publicationFile&v=14, zuletzt geprüft am 04.08.2022.
- Boston Consulting Group (Hg.) (2021): Klimapfade 2.0, Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft. Gutachten für den BDI, Oktober 2021, zuletzt geprüft am 13.04.2022.

- Brunsing, J.; Frehn, M. (1999): Stadt der kurzen Wege. Zukunftsfähiges Leitbild oder planerische Utopie?. Universität Dortmund, Institut für Raumplanung (Hg.). Dortmund, 1999.
- Consentec; Fraunhofer ISI - Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung; TU Berlin Fachgebiet E&R; ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3, Kurzbericht: 3 Hauptszenarien. Karlsruhe, Aachen, 2021. Online verfügbar unter https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS_Kurzbericht_final_v5.pdf, zuletzt geprüft am 20.07.2021.
- Destatis - Statistisches Bundesamt (Hg.) (2021): Daten aus dem Gemeindeverzeichnis Kreisfreie Städte und Landkreise nach Fläche, Bevölkerung und Bevölkerungsdichte, Gebietsstand: 31.12.2020, September 2021.
- Deutsche Energie-Agentur (dena) (Hg.) (2021): dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität, Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Berlin, 07.10.2021, zuletzt geprüft am 03.11.2021.
- Ebinger, K.; Naumann, S.; Seyfang, H. (2017): Ein gutes Leben für alle! Eine Einführung in Suffizienz. Unter Mitarbeit von Franzen, E.; Kraus, J. und Wochner, N. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND) Landesverband Baden-Württemberg und Jugend im Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUNDjugend) Landesverband Baden-Württemberg (Hg.). Stuttgart, 2017. Online verfügbar unter https://www.bund-bawue.de/fileadmin/bawue/Dokumente/Themen/Nachhaltigkeit/Suffizienz_Gutes_Leben_fuer_Alle_web.pdf, zuletzt geprüft am 03.08.2022.
- Elmer, C.-F.; Lenck, T.; Fischer, B.; Blanck, R.; Schumacher, K. (2019): Klimaschutz auf Kurs bringen, Wie eine CO₂-Bepreisung sozial ausgewogen wirkt. Öko-Institut; Freie Universität Berlin. Agora Verkehrswende und Agora Energiewende (Hg.). Berlin, 2019. Online verfügbar unter https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/Abgaben_Umlagen/CO2-Rueckverteilungsstudie/Agora-Verkehrswende_Agora-Energiewende_CO2-Bepreisung_WEB.pdf, zuletzt geprüft am 03.08.2022.
- ENTSO-E - European Network of Transmission System Operators for Electricity; ENTSOG - European Network of Transmission System Operators for Gas (Hg.) (2020): TYNDP 2020 Scenario Report, Final Report, June 2020. Brussels, 2020. Online verfügbar unter https://2020.entsos-tyndp-scenarios.eu/wp-content/uploads/2020/06/TYNDP_2020_Joint_ScenarioReport_final.pdf, zuletzt geprüft am 23.06.2021.
- FA Wind - Fachagentur Windenergie an Land (2022a): Beteiligung und Teilhabe, Fachagentur Windenergie an Land. Online verfügbar unter <https://www.fachagentur-windenergie.de/themen/beteiligungundteilhabe/>, zuletzt aktualisiert am 25.07.2022, zuletzt geprüft am 25.07.2022.
- FA Wind - Fachagentur Windenergie an Land (2022b): Gute Kommunikation im Kontext der Umsetzung des § 36k EEG 2021. Fachagentur Windenergie an Land. Berlin, 2022, zuletzt geprüft am 25.07.2022.
- Fischer, C.; Blanck, R.; Brohmann, B.; Cludius, J.; Förster, H.; Heyen, D. A.; Hünecke, K.; Keimeyer, F.; Kenkmann, T.; Schleicher, T.; Schumacher, K.; Wolff, F.; Beznoska, M. et al. (2016): Konzept zur absoluten Verminderung des Energiebedarfs: Potenziale, Rahmenbedingungen und Instrumente zur Erreichung der Energieverbrauchsziele des Energiekonzepts (Climate Change, 17). Umweltbundesamt, 2016, zuletzt geprüft am 17.05.2016.
- Fischer, C.; Grießhammer, R.; Barth, R.; Brohmann, B.; Brunn, C.; Heyen, D. A.; Keimeyer, F.; Wolff, F. (2013): Mehr als nur weniger - Suffizienz: Begriff, Begründung und Potenziale (Working Paper, 02/2013). Öko-Institut (Hg.). Freiburg, Berlin, Darmstadt, 2013. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/oekodoc/1836/2013-505-de.pdf>, zuletzt geprüft am 03.08.2022.

- Fleiter, T.; Rehfeldt, M.; Manz, P.; Neuwirth, M.; Herbst, A. (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3 - Modul Industrie. Consentec; Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung; TU Berlin Fachgebiet E&R; Institut für Energie- und Umweltforschung. Karlsruhe, 2021. Online verfügbar unter https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/Modul_TN_Hauptszenarien_Industrie.pdf, zuletzt geprüft am 24.01.2022.
- Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (Hg.) (2021): Studie: Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Update Klimaneutralität 2045. Unter Mitarbeit von Brandes, J.; Haun, M.; Wrede, D.; Jürgens, P.; Kost, C. et al. Freiburg im Breisgau, November 2021, zuletzt geprüft am 13.04.2022.
- Geres, R.; Bazzanella, A. (2019): Roadmap Chemie 2050, Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland. Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie; FutureCamp Climate. Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie und FutureCamp Climate (Hg.). München, Frankfurt, 2019.
- Greinus, A.; Killer, M.; Sutter, D.; Wörner, M. (2022): Pkw-Maut für die Mobilitätswende, Eine verursachergerechte Straßennutzungsgebühr als Baustein für ein digitalisiertes und klimaneutrales Verkehrssystem. Unter Mitarbeit von Oehry, B. und Felix, A. INFRAS. Agora Verkehrswende (Hg.). Berlin, 2022. Online verfügbar unter https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2022/Pkw-Maut/AgoraVW_Pkw_Maut_Bericht_final_3.pdf, zuletzt geprüft am 03.08.2022.
- Harding, M. (2014): Personal Tax Treatment of Company Cars and Commuting Expenses: Estimating the Fiscal and Environmental Costs (OECD Taxation Working Papers, 20). Organisation for Economic Cooperation and Development (Hg.). Paris, 2014. Online verfügbar unter <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/5jz14cg1s7vl-en.pdf?expires=1659523021&id=id&acname=quest&checksum=8E663EFA2C9CFF69F9A1336F8BD12E8A>, zuletzt geprüft am 03.08.2022.
- Held, C.; Ringwald, R.; Roller, J. (2021): Der Bundesverkehrswegeplan: Status Quo, Reformbedarf und Änderungsmöglichkeiten, im Auftrag der Stiftung Klimaneutralität und der Agora Verkehrswende. Becker Büttner Held (Hg.). Berlin, 2021. Online verfügbar unter https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2021/BVWP-Gutachten/Gutachten_-_Bundesverkehrswegeplan.pdf, zuletzt geprüft am 03.08.2022.
- Hurst, J.; Brinkmann, R.; Kohnen, A.; Moll, F. (2021): Raumkonzept für windkraftsensible Fledermaus- und Vogelarten in Baden-Württemberg, Ausarbeitung einer gemeinsamen Sensibilitätskarte für beide Artengruppen. im Auftrag des NABU Baden-Württemberg. Freiburger Institut für angewandte Tierökologie (Hg.), 2021, zuletzt geprüft am 29.06.2022.
- ifeu; GEF Ingenieur AG; Indevo; geomer (2019): EnEff:Wärme - netzgebundene Nutzung industrieller Abwärme (NENIA), 2019. Online verfügbar unter https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/pdf/Schlussbericht_EnEffW%C3%A4rme-NENIA.pdf.
- IÖW; IKEM; BBH; BBHC (2020): Finanzielle Beteiligung von Kommunen an EE-Anlagen. IÖW. Berlin, 2020, zuletzt geprüft am 25.07.2022.
- IWU (2015): Deutsche Wohngebäudetypologie, Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden (zweite erweiterte Auflage), 2015.
- IZES; IÖW; AEE (2022): Erste ReWA-Forschungsergebnisse: Hünfelden profitiert finanziell vom Windpark, Bevölkerung von Anfang an stark eingebunden. Online verfügbar unter <https://www.unendlich-viel-energie.de/rewa/ergebnisse>, zuletzt aktualisiert am 26.07.2022, zuletzt geprüft am 26.07.2022.

- Kelm, T.; Bickel, P.; Jachmann, H.; Liebhart, L.; Bergk, F.; Fehrenbach, H.; Mellwig, P.; Stange, H.; Wiegmann, K.; Hennenberg, K.; Bürger, V.; Fleiter, T.; Manz, P. et al. (2022): Sektorziele 2030 und klimaneutrales Baden-Württemberg 2040, Teilbericht Sektorziele 2030. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg; Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg; Öko-Institut; Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung und Hamburg Institut Research (Hg.). Stuttgart, 2022.
- Kelm, T.; Metzger, J.; Fuchs, A.-L.; Schicketanz, S.; Günnewig, D.; Thylmann, M. (2019): Untersuchung zur Wirkung veränderter Flächenrestriktionen für PV-Freiflächenanlagen. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg und Bosch & Partner (Hg.), 2019. Online verfügbar unter https://www.zsw-bw.de/fileadmin/user_upload/PDFs/Aktuelles/2019/politischer-dialog-pv-freiflaechenanlagen-studie-333788.pdf.
- Kelm, T.; Walker, M.; Fuchs, A.-L. (2020): Erneuerbare Energien in Baden-Württemberg 2019. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg. Ministerium für Umwelt Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (Hg.). Stuttgart, 2020. Online verfügbar unter https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Energie/Erneuerbare-Energien-2019-bf.pdf, zuletzt geprüft am 08.07.2022.
- Krafftahrt-Bundesamt (Hg.) (2021): Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Zulassungsbezirken, Zeitpunkt: 1. Januar 2021. Flensburg, April 2021.
- Kreye, K.; Kampffmeyer, N.; Scherf, C.-S.; Weber, M. (2022): Arbeiten im Homeoffice – gut für die Umwelt und die Mitarbeiter:innen?, Analyse der potenziellen ökologischen und sozialen Auswirkungen mobilen Arbeitens. Öko-Institut (Hg.). Berlin, 2022. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/compan-e_Homeoffice.pdf, zuletzt geprüft am 03.08.2022.
- Kuhnenn, K. (2017): Wachstumsrücknahme in Klimaschutzszenarien (Analyse). konzeptwerk neue ökonomie (Hg.), 2017. Online verfügbar unter https://konzeptwerk-neue-oekonomie.org/wp-content/uploads/2018/06/Analyse_Wachstumsruecknahme-Klimaschutzszenarien.pdf, zuletzt geprüft am 03.08.2022.
- Lotze, J.; Salzinger, M.; Gaillardon, B.; Mogel, M.; Troitskyi, K. (2020): Stromnetz 2050. TransnetBW (Hg.). Stuttgart, 2020.
- Lübbers, S.; Wunsch, M.; Lovis, M.; Wagner, J.; Sensfuß, F.; Luderer, G.; Bartels, F. (2022): Vergleich der „Big 5 Klimaneutralitätsszenarien“, 16.03.2022, zuletzt geprüft am 13.04.2022.
- LUBW - Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (Hg.) (2022a): Daten- und Kartendienst der LUBW, Ermitteltes Solarpotenzial auf Dachflächen. Online, 2022. Online verfügbar unter <https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/public/pages/map/default/index.xhtml?mapId=a01b2c0b-935a-46b9-a5ee-e09807621764&mapSrs=EPSG%3A25832&mapExtent=173723.0950118765%2C5240158%2C824682.9049881236%2C5525631>.
- LUBW - Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (Hg.) (2022b): Daten- und Kartendienst der LUBW, PV-Freiflächenpotenzial (Konversionsfl. und Seitenrandstreifen). Online, 2022. Online verfügbar unter <https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/public/pages/map/default/index.xhtml?mapId=a01b2c0b-935a-46b9-a5ee-e09807621764&mapSrs=EPSG%3A25832&mapExtent=493951.4698090578%2C5382564.037017846%2C506643.8219898887%2C5388130.162297147>.

- LUBW - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg; Ministerium für Umwelt Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (Hg.) (2022): Energieatlas Baden-Württemberg, 2022. Online verfügbar unter <https://www.energieatlas-bw.de/energieatlas>.
- Luderer, G.; Kost, Christoph, Sörgel, Dominika; et al. (2021): Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045, Szenarien und Pfade im Modellvergleich. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung. Kopernikus-Projekt Ariadne (Hg.). Potsdam, 11.10.2021. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.48485/pik.2021.006>, zuletzt geprüft am 12.11.2021.
- Lüngen, B. (2021): Wege zur Minderung von CO₂-Emissionen in der Eisen- und Stahlindustrie in Europa. Stahlinstitut VDEh. Düsseldorf, Mai 2021, zuletzt geprüft am 19.01.2022.
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (Hg.) (2019): Freiflächensolaranlagen, Handlungsleitfaden. Stuttgart, 2019, zuletzt geprüft am 07.04.2022.
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (Hg.) (2021): Erneuerbare Energien in Baden-Württemberg 2020. Stuttgart, Oktober 2021, zuletzt geprüft am 07.04.2022.
- Nitsch, J.; Magosch, M. (2021): Baden-Württemberg Klimaneutral 2040, Erforderlicher Ausbau der erneuerbaren Energien. Plattform Erneuerbare Energien Baden-Württemberg e.V. (Hg.). Stuttgart, 2021, zuletzt geprüft am 03.11.2021.
- Ortner, S.; Pehnt, M.; Blömer, S.; Auberger, A.; Steinbach, J.; Deurer, J.; Popovski, E.; Lösch, O.; Langreder, N.; Thamling, N.; Sahnoun, M.; Rau, D. (2021): Analyse des wirtschaftlichen Potenzials für eine effiziente Wärme- und Kälteversorgung: Beitrag zur Berichtspflicht EnEff-RL, Artikel 14 - Anhang VIII. Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau, Juni 2021. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2021-08-05_cc_54-2021_effiziente_waerme-kaelteversorgung.pdf, zuletzt geprüft am 27.09.2022.
- Pehnt, M.; Weiß, U.; Fritz, S.; Jessing, D.; Lempik, J.; Mellwig, P.; Nast, M.; Bürger, V.; Kenkmann, T.; Zieger, J.; Steinbach, J.; Lambrecht, K. (2018): Evaluation des Erneuerbare - Wärme - Gesetz (EWärmeG), 2018. Online verfügbar unter https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/5_Energie/Neubau_und_Gebäudesanierung/Evaluationsbericht_EWaermeG.pdf.
- Perner, J.; Unteutsch, M.; Lenz, A.-K.; Krug, J.; Turek, N. (2021): Trends des zukünftigen Stromverbrauchs der Industrie in Baden-Württemberg, Eine Studie im Auftrag des VfEW. Stuttgart, 13.08.2021, zuletzt geprüft am 14.04.2022.
- Prognos; Öko-Institut; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045, Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Zusammenfassung. Agora Energiewende; Stiftung Klimaneutralität und Agora Verkehrswende (Hg.), 2021. Online verfügbar unter https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_209_KNDE2045_Zusammenfassung_DE_WEB.pdf.
- Pye, S.; Anandarajah, G.; Fais, B.; McGlade, C.; Strachan, N. (2015): Pathways to deep decarbonization in the United Kingdom. Sustainable Development Solutions Network und Institute for Sustainable Development and International Relations (Hg.), 2015. Online verfügbar unter <https://ddpinitiative.org/category/publication/page/4/#gallery-1>, zuletzt geprüft am 03.08.2022.
- Rieke, J.; Wöllpe, F. (2018): Flächen für Landwirtschaft in den Kreisen Baden-Württembergs, Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg 09/2018. Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (Hg.), September 2018, zuletzt geprüft am 29.09.2022.
- Samadi, S.; Gröne, M.-C.; Schneidewind, U.; Luhmann, H.-J.; Venjakob, J.; Best, B. (2017): Sufficiency in energy scenario studies: Taking the potential benefits of lifestyle changes into

account. In: *Technological Forecasting & Social Change* (124), S. 126–134. DOI: 10.1016/j.techfore.2016.09.013.

- Schmitt, C.; Leuser, L.; Brischke, L.-A.; Duscha, M.; Jacobsen, S. (2015): Suffizienz-Maßnahmen und -Politiken in kommunalen Klimaschutzkonzepten und Masterplänen – ein Überblick, Arbeitspapier im Rahmen des Projektes „Strategien und Instrumente für eine technische, systemische und kulturelle Transformation zur nachhaltigen Begrenzung des Energiebedarfs im Konsumfeld Bauen / Wohnen“. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (Hg.). Heidelberg, Berlin, 2015. Online verfügbar unter https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/2015.09_ifeu-Schmitt-Leuser-Brischke-Duscha-Jacobsen_Suffizienz-Ma%c3%9fnahmen-und-Politiken.pdf, zuletzt geprüft am 03.08.2022.
- Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (Hg.) (2021): Im Blickpunkt: Energie in Baden-Württemberg, 2021. Stuttgart, 2021. Online verfügbar unter <https://www.statistik-bw.de/Service/Veroeff/Faltblatt/803821018.pdf>, zuletzt geprüft am 22.06.2022.
- Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Energiebericht kompakt 2021. Online verfügbar unter https://www.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Energie/Energiebericht-kompakt-2021.pdf, zuletzt geprüft am 08.07.2022.
- UMBW - Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (Hg.) (2020): Abwärmekonzept Baden-Württemberg, Stand 01.12.2020. Stuttgart, 2020. Online verfügbar unter https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/5_Energie/Energieeffizienz/Abwaermenutzung/Abwaermekonzept-Baden-Wuerttemberg-bf.pdf, zuletzt geprüft am 29.06.2022.
- Umweltbundesamt (Hg.) (2020): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenSupreme, Abschlussbericht. Dessau-Roßlau, Dezember 2020, zuletzt geprüft am 13.04.2022.
- Umweltbundesamt (Hg.) (2021): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität, RESCUE-Studie. 2. Auflage. Dessau-Roßlau, Juni 2021, zuletzt geprüft am 13.04.2022.
- Verband der Chemischen Industrie e. V. (Hg.) (2021): Chemiewirtschaft in Zahlen 2021. Frankfurt a. M., August 2021, zuletzt geprüft am 19.01.2022.
- Wirtschaftsvereinigung Stahl (Hg.) (2021): Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2021. Berlin, Dezember 2021. Online verfügbar unter www.stahl-online.de, zuletzt geprüft am 19.01.2022.
- Zell-Ziegler, C.; Förster, H. (2018): Mit Suffizienz mehr Klimaschutz modellieren, Relevanz von Suffizienz in der Modellierung, Übersicht über die aktuelle Modellierungspraxis und Ableitung methodischer Empfehlungen. Zwischenbericht zu AP 2.1 „Möglichkeiten der Instrumentierung von Energieverbrauchsreduktion durch Verhaltensänderung“ (Texte, 55/2018). Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau, 2018. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/uba_texte_55_2018_zwischenbericht_mit_suffizienz_mehr_klimaschutz_modellieren.pdf, zuletzt geprüft am 03.08.2022.
- Zerzawy, F. (2020): Umdenken! Industrieausnahmen reformieren, Innovationen fördern, Klimaneutralität ermöglichen. Unter Mitarbeit von Liss, F. und Paoli, L. (WISO Diskurs, 11/2020). Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft. Friedrich-Ebert-Stiftung (Hg.), 2020. Online verfügbar unter https://foes.de/publikationen/2020/2020-09_FOES_Umdenken_Subventionen.pdf, zuletzt geprüft am 03.08.2022.

Zimmer, K.; Dörrenbächer, S.; Dengler, J.; Seelmann-Eggebert, M. (2022): Positionspapier der LAG Energie B90/GRÜNE BW zum Ausbau der Erneuerbaren Energien. Stuttgart, 18.06.2022, zuletzt geprüft am 03.08.2022.

7 Anhang

7.1 Exkurs: Berücksichtigung des Strombedarfs für Wasserstoff aus der Elektrolyse und der Kohlenstoffabscheidung aus der Atmosphäre für deren stoffliche Nutzung

Neben der energetischen Nutzung von Wasserstoff, synthetischem Methan und weiteren strombasierten Kraftstoffen (sogenannte E-Fuels) besteht für Wasserstoff und Kohlenstoff auch ein stofflicher Nutzungspfad, um zukünftig den Einsatz von fossilen Rohstoffen zu substituieren.

Wichtige Prozesse, die bislang in größerem Umfang fossile Rohstoffe einsetzen, sind:

- Herstellung von Roheisen und Primärstahl über die sogenannte Hochofenroute mit Koks Kohle als Reduktionsmittel
- Herstellung von Ammoniak über das Haber-Bosch-Verfahren mit Erdgas als fossilem Rohstoff für die Wasserstoffgewinnung
- Herstellung von Methanol aus Erdgas oder Schweröl
- Herstellung von Kunststoffen basierend auf Naphtha, einem aus Erdöl gewonnenen chemischen Grundstoff

Die während der Herstellung anfallenden prozessbedingten CO₂-Emissionen müssen für das Erreichen von Klimaneutralität vermieden werden, indem die eingesetzten fossilen Rohstoffe durch strombasierte Rohstoffe ersetzt werden. Neben diesem Substitutionsschritt ist darüber hinaus auch die Kreislaufführung von Stoffen und Produkten eine wichtige Möglichkeit, um einerseits den Bedarf an der Primärerzeugung der Stoffe und Produkte zu senken und andererseits die bei der thermischen Entsorgung von Kunststoffen anfallenden CO₂-Emissionen zu vermeiden.

7.1.1 Substitution von Koks Kohle in der Primärstahlerzeugung

In Deutschland wurden in den letzten Jahren rund 30 Millionen Tonnen Rohstahl pro Jahr über die Hochofenroute hergestellt (Böhmer und Limbers 2020; Agora Energiewende 2020). In den Jahren 2009, 2019 und 2021 lag die gesamte Rohstahlerzeugung⁷⁴ jedoch unter dem langjährigen Mittelwert. Im Jahr 2019 war die Stahlindustrie für knapp 30 % der industriellen CO₂-Emissionen in Deutschland verantwortlich (rund 53 Millionen Tonnen CO₂) (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2021). Diese CO₂-Emissionen gehen im Wesentlichen auf die prozessbedingten CO₂-Emissionen der Primärstahlerzeugung über die Hochofenroute zurück (Lüngen 2021).

Für die Dekarbonisierung der Primärstahlerzeugung muss deshalb die als Reduktionsmittel (und auch als Brennstoff) verwendete Koks Kohle substituiert werden. Hierzu eignen sich sowohl Methan als auch Wasserstoff. Langfristig ist jedoch nur grüner Wasserstoff, welcher mittels Elektrolyse und basierend auf erneuerbarem Strom produziert wird, als klimaneutrales Reduktionsmittel einsetzbar. Würde die derzeitige Hochofenroute zur Primärstahlerzeugung in Deutschland komplett auf das Verfahren der Wasserstoffdirektreduktion umgestellt, müssten für die klimaneutrale Wasserstoffherstellung **74 TWh erneuerbarer Strom** bereitgestellt werden (Agora Energiewende 2020).

⁷⁴ Neben der Primärstahlerzeugung über die Hochofenroute gibt es auch noch den Weg der Sekundärstahlerzeugung über die Elektrolichtbogenofenroute.

Die Klimaschutzwirkung von Wasserstoff ist in der Stahlindustrie im Vergleich zu anderen Anwendungsfeldern besonders hoch (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2021). Deshalb sollte grüner Wasserstoff zunächst vorrangig in der Stahlindustrie eingesetzt werden. Neben der Nutzung von Wasserstoff in der Primärstahlerzeugung ist das verstärkte Recycling von Stahlschrott über die Elektrolichtbogenofenroute (d. h. Aufbau einer Kreislaufwirtschaft) der zweite wichtige Ansatzpunkt für Klimaneutralität in der Stahlindustrie.

7.1.2 Substitution von Erdgas in der Ammoniaksynthese

Die Herstellung von Ammoniak (NH_3) dient im Wesentlichen der Produktion von Stickstoffdüngern für die Landwirtschaft. Für die Ammoniaksynthese wird das Haber-Bosch-Verfahren eingesetzt, welches Wasserstoff und Stickstoff als Einsatzstoffe benötigt. Stickstoff wird dabei aus der Luft abgeschieden. Wasserstoff wird bislang über den Prozess der Dampfreformierung aus dem fossilen Rohstoff Erdgas gewonnen, wobei prozessbedingt 1,3 Tonnen CO_2 -Emissionen pro Tonne Ammoniak entstehen und weitere 0,5 Tonnen CO_2 -Emissionen pro Tonne Ammoniak energiebedingt für die Wasserdampferzeugung anfallen (Agora Energiewende 2020, S. 179). Für eine klimaneutrale Ammoniaksynthese muss dieser Prozessschritt ersetzt werden, indem grüner Wasserstoff als Ausgangsprodukt verwendet wird.

In Deutschland werden jährlich rund 3,3 Millionen Tonnen Ammoniak produziert. Dabei entstehen in dem Prozessschritt der erdgasbasierten Wasserstofferzeugung rund 6 Millionen Tonnen CO_2 -Emissionen (Agora Energiewende 2020, S. 179).

Der zusätzliche erneuerbare Strombedarf für die Herstellung von Wasserstoff über die Wasserelektrolyse beläuft sich auf rund **30 TWh** (Geres und Bazzanella 2019, S. 36).

Zukünftig ist auch denkbar, dass sich die Ammoniakproduktion teilweise in Länder verlagert, die im Vergleich mit Deutschland sehr viel günstigeren grünen Wasserstoff für den weltweiten Markt herstellen können. Eine Umwandlung des Wasserstoffs in Ammoniak stellt für den Schiffstransport über lange Strecken dabei eine mögliche Form des Wasserstofftransports dar.

Darüber hinaus ließe sich durch eine Extensivierung der Landwirtschaft und eine fleischarme Ernährung auch der Bedarf an Stickstoffdüngern reduzieren. Im Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2045“ wird beispielsweise für das Jahr 2040 von einer Halbierung des konventionellen Mineräldüngereinsatzes im Vergleich zum Jahr 2016 ausgegangen (Prognos et al. 2021, S. 89).

7.1.3 Substitution von Erdgas oder Schweröl in der Methanolsynthese

Im Jahr 2020 wurden in Deutschland rund 1,5 Millionen Tonnen Methanol hergestellt (Verband der Chemischen Industrie e. V. 2021, S. 16). Als fossile Rohstoffe dienen Erdgas und teilweise auch Schweröle als Rückstände von Raffinerien.

Als Alternative dazu kommt grüner Wasserstoff aus der Wasserelektrolyse sowie Kohlenstoff aus der Abscheidung von CO_2 aus der Atmosphäre in Betracht. Stöchiometrisch werden 1,37 t CO_2 /t Methanol benötigt (Geres und Bazzanella 2019, S. 39).

Der zusätzliche erneuerbare Strombedarf für die Abscheidung von CO_2 aus der Atmosphäre beläuft sich bei einem spezifischen Stromverbrauch von Direct Air Capture in Höhe von 1,05 MWh/t CO_2 (Prognos et al. 2021, S. 31) auf rund 2,2 TWh. Für die Herstellung von Wasserstoff für die Methanolsynthese werden rund 12 TWh Strom benötigt (Geres und Bazzanella 2019, S. 40), so dass sich

in Summe ein zusätzlicher Strombedarf von **knapp 15 TWh** für die alternative Methanolsynthese ergibt.

7.1.4 Substitution von erdölbasiertem Naphtha in der Kunststoffherzeugung

In der Petrochemie wird erdölbasiertes Naphtha in sogenannten Steamcrackern gespalten. Die dabei entstehenden Produkte sind Ethylen, Propylen, Buten und Butadien (Gruppe der Olefine) sowie Benzol, Toluol und Xylol (Gruppe der Aromaten). Zusammen bilden diese Stoffe die Gruppe der sogenannten High Value Chemicals (HVC) (Geres und Bazzanella 2019, S. 42). Im Jahr 2020 wurden in Deutschland rund 12,5 Millionen Tonnen HVC hergestellt (Verband der Chemischen Industrie e. V. 2021, S. 16).

Als Alternative zu erdölbasiertem Naphtha kommen die Methanol-to-Olefin und die Methanol-to-Aromate Routen in Betracht. In diesem Fall wird kein Steamcracker benötigt, da Methanol als neues Ausgangsprodukt im Gegensatz zu Naphtha nicht weiter gespalten werden muss. Um die heutige HVC-Menge über die alternativen MTO-/MTA-Routen zu produzieren, sind mit **rund 320 TWh jedoch erhebliche Strommengen** erforderlich, vor allem für die Herstellung von grünem Wasserstoff (Agora Energiewende 2020, S. 189). Am Ende ihrer Nutzungsdauer müssen Kunststoffe über Pyrolyse- oder Gasifizierungsverfahren zurück in den Kreislauf geführt werden, indem Pyrolyseöle und Gasöle im Steamcracker wieder in Olefine und Aromate gespalten werden.

7.1.5 Fazit zur stofflichen Nutzung von Wasserstoff aus der Elektrolyse und Kohlenstoff aus der Atmosphäre

Die stoffliche Nutzung von Wasserstoff aus der Elektrolyse und Kohlenstoff aus der Atmosphäre in der Industrie ist mit einem erheblichen zusätzlichen Strombedarf verbunden. Wird der heutige Einsatz fossiler Energieträger eins zu eins mit Wasserstoff aus der Elektrolyse und Kohlenstoff aus der Atmosphäre ersetzt, ergibt sich ein zusätzlicher Strombedarf von bis zu 350 TWh.

In den verschiedenen Szenarien erfolgt dieser Dekarbonisierungsschritt für die Industrie vorwiegend erst im letzten Abschnitt der Transformation hin zu Klimaneutralität. Die aktuellen BMWi-Langfristszenarien weisen einen Endenergieträgerbedarf für die stoffliche Nutzung in der Industrie von bis zu 115 TWh Wasserstoff (Szenario Strom und Szenario Wasserstoff) bzw. auch 115 TWh synthetisches Methan (Szenario PtG/L) aus. Dies entspricht einem zusätzlichen Strombedarf von rund 165 TWh (Szenario Strom und Szenario Wasserstoff) bis 230 TWh (Szenario PtG/L) (Consentec; Fraunhofer ISI; TU Berlin Fachgebiet E&R; ifeu 2021, S. 10; Fleiter et al. 2021, S. 100).

Besonders in der Chemieindustrie spielt der Aufbau einer Kreislaufwirtschaft eine wichtige Rolle. Bei einer klimaneutralen Produktion von High Value Chemicals setzt sich der Feedstock überwiegend aus Pyrolyseölen und Gasölen zusammen, wobei sich die HVC-Produktion in Deutschland auch ein Stück weit in andere Länder und vorteilhaftere Standorte verlagert hat⁷⁵ (Prognos et al. 2021, S. 47–48).

Für Baden-Württemberg hat die stoffliche Nutzung von Wasserstoff aus der Elektrolyse und Kohlenstoff aus der Atmosphäre keine Relevanz, da sich in Baden-Württemberg keine Standorte zur

⁷⁵ Beispielsweise aufgrund des Wegfalls von Kuppelprodukten aus Raffinerien, dem Zugang zu Seehäfen oder der Nähe zur Stromeinspeisung von Wind offshore Anlagen.

Primärstahlerzeugung oder der Grundstoffchemie (z. B. Ammoniaksynthese oder Petrochemie) befinden (Agora Energiewende 2020, S. 4).

7.2 Exkurs: Unterschiedliche Konzepte für die Wärmeerzeugung und ihre Auswirkungen auf die Endverbraucherpreise

Investitionsentscheidungen von Hauseigentümern basieren meist nicht auf rein ökonomisch rationalen Kriterien. Dennoch kann ein Wirtschaftlichkeitsvergleich verschiedener Wärmeerzeugungskonzepte als Wegweiser bei der Gestaltung der Transformation des Wärmesektors dienen. Nachfolgend werden daher Endverbraucherpreise verschiedener Heizungsalternativen verglichen.

7.2.1 Betrachtete Heizsystemkombinationen für den Wirtschaftlichkeitsvergleich

Der Wirtschaftlichkeitsvergleich erfolgt für jeweils ein typisches Ein- (EFH) und Mehrfamilienhaus (MFH) aus den 60er Jahren. Die Parametrisierung der beiden Typgebäude in Form der Gebäudegeometrie, bauphysikalischer Gebäudemerkmale und energetischer Kennwerte basiert auf der Gebäudetypologie des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU 2015). Für beide Typgebäude werden jeweils zwei energetische Zustände betrachtet: ein unsanierter und ein gut sanierter Zustand. Tabelle 7-1 zeigt die Gebäudemerkmale der vier sich aus dieser Kombination ergebenden Gebäudetypen.

Tabelle 7-1: Gebäudemerkmale und energetische Kennwerte der Typgebäude

		EFH		MFH	
		unsaniert	saniert	unsaniert	saniert
Wohnfläche	m ²	110		2.845	
Gebäudevolumen	m ³	503		8.318	
Heizkreistemperaturen		VL70/ RL55	VL55/ RL45	VL70/ RL55	VL55/ RL45
Gebäudeheizlast	kW _{th}	15,3	6,6	246	95
auf Wohnfläche bezogener Endenergiebedarf*	kWh/(m ² _{Wfl} *a)	277	120	182	70
Endenergiebedarf*	kWh/a	30.520	13.200	517.040	199.120

Anmerkungen: * verbrauchskorrigierte Werte

Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts

Für die beiden Typgebäude und die jeweiligen Sanierungszustände werden die folgenden Heiztechnologien betrachtet:

- Gaskessel
- Pelletkessel
- Luft-Wärmepumpe

- Erdsonde
- Nah- und Fernwärme
- H₂-Kessel

7.2.2 Annahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verschiedener Heizsystemkombinationen

In die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der verschiedenen Systemkombinationen fließen die folgenden Parameter und Annahmen ein:

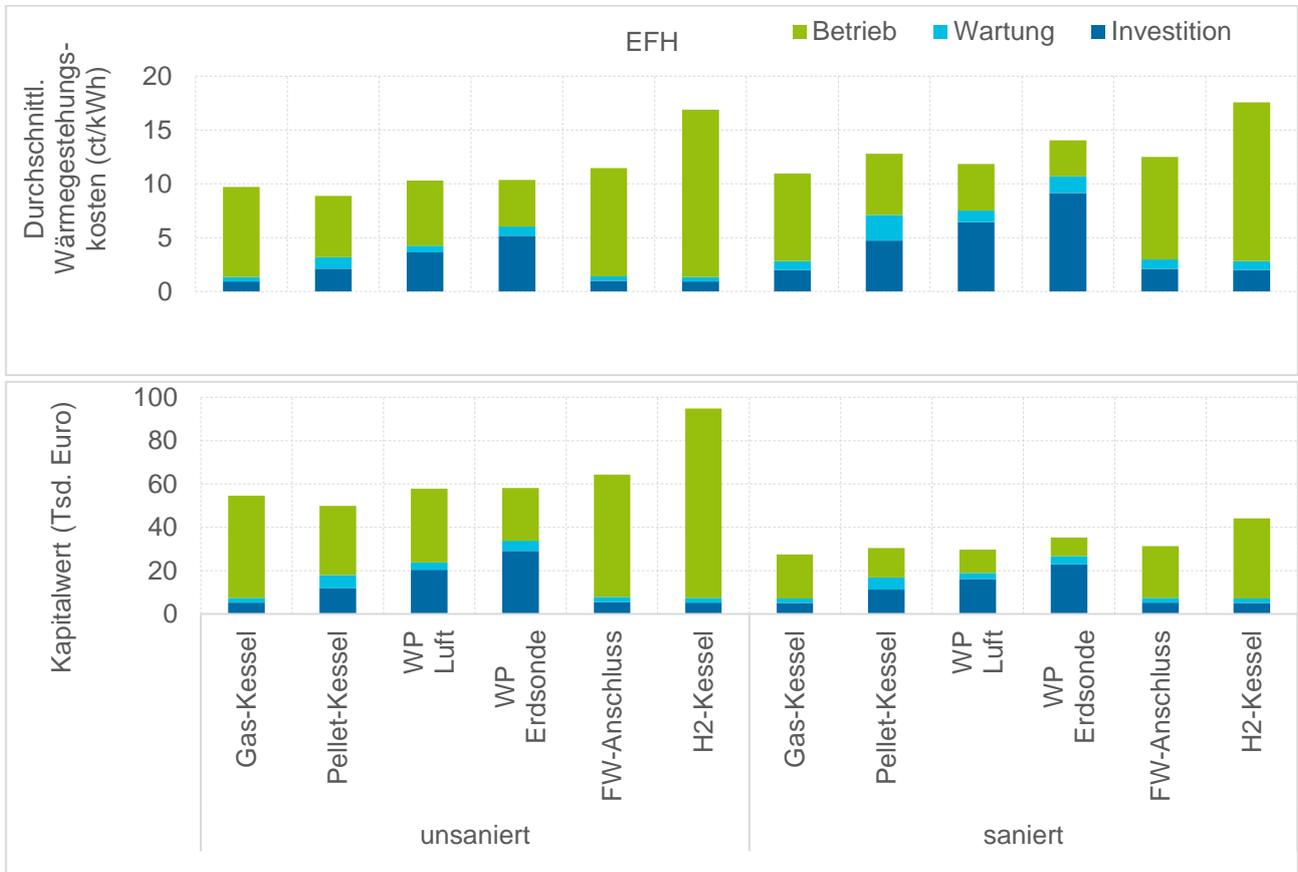
- Die Investitionskosten werden über Kostenfunktionen in Abhängigkeit der thermischen Leistung abgebildet. Als Datengrundlage dienen die Kostendaten vom Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern (BKI 2021), die durch Auswertung real abgerufener Baupreise aus dem Jahr 2019 für Neubauten ermittelt wurden.
- Fixe Betriebskosten beinhalten Kosten für Wartung, Instandsetzung und Inspektion. Die jährlichen, fixen Betriebskosten für Wasserstoff-, Gaskessel und Nah- und Fernwärme liegen bei 2,5 % der Investitionskosten. Für Pelletkessel werden 3 % und für Wärmepumpen 1 % der jeweiligen Investition angenommen.
- Variable Betriebskosten fallen für den jeweilig eingesetzten Brennstoff an. Der Strompreispfad geht von einer sukzessiven Reduktion der EEG-Umlage auf Null bis 2025 aus. Darüber hinaus wird angenommen, dass Stromversorger für Wärmepumpen auch zukünftig vergünstigte Wärmepumpen-Tarife anbieten (müssen). Der Gaspreis beinhaltet einen CO₂-Preis. Im Rahmen des Wirtschaftlichkeitsvergleichs wird angenommen, dass dieser bis 2030 auf 125 € pro Tonne CO₂ ansteigt. Die Entwicklung des Wasserstoffpreispfades basiert auf der BDI-Studie „Klimapfade 2.0“ (Boston Consulting Group 2021). Die Entwicklung der Brennstoffpreise spiegelt Preisprojektionen zum Stand 01/2022 wider und berücksichtigen deswegen nicht die drastischen Verwerfungen der letzten Monate.
- Für diese Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden keine Infrastrukturkosten berücksichtigt. Inwieweit der Ausbau der Wärmepumpen dazu führt, dass die Verteilnetze für Strom weiter ausgebaut werden müssen, unterliegt erheblichen Unsicherheiten. Gleiches gilt für den Anstieg der Verteilnetzkosten für Gas, wenn zukünftig die Gasinfrastrukturkosten auf eine kleinere Gasmenge umgelegt werden müssen.
- Bei einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hat der Investitionszeitpunkt Auswirkungen auf das Ergebnis. Für diesen Vergleich wird angenommen, dass die Investition zum heutigen Zeitpunkt getätigt wird. Fixe und variable Betriebskosten fallen zukünftig über die gesamte Nutzungsdauer der Anlage an und werden über den Barwert abgebildet. Für die Berechnung des Barwerts wird ein Zins von 2 % angenommen. Die Nutzungsdauer liegt für alle Heizungsanlagen bei 20 Jahren. Die Preisbasis für alle Berechnungen ist 2019.
- Es werden keine Kosten für Sanierung berücksichtigt. Es wird demnach davon ausgegangen, dass die jeweiligen Heizsysteme in die unterschiedlichen energetischen Zustände der Typgebäude eingebaut werden. Die Sanierungsentscheidung hat unabhängig von der Wahl des Heizsystems bereits stattgefunden.

- Es werden keine staatlichen Förderungen einzelner Technologien berücksichtigt.
- Bei den Wärmepumpen wird für den Vergleich eine Luft- und eine Erdsonden-Wärmepumpe berücksichtigt. Der COP gibt Auskunft über die Effizienz der Wärmepumpe (WP) und hängt bei beiden Systemen im Wesentlichen von der Temperaturdifferenz zwischen der Wärmequelle (Luft bzw. Erdreich) und dem Temperaturniveau des Heizsystems ab. Letzteres wird insbesondere durch den Effizienzstandard des Gebäudes und die Größe der Heizfläche beeinflusst. Aufgrund der durchschnittlich höheren Quelltemperatur erreichen Erdsonden-Wärmepumpen tendenziell einen höheren COP als Luft-Wärmepumpen. Für die Erdsonden-WP werden COP zwischen 3,3 (unsaniertes MFH) und 4,5 (saniertes EFH) angenommen. Der COP der Luft-WP liegen zwischen 2,3 (unsaniertes MFH) und 3,5 (saniertes EFH).

7.2.3 Ergebnisse des Wirtschaftlichkeitsvergleichs verschiedener Heizsystemkombinationen

Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit der einzelnen Heizsystemkombinationen werden sowohl durchschnittliche Wärmegestehungskosten als auch der absolute Kapitalwert verglichen. Wärmegestehungskosten zeigen auf, welche Kombination die geringsten spezifischen Kosten pro kWh aufweist. Der Kapitalwert berücksichtigt auch die vom Sanierungszustand abhängige absolute Wärmenachfrage und verdeutlicht somit den Einfluss des Sanierungszustandes auf die Heizkosten. Abbildung 7-1 und Abbildung 7-2 zeigen die Ergebnisse für ein EFH und ein MFH jeweils im sanierten und unsanierten Zustand. Die Kosten werden dabei nach Investition, Wartung und Betrieb unterschieden. Allgemein lässt sich erkennen, dass die Investitions- und Wartungskosten bei Einfamilienhäusern einen größeren Anteil als bei Mehrfamilienhäusern ausmachen. Aufgrund der kleineren Wärmenachfrage und höheren spezifischen Investitionskosten bei kleineren Anlagen sind die durchschnittlichen Wärmegestehungskosten im EFH höher als im MFH. Gleiches gilt auch für unsanierte EFH gegenüber sanierten EFH. Bei MFH hat der Sanierungszustand kaum einen Einfluss auf die durchschnittlichen Wärmegestehungskosten, da mit der Anlagengröße Skaleneffekte kleiner werden. Der Kapitalwert hingegen zeigt alle über die Anlagennutzungsdauer anfallenden Kosten und verdeutlicht die Einsparungen im sanierten Gebäude aufgrund eines verminderten Wärmebedarfs.

Abbildung 7-1: Durchschnittliche Wärmegestehungskosten und Kapitalwerte für unterschiedliche Heizsysteme und Sanierungszustände eines typischen Einfamilienhauses



Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung und Darstellung)

Abbildung 7-2: Durchschnittliche Wärmegestehungskosten und Kapitalwerte für unterschiedliche Heizsysteme und Sanierungszustände eines typischen Mehrfamilienhauses



Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung und Darstellung)

Vergleicht man die einzelnen Heizsysteme miteinander, lässt sich erkennen, dass Luft-Wärmepumpen in sanierten Einfamilienhäusern heute schon fast genauso günstig wie Gaskessel sind. Zukünftig (also im Falle zukünftiger Investitionszeitpunkte) werden Luft-WP günstiger sein, da die Betriebskosten der Gaskessel aufgrund des CO₂-Preises steigen und die Investitionskosten der Wärmepumpen aufgrund von Skalen- und Lerneffekten sinken werden. In unsanierten Gebäuden können Pelletheizungen eine wirtschaftliche Option darstellen, allerdings sollte Biomasse aufgrund des begrenzten Potenzials nur dort eingesetzt werden, wo es keine andere erneuerbare Alternative gibt. Wasserstoff ist in allen betrachteten Varianten die teuerste Option der Wärmeversorgung.

7.3 Daten und Ergebnisse zur Regionalisierung

7.3.1 Potenzialflächen und Verteilschlüssel

Tabelle 7-2: Geeignete und bedingt geeignete Potenzialflächen für Windenergie in Baden-Württemberg in Kombination mit einem „geringen“ (KR 1) bzw. „mittleren“ (KR 2) Konfliktrisiko für windkraftsensible Vogelarten und Fledermäuse sowie der daraus abgeleitete Verteilschlüssel

Region	Geeignet & KR 1 oder 2 [ha]	Bedingt geeignet & KR 1 oder 2 [ha]	Potenzialfläche [ha]	Spez. Flächenanteil	Verteilschlüssel
Stuttgart	1.456	1.865	3.321	0,9 %	3 %
Heilbronn-Franken	19.795	3.254	23.050	4,8 %	20 %
Ostwürttemberg	3.241	964	4.205	2,0 %	4 %
Mittlerer Oberrhein	4.836	3.220	8.055	3,8 %	7 %
Rhein-Neckar	6.843	1.199	8.042	3,3 %	7 %
Nordschwarzwald	2.135	16.683	18.818	8,1 %	16 %
Südlicher Oberrhein	1.541	4.250	5.792	1,4 %	5 %
Schwarzwald-Baar-Heuberg	3.031	3.252	6.283	2,5 %	5 %
Hochrhein-Bodensee	337	2.296	2.633	1,0 %	2 %
Neckar-Alb	4.505	3.511	8.015	3,2 %	7 %
Donau-Iller	10.806	12.072	22.878	7,9 %	20 %
Bodensee-Oberschwaben	4.143	1.349	5.492	1,6 %	5 %
Baden-Württemberg	62.670	53.914	116.584	3,3 %	100 %

Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

Tabelle 7-3: Potenzialflächen für PV-Freiflächenanlagen auf Seitenrandstreifen und benachteiligten landwirtschaftlichen Gebieten sowie die daraus abgeleiteten Verteilschlüssel

Region	Seitenrandstreifen und Konversionsflächen [ha]	Spezifischer Verteilschlüssel	Benachteiligte landwirtschaftliche Gebiete [ha]	Spezifischer Verteilschlüssel	Kombinierter Verteilschlüssel (2 : 1)
Stuttgart	3.339	13%	630	7 %	11 %
Heilbronn-Franken	4.144	16%	2.262	25 %	19 %
Ostwürttemberg	1.317	5%	971	11 %	7 %
Mittlerer Oberrhein	2.311	9%	19	0 %	6 %
Rhein-Neckar	2.252	8%	540	6 %	8 %
Nordschwarzwald	895	3%	459	5 %	4 %
Südlicher Oberrhein	3.140	12%	129	1 %	8 %
Schwarzwald-Baar-Heuberg	1.451	5%	996	11 %	7 %
Hochrhein-Bodensee	1.745	7%	626	7 %	7 %
Neckar-Alb	1.468	5%	934	10 %	7 %
Donau-Iller	2.094	8%	648	7 %	8 %
Bodensee-Oberschwaben	2.544	10%	785	9 %	9 %
Baden-Württemberg	26.699	100%	9.000	100 %	100 %

Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

Tabelle 7-4: Verteilschlüssel für PV-Dachanlagen und PV-Sonderanlagen

Region	PV-Dachanlagen	Agri-PV auf Sonderkulturen	Agri-PV auf Grünland	PV-Parkplätze	PV-Sonderanlagen kombiniert (2 : 1 : 1)
Stuttgart	20 %	12 %	11 %	17 %	13 %
Heilbronn-Franken	9 %	12 %	9 %	11 %	11 %
Ostwürttemberg	5 %	0 %	7 %	5 %	3 %
Mittlerer Oberrhein	6 %	6 %	2 %	9 %	6 %
Rhein-Neckar	10 %	7 %	3 %	9 %	6 %
Nordschwarzwald	6 %	0 %	4 %	6 %	2 %
Südlicher Oberrhein	11 %	26 %	10 %	10 %	19 %
Schwarzwald-Baar-Heuberg	6 %	0 %	9 %	6 %	3 %
Hochrhein-Bodensee	6 %	7 %	10 %	7 %	8 %
Neckar-Alb	7 %	0 %	9 %	7 %	3 %
Donau-Iller	7 %	1 %	9 %	7 %	4 %
Bodensee-Oberschwaben	8 %	28 %	17 %	8 %	22 %
Baden-Württemberg	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

7.3.2 Installierte Erzeugungskapazitäten zur Stromerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs

Tabelle 7-5: Installierte Erzeugungskapazitäten zur Stromerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Ariadne-Szenario-BW-2040

Region (alle Werte in der Einheit GW _{el})	Wind	PV-Freifläche	PV-Dach	PV-Sonderanlagen	Bio-masse	Lauf-wasser	Wasser-stoff
Stuttgart	0,6	1,4	4,5	0,6	0,0	0,0	1,2
Heilbronn-Franken	4,3	2,5	2,0	0,5	0,1	0,0	0,7
Ostwürttemberg	0,8	0,9	1,2	0,1	0,1	0,0	0,0
Mittlerer Ober-rhein	1,5	0,8	1,5	0,3	0,0	0,1	0,8
Rhein-Neckar	1,5	1,0	2,2	0,3	0,0	0,0	1,0
Nordschwarzwald	3,5	0,5	1,3	0,1	0,0	0,0	0,1
Südlicher Ober-rhein	1,1	1,1	2,4	0,9	0,0	0,1	0,1
Schwarzwald-Baar-Heuberg	1,2	1,0	1,3	0,1	0,1	0,0	0,1
Hochrhein-Boden-see	0,5	0,9	1,4	0,4	0,1	0,5	0,0
Neckar-Alb	1,5	0,9	1,6	0,2	0,0	0,0	0,1
Donau-Iller	4,3	1,0	1,5	0,2	0,1	0,1	0,0
Bodensee-Ober-schwaben	1,0	1,2	1,9	1,0	0,1	0,0	0,0
Baden-Württem-berg	21,7	13,3	22,9	4,7	0,7	0,9	4,3

Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

Tabelle 7-6: Installierte Erzeugungskapazitäten zur Stromerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Agora-Szenario-BW-2040

Region (alle Werte in der Einheit GW _{el})	Wind	PV-Freifläche	PV-Dach	PV-Sonderanlagen	Bio-masse	Lauf-wasser	Wasser-stoff
Stuttgart	0,3	1,5	4,6	0,6	0,0	0,1	2,3
Heilbronn-Franken	2,2	2,5	2,0	0,5	0,1	0,0	0,9
Ostwürttemberg	0,4	0,9	1,2	0,1	0,0	0,0	0,1
Mittlerer Ober-rhein	0,8	0,8	1,5	0,3	0,0	0,2	1,1
Rhein-Neckar	0,8	1,0	2,2	0,3	0,0	0,0	1,5
Nordschwarzwald	1,8	0,5	1,3	0,1	0,0	0,0	0,2
Südlicher Ober-rhein	0,5	1,1	2,5	0,9	0,0	0,1	0,3
Schwarzwald-Baar-Heuberg	0,6	1,0	1,4	0,1	0,1	0,0	0,1
Hochrhein-Boden-see	0,2	0,9	1,5	0,4	0,1	0,7	0,2
Neckar-Alb	0,7	1,0	1,7	0,2	0,0	0,0	0,2
Donau-Iller	2,1	1,0	1,6	0,2	0,1	0,1	0,1
Bodensee-Ober-schwaben	0,5	1,3	2,0	1,1	0,1	0,0	0,1
Baden-Württem-berg	10,9	13,6	23,4	4,8	0,6	1,3	7,1

Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

Tabelle 7-7: Installierte Erzeugungskapazitäten zur Stromerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das UBA-Szenario-BW-2040

Region (alle Werte in der Einheit GW _{el})	Wind	PV-Freifläche	PV-Dach	PV-Sonderanlagen	Biomasse	Laufwasser	Wasserstoff
Stuttgart	0,4	0,6	1,8	0,2	0,0	0,0	0,3
Heilbronn-Franken	3,1	1,0	0,8	0,2	0,1	0,0	0,0
Ostwürttemberg	0,6	0,4	0,5	0,0	0,1	0,0	-
Mittlerer Oberrhein	1,1	0,3	0,6	0,1	0,0	0,2	0,1
Rhein-Neckar	1,1	0,4	0,9	0,1	0,0	0,0	0,1
Nordschwarzwald	2,5	0,2	0,5	0,0	0,0	0,0	0,1
Südlicher Oberrhein	0,8	0,5	1,0	0,4	0,0	0,1	0,1
Schwarzwald-Baar-Heuberg	0,9	0,4	0,5	0,1	0,1	0,0	0,1
Hochrhein-Bodensee	0,4	0,4	0,6	0,1	0,1	0,6	0,0
Neckar-Alb	1,1	0,4	0,7	0,1	0,0	0,0	0,1
Donau-Iller	3,1	0,4	0,6	0,1	0,1	0,1	0,0
Bodensee-Oberschwaben	0,7	0,5	0,8	0,4	0,1	0,0	0,0
Baden-Württemberg	15,8	5,4	9,3	1,9	0,7	1,2	1,0

Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

Tabelle 7-8: Flächenanteile für Windenergieanlagen und PV-Freiflächenanlagen in den zwölf Regionen Baden-Württembergs

Region	Wind			PV-Freifläche		
	Ariadne-Szenario-BW-2040	Agora-Szenario-BW-2040	UBA-Szenario-BW-2040	Ariadne-Szenario-BW-2040	Agora-Szenario-BW-2040	UBA-Szenario-BW-2040
Stuttgart	0,8%	0,4%	0,6%	0,4%	0,4%	0,2%
Heilbronn-Franken	4,1%	2,0%	3,0%	0,5%	0,5%	0,2%
Ostwürttemberg	1,6%	0,8%	1,2%	0,4%	0,4%	0,2%
Mittlerer Oberrhein	3,2%	1,6%	2,3%	0,4%	0,4%	0,1%
Rhein-Neckar	2,8%	1,4%	2,0%	0,4%	0,4%	0,2%
Nordschwarzwald	6,7%	3,4%	4,9%	0,2%	0,2%	0,1%
Südlicher Oberrhein	1,2%	0,6%	0,9%	0,3%	0,3%	0,1%
Schwarzwald-Baar-Heuberg	2,1%	1,0%	1,5%	0,4%	0,4%	0,2%
Hochrhein-Bodensee	0,8%	0,4%	0,6%	0,3%	0,3%	0,1%
Neckar-Alb	2,7%	1,3%	1,9%	0,4%	0,4%	0,2%
Donau-Iller	6,6%	3,3%	4,8%	0,4%	0,4%	0,1%
Bodensee-Oberschwaben	1,3%	0,7%	1,0%	0,4%	0,4%	0,1%
Baden-Württemberg	2,7 %	1,4 %	2,0%	0,4 %	0,4 %	0,2%

Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

7.3.3 Energieträgerspezifische Endenergienachfrage für Raumwärme und Warmwasser in den Sektoren Haushalte und GHD

Tabelle 7-9: Endenergienachfrage für Raumwärme und Warmwasser in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Jahr 2019

Region (alle Werte in der Einheit TWh)	Steinkohle	Mineralöl	Erdgas	Biomasse	Solarthermie	Umweltwärme	Strom	Nah- und Fernwärme
Stuttgart	0,1	7,3	11,1	3,6	0,3	0,4	1,1	1,8
Heilbronn-Franken	0,0	2,4	3,6	1,2	0,1	0,1	0,3	0,4
Ostwürttemberg	0,0	1,2	1,8	0,6	0,1	0,1	0,2	0,2
Mittlerer Oberrhein	0,0	2,7	4,2	1,3	0,1	0,2	0,4	0,6
Rhein-Neckar	0,0	3,1	4,6	1,5	0,2	0,2	0,4	2,2
Nordschwarzwald	0,0	1,6	2,4	0,8	0,1	0,1	0,2	0,5
Südlicher Oberrhein	0,0	2,9	4,4	1,4	0,2	0,2	0,4	0,6
Schwarzwald-Baar-Heuberg	0,0	1,3	2,0	0,6	0,1	0,1	0,2	0,2
Hochrhein-Bodensee	0,0	1,8	2,7	0,9	0,1	0,1	0,3	0,3
Neckar-Alb	0,0	1,9	2,8	0,9	0,1	0,1	0,3	0,5
Donau-Iller	0,0	1,4	2,1	0,7	0,1	0,1	0,2	0,5
Bodensee-Oberschwaben	0,0	1,7	2,5	0,8	0,1	0,1	0,2	0,2
Baden-Württemberg	0,3	29,2	44,2	14,2	1,7	1,6	4,2	8,1

Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

Tabelle 7-10: Endenergienachfrage für Raumwärme und Warmwasser in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Ariadne-Szenario-BW-2040

Region (alle Werte in der Einheit TWh)	E-Fuels	Biomasse	Umweltwärme	Strom	Nah- und Fernwärme
Stuttgart	0,5	1,1	3,0	1,2	5,8
Heilbronn-Franken	0,2	0,5	1,5	0,6	1,0
Ostwürttemberg	0,1	0,3	0,9	0,3	0,2
Mittlerer Oberrhein	0,2	0,5	1,4	0,6	1,7
Rhein-Neckar	0,2	0,5	1,3	0,5	2,4
Nordschwarzwald	0,1	0,4	1,0	0,4	0,6
Südlicher Oberrhein	0,3	0,6	1,8	0,7	1,2
Schwarzwald-Baar-Heuberg	0,1	0,3	0,9	0,4	0,3
Hochrhein-Bodensee	0,2	0,4	1,0	0,4	0,9
Neckar-Alb	0,2	0,4	1,2	0,5	0,7
Donau-Iller	0,1	0,4	1,0	0,4	0,3
Bodensee-Oberschwaben	0,2	0,4	1,1	0,4	0,6
Baden-Württemberg	2,4	5,7	16,0	6,4	15,8

Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

Tabelle 7-11: Endenergienachfrage für Raumwärme und Warmwasser in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Agora-Szenario-BW-2040

Region (alle Werte in der Einheit TWh)	E-Fuels	Biomasse	Solarthermie	Umweltwärme (WP)	Strom	Nah- und Fernwärme
Stuttgart	0,2	3,5	1,2	2,4	1,2	7,0
Heilbronn-Franken	0,1	1,7	0,6	1,1	0,6	1,0
Ostwürttemberg	0,0	0,9	0,3	0,6	0,3	0,3
Mittlerer Oberrhein	0,1	1,6	0,6	1,1	0,5	2,0
Rhein-Neckar	0,1	1,4	0,5	1,0	0,5	3,0
Nordschwarzwald	0,0	1,1	0,4	0,8	0,4	0,7
Südlicher Oberrhein	0,1	2,0	0,7	1,4	0,7	1,2
Schwarzwald-Baar-Heuberg	0,0	1,0	0,4	0,7	0,3	0,3
Hochrhein-Bodensee	0,0	1,1	0,4	0,7	0,4	1,2
Neckar-Alb	0,1	1,2	0,4	0,8	0,4	0,9
Donau-Iller	0,0	1,0	0,4	0,7	0,4	0,4
Bodensee-Oberschwaben	0,1	1,2	0,4	0,8	0,4	0,7
Baden-Württemberg	0,8	17,7	6,3	12,1	6,0	18,8

Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

Tabelle 7-12: Endenergienachfrage für Raumwärme und Warmwasser in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das UBA-Szenario-BW-2040

Region (alle Werte in der Einheit TWh)	Strom	Umweltwärme (WP)	Nah- und Fernwärme
Stuttgart	1,3	3,5	3,3
Heilbronn-Franken	0,6	1,6	0,5
Ostwürttemberg	0,4	0,9	-
Mittlerer Oberrhein	0,6	1,6	0,8
Rhein-Neckar	0,5	1,4	1,5
Nordschwarzwald	0,4	1,0	0,4
Südlicher Oberrhein	0,7	1,9	0,6
Schwarzwald-Baar-Heuberg	0,3	0,9	0,2
Hochrhein-Bodensee	0,4	1,2	0,4
Neckar-Alb	0,4	1,2	0,4
Donau-Iller	0,4	1,0	0,2
Bodensee-Oberschwaben	0,5	1,2	0,1
Baden-Württemberg	6,5	17,3	8,5

Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

7.3.4 Installierte Erzeugungskapazitäten zur Nah- und Fernwärmeerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs

Tabelle 7-13: Anlagenpark zur Nah- und Fernwärmeerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württemberg für das Ariadne-Szenario-BW-2040

Region (alle Werte in der Einheit MW _{th})	Müllver- brennung	Geother- mie	Abwärme	Solar- thermie	Biomasse	H ₂ -KWK	Wärme- pumpe
Stuttgart	140	0	45	1.040	35	906	423
Heilbronn-Fran- ken		0	26	266	95	236	130
Ostwürttemberg		0	22	96	125	33	12
Mittlerer Ober- rhein		139	92	310	165	443	387
Rhein-Neckar	100	87	42	410	110	601	541
Nordschwarz- wald		0	11	104	50	122	44
Südlicher Ober- rhein	30	45	38	216	70	131	18
Schwarzwald- Baar-Heuberg		0	13	60	70	67	26
Hochrhein-Bo- densee		30	21	260	55	39	388
Neckar-Alb		0	16	204	30	59	105
Donau-Iller		12	31	72	155	43	37
Bodensee-Ober- schwaben		25	17	150	100	26	181
Baden-Württem- berg	270	338	375	3.188	1.060	2.706	2.292

Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

Tabelle 7-14: Anlagenpark zur Nah- und Fernwärmeerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Agora-Szenario-BW-2040

Region (alle Werte in der Einheit MW _{th})	Müllverbrennung	Geothermie	Abwärme	Solarthermie	Biomasse	H ₂ -KWK	Wärmepumpe
Stuttgart	140	0	45	1040	35	1.942	423
Heilbronn-Franken		0	26	266	95	369	130
Ostwürttemberg		0	22	96	45	89	12
Mittlerer Oberrhein		139	92	310	5	751	387
Rhein-Neckar	100	87	42	410	30	1.055	541
Nordschwarzwald		0	11	104	10	234	44
Südlicher Oberrhein	30	45	38	216	30	293	18
Schwarzwald-Baar-Heuberg		0	13	60	70	123	26
Hochrhein-Bodensee		30	21	260	55	207	388
Neckar-Alb		0	16	204	30	205	105
Donau-Iller		12	31	72	115	99	37
Bodensee-Oberschwaben		25	17	150	100	138	181
Baden-Württemberg	270	338	375	3.188	620	5.506	2.292

Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

Tabelle 7-15: Anlagenpark zur Nah- und Fernwärmeerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das UBA-Szenario-BW-2040

Region (alle Werte in der Einheit MW _{th})	Müllver- brennung	Geother- mie	Abwärme	Solar- thermie	Biomasse	H₂-KWK	Wärme- pumpe
Stuttgart	140	0	45	1040	35	320	423
Heilbronn-Franken		0	26	266	95	31	130
Ostwürttemberg	-	-	-	-	-	-	-
Mittlerer Ober- rhein		139	92	310	165	73	387
Rhein-Neckar	100	87	42	410	110	150	541
Nordschwarzwald		0	11	104	50	112	44
Südlicher Ober- rhein	30	45	38	216	70	114	18
Schwarzwald-Baar- Heuberg		0	13	60	70	62	26
Hochrhein-Boden- see		30	21	260	55	20	388
Neckar-Alb		0	16	204	30	52	105
Donau-Iller		12	31	72	155	42	37
Bodensee-Ober- schwaben		25	17	150	100	8	181
Baden-Württem- berg	270	338	353	3.092	935	983	2.280

Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

7.3.5 Technologie- und Brennstoffmix der Nah- und Fernwärmeerzeugung

Tabelle 7-16: Nah- und Fernwärmeerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Ariadne-Szenario-BW-2040

Region (alle Werte in der Einheit GWh _{th})	Müllverbrennung	Geothermie	Abwärme	Solarthermie	Biomasse	H ₂ -KWK	Wärmepumpe
Stuttgart	1.104	-	396	988	39	2.123	1.990
Heilbronn-Franken	-	-	227	253	96	117	420
Ostwürttemberg	-	-	31	-	187	54	-
Mittlerer Oberrhein	-	847	392	35	449	173	-
Rhein-Neckar	764	571	235	146	291	302	364
Nordschwarzwald	-	-	96	85	215	223	98
Südlicher Oberrhein	232	297	233	65	202	253	40
Schwarzwald-Baar-Heuberg	-	-	116	28	51	117	33
Hochrhein-Bodensee	-	200	188	186	48	69	371
Neckar-Alb	-	-	144	194	30	116	323
Donau-Iller	-	77	96	-	109	70	-
Bodensee-Oberschwaben	-	164	147	93	82	46	197
Baden-Württemberg	2.100	2.156	2.300	2.073	1.800	3.663	3.835

Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

Tabelle 7-17: Nah- und Fernwärmeerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Agora-Szenario-BW-2040

Region (alle Werte in der Einheit GWh _{th})	Müllverbrennung	Geothermie	Abwärme	Solarthermie	Biomasse	H ₂ -KWK	Wärmepumpe
Stuttgart	1.104	-	396	988	170	2.495	2.854
Heilbronn-Franken	-	-	227	253	242	113	332
Ostwürttemberg	-	-	191	40	50	47	4
Mittlerer Oberrhein	-	1.218	555	76	4	223	184
Rhein-Neckar	783	762	368	254	60	379	782
Nordschwarzwald	-	-	96	98	49	243	294
Südlicher Oberrhein	213	397	324	77	76	250	56
Schwarzwald-Baar-Heuberg	-	-	108	56	79	69	48
Hochrhein-Bodensee	-	266	188	246	91	121	418
Neckar-Alb	-	-	144	194	92	154	492
Donau-Iller	-	102	206	2	89	52	10
Bodensee-Oberschwaben	-	219	147	123	99	75	171
Baden-Württemberg	2.100	2.964	2.949	2.406	1.100	4.220	5.644

Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

Tabelle 7-18: Nah- und Fernwärmeerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das UBA-Szenario-BW-2040

Region (alle Werte in der Einheit GWh _{th})	Müllverbrennung	Geothermie	Abwärme	Solarthermie	Biomasse	H ₂ -KWK	Wärmepumpe
Stuttgart	814	-	396	853	21	382	1.304
Heilbronn-Franken	-	-	227	138	42	32	141
Ostwürttemberg	-	-	-	-	-	-	-
Mittlerer Oberrhein	-	201	-	-	646	73	-
Rhein-Neckar	451	508	141	40	377	153	25
Nordschwarzwald	-	-	54	26	189	115	21
Südlicher Oberrhein	135	230	27	-	192	114	-
Schwarzwald-Baar-Heuberg	-	-	85	5	29	64	10
Hochrhein-Bodensee	-	266	112	36	23	21	8
Neckar-Alb	-	-	144	133	16	58	150
Donau-Iller	-	39	5	-	163	42	-
Bodensee-Oberschwaben	-	145	0	-	12	8	-
Baden-Württemberg	1.400	1.388	1.191	1.230	1.710	1.060	1.660

Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

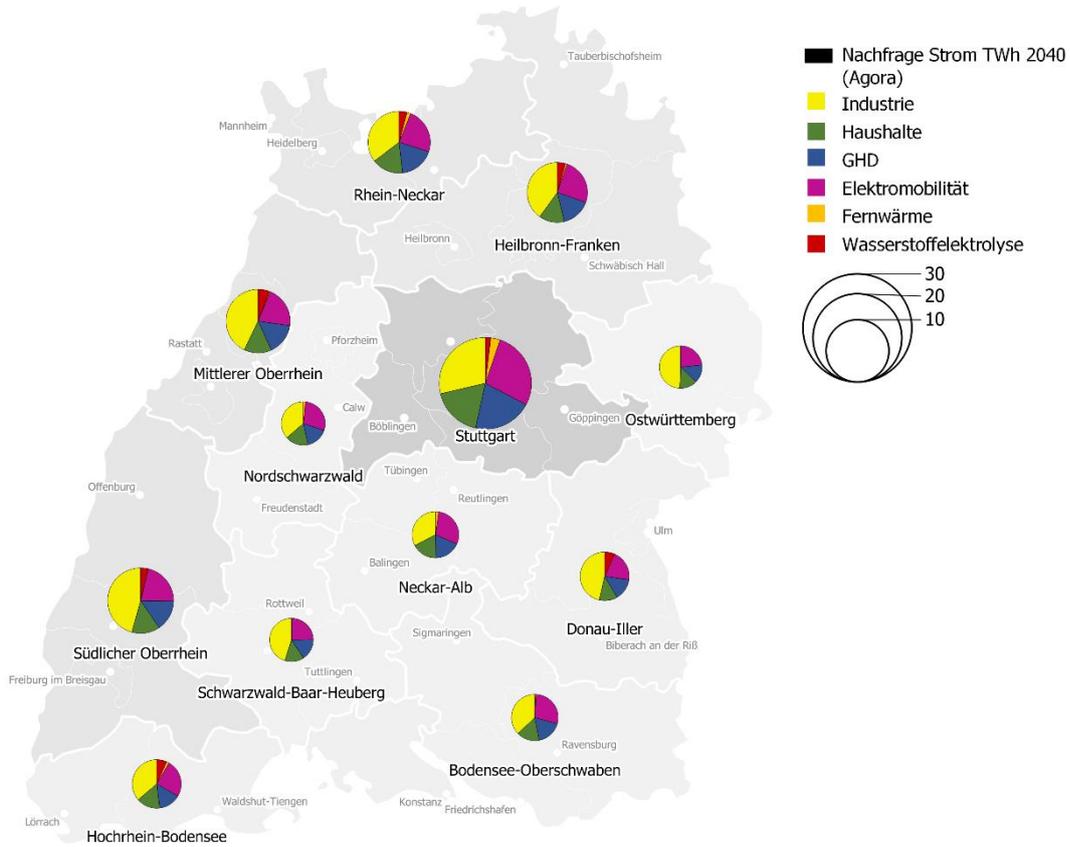
7.3.6 Sektorspezifische Stromnachfrage

Tabelle 7-19: Sektorspezifische Stromnachfrage in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Ariadne-Szenario-BW-2040

Region (alle Werte in der Einheit TWh _{el})	Industrie	Haushalte	Sektor GHD	Elektromobilität	Nah- und Fernwärme	H ₂ -Elektrolyse
Stuttgart	6,8	6,9	8,0	6,1	0,5	0,4
Heilbronn-Franken	4,0	2,3	2,6	2,4	0,1	0,4
Ostwürttemberg	2,5	1,1	1,1	1,1	-	-
Mittlerer Oberrhein	4,9	2,6	3,0	2,2	-	0,6
Rhein-Neckar	3,8	2,9	3,2	2,4	0,1	0,4
Nordschwarzwald	1,9	1,5	1,4	1,4	0,0	-
Südlicher Oberrhein	5,5	2,7	3,0	2,4	0,0	0,4
Schwarzwald-Baar-Heuberg	2,4	1,2	1,4	1,2	0,0	-
Hochrhein-Bodensee	2,4	1,7	1,6	1,6	0,1	0,4
Neckar-Alb	2,0	1,7	1,8	1,7	0,1	-
Donau-Iller	3,1	1,3	1,6	1,3	-	0,4
Bodensee-Oberschwaben	2,2	1,6	1,7	1,6	0,0	-
Baden-Württemberg	41,5	27,3	30,4	25,4	1,0	3,0

Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

Abbildung 7-3: Sektorspezifische Stromnachfrage in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Agora-Szenario-BW-2040



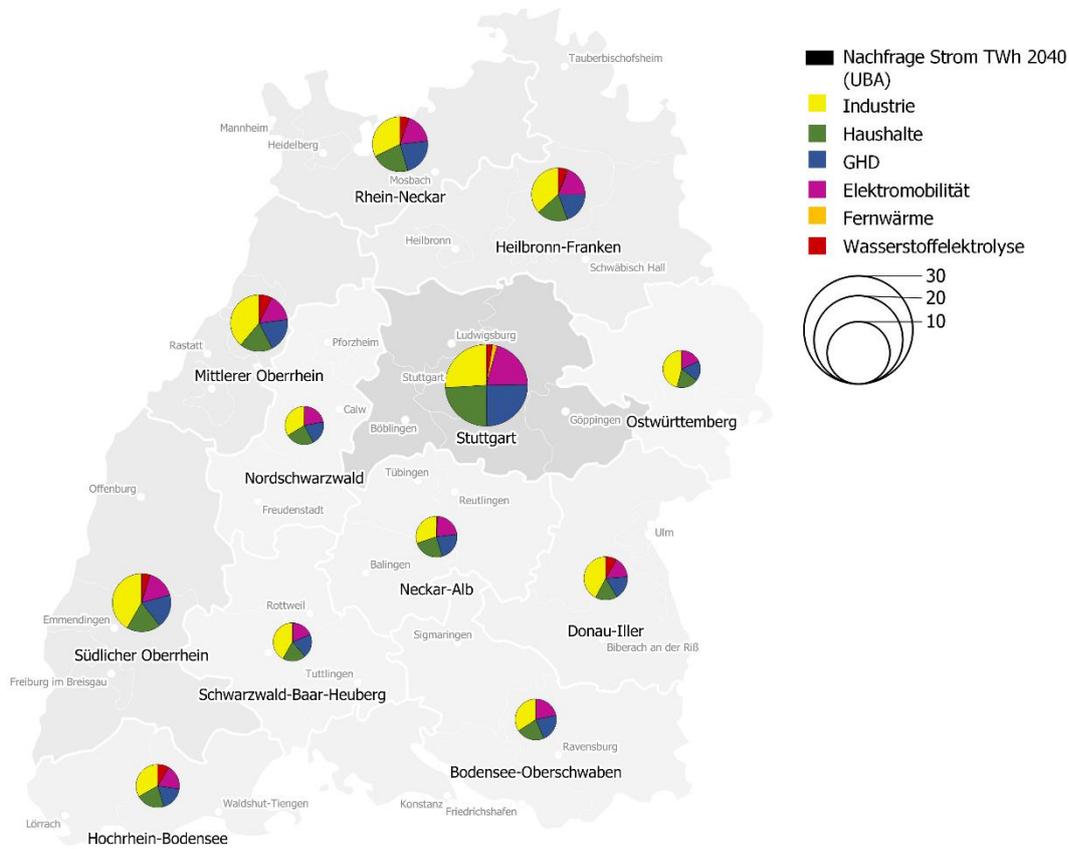
Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnungen)

Tabelle 7-20: Sektorspezifische Stromnachfrage in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Agora-Szenario-BW-2040

Region (alle Werte in der Einheit TWh _{el})	Industrie	Haushalte	Sektor GHD	Elektromobilität	Nah- und Fernwärme	H ₂ -Elektrolyse
Stuttgart	6,2	3,9	4,5	5,9	0,7	0,4
Heilbronn-Franken	3,7	1,3	1,5	2,3	0,1	0,4
Ostwürttemberg	2,3	0,6	0,6	1,1	0,0	-
Mittlerer Oberrhein	4,5	1,4	1,7	2,2	0,0	0,6
Rhein-Neckar	3,5	1,6	1,8	2,4	0,2	0,4
Nordschwarzwald	1,8	0,8	0,8	1,4	0,1	-
Südlicher Oberrhein	5,0	1,5	1,7	2,4	0,0	0,4
Schwarzwald-Baar-Heuberg	2,2	0,7	0,8	1,2	0,0	-
Hochrhein-Bodensee	2,2	1,0	0,9	1,5	0,1	0,4
Neckar-Alb	1,8	1,0	1,0	1,6	0,1	-
Donau-Iller	2,8	0,7	0,9	1,3	0,0	0,4
Bodensee-Oberschwaben	2,1	0,9	1,0	1,6	0,0	-
Baden-Württemberg	38,0	15,4	17,0	24,8	1,4	3,0

Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

Abbildung 7-4: Sektorspezifische Stromnachfrage in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das UBA-Szenario-BW-2040



Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnungen)

Tabelle 7-21: Sektorspezifische Stromnachfrage in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das UBA-Szenario-BW-2040

Region (alle Werte in der Einheit TWh _{el})	Industrie	Haushalte	Sektor GHD	Elektromobilität	Nah- und Fernwärme	H ₂ -Elektrolyse
Stuttgart	4,5	4,1	4,3	3,5	0,3	0,4
Heilbronn-Franken	2,7	1,4	1,4	1,4	0,0	0,4
Ostwürttemberg	1,6	0,7	0,6	0,6	-	-
Mittlerer Oberrhein	3,2	1,6	1,6	1,3	-	0,6
Rhein-Neckar	2,5	1,7	1,7	1,4	0,0	0,4
Nordschwarzwald	1,3	0,9	0,8	0,8	0,0	-
Südlicher Oberrhein	3,6	1,6	1,6	1,4	-	0,4
Schwarzwald-Baar-Heuberg	1,6	0,7	0,7	0,7	0,0	-
Hochrhein-Bodensee	1,6	1,0	0,9	0,9	0,0	0,4
Neckar-Alb	1,3	1,1	1,0	1,0	0,0	-
Donau-Iller	2,0	0,8	0,8	0,7	-	0,4
Bodensee-Oberschwaben	1,5	0,9	0,9	0,9	-	-
Baden-Württemberg	27,4	16,5	16,4	14,7	0,4	3,0

Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

7.3.7 Energieträgermix der Stromerzeugung

Tabelle 7-22: Energieträgermix zur Stromerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Ariadne-Szenario-BW-2040

Region (alle Werte in der Einheit TWh _{el})	Wind	PV-Freifläche	PV-Dach	PV-Sonderanlagen	Bio-masse	Lauf-wasser	Wasser-stoff-KWK
Stuttgart	1,5	1,2	4,0	0,5	0,0	0,2	2,5
Heilbronn-Franken	10,7	2,3	1,8	0,5	0,0	0,1	0,4
Ostwürttemberg	2,0	1,0	1,1	0,1	0,0	0,0	0,1
Mittlerer Ober-rhein	3,7	0,7	1,3	0,2	0,1	0,5	0,5
Rhein-Neckar	3,7	0,9	2,0	0,3	0,0	0,1	0,7
Nordschwarzwald	8,8	0,4	1,2	0,1	0,0	0,1	0,1
Südlicher Ober-rhein	2,7	1,2	2,2	0,8	0,1	0,3	0,1
Schwarzwald-Baar-Heuberg	2,9	0,9	1,2	0,1	0,1	0,0	-
Hochrhein-Boden-see	1,2	0,9	1,3	0,3	0,1	2,0	0,2
Neckar-Alb	3,7	0,8	1,5	0,1	0,0	0,0	0,2
Donau-Iller	10,7	0,9	1,4	0,2	0,0	0,3	0,1
Bodensee-Ober-schwaben	2,6	1,4	1,7	0,9	0,1	0,1	-
Baden-Württem-berg	54,3	12,7	20,6	4,2	0,5	3,7	4,8

Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

Tabelle 7-23: Energieträgermix zur Stromerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Agora-Szenario-BW-2040

Region (alle Werte in der Einheit TWh _{el})	Wind	PV-Freifläche	PV-Dach	PV-Sonderanlagen	Bio-masse	Laufwasser	Wasserstoff-KWK
Stuttgart	0,8	1,3	4,1	0,6	0,2	0,2	6,7
Heilbronn-Franken	5,4	2,4	1,8	0,5	0,2	0,2	0,4
Ostwürttemberg	1,0	1,0	1,1	0,1	0,1	0,0	0,1
Mittlerer Oberrhein	1,9	0,7	1,3	0,3	0,0	0,7	0,6
Rhein-Neckar	1,9	0,9	2,0	0,3	0,1	0,2	0,8
Nordschwarzwald	4,4	0,4	1,2	0,1	0,0	0,1	0,3
Südlicher Oberrhein	1,4	1,2	2,2	0,8	0,1	0,5	0,3
Schwarzwald-Baar-Heuberg	1,5	0,9	1,2	0,1	0,1	0,1	-
Hochrhein-Bodensee	0,6	0,9	1,3	0,3	0,1	2,8	0,1
Neckar-Alb	1,9	0,8	1,5	0,1	0,1	0,1	0,4
Donau-Iller	5,4	0,9	1,4	0,2	0,1	0,4	0,0
Bodensee-Oberschwaben	1,3	1,5	1,8	1,0	0,1	0,1	-
Baden-Württemberg	27,3	12,9	21,0	4,3	1,3	5,3	9,7

Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

Tabelle 7-24: Energieträgermix zur Stromerzeugung in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das UBA-Szenario-BW-2040

Region (alle Werte in der Einheit TWh _{el})	Wind	PV-Freifläche	PV-Dach	PV-Sonderanlagen	Bio-masse	Lauf-wasser	Wasser-stoff-KWK
Stuttgart	1,1	0,5	1,6	0,2	0,0	0,2	1,3
Heilbronn-Franken	7,8	0,9	0,7	0,2	0,1	0,2	-
Ostwürttemberg	1,4	0,4	0,4	0,0	-	0,0	-
Mittlerer Ober-rhein	2,7	0,3	0,5	0,1	0,1	0,6	-
Rhein-Neckar	2,7	0,4	0,8	0,1	0,1	0,2	0,1
Nordschwarzwald	6,4	0,2	0,5	0,0	0,0	0,1	-
Südlicher Ober-rhein	2,0	0,5	0,9	0,3	0,0	0,4	-
Schwarzwald-Baar-Heuberg	2,1	0,4	0,5	0,0	0,0	0,1	-
Hochrhein-Boden-see	0,9	0,3	0,5	0,1	0,0	2,4	0,1
Neckar-Alb	2,7	0,3	0,6	0,1	0,0	0,1	0,1
Donau-Iller	7,7	0,4	0,6	0,1	0,0	0,3	0,1
Bodensee-Ober-schwaben	1,9	0,6	0,7	0,4	0,0	0,1	-
Baden-Württem-berg	39,5	5,2	8,4	1,7	0,3	4,6	1,7

Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

7.3.8 Regionale Bilanzierung der jährlichen Netto-Stromimporte

Tabelle 7-25: Regionale Bilanzierung der jährlichen Netto-Stromimporte in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Ariadne-Szenario-BW-2040

Region (alle Werte in der Einheit TWh _{el})	Stromnachfrage	Stromerzeugung	Netto-Stromimporte (negative Zahl = Stromimport)
Stuttgart	28,5	9,8	- 18,7
Heilbronn-Franken	11,8	15,7	3,9
Ostwürttemberg	5,8	4,1	- 1,8
Mittlerer Oberrhein	13,2	6,8	- 6,4
Rhein-Neckar	12,8	7,4	- 5,4
Nordschwarzwald	6,3	10,8	4,6
Südlicher Oberrhein	14,0	7,4	- 6,6
Schwarzwald-Baar-Heuberg	6,2	5,4	- 0,8
Hochrhein-Bodensee	7,7	5,8	- 2,0
Neckar-Alb	7,2	6,4	- 0,8
Donau-Iller	7,6	13,5	5,8
Bodensee-Oberschwaben	7,2	6,6	- 0,6
Baden-Württemberg	128,5	99,7	- 28,8

Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

Tabelle 7-26: Regionale Bilanzierung der jährlichen Netto-Stromimporte in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das Agora-Szenario-BW-2040

Region (alle Werte in der Einheit TWh _{el})	Stromnachfrage	Stromerzeugung	Netto-Stromimporte (negative Zahl = Stromimport)
Stuttgart	21,5	9,8	- 11,7
Heilbronn-Franken	9,2	10,6	1,4
Ostwürttemberg	4,6	3,2	- 1,4
Mittlerer Oberrhein	10,4	5,2	- 5,2
Rhein-Neckar	9,8	5,8	- 4,0
Nordschwarzwald	4,9	6,6	1,7
Südlicher Oberrhein	11,0	6,4	- 4,6
Schwarzwald-Baar-Heuberg	4,8	4,0	- 0,9
Hochrhein-Bodensee	6,1	6,2	0,1
Neckar-Alb	5,5	4,7	- 0,8
Donau-Iller	6,1	8,4	2,3
Bodensee-Oberschwaben	5,5	5,5	- 0,1
Baden-Württemberg	99,6	76,4	- 23,2

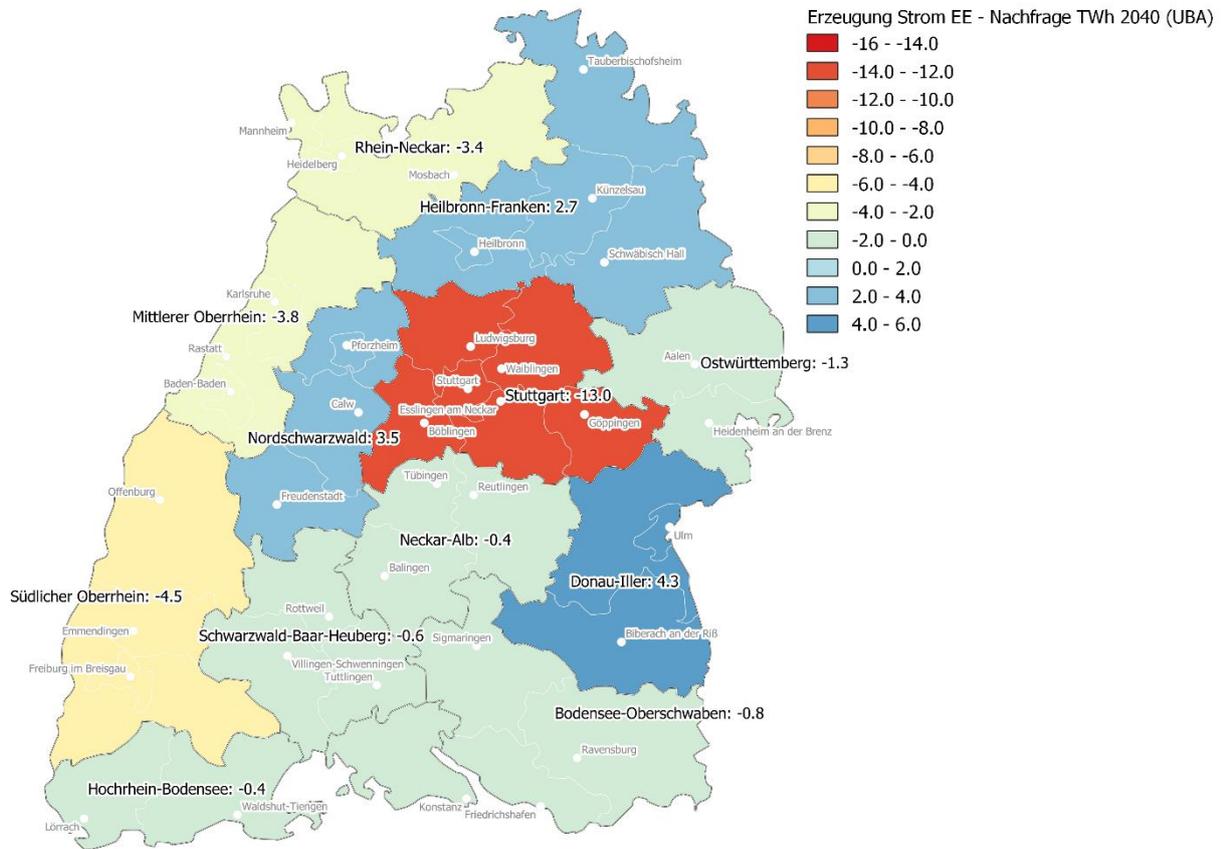
Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

Tabelle 7-27: Regionale Bilanzierung der jährlichen Netto-Stromimporte in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das UBA-Szenario-BW-2040

Region (alle Werte in der Einheit TWh _{el})	Stromnachfrage	Stromerzeugung	Netto-Stromimporte (negative Zahl = Stromimport)
Stuttgart	17,1	4,1	- 13,0
Heilbronn-Franken	7,2	9,9	2,7
Ostwürttemberg	3,6	2,3	- 1,3
Mittlerer Oberrhein	8,3	4,5	- 3,8
Rhein-Neckar	7,8	4,4	- 3,4
Nordschwarzwald	3,8	7,3	3,5
Südlicher Oberrhein	8,7	4,2	- 4,5
Schwarzwald-Baar-Heuberg	3,8	3,2	- 0,6
Hochrhein-Bodensee	4,8	4,4	- 0,4
Neckar-Alb	4,3	3,9	- 0,4
Donau-Iller	4,8	9,1	4,3
Bodensee-Oberschwaben	4,3	3,5	- 0,8
Baden-Württemberg	78,4	60,8	- 17,6

Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnung)

Abbildung 7-5: Jährliche Stromimporte und -exporte in den zwölf Regionen Baden-Württembergs für das UBA-Szenario-BW-2040



Quelle: Öko-Institut e.V. (eigene Berechnungen)