



BADEN-WÜRTTEMBERG KLIMANEUTRAL 2040: ERFORDERLICHER AUSBAU DER ERNEUER- BAREN ENERGIEN

Autoren: Dr. Joachim Nitsch, Magdalena Magosch

Stand: Oktober 2021

Vorwort

Unter den demokratischen Parteien in Baden-Württemberg besteht weitgehend Einigkeit über die langfristigen Ziele des Klimaschutzes: Das 1,5-Grad-Ziel, zu dem sich die Weltgemeinschaft bereits 2015 in Paris verständigt hat, soll erreicht werden. Klimaneutralität will und muss man deshalb schon bis zum Jahr 2040 erreichen – wie jetzt auch in der Novelle des Klimaschutzgesetzes Baden-Württemberg festgelegt ist. Die zeitnahe Weiterentwicklung unserer Studie aus dem vergangenen Jahr ist auch eine Reaktion auf die vor allem durch die jungen Menschen in unserem Land angestoßene Diskussion zur Zukunftsfähigkeit der Gesellschaft.

Die Energiebedarfe der Sektoren Strom, Wärme und Mobilität können dann nur komplett aus erneuerbaren Energien gewonnen werden – auf der Grundlage eines deutlich reduzierten Energieverbrauchs. Mit dieser Studie will die Plattform Erneuerbare Energien Baden-Württemberg skizzieren, welche Ausbaupfade bei Sonnen- und Windenergie sowie bei den vor allem für die Versorgungssicherheit bedeutenden nicht-volatilen erneuerbaren Energieträgern Biomasse, Wasserkraft und Geothermie nötig und möglich sind, um dieses Ziel zu erreichen. Damit stellt sich die Erneuerbare Energien-Branche auch der Verantwortung, zur Erreichung der Klimaneutralität 2040 in Baden-Württemberg beizutragen.

Die in Kapitel 3 und 4 dargestellten jährlichen Zubaumengen sind bezüglich der Potenziale und Flächenverfügbarkeit prinzipiell machbar, und auch aus wirtschaftlicher, ökologischer und unternehmerischer Sicht zu bewerkstelligen. Sie bedürfen jedoch einer flächendeckenden und robusten Energieplanung und stellen hohe Anforderungen an die betreffenden Unternehmen, Behörden und Anlagenbetreiber. Nur bei sehr konkreten und ehrgeizigen energie- und klimapolitischen Rahmenbedingungen und dem klaren Willen aller Akteure in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft, den Umbau in konstruktiver Weise in allen Bereichen durchzuführen, sind die notwendigen Umbau- und Zubauraten in dem vorgegebenen Zeitraum erreichbar.

Der hier vorgeschlagene und zur Erreichung des angestrebten Klimaschutzziels notwendige Ausbau der erneuerbaren Energien ist über Jahrzehnte mit erheblichen Wirtschaftsanreizen, zusätzlicher Wertschöpfung und stabilen Arbeitsmarkimpulsen verbunden. Außerdem können so die ansonsten drohenden sehr hohen Klimaschadenskosten in Grenzen gehalten werden. Die erforderliche Modernisierung der gesamten Energieversorgung und die damit einhergehenden Innovationen stellen somit eine sehr sinnvolle gesamtwirtschaftliche Strategie dar, die auch die Entstehung stabiler Zukunftsmärkte im In- und Ausland absichert.

Mit den Ergebnissen und Schlussfolgerungen der Studie will die Plattform Erneuerbare Energien Baden-Württemberg den Dialog mit Politik, Wirtschaft und Gesellschaft über die Herausforderungen der Energiewende intensivieren. Zu jeder Technologie der erneuerbaren Energien finden sich am Ende der Kapitel unsere Vorschläge der wesentlichen politischen Handlungsansätze. Diese müssen möglichst rasch angegangen werden, um die hier dargestellten Ausbautzahlen sicherzustellen, die sich am unteren Rand des für den Klimaschutz Nötigen befinden.

Auf einen Blick: Szenario KLIMANEUTRAL 2040

Wie viele erneuerbare Energien brauchen wir in Baden-Württemberg, um das im novellierten Klimaschutzgesetz verankerte neue Ziel der Klimaneutralität 2040 zu erreichen? Eine mögliche Antwort darauf gibt das in dieser Studie vorgestellte Szenario KLIMANEUTRAL 2040 (siehe auch Tabellen A-1 und A-2, Anhang).

Um den im Folgenden dargestellten, schnellen und starken Ausbau der erneuerbaren Energien (EE) bis 2040 sicherzustellen, sind zahlreiche Nachbesserungen des regulatorischen und wirtschaftlichen Rahmens notwendig. Vorschläge für entsprechende Handlungsansätze sind am Ende der jeweiligen Kapitel (blau hervorgehoben) zu finden. Darüber hinaus sind Strom-, Gas- und Wärmenetze durch intelligente Sektorkopplung besser zu verbinden. Durch Speicher für Wärme, Strom und Gas muss zudem die hohe Versorgungssicherheit im Land weiter verbessert werden.

Grundvoraussetzung einer erfolgreichen Energiewende ist eine deutliche Steigerung der Effizienz. Im Szenario KLIMANEUTRAL 2040 sinkt der **gesamte Endenergieverbrauch** bis 2040 **um rund 37 %** gegenüber 2020. Dies wird erreicht durch die Reduzierung des Endenergiebedarfs für den Verkehr um 45% und des Endenergiebedarfs für Wärme (Brennstoffe und Strom) um 46 % gegenüber 2020 (Kap. 2.1). Das Szenario KLIMANEUTRAL 2040 beinhaltet zugleich eine **Erhöhung der Stromnachfrage** bis 2040 um **46 %** auf dann gut 90 Terawattstunden pro Jahr (TWh/a; heute 62 TWh/a) und bildet so die zunehmende direkte Nutzung von Strom im Wärme- und Verkehrssektor ab (Kap. 2.2).

STROMSEKTOR

Die im Folgenden dargestellte erneuerbare Stromerzeugung in BW deckt im Jahr 2040 einen Anteil von 84 % des gesamten Bruttostromverbrauchs des Landes (dann 92 TWh/a), die restlichen 16 % werden als EE-Strom aus anderen Bundesländern und Nachbarstaaten importiert (Kap. 2.3).

Die **installierte Leistung zur Erzeugung von erneuerbarem Strom** muss sich bis 2040 mindestens verfünffachen: von heute 10,4 Gigawatt (GW) auf dann 52,5 GW. Dafür muss der Ausbau der EE im Schnitt mit der vierfachen Geschwindigkeit vonstattengehen im Vergleich zum Jahrzehnt 2010 bis 2020. Photovoltaik (PV) und Windenergie leisten dafür die größten Beiträge (Kap. 3).

Die Leistung der in Baden-Württemberg (BW) auf Dächern und als Freiflächenanlagen installierten **PV-Module** summiert sich derzeit auf knapp 7 GW. Im Szenario KLIMANEUTRAL 2040 wird dieser Wert mehr als verfünffacht auf 38,7 GW. Dafür ist spätestens ab 2030 eine jährliche Zubaurate von 2.000 Megawatt (MW) notwendig (2020 wurden 614 MW in Betrieb genommen). Die mit Hilfe der PV bereitgestellte Strommenge umfasst im Jahr 2040 37 TWh/a, etwa 40 % des dann zu erwartenden Stromverbrauchs in Baden-Württemberg (Kap. 3.1).

Windenergie wird das zweite Standbein der erneuerbaren Stromerzeugung. Im Szenario KLIMANEUTRAL 2040 summiert sich die installierte Leistung auf 11.500 MW (2020: 1.600 MW,

738 Anlagen). Da neue Windenergieanlagen immer leistungsstärker werden und alte Anlagen ersetzen, werden im Jahr 2040 je nach Anlagengröße etwa 2.000 bis 2.400 Anlagen benötigt. Sie werden dann mit 27 TWh pro Jahr etwa 29 % des Stromverbrauchs in BW decken. Der zuletzt stark eingebrochene Zubau (2020 nur 47 MW) muss dafür schnell und stark zunehmen, auf 850 MW pro Jahr in 2030 und über 1.000 MW pro Jahr ab 2035 (Kap. 3.2).

Auch bei den weiteren EE-Technologien gibt es noch Ausbaupotenziale. Ihre **nicht-variable Stromerzeugung** ist in ihrer Bedeutung für die Netzstabilität besonders hervorzuheben.

Im Bereich der **Biomasse** gibt es noch erschließbare Potenziale bei Holz, Landschaftspflegematerial und Gülle- und Mistvergärung. Zudem erfordert die Flexibilisierung der Biogasanlagen den Ausbau ihrer Leistung (bei leicht sinkender Stromerzeugung). Im Szenario KLIMANEUTRAL 2040 erhöht sich die installierte Leistung im Bereich Biomasse von heute 945 MW auf 1.241 MW (Kap. 3.3). Wie bei der Biomasse ist für die Tiefengeothermie die Wärmeerzeugung mittelfristig ausschlaggebend. Vom derzeitigen Planungsstand ausgehend ist bei der **Tiefengeothermie** zugleich eine elektrische Leistung von 60 MW bis spätestens 2030 und 120 MW bis 2040 möglich (Kap. 3.4).

Durch Modernisierungen und den Bau von neuen Kleinwasserkraftanlagen an bestehenden Regelungs- sowie Sohlenbauwerken kann auch die hier die Leistung von heute 888 MW auf rund 1.000 Megawatt erhöht werden. Damit steigt die Stromerzeugung durch **Wasserkraft** (derzeit in BW zweitstärkste EE-Technologie nach PV) im Szenario KLIMANEUTRAL 2040 noch leicht um etwa ein Sechstel an (Kap. 3.5).

Neben einem starken Stromnetzverbund innerhalb Deutschlands und der EU und dem Ausbau von Verteilnetzen sowie (Batterie-)Speichern ist auch die Sicherstellung von gasbasierter Leistung zur Stromerzeugung ausschlaggebend, um die fluktuierenden EE ausgleichen zu können. Im Szenario KLIMANEUTRAL 2040 werden noch 1.600 MW an neuer Erdgasleistung zugebaut, die bis spätestens 2040 – zusammen mit bereits bestehenden Gaskraftwerken (2.000 MW) – auf grünen Wasserstoff umgestellt werden. Die Nutzung der Kohlekraft läuft im Szenario im Jahr 2030 aus (Kap. 2.4).

Neben dem Ersatz von Erdgas in der Erzeugung von Strom und Wärme (also in Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)), wird **grüner Wasserstoff** im Szenario KLIMANEUTRAL 2040 vor allem im Verkehr und für industrielle Prozesswärme eingesetzt, insgesamt rund **47 TWh pro Jahr**. Die zu dessen Erzeugung notwendige Strommenge ist im Szenario nicht abgebildet. Es wird offengelassen, zu welchen Anteilen grüner Wasserstoff (EE-H₂) direkt importiert wird (dafür ist eine Anpassung der Gasnetze oder der Neubau von Wasserstoffnetzen notwendig) oder in Baden-Württemberg erzeugt wird. Für letzteren Fall ist dann ein zusätzlicher EE-Ausbau im Land (v.a. Wind- und Sonnenenergie) als im Szenario dargestellt erforderlich oder es sind zusätzliche Stromimporte notwendig (Kap. 2.5).

WÄRMESEKTOR

Derzeit liegt der **EE-Anteil** an der für **Wärmezwecke** eingesetzten Endenergie bei lediglich 15,7 %. Durch die nahezu Verdopplung der EE-Wärmeerzeugung auf Basis von Biomasse,

Solarthermie, Umweltwärme (mit Hilfe von strombetriebenen Wärmepumpen) und Tiefengeothermie von heute 21,7 TWh pro Jahr (TWh/a) auf 40,6 TWh/a im Jahr 2040 bei gleichzeitiger Reduzierung des Wärmeverbrauchs erhöht sich dieser Anteil auf 71,6 %. Mit dem Einsatz von grünem Wasserstoff für Prozesswärme in der Industrie und in (Block-)Heizkraftwerken kann dann der gesamte Wärmeverbrauch klimaneutral gedeckt werden. Wird darüber hinaus eine möglichst weitgehende Nutzung nicht vermeidbarer industrieller Abwärme erreicht, lässt sich der Einsatz von EE-Anlagen zur Wärmebereitstellung entsprechend verringern (Kap. 4).

Derzeit dominiert die (feste) **Biomasse** die EE-Wärmeerzeugung. Das Szenario KLIMANEUTRAL 2040 geht von einer leichten Steigerung der Wärmebereitstellung aus Biomasse aus, die vor allem auf der größeren Nutzung der Holzenergie in zentralen Heiz(kraft)werken (HKW) beruht (Kap. 4.1).

Der Einsatz von **Wärmepumpen, Solarthermie und Tiefengeothermie** weisen größere Steigerungsraten auf. Die im Szenario KLIMANEUTRAL 2040 enthaltene Wärmeerzeugung aus Solarthermie wird bis 2040 fast verfünffacht im Vergleich zu 2020 (Kap. 4.2). Auch die für Einzelversorgung von Gebäuden geeignete Nutzung der Umweltwärme mithilfe von Wärmepumpen (WP) nimmt um den Faktor 4,5 zu (Kap. 4.3). Bei der Nutzung der Tiefengeothermie (bislang eine Pilotanlage) zeichnet sich mit konkreten Projektplanungen entlang des Oberrheins eine Erhöhung der Wärmeerzeugung auf 1 TWh/a bis spätestens 2030 und auf 3,7 TWh/a bis 2040 ab.

Voraussetzung für eine umfassende Dekarbonisierung des Wärmesektors durch die Nutzung von Solarthermie, Tiefengeothermie, großen Wärmepumpen, industrieller Abwärme und zunehmend auch Biomasse ist ein konsequenter, zeitlich und örtlich abgestimmter Ausbau und Verbund von Wärmenetzen und Wärmespeichern (z.B. im Rahmen der kommunalen Wärmeplanung) beziehungsweise deren Einsatz in bereits bestehenden Fernwärmenetzen.

VERKEHRSSSEKTOR

Neben dem Fokus auf Strom und Wärme beinhaltet das Szenario KLIMANEUTRAL 2040 auch Abschätzungen zur Transformation des Verkehrssektors. EE-Strom, Biokraftstoffe und strombasierte Kraftstoffe (grüner Wasserstoff und Folgeprodukte) werden die zentralen zukünftigen Energieträger sein (Kap. 5).

Inhaltsverzeichnis

1. Klimaschutzpolitik in Baden-Württemberg	1
1.1. Das neue Ziel: Klimaneutralität 2040	1
1.2. Verlauf bisheriger Emissions-Reduktionen	2
2. Grundlegende Eckpunkte der Studie	3
2.1. Höhere Energieeffizienz als Voraussetzung	3
2.2. Wachsender Strombedarf trotz effizienter Stromverwendung	4
2.3. Stromimporte bleiben bestehen	6
2.4. Fossile Energieerzeugung wird bis 2040 ersetzt	6
2.5. Einsatz von grünem Wasserstoff	7
3. Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung in BW	9
3.1. Photovoltaik	10
3.2. Windenergie	12
3.3. Stromerzeugung mit Biomasse	14
3.4. Stromerzeugung mit Tiefengeothermie	16
3.5. Wasserkraft	17
4. Ausbau der erneuerbaren Wärmeerzeugung in BW	18
4.1. Wärmeerzeugung mit Biomasse	21
4.2. Solarthermie	22
4.3. Wärmeerzeugung mit Umweltwärme	23
4.4. Wärmeerzeugung mit Tiefengeothermie	24
5. EE im Verkehrssektor: Strom und erneuerbare Kraftstoffe	25
Anhang	27
Literatur	29
Impressum	30

1. Klimaschutzpolitik in Baden-Württemberg

1.1. Das neue Ziel: Klimaneutralität 2040

Die neue grün-schwarze Landesregierung erhöhte mit dem Koalitionsvertrag im Frühjahr 2021 ihre Klimaschutzambitionen: Baden-Württemberg soll bis zum Jahr **2040 klimaneutral** werden. Die im Oktober 2021 beschlossene Novellierung des Klimaschutzgesetzes [KSG BW, 2021] konkretisiert dies mit einem Zwischenziel für 2030 von **mehr als 65 %** Reduktion von Treibhausgasen (THG) gegenüber 1990.

Um die Ziele dieser gesamtgesellschaftlichen Aufgabe mit großer Sicherheit zu erreichen, müssen in der Energieversorgung Baden-Württembergs im nächsten Jahrzehnt erhebliche Strukturveränderungen erfolgen, die hinsichtlich Intensität und Geschwindigkeit weit über die in der Vergangenheit erfolgten Veränderungen hinausgehen. Eine realistische Konkretisierung des erforderlichen Ausmaßes und der notwendigen Geschwindigkeit dieser Strukturveränderungen sowie insbesondere des notwendigen Beitrags der erneuerbaren Energien werden im Folgenden im Rahmen des **Szenarios KLIMANEUTRAL 2040** dargestellt.

Erste Eckdaten zeigen Tabelle 1 und Tabelle A-3 (Anhang). Im Mittelpunkt des **Szenarios** steht dabei der notwendige Ausbau der EE, er wird jedoch in eine Gesamtstrategie für den Umbau der gesamten Energieversorgung und ihrer Effizienzsteigerung eingebettet. Der Ausbau der EE in allen Nutzungsbereichen bis zum wichtigen **Zwischenziel 2030** auf einen Deckungsanteil an der gesamten Endenergie von **54 %** (2020: 19,5 %) führt zusammen mit einer Reduktion der Endenergienachfrage um rund **27 %** zu einer Minderung der THG-Emissionen um **66 % gegenüber 1990**. Wenn die bis 2030 angestoßenen Dynamik ein weiteres Jahrzehnt aufrechterhalten wird, kann in **2040** eine **vollständige Klimaneutralität** erreicht werden.

Tabelle 1: Wesentliche Eckdaten der Energieversorgung BW in 2019 und 2020 sowie im Szenario KLIMANEUTRAL 2040

	2019	2020	2025	2030	2035	2040
THG-Emissionen (Mio. t CO ₂ äq/a)	71,5	65,2	51,1	30,3	14,9	0
EE-Stromerzeugung in BW (TWh/a)	17,8	18,3	31,7	49,4	64,7	76,8
EE-Wärmemenge (TWh/a)	21,6	21,7	27,4	34,8	47,3	56,7
EE-Kraftstoffe (TWh/a)	4,2	5,3	5,9	9,7	19,9	30,9
Ges. Endenergieverbrauch (TWh/a)	294	283	241	206	191	178
Entwicklung THG-Emissionen ggü. 1990	-19,9 %	-26,8 %	-42,7 %	-66,0 %	-83,3 %	-100 %

Die notwendige Reduktion der THG von durchschnittlich -3,5 Mio. t CO₂äq je Jahr bis 2030 kann durch einen entsprechend beschleunigten Ausbau der EE-Stromerzeugung kombiniert mit einem auf das Jahr 2030 vorgezogenen Kohleausstieg erreicht werden. Im Stromsektor allein könnten dadurch die Emissionen gegenüber 1990 um -70 % reduziert werden bzw. von 2020 auf 2030 mit einer Reduktion um 53 % mehr als halbiert werden (Tab. A-3, Anhang).

Erforderlich dafür ist eine Steigerung der EE-Stromleistung von derzeit 10,4 GW auf rund 33 GW in 2030. Unterstützt wird diese Strategie durch eine Steigerung der EE-Wärmebereitstellung von 21,7 TWh/a (2020) auf 34,8 TWh/a und ein Anstieg von EE-Kraftstoffen (Biokraftstoffe und grüner Wasserstoff) von 5,3 TWh/a auf 9,7 TWh/a (Tab. 1).

1.2. Verlauf bisheriger Emissions-Reduktionen

Im Rückblick zeigen die wichtigsten Eckdaten der Energieversorgung BW, dass bis zum Jahr 2005 nur minimale Fortschritte beim Klimaschutz erreicht wurden. Die THG-Emissionen waren bis zu diesem Zeitpunkt nur um knapp 2 % gegenüber dem Bezugswert des Jahres 1990 gesunken, obwohl schon in den Jahren zuvor zahlreiche Untersuchungen zum Fortschreiten des Klimawandels erschienen waren; z.B. [Enquete-Kommission, 1994]. Erst im darauffolgenden Jahrzehnt schlugen sich erste substantielle energiepolitische Maßnahmen (u.a. EEG; Einstieg in den Emissionshandel) auch in der Emissionsbilanz von BW nieder. Auch die EE-Technologien erlebten einen ersten Wachstumsschub. Bis 2017 waren die THG-Emissionen um 11 % gegenüber 1990 gesunken, die THG-Reduktionsdynamik war jedoch im Zeitraum 1990 bis 2017 mit einer mittleren Reduktion von jährlich 0,37 Mio.t CO_{2äq} insgesamt viel zu gering.

Ab 2017 hat sich der jährliche Rückgang der THG-Emissionen in BW erheblich beschleunigt. Sie sind bis 2020 gegenüber 1990 um 26,8 % gesunken (Tab. 1). Ohne die zusätzliche Emissionsreduktion der Corona-Pandemie (rund 3 Mio. t CO_{2äq}/a hauptsächlich im Verkehr) wäre eine **Minderung um 23,5 %** erreicht worden [Stat. Landesamt, 2021]. Die jährliche THG-Minderung hat sich zwischen 2017 und 2020 (ohne die Zusatzeffekte der Corona-Pandemie) mit 3,67 Mio. t CO_{2äq}/a erheblich verstärkt. Hauptgrund war der starke Rückgang der Kohlestromerzeugung infolge stark gestiegener CO₂-Zertifikatspreise bei gleichzeitig günstigen Gaspreisen. Dies zeigt schlaglichtartig, wie wichtig ein rechtzeitiger Ausstieg aus der Kohlestromerzeugung für die Verwirklichung von THG-Minderungszielen ist. Im Jahr 2021 zeichnet sich jedoch wieder ein erheblicher Anstieg der deutschen Stromerzeugung ab [AG Energiebilanzen, 2021].

Die Sektoren **Verkehr** und **Stromerzeugung/Fernwärme** verursachen derzeit mit **29 % bzw. 21 %** die meisten THG-Emissionen, gefolgt von den **Privaten Haushalten** mit **19 %**, der **Industrie** mit **13 %** sowie **Gewerbe/Handel/Dienstleistung (GHD)** mit **9 %** (alle Sektoren nur Brennstoffeinsatz; s. Tab. A-4, Anhang). In der Industrie verursacht nicht nur der Verbrauch von Brennstoffen Emissionen, zu etwa einem Drittel stammen die Emissionen aus Prozessen (in BW insbesondere Zementherstellung). Reduktionen müssen auch am Industriestandort Baden-Württemberg durch Einsparungen und Veränderungen, nicht durch Produktionsverlagerungen erreicht werden.

2. Grundlegende Eckpunkte der Studie

Die hier vorliegende Studie ist eine Aktualisierung der Szenarien, die im Jahr 2020 im Auftrag der Plattform Erneuerbare Energien Baden-Württemberg hinsichtlich der Umgestaltung der Energieversorgung in Baden-Württemberg ermittelt wurden [Plattform, 2020]. Die damaligen Szenarien sowie das aktuelle Szenario KLIMANEUTRAL 2040 basieren auf der Studie „Energie- und Klimaschutzziele 2030“ [IEKK, 2017], die im Rahmen der Fortschreibung des Integrierten Energie- und Klimaschutzkonzeptes erstellt wurde.

Der Vergleich mit dem von der Plattform EE BW im Mai 2020 empfohlenen Szenario BW PLUS [Plattform, 2020] zeigt, dass das im Entwurf des Klimaschutzgesetzes 2021 vorgesehene Ziel der Klimaneutralität bis 2040 insbesondere eine erhebliche Steigerung des jährlichen Zubaus der EE-Stromerzeugung verlangt. Statt der seinerzeit vorgeschlagenen 33 GW in 2040 werden zur Erfüllung des verschärften Ziels jetzt knapp 53 GW EE-Leistung im Stromsektor in BW erforderlich.

Das Szenario KLIMANEUTRAL 2040 umfasst keine Modellierung der zeitlichen Verläufe von Energieerzeugung und -verbrauch über das Jahr oder den Tag, Leistungsspitzen sind also nicht dargestellt. Es beruht auf der Annahme eines starken Stromnetzverbundes mit anderen Bundesländern und Nachbarstaaten sowie einem Zuwachs der Speichermöglichkeiten. Zu diesen beiden Aspekten können hier jedoch keine detaillierten Aussagen getroffen werden.

2.1. Höhere Energieeffizienz als Voraussetzung

Diese Studie konzentriert sich auf den Ausbau der erneuerbaren Energien in BW. Es ist aber klar, dass die **Steigerung der Effizienz** der Energienutzung in allen Verbrauchssektoren von ebenso großer Bedeutung für eine rechtzeitige Reduktion der THG-Emissionen ist. Nur mit einer parallelen und ausgewogenen Reduktion des Energieverbrauchs können die Anteile von EE rasch genug wachsen, um die notwendige THG-Reduktion rechtzeitig zu erreichen. Dazu bedarf es auch einer begleitenden gesellschaftlichen Diskussion zur Bedeutung der Suffizienz, auch hinsichtlich der Definition von Lebensqualität, nachhaltiger Entwicklung, Kreislaufwirtschaft und Landnutzung. Bei erfolgreicher Effizienzsteigerung kann der EE-Ausbau begrenzt werden, was den Ressourcenbedarf verringert und die Errichtung von EE-Anlagen erleichtert.

Die Anforderungen an eine rasche Ausschöpfung aller Effizienzpotenziale wachsen in allen Verbrauchssektoren erheblich. Im Szenario KLIMANEUTRAL 2040 wird der Endenergieverbrauch bis **2030 um rund 27 %** reduziert. Im Vergleich zum Jahrzehnt 2010-2020 – in dem sich der mittlere Endenergieverbrauch nur um rund 4 % reduziert hatte – muss die jährliche Reduktionsrate des gesamten Energieverbrauchs also **um mindestens das 6-fache** beschleunigt werden. Differenziert nach Sektoren schlägt das Szenario eine Schwankungsbreite der Verbrauchsreduktion zwischen -20 % bis -21 % (GHD bzw. Industrie) und -31 % bis -33 % (Private Haushalte bzw. Verkehr) vor.

Der Brennstoffeinsatz für Wärmezwecke (Endenergie für Heizwärme, industrielle Prozesswärme, Warmwasser) und der Kraftstoffverbrauch besitzen erhebliche Reduktionspotentiale.

Sie ermöglichen eine deutliche Überkompensation des wachsenden Strombedarfs (siehe Kap. 2.2). Im Szenario KLIMANEUTRAL 2040 sinkt die Nachfrage nach Brennstoffen und Kraftstoffen (ohne Stromeinsatz im Verkehr) in ähnlichem Umfang **bis 2030 um rund 40 %** und **bis 2040 um knapp 60 %** (Bild 1). Der gesamte Endenergiebedarf sinkt dagegen bis 2030 „nur“ um 27 % und bis 2040 um 37 %.

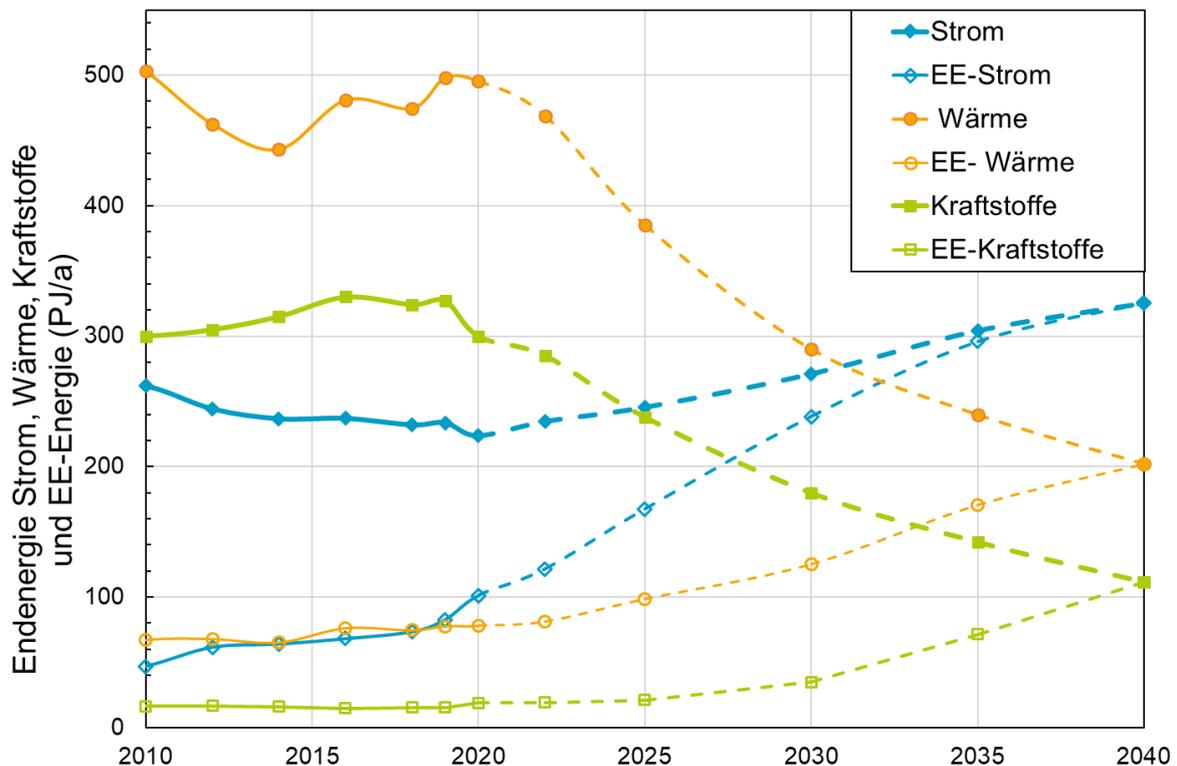


Bild 1: Entwicklung des Endenergieverbrauchs der Segmente Strom, Wärme und Verkehr und die entsprechenden Beiträge der EE (ohne Zuordnung des Stromeinsatzes zu Wärme und zu Verkehr) im Szenario KLIMANEUTRAL 2040.

Die Potenziale einer weiteren Effizienzsteigerung liegen insbesondere in der Senkung des Raumwärmebedarfs durch Sanierung des Altbaubestands, den Ausbau von Wärmenetzen, in denen erneuerbare Energien und industrielle Abwärme kombiniert werden, und der Ausweitung von KWK. In der Industrie geht es um die weitere Optimierung industrieller Fertigungsprozesse und die umfassende Nutzung industrieller Prozessabwärme. Die weiteren energetischen Verbesserungspotenziale im Verkehr liegen in der Umstrukturierung des motorisierten Individualverkehrs zugunsten des Ausbaus des öffentlichen Verkehrs in der Fläche und im Ausbau des Bahnverkehrs (insbesondere Güterverkehr). Auch beim Einsatz von Strom in seinen herkömmlichen Nutzungsbereichen (Kraft, Beleuchtung; Kommunikation und Information) können noch weitere Einsparpotenziale mobilisiert werden.

2.2. Wachsender Strombedarf trotz effizienter Stromverwendung

Im **Stromsektor** ist mit einem wachsenden Verbrauch zu rechnen, da substantielle Strommengen im Wärmesektor und im Verkehrssektor zur Verdrängung fossiler Energien benötigt

werden (Sektorkopplung). Im Szenario KLIMANEUTRAL 2040 wird angenommen, dass die Stromnachfrage (Endenergie¹) **bis 2030 um ca. 21 %** (bzw. von 62 auf 75 TWh/a) gegenüber 2020 anwachsen wird und **bis 2040 auf 90 TWh/a**, also **um 46 %** gegenüber 2020 (Bild 1). Der wichtigste „ursprüngliche“ Einsatzbereich bleibt nach wie vor das Segment „Kraft/Licht/Information“. Dort wird – auch bei zunehmender Digitalisierung – wegen der Annahme weiter steigender Effizienz nur noch von einer sehr geringen Verbrauchszunahme ausgegangen (Bild 2). Die Ursache für die deutliche Zunahme ist der wachsende Einsatz von Strom für Wärmezwecke und für den Verkehr. Längerfristig kommt noch die EE-Wasserstoffherzeugung hinzu, die im Szenario KLIMANEUTRAL 2040 nicht enthalten ist (vgl. Kap. 2.5). Diese Zunahme ist der Grund, warum EE-Anlagen zur Stromerzeugung wesentlich größere Zuwachsraten haben müssen als im Wärme- und Verkehrssektor, wenn sie baldmöglichst substantielle Anteile des Verbrauchs decken sollen. So wird im Jahrzehnt bis 2030 bei EE-Strom ein jährlicher Zuwachs von **3,8 TWh/a** erforderlich, das ist mehr als das **3,5-fache der Zuwachsrates** zwischen 2000 und 2020. Damit erreicht die EE-Stromerzeugung einschließlich des EE-Imports Anteile am Bruttostromverbrauch von 62 % in 2025 und von 82 % in 2030 (2020: 41 %).

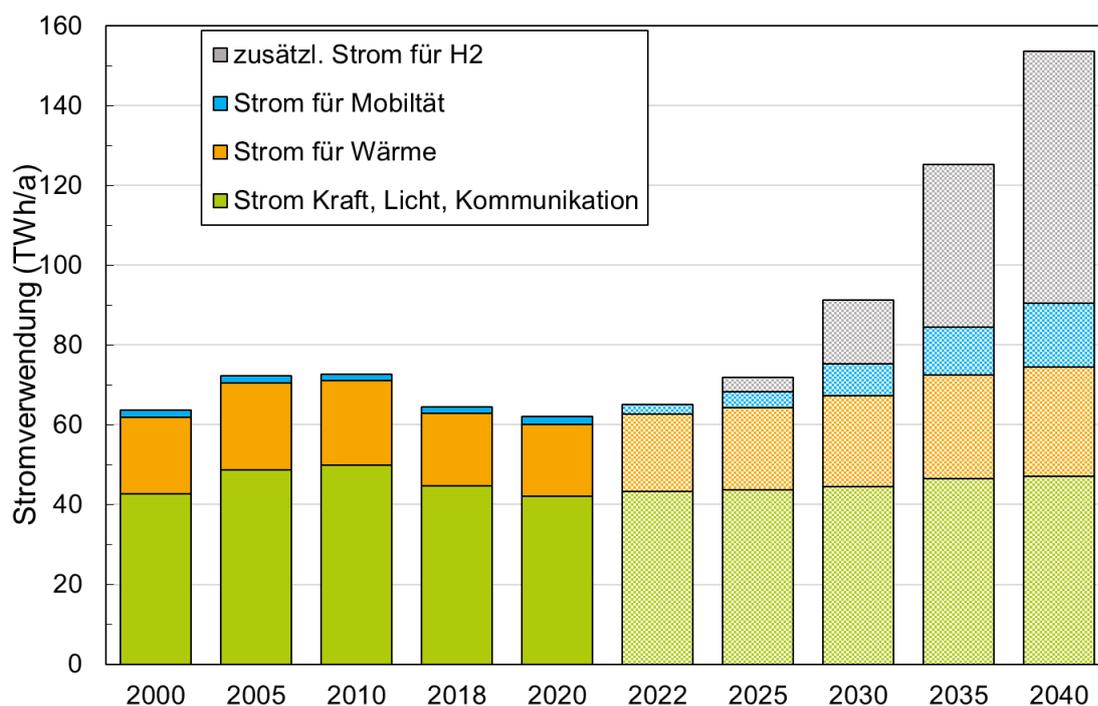


Bild 2: Entwicklung des Stromeinsatzes (Endenergie) für die Einsatzzwecke Kraft, Licht, Kommunikation; Wärme (inkl. Prozesswärme) und Mobilität in BW bis 2020 und im Szenario KLIMANEUTRAL 2040 sowie Zusatzbedarf für die Bereitstellung von EE-Wasserstoff (unabhängig davon, wo dieser produziert wird, vgl. Kap. 2.5).

¹ Der Bruttostromverbrauch beinhaltet dagegen auch Netzverluste und den (sinkenden) Kraftwerkseigenverbrauch. Er betrug 2020 69 TWh, im Szenario steigt er bis 2040 auf 92 TWh.

2.3. Stromimporte bleiben bestehen

Baden-Württemberg ist nicht nur generell ein Energie- sondern traditionell auch ein Stromimportland. Dies liegt unter anderem an der hohen Industriedichte – speziell von mittelständischen Unternehmen. Im Vergleich zu anderen Bundesländern ist auch eine relativ hohe Anzahl an Atom- und Kohlekraftwerken bereits vom Netz gegangen oder wird bis Ende 2022 abgeschaltet. Im letzten Jahrzehnt schwankte das Stromimportsaldo zwischen 11 TWh/a (2018) und 18 TWh/a (2012). In 2019 betrug es 14,9 TWh/a; in 2020 ist es erheblich auf 24,7 TWh/a gestiegen.

Im Szenario wird davon ausgegangen, dass das Stromimportsaldo in ähnlicher Bandbreite bestehen bleibt. In 2030 beträgt es im Szenario 23,2 TWh/a, bis 2040 sinkt es wieder auf 15,2 TWh/a. Dabei ist die zusätzliche Bereitstellung von EE-H₂ noch nicht berücksichtigt (s. Kap. 2.5). Die EE-Erzeugung in BW im Szenario KLIMANEUTRAL 2040 deckt damit in 2040 einen Anteil von 84 % des gesamten Bruttostromverbrauchs des Landes, die restlichen 16 % werden als EE-Strom importiert.

Generell wird der Stromaustausch wegen des wachsenden EE-Anteils volatiler. Eine weitere Ertüchtigung und Optimierung der Stromnetze innerhalb Deutschlands und Europas, insbesondere mit den Nachbarländern ist daher in jedem Fall notwendig und zweckmäßig. Auch die Speicherung von Strom, Wärme und grünem Wasserstoff sowie die stärkere Einbindung von Strom(groß)verbrauchern zum Lastausgleich wird an Bedeutung gewinnen. Das Szenario KLIMANEUTRAL 2040 geht von einem Anstieg der Speicherkapazität von derzeit 1.870 MW (Pumpspeicher) auf 2.500 MW im Jahr 2040 aus, der vor allem durch den stärkeren Einsatz von Batteriespeichern getragen wird.

2.4. Fossile Energieerzeugung wird bis 2040 ersetzt

Neben dem beschleunigten Ausbau der EE-Stromerzeugung ist zu einer deutlichen THG-Reduzierung auch der rasche Umbau des derzeitigen Kraftwerksparks für die Strom- und Wärmebereitstellung erforderlich. Konventionelle Kraftwerke dienen zukünftig in wachsendem Ausmaß zur optimalen Unterstützung des fluktuierenden Stromangebots aus Wind- und Photovoltaikanlagen. Die im Szenario KLIMASCHUTZ 2040 getroffenen Annahmen zu notwendigen Veränderungen in der Kraftwerksstruktur berücksichtigen dies; sie sind in **Tabelle 2** dargestellt.

Derzeit werden in BW noch ca. 4.500 MW Kohlekraftwerke betrieben, der größere Teil davon in KWK. Für einen rechtzeitig wirksamen Klimaschutz ist ein Kohleausstieg bis 2030 erforderlich. Um jederzeit eine sichere Strom- und Wärmeversorgung zu gewährleisten sind bis zu diesem Zeitpunkt der Zubau von mindestens **1.600 MW Gasleistung** (bzw. Umbau von Kohleleistung) auf dann insgesamt 3.600 MW gasbasierte Leistung sowie der dafür notwendige Gasnetzausbau sicherzustellen.

Tabelle 2: Veränderung der Kraftwerksstruktur im Szenario KLIMNEUTRAL 2040

	2016	2018	2019	2020	2025	2030	2035	2040
Installierte Leistung (MW)								
Gaskraftwerke (+ Öl)	2.000	2.000	2.000	2.000	3.180	3.000	2.000	0
- davon KOND*)	840	800	800	800	1.800	1.500	800	0
- davon KWK	1.160	1.200	1.200	1.200	1.380	1.500	1.200	0
zusätzlich Ersatz von Erdgas durch EE-H ₂ (KWK)					120	600	1.600	3.600
Ges. gasbasierte Leistung (Erdgas + EE-H₂)	2.000	2.000	2.000	2.000	3.300	3.600	3.600	3.600
Kohlekraftwerke; Sonst.	5.030	5.030	4.750	4.500	3.125	0		
- davon KOND*)	3.120	3.120	3.000	3.000	1.625	0		
- davon KWK	1.910	1.910	1.750	1.500	1.500	0		
Fossil gesamt	7.030	7.030	6.750	6.500	6.305	3.000	2.000	0
- davon KOND*)	3.960	3.920	3.800	3.800	3.425	1.500	800	0
- davon KWK	3.070	3.110	2.950	2.700	2.880	1.500	1.200	0
Kernenergie	2.710	2.710	1.310	1.310	0			
Erneuerbare Energien	8.062	9.126	9.663	10.355	20.388	33.046	43.616	52.327
Ges. Leistung in BW	19.672	20.736	19.593	20.035	28.683	38.546	49.166	57.927
Bruttostromverbr. (TWh/a)	74,3	73,1	72,1	69,0	75,0	81,0	88,5	92,0
Stromimportsaldo (TWh/a)	11,6	10,5	14,9	24,7	24,8	23,2	19,9	15,2
- davon EE-Strom (TWh/a)**)	3,2	3,4	5,2	9,9	14,9	16,7	17,5	15,2

*) KOND: Kondensationskraftwerke

***) entsprechend EE-Mix Deutschland

Eine Konsequenz daraus ist, dass die stark kohlebasierte Fernwärmeversorgung in der Region Stuttgart, Heilbronn, Mannheim und Karlsruhe zeitgleich beziehungsweise in Kooperation auf erneuerbare Energien (EE-Strom, Tiefengeothermie, Solarthermie, Bioenergie) oder gasgefeuerte HKW und Blockheizkraftwerke (BHKW) umgestellt werden muss. Zudem sollte die industrielle Abwärme in erheblichem Maße miteinbezogen werden. Der vermehrte Einsatz von Erdgas ist, auch vor dem Hintergrund der Methanverluste bei Gewinnung und Transport, als eine zeitlich eng begrenzte Übergangsstrategie hin zu EE einschließlich EE-H₂ und Biomethan zu sehen. Der angenommene Übergang von Erdgas zu EE-H₂, der bis 2040 abgeschlossen sein muss, kann ebenfalls Tabelle 2 entnommen werden.

2.5. Einsatz von grünem Wasserstoff

EE-Strom und thermische EE-Technologien können nicht alle Endenergienutzer direkt bedienen. Wird jedoch EE-Strom in Wasserstoff überführt, steht als ideale Ergänzung ein speicherbarer chemischer Energieträger zur Verfügung, mit dem alle Energiebedürfnisse befriedigt werden können. Mittels moderner Elektrolyseure steht dafür eine bewährte Wandlungstechnologie zur Verfügung, die bei einer starken Marktausweitung noch über beträchtliche Kostensenkungspotenziale verfügt, siehe z.B. [Berger, 2020]; [Nitsch, 2003].

Der kurze Zeitraum bis zur erforderlichen Klimaneutralität in 2040 erfordert die Einführung von EE-H₂ derart, dass ab 2030 seine breite Nutzung gewährleistet ist (s. Bild 2, oben). Diese Nutzung beginnt bereits um das Jahr 2025 in frühen Einsatzfeldern in der Industrie und im Verkehr. Für die oben genannten Einsatzzwecke werden im Szenario im Jahr 2030 rund **11 TWh/a EE-H₂** benötigt. Um bis 2040 eine vollständige CO₂-Nullemission zu erreichen, sind im Szenario jedoch rund **47 TWh/a EE-H₂** erforderlich. Eine mögliche Verteilung auf die Nutzungssektoren ist im Szenario mit 9 TWh/a für Prozesswärme, 26 TWh/a als Kraftstoff und 12 TWh/a für die Rückverstromung mittels KWK-Anlagen dargestellt (Tab. 3). Dieser Einsatz führt zu einer zusätzlichen jährlichen CO₂-Minderung von 9,5 Mio. t CO₂/a in 2030 und zu 40 Mio. t CO₂/a in 2040. Um den Bedarf an grünem Wasserstoff im Land genauer abschätzen zu können sind weitere Studien erforderlich.

Zur Bereitstellung dieser Mengen an Wasserstoff (unabhängig vom Ort der Produktion) ist eine **zusätzliche EE-Strommenge erforderlich**: Mit 16 TWh/a in 2030 ist der Strombedarf noch relativ gering, bis 2040 nimmt er jedoch mit dann rund 63 TWh/a ein erhebliches Ausmaß an. Dieser zusätzliche Strombedarf (grauer Balken in Bild 2) ist im EE-Ausbau des Szenarios KLIMANEUTRAL 2040, wie er in Kapitel 3 dargestellt wird, explizit nicht enthalten.

Im Szenario wird damit offengelassen, wann und zu welchen Teilen Strom für die Wasserstoffherstellung und/oder Wasserstoff direkt importiert wird. Dazu wird auf umfangreiche aktuelle Untersuchungen verwiesen, z.B. [DLR, 2020]. Wird beispielsweise von Offshore-Windenergieanlagen ausgegangen, so werden bei 4.000 Volllaststunden pro Jahr für die Wasserstoffherzeugung in 2030 ca. 4 GW und in 2040 rund 16 GW benötigt. Voraussetzung für den direkten Import von Wasserstoff ist der rasche Aufbau einer entsprechenden Netzinfrastruktur bis nach Süddeutschland. Die Importabhängigkeit von Energie (derzeit Import Öl und Erdgas mit rund 70 %) wird trotz Strom- oder Wasserstoffimport wesentlich geringer und wird bei einer hundertprozentigen Versorgung mit EE bei maximal 20-30 % der gesamten eingesetzten Energie liegen (ohne Betrachtung einzelner Leistungsspitzen).

Im Szenario KLIMANEUTRAL 2040 wird grüner Wasserstoff neben dem Verkehrssektor vor allem in zwei Bereichen eingesetzt: Zum einen die Bereitstellung von industrieller Prozesswärme, zum anderen der Ersatz von Erdgas in (Block-)Heizkraftwerken bis 2040, also die notwendige Dekarbonisierung der KWK. Dort kann EE-H₂ mit hohem Nutzungsgrad Strom und Nutzwärme bereitstellen. KWK ist ein wichtiges Element zur Bereitstellung abrufbarer, flexibler Leistung bei wachsendem Anteil von fluktuierendem EE-Strom. Bereits in 2030 werden mittels Wasserstoff-KWK 3,3 TWh/a Nutzwärme und 1,7 TWh/a KWK-Strom bereitgestellt. Bis 2040 wächst dieser Beitrag auf 7,1 TWh/a Nutzwärme und 4 TWh/a KWK-Strom.

Tabelle 3: Bedarf an EE-H₂, Einsatzarten und benötigter Stromeinsatz (letzterer nicht gedeckt durch EE-Stromerzeugung in BW nach Szenario KLIMANEUTRAL 2040)

	2025	2030	2035	2040
Wasserstoff gesamt (GWh/a)	2.550	11.535	29.810	46.780
Industrielle Prozesswärme	500	1.600	5.830	8.930
Brennstoff KWK	1.550	5.435	9.080	11.850
Kraftstoff	500	4.500	14.900	26.000

Stromeinsatz für H ₂ (GWh/a)	3.600	16.000	40.800	63.200
Elektrolysewirkungsgrad (%)	71	72	73	74

3. Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung in BW

Im Szenario KLIMANEUTRAL 2040 steigt die gesamte EE-Leistung im Stromsektor von 10,4 GW (2020) auf **33,2 GW** in 2030 und auf **52,5 GW** in 2040. Damit lassen sich im Jahr 2030 bereits rund 60 % des Bruttostromverbrauchs BW erneuerbar decken, einschließlich EE-Stromimport² sind es rund 80 %. Die EE-Erzeugung in BW erreicht in 2040 einen Anteil von 84 %, die restlichen 16 % werden importiert.

Das vorgesehene Ziel der Klimaneutralität bis 2040 verlangt also eine erhebliche Steigerung des jährlichen Zubaus der EE-Stromerzeugung, um bezüglich der gesamten installierten EE-Leistung eine Verdreifachung bis 2030 und eine Verfünffachung bis 2040 zu erreichen (Tab. 4). Windenergie und Photovoltaik werden den größten Teil des Zubaus ausmachen, doch auch bei Wasserkraft, Tiefengeothermie und Biomasse sind noch geringe Steigerungen möglich.

Tabelle 4: Entwicklung der EE-Stromleistung und der EE-Stromerzeugung von 2016 bis 2020 und im Szenario KLIMANEUTRAL 2040 in BW

	Bisherige Entwicklung				KLIMANEUTRAL 2040			
	2016	2018	2019	2020	2025	2030	2035	2040
EE-Leistung, gesamt (MW)	8.062	9.126	9.663	10.355	20.498	33.161	43.777	52.518
- davon Windenergie	1.032	1.533	1.550	1.587	3.666	6.872	9.767	11.494
- davon Photovoltaik	5.340	5.845	6.320	6.934	14.815	24.170	31.764	38.662
- davon Wasserkraft	881	885	887	888	900	930	960	1.000
- davon Geothermie	0,3	0,3	0,3	0,3	8,0	60	90	120
- davon Biomasse, fest	200	200	201	203	340	340	378	406
- davon Biogas, Klär-, Deponie- gas; Abfälle	609	663	705	743	770	789	818	835
EE-Stromerzeugung (TWh/a)	15,7	17,1	17,8	18,3	31,2	47,8	61,8	72,9
Anteil an gesamtem Bruttostromverbrauch (%)	21,2	23,4	24,7	26,4	42,3	61,0	73,1	83,5

Zwischen 2010 und 2020 lag die durchschnittliche jährliche (Netto-Zubaurate aller EE-Anlagen bei rund **550 MW/a** (davon Wind: 121 MW/a und PV: 395 MW/a, Übrige: 44 MW/a). Für eine Umsetzung des Szenarios KLIMANEUTRAL 2040 sind dagegen im Zeitraum 2020 bis 2030 durchschnittliche jährliche (Netto-)Zubauraten von mindestens **2.280 MW/a** für die Summe aller EE-Anlagen zur Stromerzeugung erforderlich. Dies entspricht dem **vierfachen** des derzeitigen jährlichen Zubaus.

Die fortlaufende technische Weiterentwicklung im Bereich der Sonnen- und Windenergie trägt dazu bei, die resultierenden Anforderungen zu erfüllen. So wurde z.B. die Leistung eines Standard-Solarmoduls von 120 Watt im Jahre 2005 auf heute über 350 Watt gesteigert, und weitere Steigerungen sind in den nächsten Jahren zu erwarten. Ähnliches gilt für Windenergieanlagen,

² Der EE- Anteil des Stromimportsaldos von BW wird mittels des EE-Anteils der deutschen Stromerzeugung aus dem Gesamtimport von Strom gebildet.

so wird bei den für BW wichtigen Schwachwindanlagen die Stromerzeugung an einem mittleren Standort in Baden-Württemberg von jährlich 4 GWh im Jahr 2011 auf über 10 GWh bei neuen Anlagen im Jahr 2021 steigen. Weitere Fortschritte sind auch im kommenden Jahrzehnt zu erwarten.

Politische Handlungsansätze zur Stromwende

Bundesebene

- EEG: EE-Ausbauziele/ -mengen erhöhen.
- Praxisgerechte Ausgestaltung von Ausschreibungen und des Genehmigungs- und Planungsrechtes (u.a. Bundesimmissionsschutzgesetz) für EE-Anlagen (Details siehe Folgekapitel).
- Vereinfachung der gemeinsamen Stromnutzung (Mieterstrom, energy communities)
- Beschleunigter Aufbau von Wasserstoffnetzen und Elektrolysekapazitäten.
- Über das Jahr 2026 hinausgehende Bereitstellung von Fördermechanismen zum Bau von gasgefeuerten Erzeugungsanlagen (nur KWK) und zur späteren Umstellung auf grüne Gase (derzeit über KWKG) sowie vereinfachte Genehmigungsverfahren.

Landesebene

- Genehmigungsverfahren beschleunigen: Definition und Einhaltung fester Fristen, Digitalisierung, mehr Gewicht für Klimaschutz in Abwägungen.
- Ausbau von Wind- und Solarparks und Verteilnetz harmonisieren.
- Anreize für Hybridkraftwerke (Sonne/Wind, Sonne/Bioenergie) schaffen.

Kommunen und Landkreise

- Lokale Klimaschutzverwaltung festigen, u.a. durch Schaffung neuer Personalstellen, die die Interessen und Belange des Klimaschutzes z.B. in den Bauleitplanungen vertritt.
- Ausreichend Flächen für den EE-Ausbau bereitstellen (2 Prozentziel).

3.1. Photovoltaik

Die Photovoltaik soll im Szenario KLIMANEUTRAL 2040 im Jahr 2040 eine Strommenge von mindestens **37 TWh/a** bereitstellen, die dann einem Anteil am Bruttostromverbrauch BW von 40 % entspricht. Dafür ist bereits um 2025 ein mittlerer jährlicher Zubau von **1.800 MW/a** erforderlich³. Dies stellt eine Verdreifachung der Ausbaurrate von 614 MW im Jahr 2020 dar. Zwischen 2030 und 2040 nähert sich der jährliche (Brutto-)Zuwachs etwa 2.100 MW/a an. Damit steigt die installierte Kapazität auf den Zielwert von rund 39.000 MW im Jahr 2040.

³ Vergleichsweise wird in [Agora 2021] für ganz Deutschland eine jährliche Zubaurate der Photovoltaik von 10 GW/a für notwendig gehalten, wenn die sich bis 2030 abzeichnende „Ökostromlücke“ zum Ziel einer 65 %-igen EE-Versorgung geschlossen werden soll.

Die PV-Zubauraten in den letzten 20 Jahren weisen Schwankungen auf, mit einem starken Einbruch um 2015/16 (**Bild 3**). Ende 2020 waren insgesamt 6.934 MW installiert, die rund 6,4 TWh/a Strom erzeugten. Die mittlere Zuwachsrate zwischen 2010 und 2020 lag bei 390 MW/a, wobei in den Jahren 2010 und 2011 mit 1.100 MW/a und 850 MW/a Spitzenwerte erreicht wurden (Bild 3).

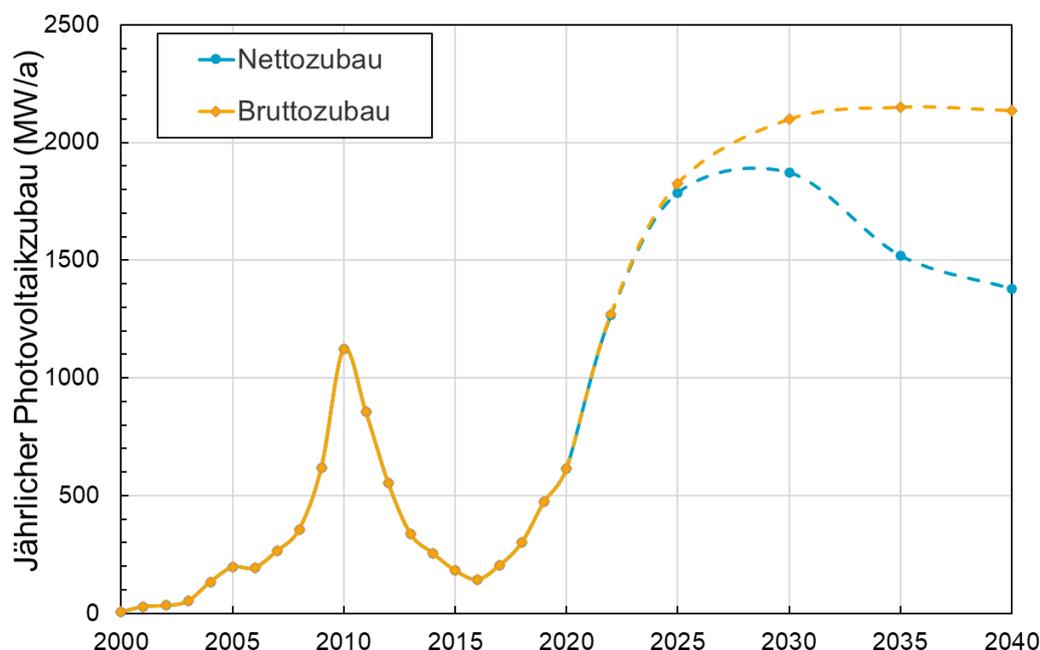


Bild 3: Jährlicher Netto- und Bruttozubau von Photovoltaikanlagen in BW seit 2000 und im Szenario KLIMNEUTRAL 2040 (mittlere Nutzungsdauer der Anlagen: 22 Jahre)

Der Flächenbedarf für die Photovoltaik beläuft sich gegenwärtig bei einer Erzeugung von 6.934 GWh/a auf rund 39 km² – etwa 0,8 % der gesamten bebauten Siedlungs- und Verkehrsfläche von 5.260 km² (die gesamte Landesfläche beträgt 35.751 km²). Im Szenario KLIMANEUTRAL 2040 wird in 2030 eine Modulfläche von 135 km² und **in 2040 von 215 km²** benötigt. Der letztere Wert entspricht rund 4 % der Siedlungs- und Verkehrsfläche von BW. Die technologische Effizienzsteigerung wird dabei mit einem Anstieg der flächenspezifischen Ausbeute von 163 kWh/m²a in 2020 auf 172 kWh/m²a in 2040 angenommen.

Der Energieatlas Baden-Württemberg gibt als reines „Dachflächenpotenzial“ eine Stromerzeugung von rund 36.000 GWh/a an, was einer erforderlichen Modulfläche von rund 200 km² entspricht. Bei der Ausbaudynamik des obigen Szenarios könnten die in 2030 erforderlichen Flächen also vollständig und in 2040 immer noch größtenteils innerhalb der Siedlungsstruktur (Dachflächen, Fassaden, Parkplätze, Haltestellen, Verkehrswege u. ä.) untergebracht werden.

Da dies aus unterschiedlichen Gründen (Wirtschaftlichkeit, Netzanschluss, kein direkter Einfluss auf Privateigentümer) unrealistisch ist, ist auch die weitere Entwicklung von Freiflächenanlagen relevant. Bundesweit wird aktuell etwa ein Viertel der PV-Anlagen im Freiland installiert. Für den schnellen PV-Ausbau wird dieser Anteil auf ein Drittel bis zur Hälfte anwachsen. In BW wird derzeit lediglich rund 8 % des PV-Stroms in Freiflächenanlagen erzeugt. Dies sind

derzeit meist Flächen wie Seitenrandstreifen von Autobahnen oder Schienenwegen, sowie minderwertige Konversionsflächen, in geringfügigem Maße auch Acker- oder Grünlandflächen. Eine Ausweitung des Zubaus stellt keine überbordenden Eingriffe dar, PV-Freiflächenanlagen fördern vielmehr die Biodiversität. Für eine PV-Leistung von 1 MW wird aktuell etwa ein Hektar (ha) an Fläche benötigt. Zukünftig wird sich wegen der stetigen Weiterentwicklung der Photovoltaik der Flächenbedarf noch verringern. Damit kann auch die intelligente Kombination von Landwirtschaft und Photovoltaik (Agri-PV) einen Anteil an der Freiflächennutzung von Photovoltaik darstellen.

Politische Handlungsansätze Photovoltaik

Bundesebene

- PV-Ausbauziele/ -mengen vervielfachen entsprechend Klimaschutzziele: 15-20 GW/a.
- Degressionsmechanismus des EEG stoppen und flexibilisieren.
- Abschaffung der Ausschreibung für Dachanlagen < 1 MW.

Auf Landesebene

- Erhöhung des Ausbaukorridors von Freiflächenanlagen nach EEG in benachteiligten Gebieten auf 500 MW/a.
- Vereinfachung von Planungsverfahren: standardisierte Alternativenprüfung und vereinfachter Bauantrag.
- Unterstützung von Projekten der integrative PV: Agri-PV, Floating PV, gebäudeintegrierte PV.
- Schnelle Umsetzung von Pilotvorhaben für bestehende Parkplätze in öffentlicher Hand; Förderprogramm und Anreize für Parkplatz-PV im Bestand.
- Kampagne für große Dachanlagen im Bestand (günstig, schnell, netzverträglich).
- Starten einer Kommunikationsoffensive zum PV-Ausbau, der über die PV-Pflicht hinausgeht.

3.2. Windenergie

Das Szenario KLIMANEUTRAL 2040 zielt auf eine installierte Gesamtleistung von 11.500 MW mit 2.000 bis 2.400 Windenergieanlagen im Jahr 2040. Damit läge man bei Deckungsbeiträgen der heimischen Windenergie am gesamten Bruttostromverbrauch von BW von rund 27 % (2020: 4 %). Wird ein Teil des benötigten Wasserstoffs (Kap. 2.5) in BW erzeugt, muss dieser Ausbau größer ausfallen.

Ende 2020 betrug die installierte Windleistung in BW 1.587 MW. 738 Anlagen mit einer mittleren Größe von 2,15 MW produzierten in diesem Jahr rund 3 TWh/a Strom mit einer mittleren Auslastung der Volllast von knapp 1.900 h/a. Weitere technische Fortschritte bezüglich der

Volllaststunden (auf über 2.300), der Leistung pro neuer Anlage (6-7 MW) und damit der mittleren Leistung aller installierten Anlagen sind abzusehen.

Der gegenwärtige Windenergieausbau ist in BW mit 18 MW im Jahr 2019 und 37 MW 2020 auf ein Minimum geschrumpft. In den Jahren 2016 und 2017 betrug der Zuwachs dagegen noch 335 bzw. 388 MW/a. Unterstellt man eine rasche Auflösung der jetzigen Zubaublockade, kann ab 2023 wieder an diese Werte angeknüpft werden. Dies setzt das Szenario KLIMA-NEUTRAL 2040 voraus, damit in 2025 und 2030 jährliche **Bruttozubauren von 700 bzw. 850 MW/a** erreicht werden können (Bild 4). Dagegen spricht aus Sicht der Flächenverfügbarkeit, des Naturschutzes und der möglichen Genehmigungsgeschwindigkeiten grundsätzlich nichts, wie die Zuwachsraten der Jahre 2016 (335 MW/a) und 2017 (388 MW/a) zeigen. In einem großen Flächenland wie BW wäre sogar erheblich mehr Ausbau möglich.

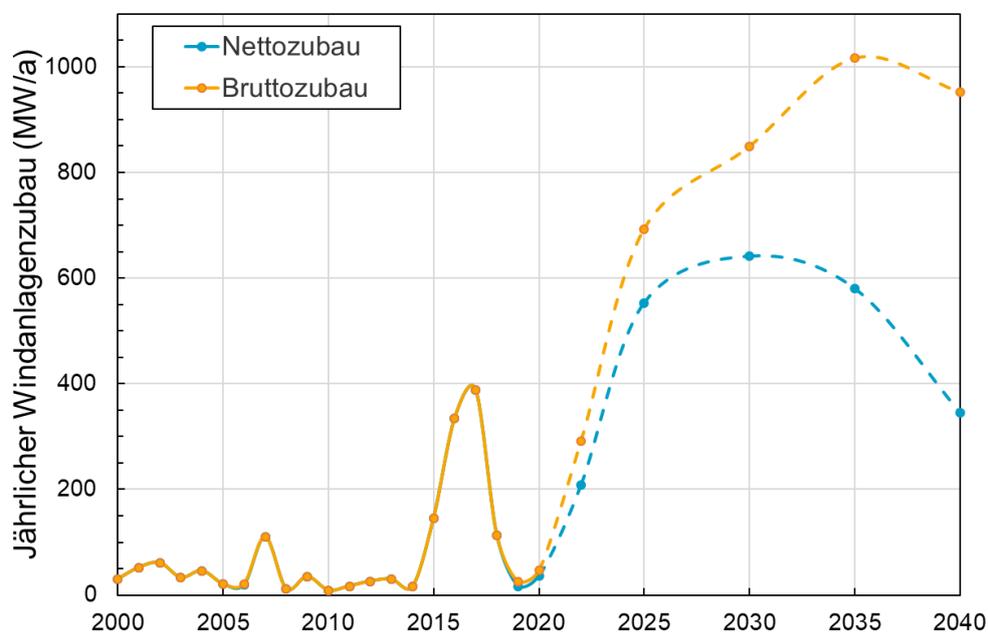


Bild 4: Jährlicher Netto- und Bruttozubau von Windanlagen in BW seit 2000 und im Szenario KLIMANEUTRAL 2040 (mittlere Nutzungsdauer der Anlagen: 20 Jahre)

Politische Handlungsansätze Windenergie

Auf Bundesebene

- Ab dem Jahr 2022 höhere EEG-Ausschreibungsvolumina definieren sowie mehr und zeitlich sinnvolle Ausschreibungsrunden einführen.
- Gerichtsverfahren beschleunigen, Drittrechtsbehelfe und deren Begründung sinnvoll befristen, Oberverwaltungsgerichte personell stärken.

Politische Handlungsansätze Windenergie

Auf Landesebene

- Mindestens 2 % der Landesfläche für die Windenergienutzung in windhöffigen Gebieten rechtssicher ausweisen.
- Landeseigene (Forst-)Flächen eigenständig und unabhängig von einer rechtskräftigen Flächenausweisung zügig ausschreiben und vergeben.
- Laufende Genehmigungsverfahren zügig bis Ende des Jahres 2022 abschließen sowie neue Rahmenbedingungen für beschleunigte, rechtssichere Genehmigungsverfahren schaffen.
- Behörden in ihren Entscheidungen stärken und für Akzeptanz in der Bevölkerung werben.
- Erlasse und Verfahrensanweisungen anwenderfreundlich formulieren.
- Artenschutzvorgaben vereinfachen, praxistauglich und rechtssicher ausgestalten sowie den Klimaschutz höher gewichten.
- Landesweite Repowering-Ziele verbindlich festlegen sowie durch eine bevorzugte Flächenausweisung und ein vereinfachtes Genehmigungsverfahren erleichtern.

3.3. Stromerzeugung mit Biomasse

Die Energieerzeugung auf Basis von Biomasse ist ähnlich wie die Nutzung fossiler Energien über längere Zeiträume weitgehend planbar. Für die Sicherung und Stabilisierung einer Stromversorgung mit wachsenden Wind- und Photovoltaikanteilen ist sie daher von großer Bedeutung, insbesondere in einem Stromimportland wie BW. Im Szenario KLIMANEUTRAL 2040 nimmt die installierte Leistung im Bereich Biomasse von derzeit 945 MW auf 1.241 MW zu.

Aus Effizienzgründen sollte ihr Einsatz weitgehend in KWK erfolgen, mit möglichst verbrauchsnahen Standorten v.a. bezüglich der Wärmeabnahme. Deren derzeitiger Anteil ist mit insgesamt 300 MW (130 MW feste Biomasse; 170 MW übrige Biomasse), entsprechend 45 % an der gesamten Stromerzeugung aus Biomasse, noch steigerungsfähig. Für 2030 wird von einem Anteil von rund 60 % und für 2040 von 75 % ausgegangen.

Tabelle 5: Installierte Leistung Bioenergien 2020 und im Szenario KLIMANEUTRAL 2040 in BW, zur Verdeutlichung Stromerzeugung aus Biogas im Vergleich zur installierten Leistung.

Installierte Leistung	2020	2022	2025	2030	2035	2040
Biomasse, fest (MW)	203	231	294	340	378	406
Bioabfall, Klär-, Deponiegas u.a. (MW)	130	130	130	130	127	125
Biogas (MW)	613	617	640	660	690	710
<i>Stromerzeugung aus Biogas (GWh/a)</i>	<i>2.931</i>	<i>2.900</i>	<i>2.880</i>	<i>2.830</i>	<i>2.750</i>	<i>2.700</i>

Im Segment **Biogase, Klär- und Deponiegas, sowie biogene Abfälle** ist das Potenzial im Strombereich größtenteils ausgeschöpft. Aktuell ist sogar davon auszugehen, dass die Leistung und die Arbeit aus Biogasanlagen in BW wegen der Ausschreibungsbedingungen des

EEG Mitte der 20er Jahre zurückgehen wird, wenn nicht schnell politisch gegengesteuert wird bezüglich der flexiblen Energiebereitstellung durch Biogasanlagen. Das Szenario KLIMANEUTRAL 2040 enthält dennoch einen Anstieg von derzeit 742 MW auf **790 MW in 2030** und auf rund **835 MW** in 2040. Dies gründet bei leicht zurückgehender Stromerzeugung auf der Flexibilisierung der Biogasanlagen (höhere Leistung kombiniert mit Gasspeichern). Mit steigendem EE-Ausbau werden diese Anlagen verstärkt zum Ausgleich fluktuierender Leistung von Wind und Sonne eingesetzt. Dies führt zu kürzeren Volllaststunden der Anlagen. Die erzeugten Strommengen (2020: 3.635 GWh/a, davon Biogas 2.930 GWh/a und biogene Abfälle, Deponie- und Klärgas 705 GWh/a) sinken leicht auf 3.530 GWh/a in 2030 und auf 3.300 GWh/a in 2040 (Tab. 5).

Politische Handlungsansätze Stromerzeugung aus Biogas

Bundesebene

- Weiterentwicklung des EEG: Flexibilitätsprämie auch für Anlagen mit kürzerer Restvergütungsdauer, Rücknahme der endogenen Mengensteuerung und der Südquote.
- Einführung neuer Anreize zur Vergärung von Gülle und Mist sowie zum Einsatz von Blühpflanzen und Biomasse aus Agrarumweltmaßnahmen.
- Abbau unnötiger Hemmnisse im Genehmigungsrecht, u.a. in der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV).

Auf Landesebene

- Bekenntnis zur energetischen Nutzung von Biogas.
- Programm zum Erhalt von Biogasanlagen in Energiedörfern.
- Vereinfachung des Genehmigungsrechts bezüglich der Flexibilisierung, des Störfall- und Immissionsschutzes sowie des Abfallrechts.

Feste Biomasse in Form von Holz wird traditionell zur Wärmegewinnung eingesetzt. Zwar wird in Holzheizkraftwerken in KWK auch Strom produziert, der Fokus wird aber auch zukünftig auf der Wärmeerzeugung liegen (s. Kap. 4.1).

Für das Szenario KLIMANEUTRAL 2040 wurde **bis 2030 ein Ausbau auf 340 MW_{el}** angenommen, bis 2040 kann der Wert auf gut **400 MW_{el}** steigen, was jährlich etwa 1 Mio. Tonnen (lufttrocken) zusätzliches Frischholz beanspruchen würde. In 2030 produzieren dann Holzheizkraftwerke rund 1.700 GWh/a Strom und zugleich Wärme für städtische Wärmenetze (s. Kap. 4.1). Bis 2040 kann diese KWK-Strommenge auf maximal 2.000 GWh/a steigen.

Zum Vergleich wurde 2020 aus Altholz in Holzheizkraftwerken mit einer Leistung von 203 MW_{el} rund 1.035 GWh/a Strom erzeugt. Seit 2012 ist der Betrag kaum gewachsen. Während die Altholzpoteziale ausgeschöpft sind, gibt es in BW jedoch etwa 12.000 bis 14.000 TJ ungenutzten Holzzuwachs, die sowohl für die stoffliche Nutzung als auch für Wärme- und Stromerzeugung eingesetzt werden können [Eigene Abschätzung (1); Plattform EE BW, 2019]. Diese

Waldressourcen sollten innerhalb eines ökologisch vertretbaren Rahmens konsequenter genutzt werden, ebenso wie (bestenfalls getrocknetes) Landschaftspflegematerial und Straßenbegleitgrün. Die in Tabelle 5 angenommene Verdopplung der Leistung erfordert aus Effizienzgründen ausschließlich die Errichtung von Heizkraftwerken. Die erforderliche Ausweitung entsprechender Nahwärmenetze muss daher Bestandteil dieser Strategie sein (vgl. Kap. 4).

3.4. Stromerzeugung mit Tiefengeothermie

Prinzipiell verfügt die hydrothermale Tiefengeothermie über relativ große Potenziale, gerade auch in BW. Hier finden sich diese am Oberrheingraben (über 150°C ab 3.000 m Tiefe) sowie in Oberschwaben, dort mit etwas niedrigerem Temperaturniveau. Die typische Größe einer geothermischen Doublette für stromerzeugende Anlagen liegt bei 35-40 MW thermisch bzw. 5 MW elektrisch, bei mehr als zwei Bohrungen an einem Standort entsprechend höher. Dieses Verhältnis zeigt, dass die Wärmeerzeugung von entscheidender Bedeutung ist (Kap. 4.4).

Mehrere Projektgesellschaften und Energieversorgungsunternehmen sind in den Planungen konkreter Projekte fortgeschritten. Bislang produziert die EnBW in Bruchsal seit mehr als 10 Jahren Strom und stellt seit zwei Jahren zusätzlich auch Wärme aus der Anlage bereit. Es wird davon ausgegangen, dass in den nächsten Jahren bis 2030 Anlagen mit einer Gesamtleistung von **60 MW_{el}** in BW in Betrieb gehen können mit einer Stromproduktion von **300 GWh/a**. Gelingt dieser engagierte Einstieg bis 2030, so wäre bis 2040 eine Verdopplung auf rund **120 MW_{el}** möglich, womit rund 600 GWh/a Strom bereitstellbar wäre. Das Potential wäre damit noch nicht ausgeschöpft.

Politische Handlungsansätze Tiefengeothermie

Auf Landesebene

- Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB): Personal aufstocken für aktuelle und zu erwartende Verfahren.
- Tiefengeothermie in Wasserschutzgebieten der niedrigsten Schutzstufe zulassen (bislang Einzelgenehmigungen der Landratsämter erforderlich).
- Die Kenntnisse des Untergrunds sind an vielen Orten unzureichend. Sie sind aber gerade für tiefengeothermische Projekte von herausragender Bedeutung. Die systematische Erkundung des Untergrundes von Seite des Landes ist geeignet, eine Dynamik beim Ausbau der Tiefen Geothermie zu erzeugen.

Politische Handlungsansätze Tiefengeothermie

Bundesebene

- Weiterentwicklung des EEG: vollständige Aussetzung der Degressionsregelung bis zu einem flächendeckenden Ausbau der tiefen Geothermie sowie eine Befreiung des Pumpenstroms von der EEG-Umlage.
- Tiefengeothermische Projekte sind im Betrieb günstig, in der Anfangsphase mit hohen Investitionskosten verbunden. Diese Hürden sollten über Eigenkapital stärkende KfW-Ausfallbürgschaften und Direktzuschüsse kompensiert werden.

3.5. Wasserkraft

Die **Wasserkraft** als traditionsreichste EE-Stromerzeugungsquelle des Landes Baden-Württemberg trägt derzeit zu fast einem Fünftel der erneuerbaren Stromerzeugung bei. Sie besitzt auch dann noch weitere Steigerungspotenziale, wenn man der Gewässerökologie nach der EU-Wasserrahmenrichtlinie angemessen Rechnung trägt.

Die Stromerzeugung durch Wasserkraft betrug im Jahr 2020 knapp 4,2 TWh (davon ca. 0,55 TWh durch die Kleinwasserkraft), der Durchschnitt der letzten zehn Jahre liegt bei 4,62 TWh. Die derzeitig installierte Leistung beträgt 888 MW_{el}, davon ist mehr als ein Zehntel den rund 1.700 Anlagen der Kleinwasserkraft zuzurechnen. Sie kann bis 2030 durch Modernisierung von Altanlagen auf rund **930 MW_{el}** (mit rund 4,65 TWh/a bei 5.000 h/a Ausnutzungsdauer) gesteigert werden. Längerfristig können nach Einschätzung der Plattform EE BW noch Neuanlagen bzw. Erweiterungen mit einer Stromproduktionskapazität von rund 0,38 TWh/a erstellt werden. Das bis 2040 erschließbare Gesamtpotenzial wird auf rund **1.000 MW** bzw. 5,0 TWh/a geschätzt, davon rund 4,0 TWh/a in Anlagen >1 MW [Abschätzung (3); Plattform EE BW].

Modernisierungen sind sowohl an den großen Wasserkraftwerken an Rhein, Neckar, Donau und Iller sowie den Pumpspeicherwerken als auch im Bereich der Kleinwasserkraft möglich. Auch durch den Neubau von Kleinwasserkraftanlagen kann ein zusätzlicher Beitrag zur Versorgungssicherheit und zum Klimaschutz geleistet werden.

Insbesondere an bestehenden, energetisch nicht genutzten Regelungs- sowie Sohlenbauwerken besteht Potenzial zum Ausbau der Kleinwasserkraft. Dieses wurde bereits für den Neckar, später für die Gebiete Donau, Alpenrhein/ Bodensee, Hochrhein, Oberrhein und Main erhoben [Reiss, 2017]. Auch der Energieatlas des Landes gibt Aufschluss über mögliche Standorte.

Dabei gibt es zahlreiche technische Möglichkeiten, die gesamthafte ökologische Durchgängigkeit an Fließgewässern sicherzustellen (ein Aspekt der Herstellung des guten ökologischen Zustands), sei es im Neubau oder im Bestand, zum Beispiel durch den Bau von Fischauf- und -abstiegsanlagen. Eine Hürde dafür stellen allerdings die Höhe der notwendigen finanziellen Investitionen sowie die Ausmaße der entsprechenden Genehmigungsverfahren für die Anlagenbetreiber dar.

Politische Handlungsansätze Wasserkraft

Bundesebene

- Weiterentwicklung des EEG zur Sicherung der Finanzierung zur Steigerung des Potenzials und der ökologischen Maßnahmen.
- Fortsetzung der Netznutzungsentgeltbefreiung für Pumpspeicherkraftwerke (Energiewirtschaftsgesetz).
- Angemessene Berücksichtigung der Kleinwasserkraft in der Nationalen Wasserstrategie.
- Anerkennung der zusätzlichen Dienstleistungen der Wasserkraft zum Energiemarkt/-mix der Zukunft.

Auf Landesebene

- Moderierende Unterstützung bei der Realisierung konkreter Projekte (Modernisierung/ Neubau von Kleinwasserkraft).
- Investitionssicherheit für Betreiber durch verlängerte Erlaubnis-/Genehmigungszeiträume bei der Neuerteilung von Wasserrechten.
- Schlanke und zügige Genehmigungsverfahren bei der Neuerteilung von Wasserrechten/ Maßnahmen in Gewässern.
- Dabei gleichwertige Abwägungen zwischen Klimaschutz durch Energieerzeugung und Naturschutz, insbesondere bei der Festsetzung von Mindestwasserregelungen an Ausleitungskraftwerken.
- Klare Vorgaben für Ökopunkte-Vergabe bei ökologischen Maßnahmen an Wasserkraftanlagen.

4. Ausbau der erneuerbaren Wärmeerzeugung in BW

Die Erzeugung erneuerbarer Wärme auf Basis von Biomasse, Solarthermie, Umweltwärme und Tiefengeothermie steigt im Szenario KLIMANEUTRAL 2040 deutlich an. Auch die Kombination von Wärme aus erneuerbaren Energien mit der nicht vermeidbaren industriellen Abwärme (darunter auch Abwärme von Elektrolyseuren) bietet zusätzliche Potentiale, die im Szenario jedoch nicht abgebildet werden können. **Im Jahr 2030** kann inklusive des Einsatzes von grünem Wasserstoff (s. Kap. 2.6) eine EE-Wärmemenge von 126 PJ/a (= 34,8 TWh/a) erreicht werden, was dann einem EE-Anteil an dem (reduzierten) Wärmeverbrauch von **43 %** (2020: 15,7%) entspricht. Bis 2040 wächst sie auf 204 PJ/a (56,7 TWh/a) und kann zusammen mit dem deutlich gewachsenen Beitrag von EE-Strom den gesamten Wärmebedarf decken. Die dem zugrundeliegende und in Kapitel 2.1 ausgewiesene Reduktion der Endenergienachfrage für Wärme bis 2040 ist mit 46 % immens. Sie erfordert im Vergleich bislang erreichten Einsparungen große Anstrengungen, zum Beispiel im Hinblick auf die Sanierungsrate von Gebäuden.

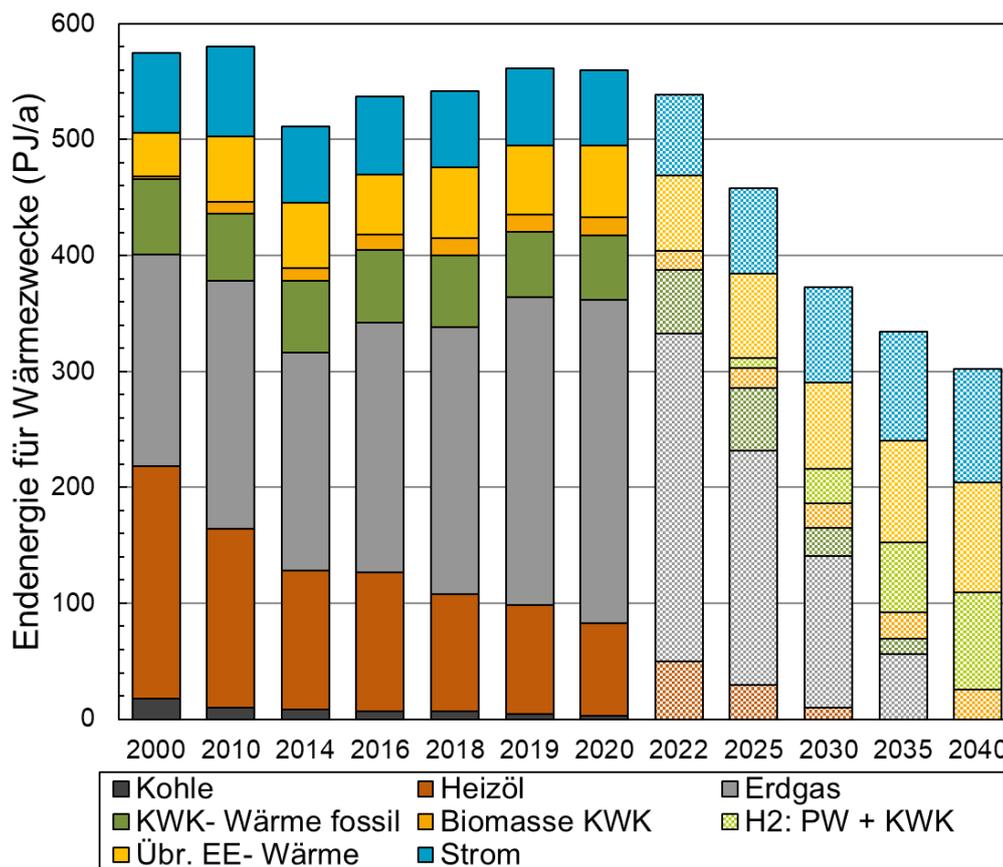


Bild 5: Veränderung der Endenergienachfrage zur Wärmebereitstellung (Raumheizung; industrielle Prozesswärme, Warmwasser, Klimaanlagen) im Szenario KLIMANEUTRAL 2040 (Übrige EE-Wärme = Biomasse ohne KWK; Solar- und Umweltwärme (WP); Tiefengeothermie), nicht temperaturbereinigt.

Im Wärmesektor betrug die bisherige mittlere jährliche Zuwachsrate von EE-Wärme zwischen 2000 und 2020 rund 520 GWh/a, mit regionalen Unterschieden zwischen städtischen und ländlichen Siedlungsstrukturen. Dabei war das Wachstum der EE-Wärme im ersten Jahrzehnt deutlich höher als im Zeitraum danach. Die im Szenario KLIMANEUTRAL 2040 erforderliche Zuwachsrate von jährlich rund 1.300 GWh/a zwischen 2020 und 2030 ist um das 2,5-fache höher als im Zeitraum 2000 bis 2020.

Derzeit (Stand 2020) stammen lediglich knapp 15,7 % der Wärmeerzeugung (21,7 TWh/a; Tab. 6) **aus EE-Anlagen**; 12 % deckt Strom und knapp 10 % stammen aus fossiler KWK-Wärme [UM BW, 2021]. Noch **nahezu 65 %** (362 PJ/a) stammen also aus dem direkten Einsatz fossiler Energieträger Erdgas, Heizöl und (geringfügig) Kohle (Bild 5). Damit kommen einschließlich des Stromeinsatzes für Wärmezwecke knapp 50 % (= 37,8 Mio. t CO_{2äq}) der gesamten THG-Emissionen von BW aus dem Wärmesektor.

Bisherige Reduktionen beruhen vor allem auf dem Ersatz von Heizöl durch Erdgas, erst in zweiter Linie durch die Verringerung des Wärmebedarfs im Gebäudesektor. Für einen erfolgreichen Klimaschutz ist also die weitere Entwicklung des Wärmesektors von zentraler Bedeutung.

Tabelle 6: EE-Wärmebereitstellung 2010-2020 und im Szenario KLIMANEUTRAL 2040

	2010	2014	2016	2018	2020	2025	2030	2035	2040	
EE-Wärmeerzeugung (TWh/a)										
Biomasse	17,1	15,9	18,3	17,4	18,0	18,8	19,2	19,8	20,2	
Solarthermie	1,2	1,5	1,5	1,8	1,8	2,8	4,2	6,9	8,6	
Umweltwärme	0,3	0,5	1,2	1,5	1,8	3,9	5,5	7,0	8,1	
Tiefengeothermie	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	1,0	2,3	3,7	
EE-Wasserstoff						1,5	4,9	11,4	16,1	
EE-Wärme, gesamt (TWh/a)	18,7	18,1	21,2	20,7	21,7	27,4	34,8	47,3	56,7	
Anteil an ges. Wärme (%)	11,6	12,7	14,2	13,8	13,9	21,5	33,6	51,0	68,0	
Anteil unter Berücksichtigung von EE-Strom für Wärme (%)	13,3	15,8	17,6	17,7	18,6	31,2	49,6	75,8	100,0	

Nach wie vor dominiert feste Biomasse, also Holz, die EE-Wärmeversorgung. 72,5 % der gesamten EE-Wärme stammen davon. Weitere 10,5 % stammen aus Biogas, Klärgas, Deponiegas und weiteren Bioabfällen, insgesamt 83 % (18 TWh/a) der EE-Wärme sind also biologischen Ursprungs. Die „technischen“ Systeme, wie solarthermische Anlagen mit 8,2 %, Wärmepumpen mit 8,8 % Anteil, und die Nutzung der Tiefengeothermie mit unter 1 % spielen 2020 vergleichsweise noch eine geringe Rolle. Sie weisen aber im Szenario KLIMANEUTRAL 2040 die größten Steigerungsraten auf (mit regional unterschiedlichen Potenzialen und Nutzungsmöglichkeiten). Zusätzlich spielt im Szenario der Einsatz von grünem Wasserstoff für Prozesswärme in der Industrie und in KWK in Spitzenlastkraftwerken eine große Rolle (Tab. 6, Bild 6). Eine weitere, schnell umzusetzende Option ist die verstärkte Aufbereitung von Biogas zu Biomethan und dessen Einspeisung ins Gasnetz. Über diese bestehende Verteilungsstruktur können übergangsweise KWK-Anlagen versorgt werden, die Wärme in Wärmenetze einspeisen.

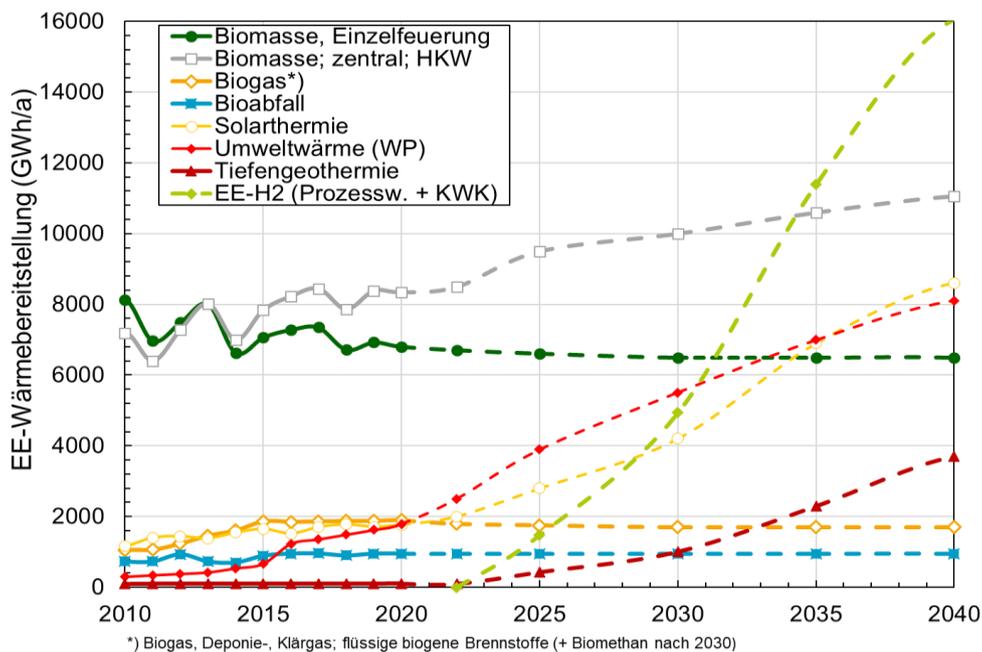


Bild 6: Wärmebereitstellung mittels EE nach Einzeltechnologien im Szenario KLIMANEUTRAL 2040

Die stärkere Nutzung von Solarthermie, Umweltwärme (auch in größerem Umfang mithilfe von Großwärmepumpen), der Tiefengeothermie sowie der Holzenergie in zentralen Heiz(kraft)werken bietet sich besonders bei der Transformation und beim Ausbau bestehender sowie beim

Bau neuer **Wärmenetze** an. Die netzgebundene Wärmeversorgung ermöglicht darüber hinaus ein schnelles Vorankommen bei der Wärmewende und bietet Anknüpfungspunkte zur Sektorkopplung, zum Beispiel Nutzung großer Wärmepumpen, der Abwärme von Industriebetrieben und Elektrolyseuren. Eine wirksame Wärmestrategie verlangt dementsprechend eine konsequente Transformation (Dekarbonisierung) bestehender Wärmenetze und einen gezielten Wärmenetzausbau. Erforderlich ist eine Steigerung der netzgebundenen Wärmeversorgung von derzeit rund 15 % auf ca. 30 % im Jahr 2030.

Politische Handlungsansätze zur Wärmewende

Bundesebene

- Wirksame Ausgestaltung des nationalen Emissionshandels (CO₂-Preis) ab 2027, u.a. Fortführung des Mindestpreises.
- Anpassung im Energiewirtschaftsgesetz: Berücksichtigung der Sektorkopplung bei Konzessionsvergaben.
- Reduktion des Strompreises, um Sektorkopplung zu forcieren.
- Ausrichtung des Gebäudeenergiegesetzes auf die Integration von EE.
- Weiterentwicklung des Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetzes: Aufnahme von Wärme aus Biomasse in den EE-Wärme-Bonus sowie von Großwärmepumpen für Wärmequellen unterhalb der Wärmenetztemperatur.
- Marktdesign für EE-Fernwärme schaffen: Einführung einer EE-Quote für Fernwärme, Einspeisevorrang für erneuerbare Wärme, Öffnung von Wärmenetzen für Dritte, Umstellung der Berechnung der Primärenergiefaktoren, Anpassung der Allgemeinen Bedingungen zur Versorgung mit Fernwärme (AVB Fernwärme) u.a.

Auf Landesebene

- Anreize zur konsequenten Erstellung kommunaler Wärmepläne, die alle EE-Potenziale eingehend prüft.
- Anreize zur Umsetzung der Wärmepläne.

Kommunen und Landkreise

- Implementierung des Wärmeplans (auch hinsichtlich Anlagen zur EE-Wärmeerzeugung) als Fachplan in die weiteren Aufgaben der Stadtplanung (baulandpolitische Beschlüsse, Energiekonzepte, Bebauungspläne, Flächennutzungspläne).

4.1. Wärmeerzeugung mit Biomasse

Die weitere Entwicklung der Biomasse im Wärmebereich ist ein Spiegelbild der im Abschnitt 3.4 dargestellten Entwicklung im Strombereich. Bei Biogas und Bioabfällen ist von einer etwa gleichbleibenden Wärmeproduktion auszugehen. Neben der besseren Ausnutzung von offenen Biogaspotenzialen wie Mist- und Gülleabfällen (s. Kap. 3.3) besteht eine Erweiterung der Wärmeproduktion bei bestehenden Anlagen durch den Anschluss an bestehende oder neu zu errichtende Wärmenetze oder die Einspeisung von Biomethan in das Gasnetz.

Im Bereich der Einzelwärmeversorgung werden neben Wärmepumpen (s. Kap. 4.4) vor allem automatische Holzfeuerungen eine Rolle spielen. So werden derzeit insbesondere in Ein- und Zweifamilienhäusern alte Ölheizungen durch moderne Pelletanlagen ausgetauscht. Weitere Impulse kommen aus dem Neubau von Wohnhäusern und Gewerbe und vom Ersatz alter, wenig effizienter Holzheizungen durch moderne Anlagen.

Größere Wachstumsmöglichkeiten zeigen sich bei der Nutzung von zusätzlichem Festholz in effizienten Heiz(kraft)werken in Wärmenetzen. Bei Holz-Einzelheizungen wird – bei etwa gleichbleibender Anzahl – wegen insgesamt sinkenden Wärmebedarfs von einem leichten Rückgang ausgegangen (Bild 6). Aus diesen Überlegungen ergibt sich insgesamt ein Anstieg der Wärmeerzeugung aus Bioenergie von derzeit knapp 18,0 TWh/a (2020) auf 19,2 TWh/a in 2030 und auf 19,7 TWh/a in 2040 mit einem wachsenden Anteil von KWK-Wärme von derzeit 24 % auf 33 % in 2030 (**Tab. 7**).

Tabelle 7: Wärmebereitstellung aus Bioenergie im Szenario KLIMANEUTRAL 2040

Wärmeleistung (TWh/a)	2018	2020	2025	2030	2035	2040
Holz-Einzelheizung	6,72	6,81	6,60	6,50	6,50	6,50
Holz-HW, Holz-HKW	7,86	8,34	9,50	10,0	10,60	10,85
Biogas, Bioabfall, Klärgas	2,77	2,84	2,70	2,65	2,65	2,30
Biowärme gesamt (TWh/a)	17,35	18,00	18,80	19,15	19,75	19,65
- davon KWK-Wärme	4,20	4,40	4,70	6,00	6,50	7,10

Politische Handlungsansätze Wärmeerzeugung aus Bioenergie

Siehe hierzu auch oben Handlungsansätze Wärme generell.

Bundesebene

- Programm zur Einspeisung von Biomethan in das Gasnetz.

Auf Landesebene

- Bekenntnis zur energetischen Nutzung von Holz.

4.2. Solarthermie

Das Szenario KLIMANEUTRAL 2040 beinhaltet eine deutliche Steigerung des jährlichen Zubaus von Solarkollektoren. Bis 2030 steigt die **Kollektorfläche auf 10,6 Mio. m²; bis 2040 auf rund 22 Mio. m²**. Das verlangt im Zeitraum 2020 bis 2030 nahezu eine **Verdreifachung der bisherigen jährlichen Zubauraten**, nach 2030 eine knappe **Verfünffachung**. Damit werden in 2030 rund 4.200 GWh/a und in 2040 8.600 GWh/a solare Nutzwärme bereitgestellt.

Dabei werden größere gebäudeintegrierte Anlagen oder Freiflächenanlagen in Verbindung mit Wärmenetzen eine immer größere Rolle spielen. Im Szenario steigt der Anteil von Großanlagen von derzeit 0,5 % (25.000 m²) auf 25 % in 2030 (2,25 Mio. m²) und bis 2050 auf 50 % (12,5 Mio. m²). Das entspricht mehreren Hundert Anlagen in der Größenordnung von 10.000 m² je Anlage.

Der Solarthermiemarkt zeigt seit den 2010ern ein verhaltenes Wachstum mit einer mittleren Ausbaurrate in BW um 90 GWh/a bzw. von 225.000 m²/a in den letzten 15 Jahren [UM BW, 2021]. Bundesweit zeichnet sich seit 2020 u.a. durch die verbesserte Förderkulisse ein Trend zu stärkerem Marktwachstum ab.

2020 werden in BW mit einer Kollektorfläche von 4,45 Mio. m² (rund 21 % der bundesweit installierten Leistung) knapp 1.770 GWh/a Solarwärme bereitgestellt, die typische spezifische Ausbeute beläuft sich auf rund 400 kWh pro m² und Jahr. Zum weitaus größten Teil sind dies Anlagen auf Einzelgebäuden, mit einer typischen Größe von 5-25 m² bzw. einer Jahresproduktion von 2.000-10.000 kWh/a. Anlagen mit Flächen zwischen 1.000 m² bis rund 15.000 m² kombiniert mit Speichern für Nah- und Fernwärmenetze nehmen deutlich zu. BW ist bei netzgebundener Solarthermie Vorreiter in Deutschland. Ein Beispiel ist Deutschlands derzeit größtes Solarthermie-Projekt SolarHeatGrid der Stadtwerke Ludwigsburg-Kornwestheim.

Politische Handlungsansätze Solarthermie

Bundesebene

- Abbau der Hemmnisse für EE-Fernwärme (s. Kap. 4).
- Privilegierung in der Flächenplanung (Baugesetzbuch).

Auf Landesebene

- Beschleunigung von Genehmigungsverfahren für Freiflächen-Solarthermie (Land und Kommunen).

Kommunen und Landkreise

- Grundsätzliche Prüfung der Solarthermie in Gebäude- und Quartierskonzepten.
- Sicherung von ortsnahen Flächen.

4.3. Wärmeerzeugung mit Umweltwärme

Eine große Anzahl von Einzelwärmeversorgung muss von fossiler Versorgung (vorrangig Heizöl; nach 2030 auch deutlich Erdgas) auf EE umgestellt werden. Eine wichtige Option ist die Versorgung mittels mit EE-Strom betriebenen Wärmepumpen auf der Basis von Erdwärme, Grundwasser sowie eingeschränkt auch Luft. Im Szenario KLIMANEUTRAL 2040 werden in 2030 mit 5.500 GWh/a Umweltwärme bzw. rund 500.000 Anlagen bereits 16 % der gesamten EE-Wärme mittels Wärmepumpen bereitgestellt. Bei unverändertem jährlichem Zubau steigt ihr Beitrag bis 2040 auf 8.100 GWh/a. Mit tendenziell steigender Jahresarbeitszahl der Wärmepumpen (derzeitiger Mittelwert: 2,875 basierend auf [UM BW, 2021]) auf 3,025 werden dafür rund 4.000 GWh/a EE-Strom benötigt, was dann rund 5 % des gesamten EE-Stroms entspricht.

Derzeit (Stand 2020) sind in BW rund 170.000 Wärmepumpen in Betrieb mit einer Ausbeute an Umweltwärme in Höhe von knapp 1.800 GWh/a und einem dafür erforderlichen Stromverbrauch von rund 950 GWh/a. In den letzten fünf Jahren war das Wachstum mit durchschnittlich 225 GWh/a bzw. rund 25.000 Anlagen pro Jahr beachtlich.

Bislang nicht genutzte Wärmequellen wie Seen, Gewässer, Kläranlagen oder Abwasserkanäle, industrielle Niedertemperaturabwärme sowie Rechenzentren können mithilfe von Großwärmepumpen ebenfalls erschlossen werden und ein Wärmenetz mitversorgen. Diese bieten zudem deutliche bessere Potenziale zum flexiblen Lastmanagement als einzelne Wärmepumpen pro Gebäude. Ein Teil der hier dargestellten Umweltwärmenutzung kann mittelfristig also auch in diesem Segment stattfinden. Eine weitere Option für hocheffiziente Neubaugebiete ist der Einsatz von kalter Nahwärme.

4.4. Wärmeerzeugung mit Tiefengeothermie

Neben der möglichen Nutzung der Tiefengeothermie zur Stromerzeugung (s. Kap. 3.5) wird die direkte Verwertung der Wärme stärker ins Gewicht fallen. Diese Wärme kann in den bestehenden großen Fernwärmenetzen (z.B. Mannheim) oder in Verbindung mit neuen Wärmenetzen im Rahmen von kommunalen Wärmenutzungskonzepten eingesetzt werden. Auch Projekte für die industrielle Prozesswärme wie im elsässischen Rittershoffen sind eine relevante Option. Die Erschließung tiefer Geothermiereservoire ist mit größeren Investitionen verbunden und damit vor allem gemeinschaftlich sinnvoll.

Bisher wird Tiefengeothermie mit rund 100 GWh/a Nutzwärme in BW nur in geringem Umfang genutzt (inklusive Thermalbäder). Im Szenario KLIMANEUTRAL 2040 werden bis 2030 rund 1.000 GWh/a Nutzwärme in Betrieb genommen. Bis 2040 sollte dieser Wert auf rund 3.700 GWh/a gesteigert werden.

In BW sind die Lagerstätten am Oberrheingraben besonders heiß und ergiebig. Hier sind bereits mehrere Projekte verschiedener Unternehmen in Planung, sodass eine realistische Chance besteht, die Kapazität von 1.000 GWh/a Nutzwärme bereits vor 2030 zu erreichen. Daneben sind auch in Oberschwaben erhebliche Mengen an Geothermie verfügbar, die Temperatur der Lagerstätten erlaubt hier ausschließlich eine Wärmenutzung.

Bei einer konsequenten kommunalen Wärmeplanung mit entsprechender energiepolitischer Unterstützung sind aus der Sicht des Geothermiepotenzials auch noch größere Nutzwärmemengen vorstellbar. Dazu ist ein konsequenter, zeitlich und örtlich abgestimmter Ausbau von Wärmenetzen notwendig. Ein sinnvoller weiterer Schritt im Bereich des Oberrheingrabens könnte die Erweiterung der Fernwärmeverbunds Mannheim-Heidelberg in Richtung Karlsruhe und darüber hinaus sein. Auf diese Weise könnte – wie im Großraum München bereits in Planung – durch Tiefengeothermie erzeugte Wärme aus der Region auch in den Großstädten genutzt werden und dazu beitragen, die Fernwärmenetze zu dekarbonisieren.

Politische Handlungsansätze Tiefengeothermie

Bundesebene

- Der Ausbau von Wärmenetzen und die Möglichkeiten zur Einspeisung von Erdwärme in diese Netze sollten gestärkt werden. Deshalb muss mit der Bundesförderung effiziente Wärmenetze der Ausbau von geothermisch kompatiblen Wärmenetzen verbessert werden, die Netzanbindung von EE-Wärmeerzeugungsanlagen an Wärmenetze ermöglichen und Speichermöglichkeiten ausbauen.
- Die Wärmelieferverordnung muss novelliert und die Erfordernisse der Betriebskostenneutralität gestrichen werden, um Lock-in-Effekte zu vermeiden und klimaneutraler Fernwärme auch im Bestand einen deutlichen Schub zu verleihen.
- Geothermie bietet auch die Möglichkeit für einen Einsatz als industrielle Prozesswärme. Deshalb ist hier eine Gleichstellung in der Förderrichtlinie zu Erneuerbaren Energien in der Industrie als neuer Baustein mit aufzunehmen.

5. EE im Verkehrssektor: Strom und erneuerbare Kraftstoffe

Der Verkehrssektor hat bisher so gut wie keinen Beitrag zum Klimaschutz geleistet. Noch im Jahr 2019 war sein Anteil an den CO₂-Emissionen BW mit 22,8 Mio. t CO₂/a rund 8 % höher als im Jahr 1990. Erst die Corona-Pandemie reduzierte die Emissionen substantiell auf 19,1 Mio. t CO₂/a in 2020 (entspricht 28 % der THG-Emissionen in BW). Gegenwärtig wird dieser Rückgang jedoch bereits wieder überkompensiert [AG Energiebilanzen, 2021]. Es ist also noch keine stabile Tendenz zur notwendigen deutlichen Reduktion der Treibhausgase im Verkehrssektor erkennbar.

EE-Strom, Biokraftstoffe und strombasierte Kraftstoffe werden die zentralen zukünftigen Energieträger im Verkehrssektor sein (Bild 7). Der Beitrag von EE-Strom ist mit derzeit rund 2 % noch unbedeutend (überwiegend Bahnstrom, nicht 100 % EE). Im Szenario KLIMANEUTRAL 2040 steigt er wegen deutlich zunehmender Elektromobilität bis **2030 auf rund 14 % und bis 2040 auf rund 35 %** (bezogen auf den dann notwendigerweise reduzierten Verbrauch, s. Kap. 2.1). Strombasierte Kraftstoffe wie Wasserstoff und seine Folgeprodukte werden ab 2025 dort als Kraftstoff eingesetzt, wo die direkte Nutzung von EE-Strom an Grenzen stößt oder unzumutbar ist (insbesondere Güterverkehr, Schifffahrt, Flugverkehr). Um Klimaneutralität bis 2040 zu erreichen, muss sein Beitrag rasch wachsen. In 2030 werden mit 4,5 TWh/a bereits 8 % des Energiebedarfs im Verkehr mittels EE-Wasserstoff beziehungsweise der Folgeprodukte gedeckt, in 2035 sind es knapp 30 % und in **2040 mit 26 TWh sind es 55 %** (Tab. 8). Die verbleibenden 10 % decken dann biogene Kraftstoffe, deren heutiger absoluter Beitrag von rund 4 TWh/a erhalten bleibt (Bild 7).

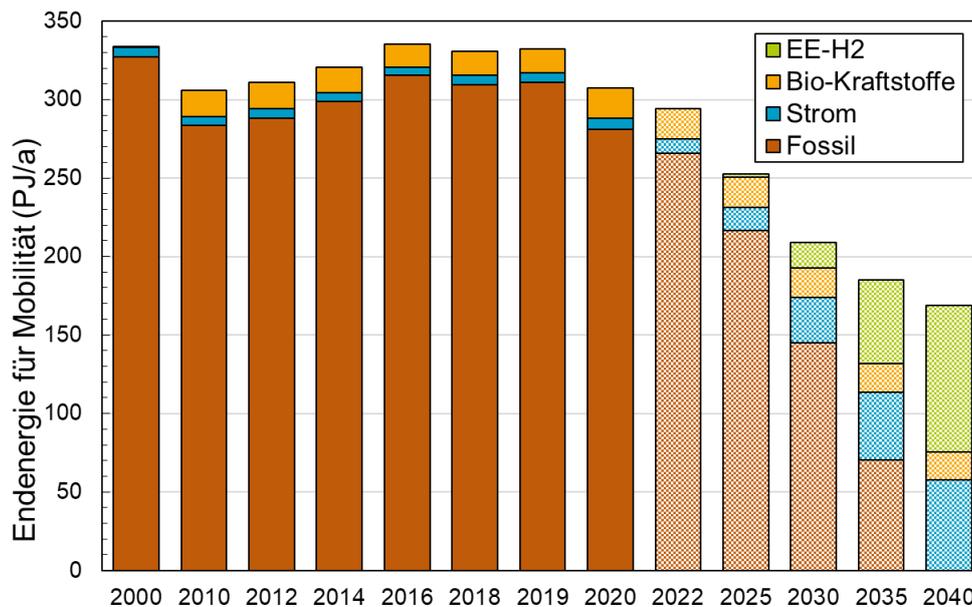


Bild 7: Entwicklung der Endenergienachfrage für Mobilitätszwecke und strukturelle Veränderungen durch die Ausweitung des Stromeinsatzes und die Einführung von EE-H₂ als Kraftstoff im Szenario KLIMANEUTRAL 2040

Voraussetzung für diese Entwicklung ist die Reduzierung des Energieverbrauchs im Verkehrssektor. Im Szenario KLIMANEUTRAL 2040 beläuft sich diese (gegenüber 2020) **bis 2030 auf 32 %** und um **rund 45 % bis 2040** (Bild 7). Diese Einsparungen basieren auf Strukturänderungen zugunsten effizienterer Mobilitätstechnologien. Dazu gehören Eindämmung/Reduktion des motorisierten Individualverkehrs zugunsten Bahn, Öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV) und Fahrrad (insbesondere im städtischen Bereich) sowie die Verlagerung eines Großteils des Güterverkehrs auf die Schiene.

Politische Handlungsansätze zur Mobilitätswende

Bundesebene

- Stärkere Anhebung des CO₂-Preises.
- Abschaffung des Dienstwagenprivilegs.
- Ambitionierte Fortführung der Treibhausgasminderungsquote.

Auf Landesebene

- Flächendeckender Ausbau ÖPNV auf Basis alternativer Kraftstoffe.
- Elektrifizierung aller Bahnstrecken, Reaktivierung alter Bahnstrecken.
- Flächendeckende verbindliche Umrüstung der öffentlichen Fahrzeugflotten auf E-Fahrzeuge bis 2025.

Kommunen

- Umbau des städtischen Verkehrs (weniger Individualverkehr mit KFZ), neue Mobilitätsangebote (Fahrradinfrastruktur, Car-Sharing, Vorrang für emissionsfreie Fahrzeuge), Ausbau von zentral gelegenen Schnelllade-Hubs (P&R).
- Aktualisierung der lokalen Mobilitätskonzepte in allen Städten und Kommunen bis 2025 und Umsetzung der identifizierten Maßnahmen.

Anhang

Tabelle A-1: EE Ausbau im Stromsektor 2020 und im Szenario KLIMANEUTRAL 2040

	Leistung (MW)					Stromerzeugung (TWh/a)				
	2020	2025	2030	2035	2040	2020	2025	2030	2035	2040
Wasserkraft	888	900	930	960	1.000	4,20	4,50	4,65	4,80	5,00
Windenergie	1.587	3.666	6.872	9.767	11.494	3,02	7,63	14500	21,00	25,00
Photovoltaik	6.934	14.815	24.170	31.764	38.662	6,37	14,00	23,08	30,34	37,00
Biomasse, fest	203	294	340	378	406	1,03	1,50	1,70	1,85	1,95
Biogas	613	640	660	690	710	2,93	2,83	2,75	2,70	2,70
Bioabfall, Klär-, Deponiegas	130	130	130	127	125	0,71	0,70	0,70	0,65	0,60
Tiefengeothermie	0,3	8,0	60	90	120	-	0,04	0,30	0,45	0,60
Summe EE in BW	10.355	20.452	33.161	43.777	52.518	18,25	31,25	47,76	61,84	72,85
Import EE	3.293	4.369	4.794	4.614	4.319	9,88	14,85	16,73	17,48	15,15
KWK aus EE-H2		119	595	1.444	2.857		0,46	1,67	2,89	4,00
EE-Strom gesamt	13.649	24.821	37.955	48.391	56.837	28,13	46,56	66,16	82,21	90,4

Tabelle A-2: EE-Ausbau im Wärmesektor 2020 und im Szenario KLIMANEUTRAL 2040

	Wärmeerzeugung (TWh/a)				
	2020	2025	2030	2035	2040
Biomasse (Einzelfeuerung)	6,81	6,60	6,50	6,50	6,50
Biomasse (zentral, HKW)	8,34	9,50	10,00	10,60	11,05
Bio-, Klär-, Deponiegas	1,89	1,75	1,70	1,70	1,70
Bioabfall	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Solarthermie	1,77	2,80	4,20	6,90	8,60
Umweltwärme (mit Wärmepumpen)	1,79	3,90	5,50	7,00	8,10
Tiefengeothermie	0,11	0,42	1,00	2,30	3,70
EE-H2 (Indust. Prozesswärme)		0,50	1,60	5,83	8,93
EE-H2 (Nutzwärme aus KWK)		0,97	3,33	5,56	7,14
EE-Wärmeerzeugung gesamt	21,66	27,39	34,78	47,34	56,67

Tabelle A-3: THG-Emissionen BW in den einzelnen Verbrauchssektoren zwischen 1990 und 2020 sowie Entwicklung im Szenario KLIMANEUTRAL 2040

	Bisherige Entwicklung					KLIMANEUTRAL 2040			
	1990	2010	2015	2019	2020	2025	2030	2035	2040
THG-Emissionen BW (Mio. t CO_{2äq}/a)									
Stromerzeugung/ Fernwärme	22,1	22,5	21,4	17,1	14,4	13,3	6,8	4,0	0,0
Priv. Haushalte und GHD	20,7	17,9	16,4	17,3	17,7	12,3	6,5	3,0	0,0
Industrie (Wärme + Prozesse)	14,0	9,4	8,8	8,7	8,6	5,5	3,3	1,5	0,0
Verkehr	20,8	20,7	22,5	22,6	18,8	15,7	10,1	4,5	0,0
Landwirtschaft, Abfall, Übrig.	11,5	7,3	7,8	5,8	5,8	4,3	3,7	1,9	0,0
Gesamt (Mio. t CO_{2äq}/a)	89,1	77,8	76,9	71,5	65,2	51,1	30,3	14,9	0,0
Mittlere jährl. Reduktionsrate (%):		-0,57	-0,18	-1,35	-6,27	-2,83	-4,16	-3,08	-2,97
Veränderung gegenüber 1990 (%)									
Stromerzeugung/ Fernwärme	0	1,9	-3,1	-22,6	-34,8	-39,8	-69,4	-81,7	-100
Priv. Haushalte und GHD	0	-13,4	-20,8	-16,4	-14,6	-40,5	-68,7	-85,5	-100
Industrie (Wärme + Prozesse)	0	-32,7	-37,0	-37,8	-38,4	-60,7	-76,7	-89,3	-100
Verkehr	0	-0,6	8,2	8,7	-9,6	-24,7	-51,5	-78,5	-100
Landwirtschaft, Abfall, Übrig.	0	-36,8	-32,5	-49,6	-50,1	-62,8	-68,0	-84,0	-100
Gesamtveränderung ggü. 1990 (%)	0	-12,7	-13,7	-19,8	-26,8	-42,7	-66,0	-83,3	-100

Tabelle A-4: Entwicklung des Endenergieverbrauchs in den einzelnen Verbrauchssektoren zwischen 2010 und 2020 sowie für das Szenario KLIMANEUTRAL 2040

	2010	2015	2019	2020	2025	2030	2035	2040
Endenergieverbrauch (PJ/a)								
Private Haushalte	343	283	290	285	232	197	183	178
Gewerbe, Handel, Dienstleist.	185	188	211	210	190	163	151	128
Industrie	231	223	224	217	194	172	167	166
Verkehr	306	328	333	307	252	209	185	169
Gesamte Endenergie (PJ/a)	1.065	1.021	1.058	1.019	869	741	686	641
Veränderung Endenergie (%)	zwischen 2010 und 2020				Bezogen auf 2020			
Private Haushalte	-17				-19	-31	-36	-38
Gewerbe, Handel, Dienstleist.	13				-9	-22	-28	-39
Industrie	-6				-11	-21	-23	-24
Verkehr	0				-18	-32	-40	-45
Veränderung Endenergie gesamt (%)	-4,3				-14,7	-27,2	-32,6	-37,1

Literatur

[AG Energiebilanzen, 2021]: Pressemitteilung vom 3.8.2021: „Energieverbrauch und Energiemix verändern sich durch Pandemie und Wetter.“

[AGORA, 2021]: AGORA; Stiftung Klimaneutralität: „Das Klimaschutz-Sofortprogramm“ Impulspapier, Berlin, August 2021

[Berger, 2020]: Roland Berger GmbH: „Potenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg.“ Studie für das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, Stuttgart, Februar 2020

[BWE, August 2019] Aufgabegründe von Windenergieprojekten in Baden-Württemberg- Umfrage des Landesverbandes Baden-Württemberg des Bundesverbands Windenergie e.V., 2019

[Eigene Abschätzung (1), Plattform EE-BW, Nov. 2019]; F. Scholl, HEF: Ausbaupfad Holzheizkraftwerke in Baden-Württemberg, November 2019

[Eigene Abschätzung (2), Plattform EE-BW; 2020]: Potenzial Erdwärme BW, Dt. Erdwärme GmbH & Co KG, Januar 2020

[Eigene Abschätzung (3), Plattform EE-BW, 2020]: Wasserkraftpotenziale in Baden-Württemberg, Januar 2020

[Enquete-Kommission, 1994]: „Schutz des Menschen und der Umwelt“; Drucksache 13/1120, Juni 1998.

[DLR, 2020]: Wasserstoff als Fundament der Energiewende. Band 1: Technologien und Perspektiven für eine nachhaltige und ökonomische Nutzung. DLR-Institut für Solarforschung, Köln, Sept. 2020; Band 2: Sektorkopplung und Wasserstoff, DLR-Institut für vernetzte Energiesysteme, Oldenburg

[IEKK, 2017]: „Energie- und Klimaschutzziele 2030“ Studie im Auftrag des UM Baden-Württemberg; ZSW Stuttgart; Öko-Institut Freiburg; ifeu Heidelberg; Fraunhofer-ISI Karlsruhe; Hamburg-Institut; J. Nitsch Stuttgart; September 2017

[KSG BW, 2021]: „Gesetz zur Änderung des Klimaschutzgesetzes Baden-Württemberg“. Gesetzesbeschluss des Landtags, Drucksache 17/943.

[Leibniz 2019]; J. Weber, I. Moek: Wärmewende mit Geothermie – Möglichkeiten und Chancen in Deutschland. Leibniz-Institut für angewandte Geophysik, Hannover, Juni 2019.

[Messner, 2017]: J. Messner, Landwirtschaftliches Zentrum Baden-Württemberg: „Aktueller Stand Biogasnutzung“ 15. März 2017

[Nitsch, 2002]: J. Nitsch: „Potenziale der Wasserstoffwirtschaft“; Expertise zum Hauptgutachten 2003 des WBGU: „Welt im Wandel – Energiewende zur Nachhaltigkeit“, Stuttgart, Juni 2002

[Nitsch, 2021]: J. Nitsch: „Wie erfolgreicher Klimaschutz erreicht werden kann – Die notwendigen Schritte zur Umgestaltung der deutschen Energieversorgung.“ Stuttgart, 20. Juni 2021

[Plattform, 2020]: J. Nitsch, M. Magosch: Ausbau der erneuerbaren Energien für eine wirksame Klimapolitik in Baden-Württemberg. EE-Plattform, Stuttgart, Mai 2020

[Reiss, 2017]: J. Reiss, A. Becker, S. Heimerl: „Ergebnisse der Wasserkraft potenzialermittlung in Baden-Württemberg“, WasserWirtschaft, 10/2017.

[Solare Wärmenetze für Baden-Württemberg, 2015], Studie im Rahmen von SOLNET BW, verfasst von Steinbeis Forschungsinstitut Solites, AGFW, IER Stuttgart, Hamburg-Institut, KEA Baden-Württemberg, Stuttgart, Juni 2015

[Stadtwerke Kiel, 2019]: „Ortstermin: Kohleausstieg im Kieler Wärmenetz“; Energiedepesche 3/2019; S. 26- 27

[Statistisches Landesamt, 2021]: Treibhausgasemissionen um 8,7% gesunken. Pressemitteilung vom 14.7.2021

[UM BW, 2021]: T. Kelm, M. Walker: Erneuerbare Energien in Baden-Württemberg 2020. Erste Abschätzung, Stand April 2021, herausgegeben vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.

[Windatlas Baden-Württemberg, 2019], AL-PRO GmbH & Co. KG Großheide, im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2019.

Impressum

Herausgeber:

Plattform Erneuerbare Energien
Baden-Württemberg e.V.

Meitnerstraße 1
70563 Stuttgart

Telefon: +49 (0) 711 7870-309

E-Mail: info@erneuerbare-bw.de

Website: www.erneuerbare-bw.de

-  /PlattformEEBW
-  /PlattformEEBW
-  /PlattformEEBW

Autoren: Dr. Joachim Nitsch, Magdalena Magosch

Publikationen als pdf:

Diese Broschüre kann auf www.erneuerbare-bw.de kostenlos geladen werden.

Stand: Oktober 2021

Haftungsausschluss

Die Inhalte der vorliegenden Studie wurden von den Autoren nach bestem Wissen und Kenntnisstand zusammengestellt. Trotz sorgfältiger Prüfung kann für die inhaltlichen Quellen, deren Richtigkeit und Vollständigkeit keine Haftung oder Gewähr übernommen werden.

Gender-Disclaimer

Ausschließlich zum Zweck der besseren Lesbarkeit wird in der vorliegenden Studie auf die geschlechtsspezifische Schreibweise verzichtet. Alle personenbezogenen Bezeichnungen in der Publikation sind somit geschlechtsneutral zu verstehen.