

Bericht über die Projektionen von Treibhausgasemissionen und deren Auswirkungen auf das Erreichen der Klimaschutzziele für Baden-Württemberg sowie der Sektorziele nach § 16 KlimaG BW

Klimaschutz- und Projektionsbericht Baden-Württemberg 2024

Von:

Dr. Jan Steinbach, Jana Deurer, Johannes Haller, Eftim Popovski, Alexandra Decker
IREES GmbH - Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien, Karlsruhe

Malte Bei der Wieden, Luca Lena Jansen, Dr. Veit Bürger, Franziska Flachsbarth,
Dr. Klaus Hennenberg, Lorenz Moosmann, Dr. Sylvie Ludig, Dr. Mirjam Pfeiffer, Margarethe Scheffler, Marc Stobbe, Kirsten Wiegmann
Öko-Institut, Freiburg, Darmstadt, Berlin

Dr. Heike Brugger, Dr. Tobias Fleiter, Dr. Michael Krail, Dr. Tim Mandel, Dr. Matthias Rehfeldt, Dr. Songmin Yu
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe

Ort, Datum:

Karlsruhe, den 11.07.2024

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	IV
Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse	V
Kernindikatoren.....	XIV
1 Einleitung.....	17
2 Methodischer Ansatz.....	19
2.1 Prozess der Projektionserstellung.....	19
2.2 Definition und Abgrenzung der Sektoren.....	20
2.3 Methodischer Ansatz für die Emissionsprojektion	21
2.3.1 Allgemeines Vorgehen.....	21
2.3.2 Rahmendaten.....	22
2.3.3 Energiewirtschaft.....	23
2.3.4 Industrie	26
2.3.5 Verkehr.....	32
2.3.6 Gebäude	34
2.3.7 Landwirtschaft.....	35
2.3.8 Abfallwirtschaft und Sonstiges	36
2.3.9 Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (LULUCF).....	37
2.4 Überblick über die berücksichtigten Instrumente.....	38
2.5 Durchführung von Sensitivitätsanalysen	44
3 Gesamtergebnisse.....	46
3.1 Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Baden-Württemberg.....	46
3.2 Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Baden-Württemberg bei Annahme eines vorzeitigen Kohleausstiegs und Wasserstoffanstieg durch Zubau wasserstofffähiger Erdgaskraftwerke.....	48
4 Energiewirtschaft	51
4.1 Zentrale Rahmendaten	51
4.2 Projektion.....	52
4.3 Instrumentenbewertung	65
4.4 Wirkung nationaler und europäischer Maßnahmen auf die Emissionen Baden-Württembergs.....	69
4.4.1 Unsicherheiten bei der Projektion.....	70
4.4.2 Maßnahmen zur Erreichung der Emissionsminderungsziele	71

5	Industrie	72
5.1	Zentrale Rahmendaten.....	72
5.2	Projektion	72
5.3	Instrumentenbewertung.....	81
6	Verkehr.....	82
6.1	Zentrale Rahmendaten.....	82
6.2	Projektion	82
6.3	Instrumentenbewertung.....	86
7	Gebäude	89
7.1	Zentrale Rahmendaten.....	89
7.2	Projektion	89
7.3	Instrumentenbewertung.....	97
8	Landwirtschaft	101
8.1	Zentrale Rahmendaten.....	101
8.2	Projektion	101
8.3	Instrumentenbewertung.....	106
9	Abfallwirtschaft und Sonstiges.....	108
9.1	Zentrale Rahmendaten.....	108
9.2	Projektion	108
9.3	Instrumentenbewertung.....	110
10	Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF).....	112
10.1	Zentrale Rahmendaten.....	112
10.2	Projektion	112
10.3	Instrumentenbewertung.....	118
11	Exkurs: Kritische Einordnung der Ergebnisse vor dem Hintergrund des Sondergutachtens des Expertenrates für Klimafragen für den nationalen Projektionsbericht.....	119
	Literaturverzeichnis	121
	Anhang: Inputdaten	124
	Anhang: Modellbeschreibungen	126

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung der Treibhausgasemissionen und Projektionen für die Jahre 2030 und 2040 in Baden-Württemberg	VI
Abbildung 2: Übersichtsdarstellung der Methodik des Berichtes mit Projektionen von THG-Emissionen für Baden-Württemberg 2024 für den Industriesektor	28
Abbildung 3: Projektion der Entwicklung CCS-Anwendung in der Zementindustrie in Baden-Württemberg	31
Abbildung 4: Entwicklung der Treibhausgasemissionen und ihre Projektion für die Jahre 2030 und 2040 in Baden-Württemberg (ohne LULUCF)	46
Abbildung 5: Entwicklung der Treibhausgasemissionen und ihre Projektion für die Jahre 2030 und 2040 in Baden-Württemberg für alle Sektoren zusammen mit LULUCF	47
Abbildung 6: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Baden-Württemberg seit 1990 mit Projektionen für 2030 und 2040 und Sektorziele nach KlimaG BW	48
Abbildung 7: Gegenüberstellung der Entwicklung der Treibhausgasemissionen in den Projektionen für 2030 und 2040 und der Berücksichtigung eines vorzeitigen Kohleausstiegs und H ₂ -Einstiegs in Deutschland	49
Abbildung 8: Bilanzierungsgrenze der Treibhausgasemissionen des Sektors Energiewirtschaft	51
Abbildung 9: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Baden-Württemberg im Sektor Energiewirtschaft	53
Abbildung 10: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Baden-Württemberg im Sektor Energiewirtschaft nach Anwendungen bzw. Energieträger	53
Abbildung 11: Energieträgerspezifische THG-Entwicklung für Baden-Württemberg und Deutschland im Vergleich	54
Abbildung 12: Sensitivitätsrechnungen zu Kohleausstieg und H ₂ -Einstieg in Deutschland und Baden-Württemberg	59
Abbildung 13: Sensitivitätsrechnungen zu Kohleausstieg in Deutschland und Baden-Württemberg	62
Abbildung 14: Sensitivitätsrechnungen zu H ₂ -Einstieg in Deutschland und Baden-Württemberg	63
Abbildung 15: Entwicklung des Endenergiebedarfs im Sektor Industrie zwischen 2021 und 2040	73
Abbildung 16: Entwicklung der energiebedingten Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie zwischen 2021 und 2040	74
Abbildung 17: Entwicklung des Endenergiebedarfs im Sektor Industrie nach Branchen zwischen 2021 und 2040	75

Abbildung 18: Entwicklung der CO ₂ -Abscheidung an Zementwerken zwischen 2020 und 2050.....	76
Abbildung 19: Entwicklung der prozessbedingten Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie zwischen 2021 und 2040	77
Abbildung 20: Entwicklung der Emissionen der F-Gase zwischen 2021 und 2040	78
Abbildung 21: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Baden-Württemberg im Sektor Industrie.....	80
Abbildung 22: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Baden-Württemberg im Sektor Verkehr	83
Abbildung 23: Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Energieträger in Baden-Württemberg im Sektor Verkehr	85
Abbildung 24: Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Verkehrsmittel in Baden-Württemberg im Sektor Verkehr	85
Abbildung 25: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Baden-Württemberg im Sektor Gebäude.....	90
Abbildung 26: Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser	91
Abbildung 27: Jährlich installierte Wärmeversorgungssysteme im 5-Jahres-Durchschnitt	93
Abbildung 28: Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Geräte und Prozesse nach Anwendungen	94
Abbildung 29: Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Geräte und Prozesse nach Energieträger	95
Abbildung 30: Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser unter konsequenter Umsetzung der Wärmepläne.....	96
Abbildung 31: Jährlich installierte Wärmeversorgungssysteme im 5-Jahres-Durchschnitt unter konsequenter Umsetzung der Wärmepläne.....	97
Abbildung 32: Bewertung der Netto-Wirkung von Instrumenten im Gebäudesektor.....	98
Abbildung 33: Verteilschlüssel der Wirkung nationaler Instrumente nach Baden-Württemberg	100
Abbildung 34: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Baden-Württemberg im Sektor Landwirtschaft.....	102
Abbildung 35: Entwicklung der landwirtschaftlichen Treibhausgasemissionen nach Quellgruppen (2021 bis 2040).....	103
Abbildung 36: Entwicklung des Tierbestands in Baden-Württemberg nach Tierarten	104
Abbildung 37: Entwicklung der Stickstoffausbringung in Baden-Württemberg	105
Abbildung 38: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Baden-Württemberg im Sektor Abfallwirtschaft.....	109

Abbildung 39: Entwicklung der Emissionen der Abfallwirtschaft nach Subsektoren ..	110
Abbildung 40: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Baden-Württemberg im Sektor LULUCF	113
Abbildung 41: Treibhausgasbilanz der Waldfläche für die Sensitivitäten.....	117
Abbildung 42: Sensitivitätsanalyse zur Treibhausgasbilanz im LULUCF-Sektor auf Basis von Sensitivitäten für die Waldmodellierung.....	118
Abbildung 43: Modelldarstellung PowerFlex	129
Abbildung 44: Modelldarstellung ASTRA-M	130
Abbildung 45: Struktur des Simulationsmodells Invert/ee-Lab	132
Abbildung 46: Struktur der hinterlegten Gebäudetypologie in Invert/ee-Lab.....	133
Abbildung 47: Modellierung der Gebäudeeigentümer als Investor-Agenten.....	134
Abbildung 48: Schematische Darstellung der Modellierung von Politikinstrumenten in Invert-Agents	135

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Entwicklung der Treibhausgasemission in Baden-Württemberg zwischen 1990 und 2040 im Vergleich mit den Zielen des KlimaG BW.....	XIV
Tabelle 2: Vergleich der Sektorziele im KlimaG BW und im Klimaschutzgesetz des Bundes für 2030.....	XV
Tabelle 3: Wesentliche Rahmendaten auf Bundesebene	XVI
Tabelle 4: Sektorziele für das Jahr 2030 im Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetz Baden-Württemberg und im nationalen Klimaschutzgesetz	17
Tabelle 5: Zentrale Rahmendaten für die Projektion der Treibhausgasemissionen	22
Tabelle 6: Verteilschlüssel der nationalen Energieträgernutzungsentwicklung auf Baden-Württemberg.....	30
Tabelle 7: Instrumente der Projektionen.....	38
Tabelle 8: Absolute und relative Emissionsminderungen der Sensitivitäten zu Kohleausstieg und Kraftwerksstrategie für Baden-Württemberg gegenüber der Projektion des PB-2024 heruntergebrochen auf Baden-Württemberg, Deutschland und Europa	58
Tabelle 9: Quantifizierung der Emissionsminderungswirkung der Landesinstrumente durch Differenzbildung zwischen kontrafaktischem Szenario und Referenz	66
Tabelle 10: Wirkung nationaler und europäischer Emissionsminderungsmaßnahmen der Energiewirtschaft auf Baden-Württemberg.....	70
Tabelle 11: Wirkung der bewerteten Instrumente im Industriesektor	81
Tabelle 12: Entwicklung der Treibhausgasemissionen (in kt) nach Verkehrsträger	84
Tabelle 13: Wirkung der bewerteten Instrumente im Verkehrssektor in kt CO ₂ äq.	87
Tabelle 14: Emissionsminderungen der Einzelinstrumente im Sektor Landwirtschaft	106
Tabelle 15: Emissionsminderungen der Einzelinstrumente im Abfallsektor	111
Tabelle 16: Entwicklung der Flächenkulisse in Baden-Württemberg zwischen 1990 und 2040.....	114
Tabelle 17: Entwicklung der Treibhausgasemission in Baden-Württemberg zwischen 1990 und 2040	114
Tabelle 18: Annahmen zur Modellierung von Sensitivitäten im Wald.....	116
Tabelle 19: Endenergiebedarf Industrie national nach Branche und Energieträger 2021	124
Tabelle 20: Endenergiebedarf Industrie in Baden-Württemberg nach Branche und Energieträger 2021	125

Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse

Hinweise zur Projektion

Es ist wichtig zu betonen, dass Projektionen nicht als genaue Vorhersagen für die kommenden Jahre interpretiert werden sollten. Bei Projektionen werden Modelle verwendet, die auf einer langfristigen und plausiblen Entwicklung der Treibhausgasemissionen basieren, unter Berücksichtigung der Bedingungen und Annahmen zum Zeitpunkt der Modellierung. Besondere Ereignisse und unerwartete, kurzfristige Veränderungen, die nach Beginn der Modellierung eintreten, können methodisch nicht vollständig oder nur begrenzt berücksichtigt werden. Diese wurden teilweise durch Annahmen abgebildet. Daher sollten die Ergebnisse der Projektionen für die nahe Zukunft stets im Zusammenhang mit dem Zeitpunkt ihrer Erstellung betrachtet werden. Die Projektion der Treibhausgasemissionen für Baden-Württemberg sind im Zeitraum Februar 2024 bis Juni 2024 erstellt worden. Dabei setzt diese auf den Projektionen des nationalen Projektionsberichtes 2024 auf. Der nationale Projektionsbericht ist im Zeitraum März bis Mai 2024 erstellt worden. Die Modellierung für die nationale Projektion der Treibhausgasemissionen erfolgte im Zeitraum September 2023 bis Februar 2024. Darüber hinaus ist zu beachten, dass langfristige Szenarien bis zum Jahr 2040 grundsätzlich mit Unsicherheiten behaftet sind. Die ermittelte Wirkung einzelner Instrumente kann in Abhängigkeit der getroffenen Annahmen und der zugrundeliegenden Methodik unterschiedlich abgeschätzt werden.

Der vorliegende Bericht stellt eine Projektion von Treibhausgasemissionen und deren Auswirkungen auf das Erreichen der Klimaschutzziele für Baden-Württemberg für die Jahre 2030 und 2040 dar.

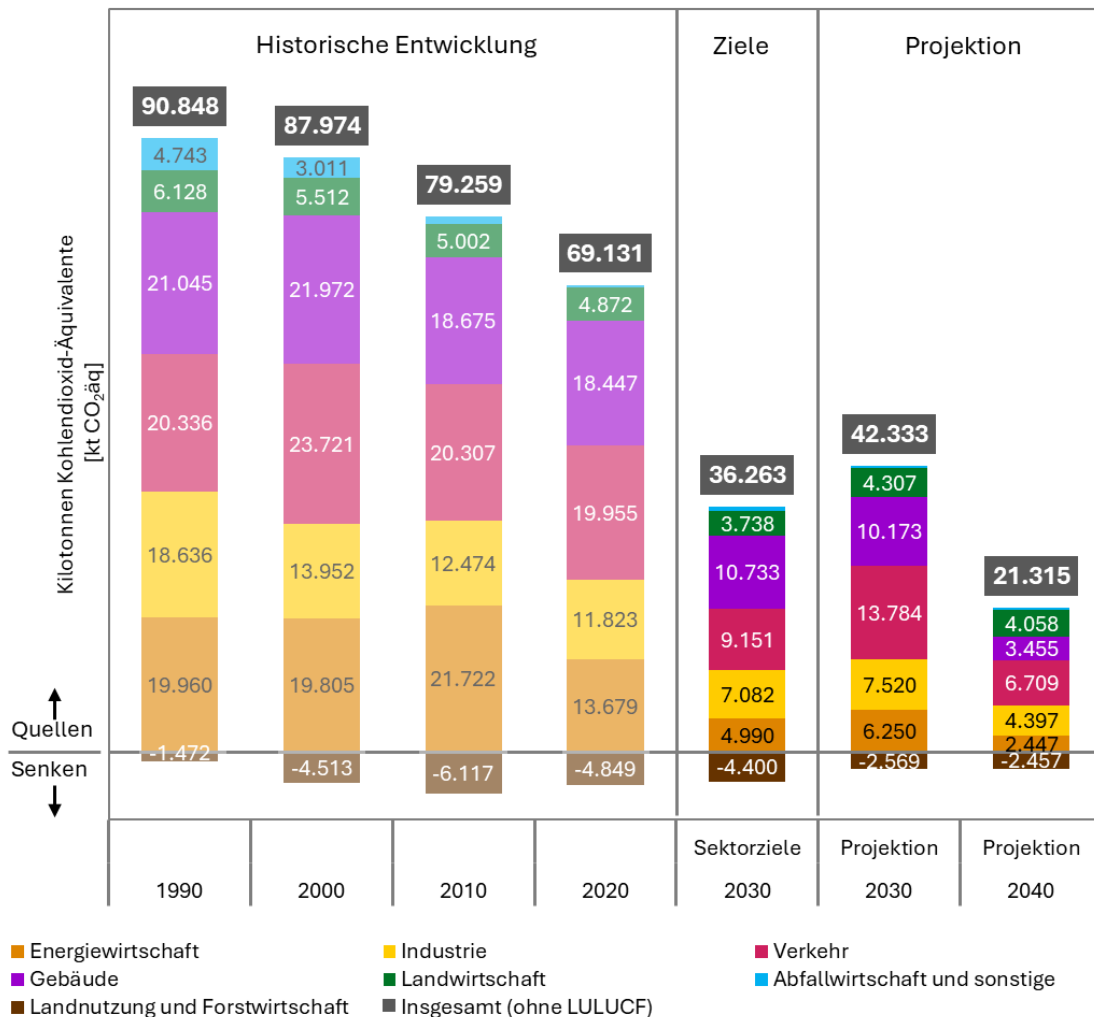
Grundlage ist das Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetz (KlimaG BW), welches im Jahr 2013 verabschiedet und zuletzt im Jahr 2023 novelliert wurde. Das KlimaG BW sieht die Reduktion von Treibhausgasemissionen um mindestens 65 % im Zeitraum 1990 bis 2030 und die Netto-Treibhausgasneutralität bis 2040 vor. Für 2030 wurden zudem Sektorziele formuliert; für 2040 besteht bisher nur das Gesamtziel. Im Vergleich zum Klimaschutzgesetz auf Bundesebene (KSG) verfolgt Baden-Württemberg damit ambitioniertere Ziele. Das KSG sieht zwar auch eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um mindestens 65 % bis zum Jahr 2030 vor, die dafür zu schließende Ziellücke ist aber deutlich geringer. Die Treibhausgasneutralität auf Bundesebene ist erst für das Jahr 2045 vorgesehen.

Ergebnisse der Projektion der Treibhausgasemissionen in Baden-Württemberg

Für das Jahr 2030 wird eine Reduktion der Treibhausgasemissionen auf rund 42.334 kt CO₂äq projiziert (Abbildung 4). Dies entspricht einem Rückgang von 53 % gegenüber dem Jahr 1990. Das im KlimaG BW gesetzte Reduktionsziel von 65 % bis 2030 (36.263 kt CO₂äq) wird damit um 6.071 kt CO₂äq verfehlt. Bis zum Jahr 2040 reduzieren sich die projizierten Treibhausgasemissionen auf rund 21.315 kt CO₂äq. Die angestrebte Netto-Treibhausgasneutralität wird somit mit den aktuellen Instrumenten nicht erreicht. Grundlage für die Projektion ist dabei das sogenannte „Mit-Maßnahmen-Szenario“ des nationalen Projektionsberichtes 2024 und die dort unterstellten Rahmenbedingungen und

nationale Instrumente¹. Die Projektion berücksichtigt zudem alle landesspezifischen Instrumente, die bis zum April 2024 ausreichend klar und verbindlich definiert waren.

Abbildung 1: Entwicklung der Treibhausgasemissionen und Projektionen für die Jahre 2030 und 2040 in Baden-Württemberg



Mit Bezug auf die im KlimaG BW definierten Sektorziele 2030 ergibt sich in der Projektion eine Zielverfehlung der Sektoren Energiewirtschaft, Industrie, Verkehr und Landwirtschaft sowie Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF).

- Die Energiewirtschaft trägt in Baden-Württemberg mit ca. 1.300 kt CO₂äq zur Überschreitung bei, da zwei baden-württembergische Steinkohlekraftwerke gemäß den bisherigen Ausstiegsplänen nach dem Kohleverstromungsbeendigungsgesetz auf Bundesebene erst nach 2030 abgeschaltet werden und für eine vom Land initiierte sowie von der EnBW angestrebte vorzeitige Beendigung der

¹ Harthan et al. (2024). Technischer Anhang der Treibhausgas-Projektionen 2024 für Deutschland (Projektionsbericht 2024). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/projektionen_technischer_anhang_0.pdf#page=25&zoom=100,91,94

Kohleverstromung in Baden-Württemberg entsprechende Rahmenbedingungen auf Bundesebene noch ausstehen.

- In der Industrie wird das Sektorziel knapp überschritten – die Zielverfehlung 2030 beträgt rund 400 kt CO₂äq. Aufgrund der industriellen Struktur in Baden-Württemberg ist der maßgebliche Hebel die Substitution von Erdgas – hierfür spielt die Umsetzung direkter Elektrifizierungspotentiale mit bereits verfügbaren Technologien die größte Rolle. Dazu sind Förderprogramme auf Bundes- und Landesebene und Bemühungen um den Ausbau der elektrischen Infrastruktur an den Industriestandorten wichtig.
- Im Verkehrssektor wird, wie auf nationaler Ebene, das Ziel deutlich verfehlt. Die Ziellücke 2030 beträgt rund 4.600 kt CO₂äq. Das deutliche Verfehlen des 15 Mio. Ziels für Elektrofahrzeuge auf der Bundesebene trägt ebenso zur Verfehlung bei wie die durch den Sanierungsbedarf auf der Schiene erschwerte Verlagerung auf klimafreundliche Verkehrsmittel.
- In der Landwirtschaft resultiert eine Zielverfehlung von knapp 600 kt CO₂äq. Die Maßnahmen von Bund und Land haben in diesem Sektor insgesamt nur einen sehr geringen Minderungsbeitrag, insbesondere im Bereich für die Tierhaltung fehlen gezielte Minderungsmaßnahmen.
- Der LULUCF-Sektor erreicht 2030 eine um 1.831 kt CO₂äq geringere Senkenleistung als im KlimaG BW vorgesehen. Dies resultiert vor allem aus einer geringen Senkenleistung im Wald, da für die Projektion der Waldentwicklung mittlere bis hohe natürliche Störungen und eine erhöhte Holzentnahme im Zuge des nötigen Waldumbaus angenommen werden.

Der Gebäudesektor und der Sektor Abfallwirtschaft erreichen gemäß der Projektion die Sektorziele 2030.

- Im Gebäudesektor wird das Ziel in der Projektion knapp übererfüllt. Insbesondere mit Blick auf die Restemissionen im Jahr 2040 und die langen Reinvestitionszyklen sind jedoch auch bereits vor 2030 weitere Maßnahmen erforderlich. Dabei bestehen Unsicherheiten in der Projektion insbesondere mit Bezug auf die Dynamik beim Heizungstausch und die Geschwindigkeit beim Wandel zu erneuerbaren Wärmeversorgungssystemen.
- In der Abfallwirtschaft konnten hohe Reduktionen bereits in der Vergangenheit erreicht werden. Das Sektorziel wird damit deutlich übererfüllt. Allerdings sind die Minderungspotenziale in dem Sektor weitestgehend ausgeschöpft.

Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse der einzelnen Sektoren

Nach heutigem Stand erreicht der **Sektor Energiewirtschaft** das Emissionsminderungsziel im Zieljahr 2030 nicht. Die baden-württembergischen Treibhausgasemissionen der Energiewirtschaft werden sich in der Projektion bis 2030 auf 6.250 kt CO₂äq redu-

zieren, was eine Überschreitung um 1.260 kt CO₂äq bedeutet. Die Netto-Treibhausgasneutralität bis 2040 würde innerhalb des Sektors Energiewirtschaft mit den bisher verabschiedeten Instrumenten nicht erreicht. In der Projektion für 2040 wurden Restemissionen in Höhe von 2.447 kt CO₂äq ermittelt, wovon noch gut 500 kt CO₂äq der Erdgasverstromung entstammen.

Ebenso wie im nationalen Projektionsbericht 2024 konnte im vorliegenden baden-württembergischen Bericht die Kraftwerksstrategie der Bundesregierung ebenso wie ein vollständiger Kohleausstieg bis 2030 in Baden-Württemberg trotz der Ankündigungen der EnBW noch nicht berücksichtigt werden, da die entsprechenden politischen Beschlüsse auf Bundesebene noch nicht vorliegen. Dies ist die wesentliche Ursache für die Zielverfehlung der Energiewirtschaft im Jahr 2030. Die Kohlekraftwerke verursachen gemäß Projektion in Baden-Württemberg im Jahr 2030 noch Emissionen in Höhe von 1.541 kt CO₂äq.

Um die Auswirkungen des Kohleausstiegs und die Umsetzung der Kraftwerksstrategie auf die Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Energiewirtschaft zu quantifizieren, sind im Rahmen des vorliegenden Berichts weitere Untersuchungen (sogenannte Sensitivitätsrechnungen) durchgeführt worden. Ein Kohleausstieg wird wahrscheinlich mit dem Zubau wasserstofffähiger Erdgaskraftwerke (H₂-ready Erdgaskraftwerke) verbunden sein. Hierzu ist es im Rahmen der Kraftwerksstrategie der Bundesregierung vorgesehen, bis zum Jahr 2030 H₂-ready Erdgaskraftwerke zu errichten, die für eine Übergangszeit mit Erdgas betrieben werden. Durch die Stilllegung von Kohlkraftwerken sinken die Treibhausgasemissionen signifikant, gleichzeitig kommen jedoch auch Treibhausgasemissionen durch neue Kraftwerke hinzu, solange diese mit Erdgas betrieben werden. Für die Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Baden-Württemberg wird es dann entscheidend sein, wie viel Kraftwerksleistung zugebaut wird und wie diese Kraftwerke betrieben werden. In der Sensitivitätsrechnung, die den Effekt eines vollständigen Kohleausstiegs und den Zubau wasserstofffähiger Erdgaskraftwerke bis 2030 untersucht, wird angenommen, dass die neuen Kraftwerke strommarktgetrieben eingesetzt werden und damit hohe Nutzungsstunden aufweisen. Die in dieser Sensitivitätsrechnung resultierenden Treibhausgasemissionen für den Sektor Energiewirtschaft belaufen sich auf 5.452 kt CO₂äq im Jahr 2030. Die Ziellücke wird damit deutlich verringert, das Sektorziel 2030 wird unter diesen Annahmen um 462 kt CO₂äq überschritten. Diese und andere Sensitivitätsrechnungen verdeutlichen, dass die Einhaltung des Sektorziels für die Energiewirtschaft von einem Kohleausstieg vor dem Jahr 2030 abhängt. Zudem kommt es auf die Lokalisierung und das Einsatzregime der wasserstofffähigen Erdgaskraftwerke an. Diese neuen, hocheffizienten Kraftwerke verdrängen die Stromerzeugung von älteren Erdgaskraftwerken auf europäischer Ebene, die höhere spezifische CO₂-Emissionen aufweisen. Entsprechende CO₂-Einsparungen werden nicht in Baden-Württemberg, sondern insbesondere auf europäischer Ebene sichtbar.

Der **Industriesektor** umfasst Treibhausgasemissionen aus der Bereitstellung von Prozesswärme (energiebedingt), Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb von Industriekraftwerken und der Nutzung von fluorierten Treibhausgasen, bauwirtschaftlichen Verkehr/Industriegeräte und prozessbedingte Treibhausgasemissionen. Zwischen 2021 und 2030 (1990: 18.636 kt CO₂äq) sinken diese in der Projektion von 12.009 kt CO₂äq auf 7.520 kt CO₂äq. Das Sektorziel 2030 nach KlimaG BW (7.082 kt CO₂äq) wird damit

in der Projektion knapp verfehlt. Im Jahr 2040 verbleiben 4.397 kt CO₂äq, womit der Sektor keinen ausreichenden Beitrag zu einer sektorübergreifenden Netto-Treibhausgasneutralität in der Projektion liefert.

Wichtigste Hebel zur Reduktion von Treibhausgasemissionen in der Industrie sind:

- Brennstoffwechsel in der Erzeugung von Prozesswärme vorrangig durch Elektrifizierung und potenziell – aber in der Projektion kaum relevant – durch Wasserstoffnutzung in geeigneten Anwendungen,
- die Abscheidung sonst nicht vermeidbarer prozessbedingter Treibhausgasemissionen aus der Verarbeitung nichtmetallischer Mineralien und deren Speicherung oder langfristige Bindung bzw. Nutzung in Produkten sowie
- die fortgesetzte Steigerung von Energieeffizienzmaßnahmen.

Im Zuge der Umstellung der Prozesswärme und der Transformation der Energiewirtschaft werden darüber hinaus fossil betriebene Industriekraftwerke ersetzt.

Diese Vermeidungshebel werden vorrangig durch nationale Instrumente adressiert, deren Wirkung in der Projektion auf Baden-Württemberg übertragen wird. Hierzu wird auf den nationalen Projektionsbericht verwiesen. Jedoch besitzt auch das Land relevante Handlungsspielräume, um die Transformation der Industrie zur Klimaneutralität voranzubringen. Die als quantifizierbar eingeschätzten, derzeitigen Instrumente auf Landesebene führen zu zusätzlichen Einsparungen in Höhe von rund 500 kt CO₂äq. Weitere Instrumente ermöglichen die Wirkung der nationalen Instrumente durch Information und Beratung in einer Größenordnung von weiteren 250 kt CO₂äq im Jahr 2030.

Die aus dem nationalen Projektionsbericht abgeleitete Wirkung der Instrumente ist voraussetzungsreich – dies überträgt sich auf die projizierte Entwicklung in Baden-Württemberg. Auf Landesebene können Voraussetzungen geschaffen werden, um die Wirksamkeit nationaler Instrumente zu erhöhen. Dazu gehört, die Elektrifizierung der Prozesswärme durch Erhöhung elektrischer Anschlussleistung an Standorten mit entsprechendem Bedarf schnell und zugänglich umzusetzen. Dies würde den Zugriff auf Förderprogramme, wie z.B. die Klimaschutzverträge, für die betroffenen Unternehmen erleichtern bzw. überhaupt erst ermöglichen.

Der aktuelle Instrumentenmix konzentriert sich vorrangig auf Energieeffizienz und Technologiewechsel. Diese Strategien sind notwendig und müssen für eine wahrscheinliche Zielerreichung weiter ausgebaut – also mit stärkeren und neuen Instrumenten gestützt – werden. Weitere Nachhaltigkeitsstrategien (Kreislaufwirtschaft, Suffizienz, Materialeffizienz) sind noch deutlich unterrepräsentiert. Obwohl in der Forschung umstritten ist, ob diese für die Zielerreichung zwingend notwendig sind, können sie jedenfalls den Bedarf an hochwertigen Energieträgern – und damit die Kosten der Transformation – deutlich senken.

Die Nutzung von Wasserstoff für die Bereitstellung von Prozesswärme auf hohem Temperaturniveau und eine stärkere Verbreitung von Technologien zur CO₂-Abscheidung und -Nutzung bzw. -Speicherung (*Carbon Capture, Utilisation and Storage*; CCUS) sind weitere Vermeidungshebel, die unter den angenommenen Rahmendaten nicht voll ausgeschöpft werden. Für die Wasserstoffnutzung in den in Baden-Württemberg wichtigen

Industriezweigen wären vor allem plausible Pfade mit deutlich geringeren Preisen erforderlich. Allerdings bestehen in diesen Anwendungen oft auch Potentiale zur direkten Elektrifizierung, deren Umsetzung mit Effizienzgewinnen einhergehen kann. Für die weitere Verbreitung von CCUS wird insbesondere höhere Planungssicherheit in Bezug auf Regulierung und Infrastrukturverfügbarkeit benötigt.

Im Sektor **Verkehr** werden mit Hilfe der Instrumente des Mit-Maßnahmen-Szenarios des nationalen Projektionsberichts und der ausgewählten Landesinstrumente für Baden-Württemberg die Treibhausgasemissionen bis 2030 auf 13.784 kt CO₂äq reduziert. Dies entspricht einer Minderung in Höhe von 32 % gegenüber 1990, womit das Reduktionsziel des KlimaG BW für den Sektor Verkehr für 2030 um 4.632 kt CO₂äq verfehlt wird. Nach der Projektion erreicht der Verkehrssektor bis 2040 keine Klimaneutralität. Im Jahr 2040 verbleiben noch Emissionen in Höhe von 6.709 kt CO₂äq. Im Vergleich zum nationalen Projektionsbericht sind die Projektionen der Treibhausgasemissionen für Baden-Württemberg mit den Landesinstrumenten marginal besser. Einer der Hauptgründe dafür ist der leicht höhere Anteil von Elektrofahrzeugen im Bestand in Baden-Württemberg im Vergleich zum Bund.

Als zentrale landesspezifische Instrumente sind in der Projektion fünf Landesmaßnahmen berücksichtigt worden. Diese haben einen Anteil von 727 kt CO₂äq an den Minderungen der Treibhausgasemissionen im Sektor Verkehr im Land. Als besonders wirksam hat sich anhand der modellbasierten Abschätzungen die Maßnahme zur Aufwertung von Straßen und Plätzen (kostendeckendes Parken) erwiesen. Die Maßnahme „Pendeln und Dienstreisen klimafreundlicher machen“ und „Durchgängige und attraktive Radverkehrsnetze schaffen“ entfalten zusammen in etwa die gleiche Wirkung wie das Parkraummanagement. Instrumente mit starker Zielwirkung auf der Bundesebene sind dabei vorrangig alle, die eine beschleunigende Wirkung auf den Markthochlauf der Elektromobilität aufweisen. Ohne einen beschleunigten Markthochlauf der Elektromobilität sind die Sektorziele im Verkehr bis 2030 nicht zu erreichen. Durch die Einstellung des Umweltbonus fehlt auf der Bundesebene ein wichtiges Instrument zur Beschleunigung des Markthochlaufs. Auch im Bereich des Aufbaus der öffentlichen Ladeinfrastruktur befindet sich der Bund nicht auf Kurs, was den Markthochlauf der Elektromobilität ebenfalls begrenzt. Dafür müssen die Voraussetzungen durch den Ausbau der Ladeinfrastruktur geschaffen werden. Rückkopplungen mit dem Energiesektor sind dabei zu beachten, damit die Elektrifizierung des Verkehrssektors nicht zu höheren Emissionen im Energiesektor führt. Der Ausbau erneuerbarer Energien ist auch hierfür zentral. Außerdem sollte der Umweltverbund, also Wege zu Fuß, per Fahrrad und mit öffentlichen Verkehrsmitteln, weiter gestärkt werden und eine kontinuierliche Finanzierung des Deutschlandtickets gewährleistet werden.

Die Treibhausgasemissionen im **Gebäudesektor** reduzieren sich in der Projektion unter den getroffenen Annahmen zu Rahmendaten und unter Berücksichtigung der bundesweiten und landesspezifischen Instrumente bis zum Jahr 2030 auf 10.173 kt CO₂äq. Die in der Projektion ermittelte Reduktion beträgt damit 52 % gegenüber 1990. Das Sektorziel 2030 von 49 % gegenüber 1990 wird damit um ca. 560 kt CO₂äq unterschritten. Auf Bundesebene wird gemäß dem nationalen Projektionsbericht dagegen eine Zielverfehlung im Gebäudesektor prognostiziert, wobei der prozentuale Rückgang der Treibhausgasemissionen für den Zeitraum 1990 bis 2030 mit rund 68 % für ganz Deutschland

deutlich höher ausfällt. Im Jahr 2040 verbleiben in Baden-Württemberg noch 3.455 kt CO₂äq, wodurch kein ausreichender Beitrag zur angestrebten sektorübergreifenden Netto-Treibhausgasneutralität geleistet werden kann. Wesentliche Treiber der Reduktion sind, wie im nationalen Projektionsbericht, die Vorgaben des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) und die Förderinstrumente im Rahmen der Bundesförderung für effiziente Gebäude. Weiterhin bedingen auch die Reduktion der Heizgradtage durch Klimawandeleffekte und steigende CO₂-Preise im Rahmen des Brennstoff-Emissionshandelsgesetzes bzw. des EU-Emissionshandels ab 2027 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen.

Wesentlicher Grund für die Abweichung gegenüber dem nationalen Projektionsbericht ist die Verteilung der Bundesförderung für effiziente Gebäude, die bisher einen überproportionalen Abruf der Fördermittel in Baden-Württemberg gegenüber anderen Bundesländern zeigen. Im Jahr 2021 flossen 169 Euro pro Einwohner nach Baden-Württemberg gegenüber 116 Euro im Bundesdurchschnitt. Unter der Annahme gleichverteilter Emissionseinsparungen je Fördereuro und der Erhaltung des bislang bestehenden Verteilungsschlüssels der Fördermittel ergeben sich höhere Minderungen in Baden-Württemberg. Außerdem wirken die Anforderungen an neuinstallierte Heizungen aus dem Erneuerbaren-Wärme-Gesetz (EWärmeG) des Landes, bis es je nach Ausweisungsentscheidung der Wärmepläne spätestens ab Mitte 2028 durch das GEG abgelöst wird. Der frühere Start einer kommunalen Wärmeplanung und die bereits vorliegenden Wärmepläne flankieren diese Entwicklung.

Unsicherheiten bestehen insbesondere darin, ob die aus der Modellierung resultierenden Dynamiken beim Heizungstausch und der Sanierungsaktivität in den kommenden Jahren auch tatsächlich so eintreffen werden und ob beim Heizungstausch der Wandel zu Wärmepumpen bereits frühzeitig einsetzt. Die aktuellen Marktdaten aus dem ersten Quartal 2024 lassen zumindest derzeit noch nicht auf einen grundlegenden Wandel schließen und zeigen weiterhin eine Dominanz der fossilen Heizkessel bei den Marktanteilen. Die aus der Modellierung resultierende Dynamik beruht insbesondere auf den Reinvestitionszyklen der Gebäude. Sofern es jedoch aufgrund von Unsicherheiten oder fehlenden Informationen in einem hohen Maß zu Verschiebungen bei den Investitionen im Gebäudesektor (Attentismus) kommt, wäre eine Zielerreichung unwahrscheinlich. Weitere Voraussetzungen kommen hinzu: Neben der durchgehenden Verfügbarkeit von Fördermitteln sind dabei auch fundierte Informationen für Gebäudeeigentümer relevant, als auch klare Signale an die Marktakteure (Fachkräfte, Technologiehersteller) zu den technischen Möglichkeiten einer klimaneutralen Wärmeversorgung. Eine Zielerreichung 2030 ist nur möglich, wenn sich im Markt in signifikantem Maß eine Umstellung von verkauften Gas- und Heizölkesseln zu erneuerbaren Wärmeversorgungstechnologien und Fernwärme ergibt. Wenn jedoch umgekehrt die Marktakteure, trotz der Anforderungen im GEG, weiterhin in hohem Maß den Einbau von fossil betriebenen Heizungen empfehlen und dabei nicht über die zukünftige Energiepreisentwicklung (CO₂-Preis, erforderliche Umstellung auf Biomethan) transparent informieren, ist mit einem signifikant höheren Anteil von Gasheizungen in der Neuinstallation zu rechnen.

Auch wenn das Sektorziel 2030 erreicht wird, ist es für eine Zielerreichung 2040 aufgrund der langen Reinvestitionszyklen im Gebäudebereich erforderlich, dass weitere Maßnahmen bereits vor 2030 erfolgen. So werden Wärmeversorgungssysteme, die im

Zeitraum bis 2030 installiert werden, zum großen Teil auch noch im Jahr 2040 im Bestand sein. Ein ähnlicher Zusammenhang gilt für das Ambitionsniveau von Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle. Die bis 2040 in den Sanierungszyklus kommenden Gebäude werden nur einmal saniert.

Im Sektor **Landwirtschaft** sinken die Treibhausgasemissionen in der Projektion um 10 % gegenüber 2021 auf 4.307 kt CO₂äq. Damit wird das Sektorziel des KlimaG BW um 569 kt CO₂äq verfehlt. Vorgesehen ist ein Ziel für 2030 von 3.738 kt CO₂äq für den Sektor. Die meisten Maßnahmen des Klima-Maßnahmen-Registers (KMR) sind flankierende Maßnahmen, denen keine direkte Wirkung zugerechnet werden kann. Direkte Wirkungen entfalten die Förderung der ökologischen Landwirtschaft und Maßnahmen der 2. Säule der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP), die zur Verringerung der Stickstoffdüngung beitragen. Die übrigen Minderungen gehen auf Maßnahmen des Bundes sowie auf Entwicklungen zurück, die nicht im Zusammenhang mit der Klimaschutzpolitik stehen. So resultiert der größte Teil der Minderungen (rund 200 kt CO₂äq) aus einer Verringerung des Tierbestands aufgrund der allgemeinen Marktentwicklung für Tierhaltung.

Die Projektion bis 2040 ergibt Emissionen in Höhe von 4.058 kt CO₂äq. Dies zeigt, dass sich mit derzeitig beschlossenen Instrumenten die jährliche Minderung von Treibhausgasemissionen verlangsamt und deutlich hinter den aktuellen Minderungsraten zurückbleibt. Für die Zielerreichung 2030 und auch für die Zeit danach sind daher weitere Anstrengungen, etwa im Bereich der Methanemissionen aus der Tierhaltung, notwendig. Dies erfordert eine Ambitionssteigerung für den Sektor sowohl im Bund als auch im Land. Außerdem resultieren die derzeit größten Minderungen aus marktbedingt getriebenen rückläufigen Tierbeständen. Das ist eine aus Klimaschutzsicht günstige Entwicklung, die jedoch bei geänderter Nachfrage auch reversibel sein kann und Emissionsverlagerungen außer Acht lässt. Hier sollte für die Zukunft ausgearbeitet werden, wie eine Absicherung dieser Reduktionen gelingen kann. Auch Fragen des Verbraucher- und Konsumverhaltens sollten dabei in den Blick genommen werden. Hierbei sollte ein breiter Instrumentenmix zur Förderung einer gesunden, überwiegend pflanzenbasierten Ernährung zum Einsatz kommen.

Die Treibhausgasemissionen im Sektor **Abfallwirtschaft und Sonstiges** reduzieren sich bis 2030 deutlich. Gründe dafür sind, neben dem bereits seit 2005 in Kraft befindlichen Verbot der Ablagerung von unbehandelten organischen Abfällen, die Fortführung der Maßnahmen zur Deponiebelüftung, der optimierten Gaserfassung sowie die Reduktion der Lebensmittelabfälle. Der Zielwert für den Sektor Abfallwirtschaft in Baden-Württemberg wird für das Jahr 2030 deutlich übererfüllt: während das Sektorziel bei 569 kt CO₂äq liegt, werden laut Projektion im Jahr 2030 nur 300 kt CO₂äq erwartet, bis zum Jahr 2040 reduzieren sich die Emissionen dann weiter bis auf 246 kt CO₂äq. Eine komplette Reduktion der Emissionen des Abfallsektors auf Null ist aufgrund von kontinuierlich ablaufenden biologischen Prozessen nicht möglich.

Im Sektor **Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF)**² werden Treibhausgasemissionen berichtet, die an die Landnutzung gebunden sind. In Baden-Württemberg lagen im Jahr 2021 die Treibhausgasemissionen für den LULUCF-

² LULUCF = land use, land use change and forestry. Aufgrund einer fehlenden Datengrundlage auf Landesebene wird der Holzproduktspeicher nicht in der Projektion für Baden-Württemberg berücksichtigt.

Sektor bei -5.171 kt CO₂äq. Somit war der LULUCF-Sektor in Summe eine Senke³, denn auf der Waldfläche wurde mit -6.114 kt CO₂äq deutlich mehr an CO₂ gebunden, als auf anderen Flächen wie Ackerland, Grünland und Feuchtgebieten Treibhausgase als Quelle emittiert wurden. In der Projektion nehmen die Treibhausgasemissionen aus diesen Quellen in den Jahren 2030 und 2040 nur leicht ab. Für den Wald liegen hohe Unsicherheiten vor, wie stark sich Veränderungen durch den Klimawandel und veränderte Holzentnahmen auswirken. Für die Projektion der Entwicklung der Waldsenke in Baden-Württemberg wurde ein Szenario mit mittleren bis hohen natürlichen Störungen und einer erhöhten Holzentnahme im Zuge des nötigen Waldumbaus angenommen. Der LULUCF-Sektor ist damit nur eine Senke von -2.569 kt CO₂äq im Jahr 2030 und von -2.457 kt CO₂äq im Jahr 2040. Das im KlimaG BW für den LULUCF-Sektor gesetzte Ziel von -4.400 kt CO₂äq im Jahr 2030 wird um 1.831 kt CO₂äq verfehlt. Somit besteht auch im Hintergrund der langfristigen Wirkungszeiträume im LULUCF-Sektor dringender Handlungsbedarf, damit die Senkenziele noch erreicht werden können.

³ Der Begriff „Senke“ steht im LULUCF-Sektor für negative Emissionen, also einer Netto-Festlegung bzw. Bindung von CO₂.

Kernindikatoren

Tabelle 1: Entwicklung der Treibhausgasemission in Baden-Württemberg zwischen 1990 und 2040 im Vergleich mit den Zielen des KlimaG BW

Sektor	Einheit	1990	2021	2030	2040
Insgesamt (ohne LULUCF)					
KlimaG BW Ziele	% Minderung			-	-
historische Jahresemissionsmenge	kt CO ₂ äq	90.848	72.334		
Ziel-Jahresemissionsmenge	kt CO ₂ äq			36.263	
Projektion	kt CO ₂ äq		72.834	42.333	21.315
Abweichung Projektion/KlimaG BW*	kt CO ₂ äq		500	6.070	
Minderung ggü. 1990**	% Minderung		-20%	-53%	-77%
Insgesamt (mit LULUCF)					
KlimaG BW Ziele	% Minderung			-65%	-100%
historische Jahresemissionsmenge	kt CO ₂ äq	89.376	67.163		
Ziel-Jahresemissionsmenge	kt CO ₂ äq			31.863	0
Projektion	kt CO ₂ äq		67.677	39.764	18.858
Abweichung Projektion/KlimaG BW*	kt CO ₂ äq		515	7.901	
Minderung ggü. 1990**	% Minderung		-25%	-56%	-79%
Energiewirtschaft					
KlimaG BW Ziel für 2030	% Minderung			-75%	
historische Jahresemissionsmenge	kt CO ₂ äq	19.960	18.581		
Ziel-Jahresemissionsmenge	kt CO ₂ äq			4.990	
Projektion	kt CO ₂ äq		18.663	6.250	2.447
Abweichung Projektion/KlimaG BW*	kt CO ₂ äq		82	1.260	
Minderung ggü. 1990**	% Minderung		-7%	-69%	-88%
Industrie					
KlimaG BW Ziel für 2030	% Minderung			-62%	
historische Jahresemissionsmenge	kt CO ₂ äq	18.636	12.009		
Ziel-Jahresemissionsmenge	kt CO ₂ äq			7.082	
Projektion	kt CO ₂ äq		12.050	7.520	4.397
Abweichung Projektion/KlimaG BW*	kt CO ₂ äq		40	438	
Minderung ggü. 1990**	% Minderung		-36%	-60%	-76%
Verkehr					
KlimaG BW Ziel für 2030	% Minderung			-55%	
historische Jahresemissionsmenge	kt CO ₂ äq	20.336	20.127		
Ziel-Jahresemissionsmenge	kt CO ₂ äq			9.151	
Projektion	kt CO ₂ äq		20.463	13.784	6.709
Abweichung Projektion/KlimaG BW*	kt CO ₂ äq		336	4.632	
Minderung ggü. 1990**	% Minderung		-1%	-32%	-67%
Gebäude					
KlimaG BW Ziel für 2030	% Minderung			-49%	
historische Jahresemissionsmenge	kt CO ₂ äq	21.045	16.473		

Ziel-Jahresemissionsmenge	kt CO ₂ äq			10.733	
Projektion	kt CO ₂ äq		16.516	10.173	3.455
Abweichung Projektion/KlimaG BW*	kt CO ₂ äq		43	-560	
Minderung ggü. 1990**	% Minderung		-22%	-52%	-84%
Landwirtschaft					
KlimaG BW Ziel für 2030	% Minderung			-39%	
historische Jahresemissionsmenge	kt CO ₂ äq	6.128	4.803		
Ziel-Jahresemissionsmenge	kt CO ₂ äq			3.738	
Projektion	kt CO ₂ äq		4.803	4.307	4.058
Abweichung Projektion/KlimaG BW*	kt CO ₂ äq		0	569	
Minderung ggü. 1990**	% Minderung		-22%	-30%	-34%
Abfallwirtschaft und sonstige					
KlimaG BW Ziel für 2030	% Minderung			-88%	
historische Jahresemissionsmenge	kt CO ₂ äq	4.743	340		
Ziel-Jahresemissionsmenge	kt CO ₂ äq			569	
Projektion	kt CO ₂ äq		340	300	249
Abweichung Projektion/KlimaG BW*	kt CO ₂ äq		-1	-270	
Minderung ggü. 1990**	% Minderung		-93%	-94%	-95%
Landnutzung und Forstwirtschaft					
KlimaG BW Ziel für 2030	Absolut [kt]			-4.400	
historische Jahresemissionsmenge	kt CO ₂ äq	-1.472	-5.171		
Ziel-Jahresemissionsmenge	kt CO ₂ äq			-4.400	
Projektion	kt CO ₂ äq		-5.157	-2.569	-2.457
Abweichung Projektion/KlimaG BW*	kt CO ₂ äq		14	1.831	
Minderung ggü. 1990**	% Minderung		-351%	-175%	-167%
** Alle Werte sind auf ganze Stellen gerundet, daher sind die Werte hier z.T. um eine Stelle abweichend, da hier die genaue Differenz gerundet wurde.					
* für 2021 bez. auf hist. Daten, für 2030 und 2040 auf die Projektionen					

Tabelle 2: Vergleich der Sektorziele im KlimaG BW und im Klimaschutzgesetz des Bundes für 2030

Sektor	Einheit	%	kt CO ₂ äq
Insgesamt (ohne LULUCF)			
KlimaG BW 2023	% Minderung		36.263
Bundes-Klimaschutzgesetz 2021	% Minderung		1.248.500
Insgesamt (mit LULUCF)			
KlimaG BW 2023	% Minderung	-65%	31.863
Bundes-Klimaschutzgesetz 2021	% Minderung	-65%	1.287.200
Energiewirtschaft			
KlimaG BW 2023	% Minderung	-75%	4.990
Bundes-Klimaschutzgesetz 2021	% Minderung	-76%	108.000
Industrie			
KlimaG BW 2023	% Minderung	-62%	7.082
Bundes-Klimaschutzgesetz 2021	% Minderung	-58%	118.000

Verkehr			
KlimaG BW 2023	% Minderung	-55%	9.151
Bundes-Klimaschutzgesetz 2021	% Minderung	-49%	84.000
Gebäude			
KlimaG BW 2023	% Minderung	-49%	10.733
Bundes-Klimaschutzgesetz 2021	% Minderung	-68%	67.000
Landwirtschaft			
KlimaG BW 2023	% Minderung	-39%	3.738
Bundes-Klimaschutzgesetz 2021	% Minderung	-33%	56.000
Abfallwirtschaft und sonstige			
KlimaG BW 2023	% Minderung	-88%	569
Bundes-Klimaschutzgesetz 2021	% Minderung	-91%	4.000
Landnutzung und Forstwirtschaft			
KlimaG BW 2023	Absolut		-4.400
Bundes-Klimaschutzgesetz 2021	Absolut		-25.000

Tabelle 3: Wesentliche Rahmendaten auf Bundesebene

Parameter	Einheit	2024	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Bevölkerung	Mio.	84,7	84,9	85,3	85,2	85,0	84,6	84,1
Bruttoinlandsprodukt								
Absolut	Mrd. € ₂₀₂₂	3.916,7	3.977,2	4.107,5	4.301,9	4.590,6	4.887,2	5.203,0
Prozent ggü. Vorjahr	Prozent	1,3	1,5	0,7	1,1	1,4	1,3	1,3
CO₂-Zertifikatspreis	€ ₂₀₂₂ /EUA	81,9	84,2	122,1	140,2	160,5	169,6	180,9
BEHG-Preis	€ ₂₀₂₂ /t CO ₂	36,4	44,9	101,3	146,5	182,0	209,4	229,9

Quelle: (Mendelevitch *et al.*, 2024)

1 Einleitung

Mit dem Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetz (KlimaG BW), welches im Jahr 2013 verabschiedet und zuletzt im Jahr 2023 novelliert wurde, setzt sich das Land Baden-Württemberg Ziele zur Reduktion von Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen).

Das KlimaG BW sieht die Reduktion von THG-Emissionen um mindestens 65 % im Zeitraum 1990 bis 2030 und die Netto-Treibhausgasneutralität bis 2040 vor. Im Vergleich zum Klimaschutzgesetz (KSG) auf Bundesebene verfolgt Baden-Württemberg damit ambitioniertere Ziele. Das KSG sieht zwar auch eine Reduktion der THG-Emissionen um mindestens 65 % im gleichen Zeitraum vor, jedoch sind die Ausgangssituationen zwischen Bund und Land unterschiedlich. Baden-Württemberg muss in den verbleibenden Jahren bis 2030 eine deutlich höhere Emissionsreduzierung erbringen, da das Emissionsniveau auf Landesebene nach 1990 nicht so stark gesunken ist wie in ganz Deutschland. Bundesweit konnten bereits unmittelbar nach der Deutschen Einheit hohe Emissionsreduktionen in den neuen Bundesländern realisiert werden⁴. Die Treibhausgasneutralität ist auf Bundesebene zudem erst für das Jahr 2045 vorgesehen.

Mit der Novelle des KlimaG BW im Jahr 2023 wurden sektorspezifische Zielmarken bis 2030 gesetzt. Tabelle 4 zeigt die sektorspezifischen Ziele im KlimaG BW und im KSG für das Jahr 2030.

Tabelle 4: Sektorziele für das Jahr 2030 im Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetz Baden-Württemberg und im nationalen Klimaschutzgesetz

Sektor	Zielsetzung Baden-Württemberg (im Vergleich zu 1990)	Zielsetzung im nationalen Klimaschutzgesetz (im Vergleich zu 1990)
Energiewirtschaft	75 %	77 %
Industrie	62 %	57 %
Verkehr	55 %	49 %
Gebäude	49 %	69 %
Landwirtschaft	39 %	31 %
Abfallwirtschaft und Sonstiges	88 %	88 %
Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft	-4.400 kt CO ₂ äq	

Quelle: (Umweltbundesamt, 2023; Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetz Baden-Württemberg (KlimaG BW), 2023)

⁴ Die THG-Emissionen in den neuen Bundesländern sind zwischen 1989 und 1994 um die Hälfte gesunken (UBA, 2020). Die Emissionsminderung in den neuen Bundesländern ist in dem Zeitraum insbesondere auf die geringere Braunkohleverfeuerung in den Kraftwerken und die Modernisierung der Heizungen zurückzuführen.

Die Sektorziele im KlimaG BW wurden in einem Forschungsvorhaben unter Federführung des Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) erstellt. Es wird deutlich, dass die Zielsetzungen im KlimaG BW in einigen Sektoren deutlich höher als im nationalen KSG sind.

Als zentrales Instrument zur Dokumentation aller Klimaschutz-Aktivitäten der Landesregierung dient das Klima-Maßnahmen-Register (KMR). Es bildet die dezentralen, nach Sektoren aufgeteilten Zuständigkeiten innerhalb der Landesregierung in Form eines dynamischen Umsetzungsinstruments ab. Das jeweils sektorverantwortliche Ministerium hat die Aufgabe (ggf. in Zusammenarbeit mit weiteren fachlich zuständigen Ministerien), Maßnahmen zu entwickeln, die dazu geeignet sind, das Sektorziel entsprechend KlimaG BW Anlage 1 zu erreichen.

Zur regelmäßigen Überprüfung der Zielerreichung sowie der Umsetzung und Wirksamkeit der Maßnahmen im KMR und der Strategie zur Anpassung an den Klimawandel sieht § 16 KlimaG BW ein Monitoring vor, bestehend aus:

1. einer jährlichen Klima-Berichterstattung beginnend im Jahr 2023,
2. einem Klimaschutz- und Projektionsbericht beginnend im Jahr 2024 und
3. einem Bericht zur Anpassung an die unvermeidbaren Folgen des Klimawandels, beginnend 2025.

Der vorliegende Bericht stellt dar, wie sich die THG-Emissionen in Baden-Württemberg in den Jahren 2030 und 2040 unter Berücksichtigung der klimapolitischen Instrumente und Annahmen zu Rahmendaten entwickeln könnten und bewertet dabei auch deren Auswirkungen auf das Erreichen der Sektorziele bis 2030 sowie der Klimaschutzziele für Baden-Württemberg für 2030 und 2040. Weiterhin werden die zugrundeliegenden Klimaschutzmaßnahmen bewertet. Dabei sind auch Wirkungsbeiträge und Wechselwirkungen von Klimaschutzmaßnahmen des Bundes bzw. der Europäischen Union (EU) berücksichtigt.

2 Methodischer Ansatz

Das Projekt erfüllt ein Element des Klimaschutz- und Projektionsberichtes nach § 16 Absatz 2 Satz 1 Nummer 2 KlimaG BW. Die Erarbeitung des Teilberichtes „Projektionen von THG-Emissionen und deren Auswirkungen auf das Erreichen der Sektorziele bis 2030 sowie der Klimaschutzziele für Baden-Württemberg für 2030 und 2040“ erfolgt in zwei Schritten.

Zunächst werden die sektorspezifischen Projektionen von THG-Emissionen durchgeführt und die Auswirkungen auf das Erreichen der Sektorziele bis 2030 sowie der Klimaschutzziele für Baden-Württemberg für 2030 und 2040 bewertet. Die Projektion wird für die Nachfragesektoren Energiewirtschaft inklusive Umwandlungssektor, Industrie, Verkehr, Gebäude, den Landwirtschaftssektor, sowie die Abfallwirtschaft und Sonstiges und ebenso für den Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderung & Forstwirtschaft erstellt. Die Projektion der THG-Emissionen für Baden-Württemberg wird auf der Grundlage des nationalen Projektionsberichtes aus dem Jahr 2024 (PB-2024) erstellt (Harthan, *et al.*, 2024) und entspricht dabei dem Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) des PB-2024. Das MMS enthält ausschließlich Politiken und Maßnahmen, die bereits umgesetzt sind oder mit einer Regierungsentscheidung legislativ unterlegt sind. Mithilfe von sektorspezifischen Modellen sowie Rahmen- und Inventardaten wird der PB-2024 auf Baden-Württemberg angepasst. Aufgrund von verschiedenen Unsicherheiten in den Rahmenbedingungen und der Ausgestaltung der Instrumente werden darüber hinaus Sensitivitätsrechnungen durchgeführt, um den Einfluss bestimmter Parameter auf die Projektionen der THG-Emissionen abzuschätzen.

Im zweiten Schritt erfolgt eine Bewertung der Auswirkungen der landesspezifischen Maßnahmen und Instrumente des KMR auf die Klimaschutz- und Sektorziele. Dabei werden die Wechselwirkungen der landesspezifischen Maßnahmen mit Klimaschutzmaßnahmen des Bundes bzw. der EU sowie Aspekte einer verursacherbezogenen Betrachtung berücksichtigt.

2.1 Prozess der Projektionserstellung

Der Prozess für die Projektion der THG-Emissionen umfasst eine Reihe von Schritten, die aufeinander aufbauen.

Zunächst werden die vom Statistischen Landesamt übergebenen Emissions- und Energieverbrauchsdaten aufbereitet und an die Modelle in den verschiedenen Sektoren übergeben. Als Basisjahr wird das Jahr 2021 herangezogen. Dies entspricht auch dem Basisjahr des PB-2024. Die Brennstoffeinsätze sowie Emissionen in den einzelnen Subsektoren werden von den Sektorbearbeitenden zur Kalibrierung ihrer Modelle genutzt. Parallel dazu werden die in der Modellierung berücksichtigten Rahmendaten zusammengestellt. Wie zuvor bereits beschrieben, werden im Wesentlichen die Rahmendaten des PB-2024, wie beispielsweise Energiepreise und CO₂-Preise, berücksichtigt. Zudem werden die quantifizierbaren Instrumente des KMR in einem Instrumentenpapier hinsichtlich der Modellparametrisierung beschrieben.

Auf Basis der abgestimmten Rahmendaten und Instrumente erfolgt im nächsten Schritt die Modellierung in den jeweiligen Sektoren. Das sektorspezifische methodische Vorgehen wird in Kapitel 2.3 beschrieben.

Nach Erstellung der sektorspezifischen Projektionen (Energieeinsätze sowie THG-Emissionen) erfolgt die Zusammenführung der Ergebnisse und die Erstellung der gesamten Emissionsprojektion und der Energiebilanzen in Form einer Gesamtintegration. Das Vorgehen ist an die Integration im Rahmen des PB-2024 mithilfe des Modells ENUSEM angelehnt. Zunächst werden aus den in den verschiedenen Sektoranalysen berechneten Energiedaten die THG-Emissionen bestimmt, indem jeder Energieeinsatz mit einem Brennstoff- und sektorspezifischen Emissionsfaktor multipliziert wird. Dazu werden dieselben Emissionsfaktoren verwendet, die auch vom Umweltbundesamt im nationalen Treibhausgasinventar verwendet werden. Die Emissionen der Treibhausgase Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) werden für jeden Brennstoff und Subsektor separat bestimmt und anschließend als Gesamtemissionen in CO₂-Äquivalenten (CO₂äq) pro Subsektor umgerechnet und dargestellt. Die Emissionen fluorierter Treibhausgase (teilhalogenierte (HFKW) und vollhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (FKW), Schwefelhexafluorid (SF₆) und Stickstofftrifluorid (NF₃)) werden ebenfalls als Gesamtemissionen in CO₂äq dargestellt, da separate Daten für einzelne Gase in Baden-Württemberg nicht zur Verfügung stehen. Die Modelresultate für die Sektoren Landwirtschaft, Abfallwirtschaft und LULUCF werden als CO₂-, CH₄-, und N₂O-Emissionen übermitteln und werden als Gesamtemissionen in CO₂äq pro Subsektor dargestellt. Die Emissionen pro Subsektor werden schließlich integriert, um Gesamtemissionen pro Sektor in CO₂äq zu erhalten. Die modellierten Gesamtemissionen stehen für die Jahre 2030 und 2040 zur Verfügung.

2.2 Definition und Abgrenzung der Sektoren

Die Definition der einzelnen Sektoren dieses Berichtes erfolgt gemäß dem Sektorzuschnitt des nationalen KSG, an dem die Aufteilung der Sektoren im KlimaG BW angelehnt ist. Die folgenden Beschreibungen der Sektoren stammen aus Repenning *et al.*, (2021)

- **Energiewirtschaft:** Die Energiewirtschaft bilanziert die Emissionen aus dem Brennstoffverbrauch der öffentlichen und sonstigen Kraftwerke, der Raffineriekraftwerke sowie die Emissionen aus Öffentlichen Heizwerken zur Erzeugung von Fernwärme. Darüber hinaus umfasst der Sektor Energiewirtschaft die Emissionen von Raffinerief Feuerungen und sonstigen energiewirtschaftlichen Anlagen. Die Emissionen aus Industriekraftwerken sind nicht dem Sektor Energiewirtschaft zuzuordnen. Federführendes Ressort für die Erarbeitung von Maßnahmenvorschlägen ist das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft (UM).
- **Industrie:** Neben industriellen Prozessfeuerungen und Wärmeerzeugungsanlagen sowie Industriekraftwerken sind auch die Emissionen aus Industrieprozessen und Produktverwendung enthalten. Da der Sektor Industrie genauer als Verarbeitendes Gewerbe und Bauwirtschaft definiert ist, sind auch die Emissionen des bauwirtschaftlichen Sonderverkehrs enthalten. Nicht enthalten hingegen sind Raffinerien, Kokeereien und andere Anlagen des Umwandlungssektors. Federführendes Ressort für die Erarbeitung von Maßnahmenvorschlägen ist das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus (WM).

- **Verkehr:** Dieser Sektor umfasst den inländischen Straßen-, Schienen- und Luftverkehr sowie die Binnen- und Küstenschifffahrt. Der internationale Luftverkehr und die Hochseeschifffahrt werden ebenfalls behandelt, allerdings werden deren THG-Emissionen nicht auf die inländischen Emissionen angerechnet, sondern lediglich nachrichtlich ausgewiesen. Sonderverkehre sind teilweise in anderen Sektoren enthalten, so ist der bauwirtschaftliche Verkehr im Industriesektor, der landwirtschaftliche Verkehr und die Fischereischifffahrt im Sektor Landwirtschaft und der Erdgaspipelinetransport in der Energiewirtschaft enthalten. Federführendes Ressort für die Erarbeitung von Maßnahmenvorschlägen ist das Ministerium für Verkehr (VM).
- **Gebäude:** Der Sektor Gebäude umfasst neben der Gebäudewärme auch den Brennstoffeinsatz für die Warmwasserbereitung sowie weiteren Brennstoffeinsatz in Haushalten und im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen. Energieverbräuche landwirtschaftlicher Gebäude (z.B. Gewächshäuser) sind nicht im Sektor Gebäude enthalten, sondern im Sektor Landwirtschaft. Federführendes Ressort für die Erarbeitung von Maßnahmenvorschlägen ist das Ministerium für Landesentwicklung und Wohnen (MLW).
- **Landwirtschaft:** Neben den biologisch-chemischen Emissionen von Tieren und landwirtschaftlichen Böden umfasst dieser Sektor auch die energetischen Emissionen der Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Fischerei. Federführendes Ressort für die Erarbeitung von Maßnahmenvorschlägen ist das Ministerium für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz (MLR).
- **Abfallwirtschaft und Sonstiges:** Dieser Sektor umfasst die Methan- und Lachgas-Emissionen, welche aus der Behandlung und Lagerung von Abfall (Deponierung, Bioabfallbehandlung, mechanisch-biologische Abfallbehandlung (MBA)) sowie der Abwasserbehandlung entstehen. Federführendes Ressort für die Erarbeitung von Maßnahmenvorschlägen ist das UM.
- **Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF):** Dieser Sektor umfasst die Emissionen von Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft. Federführendes Ressort für die Erarbeitung von Maßnahmenvorschlägen ist das MLR.

2.3 Methodischer Ansatz für die Emissionsprojektion

2.3.1 Allgemeines Vorgehen

Die Projektion der THG-Emissionen in Baden-Württemberg wird auf Grundlage des PB-2024 erstellt. Dafür wird im ersten Schritt der PB-2024 auf Baden-Württemberg regionalisiert. Das bedeutet, dass die auf nationaler Ebene projizierten THG-Emissionen in den Jahren 2030 und 2040 anhand von Parametern auf Baden-Württemberg skaliert werden. Dafür werden in den verschiedenen Sektoren unterschiedliche Methoden eingesetzt, die in den folgenden Kapiteln beschrieben werden. Auf Basis des skalierten PB-2024 erfolgt

anschließend eine Bewertung der bundesweiten Politiken und Maßnahmen für den Wirkungsbereich Baden-Württemberg. Darüber hinaus werden die landesspezifischen Instrumente aus dem KMR bewertet.

2.3.2 Rahmendaten

Für die Projektion der THG-Emissionen sind verschiedene exogene Rahmendaten zu berücksichtigen. Dadurch, dass die Projektion für Baden-Württemberg maßgeblich auf dem PB-2024 aufbaut, werden auch im Wesentlichen die Rahmendaten des PB-2024 unterstellt. Dazu zählen insbesondere die Energie- und CO₂-Preise sowie die Entwicklung der spezifischen Wohnfläche.

Darüber hinaus werden auch Rahmendaten für Baden-Württemberg berücksichtigt. Zu nennen sind sozioökonomische Rahmendaten wie die demographische Entwicklung, die Anzahl privater Haushalte und die Verkehrsnachfrage im Personen- und Güterverkehr.

Tabelle 5 4 gibt eine Übersicht über die zentralen Rahmendaten und definiert den Geltungsbereich (Baden-Württemberg vs. Deutschland).

Tabelle 5: Zentrale Rahmendaten für die Projektion der Treibhausgasemissionen

Rahmendaten	Geltungsbereich	Quelle
Energiepreise für Endverbraucher	Deutschland	(Mendelevitch <i>et al.</i> , 2024)
Klimadaten für 2021 als Mittelwert aus 12 PLZ-Regionen	Baden-Württemberg	(Institut Wohnen und Umwelt, 2023)
Entwicklung der Preise für Treibhausgas-Emissionszertifikate im europäischen Emissionshandelssystem (EU-ETS)	Deutschland	(Mendelevitch <i>et al.</i> , 2024)
Entwicklung der CO₂-Preise im Brennstoffemissionshandels-gesetz (BEHG)	Deutschland	(Mendelevitch <i>et al.</i> , 2024)
Baufertigstellungen 2012 bis 2022	Baden-Württemberg	Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (StaLA)
Anzahl privater Haushalte	Baden-Württemberg	StaLA, Destatis
Struktur des Gebäudebestands (Wohn- und Nichtwohngebäude) und Anzahl der Gebäude	Baden-Württemberg	data:NWG: Datenabfrage Nichtwohngebäude Baden-Württemberg Zensus 2011: Gebäudebestand nach Baualtersklassen StaLA (2023): Bestand und Gebäuden und Wohnflächen nach Gebäudetyp 2022
Bevölkerungsentwicklung	Baden-Württemberg	StaLA, Destatis

Fahrzeugbestand und Neuzulassungen nach Antriebsarten	Deutschland und Baden-Württemberg	Kraftfahrtbundesamt (KBA, 2023)
Verkehrs- und/oder Fahrleistung nach Verkehrsmittel	Deutschland und Baden-Württemberg	Verkehr in Zahlen (2023), Destatis und StaLA
Industrieller Energiebedarf nach Branche und Energieträger	Deutschland und Baden-Württemberg	StaLA
Entwicklungspfade des Energiebedarfs des PB-2024 (Industrie)	Deutschland	(Mendelevitch <i>et al.</i> , 2024)
Produktionsmengen Zement, Kalk, Gips	Baden-Württemberg	StaLA

2.3.3 Energiewirtschaft

Für die nationalen Projektionen sowie die Analyse für Baden-Württemberg wurde für die Betrachtung des Energiewirtschaftssektors das Modell PowerFlex des Öko-Instituts genutzt, welches auch bei dem PB-2024 Anwendung findet. Es handelt sich um ein Dispatch-Modell, das den Einsatz der konventionellen Kraftwerke, erneuerbaren Erzeuger, Fernwärmeerzeuger sowie Strom- und Wärme-Flexibilitäten bestimmt. Das modular aufgebaute Modell kann um die Funktionalität von Stilllegungs- und Investitionsentscheidungen erweitert werden. Die regionale Auflösung für die Strommarktmodellierung von PowerFlex ist Deutschland im Stromverbund mit 27 benachbarten Ländern, welche je als ein Knoten dargestellt sind. Das deutsche Stromnetz wird im Vergleich zu den anderen Ländern wesentlich detaillierter modelliert, z.B. mit Kraftwerksblöcken >10 MW als Einzelanlagen.

Das Modell ermittelt den stündlichen Einsatz von konventionellen Kraftwerksblöcken, Anlagen zur erneuerbaren Stromerzeugung, Speichern und flexiblen Verbrauchern. Dieses Ergebnis ist Grundlage für die darauffolgende detaillierte Bestimmung der THG-Emissionen des Sektors Energiewirtschaft. Der Kraftwerkseinsatz erfolgt maßgeblich auf Basis der Grenzkosten der einzelnen Kraftwerke. Zu ihrer Berechnung wurden Brennstoffpreise, Preise für Emissionszertifikate, brennstoffspezifische Emissionsintensitäten sowie kraftwerksblockscharfe Nutzungsgrade verwendet. Die Daten zu den modellierten Kraftwerken wurden aus der etablierten und detaillierten Kraftwerksdatenbank des Öko-Instituts entnommen.

Das Modell berücksichtigt die Interdependenz zwischen der Bereitstellung von Strom- und Fernwärme, indem es explizit die Strom- und Wärmeerzeugung in Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) abbildet. Im PB-2024 wird die modellierte Wärmenachfrage in Wärmenetzen aus anderen Sektoren PowerFlex als Inputparameter übergeben. Die KWK wird durch eine detaillierte Parametrisierung der KWK-Anlagen modelliert mit unterschiedlichen Wirkungsgraden im Kondensations- und KWK-Betrieb und eine angelegte Wärmenachfrage, die sich aus der Modellierung der Nachfragesektoren ergibt.

In der Modellierung können Wasserstoffkraftwerke implementiert werden, die sowohl importierten als auch in Elektrolyseuren inländisch erzeugten Wasserstoff einsetzen können. Die Elektrolyseure sind in dem Modell ebenfalls abgebildet. Ihr Einsatz wird durch eine maximale Leistung begrenzt. Die Wasserstoffkraftwerke und die Elektrolyseure sind durch ein Wasserstoffnetz miteinander verbunden. Ferner wird angenommen, dass im Netz Speicher mit ausreichender Kapazität verfügbar sind, um den Wasserstoff nach Produktion in der Elektrolyseanlage bis zur Nutzung zwischenzuspeichern. Dadurch wird in der Modellierung idealisiert unterstellt, dass Wasserstoff stets verfügbar ist.

PowerFlex ermöglicht eine vollständige Aufteilung aller Brennstoffeinsätze und Emissionen auf die Strom- und Wärmeproduktion. So können einerseits Brennstoffeinsätze entsprechend der Methodik der deutschen Energiebilanz (AG Energiebilanzen (AGEB) 2015) auf Umwandlungseinsatz und Endenergieverbrauch zugeordnet werden, was insbesondere für die korrekte Abbildung von Industriekraftwerken relevant ist. Andererseits ermöglicht die Aufteilung der Brennstoffeinsätze die Ermittlung jahres- und brennstoffspezifischer Emissionsfaktoren für Strom und Wärme. Dazu wird die Finnische Methode verwendet. Die ermittelten Emissionsfaktoren werden in Anlehnung an diese Methode für historische Daten aus der Publikation „Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix“ des Umweltbundesamtes (UBA) berechnet (UBA 2018).

Neben der Bereitstellung von Fernwärme durch Kraftwerke mit KWK kann diese auch durch erneuerbare Energieträger bereitgestellt werden. Im Modell sind als regenerative Wärmeerzeuger Solarthermie, tiefe Geothermie, Großwärmepumpen, Elektrokessel und Abwärme abgebildet. Wärme kann in Großwärmespeichern gespeichert werden. Entsprechend der Ausgestaltung der Maßnahmen wurden für den PB-2024 installierte Leistungen und Speicherkapazitäten prognostiziert.

PowerFlex hat im PB-2024 brennstoffspezifische Wärmebilanzräume aufgestellt, zu denen erneuerbare Wärmeerzeuger mit einer bestimmten Leistung beitragen konnten.

Die Projektionen von THG-Emissionen für Baden-Württemberg basieren auf dem PB-2024, in dem die Wärmenetze als brennstoffspezifische Wärmebilanzräume abgebildet werden, die durch erneuerbare Wärmeerzeuger ergänzt werden. Die erneuerbaren Wärmeerzeuger werden ex-post auf Baden-Württemberg heruntergebrochen. Emissionsrelevant sind aber die fossilen Wärmeerzeugungseinheiten, welche regional zugeordnet werden können.

PowerFlex umfasst Pump- und Batteriespeicher in allen abgebildeten Ländern. Die Speicher sind dabei nach Einspeicher- und Ausspeicherleistung (in MW) sowie der Speicherkapazität (in MWh) getrennt. Speicherwasserkraftwerke, die mittels einer Turbinenleistung, eines Speichervolumens und einer Zuflusszeitreihe charakterisiert sind, gestalten ihre jährliche Stromerzeugung zeitlich flexibel. In Abhängigkeit von der installierten Leistung von Wind an Land (Wind onshore) und Photovoltaik (PV) werden netzverfügbare Großbatteriespeicher dimensioniert und modelliert. PV-Batteriespeicher entstehen gekoppelt an die Leistung von Aufdach-PV-Anlagen und wurden in der Modellierung des PB-2024 ebenso wie die Großbatteriespeicher strommarktgetrieben eingesetzt.

PowerFlex berücksichtigt zeitlich flexible Nachfrager, auch im Rahmen der Sektorenkopplung. Dies umfasst die zeitflexible Stromnachfrage von batterie-elektrischen Fahrzeugen, ermöglicht durch die fahrzeuginternen Batterien, die zeitflexible Nachfrage von Elektrolyseuren im Bereich *Power-to-Gas* (PtG) und *Power-to-Liquid* (PtL), ermöglicht durch Wasserstoffspeicher, sowie ein Modul zum Demand-Side-Management, in dem im Wesentlichen Wärmepumpen flexibilisiert werden. Die flexiblen Nachfrager sind so modelliert, dass eine Nachfrageabsenkung zu einem anderen, im Rahmen der gesetzten Restriktionen frei wählbaren Zeitpunkt durch eine entsprechende Nachfrageerhöhung ausgeglichen werden muss. Somit können sie preissetzend wirken.

Eine detailliertere Modelldescription sowie weitere Ausführungen der Inputdaten findet sich im Anhang Modellbeschreibungen.

Für den Sektor Energiewirtschaft können aus den berechneten Ergebnissen des PB-2024 die CO₂-Emissionen Baden-Württembergs abgeleitet werden. In den Projektionsjahren 2030 und 2040 werden in Baden-Württemberg etwa 50 Einzelanlagen im Modell abgebildet, deren Emissionen direkt zuordenbar sind. Anlagen kleiner 10 MW laufen im PB-2024 als brennstoffspezifische Aggregate, sofern keine detaillierteren Informationen vorlagen. Deren Emissionen sind auf Baden-Württemberg mithilfe geeigneter Verteilungsschlüssel herunterzubrechen. Hier wird vorwiegend mit installierten Leistungen des Marktstammdatenregisters, für Abfall aber mit Bevölkerungsdaten und dem Bruttoinlandsprodukt (BIP) gearbeitet. Die Emissionszuordnung wird an den historischen Daten des Jahres 2021 kalibriert und, sofern verfügbar, an den Daten des Jahres 2022 erprobt.

Für die Abschätzung des Ausbaus erneuerbarer Energien (EE) des Landes Baden-Württemberg werden die Zubauziele des Landes berücksichtigt. Dabei wird ebenso wie im PB-2024 angenommen, dass die Zubauziele auf Bundesebene erreicht werden. Unter Berücksichtigung der Bestandsanlagen und Potentialflächen des Energieatlas Baden-Württemberg⁵ werden die Zubauanlagen Baden-Württembergs nach einem ökonomisch optimierten Verteilalgorithmus regionalisiert. Nach erfolgter Regionalisierung können unter Einbeziehung der ERA-5 Wetterdaten (Hersbach *et al.*, 2023) EE-Einspeiseprofile für Baden-Württemberg projiziert werden.

Dieses Vorgehen wird für die Projektion der THG-Emissionen Baden-Württembergs auf Basis des MMS-Szenarios des PB-2024 angewendet. Ebenso wird verfahren, um die Wirkung nationaler und europäischer Maßnahmen, die als Quantifizierungen im Rahmen des PB-2024 erstellt wurden, auf Baden-Württemberg zu bestimmen. Mit identischem Vorgehen können dann auch die Wirkungen von Landesinstrumenten auf die THG-Emissionen Baden-Württembergs, Deutschlands und der EU quantifiziert werden. Die Landesinstrumente verstärken insbesondere als flankierende Instrumente die Instrumente auf nationaler Ebene. Es wird angenommen, dass die Wirkung der Landesinstrumente im PB-2024 bereits in vollem Umfang berücksichtigt wurde. Eine Unterteilung der Wirkung auf Landes- und Bundesinstrumente ist nicht eindeutig möglich. Aufgrund dessen

⁵ Energieatlas Baden-Württemberg, <https://www.energieatlas-bw.de/>

wird bei der Quantifizierung mit Bandbreiten gearbeitet: Zum einen wird die Instrumentenwirkung vollständig den Landesinstrumenten und zum anderen vollständig den Bundesinstrumenten zugewiesen.

Ausbau Wärmenetze

Auf Grundlage von Erfahrungen in Wärmeplanungsprojekten und daraus genannten Rückmeldungen von lokalen Energieversorgern sowie aus Daten der geförderten Wärmenetze in der Vergangenheit wird als Schätzung eine maximale Ausbaugeschwindigkeit für Wärmenetze von 0,03 Trassenkilometer pro 1.000 Einwohner und Jahr angenommen. Für Baden-Württemberg ergibt sich daraus ein maximaler Ausbau von etwa 330 km pro Jahr. Der jährliche Gesamtausbau von Wärmenetzen in Deutschland ist nicht bekannt, allerdings kann neben den Erfahrungen aus der Wärmeplanung auch der Blick auf die geförderten Netze als Indikator dienen. Aus der Auswertung der Förderung von geförderten Wärmenetzen im Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) und dem Programm EE-Premium der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) für die Jahre 2009 bis 2016 zeigt sich ein Peakzubau von 2.000 Trassenkilometern bzw. 0,025 Trassenkilometer pro 1.000 Einwohner⁶, was der angenommen Größenordnung für Baden-Württemberg entspricht. Aufgrund der vergleichsweise hohen Dichte an Wärmenetzen in Baden-Württemberg und der frühzeitigen Durchführung der Wärmeplanung wird dies als realistisch ambitionierte Ausbaudynamik gesehen. Der Ausbau von Wärmenetzen wird allgemein durch lange Planungsphasen, die Koordination mit anderen Bauprojekten, Fachkräftemangel und begrenzte Akzeptanz für Bauvorhaben eingeschränkt.

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurden die Ergebnisse der vorliegenden kommunalen Wärmepläne (KWP) zum Ausbau bzw. Neubau von Wärmenetzen als auch zur Transformation bestehender Netze, von 141 Kommunen basierend auf Daten der Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg (KEA-BW) zusammengestellt und in der Modellierung in den Sektoren Gebäude und Energie berücksichtigt. In der Sensitivität wird angenommen, dass die Wärmenetze in Baden-Württemberg gemäß den Angaben der KWPs ohne Verzögerung umgestellt und ausgebaut werden. In diesem Szenario würde die Ausbaugeschwindigkeit für neue Fernwärmetrassen durchschnittlich bei etwa 600 km pro Jahr bis 2045 liegen.

Für die Gebäudemodellierung mit dem Modell Invert/ee-Lab (siehe Anhang Modellbeschreibungen) ist die projizierte Nachfrage in den Jahren 2030 und 2040 relevant. Für die Projektion der THG-Emissionen der Energiewirtschaft ist darüber hinaus auch die installierte Leistung nach Technologien bedeutend.

2.3.4 Industrie

Mit derzeitigen Jahresemissionen von knapp 10.000 kt CO₂äq ist eine Transformation des Industriesektors Voraussetzung, um die Klimaziele zu erreichen. Dabei kommt der Zementindustrie aufgrund der hohen Emissionen die mit Abstand größte Bedeutung zu. Andere Branchen wie Papiergewerbe, Fahrzeugbau und Maschinenbau, die beim Ener-

⁶ Bei 80,5 Mio. Einwohnern in Deutschland im Jahr 2012

gieverbrauch und ihrer wirtschaftlichen Bedeutung in Baden-Württemberg zu den wichtigsten Branchen gehören, weisen im Vergleich niedrigere THG-Emissionen auf. Das Erreichen der Klimaneutralität im Jahr 2040 verlangt allerdings in allen Branchen grundlegende Umstellungen der Energieträgernutzung und teilweise der Prozesstechnik.

Die Modellierung des Industriesektors umfasst die Nutzung von Energie in der Industrie, sowie die industriellen Prozesse und deren prozessbedingten THG-Emissionen. Da eine Bottom-up Modellierung⁷ (entsprechend der Methodik des PB-2024) mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen nicht möglich ist, basiert die verwendete Methodik auf einer Übertragung der nationalen Entwicklungspfade auf Baden-Württemberg.

Dabei gilt es, die Struktur der Industrie in Baden-Württemberg zu berücksichtigen – darin vor allem jene Unterschiede zur Struktur des nationalen Industriesektors, die bei einer Übertragung der Ergebnisse des PB-2024 zu Verzerrungen führen könnten. Der methodische Ansatz berücksichtigt dies systematisch, konkret sind aber drei Zusammenhänge hervorzuheben:

Erstens, in Baden-Württemberg existiert keine Primärstahlherstellung. Da diese aber auf der nationalen Ebene sowohl bezüglich der Energieträgernutzung (Kohle und Kohlederivate, perspektivisch Wasserstoff) als auch der Politikinstrumente (wichtige Projekte von gemeinsamem europäischem Interesse (*Important Projects of Common European Interest*; IPCEI), EU-Innovationsfond, potenziell Klimaschutzverträge) ein zentraler Akteur der Transformation ist, müssen die Übertragungen auf Baden-Württemberg Wirkungen dieser Branche auf die Projektionen ausschließen⁸. Zweitens, die industrielle Struktur Baden-Württembergs ist allgemein stärker von weiterverarbeitenden Industriezweigen denn jenen der Grundstoffindustrie geprägt. Daraus entsteht eine (vergleichsweise) geringere Energieintensität. Da im PB-2024 zwischen energieintensiven und nicht-energieintensiven Branchen abweichende wirtschaftliche Entwicklungen angenommen wurden, muss sich auch diese Entwicklung in der Übertragung auf Baden-Württemberg wiederfinden⁹. Drittens, auf Treibhausgasemissionsebene ist eine hohe Bedeutung prozessbedingter Emissionen festzustellen¹⁰. Hierin sind vor allem die Zementwerke – und damit die möglichen Emissionsvermeidungspfade für den Bericht mit Projektionen von THG-Emissionen für Baden-Württemberg von besonderer Bedeutung.

Für die Erstellung der Szenarien des nationalen Projektionsberichtes im Industriesektor wird das Sektormodell FORECAST als Grundlage genutzt. Das Modell wurde bereits für ähnliche Fragestellungen und Studien für Baden-Württemberg (Forschungsvorhaben

⁷ Also eine Abbildung der Industrie als Summe kleinteiliger Elemente, üblicherweise industrielle Prozesse bzw. deren Produkte.

⁸ So entfällt in Deutschland 23 % der Endenergienutzung der verarbeitenden Industrie auf die Metallerzeugung (Eisen und Stahl). In Baden-Württemberg entfallen auf diese Branche nur 3 % der Endenergienutzung.

⁹ So entfällt in Deutschland 24 % der Endenergienutzung der verarbeitenden Industrie auf die nicht- bzw. weniger energieintensiven Branchen Fahrzeugbau, Gummi- und Kunststoffverarbeitung, Maschinenbau, Metallbearbeitung, sonstige chemische Industrie und sonstige Wirtschaftszweige. In Baden-Württemberg entfallen auf diese Branchen 53 % der Endenergienutzung.

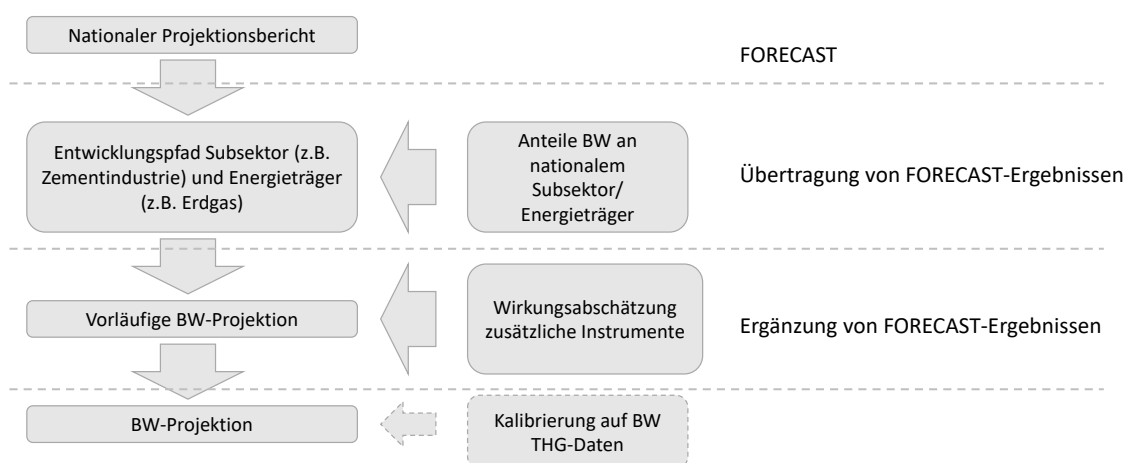
¹⁰ Während die kombinierten prozessbedingten THG-Emissionen aus der Zement- und Kalkproduktion in Deutschland in 2021 10 % der Gesamtbilanz des Industriesektors ausmachten, waren dies in Baden-Württemberg 23 % (2.795 von 12.050 kt CO₂äq).

„Sektorziele 2030 und klimaneutrales Baden-Württemberg 2040“ (Kelm *et al.*, 2023)) sowie die Bundesebene (unter anderem frühere Projektionsberichte, Langfristszenarien des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)¹¹) genutzt. Das Modell ist entsprechend mit aktuellen Daten kalibriert und kurzfristig einsatzfähig. Es ermöglicht eine hohe Kompatibilität zu anderen Studien auf nationaler Ebene. Das Modell berücksichtigt wichtige Vermeidungsoptionen wie Material- und Energieeffizienz, Prozesswechsel, Brennstoffwechsel, Kreislaufwirtschaft und CO₂-Abscheidung, -Nutzung und -Speicherung (CCU/S) mit hoher technischer und struktureller Auflösung. Die Methodik der Projektion für Baden-Württemberg basiert auf der Modellstruktur von FORECAST, nutzt das Modell aber nicht für eine Neurechnung auf Landesebene.

Aus diesen Besonderheiten und den generellen Zielsetzungen lassen sich drei Anforderungen an die Methodik für den Bericht mit Projektionen von THG-Emissionen für Baden-Württemberg 2024 im Industriesektor ableiten:

1. Abbildung der **strukturellen Unterschiede** des Industriesektors zwischen Deutschland und Baden-Württemberg
 - a. Darin insbesondere: Stahlindustrie, Bedeutung Zementherstellung, Energieintensität
2. Gleichzeitig **Beibehaltung der grundsätzlichen Transformationspfade** (je Branche und Energieträger) und damit Anschlussfähigkeit an PB-2024 (Ergebnisstruktur und Instrumentenwirkung).
3. Übertragung der nationalen Projektion aus dem PB-2024 auf Baden-Württemberg in **hinreichendem Detailgrad**, um die zusätzliche Wirkung von Landesinstrumenten abzubilden.

Abbildung 2: Übersichtsdarstellung der Methodik des Berichtes mit Projektionen von THG-Emissionen für Baden-Württemberg 2024 für den Industriesektor



Die gewählte Methodik erfüllt diese Anforderungen (Abbildung 2). Als Basis der Entwicklungspfade wird der industrielle Endenergiebedarf des PB-2024 auf der Ebene der Bran-

¹¹ <https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/>

chen (z.B. Metallerzeugung, Maschinenbau...) und der Energieträger (Erdgas, Elektrizität, Kohle...) herangezogen. Diese Matrix (Tabelle 6, Tabelle 19 im Anhang) wird im Basisjahr 2021 mit der identisch aufgebauten Matrix Baden-Württembergs (Tabelle 20 im Anhang) verglichen.

Aus diesem Vergleich ergibt sich ein Verteilschlüssel (Tabelle 6)¹² für die veränderten Energieträgernutzungen der Branchen. So können Trends der nationalen Projektion (z.B. Elektrifizierung der Prozesswärme, Erdgasausstieg) an die strukturellen Besonderheiten Baden-Württembergs angepasst werden (Erfüllung Anforderungen 1 und 2).

Ein bedeutender Nachteil dieser Methode ist, dass die Projektionen für Baden-Württemberg sehr strukturkonservativ erfolgen – eine Verschiebung der Bedeutung einzelner Branchen (absolut oder relativ zum PB-2024) ist nicht berücksichtigt. Eine solche Modellierung benötigt vermutlich einen Bottom-up Ansatz und wäre auch dann auf starke Annahmen angewiesen.

¹² Der Verteilschlüssel wird auf Verzerrungen geprüft und in einzelnen Bereichen angepasst, die auf Inkompatibilität der verwendeten Datensätze hinweisen. So besteht bei sehr kleinen Energiemengen (sonstige Erneuerbare Energien) in einigen Fällen in Baden-Württemberg eine höhere unterstellte Verwendung als in ganz Deutschland. In diesen Fällen wird der Anteil der Energieträgernutzung an den Anteil der Branchen in BW relativ zu Deutschland angeglichen. Dies erfolgt ebenso mit Energieträgern, die im Basisjahr nicht vorhanden sind, in der Projektion aber wichtig werden (wie Umweltwärme und Wasserstoff).

Tabelle 6: Verteilschlüssel der nationalen Energieträgernutzungsentwicklung auf Baden-Württemberg

Verteilschlüssel der nationalen Energieträgernutzungsentwicklung auf Baden-Württemberg	Andere Energieträger	Biomasse	Braunkohle	Erneuerbare Energien	Fernwärme	Gase	Mineralöle	Steinkohlen	Strom	Umweltwärme	Wasserstoff	Gesamtergebnis
Ernährung und Tabak	0%	7%	0%	40%	16%	8%	18%	2%	10%	9%	9%	9%
Fahrzeugbau	0%	<u>23%</u>	0%	12%	28%	22%	61%	0%	24%	<u>23%</u>	<u>23%</u>	23%
Gewinnung von Steinen und Erden	0%	41%	8%	59%	39%	16%	15%	0%	19%	<u>16%</u>	<u>16%</u>	16%
Glas u. Keramik	0%	20%	0%	0%	8%	4%	2%	0%	7%	<u>5%</u>	<u>5%</u>	5%
Grundstoffchemie	1%	0%	0%	0%	3%	1%	1%	0%	2%	<u>1%</u>	<u>1%</u>	1%
Gummi- u. Kunststoffwaren	0%	8%	0%	39%	10%	14%	23%	0%	15%	<u>15%</u>	<u>15%</u>	15%
Maschinenbau	0%	15%	0%	68%	36%	29%	49%	2%	28%	<u>29%</u>	<u>29%</u>	29%
Metallbearbeitung	0%	11%	0%	18%	14%	16%	34%	0%	22%	<u>20%</u>	<u>20%</u>	20%
Metallerzeugung	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	6%	<u>1%</u>	<u>1%</u>	1%
Nichteisen-Metalle, -gießereien	0%	0%	0%	0%	33%	10%	16%	17%	6%	<u>8%</u>	<u>8%</u>	8%
Papiergewerbe	6%	20%	4%	<u>15%</u>	9%	16%	14%	22%	16%	<u>15%</u>	<u>15%</u>	15%
Sonstige chemische Industrie	0%	21%	0%	51%	10%	20%	19%	0%	16%	<u>16%</u>	<u>16%</u>	16%
Sonstige Wirtschaftszweige	0%	16%	0%	30%	17%	18%	32%	0%	18%	<u>17%</u>	<u>17%</u>	17%
Verarbeitung von Steinen und Erden	14%	<u>12%</u>	9%	11%	2%	7%	20%	5%	13%	<u>12%</u>	<u>12%</u>	12%
Gesamtergebnis	8%	18%	6%	52%	9%	8%	19%	1%	12%	9%	9%	9%

Lesehilfe: In der Branche "Glas und Keramik" betrug der Anteil der Energienachfrage in Baden-Württemberg 2021 5 % der nationalen Energienachfrage. Der Anteil der Nachfrage nach Erdgas in dieser Branche in Baden-Württemberg entsprach 4 % der nationalen Nachfrage nach Erdgas in dieser Branche. Achtung: Aufsummierung der Anteile in jedweder Richtung ergibt keine Gesamtsumme.

Unterstrichen: Setzungen, siehe Fußnote 12

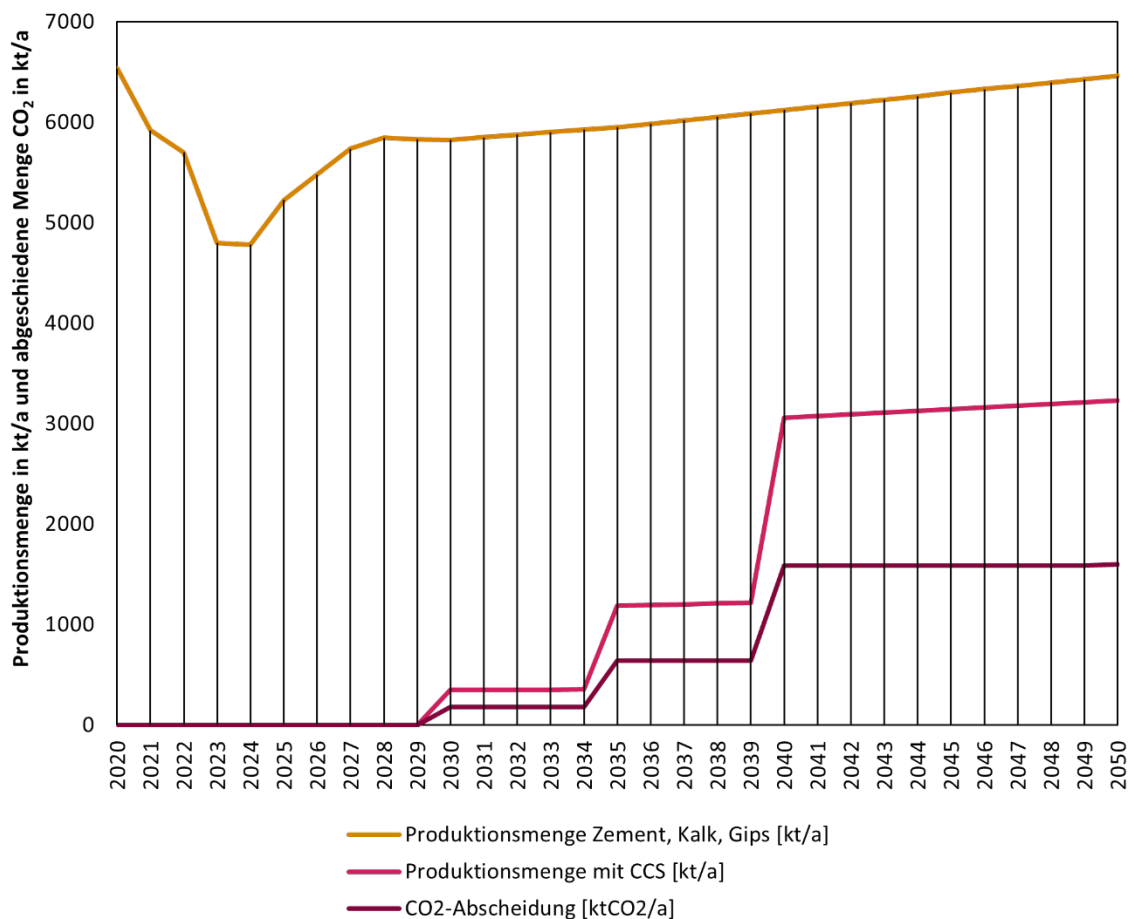
Anhand der Fortschreibung der nationalen Trends entlang des Verteilschlüssels ergeben sich die energiebedingten THG-Emissionen der "anderen Industriefeuerungen". Um entsprechend Anforderung 3 die prozessbedingten THG-Emissionen – darin vor allem die Zementindustrie – abzubilden, wird eine gesonderte Berechnung der hierfür im nationalen Projektionsbericht maßgeblichen Minderungsoption¹³ CO₂-Abscheidung und Speicherung durchgeführt¹⁴. Diese berücksichtigt die Produktionsmengen von Zementklinker in Baden-Württemberg und nimmt weiter an, dass die Diffusion der Abscheidetechnik in

¹³ In Ermangelung starker Instrumente zur Kreislaufwirtschaft und Suffizienz.

¹⁴ Da dieser Modellierungsteil sehr stark Annahmen getrieben ist, vermischen sich Ergebnisse und Methodik. Zur besseren Einordnung wird hier beides gebündelt dargestellt.

Baden-Württemberg mit der nationalen Ebene vergleichbar verläuft (Abbildung 3). Daher wird unter den angenommenen Bedingungen bis 2040 50 % der Zementproduktion (nach Produktionsmenge) mit der CCS-Technik ausgestattet und somit etwa 1.600 kt CO₂äq abgeschieden. Darin sind sowohl prozess- als auch energiebedingte (~30 %) THG-Emissionen sowie bilanziell negative Emissionen durch Abscheidung von biogenem CO₂ enthalten. Es wird von einer mittelfristig erreichbaren Abscheiderate von 80 % ausgegangen. Das entspricht einer Minderung der prozessbedingten Emissionen (gegenüber einem Fall ohne CCS) von knapp 60 % bzw. einer Minderung gegenüber 1990 um 65 %.

Abbildung 3: Projektion der Entwicklung CCS-Anwendung in der Zementindustrie in Baden-Württemberg



Im nächsten Schritt (vgl. Abbildung 2) werden die Wirkungen zusätzlich wirkender Landesinstrumente in das so erstellte Grundgerüst aus Endenergiebedarf und prozessbedingten THG-Emissionen integriert. Aufgrund für ein detaillierteres Vorgehen fehlender Ressourcen (Zeit, Budget und Informationen zu den Instrumenten) wird für die Bewertung der Instrumente eine grobe Zweiteilung vorgenommen: Instrumente mit vermuteter direkter Wirkung auf die Adoption von Energieträgerwechsel (vor allem Elektrifizierung der Prozesswärme) – Instrumente also, die jedenfalls dem Anschein nach ähnlich den Förderinstrumenten des PB-2024 (Klimaschutzverträge, IPCEI, EU-Innovationsfonds, Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft (EEW)) wirken

können. Diese Landesinstrumente (Anzahl: vier) werden anhand ihres Budgets analog zur Wirkung auf nationaler Ebene skaliert.

Die vergleichbaren Instrumente auf Bundesebene, die im PB-2024 der Anwendung der allgemeinen Prozesswärme zugewiesen wurden haben im gleichen Zeitraum ein Budget von knapp 6,5 Mrd. Euro. Daran wird deren Wirkung skaliert, so dass diesem Instrumentenbündel in Baden-Württemberg etwa 5,3 % der Wirkung zugewiesen wird. Es wird eine Nachwirkung angenommen, die zehn Jahre andauert – nach 2045 endet die emissionsmindernde Wirkung dieses zusätzlichen Instrumentenbündels¹⁵.

Ein weiteres Instrumentenbündel, bestehend aus Instrumenten, die vorrangig Beratung, Information und Vernetzung fördern, wird zwar bewertet. Es wird aber als nicht-zusätzliche Wirkung eingeschätzt – ermöglicht insofern die bereits im PB-2024 integrierte Wirkung. Darin befindet sich die überwiegende Zahl der Instrumente (19 Instrumente). Weitere neun Instrumente des KMR werden als flankierend eingeschätzt und nicht quantifiziert. Zwei Instrumente ("Förderung von klimaschonendem R-Beton", "Klimaschutz bei den Universitätsklinik / Reduzierung von klimaschädlichen Narkosegasen in der Universitätsmedizin") werden aufgrund ihrer Besonderheit individuell bewertet. Deren Wirkung ist im Gesamtkontext des Sektors aber vernachlässigbar¹⁶.

Als letzter Schritt (vgl. Abbildung 2) werden die Industrieergebnisse in einer Gesamtintegration an das Gerüst der Berichterstattung kalibriert – insbesondere mit den THG-Emissionen der Industriekraftwerke, die in der Energiewirtschaft berechnet werden, verbunden.

2.3.5 Verkehr

Für die Projektionen im Sektor Verkehr wurde das integrierte, systemdynamische Modell ASTRA-M angewendet, das das Fraunhofer ISI auf nationaler und Landesebene seit Jahren erfolgreich für die Bewertung von Klimaschutzmaßnahmen im Sektor Verkehr einsetzt. ASTRA-M setzt sich aus den Modulen Makroökonomie, Bevölkerung, Verkehr, Fahrzeugflotten, Infrastruktur und Umwelt zusammen (siehe Abbildung 44 im Anhang). Mit Ausnahme des Bevölkerungsmoduls beeinflussen sich die Module über die Laufzeit des Modells gegenseitig. Kern von ASTRA-M ist das Verkehrsmodul zur Simulation der Verkehrsnachfrage für den Personen- und Güterverkehr nach der Abgrenzung der Sektoren gemäß der Quellkategorien des gemeinsamen Berichtsformats nach der Europäischen Klimaberichterstattungsverordnung. ASTRA-M differenziert dabei entsprechend THG-Emissionen des inländischen Straßen-, Schienen- und Schiffsverkehrs. Für den inländischen Luftverkehr hat das Fraunhofer ISI ein vereinfachtes Spreadsheetmodell zur Abschätzung der Verkehrsnachfrage.

¹⁵ Methodisch bedeutet dies, dass für das Stützjahr 2050 die berechneten Emissionen wieder ansteigen. Dies ist aber als nicht aussagekräftig anzusehen, da hierfür von einem Wiedereinstieg in fossile Energieträger auszugehen wäre. Vielmehr ist anzunehmen, dass sich die wegfallende Wirkung der Instrumente autonom kompensiert, z.B. weil die ehemals geförderten Anlagen ohne neue Förderung mindestens äquivalent ersetzt werden. Diese dann weiter bestehenden Emissionsminderungen wären aber nicht mehr dem ursprünglichen Instrument zuzurechnen.

¹⁶ Etwa 2 % der projizierten jährlichen Wirkung in 2040.

Sowohl im Personenverkehr als auch im Güterverkehr verwendet ASTRA-M einen angepassten, klassischen 4-Stufen Ansatz für die Berechnung der Verkehrsnachfrage auf Basis der Entwicklung relevanter sozio-demografischer und wirtschaftlicher Einflussfaktoren. ASTRA-M berechnet die Verkehrsnachfrage dabei für alle land- und wassergebundenen Verkehrsmittel inklusive neuer, geteilter Mobilitätskonzepte wie Carsharing, Ridepooling oder Bike/e-Scootersharing. Auf Basis von Personen- und Güterverkehrsbefragungen (z.B. Mobilität in Deutschland 2017 (BMDV, 2017)) und der Entwicklung der Rahmenbedingungen simuliert ASTRA-M in der Verkehrserzeugung die Anzahl der Wege bzw. das Güterverkehrsvolumen in Tonnen ausgehend von den NUTS-2 Zonen (Regierungsbezirke) in Deutschland. Um Unterschiede zwischen städtischen und ländlichen Regionen besser zu berücksichtigen, werden die NUTS-2 Zonen dabei generisch in diese beiden Regionstypen differenziert. Das resultierende Verkehrsaufkommen wird in der Verkehrsverteilung anhand der Wegezwecke bzw. der Güterarten auf potenzielle Ziele unter Berücksichtigung der Entwicklung von Transportzeiten und -kosten verteilt. Anschließend berechnet ASTRA-M im Modal Split die Verteilung auf die verfügbaren Verkehrsmittel innerhalb von vier definierten Distanzbändern (Lokal < 2 km, Kurz < 10 km, Medium < 50 km und Lang > 50 km) anhand von mode-spezifischen Verkehrszeiten und -kosten sowie der generellen Motorisierungsrate. Anhand einer vereinfachten letzten Stufe (Umlegung auf die Verkehrsinfrastruktur) kann ASTRA-M grob Staueffekte simulieren und über Rückkopplungsschleifen die Verkehrsverteilung und den Modal Split wieder beeinflussen. Das aus der Verkehrsnachfrage resultierende Verkehrsaufkommen und die Verkehrsleistungen werden an Statistiken aus Verkehr in Zahlen regelmäßig angepasst.

Die Abbildung des Markthochlaufs alternativer Antriebe und Effekte der Digitalisierung (z.B. der Fahrzeugautomatisierung) werden im Fahrzeugflottenmodul mit detaillierten Bestandsmodellen berücksichtigt. ASTRA-M differenziert hierbei bei Straßenfahrzeugen Pkw (mit sieben Fahrzeugsegmenten), Busse (Reise- und Linienbusse), leichte Nutzfahrzeuge (bis 3,5 t zulässiges Gesamtgewicht (zGG)) sowie schwere Nutzfahrzeuge (bis 7,5 t zGG, bis 12 t zGG und über 12 t zGG). Fahrzeugneuzulassungen und -bestände werden mit Zahlen des Kraftfahrt-Bundesamts (KBA) validiert.

Auf Basis der verkehrsmittelspezifischen Fahrleistungen kann ASTRA-M unter Berücksichtigung der Zusammensetzung der Fahrzeugflotten unter Verwendung von Verbrauchswerten bzw. Emissionsfaktoren aus dem Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA) den Endenergieverbrauch der einzelnen Verkehrsmittel nach Energieträgern ausweisen und daraus die THG-Emissionen berechnen. Letztere werden ebenfalls regelmäßig anhand der Energiebilanzen validiert. ASTRA-M berechnet alle Outputindikatoren in Jahresschritten zwischen 1995 und 2050.

Für die Berechnung der Minderungswirkung der Instrumente des MMS auf die THG-Emissionen des Sektors Verkehr auf der Ebene von Baden-Württemberg sowie der zusätzlichen Wirkungen der berücksichtigten Landesinstrumente wurde das Modell wie folgt angepasst:

Im ersten Schritt wurden alle einzelnen Instrumente des MMS anhand der Beschreibungen der Ausgestaltung der Instrumente aus dem PB-2024 in das ASTRA-M Modell implementiert und als Instrumentenbündel gegenüber einem OMS (Ohne-Maßnahmen-Szenario) auf der Bundesebene gerechnet.

Im zweiten Schritt konnten Verkehrs- und Fahrleistungen auf der Landesebene anhand der geografischen Differenzierung in ASTRA-M auf das Landesgebiet von Baden-Württemberg heruntergebrochen werden. Die resultierenden, endogen berechneten Verkehrs- bzw. Fahrleistungen wurden im Anschluss an die statistischen Werte des StaLA für 2021 angepasst.

Im dritten Schritt wurde die endogene Zusammensetzung der Fahrzeugflotten in ASTRA-M mit den landesspezifischen Anteilen der Antriebsarten mit Daten des KBA für 2021 angepasst, um die Unterschiede zwischen Bund und Land zu berücksichtigen.

Im vierten Schritt wurden die daraus resultierenden Endenergieverbräuche nach Energieträger berechnet und anhand der statistischen Endenergieverbräuche für das Jahr 2021 in Baden-Württemberg ein letztes Mal justiert.

Der finale Schritt bei der Berechnung der THG-Minderungswirkungen des MMS sowie der Landesinstrumente für Baden-Württemberg besteht in der Implementierung der fünf mit dem VM abgesprochenen und im Instrumentenbericht beschriebenen landesspezifischen Instrumente.

2.3.6 Gebäude

Raumwärme und Warmwasser

Zur Ermittlung der THG-Emissionen aus Raumwärme und Warmwasser wird das Modell Invert/ee-Lab eingesetzt. Methodisch stellt Invert/ee-Lab ein dem Bottom-up-Ansatz folgendes, sozio-technoökonomisches agentenbasiertes Simulationsmodell dar, mit dem Optionen des Energiebedarfs und dessen Deckung für Wärme (Raumwärme und Warmwasser) sowie Klimatisierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden ermittelt und die Auswirkungen energie- und klimapolitischer Instrumente in Jahresschritten abgebildet werden können. Die Investitionsentscheidung in Technologien und Effizienzmaßnahmen wird unter Berücksichtigung von investorenspezifischen Entscheidungskalkülen und Hemmnissen sowie Energieträgerpotentialen simuliert. Mit dem Modell werden explorative Szenarien simuliert. Ziel ist es dabei, die Entwicklung der eingesetzten Versorgungstechnologien und der Investitionen in Energieeffizienzmaßnahmen unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen und klimapolitischer Instrumente realitätsnah zu simulieren, um daraus die mögliche Entwicklung der THG-Emissionen im Gebäudebereich in Szenarien zu analysieren. Eine detaillierte Beschreibung des Modells und der Berechnungsmethodik ist im Anhang zu finden.

Für die Projektion der THG-Emissionen in Baden-Württemberg werden die landesspezifischen Energieverbräuche und Rahmendaten in Invert/ee-Lab integriert und dadurch die Gebäudetypologie für das Land angepasst. Dadurch kann die Wirkung der bundesweiten Klimaschutzmaßnahmen auf Baden-Württemberg angepasst werden.

Parallel dazu werden die Emissionsminderungen auf politische Instrumente aufgeteilt. Zum einen wird die Wirkung der nationalen Instrumente auf Baden-Württemberg heruntergebrochen anhand von Verteilschlüsseln, wie z.B. den Förder- oder Neubaulzahlen je Bundesland. Zum anderen werden landesspezifische Instrumente wie das Erneuerbare-Wärme-Gesetz (EWärmeG) im Wirkmodell Politikinstrumente (WIRPOL) bottom-up ab-

geschätzt anhand geeigneter Indikatoren vorliegender Evaluationen. Nach einem Iterationsprozess ergibt die Summe der Instrumentenwirkungen die mit Invert/ee-Lab simulierten Emissionen.

Geräte und Prozesse in Haushalten und Gewerbe

Die Haushaltsgeräte sowie die Geräte und Prozesse im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) werden vom Fraunhofer ISI mit den Modellen FORECAST-Residential und FORECAST-Tertiary modelliert. Es handelt sich hierbei jeweils um Bottom-Up-Stockmodelle, welche den Energiebedarf des Gerätebestandes sowie die Energiebedarfe der dadurch realisierten Prozesse erfassen. Der Stromverbrauch von elektrischen Haushaltsgeräten ist im Wesentlichen durch die Weiße Ware und die Informations- und Kommunikationstechnologien bestimmt. Auch bei den Geräten und Prozessen im GHD-Sektor, zu welchen beispielsweise die Rechenzentren zählen, spielt die Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnologie eine zentrale Rolle.

2.3.7 Landwirtschaft

Im Rahmen dieses Projektes wird der FABio-Modellverbund¹⁷ des Öko-Instituts eingesetzt. Mit dessen Hilfe kann die Wirkung politischer Maßnahmen und Instrumente auf die Entwicklung der Landwirtschaft und des LULUCF-Sektors beschrieben und analysiert werden. Hinzu kommen einige exogene Annahmen aus anderen Sektoren (z.B. PV-Freiflächenanlagen). Folgende Modelle sind Teil des Verbundes:

- LiSE¹⁸: Modellierung aller Emissionsquellgruppen im Landwirtschaftssektor
- FABio-Land: Modellierung aller Emissionsquellgruppen im LULUCF-Sektor
- FABio-Forest: Modellierung der Entwicklung der Waldbestände

Im FABio-Verbund sind die Modelle über Schnittstellen miteinander verbunden: diese betreffen insbesondere Flächennutzungen und -umwandlungen, die mit Blick auf Veränderungen oder die Bildung natürlicher Kohlenstoffsinken relevant sind (beispielsweise die landwirtschaftliche Nutzung von trockengelegten Moorstandorten, Agroforstsysteme oder Agri-PV).

Die Berechnung der THG-Emissionen im Agrarsektor erfolgt mit dem LiSE-Modell des Öko-Instituts mit einer vereinfachten für das Bundesland angepassten Variante. LiSE steht dabei für Lifestock, Soil and Energy Emissions – es werden also alle Emissionskategorien der UNFCCC-Berichterstattung sowie des KSG aus der Tierhaltung und der Nutzung landwirtschaftlicher Böden in Deutschland sowie die energiebedingten Emissionen aus Land- und Gartenbau kalkuliert. Das Modell beinhaltet alle relevanten Quellkategorien, Unterquellgruppen und Gase, die nach den Richtlinien des Weltklimarats (IPCC-Guidelines) zur Berechnung der landwirtschaftlichen Emissionen erforderlich sind.

Der Modellierungsansatz entspricht den Arbeiten im Forschungsvorhaben „Sektorziele 2030 und klimaneutrales Baden-Württemberg 2040“ (Kelm *et al.*, 2023). Hierzu werden

¹⁷ Forestry and Agricultural Biomass Model (FABio)

¹⁸ Lifestock, Soil and Energy emissions (LiSE)

jährlich die aktuellen Inventardaten für Deutschland eingepflegt, die Modellierung erfolgt in 5-Jahresschritten und wird für einzelne Jahre interpoliert.

Das LiSE-Modell bildet den Agrarsektor über typische Beispielbetriebe der verschiedenen betriebswirtschaftlichen Ausrichtungen ab. Auf diese Weise können die strukturellen Unterschiede zwischen Baden-Württemberg und Deutschland erfasst werden. Weiterhin fließen landesspezifische Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren in das Modell ein.

Die zukünftigen Entwicklungen werden differenziert nach denen, die

- durch klimapolitische Instrumente von Bund und Land induziert werden und
- aus sonstigen Markteffekten und politischen Entwicklungen resultieren.

Für die Abbildung der zukünftigen Entwicklung der kleinstrukturierten Landwirtschaft in Baden-Württemberg wird v.a. auf den PB-2024 Bezug genommen. Auf diese werden dann die noch nicht abgebildeten klimapolitischen Maßnahmen des Landes gelegt (vgl. Kapitel 8).

Für die Landesklimaschutzmaßnahmen, die die Nachfrageseite adressieren, können keine direkten Rückschlüsse auf die landwirtschaftliche Erzeugung und somit die Emissionen des Sektors gezogen werden, denn die Versorgung der Bevölkerung, insbesondere mit tierischen Produkten, weist einen geringen Selbstversorgungsgrad auf.

2.3.8 Abfallwirtschaft und Sonstiges

Im Sektor Abfallwirtschaft werden entsprechend der Systematik des Nationalen Treibhausgasinventars nur die nicht-energetischen THG-Emissionen der Abfallwirtschaft adressiert (Kategorie 5 des gemeinsamen Berichtsformats (*Common Reporting Format*; CRF)). Dazu zählen die Methanemissionen aus der Deponierung von Abfällen, Methan- und Lachgasemissionen aus der biologischen Abfallbehandlung sowie aus mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen. Zudem werden Methan- und Lachgasemissionen aus der Abwasserbehandlung berücksichtigt. Die THG-Emissionen des Abfallsektors werden von den Methanemissionen aus der Deponierung dominiert. Eine signifikante Rolle spielen auch die Emissionen aus der Abwasserbehandlung, hier treten sowohl Methanemissionen als auch Lachgasemissionen auf. CO₂-Emissionen bei der Abfallbehandlung stammen hauptsächlich aus dem organischen Abfall und werden daher als biogene CO₂-Emissionen im Inventar nicht berücksichtigt.

Eine Anwendung des im PB-2024 eingesetzten Modellverbundes für Abfall und Abwasser ist im Rahmen dieses Projektes für die Emissionen aus dem Abfallsektor auf Landesebene nicht möglich. Aus diesem Grund werden die Emissionen des PB-2024 anhand wichtiger Parameter auf die Landesebene skaliert.

Maßgeblich ist hier vor allem die Bevölkerungszahl (vor allem für die Methanemissionen aus der Deponierung und für die Emissionen aus der Abwasserbehandlung). Weitere wichtige landesspezifische Datenquellen sind die Anzahl der Deponien, Bioabfall- und Grünschnittmengen im Siedlungsabfall sowie Daten zur Deponiegaserfassung. Diese werden ergänzt durch Informationen zu Deponien, welche im Rahmen der Kommunalrichtlinie der Nationalen Klimaschutzinitiative (NKI) Mittel zur In-Situ Stabilisierung erhalten haben, und Daten aus dem Treibhausgasinventar für Baden-Württemberg.

2.3.9 Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (LULUCF)

Die Modellierung der Szenarien im LULUCF-Sektor erfolgte mit dem Modell FABio-Land (siehe Überblick zum FABio-Modellverbund in Kap. 2.3.7 und Anhang Modellbeschreibungen). Als aktuelle Datenquelle für die Modellierung lagen die Daten des Nationalen Treibhausgasinventars aus dem Jahr 2023 vor. Neben den deutschlandweiten Daten (CRF-Tabellen) wurden vom Thünen-Institut für Baden-Württemberg jahresscharfe Flächenänderungen und zusammenfassende Emissionsergebnisse je Quellgruppe bereitgestellt. Je Flächenkategorie wurden als Aktivitätsdaten die jahresscharfen Flächenänderungskoeffizienten für Baden-Württemberg und die Emissionsfaktoren aus den CRF-Tabellen (deutschlandweit) in FABio-Land geladen. In einem Kalibrierungsschritt wurden historische Zeitpunkte modelliert und die Ergebnisse mit den vom Thünen-Institut für Baden-Württemberg berichteten Ergebnissen abgeglichen, um die deutschlandweiten Emissionsfaktoren aus den CRF-Tabellen für die Bedingungen in Baden-Württemberg anzupassen.

Als Startpunkt der LULUCF-Modellierung wurden die Parametrisierungen der Instrumente im PB-2024 zum MMS in FABio-Land übernommen und an die landesspezifischen Bedingungen angepasst (z.B. zu erwartende Anlage von Agroforst, Wiedervernässungsraten organischer Böden und Flächenverbrauch durch Siedlungen). Aufgrund fehlender historischer landesspezifischer Daten zum Holzproduktspeicher wird dieser nicht modelliert, sondern mögliche Effekte über eine Nebenrechnung ausgewiesen.

Die Modellierung der Waldfläche in Deutschland wurde bereits im Projekt Politiksszenarien XI vergleichbar zu der Modellierung im PB-2024 mit dem Waldmodell FABio-Forest abgebildet (siehe Modellbeschreibung im Anhang). Für Baden-Württemberg wurden in FABio-Forest 12.561 Plots der Bundeswaldinventur (BWI) bei der Modellierung berücksichtigt.¹⁹ Bei der Waldmodellierung wurden Annahmen zur zukünftigen Holzentnahme und der Intensität natürlicher Störungen berücksichtigt. Natürliche Störungen werden zum einen über die Höhe der Mortalität und zum anderen über die Beeinträchtigung der Zuwächse abgebildet.

Für die Projektion wurde ein Szenario entwickelt, das eine verstärkte Holzentnahme durch Waldumbau sowie mittlere bis hohe natürliche Störungen berücksichtigt. Hierzu wurde angenommen, dass die hohe Holzentnahme aus den Jahren 2018 bis 2022 fortgeführt wird, um risikoreiche (Nadel-)Bestände verstärkt zu beernten. Für die Mortalität wurde der mittlere Wert im Bezugszeitraum 2002 bis 2021 herangezogen, und für den Zuwachs wurden die mittleren Bedingungen aus den Jahren 2002 bis 2012 angenommen (siehe weitere Details in Kapitel 2.5).

¹⁹ Der Modellierungsansatz für den LULUCF-Sektor im vorliegenden Bericht entspricht den Arbeiten im Forschungsvorhaben „Sektorziele 2030 und klimaneutrales Baden-Württemberg 2040“. Die Waldentwicklung wird nun aber anstatt mit dem einfachen Fortschreibungstool SIFOP mit dem räumlich hoch aufgelöstem Waldmodell FABio-Forest abgebildet.

2.4 Überblick über die berücksichtigten Instrumente

Die Projektionen für Baden-Württemberg in diesem Bericht entsprechen der Szenarielogik des MMS des PB-2024. Konkret bedeutet das, dass nur Instrumente berücksichtigt werden, die bereits rechtlich umgesetzt worden sind oder die im politischen Prozess angenommen sind, d.h. dass keine Änderungen mehr zu erwarten sind. Die europäischen und nationalen Instrumente der Projektionen für Baden-Württemberg entsprechen den Instrumenten des MMS. Für zusätzliche Landesmaßnahmen aus dem KMR müssen die beschriebenen Anforderungen gelten, damit sie berücksichtigt werden können.

Tabelle 7 führt die in den Projektionen betrachteten Instrumente auf und unterteilt nach den europäischen bzw. nationalen Instrumenten des MMS 2024 im PB-2024 und den zusätzlichen Landesmaßnahmen in Baden-Württemberg. Eine detaillierte Übersicht der Instrumente findet sich im Instrumentenpapier (Bei der Wieden *et al.*, 2024).

Tabelle 7: Instrumente der Projektionen

Instrument	EU/ national	BaWü
Sektorübergreifend		
EU-Emissionshandelssystem (ETS)	X	
EEG-Umlagesenkung	X	
Energie- und Strombesteuerung	X	
CO ₂ -Bepreisung für die Sektoren Verkehr und Wärme (BEHG)	X	
Klima- und Transformationsfondsgesetz (KTFG)	X	
Nationale Klimaschutzinitiative (NKI)	X	
Mindesteffizienzstandards – EU-Ökodesign-Richtlinie	X	
Energielabel (Energieverbrauchskennzeichnung)	X	
NEC-Richtlinie über nationale Emissionsminderungsverpflichtungen für bestimmte Luftschadstoffe	X	
Kommunale Wärmeplanung (KWP)	X	
Klimaneutrale Bundesverwaltung bis 2030	X	
Energieeffizienzgesetz	X	
Nationale Wasserstoffstrategie	X	
Freiwillige Produktkennzeichnungen für energierelevante Produkte	X	
Förderung von Energieberatungen für Nichtwohngebäude, Anlagen und Systeme (EBN)	X	
Stärkung der Forschung für mehr Energieeffizienz	X	
Verbesserung der Rahmenbedingungen für Energieeffizienzdienstleistungen	X	
Finanzpolitik / Sustainable Finance	X	
Forschung und Innovation	X	
Klimaschutz und Gesellschaft	X	
Energetische Stadtsanierung	X	
Stromsektor / Energiewirtschaft		
Ausbau der erneuerbaren Energien entsprechend Ausbautzahlen und Ausschreibungen im EEG	X	

Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG)	X	
Wärmenetze zunehmend auf erneuerbare Energien und unvermeidbare Abwärme umstellen	X	
Zubau der Elektrolyseurleistung gemäß der Nationalen Wasserstoffstrategie	X	
Kohleausstieg 2038 mit beschleunigtem Braunkohleausstieg im Rheinischen Revier	X	
Reallabore	X	
Begleitmaßnahmen Energiewende	X	
EU-Kooperation	X	
Instrumentenbündel 1: EE-Ausbaukorridor - PV-Aufdach		X
Prüfung: Nutzung der Dachflächen von Dienstgebäuden zum Einsatz von Photovoltaikanlagen in Zusammenarbeit mit dem Landesbetrieb Vermögen und Bau		X
Pflicht zur Installation von Photovoltaik-Anlagen auf Dachflächen im Rahmen des KlimaG BW		X
Umsetzungsorientierte PV-Forschung		X
Information und Beratung zur PV-Pflicht		X
Instrumentenbündel 2: EE-Ausbaukorridor - PV-Freiflächen und sonstige PV		X
Umsetzungsorientierte PV-Forschung		X
Begleitung und Monitoring Flächenziel		X
PV-Anlagen auf Liegenschaften der Kreislaufwirtschaft, insbesondere auf ehemals forstwirtschaftlich genutzten Flächen		X
Pflicht zur Installation von Photovoltaik-Anlagen auf Parkplätzen im Rahmen des KlimaG BW		X
Agri-PV-Projekte		X
PV über Parkplatzflächen und weiteren versiegelten Flächen sowie Verkehrsflächen		X
Interessenbekundungsverfahren PV an Straßen		X
Potentialanalyse PV-Anlagen an Tunneln		X
EE-Ausbaukorridor – Wind durch KMR-Maßnahme „Begleitung und Monitoring Flächenziel“		X
Kohleausstieg durch Maßnahme „Flankieren und Umsetzen des Kohleausstiegs im Land“		X
Instrumentenbündel 3: Wasserstoff		X
Unterstützung des fuel switch von Gas zu Wasserstoff im Kraftwerksbereich		X
Maßnahmenbündel: Umsetzung der Wasserstoff-Roadmap BW		X
Förderprogramm Modellregion Grüner Wasserstoff (EFRE)		X
Zukunftsprogramm Wasserstoff (ZPH2)		X
Förderprogramm „Klimaschutz und Wertschöpfung durch Wasserstoff - KWH2“		X
Instrumentenbündel 4: Wärmenetze		X
Begleitung der kommunalen Wärmeplanung in Baden-Württemberg		X
Förderung der kommunalen Wärmeplanung für kleinere Kommunen		X
Kommunale Wärmeplanung: Berücksichtigung des Flächenbedarfs zur klimafreundlichen Wärmeerzeugung		X

Förderprogramm Wärmenetze		X
Aufbau und Erhalt einer flächendeckenden Beratungsstruktur zur bedarfsgerechten Unterstützung bei der Erstellung und Umsetzung kommunaler Wärmepläne		X
Auswertung der Ergebnisse der kommunalen Wärmepläne als Monitoring der Wärmewende		X
KIF-Mittel für Umsetzung dekarbonisierter Wärmenetze		X
Instrumentenbündel 5: Nachfrageveränderungen (durch sektorübergreifende Instrumente)		X
Industrie & Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)		
EU-Emissionshandel (ETS)	X	
CO ₂ -Bepreisung für die Sektoren Verkehr und Wärme (BEHG)	X	
EEG-Umlagesenkung	X	
Spitzenausgleich im Rahmen des Energiesteuergesetzes (EnergieStG) und des Stromsteuergesetzes (StromStG)	X	
Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft	X	
Kälte-Klima-Richtlinie	X	
NKI: Kommunalrichtlinie investive Maßnahmen	X	
Mindesteffizienzstandards – EU Ökodesign-Richtlinie	X	
Bundesförderung für Energieberatung für Nichtwohngebäude, Anlagen und Systeme	X	
Mittelstandsinitiative Energiewende und Klimaschutz (MIE)	X	
Initiative Energieeffizienz- und Klimaschutznetzwerke (IEEKN)	X	
Pilotprogramm Einsparzähler	X	
Energieauditpflicht für Nicht-KMU	X	
KfW-Effizienzprogramm – Produktionsanlagen/-prozesse	X	
Verpflichtung zur Einführung von Energiemanagementsystemen	X	
Förderprogramm Dekarbonisierung in der Industrie	X	
EU-Innovationsfonds	X	
Klimaschutzverträge	X	
IPCEI Wasserstoff in der Industrieproduktion	X	
Technologietransfer-Programm Leichtbau (TTP LB)	X	
Förderprogramm Industrielle Bioökonomie	X	
Systematisches Klimamanagement in Unternehmen auf Grundlage von E-MAS	X	
Öffentliche Beschaffung energieeffizienter Produkte	X	
KfW-Umweltprogramm, BMUV-Umweltinnovationsprogramm zur Förderung von Demonstrationsvorhaben	X	
Stärkung der Forschung für energieeffiziente und ressourcenschonende Industrieprozesse	X	
Neue Konstruktionstechniken und Werkstoffe für eine emissionsarme Industrie	X	
Verabschiedung Verpackungsgesetz und Novellierung Gewerbeabfallverordnung	X	
Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie	X	
Aufbau und Betrieb von kommunalen Energieeffizienznetzwerken	X	

Förderung von „Energieeffizienzmanagern“ zur Hebung von Potenzialen z.B. in Gewerbegebieten	X	
Initiativen zur Förderung der Ressourceneffizienz	X	
Flankierende Maßnahmen aus der Energieeffizienzstrategie (EffSTRA)	X	
Weiterentwicklung der Energieeffizienz-Netzwerke	X	
Effizienzanalyse-Tools für Energieaudits	X	
Treibhausgas-Projektionen 2024 für Deutschland - Instrumente	X	
Förderung der Prozesswärmeeffizienz und der Nutzung von Abwärmepotenzialen	X	
FONA - Forschung Für Nachhaltigkeit - Strategie des BMBF	X	
CO ₂ -Grenzausgleichsmechanismus (CBAM)	X	
Interessenbekundungsverfahren zur geplanten Förderung von Leuchtturmprojekten zum	X	
Hochlauf der industriellen Produktionskapazitäten im Bereich Photovoltaik	X	
Industrieprozesse und Produktverwendung (Fluorierte Treibhausgase)	X	
EU-F-Gase-Verordnung 517/2014	X	
FKW-Emissionen im EU-ETS	X	
EU-MAC-Richtlinie 2006/40/EG	X	
Chemikalien-Klimaschutzverordnung	X	
Kälte-Klima-Richtlinie	X	
Selbstverpflichtung SF ₆	X	
Instrumente mit Wirkung ähnlich einer direkten Transformationsförderung: <ul style="list-style-type: none"> • Invest BW • Innovationsgutschein HighTech Start-Up • Hydrogenium HN-F (Leuchtturmprojekt RegioWIN 2030/EFRE) • Unterstützung Förderangebot der L-Bank zur Umsetzung von Effizienzmaßnahmen 		X
Instrumente mit Informations-, Beratungs- und/oder Vernetzungscharakter: <ul style="list-style-type: none"> • Start-up BW Acceleratoren • Start-up BW Pre-Seed • Fortführung der Initiative Horizont Handwerk (vormals: Zukunftsinitiative Handwerk 2025) • Umweltschutzberatungen im Handwerk innerhalb des Förderprogramms der Unternehmensberatungen • Innovationswettbewerb "Klimaneutrale Produktion mittels Industrie 4.0-Lösungen" • Roadmap klimaneutrale Produktion • S-TEC Zentrum für klimaneutrale Produktion und ganzheitliche Bilanzierung • Konzept: Ultraeffizienzfabrik • Umsetzung Abwärmekonzept BW (Maßnahme im Sofortprogramm Koalitionsvertrag) • Unterstützung von Beratungsangeboten für Unternehmen (Energie-Management, Contracting, Abwärme, Blockheizkraftwerke, Effizienznetzwerke) • Regionale Kompetenzstellen für Ressourceneffizienz (KEFF+) • Beratungsförderung im Bereich der Ressourceneffizienz (BERE) 		X

<ul style="list-style-type: none"> • Unterstützung Bundesinitiative IEEKN zur Einrichtung von Energieeffizienz- und Klimaschutznetzwerken in BW • Unterstützung Kompetenzzentren bei der KEA-BW • KEFF+ - Regionale Kompetenzstellen für Ressourceneffizienz (EFRE) • Förderung der intelligenten Nutzung biologischer Ressourcen in einer nachhaltigen, kreislauforientierten Bioökonomie • Klimabündnis Baden-Württemberg (Klimaschutzvereinbarungen mit Unternehmen) • Förderprogramm "Unternehmen machen Klimaschutz" • Förderprogramm KLIMAFIT 		
Gebäude		
Novelle der Bundesförderung Effiziente Gebäude (BEG)	X	
Förderprogramm Klimafreundlicher Neubau	X	
Steuerliche Förderung der energetischen Gebäudesanierung	X	
Gebäudeenergiegesetz (GEG)	X	
Heizungsoptimierung (EnSimiMaV)	X	
Vorbildfunktion Bundesgebäude	X	
Aufbauprogramm und Qualifikationsoffensive Wärmepumpe	X	
Modernisierungsumlage	X	
Nationales Effizienzlabel für Heizungsanlagen	X	
Bundesförderung für Energieberatung für Wohngebäude	X	
Umlagebegrenzung des BEHG	X	
Bundesförderung Serielle Sanierung	X	
Qualitätssiegel Nachhaltige Gebäude	X	
Energieausweis	X	
Fortentwicklung des Innovationsprogramms Zukunft Bau	X	
Verbrauchsinformation und digitale Innovation	X	
Förderung „Wohnungsbau BW 2022“		X
Erneuerbare-Wärme-Gesetz		X
Elektrische Geräte und sonstige Anwendungen in privaten Haushalten		
Mindesteffizienzstandards - EU Ökodesign-Richtlinie	X	
Energielabel – EU-Verordnung zur Festlegung eines Rahmens für die Energieverbrauchskennzeichnung	X	
Beratung einkommensschwacher Haushalte (Stromsparcheck)	X	
Einführung intelligenter Messgeräte (Smart Meter) zur Stromverbrauchsmessung	X	
Verkehr		
Kaufprämie E-Pkw – (Umweltbonus) bis Ende 2023	X	
Absenkung der Dienstwagenbesteuerung für E-Pkw bis 2030	X	
Stärkere Gewichtung der CO ₂ -Komponente der Kraftfahrzeugsteuer ab 2021	X	
Senkung der Stromkosten – Abschaffung EEG-Umlage	X	
Änderung der Entfernungspauschale für Fernpendelnde	X	
Attraktivität des ÖPNV erhöhen	X	
Einführung des Deutschlandtickets für den Nahverkehr	X	
Ausbau der Radinfrastruktur	X	

Zuschuss für schwere Nutzfahrzeuge mit klimaschonenden Antrieben	X	
CO ₂ -Differenzierung der Lkw-Maut / Erweiterung der Lkw-Maut	X	
Ausbau der Förderung effizienter Trailer	X	
Bundesfinanzhilfen Landstrom in See- und Binnenhäfen	X	
CO ₂ -Emissionsstandards für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge	X	
CO ₂ -Emissionsstandards für schwere Nutzfahrzeuge	X	
THG-Quote/RED-Überarbeitung	X	
Beimischquote für PtL im Flugverkehr und ReFuelEU Aviation	X	
Tank- und Ladeinfrastruktur ausbauen für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge	X	
Tank- und Ladeinfrastruktur ausbauen für Nutzfahrzeuge	X	
Hybridelektrisches Fliegen / Klimaneutrales Fliegen	X	
Verkehr automatisieren, vernetzen, verflüssigen und innovative Mobilitätsformen ermöglichen	X	
Digitalstrategie Deutschland	X	
Förderung Binnenschifffahrt	X	
Klimaneutrales Schiff / Maritimes Forschungsprogramm	X	
Beschleunigung von Planung und Umsetzung neuer Infrastrukturen	X	
Modernisierung des Straßenverkehrsrechts	X	
Erweiterung der kommunalen Handlungsspielräume / Gebühren für Bewohnerparkausweise / Unterstützung bei Erstellung von nachhaltigen urbanen Mobilitätsplänen	X	
Förderung Betriebliches Mobilitätsmanagement (BMM)	X	
Klimaschutzorientierte Marktanreize im Lkw-Verkehr herstellen		X
Straßen und Plätze aufwerten (kostendeckendes Parken)		X
Pendeln und Dienstreisen klimafreundlicher machen		X
Durchgängige und attraktive Radverkehrsnetze schaffen		X
Sicherheit für Fuß- und Radverkehr erhöhen		X
Landwirtschaft		
Vergärung von Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft	X	
Ausbau des Ökolandbaus	X	
Energieeffizienz in der Landwirtschaft	X	
Senkung der Stickstoffüberschüsse und Verbesserung der Stickstoffeffizienz	X	
Verringerung der Treibhausgasemissionen in der Tierhaltung	X	
Forschungsinitiative zur Erreichung der Klimaschutzziele 2030	X	
Senkung Stickstoff-Überschüsse (Maßnahmenbündel)		X
Ausweitung und Optimierung des ökologischen Landbaus		X
Abfallwirtschaft		
Deponieverordnung	X	
Kreislaufwirtschaftsgesetz	X	
Förderung der Deponiebelüftung	X	X
Förderung von Technologien zur optimierten Erfassung und Verwertung von Deponiegasen in Siedlungsabfällen	X	X
Förderung von klimafreundlicher Abwasserbehandlung	X	
Reduktion von Lebensmittelabfällen	X	

Halbierung der Menge an Bioabfall im Hausmüll		X
Steigerung der Kompostnutzung im Ökolandbau		X
LULUCF		
Begrenzung der Nutzung neuer Flächen für Siedlungs- und Verkehrszwecke bis 2030 auf unter 30 Hektar pro Tag	X	
Humuserhalt und -aufbau im Ackerland	X	
Erhalt von Dauergrünland	X	
Schutz von Moorböden einschließlich Reduzierung der Torfverwendung in Kultursubstraten	X	
Erhaltung und nachhaltige Bewirtschaftung der Wälder	X	
Honorierung der Ökosystemleistung des Waldes	X	
Forschungsinitiative Klimaschutz in Land- und Forstwirtschaft	X	
Waldklimafonds	X	

Quelle: (Harthan *et al.*, 2024), KMR, Instrumentenpapier (Bei der Wieden *et al.*, 2024)

2.5 Durchführung von Sensitivitätsanalysen

Die Projektionen der THG-Emissionen für Baden-Württemberg basieren auf einer Reihe von Annahmen mit Bezug auf r Rahmendaten und Ausgestaltung der Instrumente. Durch Sensitivitätsanalysen können nicht nur die Unsicherheit einer Annahme bestimmt, sondern auch unvorhergesehene Entwicklungen abgeschätzt werden.

Im Rahmen des Projektes konnte nur eine bestimmte Anzahl an Sensitivitäten gerechnet werden. Die untersuchten Sensitivitätsrechnungen untersuchen die Wirkung von absehbaren Änderungen durch weitere Instrumente sowie Unsicherheiten in der Wirkung bestehender Instrumente. Es wurden Sensitivitätsrechnungen in den Sektoren Energiewirtschaft, Gebäude und LULUCF durchgeführt.

In der Energiewirtschaft wurde für Baden-Württemberg und für Deutschland untersucht, wie sich Änderungen der Kraftwerksstrategie und der vollständige Ausstieg aus der Kohleverstromung bis 2030 auf die THG-Emissionen auswirken würden. Dabei wurde betrachtet wie sich (1) der vorzeitige Kohleausstieg bis 2030, (2) der Einstieg in Wasserstoff durch Zubau wasserstofffähiger Erdgaskraftwerke (H₂-Einstieg) sowie (3) der kombinierte Kohleaus- und H₂-Einstieg auf die Entwicklung der THG-Emissionen auswirkt. Weiterhin wurde untersucht, inwiefern sich eine vollständige Transformation der Wärmenetze Baden-Württembergs gemäß der kommunalen Wärmeplanung auf die projizierten THG-Emissionen auswirken. Zudem wurde untersucht, welche Auswirkungen ein Rückgang der Stromnachfrage aufgrund verstärkter Effizienzmaßnahmen auf Landesebene in den Nachfragesektoren hat. Für die Sensitivitätsrechnung wurde dabei ein Nachfragerückgang von Strom um 5 % angenommen. Die jeweiligen Parametrierungen sind im Anhang Modellbeschreibungen dokumentiert.

Im Gebäudesektor wird betrachtet, wie sich der Endenergiebedarf und die THG-Emissionen bei konsequenter Umsetzung der KWP entwickeln würde.

Im Sektor LULUCF wird für den Wald analysiert, welche CO₂-Senke sich bei unterschiedlich starken natürlichen Störungen und einer unterschiedlichen Holzentnahme ergeben würde. Aufbauend auf den Annahmen zur Projektion für Baden-Württemberg und PB-2024 wurden fünf Sensitivitäten berechnet. In Anlehnung an (Pfeiffer *et al.*, 2023) werden

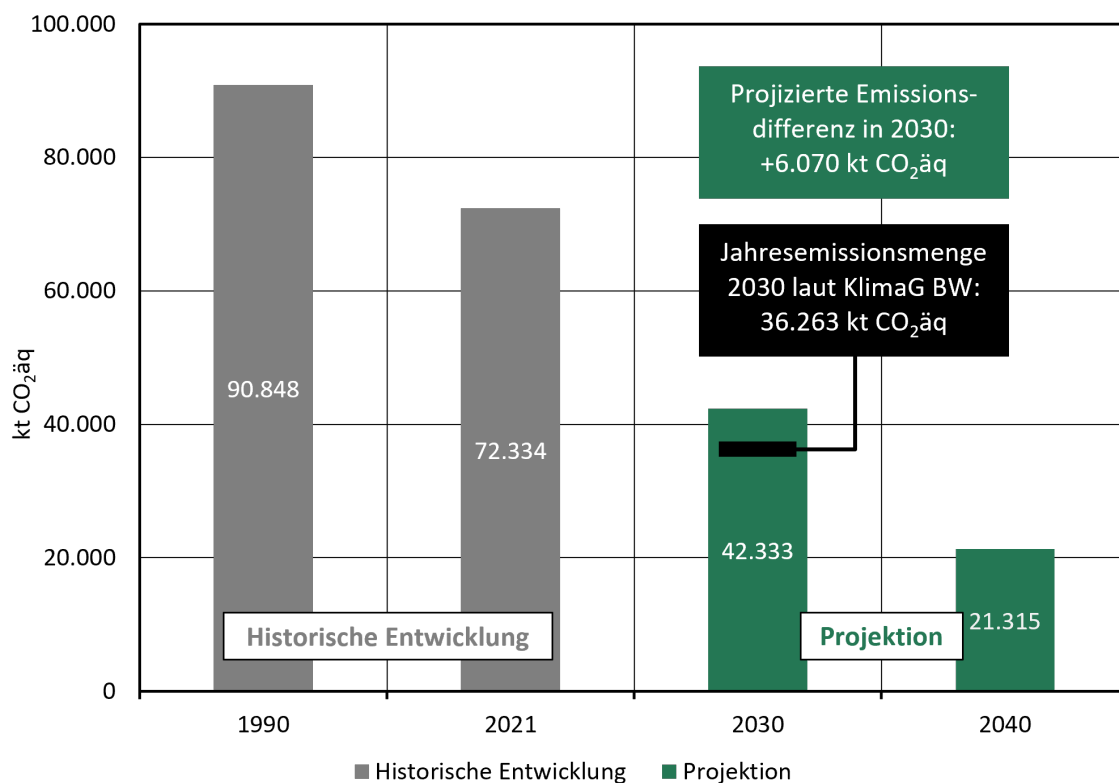
vier Sensitivitäten mit unterschiedlichen Annahmen für die Intensitäten der natürlichen Störungen bei gleichen Holzentnahmemengen (Mittelwert der Jahre 2013 bis 2017) betrachtet.

3 Gesamtergebnisse

3.1 Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Baden-Württemberg

Abbildung 4 zeigt die Entwicklung der THG-Emissionen in Baden-Württemberg in den Jahren 1990, 2021, 2030 und 2040. Für die Jahre 1990 und 2021 sind historische Daten dargestellt. Für das Jahr 2030 werden rund 42.000 kt CO₂äq projiziert, das entspricht einem Rückgang von 53 % ausgehend von 1990. Das im KlimaG BW gesetzte Ziel von minus 65 % für 2030 wird damit verfehlt. Es ergibt sich eine THG-Emissionsdifferenz von rund 6.000 kt CO₂äq. Bis 2040 reduzieren sich die projizierten THG-Emissionen auf rund 21.000 kt CO₂äq. Das Ziel der Netto-Treibhausgasneutralität im KlimaG BW im Jahr 2040 wird damit ebenfalls verfehlt.

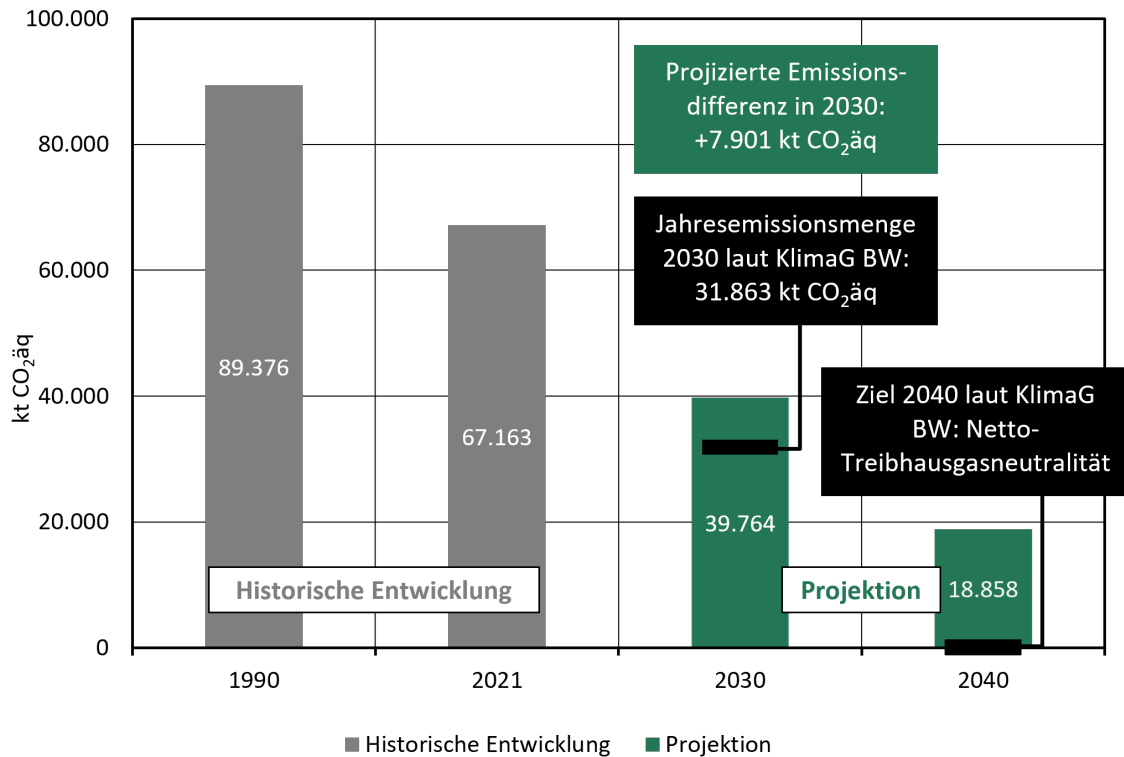
Abbildung 4: Entwicklung der Treibhausgasemissionen und ihre Projektion für die Jahre 2030 und 2040 in Baden-Württemberg (ohne LULUCF)



Quelle: StaLa, Klimaziele nach KlimaG BW, eigene Berechnungen

Abbildung 5 zeigt ergänzend dazu die Entwicklung der THG-Emissionen inklusive LULUCF als Senke. Im Vergleich zum PB-2024 ergibt sich in Baden-Württemberg eine größere Zielverfehlung im Jahr 2030. Auf Bundesebene wird das Ziel, die THG-Emissionen bis 2030 um 65 % im Vergleich zu 1990 zu senken, nur um knapp einen Prozentpunkt verfehlt.

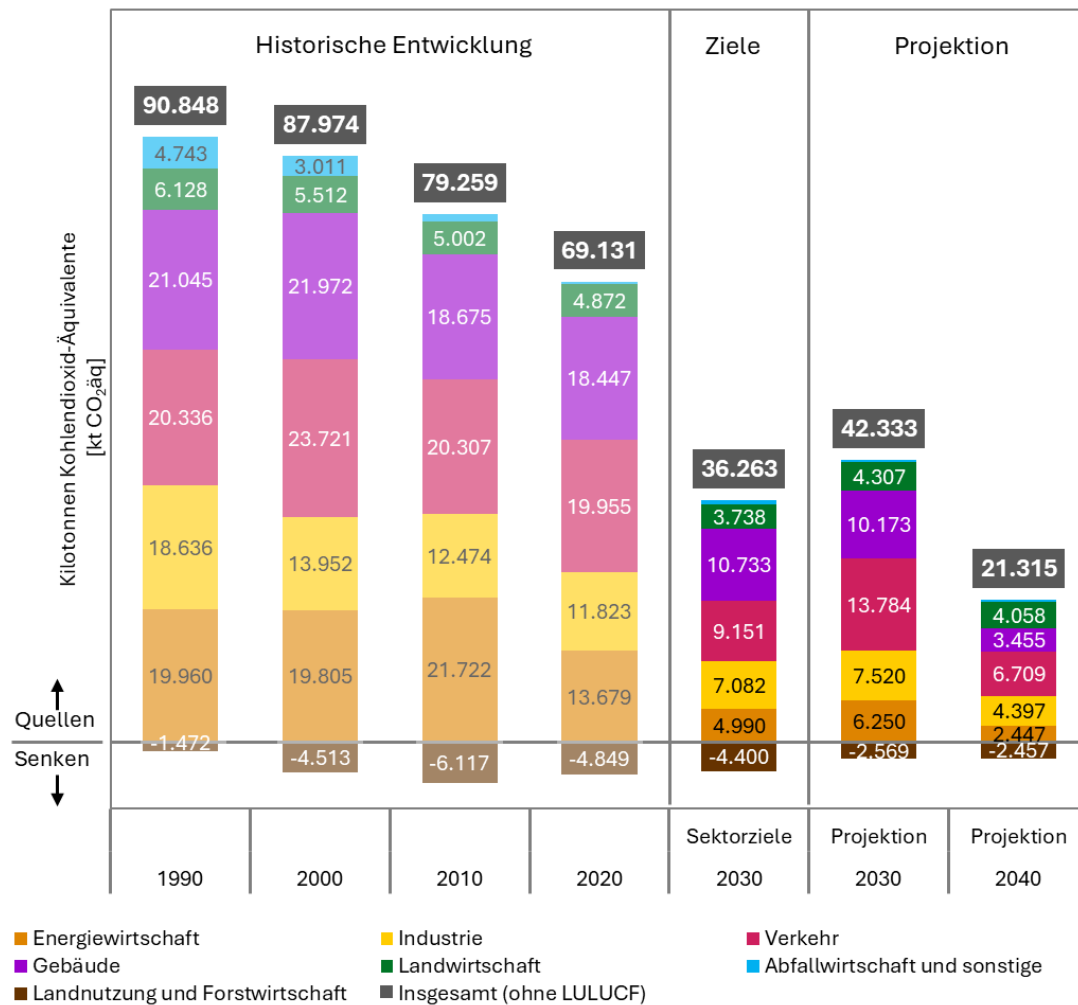
Abbildung 5: Entwicklung der Treibhausgasemissionen und ihre Projektion für die Jahre 2030 und 2040 in Baden-Württemberg für alle Sektoren zusammen mit LULUCF



Quelle: StaLa, Klimaziele nach KlimaG BW, eigene Berechnungen

Abbildung 6 gibt einen Überblick über die Entwicklung der THG-Emissionen in Baden-Württemberg nach Sektoren zwischen 1990 und 2040. Bis zum Jahr 2021 sind analog zu Abbildung 4 historische Daten dargestellt. Mit Bezug auf die im KlimaG BW definierten Sektorziele 2030 ergibt sich in der Projektion eine Zielverfehlung der Sektoren Energiewirtschaft, Industrie, Verkehr und Landwirtschaft sowie Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF). Eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse erfolgt für jeden Sektor in den folgenden Unterkapiteln.

Abbildung 6: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Baden-Württemberg seit 1990 mit Projektionen für 2030 und 2040 und Sektorziele nach KlimaG BW



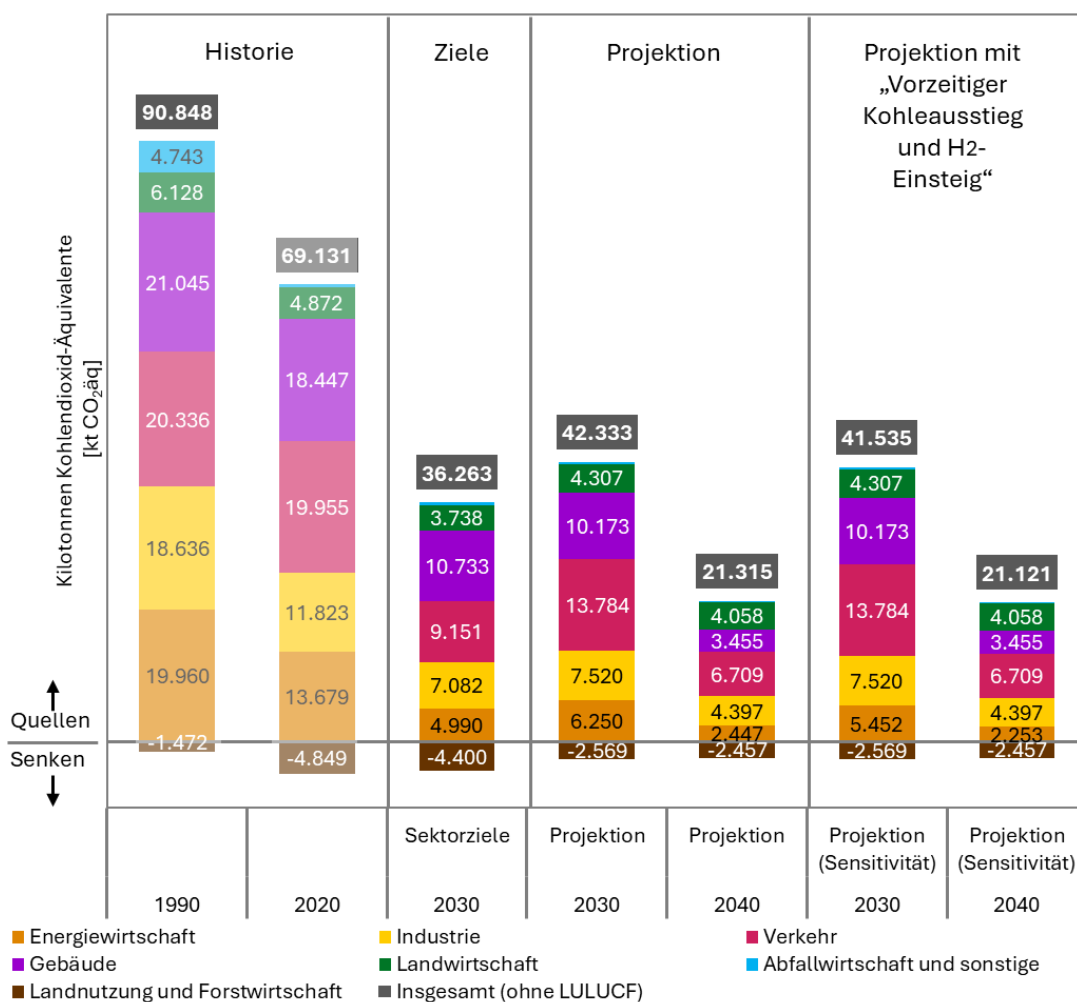
Quelle: StaLa, Klimaziele nach KlimaG BW, eigene Berechnungen

3.2 Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Baden-Württemberg bei Annahme eines vorzeitigen Kohleausstiegs und Wasserstoffanstieg durch Zubau wasserstofffähiger Erdgaskraftwerke

Wie in Kapitel 2.5 bereits erläutert, ist im Sektor Energiewirtschaft bereits absehbar, dass sich die Annahmen bezüglich des zukünftigen Kraftwerksparks nach Finalisierung der Kraftwerksstrategie ändern werden. Dieser absehbaren zukünftigen Entwicklung, deren finale Ausgestaltung zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichtes noch nicht abgeschlossen ist, wird in mehreren Sensitivitätsrechnungen untersucht. Im Gegensatz zu den untersuchten Sensitivitäten in den anderen Sektoren gibt es hierzu jedoch absehbare Änderungen, sodass die Auswirkungen der wahrscheinlichsten Sensitivität „Kohleausstieg und H₂-Einstieg durch Zubau wasserstofffähiger Erdgaskraftwerke in Deutschland“ an dieser Stelle diskutiert werden. Ein Kohleausstieg wird wahrscheinlich mit dem Zubau wasserstofffähiger Erdgaskraftwerke (H₂-ready Erdgaskraftwerke) verbunden sein. Hierzu ist es im Rahmen der Kraftwerksstrategie der Bundesregierung vorgesehen,

bis zum Jahr 2030 10 GW H₂-ready Erdgaskraftwerke zu errichten, die für eine Übergangszeit mit Erdgas betrieben werden. Durch die Stilllegung von Kohlekraftwerken sinken die THG-Emissionen signifikant. Gleichzeitig kommen jedoch auch THG-Emissionen durch neue Kraftwerke hinzu, solange diese mit Erdgas betrieben werden. Für die Entwicklung der Emissionen in Baden-Württemberg wird es dann entscheidend sein, wie viel Kraftwerksleistung regional zugebaut wird und wie diese Kraftwerke betrieben werden. Abbildung 7 vergleicht die Ergebnisse der durchgeführten Sensitivitätsrechnung mit den Projektionen.

Abbildung 7: Gegenüberstellung der Entwicklung der Treibhausgasemissionen in den Projektionen für 2030 und 2040 und der Berücksichtigung eines vorzeitigen Kohleausstiegs und H₂-Einstiegs in Deutschland



Quelle: Statistisches Landesamt BW, Klimaziele nach KlimaG BW, eigene Berechnungen

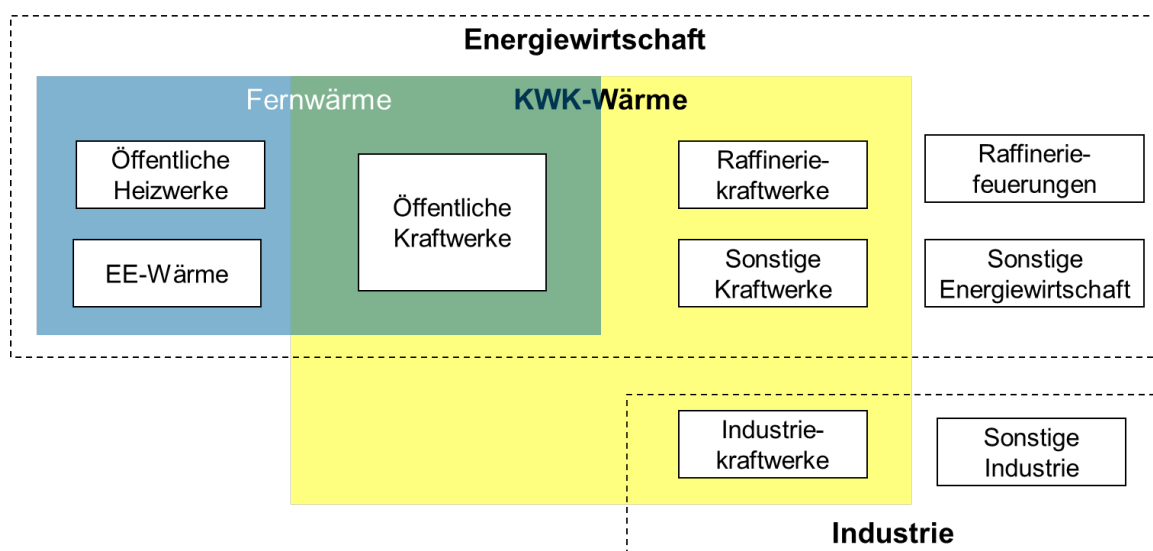
Die in dieser Sensitivitätsrechnung resultierenden Treibhausgasemissionen für den Sektor Energiewirtschaft belaufen sich auf 5.452 kt CO₂äq im Jahr 2030. Die Ziellücke wird damit deutlich verringert, das Sektorziel 2030 wird unter diesen Annahmen um 462 kt CO₂äq überschritten. Diese und andere Sensitivitätsrechnungen verdeutlichen, dass die Einhaltung des Sektorziels für die Energiewirtschaft von einem Kohleausstieg vor dem Jahr 2030 abhängt. Zudem kommt es auf die Lokalisierung und das Einsatzregime der

wasserstofffähigen Erdgaskraftwerke an. Diese neuen, hocheffizienten Kraftwerke verdrängen die Stromerzeugung von älteren Erdgaskraftwerken auf europäischer Ebene, die höhere spezifische CO₂-Emissionen aufweisen. Entsprechende CO₂-Emissionsminderungen werden nicht in Baden-Württemberg, sondern insbesondere auf europäischer Ebene sichtbar.

4 Energiewirtschaft

Die Energiewirtschaft bilanziert, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, die Emissionen aus dem Brennstoffverbrauch der öffentlichen und sonstigen Kraftwerke, der Raffineriekraftwerke sowie die Emissionen aus öffentlichen Heizwerken zur Erzeugung von Fernwärme. Darüber hinaus umfasst der Sektor Energiewirtschaft die Emissionen von Raffinerief Feuerungen und sonstigen energiewirtschaftlichen Anlagen. Die Emissionen aus Industriekraftwerken sind nicht dem Sektor Energiewirtschaft zuzuordnen. Die Bilanzierungsgrenzen der Energiewirtschaft sind in Abbildung 8 aufgezeigt.

Abbildung 8: Bilanzierungsgrenze der Treibhausgasemissionen des Sektors Energiewirtschaft



Quelle: Eigene Darstellung nach Harthan, Ralph *et al.*, 2024

Dem Sektor Energiewirtschaft werden damit alle Emissionen zugerechnet, die durch Nachfrageerhöhungen aus neuen Stromanwendungen entstehen. Hierzu zählen beispielsweise die Stromnachfrage der Elektromobilität, der Wärmepumpen oder Heizstäbe sowie die Nachfrage der Elektrolyseure zur Herstellung von Wasserstoff.

4.1 Zentrale Rahmendaten

Die Projektion für Baden-Württemberg des Sektors Energiewirtschaft basiert, wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben, auf dem PB-2024. Die zentralen Rahmendaten, die in die Modellierung eingegangen sind, sind diesem zu entnehmen.

Der nationale Projektionsbericht wurde bezüglich Brennstoffeinsätzen und THG-Emissionen auf das Basisjahr 2021 kalibriert. Sofern verfügbar, wurden auch Daten für 2022 berücksichtigt, um die Güte der Kalibrierung zu verbessern. Eingang in die Kalibrierung fanden auch energieträgerspezifische Nettostromerzeugungen für Deutschland und die im Modell abgebildeten Länder im Verband der Europäischen Übertragungsnetzbetreiber (ENTSO-E), Stromverbräuche in Deutschland und im Ausland. Darüber hinaus wurde die Statistik zum Brennstoffeinsatz der Wärmeerzeugung zur öffentlichen Versorgung in Deutschland bei der Kalibrierung berücksichtigt.

Für die Erstellung des Berichts mit Projektionen von THG-Emissionen für Baden-Württemberg wurden landesspezifische Statistiken des StaLA herangezogen. Hierzu zählt die Statistik des Brennstoffeinsatzes zur Strom- und Wärmeerzeugung sowie die der Entwicklung der THG-Emissionen Baden-Württembergs bis zum Jahr 2021, auf welche kalibriert wurde.

Darüber hinaus wurde die Bruttostromerzeugung nach Energieträgern in Baden-Württemberg sowie der Brennstoffeinsatz der Wärmeerzeugung der öffentlichen Versorgung in Baden-Württemberg für 2021 und 2022 berücksichtigt.

4.2 Projektion

Abbildung 9 zeigt die Entwicklung der historischen und projizierten Emissionen der Energiewirtschaft neben der Zielvorgabe des KlimaG BW für 2030.

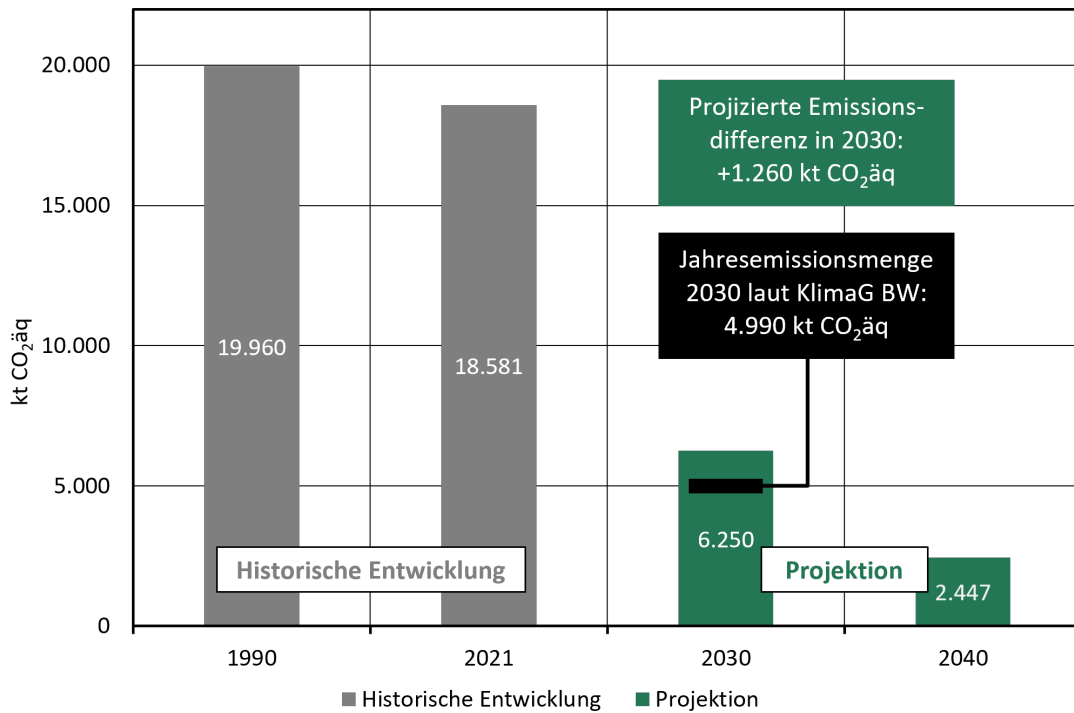
Nach heutigem Stand erreicht der Sektor Energiewirtschaft in der baden-württembergischen Projektion 2024 das Emissionsminderungsziel im Zieljahr 2030 nicht.²⁰ Die baden-württembergischen THG-Emissionen des Sektors Energiewirtschaft werden sich gemäß der Projektion bis 2030 auf 6.250 kt CO₂äq und damit um etwa 69 % gegenüber 1990 reduzieren. Das sektorspezifische Reduktionsziel einer Emissionsminderung nach KlimaG BW um 75 % gegenüber 1990, d.h. die Einhaltung einer maximalen Emission von 4.990 kt CO₂äq, wird laut Projektion um 1.260 kt CO₂äq überschritten. Für 2040 wurden im KlimaG BW bisher keine Sektorziele formuliert. Als übergeordnetes Gesamtziel ist die Netto-Treibhausgasneutralität festgelegt. Die Netto-Treibhausgasneutralität bis 2040 wird im Sektor Energiewirtschaft mit den bisher verabschiedeten Maßnahmen nicht erreicht. Es werden in 2040 Restemissionen in Höhe von 2.447 kt CO₂äq projiziert.

Auf nationaler Ebene erreicht der Sektor Energiewirtschaft Deutschland seine Emissionsminderungsziele. Wesentlicher Treiber für die Zielerreichung auf nationaler Ebene ist neben dem EU-ETS die Erreichung des EE-Ausbaukorridors, der Kohleausstieg nach Kohleverstromungsbeendigungsgesetz bis 2038 und die beschleunigte Umstellung der Wärmenetze auf erneuerbare Wärmeerzeuger.

Um die Ursachen für die Zielverfehlung Baden-Württembergs zu identifizieren, lohnt es, die verbleibenden Emissionen energieträgerspezifisch zu betrachten. Abbildung 10 bietet Einblick in die energieträgerspezifischen Emissionen.

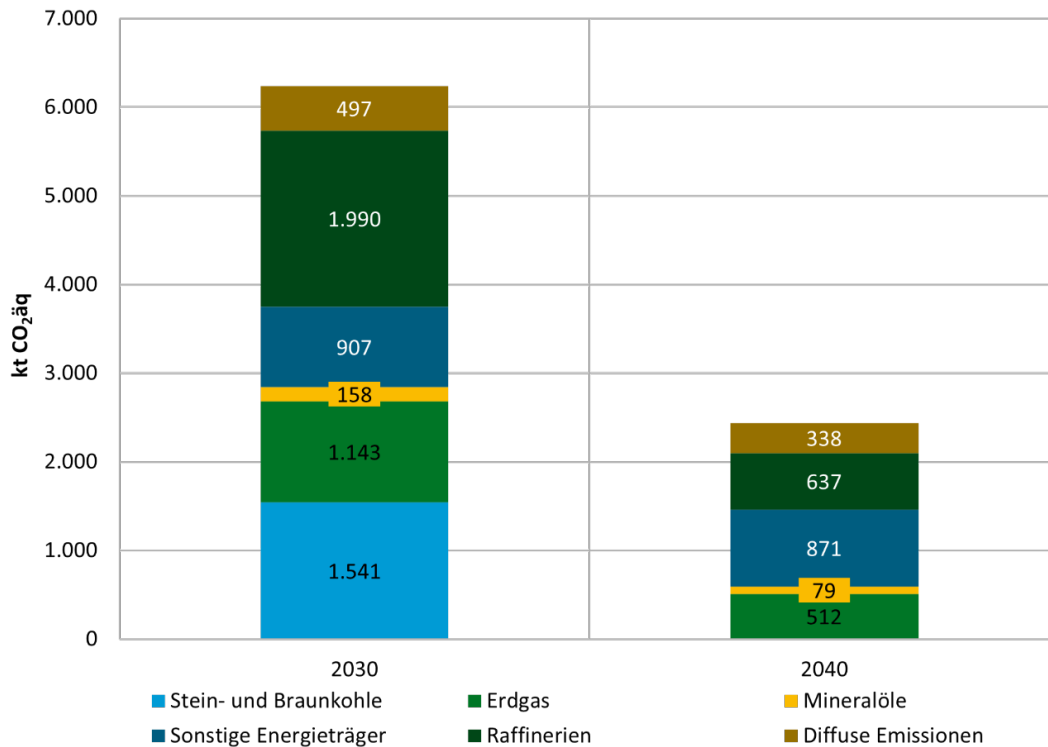
²⁰ An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass der Sektor Energiewirtschaft bezüglich der Betrachtung der Emissionen insofern besonders ist, als dass Stromnachfrage und Stromangebot in einem europäischen Strommarkt räumlich vergleichsweise weit voneinander getrennt sein können. Die Emissionen werden nach dem Territorialprinzip der Erzeugung zugeordnet. Würde Baden-Württemberg seine Nachfrage deutlich absenken, ist davon auszugehen, dass dies nicht wesentlich zu einer Reduktion der Kohleverstromung in Baden-Württemberg führt. Und baut Baden-Württemberg neue Gaskraftwerke mit einem hohen Wirkungsgrad, so werden diese im europäischen Strommarkt überdurchschnittlich eingesetzt. Die europäischen Emissionen werden sinken, die in Baden-Württemberg hingegen ansteigen. Insofern ist zu berücksichtigen, dass Klimaschutzmaßnahmen im Sektor Energiewirtschaft immer europäisch wirken, und eine ausschließliche Betrachtung der baden-württembergischen Emissionen die Gesamtwirkung von Klimaschutzmaßnahmen unvollständig abbildet.

Abbildung 9: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Baden-Württemberg im Sektor Energiewirtschaft



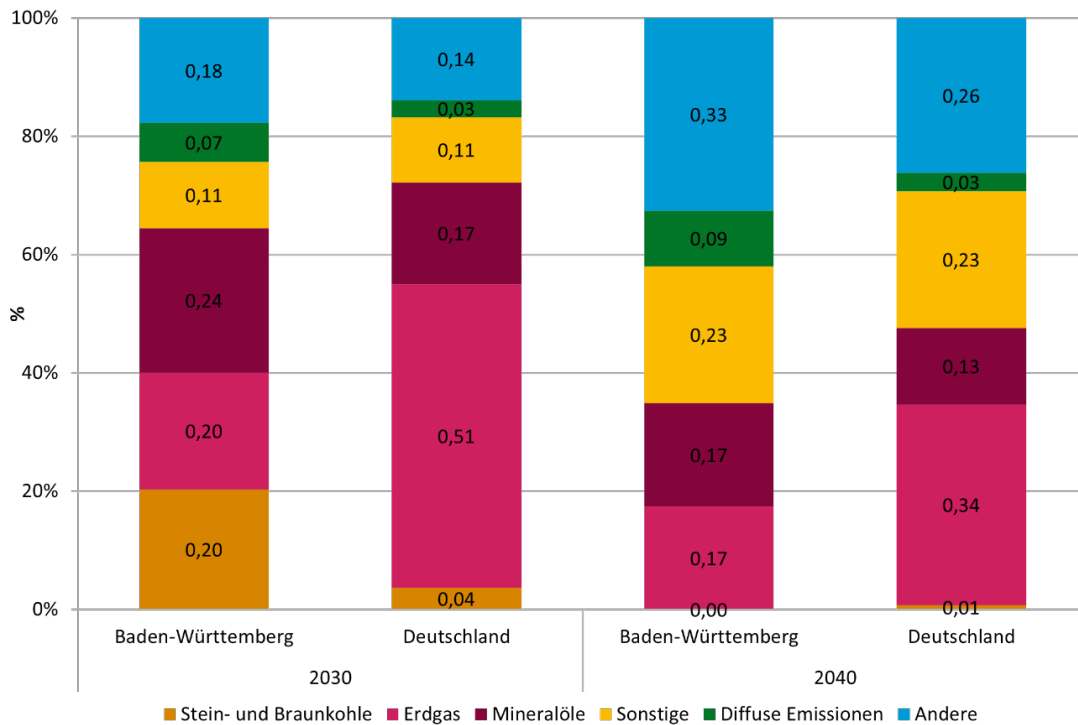
Quelle: StaLa, Klimaziele nach KlimaG BW, eigene Berechnungen Öko-Institut e.V.

Abbildung 10: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Baden-Württemberg im Sektor Energiewirtschaft nach Anwendungen bzw. Energieträger



Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut e.V.

Abbildung 11: Energieträgerspezifische THG-Entwicklung für Baden-Württemberg und Deutschland im Vergleich



Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut e.V.

Der Hauptemittent Baden-Württembergs des Sektors Energiewirtschaft mit Emissionen in Höhe von 1.990 kt CO₂äq im Jahr 2030 ist die Raffinerie MiRo. Emissionen in Höhe von etwa 1.550 kt CO₂äq sind weiterhin der Steinkohleverstromung zuzuordnen, die somit die zweithöchste Emissionsquelle darstellt. Auf die Erdgasverstromung entfallen im Jahr 2030 THG-Emissionen in Höhe von ca. 1.150 kt CO₂äq.

Die Mineralölraffinerien stellten 2021 auch deutschlandweit mit einem Anteil von 8,3% an den THG-Emissionen der Energiewirtschaft eine relevante Emissionsquelle dar, die zudem einen hohen Energieverbrauch aufweisen.²¹ In den Projektionen geht die Nachfrage nach Mineralölprodukten zurück. Die rückläufige Entwicklung ist darauf zurückzuführen, dass die Klimaschutzmaßnahmen in den Sektoren Verkehr, Gebäude und Industrie wirken und die Verbräuche von Mineralölprodukten reduzieren. Entsprechend sinken in den Raffinerien die Emissionen und die Nachfrage im Zeitverlauf: Deutschlandweit reduzieren sich die Emissionen und die Nachfrage der Raffinerien bis 2030 um etwa 12 % und bis 2050 um circa 80 % gegenüber dem Basisjahr 2021. Eine weitere Maßnahme zur Emissionsreduktion im Bereich der Raffinerien ist die Umstellung des per Dampfreformierung aus fossilen Energieträgern gewonnenen Wasserstoffs auf Elektrolysewasserstoff. Gemäß der nationalen Wasserstoffstrategie sind 2 GW an Elektrolyseuren bis zum Jahr 2030 für die Raffinerien vorgesehen. Dies ist im PB-2024 bereits berücksichtigt.

²¹ Raffinerien hatten im Basisjahr 2021 den größten Energieverbrauch von allen Anlagen der übrigen Energiewirtschaft.

Baden-Württemberg ist eines von drei Bundesländern, die nach bisheriger Projektion im Jahr 2030 noch Kohlekapazitäten betreiben. Die nationale Projektion 2024 berücksichtigt als verbindliche Rechtsgrundlage bei der Bestimmung der zukünftigen Kraftwerkskapazität im modellierten Jahr 2030 die Regelung zum Kohleausstieg nach Kohleverstromungsbeendigungsgesetz, nach der eine ordnungsrechtliche Stilllegung nach Altersreihung bis 2038 erfolgt.²²

Das Land Baden-Württemberg und der Kraftwerksbetreiber EnBW stehen miteinander in der Diskussion, ob in Baden-Württemberg ein vorzeitiger Kohleausstieg bis 2030 erwirkt werden könne. Nach aktuellem Diskussionsstand ist die EnBW dazu bereit, sofern die Rahmenbedingungen dies erlauben.²³ Wesentlich hierfür ist die Kraftwerksstrategie der Bundesregierung, da durch den Zubau von H₂-ready-Erdgaskraftwerken im süddeutschen Raum durch den vorzeitigen Kohleausstieg gegebenenfalls entstehende Kapazitätslücken geschlossen werden könnten.

Die Kraftwerksstrategie der Bundesregierung war zum Zeitpunkt der Erstellung des PB-2024 noch nicht verabschiedet. Zum Zeitpunkt der Erstellung des vorliegenden Berichts mit Projektionen von THG-Emissionen für Baden-Württemberg hat sich zwar die Bundesregierung auf die Kraftwerksstrategie geeinigt, die beihilferechtlichen Verhandlungen mit der EU-Kommission und die finale Verabschiedung standen noch aus.

Unter Berücksichtigung der politischen Maßnahmen und Bestrebungen ergibt sich für die Projektion 2024, dass Baden-Württemberg in 2030 mit einer Leistung von 1,7 GW über 50 % der installierten Steinkohle-Kraftwerkskapazität Deutschlands beherbergt. In der europäischen Merit Order reihen sich die Steinkohlekraftwerke Baden-Württembergs aufgrund des überdurchschnittlichen Wirkungsgrades entsprechend weit vorne ein und kommen auf vergleichsweise hohe Volllaststunden. Dies führt dazu, dass Baden-Württemberg im Projektionsjahr 2030 ein Bundesland ist, das im Sektor Energiewirtschaft vergleichsweise hohe Emissionen aufweist.

Baden-Württemberg erbringt seinen Beitrag zur Minderung der nationalen THG-Emissionen im Bereich der Energiewirtschaft. Unter anderem deswegen zeigt sich im PB-2024 auch, dass die Energiewirtschaft das anvisierte Emissionsminderungsziel 2030 erreicht.

Das baden-württembergische Emissionsminderungsziel bis 2030 (-75% Emissionsminderung gegenüber 1990) geht in seiner THG-Minderungswirkung über das deutschlandweite Ziel hinaus und hat das Potential, einen zusätzlichen Beitrag zur THG-Minderung darzustellen. Baden-Württemberg verfehlt in der Projektion das anvisierte Emissionsminderungsziel des Landes für 2030 auch deswegen, weil die politischen Verhandlungen zur Kraftwerksstrategie noch nicht finalisiert sind und aufgrund dessen nicht in die Projektion einbezogen werden konnten. Die Verabschiedung der Kraftwerksstrategie ist bereits stark in der politischen Diskussion. Es ist sehr wahrscheinlich, dass in näherer Zukunft eine verbindliche Rechtsgrundlage vorliegt, welche sich auf die Bewertung der nationalen CO₂-Emissionen im Sektor Energiewirtschaft auswirkt. Um die erwartbare

²² Kohleverstromungsbeendigungsgesetz – KVBG. Kohleverstromungsbeendigungsgesetz vom 8. August 2020 (BGBl. I S. 1818), das zuletzt durch Artikel 14 des Gesetzes vom 22. Dezember 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 405) geändert worden ist

²³ <https://www.enbw.com/unternehmen/nachhaltigkeit/environment/>

Wirkung der noch nicht finalisierten Kraftwerksstrategie auf Baden-Württemberg abzuschätzen, wurden Sensitivitäten zu Kohleausstieg und Einstieg in Wasserstoffstromerzeugung berechnet. Diese sind im Abschnitt folgenden Abschnitt erläutert.

Im Projektionsjahr 2040 sind die letzten Kohlekraftwerke außer Betrieb genommen und die Emissionen der Kohleverstromung sind auf 0 kt CO₂äq reduziert. Die Emissionen aus den Raffinerien belaufen sich auf 637 kt CO₂äq, was eine deutliche Reduktion gegenüber 2030, aber weiterhin eine relevante Emissionsquelle für das modellierte Jahr darstellt, in dem Netto-Treibhausgasneutralität über alle Sektoren hinweg erreicht werden muss. Die Emissionen aus der Erdgasverstromung belaufen sich auf 512 kt CO₂äq. Für die Annahmen zur Entwicklung der Wasserstoffpreise und anderer Energieträgerpreise sei auf das Rahmendatenpapier des nationalen Projektionsberichts verwiesen (Mendelevitch *et al.*, 2024) Die sonstigen Energieträger, hierunter z.B. Müllverbrennungsanlagen, stellen mit 871 kt CO₂äq die Hauptemissionsquelle des Projektionsjahres 2040 dar. Hierbei verringert sich durch Getrenntsammlung und Recycling die Menge an Abfällen, welche in der Verstromung zugeführt werden, was zu einer Verringerung der Emissionen führt.

Sensitivitätsanalysen

Wie bereits im Abschnitt 2.5 erläutert, steht für den Sektor Energiewirtschaft die Kraftwerksstrategie der Bundesregierung kurz vor ihrer Finalisierung. Da in der Projektion der THG-Emissionen nicht die wahrscheinlichste zukünftige Entwicklung, sondern die Welt aufgezeigt werden soll, die mit den bestehenden politischen Instrumenten bereits erreicht wird, konnte die Kraftwerksstrategie in der Projektion noch nicht berücksichtigt werden. Da es sehr wahrscheinlich ist, dass sich in naher Zukunft die politischen Rahmenbedingungen entsprechend verändern, sollten mögliche Auswirkungen der Kraftwerksstrategie und des vorzeitigen Kohleausstiegs auf die Entwicklung der THG-Emissionen im Sektor Energiewirtschaft im Rahmen der Projektion für das Land Baden-Württemberg quantifiziert werden.

Im Rahmen der Kraftwerksstrategie ist vorgesehen, bis zum Jahr 2030 H₂-fähige bzw. H₂-ready Erdgaskraftwerke zu errichten, die für eine Übergangszeit mit Erdgas betrieben werden. Unsicherheit besteht in der Höhe und der Lokalisierung der zu installierenden Neubauleistung. Für diese Anlagen ist unklar, ob sie marktgetrieben betrieben werden dürfen oder ob sie Nutzungsbeschränkungen erfahren. Auch die technologische Ausgestaltung der Anlagen wird wahrscheinlich erst mit der konkreten Ausschreibung der Leistung festgelegt. Unsicherheit besteht weiterhin, ob der Einstieg in H₂-ready-Erdgasanlagen notwendig den zeitgleichen Ausstieg aus Steinkohle mit sich bringt.

Um die Auswirkungen des Kohleausstiegs und die Umsetzung der Kraftwerksstrategie auf die Entwicklung der Treibhausgasemissionen zu untersuchen, wurden je drei Sensitivitäten konzipiert:

- In der Sensitivität „Kohleausstieg und H₂-Einstieg“ wird dargestellt, wie sich der Zubau von H₂-ready Erdgasanlagen, die übergangsweise mit Erdgas, nach 2030 dann mit H₂ betrieben werden, bei gleichzeitigem Rückbau der Steinkohleanlagen vor 2030 auf die THG-Emissionsbilanzen von Land, Bund und EU auswirkt. Die H₂-ready Erdgasanlagen werden als moderne Gas- und Dampfanlagen realisiert und dürfen marktgetrieben agieren.

- In der Sensitivität „Kohleausstieg 2030“ wird dargestellt, wie sich ein vorzeitiger Kohleausstieg ohne Zubau von weiteren H₂-ready Erdgasanlagen auf die THG-Emissionsbilanz von Land, Bund und EU auswirken würde. Diese Sensitivität steht auch stellvertretend für ein Szenario, in dem gegebenenfalls zu errichtende H₂-ready Erdgasanlagen mit Einsatzrestriktionen versehen sind, die ihren Betrieb auf die Zeitpunkte beschränkt, in denen sie zur Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit erforderlich sind.²⁴
- In der Sensitivität „H₂-Einstieg“ wird dargestellt, wie sich der Zubau von H₂-ready Erdgaskraftwerken auf die THG-Emissionsbilanzen von Land, Bund und EU auswirken würde, wenn die Kapazitäten zugebaut würden und die Steinkohle-Kraftwerkskapazitäten nicht vor 2030 abgeschaltet werden.

Die Sensitivitäten wurden einmal für Deutschland und einmal für Baden-Württemberg konzipiert, d.h. es wird einmal der Frage nachgegangen, wie sich ein baden-württembergischer Alleingang auswirken würde, und einmal wird dargestellt, wie sich eine deutschlandweit wirkende Kraftwerksstrategie, ggf. verbunden mit einem deutschlandweiten Kohleausstieg, auf die THG-Emissionen auswirken würde. Die letzten zwei Sensitivitäten stellen jeweils die Teilkomponenten der erstgenannten Sensitivität dar. In den entsprechenden „Deutschland-Sensitivitäten“ werden im Zuge der Kraftwerksstrategie 10 GW H₂-ready Erdgaskapazität errichtet, von denen 0,5 GW in Baden-Württemberg allokiert werden²⁵. In den „Baden-Württemberg-Sensitivitäten“ beschränkt sich der Zubau von H₂-ready Erdgaskapazität auf die 0,5 GW. Bereits angekündigte oder im Bau befindliche Kraftwerksneubauten sowie Kohleersatzkraftwerke, die ebenfalls zukünftig auf H₂ umgestellt werden sollen (und somit auch H₂-ready sind), sind hingegen auch im PB-2024 hinterlegt. In Baden-Württemberg sind das etwa 2 GW an Erdgas-Neubauleistung, die auch in der Projektion berücksichtigt sind. Die Ergebnisse der Sensitivitätsrechnungen sind in Tabelle 8 zusammengetragen: Dargestellt ist stets die Veränderung der THG-Emissionen gegenüber der Projektion. Negative Werte stellen eine Emissionsminderung, positive Werte eine Emissionserhöhung gegenüber der Projektion dar. In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Sensitivitätsrechnungen detaillierter erläutert.

²⁴ Bei allen Sensitivitäten wurde nicht der Frage nachgegangen, ob die Versorgungssicherheit in dieser Konfiguration gewährleistet bleibt. Es kann also sein, dass zusätzliche Kapazitäten durch Gewährleistung der Versorgungssicherheit erforderlich sind. Diese würden aber geringe Nutzungsstunden aufweisen und sind in der Projektion der THG-Emissionen somit nicht notwendig zu berücksichtigen.

²⁵ Mit 0,5 GW werden in Baden-Württemberg 1/20 der angekündigten 10 GW H₂-ready Gaskraftwerke vorgesehen, was circa dem Anteil Baden-Württembergs an der fossilen Kraftwerksleistung im Jahr 2021 entspricht.

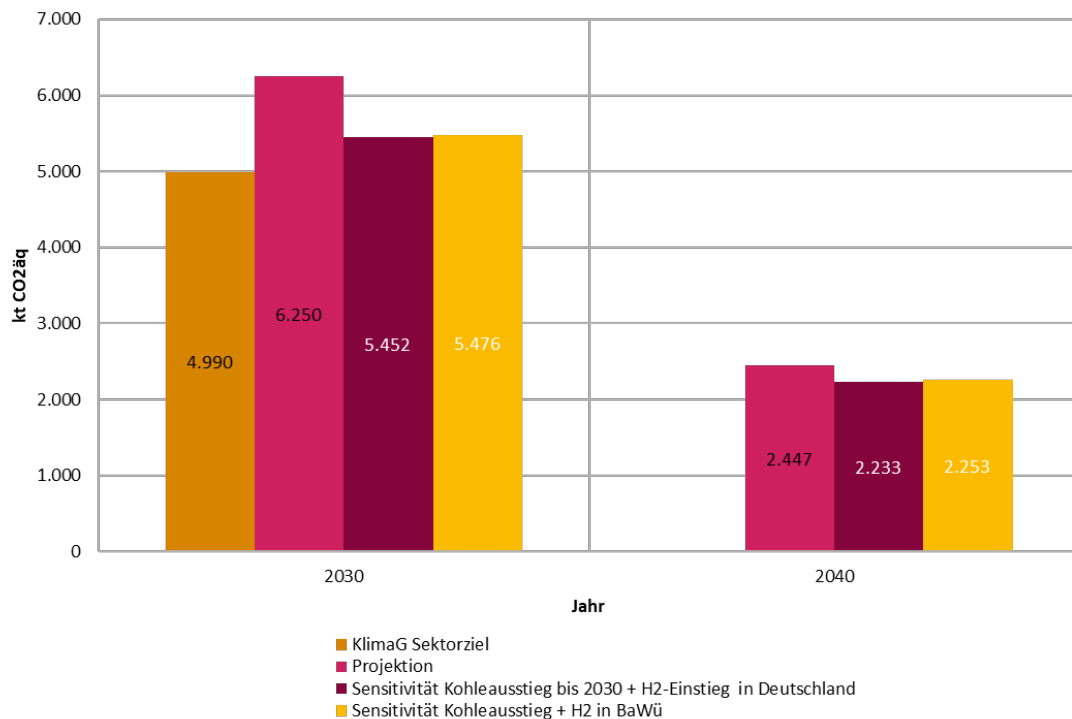
Tabelle 8: Absolute und relative Emissionsminderungen der Sensitivitäten zu Kohleausstieg und Kraftwerksstrategie für Baden-Württemberg gegenüber der Projektion des PB-2024 heruntergebrochen auf Baden-Württemberg, Deutschland und Europa

		Sensitivitäten						
		Emissionsänderung zwischen der Sensitivität und der Projektion	Kohleausstieg und H ₂ -Einstieg in Deutschland	Kohleausstieg und H ₂ -Einstieg in Baden-Württemberg	H ₂ -Einstieg in Deutschland	H ₂ -Einstieg in Baden-Württemberg	Kohleausstieg bis 2030 in Deutschland	Kohleausstieg bis 2030 in Baden-Württemberg
2030	Baden-Württemberg	[kt CO ₂ äq]	-799	-774	701	784	-1.512	-1.545
		rel.	-18,1 %	-17,6 %	15,9 %	17,8 %	-34,4 %	-35,1 %
	Deutschland	[kt CO ₂ äq]	7.632	-370	9.325	483	-1.834	-845
		rel.	8,6 %	-0,4 %	10,4 %	0,5 %	-2,1 %	-0,9 %
	Europa	[kt CO ₂ äq]	-1.936	-647	-587	-36	-1.464	-619
		rel.	-0,8 %	-0,3 %	-0,3 %	0 %	-0,6 %	-0,3 %
2040	Baden-Württemberg	[kt CO ₂ äq]	-213	-194	-213	-194	0	0
		rel.	-12,5 %	-18,1 %	-12,5 %	-11,4 %	0 %	0 %
	Deutschland	[kt CO ₂ äq]	-530	-429	-530	-429	0	0
		rel.	-1,4 %	-1,2 %	-1,4 %	-1,2 %	0 %	0 %
	Europa	[kt CO ₂ äq]	-393	-389	-393	-389	0	0
		rel.	-0,2 %	-0,2 %	-0,2 %	-0,2 %	0 %	0 %

Sensitivitäten zu „Kohleausstieg und H₂-Einstieg in Deutschland und Baden-Württemberg“

Die resultierenden THG-Emissionen Baden-Württembergs der Sensitivitäten „Kohleausstieg und H₂-Einstieg“ sind in Abbildung 12 im Vergleich zur Projektion (und zum Sektorziel) dargestellt.

Abbildung 12: Sensitivitätsrechnungen zu Kohleausstieg und H₂-Einstieg in Deutschland und Baden-Württemberg



Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut e.V.

Durch den Ausstieg aus der Steinkohleverstromung und den Einstieg in die H₂-Stromerzeugung gehen die CO₂-Emissionen der Energiewirtschaft in Baden-Württemberg signifikant zurück. Werden alle Kohlekapazitäten in Deutschland bis 2030 aus dem Markt genommen und durch den Zubau von 10 GW übergangsweise mit Erdgas betriebenen H₂-ready-Anlagen ersetzt, so reduzieren sich die Emissionen in Baden-Württemberg um ca. 800 kt CO₂äq. Werden nur in Baden-Württemberg die Steinkohlekapazitäten bis 2030 stillgelegt und der Kraftwerkspark um 0,5 GW H₂-ready-Erdgaskapazität ergänzt, so wird in Baden-Württemberg eine etwas geringfügigere, aber vergleichbare CO₂-Emissionsreduktion in Höhe von 774 kt CO₂äq. erzielt. Zur Erreichung des KlimaG Sektorziels bedarf es aber weiterer Maßnahmen, um eine darüberhinausgehend erforderliche Emissionsreduktion um ca. 500 kt CO₂äq zu erzielen.

Die Ursache dafür liegt im Emissionsrebound: Zwar werden durch die Abschaltung aller deutschen Kohlekraftwerke in Baden-Württemberg 1.545 kt CO₂äq. vermieden. Durch die Substitution dieser Anlagen durch hocheffiziente H₂-ready-Kraftwerke, die übergangsweise mit Erdgas betrieben werden und mit 3.225 Vollbenutzungsstunden zur Stromerzeugung beitragen, steigen die CO₂-Emissionen in Baden-Württemberg um 771 kt CO₂äq an.

Auf nationaler Ebene wird der Emissionsrebound noch deutlicher sichtbar: Anstatt eine THG-Emissionsminderung herbeizuführen, steigen in Deutschland die THG-Emissionen gegenüber der Projektion um 8,6 % an: Die 10 GW Erdgaskapazität verdrängen relevant europäische Stromerzeugung, da sie sich weit vorne in der Merit Order einsortieren. Die emissionsmindernde Wirkung ist erst auf europäischer Ebene, dort aber deutlich, festzustellen: Die europäischen THG-Emissionen reduzieren sich durch einen Kohleausstieg und Einstieg in die H₂-Stromerzeugung auch in der Übergangsphase im Jahr 2030 in Deutschland um 1.936 kt CO₂äq gegenüber der Projektion.

Eine denkbare Maßnahme zur Begrenzung des Emissionsrebounds und zur Erreichung von lokalen Emissionsminderungszielen wäre, die Stromerzeugung aus den H₂-ready-Neubauanlagen zu begrenzen, bis sie auf H₂ umgestellt sind. Auf europäischer Ebene hingegen wäre diese Maßnahme hinderlich für die Emissionsminderung. Sinnvoller wäre, zusätzliche Emissionsminderungen an anderer Stelle zu erwirken.

In 2040 ist der Kohleausstieg auch in der Projektion bereits vollständig erfolgt, so dass sich als einzige Änderung zur Projektion der Zubau von 10 GW Kraftwerkskapazität darstellt, die mit H₂ betrieben werden. Die Maßnahme bewirkt sowohl in Baden-Württemberg, in Deutschland und in Europa eine Minderung der THG-Emissionen. Sie fällt aber vergleichsweise gering aus: auf europäischer Ebene beträgt die THG-Emissionsminderung gegenüber der Projektion nur 0,2 % (in beiden Sensitivitäten). Die Ursache dafür liegt an den hohen Kosten des Wasserstoffs: Ohne eine Subventionierung des Brennstoffwechsels oder einen hohen CO₂-Preis ist der Einsatz von H₂ mit ca. 250 Vollbenutzungsstunden auch in 2040 marginal.

Auf nationaler Ebene wird im Rahmen der Kraftwerksstrategie der Bau von H₂-fähigen bzw. H₂-ready Gaskraftwerken angestrebt und soll finanziell gefördert werden. Um den möglichen Effekt dieser zusätzlichen Maßnahme auf Baden-Württemberg abzuschätzen, wurde die Sensitivitätsrechnung „Kohleausstieg und H₂-Einstieg in Baden-Württemberg“ durchgeführt. Hier wurde für H₂-ready-Erdgaskraftwerke in Baden-Württemberg in 2030 und 2040 eine Leistung von 0,5 GW angenommen.²⁶ Dagegen wurden im MMS-Szenario des PB-2024 diese H₂-ready Erdgaskraftwerke nicht berücksichtigt. Bereits angekündigte oder im Bau befindliche Kraftwerksneubauten sowie Kohleersatzkraftwerke (ca. 2 GW) sind hingegen auch im PB-2024 hinterlegt, auch wenn sie bis 2040 nicht auf Wasserstoff umgestellt werden. Die Errichtung neuer Erdgaskraftwerke ist relevant, um die Versorgungssicherheit in Süddeutschland bei wegfallenden Steinkohle-Kapazitäten zu gewährleisten.

Da sich die genaue Ausgestaltung der Maßnahme noch im politischen Prozess befindet, kann an dieser Stelle nur mit Annahmen bezüglich der Kraftwerkstechnologien, die zum Zuge kommen und ihrer Einsatzregeln gerechnet werden. Für die Sensitivitäten wird angenommen, dass der Zubau der H₂-ReadyErdgaskraftwerke in Form von hochmodernen Gas-und-Dampfturbinen--Anlagen erfolgt, die einen hohen elektrischen Wirkungsgrad aufweisen. Es wird angenommen, dass die Anlagen im Erdgasbetrieb marktgetrieben agieren dürfen. Diese Annahmen führen dazu, dass die neuen Erdgasanlagen in 2030

²⁶ Mit 0,5 GW werden in Baden-Württemberg 1/20 der angekündigten 10 GW H₂-ready Gaskraftwerke vorgesehen, was circa dem Anteil Baden-Württembergs an der fossilen Kraftwerksleistung im Jahr 2021 entspricht.

hohe Nutzungsstunden aufweisen. Dadurch kann der Emissionsrebound in Baden-Württemberg vergleichsweise hoch ausfallen. Die neuen, hocheffizienten Kraftwerke verdrängen dann die Stromerzeugung von älteren Erdgaskraftwerken auf europäischer Ebene, die höhere spezifische CO₂-Emissionen aufweisen. Entsprechende CO₂-Einsparungen werden dann insbesondere auf europäischer Ebene sichtbar. Erfolgt nach 2030 der Brennstoffwechsel auf Wasserstoff, bleibt die Annahme des marktgetriebenen Einsatzregimes bestehen.

Die Erhöhung der Kraftwerksleistung an neuen H₂-ready Erdgaskraftwerken bewirkt aufgrund der resultierenden hohen Volllaststunden unter Einsatz von fossilem Erdgas, dass die Emissionen im Vergleich zur Sensitivität „Kohleausstieg bis 2030 in Baden-Württemberg“ erneut ansteigen: Die Emissionen erreichen ein Niveau von 5.476 kt CO₂äq. Das Sektorziel der Energiewirtschaft ist damit um 486 kt CO₂äq. überschritten.

Die H₂-ready Erdgaskraftwerke erreichen mit etwa 3.500 Vollbenutzungsstunden eine vergleichsweise hohe Auslastung. Sie können kostengünstiger Strom erzeugen als die Kraftwerke, die bisher zur Nachfragedeckung eingesetzt wurden. Dabei verdrängen sie nicht die in Baden-Württemberg situierte Erzeugung, sondern weniger effiziente Erdgas-Stromerzeugung im europäischen Ausland: die Stromerzeugung in Deutschland erhöht sich im Vergleich zum MMS um etwa 0,9 TWh. Im Vergleich zum MMS sind dennoch auf baden-württembergischer, auf nationaler und auf europäischer Ebene Emissionsminderungen zu verzeichnen. Im Vergleich zur Sensitivität „Kohleausstieg bis 2030 in Baden-Württemberg“ bewirkt der Zubau von H₂-ready-Erdgaskraftwerken in Baden-Württemberg und Deutschland einen Anstieg der Emissionen, der erst auf europäischer Ebene zu geringfügigen Emissionsminderungen führt (vgl. Tabelle 8). Durch eine Begrenzung des Emissionsrebounds aus zu errichtenden H₂-ready-Erdgasanlagen auf die zur Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit relevanten Stunden können die THG-Emissionen auf Landesebene auf unter 4.990 kt CO₂äq. fallen.

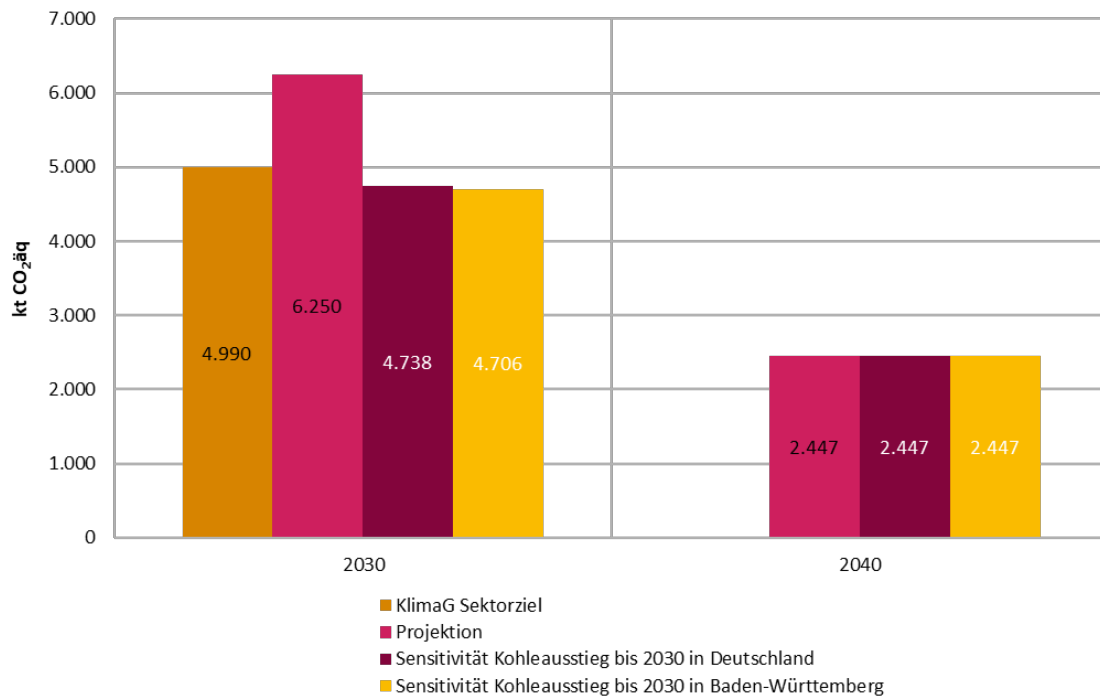
Sensitivitäten zu „Kohleausstieg bis 2030“

Um zu bemessen, inwiefern die Stilllegung der Kohlekraftwerke zur Emissionsminderung in der Energiewirtschaft beiträgt, wurde in den Sensitivitäten „Kohleausstieg bis 2030“ der vorzeitige Kohleausstieg in Deutschland bzw. in Baden-Württemberg als singuläre Parametervariation berechnet. Zudem können diese Sensitivitäten so interpretiert werden, dass H₂-ready Erdgaskraftwerke zwar zur Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit zugebaut, aber in ihrer Nutzung auf diese wenigen Stunden so beschränkt werden, dass die ihnen zuzuordnenden CO₂-Emissionen vernachlässigbar sind²⁷. Ein Ausstieg aus der Stein- und Braunkohleverstromung bis 2030 in Deutschland oder auch nur in Baden-Württemberg würde grundsätzlich - auf Landes-, Bundes- und auf europäischer Ebene zu einer schnelleren THG-Emissionsminderung führen. Für die THG-Bilanz Baden-Württembergs ist es nicht entscheidend, ob der Kohleausstieg national bis 2030 erfolgt oder ob einzig Baden-Württemberg seine Kohlekapazitäten vor 2030 ruhen lässt: Bei einem frühzeitigen nationalen Kohleausstieg wäre geringfügig mehr Stromerzeu-

²⁷ Zusätzlich benötigte Stromerzeugung wird in der Sensitivität durch sogenannte Backup-Kraftwerke bereitgestellt, welches in Leistungslücken zu sehr hohen Kosten Strom bereitstellen kann.

gung aus baden-württembergischen Erdgaskraftwerken erforderlich als bei dem regionalen Ausstieg. Auf das Projektionsjahr 2040 hat der vorzeitige Kohleausstieg keine Auswirkungen.

Abbildung 13: Sensitivitätsrechnungen zu Kohleausstieg in Deutschland und Baden-Württemberg



Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut e.V.

Die Sensitivität „Kohleausstieg bis 2030 nur in Baden-Württemberg“ untersucht, wie sich die Abschaltung der Kohlekraftwerkskapazitäten Baden-Württembergs auf die baden-württembergischen Emissionen auswirken würde. Hierfür wurden die zwei Steinkohleblöcke Baden-Württembergs RDK 8 und GKM 9 bis 2030 stillgelegt, so dass in Deutschland nur noch 1,6 GW an Steinkohlekraftwerkskapazität in anderen Bundesländern verbleibt. Die THG-Emissionen werden durch den vollständigen Kohleausstieg in Baden-Württemberg um 1.541 kt CO₂-äq auf 4.706 kt CO₂-äq sinken. Diese singuläre Maßnahme würde bewirken, dass Baden-Württemberg seine Emissionsminderungsziele im Energiesektor einhält. Auch auf nationaler (-845 kt CO₂-äq) und europäischer Ebene (-619 kt CO₂-äq) bewirkt die Abschaltung der Kohlekraftwerke in Baden-Württemberg im Jahr 2030 eine Emissionsminderung: der verbleibende europäische Kraftwerkspark bietet emissionsärmere Lösungen zur Deckung der Stromnachfrage. Es ist allerdings zu betonen, dass Auswirkungen auf die Systemstabilität im Stromsystem im vorliegenden Modellierungsrahmen nicht berücksichtigt werden. In Bezug auf die Bilanzierung der THG-Emissionen wiederum haben zusätzliche Kraftwerkskapazitäten zur Sicherung der Systemstabilität typischerweise eine sehr geringe Wirkung, da sie sehr geringe Betriebsstunden aufweisen.

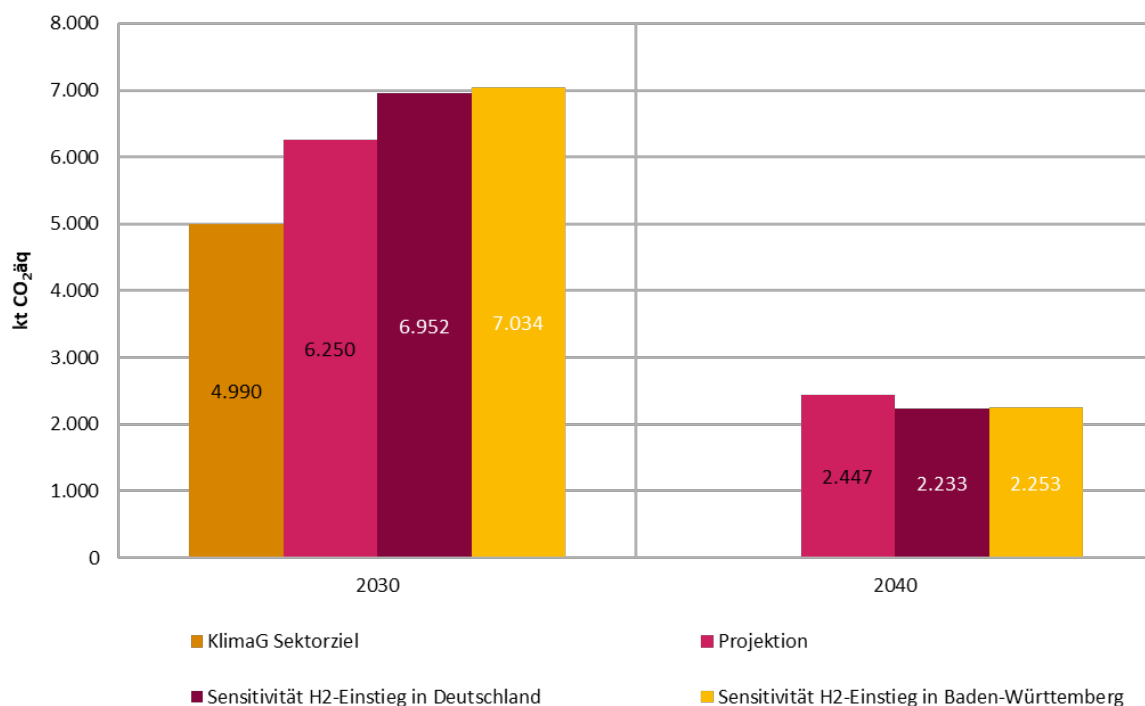
Ein Ausstieg aus der Stein- und Braunkohleverstromung bis 2030 in Deutschland würde zu schnelleren Emissionsminderungen auf nationaler und europäischer Ebene führen.

Für Baden-Württemberg würde ein nationaler Kohleausstieg hingegen zu einer geringfügigen Erhöhung der Emissionsbilanz gegenüber einem reinen baden-württembergischen Kohleausstieg führen, da bei einem nationalen Kohleausstieg etwas mehr Stromerzeugung aus baden-württembergischen Erdgaskraftwerken erforderlich wäre. Die THG-Emissionen der Energiewirtschaft in Baden-Württemberg würden sich bei einem deutschlandweiten Kohleausstieg bis 2030 auf 4.738 kt CO₂äq belaufen.

Sensitivitäten zu „H₂-Einstieg“

Die Sensitivitäten zum H₂-Einstieg in Deutschland und Baden-Württemberg komplettieren das Bild. Primär dienen die Sensitivitäten dazu, die Wirkung des H₂-Zubaus als Teilwirkung des Gesamtszenarios „Kohleausstieg und H₂-Einstieg“ zu quantifizieren. Darüber hinaus stehen die Szenarien stellvertretend für eine Welt, in der zwar der Zubau der H₂-ready Erdgaskraftwerke vorangetrieben wird, der Kohleausstieg aber nicht bis 2030 umgesetzt wird²⁸.

Abbildung 14: Sensitivitätsrechnungen zu H₂-Einstieg in Deutschland und Baden-Württemberg



Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut e.V.

Der H₂-Einstieg ist dadurch charakterisiert, dass bis 2030 bereits Kraftwerkskapazitäten zugebaut werden, die zukünftig auf den Brennstoff H₂ umgestellt werden können. In den frühen Szenariojahren, in denen H₂ regional ggf. noch nicht in ausreichenden Mengen verfügbar ist, werden die Kraftwerke übergangsweise mit Erdgas betrieben. Da 0,5 GW hochmoderne Erdgasanlagen in Baden-Württemberg verortet werden, reihen sich diese

²⁸ Mit Vollbenutzungsstunden für Braunkohle von unter 250 h/a und für Steinkohle von ca. 400 h/a ist die Wirtschaftlichkeit des Weiterbetriebs der Anlagen jedoch zweifelhaft.

entsprechend weit vorne in der europäischen Merit Order ein und werden genutzt. Die CO₂-Emissionen steigen auf Landesebene auf ca. 7.000 kt CO₂äq. an.

In 2040 kommt es dann in beiden Sensitivitäten zu geringfügigen Emissionsminderungen (jeweils ca. -200 kt CO₂äq.). Die Minderung fällt so gering aus, da die Nutzungsstunden der nun auf Wasserstoff umgestellten Kraftwerke ohne gezielte Subventionierung bei dem hinterlegten CO₂-Preis mit < 250 h/a nicht vermögen, relevant Stromerzeugung zu substituieren. Aus europäischer Gesamtsystemsicht hat der Zubau der H₂-ready Erdgaskraftwerke bereits in 2030 eine THG-Emissionsminderungswirkung. Tabelle 8 zeigt auf, dass die THG-Emissionen bei einem deutschlandweiten Zubau von 10 GW H₂-ready Erdgaskapazität bereits in 2030 in Europa um 587 kt CO₂äq. zurückgehen: Die modernen Anlagen mit geringen spezifischen CO₂-Emissionen verdrängen in ganz Europa emissions- und damit kostenintensivere Kraftwerkseinspeisungen.

Im Projektionsjahr 2040 sind die H₂-ready-Erdgaskraftwerke auf den Brennstoff H₂ umgestellt. Hierdurch können nun im Vergleich zur Sensitivität „Kohleausstieg bis 2030 in Baden-Württemberg“ nicht nur im europäischen Gesamtkontext, sondern auch in Baden-Württemberg und in Deutschland Emissionsminderungen erzielt werden. Im Vergleich zur Projektion 2040 sinken die THG-Emissionen Baden-Württembergs um 194 kt CO₂äq. und erreichen ein Niveau von 2.253 kt CO₂äq. Die Volllaststunden der Wasserstoffkraftwerke belaufen sich auf 2.250 h/a.

Die Sensitivität „H₂-Einstieg in Baden-Württemberg“ komplettiert das Bild, ohne dass es als singuläres Szenario eine Gültigkeit besitzt. Es dient einzig dazu, die Wirkung des H₂-Zubaus als Teilwirkung des Gesamtszenarios „Kohleausstieg und H₂-Einstieg in Baden-Württemberg“ zu quantifizieren. Der H₂-Einstieg ist dadurch charakterisiert, dass bis 2030 bereits Kraftwerkskapazitäten zugebaut werden, die zukünftig auf den Brennstoff H₂ umgestellt werden können. In den frühen Szenariojahren, in denen H₂ regional ggf. noch nicht in ausreichenden Mengen verfügbar ist, werden die Kraftwerke übergangsweise mit Erdgas betrieben. Die Sensitivität zeigt auf, dass eine Erhöhung der fossilen Kraftwerksleistung in Baden-Württemberg durch den Zubau von modernen Gaskraftwerken aus europäischer Gesamtsystemsicht eine THG-Emissionsminderungswirkung hat: Die hochmodernen Anlagen mit geringeren spezifischen CO₂-Emissionen verdrängen in ganz Europa emissions- und damit kostenintensivere Kraftwerkseinspeisungen. Das führt aber in der Übergangszeit, in der Erdgas als Brennstoff eingesetzt wird, auf Landes- und Bundesebene zu einem Emissionsrebound: auf lokaler Ebene steigen die CO₂-Emissionen an, da die Stromerzeugung stärker ansteigt als die spezifischen Emissionen zurückgehen. Sobald die Anlagen auf H₂ umgestellt sind, gehen auch die lokalen Emissionen zurück.

Die Sensitivitäten zum Kohleausstieg und H₂-Einstieg wurden analog zum Verfahren für Baden-Württemberg auch für Deutschland als Dreiklang („Kohleausstieg bis 2030 in DE“, „H₂-Einstieg DE“ und „Kohleausstieg und H₂-Einstieg DE“) für den Bericht mit Projektionen von THG-Emissionen für Baden-Württemberg berechnet.

Sensitivität zur Wirkung von Nachfragereduktionen auf die THG-Emissionen der Energiewirtschaft

In einigen Sektoren sind die Maßnahmen auf Landesebene nicht im MMS des PB-2024 berücksichtigt, sondern sie führen zu zusätzlichen Emissionsminderungen. Diese Maßnahmen könnten teilweise auch zu Nachfragereduktionen führen, die dann im Sektor Energiewirtschaft ebenfalls nicht berücksichtigt wären. Im Rahmen des Projektes war ein iteratives Verfahren zwischen den Sektoren nicht vorgesehen. Insofern konnte etwaigen durch Landesmaßnahmen initiierten Nachfragerückgängen nur durch eine Sensitivitätsrechnung begegnet werden. Es wurde festgelegt, dass ein Nachfragerückgang in Baden-Württemberg in Höhe von 5 % untersucht werden soll. Dies stellt auf nationaler Ebene einen Nachfragerückgang in Höhe von 0,5 % dar.

Der modellierte Nachfragerückgang führt in Baden-Württemberg, in Deutschland und in Europa zu einer THG-Emissionsminderung. Im Jahr 2030 beträgt die durch den Nachfragerückgang verursachte Emissionsminderung in Baden-Württemberg im Vergleich zum PB-2024 0,8 %, so dass sich die THG-Emissionen der Energiewirtschaft auf 6.216 kt CO₂äq belaufen. In Deutschland beträgt die Emissionsminderung 0,3 % der nationalen Emissionen, und auf europäischer Ebene werden mit einer Minderung um 1.088 kt CO₂äq etwa 0,5 % der europäischen Emissionen im Projektionsjahr 2030 vermieden.

Die Minderungswirkung im Projektionsjahr 2040 ist auf europäischer Ebene vergleichbar, auf nationaler Ebene fällt sie höher, auf Landesebene geringer aus. Das Zahlenwerk ist Tabelle 9: Quantifizierung der Emissionsminderungswirkung der Landesinstrumente durch Differenzbildung zwischen kontrafaktischem Szenario und Referenz zu entnehmen.

4.3 Instrumentenbewertung

Im Rahmen der Projektionen von THG-Emissionen für Baden-Württemberg werden die im KMR gelisteten Instrumente und Maßnahmen zur Emissionsminderung in Baden-Württemberg bezüglich ihrer Emissionsminderungswirkung eingeschätzt. Für die Energiewirtschaft können fünf Instrumentenbündel identifiziert werden. In diesem Abschnitt wird die Quantifizierung der Instrumentenbündel vorgestellt.

Quantifizierungen von Instrumenten im Gegensatz zu Sensitivitäten sollen aufzeigen, welchen Emissionsminderungsbeitrag das in der Projektion berücksichtigte Instrument erbringen kann. Deshalb wird eine kontrafaktische Referenz berechnet, in der das Instrument nicht implementiert ist. Die Differenz der THG-Emissionen stellt den Emissionsminderungsbeitrag des Instrumentes dar. Im Gegensatz zu den Sensitivitäten, in denen Maßnahmen untersucht werden, die noch nicht in der Projektion berücksichtigt werden konnten und somit zusätzlich emissionsmindernd wirken, fallen die berechneten Differenzen zwischen Quantifizierung und Projektion nun positiv aus. Tabelle 9: Quantifizierung der Emissionsminderungswirkung der Landesinstrumente durch Differenzbildung zwischen kontrafaktischem Szenario und Referenz bietet einen Überblick über die berechneten Quantifizierungen zur Instrumentenbewertung.

Bei den Quantifizierungen ist augenscheinlich, dass sich die Wirkungen der Landesinstrumente auf die Emissionen des Landes, des Bundes und auf Europa in Bereichen

<1 % bewegen. Bei der Einordnung der Größenordnung ist zu beachten, dass die gesamte Stromnachfrage Baden-Württembergs an der nationalen Stromnachfrage etwa 12 % und an der modellierten Stromnachfrage weniger als 5 % ausmacht.

Tabelle 9: Quantifizierung der Emissionsminderungswirkung der Landesinstrumente durch Differenzbildung zwischen kontrafaktischem Szenario und Referenz

		Quantifizierung							
		Emissionsänderung zwischen kontrafaktischem Szenario und Projektion	Quantifizierung Zubau PV-Freiflächenanlagen (100%)	Quantifizierung Zubau Wind onshore (100%)	Quantifizierung Zubau PV Aufdach (100%)	Summe der EE-Quantifizierungen (100%)	Quantifizierung Effizienzmaßnahmen (5%)	Quantifizierung Umstellung der Wärmenetze auf EE	Quantifizierung des Kohleausstiegs in Baden-Württemberg (100%) ²⁹
2030	Baden-Württemberg	[kt CO ₂ äq]	44	43	12	99	18	22	<u>2.565</u>
		rel.	1,0%	1,0%	0,3%	2,3%	0,4%	0,5%	<u>58,3%</u>
	Deutschland	[kt CO ₂ äq]	760	562	155	1.478	251	257	<u>1.612</u>
		rel.	0,9%	0,6%	0,2%	1,7%	0,3%	0,3%	<u>1,8%</u>
	Europa	[kt CO ₂ äq]	2.448	2.000	611	5.060	1.090	134	<u>1.714</u>
		rel.	1,1%	0,9%	0,3%	2,2%	0,50%	0,1%	<u>0,7%</u>
2040	Baden-Württemberg	[kt CO ₂ äq]	-2	15	-2	12	-8	13	<u>1.997</u>
		rel.	-0,1%	0,9%	-0,1%	0,7%	-0,5%	0,80%	<u>117,1%</u>
	DE	[kt CO ₂ äq]	303	1.099	128	1.530	173	667	<u>1.596</u>
		rel.	0,8%	3,0%	0,3%	4,1%	0,5%	1,80%	<u>4,3%</u>
	Europa	[kt CO ₂ äq]	1.062	3.349	564	4.976	678	571	<u>1.573</u>
		rel.	0,7%	2,1%	0,4%	3,2%	0,40%	0,4%	<u>1,0%</u>

²⁹ Im PB-2024 wird für Baden-Württemberg, wie dargelegt, kein vollständiger Kohleausstieg bis 2030 angenommen. Es erfolgt aber dennoch ein Kohleausstieg nach Kohleverstromungsbeendigungsgesetz, der auch in Baden-Württemberg bereits bis 2030 zur Stilllegung von Steinkohlekapazitäten führt. Die Wirkung dieses Instrumentes wird in der **Quantifizierung** untersucht.

Quantifizierung der Instrumentenbündel 1-2: EE-Ausbaukorridor und der Einzelmaßnahme Wind onshore

Die Landesinstrumente zur Unterstützung des EE-Ausbaus in Baden-Württemberg unterstützen die Instrumente zur Erreichung des EE-Ausbaukorridors auf Bundesebene. Eine Quantifizierung der Wirkung der Landesinstrumente auf den EE-Ausbau in Baden-Württemberg ist nicht möglich. Aufgrund dessen wird die Wirkung der Landesinstrumente zur Unterstützung des EE-Ausbaus in Baden-Württemberg in großen Bandbreiten aufgezeigt: Je Technologie (PV-Aufdach, PV-Freifläche, Wind onshore) wird angenommen, dass der EE-Zubau in dieser Technologie um 0% bzw. um 100 % hinter das Bundeslandziel zurückfällt. Im Falle der 0%-Quantifizierung wird den Bundesinstrumenten die volle Wirkung zugesprochen, im Falle der 100%-Quantifizierung den Landesinstrumenten. Tabelle 9 enthält das Zahlenwerk zu den 100%-Quantifizierungen und ihre Summe. Mehremissionen von Quantifizierungen sind stets als Emissionsminderungsbeitrag des Instruments zu interpretieren.

Die Quantifizierungen zeigen, dass der EE-Zubau in Baden-Württemberg einen wirkungsvollen Beitrag zur Emissionsminderung auf Landes-, Bundes- und EU-Ebene darstellt. In 2030 erwirkt der EE-Zubau in Baden-Württemberg auf allen drei Ebenen eine THG-Emissionsminderung um 2%. Auf Bundes- und EU-Ebene stellt die Sicherstellung der Erreichung des EE-Ausbaukorridors somit die wirkungsvollste Maßnahme zur Emissionsminderung dar. Auf Landesebene stellt einzig die in 2030 bereits umgesetzte Reduktion der Steinkohleverstromung ein (deutlich) wirkungsvolleres Instrument dar.

Die Bedeutung des EE-Zubaus in Baden-Württemberg nimmt auch im Zeitverlauf nicht ab: Verliert der EE-Zubau in 2040 zwar auf Landesebene seine emissionsmindernde Wirkung³⁰, so steigt dessen Bedeutung auf Bundes- und EU-Ebene. Auf EU-Ebene können durch den EE-Zubau in Baden-Württemberg in 2040 etwa 4.000 kt CO₂äq. vermieden werden.

Bis 2030 hat der Zubau von PV-Freiflächenanlagen die stärkste emissionsmindernde Wirkung, im Projektionsjahr 2040 kommt dem Erreichen der Zubauziele im Bereich Wind onshore die größte Bedeutung für die Emissionsreduktion zu.

Quantifizierung des Kohleausstiegs durch Maßnahme „Flankieren und Umsetzen des Kohleausstiegs im Land“

Mit der Quantifizierung „Bisher erfolgter Kohleausstieg in Baden-Württemberg“ wird untersucht, welchen Beitrag der bis 2030 bereits erfolgte Kohleausstieg in Baden-Württemberg an der Emissionsminderung der Projektion 2030 und 2040 leistet. Für die Parametrisierung wurde angenommen, dass in Baden-Württemberg kein Kohleausstieg erfolgt. Dies bedeutet folgende Kapazitäten an Kohleleistung:

- 2030: 6,1 GW Kohleleistung in Deutschland, davon 4,6 GW in Baden-Württemberg
- 2040: 4,6 GW Kohleleistung in Deutschland, davon 4,6 GW in Baden-Württemberg

³⁰ 1% der verbleibenden Emissionen konnten durch den EE-Zubau vermieden werden.

Die Ergebnisse der Quantifizierung sind in Tabelle 9 verzeichnet. Der bereits erfolgte Kohleausstieg in Baden-Württemberg hat zu einer Emissionsminderung in Baden-Württemberg in Höhe von 2.565 kt CO₂äq geführt. Auf nationaler und europäischer Ebene werden die Emissionsminderungen zwar deutlich gegenkompensiert, aber in beiden Fällen bleiben Emissionsminderungen in Höhe von 1.612 bzw. 1714 kt CO₂äq bestehen.

Quantifizierung des Instrumentenbündels 5: Wärme

Zuvor wurde bereits dargelegt, dass im Rahmen des MMS des PB-2024 nicht davon ausgegangen wird, dass kommunale Wärmepläne in Baden-Württemberg bis 2030 vollständig umgesetzt werden können. In einer Sensitivität wurde dargestellt, wie sich die vollständige Umsetzung der kommunalen Wärmeplanung auf die Emissionsbilanz der Energiewirtschaft auswirken würde.

Um nun die Wirkung der Maßnahmen auf Landesebene zur Umstellung der Wärmenetze auf erneuerbare Energieträger und zur Erstellung der kommunalen Wärmeplanungen zu quantifizieren, wird eine Berechnung vorgenommen, in der die Umstellung der Wärmenetze deutlich weniger ambitioniert erfolgt – also ohne Unterstützung seitens Maßnahmen der Landesebene.

Basierend auf Aussagen von Wärmenetzbetreibern in Wärmeplanungsprojekten wird eine vorsichtige Schätzung der maximalen Ausbaugeschwindigkeit für Wärmenetze von 0,03 km pro 1.000 Einwohner und Jahr angenommen (Vgl. Kapitel 2.3.3). Der Ausbau von Wärmenetzen wird durch lange Planungsphasen, die Koordination mit anderen Bauprojekten, Fachkräftemangel und begrenzte Akzeptanz für Bauvorhaben eingeschränkt. Für Baden-Württemberg ergibt sich daraus ein maximaler Ausbau von etwa 330 km pro Jahr. Im Basisjahr wurden zur Versorgung der Bestandsnetze 15,5 TWh Wärme erzeugt. Mit dem angenommenen realistisch ambitionierten Ausbau der Fernwärmeversorgung erhöht sich die Wärmeerzeugung zur Versorgung der Wärmenetze in der Projektion auf 17,8 TWh in 2030 und stagniert bis 2040 auf ähnlichem Niveau. Die notwendige Kapazität an Heiz- und Heizkraftwerken erhöht sich dadurch bis 2030 auf 9,7 GW und sinkt bis 2040 wieder auf 8,8 GW.

Zur Bewertung der Wirkung von Instrumenten auf Landesebene wird zum Vergleich die historische Entwicklung des klimabereinigten Fernwärmeverbrauchs bis zur Einführung des Förderprogramms „Energieeffiziente Wärmenetze“ im Jahr 2016 in einer Trendfortschreibung in die Zukunft projiziert. Das so ermittelte Ohne-Maßnahmen-Szenario (OMS) dient als Vergleichsentwicklung und führt in 2030 gegenüber dem MMS zu einer um 21 % geringeren installierten Kapazität von 7,7 GW. In 2040 liegt die notwendige Wärmeleistung bei 6,8 GW und damit rund 23 % geringer als im MMS. Das OMS führt sowohl 2030 als auch 2040 zu höheren Anteilen an Erdgas und Steinkohle und geringeren Anteilen an Wärmepumpen.

In der Sensitivität „konsequente Umsetzung der kommunalen Wärmepläne“ wird angenommen, dass die Wärmenetze in Baden-Württemberg entsprechend den Angaben der kommunalen Wärmepläne ohne Verzögerung umgestellt und ausgebaut werden. In diesem Fall läge die Ausbaugeschwindigkeit für neue Fernwärmetrassen durchschnittlich bei etwa 600 km pro Jahr bis 2045. In der Sensitivitätsbetrachtung erhöht sich die eingespeiste Wärmemenge auf 20,8 TWh pro Jahr im Jahr 2030 und 23,6 TWh im Jahr 2040. Das führt im Jahr 2030 zu einer im Vergleich zur Projektion um 19 % höheren

installierten Heizleistung von 11,5 GW und im Jahr 2040 zu einer um 60 % höheren Leistung von 14,1 GW.

4.4 Wirkung nationaler und europäischer Maßnahmen auf die Emissionen Baden-Württembergs

Neben den Landesinstrumenten gibt es Bundesinstrumente und europäische Instrumente zur THG-Emissionsminderung, die eine Wirkung auf die baden-württembergischen THG-Emissionen erzielen. Die wirkungsvollsten Instrumente unter ihnen wurden im PB-2024 in Form von Instrumentenbewertungen auf nationaler Ebene untersucht. Hierzu wurden sogenannte kontrafaktische Szenarien entworfen, die eine Welt darstellen, in der es das zu untersuchende Instrument nicht gibt. Bewertet wurde die Wirkung des EU-ETS, das EEG und die erfolgte Umstellung der Wärmenetze. Detailliertere Informationen zur Parametrierung sind dem PB-2024 zu entnehmen. Um der Frage nachzugehen, welchen Beitrag die Instrumente zur THG-Emissionsminderung in Baden-Württemberg leisten, wurden die Szenarien analog zum Verfahren in der Projektion auf Baden-Württemberg heruntergebrochen. Die Ergebnisse sind als Änderungen gegenüber der Projektion in Tabelle 10 dokumentiert. Eine Änderung der Emissionen um 76 % bzw. 3.364 kt CO₂äq. (EU-ETS 2030 in Baden-Württemberg) bedeutet, dass die baden-württembergischen THG-Emissionen ohne die Implementierung des EU-ETS in der Projektion um 76 % der finalen Emissionen höher ausgefallen wären.

Den drei untersuchten Instrumenten ist gemein, dass sie nicht nur auf nationaler Ebene von hoher Bedeutung für die Reduktion der THG-Emissionen sind, sondern auch auf Landesebene eine hohe Wirkung erzielen. Mit einem Beitrag zur Emissionsminderung von über 60 % über alle Ebenen (Landesebene, Bundesebene, europäische Ebene) ist der EU-ETS, der europaweit ein einheitliches CO₂-Emissionspreisniveau für den ETS-Sektor gewährleistet, in 2030 mit Abstand am wirkungsvollsten. Bis 2040 nimmt die Wirkung des EU-ETS ab, da die Anzahl der emissionsintensiven Kraftwerke zurückgeht. An dessen Stelle tritt die Bedeutung des EEG, welches den Zubau der erneuerbaren Energien gemäß EE-Ausbaukorridor fördert: Das EEG trägt auf allen Ebenen mit einem Beitrag ≥ 15 % zur Emissionsminderung bei. Auffallend ist, dass das EEG auf europäischer Ebene mit einem Beitrag von 23 % eine größere Bedeutung zur Emissionsminderung zukommt als in Baden-Württemberg (15 %).

Die Umstellung der Wärmenetze auf erneuerbare Energieträger, die in der Projektion bereits berücksichtigt wurde, trägt mit einem Beitrag von ebenfalls 15 % in 2030 insbesondere in Baden-Württemberg zur Emissionsminderung bei. In Europa ist die Umstellung der Wärmenetze Deutschlands in 2030 von deutlich geringerer Bedeutung für die erzielte THG-Emissionsminderung (2 %). Bis 2040 steigt die Bedeutung dieser Maßnahme aber auch für die europäische Ebene: Sie erwirkt, dass die europäischen Emissionen um 19 % geringer ausfallen. In Baden-Württemberg ist die Umstellung der Wärmenetze in 2040 sogar die Maßnahme mit dem größten Beitrag zur THG-Emissionsminderung: Hierdurch fallen die Emissionen um ca. 1.800 kt CO₂äq. geringer aus.

Tabelle 10: Wirkung nationaler und europäischer Emissionsminderungsmaßnahmen der Energiewirtschaft auf Baden-Württemberg

		Emissionsänderung zwischen kontrafakti- schem Szenario und Projektion	EU-ETS	EEG	Wärmenetze
2030	Baden-Württemberg	[kt CO ₂ äq]	3.364	675	645
		rel.	76 %	15 %	15 %
	Deutschland	[kt CO ₂ äq]	54.460	15.220	9.380
		rel.	61 %	17 %	11 %
	Europa	[kt CO ₂ äq]	146.620	54.340	4.900
		rel.	63 %	23 %	2,10 %
2040	Baden-Württemberg	[kt CO ₂ äq]	656	1.320	1.796
		rel.	64 %	129 %	176 %
	Deutschland	[kt CO ₂ äq]	-1.640	40.470	34.370
		rel.	-4,40 %	109 %	93 %
	Europa	[kt CO ₂ äq]	40.690	111.540	29.700
		rel.	26 %	71 %	19 %

4.4.1 Unsicherheiten bei der Projektion

Bei der Projektion der Emissionen der Energiewirtschaft Baden-Württembergs 2024 gibt es zwei wesentliche Unsicherheiten, die Einfluss auf die Bewertung der projizierten Emissionen nehmen.

Zum einen ist klar, dass bezüglich der Kraftwerksstrategie auf nationaler Ebene in Kürze eine Entscheidung herbeigeführt wird. Diese wird zu veränderten Annahmen bezüglich des zukünftigen Kraftwerksparks führen und Änderungen in der Emissionsbilanz mit sich bringen. Der Unsicherheit wurde begegnet, indem Sensitivitätsrechnungen angefertigt wurden.

Die zweite Unsicherheit betrifft die Projektion der Emissionen aus Industriekraftwerken. Hier wurde angenommen, dass der energieträgerspezifische Anteil des Brennstoffeinsatzes der Industriekraftwerke an den modellierten Kraftwerkseinsätzen konstant bleibt. Es ist aber davon auszugehen, dass der Anteil der Emissionen aus Industriekraftwerken zukünftig eher zunimmt. Zur Berücksichtigung dessen hätte im PB-2024 eine wärmeseitige Vorgabe der KWK-Stromerzeugung aus Industriekraftwerken vorgegeben werden können. Dies hätte zu einer Verschiebung von Emissionen zwischen den Sektoren geführt: der Energiewirtschaft wären weniger, dem Sektor Industrie mehr Emissionen zugewiesen worden. Die sektorübergreifende Emissionsbilanzierung bleibt hiervon unberührt. Insofern wurde auch hier im Bereich der Energiewirtschaft nach dem Vorsichtsprinzip bilanziert. Dies gilt es bei der Interpretation der Ergebnisse von Energiewirtschaft und Industrie zu berücksichtigen.

4.4.2 Maßnahmen zur Erreichung der Emissionsminderungsziele

Um die Emissionsminderungsziele der Energiewirtschaft in Projektionsjahr 2030 zu erreichen, ist, wie mit den Sensitivitätsrechnungen in Abschnitt 4.2 dargestellt, ein vorzeitiger Kohleausstieg bis zum Jahr 2030 eine relevante Maßnahme. Dieser vorzeitige Kohleausstieg ist bereits in der Diskussion und wird seitens der Landesregierung flankiert. Zur Schaffung der entsprechenden Rahmenbedingungen bedarf es noch der Finalisierung der Kraftwerksstrategie, welche auf der Bundesebene angegangen wird.

Der Zubau von H₂-ready-Erdgaskraftwerken fördert die CO₂-Emissionsminderung und ebnet den Weg in eine klimaneutrale Zukunft. Es entsteht aber ein Emissionsrebound, da die hochmodernen Anlagen effizienter arbeiten und dadurch hohe Volllaststunden erzielen. Das ist zwar auf europäischer Ebene sofort eine Emissionsminderung, auf nationaler oder auf Landesebene können die Emissionen hingegen ansteigen. Soll dieser Reboundeffekt dennoch vermieden werden, so könnte beim Zubau von H₂-ready-Erdgaskraftwerken ein frühzeitiger Einstieg in die Nutzung von H₂ forciert werden. Um den Einsatz von H₂ anzureizen und die Wirtschaftlichkeit der Anlagen zu ermöglichen wäre eine auf Bundesebene auszugestaltende Förderung erforderlich. Fraglich ist die frühzeitige regionale Verfügbarkeit von H₂, da Baden-Württemberg vermutlich nicht vor 2032 an das H₂-Kernnetz angeschlossen sein wird.

Da der marktgetriebene Einsatz der H₂-ready-Erdgaskraftwerke aber THG-Emissionsersparungen auf europäischer Ebene erwirkt, wäre es wesentlich klimafreundlicher, auf ein anderes Emissionsminderungspotential abzustellen. Wirkungsvoller wäre, emissionsintensive Anlagen anzureizen, weniger Strom oder Wärme zu erzeugen. Dies könnte z.B. durch einen höheren CO₂-Preis erwirkt werden. Ein alternativer Ansatzpunkt wäre, die Förderung neuer KWK-Anlagen von einem erzeugungsbasierten Ansatz zu einem stärker leistungsbasierten Ansatz umzugestalten.

Nachfragereduktionen im Bereich der Mineralölprodukte können ebenfalls einen wirkungsvollen Beitrag zur Senkung der THG-Emissionen der Energiewirtschaft leisten, da so die THG-Emissionen der Raffinerien gemindert werden. Hier sind zwar Maßnahmen auf Landesebene möglich. Eine Nachfragereduktion in Baden-Württemberg ist aufgrund der überregionalen Bedeutung der Raffinerie aber nur bedingt von regionaler Wirkung: die Produktionskapazitäten gehen nur zurück, wenn das Unternehmen das Grenzunternehmen ist, so dass die Nachfragereduktion für die MiRo sichtbar wird.

Wirkungsvoller auch in Bezug auf die lokalen Umsetzungsmöglichkeiten kann die Umstellung auf synthetische und CO₂-neutrale Raffinerieprodukte z.B. als Teil einer wasserstoffbasierten Wertschöpfungskette in der Chemieindustrie („Methanol-to-Olefins-Route“) sein.

Zur Erreichung der Treibhausgasneutralität im Jahr 2040 sind weitere Maßnahmen erforderlich. Von besonderer Relevanz ist die Adressierung der THG-Emissionen aus den „Sonstigen Energieträgern“, zu denen beispielsweise Abfall oder Grubengas zählen. Die Errichtung von CCU/S-Anlagen an Anlagen der thermischen Abfallbehandlung stellt eine viel diskutierte Maßnahme zur Kompensation der letzten Emissionen im Bereich der Energiewirtschaft dar.

5 Industrie

Aufbauend auf den Darstellungen der Methodik des Industriesektors (2.3.4) sind drei Ergebnisdimensionen relevant:

1. Endenergiebedarf nach Energieträger
2. THG-Emissionen nach Quelltyp (energiebedingt/ "Andere Industriefeuerung", Industrieprozesse/ Steine und Erden)
3. Entwicklung weiterer Quellen (F-Gase, Off-road Industrie (Industriegeräte/Bauwirtschaft))

Dabei ergeben sich die energiebedingten THG-Emissionen direkt aus der Energieträgernutzung; die der Industrieprozesse aus den Annahmen zur Produktionsmenge der entsprechenden Produktgruppe (Zement, Kalk, Gips) und der CCS-Diffusion. Die Entwicklung der weiteren Quellen nach 3. sind Ergebnis exogener Annahmen.

5.1 Zentrale Rahmendaten

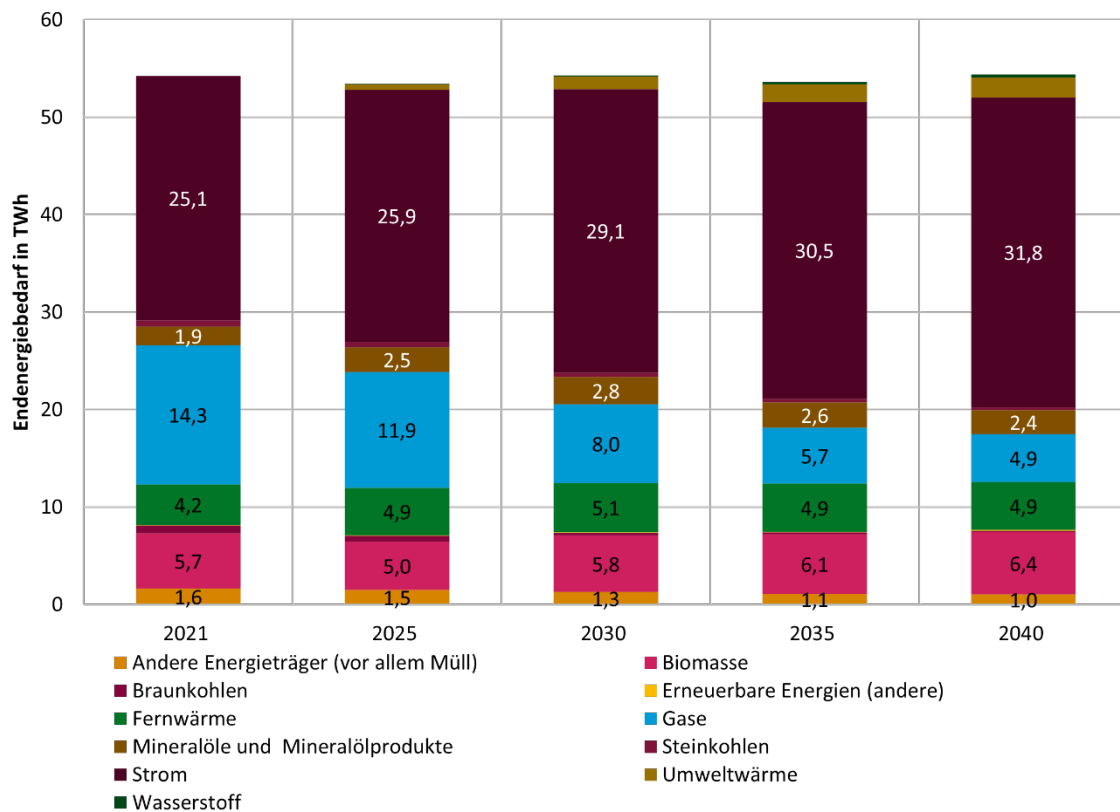
Für den Industriesektor werden, abgesehen von den in Abschnitt 2.3.4 dargestellten Informationen über den Endenergiebedarf nach Subsektor und Energieträger (für Baden-Württemberg basierend auf Landesenergiebilanzen, für Deutschland basierend auf den AGE-Bilanzbilanzen) und den historischen Produktionsmengen für das Aggregat "Zement, Kalk und Gips", keine weiteren Rahmendaten verwendet. Jegliche Annahmen, die für eine Bottom-up-Modellierung benötigt würden, sind über die Anlehnung an die Entwicklungspfade des PB-2024 ersetzt. Dies bedeutet, dass von einer identischen Gültigkeit der relativen Entwicklung (siehe Abschnitt 2.3.4) je Subsektor und Energieträger – damit implizit auch Energieträgerpreise – ausgegangen wird.

5.2 Projektion

Entwicklung des Endenergiebedarfs und der energiebedingten Treibhausgasemissionen

Die Endenergienachfrage und deren Zusammensetzung nach Energieträgern ist der maßgebliche Hebel, mit dem energiebedingte THG-Emissionen adressiert werden können. Sowohl auf nationaler als auch auf Landesebene versuchen Instrumente, an der Veränderung des Gesamtbedarfs und/oder der Energieträgeranteile zu wirken (z.B. Klimaschutzverträge, EEW). Die Projektion ergibt, dass diese Bemühungen in relevantem (aber nicht hinreichendem) Umfang erfolgreich sind (Abbildung 15 und Abbildung 16).

Abbildung 15: Entwicklung des Endenergiebedarfs im Sektor Industrie zwischen 2021 und 2040



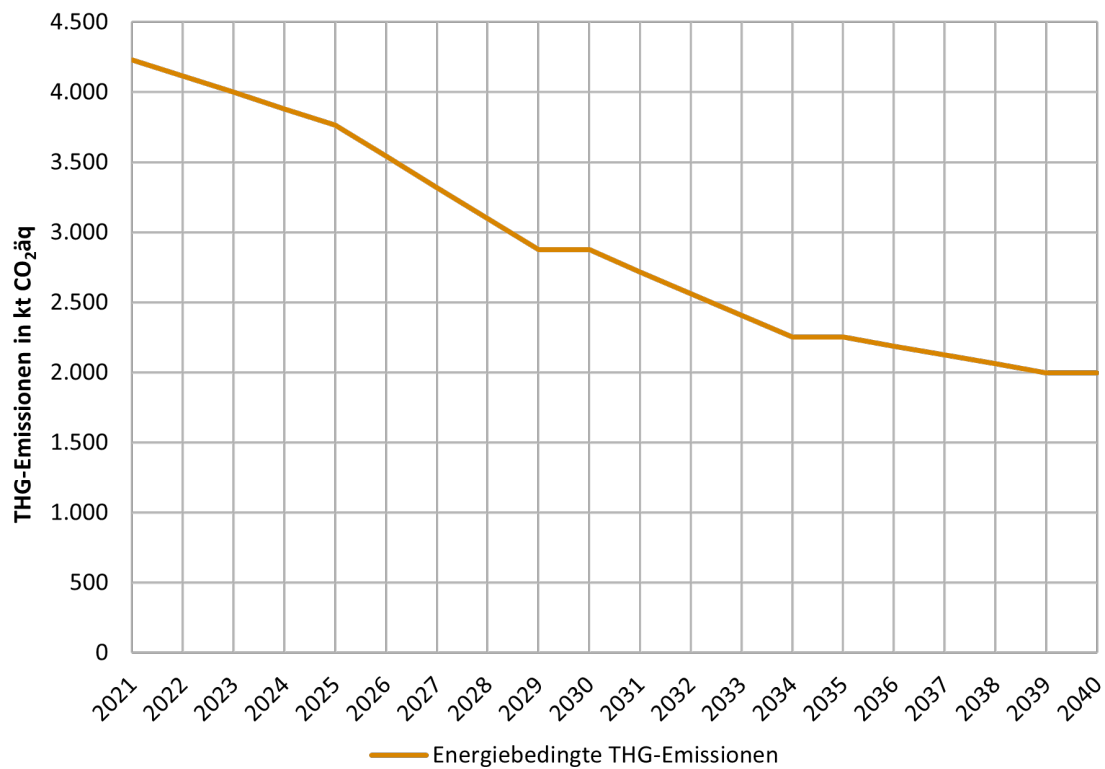
Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI

Während der gesamte Endenergiebedarf leicht ansteigt – vor allem bedingt durch Annahmen zum Wirtschaftswachstum (siehe Tabelle 3)³¹, das Effizienzsteigerungen nicht vollständig kompensieren können – ist eine deutliche Verschiebung der Energieträgeranteile von Erdgas zu direkter Stromnutzung (und Umweltwärme in Wärmepumpen) zu beobachten. Dieser Brennstoffwechsel ist der hauptsächliche Effekt auf die energiebedingten THG-Emissionen (siehe Abbildung 16). Diese sinken gegenüber 2021 bis 2030 um 32 %, und bis 2040 um 53 %³². Wichtigste verbleibende Quelle von THG-Emissionen ist die Nutzung fossiler Gase (~50 % der Residualemissionen, Rückgang um 70 % gegenüber der Nutzung 2021) und von Mineralölen (~30 % der Residualemissionen). Diese Restnutzungen sind nicht technisch bedingt – es besteht keine Notwendigkeit für den Einsatz fossiler Brennstoffe. Allerdings wirken die berücksichtigten Instrumente auf nationaler und Landesebene noch nicht stark genug, um einen vollständigen Ausstieg aus deren Nutzung zu ermöglichen.

³¹ Hier liegen die gleichen Annahmen wie im PB-2024 vor. Auf nationaler Ebene sinkt der Endenergiebedarf allerdings aufgrund der unterschiedlichen Schwerpunkte der Branchen (Grundstoff gegenüber weiterverarbeitender Industrie): Die in Baden-Württemberg stärker vertretenen weiterverarbeitenden Branchen wachsen in den Annahmen stärker.

³² Für das Bezugsjahr 1990 liegen auf dieser Ebene keine Daten vor.

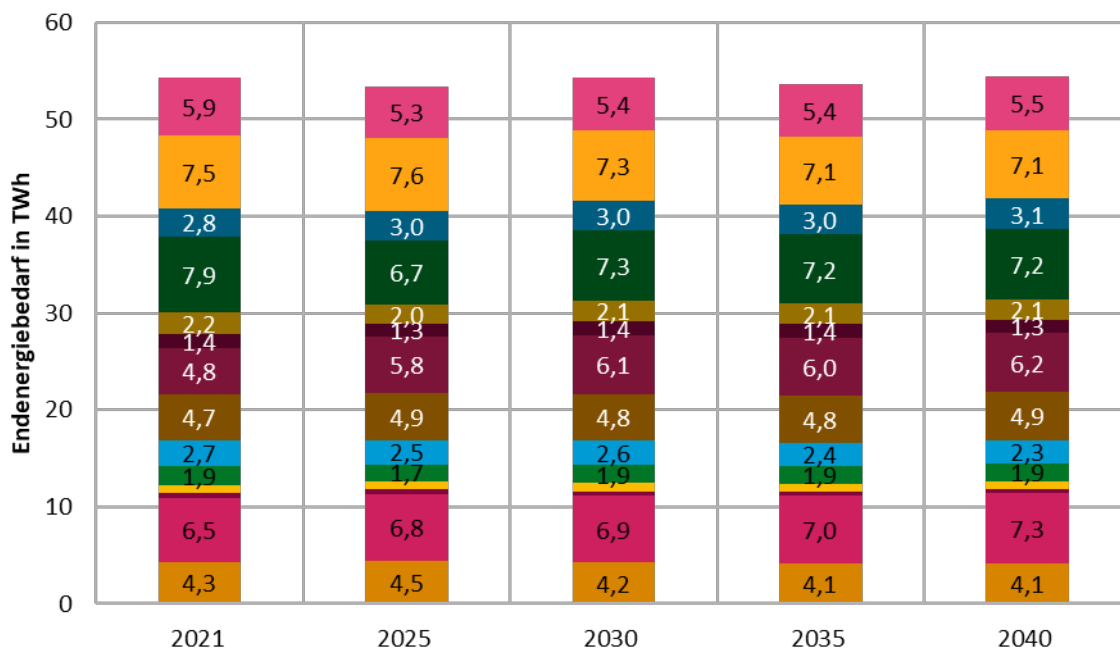
Abbildung 16: Entwicklung der energiebedingten Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie zwischen 2021 und 2040



Quelle: Eigene Berechnungen Fraunhofer ISI

Die Anteile der Branchen am Endenergiebedarf verändern sich kaum (Abbildung 17) – lediglich die Branche "Metallbearbeitung", der Batteriefabriken zugeordnet sind, steigert ihren Anteil durch den neu hinzukommenden Energiebedarf der Batteriefertigung.

Abbildung 17: Entwicklung des Endenergiebedarfs im Sektor Industrie nach Branchen zwischen 2021 und 2040



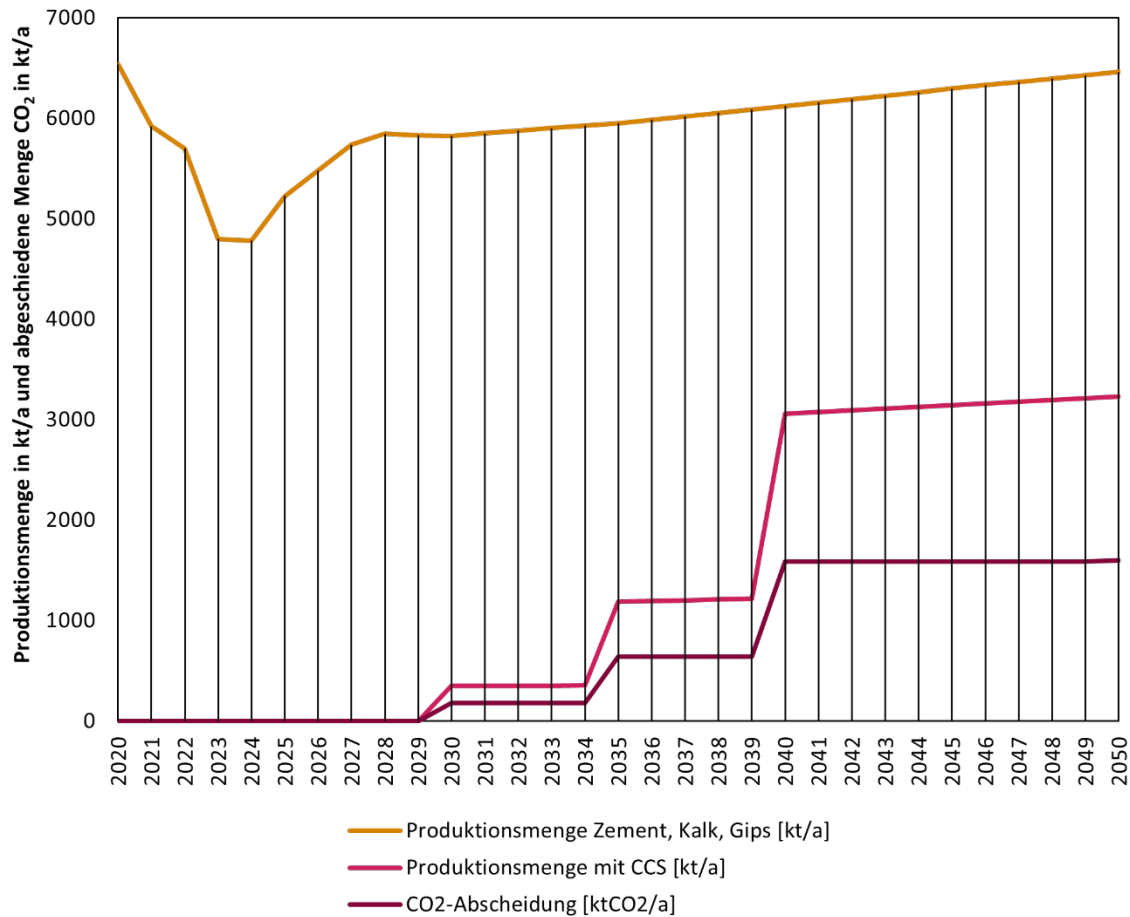
- Verarbeitung v. Steine u. Erden
 - Sonstige chemische Industrie
 - NE-Metalle, -gießereien
 - Metallbearbeitung
 - Gummi- u. Kunststoffwaren
 - Glas u. Keramik
 - Fahrzeugbau
- Sonstige Wirtschaftszweige
 - Papiergewerbe
 - Metallerzeugung
 - Maschinenbau
 - Grundstoffchemie
 - Gewinnung von Steinen und Erden, sonst. Bergbau
 - Ernährung und Tabak

Quelle: Eigene Berechnungen Fraunhofer ISI

Entwicklung der prozessbedingten Treibhausgasemissionen

Aufgrund des engen Zusammenhangs von Annahmen und Ergebnissen im Bereich der prozessbedingten THG-Emissionen, wurden diese zusammen mit der Methodik in 2.3.4 dargestellt. Hier wird rein formal Abbildung 3 wiederholt (Abbildung 18).

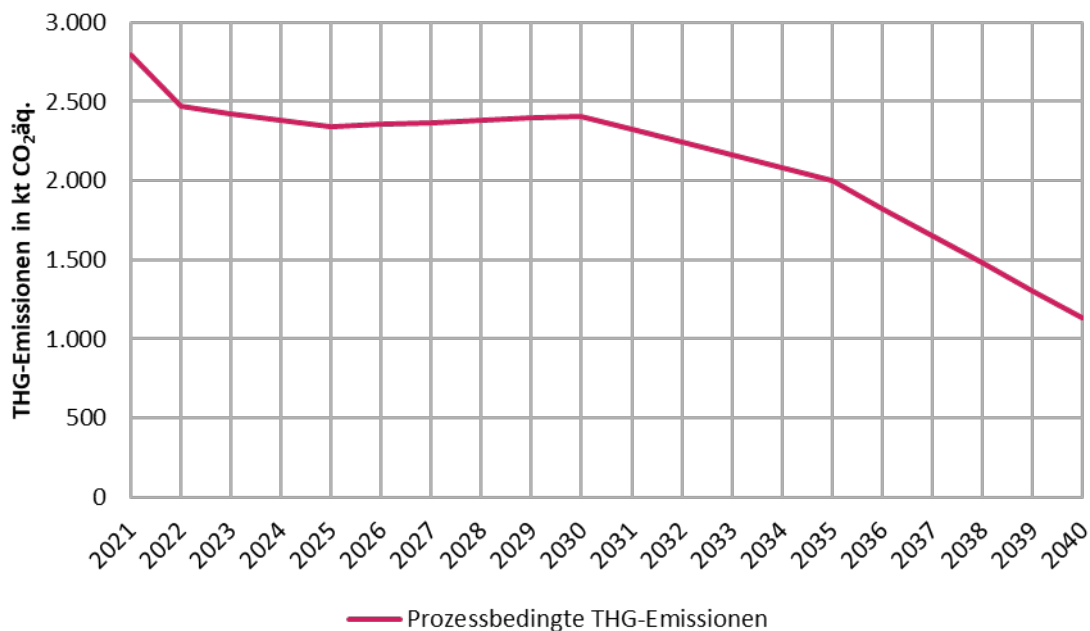
Abbildung 18: Entwicklung der CO₂-Abscheidung an Zementwerken zwischen 2020 und 2050



Quelle: Eigene Berechnungen Fraunhofer ISI

Daraus ergibt sich ein Verlauf der prozessbedingten THG-Emissionen, der bis etwa 2030 vor allem durch die Aktivitätsgröße Produktionsmenge getrieben ist (Abbildung 19). Entlang der Annahmen im PB-2024 folgt diese einem Erholungspfad aus dem im Jahr 2023 beobachteten Tief bis 2028 – Instrumente wirken in diesem Zeitraum kaum. Nach 2030 gewinnt die Diffusion von CCS gegenüber der angenommenen Produktionsmengenentwicklung an Bedeutung – bis 2040 ist diese Quellkategorie gegenüber 2021 und 60 % reduziert (gegenüber 1990 um 65 %). Der Einsatz von CCS folgt damit dem Pfad des PB-2024 auf nationaler Ebene (50 % Diffusion bis 2045).

Abbildung 19: Entwicklung der prozessbedingten Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie zwischen 2021 und 2040

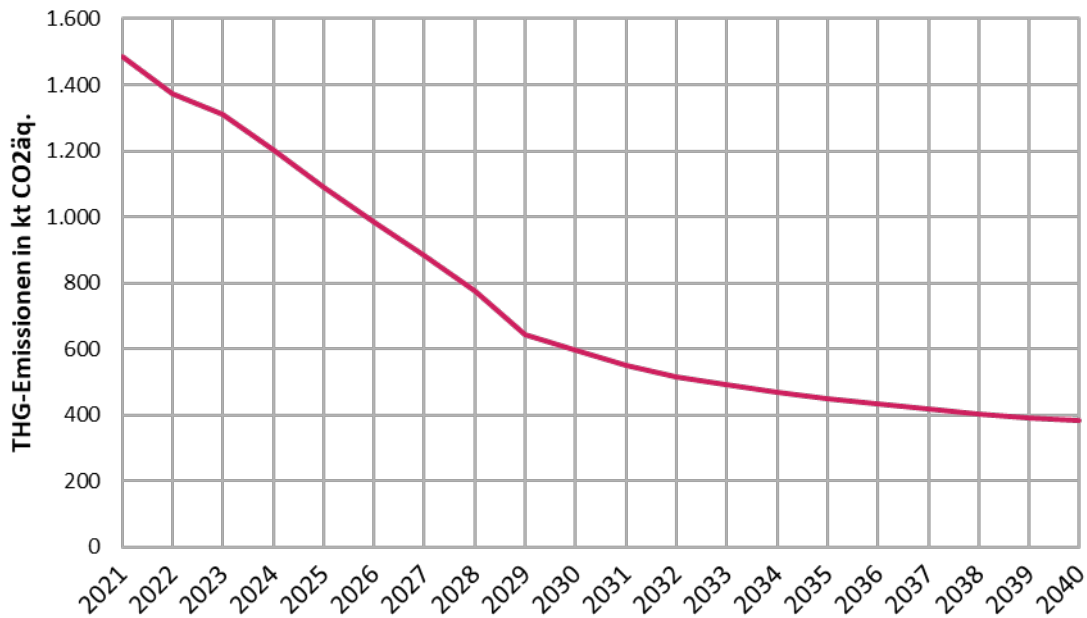


Quelle: Eigene Berechnungen Fraunhofer ISI

Entwicklung der Emissionen der F-Gase

Die Entwicklung der Emissionen (Abbildung 20) aus der Quellgruppe der F-Gase wird maßgeblich von den europäischen und nationalen Regelungen im Zusammenhang mit der EU-F-Gas-Verordnung 517/2014 beeinflusst (die diese ablösende Verordnung 2024/573 ist im MMS des PB-2024 nicht berücksichtigt). Es wird angenommen, dass diese in Baden-Württemberg daher dem bundesweiten Pfad folgen. Da die Emissionen aus diesem Bereich primär im Zusammenhang mit Betrieb, Wartung und Entsorgung von Klimaanlage und Kühlgeräten entstehen, wird ihr Anteil entsprechend dem Anteil der Bevölkerung skaliert.

Abbildung 20: Entwicklung der Emissionen der F-Gase zwischen 2021 und 2040



Quelle: Projektionen 2024, Eigene Berechnungen Öko-Institut

Zusammenfassung und Einordnung

Die Entwicklung der THG-Emissionen des Industriesektors (Abbildung 21) sind die Summe der einzelnen, oben dargestellten Quellgruppen. Ergänzend werden Industriekraftwerke (siehe Abschnitt 4) hinzugerechnet³³. Das Sektorziel 2030 wird knapp nicht erreicht (7.520 kt CO₂äq. statt 7.082 kt CO₂äq). Für 2040 wurden im KlimaG BW bisher keine Sektorziele formuliert; als übergeordnetes Gesamtziel ist die Netto-Treibhausgasneutralität festgelegt. Die Netto-Treibhausgasneutralität im Sektor Industrie selbst wird im Jahr 2040 deutlich verfehlt (4.397 kt CO₂äq verbleibende THG-Emissionen).

Letzteres ist überwiegend auf die Grundlage des PB-2024 zurückzuführen, die von einer deutlich nachlassenden Instrumentenwirkung nach 2035 ausgeht. Langfristig ist zu erwarten, dass die Deckung der Differenzkosten CO₂-armer Produktionstechniken gegenüber fossilen Verfahren aus dem Markt heraus finanziert werden muss – die im nationalen Instrumentenmix berücksichtigten Grünen Leitmärkte sind ein Einstieg. Ihre Wirksamkeit kann aber noch nicht verlässlich bewertet werden.

Die weitgehend erfolgreiche THG-Emissionsminderung bis 2030 ist voraussetzungsreich. Unmittelbar hängt sie von der Wirksamkeit nationaler Maßnahmen ab – darunter vor allem die des Brennstoffwechsels der industriellen Prozesswärme. Dies wird im bestehenden Instrumentenmix vor allem über die Deckung der Differenzkosten zu konventionellen Techniken (vor allem Erdgasbefeuerung von Öfen und Dampferzeugern) um-

³³ Modelliert werden diese aber im Sektor Energiewirtschaft.

gesetzt. Auf nationaler Ebene ist dies zunächst einmal plausibel und adressiert ein wichtiges Hemmnis³⁴. Über die Ermöglichung wirtschaftlich attraktiver Geschäftsmodelle hinaus bestehen allerdings Hemmnisse zur Elektrifizierung von Prozesswärme³⁵, die am ehesten auf Standortebene – aber jedenfalls besser auf Landes- als nationaler Ebene – überwunden werden können. Dazu gehört der Ausbau der elektrischen Anschlussleistung am Standort³⁶, der in vielen Fällen für eine Teil-, insbesondere aber für eine Voll-elektrifizierung notwendig sein wird. Sowohl Genehmigung als auch Umsetzung müssen deutlich beschleunigt werden, um die ambitionierte Substitution von Erdgas durch Strom der Projektion zu realisieren. Die Annahmen des PB-2024 zur Verfügbarkeit und wirtschaftlicher Attraktivität von Wasserstoff für die Industrie ermöglicht keinen breiten Einsatz³⁷. Darüber hinaus lässt die Ausrichtung von Förderinstrumenten auf die Fördereffizienz erwarten, dass wasserstoffbasierte Maßnahmen geringere Erfolgsaussichten haben. Grundsätzlich besteht bezüglich der mittelfristigen Wasserstoffnutzung in der Prozesswärmeerzeugung hohe Unsicherheit³⁸.

Ähnliche Zusammenhänge gelten für die Minderung prozessbedingter THG-Emissionen durch den Einsatz von CCS – obschon hier die wirtschaftlich attraktive Anwendung oft näherliegt als in der Umstellung der Prozesswärmeerzeugung. Die konkrete Umsetzung vor Ort (gesetzliche Rahmenbedingungen, Transportinfrastruktur, Genehmigung, Planungssicherheit der Investition) ist eine Herausforderung³⁹. Aufgrund vieler Unsicherheiten geht die Projektion daher analog zum PB-2024 von einer auch langfristig begrenzten Diffusion von 50 % (bezogen auf die Produktionsmenge) aus – der Verweis auf erwartete hohe Preise im EU-ETS reicht im Rahmen der instrumentenbasierten Bewertung nicht aus, um einen autonomen Ausbau zu unterstellen.

Instrumente zur Steigerung der Energieeffizienz haben in dieser Projektion aufgrund der gewählten Methodik einen eher subtilen Einfluss auf die Ergebnisse. Es fehlt vor allem ein Vergleichsszenario mit geringeren Effizienzambitionen. Die Evaluationen wichtiger Effizienzprogramme (z.B. EEW: (Barckhausen *et al.*, 2023)) zeigen allerdings, dass diese Instrumente hohe Wirksamkeit aufweisen. Trotz in dieser Projektion mangelnder

³⁴ Die Übertragung auf Baden-Württemberg geht davon aus, dass das Bundesland einen dem Energieeinsatz proportionalen Anteil der national angenommenen Fördermittel erhält.

³⁵ Analog dazu mit leicht anderen Schwerpunkten auch zur indirekten Elektrifizierung (Wasserstoffnutzung).

³⁶ In Abgrenzung zu Übertragungsnetzen.

³⁷ Maßgeblich für diese Einschätzung sind die Annahmen zur Preisentwicklung von Wasserstoff (Großhandelspreis 2030: 136 EUR/MWh). in Kombination mit der hohen Bedeutung der Fördereffizienz der untersuchten Instrumente. Dadurch ist die Nutzung von Wasserstoff ohne Förderung nicht wirtschaftlich attraktiv und würde die Förderbudgets stärker als alternative Vermeidungsoptionen belasten (was zu einer geringeren Gesamtminderung führen würde). Eine höhere Wasserstoffnutzung ist nicht grundsätzlich ausgeschlossen, im Rahmen der Bewertung in einem einzelnen Szenario erscheint eine sehr geringe Nutzung aber wahrscheinlicher als eine höhere.

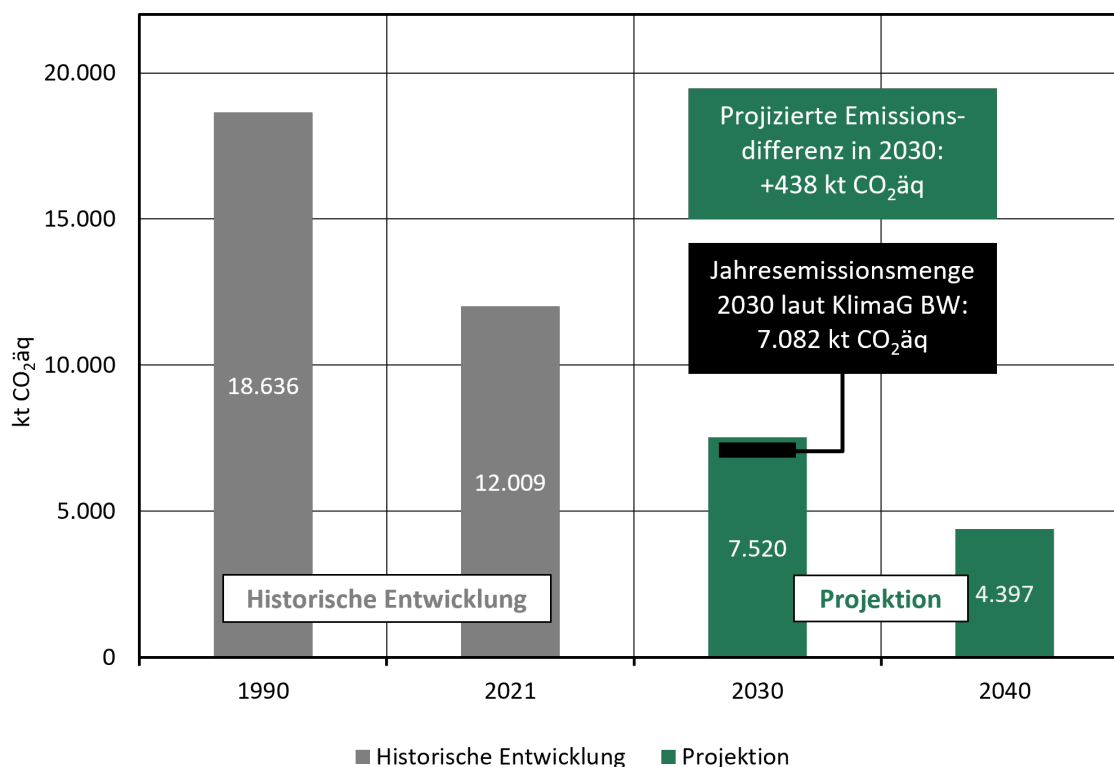
³⁸ So suggerieren die Ergebnisse der ersten Auktionen des EU-Innovationsfonds zum Teil enorm hohe Zahlungsbereitschaft ("offtake"-Preise bis 6 Euro/kg) in den erfolgreichen Projekten. Inwieweit diese aber im Allgemeinen, insbesondere aber für die in Baden-Württemberg relevanten Anwendungen sind, ist unklar. Insgesamt geht der PB-2024 davon aus, dass Wasserstoff auch nach 2030 deutlich teurer als Erdgas bleibt und somit keine wirtschaftlich attraktive Option zur Emissionsvermeidung außerhalb von Anwendungen darstellt, die technisch darauf angewiesen sind (und Förderungen erhalten).

³⁹ In den kommenden Jahren sind Erkenntnisse aus aktuell laufenden Projekten zu erwarten. Aus aktueller Perspektive sind Anpassungen nach oben (stärkere Diffusion) und unten möglich.

Tiefe der Bewertung von Energieeffizienzinstrumenten ist daher davon auszugehen, dass diese – insbesondere vor dem Hintergrund hoher wirtschaftlicher Herausforderung anderer Instrumente – weiterhin eine zentrale Säule der Zielerreichung darstellen.

In der vorliegenden Projektion sind weder auf nationaler noch auf Landesebene starke Instrumente zur Steigerung der Kreislaufwirtschaft, Materialeffizienz und Suffizienz vorhanden. Diese Nachhaltigkeitsstrategien sind damit im Vergleich zu der ihnen in der wissenschaftlichen Literatur zugestandenen Wirksamkeit stark unterrepräsentiert⁴⁰. Ihre Berücksichtigung im Instrumentenmix könnte effektiv Residualemissionen (z.B. sonst nur schwer vermeidbare prozessbedingte THG-Emissionen) mindern und darüber hinaus den Bedarf an hochwertigen Energieträgern (Strom, Wasserstoff) verringern. Allerdings bestehen Herausforderungen für ihre Bewertung und Umsetzung, darunter Fragen der gesellschaftlichen Akzeptanz und der Sektorkopplung.

Abbildung 21: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Baden-Württemberg im Sektor Industrie



Quelle: StaLA, Klimaziele nach KlimaG BW, eigene Berechnungen

⁴⁰ Nicht bewertet wurden Teile des KMR, die Mitte 2024 (nach der Modellierung) hinzugefügt wurden. Diese umfassen Maßnahmen zur Stärkung der Kreislaufwirtschaft im Bereich der Kunststoffe entlang verschiedener Stufen der Wertschöpfung. Jedenfalls auf Landesebene sind diese Nachhaltigkeitsstrategien damit stärker als hier bewertet.

5.3 Instrumentenbewertung

Entsprechend der in Abschnitt 2.3.4 dargestellten Methodik ist die Instrumentenwirkung am hinterlegten Budget festgemacht und in zwei Bündel (direkte Wirkung und Information, Beratung, Vernetzung) sowie zwei Einzelinstrumente unterteilt (Tabelle 11). Hinzu kommen flankierende (nicht bewertete) Instrumente, die als qualitativ unterstützend für die Wirkung der bewerteten Instrumente eingeschätzt werden⁴¹. Die direkt wirksamen Instrumente bestimmen die Bewertung, da diesen die größte Wirkung zur Verschiebung der Energieträgeranteile zugewiesen wird und sie als zusätzlich eingeschätzt werden. Das Instrumentenbündel zur Verbesserung von Beratung, Information und Vernetzung wird als nicht zusätzlich – sondern die zugrunde gelegten nationalen Entwicklungen der Energieeffizienz stützenden Entwicklung – bewertet⁴². Die beiden aufgrund ihrer besonderen Wirkweise einzeln bewerteten Instrumente (R-Beton⁴³, F-Gase in Universitätskliniken) haben nur geringe Wirkungen, die zusammen etwa 2 % der Wirkung in 2040 ausmachen.

Tabelle 11: Wirkung der bewerteten Instrumente im Industriesektor

#	Name Instrument/Bündel	2021	2025	2030	2035	2040	Zusätzlichkeit
1	Direkt wirksame Instrumente	0.0	0.0	464.6	686.8	686.8	ja
2	Beratung, Information, Vernetzung	0.0	239.7	239.7	239.7	239.7	nein
3	Förderung von klimaschonendem R-Beton	0.0	0.0	20.0	20.0	20.0	ja
4	Klimaschutz bei den Universitätskliniken / Reduzierung von klimaschädlichen Narkosegasen in der Universitätsmedizin (F-Gase)	0.0	1.3	1.3	1.3	1.3	ja

⁴¹ Siehe Instrumentenpapier

⁴² Das bedeutet nicht, dass diese keine Wirkung haben: Wären sie nicht vorhanden, müssten die nationalen Wirkungen um den hier ausgewiesenen Betrag verringert werden.

⁴³ Obwohl die direkte Wirkung der Förderung von klimaschonendem R-Beton gering ist – wobei die Bewertung hoher Unsicherheit unterliegt – ist der zugrundeliegende Gedanke der Stärkung von Kreislaufwirtschaft wichtig und könnte bei breiter Anwendung deutlich höhere Wirkungen, insbesondere auf in der aktuellen Projektion noch 2040 verbleibenden Residualemissionen, entfalten.

6 Verkehr

Für den Sektor Verkehr sind für die Ergebnisdarstellung die Dimensionen der THG-Emissionen sowie des Endenergieverbrauchs relevant. Für den Sektor werden alle direkt von den Fahrzeugen auf der Verkehrsinfrastruktur des Landes Baden-Württemberg ausgestoßenen THG-Emissionen sowie der Endenergieverbrauch bilanziert. Das bedeutet, dass indirekte THG-Emissionen durch die zunehmende Elektrifizierung der Fahrzeugflotten während der Nutzung nicht dem Sektor Verkehr zugeordnet werden. Gemäß der Klimaberichterstattung werden ebenfalls keine THG-Emissionen aus dem internationalen Luft- und Schiffsverkehr ausgewiesen.

6.1 Zentrale Rahmendaten

Für den Verkehr relevante Rahmendaten sind vorrangig die Bevölkerungsentwicklung (für die Nachfrage im Personenverkehr) sowie die Entwicklung der sektoralen Wertschöpfung für die Nachfrage im Güterverkehr. Das verwendete Modell ASTRA-M (Assessment of TRANsport strategies) nutzt hierfür zur Anpassung Statistiken von Destatis (siehe Anhang zur Modellbeschreibung).

Für die Feinjustierung der Verkehrsleistung bzw. der Fahrleistung auf der Landesebene für Baden-Württemberg wurden für die Erstellung der Projektionen der THG-Emissionen für Baden-Württemberg Zahlen des StaLA für das Jahr 2021 (wo vorhanden auch für 2022 oder 2023) verwendet. Die spezifischen Mobilitätsprofile (z.B. Wegeraten nach Bevölkerungsgruppe) werden anhand von Auswertungen aus Mobilität in Deutschland (2017) bzw. aus weiteren Mobilitätshebungen (z.B. Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010, etc.) in das Modell integriert.

Der Abgleich der Anteile der Antriebsarten wurde anhand der Zahlen des KBA (Bestand an Kfz nach Bundesländern, Fahrzeugklassen und Antriebsarten, Tabelle FZ27) bis zum Jahr 2023 vorgenommen. Spezifische Verbrauchsfaktoren für die jeweiligen Verkehrsmittel werden in ASTRA-M vorrangig aus HBEFA 4.2 entnommen. Weitere Annahmen können aus der Beschreibung des ASTRA-M Referenzszenarios⁴⁴ entnommen werden.

6.2 Projektion

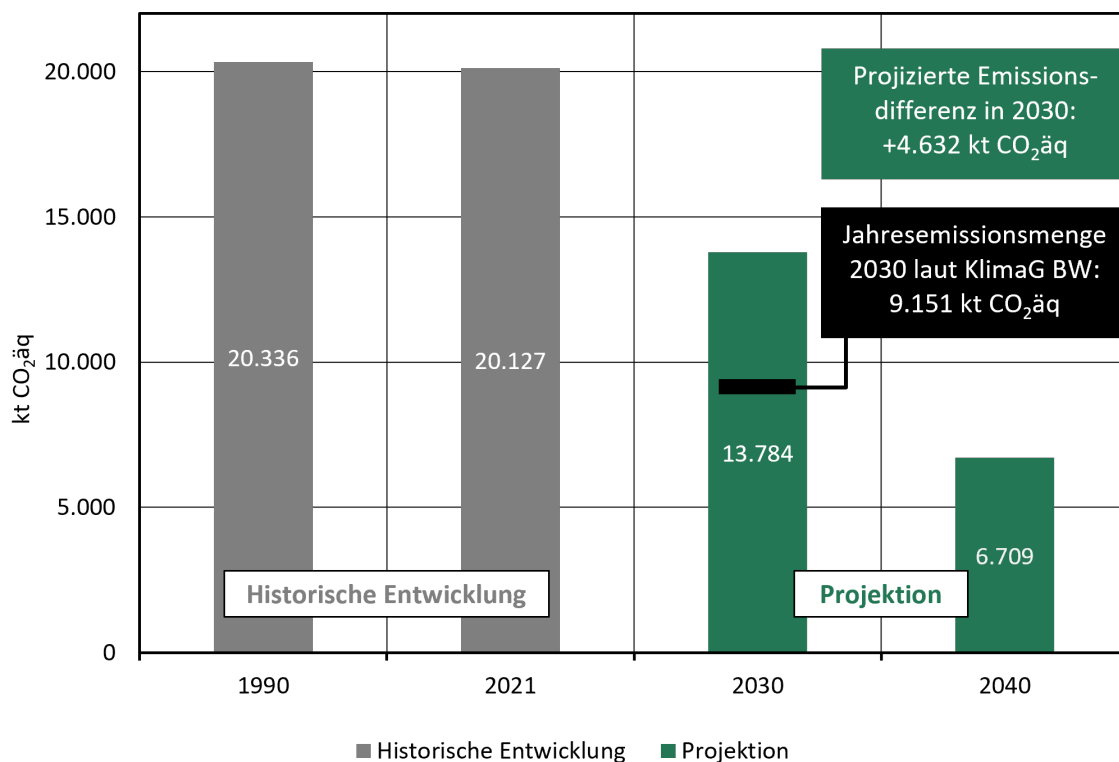
Nach dem KlimaG BW müssten die THG-Emissionen des Sektors bis 2030 um 55 % gegenüber 1990 gesenkt werden. Das entspricht einer Jahresemissionsmenge für den Sektor Verkehr in Baden-Württemberg von 9.151 kt CO₂äq im Jahr 2030. Nach den Projektionen der THG-Emissionen unter Einbezug des MMS plus fünf landesspezifischer Instrumente erreicht der Sektor Verkehr bis 2030 in Baden-Württemberg voraussichtlich nur eine Minderung der CO₂äq-Emissionen von -32 % gegenüber dem Jahr 1990. In absoluten Zahlen liegt die gesamte THG-Emissionsmenge bei 13.784 kt CO₂äq und damit +4.632 kt CO₂äq über dem Sektorziel.

⁴⁴ Schade W., Stich M., Kleemann M., Berthold D., Scherf C., Krail M., Brauer C., Krauß K., Anstett P., Walther C., Waßmuth V. (2022): Gestaltung des MKS Referenzszenarios für die Periode 2021 bis 2035 (REF-2020). Arbeitspapier im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr. Karlsruhe.

Zwischen 2030 und 2040 führen unter anderem der beschleunigte Markthochlauf der Elektromobilität im Straßenverkehr nach 2030 sowie die Verbesserung der Schienen- und Radverkehrsinfrastruktur zu einer deutlichen Reduktion der THG-Emissionen. Im Jahr 2040 emittiert der Verkehrssektor in Baden-Württemberg anhand der Modellrechnungen noch 6.709 kt CO₂äq. Dies entspricht einer Reduktion der THG-Emissionen in Höhe von 67,1 % gegenüber der Jahresemissionsmenge des Sektors im Jahr 1990. Für 2040 wurden im KlimaG BW bisher keine Sektorziele formuliert; als übergeordnetes Gesamtziel ist die Netto-Treibhausgasneutralität festgelegt. Der Sektor Verkehr selbst verfehlt damit jedoch die Netto-Treibhausgasneutralität.

Ohne die landesspezifischen Instrumente im Sektor Verkehr erreicht der Sektor in Baden-Württemberg im Jahr 2030 mit den Instrumenten des MMS auf der Bundesebene nach Abschätzungen mit ASTRA-M eine Minderung der THG-Emissionen in Höhe von 28,6 % gegenüber der Jahresemissionsmenge im Jahr 1990. Auf der Bundesebene wurde die relative Minderung an THG-Emissionen im MMS des Projektionsberichtes 2023 im Jahr 2030 gegenüber dem Jahr 1990 mit 28,4 % abgeschätzt. Die marginal höhere Wirkung für Baden-Württemberg ist dabei vor allem durch die moderat höheren Anteile von batterieelektrischen Pkw (BEV) am Pkw Bestand in Baden-Württemberg (3,3 % zum 01.01.2024) im Vergleich zum Bundesschnitt (2,9 % zum 01.01.2024) zu erklären.

Abbildung 22: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Baden-Württemberg im Sektor Verkehr



Quelle: StaLa, Klimaziele nach KlimaG BW, eigene Berechnungen

Die THG-Emissionen im Sektor Verkehr sind sowohl auf der nationalen als auch auf der Ebene des Landes Baden-Württemberg dominiert durch den Straßenverkehr. Der Anteil des Straßenverkehrs an den THG-Emissionen betrug im Jahr 2021 über 98 % in Baden-Württemberg. Bis zum Jahr 2040 beträgt der Anteil des Straßenverkehrs an den gesamten THG-Emissionen des Sektors trotz der Verbesserung der Infrastruktur, des öffentlichen Verkehrs und des Radverkehrs immer noch über 96 %. Die zunehmende Elektrifizierung des Straßenverkehrs trägt trotz der Bestrebungen zur Verlagerung der Verkehre auf die Schiene dazu bei, dass die Straße auf Grund der sinkenden Betriebskosten effizienter Elektroantriebe nur moderat Modalanteile verliert. In den Projektionen zeigt sich, dass die Elektrifizierung im Straßengüterverkehr auch auf Grund der durchschnittlich kürzeren Lebensdauer der Fahrzeuge schneller voranschreitet als im Straßenpersonenverkehr. Während im Jahr 2030 der Straßengüterverkehr noch 36 % Anteil an den THG-Emissionen (13.476 kt CO₂äq) hat, beträgt der Anteil im Jahr 2040 nur noch 28 % (von 6.493 kt CO₂äq). Die zunehmende Elektrifizierung im Schienenverkehr bewirkt eine weitere Abnahme der THG-Emissionen trotz steigender Verkehrsleistung (siehe folgende Tabelle).

Tabelle 12: Entwicklung der Treibhausgasemissionen (in kt) nach Verkehrsträger

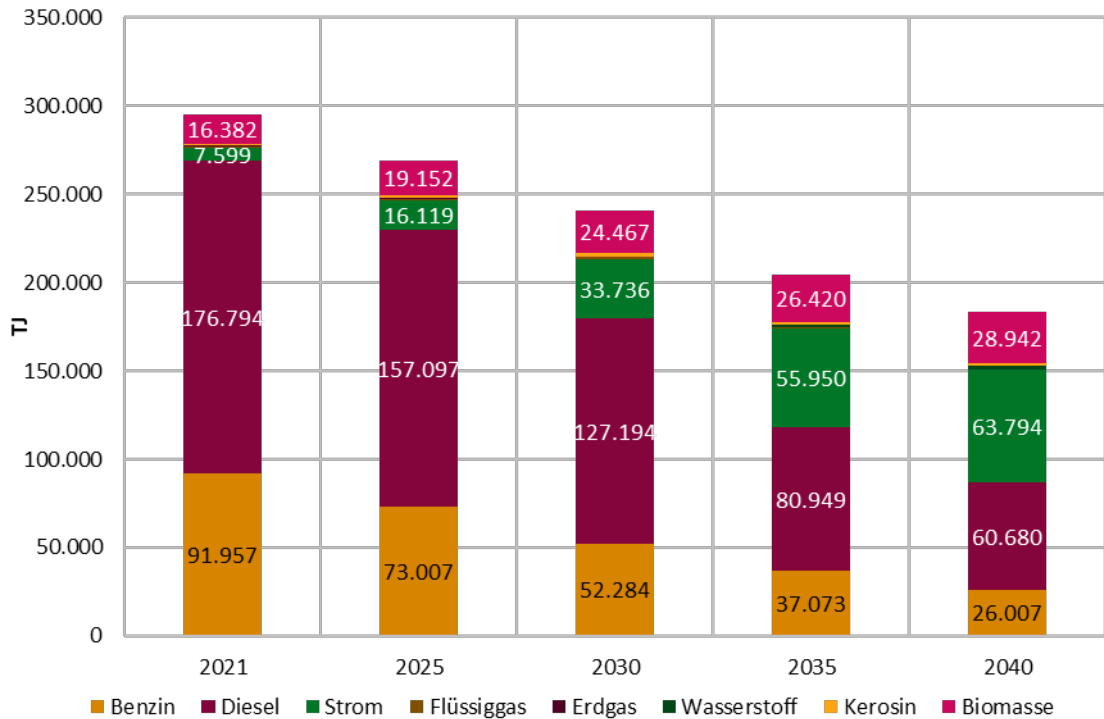
Verkehrsmittel	2021	2025	2030	2035	2040
Flugverkehr, national	39.3	115	125.7	127.9	122.8
Straße	20228.9	17321.9	13476.8	8851.4	6493.0
Schiene	158.6	155	150.3	105.0	66.2
Binnenschiff	35.8	33.6	30.7	27.7	27.1

Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI

Der Endenergieverbrauch im Sektor Verkehr sinkt nach den Projektionen mit ASTRA-M bis 2030 auf 241.000 TJ (gegenüber 295.000 TJ im Jahr 2021, siehe folgende Abbildung 21). Bis 2040 bewirken vorrangig die Elektrifizierung und die Verlagerung auf die Schiene und den nicht-motorisierten Verkehr eine Reduktion des Endenergieverbrauchs auf 183.000 TJ. Der Anteil des Endenergieverbrauchs der jeweiligen Energieträger zeigt einen deutlichen Rückgang bei Diesel von 60 % im Jahr 2021 auf 52,8 % im Jahr 2030 sowie bei Benzin von 31,2 % im Jahr 2021 auf 21,7 % in 2030. Gleichzeitig nimmt der Anteil des Energieträgers Strom am Endenergieverbrauch des Sektors von 2,6 % im Jahr 2021 auf 14 % im Jahr 2030 deutlich zu.

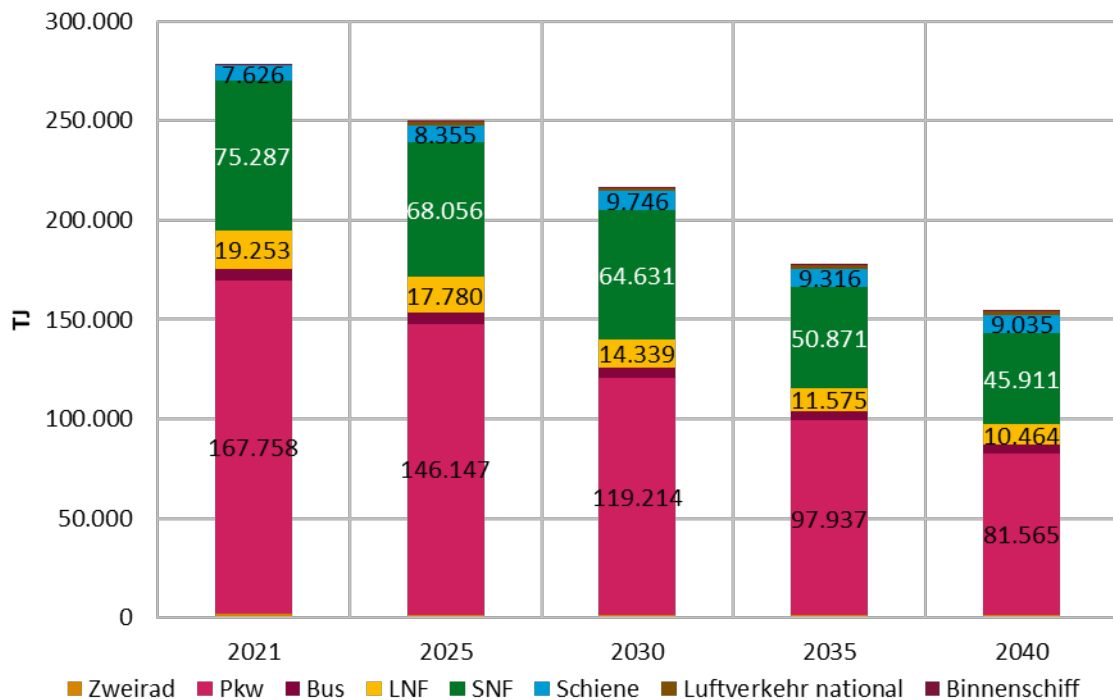
Bezogen auf die Verkehrsmittel zeigt sich bei den Projektionen ein deutlicher Rückgang des Endenergieverbrauchs bei Pkw (-29 % bis 2030) sowie bei leichten Nutzfahrzeugen (LNF: -26 % bis 2030). Die steigenden Verkehrs- und Fahrleistungen bewirken bei schweren Nutzfahrzeugen (SNF: -14 % bis 2030) eine geringere Reduktion des Endenergieverbrauchs trotz schnellerer Elektrifizierung als im Personenverkehr (siehe folgende Abbildung 21).

Abbildung 23: Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Energieträger in Baden-Württemberg im Sektor Verkehr



Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI

Abbildung 24: Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Verkehrsmittel in Baden-Württemberg im Sektor Verkehr



Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI

6.3 Instrumentenbewertung

Zusätzlich zu den Instrumenten des MMS auf der Bundesebene wurden für die Projektionen der THG-Emissionen für Baden-Württemberg die Wirkungen von fünf landesspezifischen Verkehrsinstrumenten einzeln abgeschätzt. Zusätzlich zur Wirkungsabschätzung der fünf Einzelinstrumente für Baden-Württemberg wurde die Wirkung des gesamten Instrumentenbündels integriert abgeschätzt, um mögliche Wechselwirkungen zwischen den Instrumenten zu berücksichtigen. Die Summe der Einzelwirkungen der Instrumente auf die Minderung der THG-Emissionen ist dabei moderat höher als die Wirkung des gesamten Instrumentenbündels. Dies liegt an der Kombination der Instrumente. Kombiniert man beispielsweise Instrumente, die eine Verlagerung vom motorisierten Individualverkehr auf den Radverkehr anreizen sollen, mit Instrumenten, die den Anteil von batterieelektrischen Pkw (BEV) positiv beeinflussen, dann fällt die Minderung der THG-Emissionen kleiner als die Summe der beiden Instrumente isoliert aus. Dies liegt daran, dass die durchschnittlichen THG-Emissionen pro Fahrzeugkilometer mit steigendem Anteil an BEV sinken und die Verlagerung geringere Minderungseffekte erzeugt als ohne das Instrument zur Steigerung des BEV-Anteils. Um die jeweiligen Anteile der Einzelinstrumente an der gesamten THG-Minderung des Instrumentenbündels ausweisen zu können, wurden zunächst die Einzelwirkungen berechnet, aufsummiert und die jeweiligen relativen Anteile an der THG-Minderung abgeleitet. Dieser relative Anteil wurde im Anschluss mit der integrierten THG-Minderungswirkung des gesamten Instrumentenbündels verrechnet.

Die folgende Tabelle zeigt die durch die quantifizierbaren Instrumente auf der Landesebene Baden-Württemberg zusätzlich erreichten Minderungen bei THG-Emissionen im Sektor Verkehr. Die größte Minderungswirkung in Höhe von 339 kt CO₂äq im Jahr 2030 wird durch das Instrument „Straßen und Plätze aufwerten (kostendeckendes Parken)“ erreicht. Da Straßen der Zukunft zukünftig mehr Aufgaben als nur das umweltfreundliche Fortkommen ermöglichen können müssen, sollte das Parken in Parkhäusern und Quartiersgaragen zentralisiert und verlagert werden, sowie intelligente Parkleitsysteme integriert werden. Frei gewordene Flächen können für nachhaltige Mobilitätsangebote wie Carsharing oder E-Fahrzeuge zur Verfügung gestellt werden oder zu Begegnungsflächen umgewandelt werden. Dazu tragen kommunale Konzepte für ein örtlich passendes Parkraummanagement bei. Das Land unterstützt entsprechende Parkraumkonzepte sowie die Umgestaltungen und die Umsetzung des kostendeckenden Parkens durch die Kommunen. Parken auf Landesliegenschaften, im öffentlichen Raum und auf öffentliche Landesstellflächen soll kostendeckend gestaltet werden. In die Berechnung der Wirkungen fließen dabei die Annahmen zu Parkkosten für Kurzzeitparken sowie Bewohnerparken einer Studie⁴⁵ zur Ermittlung der Wirkungen auf den Pkw-Besitz und die Verkehrsmittelwahl ein. Bis 2030 sollen demnach alle öffentlichen Parkflächen mit 1 Euro pro Stunde bzw. 140 Euro pro Jahr für Bewohner bepreist werden. Bis 2040 sollen diese Kosten auf 2 Euro für Kurzzeitparken sowie 500 Euro pro Jahr steigen. Im Modell bewirkt das Instrument des Kurzzeitparkens eine Verlagerungswirkung im Personenverkehr auf den öffentlichen Verkehr sowie die nicht-motorisierten Verkehrsmittel. Die Kosten für das

⁴⁵ Schade W., Haug I., Berthold D., Waßmuth V., Köllermeier N. (2023): Abschätzung der Klimawirkung von Parkraum-Management in Baden-Württemberg. Arbeitspapier im Auftrag der NVBW Nahverkehrsgesellschaft, Stuttgart.

Bewohnerparken verändern die Motorisierung und damit den Pkw-Besitz über die Zeit. Insgesamt zeigen sich anhand der Modellabschätzung deutlich positive Wirkungen auf die Minderung von THG-Emissionen.

Tabelle 13: Wirkung der bewerteten Instrumente im Verkehrssektor in kt CO₂äq.

#	Name Instrument/Bündel	2021	2025	2030	2035	2040	Zusätzlichkeit
1	Klimaschutzorientierte Marktanreize im Lkw-Verkehr herstellen	0.0	10.2	35.8	30.3	23.3	Ja
2	Straßen und Plätze aufwerten (kosten-deckendes Parken)	0.0	96.9	339.2	359.4	383.3	Ja
3	Pendeln und Dienstreisen klimafreundlicher machen	0.0	0.0	193.3	191.6	188.0	Ja
4	Durchgängige und attraktive Radverkehrsnetze schaffen	0.0	31.4	109.8	128.7	154.1	Ja
	Sicherheit für Fuß- und Radverkehr erhöhen	0.0	14.2	49.7	37.6	23.7	Ja

Die zweitgrößte Minderungswirkung auf die THG-Emissionen im Sektor Verkehr in Baden-Württemberg ergibt sich anhand der Modellabschätzungen für das Instrument "Pendeln und Dienstreisen klimafreundlicher machen". Im Jahr 2030 können durch das Instrument auf der Landesebene, zusätzlich zu den Instrumenten des MMS auf der Bundesebene, 193 kt CO₂äq eingespart werden. Durch die Vereinbarung des Landes mit den Unternehmen können bis 2030 knapp 65.000 BEV anstelle von Pkw mit Verbrennungsmotoren in den Pkw-Bestand kommen. Für die Berechnung wurde angenommen, dass ab 2027 durchschnittlich 80 % der neu zugelassenen Dienstwagen von Unternehmen in Baden-Württemberg als BEV zugelassen werden.

Etwas weniger groß in der Minderungswirkung zeigt sich das Instrument "Durchgängige und attraktive Radverkehrsnetze schaffen". Durch die Schaffung landesweit einheitlicher und radverkehrsfreundlicher Rahmenbedingungen sollen die Kommunen lückenlose, flächendeckende und durchgängige Radnetze realisieren können. Das Land passt im Instrument dazu den Rechtsrahmen der Radverkehrsförderung an. Im LGVFG wird eine attraktive Förderung mit unbürokratischen Abrufmöglichkeiten umgesetzt. Stadt- und Landkreise sind Schnittstelle zwischen Bund/Land und Städten/Gemeinden und koordinieren den Ausbau der Radinfrastruktur in ihrem Gebiet. Die Landesregierung prüft, diese Koordinationsaufgabe als konnexitätsrelevante Pflichtaufgabe gesetzlich zu verankern. Ein zentraler Baustein der Radnetze ist das baulastträgerübergreifende RadNETZ Baden-Württemberg (RadNETZ BW). Hierfür werden ca. 8.000 Kilometer RadNETZ BW bis 2030 auf den Zielzustand ausgebaut. Ein ambitionierter Ausbau der Radverkehrsinfrastruktur ist in Zuständigkeit des Landes und des Bundes eine wichtige Landesaufgabe. Durch das Instrument sollen zusätzlich weitere Widerstände gegen die Nutzung des Radverkehrs im Land abgebaut werden. Im ASTRA-M Verkehrsmodell wird

angenommen, dass die Widerstände für den Radverkehr auf den relevanten Distanzbändern (für Wege bis 10 km Distanz) bis 2030 um 10 % und bis 2040 um 20 % sinken. Als Widerstände werden hierbei die in die Simulation der Verkehrsmittelwahl einfließenden Fahrtzeiten, die Bewertung der Fahrtzeit sowie die allgemeinen Präferenzen bei der Verkehrsmittelwahl verstanden. Im Jahr 2030 sinken die THG-Emissionen des Sektors Verkehr in Baden-Württemberg dadurch zusätzlich um 110 kt CO₂äq.

Vergleichsweise gering fallen die THG-Minderungswirkungen der Instrumente "Klimaschutzorientierte Marktanreize im Lkw-Verkehr herstellen" sowie die "Sicherheit für Fuß- und Radverkehr erhöhen" aus. Im Jahr 2030 zeigt die Ausweitung der Lkw Maut infolge der Maßnahme „Klimaschutzorientierte Marktanreize im Lkw-Verkehr herstellen“ eine THG-Minderungswirkung in Höhe von 36 kt CO₂äq, sowie die Einführung des Tempolimits von 30 km/h Minderungen in Höhe von 50 kt CO₂äq. Bei der Ausweitung der Lkw Maut wurden die Wirkungen auf Verlagerung bzw. die Veränderung der Antriebswahl im Lkw Flottenmodell modellbasiert für die betroffenen Gewichtsklassen berechnet. Anhand der Mautstatistiken des Bundesamtes für Logistik und Mobilität wurde der Anteil der Fahrleistung der betroffenen Lkw auf den bereits bemauteten Straßentypen sowie die verbleibenden Straßentypen berechnet und in ASTRA-M quantifiziert. Aus der Veränderung der Vollkosten (Total Cost of Ownership) ergeben sich veränderte generalisierte Kosten, die die Verkehrsmittelwahl beeinflussen und zeitgleich auch Änderungen bei der Investitionsentscheidung bzw. der Antriebswahl bei Lkw Neuzulassungen bewirken. Da der Anteil der Fahrleistung auf noch nicht bemauteten Straßen verhältnismäßig gering ist und viele Unternehmen ihre Lkw nicht ausschließlich nur für die Nutzung auf einem bemauteten bzw. nicht bemauteten Straßentyp eingrenzen können, ist der zusätzliche Effekt einer Ausweitung nur marginal.

Der Effekt eines generellen Tempolimits von 30 km/h innerorts durch die Maßnahme „Sicherheit für Fuß- und Radverkehr erhöhen“ erweist sich ebenfalls anhand der Modellrechnungen als moderat, da die Durchschnittsgeschwindigkeiten innerorts in vielen Kommunen durch die hohe Verkehrsbelastung zumindest in den Spitzenzeiten sowieso sehr gering sind. Auswertungen vom Verkehrsdatenspezialisten INRIX zeigen, dass hier viele Städte über Durchschnittsgeschwindigkeiten von 20 km/h nicht hinauskommen. Der Effekt eines generellen Tempolimits auf diese Durchschnittsgeschwindigkeiten wurde daher für die Modellrechnung auf 10 % gesetzt. Die Minderungswirkung durch eine Verlagerung auf den ÖPNV und den Radverkehr ist jedoch überschaubar und dementsprechend die THG-Minderungswirkungen begrenzt.

7 Gebäude

Der Gebäudesektor im KlimaG BW bilanziert die THG-Emissionen aus dem Brennstoffverbrauch in den Bereichen GHD sowie in privaten Haushalten. THG-Emissionen, die durch den Verbrauch von Strom und Fernwärme entstehen, werden zwar auch nachfrageeitig durch das Gebäudemodell modelliert, aber entsprechend der sektoralen Zuordnung der Energiewirtschaft zugeordnet.

7.1 Zentrale Rahmendaten

Für die Projektion der THG-Emissionen im Gebäudesektor wurden neben den Rahmendaten des PB-2024 zu Energiepreis- und Wohnflächenentwicklung verschiedene landesspezifische Rahmendaten berücksichtigt. Dazu gehören die Datenabfrage zu Nichtwohngebäuden in Baden-Württemberg (data:NWG) sowie der Zensus 2011, der den Gebäudebestand nach Baualtersklassen erfasst. Weiterhin wurden Daten des StaLA aus dem Jahr 2023 zum Bestand und zu den Gebäudeflächen nach Gebäudetyp im Jahr 2022 herangezogen. Auch die Baufertigstellungen von 2012 bis 2022, die ebenfalls vom Statistischen Landesamt erfasst wurden, flossen in die Analyse ein.

Ebenfalls wurden regionale Klimadaten für das Jahr 2021 berücksichtigt, die als Mittelwert aus 14 PLZ-Regionen berechnet wurden. Zusätzlich wurden Daten zu Geräten und Prozessen im Bereich GHD, die Beschäftigtenentwicklung nach Wirtschaftszweigen im Dienstleistungssektor sowie die Entwicklung der Haushaltsgröße in die Projektion integriert. Die weiteren Rahmendaten sind in Kapitel 2.3.2 aufgeführt und der methodische Ansatz für die Modellierung ist in Kapitel 2.3.6 beschrieben.

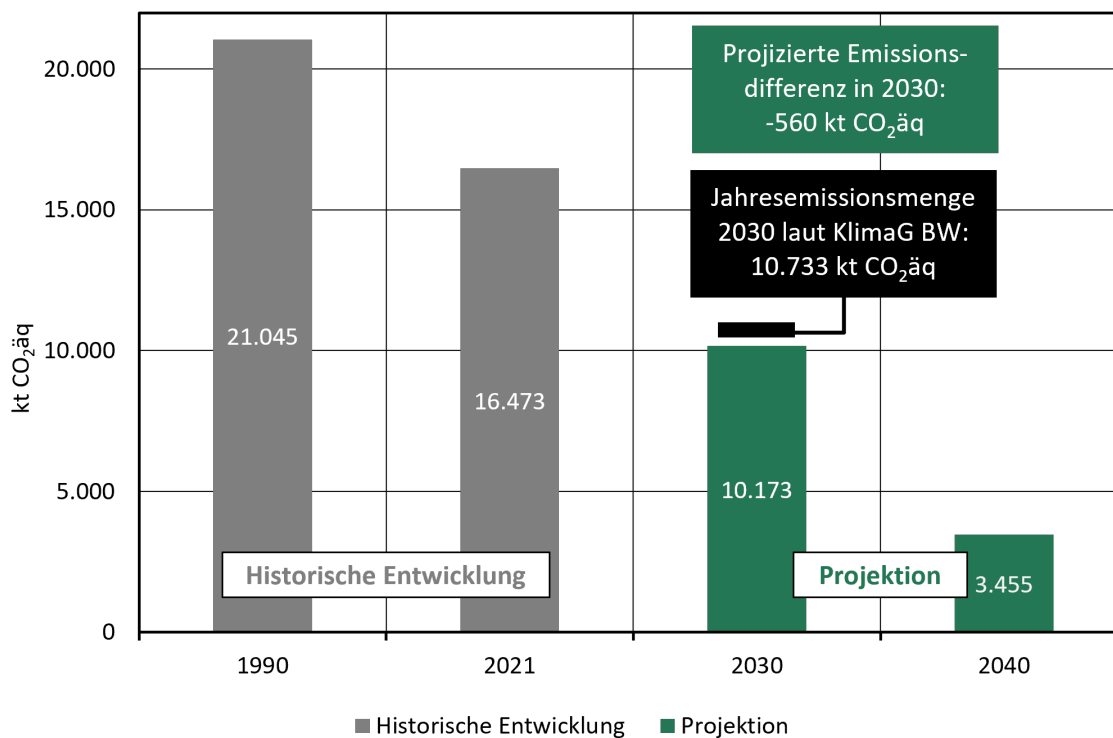
7.2 Projektion

Die THG-Emissionen im Gebäudesektor reduzieren sich in der Projektion aufgrund der erfassten Instrumente bis 2030 auf 10.173 kt CO₂äq und damit um etwa 52 % gegenüber 1990. Das Reduktionsziel des KlimaG BW für 2030 von 49 % gegenüber 1990 wird damit um ca. 560 kt CO₂äq unterschritten. Zwar werden im PB-2024 im Vergleich hierzu die Zielvorgaben des Bundes-KSG knapp verfehlt, dennoch liegt die relative THG-Reduktion in Baden-Württemberg für 2030 unterhalb der nationalen Ergebnisse, welche eine Entwicklung von -68 % im Gebäudesektor ergeben.

Für 2040 wurden im KlimaG BW bisher keine Sektorziele formuliert; als übergeordnetes Gesamtziel ist die Netto-Treibhausgasneutralität festgelegt. Das Projektionsszenario ergibt für 2040 Restemissionen von 3.455 kt CO₂äq. im Gebäudesektor, wodurch die Erreichung der Netto-Treibhausgasneutralität aller Sektoren in diesem Jahr deutlich erschwert wird. Hier liegt die relative Entwicklung der THG-Emissionen im Gebäudesektor mit -84 % nur knapp unterhalb der national projizierten Reduktion von 90 %.

Abbildung 25 zeigt die Entwicklung der historischen und projizierten THG-Emissionen im Gebäudesektor neben der Zielvorgabe des KlimaG BW für 2030.

Abbildung 25: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Baden-Württemberg im Sektor Gebäude



Quelle: StaLa, Klimaziele nach KlimaG BW, eigene Berechnungen

Wesentliche Treiber der Reduktion sind wie im nationalen Projektionsbericht die Vorgaben des GEG und die Förderinstrumente im Rahmen der BEG, wie in Kapitel 7.3 näher erläutert. Effekte der Rahmendaten, die eine THG-Reduktion unterstützen, sind einerseits die Reduktion der Heizgradtage durch Klimawandeleffekte und andererseits steigende CO₂-Preise im Rahmen des BEHG bzw. des neuen EU-Emissionshandels für Gebäude und Verkehr (ETS II), in den das BEHG voraussichtlich ab 2027 aufgehen wird.

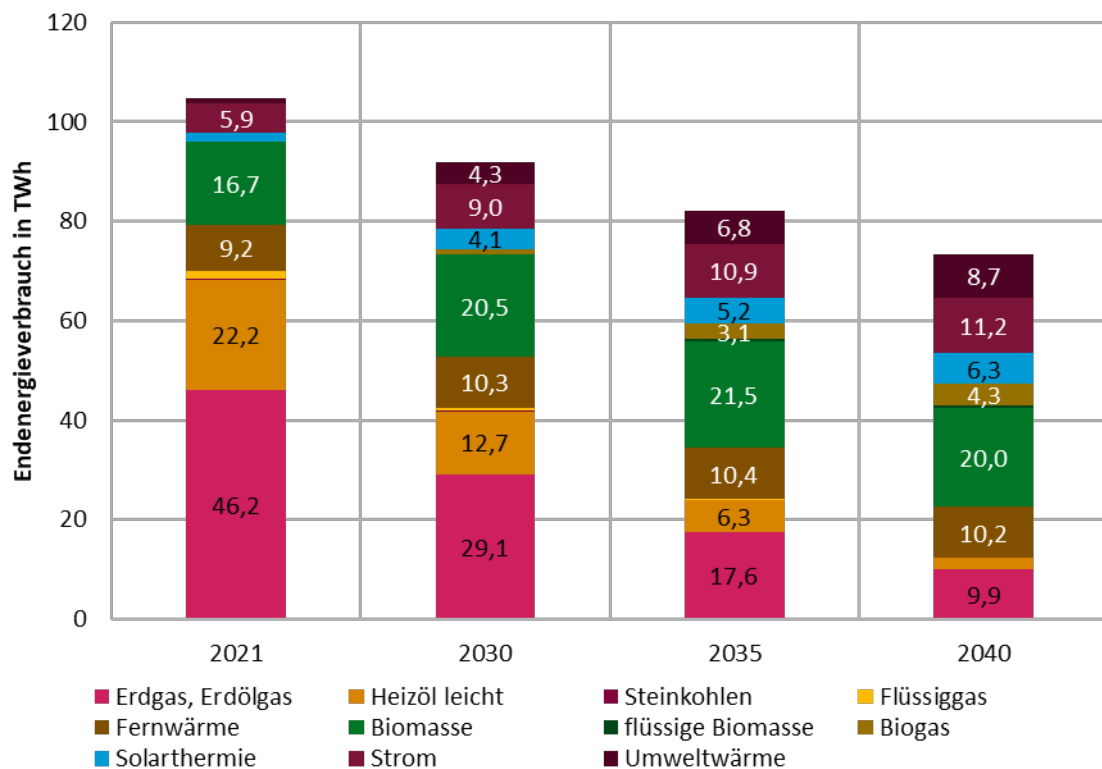
Entwicklung des Endenergiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser

Der Großteil des Endenergieverbrauchs im Gebäudesektor wird durch die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser verursacht und zu einem kleineren Teil durch Geräte und Prozesse in Haushalten und GHD. Abbildung 26 zeigt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser in den rund 2,7 Mio. beheizten Wohn- und Nichtwohngebäuden in Baden-Württemberg. Der Endenergieverbrauch sinkt im Zeitraum von 2021 bis 2030 um 12 % und bis 2040 um 30 %. Die Darstellung des Stromverbrauchs für Wärmepumpen, Strom-Direktheizungen und Hilfsenergie, sowie des Fernwärmeverbrauchs ist Teil des Endenergieverbrauchs im Gebäudesektor. Die THG-Emissionen der genannten Energieträger werden im Energiesektor bilanziert.

Im Szenario zeigt sich ein deutlicher Rückgang des Verbrauchs an Heizöl von rund 22 TWh auf rund 13 TWh bis 2030 und eine ähnliche Reduktion in den folgenden zehn Jahren. Bis 2040 wird nur noch 3 % des Endenergieverbrauchs im Gebäudesektor durch Heizöl gedeckt. Bei der Entwicklung des Erdgas- und Erdölgasverbrauchs verzeichnet die Projektion zwar einen deutlichen Rückgang, jedoch verbleiben hierauf auch 2040

noch 14 % des Endenergieverbrauchs. Der weiterhin hohe Verbrauch an Erdgas im Zieljahr bildet den größten Beitrag zum Verbleib der hohen Restemissionen im Gebäudesektor. Aufgrund der 65 %-Anforderung des GEG werden ab 2026 bzw. 2028 einige der Erdgasfeuerungsanlagen sukzessive auf Biomethan (Biogas) umgestellt und der Verbrauch steigt auf rund 1 TWh in 2030 und auf über 4 TWh in 2040. Die auch im Basisjahr geringen Verbräuche anderer fossiler Energieträger wie Steinkohle und Flüssiggas leisten im Zieljahr der Simulation fast keinen Beitrag mehr.

Abbildung 26: Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

Der Endenergieverbrauch aus Wärmenetzen bleibt über den Simulationszeitraum weitestgehend konstant bei rund 10 TWh, da einerseits die angeschlossenen Gebäude mit vergleichsweise geringer Effizienz im Basisjahr im Zeitraum energetisch saniert werden, andererseits aber die Anzahl der durch Fernwärme versorgten Gebäude zunimmt, da diese häufig eine Erfüllungsoption der 65 %-Anforderung darstellt.

Der Beitrag der Stromaufnahme von elektrischen Wärmepumpen zum Endenergieverbrauch steigt von 1 TWh im Jahr 2021 auf rund 5 TWh in 2030 und rund 8 TWh in 2040. Zusammen mit der genutzten Umweltwärme werden so 2030 10 % und 2040 ein Viertel des Endenergieverbrauchs durch Wärmepumpen gedeckt.

Die Verfügbarkeit von Biomasse wurde analog zum PB-2024 über Kosten-Potenzialkurven auf das verfügbare Potenzial begrenzt. Dieses Vorgehen sorgt dafür, dass der Preis für die unterschiedlichen Biomassefraktionen mit zunehmender Nachfrage zunimmt. Im

Vergleich mit anderen Wärmeversorgungssystemen stellen Biomasse-Zentralheizungskessel in vielen Gebäuden dennoch eine preislich konkurrenzfähige Option dar, weshalb der Endenergieverbrauch an Biomasse von rund 17 TWh im Basisjahr auf rund 21 TWh im Jahr 2030 zunimmt. Aufgrund der zunehmenden Sanierungsaktivitäten nimmt der Anteil der Biomasse bis 2040 jedoch wieder auf 20 TWh ab.

Entwicklung der Marktanteile von Wärmeversorgungssystemen

Ergänzend zum Endenergieverbrauch kann die Entwicklung der neu installierten Wärmeversorgungssysteme genutzt werden, um die Wirkung von Politikinstrumenten zu beurteilen. Abbildung 27 zeigt hierzu den 5-Jahres-Durchschnitt der projizierten Neuinstallationen (Anzahl der Gebäude) bis zum Jahr 2040. Aufgrund der altersbedingten Austausch- und Sanierungszyklen in verschiedenen Baualtersklassen steigt die Aktivitätsrate beim Heizungstausch bis in die erste Hälfte der 2030er Jahre an und fällt bis 2040 wieder auf ein ähnliches Niveau wie 2022-2025.

Bis spätestens 2026 bzw. 2028 können in Bestandsgebäuden bzw. Neubauten in Baulücken Öl- oder Gaskessel ohne 65 %-EE-Anteil eingebaut werden, wenn diese ab 2029 mit mindestens 15 %, ab 2035 mit mindestens 30 % und ab 2040 mit mindestens 60 % EE-Anteil betrieben werden⁴⁶. In den Projektionen für die Jahre 2022 bis 2025 sind daher noch durchschnittlich 41 % der eingebauten Wärmeversorgungssysteme in 134.000 Gebäuden gasbetriebene Zentralheizkessel (ZHK). Der Anteil der Gebäude mit neu installierten fossilen Heizsystemen liegt damit bei 50 %. Ab 2026 ist die Wirkung der 65 %-Anforderung des GEG deutlich zu sehen. Hier werden nur noch wenige Ölkessel verbaut und der Anteil neu installierter Gas-ZHK sinkt auf 19 %. Der Marktanteil von Wärmepumpensystemen nimmt dagegen auf 52 % und damit etwa 79.000 installierte Wärmepumpen pro Jahr deutlich zu. Dies entspricht etwa 22 % der im Jahr 2023 deutschlandweit verkauften Heizungswärmepumpen⁴⁷ und verdeutlicht den ambitionierten Zubau klimaneutraler Heizungssysteme in den kommenden Jahren. Hemmnisse für diesen Zubau durch fehlende Fachkräfte wurden in der Projektion nicht berücksichtigt. Auch die Zahl der Biomasse-ZHK nimmt in den Jahren 2026-2030 leicht auf 17 % Marktanteil zu und stagniert bis 2040 auf etwa demselben Niveau. Ab 2030 werden in 61 % der Neuinstallationen Wärmepumpensysteme verbaut und der Anteil der neuen Gaskessel nimmt weiter ab, jedoch werden auch in der zweiten Hälfte der 2030er Jahre noch 13 % neue Gaskessel eingebaut. Die Versorgung der nach 2026 bzw. 2028 eingebauten Gas-ZHK muss entsprechend der 65 % Pflicht des GEG ab 2029 sukzessive mit grünen Gasen (vornehmlich Biomethan) betrieben werden, sofern diese nicht in Wasserstoffnetzausbaugebieten liegen⁴⁸.

Der Anteil von neu installierten Biomasse-Öfen und Stromdirektheizungen bleibt über den Simulationszeitraum weitgehend konstant auf vergleichsweise niedrigem Niveau.

⁴⁶ Zu detaillierten Informationen über die geltenden Regelungen des GEG siehe [Das Gebäudeenergiegesetz – Ihr Weg zu einer Heizung mit 65 Prozent erneuerbaren Energien | Umweltbundesamt](#).

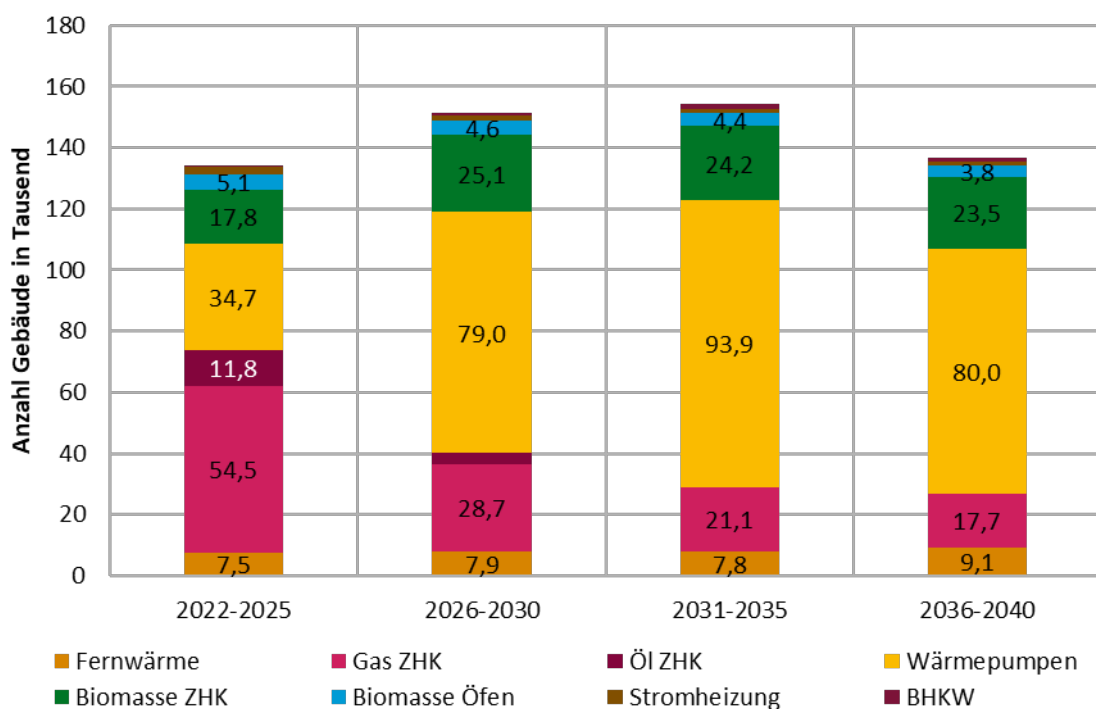
⁴⁷ Siehe Zahlen des Bundesverband Wärmepumpe: [Zahlen & Daten | Bundesverband Wärmepumpe \(BWP\) e.V. \(waermepumpe.de\)](#)

⁴⁸ Laut GEG § 71, 15 % grüne Gase ab 1.1.2029, 30 % grüne Gase ab 1.1.2035, 60 % grüne Gase ab 1.1.2040.

Als Biomasse-Öfen sind hier keine zusätzlichen Komfortheizungen, sondern Einzelraumfeuerungen erfasst, die der hauptsächlichen Beheizung des Gebäudes dienen.

Der Zuwachs an Gebäuden mit Fernwärme-Versorgung wurde basierend auf Angaben von Wärmenetzbetreibern zum realistischen Netzausbau⁴⁹ begrenzt und ist mit etwa 8.000 Gebäuden pro Jahr über den Simulationszeitraum weitgehend konstant. Der Anteil der Fernwärmesysteme an den neu installierten Wärmeversorgungssystemen liegt damit bei ca. 5 % und nimmt vor allem in den letzten fünf Jahren auf 7 % der Neuinstallationen zu.

Abbildung 27: Jährlich installierte Wärmeversorgungssysteme im 5-Jahres-Durchschnitt



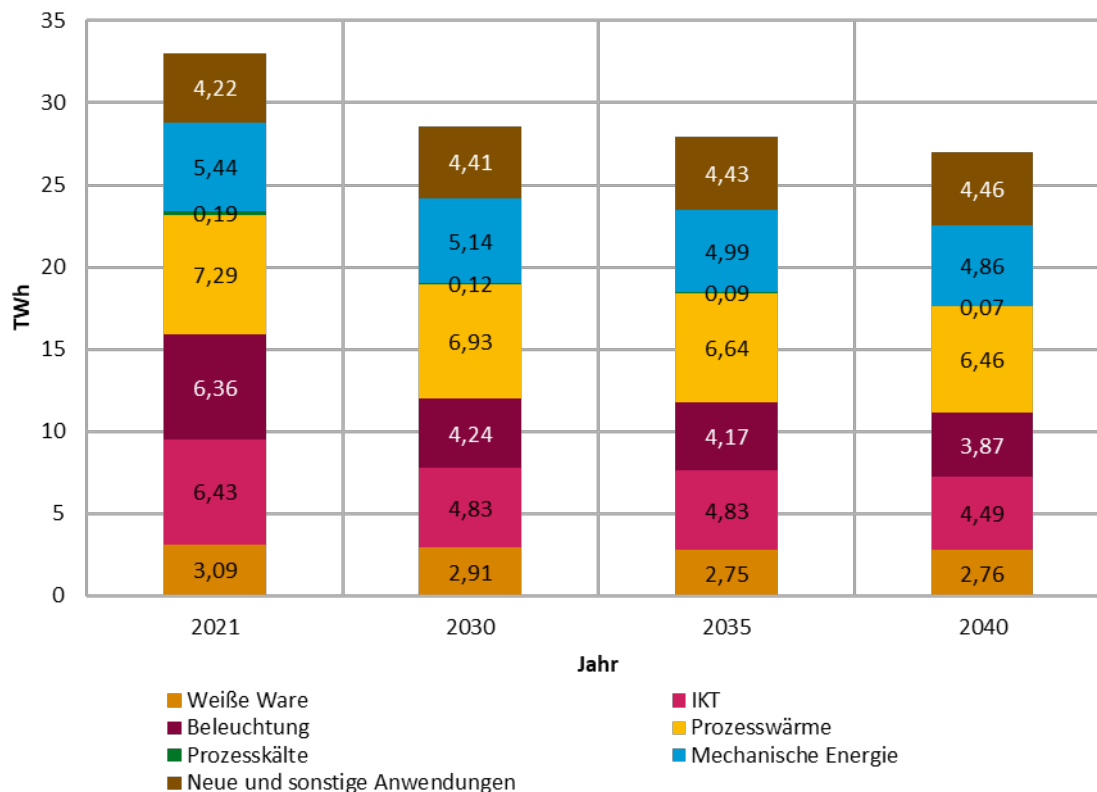
Quelle: Eigene Berechnungen IREES

Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Geräte und Prozesse

Abbildung 28 zeigt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Geräte und Prozesse in den Sektoren Haushalte und GHD nach Anwendungen. Insgesamt sinkt der Endenergieverbrauch zwischen 2021 und 2040 um 6,1 TWh bzw. 18 %. Prozesswärmeanwendungen wie Backöfen und Geschirrspüler haben im Jahr 2021 mit rund 22 % den größten Anteil am Endenergieverbrauch, gefolgt von Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) und Beleuchtung (jeweils 19 %). Im Haushaltssektor ist auch die sogenannte Weiße Ware (Kühlschränke, Waschmaschinen etc.) von großer Bedeutung. Im Sektor GHD wird darüber hinaus mechanische Energie eingesetzt, z.B. für Druckluft und Motoren.

⁴⁹ 0,03 km je 1000 Einwohner und Jahr, siehe Instrumentenpapier

Abbildung 28: Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Geräte und Prozesse nach Anwendungen

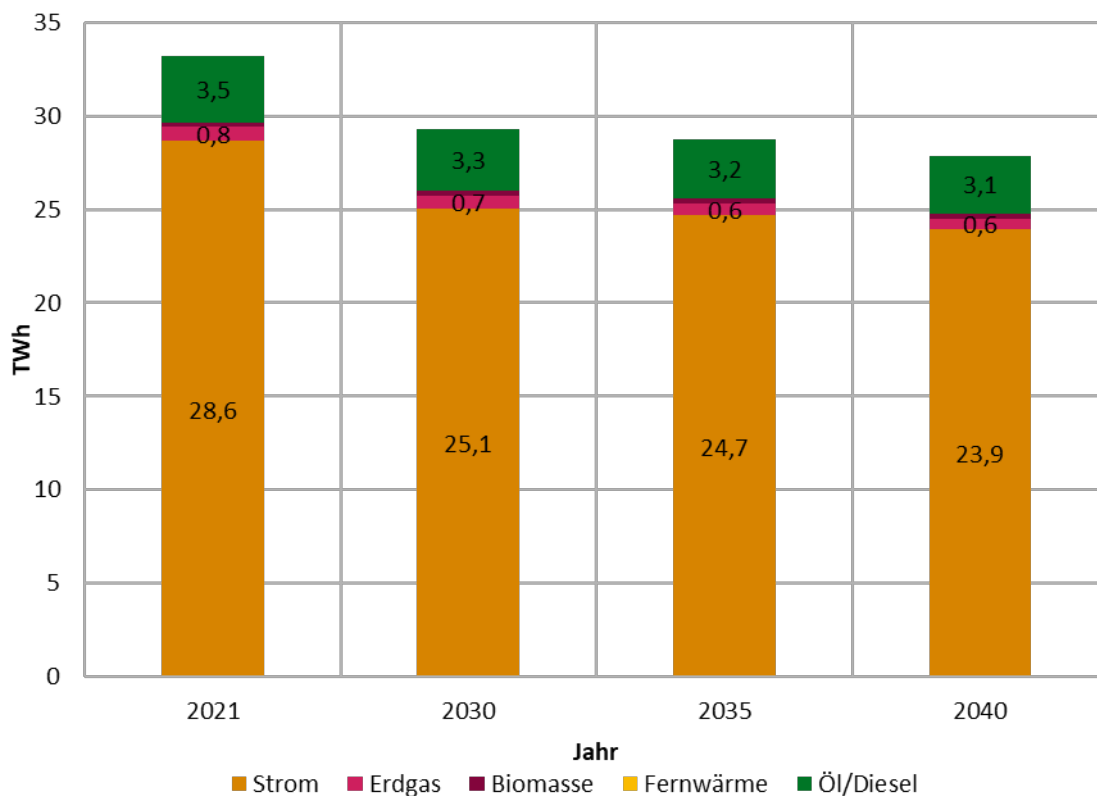


Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI

Abbildung 29 zeigt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Geräte und Prozesse in den Sektoren Haushalte und GHD nach Energieträgern. Strom ist mit einem Anteil von 86 % am Endenergieverbrauch im Jahr 2021 der eindeutig dominierende Energieträger. Heizöl und Diesel werden über die Projektionsjahre konstant für Prozesswärmanwendungen und mechanische Energie eingesetzt. Der Anteil von Erdgas liegt in allen Jahren bei etwa 2 %.

Insgesamt ist die Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Geräte und Prozesse durch zwei gegenläufige Trends gekennzeichnet. Einerseits werden diese Anwendungen im Zuge der EU-Regelungen zum Ökodesign und zur Energieverbrauchskennzeichnung immer energieeffizienter, benötigen also weniger Energieinput pro Einheit nutzbaren Outputs. Das Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz (EVPG) und das Energieverbrauchskennzeichnungsgesetz (EnVKG) setzen diese EU-weiten Anforderungen in deutsches Recht um. Zum anderen werden die erzielten Energieeinsparungen durch direkte Rebound-Effekte konterkariert, wie z.B. größere Fernsehgeräte oder die Nutzung von Zweit- und Drittgeräten in größeren Haushalten. Beide Effekte führen dennoch zu einem Netto-Rückgang des Endenergieverbrauchs bei Geräten und Prozessen.

Abbildung 29: Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Geräte und Prozesse nach Energieträger



Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI

Sensitivitätsanalyse

Neben der Annahme eines begrenzten Ausbaus von Wärmenetzen wurde in einer Sensitivitätsanalyse ein Szenario mit konsequenter Umsetzung, der in Baden-Württemberg bereits vorliegenden kommunalen Wärmepläne betrachtet. In vielen Fällen berücksichtigen diese Pläne keine Begrenzungen für den Fernwärmeausbau und stellen somit ein Zielszenario des Wärmenetzausbaus dar. Berücksichtigt wurden dabei die zum Berichtszeitpunkt vorliegenden Wärmepläne von 141 Kommunen.

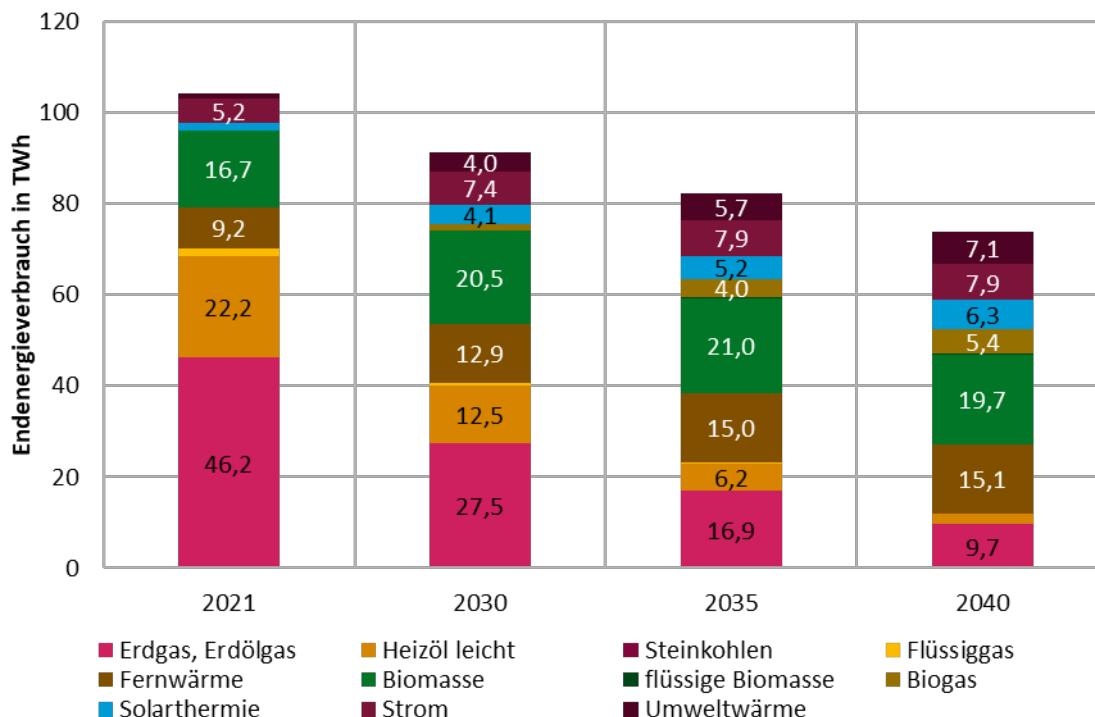
Abbildung 30 zeigt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs unter Berücksichtigung des Zielszenarios für den Fernwärmeausbau. Im Vergleich zum Szenario mit begrenztem Fernwärmeausbau verringert sich der Endenergieverbrauch durch eine leicht geringere Sanierungsaktivität in kleinerem Maß und liegt im Jahr 2040 um 0,8 Prozentpunkte höher als im Basisszenario. Der Anteil der Fernwärme am Endenergieverbrauch im Gebäudesektor erhöht sich von 9 % im Basisjahr auf rund 14 % im Jahr 2030, verglichen mit rund 11 % bei moderatem Fernwärmeausbau. Im Zieljahr wird mit 15 TWh ein Anteil von rund 21 % am Endenergieverbrauch erreicht, im Vergleich zu rund 14 % im Basisszenario.

Der höhere Anteil der Fernwärme am Endenergieverbrauch führt im Jahr 2030 in erster Linie zu einer Verringerung von Wärmepumpenstrom um 1,6 TWh und Erdgas um 1,7 TWh. Im Jahr 2040 zeigt die Sensitivitätsrechnung vornehmlich einen Rückgang des

Wärmepumpenstroms um 3,3 TWh und eine Erhöhung des Biogasverbrauchs um 1,1 TWh im Vergleich zum Basisszenario.

Der Anteil von EE-Wärme am Endenergieverbrauch (ohne Fernwärme) steigt bis 2030 wie im Basisszenario auf 33 %, bis 2040 jedoch nur auf 46 %, verglichen mit 52 % bei begrenztem Fernwärmeausbau.

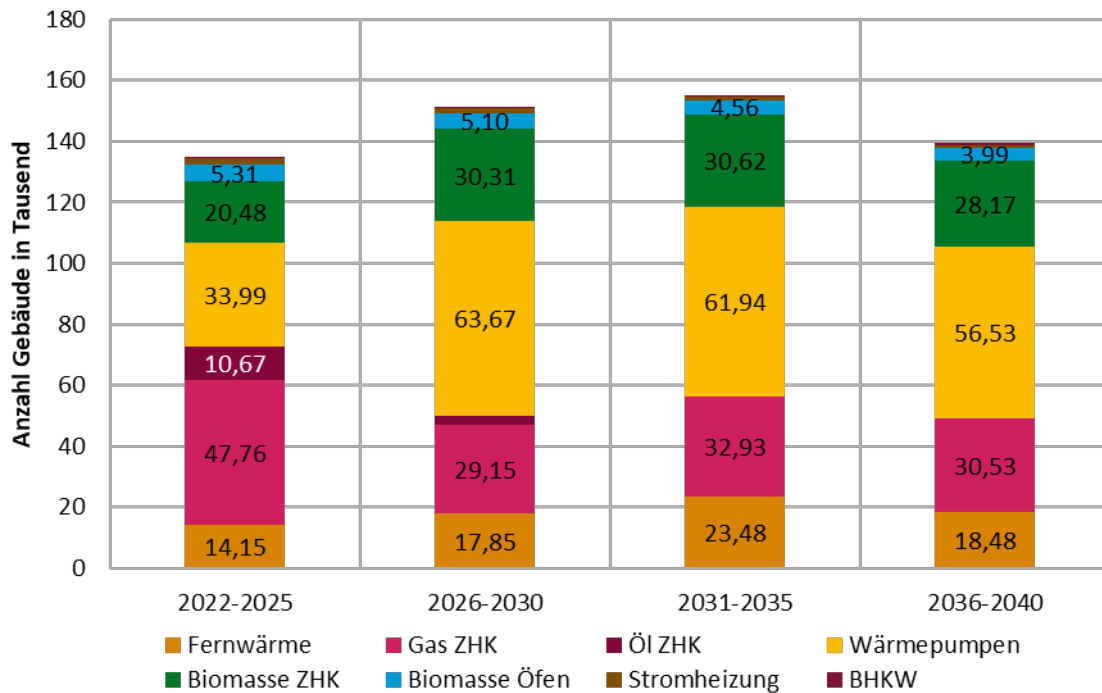
Abbildung 30: Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser unter konsequenter Umsetzung der Wärmepläne



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

Bei den jährlich neu installierten Wärmeversorgungssystemen im Zielszenario des Fernwärmeausbaus in Abbildung 31 zeigt sich der stärkere Zuwachs an Fernwärmesystemen von bis zu 23.500 Gebäuden pro Jahr und einem Anteil von 15 % der Neuinstallationen im Jahr 2035. Im Vergleich dazu liegt der Anteil im Szenario mit begrenztem Wärmenetzausbau bei maximal 7 %. Die Gesamtanzahl der neu installierten Heizsysteme unterscheidet sich nur marginal vom Basisszenario, die deutlichste Änderung ergibt sich bei den Anteilen der Wärmepumpensysteme und der Gas-ZHK. Während der Anteil der Wärmepumpen im Sensitivitätsszenario in den ersten fünf Jahren des Simulationszeitraums den Werten des Basisszenarios entspricht, liegt dieser ab 2030 um durchschnittlich 16 Prozentpunkte darunter. Ab 2030 werden zudem noch deutlich mehr Gas-ZHK verbaut, im Schnitt 22 % verglichen mit 13 % im Basisszenario. Von 2021 bis 2040 werden bei ambitioniertem Fernwärmeausbau außerdem etwas mehr Biomassefeuerungen installiert, der Anteil liegt im Schnitt etwa 3 Prozentpunkte höher.

Abbildung 31: Jährlich installierte Wärmeversorgungssysteme im 5-Jahres-Durchschnitt unter konsequenter Umsetzung der Wärmepläne



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

Insgesamt ergeben sich durch den angenommenen höheren Anteil der Fernwärme zunächst im Jahr 2030 um 370 kt CO₂äq geringere THG-Emissionen im Gebäudesektor, da eine Verschiebung zum Energiesektor stattfindet. Durch den geringeren Anteil an Wärmepumpen und den insgesamt höheren Endenergieverbrauch liegen die Emissionen jedoch im Jahr 2040 sogar um 330 kt CO₂äq höher als im Basisszenario.

7.3 Instrumentenbewertung

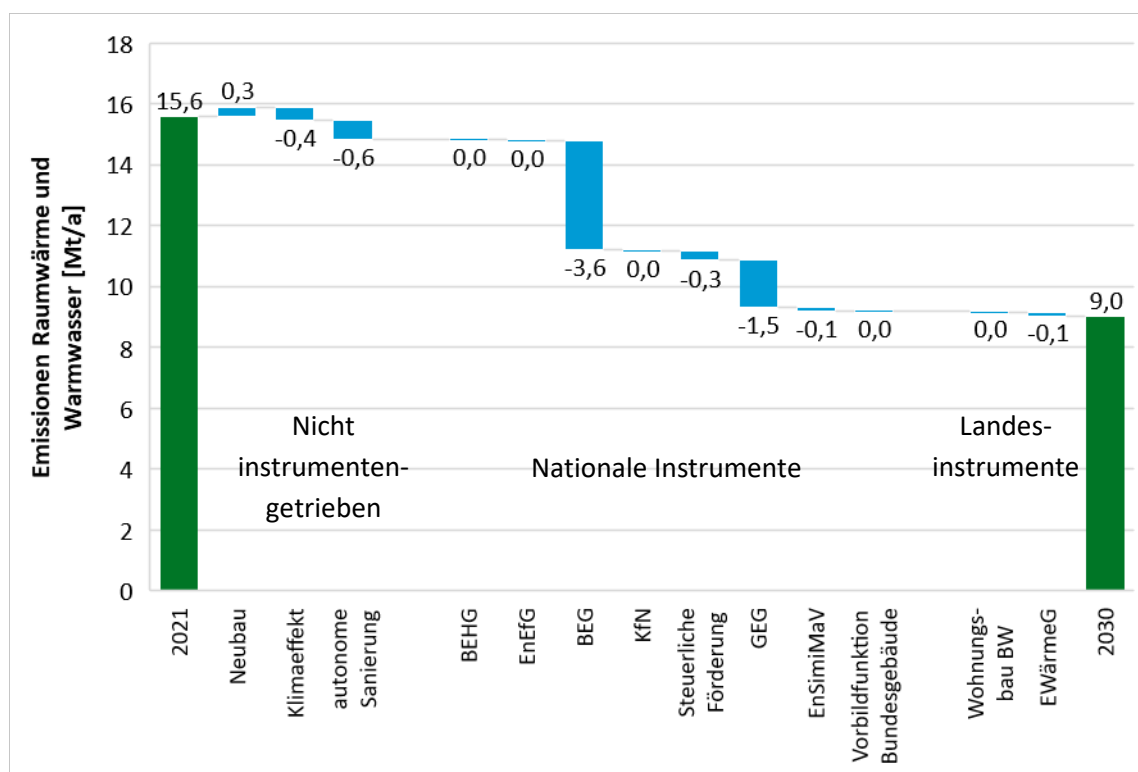
Die Projektionen der Entwicklung der Beheizung des baden-württembergischen Gebäudebestandes basieren auf einer Modellierung mit Invert/ee-Lab (siehe Modellbeschreibung im Anhang). Im Modell wirken die Instrumente des Politik-Mix (z.B. Förderung und Ordnungsrecht) als Bündel. Abbildung 32 zeigt eine Abschätzung der Emissionsminderungswirkung der Einzelinstrumente, die auf den Bereich Raumwärme und Warmwasser in Gebäuden in Baden-Württemberg einwirken.

Diese Berechnungen basieren auf den Abschätzungen zur Wirkung der Instrumente im PB-2024. Die Minderungswirkung ist um Wechselwirkungseffekte der Instrumente bereinigt (Netto-Wirkung). Analog zum nationalen Projektionsbericht trägt die BEG am stärksten zur Minderung bei, gefolgt vom novellierten GEG inkl. 65 % EE-Anforderung beim Heizungstausch. Weitere nationale Instrumente mit jeweils geringer Minderungswirkung in Baden-Württemberg sind das BEHG, das EnEFG, das Förderprogramm Klimafreundlicher Neubau (KfN), die steuerliche Förderung der energetischen Gebäudesanierung, die Mittelfristenergieversorgungsmaßnahmenverordnung (EnSimiMaV) und der Erlass zur Sanierung der Bundesgebäude.

Basierend auf dem nationalen PB-2024 führen zusätzlich nicht-instrumentengetriebene Effekte zu Emissionsminderungen: zum einen dadurch, dass durch den Anstieg der Außentemperatur im Zuge der Klimakrise weniger geheizt werden muss (Klimaeffekt) und zum anderen durch Sanierungen, die auch ohne Instrumente durchgeführt worden wären (autonome Sanierung). Zusätzlicher Neubau führt zu zusätzlichen Emissionen.

Außerdem wirken zwei Landesinstrumente emissionsmindernd: In der Wohnungsbauförderung Baden-Württemberg gelten für Sanierungen Effizienzstandards und das EWärmeG BW führt zu zusätzlichen Einsparungen, bis das GEG flächendeckend gilt. Insgesamt überwiegt die Wirkung der nationalen Instrumente aufgrund der strengeren Anforderungen und der größeren Fördervolumina.

Abbildung 32: Bewertung der Netto-Wirkung von Instrumenten im Gebäudesektor



Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Die Allokation der Emissionsminderungen durch die nationalen Instrumente nach Baden-Württemberg erfolgt anhand der Verteilungsschlüssel in Abbildung 33. Auf Grundlage verschiedener Daten wird der Anteil der nationalen Wirkung abgeschätzt, der je Instrument dem Bundesland zugerechnet werden kann. Die restliche Minderungswirkung verteilt sich auf die anderen Bundesländer. Als Vergleichswert dient die Einwohnerzahl Baden-Württembergs. Übersteigt ein Balken die horizontale Linie, ist die Minderungswirkung in Baden-Württemberg im Bundesländervergleich überdurchschnittlich hoch. Beispielsweise wird pro 1.000 Einwohner mehr BEG-Förderung in Baden-Württemberg beantragt als in anderen Bundesländern, so dass die Minderungswirkung des BEG in Baden-Württemberg überdurchschnittlich hoch ist. In der Projektion wird angenommen, dass der Anteil der BEG-Förderung je Bundesland bis 2030 fortgeschrieben

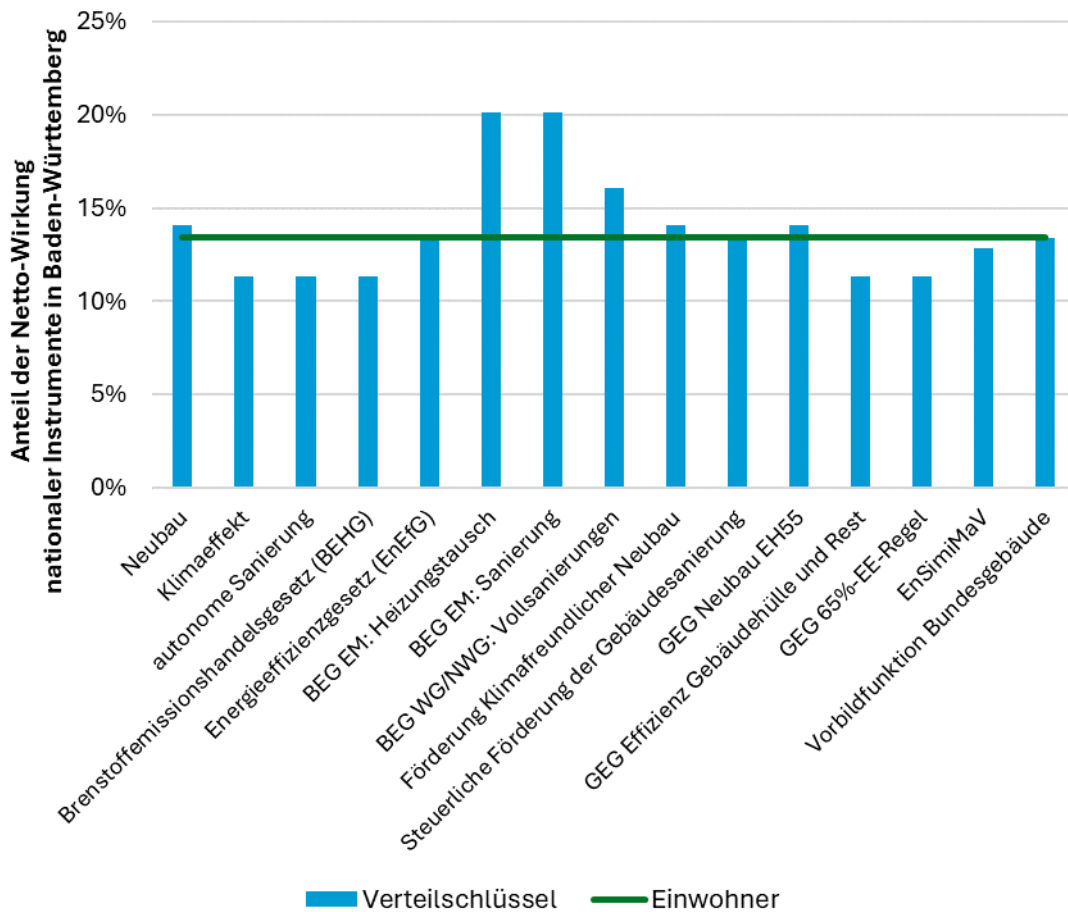
wird. Treten Sättigungseffekte in der Förderdynamik in Baden-Württemberg auf, gefährdet dies das Erreichen des Sektorziels.

Für die Herleitung der Verteilschlüssel je Instrument kommen verschiedene Daten zum Einsatz:

- Förderprogramm KfN, Anforderungen an Neubauten im GEG: Die Neubaustatistik weist den Anteil der Neubauten je Bundesland aus. Daraus wird der Verteilschlüssel abgeleitet für die nationalen Instrumente mit Bezug zu Neubau → (Destatis, 2022a)
- Klimateffekt, autonome Sanierung, BEHG und GEG: Es wird eine Wahrscheinlichkeit abgeschätzt, dass bis 2030 fossile Heizungen ausgetauscht werden. Diese basiert auf dem Anteil fossiler Energien an der derzeitigen Beheizungsstruktur (Destatis, 2019) und dem Alter der fossilen Heizungen (BDEW, 2023) und wird bereinigt um die Wahrscheinlichkeit, dass auch ohne Regulierung eine erneuerbare Heizung verbaut worden wäre anhand von Zubauzahlen erneuerbarer Wärmeerzeuger⁵⁰. Diese Wahrscheinlichkeit je Bundesland bedingt den Verteilschlüssel für verschiedene Instrumente bzw. Effekte
- EnEfG, Vorbildfunktion Bundesgebäude, steuerliche Förderung Gebäudesanierung: Für mehrere Instrumente liegen keine Daten für eine detailliertere Verteilung vor bzw. eine Verteilung nach Einwohnerzahl scheint hinreichend genau
- EnSimiMaV: Die Verordnung stellt auf den Anteil mit Gas beheizter Mehrfamilienhäuser ab, der den Verteilschlüssel ausmacht (Destatis, 2019)
- BEG: Die Minderungswirkung wird proportional zum Fluss von Fördermitteln zwischen den Bundesländern aufgeteilt (Heinrich *et al.*, 2022; Heinrich, Langreder and Grodeke, 2022).

⁵⁰ Siehe <https://www.biomasseatlas.de/index.php?id=1> und <http://www.waermepumpenatlas.de/>

Abbildung 33: Verteilschlüssel der Wirkung nationaler Instrumente nach Baden-Württemberg



Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Der Bund verfehlt sein Klimaziel für 2030 im Gebäudesektor knapp. In Baden-Württemberg wird es gemäß diesen Projektionen erreicht. Hauptgrund dafür ist, dass überdurchschnittlich viel Fördergeld der BEG nach Baden-Württemberg fließt. 2021 waren es 169 Euro je Einwohner gegenüber 116 Euro im Bundesdurchschnitt. Unter der Annahme gleichverteilter Emissionseinsparungen je Fördereuro ergeben sich höhere Minderungen in Baden-Württemberg. Außerdem wirken die Anforderungen an neuinstallierte Heizungen aus dem EWärmeG zusätzlich zum Bundes-Politik-Mix, bis es ab Mitte 2028 durch das GEG abgelöst wird. Der frühere Start einer kommunalen Wärmeplanung flankiert diese Entwicklung. Dass es in Baden-Württemberg etwas wärmer ist als im Bundesdurchschnitt, führt ebenfalls dazu, dass im Land die Emissionsprojektion für den Gebäudebereich etwas besser ausfällt als auf Bundesebene (Eurostat, 2024).

8 Landwirtschaft

8.1 Zentrale Rahmendaten

Die Entwicklung der landwirtschaftlichen Nutzfläche ist mit dem LULUCF Sektor abgestimmt, dies betrifft sowohl Flächenverluste für landwirtschaftsfremde Nutzungen (z.B. für Siedlungen und Infrastruktur) als auch Veränderungen der landwirtschaftlichen Nutzung (z.B. Paludikulturen auf wiedervernässten Moorböden oder Agroforstsysteme).

Weitere Rahmendaten sind für den Sektor Landwirtschaft nicht relevant, denn die landwirtschaftliche Produktion hängt vor allem von der verfügbaren Agrarfläche und den Betriebsausrichtungen ab.

8.2 Projektion

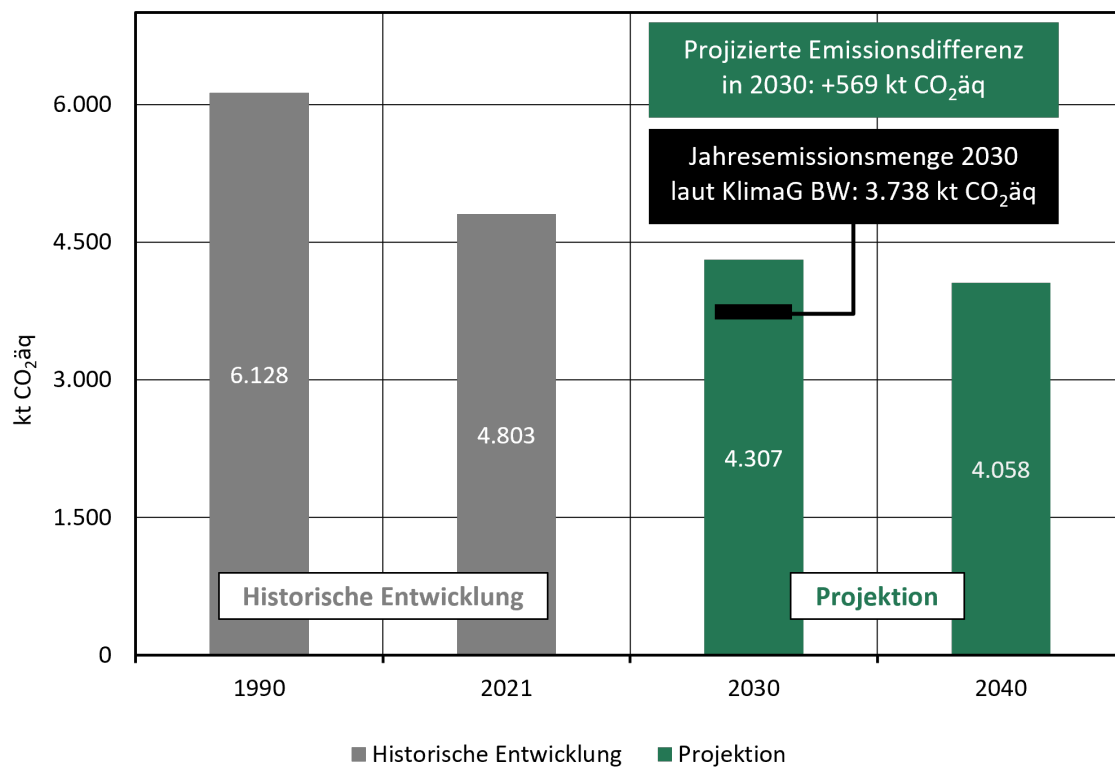
Die THG-Emissionen im Sektor Landwirtschaft sinken in der Projektion bis 2030 auf 4.307 kt CO₂äq und bis 2040 auf 4.058 kt CO₂äq. Das entspricht gegenüber dem Jahr 2021 einem Rückgang von 10 % bzw. 15,5 %. Diese Minderung ist geringer als das KlimaG BW für den Sektor vorsieht. Die dort für den Sektor festgelegte Jahresemissionsmenge für 2030 umfasst 3.738 kt CO₂äq, die Projektion ergibt somit eine Zielverfehlung von insgesamt 569 kt CO₂äq.

Für das Jahr 2040 sind noch keine Sektorziele festgelegt⁵¹; als übergeordnetes Gesamtziel ist die Netto-Treibhausgasneutralität festgelegt. Damit das Land diese bis 2040 erreichen kann, ist davon auszugehen, dass die THG-Emissionen mindestens linear abnehmen müssen. In der Projektion verringert sich dagegen die jährliche Abnahme. Insofern muss davon ausgegangen werden, dass die Landwirtschaft ohne zusätzliche Maßnahmen keinen ausreichend großen Beitrag zum Landesziel der Netto-Treibhausgasneutralität bis 2040 leisten kann.

In Abbildung 34 wird die Entwicklung der THG-Emissionen und die Zielerreichung im Sektor Landwirtschaft mit Blick auf das Sektorziel 2030 des KlimaG BW dargestellt.

⁵¹ Der Landwirtschaftssektor wird aber auch dann noch Restemissionen aufweisen, da Lachgas und Methan aus natürlichen Prozessen stammen, die nicht vollständig gemindert werden können.

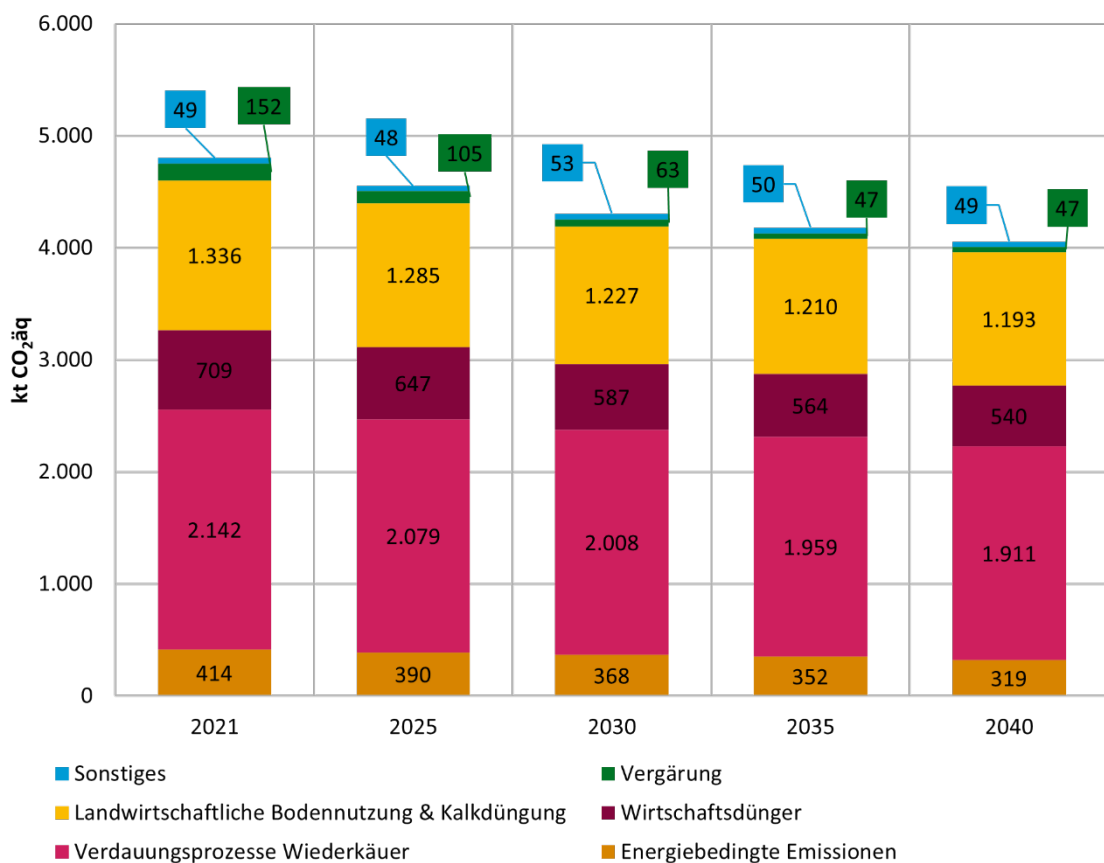
Abbildung 34: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Baden-Württemberg im Sektor Landwirtschaft



Quelle: StaLa, Klimaziele nach KlimaG BW, eigene Berechnungen

Die zeitliche Entwicklung der THG-Emissionen im Sektor Landwirtschaft, differenziert nach den einzelnen Quellgruppen, ist in Abbildung 35 dargestellt. Außer bei der Vergärung nachwachsender Rohstoffe zur Biogasgewinnung bleiben alle einzelnen Emissionsquellen hinter dem Minderungsziel von 39 % bis 2030. Dies betrifft insbesondere die beiden größten Emissionsquellen der enterischen Verdauung (-6,3 % bis 2030; -10,8 % bis 2040) und der landwirtschaftlichen Bodennutzung inklusive Kalkung (-8,1 % bis 2030; -11,8 % bis 2040).

Abbildung 35: Entwicklung der landwirtschaftlichen Treibhausgasemissionen nach Quellgruppen (2021 bis 2040)



Quelle: StaLa (2021) und eigene Berechnungen

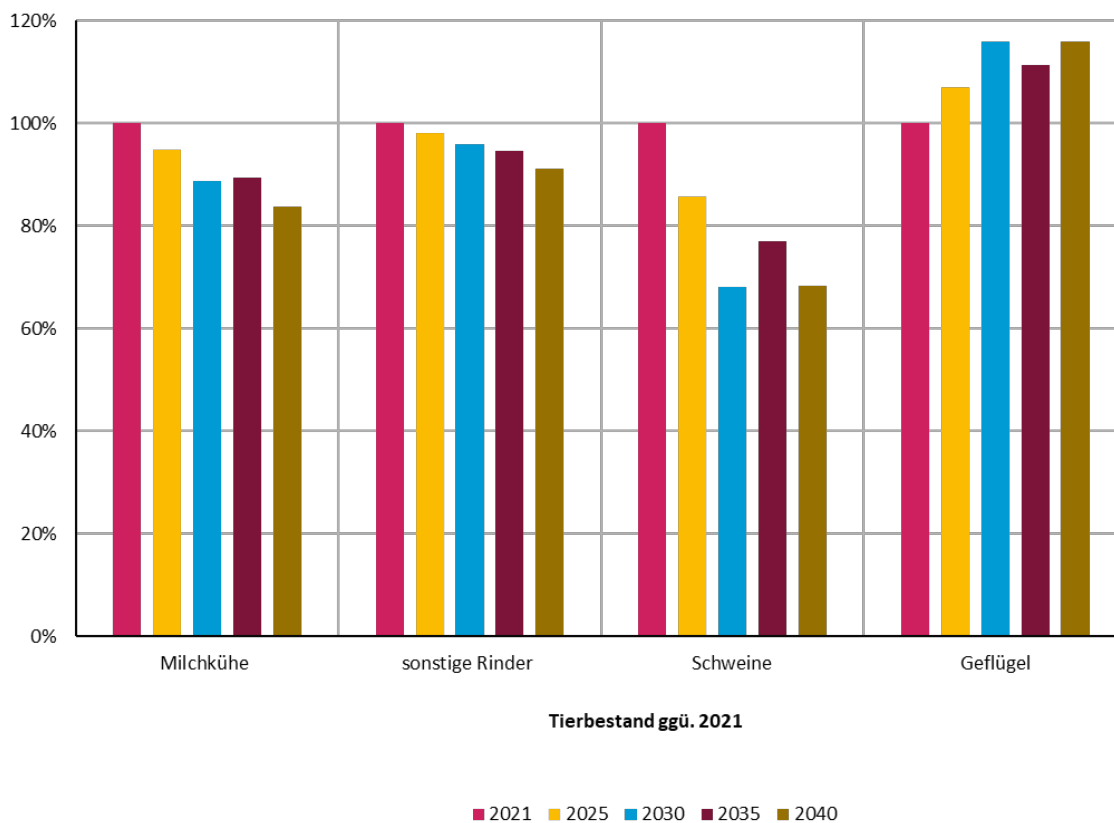
Treiber der Entwicklung der THG-Emissionen

Zwei maßgebliche Treiber für die Entwicklung der Treibhausgase in der Landwirtschaft sind der Nutztierbestand sowie die Ausbringung von Stickstoffdüngern.

In Abbildung 36 sind die Tierbestände nach Tierkategorie dargestellt. Die hier unterstellte zukünftige Entwicklung ist auf Basis des PB-2024 erfolgt⁵².

⁵² Die Entwicklungen in Baden-Württemberg können sich angesichts der vom Bund abweichenden Betriebsstruktur unterscheiden. Für eine weitere Differenzierung müsste jedoch auf die Projektionen für die Region Süd der agrarökonomischen Baseline zurückgegriffen werden, die vom Thünen Institut alle zwei Jahre veröffentlicht werden. Die Zahlen der Baseline 2022 weichen jedoch stark von denen der Projektion ab, die aktuelle, für das Jahr 2024 ist noch in der Bearbeitung.

Abbildung 36: Entwicklung des Tierbestands in Baden-Württemberg nach Tierarten

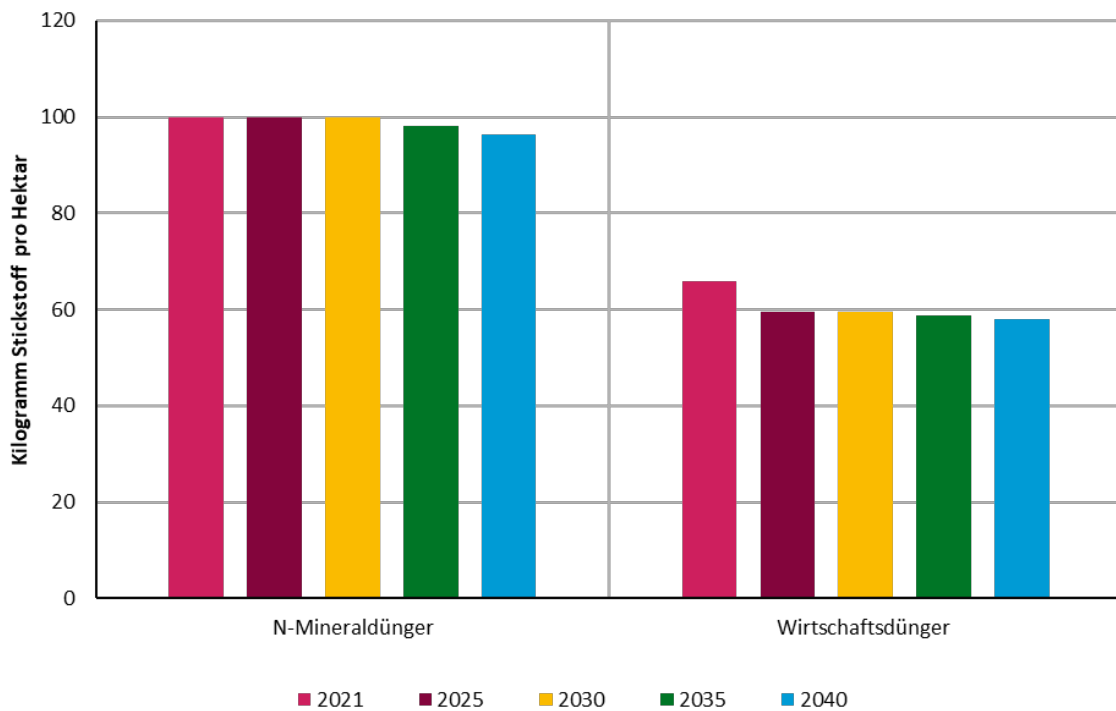


Quelle: eigene Berechnungen auf Basis Projektionen 2024

Der seit Jahren anhaltende Strukturwandel in der Tierhaltung setzt sich für Schweine, Milchkühe und Rinder fort. Nur der Geflügelbestand nimmt noch zu. Grund ist der hohe Investitionsbedarf in Tierwohl und Klima- und Luftreinhaltung bei gleichzeitig sinkender Nachfrage nach (rotem) Fleisch. Die Nachfrage nach Milchprodukten sinkt nicht, doch hier kann die geringere Herdengröße durch Leistungszuwächse bei den Kühen kompensiert werden.

Die Entwicklung der Stickstoffausbringung ist in Abbildung 37 für Mineraldünger und Wirtschaftsdünger dargestellt. Auch hier setzt sich der seit 2015/2016 beobachtbare kontinuierliche Rückgang in die Zukunft fort. Dies macht sich zunächst in einer Reduktion der Wirtschaftsdünger-Ausbringung bemerkbar, langfristig (ab 2035) wird auch der Mineraldüngereinsatz ebenfalls als rückläufig projiziert.

Abbildung 37: Entwicklung der Stickstoffausbringung in Baden-Württemberg



Quelle: Eigene Berechnungen

Diese Entwicklung basiert auf verschiedenen Entwicklungen: Da sind einerseits strengere ordnungsrechtliche Vorgaben aus dem Düngerecht von 2020⁵³, wie z.B. die Mindestwirksamkeit von Wirtschaftsdüngern sowie die Deckelung der Düngung in den roten Gebieten⁵⁴. Zusätzlich sind es aber auch verschiedene Elemente der Extensivierung, wie der Ausbau des Ökolandbaus und in geringem Maße die Anlage von Agroforstsystemen und der Wiedervernässung von Mooren. Zusätzlich führt auch die Zunahme nicht produktiver Flächen zur Förderung der Biodiversität zu einer geringeren Ausbringung von Stickstoff⁵⁵.

Die Dynamik im Bereich Wirtschaftsdünger folgt der Entwicklung im Tierbestand. Da die sinkenden Wirtschaftsdüngermengen kompensiert werden müssen, bleiben die Mengen an ausgebrachtem Stickstoff-Mineraldünger zunächst auf konstant hohem Niveau. Ein weiterer Treiber ist der erwartete starke Rückgang von Ackerkulturen für die Biogasproduktion, wodurch die Menge hofeigener organischer Dünger reduziert wird⁵⁶.

⁵³ Die derzeit in der Abstimmung befindliche zweite Novelle des Düngegesetzes wurde hier nicht betrachtet.

⁵⁴ Als „rote Gebiete“ wird die Kulisse der Nitratgebiete nach § 13 Düngeverordnung bezeichnet, die von den Bundesländern ausgewiesen werden. In diesen Gebieten darf die Stickstoffdüngung nur unter Bedarf erfolgen (-20%).

⁵⁵ Die jüngsten Entwicklungen der Rücknahme von Umweltauflagen im Rahmen der Konditionalität der gemeinsamen Agrarpolitik der EU haben hier ebenfalls keine Betrachtung gefunden, da sie nach dem gesetzten Stichtag (31.01.2024, vgl. Kapitel 2.4) erfolgt sind.

⁵⁶ Es sind keine Annahmen zu Wirtschaftsdüngerimporten nach Baden-Württemberg getroffen worden, die notwendigen Nachverfolgungssysteme befinden sich bundesweit erst im Aufbau.

Gleichzeitig führt der Rückgang der Vergärung von Ackerkulturen zu weniger Methanemissionen aus der Biogasproduktion und deren Gärrestlagerung.

8.3 Instrumentenbewertung

Im Rahmen der Instrumentenbewertung wird die Minderungswirkung der Landesmaßnahmen quantifiziert. Bei den Landesinstrumenten konnten dem Maßnahmenbündel zur Senkung der Stickstoffüberschüsse sowie dem Ausbau des Ökolandbaus eine direkte und quantifizierbare Minderungswirkung zugeordnet werden.

Tabelle 14: Emissionsminderungen der Einzelinstrumente im Sektor Landwirtschaft

Minderungswirkung (kt CO ₂ äq)	2030	2040
Senkung der Stickstoffüberschüsse	7	7
Ausbau des Ökolandbaus	10	20
Summe	17	27

Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut

Der Effekt durch den Ausbau des Ökolandbaus hält durch anhaltende Zuwachsraten bis ins Jahr 2040 an. Dem Maßnahmenbündel „Senkung der Stickstoffüberschüsse“ werden die Agrarumweltmaßnahmen der sog. 2. Säule zugerechnet. Für diese wird davon ausgegangen, dass keine Flächenausdehnung nach 2030 stattfindet. Inwiefern sich diese Annahme bewahrheitet, hängt maßgeblich von der zukünftigen Umsetzung der Ziele der jüngst verabschiedeten Verordnung über die Wiederherstellung der Natur ab.

Insgesamt führen die Landesmaßnahmen zu einer Verringerung von 17 kt CO₂e bis ins Jahr 2030 bzw. 27 kt CO₂äq bis 2040, während die Minderungen insgesamt bei knapp 500 kt CO₂e bzw. 745 kt CO₂äq liegen (vgl. Kapitel 8.2). Diese zusätzlichen Minderungen gehen sowohl auf die Klimaschutzmaßnahmen des Bundes zurück als auch auf den rückläufigen Tierbestand und die Flächenverluste in der Landwirtschaft, die unabhängig vom Klimaschutz stattfinden.

Senkung der Stickstoffüberschüsse

Wie bereits zu den Treibern der THG-Emissionen ausgeführt, wirken viele Faktoren auf die Stickstoffverwendung und die Stickstoffeffizienz in der Landwirtschaft, so auch die Maßnahmen im Rahmen der GAP, die von der EU, dem Bund und dem Land finanziert werden. Die Bewertung der Landesmaßnahmen konzentriert sich dabei auf die GAP-Maßnahmen der 2. Säule, während die Maßnahmen der 1. Säule⁵⁷ hier als Bundesmaßnahme zählen.

Für die Wirkungsabschätzung werden diejenigen Maßnahmen identifiziert, die mit einer Wirkung auf die Stickstoffabgabe verbunden sind. Dabei werden die Veränderungen gegenüber dem Basisjahr 2021 erfasst – d.h. demgegenüber zusätzliche oder verringerte

⁵⁷ Das sind bei der Konditionalität v.a. unproduktive Flächen zur Biodiversitätsförderung und bei den freiwilligen Öko-Regelungen v.a. Agroforstsysteme

Einsparungen. Der aktuelle Förderzeitraum der EU-Agrarpolitik reicht bis 2028, Folge-Regelungen gibt es noch nicht. Aus diesem Grund wird eine Fortführung der bestehenden Regelungen bis 2030 angenommen. Es werden verschiedene Maßnahmen aus dem zweiten Förderprogramm Agrarumwelt, Klimaschutz und Tierwohl (FAKT II) A, sowie die Ausdehnung der Leguminosenanbaufläche durch die Eiweißinitiative des Landes einbezogen. Dadurch werden auf insgesamt 35.000 ha Ackerland 1,4 kt weniger Stickstoff ausgebracht, was eine Einsparung von 7 kt CO₂äq mit sich bringt. Auf Grünland konnten keine zusätzlichen Flächen identifiziert werden. Überschneidungswirkungen mit dem Ökolandbau sind bereits rausgerechnet. Der reine Klimaschutzeffekt dieser Maßnahmen ist gering, aber es gibt weitere positive Effekte für die Biodiversität und den Wasser-schutz.

Ausbau des Ökolandbaus

Im Ökolandbau wirken verschiedene Effekte, so dass diese Anbauform je Hektar Nutzfläche geringere THG-Emissionen als der konventionelle Landbau aufweist. Hier wirken vor allem die Effekte von Düngung und Tierhaltung⁵⁸.

Insgesamt wird von einem weiterhin konstanten Zuwachs der ökologisch bewirtschafteten Fläche ausgegangen, der bei 0,4 % pro Jahr im Vergleich zur heutigen landwirtschaftlichen Nutzfläche liegt. Dadurch werden bis 2040 insgesamt 20 kt CO₂äq eingespart. Diese resultieren hauptsächlich aus dem Wegfall der mineralischen Düngung. Der Effekt einer Reduktion der Tierbestände ist dagegen gering, da die Tierbestandsdichte in Baden-Württemberg ohnehin gering ist.

58

9 Abfallwirtschaft und Sonstiges

Der Sektor Abfallwirtschaft und Sonstiges umfasst im Bundes-Klimaschutzgesetz ausschließlich die direkten THG-Emissionen aus der Quellgruppe CRF 5 (Abfall und Abwasser) sowie CRF 6 (Sonstige)⁵⁹. Emissionen aus der Stromerzeugung durch Müllverbrennung werden der Energiewirtschaft bzw. der Industrie zugerechnet und dort bilanziert. Maßnahmen mit Bezug auf Recycling von nicht-organischen Stoffen werden im Sektor Industrie bilanziert.

9.1 Zentrale Rahmendaten

Die Basis für die Berechnungen der Emissionen des Abfallsektors bilden die historischen Daten für Methan und Lachgas aus dem Treibhausgasinventar für Baden-Württemberg für die Quellgruppe 5. Diese werden als Grundlage für die Fortschreibungen herangezogen.

Maßgeblich für die Projektion der Emissionen des Abfallsektors in Baden-Württemberg ist darüber hinaus vor allem die Bevölkerungszahl, vor allem für die Bestimmung der Methanemissionen aus der Deponierung und der THG-Emissionen aus der Abwasserbehandlung. Weitere wichtige landesspezifische Datenquellen sind die Anzahl der Deponien, Bioabfall- und Grünschnittmengen im Siedlungsabfall sowie Daten zur Deponiegaserfassung.

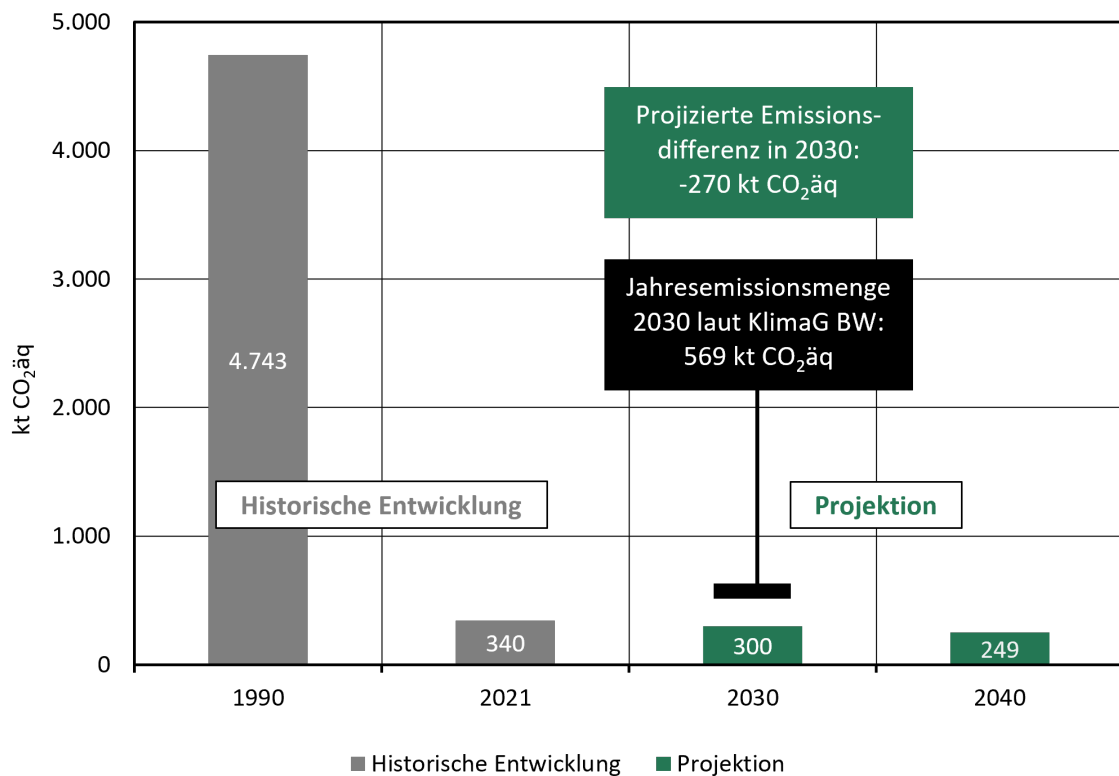
Diese werden für die Instrumentenbewertung ergänzt durch Informationen zu Deponien, welche im Rahmen der Kommunalrichtlinie NKI-Fördermittel zur In-Situ Stabilisierung erhalten haben.

9.2 Projektion

Der Zielwert für den Sektor Abfallwirtschaft in Baden-Württemberg für das Jahr 2030 wird deutlich übererfüllt: während die Jahresemissionsmenge für das Jahr 2030 bei 569 kt CO₂-äq liegt, werden laut Projektion 300 kt CO₂-äq erwartet (Abbildung 38). Hierbei ist wichtig zu berücksichtigen, dass eine signifikante Minderung von ca. 94 % bereits zwischen den Jahren 1990 und 2021 erfolgte, welche maßgeblich durch das Verbot der Ablagerung von unbehandelten organischen Abfällen auf Siedlungsabfalldeponien aus dem Jahr 2005 bewirkt wurde. Die Emissionen des Abfallsektors lassen sich in Methanemissionen und Lachgasemissionen aufteilen, welche im folgenden Abschnitt nacheinander besprochen werden.

⁵⁹ Aktuell werden in Deutschland keine Emissionen in der CRF-Kategorie 6 berichtet.

Abbildung 38: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Baden-Württemberg im Sektor Abfallwirtschaft



Quelle: StaLa, Klimaziele nach KlimaG BW, eigene Berechnungen

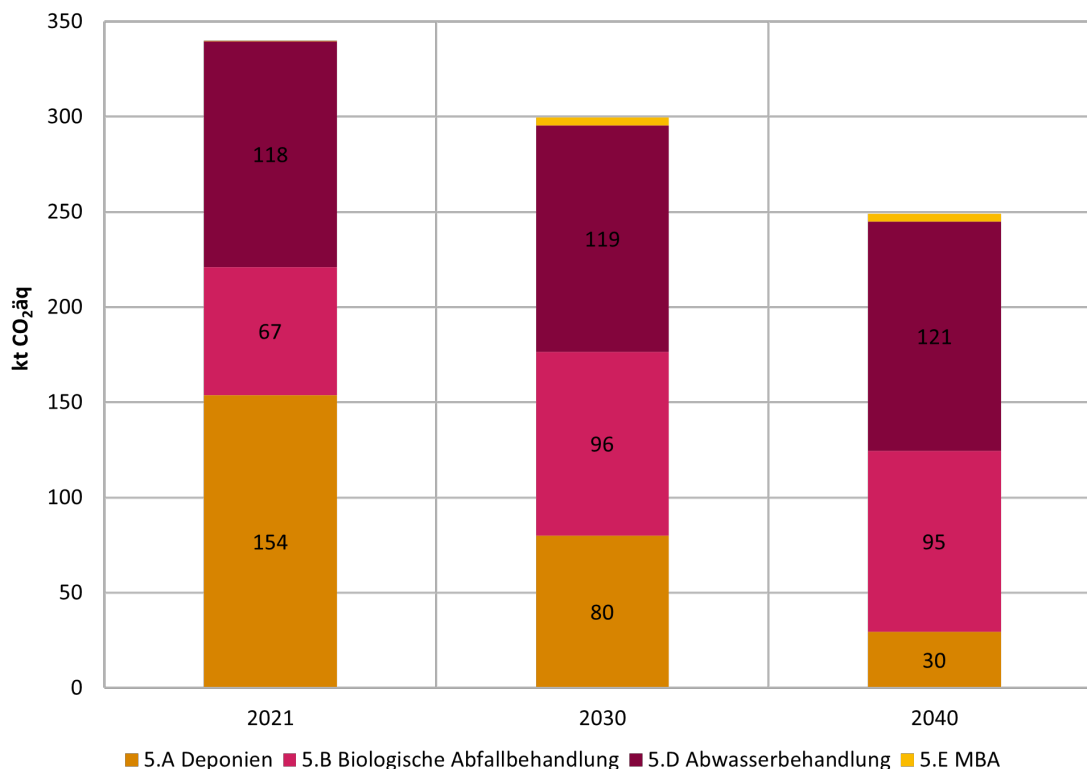
Während die Methanemissionen aus der biologischen Abfallbehandlung, der Abwasserbehandlung und der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung gegenüber 2021 annähernd konstant bleiben, sinken die projizierten Methanemissionen aus auf Deponien abgelagerten Abfällen deutlich. Neben dem bereits genannten Ablagerungsverbot für organische Abfälle seit 2005 wirken hier die Maßnahmen zur Deponiebelüftung und zur optimierten Gaserfassung. Die Methanemissionen aus der biologischen Abfallbehandlung werden durch die Bevölkerungsentwicklung, die Ausweitung der separaten Bioabfallsammlung, die Reduktion von Lebensmittelabfällen und den Wechsel von der Kompostierung zur Abfallvergärung in jeweils unterschiedliche Richtungen beeinflusst. Diese schwanken geringfügig über die Zeit, wobei sich das Niveau kaum ändert.

Im Bereich der Lachgasemissionen wurde wesentliches Minderungspotenzial vor allem im Bereich der Abwasserbehandlung bereits seit 1990 erschlossen. Die Anschlussraten an die Kanalisation sind hoch und ein Großteil der Kläranlagen erreichen aktuelle Standards.

Abbildung 39 zeigt die Entwicklung der Emissionen des Abfallsektors nach den untersuchten Unterkategorien. Während, wie weiter oben beschrieben, die THG-Emissionen im Bereich Deponien deutlich sinken, bleiben die THG-Emissionen aus der biologischen Abfallbehandlung nach einem leichten Anstieg annähernd konstant. Hervorzuheben ist, dass der Anteil der THG-Emissionen aus der Abwasserbehandlung durch die Änderungen in den anderen Sektoren über die Zeit einen steigenden Anteil ausmacht und im

Jahr 2040 nahezu die Hälfte der THG-Emissionen des Abfallsektors im Teilbereich Abwasserbehandlung anfallen. In diesem Teilbereich sind darüber hinaus aktuell keine Maßnahmen mit dem Fokus auf die direkten THG-Emissionen der Abwasserbehandlung vorgesehen. Geplante Maßnahmen, welche den Bezug von Energie für den Betrieb von Kläranlagen verringern, wie beispielsweise die Installation von PV-Anlagen oder die Nutzung von Klärgas in BHKWs am Standort führen zur Einsparung von Emissionen in anderen Sektoren (Energiewirtschaft bzw. Gebäude) und werden dort bilanziert.

Abbildung 39: Entwicklung der Emissionen der Abfallwirtschaft nach Subsektoren



Abschließend kann für den Sektor Abfallwirtschaft festgestellt werden, dass bereits große Minderungen erreicht wurden. Weitere signifikante Minderungen sind durch die ablaufenden biologischen Prozesse schwierig zu erreichen und das Potenzial für weitere wirksame Maßnahmen ist nur begrenzt vorhanden.

9.3 Instrumentenbewertung

Tabelle 15 zeigt die erreichten Emissionsminderungen der quantifizierbaren Instrumente im Abfallsektor. Die größte Einzelminderung von 55 kt CO₂äq im Jahr 2030 wird durch die Ausweitung der Deponiebelüftung und eine optimierte Erfassung von entstehendem Deponiegas erreicht⁶⁰. Die Reduktion von Lebensmittelabfällen bewirkt darüber hinaus eine weitere Minderung von 11 kt CO₂äq im Jahr 2030.

⁶⁰ Die In-Situ-Belüftung von Deponien führt zu einer Erhöhung des Energiebedarfs für den Betrieb dieser Deponien. Eine Bilanzierung dieses Energiebedarfs erfolgt im Bereich GHD bzw. Gebäude.

Tabelle 15: Emissionsminderungen der Einzelinstrumente im Abfallsektor

Minderungswirkung (kt CO ₂ äq)	2030	2040
Deponiebelüftung und optimierte Gaserfassung	55	68
Reduktion der Lebensmittelabfälle	11	11

Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut

Für die Ermittlung der Minderungswirkung der Deponiebelüftung wurde zuerst auf Basis der Anzahl an Siedlungsabfalldponien in der Stilllegungsphase ermittelt, welche zusätzlichen Projekte, über die bereits vorhandenen hinaus, in Baden-Württemberg durchgeführt werden können. Diese Information ist in einer regionalisierten Berechnung auf Basis des IPCC Waste Models unter Berücksichtigung der Deponiegaserfassung eingeflossen, um die Emissionen des Teilbereichs Deponien mit und ohne In-Situ-Belüftung zu ermitteln und so die Minderungswirkung abzuleiten.

Für die Bewertung der Wirkung der Reduktion von Lebensmittelabfällen wurden die Annahmen aus dem PB-2024 für die Pro-Kopf-Entwicklung zugrunde gelegt:

Die durchschnittlichen Lebensmittelabfälle liegen heute bei 78 kg/Person/Jahr in den Haushalten, hinzu kommen ca. 32 kg/Person/Jahr aus der Außer-Haus-Verpflegung und dem Einzelhandel (Destatis, 2022b). Laut Nationaler Strategie zur Reduzierung der Lebensmittelabfälle (BMEL, 2024) sollen diese bis zum Jahr 2030 um 50 % reduziert werden, was insgesamt zu einer Reduktion um 55 kg/Person führen würde. Allerdings ist unsicher, ob die bestehenden Instrumente (Informationskampagnen, Dokumentation etc.) ausreichen, um eine solche Reduktion herbeizuführen. Darüber hinaus verbleiben Lebensmittelabfallbestandteile, welche nicht verzehrbar sind und daher weiterhin anfallen werden. Daher wird für das Jahr 2030 mit einer 30 %-igen Zielerreichung gerechnet.

Auch wenn Teile der Lebensmittelabfälle auch zukünftig über den Restmüll entsorgt werden, wird für die Quantifizierung angenommen, dass die Reduktion der Lebensmittelabfälle Auswirkungen auf die Höhe des separat gesammelten Bioabfalls hat. Damit sinkt das Bioabfallaufkommen, das in biologischen Abfallbehandlungsanlagen behandelt wird.

10 Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF)

10.1 Zentrale Rahmendaten

Die Grundlage für die Modellierung des Sektors Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF)⁶¹ bilden die historischen Daten des Nationalen THG-Inventars. Für die Fortschreibung der Flächenänderungskoeffizienten und der Emissionsfaktoren je Flächenkategorie werden Mittelwerte der letzten fünf Jahre herangezogen.

10.2 Projektion

Im LULUCF-Sektor werden THG-Emissionen berichtet, die an die Landnutzung gebunden sind. In Baden-Württemberg lagen im Jahr 2021 die THG-Emissionen für den LULUCF-Sektor bei -5.171 kt CO₂äq (Abbildung 40). Somit war der LULUCF-Sektor in Summe eine Senke, denn auf der Waldfläche wurde mit -6,114 kt CO₂äq deutlich mehr an CO₂ festgelegt, als auf anderen Flächen wie Ackerland, Grünland und Feuchtgebieten an THG emittiert wurde (Tabelle 17). THG-Emissionen im Acker- und Grünland stammen zu hohen Anteilen von trocken bewirtschafteten Moorstandorten⁶². Im Vergleich zur Bundesebene ist hervorzuheben, dass Baden-Württemberg walddreich ist und gleichzeitig wenige Moorstandorte im Vergleich zu anderen Ländern, wie z.B. Brandenburg oder Niedersachsen, vorliegen. Dies begünstigt die THG-Bilanz des LULUCF-Sektors in Baden-Württemberg.

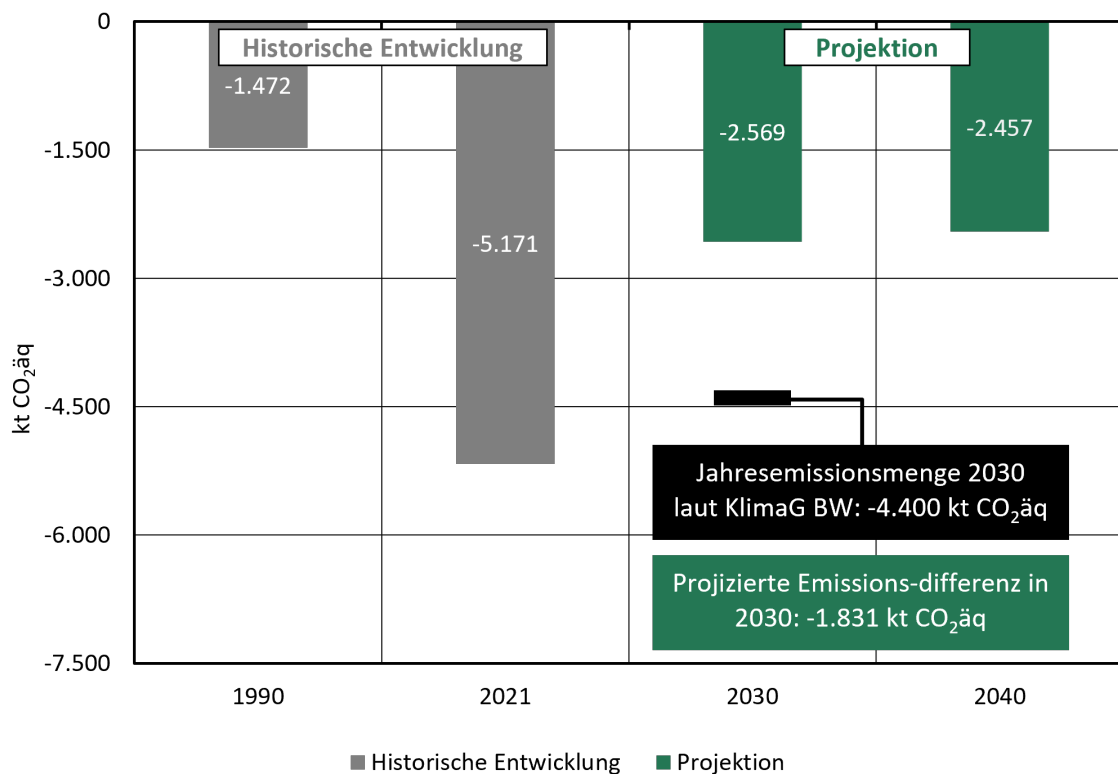
Bei den im LULUCF-Sektor betrachteten Landflächen handelt es sich zu einem großen Anteil um Systeme mit natürlichen Prozessen. Die THG-Emissionen je Fläche hängen zum einen von der Art der Flächenbewirtschaftung ab. Zum anderen spielen natürliche Faktoren wie Witterung und Schädlingsbefall eine Rolle. Beispielsweise war der Wald im Jahr 1990 aufgrund von Windwurf mit -2,372 kt CO₂äq eine deutlich geringere Senke als im Jahr 2021 (vgl. Abbildung 40 und Tabelle 17).

Laut KlimaG BW hat Baden-Württemberg sich das Ziel gesetzt, im Jahr 2030 eine Senkenleistung im LULUCF-Sektor von -4.400 kt CO₂äq zu erreichen. Mit der vorliegenden Projektion wird modelliert, dass die Senkenleistung im LULUCF-Sektor im Jahr 2030 bei -2.569 kt CO₂äq und im Jahr 2040 bei -2.457 kt CO₂äq liegen wird. Somit kann erwartet werden, dass das 2030er-Ziel um 1,831 kt CO₂äq verfehlt wird (Abbildung 40).

⁶¹ LULUCF = engl. land use, land use change and forestry.

⁶² Diese sogenannten organischen Böden umfassen Anmoore und Moorfolgeböden. Sie zeichnen sich durch einen hohen Bodenkohlenstoffgehalt aus, der bei einer trockenen Bewirtschaftung zersetzt wird.

Abbildung 40: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Baden-Württemberg im Sektor LULUCF



Quelle: Thünen-Institut auf Basis des Nationalen Treibhausgasinventars 2023, StaLA, Klimaziele nach KlimaG BW, eigene Berechnungen (Öko-Institut).

Für die Projektion wurde mit dem Auftraggeber unter Einbeziehung weiterer Expertinnen und Experten aus anderen Ministerien die folgenden Annahmen getroffen, in die insbesondere bestehende Erfahrungen aus laufenden Prozessen in Baden-Württemberg einfließen (z.B. Gemeinschaftsaufgabe Agrarstruktur und Küstenschutz (GAK), Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz (ANK), Bund-Länder-Vereinbarung Moorbodenschutz):

- Moorbodenschutz: Bis zum Jahr 2030 werden 475 ha an trocken bewirtschaftetem Acker- und Grünland auf Moorböden wiedervernässt (4,1 %). Die wiedervernässte Fläche steigt bis zum Jahr 2040 um 325 ha auf 800 ha an (7,8 %). THG-Wirkung: Die Wiedervernässung führt zu einer THG-Minderung von -6,0 kt CO₂äq im Jahr 2030 und -11,6 kt CO₂äq im Jahr 2040.
- Anlage von Agroforst: Agroforstsysteme werden bis zum Jahr 2030 auf 1.000 ha neu angelegt. Bis zum Jahr 2040 kommen weitere 1.335 ha hinzu (Summe: 2.335 ha). THG-Wirkung: neu angelegte Agroforstsysteme erreichen eine THG-Minderung von -3,1 kt CO₂äq im Jahr 2030 und von -7,2 kt CO₂äq im Jahr 2040.
- Flächenverbrauch durch Siedlung: Der Netto-Flächenverbrauch durch Siedlungen nimmt bis zum Jahr 2030 auf 2,5 ha pro Tag und bis zum Jahr 2035 auf 0 ha pro Tag ab.
THG-Wirkung: Gegenüber einer langsameren Abnahme der Flächenverbräuche

(vergleichbar zum PB-2024 im Jahr 2030 4 ha/Tag und im Jahr 2050 0 ha/Tag) steigen die THG-Emissionen an (+3,9 kt CO₂äq; 2040: +15,0 kt CO₂äq).⁶³

- **Waldbewirtschaftung:** Es wird erwartet, dass die Holzentnahme im Zuge eines forcierten Waldumbaus ansteigt und natürlichen Störungen sich auf einem mittleren bis hohen Niveau einstellen: (siehe Details in Kap. 2.3.9): -Für die Mortalität wurden die mittleren Bedingungen aus den Jahren 2002 bis 2021 verwendet, und für den Zuwachs wurden die mittleren Bedingungen aus den Jahren 2002 bis 2012 angenommen. Die Holzentnahme entspricht dem Mittelwert der Jahre 2018 bis 2022 (Projektion: mittlere bis hohe natürliche Störungen und Waldumbau).

Die THG-Wirkungen durch Moorbodenschutz, Agroforstsysteme und Siedlungsflächen fallen in Relation zu Änderungen, die bereits durch die Fortschreibung der historischen Entwicklung, auftreten, klein aus (Tabelle 17).

Tabelle 16: Entwicklung der Flächenkulisse in Baden-Württemberg zwischen 1990 und 2040

Quellgruppen	Einheit	1990	2000	2010	2021	2030	2040
Wald	kha	1.340	1.365	1.367	1.370	1.374	1.382
Ackerland	kha	1.097	1.102	968	954	953	957
Grünland	kha	686	657	739	712	692	676
Feuchtgebiete	kha	56	56	64	64	66	67
Siedlungen	kha	420	421	462	501	517	520
Sonstige	kha	2	0	0	0	0	0
Summe LULUCF	kha	3.601	3.601	3.601	3.601	3.601	3.601

Quelle: Thünen-Institut auf Basis des Nationalen Treibhausgasinventars 2023, eigene Berechnungen (Öko-Institut).

Tabelle 17: Entwicklung der Treibhausgasemission in Baden-Württemberg zwischen 1990 und 2040

Quellgruppen	Einheit	1990	2000	2010	2021	2030	2040
Wald	kt CO ₂ äq	-2.372	-6.379	-6.873	-6.114	-3.388	-3.432
Ackerland	kt CO ₂ äq	546	502	499	519	466	603
Grünland	kt CO ₂ äq	305	1.311	219	226	133	78
Feuchtgebiete	kt CO ₂ äq	68	68	152	236	266	284
Siedlungen	kt CO ₂ äq	-20	-15	114	-38	-46	10
Sonstige	kt CO ₂ äq	0	0	0	0	0	0
Summe LULUCF	kt CO ₂ äq	-1.472	-4.513	-6.117	-5.171	-2.569	-2.457

Quelle: Thünen-Institut auf Basis des Nationalen Treibhausgasinventars 2023, eigene Berechnungen (Öko-Institut).

⁶³ Bei der Umwandlung von Ackerland zu Siedlungsfläche steigt die CO₂-Einbindung in Vegetation und Boden. So verbessert sich die THG-Bilanz bei höherer Siedlungsentwicklung. Bei einer Umwandlung von Grünland zu Siedlungsfläche ist der Effekt weniger stark ausgeprägt. Die Umwandlung von Wald und Gehölzen zu Siedlungsfläche verschlechtert die THG-Bilanz.

Des Weiteren wird keine Waldmehrung erwartet, die über den aktuellen Trend hinausgeht, und der Erhalt von Dauergrünland ist bereits über Maßnahmen im Rahmen der GAP sichergestellt.⁶⁴ Letzteres ist in der Modellierung derart abgebildet, dass die Umwandlungen von Grünland zu Ackerland und von Ackerland zu Grünland gleich hoch sind. Für die Flächenkulisse stellt sich bis zum Jahr 2040 eine leichte Zunahme der Waldfläche und der Siedlungsfläche ein (Tabelle 16). Dies erfolgt vor allem auf Kosten der Grünlandfläche inkl. Gehölzflächen (z.B. Hecken, Brachen).

Wie in Kap. 2.3.9 erläutert, sind für den Holzproduktspeicher keine Daten auf Landesebene verfügbar. Im Mittel der Jahre 2012 bis 2021 lag deutschlandweit der jährliche Zufluss an Holzprodukten mit hoher Lebensdauer (Schnittholz, Holzwerkstoffe) in den Holzproduktspeicher bei 36 Mio. m³/Jahr. Unter der Annahme, dass mit der Holzbau-Offensive Baden-Württemberg im Jahr 2040 ein zusätzlicher Zufluss in den Holzproduktspeicher von 0,36 Mio. m³ (Steigerung des deutschlandweiten Zuflusses um 1 %) erreicht wird, entspräche dies einer Festlegung von 324 kt CO₂äq.⁶⁵

Sensitivitätsanalyse

Parallel zu der Projektion für den LULUCF-Sektor (siehe Abbildung 40 und Tabelle 17) wurden fünf Sensitivitäten für den LULUCF-Sektor mit jeweils veränderten Annahmen zur Waldentwicklung modelliert (siehe Annahmen in Tabelle 18).

- Geringe natürliche Störungen: Es wurden die Bedingungen für Mortalität und Zuwachs aus den Jahren 2013 bis 2017 fortgeschrieben. Hierbei handelt es sich um die Ergebnisse der Kohlenstoffinventur aus dem Jahr 2017⁶⁶. Diese Wuchsperiode war durch günstige Witterungsbedingungen geprägt. Die Holzentnahme entspricht dem Mittelwert der Jahre 2013 bis 2017. Die getroffenen Annahmen sind dieselben wie diejenigen im PB-2024.
- Mittlere natürliche Störungen: Sowohl für die Mortalität als auch für den Zuwachs der Bäume wurden die mittleren Bedingungen der Jahre 2002 bis 2017 angenommen. In diese Periode fallen insbesondere starke natürliche Störungen in den Jahren 2002 bis 2007 (2002: Orkan Janette, 2003: Trockenheit, 2007: Orkan Kyrill). Die Holzentnahme entspricht dem Mittelwert der Jahre 2013 bis 2017.
- Hohe natürliche Störungen: Als Bezugszeitraum für die Mortalität wurden die mittleren Bedingungen aus den Jahren 2002 bis 2021 verwendet. Dadurch werden die starken natürlichen Störungen der Jahre 2018 bis 2021 einbezogen. Für die Zuwächse wurden die mittleren Werte aus den Jahren 2002 bis 2017 um 10 % reduziert, da für die Jahre 2018 bis 2021 keine Daten vorlagen. Die Holzentnahme entspricht dem Mittelwert der Jahre 2013 bis 2017.
- Sehr hohe natürliche Störungen: Es wurden für die Mortalität die gemittelten Werte der Jahre 2013 bis 2021 angenommen, und der mittlere Zuwachs der Jahre 2002 bis

⁶⁴ Siehe Standards für den guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand von Flächen (GLÖZ).

⁶⁵ Annahme: Holzdichte = 0,5 t/m³, C-Gehalt im Holz von 50 %. In dieser Abschätzung sind keine dynamischen Veränderungen des Holzproduktspeichers berücksichtigt.

⁶⁶ <https://bwi.info>

2017 wurde um 20 % reduziert. Dies spiegelt näherungsweise wider, dass Bedingungen wie in den Jahren 2018 bis 2021 etwa alle fünf Jahre auftreten. Die Holzentnahme entspricht dem Mittelwert der Jahre 2013 bis 2017.

- Hohe bis sehr hohe natürliche Störungen und Waldumbau: Aufbauend auf der Projektion wurde eine weitere Sensitivität entwickelt. Die Annahmen zur Mortalität wurden entsprechend der Projektion „mittlere bis hohe natürliche Störungen mit Waldumbau“ getroffen, der mittlere Zuwachs wurde aber – ausgehend vom Mittel der Jahre 2002 bis 2012 – um 10 % reduziert. Die angenommene Störungsintensität kann im Verhältnis zu den übrigen Sensitivitäten als hoch bis sehr hoch eingestuft werden. Die Holzentnahme entspricht dem Mittelwert der Jahre 2018 bis 2022.

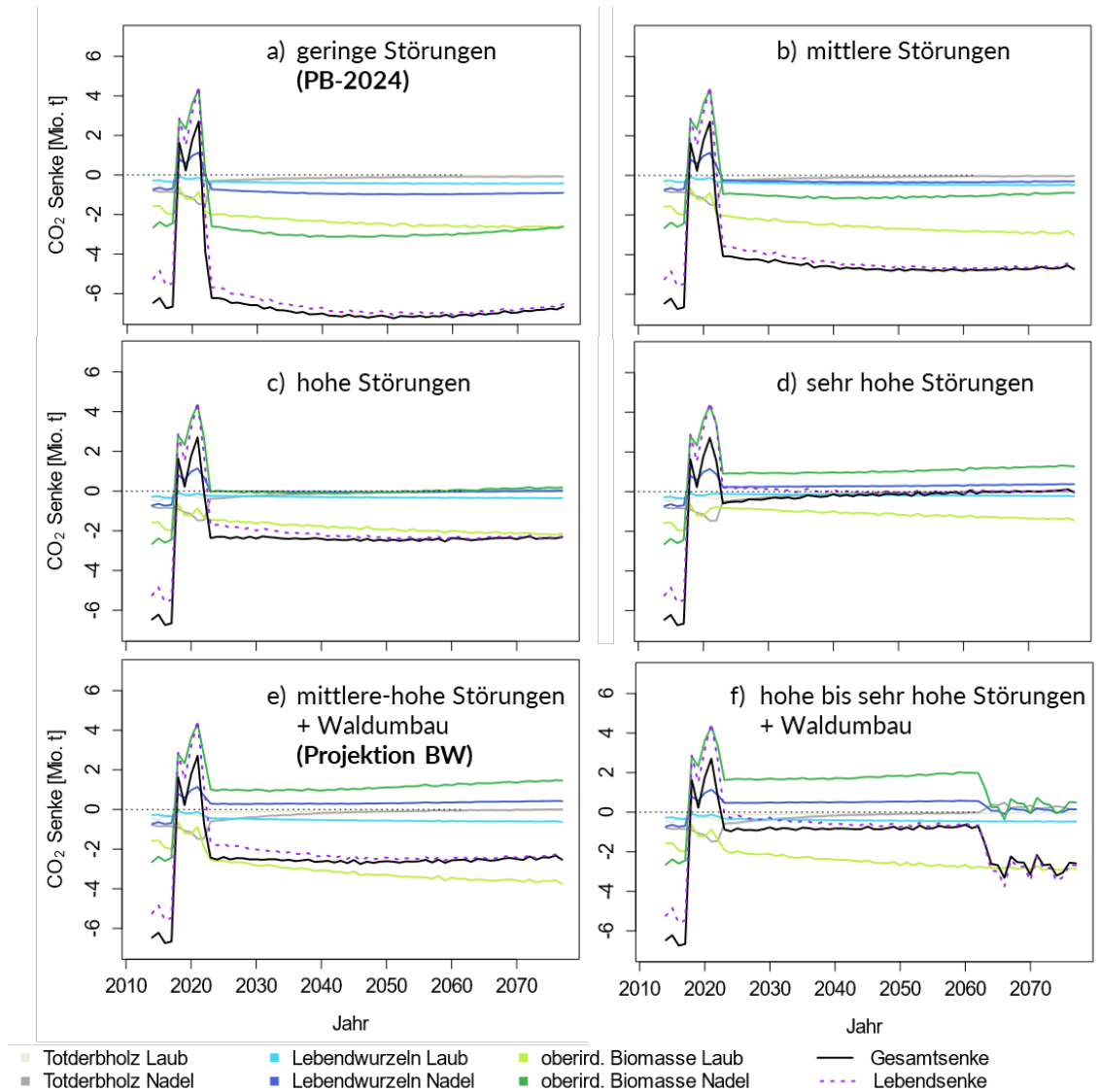
Tabelle 18: Annahmen zur Modellierung von Sensitivitäten im Wald

Sensitivität	Holzentnahme	Mortalität	Zuwachs
Geringe natürliche Störungen	Mittelwert 2013-2017 (entspricht PB-2024)	Mittelwert 2013- 2017 (entspricht PB-2024)	Mittelwert 2013- 2017 (entspricht PB-2024)
Mittlere natürliche Störungen		Mittelwert 2002-2017	Mittelwert 2002-2017
Hohe natürliche Störungen		Mittelwert 2002-2021	Mittelwert 2002-2017 * 0,9
Sehr hohe natürliche Störungen		Mittelwert 2013-2021	Mittelwert 2002-2017 * 0,8
Projektion: Mittlere-hohe natürliche Störungen und Waldumbau	Mittelwert 2018-2022	Mittelwert 2002-2021	Mittelwert 2002-2012
Hohe bis sehr hohe natürliche Störungen und Waldumbau			Mittelwert 2002-2012 * 0,9

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Öko-Institut.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen für den Wald in Baden-Württemberg sind in Abbildung 41 zusammengestellt. Es spannt sich ein Korridor zu erwartender Treibhausgasbilanzen der Waldfläche von einer Senke von über 6.000 kt CO₂äq in der Sensitivität „geringe Störungen“ bis hin zu Netto-Null Emissionen in der Sensitivität „sehr hohe Störungen“ auf (schwarze Linien). In allen Sensitivitäten legen Laubbaumbestände CO₂ fest und tragen so zur Senkenleistung bei. Die Nadelbaumbestände sind hingegen nur bei geringen Störungen eine Senke; sie werden bei steigenden natürlichen Störungen zu einer Quelle. Aus FABio-Forest wird die THG-Bilanz der lebenden Bäume für die Modellierung des LULUCF-Sektors an FABio-Land übergeben.

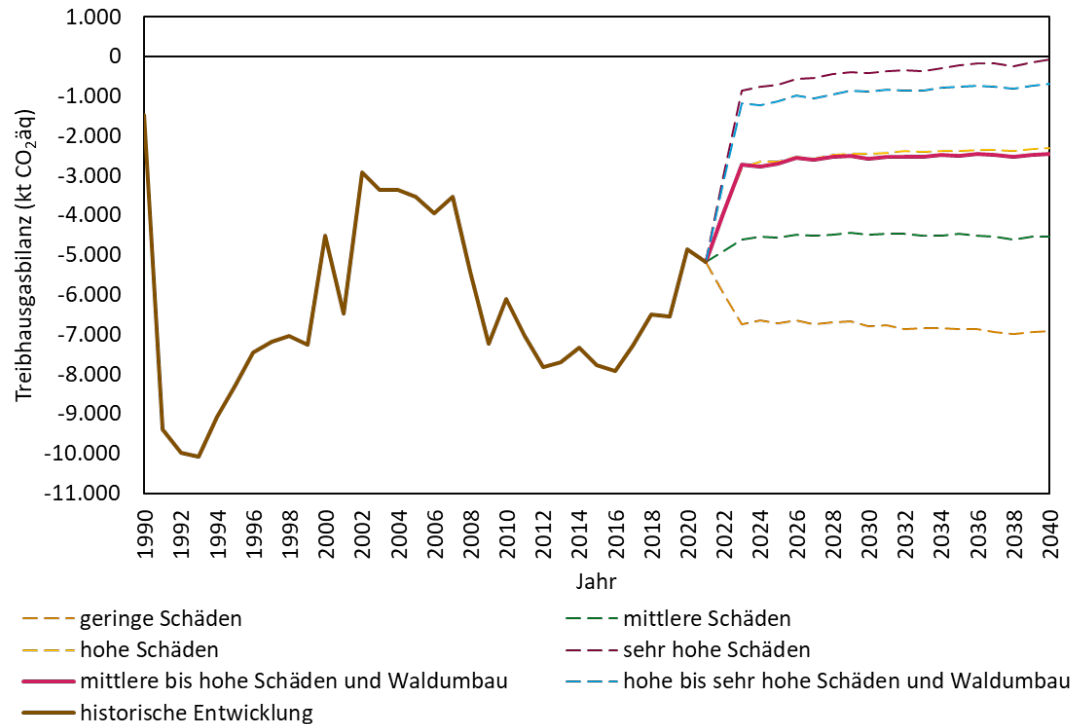
Abbildung 41: Treibhausgasbilanz der Waldfläche für die Sensitivitäten



Quelle: Eigene Berechnungen und Darstellung in FABio-Forest, Öko-Institut. Die THG-Bilanz für die Projektion des LULUCF-Sektors bezieht für den Wald die Ergebnisse aus „mittlere bis hohe Störungen und Waldumbau“ ein.

In Abbildung 42 ist die THG-Bilanz der Projektion als rote durchgezogene Linie dargestellt. Für die Waldfläche ist das Szenario „mittlere bis hohe Schäden und Waldumbau“ hinterlegt. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die Spannweite zu erwartender Entwicklungen bis zum Jahr 2040 zwischen -6.900 kt CO₂äq in der Sensitivität „geringe Störungen“ und -100 kt CO₂äq in der Sensitivität „sehr hohe Störungen“ liegt (Abbildung 42). Diese Unsicherheit für die THG-Bilanz im LULUCF-Sektor ist in der Bewertung der Gesamtergebnisse für Baden-Württemberg zu berücksichtigen.

Abbildung 42: Sensitivitätsanalyse zur Treibhausgasbilanz im LULUCF-Sektor auf Basis von Sensitivitäten für die Waldmodellierung



Quelle: Thünen-Institut auf Basis des Nationalen Treibhausgasinventars 2023, eigene Berechnungen Öko-Institut. Die THG-Bilanz für die Projektion des LULUCF-Sektors bezieht für den Wald die Ergebnisse zu „mittlere bis hohe Schäden und Waldumbau“ ein.

10.3 Instrumentenbewertung

Den Klimaschutz-Instrumenten auf Landesebene aus dem KMR können für die Projektionen keine direkten Treibhausgas-Minderungswirkungen zugewiesen werden, weil sie flankierend wirken oder eine Datengrundlage für die Abschätzung fehlt. Diese Einschätzung erfolgte in Rücksprache mit dem Auftraggeber und relevanten Expertinnen und Experten der Ministerien.

11 Exkurs: Kritische Einordnung der Ergebnisse vor dem Hintergrund des Sondergutachtens des Expertenrates für Klimafragen für den nationalen Projektionsbericht

Die Ergebnisse des PB-2024 und der aktuellen Emissionsberichtserstattung werden regelmäßig in einem Sondergutachten vom Expertenrat für Klimafragen (ERK) geprüft (*Gutachten zur Prüfung der Treibhausgas-Projektionsdaten 2024*, 2024). Hintergrund dafür ist das KSG des Bundes, welches die Feststellung der Zieleinhaltung bzw. -verfehlung durch das Gremium vorsieht. Der ERK prüft deshalb die Projektionsdaten 2024 für den Zeitraum 2021 bis 2030.

Der Prüfbericht des ERK bewertet Aktualität und Plausibilität der Projektionen im PB-2024. Da Projektionen naturgemäß mit hohen Unsicherheiten behaftet sind, wird die Güte des projizierten Emissionspfades durch den ERK daran bewertet, ob dieser ebenso wahrscheinlich über- oder unterschritten wird. Diese qualitative Einordnung wird als „50/50“ Emissionspfad bezeichnet. Im ERK Gutachten wird Stellung dazu genommen, inwieweit nach Auffassung des ERK die vorgelegten Projektionen in den einzelnen Sektoren diesen Pfad treffen oder ob eine Überschätzung oder Unterschätzung der Emissionsminderungen wahrscheinlich ist.

Da der vorliegende Bericht mit Projektionen für THG-Emissionen für Baden-Württemberg maßgeblich auf dem PB-2024 für Deutschland aufbaut und auch die dort eingesetzten Modelle verwendet, werden in diesem Exkurs die Bewertung und Einschätzung des ERK für die einzelnen Sektoren eingeordnet.

Im Gutachten des ERK werden an verschiedenen Stellen die Aktualität bzw. die zugrundeliegenden Annahmen der sektoralen und sektorübergreifenden Rahmendaten kritisch hinterfragt. Dazu ist anzumerken, dass dem MMS Rahmendaten und ein Instrumentenpapier zugrunde liegen, die Ende 2023 finalisiert wurden. Spätere Entwicklungen sind nicht berücksichtigt. Die Einschätzung des erhöhten Risikos einer Überschätzung der Instrumentenwirkung aufgrund von Abweichungen zu den Papieren ist qualitativ plausibel. Allerdings ist unklar, in welchem Umfang diese Änderungen wirken. Im Einzelnen teilen wir die Einschätzung zu den Rahmendaten nicht. Beispielsweise werden die Annahmen zur Erdgasverbraucherpreisen als eher zu hoch angesehen. In dem hier unterstellten Preisszenario sinkt der reale Endverbrauchergaspreis (ohne CO₂-Umlage) wieder auf 7,5 ct/kWh (reale Preisbasis 2022) im Jahr 2030 und 7,2 ct/kWh (reale Preisbasis 2022) im Jahr 2040, was faktisch nicht einem hohen Preispfad entspricht. Andere Anregungen des ERK zu Rahmendaten konnten im Rahmen der Modellierung in diesem Bericht berücksichtigt werden: Auf Ebene der Waldmodellierung in FABio-Forest im vorliegenden Bericht mit Projektionen von THG-Emissionen für Baden-Württemberg werden so die vom ERK geforderten Sensitivitäten berücksichtigt, sowohl für unterschiedliche Holzentnahmemengen als auch für die Intensität natürlicher Störungen

Grundlegende Kritikpunkte des ERK am PB-2024 umfassen die Befassung mit Wahrscheinlichkeiten/ Unsicherheiten und die Aktualität. Aus Sicht unseres Konsortiums wird der Bedarf nach besserer Adressierung der vielfältigen Unsicherheiten geteilt. Der Wunsch nach größerer Aktualität allerdings scheint nicht umsetzbar, da die hohen (und vom ERK im Grunde noch erweiterten) Anforderungen an Detailgrad und Konsistenz der Projektion zwangsläufig mit langen Bearbeitungszeiträumen einhergehen. Mit Blick auf

den Zeitraum der Modellierung (2030/2040/2045) ist überdies fragwürdig, ob die zwischen Erstellung des Szenarios (Ende 2023) und der Stellungnahme des ERK (Mitte 2024) eingetretene Entwicklung tatsächlich fundamentale Änderungen zeitigen. Es besteht die Gefahr, unter dem Eindruck aktueller Entwicklungen mittel- und langfristige Transformationspfade grundsätzlich zu hinterfragen.

Literaturverzeichnis

- Barckhausen, A.; Rohde, C.; Jensterle, M.; Neusel, L.; Adak, B. (2023): Monitoring der Initiative Energieeffizienz-Netzwerke. Siebter Jahresbericht. Adelphi. Berlin.
- BDEW – Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2023): Wie heizt Deutschland 2023? Zugriff: <https://www.bdew.de/energie/studie-wie-heizt-deutschland/> [25 Januar 2024]
- Bei der Wieden, M.; Braungardt, S.; Jansen, L.; Flachsbarth, F.; Hennenberg, K.; Ludig, S.; Scheffler, M.; Brugger, H.; Mandel, T.; Rehfeldt, M.; Krail, M.; Steinbach, J.; Deurer, J. (2024): Instrumentenpapier - Bericht über die Projektionen von Treibhausgasemissionen und deren Auswirkungen auf das Erreichen der Klimaschutzziele für Baden-Württemberg sowie der Sektorziele nach § 16 KlimaG BW. Öko-Institut, Fraunhofer ISI. IREES.
- BMDV – Bundesministerium für Digitales und Verkehr (2017): Mobilität in Deutschland 2017. Ergebnisbericht. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur vorgelegt von: infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH in Kooperation mit DLR, IVT Research GmbH und infas 360 GmbH. Zugriff: https://bmdv.bund.de/Shared-Docs/DE/Anlage/G/mid-ergebnisbericht.pdf?__blob=publicationFile.
- BMEL – Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2024): Nationale Strategie zur Reduzierung der Lebensmittelverschwendung. Zugriff: <https://www.bmel.de/DE/themen/ernaehrung/lebensmittelverschwendung/strategie-lebensmittelverschwendung.html> [17 Juni 2024]
- Destatis (2019): Wohnen in Deutschland - Zusatzprogramm des Mikrozensus 2018, Statistisches Bundesamt. Zugriff: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Publikationen/Downloads-Wohnen/wohnen-in-deutschland-5122125189005.html> [25 Januar 2024]
- Destatis (2022a): Fachserie 5 - Bauen und Wohnen. Statistisches Bundesamt. Zugriff: https://www.destatis.de/DE/Service/Bibliothek/_publikationen-fachserienliste-5.html#651444. [25 Januar 2024]
- Destatis (2022b): Lebensmittelabfälle in Deutschland. Statistisches Bundesamt. Zugriff: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Tabelle/lebensmittelabfaelle.html> [17 Juni 2024]
- Eurostat (2024): Heizgradtage und Kühlgradtage nach NUTS-3-Regionen - jährliche Daten. Zugriff: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/product/page/NRG_CHDDR2_A?lang=de [18 Juni 2024]
- ERK - Expertenrat für Klimafragen (Hrsg.) (2024): Gutachten zur Prüfung der Treibhausgas-Projektionsdaten 2024. Berlin.
- Harthan, R.; Förster, H.; Braungardt, S.; Bürger, V.; Görz, W.; Jansen, L.; Jörß, W.; Kasten, P.; Loreck, C.; Ludig, S.; Scheffler, M.; Steinbach, I.; Bei der Wieden, M.; Brugger, H.; Fleiter, T.; Mandel, T.; Rehfeldt, M.; Steinbach, J.; Deurer, J.; Rock, J.; Osterburg, B. (2024): (2024) Treibhausgas-Projektionen 2024 für Deutschland - Instrumente. Dessau-Roßlau: Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES, Thünen-Institut.

Harthan, R.; Förster, H.; Borkowski, K.; Böttcher, H.; Braungardt, S.; Bürger, V.; Emele, L.; Görz, W.; Hennenberg, K.; Jansen, L.; Jörß, W.; Kasten, P.; Loreck, C.; Ludig, S.; Matthes, F.; Mendelevitch, R.; Moosmann, L.; Nissen, C.; Repenning, J.; Scheffler, M.; Steinbach, I.; Bei der Wieden, M.; Wiegmann, K.; Brugger, H.; Fleiter, T.; Mandel, T.; Rehfeldt, M.; Rohde, C.; Yu, S.; Steinbach, J.; Deurer, J.; Fuß, R.; Rock, J.; Osterburg, B.; Rüter, S.; Adam, S.; Dunger, K.; Rösemann, C.; Stümer, W.; Tiemeyer, B.; Vos, C. (2024): Technischer Anhang der Treibhausgas-Projektionen 2024 für Deutschland (Projektionsbericht 2024). Umweltbundesamt (KLIFOPLAN des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz, Forschungskennzahl 3722 41 511 0).

Heinrich, Dr. S.; Langreder, N.; Grodeke, A.; Jessing, D.; Wachter, D.; Empl, B.; Winieswka, Dr. B. (2024): Förderwirkungen BEG 2022 - Kurzfassung der Evaluationsergebnisse'. Prognos. Ifeu. FIW. iTG.

Heinrich, Dr. S.; Langreder, N.; Jessing, D.; Wachter, D.; Empl, B.; Winieswka, Dr. B. (2023): Förderwirkungen BEG 2021 - Kurzfassung der Evaluationsergebnisse.

Hersbach, H.; Bell, B.; Berrisford, P.; Hirahara, S.; Horányi, A.; Muñoz-Sabater, J.; Nicolas, J.; Peubey, C.; Radu, R.; Schepers, D.; Simmons, A.; Soci, C.; Abdalla, S.; Abellan, X.; Balsamo, G.; Bechtold, P.; Biavati, G.; Bidlot, J.; Bonavita, M.; De Chiara, G.; Dahlgren, P.; Dee, D.; Diamantakis, M.; Dragani, R.; Flemming, J.; Forbes, R.; Fuentes, M.; Geer, A.; Haimberger, L.; Healy, S.; Hogan, R.J.; Hólm, E.; Janisková, M.; Keeley, S.; Laloyaux, P.; Lopez, P.; Lupu, C.; Radnoti, G.; de Rosnay, P.; Rozum, I.; Vamborg, F.; Villaume, S.; Thépaut, J-N. (2017): Complete ERA5 from 1940: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service (C3S) Data Store (CDS). DOI: [10.24381/cds.143582cf](https://doi.org/10.24381/cds.143582cf)

Institut Wohnen und Umwelt (2023): Gradtagzahlen Deutschland (Tool). Institut Wohnen und Umwelt (IWU). Darmstadt. Zugriff <https://www.iwu.de/publikationen/fachinformationen/energiebilanzen/#c205> [1 März 2024].

Kelm, T.; Bickel, Dr. B.; Jachmann, H.; Liebhart, L.; Bergk, F.; Fehrenbach, H.; Mellwig, P.; Stange, Dr. H.; Wiegmann, K.; Henneberg, K.; Bürger, V.; Fleiter, Dr. T.; Manz, P.; Neuwirth, M.; Sandrock, M. (2023): Sektorziele 2030 und klimaneutrales Baden-Württemberg 2040: Teilbericht Sektorziele 2030'.

Mendelevitch, R.; Repenning, J.; Matthes, F.; Deurer, J. (2024): Treibhausgas-Projektionen 2024 für Deutschland - Rahmendaten. Öko-Institut, IREES im Auftrag des Umweltbundesamtes.

Pfeiffer, M. et al. (2023) Referenzszenario der Holzverwendung und der Waldentwicklung im UBA-Projekt BioSINK. Working Paper. Öko-Institut. Available at: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-Referenzszenario-BioSINK.pdf> (Accessed: 18 June 2024).

Repenning, J.; Harthan, R.; Böttcher, H.; Blanck, R.; Braungardt, S.; Bürger, V.; Emele, L.; Görz, W.; Hennenberg, K.; Jansen, L.; Jörß, W.; Ludig, S.; Matthes, F.; Mendelevitch, R.; Moosmann, L.; Nissen, C.; Rausch, L.; Scheffler, M.; Schumacher, K.; Wiegmann, K.; Wissner, N.; Zerrahn, A.; Brugger, H.; Fleiter, T.; Mandel, T.; Rehfeldt, M.; Rohde, C.; Schlomann, B.; Yu, S.; Steinbach, J.; Deurer, J.; (2021): Projektionsbericht 2021 für Deutschland. Öko-Institut. Fraunhofer ISI. IREES.

Umweltbundesamt (2020): Schwerpunkt 2-2020: 30 Jahre Deutsche Einheit Schwerpunkt - Das Magazin des Umweltbundesamtes, 2/2020.

Umweltbundesamt (2023): Treibhausgasminderungsziele Deutschlands, Umweltbundesamt. Umweltbundesamt. Zugriff: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgasminderungsziele-deutschlands#internationale-vereinbarungen-weisen-den-weg> [6 Juni 2024]

Anhang: Inputdaten

Tabelle 19: Endenergiebedarf Industrie national nach Branche und Energieträger 2021

Endenergiebedarf Industrie national nach Branche und Energieträger 2021	Andere Energieträger	Biomasse	Braunkohlen	Erneuerbare Energien	Fernwärme	Gase	Mineralöle	Steinkohlen	Strom	Umweltwärme	Wasserstoff	Gesamtergebnis
Ernährung und Tabak	0	1	1	0	3	30	2	1	17	0	0	55
Fahrzeugbau	0	0	0	0	3	10	0	2	16	0	0	31
Gewinnung von Steinen und Erden	0	0	1	0	0	1	0	0	2	0	0	4
Glas u. Keramik	0	0	0	0	0	17	1	0	5	0	0	22
Grundstoffchemie	9	1	1	0	24	63	2	2	43	0	0	143
Gummi- u. Kunststoffwaren	0	0	0	0	1	6	0	0	13	0	0	20
Maschinenbau	0	0	0	0	1	6	1	0	10	0	0	18
Metallbearbeitung	0	0	0	0	0	11	1	0	14	0	0	27
Metallerzeugung	0	0	2	0	1	53	1	82	20	0	0	158
Nichteisen-Metalle, -gießereien	0	0	0	0	0	10	0	2	18	0	0	32
Papiergewerbe	2	8	1	0	7	19	1	1	17	0	0	58
Sonstige chemische Industrie	0	0	1	0	5	8	0	0	6	0	0	21
Sonstige Wirtschaftszweige	0	13	0	0	3	10	1	0	19	0	0	47
Verarbeitung von Steinen und Erden	11	6	11	0	0	12	3	4	8	0	0	55
Gesamtergebnis	22	31	18	0	48	255	13	96	207	1	0	692

Tabelle 20: Endenergiebedarf Industrie in Baden-Württemberg nach Branche und Energieträger 2021

Endenergiebedarf Industrie Baden-Württemberg nach Branche und Energieträger 2021	Andere Energieträger	Biomasse	Braunkohlen	Erneuerbare Energien	Fernwärme	Gase	Mineralöle	Steinkohlen	Strom	Umweltwärme	Wasserstoff	Gesamtergebnis
Ernährung und Tabak	0	0	0	0	0	3	0	0	2	0	0	5
Fahrzeugbau	0	0	0	0	1	2	0	0	4	0	0	7
Gewinnung von Steinen und Erden	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Glas u. Keramik	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
Grundstoffchemie	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	2
Gummi- u. Kunststoffwaren	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	3
Maschinenbau	0	0	0	0	0	2	0	0	3	0	0	5
Metallbearbeitung	0	0	0	0	0	2	0	0	3	0	0	5
Metallerzeugung	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2
Nichteisen-Metalle, -gießereien	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	3
Papiergewerbe	0	2	0	0	1	3	0	0	3	0	0	9
Sonstige chemische Industrie	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	3
Sonstige Wirtschaftszweige	0	2	0	0	0	2	0	0	3	0	0	8
Verarbeitung von Steinen und Erden	1	2	1	0	0	1	1	0	1	0	0	7
Gesamtergebnis	2	6	1	0	4	19	3	1	25	0	0	61

Anhang: Modellbeschreibungen

PowerFlex (Energiewirtschaft)

Die Modellierung der zu erwartenden Entwicklung des Kraftwerksparks wird mit Hilfe des Strommarktmodells PowerFlex des Öko-Instituts vorgenommen. Dabei wird zum einen der Kraftwerkseinsatz berechnet, zum anderen kommt ein integriertes Stilllegungskalkül zum Einsatz, das die Wirtschaftlichkeit der Kraftwerke überprüft.

Das am Öko-Institut entwickelte Strommarktmodell PowerFlex ist ein Fundamentalmodell, welches thermische Kraftwerke, die Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien, Pumpspeicherkraftwerke, Batteriespeicher und flexible Stromverbraucher kostenminimal einsetzt, um die stündlichen Strom- und Fernwärmenachfragen über ein Jahr zu decken.

Der Fokus des Modells liegt auf Deutschland. Es werden jedoch mit Ausnahme von Malta und Zypern alle Länder der EU-27 sowie Norwegen, die Schweiz und das Vereinigte Königreich berücksichtigt. Für Deutschland liegt ein hoher Detaillierungsgrad der Strom- und Fernwärmeerzeugung vor. Die anderen Länder werden jeweils aggregiert abgebildet. Jedes Land stellt dabei einen Knoten dar, der über Kuppelleitungen mit seinen Nachbarländern verbunden ist. Innerhalb eines Knotens wird ein einheitliches Marktgebiet ohne Netzengpässe unterstellt. Die Austauschkapazitäten zwischen den Ländern (*Net Transfer Capacities*, NTC) werden in beide Richtungen und nach Jahren differenziert vorgegeben.

Die einzelnen Kraftwerke werden im Modell detailliert mit Hilfe technischer und ökonomischer Parameter abgebildet. Thermische Kraftwerke in Deutschland mit einer installierten elektrischen Leistung größer 100 MW werden blockscharf und mit individuellem Wirkungsgrad erfasst. Diese Grenze kann auch in der dem Modell vorangehenden Datenaufbereitung nach unten angepasst werden. Kleinere thermische Stromerzeugungsanlagen werden in technologie- und baujahrspezifischen Gruppen zusammengefasst und mit Hilfe von typspezifischen Parametern charakterisiert. Für Pumpspeicherkraftwerke sind neben den Turbinen auch Parameter zur Abbildung der Pumpen und Speicher hinterlegt. Der Einsatz der Pumpspeicherkraftwerke wird im Rahmen der Gesamtoptimierung endogen bestimmt. Batteriespeicher können sowohl als netzverfügbare Großspeicher als auch als Haushalts-PV-Speicher implementiert werden. Für das Jahr 2018 etwa setzte sich der im Modell PowerFlex abgebildete deutsche Kraftwerkspark aus rund 250 Einzelblöcken und 150 Technologieaggregaten zusammen.

Biogaskraftwerke werden über Technologieaggregate als Teil des thermischen Kraftwerksparks im Modell abgebildet. Kraftwerke, die feste oder flüssige Biomasse verfeuern, können mit einem Einspeiseprofil versehen werden oder, wie Biogaskraftwerke, als Aggregate Teil des Kraftwerksparks sein. Das Stromdargebot aus fluktuierenden erneuerbaren Erzeugern (Laufwasser, Windenergie an Land, Windenergie auf See, Photovoltaik, Geothermie) wird in stündlicher Auflösung vorgegeben. Die tatsächlich eingespeiste Menge wird modellendogen bestimmt, sodass das zur Verfügung stehende fluktuierende Stromangebot auch als Überschuss identifiziert und abgeregelt werden kann. Speicherwasserkraftwerke sind als Technologieaggregat im Modell implementiert und durch eine Turbinenleistung, eine Speichergröße und eine Zuflusszeitreihe charakterisiert. Die Jahrerzeugung kann somit im Rahmen der Parameter zeitlich flexibel eingesetzt werden.

Für KWK-Anlagen sind sowohl die relevanten Eigenschaften der Anlage im Kondensationsbetrieb (Wirkungsgrad, maximale elektrische Leistung), als auch die Eigenschaften im KWK-Betrieb (Wirkungsgrad im KWK-Betrieb, maximale elektrische Leistung im KWK-Betrieb und thermische Leistung) hinterlegt. Für jede KWK-Anlage werden im Modell der Anteil des Kondensationsbetriebs und der Anteil des KWK-Betriebs im Rahmen der Optimierung berechnet. Wesentliche Randbedingungen sind dabei die thermodynamischen und technischen Grenzen je nach Anlagentyp sowie die vorgegebene Wärmenachfrage. Das Wärmenachfrageprofil für die KWK-Anlagen setzt sich aus einem typischen Fernwärmeprofil und einer angenommenen Gleichverteilung für industrielle KWK-Anlagen zusammen. Für jeden Hauptenergieträger ergibt sich somit ein individuelles KWK-Profil. Für *Must-Run*-Kraftwerke, wie z.B. Gichtgas oder Müllverbrennungsanlagen, wird eine gleichverteilte Stromeinspeisung unterstellt.

Die jährliche Stromnachfrage wird dem Modell exogen vorgegeben und ergibt sich aus den Stromnachfragen der anderen Sektoren. Die Stromnachfrage teilt sich in einen unflexiblen Anteil mit vorgegebenem stündlichen Lastprofil sowie einen flexiblen Anteil, der aus der Stromnachfrage von flexiblen Verbrauchern wie batterieelektrischen Fahrzeugen, Pumpspeicherkraftwerken, Wärmepumpen oder anderen (*Demand-Side Management*) resultiert. Für diese Verbraucher existieren im Modell zusätzliche Nebenbedingungen, die beispielsweise die Anforderungen aus den Fahrprofilen oder die Kapazität der Speicher abbilden. Unter Berücksichtigung dieser Nebenbedingungen wird die zeitliche Struktur dieser Nachfrage modellendogen im Zuge der Optimierung berechnet. Darüber hinaus wird modellendogen der stündliche Stromexport und -import als Austausch mit den Nachbarstaaten bestimmt.

Auf Basis einer vollständigen Voraussicht wird im Rahmen einer linearen Optimierung der kostenminimale Einsatz aller Stromerzeugungstechnologien und Flexibilitätsoptionen sowie des Imports und Exports unter Berücksichtigung technischer und energiewirtschaftlicher Nebenbedingungen bestimmt.

Das in PowerFlex integrierte Stilllegungskalkül⁶⁷ überprüft, ob die Deckungsbeiträge ausreichen, um die fixen Betriebskosten eines Kraftwerksblocks zu decken. Ist dies nicht der Fall, geht das Kraftwerk in Kaltreserve und wird langfristig stillgelegt. Da sich durch Kraftwerksstilllegungen in großem Umfang der Strompreis ändern würde, was wiederum die Erlöse der verbleibenden Kraftwerke und damit das Ergebnis des Stilllegungskalküls beeinflussen würde, wird bei der Kraftwerksstilllegung iterativ vorgegangen. Die Kraftwerke mit den größten Verlusten werden zuerst stillgelegt, in jeder Iteration kommen wenige weitere Kraftwerke hinzu, bis die verbleibenden Kraftwerke ihre fixen Betriebskosten aus den Deckungsbeiträgen finanzieren können. Alternativ können die Stilllegungsentscheidungen aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive gemeinsam mit dem kostenminimalen Dispatch bestimmt werden.

⁶⁷ Das in PowerFlex integrierte Stilllegungskalkül basiert auf dem Kraftwerksinvestitionsmodell ELIAS (Electricity Investment Analysis). Für eine genauere Darstellung des Stilllegungsmechanismus siehe die dazugehörige Dissertationsschrift (Harthan 2015, <https://ul.qucosa.de/api/qucosa%3A13132/attachment/ATT-0/>).

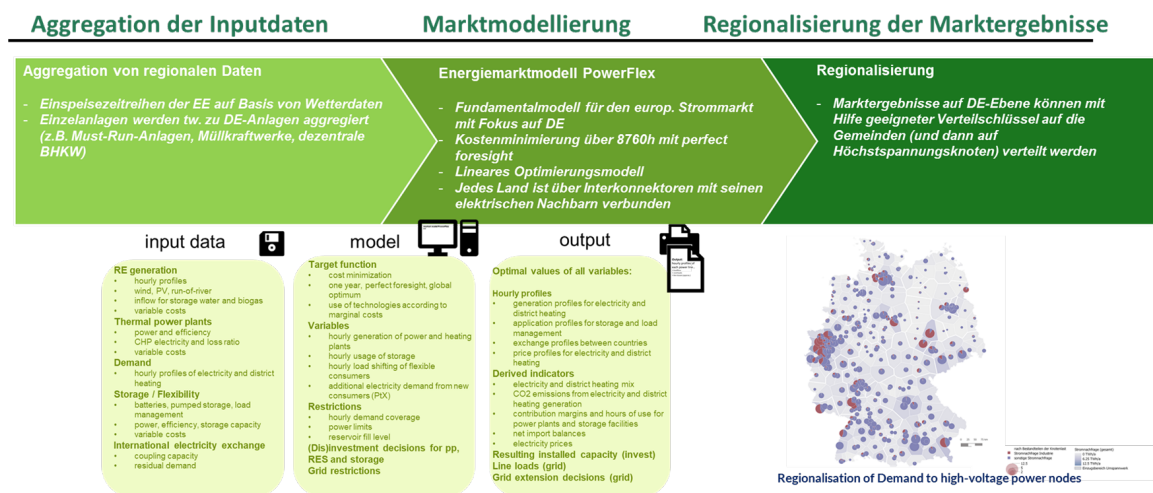
Zentrale Inputdaten

- Profile der Stromnachfrage (stündlich aufgelöst)
- Profile der EE-Einspeisung (stündlich aufgelöst)
- Techno-ökonomische Parameter des thermischen Kraftwerksparks (z.B. Wirkungsgrad, Brennstoffpreise, CO₂-Preise)
- Techno-ökonomische Parameter von Stromspeichern (z.B. Speicherkapazität, Wirkungsgrad)
- Techno-ökonomische Parameter von flexiblen Verbrauchern und Elektromobilität (z.B. Speicherkapazität, Wirkungsgrad)

Zentrale Ergebnisse

- In stündlicher Auflösung
 - Einsatzprofile von Speichern, thermischen Kraftwerken/Kraftwerksblöcken, anderen Technologien zur Strom- und Fernwärmeerzeugung, flexiblen Verbrauchern sowie des Stromaustausch zwischen allen Ländern
 - Strompreise
 - Nachfrage und Residuallast pro Land
 - Brennstoffeinsätze
- Als Jahreswerte bzw. Jahresdurchschnittswerte
 - Strompreise
 - Deckungsbeiträge, Marktwerte
 - Installierte Leistungen
- Als Jahressumme
 - Benutzungsstunden von Speichern, Stromerzeugungstechnologien und flexiblen Verbrauchern
 - Brennstoffeinsätze, hierbei können die Brennstoffeinsätze von KWK-Anlagen auf die Strom- und Wärmeerzeugung aufgeteilt werden (Finnische Methode)
 - Gesamtemissionen sowie Emissionen nach Energieträgern; hierbei können die Emissionen von KWK-Anlagen auf die Strom- und Wärmeerzeugung aufgeteilt werden (Finnische Methode)
 - Integrierte bzw. überschüssige Mengen an fluktuierendem EE-Strom

Abbildung 43: Modelldarstellung PowerFlex



^[1] Das in PowerFlex integrierte Stilllegungskalkül basiert auf dem Kraftwerksinvestitionsmodell ELIAS (Electricity Investment Analysis). Für eine genauere Darstellung des Stilllegungsmechanismus siehe die dazugehörige Dissertationsschrift (Harthan 2015).

ASTRA-M (Verkehr)

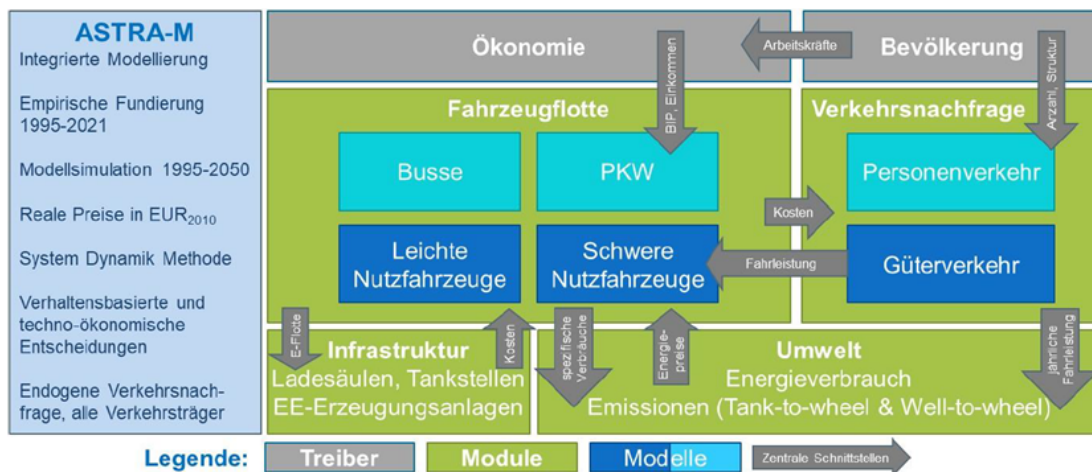
Für die Projektionen im Sektor Verkehr wird das integrierte, systemdynamische Modell ASTRA-M verwendet, das das Fraunhofer ISI auf nationaler und Landesebene seit Jahren erfolgreich für die Bewertung von Klimaschutzmaßnahmen im Sektor Verkehr einsetzt. Die Berechnung von Endenergieverbrauch (EEV) und THG-Emissionen aus dem Verkehr erfolgt in ASTRA-M sowohl in einfachen als auch in komplexen Modellierungsansätzen nach demselben Prinzip, welches wir als ASIF bezeichnen. Das Akronym leitet sich aus dem Englischen ab. Es weist aber deutsche Pendanten auf: mit A für Verkehr-Aktivität, S für Modal-Split, I für Energie-Intensität und F für CO₂-Emission des Kraftstoffs (Fuel Intensity). Im ASIF-Konzept werden die Verkehrsnachfrage, die modale Verteilung, technische Eigenschaften der Fahrzeuge und chemische Eigenschaften der Kraftstoffe berücksichtigt. Die verschiedenen komplexen Ansätze zur THG-Berechnung unterscheiden sich meist dadurch, (1) wie viele Einflussparameter berücksichtigt werden und (2), ob eine lineare Modellierung (in Abbildung 44 von links nach rechts) oder eine komplexe Modellierung mit Berücksichtigung der verschiedensten Rückkopplungen – teils auch sektorübergreifend zwischen Verkehr, Energie und Ökonomie – erfolgt.

Die Modellierung von ASTRA-M stellt eine komplexe Berücksichtigung zahlreicher Rückkopplungen sowohl innerhalb des Verkehrssystems (z.B. Flottenkosten und damit Technologieparameter beeinflussen Modalwahl und Emissionen) als auch mit anderen Systemen wie dem Energiesektor (z.B. E-PKW-Hochlauf beeinflusst Investitionen im Energiesystem) dar. ASTRA-M ist dazu in Module und Modelle unterteilt, zwischen denen verschiedene Rückkopplungen berücksichtigt sind (siehe folgende Abbildung). Das Modell simuliert den historischen Zeitraum von 1995 bis 2021, um die Parameter der Funktionsgleichungen empirisch zu kalibrieren und die Güte der Modellierung im Gesamtsystem zu testen. Durch die Betrachtung des Gesamtsystems kann eine zusätzliche Dimension der Validierung des Modells genutzt werden, weil Gleichungen, die verschiedene Teile des Systems beschreiben, ineinandergreifen und ein mathematisch stimmiges Ganzes ergeben. Vergleichbar einem Hausbau, bei dem Wände, Türen, Fenster,

Dach, Rohre und Elektrik alle an der richtigen Stelle und in passender Anordnung zueinander angebracht sein müssen, um ein stimmiges und funktionsfähiges Gebäude zu erstellen.

Ab 2022 beginnt das Modell die Zukunft zu simulieren und quantifiziert diese in Form von Szenarien bis 2050. Dabei werden verschiedene mathematische Modelle genutzt, um Wahlentscheidungen der Verkehrsnutzer und Fahrzeugkäufer zu simulieren. Insbesondere werden Discrete-Choice Ansätze (Logit-Modelle) eingesetzt, wenn unterschiedliche Präferenzen und nicht-monetäre Faktoren zu berücksichtigen sind; ebenso Vollkosten-rechnungen (Total-Cost of Ownership, TCO), wenn Entscheider rein rational als Homo Oeconomicus agieren.

Abbildung 44: Modelldarstellung ASTRA-M



Invert/ee-Lab (Gebäude)

Invert/ee-Lab Modellbeschreibung und Invert-Agents

Methodisch stellt Invert/ee-Lab ein dem Bottom-up-Ansatz folgendes, techno-ökonomisches Simulationsmodell dar, mit dem Optionen des Energiebedarfs und dessen Deckung für Wärme (Raumwärme und Warmwasser) sowie Klimatisierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden ermittelt und die Auswirkungen verschiedener Förderinstrumente in Jahresschritten abgebildet werden können (Abbildung 45). Grundlage des Modells ist eine detaillierte Darstellung des Gebäudebestands nach Gebäudetypen, Baualtersklassen und Sanierungszuständen mit relevanten bauphysikalischen und ökonomischen Parametern einschließlich der Technologien zur Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und Klimatisierung. Darauf aufbauend wird der Heiz- und Kühlenergiebedarf unter Einbeziehung von Nutzerverhalten und Klimadaten ermittelt. Die Investitionsentscheidung in Technologien und Effizienzmaßnahmen wird unter Berücksichtigung von investorenspezifischen Entscheidungskalkülen und Hemmnissen sowie Energieträgerpotentialen im Modul Invert-Agents ermittelt (vgl. Steinbach 2015)⁶⁸.

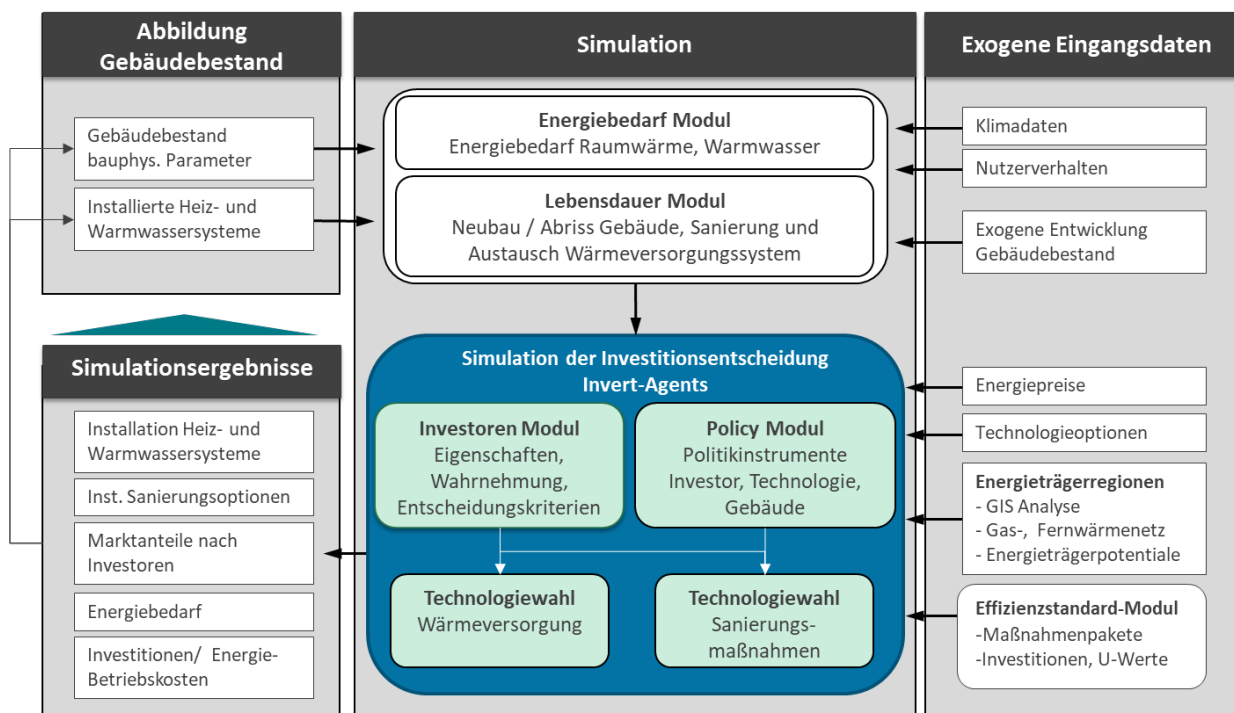
⁶⁸ <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/6cc9411e-c0f8-4b58-bed7-bb65ec0ddc4e/content>

Mit Invert/ee-Lab ist es möglich, die Auswirkung unterschiedlicher Politikinstrumente und Ausgestaltungsvarianten auf den Ausbau der Erneuerbaren Energien im Gebäudebereich in Szenarien zu analysieren. Im Rahmen des laufenden Forschungsprojektes Diffusion EE wird das Modell, um den Bereich der Intermediäre als zentrale Change Agents erweitert, um den Einfluss auf die Investitionsentscheidung im Gebäudebereich abzubilden.

Für eine realitätsnahe Simulation des Einsatzes erneuerbarer Energien im Gebäudebereich werden u.a. folgende relevante Zusammenhänge im Modell abgebildet:

- Berücksichtigung von investorenspezifischen Hemmnissen und Kalkülen bei der Investitionsentscheidung in Wärmeversorgungssysteme und Effizienzmaßnahmen.
- Das Temperaturniveau des Wärmeverteilungssystems wird in der Simulation berücksichtigt, hier besonders die Interaktion zwischen diesem und den Wirkungsgraden bzw. Arbeitszahlen der Bereitstellungstechnologien. Dies ist in besonderem Maße für eine realitätsnahe Simulation des Einsatzes von Wärmepumpen in älteren Gebäuden von Bedeutung.
- Die Modellierung der Energiebereitstellung aus solarthermischen Anlagen erfolgt auf monatlicher Basis unter Berücksichtigung der entsprechenden solaren Einstrahlung. Zudem wird entsprechend der Geometrie der Referenzgebäude, die den solarthermischen Anlagen zur Verfügung stehende Dachfläche im Modell berücksichtigt.
- Politikinstrumente zur Förderung von EE-Wärme und Effizienzmaßnahmen wie Investitionszuschüsse (Marktanreizprogramm), Nutzungspflichten (EWärmeG) oder haushaltsunabhängige Umlagesysteme werden technologie- und gebäudespezifisch (Neubau, Bestand, öffentliche Gebäude) definiert.
- Darüber hinaus erfolgt eine Berücksichtigung der Limitierung erneuerbarer Energieträger über definierte Kostenpotenziale inklusive deren Entwicklung über den Simulationszeitraum.

Abbildung 45: Struktur des Simulationsmodells Invert/ee-Lab



Quelle: Steinbach 2015

Gebäudetypologische Abbildung von Referenzgebäuden und Wärmeversorgungstechnologien

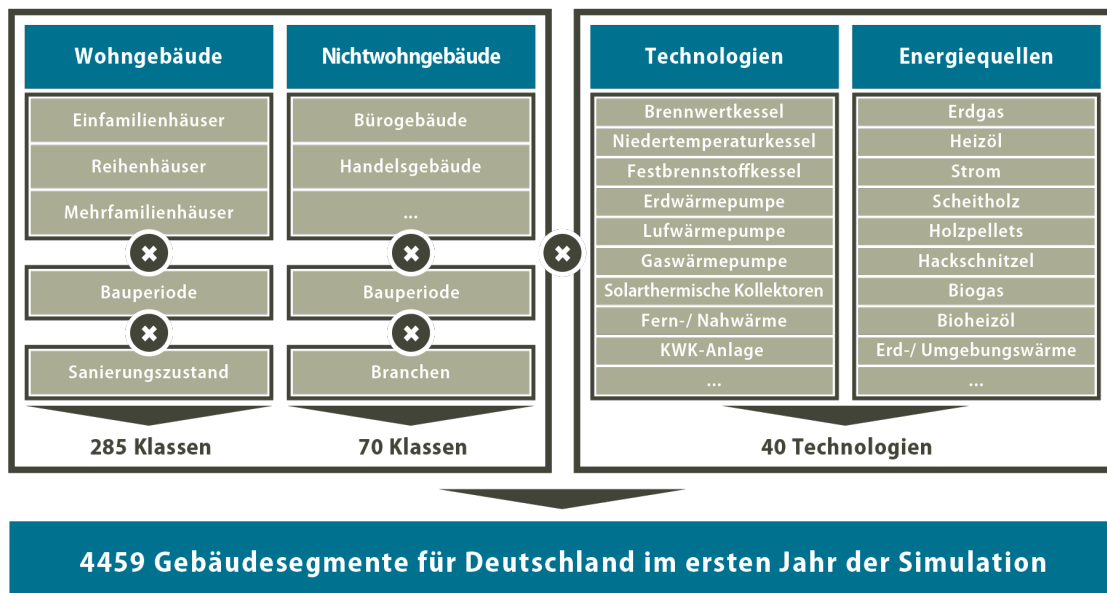
Derzeit werden 40 verschiedene Technologien zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser unterschieden, welche über detaillierte technische und ökonomische Daten abgebildet werden. Die Referenzgebäudetypologie mit den entsprechenden Zuordnungen von Gebäuden und Technologien wird auf Basis der Erhebungen „Datenbasis Wohngebäude“ (Diefenbach et al. 2010)⁶⁹ und deren Aktualisierung aus dem Jahr 2018 (Cischinsky und Diefenbach 2018)⁷⁰ abgeleitet.

Die Gebäudetypologie von Nichtwohngebäuden basiert ursprünglich auf der Studie „Energieverbrauch im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen“ und ist mit den Daten aus dem Projekt dataNWG: Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude (<https://www.datanwg.de>) aktualisiert worden. Der aus der Modellrechnung resultierende Energiebedarf ist auf die temperaturbereinigten Werte der Anwendungsbilanzen sowie der EE-Wärmebereitstellung nach AGEE-Stat kalibriert.

⁶⁹ https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebäudebestand/datenbasis/Endbericht_Datenbasis.pdf

⁷⁰ https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebäudebestand/2018_IWU_CischinskyEtDiefenbach_Datenerhebung-Wohngeb%C3%A4udebestand-2016.pdf

Abbildung 46: Struktur der hinterlegten Gebäudetypologie in Invert/ee-Lab



Quelle: Steinbach 2015

Modellierung von Investoren im Gebäudebereich

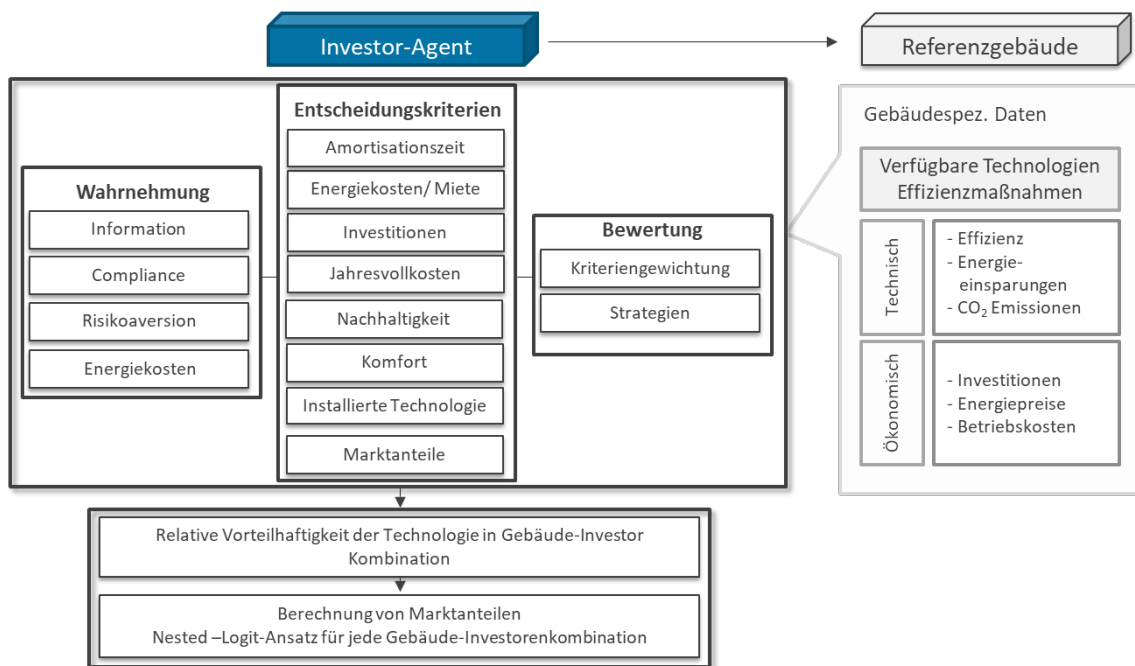
Im Modell können einzelne Investorentypen implementiert werden, welche den Referenzgebäudesegmenten anteilig als Besitzer zugeordnet werden. Diese Anteile sind zeitabhängig und können somit exogen über den Simulationszeitraum verändert werden. Das Modell erlaubt die Definition beliebig vieler Investorenagenten, welche jeweils Instanzen einer von fünf möglichen Agentenklassen darstellen – Selbstnutzende Eigentümer, Private Vermieter, Eigentümergemeinschaften, Wohnungsbaugesellschaften, gewerbliche Gebäudebesitzer. Als Grundlage der Investitionsentscheidung werden verschiedene ökonomische und nicht – ökonomische Entscheidungskriterien definiert, die für jede Kombination von Investoren, Referenzgebäudesegmenten und Technologieoptionen individuell ermittelt werden. Die Eigenschaften einer Investoreninstanz werden als Eingangsdaten definiert, womit einerseits die Relevanz unterschiedlicher Entscheidungskriterien über Gewichte bestimmt werden, andererseits auch die Ausprägung der Kriterien beeinflusst werden. Somit wird sowohl die Art der Investitionsentscheidung – Berücksichtigung unterschiedlicher Kriterien – als auch die Wahrnehmung der Technologieoptionen und der damit verbundenen Parameterausprägungen unterschieden. Für jede zur Verfügung stehende Technologieoption werden in jedem Referenzgebäudesegment aus Sicht jeder Investoreninstanz Nutzwerte berechnet, auf deren Basis die Marktanteile mit einem Nested-Logit-Modell ermittelt werden.

Die Datengrundlage zur Abbildung der Investoren basiert ursprünglich auf XX und ist im Rahmen empirischer Untersuchungen zum Entscheidungsverhalten mittels Discrete Choice und Conjoint Analysen in verschiedenen Forschungsprojekten erweitert und verbessert worden:

- Changing Energy Efficiency Technology Adoption in Households – Horizon 2020 Research Project: <https://www.briskee-cheetah.eu/cheetah/>. Siehe auch Schleich et al. (2019), Schleich et al. (2021) und Müller et al. (2019).
- Modellierung individueller Entscheidungsprozesse und des Einflusses von Intermediären bei der Diffusion von Energieeffizienzmaßnahmen und Erneuerbaren Energien im Gebäudebereich (DiffusionEE): https://www.isi.fraunhofer.de/de/competence-center/energietechnologien-energiesysteme/projekte/319147_diffusion-ee.html. Siehe auch Arning et al. (2019) und Dütschke und Steinbach (2020).

Eine Aktualisierung der Datengrundlage für den Wohngebäudebereich in Invert/ee-Lab wurde in 2022 durch die RWTH Aachen in dem gemeinsam mit dem IREES und Fraunhofer ISI durchgeführten Forschungsprojektes „Manifold – Modellentwicklung und Modellkopplung zum Akteursverhalten in Innovations- und Diffusionsnetzwerken“ (<https://irees.de/2021/02/19/manifold/>) entwickelt und in das Modell integriert.

Abbildung 47: Modellierung der Gebäudeeigentümer als Investor-Agenten



Quelle: Steinbach 2015

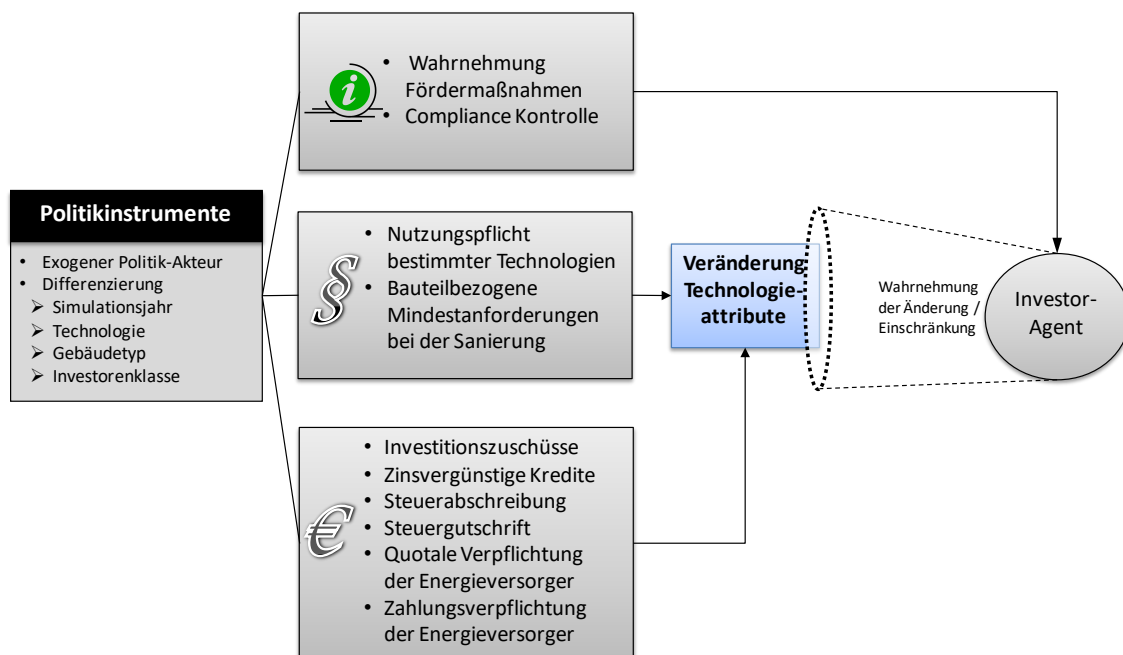
Modellierung von Politikinstrumenten

Um die Wirkung der Politikinstrumente auf die Investitionsaktivität in Energieeffizienzmaßnahmen und Wärmeversorgungssysteme zu untersuchen, werden diese explizit im Modell abgebildet. Dies geschieht als integrale Modellierung von Politikinstrumenten und Investoren, die eine akteurspezifische Untersuchung der Wirkungen der Instrumente ermöglichen sollen.

Die Politikinstrumente und deren Ausgestaltung werden zunächst aus Sicht eines Politik-Akteurs für jedes Simulationsjahr exogen definiert. Dabei werden Förder- und Anfordersbedingungen nach den adressierten Technologien und Maßnahmen sowie den Adressaten – Investorenklassen und Gebäudetypen differenziert. Ordnungsrechtliche und

finanzielle Fördermaßnahmen verändern die Attribute der Technologiealternativen oder schränken die Wahlmöglichkeiten durch Nutzungspflichten oder Mindestanforderungen ein. In Abhängigkeit der definierten Investor-Agenten werden diese Veränderungen oder Einschränkungen bei der Investitionsentscheidung berücksichtigt. Ein Investitionszuschuss beispielsweise verändert die relative Vorteilhaftigkeit einer Technologie hinsichtlich des Attributes Investitionen, wobei dies nicht zwangsläufig der wahrgenommenen Attributausprägung eines Investor-Agenten entspricht. Informatorische Maßnahmen wiederum wirken indirekt auf die Attribute der Wahlmöglichkeiten, indem die investorenspezifische Wahrnehmung verändert wird.

Abbildung 48: Schematische Darstellung der Modellierung von Politikinstrumenten in Invert-Agents



Quelle: Steinbach 2015

LiSE (Agrarmodel)

Das Agrarmodell LiSE (LiSE steht für Lifestock, Soil and Energy emissions) ist ein excelbasiertes Modell, das die THG-Emissionen und andere umweltrelevante Indikatoren der landwirtschaftlichen Produktion aus der Tierhaltung und der Nutzung landwirtschaftlicher Böden in Deutschland sowie die energiebedingten Emissionen aus Land- und Gartenbau kalkuliert. Das Modell setzt auf den Bestands- und Strukturdaten der Nationalen Treibhausgasinventare auf und produziert in einem Bottom-up-Ansatz Emissionen für die entsprechenden Quellgruppen. Neben den THG-Emissionen werden im Modell für die nationale Ebene weitere Größen wie z.B. die Entwicklung der Flächenbelegung und Stickstoffsalden etc. berechnet. Das Modell besteht aus den drei Hauptmodulen Nutztierhaltung, landwirtschaftliche Böden und Energienutzung. Zusätzlich ist eine Differenzierung nach einzelnen Nachfragruppen in Tierhaltung (inkl. Futtermittel), Pflanzliche Lebensmittel und Biomasseproduktion für die stoffliche und energetische Nutzung möglich.

Die hier vorliegende Modellbeschreibung umfasst alle Aspekte, die das Modell für die *nationale* Modellierung behandelt. Eine Skalierung des Modells auf die Ebene eines Bundeslands ist möglich, aber nicht in allen Details. Die genaue Umsetzung hängt vom Umfang des Zugangs zu notwendigen Inputdaten und dem verfügbaren Zeitrahmen ab.

Externe Größen, Nachfrage und Ableitung von relevanten Aktivitätsgrößen

Als Eingangsdaten für das Modell stehen externe Annahmen zur Entwicklung der Nachfrage nach tierischen Lebensmitteln, pflanzlichen Lebensmitteln und Biomasseproduktion für die stoffliche und energetische Nutzung. Diese Größen werden in Abgleich mit der Fachliteratur, wie z.B. agrarökonomischen Projektionen zur Marktentwicklung, politischen Vorgaben oder Annahmen zur Entwicklung des Konsumverhaltens ermittelt oder aus anderen Modellen des Öko-Instituts abgeleitet, wie z.B. die Biomassenachfrage anderer Sektoren. Neben der Entwicklung der Nachfrage können weitere externe Vorgaben, die sich aus politischen Zielstellungen und der Umsetzung rechtlicher Vorgaben ableiten lassen, berücksichtigt werden. Dazu zählen beispielsweise verschiedene Landbau- und Tierhaltungsformen und deren Ertrags- und Leistungsentwicklung, aber auch die Flächenbelegungen durch zusätzliche Biodiversitätsflächen, Flächen zum Moorschutz oder der Flächenbedarf für Siedlung und Infrastruktur.

Räumliche und zeitliche Auflösung

In seiner Grundversion arbeitet das Modell mit einer räumlichen Auflösung auf der Ebene von Deutschland. Hierfür ist auch eine Auflösung auf Ebene von Bundesländern möglich. Detailanalysen können zusätzlich auf Landkreisebene erfolgen.

Inputgrößen fließen mit einer zeitlichen Auflösung von Fünf- bis Zehnjahresschritten in das Modell ein. D.h. äußere Einflüsse wie z.B. gesetzliche Auflagen oder Annahmen zu wichtigen Konsum- oder Leistungsentwicklungen werden in größeren Schritten festgelegt und die sich ergebenden Aktivitätsgrößen und Emissionsfaktoren werden für die Zwischenjahre interpoliert. Eine jahresweise Ausgabe der Ergebnisse ist daher möglich.

Flächenbelegung

Die Belegung der landwirtschaftlichen Nutzfläche wird innerhalb des LiSE Modells durch die verschiedenen Nachfragen nach Tierfutter, pflanzlichen Lebensmitteln und Biomasseproduktion für die stoffliche und energetische Nutzung ermittelt. Die Ausweisung des Futterflächenbedarfs der Tierhaltung erfolgt differenziert in den Bedarf nach Ackerfutterflächen und Grünland. Sämtliche Flächennutzungen werden hinsichtlich konventioneller und ökologischer Bewirtschaftung unterschieden. Ferner können Vorgaben zu ungedüngten Flächen (ökologischer Vorrangflächen, Strukturelemente etc.), zur Fruchtfolge als auch zur Belegung der Ackerflächen und zur Intensität der Grünlandnutzung berücksichtigt werden.

Nutztierhaltung

Das Modul zur Nutztierhaltung umfasst alle relevanten Nutztierklassen und deren Methan-, sowie direkte und indirekte Lachgasemissionen. Wichtigste Aktivitätsgröße sind zunächst die Tierbestände selbst. Hier gibt es eine Schnittstelle zu einem Konsummodell, mit dem Verhaltensänderungen und Selbstversorgungsgrade im Bereich des Milch- und Fleischverzehrs quantifiziert und in das Tiermodell zur Bestandsanpassung einfließen.

ßen können. Wesentliche Aktivitätsgrößen des Modells sind: Bestandsgrößen der Nutztiere, Milchleistung, N- und VS-Exkretionsrate, Methanbildungsraten für Wirtschaftsdünger, sowie die Güllevergärung. Die folgende Abbildung stellt die wesentlichen Parameter des Teilmoduls der Nutztierhaltung dar.

Weitere wichtige Kenngrößen charakterisieren die Stallungen (stroh- bzw. güllebasiert, Anbindehaltung oder Freilaufsysteme) und die Wirtschaftsdüngerlagerung. Bei letzterer wird spezifiziert, welcher Anteil anaerob vergoren wird und in welchem Umfang die Gärrestlagerung gasdicht erfolgt.

Für die enterische Verdauung und die Emissionen aus Stall und Wirtschaftsdüngerlagerung werden die spezifischen Emissionsfaktoren der einzelnen Tiergruppen fortgeschrieben. Maßnahmen des Herdenmanagements bei Kühen bzw. Rindern können über die Verhältnisse adulter zu juvenilen Tieren abgebildet werden. Eine Untergruppe des Nutztier Moduls bilden die Futterpläne. Hier wird der jährliche Futter- und Flächenbedarf pro Tierplatz für die verschiedenen Nutztiergruppen ermittelt. Hierbei sind Futterpläne für die konventionelle und ökologische Tierhaltung hinterlegt. Daraus wird die Flächenbelegung mit den verschiedenen Ackerfrüchten und der Bedarf und die Intensivität der Grünlandnutzung ermittelt. Wesentliche Parameter, die berücksichtigt werden können, sind die Annahmen zu Stall, Weidehaltung, Mais- oder Grünlandbasierte Fütterung, aber auch Annahmen zur Grünlandintensivität (z.B. Anbau auf Dreischürigem Grünland etc.).

Landwirtschaftliche Böden

Über die Belegung der landwirtschaftlichen Nutzfläche mit den verschiedenen Ackerfrüchten und der Grünlandnutzung wird der Stickstoffdüngereinsatz ermittelt. Dazu ist der Düngebedarf der einzelnen Kulturen aus der aktuellen Fassung der Düngeverordnung hinterlegt. Wahlweise können auch andere Bedarfswerte übernommen werden. Aus dem Tiermodell wird der anfallende Wirtschaftsdünger auf Basis der Stickstoffexkretion der einzelnen Tierarten ermittelt. Der Stickstoffstrom über Nawaro-Biogassubstrate wird über externe Vorgaben zur Bioenergie einbezogen. Je nach Stickstoffbedarf und verwendeten Anrechnungsregeln für organische Stickstoffdünger wird der verbleibende Bedarf mit mineralischem Stickstoff gedeckt. Die Emissionsfaktoren für die Wirtschaftsdüngerausbringung können technologiebezogen über den betrachteten Szenario-Zeitraum verändert werden und so sich ändernde gesetzliche Vorgaben einbeziehen. Auf Ebene der Stickstoffflüsse kann die Gesamtbilanz als zentraler Umweltindikator in der Landwirtschaft ausgewiesen werden. Die folgende Abbildung stellt die wesentlichen Parameter des Teilmoduls der landwirtschaftlichen Böden dar.

Für die Ermittlung der direkten und indirekten Lachgasemissionen aus der landwirtschaftlichen Bodennutzung werden die Düngeranwendung (mineralische, sowie tierische und pflanzliche Wirtschaftsdünger), Erntereste, die Bewirtschaftung organischer Böden, Klärschlammasbringung und Exkremete aus der Weidehaltung berücksichtigt.

Energiebedingte Emissionen

Das Modul für die energiebezogenen Emissionen umfasst die mobile (Binnen- und Außenwirtschaft) und die stationäre Energienutzung. Hier werden für die Szenarien Annahmen zur Effizienz- und Energieeinsparung und der Wechsel auf regenerative Energieträger für die Landwirtschaft kombiniert. Mit Hilfe der im Inventar verwendeten Emissi-

onsfaktoren werden aus dem resultierenden neuen Energiemix die THG-Emissionen ermittelt. Die folgende Abbildung stellt die wesentlichen Parameter des Teilmoduls der Energienutzung dar.

Das Modell verwendet die aktuellen RMD-Daten des Thünen-Instituts, die für die Erstellung der THG-Inventarberichte des UBAs verwendet werden. Zudem werden Daten aus der aktuellen Statistik zu Grunde gelegt. Die RMD-Daten enthalten Angaben für fast alle Parameter bis zum Jahr 2030. Bei Umstellung der Daten auf eine neue Inventar-Submission werden die RMD-Daten des Thünen-Instituts zur Kalibrierung verwendet. Ebenso werden die Modellergebnisse z.B.: zur Nachfrage von Tierfuttermengen, Flächenbelegungen etc. mit der aktuellen Statistik abgeglichen. Damit können Fehlstellen identifiziert und behoben werden. Unsicherheiten durch kleine Abweichungen zur Statistik bleiben aber bestehen.

FABio-Land (LULUCF-Modell)

Am Öko-Institut liegt ein LULUCF-Modell (FABio-Land) als Excel-Anwendung vor, das bereits in zahlreichen Klimaschutzprojekten eingesetzt wurde und deutschlandweit Emissionen aus Quellen und Kohlenstofffestlegungen durch Senken im LULUCF-Sektor modelliert. In FABio-Land sind alle Landnutzungskategorien abgebildet, die in der deutschen Berichterstattung berücksichtigt sind: Wald, Ackerland, Grünland, Gehölze (Hecken etc.), terrestrische Feuchtgebiete, Gewässer, Torfabbau, Siedlung und sonstige Flächen. Die Flächen werden nach mineralischen und organischen Böden, sowie neuen Flächen (Übergangszeit 20 Jahre) und bestehenden Flächen (älter als 20 Jahre) differenziert. Als Kategorie ohne Flächenbezug werden langlebige Holzprodukte ausgewiesen. Zudem sind in FABio-Land weitere Flächenkategorien aufgenommen:

- Wiedervernässte Moorstandorte: Hier können für Acker- und Grünland auf organischen Böden und für Torfabbauf Flächen unterschiedliche Vernässungsintensitäten eingestellt werden (Abstufung in 10cm-Schritten).
- Agroforst und Kurzumtriebsplantagen: Ackerland auf mineralischen Böden kann in diese Kategorie umgewandelt werden.
- Aufforstung: Ackerland auf mineralischen Böden wird aufgeforstet.
- PV-Freiflächenanlagen: Auf Ackerland auf mineralischen Böden können PV-Freiflächenanlagen angelegt werden. Diese Flächen werden als Siedlungsfläche gewertet.
- Agri-PV-Flächen: Mit einer geringen Besatzdichte werden in Acker- und Grünlandflächen PV-Anlagen zugebaut.
- Moor-PV: Auf wiedervernässten Moorstandorten können zusätzlich PV-Anlagen installiert werden.

Die historischen Emissionsfaktoren zu den Flächenkategorien stammen aus den aktuellen CRF-Tabellen (UBA, NIR) und Flächenänderungskoeffizienten vom Thünen-Institut.⁷¹ Für die Flächenkategorie „wiedervernässte Moorstandorte“ werden die Emissionskoeffizienten je Wasserstufe aus Tiemeyer et al. (2020)⁷² angenommen.

Als Ausgangspunkt wird die historische Entwicklung der Flächennutzung (Flächenänderungskoeffizienten) und der zugehörigen Emissionen je Flächenkategorie (Emissionsfaktoren) in Deutschland fortgeschrieben. Dabei hat sich in bisherigen Arbeiten der Mittelwert der letzten fünf Jahre als sinnvoller Kompromiss zwischen der Nutzung aktueller Daten und der Vermeidung einer hohen Variabilität erwiesen. Um die Auswirkung von Maßnahmen in Szenarien zu modellieren, können auf dieser Basis durch ein Steuerungsmodul die Flächenänderungen einzelner Flächenkategorien angesteuert werden (z.B. Umbruchverbot für Grünland, anteilige Wiedervernässung von Ackerland auf organischen Böden). Zudem besteht die Möglichkeit, Emissionsfaktoren über die Zeitachse zu verändern (z.B. Änderung der Nutzung ohne Flächenumwandlung). So werden z.B. Änderungen in der Ackerbewirtschaftung (ökologischer Landbau, Kurzumtriebsplantagen, Fruchtfolgen mit Boden-C-Mehrern) in das Modell eingebracht.

Eine Ausnahme stellen die Emissionen für die Waldfläche und für langlebige Produkte dar, die nicht in FABio-Land modelliert, sondern über eine Schnittstelle als Ergebnisse aus externen Modellen eingelesen werden. So werden Ergebnisse aus FABio-Forest (siehe unten) in die LULUCF-Modellierung integriert, und unterschiedliche Wald-Szenarien können für die LULUCF-Szenarien ausgewählt werden.

Eine zweite Schnittstelle übergibt Daten zur Flächenentwicklung von Ackerland, Grünland, vernässten Flächen (inklusive Nutzungsmöglichkeit) und Flächen mit PV-Anlagen an das Agrarmodell, um eine Konsistenz zwischen den beiden Teilmodellen zu gewährleisten.

Über eine dritte Schnittstelle werden Informationen aus dem Agrarmodell an FABio-Land zurückgespielt, um eine konsistente Flächenkulisse (z.B. Erhöhung der Grünlandnutzung für Rinderbeweidung im ökologischen Landbau, Anlage von Agroforst/Kurzumtriebsplantagen, für Aufforstung frei werdender Ackerflächen) zu erreichen und um Emissionsfaktoren für Ackerland an Nutzungsänderungen der Flächen (Erhöhung des Bodenkohlenstoffs und/oder der lebenden Biomasse z.B. durch ökologischen Landbau, mehr Winterzwischenfrucht, etc.) anzupassen.

Berechnungen in FABio-Land erfolgen mit einer zeitlichen Auflösung von einem Jahr und reichen bis zum Jahr 2075.

Als wichtigste Ausgabeparameter von FABio-Land sind zu nennen:

- Flächenkulisse und Flächenänderungen (ha je Flächenkategorie)

⁷¹ Nicht veröffentlichte Daten des Thünen Instituts mit einer jährlichen Auflösung. Diese Daten sind notwendig, da in den CRF-Tabellen die Flächenänderungen für neue Flächen nur als 20-jähriges Mittel ausgewiesen werden.

⁷² Tiemeyer, B.; Freibauer, A.; Borraz, E. A.; Augustin, J.; Bechtold, M.; Beetz, S.; Beyer, C.; Ebli, M.; Eickenscheidt, T.; Fiedler, S.; Förster, Christoph, Gensior, Andreas; Giebels, M.; Glatzel, S. et al. (2020): A new methodology for organic soils in national greenhouse gas inventories: Data synthesis, derivation and application. In: Ecological Indicators 109. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1016/j.ecoind.2019.105838>.

- THG-Emissionen (Mio. t CO₂äq je Flächenkategorie)
- Abschätzung der Kosten für Maßnahmen zur Wiedervernässung von Mooren, Extensivierung der Waldbewirtschaftung und der Reduktion des Torfabbaus (eine Erweiterung auf andere Maßnahmen ist möglich).

FABio-Forest (Waldmodell)

Beschreibung

Im Detail wird das Modell in Böttcher et al. (2018)⁷³ und Pfeiffer et al. (2023)⁷⁴ beschrieben. Es basiert zum Stand der vorliegenden Ergebnisse vorrangig auf Daten der zweiten und dritten BWI und beschreibt das Wachstum einzelner durch die Inventuren erfassten Bäume als distanzunabhängiges Einzelbaumwachstumsmodell. Dabei werden die Bäume mit unterschiedlichen Eigenschaften, wie Art, Alter, Durchmesser, Höhe, etc. im Modell beschrieben und mittels Wachstumsfunktionen fortgeschrieben.

Das Modell beinhaltet Module für die Beschreibung des Kohlenstoffs in Holzprodukten, in der Streu und im Boden. Als konkrete Sub-Modelle sind in FABio implementiert⁷⁵:

- **Zuwachsmmodell:** Zuwachs einzelner Bäume in Abhängigkeit von Baumart, Durchmesser, Höhe, Konkurrenz und Standortbedingungen,
- **Einwuchsmmodell:** Einwuchs von im Bestand vorhandenen Baumarten sowie zufällig hinzukommende bzw. gezielt geförderte weitere Baumarten. Überprägung durch Durchforstung ist möglich,
- **Mortalitätsmodell:** Mortalität einzelner Bäume in Abhängigkeit von Baumart, Durchmesser, Alter, Konkurrenz, Standortbedingungen und Baumartenvielfalt sowie Ergänzungen durch jährlich vorliegende Mortalitätsdaten aus der Waldzustandserhebung (WZE),
- **Totholzmodell:** Entwicklung des Totholzvorrats (Input durch Erntereste und natürliche Mortalität sowie Zersetzung der Bäume im Zeitverlauf),
- **Boden-Kohlenstoff-Modell:** Simulierung des Abbaus von Kohlenstoff in Streu und Boden über die Zeit in Abhängigkeit von Klima und Streuqualität,
- **Holzprodukte-Modell:** Einteilung des zu erntenden Holzes in Verwendungsklassen und Berechnung von Kohlenstoffvorräten in Holzprodukten.
- **Holznachfrage-Modell:** Die Holzentnahme in FABio-Forest wird durch die Nachfrage nach Stamm- und Industrieholz für Nadel- und Laubbäume im Rahmen der Waldbewirtschaftungsregeln gesteuert. Eine nicht erfüllbare Nachfrage wird als Lücke ausgewiesen.

⁷³ Böttcher, H.; Hennenberg, K. J. & Winger, C. (2018). FABio-Waldmodell - Modellbeschreibung Version 0.54. Berlin. Available at <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/FABio-Wald-Modellbeschreibung.pdf>.

⁷⁴ Pfeiffer et al. (2023): Referenzszenario der Holzverwendung und der Waldentwicklung im UBA-Projekt BioSINK. Öko-Institut Working Paper 4/2023. Öko-Institut, Berlin. www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-Referenzszenario-BioSINK.pdf

⁷⁵ Siehe Details unter www.waldvision.de und Pfeiffer et al. (2023).

Mit Hilfe dieser Teilmodelle lassen sich die meisten relevanten Waldbau- und Waldbewirtschaftungsmaßnahmen mit Klimaschutzwirkung darstellen und quantifizieren. Dazu zählen insbesondere:

- Änderung der Holznachfrage
- Änderung der Durchforstungsintensität (Baumdurchmesser, Eingriffsstärke)
- Änderung in der Intensität der Zielstärkennutzung (Zieldurchmesser, Eingriffsstärke),
- Änderung der Extraktionsrate (Verbleib von Holz und Ernteresten im Wald),
- Änderung der Holzverwendung (energetische versus stoffliche Nutzung),
- Änderung der Baumart/Baumartenanteile

Als Indikatoren bzw. Ausgabevariablen werden in FABio momentan berechnet:

- Zuwachs der Bestände und Entwicklung des Holzvorrats
- CO₂-Speicherleistung: lebende Biomasse, Bodenkohlenstoff, Totholz und Holzprodukte. Die verwendeten Berechnungsmethoden genügen den IPCC-Anforderungen im LULUCF-Sektor.
- Bestandsstruktur (z.B. Höhenverteilung und Altersstruktur), Baumarten- und Durchmesserverteilung
- Totholzvorrat nach Artengruppen
- Holzentnahme nach Baumarten und Sortimenten (Holzprodukte)

Als zentrales Ergebnis aus FABio-Forest ist insbesondere die Berechnung der CO₂-Speicherleistung zu nennen, die in flächenbezogene Emissionsfaktoren umgerechnet wird, welche an das LULUCF-Modell FABio-Land übergeben werden.

Datengrundlage

Als zentrale Datengrundlage für die Beschreibung des Waldzustands, der Initialisierung und der Parametrisierung des Modells dient die Datenbank der BWI des Thünen-Instituts, die die Ergebnisse der Auswertung der BWI-2 (2002) und BWI-3 (2012) zusammenstellt (BWI-Ergebnisdatenbank unter: <https://bwi.info/>). Die BWI-3 stellt nach der BWI-2 die erste flächendeckende Erhebungswiederholung in Deutschland dar, die Aussagen über eine zeitliche Entwicklung des Waldes ermöglicht.

Das Inventurverfahren der Bundeswaldinventur basiert auf Stichproben in einem Basisnetz von 4 km mal 4 km Kantenlänge. In einigen Regionen wurde dieses Netz noch einmal auf 2,83 km mal 2,83 km, bzw. auf 2 km mal 2 km verdichtet. An jedem Knotenpunkt des Netzes (Trakt) wird ein Quadrat von 150 m mal 150 m gezogen. Die vier entstehenden Traktecken bilden die Aufnahmepunkte für die Inventur (sofern sie sich im Wald befinden). Insgesamt umfasst der BWI-Datensatz auf diese Weise mehr als 47.000 Traktecken auf denen Bäume stehen.

An den vier Traktecken eines jeden Netzknotens werden Baummerkmale wie Baumart, Brusthöhendurchmesser, Baumhöhe und Anzahl der Bäume über 7 cm Durchmesser durch eine Winkelzählprobe erfasst. Zudem werden umfangreiche Daten zu z.B. Totholz

(Totholztypen, Zersetzungsgrad, Durchmesserklassen), Habitaten (besonders geschützte Biotope) und Bäumen mit ökologisch bedeutsamen Strukturen (Biotopbäume wie Höhlenbäume) sowie Schutzgebieten und Nutzungseinschränkungen erfasst. Außerdem werden Merkmale wie Eigentumsart, Bundesland oder bestehende Nutzungseinschränkungen erhoben.

Zur Kalibrierung der Zuwächse im Zeitraum 2013-2017 werden Ergebnisse der Treibhausgasinventur aus dem Jahr 2017, Daten zur Holzentnahme aus der Einschlagsrückrechnung (ESRR, Thünen-Institut) und Daten zur Mortalität aus der Waldzustandserhebung (WZE, Thünen-Institut) herangezogen.

Aktuell werden bei einer Modellierung auf nationaler Ebene in einem Standardlauf 36.692 Traktecken verwendet. Je nach Fragestellung kann der in das Modell eingespeiste Datensatz angepasst werden. Der Stichprobenumfang der Bundeswaldinventur ist repräsentativ für den gesamten deutschen Wald und die meisten Länder. Ist die betrachtete Region allerdings zu klein oder die Fragestellung zu detailliert, dann leidet die Repräsentativität der Stichprobe, so dass Aussagen für kleinräumige Fragestellungen nicht zuverlässig getroffen werden können.

Optionen der Modelleinstellung

Im Modell werden die folgenden Modellparameter bzw. Unterscheidungsmerkmale für Managementoptionen dargestellt:

- Bundesländer: stellen nicht per se ein Unterscheidungsmerkmal für Waldbauoptionen dar, werden aber bereits bei der Datenausgabe vom Modell unterschieden, sind also bereits implementiert.
- Eigentumsarten: Es werden Privatwald (ohne Unterscheidung von klein oder groß wie in der BWI) und Staatswald (beinhaltet Körperschaftswald, Landeswald und Bundeswald) unterschieden.
- Baumarten: Es werden insgesamt 24 Baumartengruppen modelliert, deren Ergebnisse in der nachgeschalteten Auswertung standardmäßig zu neun Hauptartengruppen zusammengefasst werden (Eiche, Buche, andere Laubbäume hoher Lebensdauer, andere Laubbäume niedriger Lebensdauer, Fichte, Tanne, Douglasie, Kiefer, Lärche)
- Bestandstypen: zusätzlich zu den neun Baumartengruppen werden drei Bestandstypen unterschieden (Reinbestand, Mischung mit Dominanz von Laubbäumen, Mischung mit Nadelbäumen)
- Behandlungstypen (Waldbauphasen): Der Behandlungstyp unterscheidet Bestände in verschiedenen Entwicklungsphasen. Die Waldbauphasen werden mittels des Mediandurchmessers eines Bestands unterschieden und den jeweiligen Bestandstypen zugewiesen. Unterschieden werden:
 - Jungbestandspflege
 - Durchforstung
 - Vorratspflege
 - Nutzung