

Expertenrat
für Klimafragen

Zweijahresgutachten 2022

Gutachten zu bisherigen Entwicklungen der Treibhausgasemissionen,
Trends der Jahresemissionsmengen und Wirksamkeit von Maßnahmen
(gemäß § 12 Abs. 4 Bundes-Klimaschutzgesetz)



04. November 2022

Zweijahresgutachten 2022

Gutachten zu bisherigen Entwicklungen der Treibhausgasemissionen,
Trends der Jahresemissionsmengen und Wirksamkeit von Maßnahmen
(gemäß § 12 Abs. 4 Bundes-Klimaschutzgesetz)



Impressum

Geschäftsstelle Expertenrat für Klimafragen (ERK)

Seydelstr. 15, 10117 Berlin

Tel.: +49 30 8903 5575

info@expertenrat-klima.de

www.expertenrat-klima.de

Erschienen am 04.11.2022 | Version vom 10.11.2022

Die Veröffentlichungen des ERK sind unter www.expertenrat-klima.de kostenlos verfügbar.

Zur sprachlichen Gleichbehandlung: Als Mittel der sprachlichen Darstellung aller sozialen Geschlechter und Geschlechtsidentitäten wird in diesem Gutachten bei allen Bezeichnungen, die auf Personen bezogen sind, die Doppelpunktform (z. B. Leser:innen) verwendet.

Zitierweise für diese Publikation: ERK (2022): Zweijahresgutachten 2022. Gutachten zu bisherigen Entwicklungen der Treibhausgasemissionen, Trends der Jahresemissionsmengen und Wirksamkeit von Maßnahmen (gemäß § 12 Abs. 4 Bundes-Klimaschutzgesetz). Hg. v. Expertenrat für Klimafragen (ERK). Online verfügbar unter: <https://www.expertenrat-klima.de>

©Expertenrat für Klimafragen

Die Vervielfältigung und Verbreitung originären Text- und Bildmaterials des ERK ist, auch auszugsweise, mit Quellenangabe für nicht-kommerzielle Zwecke gestattet. Text- und Bildmaterial aus Quellen Dritter unterliegt den urheberrechtlichen Bedingungen der jeweiligen Quellen.



Expertenrat für Klimafragen

Prof. Dr. Hans-Martin Henning (Vorsitzender)

Dr. Brigitte Knopf (stellvertretende Vorsitzende)

Prof. Dr. Marc Oliver Bettzüge

Prof. Dr. Thomas Heimer

Dr. Barbara Schlomann

Die Ratsmitglieder bedanken sich für die sachkundige und engagierte Unterstützung durch die Mitarbeiter:innen des wissenschaftlichen Stabes und der Geschäftsstelle des ERK.

Wissenschaftlicher Stab

Dr. Jakob Peter (Generalsekretär) • Jessica Berneiser • Marc Blauert (Koordination) • Iska Brunzema • Nicolai Hans • Dr. Alexander Hurley • Dr. Katrin Kohnert • Robert Meyer • Nicole Niesler • Swaroop Rao • Dr. Niklas Reinfandt • Simon Schnier (Koordination) • Dr. Franziska Schulz • Charlotte Senkpiel • Dr. Jan Stede (Koordination) • Dr. Annette Steingrube • Pia Willers • Marie-Louise Zeller

Geschäftsstelle

Lea Eisemann • Cynthia Schmitt

Im Laufe der Erarbeitung dieses Gutachtens hat der Expertenrat für Klimafragen und der wissenschaftliche Stab zudem mit vielen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern sowie Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern unterschiedlicher Institutionen zusammengearbeitet:

Hans Georg Buttermann (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.), Jana Deurer (IREES), Dirk Günther (UBA), Prof. Dr. Wolfgang Eichhammer (Fraunhofer ISI), Dr. Daniela Fietze (Stiftung Umweltenergierecht), Dr. Tobias Fleiter (Fraunhofer ISI), Dr. Roland Fuß (Thünen-Institut für Agrarklimaschutz), Jakob Graichen (Öko-Institut), Gunter Grimm (Fraunhofer ISE), Dr. Christopher Hedemann (ehem. wiss. Stab ERK), Kristina Juhrich (UBA), Markus Kaiser (Fraunhofer ISE), Maximilian Langer (Fraunhofer ISE), Dr. Thomas Lauf (UBA), Prof. Dr. Andreas Löschel (Ruhr-Universität Bochum), Dr. Thorsten Müller (Stiftung Umweltenergierecht), Nils Namockel (EWI), Prof. Dr. Karsten Neuhoff (DIW), Thomas Nieder (ZSW), Stefan Ollendorf (KfW Bankengruppe), Priv.-Doz. Dr. Patrick Plötz (Fraunhofer ISI), Eva Rath (EWI), Prof. Dr.-Ing. Clemens Rohde (Fraunhofer ISI), Claus Rösemann (Thünen-Institut für Agrarklimaschutz), Dr. Artur Runge-Metzger (MCC), Dr. Wolf-Peter Schill (DIW, EVU), Hannah Scheuing (Stiftung Umweltenergierecht), Prof. Dr. Joachim Schleich (Fraunhofer ISI), Franka Sunder (Fraunhofer ISE), Eike Karola Velten (Ecologic), Dr. Eberhard von Rottenburg (BDI).

Der Expertenrat für Klimafragen dankt für die wertvolle Zusammenarbeit.

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung und Fazit	15
Zusammenfassung zentraler Ergebnisse	19
1 Auftrag und Herangehensweise	39
2 Beschreibung und Analyse bisheriger Entwicklungen	43
2.1 Sektorenübergreifende Betrachtung	43
2.1.1 Entwicklung der Treibhausgasemissionen	43
2.1.2 Dekompositionsanalyse	51
2.1.3 Diskussion von Ursachen der Entwicklung	53
2.2 Energiewirtschaft	61
2.2.1 Entwicklung der Treibhausgasemissionen	61
2.2.2 Dekompositionsanalyse	64
2.2.3 Diskussion von Ursachen der Entwicklung	67
2.3 Industrie	78
2.3.1 Entwicklung der Treibhausgasemissionen	78
2.3.2 Dekompositionsanalyse	79
2.3.3 Diskussion von Ursachen der Entwicklung	84
2.4 Gebäude	87
2.4.1 Entwicklung der Treibhausgasemissionen	87
2.4.2 Dekompositionsanalyse	89
2.4.3 Diskussion von Ursachen der Entwicklung	95
2.5 Verkehr	115
2.5.1 Entwicklung der Treibhausgasemissionen	115
2.5.2 Dekompositionsanalyse	116
2.5.3 Diskussion von Ursachen der Entwicklung	121
2.6 Landwirtschaft	135
2.6.1 Entwicklung der Treibhausgasemissionen	135
2.6.2 Dekompositionsanalyse	136
2.6.3 Diskussion von Ursachen der Entwicklung	141
2.6.4 Auswirkungen der Methodenänderung für die Berechnung direkter Lachgasemissionen auf die THG-Emissionen im Landwirtschaftssektor	147
2.7 Abfallwirtschaft und Sonstiges	149
2.7.1 Entwicklung der Treibhausgasemissionen	149

2.7.2	Diskussion von Ursachen der Entwicklung	151
2.8	LULUCF	153
2.8.1	Entwicklung der Treibhausgasemissionen	153
2.8.2	Diskussion von Ursachen der Entwicklung	155
3	Trendbetrachtungen zur Zielerreichung bis 2030	161
3.1	Klimaneutralitätsstudien als Referenzpunkte	162
3.2	Betrachtung ausgewählter Trends	164
3.2.1	Sektorenübergreifende Entwicklungen	164
3.2.2	Energiewirtschaft	165
3.2.3	Industrie	171
3.2.4	Gebäude	177
3.2.5	Verkehr	181
3.2.6	Landwirtschaft	184
3.2.7	Abfallwirtschaft und Sonstiges	185
3.2.8	LULUCF	187
4	Betrachtungen zu klimapolitischen Maßnahmen und ihrer Wirksamkeit	189
4.1	Analyse klimapolitischer Instrumente im Zeitraum 2000 bis 2022	189
4.2	Betrachtungen zur Wirksamkeit	196
4.3	Diskussion und Ausblick	201
5	Weiterführende Betrachtungen	207
5.1	Indikatoren für Monitoring und Governance von Klimazielen	207
5.1.1	Die Funktion von Indikatoren für Monitoring und Governance in anderen Ländern	210
5.1.2	Umsetzung und Prozess	212
5.2	Anmerkungen zur Datenverfügbarkeit	213
6	Anhang	217
A.1	Temperaturbereinigung	217
A.2	Dekomposition	218
A.3	Ergänzende Ergebnisdarstellungen	227
7	Literaturverzeichnis	231

Abbildungen

Abbildung Z1: Dekomposition der sektorenübergreifenden THG-Emissionen - Aggregierte Betrachtung 2000-2010, 2010-2017 und 2017-2020 (Daten für Gebäudesektor temperaturbereinigt)	21
Abbildung Z2: Entwicklung der Anzahl Wärmepumpen und des Anteils der fossilen Heizstruktur im Vergleich zur politischen Zielsetzung sowie den Zielkorridoren der „Big 5“-Studien	32
Abbildung Z3: Mögliche von der Politik beeinflussbare Handlungsfelder und -optionen zur Treibhausgasminderung	34
Abbildung Z4: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Funktionen und Anforderungen an Indikatoren	36
Abbildung 5: Entwicklung der deutschen THG-Emissionen im Zeitraum 2000-2021 in den einzelnen Sektoren nach Bundes-Klimaschutzgesetz	44
Abbildung 6: Entwicklung der deutschen THG-Emissionen im Zeitraum 2000-2021 aufgeschlüsselt in die verschiedenen Treibhausgase	45
Abbildung 7: Prozentuale Veränderung der erfassten Treibhausgase	46
Abbildung 8: Pro Kopf THG-Emissionen im Zeitraum von 2000 bis 2020 und die Zunahme der Weltbevölkerung (Basisjahr = 2000)	48
Abbildung 9: Deutsche CO ₂ -Emissionen – Produktions- und konsumbasiert	50
Abbildung 10: Dekomposition der sektorenübergreifenden THG-Emissionen - Änderungen im Vergleich zu 2000	51
Abbildung 11: Dekomposition der sektorenübergreifenden THG-Emissionen - Aggregierte Betrachtung 2000-2010, 2010-2017 und 2017-2020 (Daten für Gebäudesektor temperaturbereinigt)	52
Abbildung 12: Primärenergieverbrauch nach Energieträgern für die Jahre 2000 bis 2020	54
Abbildung 13: Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Endenergieproduktivität für die Jahre 2000 bis 2020	58
Abbildung 14: Entwicklung der THG-Emissionen des Sektors Energiewirtschaft nach Bundes-Klimaschutzgesetz im Zeitraum 2000-2021	62
Abbildung 15: Jährliche Schwankungen der produzierten Strommenge aus erneuerbaren Energieträgern in Prozent von der Bruttostromerzeugung im Vergleich zum langjährigen Mittel aufgrund des Wetterdargebots	63
Abbildung 16: Dekomposition der THG-Emissionen der Energiewirtschaft - Änderungen im Vergleich zu 2000	64
Abbildung 17: Dekomposition der THG-Emissionen der Energiewirtschaft - Aggregierte Betrachtung 2000-2010, 2010-2017 und 2017-2020	66
Abbildung 18: Bruttostromerzeugungskapazitäten (installierte Leistung in GW) nach Energieträgern über den Zeitraum von 2000 bis 2021	68

Abbildung 19: Entwicklung der CO ₂ -Emissionen des deutschen Strommix nach Energieträgern und dem korrespondierenden CO ₂ -Äq. Emissionsfaktor (ohne Vorketten) für den Zeitraum von 2000 bis 2021	71
Abbildung 20: Bruttostromerzeugung in Deutschland in TWh nach Energieträgern für den Zeitraum von 2000 bis 2021	72
Abbildung 21: Anteil der erneuerbaren Energieträger in der Bruttostrom- und Bruttowärmeerzeugung der Jahre 2000 bis 2020	74
Abbildung 22: Zusammensetzung des Strompreises eines 3-Personen-Haushaltes mit einem Jahresverbrauch von 3 500 kWh in den Jahren 2000 und 2020.....	75
Abbildung 23: Jährliche Außenhandelsstatistik für den elektrischen Stromaustausch in Deutschland und die Preisentwicklung der europäischen Emissionszertifikate im Zeitraum von 2006 bis 2021	77
Abbildung 24: Entwicklung der THG-Emissionen im Industriesektor	79
Abbildung 25: Dekomposition der THG-Emissionen aus der Brennstoffverbrennung in der Industrie - Änderungen im Vergleich zum Basisjahr 2000.....	80
Abbildung 26: Dekomposition der THG-Emissionen aus der Brennstoffverbrennung in der Industrie - Aggregierte Betrachtung 2000-2010 und 2010-2020.....	81
Abbildung 27: Dekomposition der prozess- und produktbedingten THG-Emissionen in der Industrie - Änderungen im Vergleich zum Referenzjahr 2000	82
Abbildung 28: Dekomposition der prozess- und produktbedingten THG-Emissionen in der Industrie - Aggregierte Betrachtung 2000-2010 und 2010-2020.....	83
Abbildung 29: Entwicklung der THG-Emissionen im Industriesektor aufgeteilt nach im ETS und nicht im ETS enthaltenen Emissionen und zugehöriger CO ₂ -Preis.....	85
Abbildung 30: Entwicklung der THG-Emissionen des Sektors Gebäude nach Bundes-Klimaschutzgesetz im Zeitraum 2000-2021	88
Abbildung 31: Dekomposition der THG-Emissionen von Gebäuden privater Haushalte - Änderungen im Vergleich zu 2000	89
Abbildung 32: Dekomposition der THG-Emissionen von Gebäuden privater Haushalte - aggregierte Betrachtung 2000-2010, 2010-2017 und 2017-2020 (Daten temperaturbereinigt).....	90
Abbildung 33: Dekomposition der THG-Emissionen von Gebäuden in GHD (Gewerbe, Handel, Dienstleistungen) - Änderungen im Vergleich zu 2000	93
Abbildung 34: Dekomposition der THG-Emissionen von Gebäuden in GHD (Gewerbe, Handel, Dienstleistungen) - aggregierte Betrachtung 2000-2010 und 2010-2020 (Daten temperaturbereinigt)	94
Abbildung 35: Entwicklung der Beheizungsstruktur im deutschen Wohngebäudebestand von 2000 bis 2020	97
Abbildung 36: Jährliche Absatzzahlen Wärmeerzeuger, Marktentwicklung Deutschland 2000 bis 2021	98
Abbildung 37: Entwicklung des Endenergieverbrauchs erneuerbarer Energieträger für Wärme und Kälte	99

Abbildung 38: Entwicklung der Förderzusagen für Wohngebäude in den Jahren 2015-2021 (Energieeffizienter Neubau und energieeffiziente Sanierung inkl. Einzelmaßnahmen)...	101
Abbildung 39: Entwicklung des Anteils der geförderten Effizienzhäuser im Wohngebäude Neubau	102
Abbildung 40: Entwicklung der Brutto-Fördereffizienz für Neubau und Sanierung von Wohngebäuden in den Jahren 2015 bis Q1 2021	103
Abbildung 41: Häufigkeitsverteilung der Effizienzklassen nach Endenergiebedarf des deutschen Wohngebäudebestands	104
Abbildung 42: Endenergiebedarf nach Baualtersklassen sowie Entwicklung der Mindestanforderungen durch WSchV und EnEV	105
Abbildung 43: Überblick über Einführungen und Novellierungen der Wärmeschutzverordnung, Heizungsanlagenverordnung und der Energieeinsparverordnung	106
Abbildung 44: Entwicklung des Endenergieverbrauchs privater Haushalte für Raumwärme und Warmwasser, temperaturbereinigt	109
Abbildung 45: Entwicklung der realen Endverbraucherpreise für Heizöl, Erdgas, Strom und Fernwärme	110
Abbildung 46: Mittlerer Endenergiebedarf von Nichtwohngebäuden nach Baualtersklasse	113
Abbildung 47: Entwicklung der THG-Emissionen des Sektors Verkehr nach Bundes-Klimaschutzgesetz im Zeitraum 2000-2021	115
Abbildung 48: Dekomposition der THG-Emissionen vom Pkw-Verkehr - Änderungen im Vergleich zu 2000	116
Abbildung 49: Dekomposition der THG-Emissionen vom Pkw-Verkehr – aggregierte Betrachtung der Zeiträume 2000-2010, 2010-2019 sowie 2019-2020	117
Abbildung 50: Dekomposition der THG-Emissionen des Lkw-Güterverkehrs - Änderungen im Vergleich zu 2000	119
Abbildung 51: Dekomposition der THG-Emissionen vom Lkw-Güterverkehr – Aggregierte Betrachtung der Zeiträume 2000-2010, 2010-2019 sowie 2019-2020	120
Abbildung 52: Biomasse in Terrajoule in der CRF-Kategorie 1.A.3.b.i und die Emissionsintensität der Dekomposition	122
Abbildung 53: Durchschnittsverbrauch der in Deutschland zugelassenen Pkw bis 2020	123
Abbildung 54: Entwicklung der durchschnittlichen amtlichen und realen CO ₂ -Emissionen neu zugelassener Pkw in Europa	125
Abbildung 55: Entwicklung durchschnittliche Leermasse und Motorisierung von Neuzulassungen in Deutschland bis 2021	126
Abbildung 56: Anteil der Kraftstoffarten an Pkw-Neuzulassungen in Deutschland bis 2021	128
Abbildung 57: Entwicklung Personenverkehr: motorisierte Verkehrsleistung nach Transportmittel	129
Abbildung 58: Durchschnittlicher Preis für Superbenzin in Cent pro Liter inkl. Abgaben & Steuern	131
Abbildung 59: Biomasse in TJ in der CRF-Kategorie 1.A.3.b.iii	134
Abbildung 60: Güterverkehrsleistung in Tkm	135

Abbildung 61: Entwicklung der THG-Emissionen des Sektors Landwirtschaft nach Bundes-Klimaschutzgesetz im Zeitraum 2000-2021	136
Abbildung 62: Dekomposition der THG-Emissionen von landwirtschaftlich genutzten Flächen - Änderungen im Vergleich zu 2000	137
Abbildung 63: Dekomposition der THG-Emissionen von landwirtschaftlich genutzten Flächen - Aggregierte Betrachtung 2000-2010 und 2010-2020	138
Abbildung 64: Dekomposition der THG-Emissionen der Nutztierhaltung in der Landwirtschaft - Änderungen im Vergleich zu 2000	139
Abbildung 65: Dekomposition der THG-Emissionen der Nutztierhaltung in der Landwirtschaft - Aggregierte Betrachtung 2000-2010 und 2010-2020	140
Abbildung 66: Verbrauch von synthetischem Stickstoffdünger und Verlauf der Lachgasemissionen aufgeteilt in THG-Emissionen, die durch Wirtschaftsdünger und synthetischen Dünger bedingt sind	141
Abbildung 67: Entwicklung der Tierzahlen für ausgewählte Nutztierarten.....	142
Abbildung 68: Entwicklung der Anzahl der Milchkühe und der CH ₄ -Emissionen aus der Milchkuhhaltung	143
Abbildung 69: Milcherzeugung und Milchleistung.....	144
Abbildung 70: THG-Emissionen resultierend aus dem Außenhandelssaldo von Rind/Kalbfleisch bzw. Schweinefleisch, sowie die verrechneten Netto-Emissionen durch den Handel mit diesen beiden Fleischarten	146
Abbildung 71: Änderungen der N ₂ O-Emissionen im Landwirtschaftssektor für exemplarische Jahre auf Grund geänderter Berechnungsmethoden	148
Abbildung 72: Auswirkungen des Ausgleichsmechanismus auf die Jahresemissionsziele im Sektor Landwirtschaft	149
Abbildung 73: Entwicklung der THG-Emissionen des Sektors Abfallwirtschaft und Sonstiges nach Bundes-Klimaschutzgesetz im Zeitraum 2000-2021	150
Abbildung 74: Entwicklung der Ablagerungsquote für Siedungsabfälle und die Entwicklung der THG-Emissionen aus Abfalldeponierung (CRF 5.A) im Zeitraum 2000-2020	152
Abbildung 75: Entwicklung der THG-Emissionen des Sektors LULUCF nach Bundes-Klimaschutzgesetz im Zeitraum 2000-2021	154
Abbildung 76: Zeitreihe der THG-Emissionen im LULUCF-Sektor aufgeteilt nach Kohlenstoff-Pools.....	155
Abbildung 77: Holzeinschlag nach Baumart und insgesamt für den Zeitraum von 2000 bis 2021	156
Abbildung 78: Schadholzeinschlag in Deutschland nach Ursachen.....	156
Abbildung 79: Prozentuale Nutzung von Moorböden in Deutschland.....	157
Abbildung 80: THG-Emissionen aus Moorböden aufgegliedert in Landnutzungskategorien	158
Abbildung 81: Sektorenübergreifende THG-Emissionen - Rückblick, Projektion und Zielwertevergleich ...	164
Abbildung 82: THG-Emissionen im Sektor Energiewirtschaft – Rückblick, Projektion und Zielwertevergleich	166

Abbildung 83: Entwicklung der installierten Leistung der Photovoltaik im Vergleich zur politischen Zielsetzung sowie den Zielkorridoren der „Big 5“-Studien	167
Abbildung 84: Entwicklung der Installierten Leistung von Wind an Land im Vergleich zur politischen Zielsetzung sowie den Zielkorridoren der „Big 5“-Studien	168
Abbildung 85: Entwicklung der Installierten Leistung von Wind auf See im Vergleich zur politischen Zielsetzung sowie den Zielkorridoren der „Big 5“-Studien	169
Abbildung 86: Entwicklung des Anteils der Erneuerbaren Energieträger am Bruttostromverbrauch im Vergleich zur politischen Zielsetzung sowie den Zielkorridoren der „Big 5“-Studien	170
Abbildung 87: THG-Emissionen im Sektor Industrie - Rückblick, Projektion und Zielwertevergleich	171
Abbildung 88: Entwicklung des Anteils der fossilen Energieträger am Endenergieverbrauch der Industrie im Vergleich zu den Zielkorridoren der „Big 5“-Studien	172
Abbildung 89: Entwicklung der absoluten Werte der fossilen Energieträger des Endenergieverbrauchs der Industrie im Vergleich zu den Zielkorridoren der „Big 5“-Studien	173
Abbildung 90: Entwicklung des Anteils von Strom am Endenergieverbrauch der Industrie im Vergleich zu den Zielkorridoren der „Big 5“-Studien	174
Abbildung 91: Entwicklung des Anteils von Erdgas am Endenergieverbrauch der Industrie im Vergleich zu den Zielkorridoren der „Big 5“-Studien	175
Abbildung 92: Entwicklung der absoluten Werte ausgewählter Energieträger des Endenergieverbrauchs der Industrie sowie die entsprechenden modellierten Datenpunkte 2025 und 2030 aus dem Szenario CO ₂ -Preissprung und beschleunigter Anlagentausch	176
Abbildung 93: THG-Emissionen im Sektor Gebäude - Rückblick, Projektion und Zielwertevergleich	177
Abbildung 94: Entwicklung des Bestands der Wärmepumpen im Vergleich zur politischen Zielsetzung sowie den Zielkorridoren der „Big 5“-Studien	178
Abbildung 95: Entwicklung des Anteils der fossilen Heizstruktur im Vergleich zu den Zielkorridoren der „Big 5“-Studien	179
Abbildung 96: Entwicklung des Anteils der Erneuerbaren Energieträger am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte im Vergleich zur politischen Zielsetzung	180
Abbildung 97: THG-Emissionen im Sektor Verkehr - Rückblick, Projektion und Zielwertevergleich	181
Abbildung 98: Entwicklung des Bestands an Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb im Vergleich zur politischen Zielsetzung sowie den Zielkorridoren der „Big 5“-Studien	182
Abbildung 99: Entwicklung des Bestands an Fahrzeugen mit fossilem Antrieb im Vergleich zu den Zielkorridoren der „Big 5“-Studien	183
Abbildung 100: Entwicklung des Anteils des Schienengüterverkehrs an der Güterverkehrsleistung im Vergleich zur politischen Zielsetzung sowie den Zielkorridoren der „Big 5“ Studien	184
Abbildung 101: THG-Emissionen im Sektor Landwirtschaft - Rückblick, Projektion und Zielwertevergleich	185
Abbildung 102: THG-Emissionen im Sektor Abfallwirtschaft - Rückblick, Projektion und Zielwertevergleich	186
Abbildung 103: THG-Emissionen im Sektor LULUCF- Rückblick, Projektion und Zielwertvergleich	187

Abbildung 104: Grundsätzliche Handlungsfelder zur Minderung von THG-Emissionen, die von der Politik beeinflusst werden können	191
Abbildung 105: Wesentliche klimapolitische Programme und Instrumente in der Periode 2000 bis 2009 ..	192
Abbildung 106: Wesentliche klimapolitische Programme und Instrumente in der Periode 2010 bis 2019/2020	194
Abbildung 107: Wesentliche klimapolitische Programme und Instrumente in der Periode 2020 bis 2022 ..	196
Abbildung 108: Berichtspflichten der Bundesregierung auf nationaler und europäischer Ebene	197
Abbildung 109: Gegenüberstellung der THG-Minderungsziele für 2020 und 2030 und der in den Projektionsberichten (MMS) 2009-2021 jeweils abgeschätzten Entwicklung der THG-Emissionen	199
Abbildung 110: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Funktionen und Anforderungen an Indikatoren	208
Abbildung 111: Übersicht über Funktionen und Anforderungen an Indikatoren in ausgewählten anderen Ländern	211
Abbildung 112: Dekomposition der sektorenübergreifenden THG-Emissionen - Änderungen im Vergleich zum Vorjahr	227
Abbildung 113: Dekomposition der THG-Emissionen der Energiewirtschaft - Änderungen im Vergleich zum Vorjahr	227
Abbildung 114: Dekomposition der THG-Emissionen von der Energetischen Nutzung von Brennstoffen in der Industrie - Änderungen im Vergleich zum Vorjahr	228
Abbildung 115: Dekomposition der THG-Emissionen von Industrieprozessen - Änderungen im Vergleich zum Vorjahr	228
Abbildung 116: Dekomposition der THG-Emissionen von Gebäuden in GHD (Gewerbe, Handel, Dienstleistungen) - Änderungen im Vergleich zum Vorjahr	228
Abbildung 117: Dekomposition der THG-Emissionen von Gebäuden privater Haushalte - Änderungen im Vergleich zum Vorjahr	229
Abbildung 118: Dekomposition der THG-Emissionen von Pkw - Änderungen im Vergleich zum Vorjahr	229
Abbildung 119: Dekomposition der THG-Emissionen von Lkw - Änderungen im Vergleich zum Vorjahr	229
Abbildung 120: Dekomposition der THG-Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden - Änderungen im Vergleich zum Vorjahr	230
Abbildung 121: Dekomposition der THG-Emissionen der Nutztierhaltung in der Landwirtschaft - Änderungen im Vergleich zum Vorjahr	230

Tabellen

Tabelle 1:	Überblick über die betrachteten Klimaneutralitätsstudien 2045	163
Tabelle 2:	Evaluationen zum Aktionsplan Klimaschutz 2020	200
Tabelle 3:	Berechnungsgrundlage und Datenquellen der Dekomposition – Sektorenübergreifend...	219
Tabelle 4:	Berechnungsgrundlage und Datenquellen der Dekomposition – Energiewirtschaft.....	220
Tabelle 5:	Berechnungsgrundlage und Datenquellen der Dekomposition – Industrie	222
Tabelle 6:	Berechnungsgrundlage und Datenquellen der Dekomposition – Wohngebäude und GHD	223
Tabelle 7:	Berechnungsgrundlage und Datenquellen der Dekomposition – Personen- und Güterverkehr	224
Tabelle 8:	Berechnungsgrundlage und Datenquellen der Dekomposition - Landwirtschaft Nutztiere/landwirtschaftliche Böden	226

Abkürzungen

AbfAbIV	Abfallablagerungsverordnung
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
APEE	Anreizprogramm Energieeffizienz
APK	Aktionsprogramm Klimaschutz
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BBPIG	Gesetz über den Bundesbedarfsplan
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BEG	Bundesförderung für effiziente Gebäude
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz (Gesetz über einen nationalen Zertifikatehandel für Brennstoffemissionen)
BEV	Batterieelektrische Fahrzeuge (Battery Electric Vehicles)
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (ehem. BMU)
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (ehem. BMWi)
BWS	Bruttowertschöpfung
BZL	Bundesinformationszentrum Landwirtschaft
CH ₄	Methan
CNG	Erdgas (Compressed Natural Gas)
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ -Äq.	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
CRF	Common Reporting Format der Europäischen Klimaberichtserstattung
DeGEval	Gesellschaft für Evaluation e.V.
DEHSt	Deutsche Emissionshandelsstelle
DePV	Deponieverordnung
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
DWD	Deutscher Wetterdienst
EBS	Energieeffizientes Bauen und Sanieren
EEA	Europäische Energieagentur (European Energy Agency)

EEB	Endenergiebedarf
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEV	Endenergieverbrauch
EEW	Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
EFZH	Ein- und Zweifamilienhäuser
EKF	Energie- und Klimafonds
EnEG	Energieeinsparungsgesetz
EnergieStG	Energiesteuergesetz
EnergieStV	Energiesteuer-Durchführungsverordnung
EnEV	Energieeinsparverordnung
EnSikuMaV	Verordnung zur Sicherung der Energieversorgung über kurzfristig wirksame Maßnahmen (Kurzfristenergieversorgungssicherungsmaßnahmenverordnung)
EnSimiMaV	Verordnung zur Sicherung der Energieversorgung über mittelfristig wirksame Maßnahmen (Mittelfristenergieversorgungssicherungsmaßnahmenverordnung)
ERK	Expertenrat für Klimafragen
ESR	Lastenteilungsverordnung (Effort Sharing Regulation)
EU	Europäische Union
EU-ETS	EU-Emissionshandelssystem/Handelssystem Emissionszertifikate (European Emissions Trading System)
F-Gase	Fluorierte Treibhausgase
GAK	Gemeinschaftsaufgabe Agrarstruktur und Küstenschutz
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistung
GW	Gigawatt
GWh	Gigawattstunde
GWP	Treibhausgaspotenzial (Global Warming Potential)
HeizAnlV	Heizungsanlagen-Verordnung
HeizBetrV	Heizungsbetriebsverordnung
HFKW	Teilfluorierte Kohlenwasserstoffe
ICCT	International Council on Clean Transportation
IDA	Indexdekompositionsanalyse
IEEKN	Initiative Energieeffizienz- und Klimaschutznetzwerke
IEKP	Integriertes Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung

IPCC	Weltklimarat oder Intergovernmental Panel on Climate Change
ITMS	Integriertes Treibhausgas-Monitoringsystem
KBA	Kraftfahrtbundesamt
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KMU	Klein- und Mittelständische Unternehmen
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
KVBG	Kohleverstromungsbeendigungsgesetz
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
Lkw	Lastkraftwagen
LPG	Flüssiggas (Liquified Petroleum Gas)
LULUCF	Land Use Land Use Change and Forestry
MAP	Marktanreizprogramm
MFH	Mehrfamilienhaus
MMS	Mit-Maßnahmen-Szenario
MwSt.	Mehrwertsteuer
N	Stickstoff
N ₂ O	Lachgas
NAPE	Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
nEHS	nationales Emissionshandelssystem
NF ₃	Stickstofffluorid
NIB	Nationaler Inventarbericht
NIP	Nettoinlandsprodukt
NMVOC	Flüchtige Organische Verbindungen ohne Methan
NO _x	Stickoxide
NWG	Nichtwohngebäude
PEV	Primärenergieverbrauch
PFC	Perfluorcarbone
Pkw	Personenkraftwagen
PV	Photovoltaik

SF ₆	Schwefelhexafluorid
SO ₂	Schwefeldioxid
SUV	Sport Utility Vehicle
THG	Treibhausgas
Tkm	Tonnenkilometer
TWh	Terawattstunde
UBA	Umweltbundesamt
UNFCCC	Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen
WLTP	Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure
WSchV	Wärmeschutzverordnung
ZLEV	Zero und Low Emission Vehicle

Kurzzusammenfassung und Fazit

Gemäß dem Auftrag im Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) legt der Expertenrat für Klimafragen in diesem Jahr erstmals ein Gutachten zu bisherigen Entwicklungen der Treibhausgasemissionen, Trends bezüglich der sektoralen Emissionen und Wirksamkeit von Maßnahmen mit Blick auf die Zielerreichung nach diesem Gesetz vor. Das Gutachten ist ab dem Jahr 2022 für alle zwei Jahre vorgesehen.

Entwicklungen der Treibhausgasemissionen

In den durchgeführten historischen Analysen werden die Jahre von 2000 bis 2021 betrachtet, in denen eine Treibhausgasemissionsminderung um 26,6 % bzw. temperaturbereinigt um 27,3 % stattgefunden hat.¹ Dabei hat über den gesamten Zeitverlauf vor allem die Wirtschaftsentwicklung emissionssteigernd gewirkt. Minderungsbeiträge sind dagegen von Verbesserungen der Energieintensität, der Energieeffizienz im Umwandlungssektor und der Emissionsintensität der Volkswirtschaft ausgegangen – also sowohl der Effizienz der Energiebereitstellung und -nutzung als auch der Emissionen der bereitgestellten Energie.

Die Sektoren Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude und Verkehr machten im Jahr 2021 gemeinsam rund 90 % der Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) aus, die verbleibenden rund 10 % entfallen auf Landwirtschaft sowie Abfallwirtschaft und Sonstige. In den meisten Sektoren lassen sich zwei oder drei Phasen der Treibhausgasentwicklung identifizieren: Die Phase von 2000 bis 2010, die Phase von 2010 bis 2017 oder 2019 und die restlichen Jahre bis 2021, die zum Teil stark von den Sondereffekten rund um die Covid-19-Pandemie bestimmt waren. Der Energiesektor trägt mengenmäßig fast die Hälfte der gesamten Emissionsminderung im Zeitraum von 2000 bis 2021 bei.

Die Emissionen des Energiesektors lagen im Jahr 2021 um 36 % niedriger als der Wert im Jahr 2000, wobei diese Minderung nahezu vollständig in der zweiten Phase von 2010 bis 2021 erfolgte. Ähnlich hoch liegt mit 35 % die Minderung im Gebäudesektor, wobei hier die Reduktion weitgehend in der Periode von 2000 bis 2010 stattfand; diese Angaben gelten bei Heranziehung der temperaturbereinigten Daten. In den Sektoren Verkehr und Industrie ist dagegen die Minderung wesentlich geringer (13 % für Industrie bzw. 18 % für Verkehr) und auch hier erfolgte der überwiegende Teil der Minderung in der ersten Phase von 2000 bis 2010. Danach kam es eher zur Stagnation und zwischenzeitlich bis zum Jahr 2017 sogar wieder zu Emissionssteigerungen.

Trends bezüglich der sektoralen Emissionen (Jahresemissionsmengen)

Während der langfristige Trend (abgeleitet auf Basis der Entwicklung von 2000 bis 2021) in allen Sektoren auf sinkende THG-Emissionen bis zum Jahr 2030 hinweist, zeigen sich bei Industrie und Verkehr in der Trendfortschreibung der Entwicklung der letzten Jahre vor der Covid-19-Pandemie (2010 bis 2019) ansteigende Emissionen. Generell reichen die bisherigen Emissions-Reduktionsraten bei weitem nicht aus, um die Klimaschutzziele für das Jahr 2030 zu erreichen – weder in der Summe noch in den einzelnen Sektoren. Bei den Gesamtemissionen müsste sich die durchschnittliche Minderungsmenge pro Jahr im Zeitraum von 2022 bis 2030 im Vergleich zur historischen Entwicklung im Zeitraum von 2011 bis 2021 mehr als verdoppeln. Im Industriesektor wäre etwa eine 10-fache und beim Verkehr sogar eine 14-fache Erhöhung der durchschnittlichen Minderungsmenge pro Jahr notwendig. Auch mit den bis zum Jahr 2021

¹ Die folgenden Zahlen beziehen sich immer auf temperaturbereinigte Daten. Dabei wirkt sich die Temperaturbereinigung ausschließlich auf den Gebäudesektor aus.

implementierten Politikinstrumenten wird laut Projektionsbericht der Bundesregierung in keinem Sektor das Sektorziel und auch nicht das Gesamtziel im Jahr 2030 erreicht.

Die notwendige Beschleunigung bei der Emissionsminderung wird politisch im Koalitionsvertrag adressiert. Schwerpunkt sind dabei stark erhöhte Ausbauziele eines CO₂-armen Kapitalstocks², insbesondere von Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energieträger sowie der verstärkten Stromnutzung in Gebäuden, Verkehr und Industrie. Allerdings zeigt sich in der Trendbetrachtung, dass das Ausbautempo bei Solar- und Windenergieanlagen, Wärmepumpen oder der Elektromobilität bei weitem noch nicht ausreichend ist, um diese Ausbauziele zu erreichen. Dabei müsste eine solche Ausbauanstrengung enorme Herausforderungen bewältigen. Zudem ist im gleichen Maße der Abbau des fossilen Kapitalstocks im Gebäude- oder Verkehrssektor, beispielsweise von Öl- und Gasheizungen oder des fossilen Pkw-Bestands, notwendig. Diese Trendwende hin zum Abbau des fossilen Kapitalstocks findet derzeit nicht ausreichend statt. Gelingt es nicht, den schnellen Umbau zu realisieren, wird ein Erreichen der Klimaziele nur möglich sein, wenn andere Hebel, wie zum Beispiel ein Rückgang der Aktivitäten beispielsweise mit entsprechender Änderung im Konsumverhalten, stärker adressiert werden.

Die Auswirkungen der derzeitigen Energiepreiskrise auf die Entwicklungen der THG-Emissionen und damit auf die Zielerreichung für das Jahr 2030 können bisher noch nicht belastbar abgeschätzt werden. Sie werden sich in den Sektoren aber unterschiedlich auswirken.

Um Trends systematischer abzuschätzen und Regierungshandeln auf Basis umfassenderer und besser abgesicherter Informationen aufzubauen, braucht es ein besseres Monitoring der Entwicklung in den einzelnen Sektoren. Hier können geeignete Indikatoren (ex post und ex ante) einen wichtigen Beitrag zur Transparenz und frühzeitigem und zielgerichtetem Nachsteuern leisten.

Wirksamkeit von Maßnahmen mit Blick auf die Zielerreichung

Die nationale Klimaschutzpolitik der vergangenen zwei Jahrzehnte war von einer großen Vielfalt und wachsenden Anzahl der verwendeten Instrumente und einer hohen Dynamik von deren Weiterentwicklung gekennzeichnet. Dabei stand im ersten Jahrzehnt tendenziell die Einführung ökonomisch und ordnungsrechtlich ausgerichteter Instrumente im Vordergrund, während im zweiten Jahrzehnt insbesondere Förderprogramme hinzukamen. Letztgenannte Instrumente zielten (und zielen) insbesondere auf die Verbesserung der technischen Effizienz auf Bereitstellungs- und Nutzungsebene. Über den gesamten Zeitraum war das Erneuerbare-Energien-Gesetz als zentrales Element zum Aufbau eines neuen, nicht-fossilen Kapitalstocks wirksam; auch dieses Gesetz wurde kontinuierlich weiterentwickelt. Nach der im Jahr 1999 eingeführten Ökologischen Steuerreform wurde erstmals wieder mit dem Brennstoff-Emissions-Handelsgesetz im Jahr 2021 ein Instrument auf nationaler Ebene eingeführt, das direkt den Energiepreis als Steuerungsinstrument adressiert. Überlagert war der nationale Rahmen durch europäische Instrumente, insbesondere den EU-ETS, und nach dem Jahr 2007 auch vermehrt durch ordnungsrechtliche Vorgaben, woraus gegenseitige, oftmals nicht intendierte, Wechselwirkungen resultierten. Zudem hat es immer wieder auch Politikanreize gegeben, die eher emissionsfördernd wirkten.

Die Betrachtung zeigt, dass i) bislang praktisch keine Maßnahmen implementiert wurden, die unmittelbar (und nicht vermittelt über ökonomische Mengen- oder Preissteuerungen) auf eine Reduktion der Aktivitäten und die Vermeidung von Rebound-Effekten abzielten, wie z. B. Änderungen im Konsumverhalten, ii) Instrumente, die auf den Aufbau des neuen Kapitalstocks zielten, in vielen Fällen keine Gewähr boten, dass

² Mit dem Kapitalstock sind in diesem Bericht verallgemeinernd alle diejenigen Anlage- und Gebrauchsgüter gemeint, die im Zuge ihrer Nutzung zu THG-Emissionen und deren Minderung beitragen (also einschließlich der nicht im Brutto-Anlage-Vermögen ausgewiesenen, emissionsrelevanten Vermögensgegenstände).

alter Kapitalstock entsprechend abgebaut wurde und iii) bei vielen Maßnahmen die Wirkungen regelmäßig unterhalb der intendierten Minderungsziele lagen.

Fazit

Für die zukünftige Ausrichtung der deutschen Klimapolitik sind drei Hauptergebnisse dieses Gutachtens entscheidend: i) Es hat im Zeitraum von 2000 bis 2021 substanzielle Emissionsminderungen gegeben, aber die realisierten klimapolitischen Wirkungen waren vielfach geringer als die avisierten und durch politische Instrumente adressierten Ziele. Dies zeigt sich an den sehr unterschiedlichen Verläufen der Minderungen in den verschiedenen Sektoren durch Phasen, in denen THG-Emissionen nicht weiter zurückgingen oder sogar wieder anstiegen. ii) Ein nahezu kontinuierlicher Zuwachs der Aktivitäten in allen Sektoren einschließlich Rebound-Effekten wirkte einer möglichen stärkeren Absenkung der THG-Emissionen entgegen. iii) Die in der Vergangenheit beobachtete Entwicklung der THG-Emissionen wie auch die Fortschreibung der Trends der letzten Jahre vor der Covid-19-Pandemie weisen für alle Sektoren und insgesamt auf eine erhebliche Erfüllungslücke mit Blick auf die Ziele des Jahres 2030 hin.

Diese Beobachtungen führen zur Frage, ob ein Erreichen der zukünftigen Klimaziele ohne einen Paradigmenwechsel in der Ausrichtung der deutschen Klimapolitik gelingen kann. Während heute vor allem der Wirkraum des Aufbaus von neuem Kapitalstock politisch im Fokus steht, würde ein substanzieller Wechsel darin bestehen, dass zukünftig *alle* zur Verfügung stehenden Wirkräume konsequent adressiert werden. Das beinhaltet insbesondere auch den Rückbau des fossilen Kapitalstocks sowie die Reduzierung relevanter Aktivitätsgrößen. Eine Möglichkeit für die ganzheitliche Adressierung aller Wirkräume wäre die harte Begrenzung zulässiger Emissionsmengen. Politische Steuerung hätte dann nicht mehr die primäre Aufgabe, Emissionen zu steuern, sondern die dafür umso größere Herausforderung, den Wandel so zu gestalten, dass er für Wirtschaft und Gesellschaft ökonomisch und verteilungspolitisch tragfähig ist. Klimapolitik wäre dann nicht mehr überwiegend Emissions-Minderungspolitik, sondern zunehmend Wirtschafts- und Sozialpolitik unter den neuen Rahmenbedingungen der harten Mengengrenze, die zugleich die Gefahr von Rebound-Effekten bannen würde.

Ohne harte Begrenzung von Emissionsmengen bedeutet ganzheitliche Adressierung der Wirkräume, dass politische Maßnahmen neben der Förderung des beschleunigten Ausbaus eines neuen Kapitalstocks deutlich stärker als bisher auch den Rückbau des fossilen Kapitalstocks und eine stärkere Ausschöpfung verhaltensbedingter Effizienzpotenziale³ adressieren müssen, um die Aussicht auf eine Erreichung der Klimaziele zu verbessern. Dabei kann das Leitbild der harten Mengengrenze und der Klimapolitik als Wirtschafts- und Sozialpolitik die Perspektive der deutschen Treibhausgasminderung deutlich weiten. Denn damit könnten die gesellschaftspolitischen Voraussetzungen dafür geschaffen werden, dass die Einführung einer harten Mengengrenze ermöglicht wird. Unabhängig vom geschilderten grundlegenden Wechsel des Paradigmas erscheint es darüber hinaus in jedem Fall sinnvoll, kontraproduktiv wirkende und komplexitätserhöhende Elemente im derzeitigen Instrumentenmix konsequent abzubauen.

³ Beispiele sind: Anreize zur Reduktion der Heiztemperaturen in privaten und öffentlichen Gebäuden, zu einer CO₂-ärmeren Ernährung, zu einem beschleunigten Umstieg auf CO₂-ärmere oder -freie Verkehrsträger, zu einer Verringerung der Ansprüche an Transportdienstleistungen im Individualverkehr oder zu einer reduzierten Geschwindigkeit im Straßenverkehr.

Zusammenfassung zentraler Ergebnisse

Auftrag und Herangehensweise

- Z1 Das Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) 2019 legt fest, dass der Expertenrat für Klimafragen (ERK) insbesondere das Erreichen der Sektorziele prüft und Stellung zu wichtigen klimapolitischen Maßnahmen nimmt. Mit der Novelle des Klimaschutzgesetzes im Jahr 2021 kam zu den bereits in der Erstfassung aus dem Jahr 2019 festgelegten Aufgaben des Expertenrates für Klimafragen eine weitere Aufgabe hinzu (§ 12 Abs. 4 KSG): „Der Expertenrat für Klimafragen legt erstmals im Jahr 2022 und dann alle zwei Jahre dem Deutschen Bundestag und der Bundesregierung ein Gutachten zu bisherigen Entwicklungen der THG-Emissionen, Trends bezüglich der Jahresemissionsmengen und Wirksamkeit von Maßnahmen mit Blick auf die Zielerreichung nach diesem Gesetz vor.“ Dieser Aufgabe kommt der Expertenrat mit diesem Gutachten nach.
- Z2 Gemäß dem gesetzlichen Auftrag werden in diesem Gutachten historische Entwicklungen der THG-Emissionen betrachtet. Darin sind auch Folgewirkungen der Covid-19-Pandemie bereits abgebildet. Darüber hinaus werden bei Trendbetrachtungen zur Entwicklung der THG-Emissionen auch jüngste Entwicklungen, die sich in Folge des Kriegs von Russland gegen die Ukraine ergeben, diskutiert und eingeordnet.
- Z3 Das Vorgehen im vorliegenden Gutachten basiert auf fünf Analyseschritten: Zunächst werden die im Betrachtungszeitraum liegenden Entwicklungen der THG-Emissionen insgesamt und für die im KSG definierten Sektoren beschrieben (Kapitel 2). Darauf aufbauend wird auf Basis einer Dekompositionsanalyse das gesamtwirtschaftliche und sektorale Emissionsgeschehen in zentrale Einflusskomponenten zerlegt und in einem weiteren Schritt vertieft analysiert. Im vierten Analyseschritt wird die Erreichung der KSG-Ziele bis zum Jahr 2030 dann aus einer ex ante Perspektive erörtert (Kapitel 3), bevor in einem letzten Schritt die Wirksamkeit des klimapolitischen Instrumentariums diskutiert wird (Kapitel 4). Das Gutachten endet mit einem Kapitel zu weiterführenden Betrachtungen (Kapitel 5).
- Z4 Die durch das Umweltbundesamt ermittelten Daten der deutschen THG-Emissionen enthalten Effekte, die wesentlich durch das Witterungsgeschehen bestimmt sind. Dies trifft insbesondere auf den Energieverbrauch des Gebäudesektors zu, sowie auf das ebenfalls wetterabhängige Dargebot derjenigen Wandler erneuerbarer Energieträger, die Solar- und Windenergie nutzen. Eine Temperaturbereinigung erlaubt es, diesen Einfluss auf das Emissionsgeschehen herauszurechnen und liefert somit ein klareres Bild der Entwicklung aufgrund von Handlungen im politischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Raum. Aus Gründen der Datenverfügbarkeit und Machbarkeit wurde in diesem Bericht nur der Energieverbrauch des Gebäudesektors temperaturbereinigt.

Beschreibung und Analyse bisheriger Entwicklungen

- Z5 Für die Analyse der Entwicklung der THG-Emissionen Deutschlands wurde für die Zwecke dieses Gutachtens der Zeitraum von 2000 bis 2021 herangezogen. Dadurch blieb einerseits der Zeitraum, in dem Entwicklungen in Folge der deutschen Wiedervereinigung wesentlichen Einfluss auf das Treibhausgeschehen hatten, unberücksichtigt und es wurden andererseits die vergangenen zwei Jahrzehnte, in denen wesentliche klima- und energiepolitische Aktivitäten zu verzeichnen waren, vollständig einbezogen.

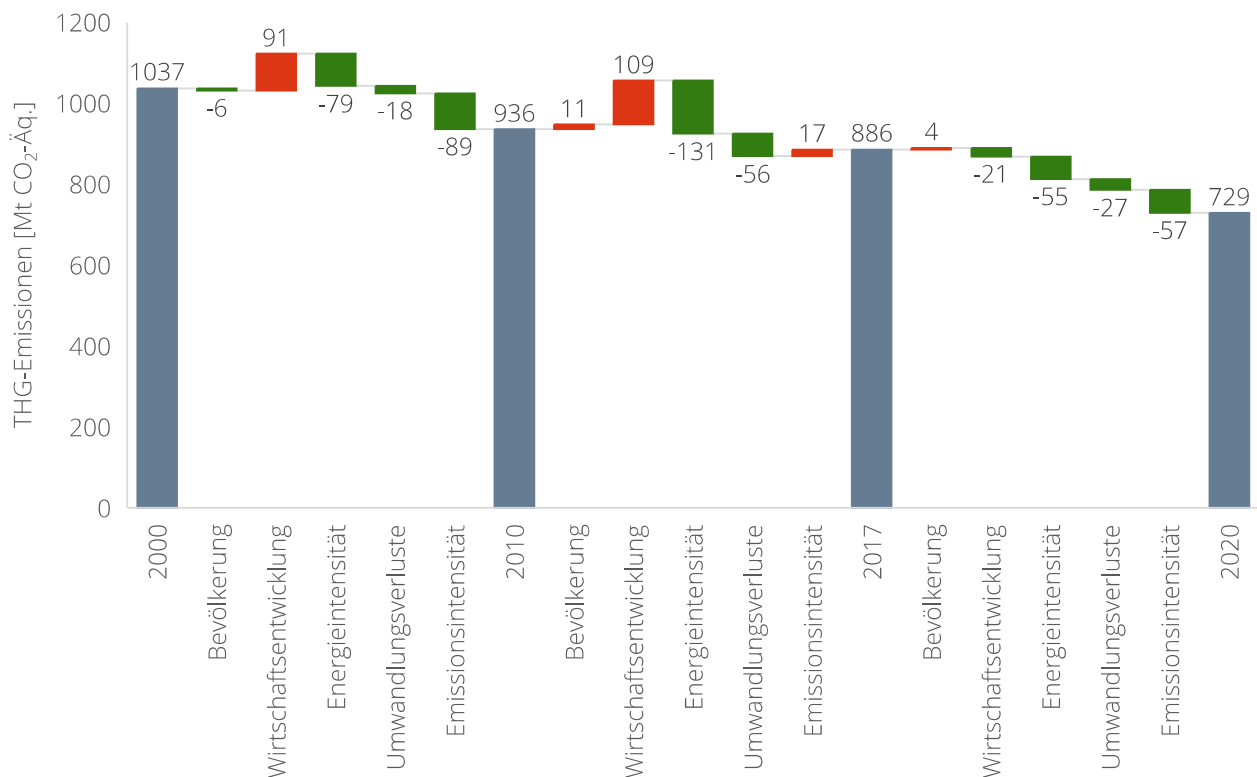
Sektorenübergreifende Betrachtung

- Z6 Die THG-Emissionen in Deutschland (ohne LULUCF) sind im Zeitraum von 2000 bis 2021 temperaturbereinigt von 1 044 Mt CO₂-Äq. auf 759 Mt CO₂-Äq. gesunken; dies entspricht einer Reduktion um 27,3 % gegenüber dem Jahr 2000; diese Angaben gelten bei Heranziehung der temperaturbereinigten Daten. Die Gesamtentwicklung der THG-Emissionen lässt sich dabei in drei Phasen unterteilen: zunächst gab es von 2000 bis 2010 eine Phase mit moderater Minderung (im Mittel um 12,6 Mt CO₂-Äq. pro Jahr), 2010 bis 2017 gefolgt von einer Phase mit geringer Minderung (im Mittel um 4,3 Mt CO₂-Äq. pro Jahr) und von 2017 bis 2021 folgte dann eine Phase mit starker Minderung (im Mittel 32,1 Mt CO₂-Äq. pro Jahr), zu der allerdings vor allem der Energiesektor beitrug.⁴
- Z7 Die rechnerische Zerlegung der Gesamtveränderung der THG-Emissionen in zentrale Komponenten, die aufgrund verfügbarer Daten nur bis zum Jahr 2020 erfolgen konnte, zeigt eine Entkopplung der Aktivitäts⁵ von der Emissionsentwicklung. Während die Bevölkerungsentwicklung über den gesamten Betrachtungszeitraum nur einen geringen, leicht emissionssteigernden Einfluss hatte, trug der deutliche Anstieg der Wirtschaftsleistung rechnerisch zu einer Erhöhung der THG-Emissionen um 158 Mt CO₂-Äq. bei. Dieser aktivitätsbedingte Anstieg wurde jedoch durch den emissionsmindernden Beitrag der übrigen Komponenten deutlich überkompensiert. Die rückläufige Energieintensität trug über den gesamten Zeitraum mit 251 Mt CO₂-Äq. am stärksten zur Emissionsminderung bei, gefolgt von der Emissionsintensität mit 124 Mt CO₂-Äq. und der Verringerung der Umwandlungsverluste zwischen Primär- und Endenergie mit 102 Mt CO₂-Äq.
- Z8 Während die Verringerung der Energieintensität und der Umwandlungsverluste über den gesamten Zeitraum stetig zur beobachteten Minderung der THG-Emissionen beitrugen, stagnierte der Beitrag der Emissionsintensität in der Periode von 2010 bis 2017 bzw. kehrte sich leicht um. Dies deckt sich energieseitig mit einem weitgehenden bilanziellen Ausgleich steigender Stromerzeugung auf Basis erneuerbarer Energieträger und dem Ausstieg aus der Kernenergie in diesem Zeitraum. Der ab dem Jahr 2018 beobachtete Rückgang der THG-Emissionen fällt in eine Zeit steigender Preise für Emissionszertifikate im europäischen Emissionshandelssystem (EU-ETS) sowie eines abgeschwächten und im Jahr 2020 aufgrund der Folgen der Covid-19-Pandemie sinkenden Wirtschaftswachstums.

⁴ Die durchschnittliche Minderung im Zeitraum von 2017 bis 2021 betrug auf Ebene der (temperaturbereinigten) Gesamtemissionen 3,8 % pro Jahr. Überdurchschnittliche Minderungen wies der Sektor Energiewirtschaft auf (minus 6,4 % pro Jahr) sowie der Sektor Abfallwirtschaft und Sonstiges (minus 4,2 % pro Jahr), unterdurchschnittliche die anderen Sektoren Verkehr (minus 3,1 %, im Jahr 2021 vermutlich teilweise noch Covid-19-bedingt), Industrie (minus 2,1 % pro Jahr), Gebäude (minus 2,3 % pro Jahr) sowie Landwirtschaft (minus 1,8 % pro Jahr).

⁵ Mit dem Begriff „Aktivitäten“ werden hier Größen bezeichnet, die die Entwicklung THG-Emissionen der gesamten Volkswirtschaft oder eines Sektors unmittelbar beeinflussen (wie Bevölkerung, Bruttoinlandsprodukt, Produktionsmenge, Wohnfläche oder Fahrzeugkilometer).

Abbildung Z1: Dekomposition der sektorenübergreifenden THG-Emissionen - Aggregierte Betrachtung 2000-2010, 2010-2017 und 2017-2020 (Daten für Gebäudesektor temperaturbereinigt)



Eigene Darstellung. Weitere Details zu den verwendeten Daten finden sich in Tabelle 3.

Energiewirtschaft

- Z9 Die Energiewirtschaft hat seit dem Jahr 2000 mit rund 140 Mt CO₂-Äq. fast genau so viel gemindert wie alle anderen Sektoren zusammen. Allerdings ist eine deutliche Minderung der THG-Emissionen – mit einer Ausnahme im Zeitraum der Finanzkrise in den Jahren von 2007 bis 2009 – erst ab dem Jahr 2014 zu verzeichnen.
- Z10 In den Jahren von 2000 bis 2013 sind die THG-Emissionen nur geringfügig zurückgegangen. In dieser Zeitspanne haben sich trotz des kontinuierlichen Ausbaus von Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern die emissionssteigernden Effekte aus wirtschaftlicher Entwicklung sowie der Abschaltung von Kernkraftwerksleistung auf der einen Seite und die emissionsmindernden Verbesserungen der Energieproduktivität des Sektors auf der anderen Seite in etwa die Waage gehalten. Diese Verbesserungen sind sowohl auf den kontinuierlichen Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern als auch auf die Steigerung des Brutto-Wirkungsgrades fossiler Kraftwerke durch technische Verbesserungen, die kombinierte Erzeugung von Strom und Wärme (KWK) sowie die Außerbetriebnahme veralteter (Braunkohle-)Kraftwerke zu begründen.
- Z11 Der kontinuierliche Rückgang der THG-Emissionen seit dem Jahr 2014 lässt sich zum einen auf den starken Anstieg der EU ETS-Preise ab dem Jahr 2017 und damit einhergehend den Rückgang der Kohleverstromung zurückführen, welche teils durch Strommengen aus dem fortgesetzten Ausbau der erneuerbaren Energieträger und durch Gaskraftwerke substituiert wurde. Der Trend sinkender THG-

Emissionswerte wurde ab dem Jahr 2020 durch die Covid-19-Pandemie und eine schwächere Wirtschaftsentwicklung verstärkt.

- Z12 Die Stromerzeugungskapazität im gesamten Kraftwerkspark ist im Zeitraum von 2000 bis 2020 um 86 % gestiegen. Dieser Zuwachs ist der Saldo aus dem durch das EEG geförderten starken Anstieg der Bruttostromerzeugungskapazitäten aus erneuerbaren Energieträgern und einem Rückgang der Kapazitäten zur Umwandlung konventioneller Energieträger (- 20 %). Die Veränderungen im Kapitalstock führten insgesamt zu einem Rückgang der Emissionsintensität. Für die Höhe der THG-Emissionen ist jedoch nicht nur die Emissionsintensität der Stromerzeugung relevant, sondern auch der Anteil der erneuerbaren Energieträger in der gesamten Wärmeerzeugung. Der Anteil von erneuerbaren Energieträgern in der Wärmebereitstellung liegt dabei deutlich hinter der Entwicklung in der Bruttostromerzeugung und war seit dem Jahr 2012 wenig dynamisch. Zwar stieg die Nutzung fester Biomasse bis zum Jahr 2013 stetig an, zeigt seitdem aber wenig Veränderungen und nur einen moderaten Anstieg von 13,9 % im Jahr 2012 auf 15,6 % im Jahr 2020.
- Z13 Die politische Strategie der Bundesregierung zur Verminderung der THG-Emissionen in der Energiewirtschaft zielte im betrachteten Zeitraum überwiegend auf die Stärkung des EU-ETS und den Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern ab. Zudem sollen Kohlekraftwerke durch das Kohleausstiegsgesetz bis zum Jahr 2038 (bzw. idealerweise bis zum Jahr 2030 gemäß Koalitionsvertrag 2021) schrittweise aus dem Markt genommen werden. Die ebenfalls politisch induzierte Stilllegung von Kernkraftwerken wirkt im Gegenzug erhöhend auf die deutschen THG-Emissionen.
- Z14 Der Ausbau von Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern soll weiter fortgesetzt und beschleunigt werden. Die aktuellen Verwerfungen auf den Märkten sorgen für Anpassungen an den Ausstiegspfaden für Kernkraft- und Kohlekapazitäten, die aber derzeit nur als von kurzfristiger Natur eingeschätzt werden. Die weitere Entwicklung der THG-Emissionen in der Energiewirtschaft wird vor diesem Hintergrund vor allem auch von den Veränderungen bei der Stromnachfrage beeinflusst werden. Dabei kann sich ein wachsender Strombedarf vor allem aus der Informations- und Kommunikationstechnologie sowie aus Fortschritten bei der Elektrifizierung der Sektoren Industrie, Gebäude und Verkehr ergeben. Demgegenüber stehen Einsparungen aufgrund von erhöhter Energieeffizienz sowie möglicherweise einer De-Industrialisierung aufgrund absehbar hoher Energiepreise in Deutschland.

Industrie

- Z15 Die THG-Emissionen in der Industrie sind bis zum Jahr 2021 gegenüber dem Jahr 2000 um 13 % (27 Mt CO₂-Äq.) gesunken. Damit ist die Minderungsrate deutlich geringer als die durchschnittliche Minderungsrate über alle Sektoren (27 %). Im zeitlichen Verlauf kam es zu Minderungen vor allem im Zuge der Finanzkrise (2008-2012), die aber bis zum Jahr 2017 weitgehend wieder aufgeholt worden sind. In den Folgejahren gingen die THG-Emissionen erneut spürbar zurück, um im Jahr 2020, im ersten Jahr der Covid-19-Pandemie, das bisherige Emissions-Minimum aus dem Jahr 2009 zu unterschreiten. Im Jahr 2021 kam es allerdings zu einer Trendumkehr (plus 5 % gegenüber dem Jahr 2020).
- Z16 Den Großteil der THG-Emissionen (2021: 68 %) machen Industriefeuerungen und Industriekraftwerke aus. Etwa 80 % der THG-Emissionen in der Industrie unterliegen dem EU-ETS. Die THG-Emissionen unter dem EU-ETS sind zwischen den Jahren 2013 und 2017 relativ konstant geblieben und danach – vermutlich auch in Folge der starken Erhöhung der Zertifikatpreise – leicht gesunken. Die nicht vom EU-ETS erfassten THG-Emissionen im Industriesektor sind zwischen den Jahren 2013 und 2017 zunächst stark gestiegen (plus 48 %), aber seitdem wieder deutlich gefallen. Dennoch lagen sie selbst im Covid-

Jahr 2020 noch rund 20 % über den THG-Emissionen des Jahres 2013. Diese Unterschiede in der Entwicklung legen den Schluss nahe, dass der Emissionshandel tatsächlich mengenbegrenzende und dabei, vermutlich aufgrund seiner intertemporalen Struktur, auch glättende Effekte ausübt.

- Z17 Die Emissionsentwicklung in der Industrie setzt sich aus gegenläufigen Komponenten zusammen: So können dem Wirtschaftswachstum und einem leicht wachsenden Anteil der Industrie an der Gesamtwertschöpfung emissionserhöhende Wirkungen zugewiesen werden (plus 17 Mt CO₂-Äq. im Zeitraum 2000-2010, plus 16 Mt CO₂-Äq. im Zeitraum 2010-2020). Dagegen stehen vor allem Verbesserungen in der Energieeffizienz sowie in der Emissionsintensität der Umwandlungsprozesse (gemeinsam minus 21 Mt CO₂-Äq. im Zeitraum 2000-2010, minus 26 Mt CO₂-Äq. im Zeitraum 2010-2020). Dabei tragen Wirtschaftswachstum und Energieeffizienz den jeweiligen Hauptanteil bei.
- Z18 Nach einer langen Phase des Aufschwungs (2009-2019) hat im Jahr 2020 der Beitrag der Wirtschaftsentwicklung zur Emissionsentwicklung wieder abgenommen. Auch scheint der Einfluss des strukturellen Wandels seit dem Jahr 2017 das Vorzeichen geändert zu haben, indem seitdem der Anteil der Industrie an der Bruttowertschöpfung langsam gesunken ist. Interessant erscheint, dass die Energieeffizienz sich zeitgleich wieder verschlechtert hat. Dies resultiert – wie bereits während der Finanzkrise zu beobachten – vor allem aus einem produktionsunabhängigen Basis-Energieverbrauch, der dazu führt, dass in Zeiten eines wirtschaftlichen Rückgangs der Energieverbrauch weniger stark zurückgeht als die Produktion. Der Einfluss struktureller Verschiebungen innerhalb der Industrie konnte im Rahmen dieses Gutachtens aufgrund emissionsseitig fehlender Daten nicht abschließend aufgeklärt werden. Nach anderen Quellen dürfte dieser zumindest energieseitig tendenziell verbrauchsmindernd gewirkt haben, so dass ein Teil der seit dem Jahr 2000 beobachteten Effizienzverbesserung auf strukturelle Verschiebungen hin zu weniger energieintensiven Industriezweigen zurückzuführen sein könnte.
- Z19 Insgesamt kann die Emissionsentwicklung im Industriesektor vor allem aus dem Wechselspiel von Ausweitung der wirtschaftlichen Tätigkeiten (emissionssteigernd) und Verbesserungen in der Energieeffizienz durch eine kontinuierliche Verbesserung des Kapitalstocks (emissionsmindernd) erklärt werden. Letztere erfolgt aufgrund der Langlebigkeit von Industrieanlagen graduell und kann die Effekte aus der positiven Wirtschaftsentwicklung (nur) in geringem Maße überkompensieren. Gleichzeitig ist es bislang trotz der Einführung des Emissionshandels nicht zu einer vielfach befürchteten raschen De-Industrialisierung Deutschlands gekommen. All dies demonstriert eine erhebliche Trägheit dieses Sektors gegenüber Veränderung.

Gebäude

- Z20 Für die Analyse der THG-Emissionen des Gebäudesektors wurde zunächst eine Temperaturbereinigung durchgeführt. Unter Verwendung der temperaturbereinigten Daten ist eine Reduktion der Emissionen um 35 % von 173,7 Mt CO₂-Äq. im Jahr 2000 auf 113 Mt CO₂-Äq. im Jahr 2021 zu verzeichnen. Dabei fiel der Rückgang in der Periode von 2000 bis 2010 mit 25 % signifikant höher aus als zwischen den Jahren 2010 und 2021 mit 10 %. Die temperaturbereinigten THG-Emissionen weichen dabei im Zeitraum 2000 - 2021 im Mittel um 3,1 % von den nicht-temperaturbereinigten Werten ab.
- Z21 Eine Dekomposition der Emissionsdaten für den Zeitraum von 2000 bis 2020 wurde getrennt nach Gebäuden privater Haushalte und Gebäuden des Bereichs Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) durchgeführt. Im Jahr 2021 trugen die Gebäude der privaten Haushalte mit 73,2 % zu den THG-Emissionen des Gebäudesektors bei, die GHD-Gebäude mit 26 % und der verbleibende Rest entfällt auf das Militär.

- Z22 Die Entwicklung der temperaturbereinigten THG-Emissionen der Gebäude privater Haushalte zeigt drei zeitliche Phasen mit jeweils unterschiedlicher Entwicklung. In den Jahren von 2000 bis 2010 fand eine Reduktion der THG-Emissionen um rund 29,7 Mt CO₂-Äq. statt, in den Jahren 2010 bis 2017 sind nahezu gleichbleibende THG-Emissionen zu beobachten (-5 Mt CO₂-Äq.) und im Zeitraum 2017 bis 2020 stiegen die THG-Emissionen stetig um insgesamt rund 9,4 Mt CO₂-Äq. an. Die beobachtete Pro-Kopf-Zunahme der Wohnfläche trägt rechnerisch über nahezu den gesamten Beobachtungszeitraum zu einem kontinuierlichen Anstieg der Emissionen mit insgesamt rund 17,6 Mt CO₂-Äq. bei. Dem wirkt ein Rückgang der Emissionsintensität mit einem Beitrag von rund 11,7 Mt CO₂-Äq. entgegen. Dabei fällt auf, dass dieser Rückgang ausschließlich im Zeitraum 2000 bis 2012 erfolgte, während in den Folgejahren der Beitrag der Emissionsintensität weitgehend konstant blieb. Der emissionsmindernde Beitrag der Energieintensität schwächte sich zwischen den Jahren 2000 und 2017 kontinuierlich ab und führte insgesamt zu einer rechnerischen Emissionsminderung um 39 Mt CO₂-Äq. Der Großteil der Minderungswirkung erfolgte dabei in den ersten Jahren des Betrachtungszeitraumes bis zum Jahr 2010. Ab dem Jahr 2017 kehrte sich der Beitrag der Energieintensität dann um und führte zu einem rechnerischen Emissionsanstieg in Höhe von knapp 7 Mt CO₂-Äq. Der zeitliche Verlauf der Energieintensität folgte damit weitgehend dem der THG-Emissionen insgesamt.
- Z23 Für die GHD-Gebäude ist im Jahr 2020 eine Reduktion der jährlichen THG-Emissionen um rund 17,5 Mt CO₂-Äq. gegenüber dem Jahr 2000 zu beobachten. Einem Anstieg des Bruttoinlandsprodukts, das rechnerisch zu einem Anstieg um rund 7,4 Mt CO₂-Äq. beitrug, steht eine Reduktionswirkung der Emissionsintensität mit einem Minderungsbeitrag von rund 6,7 Mt CO₂-Äq. und der Energieintensität mit einem Minderungsbeitrag von rund 18,2 Mt CO₂-Äq. gegenüber. Anders als im Bereich der Gebäude privater Haushalte ist hier keine kontinuierliche Zunahme der Energieintensität (mit Ausnahme des Anstiegs im Jahr 2020) und der Gesamtemissionen im Zeitraum 2017 bis 2020 zu beobachten.
- Z24 Die Dekompositionsanalyse zeigt auf, dass sich die Pro-Kopf-Wohnfläche (Gebäude privater Haushalte) und das Bruttoinlandsprodukt (GHD-Gebäude) deutlich gegenläufig zur Energie- und Emissionsintensität entwickelt haben. Rein rechnerisch wäre über den betrachteten Zeitraum von 2000 bis 2020 eine Reduktion der THG-Emissionen des Gebäudesektors ohne die genannten Anstiege um 40 % möglich gewesen, wenn die Wohnfläche pro Kopf und das BIP konstant geblieben wären; faktisch betrug sie 25 %.
- Z25 Der für den Zeitraum 2000 bis 2010 konstatierte merkliche Minderungsbeitrag der Energieintensität ging einher mit Maßnahmen zur energetischen Sanierung von Gebäuden und dem Einbau energieeffizienterer Heizungssysteme sowie stetig steigenden realen Preisen fossiler Energieträger. Erstaunlich erscheint im Gegensatz dazu der nahezu gleichbleibende – und seit dem Jahr 2017 sogar wieder emissionssteigernd wirkende – Beitrag der Energieintensität bei den Wohngebäuden seit dem Jahr 2010. Denn diese Entwicklung erfolgte trotz fortgesetzter energetischer Sanierung von Gebäuden auf ähnlichem Niveau wie zuvor (jährliche Sanierungsrate von rund 1 %), eines vergleichsweise noch höheren Energiestandards von Neubauten, des weiterhin erfolgenden Ersatzes alter Heizkessel durch effizientere Neue, sowie (mit vergleichsweise geringem Umfang) des Wechsels von Heizgeräten, die fossile Energieträger nutzen, zu Wärmepumpen und Biomassekesseln. Allerdings waren in diesem Zeitraum die realen Energiepreise stabil, leicht fallend oder allenfalls leicht ansteigend. Als wesentliche Ursache für die nicht weiter sinkende Energieintensität, verbleibt somit das Verhalten der Gebäudenutzer:innen, das sich faktisch in einem Anstieg des Verhältnisses aus dem realen Energieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser zum rechnerischen Energiebedarf für diese Energiedienstleistungen ausdrückt. Dies ist ein Beispiel dafür, wie Rebound-Effekte und

wohlstandsbedingte Veränderungen des Nutzungsverhaltens die Verbesserungen in der technischen Effizienz vollständig zunichtemachen können.

- Z26 Die Beiträge der Energie- und Emissionsintensität zur Minderung von Emissionen des Gebäudesektors im betrachteten Zeitraum 2000 bis 2020 sind überwiegend auf Maßnahmen der energetischen Sanierung von Bestandsgebäuden bzw. entsprechender Effizienzstandards im Neubau und die Verwendung effizienterer Heizungstechnologien (Umstieg von Standardtechnologien auf Brennwerttechnik) und Umstieg auf emissionsärmere fossile Energieträger (Umstieg von Heizöl auf Erdgas) zurückzuführen. Dazu kommt eine – insbesondere bis zum Jahr 2012 zu verzeichnende – stetig wachsende Verwendung erneuerbarer Energieträger für Gebäude privater Haushalte, mit einem Anstieg von rund 58 TWh im Jahr 2003 auf knapp 95 TWh im Jahr 2020, wovon die Biomasse mit rund 68 TWh den größten Anteil ausmacht. Vor dem Hintergrund des zur Erreichung der Klimaschutzziele bis zum Jahr 2030 deutlich schnelleren notwendigen Rückgangs der THG-Emissionen im Vergleich zu den Jahren 2000 bis 2020 einerseits und der limitierten Potenziale zur Effizienzverbesserung im Bereich der fossilen Heizungstechnologien sowie der limitierten Biomassepotenziale andererseits, ist ein beschleunigter Umstieg auf Heiztechnologien mit signifikant niedrigeren Werten der spezifischen THG-Emissionen notwendig.
- Z27 Im Zeitraum der Jahre 2015 bis 2020 wurden in Summe knapp 20 Mrd. Euro Fördermittel der öffentlichen Hand für die energetische Sanierung von Bestandsgebäuden (24 %), für höhere als die gesetzlich vorgeschriebenen Energiestandards von Neubauten (38 %) sowie für besonders energieeffiziente Heizungssysteme oder Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energieträger für die Wärmebereitstellung in Gebäuden (38 %) verwendet. Im Jahr 2021 wurden für entsprechend hohe Energiestandards im Neubau und die energetische Sanierung von Wohngebäuden allein 7,6 Mrd. Euro eingesetzt. Für die energetische Sanierung von Bestandsgebäuden sowie die Förderung von besonders energieeffizienten Neubauten im Bereich Wohngebäude, für die Daten zur Ermittlung der Fördereffizienz vorliegen, erweist sich, dass insbesondere in den Jahren 2019 bis 2021 vergleichsweise hohe (bis zu 225 Euro pro Tonne CO₂ für die Bestandssanierung) bis sehr hohe Förderaufwendungen (bis zu 400 Euro pro Tonne CO₂ für Neubauten) pro eingesparte Menge an THG-Emissionen getätigt wurden.
- Z28 Im Bereich GHD ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den Gebäuden privater Haushalte. Die Entwicklung des BIP wies in der Vergangenheit einen eher emissionssteigernden Einfluss auf. Dabei ist der Zusammenhang zwischen BIP und Emissionsentwicklung jedoch von verschiedenen Aspekten beeinflusst, so bspw. von der Art und möglichen Veränderung in den Wertschöpfungsbereichen und damit verbundenen variierenden Raumwärme- und Prozesswärmebedarfen. Im GHD-Bereich ist darüber hinaus ein gleichmäßig abnehmender Verlauf in der Emissionsintensität erkennbar, welcher auf einem fortschreitenden Einsatz emissionsärmerer und erneuerbarer Energieträger basiert. Der Anteil erneuerbarer Energieträger an der Wärmeerzeugung stieg in den letzten Jahren dabei schneller als bei den Gebäuden privater Haushalte und ist primär auf den Einsatz von Biomasse zurückzuführen. Die Energieintensität wies über den Zeitraum 2000-2020 eine unregelmäßige, in der Gesamtheit jedoch emissionsmindernde Wirkung auf. Die geringe emissionsmindernde Wirkung ist neben niedrigen Sanierungsraten im GHD-Bereich auch auf einen insbesondere ab dem Jahr 2010 erfolgten Trend zum Wechsel von Fernwärme auf Gaskessel und der damit verbundenen Zunahme der im Gebäudesektor bilanzierten Emissionen zu erklären. Bei Betrachtung der Entwicklung der mittleren Endenergiebedarfe von Nichtwohngebäuden nach Baualtersklasse wird deutlich, dass im Untersuchungszeitraum vermutlich vor allem Ordnungsrecht im Neubau Wirkung zeigte und damit Energieeinsparungen aufgrund höherer Effizienz unterstützte. Grundsätzlich wird bei Betrachtung der emissionsrelevanten

Parameter deutlich, dass das Potenzial zur Emissionsreduktion des GHD-Bereichs in der Vergangenheit nicht voll ausgeschöpft und hinreichend adressiert wurde.

- Z29 Die Zunahme der emissionssteigernd wirkenden Wohlstandseffekte, einschließlich beobachteter Rebound-Effekte, in Verbindung mit der teilweise geringen Fördereffizienz und den begrenzten Potenzialen weiterer Effizienzverbesserungen bei der Verwendung fossiler Technologien, lassen bei einer Fortführung der Fördermaßnahmen aus der Vergangenheit eine Zielerreichung unsicher erscheinen.

Verkehr

- Z30 Im Verkehrssektor hat es seit dem Jahr 2000 einen leichten Rückgang der THG-Emissionen bis zum Jahr 2012 gegeben, dann aber wieder einen Anstieg bis zum Jahr 2019. Für die Jahre 2000 und 2021 sind signifikant niedrigere Emissionswerte zu verzeichnen, da diese Jahre wesentlich durch Maßnahmen zur Eindämmung der Covid-19-Pandemie geprägt waren. Insgesamt sind die THG-Emissionen in dem Zeitraum von 2000 bis 2019 von 181 Mt CO₂-Äq. auf 164 Mt CO₂-Äq. bzw. bis zum Jahr 2021 auf 148 Mt CO₂-Äq. abgesunken, was einer Absenkung um 9,3 % bis zum Jahr 2019 bzw. 18,2 % bis zum Jahr 2021 gegenüber dem Jahr 2000 entspricht. Zu 97 % entstehen die THG-Emissionen im Straßenverkehr (im Jahr 2019), wobei dort die drei wesentlichen Kategorien Pkw (60 %), Lkw und Busse (28 %) und leichte Nutzfahrzeuge (7 %) sind.
- Z31 Emissionsmindernde Beiträge im Pkw-Verkehr können in den letzten 20 Jahren (bis zum Jahr 2019) zu etwa gleichen Teilen Intensitätsveränderungen und Verschiebungen im grenzüberschreitenden Tankverhalten zugeschrieben werden. Letztgenannte Effekte resultieren daraus, dass die THG-Emissionen aufgrund des Territorialprinzips im Ausland bilanziert werden, auch wenn im Inland gefahren wird. Da die Kraftstoffpreise real bis zum Jahr 2012 gestiegen sind, führte in diesem Zeitraum das zunehmende Tanken im Ausland zu einem emissionsmindernden Effekt. Anschließend sind die Preise auf ein Niveau von Anfang der 2000er Jahre gefallen, was sich in zunehmendem inländischem Tanken und damit einem Anstieg der THG-Emissionen bemerkbar macht. Die über den Betrachtungszeitraum sinkende Energieintensität (weniger Kraftstoffeinsatz pro Kilometer) ist auf den Wechsel hin zu Dieselfahrzeugen und auf Motoren- und Kraftstoffeffizienz zurückzuführen. Gleichzeitig wird die sinkende Energieintensität durch steigende Motorisierung und sowohl größere als auch schwerere Fahrzeuge gedämpft. Emissionsminderungen aufgrund technisch bedingter Effizienzgewinne wurden somit in der Vergangenheit in großen Teilen durch gegenläufige Entwicklungen in Fahrzeugeigenschaften (Zunahme Fahrzeuggewicht und Motorleistung) konterkariert. Zudem führte eine Änderung des Verbrauchsverhaltens, bedingt unter anderem durch Rebound-Effekte und wohlstandsbedingte Veränderungen des Nutzungsverhaltens, zu einer gestiegenen Transportintensität. Weiterhin ist weder ein Modal Shift zu alternativen emissionsärmeren Verkehrsdienstleistungen, noch eine substanzielle Substitution bestehender Fahrzeuge durch nicht-fossile Neuanschaffungen zu erkennen. Dabei hat der Trend zu schwereren und leistungstärkeren Pkw dazu geführt, dass der Energieverbrauch pro Kilometer (Energieintensität) trotz der EU-Flottengrenzwerte im Jahr 2015 seit dem Jahr 2008 nicht substanziell gesunken ist. Zudem ist kein Umstieg auf die Schiene oder eine Trendumkehr des stetig steigenden Pkw-Aufkommens zu sehen. Dabei laufen insbesondere Politik-Anreize, wie die Subvention bei der Dieselbesteuerung oder das Dienstwagenprivileg, der erforderlichen Emissionsminderung zuwider. Auch bei den EU-Flottengrenzwerten, dem zentralen Instrument der EU zur Emissionsminderung im Straßenverkehr über technische Effizienzsteigerungen, erlauben verschiedene regulatorische Flexibilitäten eine Abschwächung der Grenzwerte. Dazu gehören herstellereigenspezifische Teilziele, die höhere Grenzwerte für schwerere Flotten erlauben, und Pooling zwischen Herstellern.

Z32 Bei den THG-Emissionen durch den Lkw-Verkehr gibt es strukturelle Unterschiede zur Entwicklung der Pkw-Emissionen: Der Rückgang der THG-Emissionen im Zeitraum von 2000 bis 2010 ist stärker auf eine stetig sinkende Energieintensität zurückzuführen, zudem gibt es einen Anstieg der THG-Emissionen zwischen den Jahren 2010 und 2019, der vor allem auf das gestiegene Wirtschaftswachstum und die dadurch erhöhte Straßenverkehrsleistung zurückzuführen ist.

Landwirtschaft

Z33 Die THG-Emissionen im Landwirtschaftssektor sanken seit dem Jahr 2000 insgesamt um 9 % und damit deutlich weniger als im Gesamtdurchschnitt der KSG-Sektoren. Insbesondere ist hervorzuheben, dass sich die THG-Emissionen im Zeitraum von 2000 bis 2021 in unterschiedlichen Phasen entwickelten. So ist für die Jahre von 2006 bis 2015 ein Anstieg der THG-Emissionen zurück auf den Wert des Jahres 2000 und für die Phase ab dem Jahr 2016 eine Reduktion auf den Wert im Jahr 2021 festzuhalten.

Z34 Grundsätzlich gibt es zwei Komponenten, die Einfluss auf die THG-Emissionen im Sektor Landwirtschaft nehmen. Das sind u. a. 1) die Größe und Zusammensetzung des Viehbestands, da die Methanemissionen aus der Tierhaltung rund 43 % der gesamten THG-Emissionen des Landwirtschaftssektors ausmachen und 2) die Düngemittelverwendung, da die resultierenden Lachgasemissionen aus landwirtschaftlichen Böden rund 33 % der landwirtschaftlichen THG-Emissionen verursachen. Die Verwendung von synthetischem Dünger und damit auch die daraus resultierenden THG-Emissionen gehen seit dem Jahr 2014 zurück. Die Anzahl der Rinder und die damit verbundenen THG-Emissionen sind ebenfalls rückläufig. Die gestiegenen Netto-Importe an Rindern für den Verzehr werden in den THG-Emissionen wegen des Territorialprinzips nicht berücksichtigt.

Z35 Im Jahr 2021 wurde ein neuer Emissionsfaktor für direkte Lachgasemissionen aus Mineralböden resultierend aus Düngerausbringung auf landwirtschaftlich genutzten Böden eingeführt. Diese Methodenänderung in der THG-Berechnung im Landwirtschaftssektor führte dazu, dass die gemäß KSG maximal zulässigen Jahresemissionsmengen mit rund 6 Mt CO₂-Äq. pro Jahr deutlich unterschritten werden. Das KSG sieht keine Regelungen für den Umgang mit Änderungen in der Erhebungsmethodik vor. Entsprechend ist eine Anpassung der Sektorziele in Anlage 2 des KSG auch nicht gesetzlich vorgegeben. Dies bedeutet für den Landwirtschaftssektor, dass für die Jahre bis 2030 unter Berücksichtigung des Ausgleichsmechanismus (§ 4 Abs. KSG) im Landwirtschaftssektor und unter Voraussetzung gleichbleibender jährlicher THG-Emissionen keine realen THG-Reduktionen nötig sind, um das Ziel im Jahr 2030 zu erreichen.

Z36 Die THG-Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden sind im Zeitraum von 2000 bis 2020 rückläufig. Die Komponente Dünger pro Fläche zeigt witterungsbedingt eine hohe jährliche Variabilität und wirkte teils emissionssteigernd, teils emissionsmindernd gegenüber dem Jahr 2000. Die Komponente Landwirtschaftsfläche, die leicht emissionsmindernd wirkte, und die Komponente Emissionsintensität spielen für die THG-Emissionen eine untergeordnete Rolle.

Z37 Die THG-Emissionen aus der Tierhaltung sind leicht rückläufig. Die Komponente Nutztiere pro Kopf (Anzahl Nutztiere pro Anzahl Einwohner:innen) wirkt emissionssteigernd und stieg zwischen den Jahren 2010 und 2012 stark an. Dem entgegen wirkte die Komponente Anteil Nutztiere, die die Komposition des gesamten Viehbestandes repräsentiert und die eine emissionsmindernde Entwicklung durch die Substitution von Rindern durch andere Tierarten aufweist. Die Emissionsintensität, also die THG-Emissionen pro Anzahl der Nutztiere und die Bevölkerungsentwicklung spielen eine untergeordnete Rolle.

- Z38 Die Höhe der THG-Emissionen im Bereich der landwirtschaftlichen Düngung ist witterungsabhängig. Dies liegt in dem Umstand begründet, dass in einer trockenen Periode eine geringere Düngerausbringung erfolgt, da die Nährstoffflüsse zu den Pflanzen geringer sind als in feuchten Jahren. Hinzu kommt, dass die THG-Emissionen aus der Düngemittelverwendung seit dem Jahr 2014 sinken, da ab diesem Jahr weniger synthetischer Dünger ausgetragen und die Reduktion nicht durch Wirtschaftsdünger kompensiert wird.
- Z39 Die THG-Emissionen aus der Nutztierhaltung hängen von der Größe des Bestands sowie der Komposition der Nutztierarten ab. Insbesondere der sinkende Anteil der Rinder am Nutztierbestand weist einen emissionsreduzierenden Anteil auf, da andere Nutztierarten deutlich geringere Emissionsfaktoren aufweisen. Insofern hat der Abbau des Rinderbestandes gekoppelt mit einem Anstieg der Nutztierart Schwein einen, wenn auch geringen, emissionsmindernden Effekt. Die Förderung gesunder und nachhaltiger Ernährungsweisen könnte durch Auswirkungen auf den Nutztierbestand zu einer Reduzierung der THG-Emissionen beitragen.
- Z40 Bei der Berechnung der THG-Emissionen in der Landwirtschaft ist zu berücksichtigen, dass Deutschland zu den Exportländern von Nutztieren gehört. Da nach dem Territorialprinzip die mit der Mast der exportierten Nutztiere verbundenen THG-Emissionen Deutschland zugerechnet werden, entspricht der Umfang der THG-Emissionen nicht den in Deutschland verbrauchten Fleischmengen. Dies gilt insbesondere für die Nutztierart Schwein, die seit dem Jahr 2006 einen steigenden Exportanteil aufweist. Demgegenüber sind die Nettoexporte von Kalb- und Rindfleisch seit dem Jahr 2000 gesunken und Deutschland ist seit dem Jahr 2016 zum Nettoimporteuer für das Fleisch dieser Nutztierart geworden. Die durch den Verzehr von Nutztieren und die Produktion von Milch entstehenden THG-Emissionen lassen sich national kaum ohne harte Minderungswerte der THG-Emissionen durch die Erzeugungshöhe beeinflussen. Ergänzend scheint es sinnvoll, vor allem durch die Erhöhung der Transparenz der Folgen eines hohen Fleischverbrauchs international die Nachfrage nach Fleisch zu reduzieren.

Abfallwirtschaft und Sonstiges

- Z41 Die THG-Emissionen im Sektor Abfallwirtschaft sanken seit dem Jahr 2000 insgesamt um 70,4 %. Damit hatte der Abfallsektor, bezogen auf das Basisjahr 2000, die mit Abstand höchste relative Minderungsrate über alle KSG-Sektoren hinweg. Die umfangreiche Minderung der THG-Emissionen wurde durch die Reduktion der THG-Emissionen aus der Abfalldeponierung erreicht.
- Z42 Insbesondere haben zur Minderung der THG-Emissionen aus der Abfalldeponierung Maßnahmen zur Reduktion der auf Deponien abgelagerten Mengen biologisch abbaubarer Abfälle beigetragen. Hierzu gehören zum einen die Maßnahmen aus der Zeit vor dem Jahr 2000 zur getrennten Erfassung von Bioabfällen aus Haushalten und Gewerbebetrieben und zur getrennten Erfassung von sonstigen Wertstoffen mit organischem Anteil und zum anderen die Bestimmungen zum maximalen Gesamtkohlenstoffgehalt von abgelagerten Abfällen aus der Abfallablagerungsverordnung (AbfAbIV), welche Mitte des Jahres 2005 in Kraft getreten ist (im Jahr 2009 aufgegangen in der Deponieverordnung). Durch die Grenzwerte der Verordnung wurde in der Praxis eine thermische oder mechanisch-biologische Vorbehandlung von Abfällen notwendig.
- Z43 Die Entwicklungen der THG-Emissionen für die biologische Behandlung von festen Bioabfällen sowie für die Abwasserbehandlung sind maßgeblich von strukturellen Effekten zum Bioabfall- und Abwasseraufkommen bestimmt. Darüber hinaus sind in Interaktion mit den anderen KSG-Sektoren zwei zusätzliche Effekte zu berücksichtigen. Zum einen werden durch die energetische Nutzung verschiedener Abfälle diese in den THG-Emissionen der Sektoren, in denen sie eingesetzt werden,

erfasst. Zum anderen trägt die Abfallwirtschaft durch die Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen erheblich zur Verringerung der THG-Emissionen in anderen Sektoren, wie z. B. in der Industrie, bei.

LULUCF

- Z44 Anders als die anderen Sektoren stellt der Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) im zeitlichen Verlauf überwiegend eine Emissions-Senke dar, da die Senkenwirkung der Waldbiomasse meist die THG-Emissionen aus organischen Böden kompensiert. Allerdings war der Sektor zwischen den Jahren 2002 und 2005 und im Jahr 2007 eine Netto-THG-Quelle wegen durch Holzeinschlag reduzierter Senkenleistung des Waldes. Die zeitlichen Schwankungen der Senkenleistung begründet sich in witterungsbedingten Schäden an den Pflanzen (Kalamitäten), sowie in schwankender Holznachfrage. Seit dem Jahr 2018 nimmt die Senkenleistung des Sektors LULUCF ab, da in Folge der Dürre die intakte Waldbiomasse zurückging und weniger CO₂ aufnehmen kann.
- Z45 Das KSG definiert in §3a Abs. 1 für den Sektor LULUCF lediglich drei Soll-Ziele für die Jahre 2030, 2040 und 2045. Durch das Fehlen von Zwischenzielen lässt sich der Pfad des Sektors nicht frühzeitig verfolgen und es besteht wenig Planungssicherheit für die Transformation des Sektors. Des Weiteren fehlen z. B. für das Monitoring des Waldzustands zeitlich hochaufgelöste Daten als Grundlage für Modellrechnungen.
- Z46 Die THG-Emissionen im Jahr 2021 lagen bei -11 Mt CO₂-Äq. Das KSG-Ziel für das Jahr 2030 von -25 Mt CO₂-Äq. wird laut Projektionsbericht 2021 mit projizierten +22,3 Mt CO₂-Äq. deutlich verfehlt. Die Aussagekraft dieser Projektion ist jedoch nicht hinreichend gegeben, da auf Grund veralteter Daten die Senkenkapazität des Waldes, der als größte Senke des Sektors fungiert, unterschätzt wird. Trotzdem bleibt eine große Unsicherheit in der Abschätzung des Beitrags des LULUCF-Sektors bestehen, der je nach Annahme über die Waldschäden in einer substantiellen Größenordnung liegen kann und damit auch einen großen Einfluss auf die Erreichung des übergeordneten Ziels für das Jahr 2030 hat.

Trendbetrachtungen zur Zielerreichung bis 2030

- Z47 Eine Fortschreibung der beobachteten Entwicklung in die Zukunft belegt für nahezu alle Sektoren wie auch für die Emissionen insgesamt, dass die Ziele des Klimaschutzgesetzes für das Jahr 2030 bei gleichbleibender Minderungsrate signifikant verfehlt würden. Vielfach sind die durch technische Substitution im fossilen Kapitalstock in der Vergangenheit realisierten Emissionseinsparungen ausgereizt und der Wechsel hin zu einem nicht-fossilen Kapitalstock ist zu schleppend verlaufen. Ohne einen Paradigmenwechsel in der Klimaschutzpolitik hin zu einer deutlichen Reduktion des fossilen Kapitalstocks, bei gleichzeitig verstärktem Aufbau eines nicht-fossilen Kapitalstocks und einer verstärkten Hebung von Potenzialen bei den Aktivitäten scheint ein Erreichen des Klimaziele nicht realisierbar.

Eine Ausnahme bildet die Energiewirtschaft, wo eine Fortschreibung der Absenkung der Emissionen aus der Vergangenheit eine Zielerreichung bis zum Jahr 2030 als möglich erscheinen lässt, zumindest dann, wenn man einbezieht, dass in den vergangenen Jahren zeitgleich der weitgehende Ausstieg aus der Kernenergie erfolgte. Allerdings gilt dies dann nicht mehr, wenn der Stromverbrauch zukünftig dadurch steigt, dass in Sektoren wie Gebäude, Verkehr und Industrie zunehmend Strom anstelle fossiler Energieträger Verwendung findet und auch der Stromverbrauch der Informations- und Kommunikationstechnologie weiterhin zunimmt.

Um die Ziele zum Ausbau von Photovoltaik, Wind an Land und Wind an See aus dem Osterpaket zu erreichen, sind erhebliche Zuwachsraten notwendig, die deutlich über den realisierten Zuwachsraten der letzten Jahre liegen. Das stellt die Lieferketten, das Handwerk sowie die Finanzierung vor vielfältige Herausforderungen. Die Realisierung der gesetzten Ziele im vorgesehenen Zeitraum ist daher mit erheblichen Unsicherheiten behaftet.

Zur Erreichung des Ziels aus dem Osterpaket wäre ein Netto-Zubau bei der Photovoltaik von rund 150 GWp (brutto vermehrt um altersbedingt ausscheidende Anlage bis zu 170 GWp) innerhalb von acht Jahren erforderlich. Dieses Ziel entspricht einem durchschnittlichen jährlichen Zubau von mehr als 20 GWp im laufenden Jahrzehnt. Dies ist ein signifikanter Anstieg, da der durchschnittliche Brutto-Zubau im vergangenen Jahrzehnt 4 GWp pro Jahr betragen hat. Im Jahr 2021 betrug er 5,3 GWp und im Jahr 2022 voraussichtlich bis rund 8 GWp. Eine derartige, schnelle Skalierung wirft vielfältige Herausforderungen für die Lieferketten, das Handwerk sowie die Finanzierung auf. Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass das durchschnittliche Zubauziel Deutschlands knapp 10 % des aktuellen Weltmarkts für PV-Module betrifft und somit durchaus weltweite Preiseffekte auslösen könnte. Der Weltmarkt wird zu über 90 % von asiatischen bzw. zu 70 % von chinesischen Herstellern dominiert. Angesichts der momentanen Unsicherheiten steht die Realisierung der formulierten Ausbauziele daher auch unter diesem Aspekt unter Vorbehalt.

Z48 Auch bei Wind an Land müssten zwischen den Jahren 2023 und 2030 ein durchschnittlicher Brutto-Zubau von 8 GW pro Jahr erreicht werden. Dieser Zubau liegt um den Faktor 1,6 über dem bisherigen Maximalzubau aus dem Jahr 2016 (5,1 GW). Hier spielen Standort- und Genehmigungsfragen eine größere Rolle, die eine Zielerreichung erschweren können. Derartige Herausforderungen sind im Osterpaket umfangreich adressiert worden. Für Wind auf See müsste ein Netto-Zubau von knapp 22 GW in den Jahren von 2023 bis 2030 erfolgen, was einer Steigerung des bisherigen Ausbautempos um einen Faktor von rund 3,5 erfordern würde.

Z49 Die Erfüllungslücken bei den Extrapolationen für die Sektoren Industrie, Gebäude und Verkehr lassen eine geringe Chance für die Erfüllung der im KSG niedergelegten Emissionsziele erwarten. Um die Klimaschutzziele für das Jahr 2030 zu erreichen, müssten im Durchschnitt im Gebäudesektor 5,1 Mt CO₂-Äq. und im Verkehrssektor und in der Industrie jeweils rund 7 Mt CO₂-Äq. jährlich eingespart werden.

Die zu erreichende Minderung von THG-Emissionen im Sektor Industrie liegt somit um den Faktor 10 über den im vergangenen Jahr erzielten Einsparungen. Die Klimaneutralitätsstudien und weitere aktuelle Szenarienrechnungen weisen aus, dass eine erhebliche, und nicht mehr nur graduelle Veränderung des industriellen Kapitalstocks hin zu nicht-fossilen Energieträgern, vor allem Strom und Wasserstoff, erforderlich wäre, um die Klimaziele zu erreichen. Sofern die entsprechenden Investitionen nicht getätigt und die hierfür benötigten infrastrukturellen Voraussetzungen (Stromnetz, Wasserstoffnetz und -bereitstellung) nicht in der gebotenen Geschwindigkeit – die zwar theoretisch erreichbar, aber keinesfalls im Trend der Vorjahre liegt – realisiert werden, könnte das Treibhausgasziel für die Industrie wohl nur durch eine Reduzierung der industriellen Aktivitäten in Deutschland erreicht werden.

Insbesondere das aktuell (und gegebenenfalls noch auf mehrere Jahre) im Weltmarktvergleich hohe Energiepreisniveau in Deutschland, vor allem für Strom und Gas, könnte absehbar zu einem Rückgang industrieller Aktivitäten hierzulande, und damit zu einer Minderung der sektoralen THG-Emissionen, führen, sofern der Staat diesen Effekt nicht kompensiert. Bei den Überlegungen, ob, in welchem Umfang, und auf welche Dauer derartige Kompensationen angelegt werden, sind die sektoralen Klimaschutzziele in angemessener Weise zu berücksichtigen. Vor diesem Hintergrund erscheint es sinnvoll, ein „Zielbild

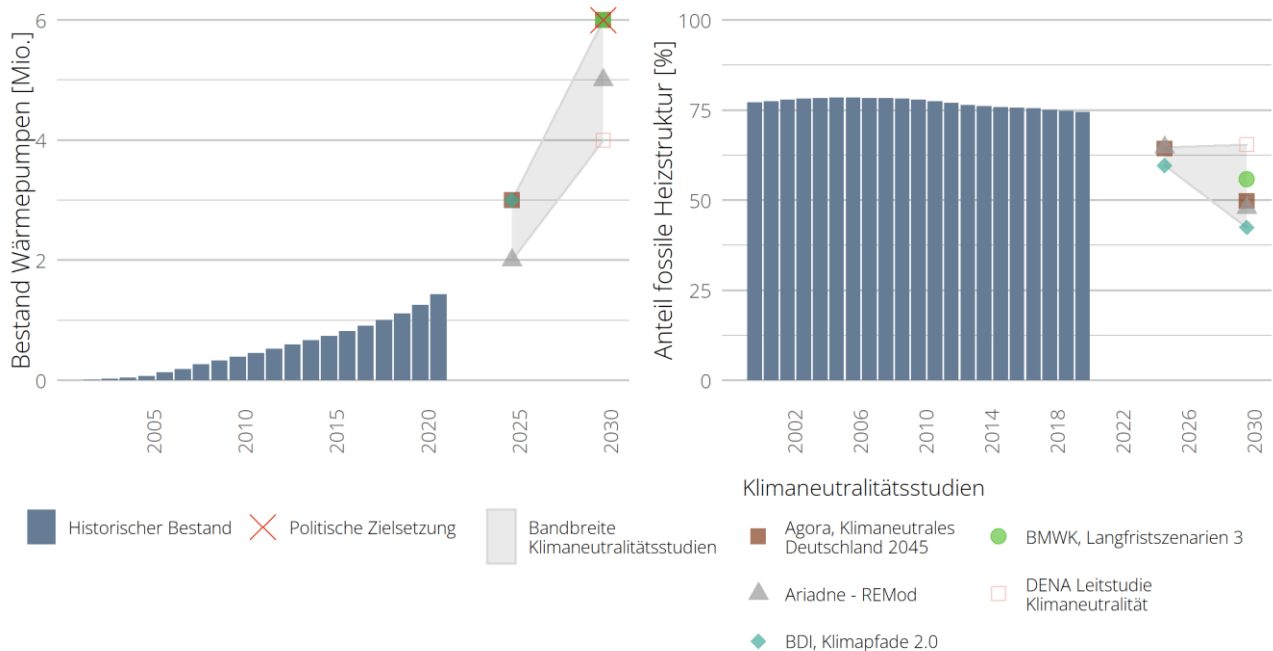
Industrie 2030“ zu definieren, welches die wirtschaftlichen und die klimapolitischen Ziele für diesen Sektor zu einem tragfähigen Ausgleich bringt. Aus diesem Zielbild können dann die erforderlichen Maßnahmen zur Begleitung der entsprechenden Veränderungsprozesse abgeleitet werden, wozu auch die Frage nach Ausgleichsmechanismen an der EU-Außengrenze (sogenannte Carbon Border Adjustment Mechanisms, CBAM) zählt.

Die Daten zur Entwicklung im Gebäudesektor lassen den Schluss zu, dass in den vergangenen Jahrzehnten eher eine Substitution innerhalb der fossilen Technologien bei Heizungen und Wärmeerzeugung als der Ersatz fossiler durch nichtfossile Technologien stattgefunden hat. Insbesondere die Verbauung von Gas- und Ölheizungen mit Brennwerttechnik wurde innerhalb der fossilen Heiz- und Wärmetechnologien vorangetrieben. Um die Ziele der Klimaneutralitätsstudien wie auch des Bundes-Klimaschutzgesetzes für das Jahr 2030 zu erreichen, sind Emissionsminderungen um durchschnittlich 5,14 Mt CO₂-Äq. pro Jahr durch den Ersatz von fossilen durch nicht-fossile sowie die Substitution innerhalb der fossilen Heiz- und Wärmetechnologien sowie durch eine steigende Rate der energetischen Sanierung des Gebäudebestands notwendig.

Insbesondere der Einsatz nicht-fossiler Technologien für die Wärme- und Kälteerzeugung im Gebäudesektor erfolgt bisher in einem viel zu geringen Maße (siehe Abbildung Z2), um die politischen Ziele der Bundesregierung für das Jahr 2030 zu erreichen, die mehr als eine Verdreifachung des Anteils erneuerbarer Energieträger vorsieht.

Im Bereich der nicht-fossilen Technologien bietet die Wärmepumpe einen zielführenden Ansatz zur Reduktion der THG-Emissionen, insbesondere im Gebäudesektor. Allerdings sind die in den Klimaneutralitätsstudien und im Koalitionsvertrag dargelegten Steigerungsraten in der Verbauung von Wärmepumpen nur schwer zu erreichen. Insbesondere die Verfügbarkeit von Fachkräften zur Verbauung von Wärmepumpen wie auch die benötigten Materialien stellen, wie der Expertenrat für Klimafragen bereits in seinem Prüfbericht zu den Sofortprogrammen 2022 für den Gebäude- und Verkehrssektor ausgeführt hat, eine Hürde für die Zielerreichung dar.

Abbildung Z2: Entwicklung der Anzahl Wärmepumpen und des Anteils der fossilen Heizstruktur im Vergleich zur politischen Zielsetzung sowie den Zielkorridoren der „Big 5“-Studien



Eigene Darstellung. Weitere Details zu den verwendeten Daten finden sich in Kapitel 3.

Z50 Während die Klimaneutralitätsszenarien für den Verkehrssektor sehr deutlich aufzeigen, dass es für die Zielerreichung auch eines Abbaus des Bestands fossiler Pkw bedarf, ist dieser Trend, der sich (laut Szenarien) spätestens ab dem Jahr 2025 abzeichnen müsste, noch nicht zu erkennen. Es erscheint unwahrscheinlich, dass ein Abbau des Bestands aus sich heraus erfolgt, vielmehr ist zu befürchten, dass zwar neue Elektroautos angeschafft werden, die alten Verbrenner-Autos aber als Zweitwagen weiter genutzt werden.

Der Trend des Anteils des Schienengüterverkehrs ist seit dem Jahr 2016 abnehmend und zeigt damit eine andere Richtung auf, als in den Zielszenarien von zwei der fünf Klimaneutralitätsstudien (siehe Kapitel 3) erforderlich. Gleichzeitig hat der Güterverkehr auf der Straße zwischen den Jahren 2012 und 2018 stetig zugenommen. Die Erreichung der politischen Zielsetzung bei weiterwachsendem Güteraufkommen erscheint daher sehr ambitioniert und erfordert hohe Investitionen und politische Anstrengungen.

Z51 Im Landwirtschaftssektor ist eine Zielerreichung basierend auf der Entwicklung seit dem Jahr 2015 erreichbar. Dies gilt umso mehr als durch die neue Messmethodik bei den Lachgasemissionen deutlich geringere Emissionswerte anzusetzen sind. Wenn keine Anpassung der Zielwerte in Anlage 2 des Bundesklimaschutzgesetzes erfolgt, könnte der Landwirtschaftssektor sogar bei gleichbleibenden THG-Emissionen das Klimaschutzziel im Jahr 2030 ohne weitere Veränderungen erreichen.

Z52 In der Abfallwirtschaft zeigt die Extrapolation einen etwas stärkeren Abwärtstrend als das Mit-Maßnahmen-Szenario des Projektionsberichts 2021 und die KSG-Ziele, welche ungefähr den gleichen Verlauf aufweisen. Sollten die beschlossenen Maßnahmen in der Abfallwirtschaft umgesetzt werden, ist ein Erreichen der KSG-Ziele in diesem Sektor als realistisch einzustufen. Ein Großteil der THG-Emissionen entstammt der Abfalldeponierung, deren THG-Emissionen kontinuierlich absinken, weil sich

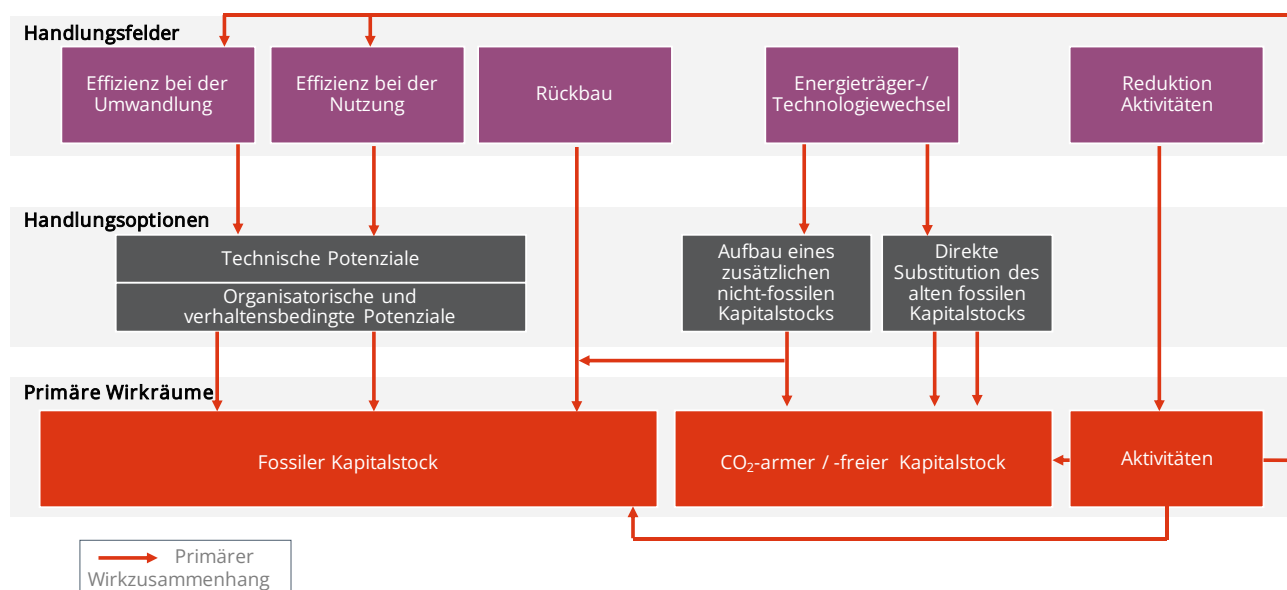
die Methanbildung aus alten Deponien sukzessive verkleinert. Somit sind diese THG-Emissionen unabhängig von beschlossenen Maßnahmen und ein Absinken der THG-Emissionen zu erwarten.

Betrachtungen zu klimapolitischen Maßnahmen und ihrer Wirksamkeit

- Z53 Der Rückblick auf das Instrumentarium der Klimapolitik in Deutschland in den letzten 20 Jahren hat gezeigt, dass der Instrumentenmix sich seit dem Jahr 2000 zunehmend ausdifferenziert hat und mittlerweile ein breites Spektrum umfasst. Dabei ist zu beobachten, dass durchgängig deutlich mehr neue Maßnahmen geschaffen als alte abgeschafft worden sind. Vorwiegend wurde auf Ergänzung der Regulierung durch zusätzliche Instrumente gesetzt. Ferner haben sich die Schwerpunkte dieser Erweiterungen der klimapolitischen Regulierung im Zeitverlauf merklich verschoben. Während in den 2000er Jahren die Weiterentwicklung stark durch ökonomische Instrumente (v. a. EU-ETS, EEG, KWKG und Ökosteuer) sowie Ordnungsrecht (v. a. Atomausstieg, Biokraftstoffe) geprägt war, wurden in der Periode ab 2010 insbesondere fiskalische Instrumente der staatlichen, überwiegend aus Haushaltsmitteln finanzierten Förderung hinzugefügt. Dies gilt vor allem für die Sektoren Gebäude, Industrie und auch den Verkehr. Unter allen verwendeten Instrumenten kann vermutlich dem EU-ETS und dem EEG die größte materielle Wirkreichweite zugewiesen werden.
- Z54 Die staatliche Regulierung wurde in beiden Zeitphasen zunehmend auch durch die EU geprägt. Dabei setzte die EU zunächst weitgehend auf das ökonomische Instrument des EU-ETS. Dieses mengensteuernde Instrument stellt seither einen wichtigen Treiber für die Entwicklung der THG-Emissionen in den Sektoren Energiewirtschaft und Industrie dar (insbesondere seit dem Jahr 2017 mit der dritten Phase des EU-ETS). Ab dem EU-Gipfel im Dezember 2007 ist die EU jedoch vermehrt auch ordnungsrechtlich aktiv geworden. Auf nationaler Ebene wurden ökonomische Instrumente der Preis- und/oder Mengensteuerung nur zu Beginn der Betrachtungsperiode (Ökologische Steuerreform 1999) und dann wieder am Ende mit der Einführung des BEHG zum Jahr 2021 eigenständig eingeführt.
- Z55 Die meisten der im Betrachtungszeitraum etablierten ordnungsrechtlichen und förderpolitischen Instrumente zielten auf eine Minderung der THG-Emissionen durch eine Erhöhung der Energieeffizienz des bestehenden, überwiegend fossilen Kapitalstocks ab, und zwar sowohl auf der Umwandlungs- als auch auf der Nutzungsebene. Entsprechend leisteten diese Handlungsfelder wesentliche emissionsmindernde Beiträge in den meisten KSG-Sektoren. Eine Ausnahme stellt der Sektor Energiewirtschaft dar, in dem das EEG seit dem Jahr 2000 (in der Nachfolge des Stromeinspeisungsgesetz von 1990) den Zubau von Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern aktiv befördert. In den übrigen Sektoren wurde der Zubau von neuem CO₂-ärmerem oder -freiem Kapitalstock erst relativ spät instrumentell adressiert (zunächst mit dem Marktanreizprogramm im Gebäudebereich, später auch durch die Förderung der Elektromobilität). Die Option eines Rückbaus des bestehenden fossilen Kapitalstocks wurde neben kleineren Maßnahmen in den Sektoren Verkehr und Gebäude (Abwrackprämie, APEE) insbesondere mit dem Kohleausstieg im Sektor Energiewirtschaft adressiert.
- Z56 Neben den indirekt auf die Aktivitäten wirkenden Preissteigerungen durch EU-ETS und Energiesteuern wurde das Handlungsfeld der Aktivitätsreduktion im bisherigen Instrumentenmix kaum direkt adressiert. Allerdings wirkten sich wirtschaftliche Krisen – wie die Finanzkrise im Jahr 2008 und in Folge der Covid-19-Pandemie im Jahr 2020 – emissionsmindernd aus, woraus ersichtlich wird, welches Potenzial dieser Wirkraum mit Blick auf die Erreichung der KSG-Ziele haben kann.

Z57 Instrumentenseitig waren die letzten drei Jahre krisengeprägt. Während die in der Covid-19-Pandemie aufgelegten Konjunkturprogramme auch Elemente enthielten, die beispielsweise den Energieträgerwechsel und die Gebäudesanierung förderten, ist bei den seit Februar 2022 bereits implementierten und geplanten Maßnahmen zur Bewältigung der Energiekrise noch nicht klar ersichtlich, ob diese in der Summe eher treibhausgasmindernd oder -steigernd wirken. Zu erwarten ist darüber hinaus ein durch den hohen Kostendruck induzierter Produktionsrückgang, d.h. ein aktivitätsbedingter Emissionsrückgang insbesondere in der Industrie, aber ggf. auch in anderen Sektoren, wie er auch in der Folge der Finanzkrise und der Covid-19-Pandemie zu beobachten war. Im Sektor Energiewirtschaft dürften sich die aktuellen Entwicklungen aufgrund des stärkeren Einsatzes von Kohle statt Erdgas zunächst treibhausgassteigernd auswirken, während sie in den Sektoren Industrie (aufgrund des erwarteten wirtschaftlichen Rückgangs, allerdings teilweise kompensiert durch einen Brennstoffwechsel von Erdgas zu Heizöl) und Gebäude (aufgrund der kurz- und mittelfristigen Maßnahmen zur Gaseinsparung) eher THG-mindernd wirken dürften. Im Verkehrssektor ist der Nettoeffekt aufgrund sich überlagernder Effekte von hohen Kraftstoffpreisen, Tankrabbatt, 9-Euro-Ticket und der geringen Preiselastizität schwierig abzuschätzen, ebenso wie der Nettoeffekt auf die gesamten THG-Emissionen in Deutschland.

Abbildung Z3: Mögliche von der Politik beeinflussbare Handlungsfelder und -optionen zur Treibhausgasminde rung



Eigene Darstellung.

Z58 Die Analysen zum Instrumentenmix der Klimapolitik haben gezeigt, dass dieser bisher insbesondere auf die technische Verbesserung der Energieeffizienz bei der Umwandlung und Nutzung sowie den bisher überwiegend im Energiesektor erfolgten Aufbau eines neuen, nicht-fossilen Kapitalstocks gerichtet waren. Zukünftig werden die weiteren genannten Handlungsoptionen einen erheblich größeren Beitrag leisten müssen. Auf der einen Seite muss der abnehmende Beitrag der technologischen Verbesserungen auf der Umwandlungsseite kompensiert werden, auf der anderen Seite müssen die im Vergleich zur Vergangenheit erheblich höheren Treibhausgasminde rungen erzielt werden, die zur Erreichung der Klimaziele für das Jahr 2030 erforderlich sind. Damit sind instrumentenseitig die

technischen Effizienzpotenziale auf der Nutzungsebene, der Rückbau des alten fossilen Kapitalstocks, und verhaltensbedingte Effizienzpotenziale sowie möglicherweise auch zentrale Aktivitätsgrößen stärker zu adressieren als in der Vergangenheit. Zugleich sollten der Treibhausgasminde rung nicht förderliche Anreizstrukturen im klimapolitischen Instrumentarium konsequent vermieden werden.

Z59 Eine weitere Beobachtung betrifft die Komplexität der Regelungen und Details der Ausführungsbedingungen einmal eingeführter und dann aus unterschiedlichsten Gründen angepasster und weiterentwickelter Maßnahmen und Gesetze. Gerade vor dem Hintergrund der notwendigen Steigerung der Reduktionsgeschwindigkeit der THG-Emissionen zur Erreichung der Ziele des KSG und der damit verbundenen notwendigen Beschleunigung von Investitionen zum Umbau des Kapitalstocks von fossilen zu nicht-fossilen Anlagen scheint der Sachverhalt der hohen – und zumeist steigenden – Komplexität des regulatorischen Rahmens sich selbst zu einem Hemmnis zur Erreichung dieser Ziele zu entwickeln. Bei der künftigen (Weiter-) Entwicklung von Maßnahmen und Instrumenten und deren Ausgestaltung sollte dieser Gesichtspunkt der steigenden Komplexität wesentliche Berücksichtigung finden.

Z60 Zusammenfassend scheint das Erreichen der mit der Revision des KSG angehobenen THG-Minderungsziele bis zum Jahr 2030 nur dann wahrscheinlich, wenn alle in Zukunft noch verfügbaren Handlungsfelder effektiv von der Klimapolitik adressiert werden. Die erfolgreiche Erreichung der Treibhausgasminde rungsziele setzt also ein geschicktes Zusammenspiel des Aufbaus von neuem CO₂ armem/-freiem Kapitalstock und die Rückführung der Nutzung von altem fossile m Kapitalstock bis hin zu dessen Rückbau voraus. Der Expertenrat für Klimafragen hat bereits in seinem Prüfbericht zur Berechnung der deutschen THG-Emissionen für das Jahr 2021 eine politisch vorgegebene fixe Begrenzung von Emissionsmengen in Verbindung mit der Etablierung eines entsprechenden Handelssystems als grundsätzliche Alternative zu der im KSG bisher angelegten Steuerungslogik dargestellt. Ein harter Mengendeckel würde die erforderlichen Maßnahmen erzwingen, allerdings zu einem wirtschaftlich wie gesellschaftspolitisch möglicherweise übermäßig hohen Preis. Ohne einen harten Mengendeckel müssen die erforderlichen Investitionen, Des-Investitionen und Nutzungsänderungen auf anderem Wege angereizt werden, und selbst mit einer harten Begrenzung wären aus den genannten Gründen flankierende Maßnahmen unerlässlich. Somit stellt sich dem Staat eine Koordinationsaufgabe bei der Lenkung der entsprechenden wirtschaftlichen Prozesse, die durch Marktkräfte allein (ob mit oder ohne harten Mengendeckel) den politisch gewünschten Pfad nicht vollständig in der gesetzten Zeitspanne implementieren würden.

Weiterführende Betrachtungen

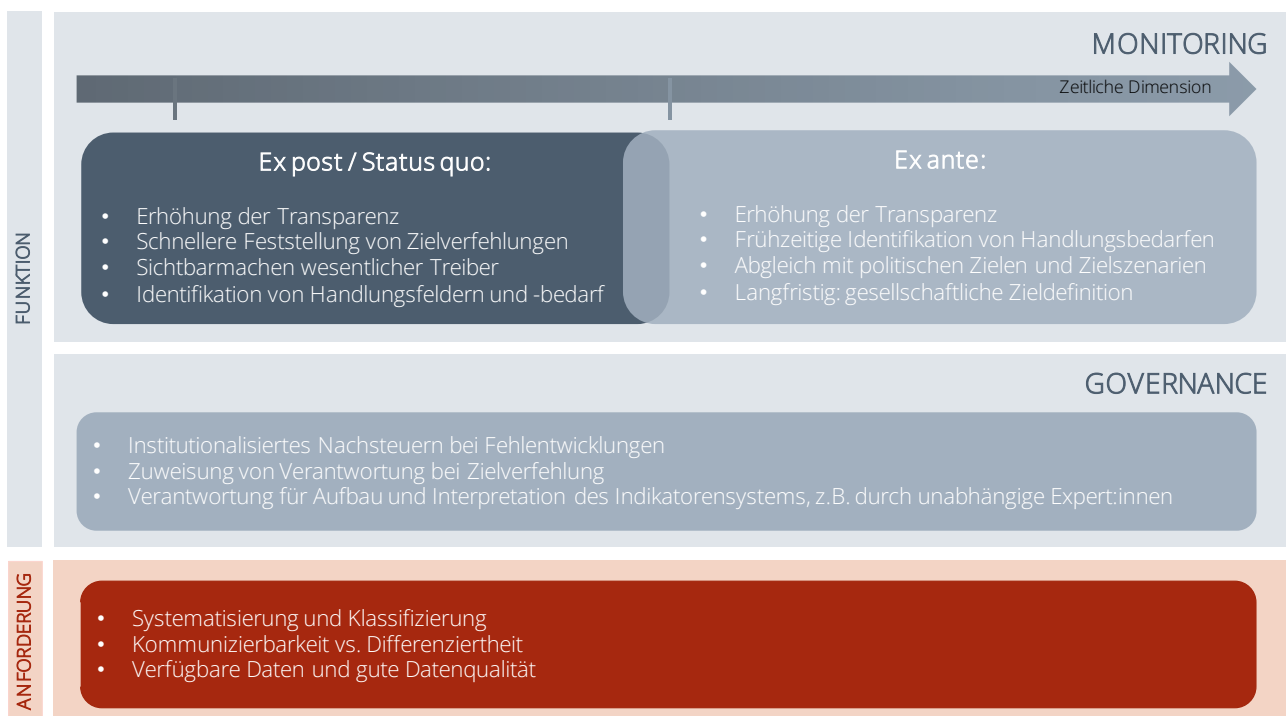
Indikatoren für Monitoring und Governance von Klimazielen

Z61 Die Analysen dieses Berichts haben gezeigt, dass mit einer Fortsetzung der Klimapolitik der vergangenen Jahre die Erreichung der Ziele des Klimaschutzgesetzes unwahrscheinlich ist. Die tiefergehenden Analysen konnten an verschiedenen Stellen Treiber und Ursachen für das beobachtete Geschehen liefern, insbesondere auch dort, wo Ziele nicht erreicht wurden. Generell wäre es hilfreich, solche Analysen systematischer und frühzeitiger durchzuführen und zu bündeln, um i) ein vollständiges Bild der deutschen Klimapolitik als Basis zu haben und nicht nur auf sektorale THG-Ziele zu fokussieren und ii) bei Verfehlungen schneller nachsteuern zu können. Indikatoren können dabei eine wichtige Funktion für Monitoring und Governance von Klimazielen einnehmen. In einigen Ländern werden Indikatoren bereits für das Monitoring des Fortschritts hin zur Klimaneutralität eingesetzt und sind auch in der Klimaschutz-Governance der Länder verankert, so beispielsweise im Vereinigten Königreich, Frankreich,

den Niederlanden oder Schweden. Auch auf Europäischer Ebene werden bereits im Rahmen der nationalen Berichtspflichten verschiedene Indikatoren abgefragt.

Generell kann zwischen einer Monitoring- und einer Governance-Funktion von Indikatoren unterschieden werden, zudem bestehen gewisse grundsätzliche Anforderungen an Indikatoren (siehe Abbildung Z4). Im Rahmen der Monitoring-Funktion kann nach der zeitlichen Dimension (ex post und ex ante) differenziert werden. Dabei stellt das Monitoring anhand von Indikatoren eine erhöhte Transparenz sicher und die frühzeitige Identifikation von Handlungsfeldern ermöglicht ein frühzeitiges Nachsteuern durch die Politik. Die Einbeziehung von Indikatoren in den Governance Prozess könnte sowohl institutionalisiertes frühzeitiges Nachsteuern als auch klare Zuweisung von Verantwortungen bei Zielverfehlung ermöglichen, wie es derzeit im Klimaschutzgesetz nur auf Basis von THG-Emissionen bei den Sektorzielen der Fall ist. Übergreifend bestehen zudem gewisse Anforderungen an Indikatoren, beispielsweise die Verantwortung für die Bereitstellung und Verfügbarkeit von Daten, sowie eine gute Kommunizierbarkeit bei gleichzeitig differenzierter Darstellung eines möglichen Indikatorensets. Eine Möglichkeit wäre die Nutzung verschiedener Hierarchieebenen zur Systematisierung und Klassifizierung des Indikatorensets.

Abbildung Z4: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Funktionen und Anforderungen an Indikatoren



Eigene Darstellung.

Z62 Um das Monitoring und die Nachsteuerung im KSG zu ergänzen oder zu erweitern, könnte das bislang ausschließliche Monitoring der sektoralen Emissionswerte durch die Einbeziehung weiterer (Früh-) Indikatoren erweitert werden. Zudem könnten auch Betrachtungen im Ausblick (ex ante) bei der Entwicklung klimapolitischer Maßnahmen einbezogen werden, um ein besseres Gesamtbild zu bekommen und auf dieser Basis zu einer besseren Steuerung zu gelangen. Der Expertenrat für

Klimafragen regt an, einen koordinierten Prozess zu starten, um eine verbesserte Nutzung von Indikatoren in der deutschen Klimapolitik zu ermöglichen.

Anmerkungen zur Datenverfügbarkeit

Z63 Die Verfügbarkeit qualitativ hochwertiger, aussagekräftiger Daten bildet eine wesentliche Voraussetzung für eine tiefergehende Analyse des Emissionsgeschehens. Die zusätzliche Erhebung fehlender Daten und eine Harmonisierung vorhandener Daten in Bezug auf zeitliche Verfügbarkeit, Bilanzgrenzen und zeitliche Auflösung wären wichtige Schritte für die Bereitstellung einer besseren Basis für sektorale und übergreifende Analysen von Trends und der Wirksamkeit politischer Maßnahmen und damit beitragen, eine höhere Transparenz bezüglich der Ursachen der Entwicklung des Emissionsgeschehens zu erlangen.

1 Auftrag und Herangehensweise

- 1 Am 12. Dezember 2019 hat der Deutsche Bundestag das Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) beschlossen (KSG 2019), das am 18. Dezember 2019 in Kraft trat und am 18. August 2021 novelliert wurde (KSG 2021). Zweck des Gesetzes ist es, „zum Schutz vor den Auswirkungen des weltweiten Klimawandels die Erfüllung der nationalen Klimaschutzziele sowie die Einhaltung der europäischen Zielvorgaben zu gewährleisten. Die ökologischen, sozialen und ökonomischen Folgen werden berücksichtigt. Grundlage bildet die Verpflichtung nach dem Übereinkommen von Paris aufgrund der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen, wonach der Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2 Grad Celsius und möglichst auf 1,5 Grad Celsius gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen ist, um die Auswirkungen des weltweiten Klimawandels so gering wie möglich zu halten, sowie das Bekenntnis der Bundesrepublik Deutschland auf dem Klimagipfel der Vereinten Nationen am 23. September 2019 in New York, Treibhausgasneutralität bis 2050 als langfristiges Ziel zu verfolgen.“ (KSG 2019).
- 2 Im Rahmen des Bundes-Klimaschutzgesetzes hat Deutschland seine nationalen Klimaziele für das Jahr 2030 durch sechs Sektorziele⁶ näher ausgestaltet. Für die Sektoren werden, mit Ausnahme der Energiewirtschaft, zusätzlich verbindliche jährliche Sektorziele durch Vorgabe von Jahresemissionsmengen festgeschrieben. Für den Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) werden für die Jahre 2030, 2040 und 2045 Sollziele definiert. Zudem werden für die Jahre 2031 bis 2040 nationale Minderungsziele festgelegt.
- 3 Im Bundes-Klimaschutzgesetz wird auch die Rolle des unabhängigen Expertenrats für Klimafragen (ERK) definiert. Wie im Bundes-Klimaschutzgesetz 2019 festgelegt, prüft der ERK insbesondere das Erreichen der Sektorziele und nimmt Stellung zu wichtigen klimapolitischen Maßnahmen. Zusätzlich kam durch die KSG-Novelle 2021 folgende weitere Aufgabe hinzu (§ 12 Abs. 4 KSG): „Der Expertenrat für Klimafragen legt erstmals im Jahr 2022 und dann alle zwei Jahre dem Deutschen Bundestag und der Bundesregierung ein Gutachten zu bisherigen Entwicklungen der THG-Emissionen, Trends bezüglich der Jahresemissionsmengen und Wirksamkeit von Maßnahmen mit Blick auf die Zielerreichung nach diesem Gesetz vor.“ Dieser Aufgabe kommt der Expertenrat mit diesem Gutachten nach.
- 4 Gemäß dem gesetzlichen Auftrag werden in diesem Gutachten einerseits historische Daten betrachtet. Darin sind auch Entwicklungen zu sehen, die auf Maßnahmen in Folge der Covid-19-Pandemie zurückzuführen sind. Andererseits werden in denjenigen Abschnitten, die sich mit den Trends der THG-Emissionen und daraus abgeleiteten vorausschauenden Erwartungen beschäftigen, jüngste Entwicklungen, die sich in Folge des Angriffskriegs von Russland gegen die Ukraine ergeben, diskutiert und deren zu erwartende Effekte eingeordnet.

⁶ Minderungsziele sind im Bundes-Klimaschutzgesetz in Anlage 2 festgesetzt für die Sektoren Energiewirtschaft, Industrie, Verkehr, Gebäude, Landwirtschaft, Abfallwirtschaft und Sonstiges. Die Abgrenzung der Sektoren erfolgt entsprechend der Quellkategorien des gemeinsamen Berichtsformats (Common Reporting Format – CRF) nach der Europäischen Klimaberichterstattungsverordnung oder entsprechend einer auf der Grundlage von Artikel 26 Absatz 7 der Europäischen Governance-Verordnung erlassenen Nachfolgeregelung.

- 5 Datengrundlage sind die innerdeutschen THG-Emissionen gemäß der einheitlichen Berichterstattung Deutschlands nach der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen.⁷ Um Effekte, die wesentlich durch das Witterungsgeschehen bestimmt sind, herauszurechnen und somit ein klareres Bild der Entwicklung aufgrund von Handlungen im politischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Raum zu ermöglichen, wurden der Energieverbrauch und die THG-Emissionen des Gebäudesektors temperaturbereinigt.⁸ Als Zeitraum für die historischen Analysen werden die Jahre von 2000 bis 2021 berücksichtigt. Emissionseinsparungen, die auf Effekte der deutschen Wiedervereinigung zurückzuführen sind (z. B. durch Stilllegungen von emissionsintensiven Industrieanlagen), fallen überwiegend in die 1990er Jahre und sind somit nicht im Fokus der Betrachtungen. Zudem bestanden für den Zeitraum ab dem Jahr 2000 durch die Zielsetzung des Kyoto-Protokolls von 1997 und der Einführung des Nationalen Klimaschutzprogramms im Jahr 2000 erstmals integrierte Ziele und Maßnahmen zur Reduzierung der THG-Emissionen in Deutschland. Das für dieses Gutachten gewählte Vorgehen basiert auf insgesamt fünf Analyseschritten. Die Analysen werden sowohl sektorenübergreifend als auch auf sektoraler Ebene⁹ durchgeführt.
- 6 In Kapitel 2 werden die bisherigen Entwicklungen und Trends der THG-Emissionen aus einer ex post Perspektive in drei Analyseschritten untersucht. Im ersten Analyseschritt wird die historische Entwicklung der THG-Emissionen im betrachteten Zeitraum beschrieben. Im zweiten Analyseschritt wird das Emissionsgeschehen mithilfe einer Dekompositionsanalyse in zentrale Komponenten zerlegt.¹⁰ Dies erlaubt eine Einordnung, welchen relativen Effekt zentrale Emissionstreiber (z. B. Wirtschaftsentwicklung, Energieintensität, Emissionsintensität) auf die Entwicklung der THG-Emissionen insgesamt und auf Ebene der Sektoren hatten. Der dritte Schritt umfasst eine vertiefte Analyse der beobachteten Entwicklungen. Hierfür werden die Ursachen hinter den Entwicklungen der einzelnen Komponenten aus der Dekompositionsanalyse genauer beleuchtet. Dabei werden insbesondere drei Arten von Entwicklungen berücksichtigt: (autonomer) technologischer Fortschritt, (Markt-)Preise bzw. (markt-)preisgetriebene Entwicklungen sowie politikgetriebene Entwicklungen (politische Maßnahmen).
- 7 In Kapitel 3 wird in einem vierten Analyseschritt Zielerreichung nach dem Bundes-Klimaschutzgesetz aus einer ex ante Perspektive betrachtet. Dafür wird zunächst sektorenübergreifend und auf der Ebene der einzelnen Sektoren analysiert, inwiefern die Geschwindigkeit der Dekarbonisierung der letzten Jahre ausreicht, um die jeweiligen Sektorziele des Bundes-Klimaschutzgesetzes für das Jahr 2030 zu erreichen. Anschließend wird mithilfe von ausgewählten Kenngrößen (z. B. installierter Leistung der Photovoltaik (PV), Bestand fossiler Personenkraftwagen (Pkw)) beispielhaft die zu erwartende Wirkung auf die THG-Minderung in Deutschland betrachtet. Dabei wird, ausgehend von der aktuellen Entwicklungsdynamik,

⁷ Als Vertragsstaat der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) hat sich Deutschland mit Inkrafttreten des Kyoto-Protokolls dazu verpflichtet, seine THG-Emissionen in einem standardisierten Nationalen Inventarbericht (NIB, englisch: national inventory report, NIB) auszuweisen. Die Berichterstattung erfolgt gemäß UNFCCC-Richtlinie zur Berichterstattung über jährliche Inventare (UNFCCC 2014) und den 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC 2006).

⁸ Neben dem Energieverbrauch und den THG-Emissionen des Gebäudesektors wird auch das Dargebot derjenigen Wandler erneuerbarer Energien, die Solar- und Windenergie nutzen, wesentlich durch das Witterungsgeschehen bestimmt. Aus Gründen der Datenverfügbarkeit und Machbarkeit wurde in diesem Bericht allerdings nur eine Temperaturbereinigung im Gebäudesektors berücksichtigt. Für eine genaue Beschreibung der Temperaturbereinigung siehe auch Kapitel 6 Anhang.

⁹ Aufgeschlüsselt nach den KSG-Sektoren Energiewirtschaft, Industrie, Verkehr, Gebäude, Landwirtschaft, Abfallwirtschaft und Sonstiges und LULUCF.

¹⁰ Siehe dazu auch die weiterführenden Erläuterungen zur Dekompositionsanalyse in Kapitel 6 Anhang.

auf eine Einordnung anhand von politischen Zielsetzungen einerseits und Zielparametern aus Klimaneutralitätsstudien¹¹ andererseits zurückgegriffen.

- 8 Kapitel 4 umfasst den fünften Analyseschritt, in dem Ansatzpunkte und Wirksamkeit der klimapolitischen Instrumente diskutiert werden. Dafür wird untersucht, welchen Beitrag die klima- und energiepolitischen Instrumente, die im betrachteten Zeitraum auf nationaler und EU-Ebene etabliert wurden, zu der Entwicklung der zentralen Treiber leisteten. Eine wesentliche Rolle spielt dabei die Wirksamkeit der Instrumente im Einzelnen und in ihrem Zusammenwirken. Diese Betrachtung gibt auch Hinweise auf zukünftige Anforderungen an den Instrumentenmix der Klimapolitik in Deutschland. Dabei werden auch die aktuellen Entwicklungen berücksichtigt, die geprägt waren durch eine reaktive Krisenpolitik als Folge der Covid-19-Pandemie und zuletzt der durch den russischen Angriffskrieg auf die Ukraine ausgelöste Gas- und Energiepreiskrise.
- 9 Kapitel 5 umfasst weiterführende Betrachtungen. Im ersten Teil zur Rolle von Indikatoren für das Monitoring und die Governance von Klimazielen. In einem zweiten Teil des Kapitels werden Fragen der Datenverfügbarkeit behandelt.

¹¹ Hierbei handelt es sich um die sogenannten „Big 5“-Studien, also die Klimaneutralitätsstudien der Stiftung Klimaneutralität/Agora Energiewende/Agora Verkehrswende (Prognos et al. 2021), BDI (BDI 2021), dena (dena 2021a), BMWK (Fraunhofer ISI et al. 2021) und dem Ariadne-Projekt (Luderer et al. 2021).

2 Beschreibung und Analyse bisheriger Entwicklungen

2.1 Sektorenübergreifende Betrachtung

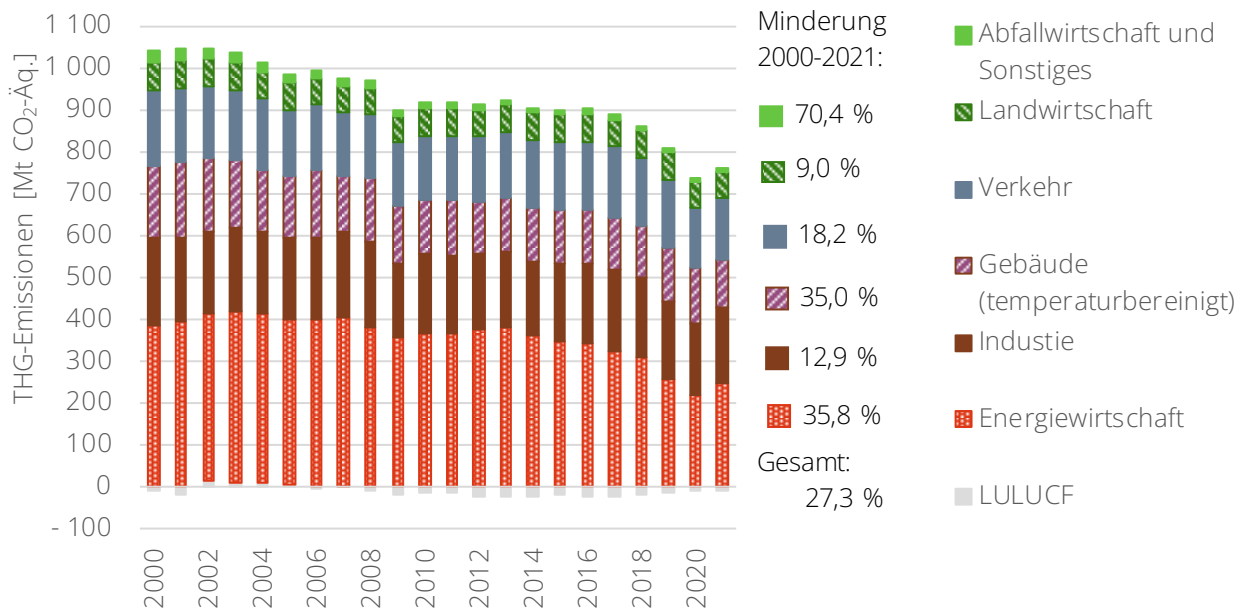
2.1.1 Entwicklung der Treibhausgasemissionen

- 10 In Deutschland sind die THG-Emissionen seit dem Jahr 2000 ohne die Berücksichtigung des LULUCF-Sektors und unter Berücksichtigung der Temperaturvereinbarung im Gebäudesektor¹², von 1 044 Mt CO₂-Äq. auf 759 Mt CO₂-Äq. im Jahr 2021 gesunken.¹³ Dies entspricht einer Reduktion um 27,3 % bezogen auf den Wert im Jahr 2000. Abbildung 5 zeigt den Verlauf der THG-Emissionen. Der betrachtete Zeitraum von 2000 bis 2021 lässt sich grob in drei Phasen mit je unterschiedlicher Entwicklung der THG-Emissionen einteilen. In der ersten Phase von 2000 bis 2010 kam es ohne die Berücksichtigung des LULUCF-Sektors zu einer Reduktion der THG-Emissionen um 126 Mt CO₂-Äq., was einer Reduktion von 12,1 % bezogen auf den Wert im Jahr 2000 entspricht. In einem vornehmlich stabilen Trend verursachte im Wesentlichen die Finanzkrise im Jahr 2009 eine Minderung der THG-Emissionen, vor allem in den Sektoren Industrie und Energiewirtschaft. In der zweiten Phase von 2011 bis 2017 kam es zu deutlich geringeren Reduktionen der THG-Emissionen um rund 30 Mt CO₂-Äq. (ohne Berücksichtigung des LULUCF-Sektors), was bezogen auf den Wert des Jahres 2000 lediglich einer Reduktion um 2,9 % entspricht bzw. von 0,4 % pro Jahr. Im Vergleich dazu kam es in der dritten Phase zwischen den Jahren 2017 und 2021 zur stärksten jährlichen Minderung der THG-Emissionen. In dieser Phase wurden die THG-Emissionen ohne den LULUCF-Sektor um 128 Mt CO₂-Äq. reduziert. Dies stellt für die THG-Minderung bezogen auf das Jahr 2000 einen relativen Anteil von 12,3 % bzw. 3,1 % pro Jahr dar. Dabei ist zu berücksichtigen, dass insbesondere das Jahr 2020 sowie die erste Jahreshälfte von 2021 durch zusätzliche THG-Minderungen in Folge der Covid-19-Pandemie geprägt waren. Insgesamt zeigt sich eine Emissionssenkungen in den letzten 20 Jahren, wobei fast die Hälfte auf die Emissionsminderung im Energiesektor zurückzuführen ist. Im Gebäude-, Industrie- und Verkehrssektor sanken die THG-Emissionen nur sehr geringfügig, wobei es zwischenzeitlich sogar zu Emissionssteigerungen kam.

¹² Siehe Kapitel 6 Anhang zum Vorgehen bei der Temperaturvereinbarung im Gebäudesektor.

¹³ Die THG-Emissionen Deutschlands sind seit dem Jahr 2000 ohne die Berücksichtigung des LULUCF-Sektors und die Temperaturvereinbarung im Gebäudesektor von 1 037 Mt CO₂-Äq. auf 762 Mt CO₂-Äq. im Jahr 2021 gesunken. Dies entspricht einer Reduktion um 26,5 % bezogen auf den Wert im Jahr 2000. Im Jahr 1990 betrugen die THG-Emissionen 1 242 Mt CO₂-Äq. Somit sind die THG-Emissionen gegenüber dem Jahr 1990 um 38,6 % gesunken. Zwischen den Jahren 1990 und 1995 gingen die THG-Emissionen stark zurück. Dieser Rückgang ist hauptsächlich auf den wirtschaftlichen Umbruch in den neuen Bundesländern zurückzuführen sowie die Stilllegung von veralteten Braunkohlekraftwerken und Industrieanlagen. Aufgrund guter wirtschaftlicher Entwicklung steigen die THG-Emissionen im Jahr 1996 an und fallen bis zum Jahr 1999 wieder aufgrund eines konjunkturellen Einbruchs. Häufig dient das Jahr 1990 als Referenzjahr, beispielsweise im Bundes-Klimaschutzgesetz oder den Klimazielen der EU. In diesem Gutachten wird das Jahr 2000 als Basisjahr gewählt (siehe Begründung in Kapitel 1)

Abbildung 5: Entwicklung der deutschen THG-Emissionen im Zeitraum 2000-2021 in den einzelnen Sektoren nach Bundes-Klimaschutzgesetz



Eigene Darstellung auf Basis der Trendtabellen des Treibhausgasinventars 2022 (UBA 2022c). Die Daten für das Jahr 2021 basieren auf der Berechnung der Vorjahresemissionen, Inventardaten liegen zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vor.

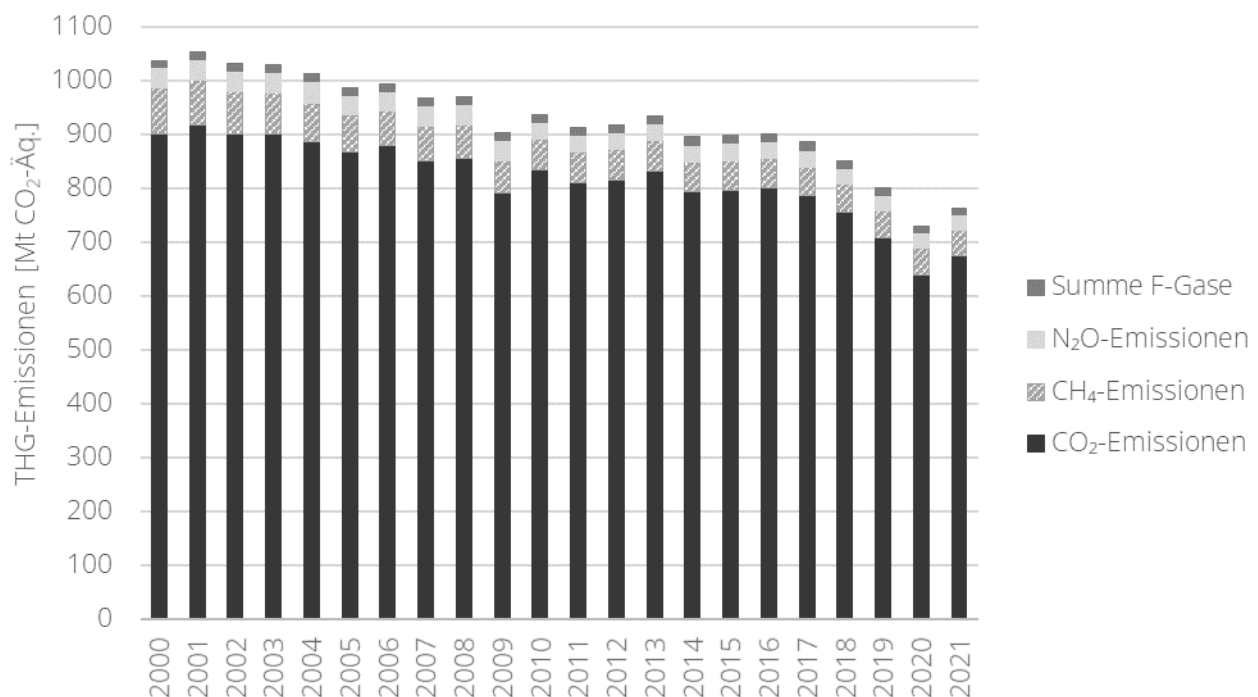
- 11 Hinter den in Abbildung 5 dargestellten THG-Emissionen stehen diverse erfasste Treibhausgase, welche in Abbildung 6 über den Zeitraum von 2000 bis 2021 ohne Berücksichtigung des LULUCF-Sektors dargestellt werden. Der größte Anteil der THG-Emissionen entfällt dabei über den gesamten Zeitraum auf CO₂, dessen Emissionsentwicklung die Höhe der THG-Emissionen stark beeinflusst (siehe Abbildung 6). Im Jahr 2021 beträgt der Anteil von CO₂ 88,6 % an den gesamten THG-Emissionen. Die THG-Emissionen aus Methan bzw. Lachgas machen im Jahr 2021 ca. 6,3 % bzw. 3,4 % der gesamten THG-Emissionen aus. Der Anteil der fluorierten Treibhausgase (F-Gase)¹⁴ ist mit einem relativen Beitrag der THG-Emissionen von 1,4 % der geringste (UBA 2022c).
- 12 Die Summe der THG-Emissionen aller Treibhausgase werden in CO₂-Äquivalenten (CO₂-Äq.) angegeben. Zur Ermittlung der jeweiligen Emissionsfaktoren werden die ermittelten THG-Emissionen je Treibhausgas (CO₂, Methan, Lachgas und fluorierte Treibhausgase) mit den jeweiligen Treibhausgaspotenzialen, basierend auf ihrer Wirkung auf die Emissionsentwicklung über einen Zeithorizont von 100 Jahren, multipliziert. Das Treibhausgaspotenzial von CO₂ ist definitionsgemäß eins. Die übrigen derzeit verwendeten Treibhausgaspotenziale sind im Vierten Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) veröffentlicht (UNFCCC 2014). Treibhausgaspotenziale werden bei neuen Erkenntnissen oder auf Basis sich ändernder Definition des Zeitintervalls¹⁵ angepasst. Nach dem Übereinkommen von Paris werden für Veröffentlichungen ab dem

¹⁴ Die fluorierten Treibhausgase (F-Gase) umfassen die vollfluorierten Kohlenwasserstoffe, die teilfluorierten Kohlenwasserstoffe, Schwefelhexafluorid und Stickstofftrifluorid. F-Gase werden häufig gezielt eingesetzt und nicht wie bei der Verbrennung fossiler Rohstoffe als Nebenprodukt freigesetzt. Eine Verwendung findet hauptsächlich als Kältemittel in Kälte- und Klimaanlage, als Treibmittel in Schäumen und Dämmstoffen sowie als Feuerlöschmittel statt (UBA 2022e).

¹⁵ Das Treibhausgaspotenzial der einzelnen Treibhausgase im Vergleich zu Kohlenstoffdioxid hängt vom Zeithorizont ab. Würde statt des 100-jährigen Zeithorizonts ein kürzerer oder längerer Zeithorizont verwendet, würde dies auch die Treibhausgaspotenziale von Methan, Lachgas und F-Gasen beeinflussen (ERK 2022b).

Jahr 2023 die Treibhausgaspotenziale auf Basis des Fünften Sachstandsberichts des IPCC berechnet (IPCC 2014). Der Wert des Treibhausgaspotenzials für Methan steigt durch diese Anpassung um 12 %, wohingegen der Wert für Lachgas um 11 % sinkt. Diese Veränderungen wirken sich auf die gesamte Zeitreihe der Emissionsdaten seit dem Jahr 1990 aus, einschließlich der in diesem Bericht geprüften Emissionsberechnung. Die größten Änderungen ergeben sich hierdurch in Sektoren mit einem hohen Anteil an Methan- und Lachgas-Emissionen (z. B. Landwirtschaft sowie Abfallwirtschaft und Sonstiges) (ERK 2022b). Weiterführende Ausführungen zu den Prinzipien der Emissionsberichterstattung können dem Technischen Begleitdokument zum Prüfbericht, Kapitel A.1.2, entnommen werden (ERK 2022c).

Abbildung 6: Entwicklung der deutschen THG-Emissionen im Zeitraum 2000-2021 aufgeschlüsselt in die verschiedenen Treibhausgase



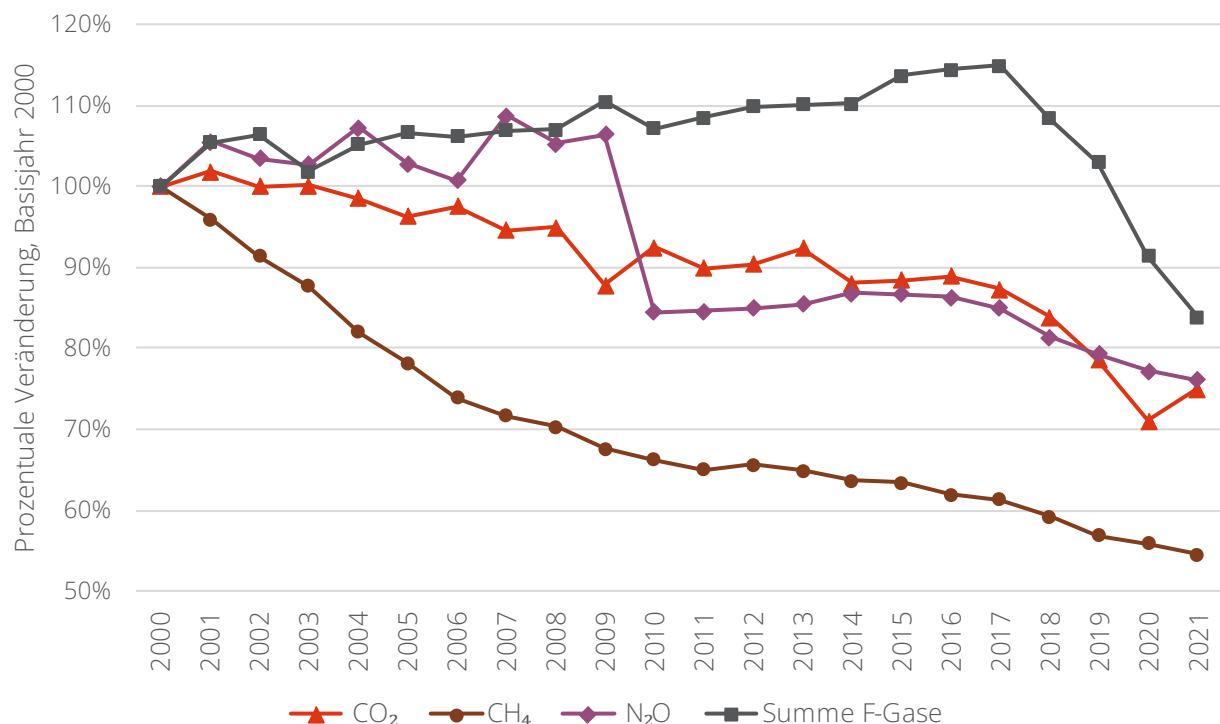
Eigene Darstellung auf Basis der Trendtabellen des Treibhausgasinventars 2022 (UBA 2022c). Die Daten für das Jahr 2021 basieren auf der Berechnung der Vorjahresemissionen, Inventardaten liegen zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vor.

- 13 Im Zeitraum seit dem Jahr 2000 sind ohne Berücksichtigung des LULUCF-Sektors insbesondere die Methanemissionen signifikant von 88 Mt CO₂-Äq. auf 48 Mt CO₂-Äq. zurückgegangen (rund 45 % Reduktion), die relative Reduktion der THG-Emissionen von CO₂ und Lachgas hingegen betrug in dem betrachteten Zeitraum etwa ein Viertel (siehe Abbildung 7). Die Methanemissionen stammen mit 31 Mt CO₂-Äq. im Jahr 2021 vor allem aus der Landwirtschaft, wobei 23 Mt CO₂-Äq. durch die Verdauung in der Tierhaltung (CRF-Kategorie 3.A) entstehen. In der CRF-Kategorie 3.A konnten die THG-Emissionen in den Jahren von 2000 bis 2021 um knapp 15 % gesenkt werden. Des Weiteren nahmen die Methanemissionen aus der Abfallwirtschaft seit dem Jahr 2000 von 28 Mt CO₂-Äq. auf 8 Mt CO₂-Äq. im Jahr 2021 ab. In der Abfalldeponierung resultiert die Absenkung daraus, dass in den Abfalldeponien, welche das Emissionsgeschehen dominieren, die Methanentwicklung jedes Jahr absinkt (siehe Kapitel 2.2.2). Die Energiewirtschaft ist im Jahr 2021 für rund 15 % der Methanemissionen verantwortlich,

welche vor allem durch diffuse THG-Emissionen aus Brennstoffen (CRF- Kategorie 1.B) entstehen. Die Hauptquelle der diffusen THG-Emissionen in der Energiewirtschaft ist der Ausstoß von Methan als Grubengas bei der Kohleförderung. Der konstante Rückgang der Methanemissionen lässt sich hier insbesondere auf zwei Faktoren zurückführen. Zum einen ist das Grubengas im Zeitverlauf verstärkt aufgefangen und energetisch weitergenutzt worden und zum anderen hat die Kohleförderung in Deutschland über die Zeit abgenommen (siehe Kapitel 2.2.2).

- 14 Die Lachgasemissionen lagen in den Jahren 2000 bis 2009 im Durchschnitt bei ca. 40 Mt CO₂-Äq. und in den Jahren 2010 bis 2021 bei durchschnittlichen 30 Mt CO₂-Äq. (siehe Abbildung 6). Mit einem Anteil von über 75 % im Jahr 2021 stammen die Lachgasemissionen größtenteils aus der Landwirtschaft. Die größten Einsparungen der Lachgasemissionen über den Zeitraum sind hingegen dem Industriesektor zuzuschreiben. Hier konnten die Lachgasemissionen von 7 Mt CO₂-Äq. im Jahr 2000 auf 2 Mt CO₂-Äq. im Jahr 2021 gesenkt werden. Das Absenken der Lachgasemissionen im Jahr 2010 ist auf die gezielte technische Minderung der THG-Emissionen einer Chemieanlage in der Chemischen Industrie (CRF-Kategorie 2.B) zurückzuführen (UBA 2022d). Die THG-Emissionen durch F-Gase entstehen ausschließlich in der Industrie und stiegen im Zeitraum von 2000 bis 2017 konstant an. Durch das Inkrafttreten der F-Gas-Verordnung im Jahr 2015 (EU 2014) konnte eine Trendwende und eine signifikante Reduktion um 27 % bis zum Jahr 2021 erreicht werden (siehe Unterkapitel 2.3.3). Im Wesentlichen waren dabei Verwendungsverbote, Verbote des Inverkehrbringens sowie Regelungen zu Dichtheitsprüfungen, Zertifizierung, Entsorgung und Kennzeichnung verantwortlich (UBA 2022h).

Abbildung 7: Prozentuale Veränderung der erfassten Treibhausgase



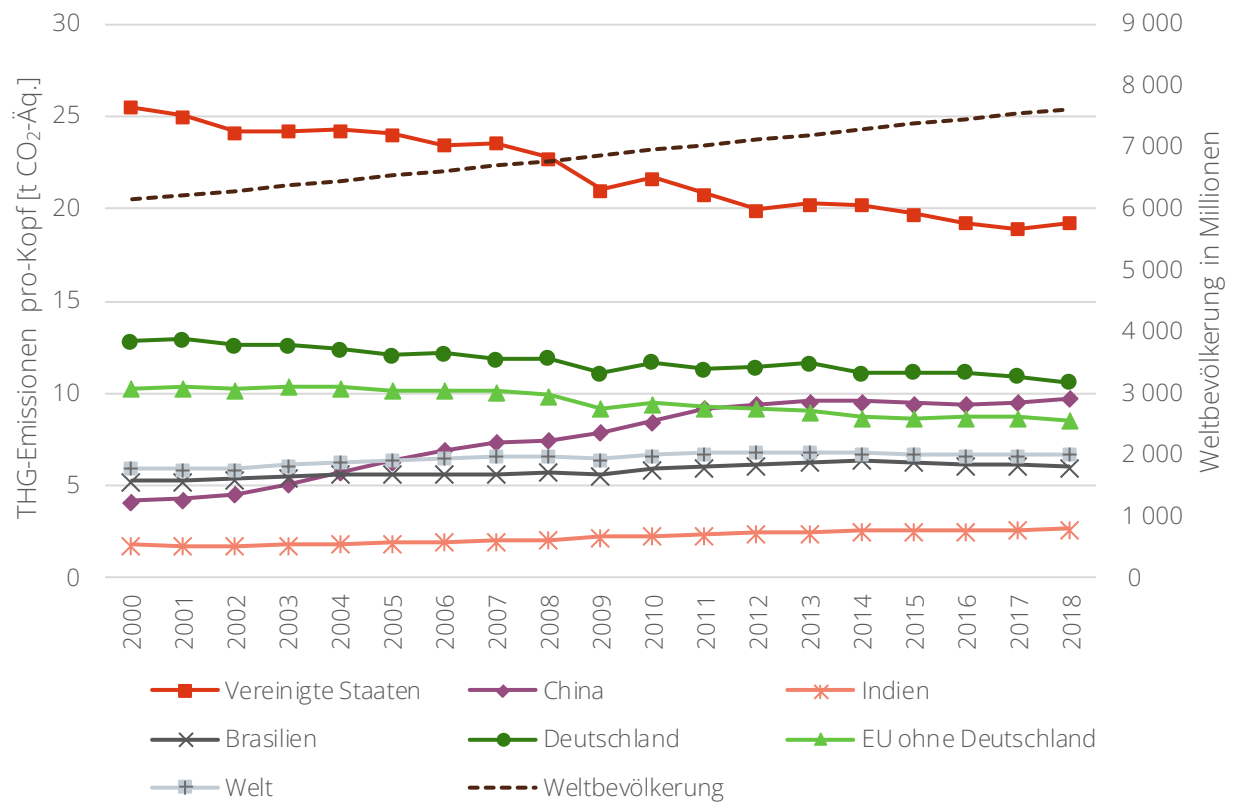
Eigene Darstellung auf Basis der Trendtabelle 2022 (UBA 2022c).

Weltweiter Vergleich der Entwicklungen von THG-Emissionen

- 15 Zur Einordnung der in dem vorherigen Abschnitt beschriebenen Entwicklung der THG-Emissionen Deutschlands in den internationalen Kontext zeigt Abbildung 8 die Entwicklung der THG-Emissionen pro Kopf für die Vereinigten Staaten, Deutschland, die EU ohne Deutschland¹⁶, Brasilien, Indien, China und die Welt für den Zeitraum 2000 bis 2018. Die Daten basieren auf der territorialen Berechnung der THG-Emissionen (siehe Infokasten 1). Auf der Sekundärachse in Abbildung 8 ist die Zunahme der Weltbevölkerung abgetragen. Für die Vereinigten Staaten, Deutschland und die EU ohne Deutschland nahmen die Pro-Kopf-Emissionen über den betrachteten Zeitraum ab. Dabei ist der Einfluss der Finanzkrise im Jahr 2009 jeweils durch ein Absinken der Pro-Kopf-Emissionen erkennbar. Insgesamt liegen die Pro-Kopf-Emissionen in den Vereinigten Staaten, in Deutschland und in der EU ohne Deutschland auf einem hohen Niveau verglichen mit den weltweiten Pro-Kopf-Emissionen mit abnehmender Tendenz. Im Vergleich dazu stiegen die Pro-Kopf-Emissionen in China deutlich und konstant über den betrachteten Zeitraum und liegen seit dem Jahr 2011 über dem durchschnittlichen europäischen Niveau ohne Deutschland. Über den gesamten betrachteten Zeitraum haben sich die Pro-Kopf-Emissionen in China mehr als verdoppelt. Brasilien verzeichnet über den Zeitraum eine leichte Zunahme der Pro-Kopf-Emissionen. Während die Zunahme der indischen Pro-Kopf-Emissionen auf niedrigem Niveau leicht ansteigt, stieg der absolute Wert von 2000 bis 2018 in Verbindung mit dem zeitgleichen Bevölkerungswachstum um mehr als 50 % an. Die durchschnittlichen Pro-Kopf-Emissionen der Welt steigen ebenfalls über den gesamten Betrachtungszeitraum um 13 % an. Da zugleich die Weltbevölkerung im Betrachtungszeitraum um knapp 25 % gewachsen ist, resultiert eine absolute Zunahme der weltweiten THG-Emissionen um mehr als 45 % bezogen auf das Jahr 2000.
- 16 Die absoluten globalen THG-Emissionen sind von 25 847 Mt CO₂-Äq. im Jahr 2000 auf 35 962 Mt CO₂-Äq. im Jahr 2020 gestiegen (Crippa et al. 2021). Dies entspricht einem Anstieg um 39 % bezogen auf den Wert im Jahr 2000. Deutlich ist, dass die global steigenden THG-Emissionen nicht in Einklang mit der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) stehen. Der im Oktober 2022 veröffentlichte Bericht der UNFCCC zeigt, dass ohne weitere Klimaschutzprogramme die THG-Emissionen bis zum Jahr 2030 gegenüber dem Jahr 2019 um 0,3 % sinken, was jedoch einem Anstieg der THG-Emissionen gegenüber dem Jahr 1990 um 50,8 % entspricht. Der jüngste wissenschaftliche Bericht des IPCC, der Anfang 2022 veröffentlicht wurde, bezieht sich auf das Jahr 2019 und besagt, dass die THG-Emissionen bis zum Jahr 2030 um 43 % gesenkt werden müssen (UNFCCC 2022). Somit kommen die aktuellen Prognosen nicht mit der notwendigen THG-Emissionsminderung des IPCC-Berichts überein. Um die Erderwärmung auf deutlich unter zwei Grad Celsius gegenüber dem Niveau vor Beginn der Industrialisierung zu begrenzen, müssen die aktuellen nationalen Klimaaktionspläne gestärkt werden.

¹⁶ Die Pro-Kopf-Emissionen der EU werden ohne Deutschland dargestellt, da die Pro-Kopf-Emissionen Deutschlands ebenfalls in der Grafik dargestellt sind und somit ein Vergleich der deutschen und den durchschnittlichen Pro-Kopf-Emissionen aller anderen EU-Mitgliedsstaaten möglich ist.

Abbildung 8: Pro Kopf THG-Emissionen im Zeitraum von 2000 bis 2020 und die Zunahme der Weltbevölkerung (Basisjahr = 2000)



Eigene Darstellung auf Basis der Daten von Crippa et al. (2021).

Infokasten 1

Territoriale vs. konsumbasierte Berechnung von THG-Emissionen

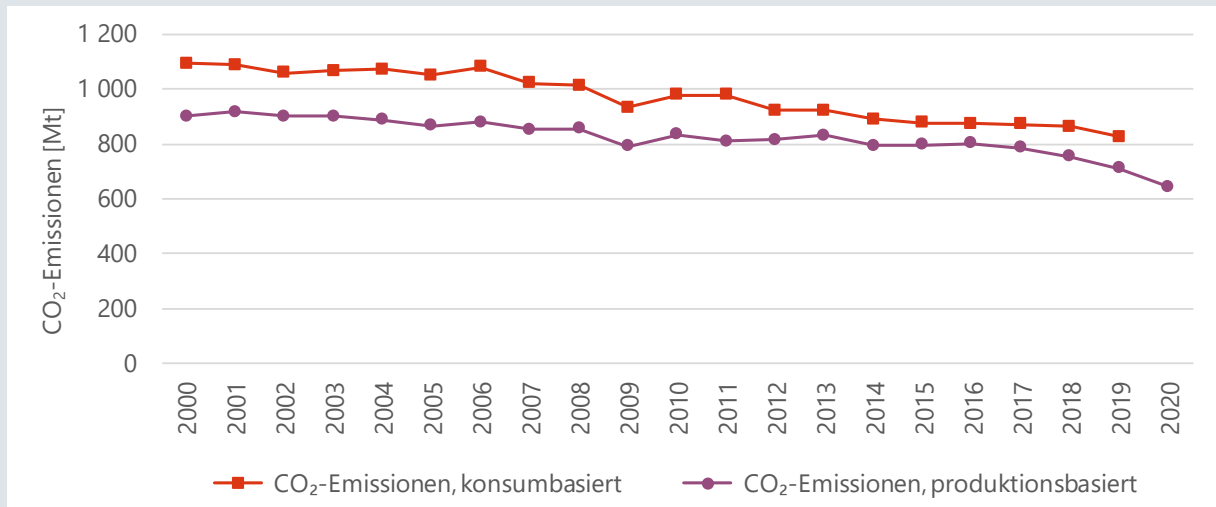
Die im Rahmen des Bundes-Klimaschutzgesetzes erhobenen und ausgewiesenen THG-Emissionen und Luftschadstoffe werden nach dem Territorialprinzip bilanziert. Dieser Ansatz erfasst direkte und indirekte Treibhausgase (CO_2 , CH_4 , N_2O , HFKW, PFC, SF_6 , NF_3 , SO_2 , NO_x , NMVOC, CO), welche durch die Produktion innerhalb der Landesgrenzen entstehen. Für Deutschland werden jene THG-Emissionen, die durch Privathaushalte oder durch die Produktion von finalen Produkten oder Zwischenprodukten in Deutschland entstehen, einberechnet. Dabei ist irrelevant, ob der Konsum dieser Güter in Deutschland oder nach Export im Ausland erfolgt. Dieser produktionsorientierte Ansatz ist durch die Klimarahmenkonvention (UNFCCC) vorgegeben und wird im Rahmen der Emissionsberichterstattung des Kyoto Protokolls international für die Berechnung der nationalen Treibhausgasinventare angewandt. Neben der Berechnung der THG-Emissionen nach dem Territorialprinzip können die THG-Emissionen eines Landes auch nach einem konsumbasierten Ansatz bilanziert werden. Dieser unterscheidet sich von dem traditionellen, produktbasierten Ansatz durch die Mitberücksichtigung von Importen und Exporten von Waren und Dienstleistungen, die entweder direkt oder indirekt mit THG-Emissionen verbunden sind. Mithilfe von Methoden wie eine Lebenszyklusanalyse oder Erweiterten Input-Output-Analysen lassen sich THG-Emissionen durch das weltweite Handelssystem verfolgen und den Ländern zuordnen, die für den finalen Konsum der Güter verantwortlich sind.

Über die Interpretation der beiden Prinzipien – Territorialprinzip und konsumbasierter Ansatz – im Vergleich bzw. allgemeiner über die angemessene Berücksichtigung der durch Handelsbeziehungen ausgelösten gemeinsamen Verantwortlichkeiten der Nationalstaaten besteht in der Literatur noch kein einheitliches Bild (siehe Haberl et al. 2020). Beide Ansätze vernachlässigen jeweils eine Seite der Handelsbeziehungen eines Landes. Das Territorialprinzip vernachlässigt den Import von THG-Emissionen (z. B. durch emissionsintensive Zwischen- und Fertigprodukte in der Grundstoffindustrie, Textilimporte aber auch Tanktourismus), der konsumbasierte Ansatz deren Export (z. B. emissionsintensiver, günstiger Kohlestrom oder steigende Fleischexporte). Betrachtet man beide Ansätze gemeinsam sowie in Verbindung mit weiteren Aspekten, wie z. B. dem jeweiligen Energie- und Technologiemarkt im Import- und Export (siehe Kander et al. 2015), können die komplexen Wechselwirkungen der handelsbezogenen THG-Emissionen zwischen Export- und Importland differenziert reflektiert werden (für einen diesbezüglichen Vorschlag siehe bspw. Jakob et al. 2021,). Voraussetzung dafür ist jedoch die explizite Erfassung dieser THG-Emissionen. Für die Berichterstattung Deutschlands würde dies einerseits bedeuten, zusätzlich zu den bisher erhobenen Daten auch die importierten THG-Emissionen zu erfassen sowie andererseits innerhalb der nach dem Territorialprinzip berichteten THG-Emissionen diejenigen zu identifizieren, welche mit dem Export verbunden sind. Aus diesen Datenpunkten würden zusätzliche, für die Klimapolitik relevante Informationen resultieren, auch an der Schnittstelle zur Außenhandelspolitik (ERK 2021b).

Im Zeitraum von 2000 bis 2019 lagen in Deutschland die CO_2 -Emissionen aus fossilen Brennstoffen, welche für den konsumbasierten Ansatz um den Handel bereinigt wurden, im Durchschnitt 14 % über den CO_2 -Emissionen, welche nach dem produktbasierten Ansatz auf Basis des Territorialprinzips berechnet wurden (siehe Abbildung 9)

Die CO_2 -Emissionen nach dem konsumbasierten Ansatz liegen für alle Jahre über den CO_2 -Emissionen nach dem produktbasierten Ansatz. Während sich die Differenz zwischen den beiden Bilanzierungsmethoden über die Jahre verringerte, ist sie jedoch von 2018 bis 2019 wieder angestiegen (Friedlingstein et al. 2022).

Abbildung 9: Deutsche CO₂-Emissionen – Produktions- und konsumbasiert



Eigene Darstellung nach GCP (2021) auf Basis von Friedlingstein et al. (2022), Andrew und Peters (2021), Andrew (2022), Peters et al. (2012). In der Abbildung sind nur CO₂-Emissionen aus fossilen Brennstoffen abgebildet. Die jährlichen konsumbasierten CO₂-Emissionen sind um den Handel (Ex- und Import) bereinigte inländische CO₂-Emissionen.

Verlagerungseffekte

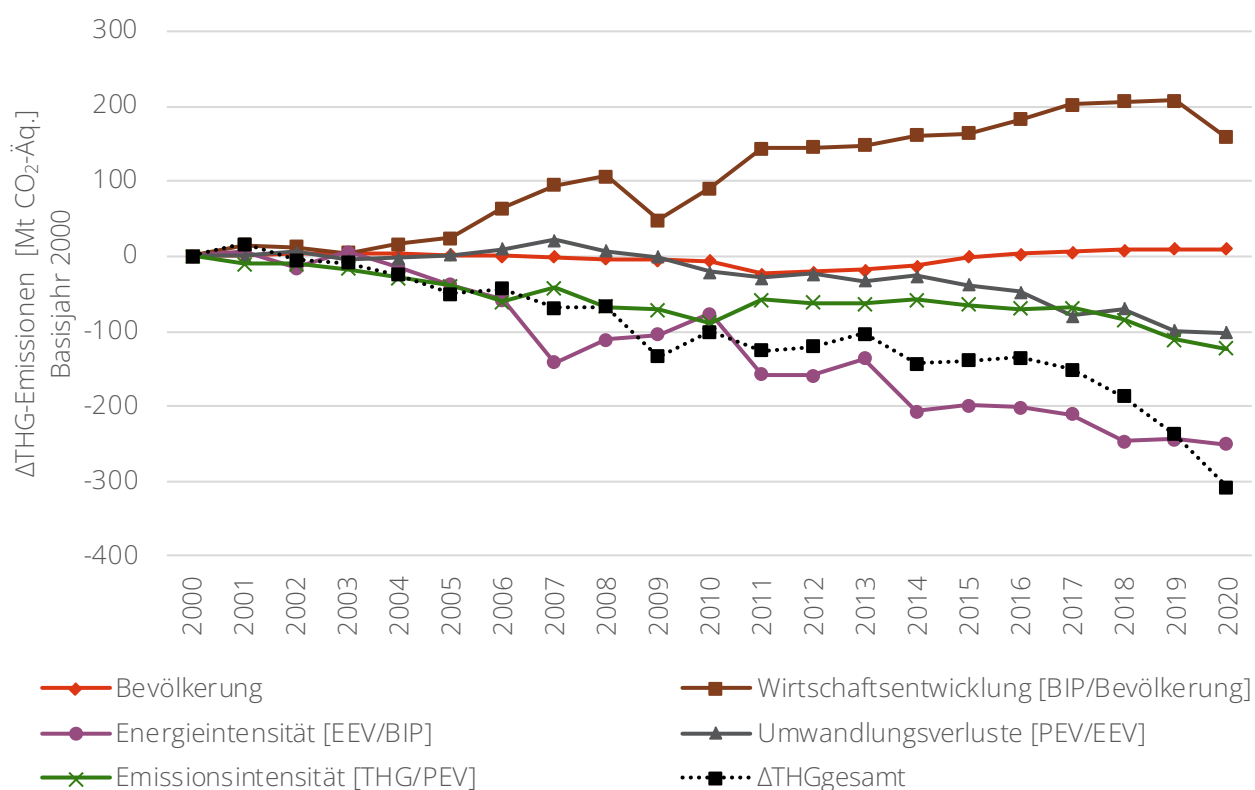
Durch das der Emissionsberichterstattung zugrunde liegende Quellprinzip¹⁷ ergeben sich zwischen den Sektoren sogenannte Verlagerungseffekte. Werden im Gebäudesektor beispielsweise fossile Heizungsanlagen durch Wärmepumpen oder Fernwärmeanschlüsse ersetzt, so verlagern sich die entsprechenden THG-Emissionen zulasten des Sektors Energiewirtschaft. Dasselbe gilt im Verkehrssektor: wird ein Verbrennungsfahrzeug durch ein elektrisch betriebenes Fahrzeug ersetzt, so verringert dies die THG-Emissionen im Verkehrssektor, jedoch steigen die THG-Emissionen in der Energiewirtschaft. Bedingt die Produktion eines elektrisch betriebenen Fahrzeugs höhere THG-Emissionen als die Produktion eines entsprechenden Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor, so induziert dies zugleich höhere THG-Emissionen im Industriesektor. Auch letzterer ist durch eine mögliche Elektrifizierung ein potenziell starker Treiber für Verlagerungseffekte in die Energiewirtschaft. Generell haben Sektoren außerhalb der Energiewirtschaft durch diese Emissionsverlagerung einen geringeren Anreiz zur Reduktion des Stromverbrauchs bzw. der Erhöhung der Stromeffizienz, da diese THG-Minderung im Sektor Energiewirtschaft bilanziert wird, und umgekehrt entsteht ein Anreiz zur Elektrifizierung und Substitution durch Strom.

¹⁷ Die THG-Emissionen werden dabei dem Sektor angerechnet, in dem sie ursprünglich anfallen. Beispielsweise werden der Energiewirtschaft sämtliche THG-Emissionen aus der Fernwärmeproduktion oder von Strom für den Betrieb Wärmepumpen zugerechnet (BMWi 2021).

2.1.2 Dekompositionsanalyse

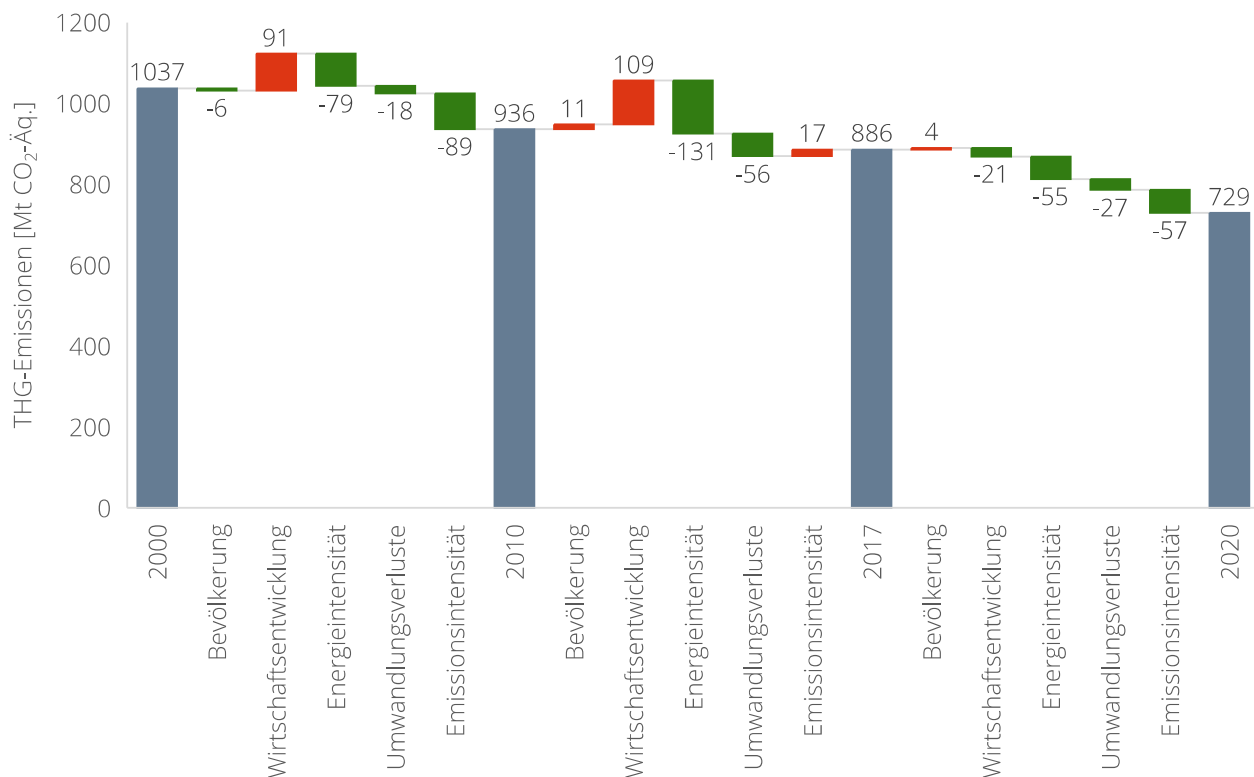
- 17 Die Abbildung 10 und Abbildung 11 zeigen die Dekomposition der Änderung der THG-Emissionen von Deutschland zerlegt in die Komponenten Bevölkerungsentwicklung (Anzahl der Einwohner:innen), Wirtschaftsentwicklung (Bruttoinlandsprodukt (BIP) pro Kopf), Emissionsintensität (Treibhausgasemissionen pro Primärenergieverbrauch (PEV)), Energieintensität (Endenergieverbrauch (EEV)/BIP) und Umwandlungsverluste (PEV/EEV). Gezeigt wird die Entwicklung in Bezug auf das Basisjahr 2000 bzw. aggregiert für die Zeiträume von 2000 bis 2010, von 2010 bis 2017 und von 2017 bis 2020.

Abbildung 10: Dekomposition der sektorenübergreifenden THG-Emissionen - Änderungen im Vergleich zu 2000



Eigene Darstellung. Weitere Details zu den verwendeten Daten finden sich in Tabelle 3.

Abbildung 11: Dekomposition der sektorenübergreifenden THG-Emissionen - Aggregierte Betrachtung 2000-2010, 2010-2017 und 2017-2020 (Daten für Gebäudesektor temperaturbereinigt)



Eigene Darstellung. Weitere Details zu den verwendeten Daten finden sich in Tabelle 3.

- 18 Bei der Dekomposition der deutschen THG-Emissionen hat insbesondere die wirtschaftliche Gesamtentwicklung, ausgedrückt durch das BIP, rechnerisch eine emissionssteigernde Wirkung. Den stärksten emissionsmindernden Effekt hat die Komponente Energieintensität, die seit dem Jahr 2000 einen deutlichen emissionsmindernden Effekt zeigt, wobei sie zwischen den Jahren 2006 und 2014 deutlichen Schwankungen unterliegt. Die Umwandlungsverluste zeigen nach einer relativ konstanten Phase bis zum Jahr 2007 ab dann einen emissionsmindernden Effekt auf. Ab dem Jahr 2017 schließlich wirken sie ähnlich emissionsmindernd wie die Komponente Emissionsintensität, also die pro Einheit Primärenergie entstandenen THG-Emissionen. Dies deckt sich energiewirtschaftlich mit einem weitgehenden bilanziellen Ausgleich steigender Stromerzeugung auf Basis erneuerbarer Energieträger und dem Ausstieg aus der Kernenergie in diesem Zeitraum. Die Emissionsintensität weist nach einer relativ konstanten Phase zwischen den Jahren 2011 und 2017 seit dem Jahr 2018 wieder einen emissionsmindernden Effekt auf. Der ab dem Jahr 2018 beobachtete forcierte Rückgang der THG-Emissionen fällt in eine Zeit steigender Preise für Emissionszertifikate im Europäischen Emissionshandelssystem (EU-ETS) sowie eines abgeschwächten und im Jahr 2020 aufgrund der Folgen der Covid-19-Pandemie sinkenden Wirtschaftswachstums. Der Einfluss der Bevölkerungsentwicklung ist insgesamt gering. Hier ist lediglich eine leichte emissionsmindernde Wirkung im Jahr 2011 im Rahmen der Zensus Neuzählung zu erkennen. Im folgenden Zeitraum steigt der Einfluss der Komponenten hin zu einem insgesamt emissionssteigernden Einfluss gegenüber dem Jahr 2000. Der Einfluss der Komponenten auf die THG-Emissionen wird auch in der aggregierten Betrachtungsweise deutlich, in der

die stark emissionsmindernde Wirkung der Energieintensität in beiden Zeiträumen nochmals hervorgehoben wird.

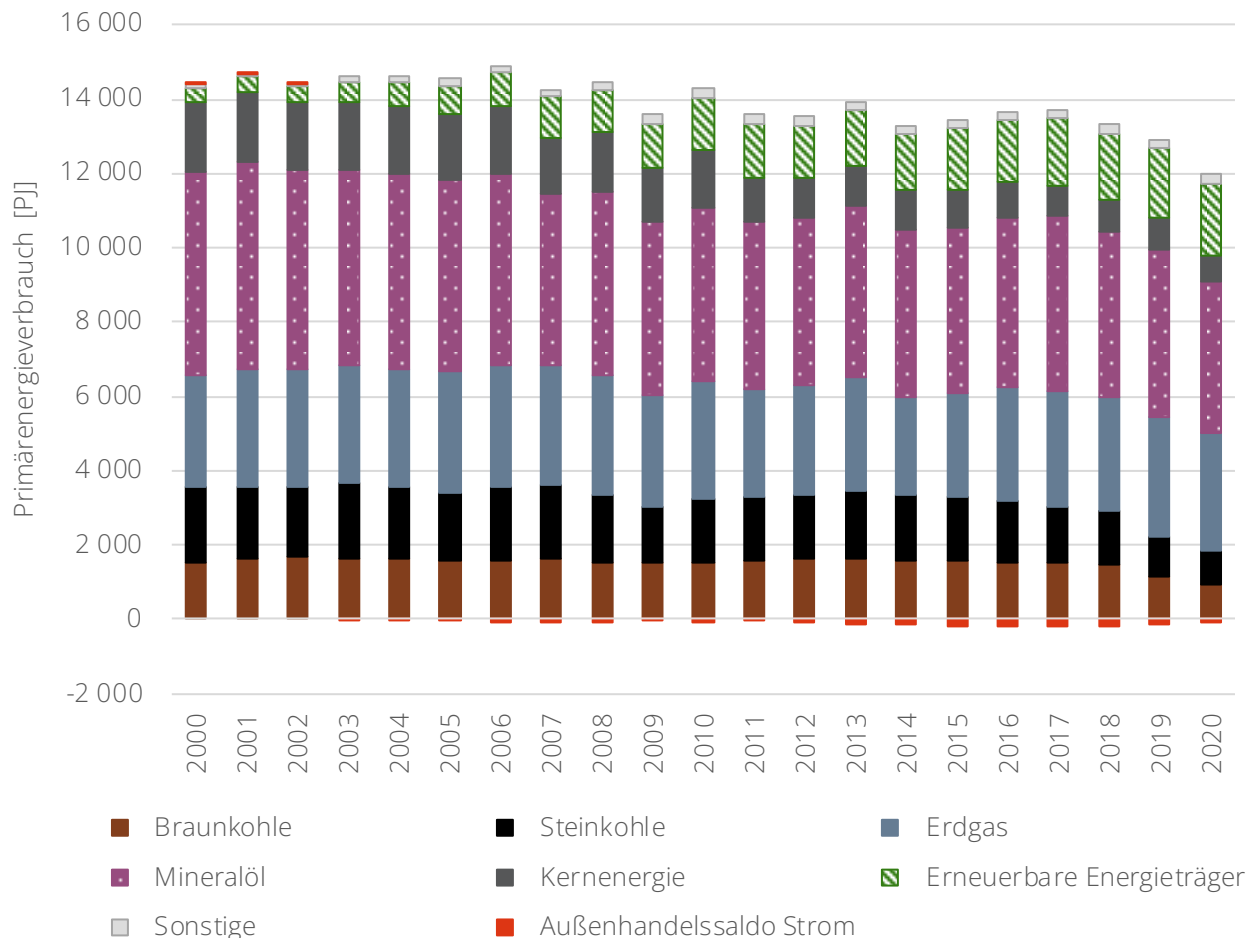
2.1.3 Diskussion von Ursachen der Entwicklung

- 19 In der Dekompositionsanalyse ist die Entwicklung der THG-Emissionen in die Komponenten Bevölkerungsentwicklung, Wirtschaftsentwicklung, Emissionsintensität, Energieintensität und Umwandlungsverluste zerlegt. Zur Identifizierung der treibenden Kräfte und Trends für die THG-Emissionsentwicklung werden nachfolgend einige relevante Aspekte und Entwicklungen innerhalb der Komponenten näher betrachtet. Die Komponente der Emissionsintensität wird durch die Analyse der spezifischen Entwicklung des PEV untersucht. Weiter wird die Komponente anhand der Entwicklung des deutschen Energiemix betrachtet. Zusätzlich wird der Einfluss des EU-ETS auf die energiebedingten THG-Emissionen beschrieben. Die Energieintensität wird durch die Entwicklung des Endenergieverbrauchs sowie der Endenergieproduktivität näher beleuchtet. Abschließend erfolgt die Analyse der Komponente Umwandlungsverluste.

Emissionsintensität (THG-Emissionen/Primärenergieverbrauch)

- 20 Die Emissionsintensität bezeichnet das Verhältnis aus den gesamten THG-Emissionen und des PEV. Eine sinkende Emissionsintensität bedeutet, dass pro Einheit Primärenergie die Menge emittierter Treibhausgase abnimmt. Der PEV ist die Summe der in Deutschland von allen Sektoren innerhalb eines Jahres eingesetzten Energieträgern (erneuerbare Energieträger, Erdöl, Erdgas, Stein- und Braunkohle und Uran) und berücksichtigt auch Energieverluste bei der Umwandlung der Energieträger in Strom, Wärme, Bewegungsenergie und den nicht-energetischen Verbrauch von zum Beispiel Mineralöl in der Kunststoffproduktion. Der PEV wird u. a. durch die Wirtschaftsstruktur, die Bevölkerungszahl, die Rohstoffpreise und die technische Entwicklung beeinflusst. Eine Betrachtung der Zusammensetzung des PEV gibt Auskunft über den Verbrauch der unterschiedlichen fossilen Energieträger sowie der Energiebereitstellung durch erneuerbare Energieträger und Nuklearenergie. Mittels der Brennstoff-Emissionsfaktoren lassen sich die THG-Emissionen, die im Zusammenhang mit der Gewinnung, dem Transport, der Aufbereitung und der Verbrennung von Primärenergieträgern entstanden sind, quantifizieren.
- 21 Ziel ist eine kontinuierliche Verschiebung der Zusammensetzung des PEV über die Substitution von fossilen Energieträgern durch erneuerbare Energieträger und die Reduktion des PEV durch einen geringeren Verbrauch sowie Effizienzgewinne, sodass die THG-Emissionen und somit auch die Emissionsintensität sinken. Trotz der Verzerrungseffekte bei der Berechnung des PEV über das Wirkungsgradprinzip (siehe Infokasten 2) ist der PEV aufschlussreich, da sich durch diesen nicht nur die Steigerung des Stroms durch erneuerbare Energieträger, sondern auch tatsächliche Effizienzsteigerungen ablesen lassen. Entsprechend stellt Abbildung 12 den PEV nach Energieträgern für den Betrachtungszeitraum der Jahre 2000 bis 2020 dar.

Abbildung 12: Primärenergieverbrauch nach Energieträgern für die Jahre 2000 bis 2020



Eigene Darstellung auf Basis der Daten von (AGEB 2021a).

- 22 Der PEV in Deutschland ist in der ersten Phase bis zum Jahr 2010 mit der Ausnahme von kleinen Schwankungen konstant geblieben. Seit dem Jahr 2010 ist grundsätzlich ein leicht rückläufiger Trend des PEV zu sehen. In der zweiten Phase zwischen den Jahren 2011 und 2017 sind leichte Schwankungen des PEV zu sehen, wobei seit dem Jahr 2017 ein konstanter Rückgang des PEV besteht (siehe Abbildung 12). Im gesamten Zeitraum wurde der PEV um 17,4 % reduziert. Zu dem sinkenden PEV trugen vor allem weitere Verbesserungen in der Energieeffizienz unter anderem durch den stetigen Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (siehe Kapitel 2.2.3) und die Erhöhung des Bruttobrennstoffnutzungsgrades bei fossilen Kraftwerken bei. Insgesamt hat sich die Energieträgerstruktur im Zeitverlauf geändert. Der Verbrauch von Kernenergie, Mineralöl, Braunkohle und Steinkohle ist rückläufig, wohingegen der PEV von erneuerbaren Energieträgern ansteigt.

Infokasten 2

Primärenergieverbrauch (PEV) und Wirkungsgradprinzip

Der PEV wird über das Wirkungsgradprinzip ermittelt, was jedem Energieträger einen eigenständigen Wirkungsgrad zuweist. Für Energieträger, die verfeuert werden, ergibt sich der Wirkungsgrad aus der eingesetzten Menge des Energieträgers und dem entsprechenden Heizwert. Die festgesetzten Wirkungsgrade für Strom aus Kernenergie (33 %), Geothermie (10 %) sowie für Windenergie, PV, Wasserkraft (erneuerbare Energieträger: 100 %) und Stromimporte (100 %) führen hingegen dazu, dass für erneuerbare Energieträger ein erheblich niedrigerer PEV errechnet wird als für fossile oder nukleare Brennstoffe (UBA 2022m). Demnach haben Strom exportierende Länder in der Regel einen höheren PEV, weil dem Territorialprinzip (siehe Infokasten 1) folgend die Stromerzeugung am Ort der Erzeugung und nicht im Land des Verbrauchs ermittelt und bilanziert wird.

Die Berechnungsmethode über das Wirkungsgradprinzip führt zu zwei Verzerrungseffekten bei der Betrachtung des PEV im Zeitverlauf. Erstens sinkt der PEV mit steigender Substitution von fossilen und nuklearen Brennstoffen durch erneuerbare Energieträger überproportional stark. Bei der Berechnung fällt der PEV von erneuerbaren Energieträgern deutlich geringer aus als von fossilen oder nuklearen Brennstoffen. Hierdurch entsteht der Eindruck eines stärkeren Rückgangs des PEV aus fossilen oder nuklearen Brennstoffen, der sich rechnerisch durch die unterschiedlichen Wirkungsgrade ergibt. Außerdem wird eine höhere Energieeffizienz suggeriert. Zweitens entsteht durch den rechnerisch bedingten geringeren absoluten Anstieg aus erneuerbaren Energieträgern der Eindruck, dass niedrige Ausbauraten bestehen. Der Anteil von erneuerbaren Energieträgern am PEV steigt durch diese methodischen Gründe unterproportional (UBA 2022m).

- 23 Ein weiterer Aspekt, der die Emissionsintensität beeinflusst, ist die Verschiebung im Energiemix hin zu mehr Einspeisung aus erneuerbaren Energieträgern und weg von fossilen Energieträgern. Dabei erfolgt der starke Zuwachs an Anlagen zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern überproportional im Vergleich zur Reduktion von fossilen Energieträgern. Grundsätzlich lässt sich die Verschiebung des Energiemix durch verschiedene Faktoren wie den Ausstieg aus der Kernenergie oder den Rückgang der Kohleverstromung erklären, die eine detaillierte Berücksichtigung im Kapitel 2.2.3 finden. Des Weiteren hat die Einführung des EU-ETS und insbesondere die Preisentwicklung seit dem Jahr 2018 großen Einfluss auf den Energiemix ausgeübt und somit auch auf die Komponente der Emissionsintensität.

Infokasten 3

Das Europäische Emissionshandelssystem (EU-ETS)

Das EU-ETS basiert auf dem Cap-and-Trade Verfahren, bei dem eine Obergrenze für den Gesamtausstoß eines bestimmten Treibhausgases für alle unter das System fallenden Anlagen festgelegt wird. Diese Obergrenze wird über die Zeit stetig abgesenkt, um die Gesamtemissionen zu reduzieren. Das EU-ETS deckt zum jetzigen Zeitpunkt ungefähr 83 % der THG-Emissionen der Energiewirtschaft, 80 % der Industrie und 0,4 % aus dem Sektor Gebäude ab (UBA 2022c). Berücksichtigung finden THG-Emissionen aus der Strom- und Wärmeerzeugung sowie von energieintensiven Industriesektoren. Im Luftverkehrssektor gilt das EU-ETS bis zum 31. Dezember 2023 nur für Flüge zwischen Flughäfen im Europäischen Wirtschaftsraum (Europäische Kommission 2022a).

Die ersten zwei Phasen (2005-2007 und 2008-2012) des EU-ETS waren aufgrund der zum Großteil kostenlosen Emissionszuteilung und der auf Schätzungen basierenden Emissionsobergrenze stark in ihrer Wirksamkeit eingeschränkt. Durch den Angebotsüberhang fielen die Preise auf null bzw. lagen bei knapp 5 Euro pro Tonne CO₂-Äq. (EEA und Ember 2022). Außerdem führte die kostenlose Zuteilung der Zertifikate u. a. zu Windfall-Profits, bei denen die vermeintlichen „Kosten“ der Zertifikate auf die Kund:innen abgewälzt wurden (Sijm et al. 2006). Die Reform des EU-ETS (Phase III: 2013–2020) führte zu erheblichen Anpassungen des Systems. Die Einführung von Auktionen für die Zuteilung von Zertifikaten hat dazu beigetragen, Mitnahmeeffekte zu verhindern und die Emissionsreduzierung auf den vereinbarten Pfad zu bringen (Europäische Kommission 2022a; Ghazani und Jafari 2021). Jedoch lagen die EU-ETS Preise bis zum Jahr 2017 weiterhin auf einem niedrigen Preisniveau, was unter anderem auf den Wasserbett-Effekt zurückzuführen ist (Ghazani und Jafari 2021). Dieser beschreibt das Phänomen, dass zusätzliche Klimaschutzmaßnahmen wie zum Beispiel Stilllegungen von Kohlekraftwerken fast keinen Effekt hatten, da die freiwerdenden Zertifikate nicht gelöscht, sondern lediglich an andere Marktteilnehmer übertragen wurden. Erst der Beschluss erneuter Reformen führte zu einem signifikanten Anstieg der Zertifikatspreise (rund 25 Euro pro Tonne CO₂-Äq. ab 2019) (EEA und Ember 2022). Dabei führte neben einer stärkeren Verknappung der jährlich ausgegebenen neuen Emissionszertifikate ab 2020, die Möglichkeit überzählige Zertifikate endgültig zu löschen, welche in der sogenannten Marktstabilitätsreserve verblieben sind, zum Preisanstieg.

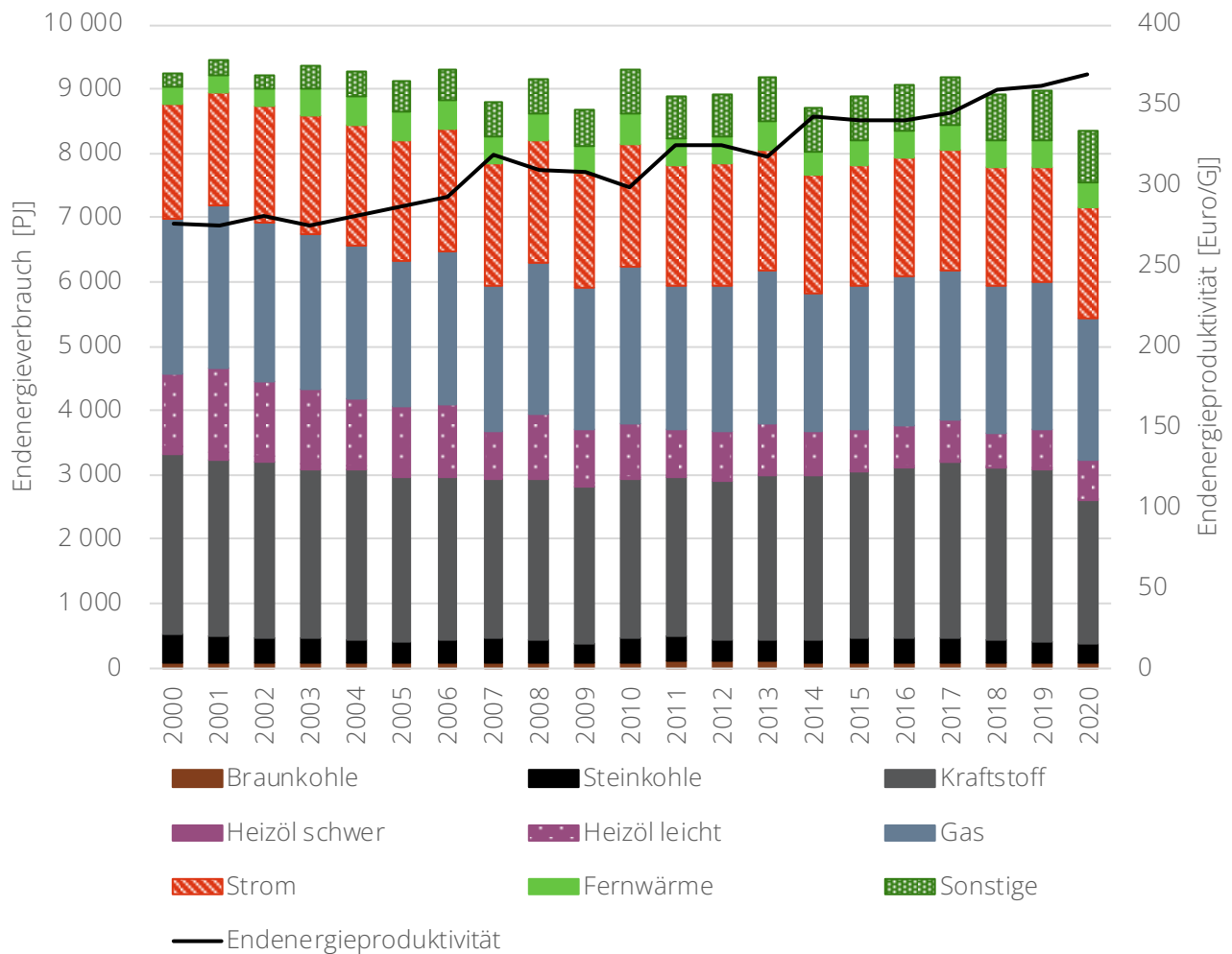
Im Juli 2021 hat die Europäische Kommission weitere Vorschläge zur Überarbeitung von Teilen des EU-ETS vorgelegt, in denen konkret dargelegt wird, wie die Kommission die EU-Klimaziele in Phase IV (2021-2030) im Rahmen des Europäischen Green Deal mit einer Reihe miteinander verbundener Maßnahmen erreichen will (Fit-for-55 Maßnahmenpaket). Die Gesamtzahl der Emissionszertifikate wird ab dem Jahr 2021 jährlich um 2,2 % sinken, verglichen mit derzeit 1,74 %. Zudem wird die Marktstabilitätsreserve erheblich gestärkt (Europäische Kommission 2022a). Nach dem Beginn dieser Phase im Januar 2021 stieg der Zertifikatspreis im vergangenen Jahr stark an. Neben den institutionellen Anpassungen und verschärften Klimazielen, war die Preisentwicklung dabei auch durch die bereits Ende 2021 stark angestiegenen Gaspreise getrieben. Diese hatten zur Folge, dass die Nachfrage nach Kohle, welche eine größere Menge Zertifikate benötigt, gestiegen ist was auch den Zertifikatspreis ansteigen lassen hat. Durch den russischen Angriffskrieg auf die Ukraine unterlagen die Zertifikatspreise im Jahr 2022 starken Fluktuationen und lagen zwischen 60 und 100 Euro pro Tonne CO₂-Äq.

- 24 Der große Einfluss des Europäischen Emissionshandels auf die Höhe der THG-Emissionen beginnend mit dem Jahr 2018 lässt sich auf den hohen Anteil der energiebedingten THG-Emissionen an den deutschen THG-Emissionen zurückführen. Diese machten im Jahr 2020 rund 83 % der gesamten THG-Emissionen aus. Mit einem Anteil von 35 % entstehen die energiebedingten THG-Emissionen vornehmlich im Sektor Energiewirtschaft bei der Umwandlung der Energieträger in Strom und Wärme. Danach folgen die Sektoren Verkehr mit einem Anteil von 24 %, der Gebäudesektor mit einem Anteil von 21 % und die Industrie mit einem Anteil von 19 % (UBA 2022g). Bei der Energiewirtschaft entstehen die energiebedingten THG-Emissionen hauptsächlich bei der Umwandlung insbesondere der fossilen Energieträger in elektrische oder thermische Energie oder durch die Freisetzung von Grubengas in Kohlegruben. Seit dem Jahr 2000 sind die THG-Emissionen aus der Strom- und Wärmeerzeugung sowie die diffusen THG-Emissionen rückläufig (-43 %). Ein deutlicher Rückgang ist jedoch erst seit dem Jahr 2018 zu beobachten (2018-2020: -29 %) (UBA 2020c). Dies lässt sich darauf zurückführen, dass vor allem Braunkohle-Kraftwerke verhältnismäßig lange preiswert Strom produzieren konnten und sich über Stromexporte lange auf dem Markt behaupten konnten. Der starke Rückgang der energiebedingten THG-Emissionen ab dem Jahr 2018 ist daher insbesondere auf den veränderten Energiemix, durch den Rückgang der Kohleverstromung und den stetig steigenden Anteil der Erzeugung aus emissionsärmeren Kraftwerken auf Basis von erneuerbaren Energieträgern oder Erdgas zu erklären. Diese Entwicklung lässt sich auch an der Entwicklung der Emissionsintensität festmachen.

Energieintensität (Endenergieverbrauch/Bruttoinlandsprodukt)

- 25 Die Energieintensität, wie sie in der Dekomposition dargestellt ist, stellt ein Maß für die Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Endenergieverbrauch dar und wird als Quotient des Endenergieverbrauchs bezogen auf das BIP berechnet. Relevante Einflussfaktoren stellen hierbei die Anteile der Wirtschaftszweige an der Bruttowertschöpfung dar. Dabei zeigen Industrienationen wie Deutschland meist einen höheren Endenergieverbrauch und damit auch THG-Emissionen pro BIP gegenüber Ländern, deren Bruttowertschöpfung hauptsächlich auf dem Dienstleistungssektor beruht (siehe Kapitel 2.3.3).
- 26 Im Vergleich zum PEV, der vor allem aufgrund von Energieträgerwechseln und Energieeffizienzsteigerungen sinkt, ist der Endenergieverbrauch im Zeitraum von 2000 bis 2020 nur sehr geringfügig gesunken (siehe Abbildung 13). Im gesamten Zeitraum wurde der Endenergieverbrauch um 9 % reduziert, wobei das Jahr 2020 wegen der Covid-19-Pandemie als Ausreißer mit einem niedrigeren Endenergieverbrauch gilt. Im Zeitraum von 2000 bis 2019 wurde der Endenergieverbrauch lediglich um 2,8 % reduziert. Im langjährigen Trend ist nur bei leichtem und schwerem Heizöl ein Rückgang zu erkennen. Für Fernwärme ist ein leichter Anstieg des Endenergieverbrauches über den betrachteten Zeitraum zu sehen. Der Endenergieverbrauch aller anderen Energieträger ist nahezu konstant, da Wirtschaftswachstum und Konsumsteigerungen einem Verbrauchsrückgang gegenüberstehen. Ausreißer mit einer stärkeren Senkung des Endenergiebedarfs sind in den Jahren 2007, 2009, 2011, 2014 und 2020 zu beobachten. Im Jahr 2009 lässt sich der Rückgang durch die Wirtschafts- und Finanzkrise erklären. Der Rückgang in den Jahren 2007 und 2014 ist vor allem auf sehr milde Winter zurückzuführen. Die Witterung wirkt sich stark auf den Wärmebedarf aus und damit auch auf den Verbrauch. Im Jahr 2011 waren hohe Energiekosten ein wesentlicher Einfluss für die Senkung des Endenergieverbrauchs. Im Jahr 2020 ist der Endenergiebedarf aufgrund der Covid-19-Pandemie gesunken, wobei vor allem eine Reduktion des Energieträgers Kraftstoff zu sehen ist.

Abbildung 13: Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Endenergieproduktivität für die Jahre 2000 bis 2020



Eigene Darstellung auf Basis der Daten von BMWK (2022g).

- 27 Die geringfügige Reduzierung des Endenergieverbrauchs steht auch im Zusammenhang mit der Entwicklung der Energiesteuer. Ziel der Energiesteuer ist es, Unternehmen und Haushalte über einen höheren Preis dazu zu bewegen, die Umweltkosten der betreffenden Produkte in die Produktions- und Kaufentscheidungen mit einzubeziehen. In den Jahren von 2005 bis 2020 haben sich in Deutschland die umweltbezogenen Steuern (siehe Infokasten 4) nur um 3,6 % erhöht, die gesamten kassenmäßigen Steuereinnahmen öffentlicher Haushalte stiegen jedoch im selben Zeitraum um 63,6 %. Mit steigenden Preisen im Zuge der Inflation sinkt der reale Wert der Energiesteuer und damit ihre Lenkungswirkung hin zu einem geringeren Endenergieverbrauch.

Infokasten 4

Umweltbezogene Steuern

Unter dem Begriff der umweltbezogenen Steuern sind die Energiesteuer auf Kraftstoffe (v. a. Benzin, Diesel) und Heizstoffe (v. a. Heizöl, Erdgas), die Stromsteuer, die Kraftfahrzeugsteuer und die Luftverkehrssteuer enthalten. Der Anteil umweltbezogener Steuern am gesamten Steueraufkommen beträgt 7,7 % (UBA 2021c). Im europäischen Ländervergleich haben die umweltbezogenen Steuern in Deutschland einen geringeren Anteil an den gesamten Steuern und Sozialabgaben. Bezogen auf das BIP lag der Anteil der umweltbezogenen Steuern in Deutschland im Jahr 2019 mit 1,77 % deutlich unter dem EU-Durchschnitt von 2,36 % (Eurostat 2022a). Den höchsten Anteil an den kassenmäßigen umweltbezogenen Steuern hat weiterhin die Energiesteuer mit 65 %, gefolgt von der Kraftfahrzeugsteuer und der Stromsteuer. Im Jahr 2021 betragen die Einnahmen aus umweltbezogenen Steuern insgesamt 57,2 Milliarden Euro (Destatis 2022f).

Die Energiesteuer ist eine indirekte Verbrauchssteuer, die auf dem europäischen Level harmonisiert ist. Die rechtlichen Grundlagen schaffen dabei das Energiesteuergesetz (EnergieStG) und die Energiesteuer-Durchführungsverordnung (EnergieStV) in Deutschland. Die Höhe der Energiesteuer hängt von den jeweiligen Rohstoffen und ihrer Verwendung (z. B. Mobilität oder Heizung) ab. Im Regelfall wird die Energiesteuer beim Hersteller oder bei einem Weiterverkäufer erhoben und anschließend über den Warenpreis auf die Verbraucher:innen umgelegt. Um den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen weiter zu senken, hat die Bundesregierung zusätzlich zur Energiesteuer auch eine CO₂-Bepreisung anhand des Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) beschlossen. Die Abgabe soll die Preise von Rohstoffen für den Verkehrs- und Gebäudebereich an den CO₂-Gehalt der Energieträger anpassen und ist ebenfalls von den Rohstoffhändlern zu tragen. Energiesteuerpflichtige Energieerzeugnisse, die vom BEHG erfasst werden, unterliegen ab dem 1. Januar 2021 dem nationalen Emissionshandelssystem (nEHS).

- 28 Eine sinkende Energieintensität bei einem stagnierendem Endenergieverbrauch impliziert eine Entkopplung des Energieverbrauchs von der wirtschaftlichen Entwicklung. Die Entwicklung der Energieintensität und der Energieproduktivität¹⁸ in Deutschland erlauben daher weitere Rückschlüsse bezüglich der Entwicklung der Energieeffizienz und auch der Emissionsintensität. Die Endenergieproduktivität steigt seit dem Jahr 2000 mit wenigen Ausnahmen, wie in den Jahren 2008 bis 2010 durch die Finanzkrise und den Jahren 2012 und 2013, kontinuierlich an (siehe Abbildung 13). Der Anstieg der Endenergieproduktivität geht fast vollständig auf den Anstieg des BIP seit dem Jahr 2000 zurück, denn wie die Abbildung 13 zeigt, ist der Endenergieverbrauch zwischen den Jahren 2000 und 2020 nicht bedeutend rückläufig. Somit ist in der Vergangenheit die Entkopplung des Energieverbrauchs von der wirtschaftlichen Entwicklung durch einen stagnierenden Endenergieverbrauch bei wachsendem BIP gekennzeichnet. Die Entkopplung von Wirtschaftsentwicklung und Endenergieverbrauch kann durch Effizienzgewinne und dem strukturellen Wandel in Deutschland von einer vornehmend energieintensiven Industrie hin zu mehr Dienstleistungen erklärt werden. Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz können gerade für den Wirtschaftszweig produzierendes Gewerbe, insbesondere Schwerindustrie, ein großes THG-Minderungspotenzial bieten. Dabei wurden Effizienzgewinne unter

¹⁸ Die Energieintensität bzw. deren Kehrwert Energieproduktivität ist ein Maß dafür, wie effizient eine Volkswirtschaft mit der Ressource Energie umgeht. Hierfür wird die volkswirtschaftliche Leistung (Bruttoinlandsprodukt) von Deutschland im Verhältnis zum Energieverbrauch gesetzt. Eine Volkswirtschaft geht umso effizienter mit Energieressourcen um, je mehr volkswirtschaftliche Leistung aus einer Einheit eingesetzter Primärenergie erwirtschaftet wird.

anderem durch die Energieeffizienzstrategie und die Nationalen Aktionspläne Energieeffizienz (NAPE) beeinflusst. Trotzdem lag der durchschnittliche Anstieg der Endenergieproduktivität zwischen den Jahren 2008 und 2020 mit 1,4 % pro Jahr deutlich unter der jährlich angestrebten Steigerung der Endenergieproduktivität von 2,1 % (UBA 2022k).

Infokasten 5

Energieeffizienz

Die Erreichung der deutschen Klimaziele im Bundes-Klimaschutzgesetz benötigt neben dem Ausbau von erneuerbaren Energieträgern auch Fortschritte in der Energieeffizienz. Hierfür hat die Bundesregierung im Dezember 2019 die sektorenübergreifende Energieeffizienzstrategie 2050 verabschiedet (BMWK 2019). Damit soll ein wesentlicher Beitrag zur Erreichung der europäischen und nationalen Energieeffizienzziele geleistet werden.

Die Energieeffizienzstrategie 2050 umfasst drei wesentliche Elemente. Mit der Strategie wird erstmals ein Energieeffizienzziel für das Jahr 2030 festgelegt. Ziel ist es, bis zum Jahr 2030 den PEV gegenüber dem Jahr 2008 um 30 % zu senken. Bis zum Jahr 2050 ist eine Halbierung des PEV angestrebt. Allerdings ist mit dem neuen Bundes-Klimaschutzgesetz eine Anhebung des Ambitionsniveaus für die Senkung des PEV nötig. Konkret ist bis zum Jahr 2030 eine Reduktion um 40 % des PEV erforderlich und eine Halbierung des PEV bereits im Jahr 2045 (BMWK 2021). Als weiteres Element umfasst die Energieeffizienzstrategie einen neuen Nationalen Aktionsplan Energieeffizienz (NAPE 2.0) für den Zeitraum 2021 bis 2030, der neben den Maßnahmen des Klimaschutzprogramms 2030 weitere Energieeffizienzmaßnahmen beinhaltet. Bereits im Jahr 2014 hat die Bundesregierung mit dem Nationalen Aktionsplan Energieeffizienz (NAPE) eine Vielzahl an Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz auf den Weg gebracht, welche inzwischen umgesetzt wurden. Die Umsetzung des NAPE erfolgte durch den Ausbau von Informationsangeboten und Beratungsleistungen, finanzielle Fördermaßnahmen, sowie der Einführung wettbewerblicher Ausschreibungen für Energiesparprojekte. Als drittes Element kommt der im Jahr 2020 gestartete Dialogprozess „Roadmap Energieeffizienz 2045“ hinzu. Ziel ist es mit einer großen Vielzahl von Vertreter:innen aus Wirtschaft, Wissenschaft und der Zivilgesellschaft sowie den Bundesländern Maßnahmen zur Senkung des Energieverbrauchs und zur Steigerung der Energieeffizienz zu entwickeln. In einem Abschlusspapier sollen dann Handlungs- und Lösungsoptionen aufgezeigt werden (BMWK 2021). Insgesamt soll die „Roadmap Energieeffizienz 2045“ dann im NAPE 3.0 münden.

Umwandlungsverluste (PEV/EEV)

- 29 Bei der Umwandlung von Primärenergieträgern bis hin zur Endenergie entstehen Umwandlungsverluste. Je nach Energieträger sind die Umwandlungsprozesse unterschiedlich energieintensiv. Der größte Anteil der Umwandlungsverluste ist dem Industriesektor zuzuordnen. Ziel ist es die Verluste in der Energieumwandlung zu minimieren, wobei der Nutzen durch den Energieverbrauch gleichbleibend ist (BMW 2021). Die Komponente Umwandlungsverluste zeigt in der Dekomposition eine emissionsmindernde Wirkung. Dies ist bei der Betrachtung der Entwicklung des PEV (siehe Abbildung 12) und des Endenergieverbrauchs (siehe Abbildung 13) durch einen sinkenden PEV bei einem konstanten Endenergieverbrauch zu erklären. Somit ist der Rückgang der Umwandlungsverluste hauptsächlich auf Effizienzeffekte und Energieeinsparungen zurückzuführen. Vor

dem Hintergrund der Sektorenkopplung wird die Komponente an Bedeutung gewinnen, da der notwendig PEV, um zukünftig Wärme und Mobilität mit Hilfe von Strom bereitzustellen, offengelegt wird.

2.2 Energiewirtschaft

2.2.1 Entwicklung der Treibhausgasemissionen

- 30 Die THG-Emissionen im Sektor Energiewirtschaft sind im Zeitraum von 2000 bis 2021 von 385 Mt CO₂-Äq. auf 247 Mt CO₂-Äq., also um 35,8 %, gesunken, wobei sich der Rückgang hauptsächlich auf den Zeitraum ab 2014 konzentriert (siehe Abbildung 14). Dieses Absinken der THG-Emissionen ist im Vergleich zu den anderen Sektoren überdurchschnittlich hoch. Nach dem Rückgang der THG-Emissionen während der Finanzkrise in den Jahren von 2007 bis 2009 von 400 Mt CO₂-Äq. auf 356 Mt CO₂-Äq. gab es einen erneuten Anstieg der THG-Emissionen bis zum Jahr 2013. Erst seit dem Jahr 2014 ist ein deutlicher Rückgang der THG-Emissionen zu beobachten, welcher durch die sprunghafte Erhöhung der ETS-Preise im Jahr 2017 verstärkt wurde. Im Jahr 2020 fielen die THG-Emissionen aufgrund einer starken Reduktion der Stromnachfrage während der Covid-19-Pandemie auf ein Rekordtief. Im Jahr 2021 sind die THG-Emissionen allerdings wieder gestiegen, unter anderem aufgrund der Erholung der Stromnachfrage. Der Ausstieg aus der Kernkraft wirkt dabei gegenläufig zum allgemeinen, absinkenden Trend der THG-Emissionen in der Energiewirtschaft. Dieser hat gemäß der Merit-Order¹⁹ eine emissionssteigernde Wirkung, da der Ersatz der Kernkraftwerke in der Übergangszeit, bis genügend Strom aus erneuerbaren Energieträgern zur Verfügung steht, zu großen Teilen durch fossile Kraftwerke im In- und Ausland erfolgt.

¹⁹ Als Merit-Order wird in der Energiewirtschaft die Einsatzreihenfolge der stromproduzierenden Kraftwerke bezeichnet, welche sich an den Grenzkosten der verfügbaren Kraftwerkskapazitäten orientiert. In der Merit-Order werden die Grenzkosten in aufsteigender Reihenfolge sortiert, sodass das teuerste Kraftwerk, welches zur Deckung der Stromnachfrage benötigt wird, den Preis bestimmt. Die Merit-Order ist daher unabhängig von den Fixkosten einer Stromerzeugungstechnologie. Kraftwerke, die fortläufig preisgünstigen Strom produzieren, bekommen so als Erstes einen Zuschlag zur Einspeisung. Danach werden so lange Kraftwerke mit höheren Grenzkosten hinzugenommen, bis die Stromnachfrage gedeckt ist (FfE 2022).

Abbildung 14: Entwicklung der THG-Emissionen des Sektors Energiewirtschaft nach Bundes-Klimaschutzgesetz im Zeitraum 2000-2021

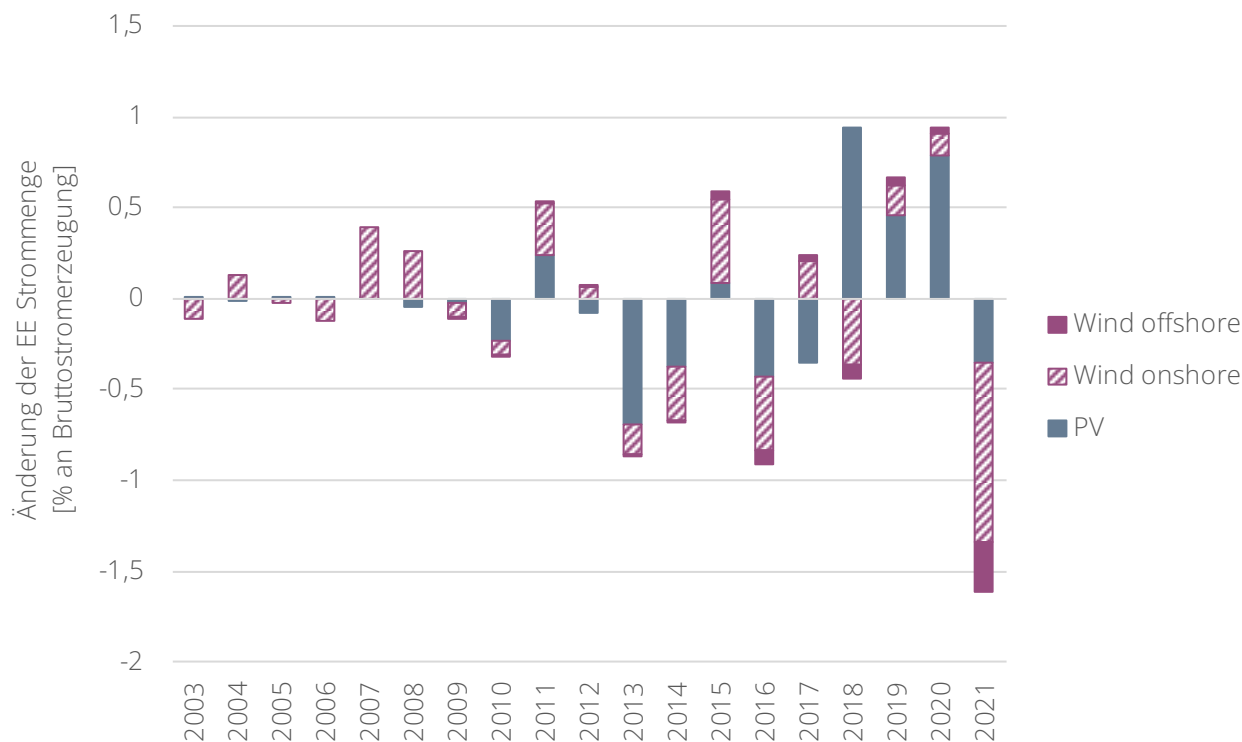


Eigene Darstellung auf Basis der Trendtabellen des Treibhausgasinventars 2022 (UBA 2022c). Die Daten für das Jahr 2021 basieren auf der Berechnung der Vorjahresemissionen, Inventardaten liegen zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vor.

- 31 Für die Stromerzeugung auf Basis von erneuerbaren Energieträgern sind die Windverhältnisse und die Sonnenstunden entscheidende Faktoren, die die Anzahl an Volllaststunden²⁰ und damit die produzierte Menge an Strom beeinflussen. Kraftwerke, die auf Basis von erneuerbaren Energieträgern betrieben werden, erreichen deutlich geringere Volllaststunden als Braunkohle- oder Kernkraftwerke (Grundlastkraftwerke), die technologisch für einen Dauerbetrieb ausgelegt sind, da Wind und Sonneneinstrahlung nicht jederzeit verfügbar sind (Paschotta 2020). Abbildung 15 zeigt die jährlichen Schwankungen der produzierten Strommenge aus erneuerbaren Energieträgern in Prozent von der Bruttostromerzeugung in den Jahren 2003 bis 2021. Diese Schwankungen lassen sich auf Schwankungen der Windgeschwindigkeit und der Sonnenstunden einzelner Jahre vom langjährigen Mittel zurückführen.

²⁰ Der Begriff Volllaststunden beschreibt die Ausnutzung einer Stromerzeugungsanlage. Der Wert der Volllaststunden ergibt sich, indem man die erzeugte Jahresenergiemenge durch die Nennleistung der Anlage teilt. Die Volllaststunden beschreiben die Anzahl der Stunden pro Jahr, in denen eine Anlage auf Nennleistung laufen müsste, um die tatsächlich erzeugte Jahresenergiemenge bereit zu stellen (Paschotta 2020).

Abbildung 15: Jährliche Schwankungen der produzierten Strommenge aus erneuerbaren Energieträgern in Prozent von der Bruttostromerzeugung im Vergleich zum langjährigen Mittel aufgrund des Wetterdargebots



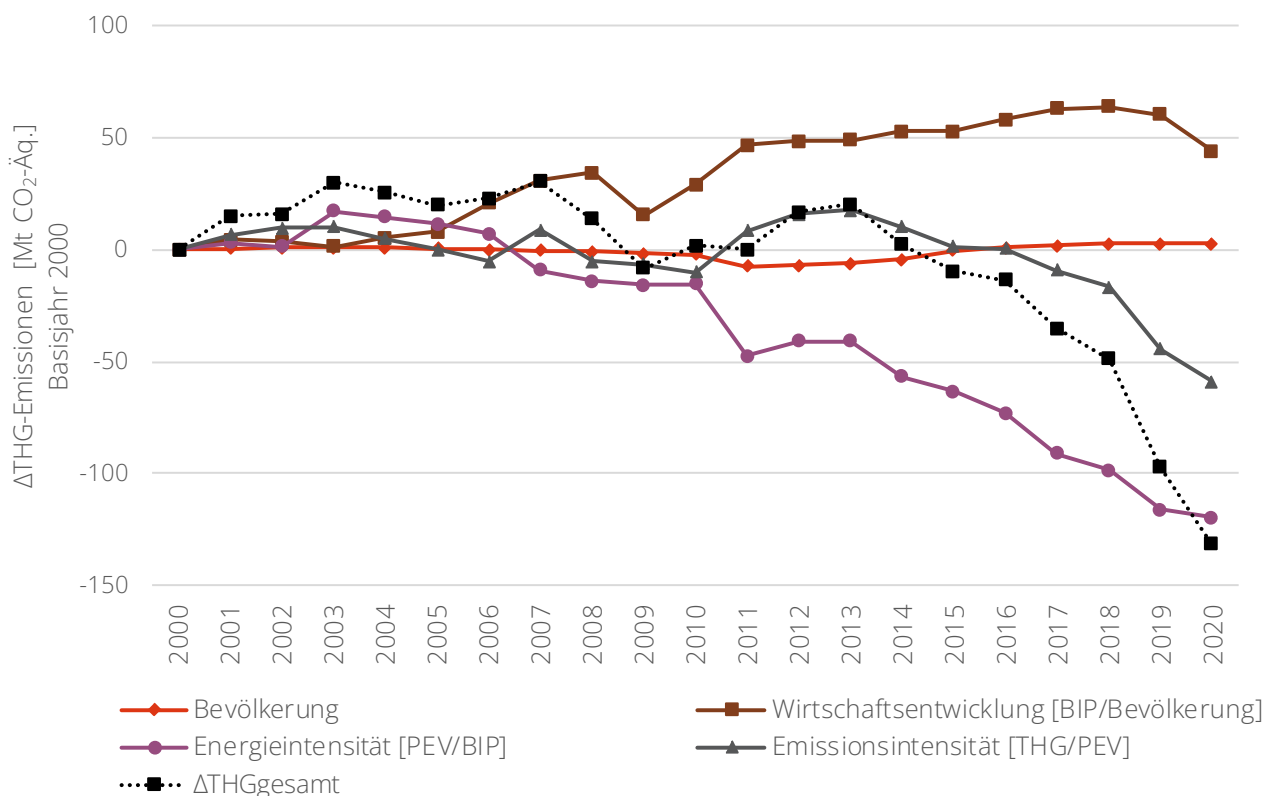
Eigene Darstellung auf Basis von UBA (2022c), AGEE-Stat (2022) und AGEb (2003-2022).

- 32 Abbildung 15 zeigt, dass der steigende Anteil an erneuerbaren Energieträgern dazu führt, dass die Erzeugung volatiler wird. Der Ausgleich dieser Schwankungen erfolgt durch andere zum jeweiligen Zeitpunkt vorhandene Kraftwerke, durch Flexibilisierung durch Speicher oder Lastmanagement sowie in Wechselwirkung mit dem europäischen Strommarkt. Dies kann in einzelnen Jahren einen Anstieg der Stromerzeugung aus konventionellen (fossilen) Energieträgern zur Folge haben, wodurch die THG-Emissionen in der CRF-Kategorie 1.A.1 Energiewirtschaft ansteigen würden. Das Jahr 2021 war zum Beispiel ein Jahr mit geringer solarer Einstrahlung und niedrigeren Windgeschwindigkeiten, so dass weniger Strom aus PV und Wind als im langjährigen Mittel produziert wurde. Bezogen auf die Bruttostromerzeugung lag der Einfluss der zwischenjährlichen Schwankungen im Jahr 2021 bei -1,6 % oder 9,3 TWh. Für das Jahr 2021 kann eine Obergrenze der dadurch entstehenden THG-Emissionen in CO₂-Äq. grob abgeschätzt werden: 1,6 % der Bruttostromerzeugung, wenn nur durch inländische Braunkohle substituiert, entsprechen rund 10,7 Mt CO₂-Äq. (siehe Icha et al. 2021). Der Einfluss der Dargebotsabhängigkeit des Wetters auf die THG-Emissionen nimmt mit steigendem Anteil von Strom aus erneuerbaren Energieträgern an der Stromerzeugung zu (siehe Abbildung 18) und gewinnt bezogen auf die Ziele des Bundes-Klimaschutzgesetzes an Relevanz, da das Erreichen der Klimaziele folglich auch vom Wind und Solardargebot eines jeden Jahres abhängig ist. Eine Quantifizierung dieses Effektes auf die THG-Emissionen bedarf einer detaillierten Simulation des europäischen Strommarktes.

2.2.2 Dekompositionsanalyse

- 33 Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigen die Dekomposition der Änderung der gesamten jährlichen THG-Emissionen in der Energiewirtschaft in die Komponenten Bevölkerungsentwicklung (Anzahl der Einwohner:innen), Wirtschaftsentwicklung (BIP pro Kopf), Energieintensität (Primärenergieverbrauch der Energiewirtschaft pro Einheit BIP) und Emissionsintensität (Treibhausgasemissionen pro Einheit Primärenergieverbrauch) in Bezug auf das Jahr 2000 bzw. aggregiert in drei Phasen für die Zeiträume von 2000 bis 2010, von 2010 bis 2017 und von 2017 bis 2020.
- 34 Die Dekomposition berücksichtigt die THG-Emissionen der Erzeugung von Elektrizität und Wärme (CRF-Kategorie 1.A.1.a) und umfasst damit 86 % der THG-Emissionen des Sektors Energiewirtschaft. Die THG-Emissionen aus Raffinerien, der Herstellung fester Brennstoffe und anderer Energieerzeuger, aus Erdgasverdichtern sowie die diffusen THG-Emissionen aus Brennstoffen sind nicht Teil dieser Analyse. Die Dekomposition umfasst flüssige, feste und gasförmige fossile Energieträger, weitere fossile Energieträger, Biomasse sowie die Stromerzeugung durch Wind- und Wasserkraft und PV. Mit steigendem Ausbau von erneuerbaren Energieträgern sind auch die Wetterbedingungen der entsprechenden Jahre sowie die aus ihnen resultierenden Volllaststunden der erneuerbaren Energieträger wichtig. Die hier dargestellte Dekomposition führt keine Bereinigung um diese Größe durch, dies kann dazu führen, dass der Faktor Emissionsintensität selbst bei konstantem Kapitalstock aufgrund unterschiedlicher Wetterverhältnisse zwischen den Jahren variieren kann (siehe Abbildung 15).

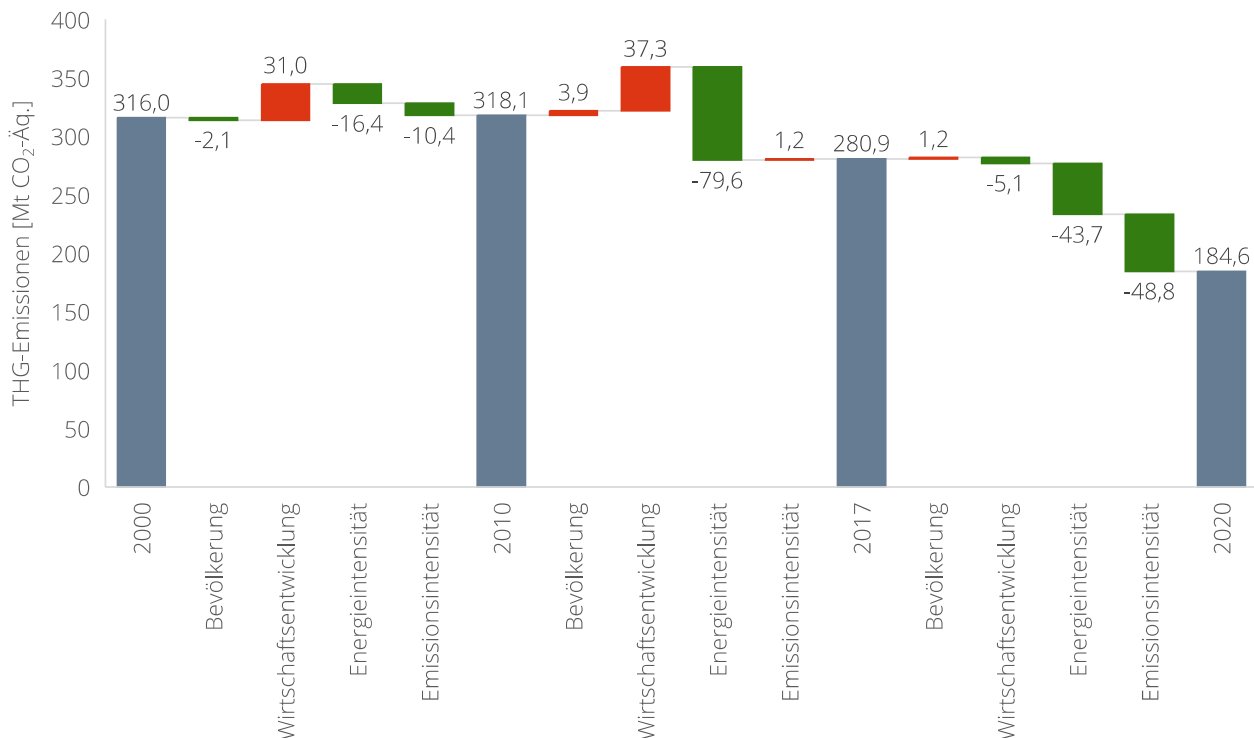
Abbildung 16: Dekomposition der THG-Emissionen der Energiewirtschaft - Änderungen im Vergleich zu 2000



Eigene Darstellung. Weitere Details zu den verwendeten Daten finden sich in Tabelle 4.

- 35 Die Phasen zwischen den Jahren 2000 und 2010 sowie zwischen 2010 und 2017 sind vor allem durch die wirtschaftliche Entwicklung und die Finanzkrise geprägt, infolge derer aufgrund eines Nachfrageeinbruchs die Wirtschaftsentwicklung (BIP/Kopf) und die THG-Emissionen im Jahr 2009 deutlich zurückgingen (siehe Abbildung 16 und Abbildung 17). Insgesamt lässt sich zwischen den Jahren 2000 bis 2010 kein eindeutiger Trend der THG-Emissionen erkennen. Der Zeitraum ist geprägt durch den kontinuierlichen Ausbau von Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern, die emissionssteigernden Effekte aus wirtschaftlicher Entwicklung und die emissionsmindernden Verbesserungen der Energieintensität des Sektors. Diese Verbesserungen sind sowohl auf den kontinuierlichen Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern als auch auf die Steigerung des Brutto-Wirkungsgrades fossiler Kraftwerke durch technische Verbesserungen, die kombinierte Erzeugung von Strom und Wärme (KWK) sowie der Außerbetriebnahme veralteter (Braunkohle-)Kraftwerke zu begründen (siehe Kapitel 2.2.3).
- 36 Mit Erholung der Stromnachfrage nach der Finanzkrise ist zunächst in den Jahren 2010 und 2011 ein geringfügiges Absinken der THG-Emissionen zu sehen mit einem anschließenden Anstieg bis zum Jahr 2013. Ab dem Jahr 2014 ist ein sinkender Trend der THG-Emissionen zu verzeichnen. Insgesamt ist in der Phase von 2010 bis 2017 ein deutlicher Anstieg der Wirtschaftsentwicklung bei gleichzeitiger Absenkung der Energieintensität erkennbar (siehe Abbildung 16). Die sinkende Energieintensität lässt sich im Wesentlichen auf Effizienzgewinne fossiler Kraftwerke, einen Wandel der Wirtschaftsstruktur hin zu mehr Dienstleistungen (siehe Kapitel 2.3.3), aber auch auf den starken Ausbau der erneuerbaren Energieträger sowie der Bilanzierung dieser im Rahmen des PEV (siehe Infokasten 2) zurückführen. Als Reaktion auf das Reaktorunglück in Fukushima sind im Jahr 2011 acht Atomkraftwerke mit einer Leistung von rund 8,8 GW bzw. 41 % der Bruttostromerzeugungskapazität der laufenden Kernkraftwerke kurzfristig stillgelegt worden. Aufgrund der Substitution der Kernenergie durch fossile Kraftwerke hat die Abschaltung der Kernkraftwerke dazu geführt, dass, trotz Ausbau der erneuerbaren Energieträger, die Emissionsintensität angestiegen ist (siehe Abbildung 13 und Kapitel 2.2.3).

Abbildung 17: Dekomposition der THG-Emissionen der Energiewirtschaft - Aggregierte Betrachtung 2000-2010, 2010-2017 und 2017-2020



Eigene Darstellung. Weitere Details zu den verwendeten Daten finden sich in Tabelle 4.

- 37 In der dritten Phase von 2017 bis 2020 ist eine Verstärkung des starken, emissionsmindernden Trends, der seit dem Jahr 2014 vorherrscht, zu verzeichnen. Das kontinuierliche Sinken der THG-Emissionen wird ab dem Jahr 2017 durch steigende Zertifikatspreise des EU-ETS (siehe Infokasten 3) und einem damit einhergehenden Rückgang der Kohle-Verstromung verstärkt, welche teils durch Strommengen aus dem fortgesetzten Ausbau der erneuerbaren Energieträger und durch Gaskraftwerke substituiert wurde. Auch ist ab dem Jahr 2018 durch eine im Vergleich zu den Vorjahren weniger stark wachsende wirtschaftliche Entwicklung dieser Trend weiter unterstützt worden. Allein im Jahr 2019 konnten gegenüber dem Vorjahr mit demselben Energieeinsatz 3,1 % mehr Produkte und Dienstleistungen bereitgestellt werden (BMWi 2021), was sich u. a. in der Entwicklung der Komponente Energieintensität in den Jahren 2019 und 2020 abzeichnet. Diese Effekte werden verstärkt durch die emissionsmindernde Wirkung der sinkenden Wirtschaftsentwicklung in Folge der Covid-19-Pandemie (siehe Abbildung 16).
- 38 Im Vergleich zu den anderen Komponenten spielt die Bevölkerungsentwicklung über den betrachteten Zeitraum eine untergeordnete Rolle, wobei ihre Entwicklung seit dem Jahr 2015 durchgehend schwach emissionsfördernd wirkt.
- 39 Während der Rückgang der Emissions- und Energieintensität im Zeitraum von 2000 bis 2010 zu schwach war, um den emissionsfördernden Effekt der Wirtschaftsentwicklung auszugleichen, lässt sich die THG-Minderung von 2010 bis 2017 hauptsächlich auf die Komponente Energieintensität und steigende Energieeffizienz fossiler Kraftwerke zurückführen. Die Komponente Emissionsintensität hatte in dieser Phase nur einen minimalen Anteil an der THG-Reduktion. Im Zeitraum ab 2017 sieht man eine deutliche

und stetige Reduktion dieser beiden Komponenten, welche zu einer deutlichen THG-Reduktion führte, trotz insgesamt ähnlich starker emissionsfördernder Komponenten.

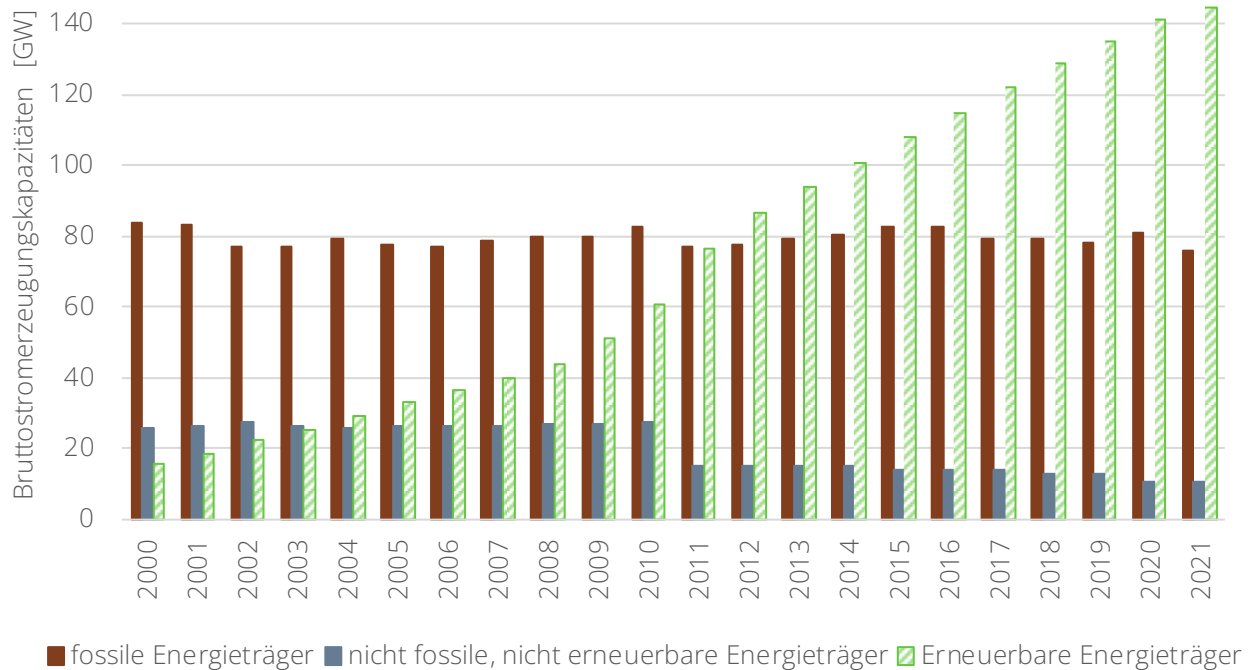
2.2.3 Diskussion von Ursachen der Entwicklung

- 40 Die Dekompositionsanalyse zeigt die Entwicklung der Komponenten Bevölkerungsentwicklung, Wirtschaftsentwicklung, Emissionsintensität und Energieintensität. Um die dargestellten Trends und die dahinterliegenden Ursachen zu identifizieren, werden in diesem Kapitel Einflüsse der strukturellen Entwicklungen sowie der Einfluss von politik- und marktpreisgetriebenen Entwicklungen im Sektor Energiewirtschaft eingeordnet. Zu diesem Zweck erfolgt eine Analyse des Kapitalstocks der Energiewirtschaft mit Fokus auf Strom- und Wärmeerzeugungsanlagen sowie eine Einordnung der Wechselwirkungen veränderter Kraftwerksstrukturen und des Energiemix anhand von korrespondierenden Preisentwicklungen.

Strukturelle Entwicklungen

- 41 Die Zusammensetzung des Kapitalstocks in der Energiewirtschaft bzw. der davon abhängige Energiemix für Strom und Wärme ist ausschlaggebend für die Zusammensetzung des Primärenergieverbrauches (siehe Infokasten 2) und beeinflusst die Höhe der THG-Emissionen des Sektors, was sich insbesondere in der Komponente Emissionsintensität niederschlägt. Aus diesem Grund werden nachfolgend die installierte Leistung und die Kapazitäten zur Strom- und Wärmeerzeugung aus fossilen und erneuerbaren Energieträgern näher betrachtet. Abbildung 18 stellt die Bruttostromerzeugungskapazitäten über den Zeitraum von 2000 bis 2021 dar.

Abbildung 18: Bruttostromerzeugungskapazitäten (installierte Leistung in GW) nach Energieträgern über den Zeitraum von 2000 bis 2021



Eigene Darstellung nach BMWK (2022g). Die Energieträger Stein- und Braunkohle sowie Heizöl und Gase sind in dieser Darstellung unter der Bezeichnung fossile Energieträger zusammengefasst worden, Kernenergie und Sonstige Energieträger unter der Bezeichnung nicht fossile, nicht erneuerbare Energieträger. Unter die Bezeichnung erneuerbare Energieträger fällt Wind, PV, Wasser, Geothermie und Biomasse.

42 Die Stromerzeugungskapazität im gesamten Kraftwerkspark bzw. die installierte Leistung in Gigawatt (GW) ist im Zeitraum von 2000 bis 2020 von 125,5 GW auf 233,7 GW angestiegen, was einem relativen Zuwachs von 86 % entspricht. Dieser Zuwachs ist auf den durch das EEG geförderten starken Anstieg der Bruttostromerzeugungskapazitäten aus erneuerbaren Energieträgern (Wasser, Wind, PV, Geothermie und Biomasse) bei einem Rückgang der Kapazität zur Umwandlung konventioneller Energieträger (- 20 %) zurückzuführen. Die installierte Leistung von Anlagen zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern wurde in Deutschland von 2000 bis 2021 von 15,9 GW auf 144,9 GW ausgebaut. Im Jahr 2016 bestand knapp die Hälfte der gesamten installierten Leistung aus Anlagen zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern, im Jahr 2021 waren es 60 % (BMWK 2022g). Zum einen soll durch den Zu- und Ausbau der erneuerbaren Energieträger der Atomausstieg und damit der Rückgang der Kernenergie substituiert werden. Zum anderen sollen fossile Energiequellen zunehmend durch Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energieträger ersetzt werden mit dem Ziel, die Emissionsintensität des Energiemix und somit die THG-Emissionen als Ganzes zu senken. Im Jahr 2012 lag die Erzeugungskapazität der erneuerbaren Energieträger erstmalig über der Spitzenlast²¹, welche im Winter 2012/2013 einen Höchstwert von 81 GW erreichte und an normalen Tagen in Deutschland zwischen 65 GW bis 70 GW liegt (Bundesregierung 2022c). Die steigenden Stromerzeugungskapazitäten

²¹ Als Spitzenlast wird die Höchstbelastung eines Stromnetzes während der größten Nachfrage innerhalb eines Zeitabschnittes wie zum Beispiel eines Tages oder eines Jahres bezeichnet.

der erneuerbaren Energieträger, der langsam vorangehende Netzausbau und Must-Run-Kapazitäten²² von KWK-Anlagen stehen in Zusammenhang mit dem steigenden Anteil an Ausfallarbeit abgeregelter erneuerbarer Energieträger (u. a. im Jahr 2020 69 % Wind an Land und 29 % Wind auf See). Diese Ausfallarbeit²³ stellt dabei ein potenzielles THG-Minderungspotenzial dar, welches aus den bereits genannten Gründen nicht ausgeschöpft wurde (BNetzA und BKartA 2022).

- 43 Der Ausbau von Windkraftanlagen (siehe Abbildung 84 und Abbildung 85) beschleunigte sich erstmals im Jahr 2014. Jedoch brach dieser beschleunigte Ausbau im Jahr 2018 ein und befindet sich seitdem auf einem niedrigen Niveau. Potenzielle Hemmnisse sind hierbei die Flächenverfügbarkeit und Hemmnisse in der Regional- und Kommunalplanung in Wechselwirkung mit der Genehmigungsplanung (FA Wind und Tucci 2022). Der Ausbau der installierten Kapazitäten von PV (siehe Abbildung 83) zeigt starke Abhängigkeiten mit der Förderausgestaltung durch das EEG (Infokasten 6). Seit der Einführung des EEG im Jahr 2000 gab es bis zum Jahr 2020 fünf Novellierungen. Den größten Einfluss auf den PV-Ausbau hatte dabei die Reform im Jahr 2012. Zwischen den Jahren 2013 und 2017 kam es allerdings zu einer Verlangsamung im Aufbau der installierten PV-Kapazitäten im Vergleich zu den Vorjahren. Grund hierfür war die EEG-Novelle 2012, die eine Kürzung für die Einspeisevergütung vorsah. Mit der Einführung des wettbewerblichen Vergütungssystems der Ausschreibungen im EEG 2017 und der Abschaffung von festen Fördersätzen erhöhte sich der Zubau an PV-Anlagen wieder.
- 44 Für die Entwicklung der Emissionsintensität, und folglich die Höhe der THG-Emissionen der einzelnen Jahre, sind die Zusammensetzung des Energiemix, im speziellen des Strommix, sowie die zur Verfügung stehenden Kraftwerkskapazitäten ausschlaggebend. Abbildung 19 stellt die Entwicklung der CO₂-Emissionen des deutschen Strommix nach Energieträgern und dem zugehörigen CO₂-Äq.-Emissionsfaktor (ohne Vorketten) über den Zeitraum von 2000 bis 2021 dar. Aus Abbildung 19 wird ersichtlich, dass bis zum Jahr 2020 ein stetiger Rückgang des CO₂-Äq.-Emissionsfaktors des deutschen Strommix auf 382 Gramm CO₂-Äq. pro Kilowattstunde zu verzeichnen ist. Nach den Schätzungen des Umweltbundesamtes liegt der CO₂-Äq.-Emissionsfaktor im Jahr 2021 bei 428 Gramm CO₂-Äq. pro Kilowattstunde.

²² Die Must-Run-Kapazität ist die installierte elektrische Leistung von Kraftwerken, die mindestens erforderlich ist, um die Netzstabilität durch die Systemdienstleistungen Blindleistung und Regelenergie zu gewährleisten. Auch können KWK-Anlagen ihre elektrische Leistung zu bestimmten Zeiten nicht reduzieren, weil die thermische Leistung z. B. für Heizzwecke benötigt wird.

²³ Ausfallarbeit beschreibt den entstehenden Energieverlust bei der Abregelung durch das Einspeisemanagement.

Infokasten 6

Nationale Förderung von erneuerbaren Energieträgern und Kraft-Wärme-Kopplung

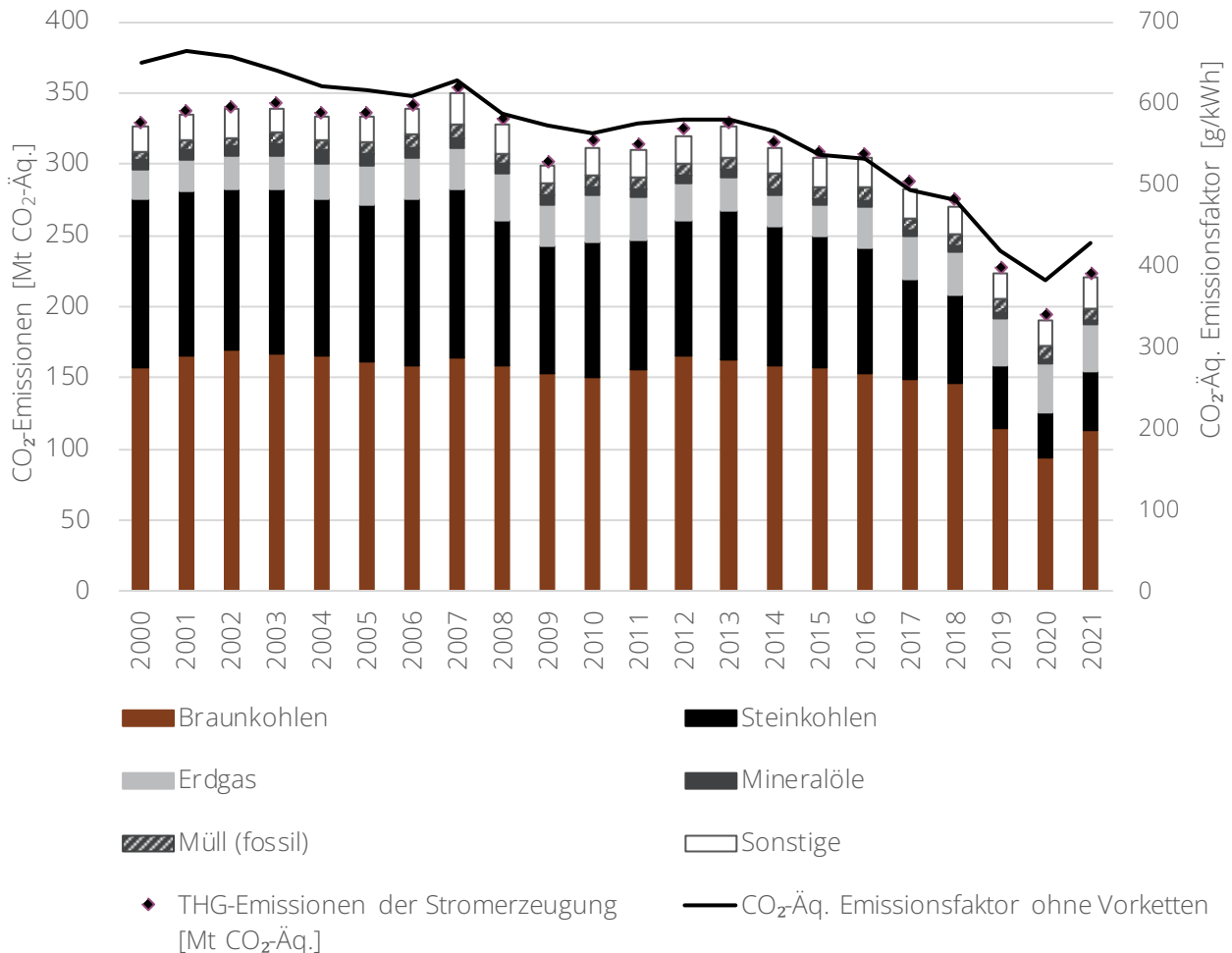
Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) ist das zentrale nationale Instrument zur Steuerung des Ausbaus von erneuerbaren Energieträgern seit dem Jahr 2000. Das Ziel des EEG (2021) ist es, den Anteil der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern bis zum Jahr 2035 auf 65 % zu erhöhen und bis zum Jahr 2050 den gesamten Strom des Staatsgebietes treibhausgasneutral zu erzeugen. Das dadurch entstehende Fördervolumen taxierte die EU-Kommission im Jahr 2021 auf 33 Milliarden Euro (Europäische Kommission 2022b). Bei Betrachtung der THG-Emissionswirkung des EEG wird in der Literatur von einer geografischen Emissionsverlagerung in Wechselwirkung mit dem EU-ETS und einem Wasserbett-Effekt²⁴ gesprochen (siehe Infokasten 3). Dabei waren insbesondere die EEG-Novellen 2012 und 2017 maßgeblich für die Entwicklung des Ausbaus der erneuerbaren Energieträger und der Fördereffizienz verantwortlich. Mit der Novelle des EEG 2012 wurde die Vergütungshöhe des erneuerbaren Stroms nicht wie vorher staatlich festgelegt, sondern durch Ausschreibungen am Markt ermittelt. Ziel war es, die erneuerbaren Energieträger und deren Ausbau marktfähig zu gestalten.

Die Förderung von KWK-Anlagen erfolgt seit dem Jahr 2002 durch das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG). Das KWKG ist in den vergangenen zwei Jahrzehnten mehrfach novelliert worden und ist Grundlage für die Einspeisung und Vergütung des Stroms aus neuen, modernisierten und nachgerüsteten KWK-Anlagen. Mit dem KWKG (2017) wurde die Förderung von KWK-Anlagen auf 1,5 Mrd. Euro pro Jahr verdoppelt mit dem Ziel, den Strom aus KWK-Anlagen bis zum Jahr 2025 auf 120 TWh zu steigern. Durch das KWKG werden nur fossil betriebene Anlagen gefördert, da die Förderung von Biomasse-KWK-Anlagen Teil des EEGs ist. Die Privilegierung der stromkostenintensiven Industrie bei der KWKG-Umlage entspricht der Besonderen Ausgleichsregelung²⁵ im EEG. Wer diesen Begrenzungsbescheid auf Grundlage des EEGs in Anspruch nimmt, wird auch nach dem KWKG entlastet. Seit dem Jahr 2020 wird der KWK-Zuschlag begrenzt. Darüber hinaus ist eine Streichung für Neuanlagen und Auslaufen der Förderung für Bestandsanlagen möglich. Außerdem gilt für KWK-Anlagen mit einer elektrischen Leistung ab 10 MW und einer Zulassung nach dem 30. Juni 2023 die Regelung, dass diese für den Betrieb mit 100 % Wasserstoff technisch ausgestattet sein müssen.

²⁴ Der Wasserbett-Effekt beschreibt das Phänomen, dass zusätzliche Klimaschutzmaßnahmen wie zum Beispiel die Stilllegungen von Kohlekraftwerken fast keinen Effekt auf den EU-ETS Preis hatten, da die freiwerdenden Emissionszertifikate nicht gelöscht, sondern lediglich an andere Marktteilnehmer übertragen wurden.

²⁵ Durch Inanspruchnahme der Besonderen Ausgleichsregelung des EEG können stromintensive Industrieunternehmen ihre Stromkosten senken. Auf Antrag begrenzte das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) für eine Abnahmestelle die EEG-Umlage, um die internationale Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens zu erhalten. Um von der Umlagebegrenzung profitieren zu können, musste ein Unternehmen nach dem EEG 2017 bestimmte Voraussetzungen bzgl. des jährlichen Stromverbrauchs und der Stromintensität vorweisen sowie bei Abnahme von mehr als 5 GWh/a ein Energie- und Umweltmanagement vorweisen.

Abbildung 19: Entwicklung der CO₂-Emissionen des deutschen Strommix nach Energieträgern und dem korrespondierenden CO₂-Äq. Emissionsfaktor (ohne Vorketten) für den Zeitraum von 2000 bis 2021



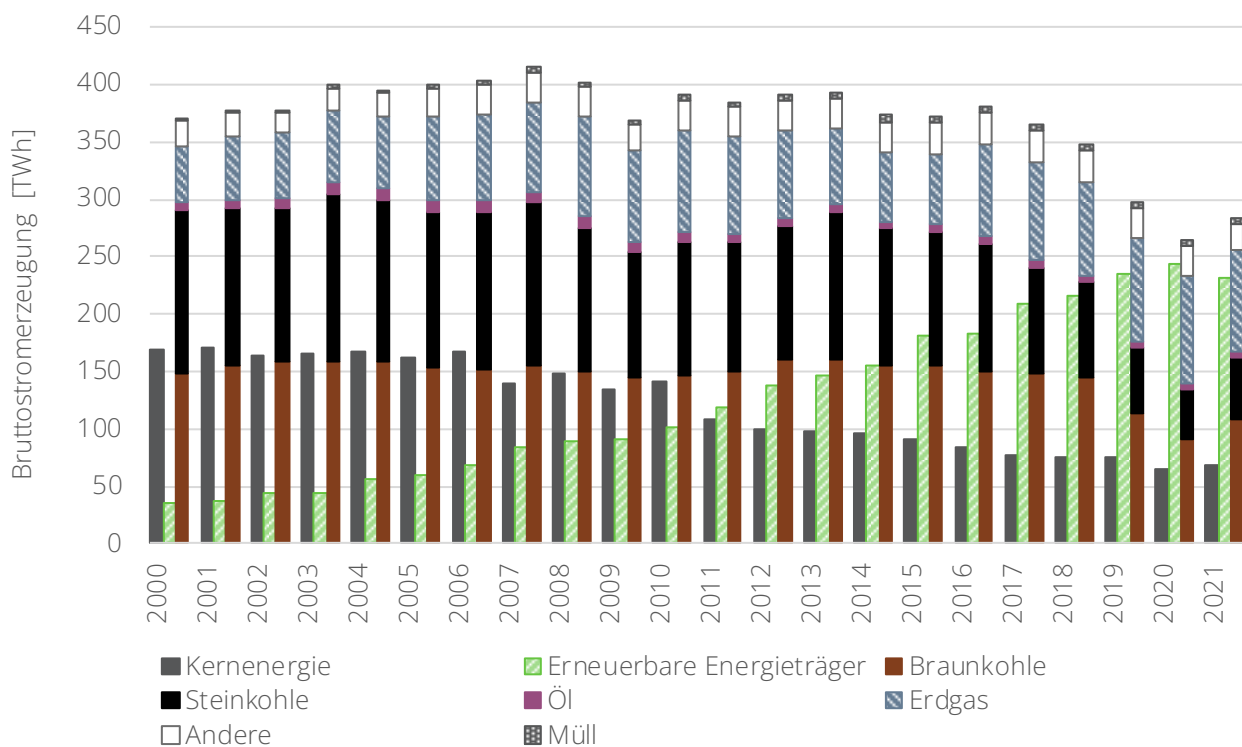
Eigene Darstellung nach Icha et al. (2021). Die Berechnung des CO₂-Äq. Emissionsfaktors ohne Vorketten erfolgt in Icha et al. (2021) auf Basis der Treibhausgaspotenziale (GWP) des Fünften Sachstandsberichts des IPCC. Diese weichen von den derzeit verwendeten GWPs des Vierten Sachstandsbericht des IPCC ab, welche aktuell in der Berichterstattung der THG-Emissionen nach KSG und Kyoto-Protokoll verwendet werden (ERK 2021b).

- 45 Für den beschriebenen Rückgang des Emissionsfaktors des deutschen Strommix ist unter anderem ab dem Jahr 2003 der gestiegene Stromanteil erneuerbarer Energieträger verantwortlich, welcher auf Basis von erneuerbaren Energieträgern produziert wurde. Im Jahr 2007 ist diese Entwicklung kurzfristig durch den gestiegenen Anteil konventioneller Brennstoffe kompensiert worden, was zu einem Anstieg der spezifischen Emissionsfaktoren führte. Der fallende Trend des Emissionsfaktors setzt sich allerdings mit dem Jahr 2008 fort und wird durch die Auswirkungen der Wirtschafts- und Finanzkrise verstärkt. Der Einfluss des Anstiegs des Stromverbrauchs ab dem Jahr 2014 (siehe Abbildung 18) wird durch den gleichzeitigen Anstieg des Anteils der erneuerbaren Energieträger an der Bruttostromerzeugung und einer Erhöhung des Brennstoffausnutzungsgrades bei gleichzeitiger Verminderung des

Brennstoffeinsatzes bei fossilen Kraftwerken kompensiert (Icha et al. 2021). Der Brutto-Wirkungsgrad²⁶ hat sich im Kraftwerkspark seit dem Jahr 1990 verbessert. Grundsätzlich ist der Anstieg des Brutto-Wirkungsgrads zum einen durch die Modernisierung der Kraftwerke und zum anderen durch die Außerbetriebnahme alter (Braunkohle-)Kraftwerke zugunsten neuer Kraftwerke zu begründen (UBA 2022l).

- 46 Die stärkere Verstromung von Erdgas, welches einen niedrigeren CO₂-Emissionsfaktor als Kohle aufweist, ab dem Jahr 2016 hatte eine zusätzlich emissionsmindernde Wirkung auf die spezifischen Emissionsfaktoren und die THG-Emissionen der Bruttostromerzeugung im Allgemeinen. Dieser Trend bedingt sich unter anderem durch die Preisentwicklungen im EU-ETS und folglich durch die Preisentwicklungen auf dem europäischen Strombinnenmarkt. Die Covid-19-Pandemie und der Rückgang der Stromnachfrage führten zu einer Verstärkung des Trends. Der Anstieg der spezifischen Emissionsfaktoren im Jahr 2021 lässt sich wiederum auf die wirtschaftliche Erholung, eine geringere Menge an produziertem Strom auf Basis von erneuerbaren Energieträgern (siehe Kapitel 2.2.1), sowie gestiegene Erdgaspreise zurückführen (Icha et al. 2021).

Abbildung 20: Bruttostromerzeugung in Deutschland in TWh nach Energieträgern für den Zeitraum von 2000 bis 2021



Eigene Darstellung nach BMWK (2022g).

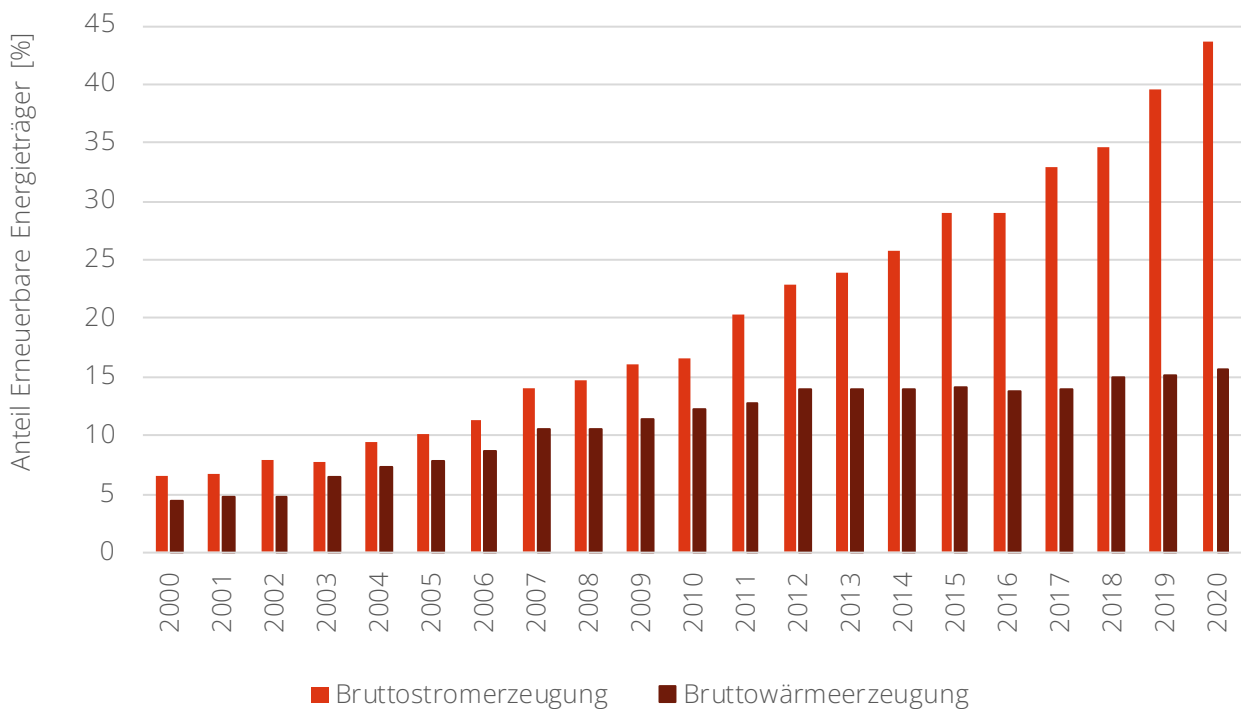
- 47 Abbildung 20 zeigt den Strommix über den Zeitraum 2000 bis 2021. Die Bruttostromerzeugung der verschiedenen Energieträger ist für jedes Jahr in drei Säulen unterteilt: Bruttostromerzeugung durch

²⁶ Der Brutto-Wirkungsgrad bezieht sich auf die Stromerzeugung eines Kraftwerkes. Dieser wird als durchschnittlicher Wirkungsgrad innerhalb eines Jahres errechnet und im sogenannten „Bestpunkt“ gemessen. Vor allem für Gaskraftwerke ist durch effiziente Gas- und Dampfkraftwerke eine positive Effizienzentwicklung zu sehen. Der Brutto-Wirkungsgrad ist für Gaskraftwerke um über 18 Prozentpunkte seit dem Jahr 1990 auf 49,2 % im Jahr 2020 angestiegen.

Kernkraft, Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern und Bruttostromerzeugung fossiler Energieträger. Die Bruttostromerzeugung ist – mit Ausnahme des Jahres 2009, bedingt durch den konjunkturellen Einbruch und die niedrigere wirtschaftliche Leistung während der Finanzkrise – stetig angestiegen und erst seit dem Jahr 2017 ist ein Rückgang in der Stromerzeugung zu verzeichnen. Während bis zum Jahr 2010 vor allem Kohle, Erdgas und Kernenergie den Strommix dominierten (im Jahr 2000 waren es noch 80 %), lag der Anteil der Energieträger Braunkohle, Steinkohle und Kernenergie im Jahr 2021 nur noch bei 39,8 %. Der Anteil der Kernenergie an der Bruttostromerzeugung war in den Jahren 2000 und 2001 mit 29 % am höchsten und erreichte ein Maximum im Jahr 2001 mit 171,3 TWh. Seitdem ist die Bruttostromerzeugung aus Kernenergie stetig gesunken und hatte eine Minimalerzeugung im Jahr 2020 mit 64,4 TWh, bevor die Erzeugung im Jahr 2021 wieder geringfügig auf 69 TWh anstieg. Der stärkste Rückgang der Bruttostromerzeugung aus Kernenergie ist im Jahr 2011 zu verzeichnen, was sich auf die kurzfristige Stilllegung von rund 8,8 GW Bruttoerzeugungskapazität Kernenergie – im Rahmen des Atom-Moratoriums und des „13. Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes“ (BGBl I S. 1704 - 13. AtG-Novelle) – als Reaktion auf das Reaktorunglück in Fukushima zurückführen lässt. Die Substitution der Erzeugungskapazitäten durch vornehmend fossile Kraftwerke hat in den darauffolgenden Jahren zu einem Anstieg der Emissionsintensität geführt. Erst die Außerbetriebnahme von konventionellen Kraftwerken und die Abnahme der Bruttostromerzeugung sowie der Wechsel von Kohle zum emissionsärmeren Erdgas im Jahr 2017 – bedingt durch steigende EU-ETS Preise (siehe Infokasten 3) und eine Trendwende im Stromexport – führen zu einer Trendumkehr der Emissionsintensität.

- 48 Der Anteil von produziertem Strom auf Basis von erneuerbaren Energieträgern an der Bruttostromerzeugung ist kontinuierlich seit dem Jahr 2000 angestiegen und betrug im Jahr 2020 rund 43 % (circa 244 TWh). Aufgrund ungünstiger Witterungsverhältnisse ist dieser im Jahr 2021 jedoch auf rund 40 % (231 TWh) gefallen (siehe Kapitel 2.2.1). Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Rücklauf der Produktion aus fossilen Kraftwerken nicht gleichmäßig zum Ausbau der erneuerbaren Energieträger erfolgt. Dies lässt sich zum größten Teil auf Wechselwirkungen mit dem europäischen Strommarkt zurückführen, aber auch auf die Tatsache, dass zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit bei zunehmender Dargebotsabhängigkeit der Stromerzeugung, fossile Kraftwerke in Teilen zur Deckung des Strombedarfs und zur Glättung von Preisspitzen genutzt werden.
- 49 Für die Höhe der THG-Emissionen ist neben der Emissionsintensität der Stromerzeugung, auch der Anteil der erneuerbaren Energieträger in der Wärmeerzeugung relevant (siehe Abbildung 21). Die Entwicklung des Anteils der Abwärme und der erneuerbaren Energieträger in Fernwärmenetzen ist dabei insbesondere zu berücksichtigen, da die THG-Emissionen der Fernwärme bilanziell dem Sektor Energiewirtschaft zugeordnet werden. Der Anteil von erneuerbaren Energieträgern in der Wärmebereitstellung entwickelt sich deutlich langsamer als in der Bruttostromerzeugung und hat sich insbesondere seit dem Jahr 2012 kaum noch verändert. Zwar stieg die Nutzung fester Biomasse bis zum Jahr 2013 stetig an, zeigt seitdem aber wenig Veränderungen und lediglich einen moderaten Anstieg von 13,9 % im Jahr 2012 auf 15,6 % im Jahr 2020.

Abbildung 21: Anteil der erneuerbaren Energieträger in der Bruttostrom- und Bruttowärmeerzeugung der Jahre 2000 bis 2020



Eigene Darstellung nach BMWK (2022g).

50 Zeitgleich ist der Anteil der erneuerbaren Energieträger in der Wärmebereitstellung und insbesondere der Fernwärme im Zeitraum von 2010 bis 2020 um zehn Prozentpunkte auf 17,8 % (rund 22 TWh) angestiegen. Daran hat Biomasse mit 9,4 % den größten Anteil, gefolgt von biogenem Siedlungsabfall (7,6 %) sowie Geo- und Solarthermie (0,8 %) (BDEW 2021b). Gespeist werden die Fernwärmenetze trotzdem meist durch fossile Kraftwerke, die die Kraft-Wärme-Kopplung nutzen. Die Nutzung der KWK-Technologie birgt gegenüber der getrennten Bereitstellung von Strom und Wärme Effizienzgewinne und wirkt sich emissionsmindernd aus. Durch den Erlass des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes und die Förderung von KWK-Anlagen ist der Anteil von der KWK-Wärmeerzeugung und KWK-Stromerzeugung stetig gestiegen. Die auf Steinkohle- und Mineralölen basierende KWK-Stromerzeugung ist im Zeitverlauf zurückgegangen und die auf Biomasse basierende KWK-Stromerzeugung ist angestiegen. Den größten Anteil über den gesamten Zeitverlauf hat allerdings die auf Gas basierende KWK-Stromerzeugung. Fossile Gase waren im Jahr 2018 immer noch der wichtigste Energieträger. Aus ihm wurden 105,6 TWh KWK-Nettowärme erzeugt. Im selben Jahr trug Biogas mit 52,5 TWh zur KWK-Wärmeerzeugung bei (UBA 2020b).

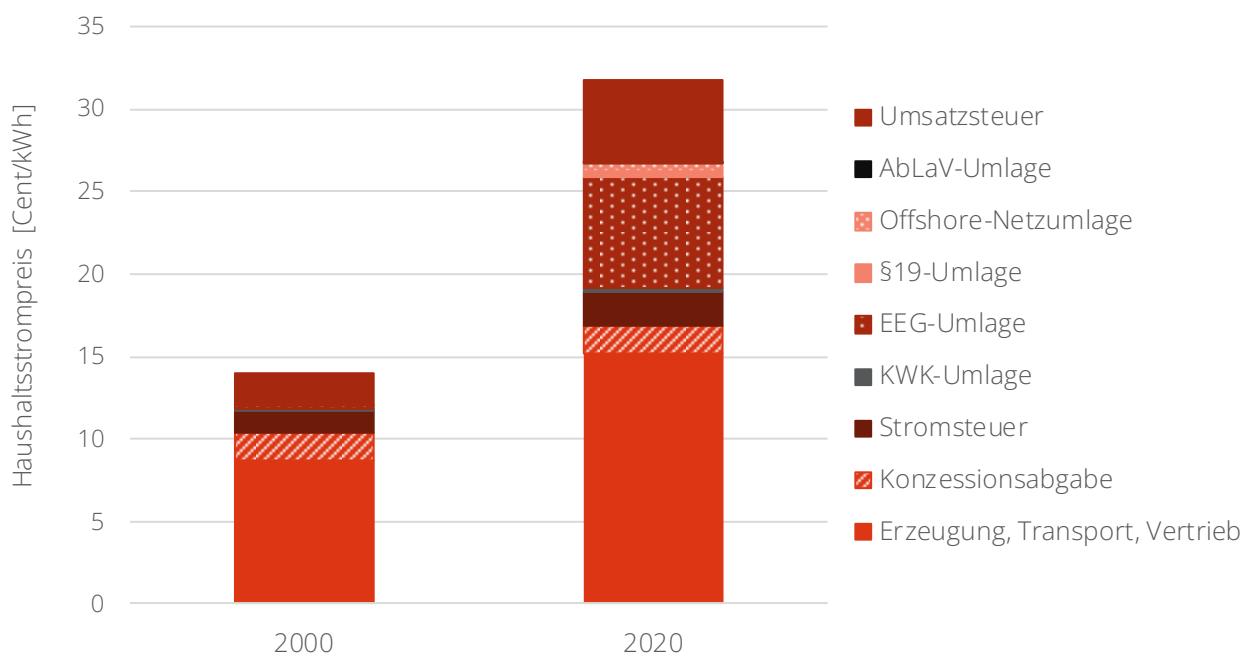
Preis- und Nachfrageentwicklungen

51 Die bereits dargestellte, sich verändernde Zusammensetzung des Kapitalstocks bzw. des Kraftwerkseinsatzes, und somit auch die Höhe der Emissionsintensität und der THG-Emissionen der Energiewirtschaft, stehen in Wechselwirkung mit weiteren politisch- und marktpreisgetriebenen Entwicklungen auf nationaler sowie internationaler Ebene. Insbesondere die nationale Förderung der erneuerbaren Energieträger durch das EEG sowie von KWK-Anlagen (KWKG) aber auch die Einführung

des EU-ETS hatten signifikante Effekte auf die Entwicklung der Strompreise und daher auch über die Stromnachfrage auf die Kraftwerkseinsatzstruktur.

- 52 Zum einen wurde der Ausbau der erneuerbaren Energieträger, der Kraft-Wärme-Kopplung und der Stromnetze zum größten Teil über die Netzentgelte und Umlagen (u. a. EEG-, KWK-Umlage und Offshore-Umlage) finanziert, was sich in einem stetigen Anstieg des Strompreises für Letztverbraucher niederschlug. Im Zeitraum von 2000 bis 2020 sind die Energiekosten (Anstieg der Haushalts-, GHD- und Industriestrompreise) stetig gestiegen. Über die zwei Jahrzehnte betrug die Steigerung allein für Haushalte rund 128 %, was einer jährlichen Steigerung von circa 6 % entspricht (BDEW 2022a). Ein Grund hierfür sind die Abgaben, Steuern und Umlagen pro bezogener kWh. Die Abgaben Steuern und Umlagen sind seit dem Jahr 2000 allein um das Dreifache gestiegen und machen im Jahr 2020 mehr als die Hälfte des Strompreises aus (siehe Abbildung 22). Die Stellgröße der Stromsteuer ist im Hinblick auf den Strompreis hingegen gering. Die Stromsteuer ist seit dem Jahr 2003 unverändert bei 2,05 Cent je Kilowattstunde und beträgt weniger als 7 % des durchschnittlichen Haushaltsstrompreises. Insgesamt werden jährlich durch die Stromsteuer rund 6,5 bis 7 Mrd. Euro vom Bund eingenommen. Mit steigenden Preisen im Zuge der Inflation sinkt der reale Wert der Stromsteuer und damit ihre Lenkungswirkung. Seit 2003 ist der Wert der Stromsteuer Steuern inflationsbereinigt um rund 28 % gesunken (Destatis 2022e).

Abbildung 22: Zusammensetzung des Strompreises eines 3-Personen-Haushaltes mit einem Jahresverbrauch von 3 500 kWh in den Jahren 2000 und 2020



Eigene Darstellung nach BDEW (2022a).

- 53 Neben der nationalen Förderung der erneuerbaren Energieträger über die Umlagen sind weitere Faktoren für den starken Preisanstieg die niedrigen Börsenstrompreise und der Merit-Order Effekt. In der Merit-Order werden die verfügbaren Kraftwerkskapazitäten nach ihren Grenzkosten der Stromerzeugung in aufsteigender Reihenfolge sortiert, dabei bestimmt das teuerste Kraftwerk, das zur Deckung der Stromnachfrage benötigt wird, den Preis. Da jedoch erneuerbare Energieträger

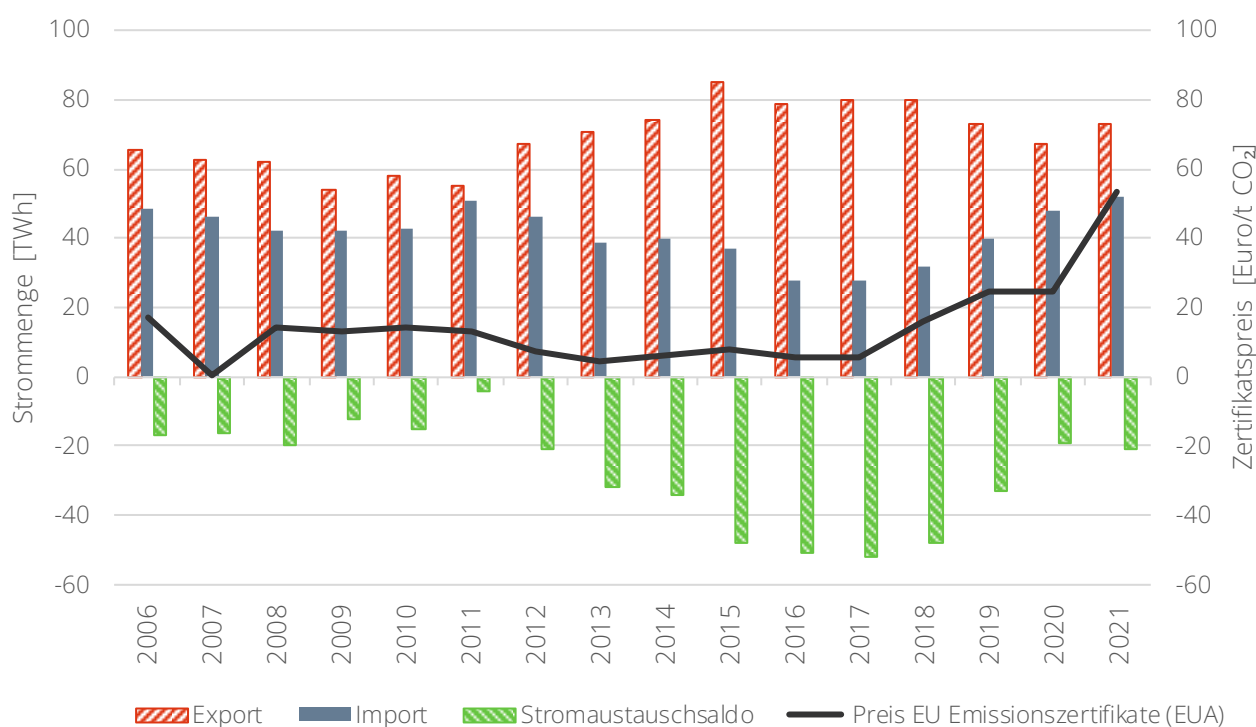
Grenzkosten nahe Null aufweisen, verschiebt sich die Angebotskurve der Kraftwerke mit steigender Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern bei gleicher Nachfrage nach rechts und der Großhandelsstrompreis sinkt. Dieser Effekt verringert den Erlös, den Übertragungsnetzbetreiber durch den Verkauf des EEG-subventionierten Stroms auf dem Spotmarkt erzielen, und erhöht somit den Differenzbetrag zu den Vergütungskosten für die Betreiber von EE-Anlagen. Mittelbar erhöht sich hierdurch die EEG-Umlage, da diese als Ausgleichszahlung zwischen dem Großhandelsstrompreis und der EEG-Vergütung für Strom aus erneuerbaren Energieträgern dient. Von dieser Entwicklung waren insbesondere private Haushalte und Unternehmen betroffen, die nicht über die besondere Ausgleichsregelung anteilig oder vollständig von der EEG-Umlage befreit wurden.

- 54 Die hohe Einspeisung von Strom aus der Umwandlung erneuerbarer Energieträger hat zum anderen den Großhandelsstrompreis gesenkt, wovon in der Vergangenheit insbesondere stromintensive Industrieunternehmen profitieren konnten. Der Großhandelsstrompreis ist abhängig von verschiedenen Faktoren wie zum Beispiel den Brennstoffpreisen, den EU-ETS Preisen, Kraftwerksverfügbarkeiten und Stromverbrauch. Die Großhandelsstrompreise gehen in Form der Beschaffungskosten in den Strompreis für Letztverbraucher ein und sind gerade für energieintensive Großunternehmen entscheidende Stellgröße des Gesamtstrompreises. In den Jahren von 2002 bis 2008 sind die Realpreise für Strom tendenziell angestiegen. Die Finanzkrise im Jahr 2009 führte dann durch die einbrechende Stromnachfrage, insbesondere in der Industrie, zu einem deutlichen Preisrückgang. Trotz der wirtschaftlichen Erholung ist der Großhandelsstrompreis in den Jahren von 2009 zu 2011 nur leicht angestiegen und in den Jahren von 2011 bis 2016 kontinuierlich gesunken. Im Jahr 2016 lag der Strompreis bei 2,9 Cent pro Kilowattstunde im Vergleich zum Rekordjahr 2008 mit 6,6 Cent pro Kilowattstunde. Maßgeblich für diese Entwicklung waren nicht nur rückläufige Rohstoff- und EU-ETS Preise²⁷ (siehe Infokasten 3), sondern auch der massive Ausbau erneuerbarer Energieträger.
- 55 Emissionstreibend haben sich hingegen die niedrigen Großhandelspreise im Rahmen des europäischen Binnenstrommarktes ausgewirkt. Deutschland gehört zu den größten Stromexporteuren Europas. Da die Berichterstattung der Treibhausgase jedoch dem Territorialprinzip folgen, werden die durch die Stromproduktion erzeugten CO₂-Äq. THG-Emissionen gänzlich dem Sektor Energiewirtschaft in Deutschland zugeschrieben. Betrachtet man den Stromaustauschsaldo in Abbildung 23 wird ersichtlich, dass Deutschland aufgrund niedriger Großhandelspreise, welche unter anderem auf den hohen Anteil der Kohleverstromung zurückzuführen sind, trotz Einführung des EU-ETS immer mehr Strom exportiert als importiert hat. Das Jahr 2011 stellt hierbei einen Ausreißer dar, da, wie bereits erläutert, durch den Atomausstieg kurzfristig ein großer Anteil der Bruttoerzeugungskapazität aus dem Netz genommen wurde.
- 56 Erst die dritte Phase des EU-ETS, welche neben der Einführung von Auktionen auch den Wasserbett-Effekt adressiert hat, führte zu einem signifikanten Preisanstieg der Emissionszertifikate (auch EUA) und einem rückläufigen Export-Trend ab dem Jahr 2019. Grund hierfür ist der Rückgang der günstigen Kohle- und KWK-Verstromung aus Deutschland. Der Preisanstieg der Emissionszertifikate sowie steigende Rohstoffpreise machten die Energieträger Stein- und Braunkohle zunehmend unattraktiv und die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern wettbewerbsfähig auf dem europäischen Binnenmarkt. Zuvor hatte die mitunter stark schwankende Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern, welche temporär zu einem erhöhten Stromangebot und fallenden

²⁷ Die Finanzkrise im Jahr 2008 und die einbrechende Stromnachfrage führte unter anderem zu einem großen Überschuss an ETS-Zertifikaten und Gutschriften, die den Kohlenstoffpreis während der gesamten zweiten Phase (2008-2012) auf ein niedrigeres Level von ungefähr 5 Euro/t CO₂ Äq. führten (Ghazani und Jafari 2021).

Großhandelsstrompreisen geführt hat, zu attraktiven Stromimportbedingungen für das europäische Ausland geführt. Die Nachfrage aus dem Ausland verhinderte bis zum Jahr 2017, dass die Großhandelsstrompreise weiter fielen und Energieträger wie Braun- und Steinkohle konnten sich weiter auf dem Markt halten (siehe Abbildung 18). Somit sind entsprechende Rückgänge der Bruttostromerzeugung aus fossilen Energieträgern trotz steigender Kapazitäten erneuerbarer Energieträger im deutschen Stromnetz ausgeblieben. Wenn für das Jahr 2021 vereinfacht angenommen wird, dass der exportierte Strom dem durchschnittlichen CO₂-Äq. Emissionsfaktor ohne Vorketten des deutschen Strommix entspricht, würde das für das Jahr 2021 bedeuten, dass rund 31 Mt CO₂-Äq. im Sektor Energiewirtschaft durch den Export von Strom verursacht werden. Wenn stattdessen der Stromaustauschsaldo²⁸ als Referenzgröße herangezogen wird, würde bei Anwendung des CO₂-Äq. Emissionsfaktors ohne Vorketten des deutschen Strommix nur rund 9 Mt CO₂-Äq. im Sektor Energiewirtschaft anfallen.

Abbildung 23: Jährliche Außenhandelsstatistik für den elektrischen Stromaustausch in Deutschland und die Preisentwicklung der europäischen Emissionszertifikate im Zeitraum von 2006 bis 2021



Eigene Darstellung nach AGEB (2021b) und BMWK (2022g). *Werte für das Jahr 2021 sind vorläufig. Der Stromaustauschsaldo ist berechnet über die Differenz zwischen den Stromimporten und den Stromexporten eines Jahres.

- 57 Die Auswirkungen der Covid-19-Pandemie führten, ähnlich wie die Finanzkrise, zu einer niedrigeren Stromnachfrage, insbesondere bei der Industrie, und zu niedrigeren Großhandelsstrompreisen. Beginnend mit dem Jahr 2021 sind die Großhandelsstrompreise wieder stark angestiegen (siehe Abbildung 23). Der sprunghafte Anstieg lässt sich auf mehrere Faktoren und insbesondere auf den Anstieg der Grenzkosten konventioneller (fossiler) Kraftwerke zurückführen. Zum einen sind die Erdgas-

²⁸ Der Stromaustauschsaldo ist die Differenz des physikalischen Stromflusses aus dem Ausland nach Deutschland bzw. aus Deutschland ins Ausland.

und Steinkohlepreise zeitweise auf ein Rekordniveau angestiegen. Gründe hierfür sind unter anderem die weltweite Erholung der Stromerzeugung und Produktionsstörungen, niedrige Erdgasspeichermengen in Europa sowie Ausfälle der Gas-Infrastruktur. Zum anderen hat sich der EU-ETS Zertifikatpreis mehr als verdoppelt (25 Euro pro Tonne CO₂-Äq. (2020) vs. 52,50 Euro pro Tonne CO₂-Äq. (2021)) und brachte mit einem Preis von 82,25 Euro pro Tonne CO₂-Äq. im Dezember ein Rekordergebnis bei einer deutschen Auktion seit Beginn der Versteigerung der europäischen Emissionszertifikate im Jahr 2010 ein. Dieser Preisanstieg fand maßgeblich vor dem Hintergrund der Verschärfung der Europäischen Klimaziele im Rahmen des Green Deals sowie der steigenden Gaspreise statt (Schulte et al. 2021) (siehe Infokasten 3). Der starke Anstieg der Gaspreise hatte auch zur Folge, dass die Nachfrage nach Kohle angestiegen ist, was sich wiederum emissionssteigernd ausgewirkt hat.

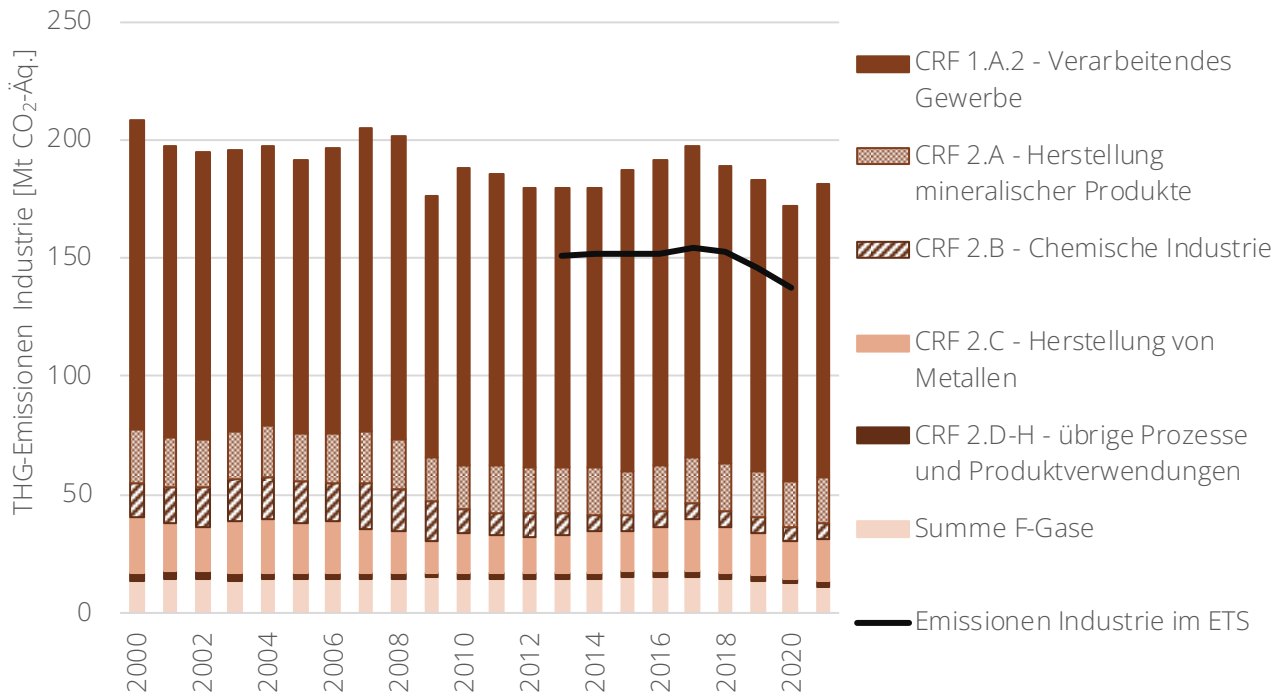
- 58 Die politische Strategie der Bundesregierung zur Verminderung der THG-Emissionen in der Energiewirtschaft zielte im betrachteten Zeitraum überwiegend auf die Stärkung des europäischen Emissionshandelssystems und den Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern ab. Zudem sollen Kohlekraftwerke durch das Kohleausstiegsgesetz bis zum Jahr 2038 (bzw. idealerweise bis 2030 gemäß Koalitionsvertrag 2021) schrittweise aus dem Markt genommen werden. Die ebenfalls politisch induzierte Stilllegung von Kernkraftwerken wirkt im Gegenzug erhöhend auf die deutschen THG-Emissionen.

2.3 Industrie

2.3.1 Entwicklung der Treibhausgasemissionen

- 59 Die THG-Emissionen in der Industrie sind bis zum Jahr 2021 gegenüber dem Jahr 2000 um 27 Mt CO₂-Äq. (13 %) gesunken und damit deutlich geringer als der Durchschnitt über alle Sektoren (27 %) (siehe Abbildung 24). Im zeitlichen Verlauf kam es zu THG-Minderungen vor allem im Zuge der Finanzkrise (2008-2012), die aber bis zum Jahr 2017 weitgehend wieder aufgeholt worden sind. In den Folgejahren gingen die THG-Emissionen erneut spürbar zurück, um im Jahr 2020, dem ersten Jahr der Covid-19-Pandemie, das bisherige Emissions-Minimum aus dem Finanzkrisen-Jahr 2009 zu unterschreiten. Im Jahr 2021 war allerdings wieder erstmals seit 2017 ein Emissionsanstieg um 5 % gegenüber dem Vorjahr zu beobachten.

Abbildung 24: Entwicklung der THG-Emissionen im Industriesektor



Eigene Darstellung auf Basis der Trendtabellen des Treibhausgasinventars 2022 (UBA 2022c).

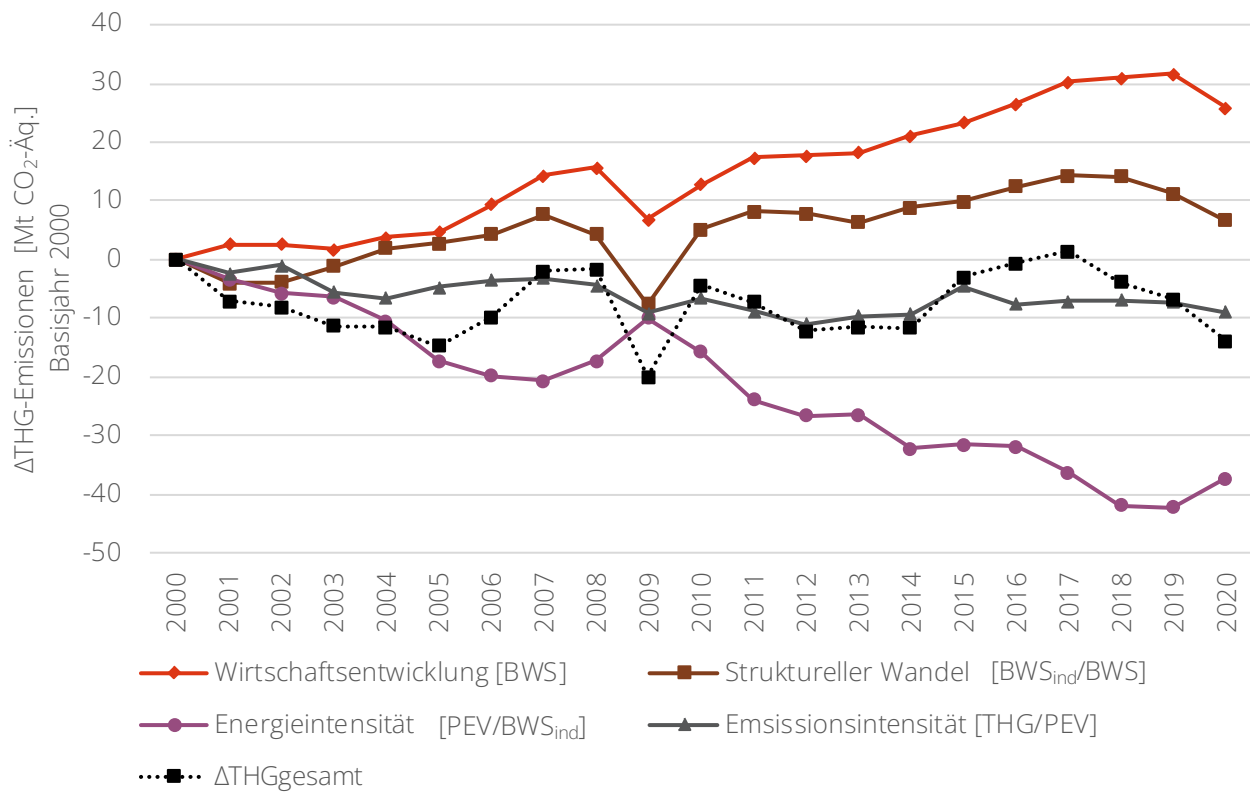
60 Den Großteil der THG-Emissionen (2021: 68 %) machen Industriefeuerungen und Industriekraftwerke (CRF 1.A.2) aus. Etwa 80 % der THG-Emissionen in der Industrie unterliegen dem EU-ETS (2021). Die dem EU-ETS unterliegenden THG-Emissionen sind zwischen 2013 und 2017 relativ konstant geblieben und danach – vermutlich auch in Folge der starken Erhöhung der Zertifikatpreise (siehe Infokasten 3) – leicht zurückgegangen (UBA 2022c). Demgegenüber war bei den nicht vom EU-ETS erfassten THG-Emissionen zwischen 2013²⁹ und 2017 ein deutlicher Anstieg um knapp 50 % zu beobachten, gefolgt von einem deutlichen Rückgang bis 2020. Dennoch lagen die nicht dem EU-ETS unterliegenden THG-Emissionen der Industrie auch im ersten Jahr der Covid-19-Pandemie noch knapp 20 % über den THG-Emissionen des Jahres 2013.

2.3.2 Dekompositionsanalyse

61 Die Dekomposition der THG-Emissionen des Industriesektors unterscheidet zwischen den THG-Emissionen aus der Verbrennung von Kraftstoffen (CRF-Kategorie 1.A.2) sowie prozessbedingten THG-Emissionen. Die THG-Emissionen umfassen die Industriezweige der CRF-Kategorien 1.A.2 (Verarbeitendes Gewerbe) und 2. (Industrieprozesse): Chemische Industrie, Metallindustrie, nicht energetische Produkte von Kraftstoffen und Lösemitteln, Elektroindustrie, Produktnutzungen als Ersatz für Ozonschicht schädigende Stoffe, andere Produkterzeugnisse und -nutzungen und sonstige.

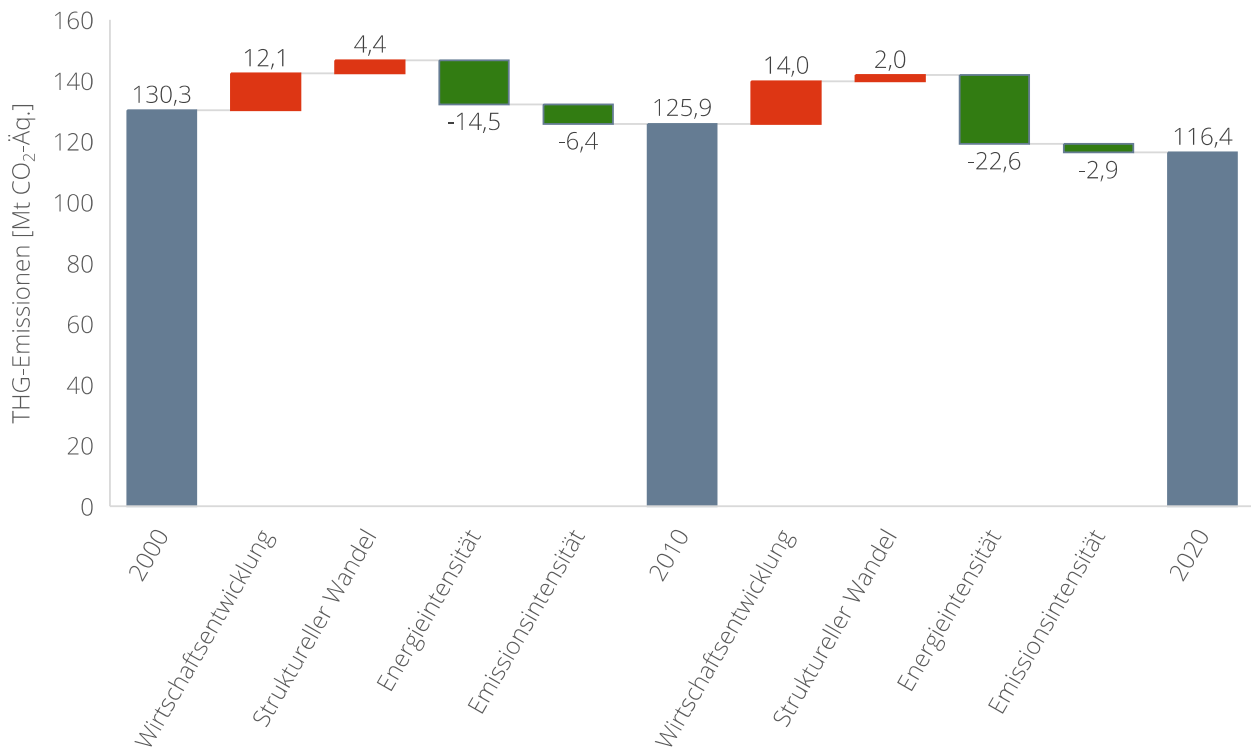
²⁹ Die Daten zu den THG-Emissionen getrennt nach im EU-ETS und nicht im EU-ETS enthaltenen Emissionen sind erst ab dem Jahr 2013 verfügbar, weshalb keine Analyse über den gesamten Wirkungszeitraum des EU-ETS ab 2005 möglich ist.

Abbildung 25: Dekomposition der THG-Emissionen aus der Brennstoffverbrennung in der Industrie - Änderungen im Vergleich zum Basisjahr 2000



Eigene Darstellung. Weitere Details zu den verwendeten Daten finden sich in Tabelle 5.

Abbildung 26: Dekomposition der THG-Emissionen aus der Brennstoffverbrennung in der Industrie - Aggregierte Betrachtung 2000-2010 und 2010-2020



Eigene Darstellung. Weitere Details zu den verwendeten Daten finden sich in Tabelle 5.

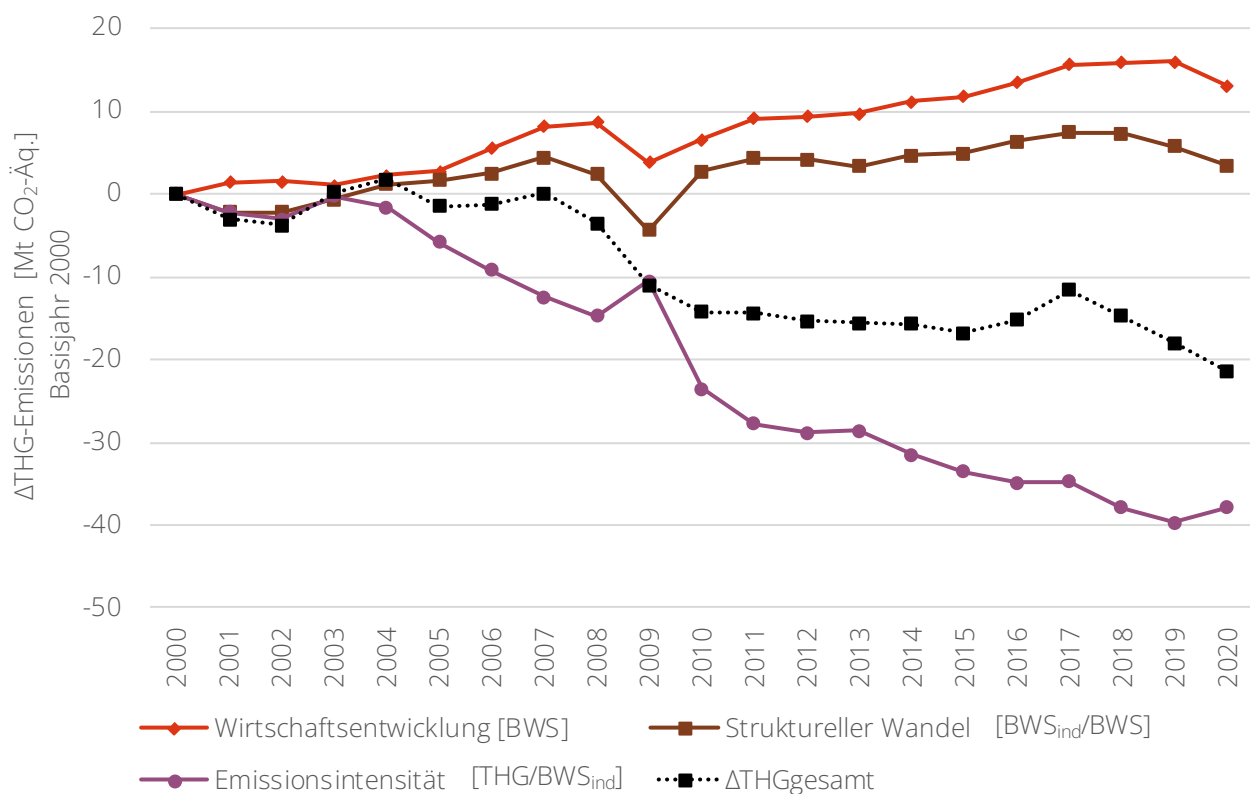
62 Abbildung 25 und Abbildung 26 zeigen die Dekomposition der jährlichen THG-Emissionen der Brennstoffverbrennung in der Industrie in die Komponenten Emissionsintensität (Treibhausgase pro Primärenergieverbrauch), Energieintensität (Primärenergieverbrauch pro Bruttowertschöpfung der Industrie), Struktureller Wandel (Bruttowertschöpfung der Industrie pro Bruttowertschöpfung gesamt) und Wirtschaftsentwicklung (Bruttowertschöpfung gesamt) im Vergleich zum Jahr 2000 bzw. aggregiert über die Zeiträume 2000-2010 und 2010-2020.

63 Die Energieintensität wirkt dabei emissionsmindernd auf die Höhe der THG-Emissionen, wobei der Zeitraum von 2007 bis 2009 sowie das Jahr 2020 eine Ausnahme darstellen. Die für diese Phasen errechnete emissionssteigernde Wirkung der Energieintensität ist vor allem darauf zurückzuführen, dass der Energieverbrauch in Jahren eines krisenbedingt rückläufigen Wirtschaftswachstums aufgrund eines produktionsunabhängigen Basisverbrauchs nur unterproportional zurückgeht (Lopez et al. 2018a). Auch die Emissionsintensität hat im Vergleich zu dem Jahr 2000 eine emissionsmindernde Wirkung, weist allerdings spätestens seit dem Jahr 2009 einen relativ konstanten Verlauf mit nur geringen Schwankungen auf. Im Gegensatz zu den beiden Komponenten Energie- und Emissionsintensität hat die Wirtschaftsentwicklung, abgesehen von Einbrüchen in den Krisenjahren 2009 und 2020, einen deutlich emissionssteigernden Effekt. Dieser kann analog, wenn auch deutlich schwächer, auch für den intersektoralen strukturellen Wandel zwischen der Industrie und den übrigen Wirtschaftssektoren beobachtet werden. Nur zwischen 2007 und 2009 und dann wieder ab 2017 wirkte dieser Faktor

emissionsmindernd, d. h. die weniger emissionsintensiven Sektoren wuchsen stärker als die emissionsintensivere Industrie.³⁰

- 64 Die aggregierte Darstellung Abbildung 28 der Einflussfaktoren für die Phasen 2000 bis 2010 und 2010 bis 2020 zeigt, dass in beiden Phasen die Energieintensität emissionsmindernd und die Wirtschaftsentwicklung emissionstreibend auf die Höhe der THG-Emissionen eingewirkt haben. Damit kompensieren sich diese Faktoren zu einem großen Teil.

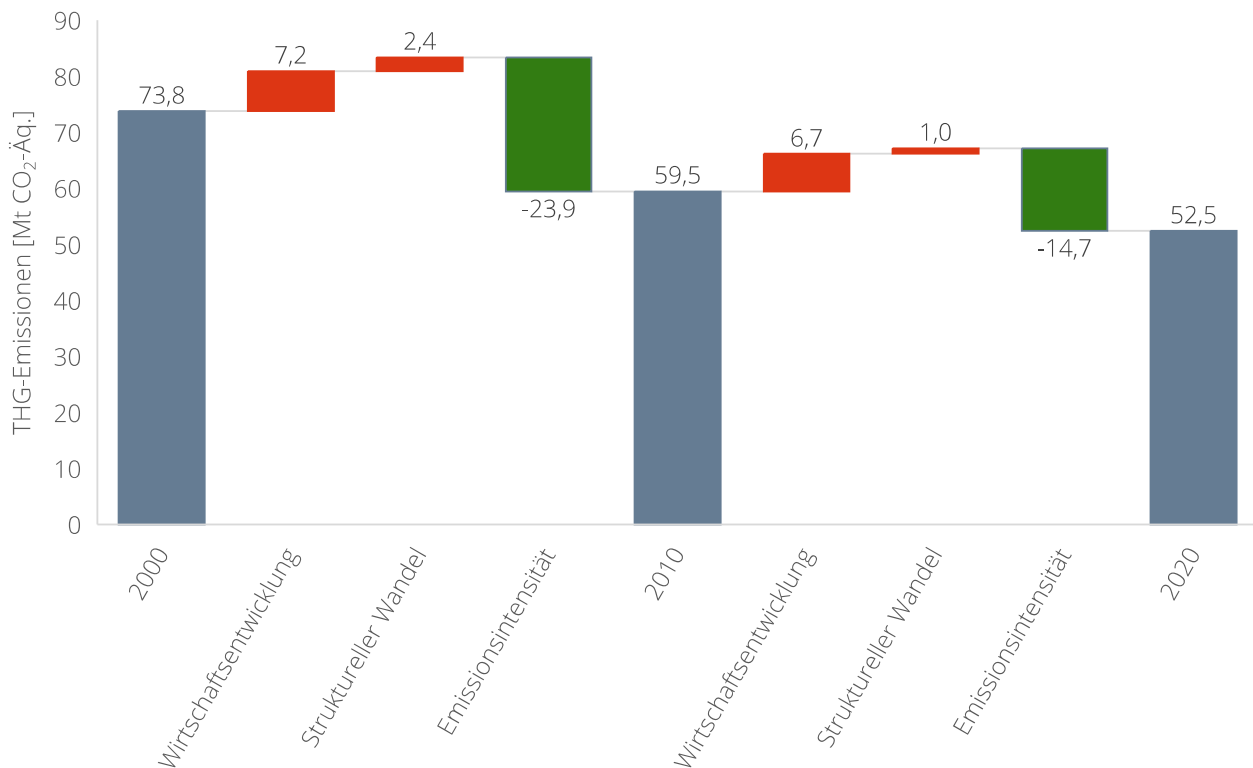
Abbildung 27: Dekomposition der prozess- und produktbedingten THG-Emissionen in der Industrie - Änderungen im Vergleich zum Referenzjahr 2000



Eigene Darstellung. Weitere Details zu den verwendeten Daten finden sich in Tabelle 5.

³⁰ Der Einfluss des strukturellen Wandels innerhalb der Industrie, d. h. zwischen den unterschiedlichen energie- und emissionsintensiven Industriezweigen, konnte in diesem Gutachten aufgrund emissionsseitig fehlender Daten auf der Ebene einzelner Branchen nicht quantifiziert werden. Basierend den Berechnungen in der ODYSSEE-Datenbank (<https://www.indicators.odyssee-mure.eu/decomposition.html>) hatte der intraindustrielle Strukturwandel in der gesamten Periode 2000-2019 einen verbrauchsmindernden Effekt, der in der gleichen Größenordnung lag wie der Einfluss technisch bedingter Energieeinsparungen.

Abbildung 28: Dekomposition der prozess- und produktbedingten THG-Emissionen in der Industrie - Aggregierte Betrachtung 2000-2010 und 2010-2020



Eigene Darstellung. Weitere Details zu den verwendeten Daten finden sich in Tabelle 5.

- 65 Abbildung 27 und Abbildung 28 zeigen die Dekomposition der jährlichen, prozess- und produktbedingten THG-Emissionen in der Industrie in die Komponenten Emissionsintensität (Treibhausgase pro Bruttowertschöpfung der Industrie), Struktureller Wandel (Bruttowertschöpfung der Industrie pro Bruttowertschöpfung insgesamt) und Wirtschaftsentwicklung (Bruttowertschöpfung gesamt) im Vergleich zum Jahr 2000 bzw. aggregiert über die Zeiträume von 2000 bis 2010 und von 2010 bis 2020. Aufgrund der Datenstruktur der nationalen Treibhausgasinventare ist eine detailliertere Betrachtung unter Berücksichtigung der Energieintensität – analog zu der Brennstoffverbrennung – nicht möglich.
- 66 Folglich ist die Komponente Emissionsintensität der Haupttreiber der Emissionsminderung und weist lediglich für die Jahre 2009 und 2020 jeweils eine emissionssteigernde Wirkung auf. Analog zur Dekomposition der Brennstoffverbrennungen hat die Wirtschaftsentwicklung einen deutlich emissionssteigernden Effekt, der – wenn auch deutlich schwächer – in der aggregierten Betrachtung der Phase von 2010 bis 2020 beobachtet werden kann. Hierbei wird auch deutlich, dass der emissionsmindernde Effekt der Emissionsintensität sich im Zeitraum 2010 bis 2020 deutlich abgeschwächt hat.

2.3.3 Diskussion von Ursachen der Entwicklung

67 Die Dekompositionsanalyse zeigt die Entwicklung der Komponenten Wirtschaftsentwicklung, Emissionsintensität, Energieintensität und (intersektoraler) Strukturwandel. Im Industriesektor sind trotz Effizienzsteigerungen insbesondere in den energieintensiven Industriezweigen in den vergangenen Jahren nur geringe THG-Emissionsreduktionen zu verzeichnen. Die Ursachen hinter der Entwicklung der THG-Emissionen werden entlang politik- und marktpreisgetriebener sowie struktureller Entwicklungen diskutiert. Insgesamt kann die Emissionsentwicklung im Industriesektor vor allem aus dem Wechselspiel von Ausweitung der wirtschaftlichen Tätigkeiten (emissionssteigernd) und Verbesserungen in der Energieeffizienz durch eine kontinuierliche Verbesserung des Kapitalstocks (emissionsmindernd) erklärt werden. Besondere Bedeutung kommt dabei vor allem dem EU-ETS und dessen mengenbegrenzender Wirkung zu. Hinzu kommt der tendenziell verbrauchsmindernd wirkende Einfluss des intraindustriellen Strukturwandels hin zu weniger energieintensiven Industriezweigen, der jedoch in diesem Gutachten aufgrund emissionsseitig fehlender Daten nicht berechnet werden konnte.

Strukturelle Entwicklungen

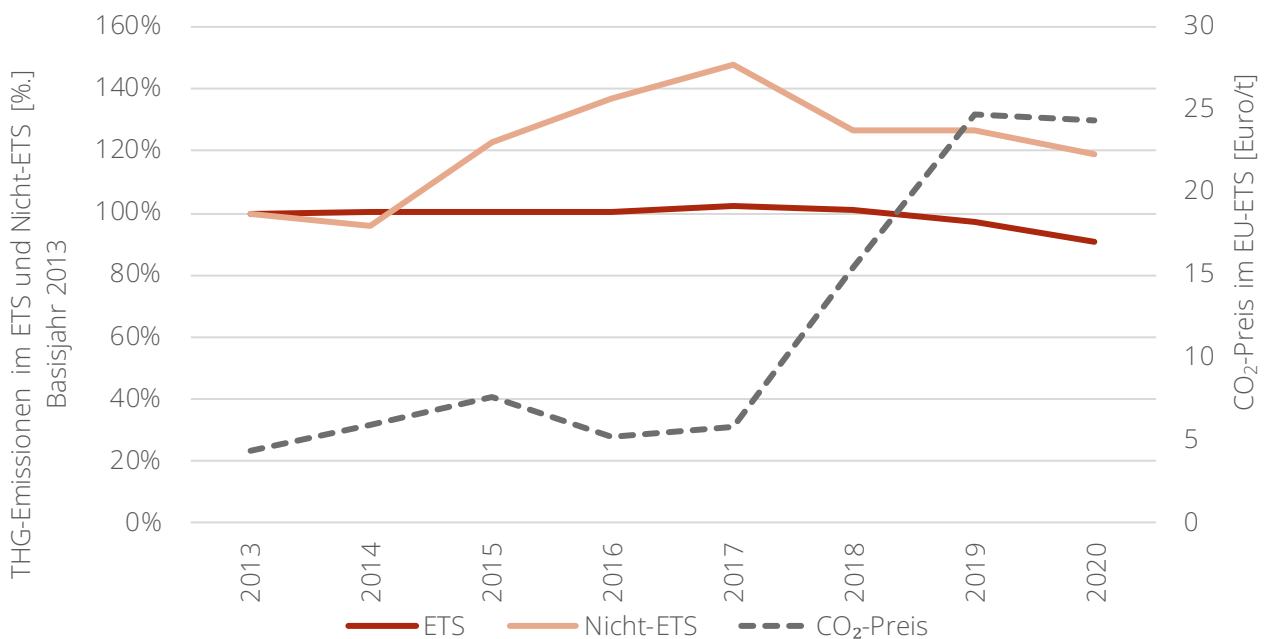
68 Der Kapitalstock in der Industrie ist seit etwa 2010 relativ konstant, insbesondere in den energieintensiven Industrien ist jedoch der Anlagenbestand zurückgegangen (Bardt 2020). Tendenziell scheinen die Produktionsmöglichkeiten in den energieintensiven Branchen seit 2002 zurückgegangen zu sein. Gleichzeitig sind in diesen Branchen nur geringe Schwankungen in der Bruttowertschöpfung zu verzeichnen, sie bleibt weitgehend konstant auch während Krisen. Ferner ist der Anteil der fossilen Energieträger am gesamten Endenergieverbrauch der Industrie von 2000 bis 2005 um ungefähr 12 Prozentpunkte gesunken und blieb danach konstant auf einem Niveau von ungefähr 54 % (AGEB 2021a). Die absoluten Zahlen in Terrawattstunden deuten ein leichtes Absinken der fossilen Energieträger in den zwei letzten Dekaden an. Insbesondere die Krisenjahre 2009 und 2020 fallen durch niedrigere Werte auf. In der chemischen Industrie, die den größten Teil der energieintensiven Industrien ausmacht, sind in Bezug auf die CO₂-Bilanz Industriekraftwerke (überwiegend KWK-Anlagen) und die Wasserstofferzeugung mit Erdgas am relevantesten. Die Hälfte des Endenergiebedarfs in der chemischen Industrie wird über fossile Energieträger gedeckt. Um diesen zu senken, wurde in der chemischen Industrie vor allem auf Energieeffizienzsteigerungen gesetzt, beispielsweise durch den Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung. Auch durch den Brennstoffwechsel von Kohle auf Gas wurden THG-Emissionen gesenkt (FutureCamp und DECHEMA 2019). Der Anlagentausch und langfristig die Elektrifizierung des Prozesswärmebedarfs bedürfen einer großen Menge erneuerbar erzeugten Stroms. Hier ist wichtig zu berücksichtigen, dass dieser auch in den anderen Industriezweigen, nicht zuletzt der Stahl- und Zementindustrie benötigt wird, teilweise für direkte Elektrifizierung, teilweise für die Herstellung grünen Wasserstoffs (Günther et al. 2019; Limbers und Böhmer 2022; Agora Energiewende 2019; Agora Industrie et al. 2022). Aufgrund der Langlebigkeit von Industrieanlagen und mitunter wegen des Technologiereifegrads handelt es sich hier um einen graduellen Prozess, der die Effekte aus der positiven Wirtschaftsentwicklung lediglich in geringem Maße überkompensieren kann und sich in der Dekomposition im Wesentlichen in den Komponenten Energie- und Emissionsintensität wiederfindet.

Politik- und marktpreisgetriebene Entwicklungen

69 Das EU-ETS ist ein Mengeninstrument, das durch den Cap sowie durch eine Zuteilung von Emissionszertifikaten wirksam Anreize zur Reduzierung von THG-Emissionen bieten kann. Die THG-Emissionen im Industriesektor unterliegen zu fast 79,1 % dem EU-ETS (UBA 2022c), vorwiegend sind hier Anlagen der energieintensiven Industrien abgedeckt. Die Phasen I und II des EU-ETS haben jedoch gezeigt, dass ein zu geringer CO₂-Preis im EU-ETS nicht ausreicht, um die Aktivitäten in der Industrie

deutlich zu senken oder die Energie- und Emissionseffizienz noch stärker zu steigern. Dies gilt insbesondere im Zusammenhang mit zeitgleich vergleichsweise geringen Preisen für fossile Energieträger (siehe Infokasten 3).

Abbildung 29: Entwicklung der THG-Emissionen im Industriesektor aufgeteilt nach im ETS und nicht im ETS enthaltenen Emissionen und zugehöriger CO₂-Preis



Eigene Darstellung auf Basis der Trendtabellen 2022 (UBA 2022c) und der Daten zur CO₂-Preis-Entwicklung (EEA und Ember 2022).

70 Abbildung 29 zeigt die Entwicklung der im Industriesektor generierten THG-Emissionen aufgeteilt nach THG-Emissionen, die unter das EU-ETS (ETS) fallen und solche, die es nicht tun (Nicht-ETS) im Vergleich zum Basisjahr 2013. Da die THG-Emissionen in der Aufteilung vor 2013 nicht vorliegen, kann hier lediglich die Entwicklung ab dem Jahr 2013 dargestellt werden. Die THG-Emissionen verhalten sich im EU-ETS anders als im Nicht-ETS, was den Schluss nahelegt, dass der Emissionshandel tatsächlich mengenbegrenzende und dabei, vermutlich aufgrund seiner intertemporalen Struktur, auch glättende Effekte ausübt. Dies würde erklären, warum bis etwa zum Jahr 2018 die THG-Emissionen in den im EU-ETS enthaltenen Industriezweigen recht konstant auf einem Niveau von etwa 150 bis 154 Mt CO₂-Äq. blieben (UBA 2022c). Erst seit dem Jahr 2019 – mit einem gestiegenen CO₂-Preis (2017: 5,83 Euro pro Tonne CO₂-Äq.; 2018: 15,92 Euro pro Tonne CO₂-Äq.; 2019: 24,87 Euro pro Tonne CO₂-Äq.) – kann erstmals eine Reduktion der THG-Emissionen festgestellt werden. DEHSt (2022) führen diese jedoch primär auf den globalen Wirtschaftsabschwung zurück, der auch die Produktionsentwicklung in Deutschland beeinflusste, was die primär glättende Wirkung durch den EU-ETS unterstreicht. Auch die weitere Reduktion der THG-Emissionen im Jahr 2020 hängt vor allem mit der Covid-19-Pandemie und den daraus resultierenden konjunkturellen Entwicklungen zusammen. Im Jahr 2021 erreichten die THG-Emissionen hingegen fast wieder das Niveau des Jahres 2019.

71 Bei der Entwicklung der THG-Emissionen, die nicht im EU-ETS enthalten sind, fällt vor allem eine konstante Steigerung von 2014 bis 2017 auf. In diesem Zeitraum waren die Rohölpreise und, wenn auch

in geringerem Maße, die Preise für leichtes Heizöl stark gesunken (Destatis 2022c). Der Preiseinbruch ist auf eine Reihe von Faktoren zurückzuführen (Stocker et al. 2018): Zum einen entstand ein Überangebot aufgrund von Produktionsanstiegen, die einem leicht sinkenden Verbrauch wegen eines global geringeren Wirtschaftswachstums sowie wegen gestiegener Energieeffizienz gegenüberstanden. Zum anderen kündigte die Organisation erdölexportierender Länder (OPEC) im Jahr 2014 an, dass die Förderquoten trotz der Überproduktion nicht gesenkt würden, während gleichzeitig die US-amerikanische Schieferölproduktion stark anwuchs und das Gleichgewicht im globalen Ölmarkt verändert hat. Ein weiterer Einflussfaktor war der Wert des US-Dollar, der im Jahr 2014 und 2015 gestiegen war und direkt auf den hiesigen Öleinfuhrpreis einwirkt. Dass der geringe Ölpreis sich nicht auch in den THG-Emissionen im EU-ETS niederschlägt, könnte auf den langfristigen Mengendeckel zurückzuführen sein, was die Bedeutung des EU-ETS für den Industriesektor unterstreicht.

- 72 Auch die Industriestrompreise können einen starken Einfluss auf die Aktivitäten im Industriesektor haben. Daten zur Energiepreisentwicklung, insbesondere für Strom, spiegeln allerdings nicht zwingend die Preise für einzelne Unternehmen wider. Insbesondere Industriekund:innen, vor allem Unternehmen aus stromintensiven Branchen, können über gesetzliche Sonderregelungen bestimmte Preisanteile des Strompreises wie Steuern und Umlagen reduzieren. Daraus ergeben sich sehr unterschiedliche individuelle Preise, die ein einheitliches Bild erschweren (BNetzA und BKartA 2022). Insgesamt jedoch sind die Strompreise im betrachteten Zeitraum recht konstant geblieben, und die Daten zeigen eine weitgehend einheitliche Entwicklung der Preise (Destatis 2022c; Eurostat 2022b). Relativ zu anderen Energieträgern hat Strom daher über weite Teile der Zeit nach dem Jahr 2013 keine Vorteile aus der Preisstellung gehabt, eher im Gegenteil.
- 73 Im Zuge der Diskussion um das EU-ETS wurde überdies insbesondere die Möglichkeit des Carbon Leakage und der Abwanderung von Unternehmen in Länder, die nicht dem EU-ETS unterliegen, thematisiert (Antoci et al. 2021). Im Zuge der aktuellen Krise um den Ukrainekrieg und die daraus resultierenden steigenden Energiepreise bekommt diese Diskussion eine weitere Dimension, da auch im Zuge dieser Entwicklungen Abwanderung von Industrieunternehmen eine Möglichkeit zu sein scheint (Leopoldina 2022). Jedoch hat die Vergangenheit gezeigt, dass es trotz der Einführung des Emissionshandels bisher nicht zu einer solchen vielfach befürchteten raschen De-Industrialisierung Deutschlands gekommen ist. In diesem Zusammenhang spielen vor allem finanzielle Anreize, besonders für energieintensive Industrien eine große Rolle. Dazu zählen beispielsweise die freie Zuteilung von EU-ETS-Zertifikaten, das Eigenstromprivileg nach dem EEG, durch das Unternehmen bei Eigenverbrauch von der EEG-Umlage befreit wurden, sowie Privilegien durch umweltbezogene Steuern (siehe RZ 26 und Infokasten 4) und ermäßigte Sätze für Gewerbe und energieintensive Industrie bei den EEG- und KWK-Umlagen (siehe Infokasten 6) (Burger und Bretschneider 2021). Hier werden konterkarierende Anreizstrukturen geboten; das Argument liegt nahe, dass diese Vergünstigungen nicht förderlich für Bestrebungen sind, die Energieeffizienz zu steigern. Jedoch ist auch zu vermuten, dass die Energieeinsparungen und somit die gesunkene Energieintensität der vergangenen Jahre (siehe Abbildung 25 bis Abbildung 28) teilweise auch auf Subventionen wie beispielsweise der Förderung fossil betriebener KWK zurückzuführen sind.
- 74 In Bezug auf die Verbesserung des Kapitalstocks in der Vergangenheit sind von der deutschen Politik vor allem die Vorgängerprogramme des Programms „Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft“ (EEW) eingesetzt worden. Die EEW wurde im Jahr 2019 implementiert und vereint in sich die Vorgängerprogramme für hocheffiziente Querschnittstechnologien, klimaschonende Produktionsprozesse, Abwärmevermeidung und -nutzung, Energiemanagementsysteme sowie erneuerbare Prozesswärme (BAFA 2022). Auch die ursprünglichen Programme haben bereits zu

Energieverbrauchs- und THG-Emissionsminderungen geführt, allerdings wurden unter anderem aufgrund der fragmentierten Förderlandschaft, wegen uneinheitlicher Antragsverfahren sowie wegen Überschneidungen zwischen verschiedenen Einzelinstrumenten nicht alle Potenziale ausgeschöpft (Öko-Institut et al. 2021). Nach aktuellen Evaluationsergebnissen dürfte die neu strukturierte EEW ihr in den Förderrichtlinien für 2023 definiertes THG-Minderungsziel relativ sicher erreichen bzw. sogar leicht übererfüllen (Fraunhofer ISI et al. 2022). Darüber hinaus waren und sind die „Initiative Energieeffizienz- und Klimaschutznetzwerke“ (IEEKN) sowie die Verpflichtung zu Energieaudits für Nicht-KMU (Klein- und mittelständische Unternehmen) relevante Maßnahmen im nationalen Politikmix, da ihnen eine Hebelwirkung zufällt und sie bei der Diffusion von Wissen über Möglichkeiten und Technologien eine größere Rolle spielen (Barckhausen et al. 2022; IREES und adelphi 2017).

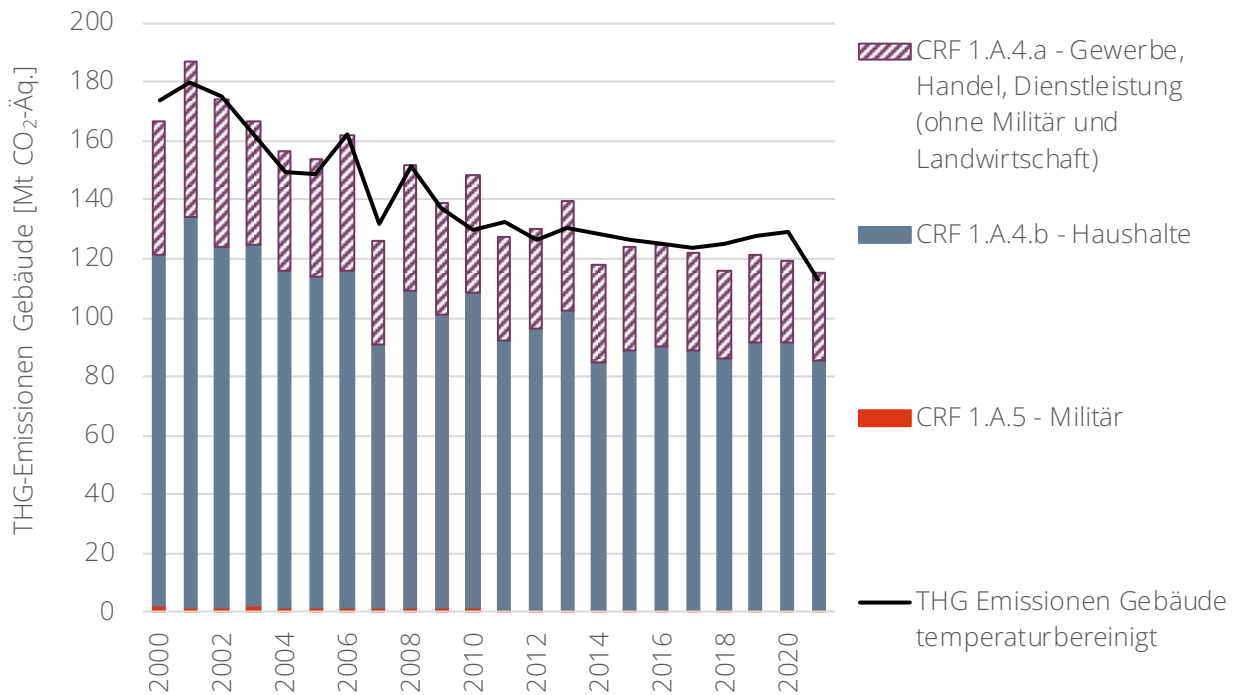
2.4 Gebäude

- 75 Die Entwicklung der THG-Emissionen des Gebäudesektors wird im Folgenden sowohl mit als auch ohne Temperaturbereinigung und anhand der in den Inventaren verwendeten CRF-Kategorien dargestellt. Daran anschließend wird die Emissionsentwicklung auf Basis von erklärenden Faktoren im Rahmen einer Dekomposition differenzierter beleuchtet, wobei zwischen privaten Haushalten und GHD separiert wird. Die Ursachen und Trends der Entwicklung der erklärenden Komponenten werden anschließend für jeweils beide Untersektoren analysiert.

2.4.1 Entwicklung der Treibhausgasemissionen

- 76 Die THG-Emissionen im Gebäudesektor sind in Abbildung 30 real (also nicht-temperaturbereinigt) und temperaturbereinigt dargestellt. Die Temperaturbereinigung wird anhand gewichteter Gradtagszahlen des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) durchgeführt, eine genaue Beschreibung der Methodik erfolgt im Anhangskapitel 6 Temperaturbereinigung. Die nicht-temperaturbereinigten THG-Emissionen sind jeweils für die einzelnen CRF-Kategorien dargestellt. Die Temperaturbereinigung wurde nur für die summierten THG-Emissionen des Sektors durchgeführt.

Abbildung 30: Entwicklung der THG-Emissionen des Sektors Gebäude nach Bundes-Klimaschutzgesetz im Zeitraum 2000-2021



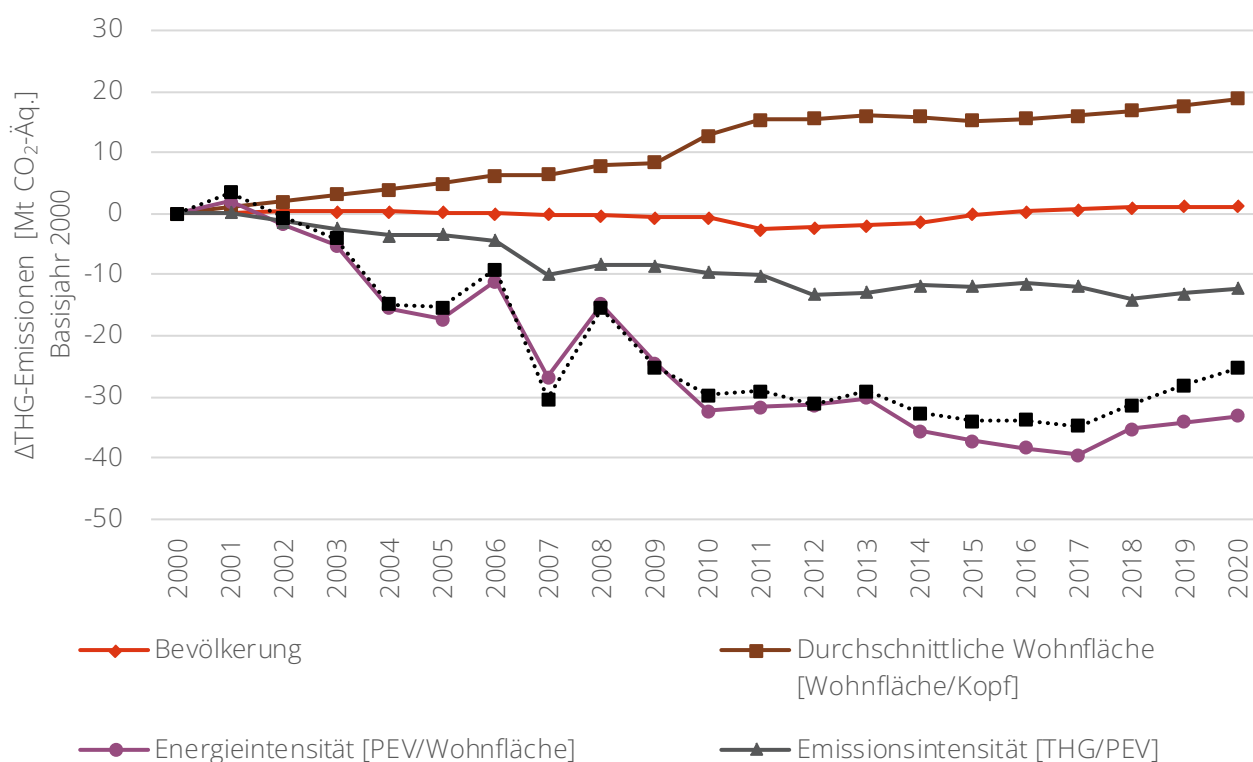
Eigene Darstellung auf Basis der Trendtabellen 2022 (UBA 2022c). Die Daten für das Jahr 2021 basieren auf der Berechnung der Vorjahresemissionen, Inventardaten liegen zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vor. Die Temperaturbereinigung erfolgte anhand gewichteter Gradtagzahlen (siehe Fußnote 31).

- 77 Die temperaturbereinigten THG-Emissionen liegen dabei seit 2014 mit Ausnahme des Jahres 2021 über den nicht-temperaturbereinigten THG-Emissionen. Dies ist auf mildere Winter in den vergangenen Jahren im Vergleich zum langjährigen Mittel der Jahre 2001-2020 zurückzuführen. Die temperaturbereinigten THG-Emissionen weichen dabei im Zeitraum von 2000 bis 2021 im Mittel um 3,1 % von den nicht-temperaturbereinigten THG-Emissionen ab. Im Jahr 2021 lagen die nicht-temperaturbereinigten THG-Emissionen 2,48 Mt CO₂-Äq. oder 2,1 % über den temperaturbereinigten THG-Emissionen. Im Jahr 2020 war der Effekt umgekehrt und die nicht-temperaturbereinigten THG-Emissionen lagen 9,96 Mt CO₂-Äq. oder 8,3 % unter den temperaturbereinigten THG-Emissionen. Der Effekt liegt also in der Höhe der jährlichen laut Bundes-Klimaschutzgesetz zu erreichenden Einsparungen im Gebäudesektor. In der weiteren Analyse werden die temperaturbereinigten Werte verwendet, um zufällige, auf das Wettergeschehen zurückzuführende Anteile in der Entwicklung der THG-Emissionen auszublenden.
- 78 Die temperaturbereinigten THG-Emissionen sind von 2000 bis 2021 von 173,7 Mt CO₂-Äq. auf 113 Mt CO₂-Äq. abgesunken, was einer Absenkung um 35,3 % entspricht. Von 2010 bis 2020 waren insgesamt keine nennenswerten Reduktionen zu verzeichnen. Die THG-Emissionen stiegen seit dem Jahr 2014 leicht an, bevor sie im Jahr 2021 erstmals wieder zurückgingen.

2.4.2 Dekompositionsanalyse

79 Die Dekomposition der THG-Emissionen im Gebäudesektor unterscheidet zwischen THG-Emissionen aus Gebäuden privater Haushalte (CRF-Kategorie 1.A.4.b) sowie Gebäuden des Bereichs GHD (CRF-Kategorie 1.A.4.a). Gebäude privater Haushalte sind hierbei für 73,2 % der Gesamtemissionen im Gebäudesektor verantwortlich, GHD-Gebäude für 26 % (Daten gelten für das Jahr 2021); die restlichen THG-Emissionen entfallen auf das Militär. Erfasst sind THG-Emissionen aus der Verbrennung von Energieträgern zur Bereitstellung von Wärme, der Anteil der THG-Emissionen aus mobilen Quellen ist gering und kann als vernachlässigbar angesehen werden (0,7 % in 2020 in Haushalten und GHD). Fernwärme und der Strom für den Betrieb von Wärmepumpen sind darin nicht enthalten, da diese dem Quellprinzip folgend im Sektor Energiewirtschaft bilanziert werden. Zur Berücksichtigung von Wetter- und Klimaeffekten wurden die Daten zum Primärenergieverbrauch (genau wie die temperaturbereinigten THG-Emissionen im vorherigen Abschnitt) auf Basis von gewichteten Gradtagszahlen³¹ bereinigt.

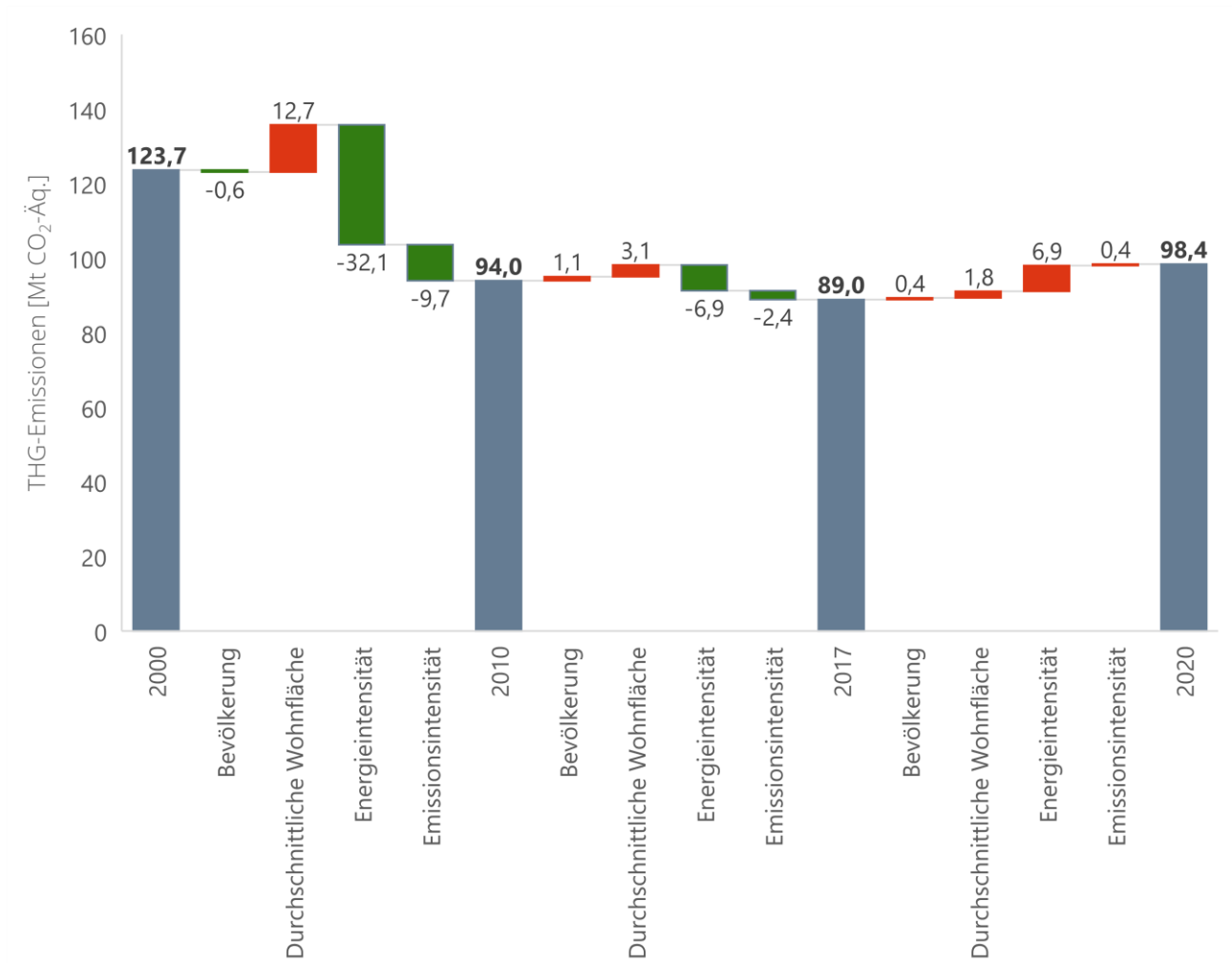
Abbildung 31: Dekomposition der THG-Emissionen von Gebäuden privater Haushalte - Änderungen im Vergleich zu 2000



Eigene Darstellung der CRF-Kategorie 1.A.4.b. Weitere Details zu den verwendeten Daten finden sich in Tabelle 6.

³¹ Zur Methodik der Bereinigung siehe Kapitel 6 Anhang.

Abbildung 32: Dekomposition der THG-Emissionen von Gebäuden privater Haushalte - aggregierte Betrachtung 2000-2010, 2010-2017 und 2017-2020 (Daten temperaturbereinigt)



Eigene Darstellung. Weitere Details zu den verwendeten Daten finden sich in Tabelle 6.

80 Abbildung 31 und Abbildung 32 zeigen die Dekomposition der jährlichen, temperaturbereinigten THG-Emissionen von Gebäuden privater Haushalte (des Teilsektors 1.A.4.b i stationäre Feuerung in Haushalten) in die Komponenten Bevölkerungsentwicklung (Anzahl an Einwohner:innen), Durchschnittliche Wohnfläche (Wohnfläche pro Kopf), Emissionsintensität (THG-Emissionen von Gebäuden pro Primärenergieverbrauch) sowie Energieintensität (Primärenergieverbrauch pro Wohnfläche) im Vergleich zum Jahr 2000 bzw. aggregiert über die Zeiträume von 2000 bis 2010, von 2010 bis 2017 und von 2017 bis 2020. Die Komponente Emissionsintensität ergibt sich aus dem Verhältnis der eingesetzten Energieträger mit ihren zugehörigen Emissionsfaktoren. Die Emissionsdaten sind den nationalen Inventarberichten entnommen (siehe Tabelle 6). Methan und Lachgasemissionen sind zu CO₂-Äquivalenten umgerechnet. Die Komponente Energieintensität (PEV pro m²), wird dabei von den Gebäudeenergiebedarfen des Gebäudebestands, der Effizienz der eingesetzten Heiztechnologien sowie dem Nutzer:innenverhalten beeinflusst. Die Daten zum Primärenergieverbrauch sind den nationalen Inventarberichten entnommen (siehe Tabelle 6). Weitere Ausführungen zur Zusammensetzung der Energieintensität befinden sich in Infokasten 7.

Infokasten 7

Anmerkungen zur Energieintensität

Die Energieintensität kann in verschiedene Faktoren zerlegt und dafür mit folgender Formel beschrieben werden:

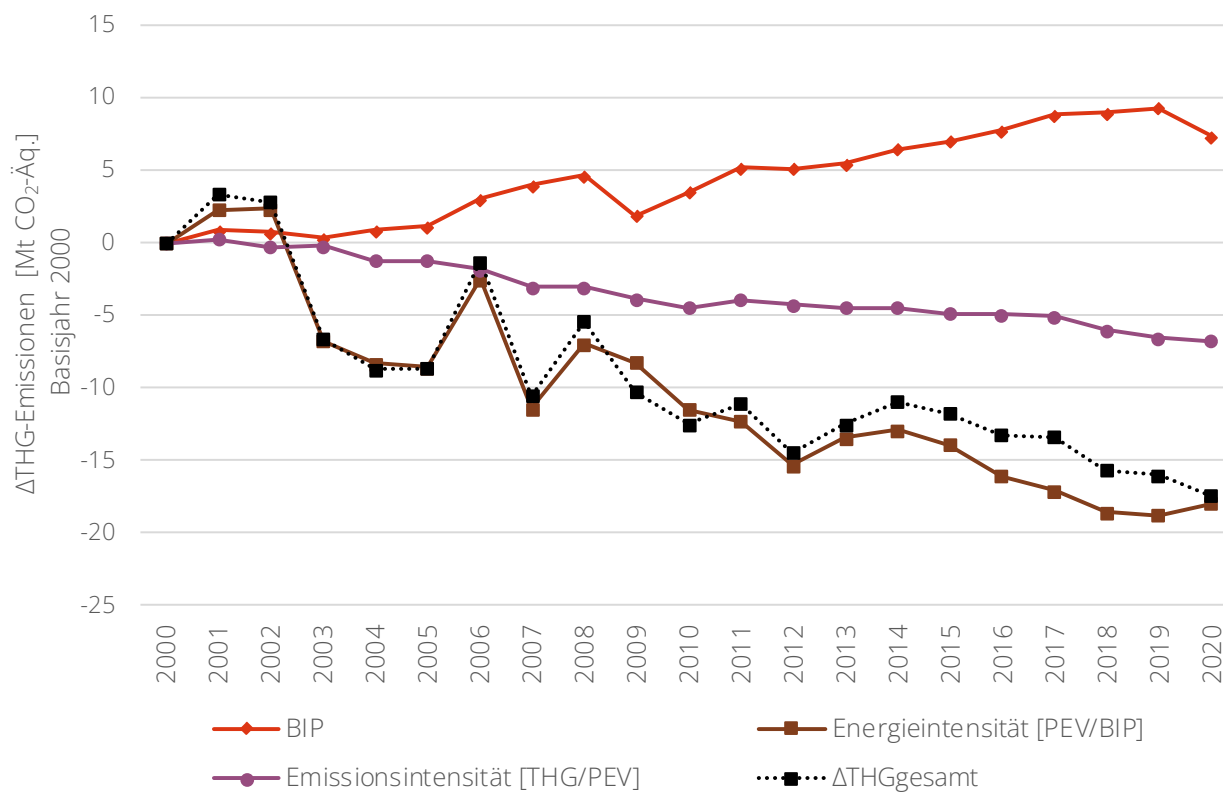
$$\text{Energieintensität} = \left(\frac{\text{EEB}_{\text{rechnerisch}}}{\text{m}^2} \right) * \left(\frac{\text{PEV}_{\text{faktisch}}}{\text{EEV}_{\text{faktisch}}} \right) * \left(\frac{\text{EEV}_{\text{faktisch}}}{\text{EEB}_{\text{rechnerisch}}} \right) = \text{PEV}/\text{m}^2$$

Der durchschnittliche Endenergiebedarf des Gebäudesektors ($\text{EEB}_{\text{rechnerisch}}/\text{m}^2$) spiegelt die technische Energieeffizienz des Bestands wider, deren Entwicklung u. a. durch Gebäudestandards im Neubau sowie die Sanierungsrate und -tiefe im Gebäudebestand beeinflusst wird. Das Verhältnis aus faktischem Primärenergieverbrauch ($\text{PEV}_{\text{faktisch}}$) und faktischem Endenergieverbrauch ($\text{EEV}_{\text{faktisch}}$), $\text{PEV}_{\text{faktisch}}/\text{EEV}_{\text{faktisch}}$, gibt Hinweise auf die Effizienz der eingesetzten Heiztechnologie. Dies trifft sowohl für gleiche Energieträger bei unterschiedlicher Heiztechnologie (bspw. Niedertemperatur- vs. Brennwertkessel) als auch variierende Effizienzen zwischen Energieträgern und den verwendeten Heiztechnologien zu (Gaskessel vs. Ölkessel oder Biomassekessel). Darüber hinaus beeinflusst zusätzlich das Nutzer:innenverhalten (z. B. gewählte Raumtemperatur, Lüftungsverhalten) die Energieintensität. Die Entwicklung des Nutzer:innenverhaltens spiegelt sich in dem Verhältnis aus dem faktischen Endenergieverbrauch ($\text{EEV}_{\text{faktisch}}$) und dem rechnerischen Bedarf ($\text{EEB}_{\text{rechnerisch}}$) wider, ($\text{EEV}_{\text{faktisch}}/\text{EEB}_{\text{rechnerisch}}$). Maßnahmen der energetischen Gebäudesanierung, der Zubau von Gebäuden mit hohem Energiestandard und der Austausch alter durch neue, effizientere Heizkessel führen zu einem Absinken des ersten und zweiten Terms in der oben angegebenen Gleichung. Bleibt zugleich aber die Energieintensität gleich oder steigt, so ist dies notwendigerweise auf ein Anwachsen des dritten Terms zurückzuführen. Auch wenn Diskrepanzen zwischen rechnerischen Energiebedarfen und faktischen Energieverbräuchen durch unterschiedliche Parameter mitbedingt werden (wie z. B. eine nicht plangemäße Ausführung von Sanierungsarbeiten oder schlecht eingestellte Heizungsanlagen; Sorrell et al. 2009; Scheer et al. 2013), ist ein solchermaßen beobachteter Sachverhalt ein starkes Indiz für ein durch die Effizienzsteigerung und Wohlfandeffekte induziertes geändertes Nutzer:innenverhalten. Dieses spiegelt sich z. B. in der Einstellung höherer Raumtemperaturen oder einem weniger disziplinierten Lüftungsverhalten in energetisch sanierten Wohnungen wider. Die beobachtete Entwicklung im Bereich der Gebäude privater Haushalte im Zeitraum seit 2010 legt nahe, dass solche Rebound-Effekte und wohlfandsbedingte Veränderungen des Nutzungsverhaltens (für nähere Ausführungen zu Rebound-Effekten siehe Infokasten 10) eine wichtige Rolle gespielt haben. Die temperaturbereinigten THG-Emissionen von Gebäuden privater Haushalte (des Teilsektors 1.A.4.b i stationäre Feuerung in Haushalten) sind zunächst im Zeitraum von 2000 bis 2010 um knapp 30 Mt CO₂-Äq. gefallen, wobei teilweise von Jahr zu Jahr starke Schwankungen auftraten. Es folgte ein Zeitraum relativ gleichbleibender THG-Emissionen in den Jahren 2011 bis 2017, gefolgt von einem Anstieg um mehr als 9 Mt CO₂-Äq. im Zeitraum von 2017 bis 2020.

- 81 Die temperaturbereinigten THG-Emissionen von Gebäuden privater Haushalte (des Teilsektors 1.A.4.b i stationäre Feuerung in Haushalten) sind zunächst im Zeitraum von 2000 bis 2010 um 29,7 Mt CO₂-Äq. gefallen, wobei teilweise von Jahr zu Jahr starke Schwankungen auftraten. Es folgte ein Zeitraum relativ gleichbleibender, in der Tendenz leicht sinkender, THG-Emissionen in den Jahren 2011 bis 2017 (-5 Mt CO₂-Äq.), gefolgt von einem Anstieg um 9,4 Mt CO₂-Äq. im Zeitraum von 2017 bis 2020.
- 82 Die Bevölkerungsentwicklung hatte im betrachteten Zeitraum einen lediglich geringfügigen Einfluss auf die Emissionsentwicklung im Vergleich zu den anderen Komponenten. In der Tendenz ist ihr Einfluss

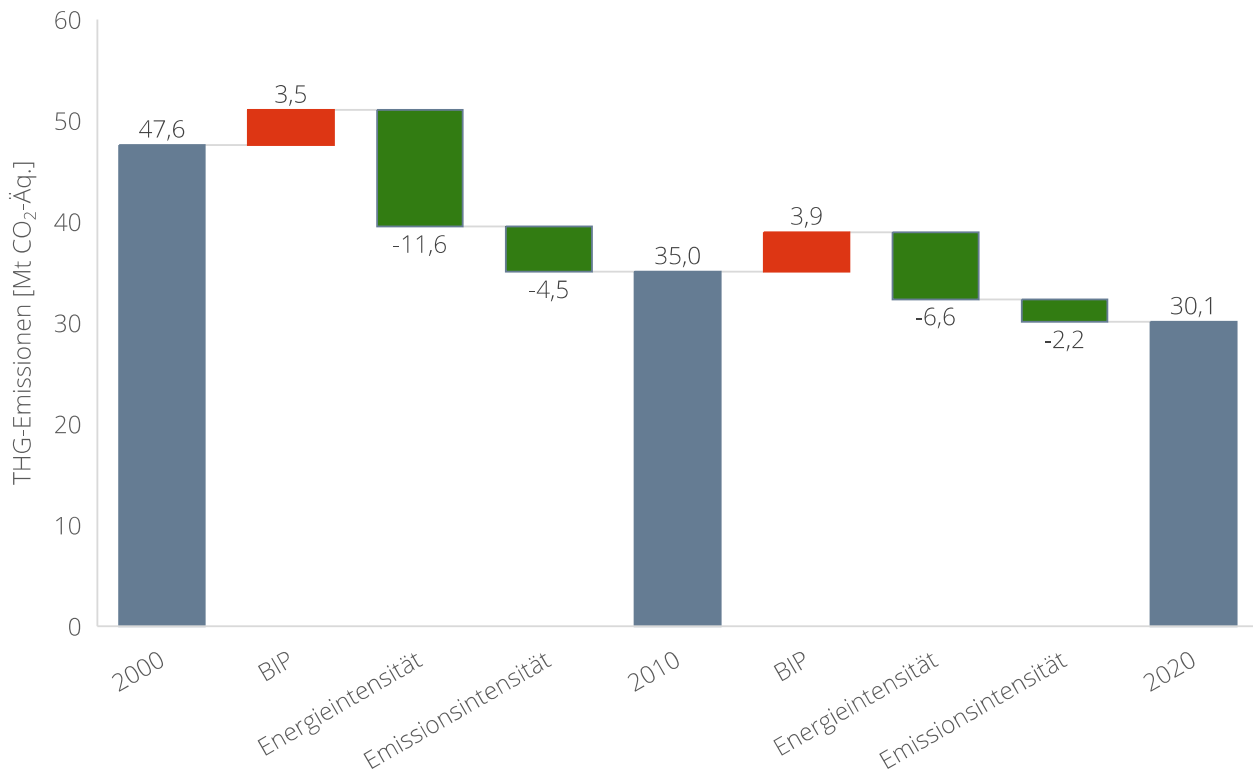
über den Zeitraum hinweg leicht emissionssteigernd. Die Wohnfläche pro Kopf führt zu einem weitgehend kontinuierlichen Anstieg der THG-Emissionen um knapp 18 Mt CO₂-Äq mit einer stärkeren Wirkung im Zeitraum von 2000 bis 2010 (12,7 Mt CO₂-Äq.). Die Emissionsintensität trug bis 2012 zu einer Emissionsminderung bei, seitdem konnten keine substanziellen Effekte der Emissionsintensität auf die Emissionsentwicklung festgestellt werden. Insgesamt trägt sie zu einer Emissionsminderung in Höhe von 11,7 Mt CO₂-Äq. über den gesamten betrachteten Zeitraum bei. Die Energieintensität wies – mit starken Schwankungen zwischen einzelnen Jahren – bis 2010 einen deutlich emissionsmindernden Einfluss auf und führte zu etwa 32 Mt CO₂-Äq. THG-Reduktion. Im Jahr 2007 sanken die THG-Emissionen aufgrund einer deutlichen Verringerung der Energieintensität, nachdem diese im Jahr 2006 angestiegen war. Der emissionssteigernde Effekt der Energieintensität im Jahr 2006 ist Vorzieheffekten (insbesondere vorzeitiger Kauf von Mineralöl) aufgrund der Umsatzsteuererhöhung von 16 % auf 19 % im Jahr 2007 zuzurechnen (UBA 2008). Durch die Bilanzierung des eingelagerten Heizöls im Jahr 2006 fielen die berechneten THG-Emissionen in 2007 daher geringer aus als sie es vermutlich in der Realität waren. Ebenfalls emissionsmindernd wirkten starke Preisanstiege für Heizöl und Erdgas und eine damit verbundene gesunkene Nachfrage der Haushalte (UBA 2008). In der darauffolgenden Dekade weist die Energieintensität bis 2017 noch einen leichten emissionsmindernden Effekt auf. Seit dem Jahr 2017 ist jedoch ein gegenläufiger Trend zu beobachten. Die Energieintensität wirkt erneut emissionssteigernd. Die Zunahme der Energieintensität von 2019 auf 2020 ist dabei in Teilen auf Vorzieheffekte durch die Einführung des BEHG zum 01.01.2021 und damit einhergehende vorzeitige Käufe fossiler Energieträger zurückzuführen. Darüber hinaus sind weitere Erklärungen für die emissionssteigernde Wirkung der Energieintensität im Jahr 2020 zusätzliche Effekte durch die Maßnahmen zur Eindämmung der Covid-19-Pandemie, wie bspw. eine Verlagerung des Arbeitsplatzes von der Arbeitsstätte ins Homeoffice (co2online 2021).

Abbildung 33: Dekomposition der THG-Emissionen von Gebäuden in GHD (Gewerbe, Handel, Dienstleistungen) - Änderungen im Vergleich zu 2000



Eigene Darstellung der CRF-Kategorie 1.A.4.a i stationäre Feuerung in GHD. Weitere Details zu den verwendeten Daten finden sich in Tabelle 6.

Abbildung 34: Dekomposition der THG-Emissionen von Gebäuden in GHD (Gewerbe, Handel, Dienstleistungen) - aggregierte Betrachtung 2000-2010 und 2010-2020 (Daten temperaturbereinigt)



Eigene Darstellung. Weitere Details zu den verwendeten Daten finden sich in Tabelle 6.

- 83 Abbildung 33 und Abbildung 34 zeigen die Dekomposition der jährlichen THG-Emissionen von Gebäuden im GHD-Bereich in die Komponenten Energieintensität (Primärenergieverbrauch (Gebäude aus GHD) pro Bruttoinlandsprodukt), Emissionsintensität (THG-Emissionen von Gebäuden (Gebäude aus GHD) pro Primärenergieverbrauch (Gebäude aus GHD)), und Wirtschaftsentwicklung (Bruttoinlandsprodukt) im Vergleich zum Jahr 2000 bzw. aggregiert über die Zeiträume von 2000 bis 2010 und von 2010 bis 2020. Neben Raumwärme und Warmwasserbereitstellung ist zudem Prozesswärme in den Daten enthalten.
- 84 Bei Betrachtung der Komponenten der Dekomposition werden folgende Entwicklungen festgestellt: die Veränderung der Wirtschaftsentwicklung (Zunahme des BIP) führte mit Ausnahme der Jahre 2008 auf 2009 sowie von 2019 auf 2020 zu einer Steigerung der THG-Emissionen. Die emissionsmindernde Wirkung einer sinkenden Wirtschaftsentwicklung ist, wie während der Finanzkrise, auch in dem Sonderjahr 2020 durch die Covid-19-Pandemie besonders deutlich zu sehen. Auch Veränderungen in der Emissionsintensität führten über den betrachteten Zeitraum (2000-2020) zu Emissionsminderungen in Höhe von 6,7 Mt CO₂-Äq. Der emissionsmindernde Effekt ist dabei nur von geringfügigen Schwankungen geprägt. Die Energieintensität führte insgesamt betrachtet im Zeitraum 2000 bis 2020 zu einer emissionsmindernden Wirkung in Höhe von 18,2 Mt CO₂-Äq. auf. Die Jahre 2006 auf 2007 und 2012 auf 2013 weisen deutliche Schwankungen im sonst kontinuierlichen Verlauf auf. Das Jahr 2006 war dabei mit einem vergleichsweise stark emissionssteigernden Einfluss verbunden. Im Jahr

2007 sanken die THG-Emissionen aufgrund einer deutlichen Verringerung der Energieintensität. Dies ist vor allem auf hohe Gas- und Ölpreise zurückzuführen (UBA 2008). Im Jahr 2020 wurden die THG-Emissionen insbesondere durch einen Rückgang der Wirtschaftsleistung gedämpft, die emissionsmindernde Wirkung der Energieintensität verringerte sich leicht aufgrund resultierender Effizienzeinbußen. Im Gegensatz zu den THG-Emissionen aus den Wohngebäuden, wirkte die Energieintensität bei GHD auch zwischen 2010 und 2020 emissionsmindernd.

2.4.3 Diskussion von Ursachen der Entwicklung

2.4.3.1 Ursachen und Trends – Haushalte

- 85 Für die Entwicklung der THG-Emissionen der privaten Haushalte im Gebäudesektor sind insbesondere die drei in der Dekompositionsanalyse aufgegriffenen Parameter relevant. Basierend auf den Erkenntnissen der Komponentenzerlegung der THG-Entwicklung des Gebäudesektors werden im Folgenden Faktoren näher beleuchtet, die mit Veränderungen der Wohnfläche pro Kopf sowie der Emissions- und Energieintensität zusammenhängen. Zu beachten ist, dass die THG-Emissionen bei Verwendung von elektrischen Speicherheizungen, Wärmepumpen oder der Fernwärmebereitstellung im Sektor Energiewirtschaft bilanziert werden und es dann zu einer Verlagerung der THG-Emissionen zwischen den Sektoren kommt.

Wohnungen pro Kopf und durchschnittliche Wohnfläche

- 86 Die (geschätzte) Wohnfläche in Deutschland ist, von 3,18 Mrd. m² im Jahr 2000, über 3,58 Mrd. m² im Jahr 2011 auf 3,94 Mrd. m² im Jahr 2020 gestiegen (Destatis 2022k). Dies entspricht einem Anstieg von etwa 24 % gegenüber dem Jahr 2000. Die zusätzlichen 760 Mio. Quadratmeter müssen beheizt werden und tragen somit zu einem höheren Energieverbrauch bei. Dieser Zuwachs der Wohnfläche ist nur in geringen Teilen auf den Bevölkerungszuwachs zurückzuführen. Die Pro-Kopf-Wohnfläche ist im gleichen Zeitraum um knapp 21 % (2000: 39,5m², 2020: 47,7m² ; Destatis 2022k) gestiegen und war somit ein wesentlicher Treiber für zusätzliche THG-Emissionen im Gebäudesektor.
- 87 Es liegen verschiedene Gründe für eine Zunahme der Wohnfläche pro Kopf vor. Relevant ist insbesondere der Anstieg der Wohnfläche mit zunehmendem Alter sowie eine Zunahme an Single-Haushalten, was u. a. durch die Entwicklung der Altersstruktur und ein verändertes Haushaltsbildungsverhalten bedingt ist (UBA 2021d ; Deschermeier und Henger 2015). Ein deutlicher Anstieg der Wohnfläche ist bis zum Jahr 2010 insbesondere bei den über 75-Jährigen zu beobachten, wohingegen kein Anstieg bei jungen Einpersonenhaushalten ersichtlich wird. Gründe dafür liegen u. a. in einer höheren Eigentumsquote bei älteren Menschen und dem Verbleib in vormals als Familie bewohntem Wohnraum (UBA 2021d). Darüber hinaus ist der in der Vergangenheit gewachsene Wohlstand und die damit verbundene Möglichkeit zur Realisierung von Wohnflächenkonsumwünschen ein Einflussfaktor (Deschermeier und Henger 2015). Gleichzeitig verfolgt die Bundesregierung das Ziel, 400 000 neue Wohnungen jährlich zu bauen (SPD Bündnis 90/Die Grünen und FDP 2021). Die neu erschlossene Fläche wird die durchschnittliche Wohnfläche pro Kopf daher aller Voraussicht nach weiter erhöhen.

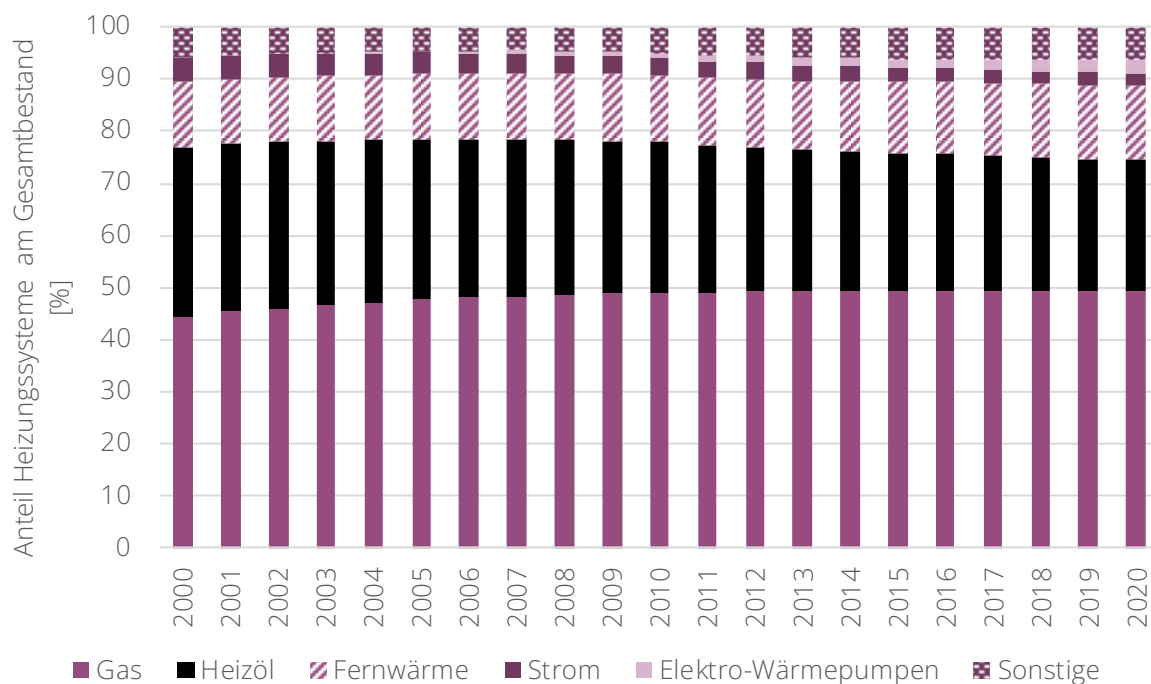
Emissionsintensität

- 88 Die Emissionsintensität gibt das Verhältnis aus den THG-Emissionen der eingesetzten Primärenergieträger und deren kalorischem Energiegehalt an. Dabei sind dem Quellprinzip folgend nur

die Energieträger von Bedeutung, bei denen die THG-Emissionen vor Ort (am Gebäude) entstehen, im Wesentlichen also Heizöl, Erdgas und Biomasse, nicht aber Strom. Bei den eingesetzten Energieträgern lagen in den vergangenen Jahren nur geringe Änderungen vor, was sich auch in dem stagnierenden Einfluss auf die Emissionsentwicklung widerspiegelt (siehe Abbildung 33).

- 89 Abbildung 35 zeigt die Entwicklung der Heizsysteme im Bestand seit dem Jahr 2000. Verminderungen der Emissionsintensität (und damit auch THG-Einsparungen) wurden insbesondere in den frühen 2000ern durch einen Wechsel zu CO₂-ärmeren Brennstoffen, namentlich von Heizöl zu Erdgas sowie zu Biomasse, erreicht. Dennoch macht Heizöl im Jahr 2020 noch einen Anteil von rund 25 % an der Beheizungsstruktur des Wohnungsbestandes aus. Gründe liegen u. a. an einer geographisch begrenzt verfügbaren Erdgas- sowie Fernwärmeinfrastruktur (BDEW 2019). Auch waren Ölheizungen in der Vergangenheit häufig die wirtschaftlichste Option, insbesondere im unsanierten Altbau (Bettgenhäuser und Boermans 2011). Dazu trugen auch im Verlauf tendenziell günstigere reale Endverbraucherpreise für Heizöl bei (mit Ausnahme der Preisspitzen in 2008 und 2010-2014). Erdgas stellte im Jahr 2020 den dominierenden Heizenergieträger im Wohngebäudebestand mit 49,5 % dar (BDEW 2021a).
- 90 Der Anteil der fossilen Energieträger in der Beheizungsstruktur des Wohngebäudebestands ist in den letzten Dekaden leicht zurückgegangen. Im Jahr 2005 betrug der Anteil von Heizöl- und Erdgaskesseln 78,5 % aller installierten Heizungsanlagen, im Jahr 2020 lag der entsprechende Anteil noch bei 74,5 %. Während die relativen Absatzzahlen von Wärmepumpen zwar deutlich stiegen (Anteil an Wärmepumpen an verbauten Heizungen im Neubau 35,5 % im Jahr 2020/44 % Januar bis November 2021; AGEb 2021b), machen Wärmepumpen im Bestand im Jahr 2020 nur rund 2,6 % aus (BDEW 2021a). Auch der Einsatz von Biomassekesseln liegt im Bestand bei weniger als 10 % aller installierten Heizungsanlagen (Kategorie „Sonstige“, BDEW 2021a). Bilanziell gleicht zudem die Verringerung von strombasierten Wärmeerzeugern (Nachtspeicherheizungen, siehe Abbildung 35 „Strom“) die Zunahme an Wärmepumpen und die damit verbundene Stromnachfrage bzw. verringerte Nachfrage an im Gebäudesektor bilanzierten Brennstoffen aus.

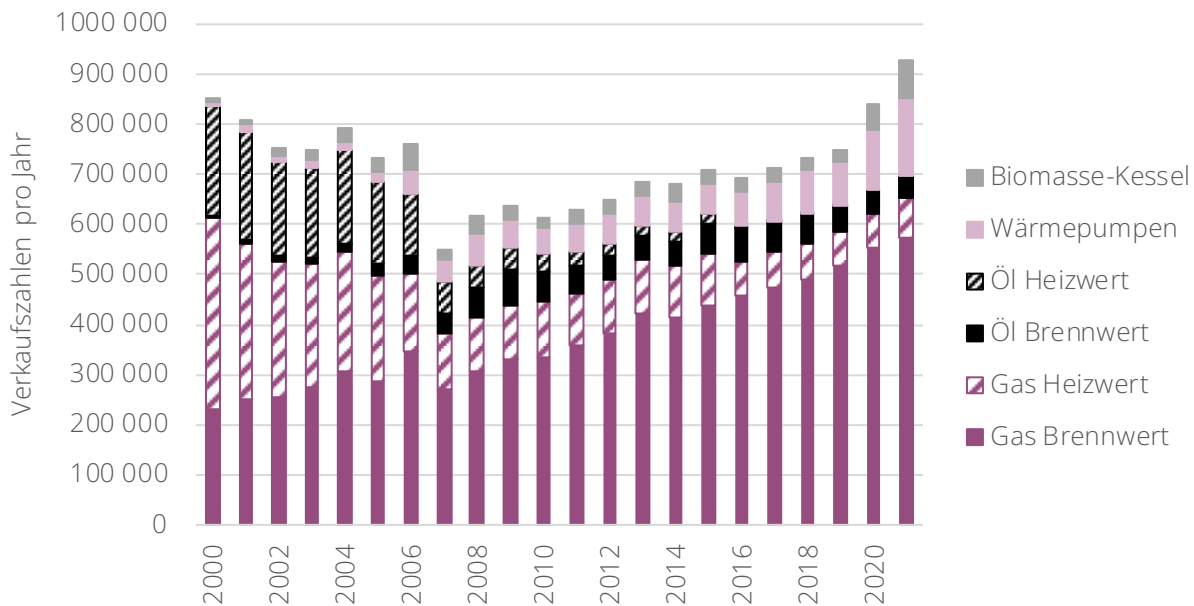
Abbildung 35: Entwicklung der Beheizungsstruktur im deutschen Wohngebäudebestand von 2000 bis 2020



Eigene Darstellung Daten basierend auf BDEW (2021a). Die Kategorie „Sonstige“ umfasst nach BDEW (2021a) Holz, Holzpellets, sonstige Biomasse, Koks/Kohle, sonstige Heizenergie. Dargestellt sind primäre Wärmeerzeuger. Der Gebäudebestand umfasst hier die Anzahl der Wohnungen in Gebäuden mit Wohnraum; Heizung vorhanden.

- 91 Auch bei Betrachtung der jährlichen Absatzzahlen (siehe Abbildung 36) wird deutlich, dass im Jahr 2021 immer noch ein Großteil der verbauten Wärmeerzeuger auf fossilen Energien basiert (~75 %; Gesamt: 929 000 verbaute Systeme, 698 608 davon sind Öl- und Gaskessel). Die Verkaufsanteile von Wärmepumpen sind insbesondere in der jüngeren Vergangenheit stark angestiegen und stellen in dem Jahr 2021 rund 17 % des Absatzes an Wärmeerzeugern (siehe Abbildung 36) dar.

Abbildung 36: Jährliche Absatzzahlen Wärmeerzeuger, Marktentwicklung Deutschland 2000 bis 2021

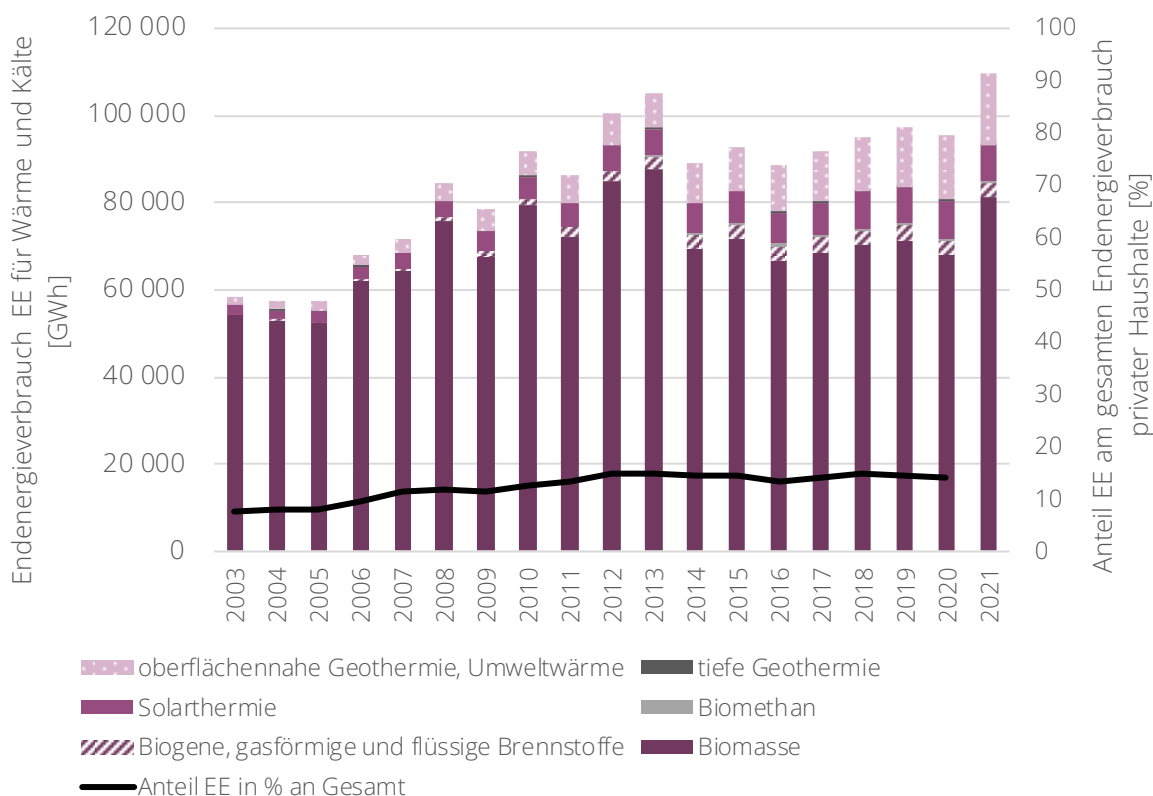


Eigene Darstellung und Berechnungen auf Basis von BDH (2011) und BDH (2021).

- 92 Maßnahmen zur Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energieträger in der Wärmebereitstellung, wie z. B. die Einführung des EE-WärmeG 2009 (inzwischen Teil des Gebäudeenergiegesetz (GEG)) und die nationale Umsetzung der EU-Erneuerbaren Energien Richtlinie (RED I und II), spiegeln sich nur in einer langsamen Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energieträger wider. Der Einsatz erneuerbarer Energieträger zur Wärmeerzeugung erfolgte vor allem von ca. 4 % im Jahr 2000 auf ca. 14 % im Jahr 2013 und blieb seitdem relativ konstant. Dabei wurde bisher primär feste und gasförmige Biomasse verwendet (siehe Abbildung 37). Geothermie, Solarthermie und oberflächennahe Geothermie/Umweltenergie³² in Verbindung mit Wärmepumpen spielen bisher nur eine geringe Rolle. Zuletzt stiegen jedoch auch die Anteile aus Geothermie/Umweltenergie an, was primär dem Anstieg der Wärmepumpen zuzuschreiben ist. Die Stagnation des Einsatzes erneuerbarer Energieträger in der Wärmebereitstellung kann somit auch teilweise die ausbleibenden Minderungen der Emissionsintensität im vergangenen Jahrzehnt erklären.

³² Durch Wärmepumpen nutzbar gemachte erneuerbare Wärme (Luft-Wasser, Wasser-Wasser und Solewasser -Wärmepumpen sowie Brauchwasser- und Gaswärmepumpen).

Abbildung 37: Entwicklung des Endenergieverbrauchs erneuerbarer Energieträger für Wärme und Kälte



Eigene Darstellung auf Basis von AGEE-Stat (2022) für die Entwicklung des Endenergieverbrauchs erneuerbarer Energieträger für Wärme und Kälte in privaten Haushalten sowie von BMWK (2022a) für die Entwicklung des gesamten Endenergieverbrauchs privater Haushalte (inkl. Strom und Fernwärme³³). Die Kategorie „Biogene gasförmige und flüssige Brennstoffe“ stellt die Summe gasförmiger Brennstoffe aus Biogas, Biomethan, Klärgas, Deponiegas und biogenem flüssigen Brennstoff dar. Der Anteil, der für Klimakälte sowie Prozesskälte Strom verwendet wird, beträgt 4,7 % (107 PJ) der gesamten Wärme- und Kälteerzeugung für Gebäude privater Haushalte (BMWK 2022a).

- 93 Der Umstieg von gebäudeindividueller (fossiler) Wärmeerzeugung auf Fernwärmesysteme erfolgt, u. a. bedingt durch mangelnde lokale Verfügbarkeit einer Fernwärmestruktur, durch private Haushalte nur in sehr geringem Umfang. Wie Abbildung 35 entnommen werden kann, wurden im Jahr 2000 12 % der Wohnungen mit Fernwärme versorgt. Im Jahr 2020 lag dieser Anteil bei 14 %. Dies spiegelt sich auch in den Absatzzahlen für Fernwärmeanschlüsse des BMWK (2022a) wider, die für private Haushalte in den letzten zwei Jahrzehnten nahezu stagnierten (48 TWh im Jahr 1995 und 51 TWh im Jahr 2020).

³³ Bei der Fernwärme ist der Einsatz erneuerbarer Energieträger nicht berücksichtigt. In 2010 betrug der Anteil erneuerbarer Energieträger aus Fernwärme am Endenergieverbrauch der Haushalte 0,6 % und stieg bis 2020 auf 1,6 % (eigene Berechnung auf Basis von AGEE-Stat 2022; BMWK 2022a).

Energieintensität

Gebäudebestand

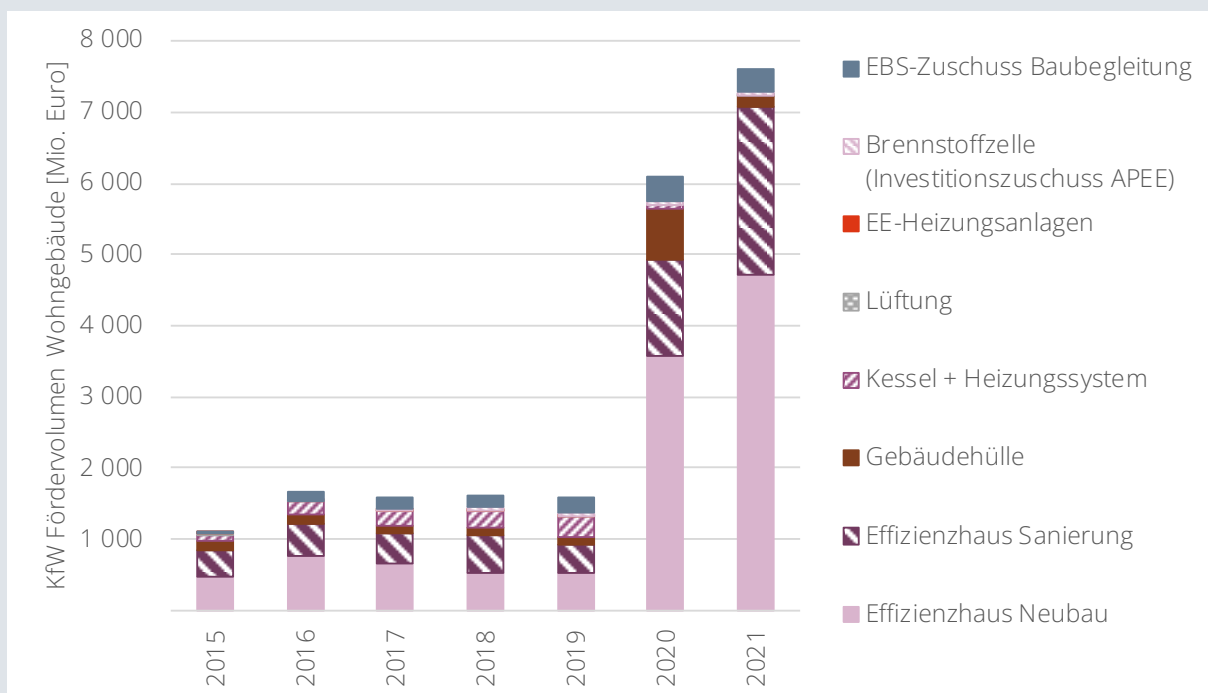
- 94 Eine Ursache für den gesunkenen Primärenergieverbrauch/m² (Energieintensität) stellen die in der Vergangenheit vollzogenen Sanierungsaktivitäten dar, die den energetischen Gebäudezustand verbessert haben. Die Sanierungsrate ist von 2000-2010 leicht gestiegen und verharrt seitdem bei rund 1 % (dena 2021b). Damit ist die Sanierungsrate auch in den vergangenen Jahren unter den politischen Zielen einer Verdoppelung auf 2 % aus dem Jahr 2010 (BMWi und BMU) geblieben.
- 95 Im Bestand konnten weder ordnungsrechtliche Maßnahmen, wie die seit 2014 geltende Austauschpflicht für Heizkessel, die älter als 30 Jahre sind, die verpflichtende Dämmung des Dachs bzw. der obersten Geschossdecke und energetische Mindestanforderungen bei Teilsanierungen (EnEV, 2014), noch eine Erhöhung der Fördersätze im Rahmen der KfW-Förderung „Energieeffizient Sanieren“ (siehe Infokasten 8) in den letzten zehn Jahren zu einer bedeutsamen Steigerung der Sanierungsrate führen. Dies ist vermutlich auf Mitnahmeeffekte und die Tatsache zurückzuführen, dass eine Erhöhung des Förderbudgets aufgrund gestiegener Fördersätze nicht in äquivalenter Weise zu einem Anstieg der ausgeführten Sanierungen führte. Inwieweit diese Maßnahmen jedoch Effekte auf die Sanierungstiefe hatten, lässt sich aufgrund der Daten nicht herleiten. Zudem ist zu bemerken, dass Fördermittelzusagen in den Jahren 2020 und 2021 sich vermutlich nur in geringen Teilen bereits in den Daten zur Sanierungsrate feststellen lassen (als erfolgte Sanierungen).
- 96 Für das Emissionsgeschehen bzw. die Energieintensität des Gebäudebestands sind insbesondere die „Worst Performing Buildings“ relevant, also die Gebäude der beiden letzten Effizienzklassen G und H (Mellwig 2021). Abbildung 41 zeigt die flächengewichtete Häufigkeitsverteilung der Effizienzklassen für Ein- und Zweifamilienhäuser (EFZH), sowie Mehrfamilienhäuser (MFH). Es wird deutlich, dass ein großer Teil (insgesamt etwa 30 %) der Wohnfläche den Klassen G und H angehört. Beide Klassen weisen vergleichsweise sehr hohe Endenergiebedarfe auf (>200 kWh/m²/a; im Vergleich: Effizienzkategorie A <50 kWh/m²/a, nach EnEV 2014). Diese beiden Klassen sind für circa 50 % der THG-Emissionen verantwortlich, weswegen hier ein besonders großer Handlungsbedarf besteht (Mellwig 2021).

Infokasten 8

Miteinsatz in der Bundesförderung Energieeffiziente Gebäude (BEG)

Die bis 2021 existierenden Programme „Energieeffizient Bauen und Sanieren“ der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) sowie die anschließende Bundesförderung Energieeffiziente Gebäude (BEG) gehören zu den wichtigsten Förderprogrammen im Gebäudesektor. Sowohl der Neubau als auch die Sanierung von Wohngebäuden wurde in den letzten Jahren mit einer zweistelligen Milliardensumme gefördert; in den Jahren 2015-2021 wurden in Summe über 21 Milliarden Euro an Förderzusagen ausgegeben. Hiervon entfielen knapp 53 % auf den Neubau (siehe [Abbildung 38](#)). Einen regelrechten Boom haben hierbei erhöhte Fördersätze ab 2020 und schließlich die Einführung der BEG Mitte 2021 ausgelöst. Nachdem auch im Januar 2022 sehr viele Anträge an die KfW gestellt wurden, wurde das Programm Ende Januar 2022 durch das BMWK vorerst gestoppt. Inzwischen können wieder Anträge im Rahmen der BEG gestellt werden, jedoch mit geringeren Fördersätzen. Zudem wurde die Förderung der Effizienzhäuser 115 und 100 in der Sanierung sowie die Förderung des Effizienzhaus 55 im Neubau eingestellt.

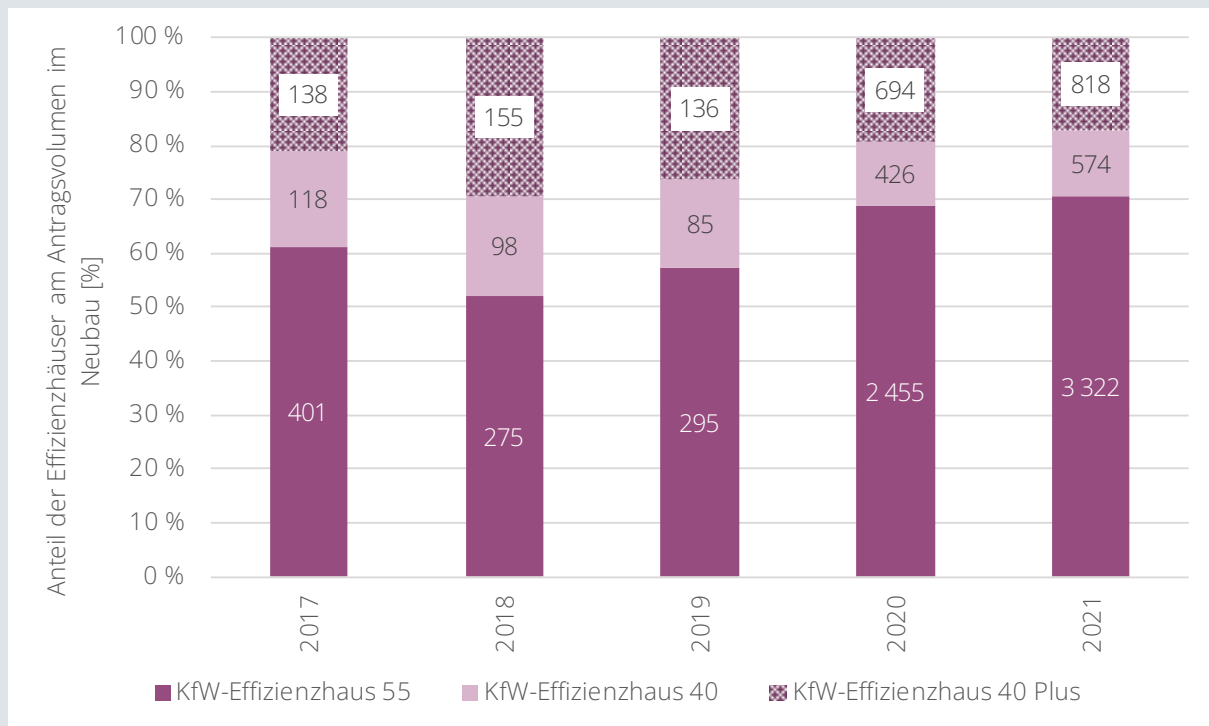
Abbildung 38: Entwicklung der Förderzusagen für Wohngebäude in den Jahren 2015-2021 (Energieeffizienter Neubau und energieeffiziente Sanierung inkl. Einzelmaßnahmen)



Eigene Darstellung auf Basis der KfW-Förderberichte und eigenen Analysen (Kessel + Heizungssystem sowie EE-Heizungsanlagen sind seit dem Jahr 2020 an die Bafa übergegangen und werden nicht mehr durch die KfW gefördert). Anmerkung: Das zugesagte Fördervolumen für EE-Heizungsanlagen ist im Vergleich zu den anderen Posten marginal. EBS (Energieeffizientes Bauen und Sanieren); APEE (Anreizprogramm Energieeffizienz).

Im Rahmen der Effizienzhaus Sanierung wurden zwischen 2015 und 2020 jeweils 20 bis 30 % der Mittel für die relativ wenig ambitionierten Standards KfW-Effizienzhaus 115 und KfW-Effizienzhaus 100 verwendet. Zudem wurden bis 2019 mit einem nicht zu vernachlässigenden Anteil des Förderbudgets neben Fern- und Nahwärmeversorgung auch die Installation fossiler Heizsysteme (wie Öl- und Gasbrennwertkessel) gefördert. Im Neubau entfiel im Jahr 2021 über 70 % des Fördervolumens auf den Effizienzhausstandard 55 (siehe [Abbildung 39](#)).

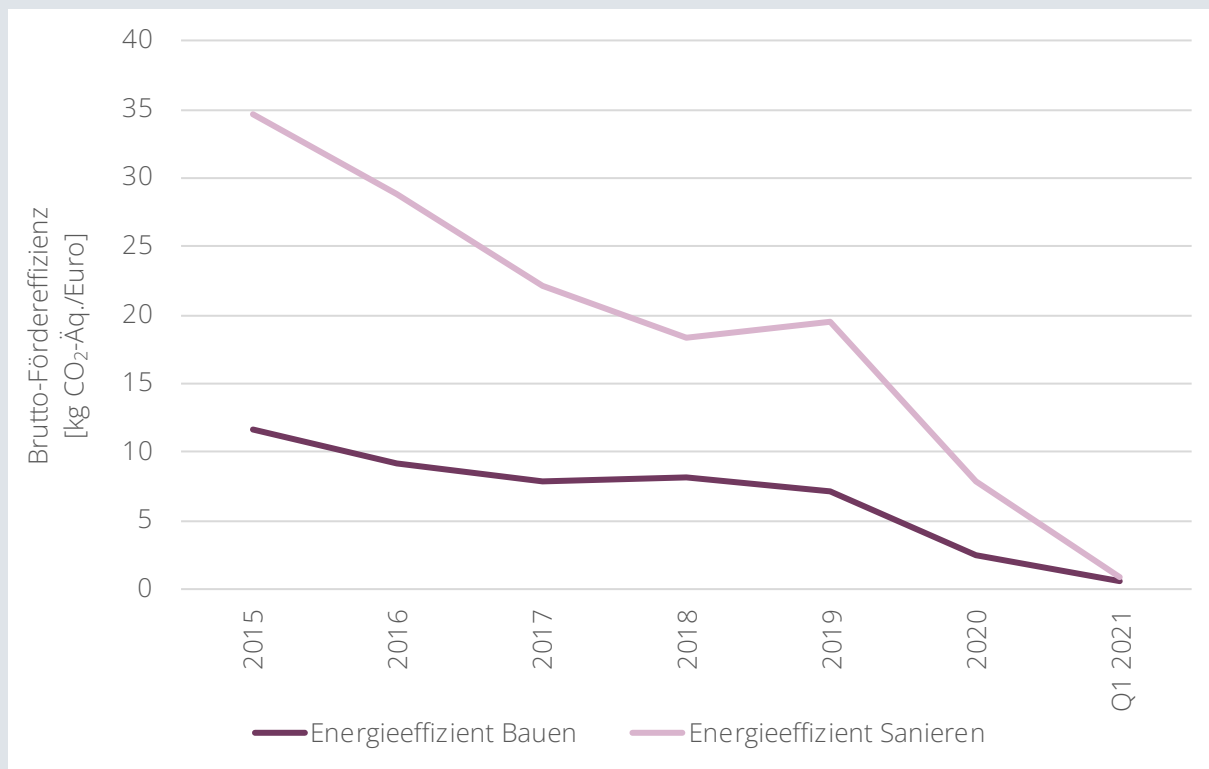
Abbildung 39: Entwicklung des Anteils der geförderten Effizienzhäuser im Wohngebäude Neubau



Eigene Darstellung auf Basis von KfW-Förderreporte und eigenen Analysen. Die Beschriftung der Balken gibt das absolute Fördervolumen in Mio. Euro wieder.

Die Brutto-Fördereffizienz (Fraunhofer ISI et al. 2019), ermittelt als das Verhältnis aus den eingesetzten Fördermitteln [Euro] und der über die Lebensdauer erwarteten Emissionseinsparung [kg CO₂-Äq.], von Neubau und Sanierung hat sich in den vergangenen Jahren konstant verringert (siehe Abbildung 40). Im Neubau lag sie durchgehend unterhalb der Sanierung, d. h. pro eingesetzter Geldeinheit konnten weniger THG-Emissionen eingespart werden. Dies kann unter anderem auf die hohe Förderquote des Effizienzhaus 55 Standards zurückgeführt werden.

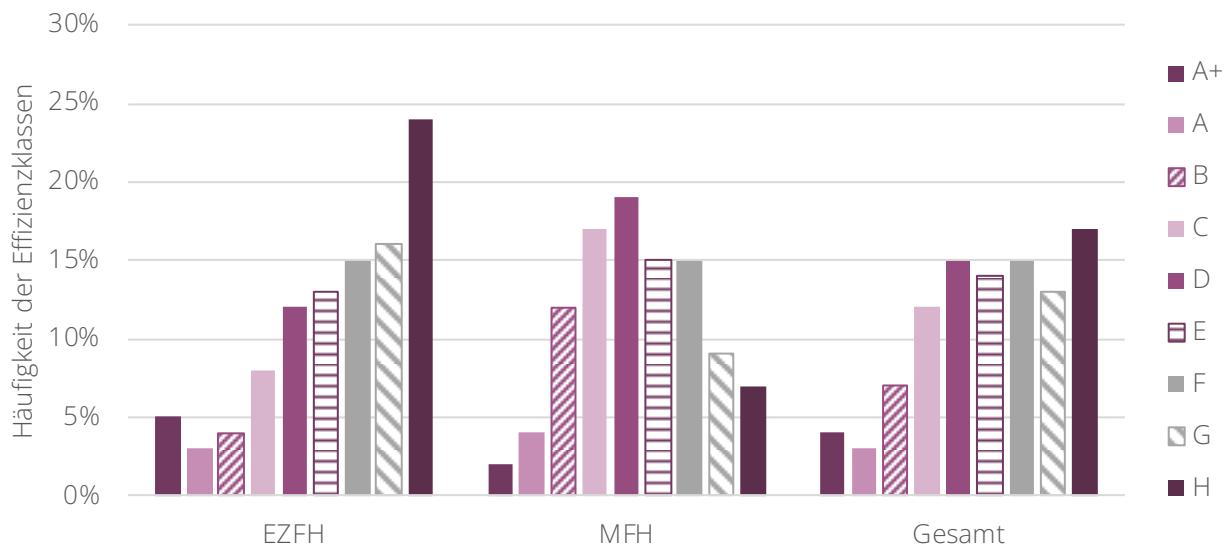
Abbildung 40: Entwicklung der Brutto-Fördereffizienz für Neubau und Sanierung von Wohngebäuden in den Jahren 2015 bis Q1 2021



Eigene Darstellung auf Basis von KfW-Förderreporten, Fördereffekten der KfW (nicht öffentlich) und eigener Analysen.

Niedrigere Werte spiegeln eine geringere Fördereffizienz wider. Die Brutto-Fördereffizienz ist nicht bereinigt um Faktoren wie Zusätzlichkeit oder Rebound-Effekte (siehe Infokasten 10) und liegt damit unterhalb der tatsächlichen Kosten einer eingesparten Tonne CO₂. Es wurde eine durchschnittliche Lebensdauer der Bauteile von 40 Jahren angenommen.

Abbildung 41: Häufigkeitsverteilung der Effizienzklassen nach Endenergiebedarf des deutschen Wohngebäudebestands

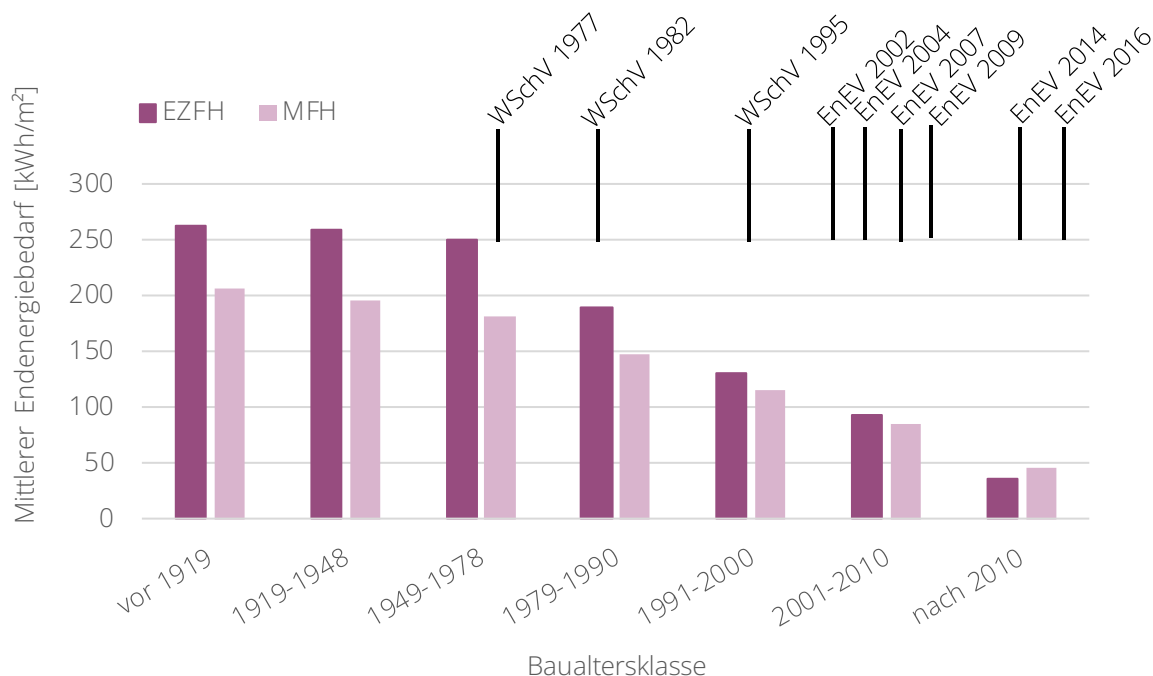


Eigene Darstellung. Daten basierend auf Krieger et al. (2019), Hochrechnung aus Stichprobe des Zensus und DIBt flächengewichtet.

Neubau

97 Neben Sanierungsaktivitäten im Gebäudebestand führten gestiegene Energieeffizienzstandards im Neubau (maßgeblich vorgegeben durch die Energieeinsparverordnung „EnEV“ und zuvor durch die Wärmeschutzverordnung „WSchV“) zu einer Verringerung der Energieintensität. Das durchschnittliche Neubauvolumen in den Dekaden 2001-2010 und 2011-2020 betrug jährlich etwa 23 800 000 m² Wohnfläche mit zwischenjährlichen Schwankungen (Destatis 2022h). Der kumulierte Wohnflächenzuwachs von 2001-2020 (476 000 000 m²) macht einen Anteil von ca. 12,5 % der gesamten Wohnfläche (3 968 000 m², Stand 2021; Destatis 2022d) aus. Der Abgang im selben Zeitraum betrug mit 51 000 Tsd. m² rund 9% des Neubauvolumens (Destatis 2022h). Die ordnungsrechtlichen Maßnahmen für den Neubau zeigen Wirkung anhand geringer spezifischer Energiebedarfe. So zeigt eine Stichprobenauswertung von 58 000 Energiebedarfsausweisen von Wohngebäuden, dass sich der mittlere flächenspezifische Endenergiebedarf, der auch Effizienzeffekte bei der Heiztechnologie berücksichtigt, von 128 kWh/m²a für Neubauten in der Dekade 1991-2000 auf 37 kWh/m²a für Neubauten in der Dekade ab 2010 verringerte. Dies entspricht einer Reduktion um mehr als 70 % innerhalb von 20 Jahren (siehe auch Abbildung 42). Die durchschnittlichen spezifischen Transmissionswärmeverluste, welche keine Effizienzeffekte bei der Heiztechnologie berücksichtigen, haben sich im selben Zeitraum von 0,6 auf 0,3 W/m²K halbiert. Höhere Gebäudestandards sind mit einem geringeren Endenergiebedarf bzw. -verbrauch pro m² verbunden (Krieger et al. 2019). In Abbildung 42 sind neben der Entwicklung der Endenergiebedarfe nach Baualtersklassen auch die Einführungen und Novellierungen der Wärmeschutzverordnung und der Energieeinsparverordnung aufgetragen.

Abbildung 42: Endenergiebedarf nach Baualtersklassen sowie Entwicklung der Mindestanforderungen durch WSchV und EnEV



Eigene Darstellung. Quelle: (Krieger et al. 2019), Auswertung Stichprobe DIBt, n = 57.918 (nur Bedarfsausweise).

- 98 Neubauten führen nur dann zu Emissionsminderungen, wenn zugleich alte Gebäude mit höheren THG-Emissionen ersetzt werden (d. h. abgerissen oder so umgenutzt werden, dass keine thermische Konditionierung der Nutz- bzw. Wohnflächen mehr erfolgt). Durch zusätzliche energieeffizientere Gebäude verschiebt sich jedoch mittel- bis langfristig die durchschnittliche Energieintensität über alle Gebäude hinweg, selbst wenn keine energetischen Veränderungen im Gebäudebestand erfolgen.

Infokasten 9

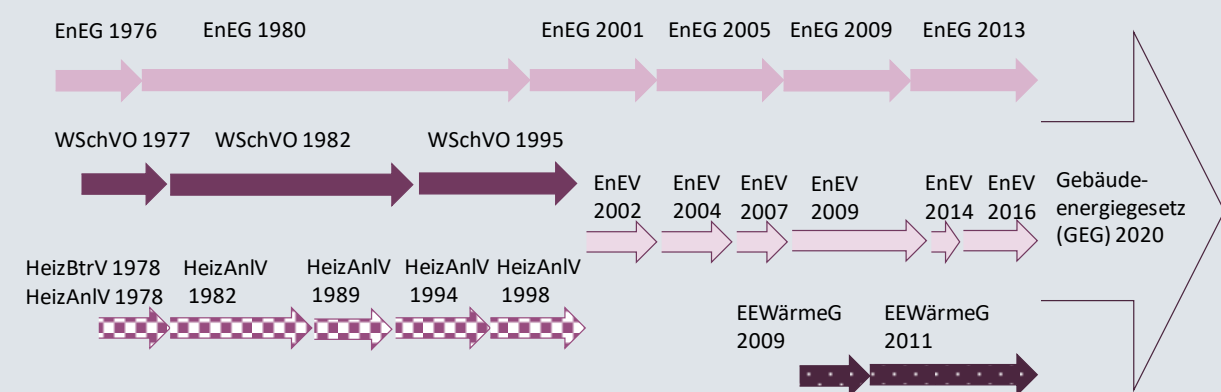
Wärmeschutzverordnung, Energieeinsparverordnung und Gebäudeenergiegesetz

Die erste Wärmeschutzverordnung („Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden“, WSchV) trat am 01.11.1977 als Folge des Energieeinsparungsgesetzes (EnEG) in Kraft. Dieses Gesetz entstand als Folge der ersten Ölpreiskrise 1973, in der die Preise für Rohöl stark anstiegen und damit eine weltweite Rezession ausgelöst wurde. Sie wurde zweimal novelliert, einmal am 01.01.1984 und am 01.01.1995.

In der ersten Wärmeschutzverordnung wurden das erste Mal maximale Wärmedurchgangskoeffizienten für den Neubau vorgeschrieben, um den Wärmebedarf von Gebäuden zu reduzieren. Die beiden Novellierungen verschärften die Wärmeschutzverordnung und führten einige methodische Änderungen ein, die unter anderem Lüftungswärmeverluste und solare Gewinne berücksichtigten.

Die Energieeinsparverordnung löste 2002 die Wärmeschutzverordnung und die Heizungsanlagenverordnung ab. Durch die Zusammenführung von Wärmeschutzverordnung und Heizungsanlagenverordnung wurde durch die EnEV ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt, welcher sowohl die energetische Qualität der Gebäudehülle als auch die Effizienz der genutzten Anlagentechnologie mit in die Bewertung einbezog. Als Basis dient der Primärenergieeinsatz eines Gebäudes. Mit diesem Ansatz war es möglich, Defizite in der Dämmung durch eine bessere Anlagendämmung auszugleichen. Die Energieeinsparverordnung wurde fünf Mal novelliert, bevor sie 2020 durch das Gebäudeenergiegesetz abgelöst wurde.

Abbildung 43: Überblick über Einführungen und Novellierungen der Wärmeschutzverordnung, Heizungsanlagenverordnung und der Energieeinsparverordnung



Eigene Darstellung nach energie-experten.org.

Heiztechnologie

99 Auch die eingesetzte Heiztechnologie beeinflusst die Energieintensität im Gebäudesektor. In den 2000er Jahren ist dabei insbesondere die Entwicklung des Einsatzes von Standard- und Niedertemperaturkesseln zu verstärkt Brennwertkesseln bei Erdgas und Heizöl zu nennen sowie die Entwicklung von Holzstandard- zu Holzvergaserkesseln/Pelletkesseln. In Abbildung 36 wurde die Marktentwicklung der verschiedenen Energieträger bereits dargestellt. Laut BDEW (2021a) sind 46,8 % der in Wohngebäuden eingesetzten Gas- und Ölheizungen Brennwertkessel, 42,2 % sind Niedertemperaturkessel. Der Anteil an besonders ineffizienten Standardkesseln liegt daher bei rund 11 %. Die Steigerung der Effizienz in der Heiztechnologie führte dazu, dass (pro Bedarf) weniger Energie zur Heizwärme- und Warmwasserbereitstellung aufgewendet werden musste. In der Literatur werden unterschiedliche Werte hinsichtlich der möglichen CO₂-Einsparung durch die Verwendung von Brennwert- gegenüber Niedertemperaturkesseln angegeben. Laut BDEW (2019) erzeugen diese rund ein Drittel geringere CO₂-Emissionen, nach Econsult (2018) liegen die Einsparungen von Brennwert- gegenüber Niedertemperaturkesseln jedoch eher im Bereich von 10 %. Rund 40 % der Heizkessel sind zudem älter als 20 Jahre und weisen aufgrund von Verschleiß geringere Effizienzen auf als bei Inbetriebnahme. Lediglich ein Drittel der Heizungsanlagen wurde in den vergangenen 10 Jahren erneuert (BDEW 2019). Laut Lopez et al. (2018b) waren die genannten Effizienzgewinne bei der Heiztechnologie in Kombination mit der Verbreitung von Zentralheizungen wegweisend für die Verringerung des Energieverbrauchs bei Betrachtung des Zeitraums von 2000-2016. Insgesamt bleibt festzuhalten, dass ein Wechsel zu Brennwerttechnik in der Vergangenheit zwar zu Emissionseinsparungen beitrug, hinsichtlich der Dimension der notwendigen THG-Einsparungen jedoch eine deutliche Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energieträger an der Wärmebereitstellung notwendig erscheint.

Nutzer:innenverhalten

100 Neben realisierten Effizienzgewinnen beim energetischen Gebäudezustand sowie der Heiztechnik wird aus der Literatur deutlich, dass Nutzer:innenverhalten einen wichtigen Einfluss auf den Heizenergieverbrauch von Gebäuden nimmt. Wie bereits in Infokasten 7 beschrieben, lässt sich das Nutzer:innenverhalten (nach Abzug des Unterschieds zwischen Labor- und Realbedingungen sowie unter Berücksichtigung der Diskrepanzen errechneter Energiekennwerte zwischen Gebäuden hoher und niedriger Energiebedarfe) annäherungsweise über die Differenz zwischen faktischem Energieverbrauch und rechnerischem Energiebedarf beschreiben (Sunikka-Blank und Galvin 2012; Sorrell et al. 2009). Nimmt diese Differenz über den Zeitverlauf im Mittel zu, liegen Hinweise für eine Änderung im Nutzungsverhalten, bspw. einer Erhöhung der Raumtemperatur oder eines verstärkten Warmwasserverbrauchs, vor. Führen realisierte Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz zu einem Nutzer:innenverhalten, das einen Teil der rechnerisch erwarteten Energieeinsparung zunichtemacht, so wird von einem Rebound-Effekt gesprochen (siehe Infokasten 10). Beispiele sind die Erhöhung der mittleren Raumtemperatur in energetisch sanierten Gebäuden, die Ausweitung der beheizten Wohnfläche oder ein geändertes Lüftungsverhalten mit längeren Fensteröffnungszeiten. In der Literatur wird insbesondere zwischen direkten und indirekten Rebound-Effekten unterschieden (Sorrell et al. 2009). Die Messung direkter und indirekter Rebound-Effekte ist nach wie vor aufgrund der schlechten Datenlage schwierig, die sich erst mit der umfassenden Verfügbarkeit von Smart Metern und der Freigabe der durch diese gewonnenen Daten verbessern kann (Madlener und Alcott 2011). Analysen von Madlener und Hauertmann (2011) nennen für die direkten Rebound-Effekte im Gebäudesektor eine Größenordnung von 21-43% als Synthese von Erkenntnissen verschiedener (internationaler) Studien. Gründe für Rebound-Effekte sind dabei vielfältig. Prinzipiell konterkarieren sie jedoch technische

Effizienzgewinne und erhöhen somit die Energieintensität bzw. den spezifischen Heizwärme- und Warmwasserverbrauch im Gebäudesektor. Neben Rebound-Effekten, die mit Maßnahmen der Effizienzsteigerung verbunden sind, gibt es jedoch wohlstandsbedingte Veränderungen des Nutzungsverhaltens, die zu einem Mehrverbrauch an Heizwärme und Warmwasser führen (Madlener und Alcott 2011).

Infokasten 10

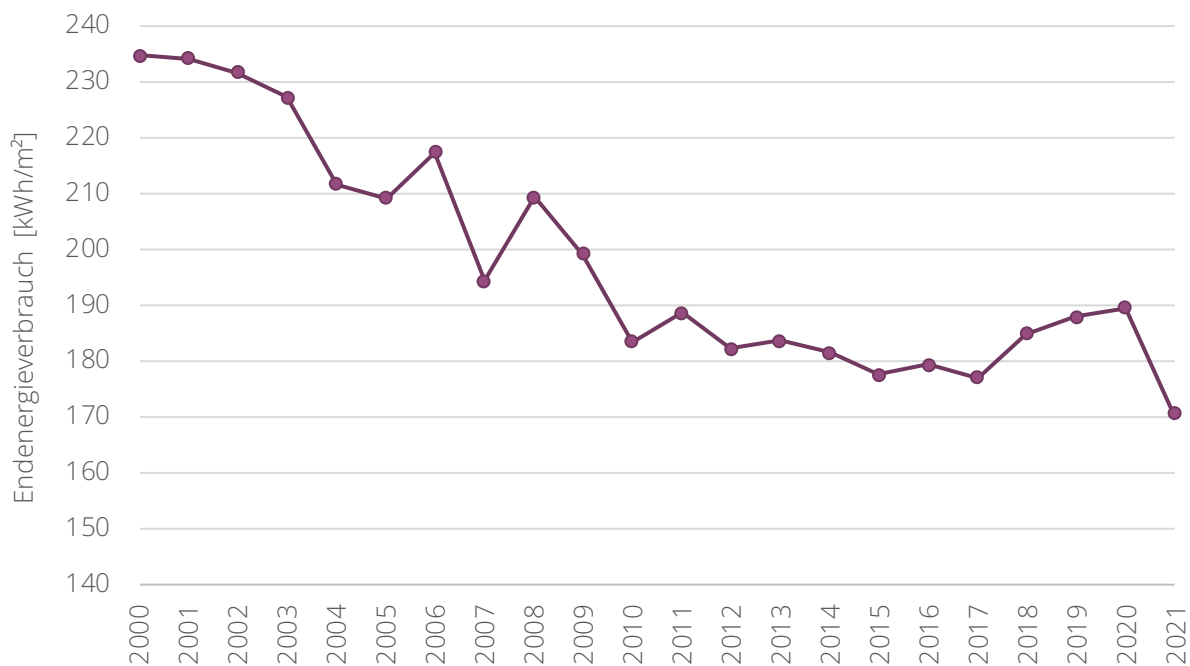
Rebound-Effekt

Unter direkten Rebound-Effekten wird ein erhöhter Verbrauch von Energiedienstleistungen nach Verbesserungen der Energieeffizienz bezeichnet. Energieeinsparungen, die durch Steigerung der Effizienz erfolgen könnten, werden dadurch in Teilen ausgeglichen (Sorrell et al. 2009). Die Ursachen von Rebound-Effekten sind multifaktoriell begründet. Diese können bspw. finanzieller Art sein, also eine Steigerung des Verbrauchs aufgrund von einer Vergünstigung der Energiedienstleistungen durch die technischen Einsparungen. Auch psychologische Gründe können eine Rolle spielen bspw. durch den Glauben, dass Umweltschäden aufgrund der technischen Effizienzsteigerung niedriger ausfallen. Zudem kann die Anschaffung effizienter bzw. auf erneuerbaren Energieträgern basierender Technologie als Rechtfertigung für emissionsintensives Verhalten an anderer Stelle dienen. Das Ausmaß von direkten Rebound-Effekten ist u. a. abhängig vom Anteil der Energiekosten an den Gesamtkosten der Energiedienstleistungen sowie der „Sichtbarkeit“ der Kosten für Verbraucher:innen (Sorrell et al. 2009). Bei Anstieg der Inanspruchnahme einer Energiedienstleistung treten jedoch auch Sättigungseffekte auf, bspw. bei Annäherung an den maximalen thermischen Komfort. Rebound-Effekte sind daher in sozioökonomisch schwächeren Haushalten tendenziell größer, da diese weiter vom komfortbezogenen Optimum entfernt sind (Milne und Boardman 2000; auch diskutiert als „Prebound-Effekt“, siehe Sunikka-Blank und Galvin 2012). Die Messung direkter Rebound-Effekte gestaltet sich meist schwierig, da dies mit einer kontrafaktischen Schätzung des Energieverbrauchs (Energieverbrauch ohne Effizienzverbesserung sowie Energieverbrauch nach Effizienzverbesserung ohne Verhaltensänderung) verglichen werden muss (Sorrell et al. 2009). Indirekte Rebound-Effekte implizieren, dass Effizienzsteigerungen in einem Bereich Auswirkungen auf Verbrauchsverhalten an anderer Stelle haben (z. B.: Einsparungen an Wärmekosten werden für eine Flugreise ausgegeben). Für einen Überblick siehe bspw. Sorrell et al. (2009); Van den Bergh (2011); Jenkins et al. (2011) und Dütschke et al. (2018). Neben Rebound-Effekten, die mit Maßnahmen der Effizienzsteigerung verbunden sind, gibt es jedoch auch davon unabhängige Änderungen im Verbrauchsverhalten. Ein höherer Konsum ist dabei häufig auf allgemeine Wohlfandeffekte (steigende Einkommen und Komfortansprüche) zurückzuführen (Madlener und Alcott 2011). Rebound-Effekte von anderweitigen Veränderungen im Verbrauchsverhalten zu separieren, gestaltet sich als schwierig (Sorrell et al. 2009). Jedoch führten beide Effekte in der Vergangenheit dazu, dass Energieeinsparungen durch technische Effizienzsteigerungen in Teilen kompensiert wurden (Madlener und Alcott 2011; Thomas 2012).

- 101 In Abbildung 44 ist die Entwicklung des Endenergieverbrauchs von Haushalten pro m² Wohnfläche temperaturbereinigt dargestellt. Dabei fällt auf, dass nicht nur die Energieintensität (PEV/m²) ab 2017 anstieg und einen emissionssteigernden Einfluss ausübt, sondern auch der Endenergieverbrauch pro m² ab diesem Zeitpunkt (bis zu einem erneuten Abfall in 2021) wieder leicht steigt. Dies ist ein weiteres Indiz dafür, dass private Haushalte ab 2017 ein gesteigertes Verbrauchsverhalten bzgl. Raumwärme und Warmwasser aufweisen. Während also aufgrund des Zubaus neuer Wohngebäude mit hohen

Energiestandards, der Sanierung von Bestandgebäuden und einer insgesamt höheren primärenergiebezogenen Effizienz der eingesetzten Heizungsanlagen ein kontinuierliches Absinken der Energieintensität zu rechnen wäre, zeigt die beobachtete Entwicklung ein Gleichbleiben bzw. leichtes Ansteigen dieses Werts in den vergangenen 10 Jahren. Dies lässt den Schluss zu, dass die rechnerisch erwartbare Reduktion des Energiebedarfs (sowie Energieverbrauchs) praktisch vollständig durch geändertes Nutzer:innenverhalten kompensiert wurde.

Abbildung 44: Entwicklung des Endenergieverbrauchs privater Haushalte für Raumwärme und Warmwasser, temperaturbereinigt



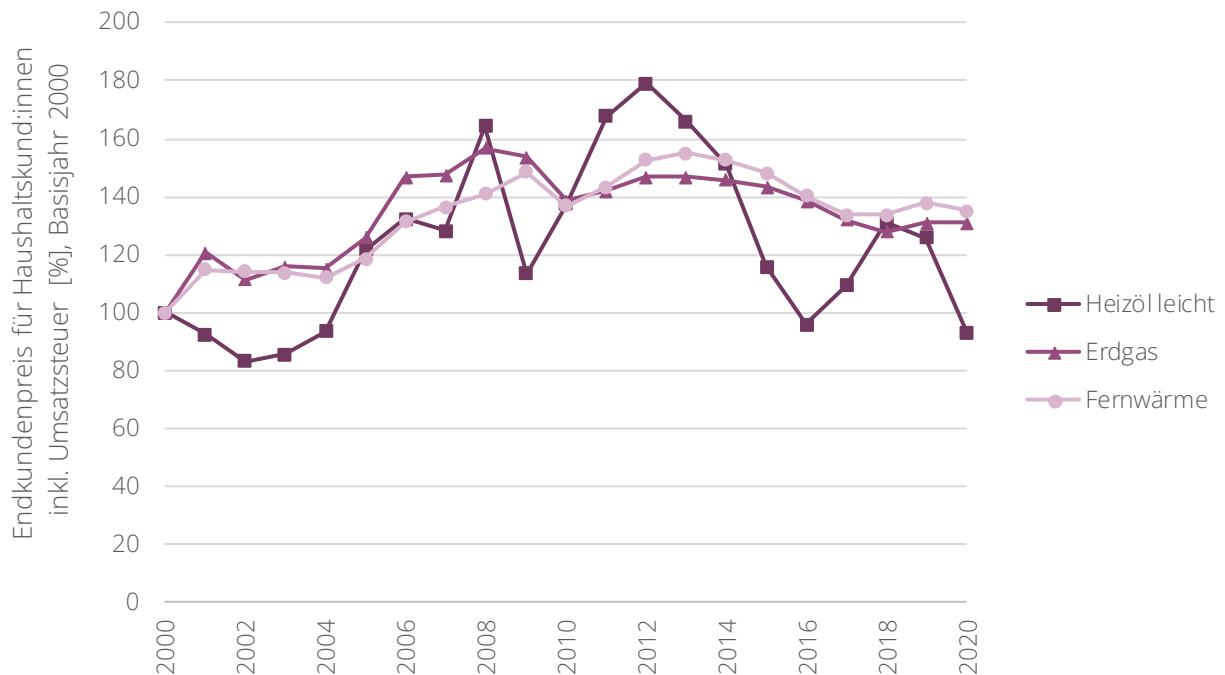
Eigene Darstellung auf Basis von AGEB (2021a) und Destatis (2022k). Daten wurden temperaturbereinigt.

Preiseffekte

- 102 Preiseffekte spielen für den Energieverbrauch ebenfalls eine wichtige Rolle. Verschiedene Studien haben für Deutschland kurzfristige stark unelastische Preiselastizitäten für die Heizenergienachfrage zwischen -0,4 und -0,1 ermittelt (Mellwig et al. 2022). Eine kurzfristige Elastizität von -0,25, welche in Mellwig et al. (2022) auf Basis eines empirischen Samples geschätzt wurde, würde bedeuten, dass bei einer Verdoppelung der Heizenergiepreise die Nachfrage um ca. 16 % sinken würde. Durch die stark unelastische Nachfrage erfolgt der Rückgang des Verbrauchs insbesondere bei einer hohen Preissteigerung in einem geringeren Maße.
- 103 Seit Ende 2021 sind die Energiepreise für fossile Energieträger wieder sehr stark angestiegen (Destatis 2022c), nachdem sie in den 10 Jahren und insbesondere im Zeitraum 2013-2018, zuvor inflationsbereinigt sogar gesunken waren (siehe Abbildung 45). In den Nullerjahren waren die Preise hingegen schon einmal kräftig angestiegen. Dabei weist insbesondere der reale Endverbraucherpreis für Heizöl starke Schwankungen auf.

- 104 In den Betrachtungszeiträumen 2000-2009 und 2010-2021 lassen sich Parallelen zwischen der realen Energiepreisentwicklung (BMWK 2022a) und der Entwicklung der Energieintensität erkennen. Eine bis 2010 sinkende Energieintensität hatte eine emissionsmindernde Wirkung. In einem ähnlichen Zeitraum (2000-2009) stiegen die realen Heizenergiekosten und erreichten für Erdgas im Jahr 2008 ihr Maximum. Ab 2010 blieben sowohl die Energieintensität (PEV/Wohnfläche) als auch die realen Heizenergiepreise relativ konstant bis 2020, letztere sanken tendenziell. Eine unterstützende Wirkung von Energiepreisen auf Energieeinsparungen blieb somit aus.
- 105 Darüber hinaus ist ein augenscheinlicher Zusammenhang zwischen Energieträgerpreisen und Absatzzahlen verschiedener Heiztechniken erkennbar. Solarthermieranlagen wurden beispielsweise insbesondere im Jahr 2008 mit einem deutlichen Unterschied zum Jahr 2007 verstärkt zugebaut (Prognos et al. 2016). 2008 war dabei von besonders hohen Preisen für Heizöl und Erdgas geprägt (siehe Abbildung 45). Zudem nimmt in den Jahren 2009-2012 mit steigenden Heizölpreisen der Absatz von Ölheizungen kontinuierlich ab (siehe Abbildung 36, BDH (2021)).

Abbildung 45: Entwicklung der realen Endverbraucherpreise für Heizöl, Erdgas und Fernwärme



Mellwig et al. (2022) auf Basis der BMWi Energiedaten 2021, die nominellen Endenergiepreise wurden inflationsbereinigt mit dem nationalen Verbraucherpreisindex (2015=100), Preise für Haushaltskund:innen inkl. MWSt; Basisjahr Index 2000.

2.4.3.2 Ursachen und Trends – Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)

- 106 Für die Entwicklung der THG-Emissionen im Gebäudesektor - GHD sind insbesondere drei Komponenten relevant. Der Parameter „Emissionsintensität“ (THG/PEV) wird analog zum Gebäudesektor - Haushalte berechnet. Die „Energieintensität“ wird abweichend von Gebäudesektor - Haushalte als Primärenergieverbrauch (Gebäude aus GHD) pro Bruttoinlandsprodukt statt PEV pro Wohnfläche berechnet. Hintergrund ist, dass keine fortlaufenden Informationen zu thermisch

konditionierten Nichtwohngebäuden und deren Nutzflächen vorliegen. Als dritter Parameter der Dekomposition wird anstatt der durchschnittlichen Wohnfläche bzw. Wohnfläche pro Kopf der Parameter BIP verwendet. Grund hierfür ist, dass neben den fehlenden Informationen zu den thermisch konditionierten Nichtwohngebäuden der Bezug auf die Bevölkerungsgröße keine gute erklärende Variable für die GHD-Aktivitäten darstellt.

- 107 Basierend auf den Erkenntnissen der Komponentenzerlegung der THG-Entwicklung des Gebäudesektors werden im Folgenden Faktoren näher beleuchtet, die mit Veränderungen im BIP sowie mit der Emissions- und Energieintensität zusammenhängen. Wie beim Bereich privater Haushalte ist auch hier zu beachten, dass die THG-Emissionen im Falle der Verwendung von elektrischen Speicherheizungen, Wärmepumpen oder der Fernwärmebereitstellung im Sektor Energiewirtschaft bilanziert werden und es dadurch zu einer Verlagerung der THG-Emissionen zwischen den Sektoren kommt.

BIP

- 108 Die Komponente BIP weist in beiden Dekaden einen treibhausgassteigernden Effekt in vergleichbarem Umfang von 3,5 Mt CO₂-Äq. (2000-2010) bzw. 3,9 Mt CO₂-Äq. (2011-2020) auf. Der Unterschied zwischen den Dekaden kann weitgehend durch das unterschiedliche Wachstum des BIP erklärt werden. So wuchs das BIP (nicht inflationsbereinigt) von 2000 bis 2010 um 23 %, während es zwischen 2011 und 2020 nur um 20 % wuchs. Damit ergeben sich trotzdem leicht unterschiedliche Zusammenhänge zwischen THG-Effekt und BIP-Wachstumspunkt von durchschnittlich 0,167 Mt CO₂-Äq. pro BIP-Wachstumspunkt in 2000 bis 2010 und durchschnittlich 0,15 Mt CO₂-Äq. pro BIP-Wachstumspunkt zwischen 2011 bis 2020. Eine mögliche Ursache für diesen rückläufigen Zusammenhang kann die Verlagerung der Wertschöpfung von Gewerbebranchen mit hohen Raumwärmebedarfen hin zu Gewerbebranchen mit geringen Raumwärmebedarfen sein, wie z. B. durch eine Verlagerung von Einzelhandels- zu Online-Versandaktivitäten.
- 109 Bei der jährlichen Betrachtung der Entwicklung dieser Dekompositionskomponente fällt auf, dass es zu stärkeren Schwankungen als der Komponente Wohnfläche pro Kopf bei den Gebäuden privater Haushalte kommt. Insbesondere die Rezessionsjahre 2009 und 2020 wirken sogar entgegen dem langfristigen Trend emissionsmindernd.

Emissionsintensität

- 110 Die Emissionsintensität zeigt einen sehr gleichmäßig abnehmenden Verlauf. Gründe hierfür sind vor allem die bereits erwähnten Energieträgerwechsel. Insbesondere von Heizöl zu Erdgas, Biomasse und Nah-/Fernwärme. Der Anteil der biogenen Festbrennstoffe, d. h. vor allem Holzhackschnitzel und Pellets, am Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser lag 2020 im GHD-Bereich mit 10,7 % etwas geringer als im Haushaltsbereich mit 12,0 % (eigene Berechnung, basierend auf AGEE-Stat und UBA (2021)).
- 111 Der Anteil erneuerbarer Energieträger für Wärme und Kälte am Endenergieverbrauch ist im GHD-Bereich seit 2003 stärker als im Haushaltsbereich oder in der Industrie gestiegen (AGEE-Stat 2022). Insbesondere im Haushaltsbereich stagniert er seit 2012 nahezu, während er im GHD-Bereich kontinuierlich weitergewachsen ist und mit 21 % im Jahr 2020 erstmals über dem Wert für Haushalte lag (BDEW 2022c).

Energieintensität

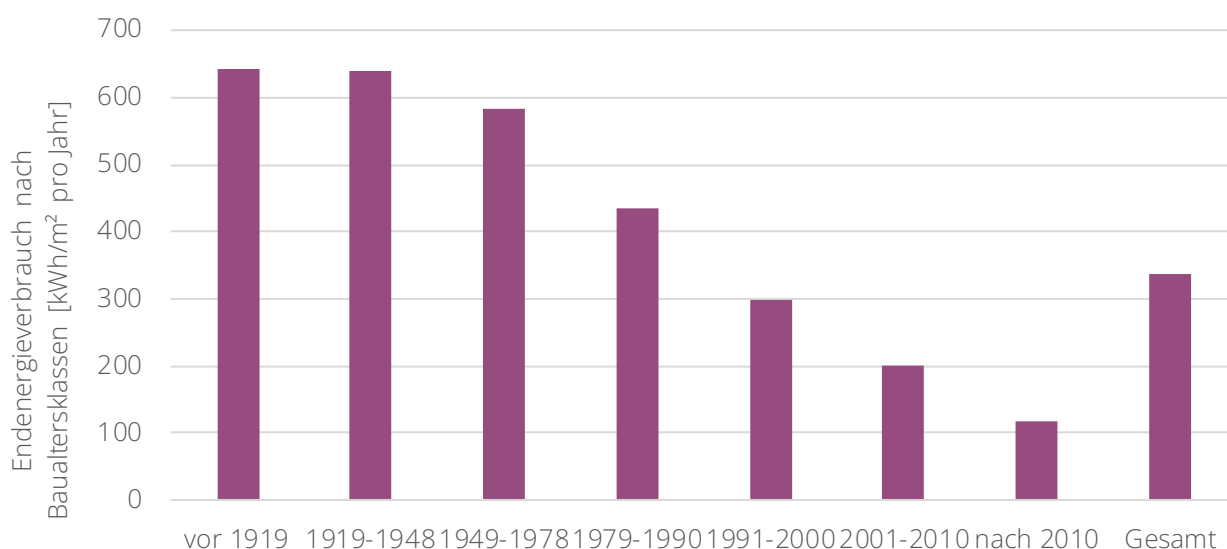
- 112 Die Energieintensität, also das Verhältnis zwischen PEV und BIP, wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst: den (durchschnittlichen) energetischen Gebäudezustand (Gebäudeenergiebedarf), die eingesetzte Heiztechnik bzw. deren Effizienz, das Nutzer:innenverhalten und BIP-Entwicklungen, die nicht komplett mit der Gebäudebelegung und -nutzung korrelieren.
- 113 Wie aus der Komponentenzerlegung (siehe Abbildung 33) ersichtlich und beschrieben, hatte die (temperaturbereinigte) Energieintensität seit 2000 bis 2019 tendenziell einen emissionsmindernden Einfluss, wobei sich der Verlauf ähnlich ungleichmäßig wie im Haushaltsbereich darstellt. Erst ab 2014 ist ein relativ stetiger abnehmender Trend zu erkennen, der sich im Jahr 2020 in eine Zunahme – jedoch nicht so stark, wie im Haushaltsbereich – umgekehrt hat. Der geringere Effekt der Energieintensität in 2020 im Bereich GHD als in Haushalten kann unter anderem damit erklärt werden, dass sich Heiz- und Wärmebedarfe in GHD-Gebäuden in Folge einer Verlagerung des Arbeitsplatzes von der Arbeitsstätte ins Homeoffice durch die Covid-19-Pandemie, verringert haben. Für die Jahre 2006 und 2008 lassen sich ähnlich starke Ausreißer erkennen (siehe Abbildung 33) wie im Haushaltsbereich, die auf ähnliche Effekte (z. B. hohe Gas- und Ölpreise im Jahr 2007) zurückgeführt werden können. Interessant ist, dass die Energieintensität in den Jahren 2009 und 2010 weniger stark bei GHD absinkt als bei den Haushalten. Dies ist damit zu erklären, dass sich Nachfrage- bzw. Verbrauchsschwankungen infolge konjunktureller Entwicklungen (wie z. B. der Immobilienkrise 2009 und der Covid-19-Pandemie 2020) für den GHD-Bereich weniger stark auswirken, da der Nenner der Energieintensität verschieden ist. Bei der Energieintensität im GHD-Sektor zeigen sich konjunkturelle Schwankungen weniger deutlich als bei den Haushalten, da sie sich auf den Zähler (Verbrauch) und Nenner (BIP) gleichermaßen auswirken.
- 114 Eine flächendeckende nationale repräsentative Erhebung zu thermisch konditionierten (beheizten und/oder klimatisierten) Nichtwohngebäuden (NWG) wurde erstmal 2022 veröffentlicht (IWU et al. 2022). Diese zeigt, dass nur ein geringer Anteil von ca. 10 % der gesamten NWG „thermisch relevante“ NWG sind und sie somit in den Anwendungsbereich des GEG fallen. Weitere 20 % werden als „sonstig thermisch konditionierte“ NWG bezeichnet, d. h., dass sie nicht unter den Anwendungsbereich des GEG fallen, aber z. B. phasenweise, wie Gebäude für religiöse Zwecke, oder indirekt konditioniert werden. Somit werden 70 % der NWG gar nicht konditioniert, sodass aus den nationalen Statistiken zu NWG, wie z. B. zu Neubau oder Nutzfläche, keine validen Rückschlüsse auf den Gebäudesektor – GHD gezogen werden können. Erschwerend kommt hinzu, dass auch die dataNWG³⁴-Erhebung keine Differenzierung in NWG-Gebäuden, die dem GHD-Sektor und dem Industriesektor zuzuschreiben sind, vornimmt. Daher ist davon auszugehen, dass in den folgenden Daten bzw. Beschreibungen auch teilweise NWG aus dem Industriesektor enthalten sind.
- 115 Die Altbauten mit Baujahr bis 1978 an allen GEG-relevanten thermisch konditionierten NWG machen einen hohen Anteil von 58 % aus (Wohngebäude 59 %). 38 % entfallen auf den Zwischenbau mit Baujahr zwischen 1979 und 2009. Der Rest wurde ab 2010 errichtet (IWU et al. 2022). Die Verteilung der Gebäude auf die drei Baualtersklassen ist somit nahezu identisch, wie die der Wohngebäude (IWU et al. 2018). Die Sanierungsrate gemessen als Vollsanierungsäquivalent betrug in den Jahren 2010-2019 für alle GEG-relevanten thermisch konditionierten NWG 0,7 % pro Jahr, bei Altbauten 1,1 % pro Jahr und liegt damit noch unter den Werten für Wohngebäude (allgemeine Sanierungsrate 1 % pro Jahr, Altbauten 1,4% pro Jahr), die im Zeitraum 2010 – 2016 erhoben wurde. Dabei zeigt sich bei der NWG-Erhebung, dass pro Jahr 1,9 % aller Außenwandflächen von NWG bzw. 2,2 % bei Altbauten ohne

³⁴ Die dataNWG ist die Forschungsdatenbank für NWG, die im Zuge eines Projekts des IWU, des Leibniz-Instituts für ökologische Raumentwicklung und der Bergischen Universität Wuppertal entwickelt wurde (<https://www.datanwg.de/>).

gleichzeitige Dämmung saniert wurden (IWU und Hörner 2021). Auch der Sanierungsfortschritt bei Altbauten als mittlerer Anteil der nachträglich gedämmten Bauteilfläche (bezogen auf die Gesamtfläche der Gebäudehülle) liegt bei den Gebäuden privater Haushalte mit 34,8 % (Stand 2016; IWU et al. 2018) etwas höher als bei NWG 30,3 % (Stand 2019; IWU und Hörner 2021).

- 116 Wie im Wohngebäudebereich zeigen sich auch im Nichtwohngebäudebereich deutliche Rückgänge der flächenspezifischen Endenergiebedarfe infolge der Einführung der Wärmeschutzverordnung ab 1977 und weiterer ordnungsrechtlicher Instrumente und deren Verschärfungen bis hin zum GEG, anhand der Auswertung einer Stichprobe von Energieausweisen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Stichprobengröße der NWG deutlich kleiner ist und die Bedarfe aufgrund verschiedener Nutzungsarten deutlich heterogener sind als bei Wohngebäuden. Darüber hinaus ist in den NWG-Bedarfsausweisen im Gegensatz zu den Bedarfsausweisen von Wohngebäuden auch der Bedarf für Beleuchtung, Lüftungsanlagen und Klimatisierung enthalten, sodass ein direkter Vergleich nicht möglich ist. In Abbildung 46 ist der Rückgang des flächenspezifischen Endenergiebedarfs dargestellt. In den Baualtersklassen zwischen 1991-2000, 2001-2010 und nach 2010 erfolgte je eine Reduktion um etwa 60 %. Diese Verminderung ist neben den verschärften Neubauanforderungen und Sanierungsaktivitäten, die sich in der Komponente Energieintensität widerspiegeln, auch teilweise Effizienzsteigerungen bei Stromanwendungen für Beleuchtung, Lüftungsanlagen und Klimatisierung zuzuschreiben, die in der Energiewirtschaft und nicht im Gebäudesektor bilanziert werden, und sich somit nicht auf die Energieintensität, wie in diesem Gutachten definiert, auswirken.

Abbildung 46: Mittlerer Endenergiebedarf von Nichtwohngebäuden nach Baualtersklasse



Eigene Darstellung auf Basis von Krieger et al. (2019). Auswertung einer Stichprobe des Deutschen Instituts für Bautechnik n = 16.995 (nur Bedarfsausweise).

- 117 Im Vorhaben dataNWG wurde auch die Zusammensetzung der Wärmeerzeuger und Energieträger zur Wärmeerzeugung erhoben. Dominant ist auch hier Erdgas mit einem Anteil von 47,7 % (Flüssiggas 3,4 %), gefolgt von Heizöl mit 19,2 %, Nah- und Fernwärme mit 15,7 % und Biomasse/Holz/Biogas mit 7,4 % als Hauptenergieträger der Wärmeerzeugungsanlagen. Mit Strom werden nur 6,6 % der NWG beheizt, wovon nur in weniger als der Hälfte der Fälle Wärmepumpen zum Einsatz kommen. Ansonsten

erfolgt eine direktelektrische Beheizung (eigene Auswertungen auf Basis von IWU et al. 2022). Gebäudenahe KWK, d. h. nicht über Nah- oder Fernwärme bereitgestellt, macht nur einen geringen Anteil an allen Wärmeerzeugern in Höhe von 2,6 % aus.

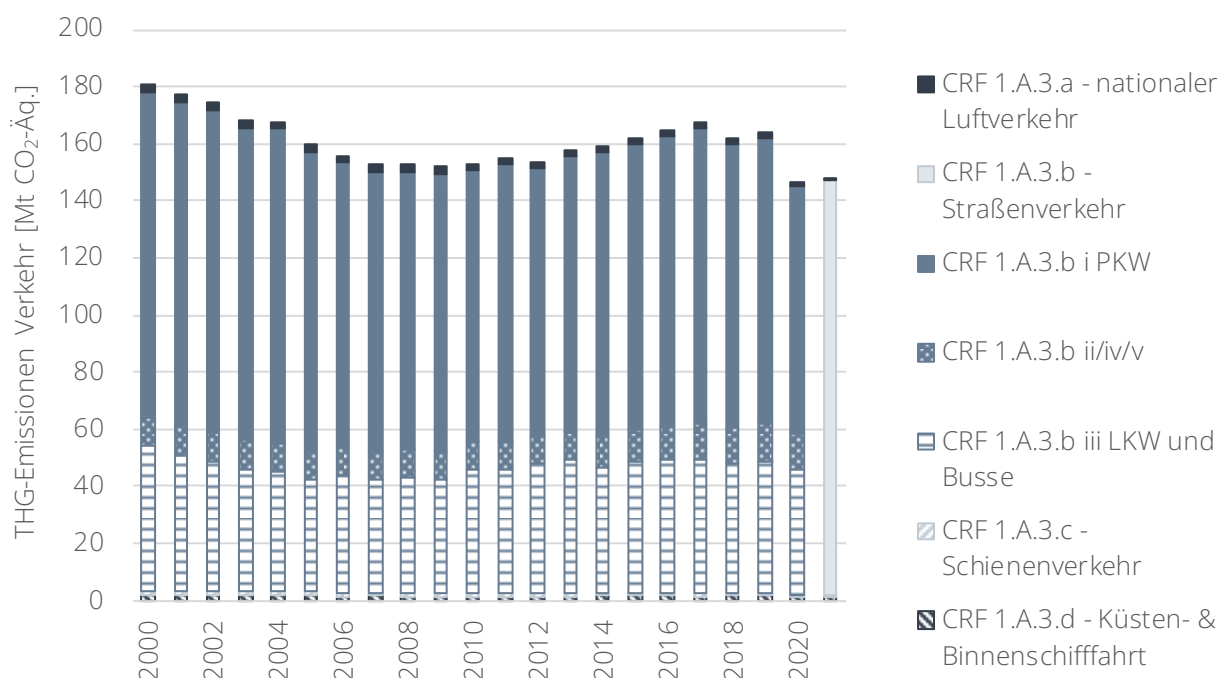
- 118 Die Modernisierungsrate der Wärmeerzeuger lag von 2010 bis 2019 mit 2,3 % pro Jahr aller GEG-relevanter NWG deutlich über der Rate für die Sanierung der Gebäudehülle (IWU et al. 2022). Jedoch lässt sich innerhalb dieses Zeitraums keine klare Entwicklung (weder Steigerung noch Absenkung) der Rate erkennen. Entscheidend ist jedoch, welche Wärmeerzeuger hierbei gegeneinander getauscht wurden. Wenn vorher ein Gaskessel verbaut war, wurde in 80 % der Fälle wieder ein Gaskessel eingebaut, in knapp 5 % auf KWK umgestellt und bei ca. 11 % auf Nah- oder Fernwärme gewechselt (IWU et al. 2022). Welche Art von Gaskesseln gegeneinander getauscht wurden, ist nicht näher untersucht worden. Allerdings ist aufgrund der durchschnittlichen Lebensdauern von Gaskesseln und der Marktdurchdringung von Gasbrennwertgeräten davon auszugehen, dass es teilweise zu einer Umstellung von Konstant- und Niedertemperaturkesseln auf Brennwertkessel gekommen ist, die durch die Effizienzgewinne zur Reduktion der Energieintensität im GHD-Sektor beiträgt. Ähnliche Effekte dürften beim Ausbau von Öl-Heizungen eine Rolle spielen. Hier wurde in 34 % der Fälle auf Gaskessel, in 14 % auf KWK und 26 % auf Biomasse-Heizkessel gewechselt (IWU et al. 2022). Diese Wechsel werden sich aber vor allem auf die Komponente „Emissionsintensität“ positiv ausgewirkt haben. Zwar kam es, wie bereits beschrieben, zu Wechseln von Gas zu Fernwärme, aber im gleichen Zeitraum kam es auch zu einem Wechsel von Nah- oder Fernwärme zu Gaskesseln in 39 % der Fälle. Weitere Wechselbewegungen, z. B. von und zu Wärmepumpen, lassen sich aufgrund der begrenzten Stichprobenanzahl nicht valide abschätzen (IWU et al. 2022).
- 119 Einen emissionsmindernden Einfluss auf die Sektorbilanz und die Energieintensität, jedoch nicht auf die Gesamt-THG-Bilanz, hat der Rückgang der Fernwärme am Wärmebedarf im GHD-Bereich. Dieser ging wie beschrieben primär mit einer Umstellung auf Gaskessel einher, sodass die Energiebedarfsdeckung nicht mehr über die dem energiewirtschaftlichen Sektor zugeschriebene Fernwärme erfolgt, sondern dem Gebäudesektor zugerechnet wird. Somit stieg der Primärenergieverbrauch im Gebäudesektor bei unverändertem BIP. Diese Entwicklung erfolgte vor allem im Zeitraum 2010-2020, indem der Fernwärmeverbrauch von jährlich 38 TWh pro auf 7 TWh zurückging, während er 2000 noch bei 25 TWh pro Jahr lag (BMWK 2022a).
- 120 Im NWG-Neubau kam es zwar zu einem starken Anstieg von Wärmepumpen mit einem Anteil von weniger als 1 % in 2000, 9 % in 2010 auf über 23 % in 2020 (eigene Berechnungen auf Basis von Destatis 2022b). Dieser Anteil liegt jedoch noch deutlich geringer als im Wohngebäudebereich. Eine nahezu identische Entwicklung zeigt der Fernwärmeanteil im Neubau. Dieser ist im NWG-Neubau in den letzten Jahren deutlich gestiegen, wohingegen die Absatzmengen jedoch stark rückläufige Zahlen verbuchen. Dies hängt einerseits mit den geringen Verbräuchen im Neubau zusammen, andererseits muss es jedoch auch eine signifikante Abwanderung im Bestand gegeben haben, ggf. lokal bedingt durch Rückbau von Netzen.

2.5 Verkehr

2.5.1 Entwicklung der Treibhausgasemissionen

121 Bei der Analyse der THG-Emissionen im Verkehrssektor sollen neben der Betrachtung der Gesamtemissionen des Sektors zwei Aspekte des Straßenverkehrs stärker beleuchtet werden, nämlich die THG-Emissionen aus der Pkw-Nutzung und aus dem Güterverkehr. Die folgende Abbildung 47 zeigt zunächst die Entwicklung der Emission für den gesamten Sektor. Dabei sind im Verkehrssektor die Jahre 2020 und 2021 vor dem Hintergrund der Maßnahmen zur Eindämmung der Covid-19-Pandemie zu betrachten.

Abbildung 47: Entwicklung der THG-Emissionen des Sektors Verkehr nach Bundes-Klimaschutzgesetz im Zeitraum 2000-2021



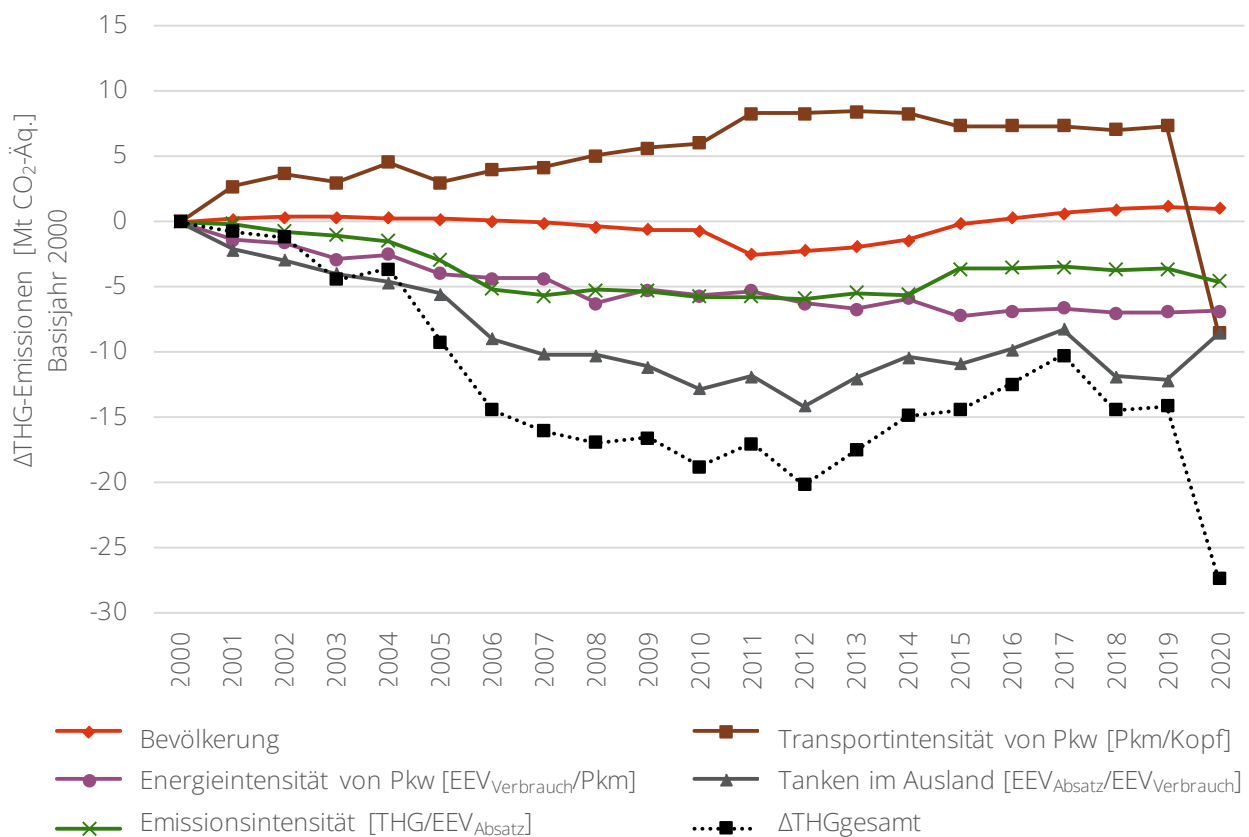
Eigene Darstellung auf Basis der Trendtabellen des Treibhausgasinventars 2022 (UBA 2022c). Die Daten für das Jahr 2021 basieren auf der Berechnung der Vorjahresemissionen, Inventardaten liegen zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vor. Deswegen kann für das Jahr 2021 auch keine Aufteilung innerhalb der CRF-Kategorie 1.A.3.b vorgenommen werden.

122 Die THG-Emissionen im Sektor Verkehr sind im Zeitraum von 2000 bis 2009 um 16 % gesunken, um dann bis zum Jahr 2017 wieder um 10,5 % anzusteigen. Insgesamt sind sie in den Jahren von 2000 bis 2019 von 181 Mt CO₂-Äq. auf 164 Mt CO₂-Äq. bzw. bis zum Jahr 2021 auf 148 Mt CO₂-Äq. abgesunken. Das entspricht einer Reduktion um 9,3 % bis zum Jahr 2019 bzw. 18,2 % bis zum Jahr 2021 gegenüber dem Basisjahr 2000. Ein starker Rückgang der THG-Emissionen ist wegen der Maßnahmen zur Eindämmung der Covid-19-Pandemie im Jahr 2020 zu verzeichnen (ERK 2021b). Im Jahr 2021 ergab sich wieder ein leichter Anstieg zum Vorjahr, die THG-Emissionen blieben aber aufgrund der andauernden Covid-19-Pandemie und der gestiegenen Energiepreise (ERK 2022b) unter dem Niveau des Jahres 2019.

2.5.2 Dekompositionsanalyse

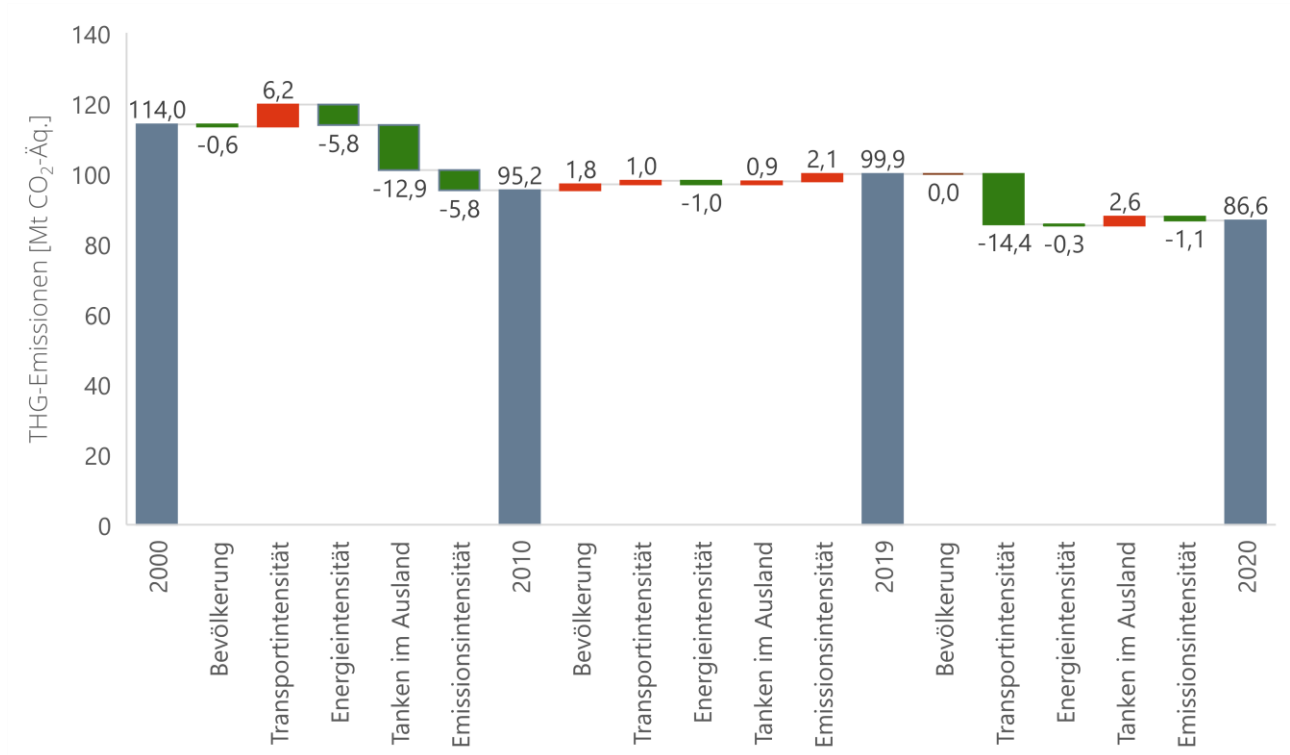
123 Die Dekompositionsanalyse der THG-Emissionen des Sektors Verkehr fokussiert sich auf die THG-Emissionen des Straßenverkehrs, welche rund 97 % (für das Jahr 2019) der Gesamtemissionen des Sektors darstellen. Hierbei wird unterschieden zwischen den THG-Emissionen der Pkw-Nutzung (CRF-Kategorie 1.A.3.b.i), die mit circa 60 % den größten Teil der Gesamtemissionen des Sektors ausmachen und den THG-Emissionen der Lastkraftwagen (Lkw) und Busse (CRF-Kategorie 1.A.3.b.iii), die den zweitgrößten Anteil mit knapp 30 % der THG-Emissionen des Sektors umfasst (siehe Abbildung 47). Die THG-Emissionen aus der drittgrößten CRF-Kategorie der leichten Nutzfahrzeuge (CRF-Kategorie 1.A.3.b.ii) wird hier nicht berücksichtigt und umfasste 7 % im Jahr 2019. Insgesamt werden in den beiden Dekompositionen somit 90 % der THG-Emissionen des Sektors abgedeckt.

Abbildung 48: Dekomposition der THG-Emissionen vom Pkw-Verkehr - Änderungen im Vergleich zu 2000



Eigene Darstellung. Weitere Details zu den verwendeten Daten finden sich in Tabelle 7. In der Komponente Tanken im Ausland werden jeweils nur der Kraftstoffverbrauch und -absatz im Inland berücksichtigt. Im Inland verbrauchter Kraftstoff enthält dabei auch die im Ausland getankte, jedoch innerhalb Deutschlands verbrannte Menge Kraftstoff. So kann ermittelt werden, wie stark Absatz und Verbrauch (durch Tanken im Ausland) voneinander abweichen. Siehe hierzu auch Infokasten 11 für nähere Erläuterungen.

Abbildung 49: Dekomposition der THG-Emissionen vom Pkw-Verkehr – aggregierte Betrachtung der Zeiträume 2000-2010, 2010-2019 sowie 2019-2020



Eigene Darstellung. Weitere Details zu den verwendeten Daten finden sich in Tabelle 7.

124 Abbildung 48 und Abbildung 49 zeigen die Dekomposition der jährlichen bzw. zeitlich aggregierten THG-Emissionen des Pkw-Verkehrs ausgehend vom Basisjahr 2000 in verschiedene Komponenten. Diese umfassen Bevölkerungsentwicklung (Anzahl Einwohner:innen), Transportintensität (Personenkilometer pro Kopf), Energieintensität von Pkw ($EEV_{\text{Verbrauch}}$ pro gefahrenem Personenkilometer) welche als Effizienz verstanden werden kann, Tanken im Ausland (Verhältnis zwischen EEV_{Absatz} und $EEV_{\text{Verbrauch}}$ - siehe Infokasten 11 zur näheren Erläuterung) und Emissionsintensität (THG/EEV_{Absatz}) welche durch unterschiedliche Bilanzierung als Anteil der biogenen Kraftstoffe verstanden werden kann. Die Aggregation wurde für die Zeiträume 2000-2010, 2010-2019 sowie den gesondert ausgewiesenen Abschnitt 2019-2020 aufgrund der Covid-19-Pandemie vorgenommen.

Infokasten 11

Tankverhalten

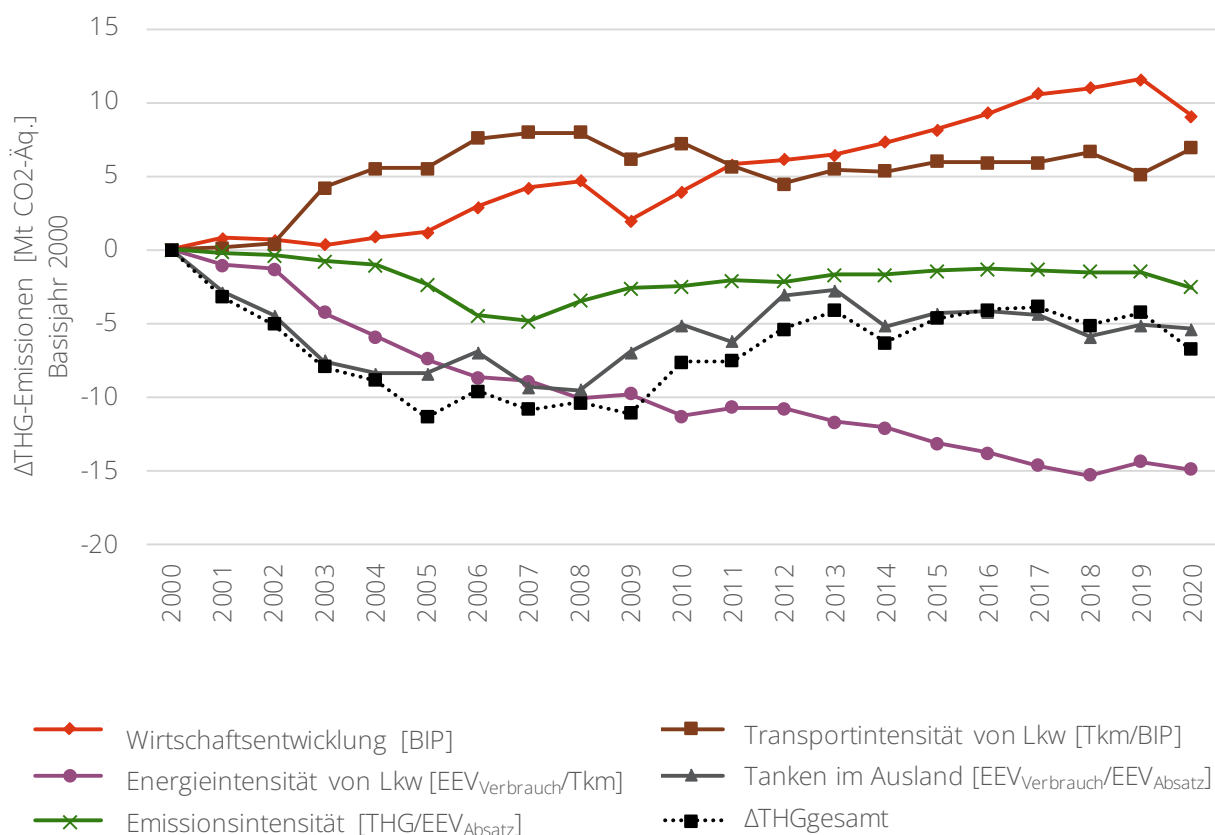
Die Dekompositionsanalyse des Verkehrssektors nutzt zwei maßgebliche Datenquellen, zum einen TREMOD für die gefahrenen Personenkilometer und den $EEV_{\text{Verbrauch}}$, zum anderen die Inventardaten für die THG-Emissionen und den EEV_{Absatz} . Da im Verkehrssektor, im Gegensatz zu stationären Verbrennungen, der Ort des Verbrauchs und der Energieaufnahme nicht identisch sein muss, ist eine Betrachtung der Bilanzierung der Datenquellen wichtig (Allekotte et al. 2020). TREMOD berechnet den $EEV_{\text{Verbrauch}}$ im Inland, somit werden hier auch im Ausland aufgenommene, jedoch im Inland umgewandelte Kraftstoffe berücksichtigt, d. h. alle Kraftstoffe, die in den Grenzen Deutschlands im Verkehr verbrannt werden. Das Inventar bilanziert strikt nach dem Inlandsabsatz von Kraftstoffen und berichtet auf dieser Basis die THG-Emissionen und den EEV_{Absatz} . Die unterschiedliche Bilanzierung führt dazu, dass im Fall einer hohen Energieaufnahme im Ausland (bspw. durch Preisunterschiede zwischen Ländern) der Verbrauch bei dem $EEV_{\text{Verbrauch}}$ berücksichtigt wird, jedoch nicht beim EEV_{Absatz} und den entsprechenden THG-Emissionen. Um den Effekt der unterschiedlichen Bilanzierung nach Absatz und Verbrauch zu berücksichtigen, wurde die Komponente Tanken im Ausland eingeführt. Diese betrachtet das Verhältnis zwischen EEV_{Absatz} und $EEV_{\text{Verbrauch}}$ sowie den damit verbundenen Effekt auf die Emissionsentwicklung. Die Komponente Tanken im Ausland ist in der Dekomposition wie folgt zu interpretieren: Ein negatives ΔTHG in Jahr X bedeutet, dass das Verhältnis zwischen EEV_{Absatz} und $EEV_{\text{Verbrauch}}$ höher als im Jahr 2000 ist – somit verhältnismäßig mehr Kraftstoff im Ausland aufgenommen wurde. Dabei reduziert dieser Anteil am getankten Kraftstoff lediglich die deutschen THG-Emissionen, weil sie im Ausland bilanziert wurden.

- 125 Abbildung 48 zeigt die Veränderung des Einflusses der Komponenten der Dekomposition zwischen den Jahren 2000 und 2020. Der emissionssteigernde Einfluss der Transportintensität nimmt im Zeitraum von 2000 bis 2019 zu. Dabei ist der steilere Anstieg zwischen den Jahren 2010 und 2011 auf die im Vorfeld genannte Neuzählung der Bevölkerung zurückzuführen. Im Zeitraum von 2011 bis 2019 bleibt der Einfluss der Transportintensität konstant. Diese emissionserhöhende Entwicklung wird in Abbildung 49 durch die entsprechenden Beiträge von 6,2 Mt CO₂-Äq. im ersten Zeitraum und 1,0 Mt CO₂-Äq. im zweiten Zeitraum deutlich. Im Jahr 2020 hatte die Transportintensität wiederum einen starken emissionsenkenden Einfluss von 14,4 Mt CO₂-Äq. Ursächlich hierfür sind hauptsächlich die Maßnahmen zur Eindämmung der Covid-19-Pandemie (siehe ERK 2021b). Das Jahr 2020 bildet daher eine Ausnahme im Vergleich zum Trend der vorherigen Jahre.
- 126 Der Faktor der Energieintensität nimmt über die Zeit von 2000 bis 2015 ab und bleibt ab diesem Zeitpunkt konstant. Dies spiegelt sich in einer Reduktion der THG-Emissionen um 6,8 Mt CO₂-Äq. gegenüber dem Jahr 2000 wider. Die Abnahme des mindernden Einflusses zeigt sich auch in Abbildung 49. Während ein Großteil der Effizienzgewinne, die den emissionsmindernden Einfluss der Energieintensität erhöhen, in der ersten Periode von 2000 bis 2010 erfolgt sind, wird dieser Trend im weiteren Verlauf nicht fortgesetzt.
- 127 Den absolut größten Einfluss auf die Emissionsentwicklung im Sektor Verkehr hat das Tanken im Ausland, bzw. die Differenz zwischen Inlandsverbrauch und -absatz. Der Verlauf des Tankens im Ausland erklärt gut den zunächst abnehmenden Verlauf im Emissionsgeschehen bis zum Jahr 2012, da Menschen mehr im Ausland tanken, und die anschließende erneute Zunahme ab dem Jahr 2012. Abbildung 48 zeigt, dass das Tankverhalten insgesamt zu einem Bilanzeffekt von bis zu 14 Mt CO₂-Äq. im Jahr 2012 und 8,6 Mt CO₂-Äq. im Jahr 2020 führt. Dieser Effekt trat im Jahr 2020 trotz zum Teil

geschlossener Grenzen im Rahmen der Pandemie-Eindämmung auf, verminderte sich jedoch gegenüber dem Vorjahr. Im Vergleich zu 2019 wurde im Jahr 2020 verstärkt im Inland getankt, was sich (bilanziell) emissionssteigernd auswirkte. Dabei ist das Konsumverhalten abhängig vom Verhältnis zwischen Inlands- und Auslandspreisen (siehe Infokasten 11).

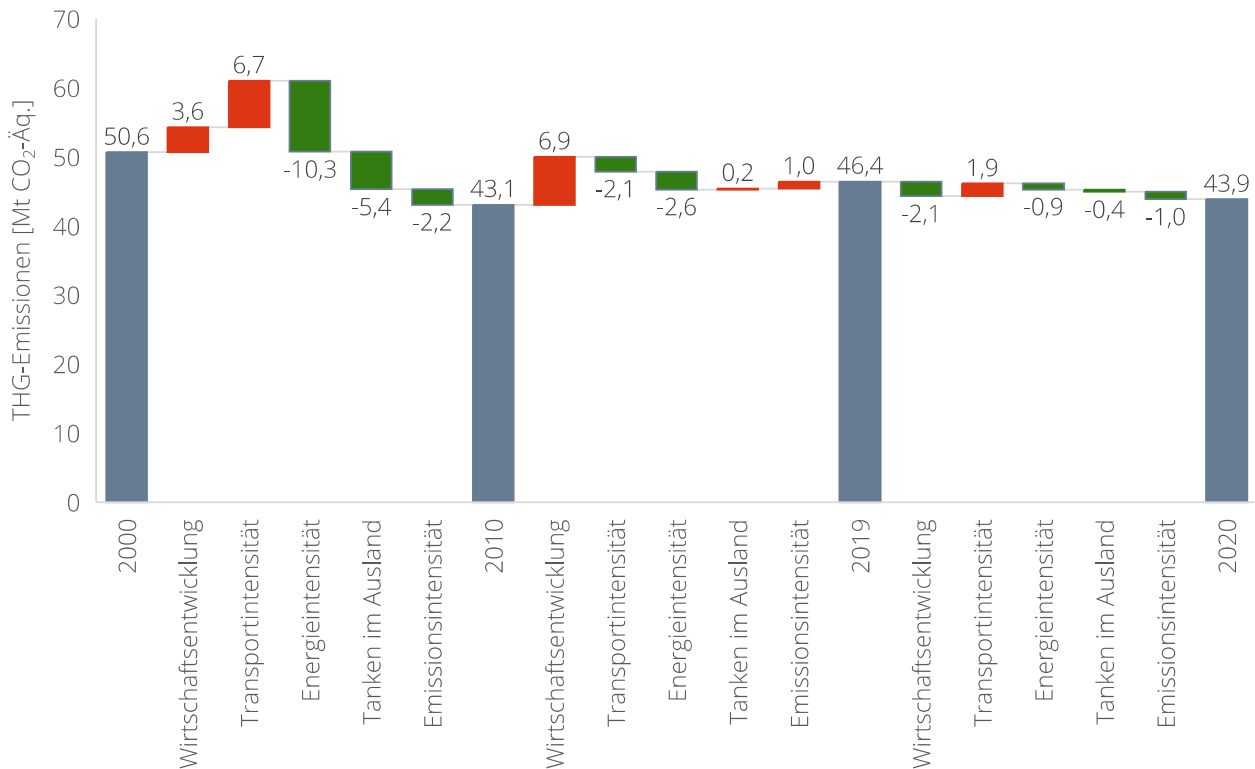
- 128 Die Emissionsintensität wirkt emissionsmindernd im gesamten Betrachtungszeitraum und ist abhängig vom Anteil biogener Kraftstoffe. Zunächst erhöht sich der emissionsmindernde Einfluss ab dem Jahr 2000 moderat und steigt zwischen den Jahren 2004 bis 2008 auf ein bis zum Jahr 2014 konstantes Niveau. Anschließend sinkt der reduzierende Einfluss der Emissionsintensität wieder leicht. Insgesamt hat die Emissionsintensität im gesamten Betrachtungszeitraum mindernd auf die Entwicklung der THG-Emissionen gewirkt, mengenmäßig schlägt sich das in etwa 5 Mt CO₂-Äq. im Vergleich zum Jahr 2000 nieder. Im Rahmen der Dekompositionsanalyse zeigt sich, dass die Komponente Emissionsintensität nicht von den Maßnahmen zur Eindämmung der Covid-19-Pandemie beeinflusst wurde.
- 129 Die genannten Komponenten erklären den Emissionsverlauf des Pkw-Verkehrs, welcher bis zum Jahr 2012, getrieben durch Effizienzgewinne und das Tankverhalten, sinkt, dabei jedoch durch eine steigende Transportintensität gedämpft wird. Ab 2012 bis zum Jahr 2019 steigen die THG-Emissionen wieder durch den sinkenden Einfluss des Tankverhaltens und durch die Zunahme der Emissionsintensität.

Abbildung 50: Dekomposition der THG-Emissionen des Lkw-Güterverkehrs - Änderungen im Vergleich zu 2000



Eigene Darstellung. Weitere Details zu den verwendeten Daten finden sich in Tabelle 7.

Abbildung 51: Dekomposition der THG-Emissionen vom Lkw-Güterverkehr – Aggregierte Betrachtung der Zeiträume 2000-2010, 2010-2019 sowie 2019-2020



Eigene Darstellung. Weitere Details zu den verwendeten Daten finden sich in Tabelle 7.

- 130 Abbildung 50 und Abbildung 51 zeigen die Dekomposition der jährlichen THG-Emissionen des Lkw-Verkehrs in die Komponenten Wirtschaftsentwicklung (BIP), Transportintensität (Tonnenkilometer (Tkm) pro Einheit BIP), Energieintensität von Lkw ($EEV_{\text{Verbrauch}}$ pro gefahrenem Tonnenkilometer des Lkw-Verkehrs), Tankverhalten (Verhältnis zwischen EEV_{Absatz} und $EEV_{\text{Verbrauch}}$) und Emissionsintensität (THG/EEV_{Absatz}). Dies wird im Vergleich zum Jahr 2000 bzw. aggregiert über die Zeiträume 2000-2010, 2010-2019 sowie für den gesondert ausgewiesenen Zeitraum 2019-2020 dargestellt.
- 131 Abbildung 50 zeigt die Veränderung der Komponenten der Dekomposition des Lkw-Verkehrs zwischen den Jahren 2000 und 2020. Dabei hat das Bruttoinlandsprodukt mit Ausnahme der Krisenjahre 2009 (Finanzkrise) und 2020 (Covid-19-Pandemie) einen deutlich steigenden Einfluss auf die THG-Emissionen. Dieser emissionssteigernde Einfluss ist insbesondere in der zweiten Dekade ab dem Jahr 2010 präsent.
- 132 Die emissionssteigernde Wirkung der Transportintensität, sprich das Verhältnis der Nachfrage nach Transportdienstleistungen zum Wirtschaftswachstum, nimmt im Zeitraum von 2000 bis 2008 zu. Der Anstieg zwischen den Jahren 2002 und 2003 ist dabei zum Teil auf eine Änderung der Güterverkehrsstatistik zurückzuführen (siehe Förster et al. 2018). In dem Zeitraum von 2008 bis 2012 ist ein leichter Rückgang der emissionssteigernden Wirkung der Transportintensität zu verzeichnen, welche ab dem Jahr 2012 konstant bleibt. Diese Entwicklung ist auch in Abbildung 51 erkennbar. Im

Zeitraum von 2000 bis 2010 weist die Transportintensität einen stark emissionssteigernden Effekt auf, in der Periode zwischen 2010 bis 2019 hingegen ist ein leicht emissionsmindernder Einfluss der Transportintensität zu beobachten. Im Jahr 2020 wiederum wirkte die Transportintensität leicht emissionssteigernd im Vergleich zum Vorjahr.

- 133 Die Komponente Energieintensität hat den größten emissionsmindernden Einfluss auf die THG-Emissionen und nimmt über den gesamten Zeitraum zu. In den ersten zehn Jahren bis zum Jahr 2010 ist dieser Einfluss besonders stark ausgeprägt, in der nachfolgenden Dekade verringert sich der emissionsmindernde Einfluss der Energieintensität. Der starke Zuwachs der mit der Energieintensität assoziierten THG-Minderung von dem Jahr 2002 auf das Jahr 2003 ist, wie bei der Transportintensität, zum Teil auf eine Änderung der Güterverkehrsstatistik zurückzuführen (siehe Förster et al. 2018).
- 134 Analog zur Analyse des Pkw-Verkehrs hat auch das Tankverhalten, bzw. die Kraftstoffaufnahme im Ausland, einen stark emissionsmindernden Einfluss auf die THG-Emissionen des Lkw-Verkehrs, der insbesondere in dem Zeitraum von 2000 bis 2010 präsent ist.
- 135 Die Emissionsintensität reduziert die THG-Emissionen im Lkw-Verkehr bis zum Jahr 2007 und flacht danach in ihrer mindernden Wirkung ab. Dies ist auch in Abbildung 51 sichtbar, in welcher die Emissionsintensität bis zum Jahr 2010 eine leicht mindernde Wirkung und in der zweiten Dekade bis zum Jahr 2019 eine leicht steigernde Wirkung auf die THG-Emissionen aufzeigt.
- 136 Die gemeinsame Wirkung der Komponenten erklärt den Gesamtemissionsverlauf, welcher aufgrund der Effizienzgewinne, des Tankverhaltens und der Emissionsintensität bis zum Jahr 2009 stetig gesunken ist. Nach dem Jahr 2009 stiegen die THG-Emissionen jedoch besonders aufgrund des emissionssteigernden Einflusses der Wirtschaftsentwicklung und der damit einhergehenden Fahrleistung wieder an. Zudem ist eine verringerte mindernde Wirkung des Tankverhaltens und der Emissionsintensität in diesem Zeitabschnitt präsent.

2.5.3 Diskussion von Ursachen der Entwicklung

2.5.3.1 Ursachen und Trends – Pkw-Verkehr

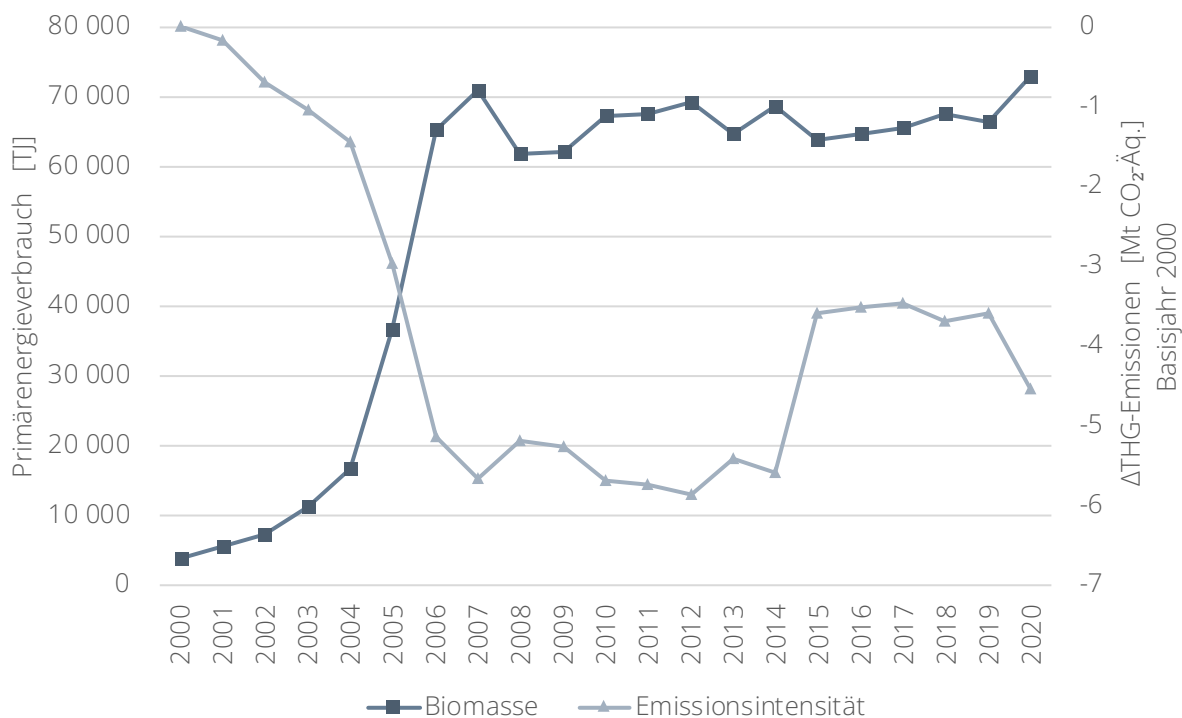
Emissionsintensität (Anteil biogener Kraftstoffe und methodische Anpassungen)

- 137 Die Emissionsintensität im Straßenverkehr hängt vom Kraftstoffmix ab. Da sich die im Nationalen Inventarbericht festgelegten Emissionsfaktoren für Diesel- und Ottokraftstoffe nur in geringem Maße unterscheiden, hat der Anteil dieser Kraftstoffe kaum einen Einfluss und lediglich der Anteil der biogenen Kraftstoffe wirkt sich auf die Komponente Emissionsintensität aus.³⁵ Die Entwicklung der Emissionsintensität (Treibhausgasemissionen pro Einheit EEV_{Absatz}) hatte anteilig einen geringen emissionsmindernden Effekt auf die THG-Emissionen des Pkw-Verkehrs und verläuft wie beschrieben. Dieser Verlauf wird durch den Anteil an Biomasse, die dem Kraftstoff beigemischt wurde, erklärt. Während die Biomasse emissionsseitig nur nachrichtlich erfasst wird, d. h. die Biomasse nicht in den THG-Emissionen des Inventars enthalten ist, ist die Biomasse dennoch im verwendeten EEV_{Absatz} enthalten. Steigt der Anteil der Biomasse am EEV_{Absatz} , so sinkt die Emissionsintensität und umgekehrt. Abbildung 52 zeigt diesen invertierten Zusammenhang zwischen Biomasse und Emissionsintensität. Dabei nimmt der Anteil der Biomasse ab dem Jahr 2003 bis zum Jahr 2007 durch eingeführte

³⁵ Fossiler Dieselmotorkraftstoff 74.027 kg/TJ, fossile Ottomotorkraftstoffe 75.285 kg/TJ (UBA 2022b).

Steuervorteile deutlich zu (Förster et al. 2018). Ab dem Jahr 2007 wird dieser Steuervorteil durch eine Beimischungsquote abgelöst und die absolute Menge an Biomasse bleibt für die CRF-Kategorie 1.A.3.b.i auf einem konstanten Niveau (Förster et al. 2018). Der Anstieg in der Emissionsintensität in Abbildung 52 zum Jahr 2015 ist jedoch nicht nur durch den Anteil der Biomasse zu erklären.³⁶ Zum einen wurde im Jahr 2015 die Beimischungsquote durch die THG-Minderungsquote abgelöst (Burger und Bretschneider 2021). Weiter lässt sich dieser Bruch auf die Anpassung des Emissionsfaktors von Benzin aufgrund der Änderung des Heizwerts durch die AG Energiebilanzen erklären (Allekotte et al. 2020).

Abbildung 52: Biomasse in Terrajoule in der CRF-Kategorie 1.A.3.b.i und die Emissionsintensität der Dekomposition



Eigene Darstellung auf Basis von UBA (2022n). Die Linie des Primärenergieverbrauchs (dunkelblau mit Quadrern) bezieht sich auf die linke Y-Achse, die Linie der Emissionsintensität (hellblau mit Dreiecken) ist mit der rechten Y-Achse assoziiert.

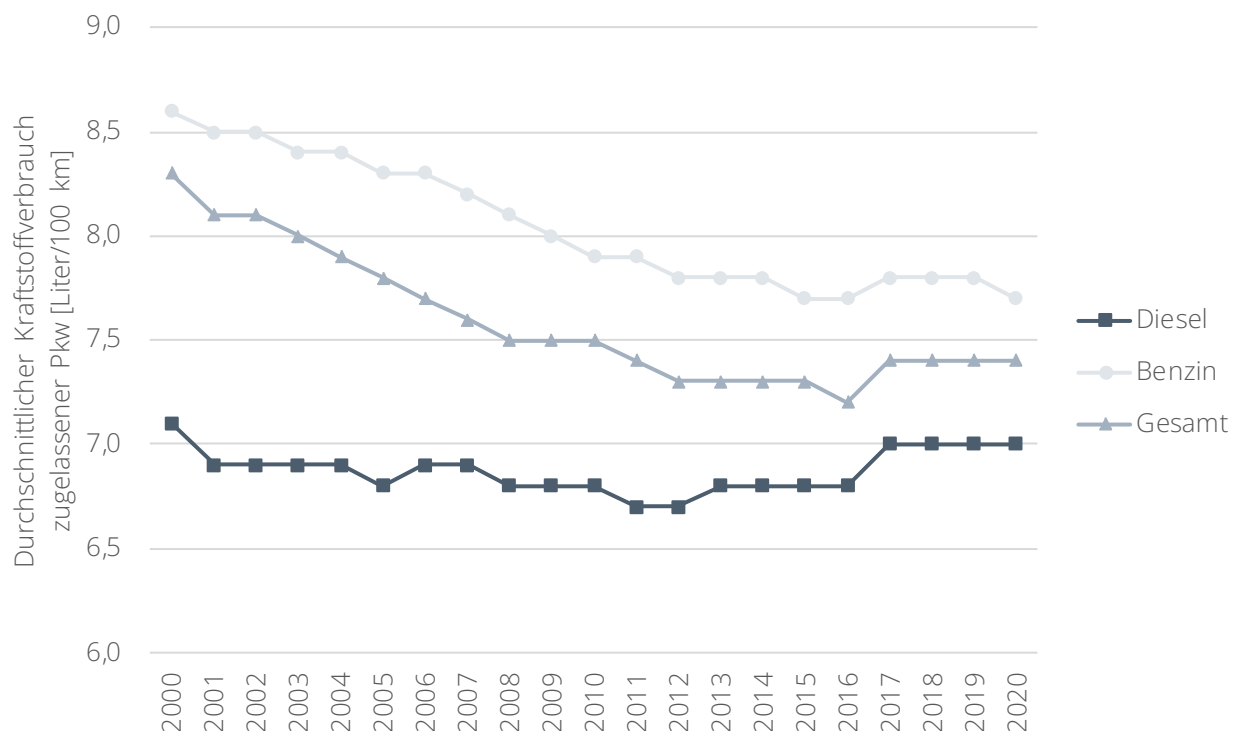
Energieintensität (Effizienz des Fahrzeugbestands)

138 Der emissionsmindernde Einfluss der Komponente Energieintensität ($EEV_{\text{Verbrauch}}$ pro gefahrenem Personenkilometer) des Pkw-Verkehrs stieg im Zeitraum von 2000 bis 2015 und verharrt seitdem auf ähnlich hohem Niveau. Die Komponente ist von verschiedenen im Folgenden betrachteten Einflüssen abhängig. Grundsätzlich kann die Energieintensität jedoch als eine Einordnung der Effizienz des Fahrzeugbestands bzw. der Antriebe verstanden werden. Der zeitliche Verlauf lässt sich durch Verschiebungseffekte im Fuhrpark weg von Pkws mit Ottomotor hin zu Dieselmotoren erklären. Dabei liegen die energiebezogenen Emissionsfaktoren zwischen den beiden Kraftstoffarten nah beieinander,

³⁶ Das Biokraftstoffquotengesetz sieht ab dem 01.01.2007 zum ersten Mal eine gesetzlich festgelegte Mindestverwendung von Biokraftstoffen vor.

jedoch ist der durchschnittliche Verbrauch pro 100 km bei Dieselfahrzeugen niedriger. Abbildung 53 zeigt den durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch der in Deutschland zugelassenen Pkw sowohl gesamt als auch nach Diesel und Benzin getrennt. Während der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch von Benzinfahrzeugen über die Zeit sinkt, steigt der Durchschnittsverbrauch von Dieselfahrzeugen nach ursprünglicher Abnahme wieder an. Über den betrachteten Zeitraum von 2000 bis 2020 nähern sich die Kraftstoffverbräuche immer weiter an. Am durchschnittlichen Gesamtverbrauch ist ebenfalls der Wechsel hin zu Dieselfahrzeugen zu erkennen.

Abbildung 53: Durchschnittsverbrauch der in Deutschland zugelassenen Pkw bis 2020



Eigene Darstellung auf Basis BMDV (2021; 2015); BMVBS (2009). Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch der in Deutschland zugelassenen Pkw in den Jahren von 2000 bis 2020.

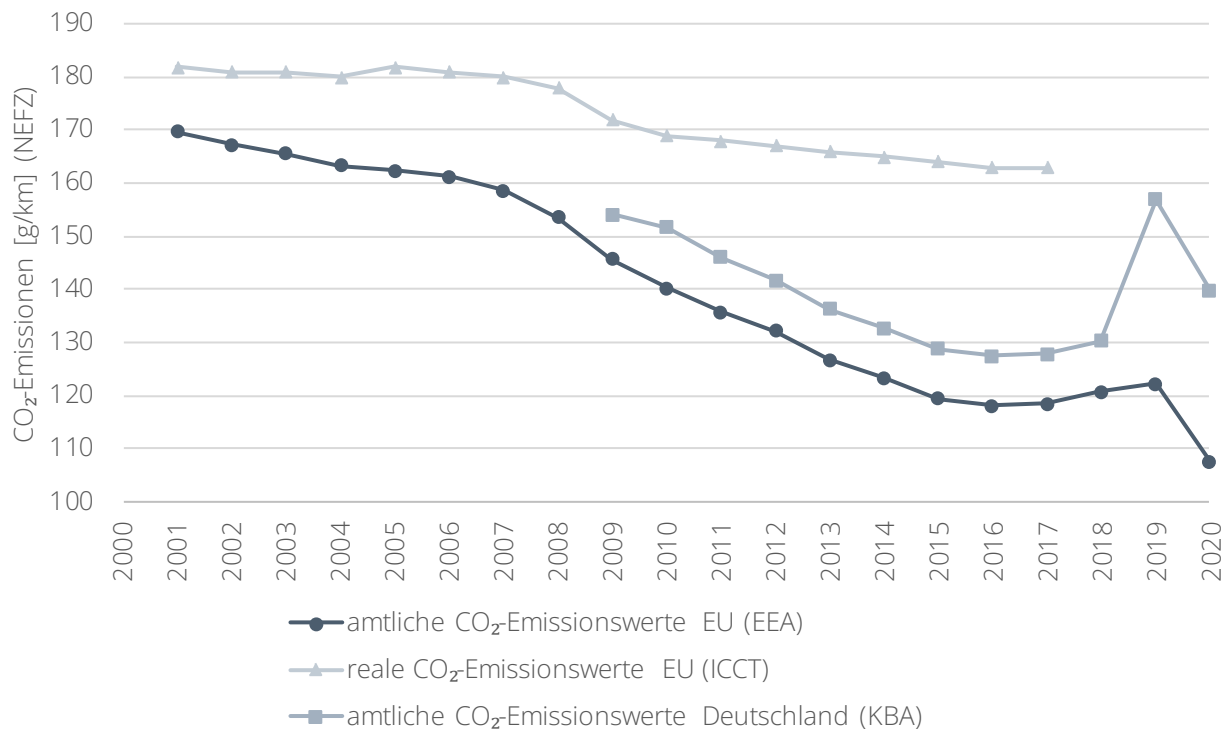
- 139 Der Verlauf des Durchschnittsverbrauchs des gesamten Fuhrparks wird zudem auch von den Neuzulassungen geprägt. Der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch der neu zugelassenen Pkw in Deutschland ist über den Zeitraum von 2006 bis 2016 gesunken und anschließend leicht angestiegen. Zum Jahr 2019 kam es zu einem starken Anstieg. Dieser Anstieg ist in großen Teilen auf die Umstellung im Testverfahren zurückzuführen (siehe RZ 140). Unabhängig von der Testverfahrensänderung im Jahr 2019 stellen SUV (Sport Utility Vehicle) erstmalig den Spitzenreiter bei den Neuzulassungen (KBA 2019), was eine (weitere) Steigerung des durchschnittlichen Fahrzeuggewichts zur Folge hat.
- 140 Der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch und die daraus resultierenden THG-Emissionen sind direkt miteinander verbunden. Bei Betrachtung der Entwicklung der durchschnittlichen CO₂-Emissionen von Neuzulassungen ist festzuhalten, dass die realen CO₂-Emissionswerte nicht mit den amtlichen Werten übereinstimmen. Die tatsächlichen THG-Emissionen der neuzugelassenen Pkw liegen, auch seit Einführung der Flottengrenzwerte (siehe Infokasten 13), deutlich über denen der Herstellerangaben und sind im Zeitverlauf weniger stark gesunken (siehe Abbildung 54). Zudem fällt in Abbildung 54 auf, dass

die amtlichen durchschnittlichen CO₂-Emissionen von in Deutschland neu zugelassenen Pkw über denen des Durchschnitts der EU liegen, was insbesondere auf die in Deutschland verkauften schwereren und leistungstärkeren Fahrzeugtypen zurückzuführen ist (CCFA 2021; ICCT 2021). Mit der (endgültigen) Umstellung des Testverfahrens³⁷ von NEFZ auf WLTP im Jahr 2019 ist für die in Deutschland im Jahr 2019 zugelassenen Pkw ersichtlich, dass die amtlichen CO₂-Emissionen deutlich steigen. Auch bei differenzierter Betrachtung der CO₂-Emissionen zwischen Benzin- und Diesel-Pkw liegen Hinweise dafür vor, dass moderne Benzin-Pkw (zumindest in der Kompaktklasse) unter realen Fahrbedingungen ähnliche oder gar niedrigere CO₂-Werte aufweisen können (ICCT 2019), was der Argumentation eines Klimavorteils durch Diesel entgegenwirkt.

- 141 Neben dem Wirkungsgrad des Antriebs, spielen, wie bereits erwähnt, verschiedene weitere Faktoren eine Rolle für den Kraftstoffverbrauch bzw. die THG-Emissionen, wie beispielsweise der Fahrwiderstand (beeinflusst u. a. durch Form und Gewicht des Pkws), aber auch die (Motor-)Leistung des Fahrzeugs. Letztere ist bis zum Jahr 2021 kontinuierlich gestiegen, wie Abbildung 55 zeigt. Treibend ist hierbei insbesondere die gestiegene Durchschnittleistung neu registrierter Diesel-Pkw, die deutlich über der von Benzin-Pkw liegt. Effizienzvorteile von Diesel-Pkw (höherer Wirkungsgrad durch höheres Verdichtungsverhältnis) gegenüber Benzin-Pkw wurden in der Vergangenheit durch die gewachsene Leistung daher vermindert (Schipper und Fulton 2013). Dabei fällt auf, dass die durchschnittliche Motorleistung nicht nur, wie im vorherigen Absatz erwähnt, zwischen EU-Staaten abweicht, sondern auch intranationale Varianzen aufweist. So bestehen Hinweise, dass tendenziell Fahrzeuge in den Bundesländern Bayern, Baden-Württemberg und Hessen höhere Motorleistungen aufweisen als bspw. Sachsen, Mecklenburg-Vorpommern und Sachsen-Anhalt (mit einer Differenz von durchschnittlich rund 10 PS; CHECK24 2019).

³⁷ Das ursprünglich in der EU angewendete Testverfahren zur Erfassung von Schadstoffemissionen basierte auf dem NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus). Bei der Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen wurden mit diesem Messverfahren in der Empirie jedoch deutlich geringere Verbrauchswerte generiert als dies im realen Straßenbetrieb der Fall war. Dieser Umstand ist auch auf die durch die Hersteller ausgenutzte Flexibilität bei dem Prüfverfahren (z. B. Toleranzen im Fahrprofil, abweichender Reifendruck, testorientierte Fahrzeugoptimierung) zurückzuführen (Kasten und Blanck 2017; Dornoff et al. 2020). Aufgrund der festgestellten deutlichen Diskrepanzen zwischen Emissionswerten auf dem Rollprüfstand versus im realen Straßenbetrieb, wurde das NEFZ Verfahren von 2017 bis 2019 auf das neuere, näher an den realen CO₂-Emissionen liegende, WLTP-Verfahren (Worldwide Harmonized Light Duty Test Procedure) umgestellt (Kasten und Blanck 2017). Durch das neue Verfahren sind die erfassten CO₂-Emissionen circa 20 % höher als bisher und stellen damit eine deutlich genauere Annäherung an den wahren Verbrauch im Realbetrieb dar (BMU 2020). Jedoch bestehen auch mit Umstellung des Verfahrens Möglichkeiten, Einfluss auf Grenzwerte zu nehmen, was auch bereits beobachtet werden konnte (eine ausführlichere Behandlung dieses Themas findet sich bei (BMU 2020; Leisinger und Runkel 2021)).

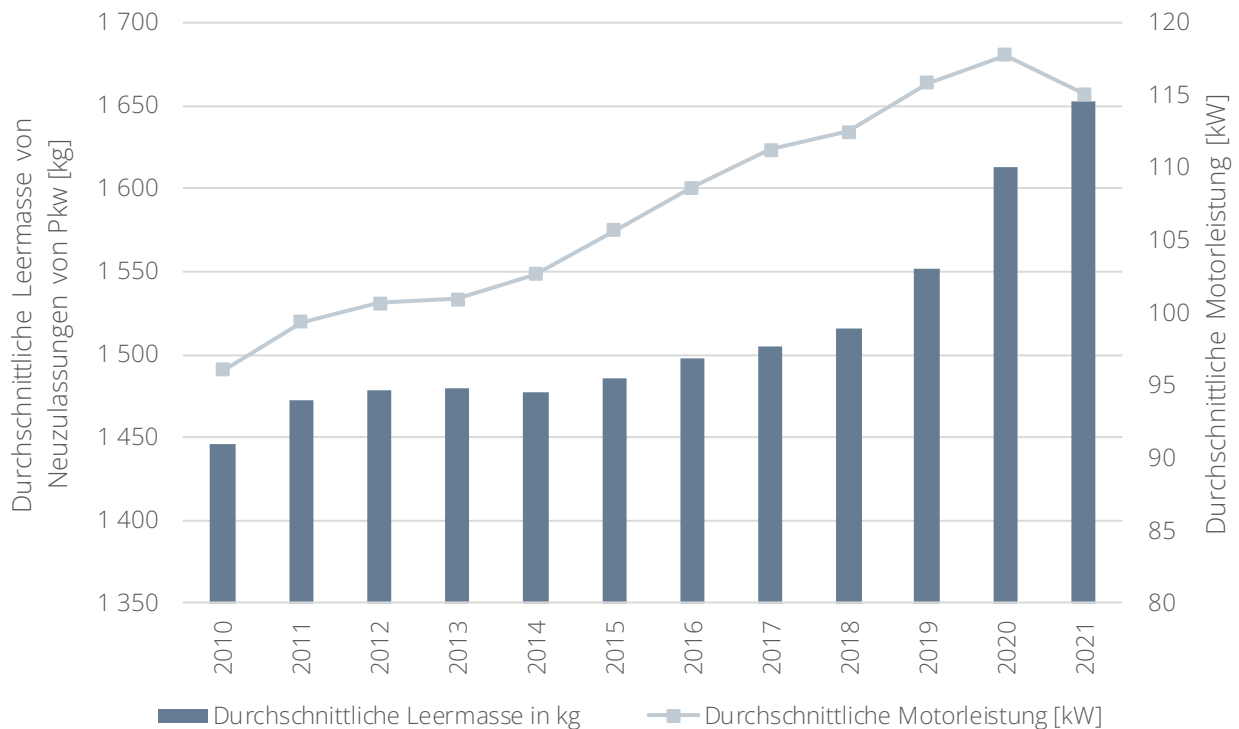
Abbildung 54: Entwicklung der durchschnittlichen amtlichen und realen CO₂-Emissionen neu zugelassener Pkw in Europa



Eigene Darstellung auf Basis von ICCT (2019) und KBA (2020). Die darin aufbereiteten Werte stammen aus den amtlichen Daten (Typgenehmigungen) der European Environment Agency (EEA 2022) sowie Schätzungen durch Spritmonitor.de. Schätzungen der realen CO₂-Emissionen liegen nur bis einschließlich des Jahres 2017 vor. Höhere Emissionswerte in Deutschland zugelassener Pkw sind auf den im Vergleich zum EU-Schnitt höheren Absatz emissionsintensiver Pkw zurückzuführen.

142 Neben der Zunahme der Motorleistung hat auch die durchschnittliche Leermasse neuzugelassener Pkw im Zeitraum von 2011 bis 2021 zugenommen, seit dem Jahr 2018 mit einem deutlichen Anstieg (siehe Abbildung 55). Die Zunahme in der Leermasse bei Neuzulassungen ist in Teilen auf die (anteilige und absolute) Zunahme an Elektroautos und Hybridfahrzeugen an den Neuzulassungen ab dem Jahr 2018 zurückzuführen (siehe Abbildung 55), die durch die Doppelmotorisierung und den verbauten Akku ein höheres Leergewicht aufweisen. Gleichzeitig stieg jedoch auch der Anteil von SUVs, Geländewagen und Vans – Fahrzeugklassen mit überdurchschnittlichem Gewicht – im Pkw-Bestand im Zeitraum von 2008 bis 2018 von rund 10 % auf etwa 20 % an (Befragungsergebnis; MiD, 2017)(infas 2019). Dieser Effekt wirkt steigernd auf die Energieintensität und somit auch auf die THG-Emissionen.

Abbildung 55: Entwicklung durchschnittliche Leermasse und Motorisierung von Neuzulassungen in Deutschland bis 2021



Eigene Darstellung auf Basis von KBA (2020).

143 Neben der Leermasse, der Motorleistung und dem Anteil an SUVs steigt auch der fossile Pkw-Bestand in Deutschland immer weiter an. Obwohl der Einfluss der Elektromobilität in den letzten Jahren zugenommen hat, ist bis zum Jahr 2020 keine Trendumkehr zu weniger fossil betriebenen Fahrzeugen erkennbar. Elektro- und Hybrid-Fahrzeuge ersetzen in den vergangenen Jahren keine Verbrenner, sondern kamen, häufig als Zweit- oder Drittauto, zum Bestand hinzu (infas 2019). Im Jahr 2021 sank der Bestand an diesel- und benzinbetriebenen Fahrzeugen erstmalig leicht. In Abbildung 56 sind die anteiligen Kraftstoffarten an den Pkw-Neuzulassungen dargestellt. Es fällt eine deutliche Steigerung des Anteils von batterieelektrischen Pkw sowie an Hybrid-Fahrzeugen seit dem Jahr 2020 auf.

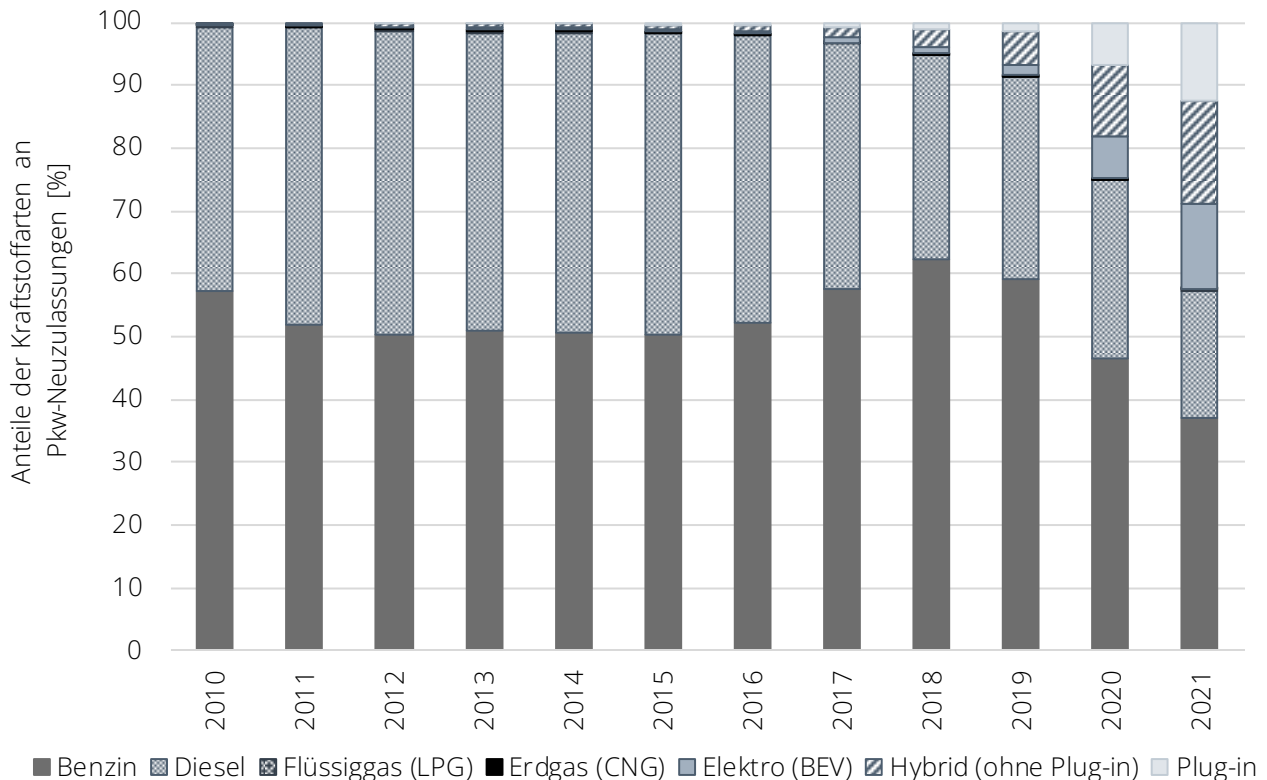
Infokasten 12

Dienstwagen

Die pauschale Besteuerung privat genutzter Dienstwagen besteht seit dem Jahr 1996 mit der sogenannten 1 %-Regel. Die rechtliche Grundlage schafft dabei das Einkommensteuergesetz (EStG) und sieht vor, dass 1 % des Listenpreises bei Erstzulassung als geldwerter Vorteil zu versteuern ist (Burger und Bretschneider 2021).³⁸ Da der tatsächliche geldwerte Vorteil in der Regel höher als die angesetzten 1 % ist, fällt die Besteuerung zu niedrig aus. Somit bietet die Bereitstellung durch den Arbeitgeber eine Möglichkeit einen Teil des Gehalts in Form eines Dienstwagens auszuzahlen und der Dienstwagen ist für die Arbeitgeber voll absetzbar (Fiedler et al. 2016). Dabei sind geförderte Dienstwagen hinsichtlich drei zentraler Punkte klimaschädlich. Erstens haben Dienstwagen einen tendenziell höheren CO₂-Ausstoß im Vergleich zu privat und gewerblich zugelassenen Fahrzeugen (Fiedler et al. 2016). Zweites beeinflusst die Förderung von Dienstwagen, die meist nur wenige Jahre von den Unternehmen gehalten werden, in hohem Maße den Fahrzeugbestand (Fiedler et al. 2016). Zuletzt ist die jährliche Laufleistung von Dienstwagen vergleichsweise höher gegenüber einem rein privat genutzten Pkw (Burger und Bretschneider 2021). Darüber hinaus verringert die steuerliche Vergünstigung für Dienstwagen die Anreize, öffentliche Verkehrsmittel zu nutzen. Bei zusätzlicher kostenfreier Bereitstellung von Kraftstoff entsteht ein hoher Anreiz, mit dem Dienstwagen zu fahren. Auch erhöht das Dienstwagenprivileg die soziale Ungleichheit, da höhere Einkommensklassen in der Regel häufiger Dienstwagen zur Verfügung gestellt bekommen und dank der Steuerprogression sich diese Vorteile bei höheren Einkommen ausweiten (Burger und Bretschneider 2021). Burger und Bretschneider (2021) schätzt dabei das Subventionsvolumen auf mindestens 3,1 Mrd Euro pro Jahr.

³⁸ Seit dem Jahr 2020 sind batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) mit einem Bruttolistenpreis unter 60.000 Euro mit 0,25 % zu versteuern und teurere BEV sowie Plug-in-Hybride mit 0,5 % zu versteuern.

Abbildung 56: Anteil der Kraftstoffarten an Pkw-Neuzulassungen in Deutschland bis 2021



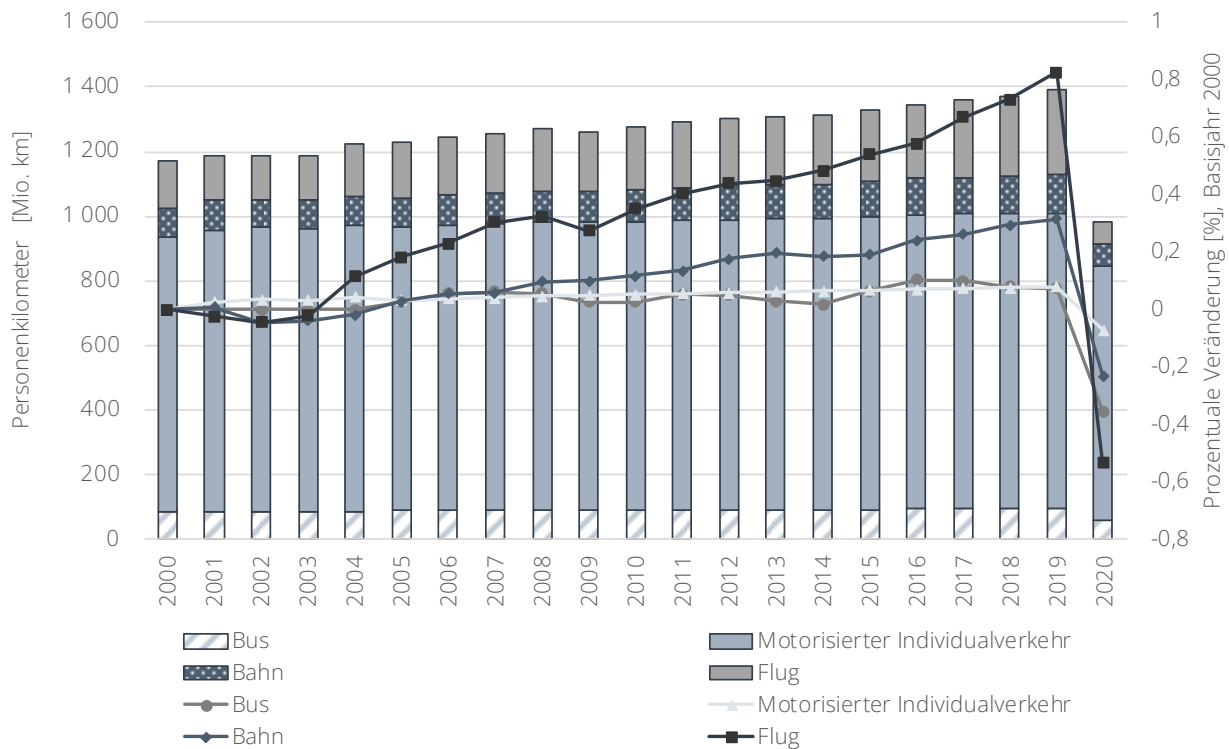
Eigene Darstellung. Quelle: Kraftfahrt-Bundesamt (2022).

144 Im Verkehrssektor konterkarierten also Rebound-Effekte (siehe Infokasten 10) und wohlstandsbedingte Veränderungen des Nutzungsverhaltens Emissionsminderungen durch technisch bedingte Effizienzgewinne. Dies spiegelt sich in einer Zunahme der Motorleistung, des Fahrzeuggewichts und einer ausbleibenden Substitution bestehender Fahrzeuge mit Neuanschaffungen wider.

Transportintensität

145 Die Transportintensität im Pkw-Bereich (Personenkilometer pro Kopf) nahm seit dem Jahr 2000 stetig zu und ist die Dekompositionskomponente, die am stärksten zu einer Emissionssteigerung beitrug. Einzige Ausnahme bildet das Jahr 2020, in dem durch die Eindämmungsmaßnahmen der Covid-19-Pandemie die Transportintensität drastisch abnahm und somit Haupttreiber der Emissionsminderung des Jahres war. In Abbildung 57 sind die Personenkilometer verschiedener Transportmittel abgebildet. Der motorisierte Individualverkehr nahm bis zum Jahr 2020 stetig zu. Aber auch insgesamt gibt es einen steigenden Trend der Personenkilometer aller Transportmittel, was Rückschlüsse auf eine allgemeine Zunahme der Mobilität zulässt. Einen Zuwachs verzeichnet bis zum Jahr 2019 auch der innerdeutsche Flugverkehr. Gegenüber dem Basisjahr 2000 ist beim Flugverkehr ein Zuwachs von über 80 % (im Jahr 2019) zu verzeichnen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass lediglich die direkten THG-Emissionen, die Nicht-CO₂-Effekte hinsichtlich der Klimawirkung jedoch nicht erfasst werden. Diese erhöhen beispielsweise durch die Freisetzung von Stickoxiden, Wasserdampf und Aerosolen den Treibhauseffekt um das Zwei- bis Fünffache (UBA 2022j; Lee et al. 2021). Eine Verlagerung von motorisiertem Individualverkehr zum öffentlichen Straßenverkehr oder auf die Schiene ist bisher nicht zu erkennen.

Abbildung 57: Entwicklung Personenverkehr: motorisierte Verkehrsleistung nach Transportmittel



Eigene Darstellung auf Basis von UBA (2022o).

146 Insgesamt überwiegt im Verkehrssektor seit dem Jahr 2012 die emissionssteigernde Wirkung der wachsenden Transportintensität über die emissionsmindernde Wirkung der Emissions- und Energieintensität.

Tankverhalten

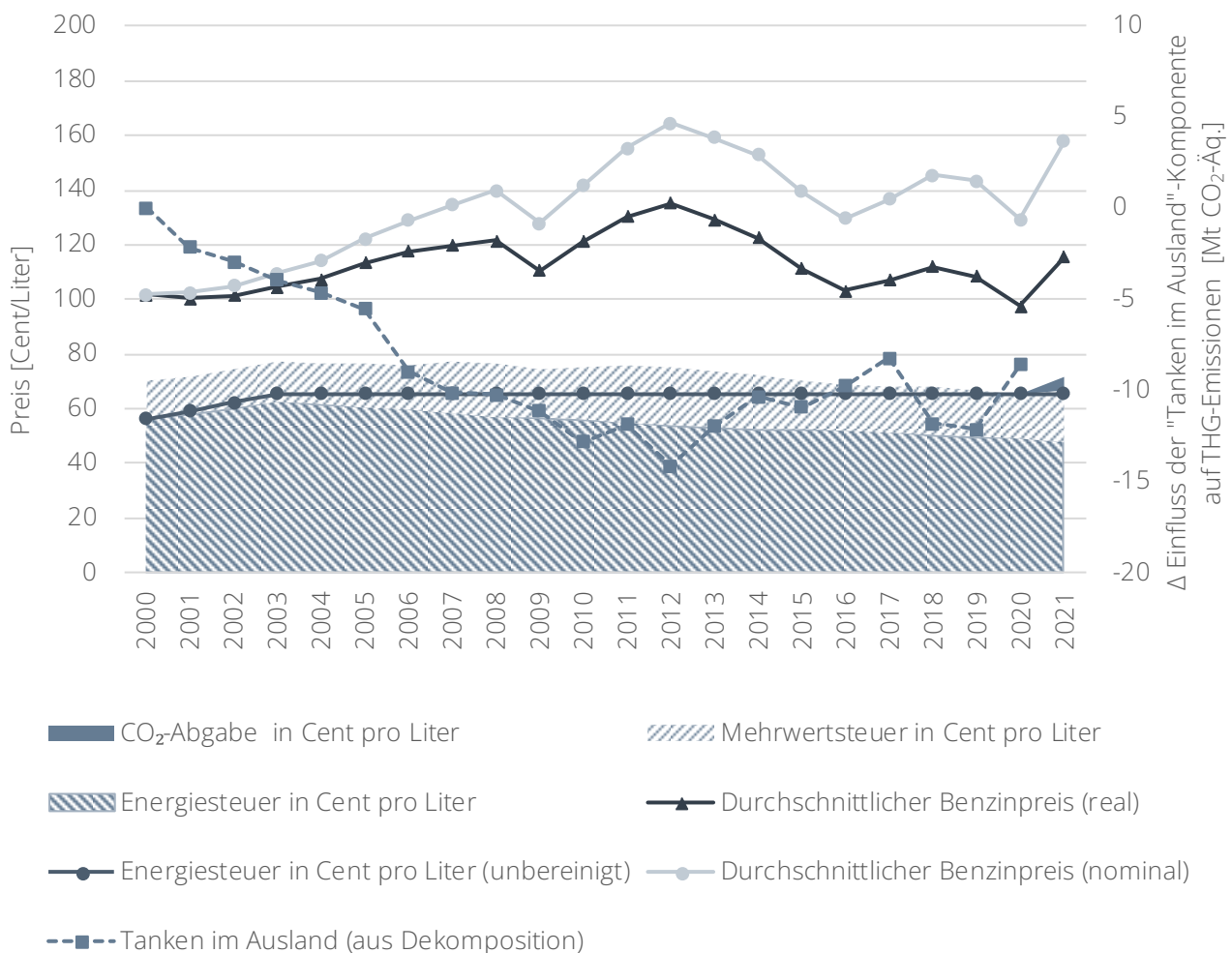
147 Das Tankverhalten hat auf den Verlauf der THG-Emissionen im Verkehrssektor einen starken Einfluss. Dabei variiert die durch Kraftstoffaufnahme im Ausland induzierte Reduktion der THG-Emissionen über den Betrachtungszeitraum. Dabei ist der Verlauf gegenläufig zur realen Preisentwicklung für Benzin und zeigt die Kostenvermeidungsreaktion von Inländern. Steigen die Preise in Deutschland, wird die Kraftstoffaufnahme ins angrenzende Ausland verlagert, sinken die Preise, findet diese Verlagerung nicht statt, sondern die Kraftstoffaufnahme findet im Inland statt. Das lässt darauf schließen, dass Autofahrer:innen in ihrem Tankverhalten sensitiv auf Preisänderungen des inländischen Benzinpreises reagieren – insofern ihnen dies möglich ist (bspw. Nähe des Wohnorts zu angrenzendem Ausland).

148 Abbildung 58 zeigt den Endkund:innenpreis für Superbenzin inklusive der Abgaben und Steuern sowohl als nominale Kraftstoffpreise als auch als reale Verbraucher:innenpreise. Dabei setzt sich der Preis für Superbenzin aus vier Komponenten zusammen: der Energiesteuer in Höhe von nominalen 65,45 Cent pro Liter (seit dem Jahr 2003 konstant), der Mehrwertsteuer von 19 % seit dem Jahr 2007 (zuvor 16 %), der CO₂-Abgabe in Höhe von circa 7 Cent pro Liter (seit dem Jahr 2021) und einer Erdöl-Bevorratungsabgabe von 0,27 Cent pro Liter (nicht in Abbildung 58 enthalten). Die Differenz zwischen Endkund:innenpreis und den Abgaben definiert sich über die Kosten für den Kraftstoff und den Gewinn der Unternehmen. Abbildung 58 zeigt einen konstanten Anstieg des Endkund:innenpreises bis zum Jahr

2012, mit Ausnahme der Finanzkrise. In diesem Zeitraum nimmt, wie in der Dekomposition gezeigt, die im Ausland getankte Menge an Kraftstoffen zu. Der Verlauf der Dekompositionskomponente ist auf der Sekundärachse der Abbildung 58 abgetragen. Im anschließenden Zeitraum sinkt der reale Preis erneut, mit wenig Variation zwischen den Jahren. Entsprechend nahm in diesem Zeitraum die im Ausland getankte Menge an Kraftstoff ab und die in Deutschland bilanzierten THG-Emissionen zu. Somit haben ansteigende Benzinpreise eine Lenkungswirkung, die jedoch nur zu Teilen die Inlands- und Gesamtnachfrage reduziert. Der Preiseffekt wirkt dabei stärker auf die Inlandsnachfrage, die durch das Tanken im Ausland substituiert wird. Die Gesamtnachfrage (EEV) wird im geringeren Maße reduziert.

- 149 Eine solche Lenkungswirkung wurde durch die Einführung der Energiesteuer induziert. Abbildung 58 zeigt, dass die Energiesteuer seit dem Jahr 2003 nominal konstant ist. Zuvor wurde die Steuer stufenweise im Zeitraum von 1999 bis 2003 erhöht. Entsprechend ist der reale Wert der Energiesteuer seit dem 2003 über die Zeit abnehmend. Während der nominale Wert von 65,45 Cent pro Liter konstant bleibt, sinkt der Wert real auf 47,93 Cent pro Liter ab. Somit nimmt die Lenkungswirkung der Energiesteuer ebenfalls über die Zeit ab.
- 150 Für den Dieselmotorkraftstoff ist der in Abbildung 58 dargestellte Verlauf vergleichbar, jedoch beträgt die Energiesteuer mit 47,04 Cent pro Liter knapp 18,41 Cent pro Liter oder 28 % weniger. Berücksichtigt man zusätzlich die Umsatzsteuer, liegt die steuerliche Begünstigung von Dieselmotorkraftstoff bei 21,9 Cent pro Liter. Somit ist auch die Lenkungswirkung beim Dieselmotorkraftstoff geringer. Eingeführt wurde die Energiesteuervergünstigung für Dieselmotorkraftstoffe, um den gewerblichen Straßenverkehr zu fördern (Burger und Bretschneider 2021). Somit stellt die Vergünstigung gegenüber Benzin eine umweltschädliche Subvention dar, die zum einen die Anreize zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs senkt und darüber hinaus einen Kraftstoff subventioniert, der gegenüber Benzin pro Liter höhere CO₂-Emissionen enthält. Die verminderte Lenkungswirkung führt zu den oben genannten Entwicklungen der Motorenleistungen und des Verbrauchs von Dieselfahrzeugen.
- 151 Insgesamt ist jedoch auf Basis empirischer Daten der Einfluss der Kraftstoffpreise auf die Gesamtnachfrage eher gering. Die beobachteten Verringerungen im EEV_{Absatz} aufgrund von Tanken im Ausland stellt vielmehr einen Substitutionseffekt dar und hat nur geringe Auswirkung auf die Gesamtnachfrage ($EEV_{\text{Verbrauch}}$). Hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen Preisen und Kraftstoffnachfrage liegt im Verkehrsbereich eine geringere Preiselastizität als in anderen Wirtschaftsbereichen vor. Das Deutsche Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) (Bach et al. 2019) nennt dabei kurzfristige Preiselastizitäten für Benzin von - 0,36 bis - 0,03 (im Mittel: - 0,19) sowie von Diesel mit - 0,25 bis - 0,07 (im Mittel: - 0,13). Zudem findet tendenziell nur eine kurzfristige Reaktion auf die Preisänderungen der Kraftstoffe statt und dies eher, wenn erhebliche Preiserhöhungen erfolgt sind (bspw. Jahre der Ölkrisen 1974, 1981; Einführung der Ökosteuer bzw. Wechselkursschwankungen in 2000; IVT 2004; Bach et al. 2003). Darüber hinaus liegen Hinweise vor, dass die Einkommenselastizität (+ 0,44) größer ist als die Preiselastizitäten; daraus folgt, dass Einkommenszuwächse von beispielsweise 10 % zu einer höheren prozentualen Steigerung der Fahrleistung (+ 4 %) führen als reduziert würde (etwa - 2 %) bei einem Anstieg der Benzin- bzw. Dieselpreise um 10 % (Steiner und Cludius 2010).

Abbildung 58: Durchschnittlicher Preis für Superbenzin in Cent pro Liter inkl. Abgaben & Steuern



Eigene Darstellung auf Basis von Statista (2022). Zur Umrechnung der nominalen Kraftstoffpreise in reale Verbraucher:innenpreise wird der allgemeine Verbraucherpreisindex (Basisjahr = 2000) des Statistischen Bundesamts verwendet (Destatis 2021c).

152 Technisch mögliche THG-Einsparungen durch Effizienzgewinne wurden in der Vergangenheit in großen Teilen durch gegenläufige Entwicklungen in Fahrzeugeigenschaften (Zunahme Fahrzeuggewicht und Motorleistung) konterkariert. Zudem führte eine Änderung des Verbrauchsverhaltens, bedingt unter anderem durch Rebound- und allgemeine Wohlstandseffekte (siehe Infokasten 10), zu einer gestiegenen Transportintensität, welche emissionssteigernd wirkte. Es erscheint fraglich, inwiefern existierende klimapolitische Instrumente (wie bspw. Flottengrenzwerte der EU sowie die Einführung des BEHG ab dem Jahr 2021) dazu führen können, dass auch eine Reduzierung der Verkehrsleistung im motorisierten Individualverkehr sowie ein Modal Shift erfolgen. Aus sozialwissenschaftlicher Forschung ist bekannt, dass die Verkehrsmittelwahl und das Ausmaß der Nutzung von Pkw multifaktoriell bedingt ist. Für einen Überblick über Determinanten und beeinflussende Faktoren für die Pkw-Nutzung siehe bspw. Dingil et al. (2021), Javaid et al. (2020), Liao et al. (2017) und Dütschke et al. (2022). Als relevant haben sich in der wissenschaftlichen Literatur u. a. die Verfügbarkeit von Alternativen (zu motorisiertem Individualverkehr), Gewohnheiten bzw. soziale Praktiken, sozioökonomische und räumliche Faktoren, die Reisedauer und Distanz, persönliche Einstellungen sowie soziale Normen herausgestellt. Bei

Investitionsentscheidungen spielen daneben auch die Marktdurchdringung und persönliche Erfahrung mit alternativen Antrieben (z. B. batterieelektrischen Fahrzeugen), die Einstellung zu Innovationen sowie politische/finanzielle Anreize eine Rolle (Liao et al. 2017). Dem Faktor Infrastruktur kommt sowohl bei kurzfristiger Verkehrsmittelwahl als auch bei Investitionsentscheidungen eine herausragende Bedeutung zu (Javaid et al. 2020). Aus sozialwissenschaftlicher Perspektive bestehen daher vielfältige Ansätze für eine zielführende Klimapolitik, um auch eine steigende Transportintensität im motorisierten Individualverkehr sowie Antriebsarten im Pkw-Bestand zu adressieren und Erfolge im Bereich technischer Effizienzsteigerungen in Gänze zu realisieren.

Infokasten 13

CO₂-Flottengrenzwerte der EU

Die europäischen CO₂-Flottengrenzwerte stellten in der vergangenen Dekade das zentrale Instrument der EU (EG/443/2009, EU/510/2011 und (EU) 2019/631) zur Senkung der CO₂-Emissionen im Straßenverkehr dar (FÖS 2016; Puls 2013). Die Einführung der Flottengrenzwerte durch die EU war eine Reaktion auf ein Scheitern der im Jahr 1998 formulierten freiwilligen Selbstverpflichtung der Automobilbranche, THG-Emissionen in der Fahrzeugflotte auf 140 g pro km bis zum Jahr 2008 zu reduzieren (BMU 2020). Daraufhin wurde vorgesehen, den durchschnittlichen CO₂-Ausstoß aller Neuwagen in der EU ab dem Jahr 2015 auf 130 g pro km zu limitieren. Dabei wurde die Diversität an Flotten berücksichtigt, indem herstellereinspezifische Teilziele ermöglicht wurden. Herstellerflotten mit höherem Durchschnittsgewicht erhalten, vereinfacht ausgedrückt, höhere Grenzwerte, Flotten mit geringerem Durchschnittsgewicht werden niedrigere Grenzwerte auferlegt (BMU 2020). Liegen die berechneten CO₂-Emissionen oberhalb der herstellereinspezifisch erlaubten Grenzwerte, fallen Strafzahlungen an. Den rechnerischen CO₂-Ausstoß können Hersteller über den Absatz von „Zero und Low Emissions Vehicles (ZLEV)“ senken, also beispielsweise über batterieelektrische Pkw, welche in der Berechnung der durchschnittlichen Flottenemissionen von einem CO₂-Ausstoß mit 0 g pro km angesetzt stärker gewichtet werden (sogenannte „Supercredits“; BMU 2020). Auch der Einsatz von vergleichsweise schweren Plug-in-Hybriden in der Fahrzeugflotte beeinflusst die Einhaltung der Grenzwerte durch eine Erhöhung des Flottengewichts und einem im Vergleich zu den Realemissionen niedrig angesetzten CO₂-Ausstoß (Plötz et al. 2020). Darüber hinaus ist ein Pooling zwischen Herstellern möglich, wodurch Flotten mit Emissionswerten oberhalb der Grenzwerte die Überschreitung dieser durch eine Zusammenlegung mit Flotten anderer Hersteller ausgleichen und somit Strafzahlungen entgehen können (Transport & Environment und Gimbert 2021). Im Rahmen der letzten Revision der europäischen Flottengrenzwerte im Jahr 2019 wurden neue prozentuale Minderungen beschlossen; ab dem Jahr 2025 15 %, ab dem Jahr 2030 37,5 % gegenüber dem Jahr 2021 (BMU 2020). Die Ausgestaltung der EU-Flottengrenzwerte löste in der Vergangenheit starke Debatten aus; unter anderem bezüglich des Ambitionsniveaus, der möglichen Verrechnung von ZLEVs mit THG-Emissionen von Verbrennern, der Manipulationsanfälligkeit der Messverfahren sowie der unterschiedlichen Grenzwertsetzung auf Basis verschiedener Flottengewichte (siehe bspw. BMU 2020; DUH 2021; Leisinger und Runkel 2021; Transport & Environment und Gimbert 2021).

Insgesamt ist festzuhalten, dass die EU-Flottengrenzwerte in der Vergangenheit durch technische Effizienzsteigerungen an einer Reduzierung der Energieintensität ansetzten, insbesondere in den letzten Jahren jedoch durch die Durchdringung mit ZLEV auch die Emissionsintensität beeinflussen. Perspektivisch wird letztere vermutlich die primär beeinflusste Komponente sein, da durch die

regulatorischen Flexibilitäten für die Einhaltung der Grenzwerte (wie bspw. die Verrechnungsmöglichkeiten der CO₂-Ausstöße von Verbrennern mit ZLEV) eine steigende Energieeffizienz von Verbrennern unter den jetzigen Rahmenbedingungen nicht notwendig sein wird (Transport & Environment und Gimbert 2021; DUH 2021).

Aus einer Klimaschutzperspektive erscheint die Bevorteilung schwerer Fahrzeugflotten durch hohe Grenzwerte vor dem Hintergrund einer kontinuierlich steigenden Leermasse der Neuzulassungen retrospektiv als nicht förderlich. Fehlende spezifische Effizienzstandards oder Verbrauchsobergrenzen für ZLEV und Verbrenner fördern den Trend zu hochmotorisierten und ressourcenintensiven Autos (DUH 2021). Im Gegensatz zu anderen europäischen Ländern, wie beispielsweise Frankreich, den Niederlanden, Portugal oder Schweden existiert in Deutschland kein zusätzliches (Bonus-)Malus System, mit dem emissionsintensivere Fahrzeuge sanktioniert werden (UBA 2021e). Die Transportintensität sowie ein möglicher „Modal Switch“, also eine Verlagerung des motorisierten Individualverkehrs auf andere Verkehrsformen wie Fahrrad und Bahn, bleiben von den EU-Flottengrenzwerten unberührt. Unter Betrachtung der bisherigen Entwicklung der THG-Emissionen erscheint daher fraglich, inwiefern eine Fokussierung der Klimapolitik im Verkehrssektor auf Verbesserungen der technischen Pkw-Effizienz die Zieleinhaltung sicherstellen kann.

2.5.3.2 Ursachen und Trends – Güterverkehr

Energieintensität

153 Der Güterverkehr, der in dieser Analyse durch Lkw und Busse (CRF-Kategorie 1.A.3.b.iii) abgedeckt wird, trug im Jahr 2020 zu knapp 30 % der THG-Emissionen bei. Die Energieintensität ($EEV_{\text{Verbrauch}}$ pro gefahrenem Tkm) des Lkw-Verkehrs sank im Zeitraum von 2000 bis 2020 durchgängig. Der emissionsmindernde Einfluss der Energieintensität entspricht einer steigenden Effizienz im Bereich des Straßengüterverkehrs, die sowohl durch technische Verbesserungen an den Fahrzeugen (UBA 2022f) als auch durch eine effizientere Logistik zu erklären ist (siehe Förster et al. 2018).

Tankverhalten

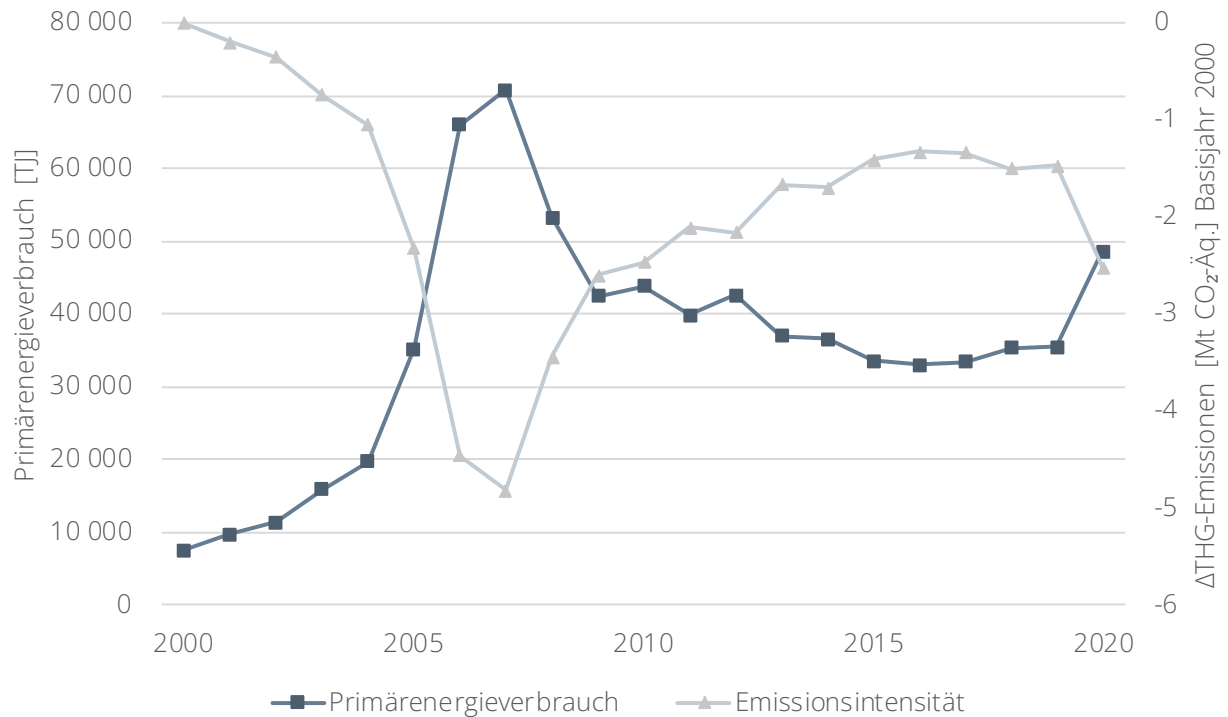
154 Das Tankverhalten hat auch auf den Verlauf der THG-Emissionen im Lkw-Verkehr einen Einfluss, wenngleich dieser nicht so stark ausgeprägt ist wie im Pkw-Verkehr. Auch beim Straßengüterverkehr variiert die durch die Kraftstoffaufnahme im Ausland induzierte Reduktion der THG-Emissionen über den Betrachtungszeitraum. Die Analyse des Pkw-Verkehrs hinsichtlich der vermehrten Kraftstoffaufnahme im Ausland bei steigenden Preisen im Inland trifft dabei ebenso auf den Lkw-Verkehr und die dort verwendeten Kraftstoffe zu. Die Verteuerung des Diesels in den Jahren 2000 bis 2003 im Rahmen der ökologischen Steuerreform zeigt sich in dieser Periode deutlich im Tankverhalten der Lkw-Flotte (siehe Förster et al. 2018).

Emissionsintensität

155 Die Entwicklung der Emissionsintensität (THG/EEV_{Absatz}) hatte einen geringen emissionsmindernden Effekt auf die Gesamtemissionen im Lkw-Verkehr. Dieser Verlauf wird analog zum Pkw-Verkehr durch den Anteil an Biomasse im Verkehrssektor erklärt. Während der Anteil der Biomasse emissionsseitig nur nachrichtlich erfasst wird, ist er vollumfänglich im EEV_{Absatz} enthalten. So nimmt der biogene Anteil bis zum Jahr 2007 deutlich zu, verringert sich bis zum Jahr 2009 jedoch wieder für die CRF-Kategorie 1.A.3.b.iii

auf ungefähr die Hälfte des Wertes aus dem Jahr 2007. Im Jahr 2020 ist ein weiterer Anstieg zu verzeichnen. Abbildung 59 zeigt den Anteil der Biomasse in der entsprechenden CRF-Kategorie, die dem invertierten Verlauf der Emissionsintensität entspricht.

Abbildung 59: Biomasse in TJ in der CRF-Kategorie 1.A.3.b.iii

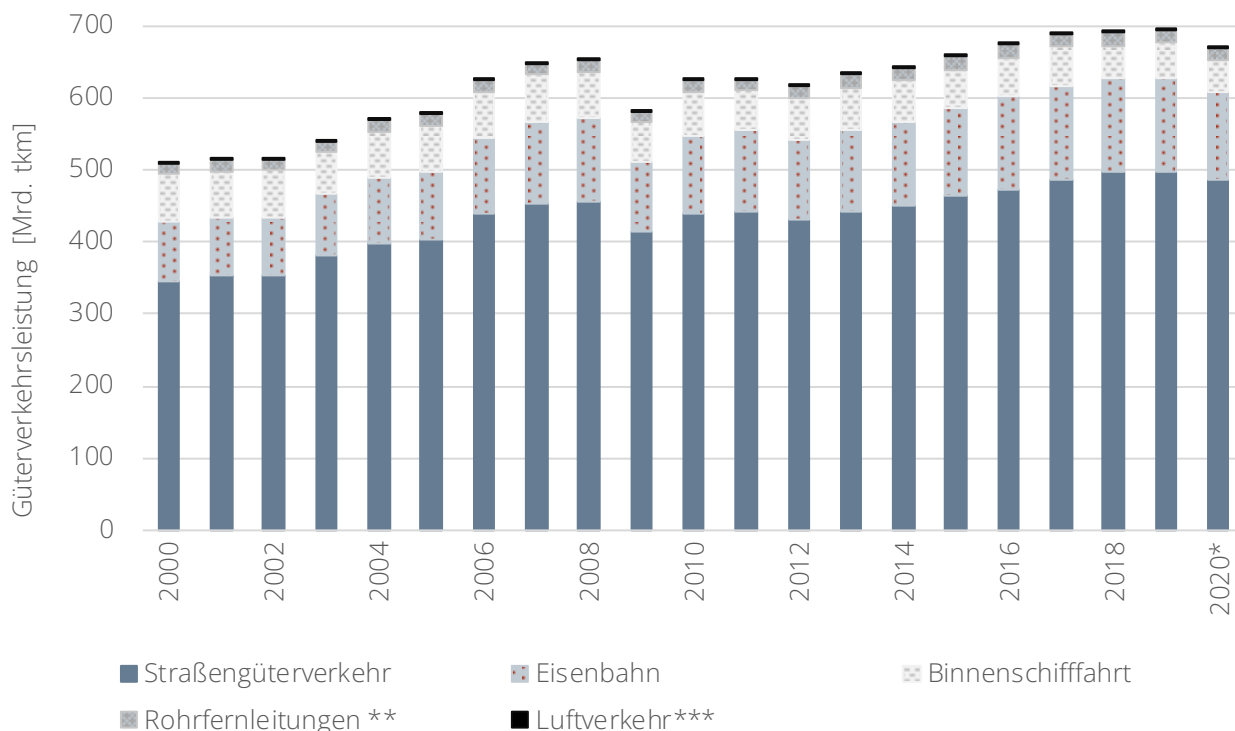


Eigene Darstellung auf Basis von UBA (2022n). Die Linie des Primärenergieverbrauchs bezieht sich auf die linke Y-Achse, die Linie der Emissionsintensität ist mit der rechten Y-Achse assoziiert.

Transportintensität und BIP

156 Die Transportintensität im Lkw-Bereich (gefahrte Tonnenkilometerzahl pro Euro BIP) hat zusammen mit der Wirtschaftsentwicklung einen emissionssteigernden Effekt. Dies begründet sich insbesondere durch eine starke Zunahme des Straßengüterverkehrs. Abbildung 60 zeigt die Entwicklung der Güterverkehrsleistung nach Verkehrsmitteln. Allgemein ist die Güterverkehrsleistung im Zeitraum von 2000 bis 2020 um 31,6 % gewachsen, wobei der Straßengüterverkehr um 40,7 % und der Schienengüterverkehr um 46,2 % zugenommen hat. Die Binnenschifffahrt ist dagegen um 30,3 % gesunken. Im Jahr 2020 betrug der Anteil des Straßengüterverkehrs an der gesamten Güterverkehrsleistung 72,4 %, wohingegen die klimafreundlicheren Transportalternativen Bahn und Binnenschifffahrt lediglich 18 % und 7 % ausmachten (siehe UBA (2022i) und UBA (2020a)). Es ist also kein Umstieg von der Straße auf die Schiene zu erkennen.

Abbildung 60: Güterverkehrsleistung in Tkm



Eigene Darstellung auf Basis von BMDV (2021), * z.T. vorläufige Werte ** ab 1996 nur Rohöl *** Fracht- und Luftpost, ohne Umladungen.

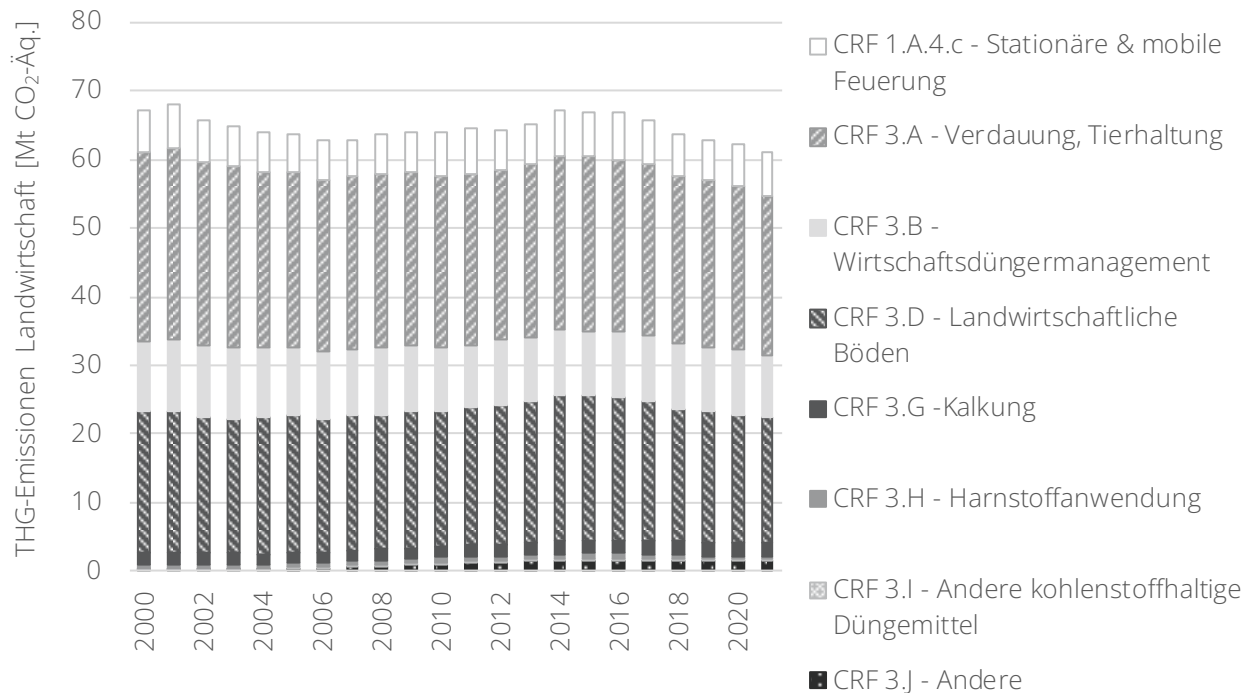
- 157 Zusammenfassend zeigt sich im Straßengüterverkehr, dass die technisch bedingten Treibhausgaseinsparungen aufgrund der gestiegenen Verkehrsleistung und des wirtschaftlichen Wachstums zum Teil wieder ausgeglichen oder überkompensiert wurden.
- 158 Maßnahmen, die die THG-Minderung im Straßengüterverkehr adressieren, wurden vornehmlich in den letzten Jahren beschlossen. Hierbei sind besonders die von der EU im Jahr 2019 eingeführten CO₂-Flottenzielwerte für schwere Nutzfahrzeuge wichtig. Diese schreiben vor, dass die durchschnittlichen spezifischen CO₂-Emissionen pro Kilometer ab dem Jahr 2025 um mindestens 15 % und ab dem Jahr 2030 um mindestens 30 % gegenüber den Jahren 2019/20 niedriger sein müssen (siehe UBA 2021b). Zudem hat die Bundesregierung im Klimaschutzprogramm 2030 beschlossen eine CO₂-Differenzierung der Lkw-Maut zugunsten klimaschonender Antriebe einzuführen. Die Wirkungen dieser Maßnahmen sind in den vorliegenden Daten der Dekomposition noch nicht präsent (siehe Bundesregierung 2019).

2.6 Landwirtschaft

2.6.1 Entwicklung der Treibhausgasemissionen

- 159 Bei der Analyse der THG-Emissionen im Landwirtschaftssektor sollen neben der Betrachtung des Sektors zwei Aspekte stärker beleuchtet werden, nämlich die THG-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Flächen und die THG-Emissionen aus der Nutztierhaltung. Die folgende Abbildung 61 zeigt zunächst die Entwicklung der Emission für den gesamten Sektor.

Abbildung 61: Entwicklung der THG-Emissionen des Sektors Landwirtschaft nach Bundes-Klimaschutzgesetz im Zeitraum 2000-2021



Eigene Darstellung auf Basis der Trendtabellen des Treibhausgasinventars 2022 (UBA 2022c). Die Daten für das Jahr 2021 basieren auf der Berechnung der Vorjahresemissionen, Inventardaten liegen zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vor.

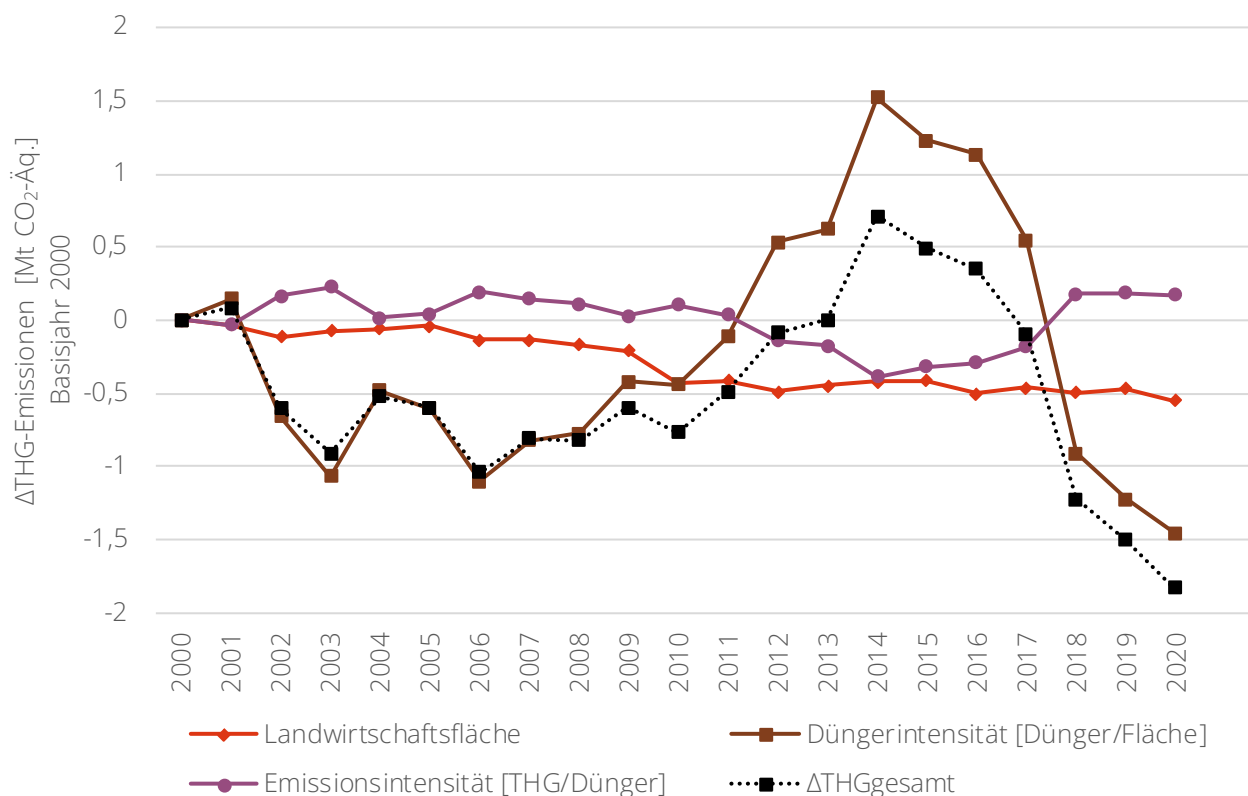
160 Die THG-Emissionen im Sektor Landwirtschaft sind in den Jahren von 2000 bis 2021 insgesamt von 67 Mt CO₂-Äq. auf 61 Mt CO₂-Äq. gesunken, also um 9 % bezogen auf das Jahr 2000. Hierbei ist jedoch kein stetiger Trend ersichtlich. Vielmehr sinken die THG-Emissionen nach einem Anstieg zwischen den Jahren 2006 und 2015 erst seit dem Jahr 2016 wieder auf das Niveau vom Jahr 2000. Mit rund 43 % haben die THG-Emissionen aus der Verdauung (Tierhaltung, CRF-Kategorie 3.A) den größten Anteil an den landwirtschaftlichen THG-Emissionen, gefolgt von landwirtschaftlichen Böden (rund 33 %, CRF-Kategorie 3.D) und dem Wirtschaftsdüngermanagement (rund 16 %, CRF-Kategorie 3.B). Die anderen CRF-Kategorien spielen eine untergeordnete Rolle.

2.6.2 Dekompositionsanalyse

161 Für die Landwirtschaft wurden zwei Dekompositionen durchgeführt, die zum einen die landwirtschaftlichen Böden (siehe Abbildung 62 und Abbildung 63) und zum anderen die Nutztierhaltung (siehe Abbildung 64 und Abbildung 65) beschreiben. Insgesamt umfassen beide Dekompositionen 84 % der THG-Emissionen des Sektors. Die Methodik der Dekompositionen wird im Anhangskapitel 6 beschrieben. Für die Nutztierhaltung werden dabei die direkten THG-Emissionen von Methan durch enterische Fermentation (Verdauung, CRF-Kategorie 3.A) verschiedener Nutztiere und die Methan- und Lachgasemissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement (CRF-Kategorie 3.B) aggregiert berücksichtigt. Die Nutztiere umfassen Rinder, Schweine, Geflügel und die Sammelkategorie „andere“ (UBA 2022n). In die Dekomposition zu den landwirtschaftlichen Böden gehen die

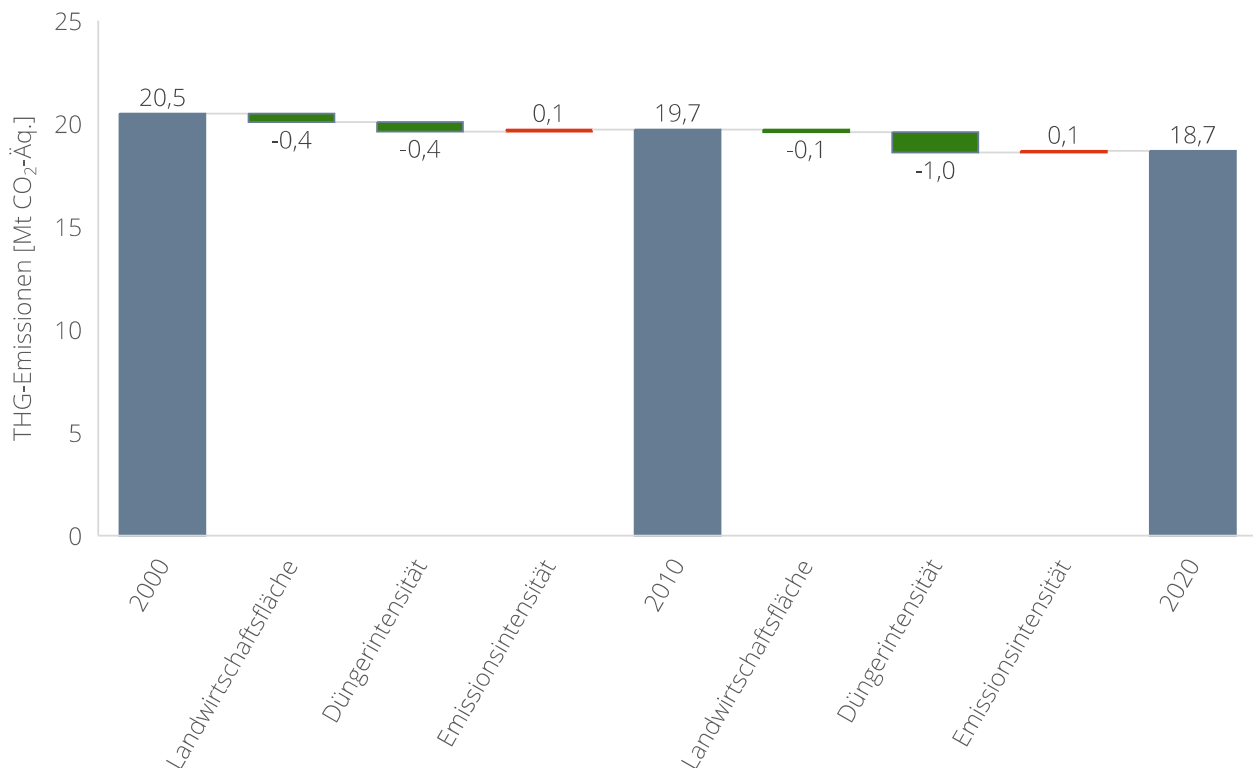
Lachgasemissionen aus der Anwendung von synthetischem Dünger (CRF-Kategorie 3.D.a.1), die durch Ausscheidungen beim Weidegang der Tiere verursachten Lachgasemissionen (CRF-Kategorie: 3.D.a.3) sowie die Lachgasemissionen aus atmosphärischer Deposition (CRF-Kategorie 3.D.b.1) ein. Nicht berücksichtigt wurden für die Dekompositionen die THG-Emissionen aus der stationären und mobilen Feuerung (CRF-Kategorie 1.A.4.c), aus Kalkung (CRF-Kategorie 3.G), aus Harnstoffanwendung (CRF-Kategorie 3.H), aus anderen kohlenstoffhaltigen Düngemitteln (CRF-Kategorie 3.I) sowie aus weiteren Emissionsquellen (CRF-Kategorie 3.J).

Abbildung 62: Dekomposition der THG-Emissionen von landwirtschaftlich genutzten Flächen - Änderungen im Vergleich zu 2000



Eigene Darstellung. Weitere Details zu den verwendeten Daten finden sich in Tabelle 8.

Abbildung 63: Dekomposition der THG-Emissionen von landwirtschaftlich genutzten Flächen - Aggregierte Betrachtung 2000-2010 und 2010-2020

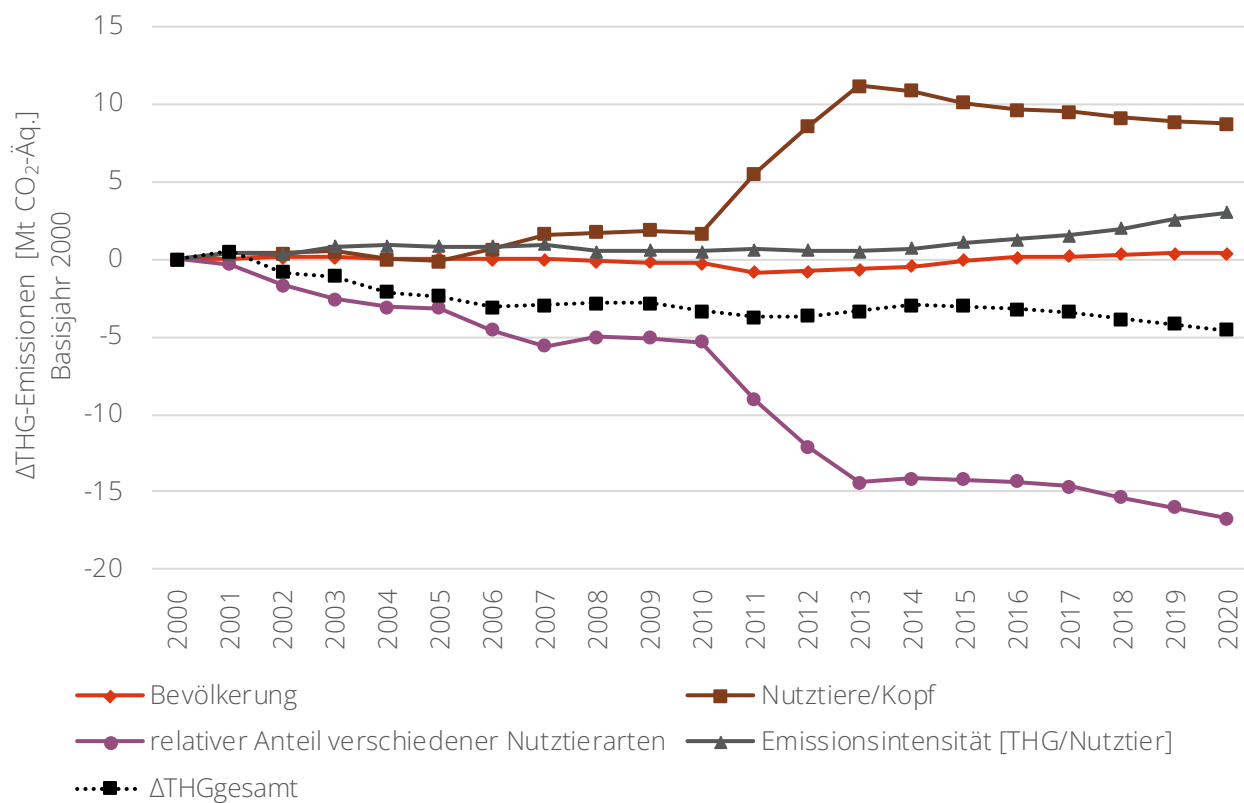


Eigene Darstellung. Weitere Details zu den verwendeten Daten finden sich in Tabelle 8.

162 Abbildung 62 und Abbildung 63 zeigen die Dekomposition der jährlichen THG-Emissionen aus landwirtschaftlichen Flächen in die Komponenten Emissionsintensität (THG-Emissionen pro verwendete Menge synthetischem Dünger), Düngerintensität (Synthetischer Dünger pro Fläche) und Landwirtschaftsfläche im Vergleich zu 2000 bzw. aggregiert über die Zeiträume 2000-2010 und 2010-2020.

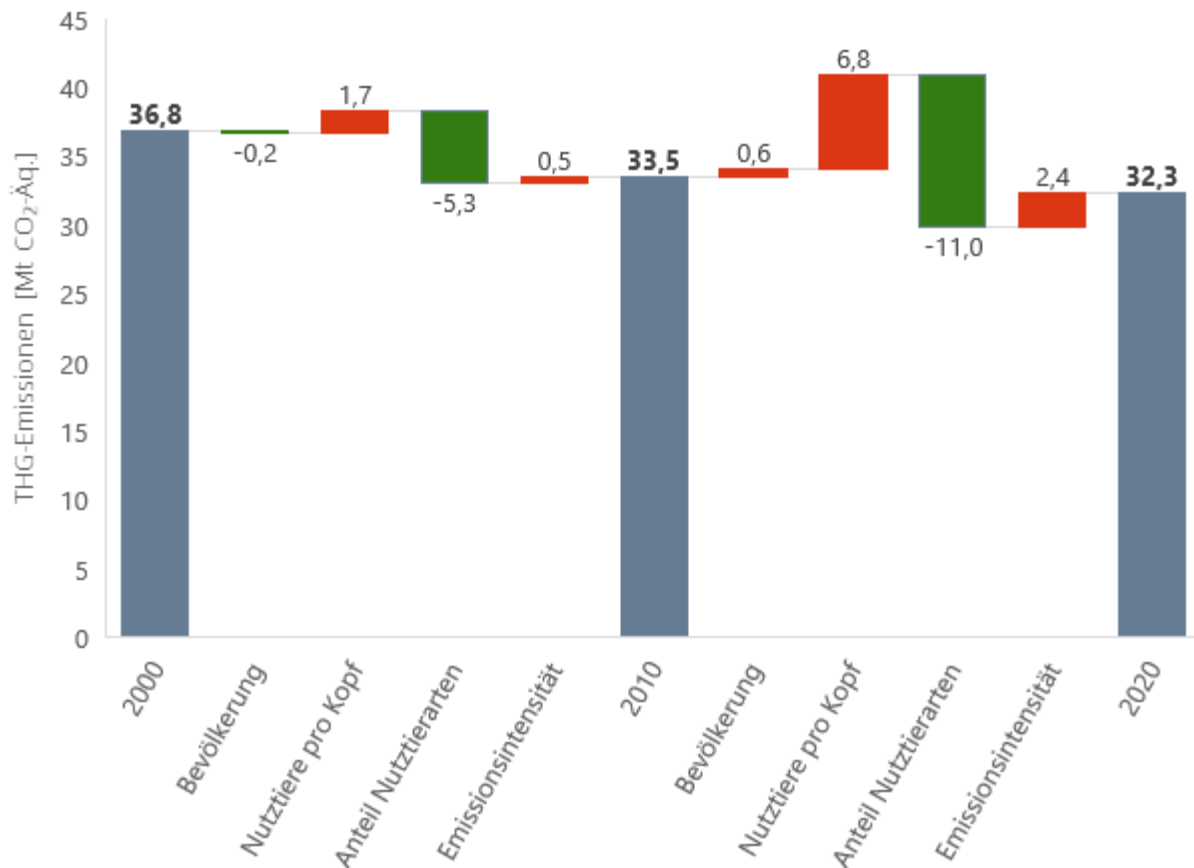
163 Die THG-Emissionen aus landwirtschaftlichen Flächen (siehe Abbildung 63) sind im Zeitraum zwischen den Jahren 2000 und 2020 leicht rückläufig. In der Dekomposition für die landwirtschaftlich genutzten Böden werden die THG-Emissionen vor allem durch die Komponente Düngerintensität beeinflusst. Diese wirkt bis zum Jahr 2011 im Vergleich zum Basisjahr 2000 emissionsmindernd, wobei sie jedoch starken Schwankungen unterliegt. Von 2011 bis 2014 kommt es zu einem starken Anstieg der Düngerintensität und resultierend hieraus zu einem emissionssteigernden Effekt der Komponente. Seit dem Jahr 2014 lässt sich dann ein stabiler Abwärtstrend beobachten, sodass die Komponente seit dem Jahr 2017 wieder eine emissionsmindernde Wirkung hat. Im Gegensatz hierzu haben die beiden Komponenten Emissionsintensität und Landwirtschaftsfläche nur einen geringen Einfluss auf die THG-Emissionen, wobei sich auch die starken Schwankungen in der Düngerintensität in der aggregierten Betrachtung über zwei Dekaden aufheben, sodass der resultierende Gesamteinfluss dieser Komponente auch nicht sehr stark auf die gesamten THG-Emissionen des Sektors Landwirtschaft wirkt (siehe Abbildung 63).

Abbildung 64: Dekomposition der THG-Emissionen der Nutztierhaltung in der Landwirtschaft - Änderungen im Vergleich zu 2000



Eigene Darstellung. Weitere Details zu den verwendeten Daten finden sich in Tabelle 8.

Abbildung 65: Dekomposition der THG-Emissionen der Nutztierhaltung in der Landwirtschaft - Aggregierte Betrachtung 2000-2010 und 2010-2020



Eigene Darstellung. Weitere Details zu den verwendeten Daten finden sich in Tabelle 8.

164 Abbildung 64 und Abbildung 65 zeigen die Dekomposition der jährlichen THG-Emissionen der Nutztierhaltung in die Komponenten Emissionsintensität (THG-Emissionen Nutztiere pro Anzahl je Nutztierart), Anteil Nutztierarten (Anzahl je Nutztierart pro Anzahl Nutztiere), Nutztiere pro Kopf (Anzahl Nutztiere pro Anzahl der Einwohner:innen) und Bevölkerungsentwicklung (Anzahl der Einwohner:innen) im Vergleich zum Jahr 2000 bzw. aggregiert über die Zeiträume 2000-2010 und 2010-2020.

165 Die THG-Emissionen aus der Nutztierhaltung, die in dieser Dekomposition den Großteil der THG-Emissionen aus den CRF-Kategorien 3.A (Verdauung, Tierhaltung) und 3.B (Wirtschaftsdüngermanagement) beinhalten, sind insgesamt leicht rückläufig. Die Komponente Nutztiere pro Kopf wirkt emissionssteigernd und stieg zwischen den Jahren 2010 und 2013 stark an, was sich auch in der aggregierten Betrachtung über zwei Dekaden bemerkbar macht. Dem entgegen wirkt der Anteil Nutztierarten. Die beiden Komponenten Emissionsintensität und Bevölkerungsentwicklung spielen eine untergeordnete Rolle (siehe Abbildung 65).

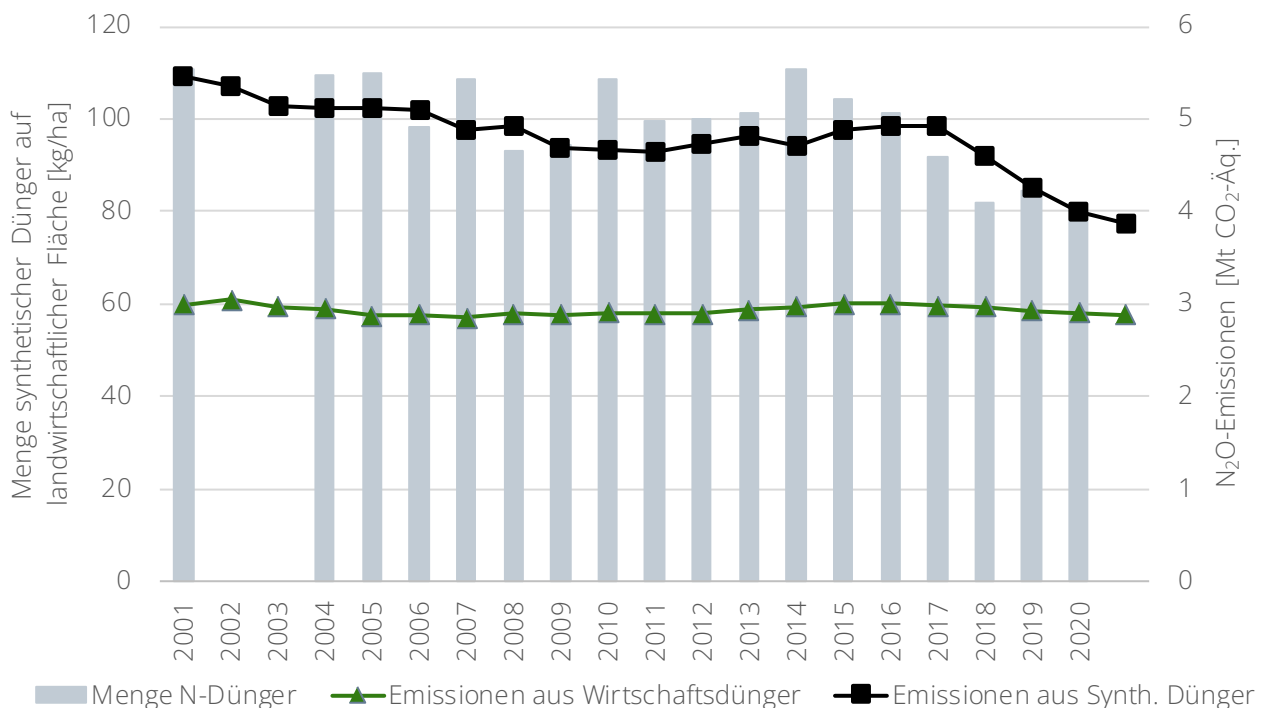
2.6.3 Diskussion von Ursachen der Entwicklung

2.6.3.1 Ursachen und Trends – Landwirtschaftliche Böden

166 Die Dekomposition zeigt starke Veränderungen zwischen aufeinander folgenden Jahren in der Komponente Düngerintensität (Dünger pro Fläche) (siehe Abbildung 120), die sich teils emissionserhöhend, teils emissionsreduzierend ausgewirkt hat. Dies lässt sich unter anderem auf die jeweils vorherrschenden Witterungsbedingungen zurückführen, die eine unterschiedliche Verwendung von synthetischem Dünger bedingen. Das Jahr 2018 war z. B. sehr trocken (DWD 2018), sodass weniger synthetischer Dünger ausgebracht wurde, weil bei Trockenheit die Nährstoffflüsse zu den Pflanzen geringer sind (Mariotte et al. 2020; Dijkstra et al. 2015).

167 Die Entwicklung der Düngerintensität ist getrieben durch den Verbrauch von synthetischem Stickstoffdünger je Hektar (siehe Abbildung 66). Ab dem Jahr 2014 sinkt der Verbrauch von Düngemittel pro Flächeneinheit, was sich im ab dem Zeitpunkt sinkenden Verbrauch von synthetischem Dünger begründet. Mögliche Gründe dafür sind verbesserte Ausbringtechniken sowie die Umsetzung von umweltpolitischen Auflagen wie der Nitratrichtlinie (EU 1991). Da die rückläufige Verwendung von synthetischem Dünger nicht durch eine verstärkte Verwendung von Wirtschaftsdünger kompensiert wird, sind die düngerbasierten Lachgasemissionen aus der Landwirtschaft seit dem Jahr 2016 rückläufig (siehe Abbildung 66).

Abbildung 66: Verbrauch von synthetischem Stickstoffdünger und Verlauf der Lachgasemissionen aufgeteilt in THG-Emissionen, die durch Wirtschaftsdünger und synthetischen Dünger bedingt sind

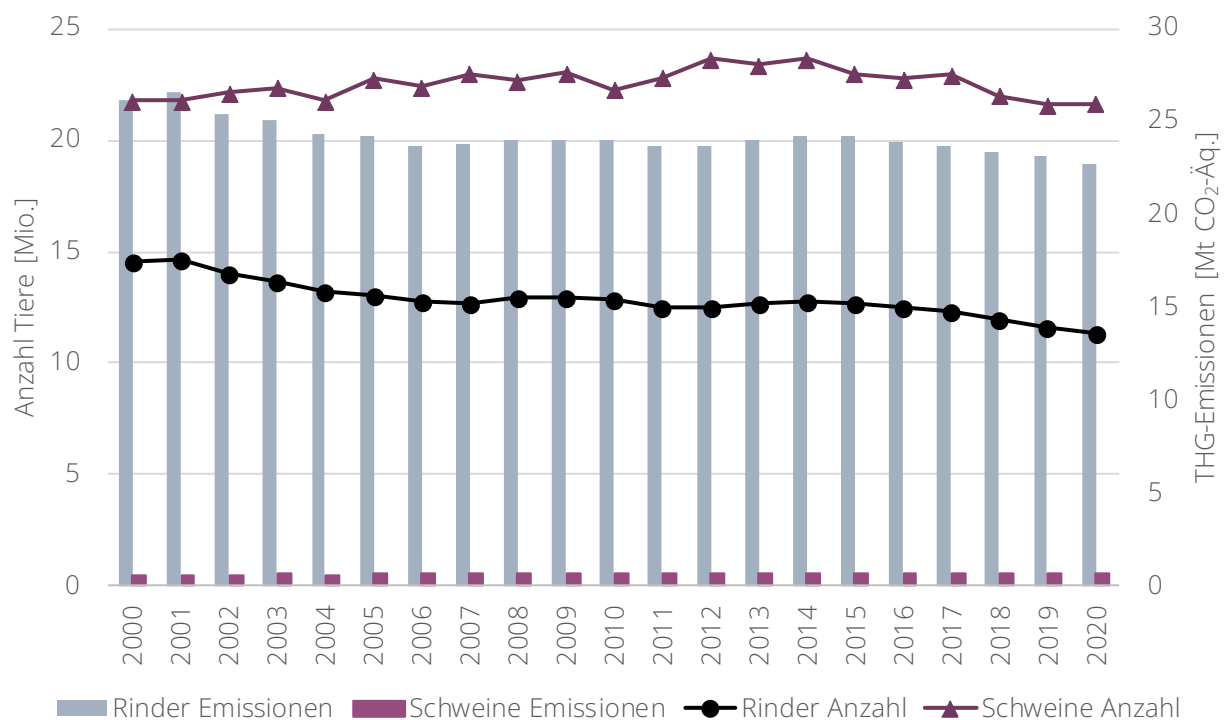


Eigene Darstellung. Die Umrechnung der N₂O-Emissionen in CO₂-Äq. erfolgte mit dem aktuell noch angewendeten Treibhausgaspotenzial des Vierten Sachstandsberichts für CH₄ für die Referenzperiode von 100 Jahren. Daten der THG-Emissionen: (Vos, Cora et al. 2022), 2022; Daten zum Düngerverbrauch: (BMEL 2022a).

2.6.3.2 Ursachen und Trends – Nutztierhaltung

168 Die Dekomposition zu Nutztieren zeigt in der jährlichen Betrachtung einen Zeitraum, der große jährliche Änderungen in den Komponenten Nutztiere pro Kopf und Anteil Nutztierarten aufweist (2011 – 2013, siehe Abbildung 64). Für den Anstieg der Komponente Nutztiere pro Kopf im Jahr 2011 sowie für das Absinken der Komponente Anteil Nutztierarten könnte der Anstieg der Schweinezahlen verantwortlich sein (siehe Abbildung 67). Dass sich dieser Effekt nicht in den THG-Emissionen widerspiegelt, ließe sich durch den deutlich geringeren Emissionsfaktor für Schweine von 1,2 kg CH₄ pro Kopf pro Jahr (Tabelle 3.As1; UBA 2022n) gegenüber dem Emissionsfaktor für Rinder inklusive Milchkühe von 80,5 kg CH₄ pro Kopf pro Jahr erklären (Rinder 48,4 kg CH₄ pro Kopf pro Jahr, Milchkühe 140,8 kg CH₄ pro Kopf pro Jahr, Inventar Tabelle 3.As1). In der Dekompositionsabbildung (siehe Abbildung 65) ist ein leichter Rückgang der THG-Emissionen aus der Nutztierhaltung seit dem Jahr 2000 zu erkennen. Dieser Rückgang deckt sich mit dem Rückgang der Rinderzahlen (siehe Abbildung 67).

Abbildung 67: Entwicklung der Tierzahlen für ausgewählte Nutztierarten

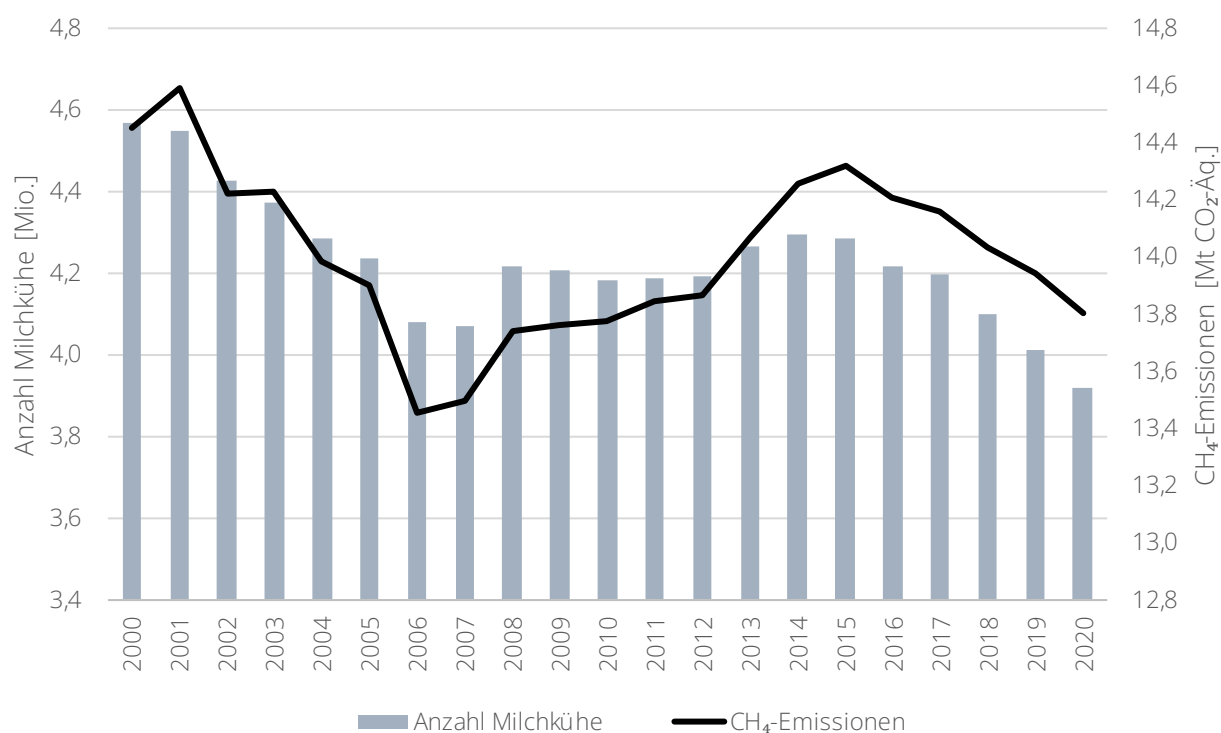


Eigene Darstellung. Die Umrechnung der CH₄-Emissionen in CO₂-Äq. erfolgte mit dem aktuell noch angewendeten Treibhausgaspotenzial des Vierten Sachstandsberichts für CH₄ für die Referenzperiode von 100 Jahren. Daten: (UBA 2022n).

169 Die THG-Emissionen aus der Milchproduktion (siehe Abbildung 68) werden nicht allein durch die Anzahl der Milchkühe beeinflusst, sondern auch durch die Milchleistung (Produktion von Milch durch eine Kuh pro Jahr) einer Kuh. Die Milchleistung stieg in den vergangenen Jahren vor allem durch veränderte Futtergabe und Züchtung an (siehe Abbildung 69), wodurch die Milcherzeugung (Gesamtmenge an produzierter Milch) erhöht wurde (siehe Abbildung 69), obwohl die Anzahl der Milchkühe sank (siehe Abbildung 68). Der Anstieg der Milchleistung bedingt auch den Anstieg des Emissionsfaktors für Milchkühe, der zwischen den Jahren 2013 und 2020 von 131,9 kg CH₄ pro Kopf pro Jahr auf 140,8 kg

CH₄ pro Kopf pro Jahr stieg (UBA 2022n). Das bedeutet, dass die THG-Emissionen pro Tier in der Summe der betrachteten Tierarten (Rinder, Schweine, Geflügel und andere) in den letzten Jahren anstiegen. Dadurch steigt auch die in der Dekomposition dargestellte Komponente Emissionsintensität [THG pro Nutztier] (siehe Abbildung 64) seit dem Jahr 2014 an.

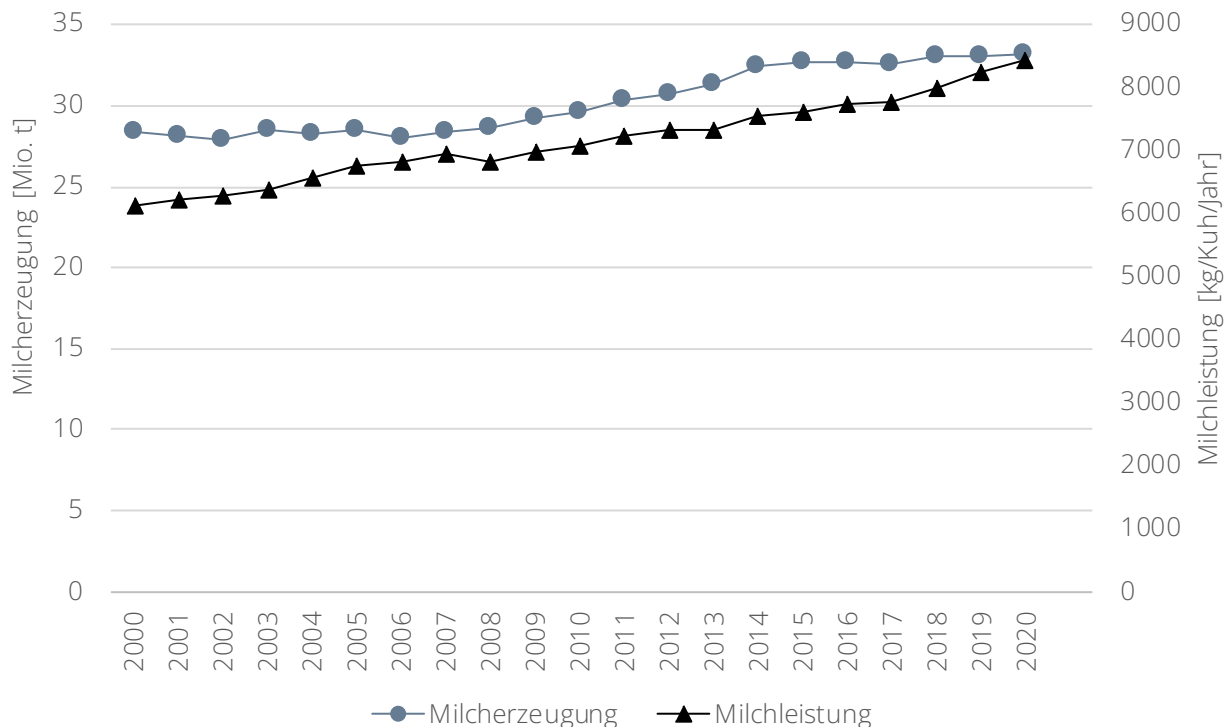
Abbildung 68: Entwicklung der Anzahl der Milchkühe und der CH₄-Emissionen aus der Milchkuhhaltung



Eigene Darstellung. Die Umrechnung der CH₄-Emissionen in CO₂-Äq. erfolgte mit dem aktuell noch angewendeten Treibhausgaspotenzial des Vierten Sachstandsberichts für CH₄ für die Referenzperiode von 100 Jahren. Daten: (UBA 2022n).

170 Um Energie zu gewinnen und die THG-Emissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement (CRF-Kategorie 3.B), das in die Dekomposition zu den Nutztieren einbezogen wird, zu reduzieren, wird Wirtschaftsdünger in den letzten Jahren vermehrt in Biogasanlagen verwendet. Seit dem Jahr 2010 hat sich der Substratinput von Gülle und Festmist in Biogasanlagen in etwa verdoppelt (FNR 2022). Derzeit werden rund 30 % des vorhandenen Wirtschaftsdüngers vergärt (BMEL 2022d). Die im Februar 2022 eingeführte neue Förderlinie des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) zur Erhöhung des Anteils der Wirtschaftsdüngervergärung könnte insbesondere die durch die Lagerung von Wirtschaftsdünger bedingten Methanemissionen reduzieren (BMEL 2022d). Durch die Stromerzeugung aus der Vergärung von Gülle zu Biogas sowie die Nutzung von Biomasse in der gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme (KWK) gibt es eine Überschneidung und etwaige Emissionsverschiebungen zum Sektor Energiewirtschaft (siehe Kapitel 2.2.3 und Abbildung 21).

Abbildung 69: Milcherzeugung und Milchleistung



Eigene Darstellung. Daten: (BZL 2022a; BMEL 2021).

171 Die in den beiden Dekompositionen dargestellten Komponenten geben einen Einblick in die Gründe für die Entwicklung der THG-Emissionen im Sektor Landwirtschaft, liefern jedoch kein vollständiges Bild. So ist die Bevölkerungsentwicklung in Deutschland nur untergeordnet geeignet, um die THG-Emissionen der Landwirtschaft zu beschreiben. Der (inländische) Konsum an emissionsintensiven tierischen Produkten hingegen, also das Ernährungsverhalten der Menschen, nimmt dabei maßgeblich Einfluss auf den Tierbestand (Nutztiere pro Kopf) und die damit verbundenen THG-Emissionen (IPCC 2020). In Deutschland geht beispielsweise der Pro-Kopf-Verbrauch von Fleisch zwar zurück (BZL 2022b), allerdings bedingt durch einen Rückgang der Nachfrage nach Schweinefleisch. Der Rückgang an Schweinefleisch, welches einen geringere Emissionsfaktoren als Rindfleisch aufweist, wirkt daher weniger emissionsmindernd als ein vergleichbarer Rückgang des Rindfleischkonsums (siehe RZ 168). Der Konsum von Rindfleisch ist hingegen gleichbleibend in Deutschland. Um diese Nachfrage zu decken, stieg in den vergangenen Jahren der Import von Rindfleisch an (siehe Infokasten 14). Daher ist u. a. aus Klimaschutzgründen³⁹ die Förderung emissionsarmer (und gesunder) Ernährungsweisen relevant. Dies bedeutet bspw. nach Einschätzung der Zukunftskommission Landwirtschaft (ZKL 2021) sowie des IPCC (Mbow et al. 2019) eine Weiterentwicklung von Konsum- und Ernährungsstilen hin zu einer abwechslungsreichen, pflanzlich orientierten Ernährung bei gleichzeitiger Reduktion des Konsums

³⁹ Auf weitere Nebeneffekte der Nutztierhaltung bzw. des zunehmenden Konsums tierischer Produkte wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen. Detailliertere Ausführungen zu direkten und indirekten ökologischen Folgen der zunehmenden Nutztierhaltung (bspw. hinsichtlich Biodiversitätsverlusts und Gewässerbelastung) finden sich bei Leip et al. (2015), gesundheitliche Auswirkungen emissionsarmer Ernährungsweisen werden bspw. bei Springmann et al. (2018) sowie Hamilton et al. (2021) differenzierter untersucht.

tierischer Erzeugnisse.⁴⁰ Dabei konterkarieren bestehende Rahmenbedingungen in Teilen Bestrebungen, gesunde und nachhaltige Ernährungsweisen zu fördern. Ein Beispiel hierfür sind fehlgeleitete finanzielle Anreize (wie bspw. ein ermäßigter Steuersatz von 7 % auf den Großteil tierischer Produkte (Burger und Bretschneider 2021)).

- 172 Neben Bevölkerungszahl und inländischem Konsum, bestimmt auch der Handel die Produktion tierischer Erzeugnisse. Beispielhaft sind in Infokasten 14 die Netto-Emissionen durch den Import und Export von Fleisch dargestellt.

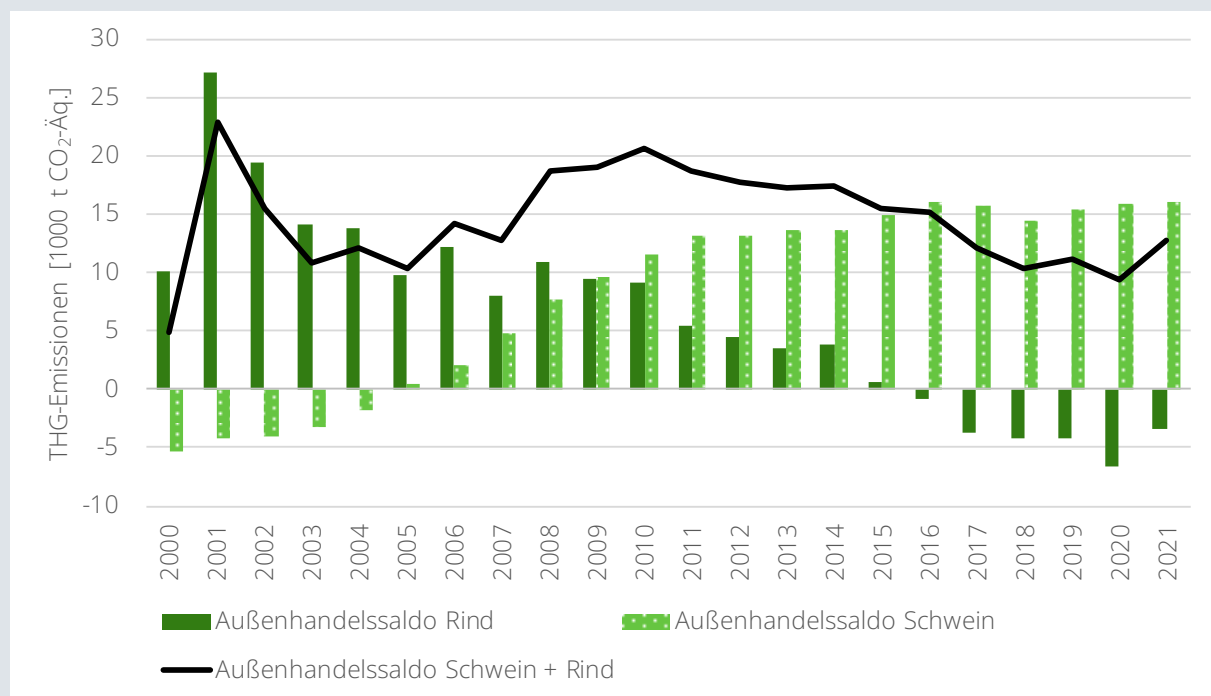
⁴⁰ Die Zukunftskommission Landwirtschaft (ZKL 2021) empfiehlt: „Eine abwechslungsreiche, pflanzlich orientierte Ernährung mit einem hohen Anteil an Obst und insbesondere Gemüse, Hülsenfrüchten sowie ballaststoffreichen Lebensmitteln, wie sie global fast in allen Ernährungsempfehlungen der Fachgesellschaften präferiert wird, sollte gefördert werden.“ Des Weiteren folgt sie den Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Ernährung (DGE) und empfiehlt, dass „der Konsum von tierischen Erzeugnissen reduziert werden“ sollte.

Infokasten 14

Exkurs zu Import-/Exportbilanz für Fleischprodukte

Deutschland war im Jahr 2020 weltweit nach Spanien und den USA der drittgrößte Exporteur für Schweinefleisch. Für Rindfleisch hingegen war Deutschland im Jahr 2020 der weltweit drittgrößte Importeur nach den USA und Japan (OECD). Durch das Territorialprinzip (siehe Infokasten 1) werden bei der Berichterstattung der THG-Emissionen nur die in Deutschland erzeugten THG-Emissionen, nicht jedoch die importierten THG-Emissionen berücksichtigt. Darüber hinaus werden keine Vorkettenemissionen, bspw. für den Futtermittelanbau bzw. Import sowie damit verbundene Landnutzungsveränderungen im Ausland eingerechnet. Für Rind- und Kalbfleisch hat sich Deutschland seit dem Jahr 2016 zu einem Netto-Importeur entwickelt, während es für Schweinefleisch seit dem Jahr 2005 ein Netto-Exporteur geworden ist. Für Rind- und Kalbfleisch ist Deutschland daher auch ein Netto-Importeur von THG-Emissionen, während es für Schweinefleisch ein Netto-Exporteur von THG-Emissionen ist (siehe Abbildung 70). Insgesamt exportierte Deutschland auf Grund des Handels mit diesen beiden Fleischarten netto 13 000 Tonnen CO₂-Äq im Jahr 2021, die den inländischen THG-Emissionen zugerechnet werden. Die durch den Verzehr von Nutztieren und die Produktion von Milch entstehenden THG-Emissionen lassen sich national aufgrund des Territorialprinzips kaum ohne harte Mengenbegrenzungen der THG-Emissionen auf der Erzeugungsseite beeinflussen. Ergänzend scheint es sinnvoll, vor allem durch die Erhöhung der Transparenz der Folgen eines hohen Fleischverbrauchs international die Nachfrage nach Fleisch zu reduzieren.

Abbildung 70: THG-Emissionen resultierend aus dem Außenhandelssaldo von Rind/Kalbfleisch bzw. Schweinefleisch, sowie die verrechneten Netto-Emissionen durch den Handel mit diesen beiden Fleischarten



Eigene Darstellung. Für die Berechnung der CO₂-Äquivalente wurden die Treibhausgaspotenziale des 4. Sachstandsberichts des IPCC verwendet. Daten Export/Import: (BZL 2022b), Daten THG-Emissionen: (Poore und Nemecek 2018).

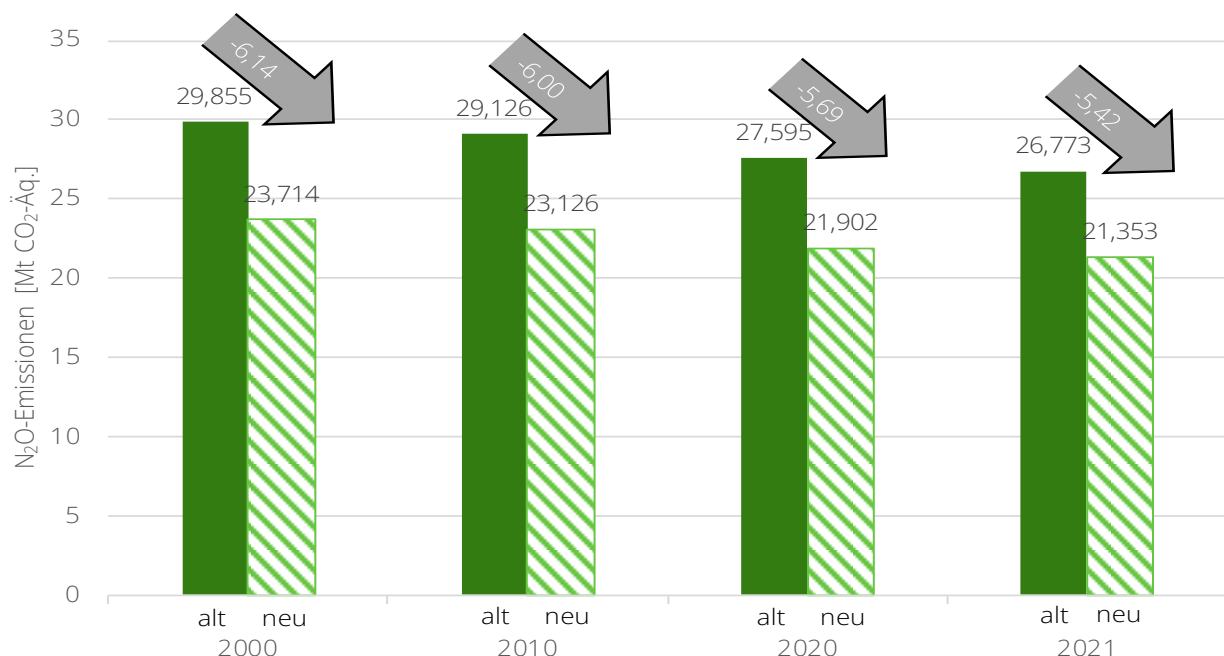
2.6.4 Auswirkungen der Methodenänderung für die Berechnung direkter Lachgasemissionen auf die THG-Emissionen im Landwirtschaftssektor

- 173 Seit dem Treibhausgasinventar 2022 (UBA 2022n) und der Berechnung der deutschen THG-Emissionen für das Jahr 2021 (UBA 2022a; Vos, C. et al. 2022), wird für die Berechnung der THG-Emissionen der Landwirtschaft ein neuer nationaler Emissionsfaktor für die direkten Lachgasemissionen (N_2O), die aus landwirtschaftlich genutzten Böden durch die Ausbringung von Mineraldüngern, Wirtschaftsdüngern, Klärschlamm und Gärresten aus Ernterückständen entstehen, verwendet (Mathivanan et al. 2021). Der Emissionsfaktor gibt an, wie viel des (zum Beispiel durch Düngung) in den Boden eingetragenen Stickstoffs in Form von Lachgas wieder an die Atmosphäre abgegeben wird. Der nationale Emissionsfaktor liegt nach neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen (Mathivanan et al. 2021) für Deutschland im Mittel bei 0,6 % anstelle des zuvor genutzten Standardwerts des IPCC von 1,0 % (IPCC 2006). Im Treibhausgasinventar 2022 wird dieser neue nationale Emissionsfaktor durch eine Rückrechnung auf die gesamte Zeitreihe der THG-Emissionen beginnend mit dem Jahr 1990 angewendet. Diese auf neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen basierende Anpassung des Emissionsfaktors führte dazu, dass die direkten Lachgasemissionen des Landwirtschaftssektors und damit die Gesamtemissionen des Sektors, im Treibhausgasinventar 2022 (UBA 2022n) rückwirkend für die gesamte Zeitreihe ab dem Jahr 1990 nach unten korrigiert wurden. Abbildung 71 zeigt beispielhaft für vier Jahre die Auswirkung dieser Korrektur. So wurden zum Beispiel im Vergleich zum Treibhausgasinventar 2021 (UBA 2021a) für den Sektor Landwirtschaft die Lachgasemissionen für das Emissionsjahr 2000 im Treibhausgasinventar 2022 (UBA 2022n) um rund 6,1 Mt CO_2 -Äq. reduziert, für das Jahr 2020 um rund 5,7 Mt CO_2 -Äq. (siehe Abbildung 71). Für das Jahr 2021 wären die Lachgasemissionen nach der alten Berechnungsmethode um rund 5,42 Mt CO_2 -Äq. höher gewesen als mit der aktuellen Methode. Im Durchschnitt betrug die jährliche THG-Minderung durch die Rückrechnung im Zeitraum von 2000 bis 2020 rund 6,1 Mt CO_2 -Äq. (Min: 5,7 Mt CO_2 -Äq.; Max: 6,7 Mt CO_2 -Äq.). Diese Korrektur entspricht keiner tatsächlichen Reduktion der Lachgasemissionen im Landwirtschaftssektor, sondern beruht lediglich auf einer durch neue wissenschaftliche Erkenntnisse veränderten Berechnungsmethode. Mit der aktualisierten Methode hat der Landwirtschaftssektor die im Jahr 2021 maximal zulässige Jahresemissionsmenge von 68 Mt CO_2 -Äq. um 7 Mt CO_2 -Äq. unterschritten, mit der vorherigen Methode wäre die Unterschreitung mit nur rund 2 Mt CO_2 -Äq. geringer ausgefallen (UBA und Thünen-Institut 2022).
- 174 Der Landwirtschaftssektor wird auch von der geplanten Anpassung der Treibhausgaspotenziale für Nicht- CO_2 -Emissionen von dem Vierten Sachstandsbericht an die des Fünften Sachstandsberichts (IPCC 2014) betroffen sein. Dabei wird das Treibhausgaspotenzial für den Zeithorizont von 100 Jahren für Methan von 25 auf 28 (+12 %) steigen, wohingegen der Wert für Lachgas von 298 auf 265 (-11 %) sinken wird.
- 175 Im Bundes-Klimaschutzgesetz ist nicht vorgesehen, auf solche rein methodischen Änderungen, die sich aus der Nutzung neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse ergeben, mit einer Anpassung der sektorspezifischen maximalen absoluten Jahresemissionsmengen (Sektorziele) der Anlage 2 des Bundes-Klimaschutzgesetzes zu reagieren. Das Bundes-Klimaschutzgesetz gibt in § 3 Abs. 1 vor, dass die deutschen THG-Emissionen bis zum Zwischenziel 2030 gegenüber dem Jahr 1990 um mindestens 65 % reduziert werden müssen. Aus dieser Vorgabe wurden die maximal zulässigen absoluten Jahresgesamtemissionen der Sektoren abgeleitet, die in Anlage 2 des Bundes-Klimaschutzgesetzes festgehalten sind. Im Landwirtschaftssektor führt die oben beschriebene Methodenänderung dazu, dass der Ausgangswert des Jahres 1990 von 87,0 Mt CO_2 -Äq. auf 81,1 Mt CO_2 -Äq. abgesenkt wurde. Dadurch reduziert sich die benötigte prozentuale Minderung der THG-Emissionen im

Landwirtschaftssektor bis 2030 von 36 % auf 31 %. Ohne eine Anpassung der zulässigen absoluten Jahresemissionsmengen in Anlage 2 des Bundes-Klimaschutzgesetzes würde der Landwirtschaftssektor durch die rein methodische Anpassung einen geringeren Beitrag zum Erreichen des übergeordneten THG-Ziels leisten. Die Auswirkungen des im Bundes-Klimaschutzgesetz verankerten Ausgleichsmechanismus (§ 4 Abs. 3 KSG) sind in Abbildung 72 dargestellt. Es wird konservativ angenommen, dass die THG-Emissionen im Landwirtschaftssektor in den Jahren bis 2030 auf dem Niveau des Jahres 2021 bleiben. Hier werden zwei Fälle dargestellt: Zunächst werden die aktuell mit den Treibhausgaspotenzialen des Vierten Sachstandsberichts berechneten THG-Emissionen fortgeschrieben. Darüber hinaus werden die THG-Emissionen des Jahres 2021 hypothetisch mit den Treibhausgaspotenzialen des fünften Sachstandsberichts angepasst, da diese Treibhausgaspotenziale ab dem Jahr 2023 verwendet werden. Für erstere Berechnung (Vierter Sachstandsbericht) ergibt sich für das Jahr 2030 eine Differenz zwischen maximal zulässiger Emissionsmenge und dem KSG-Ziel von 18 Mt CO₂-Äq.; für die zweite Berechnung (5. Sachstandsbericht) beträgt diese Differenz 5,7 Mt CO₂-Äq.

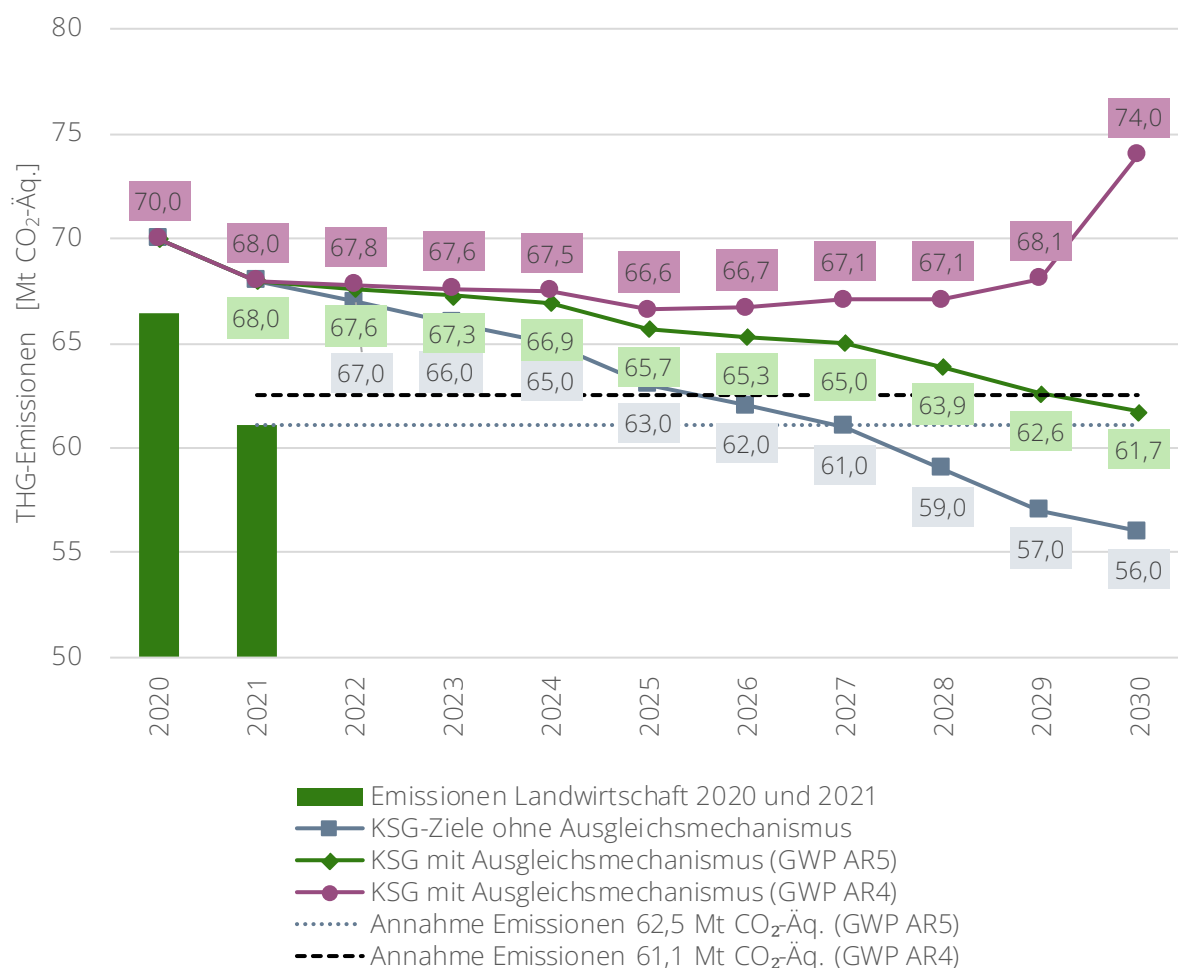
- 176 Die fehlende Anpassung der maximalen absoluten Jahresemissionsmengen führt dazu, dass der Landwirtschaftssektor durch den Ausgleichsmechanismus (§ 4 Abs. 3 KSG) keine realen THG-Einsparungen zur Erreichung des Sektorziels des Jahres 2030 mehr sicherstellen muss (Abbildung 72. Des Weiteren könnte die Unterschreitung der durch den Ausgleichsmechanismus angepassten Jahresemissionsmenge im Jahr 2030 als Kompensation für reale Überschreitungen in anderen Sektoren zum Minderungsziels nach § 3 Abs. 1 KSG genutzt werden. Dies wurde mit dem Bundes-Klimaschutzgesetz nicht intendiert und ist als problematisch anzusehen, da dadurch die Anreize für die sektoralen Anpassungen an eine Klimaneutralität reduziert werden.

Abbildung 71: Änderungen der N₂O-Emissionen im Landwirtschaftssektor für exemplarische Jahre auf Grund geänderter Berechnungsmethoden



Eigene Abbildung. Für drei exemplarische Jahre werden die N₂O-Emissionen des Sektors Landwirtschaft jeweils mit der alten Methode (alt, linker Balken) und mit der neuen Methode (neu, rechter Balken) dargestellt. Der schwarze Pfeil zeigt die Minderung der Lachgasemissionen in Mt CO₂-Äq. durch diese Rückrechnung. Daten: (UBA 2021f; 2022c), für 2021 (alt) stammen die Daten aus einer unveröffentlichten Berechnung des Thünen-Instituts.

Abbildung 72: Auswirkungen des Ausgleichsmechanismus auf die Jahresemissionsziele im Sektor Landwirtschaft



Eigene Darstellung, angelehnt an UBA und Thünen-Institut (2022). Die horizontalen Linien zeigen konservativ angenommene gleichbleibende THG-Emissionen ab dem Jahr 2021, einmal basierend auf den aktuellen THG-Emissionen für das Jahr 2021 von 61,1 Mt CO₂-Äq., die mit den Treibhausgaspotenzialen (GWP) des Vierten Sachstandsberichts (AR4) berechnet wurden, und einmal hypothetischen THG-Emissionen von 62,5 Mt CO₂-Äq. für das Jahr 2021, für deren Berechnung die GWPs des Fünften Sachstandsberichts (AR5) verwendet wurden.

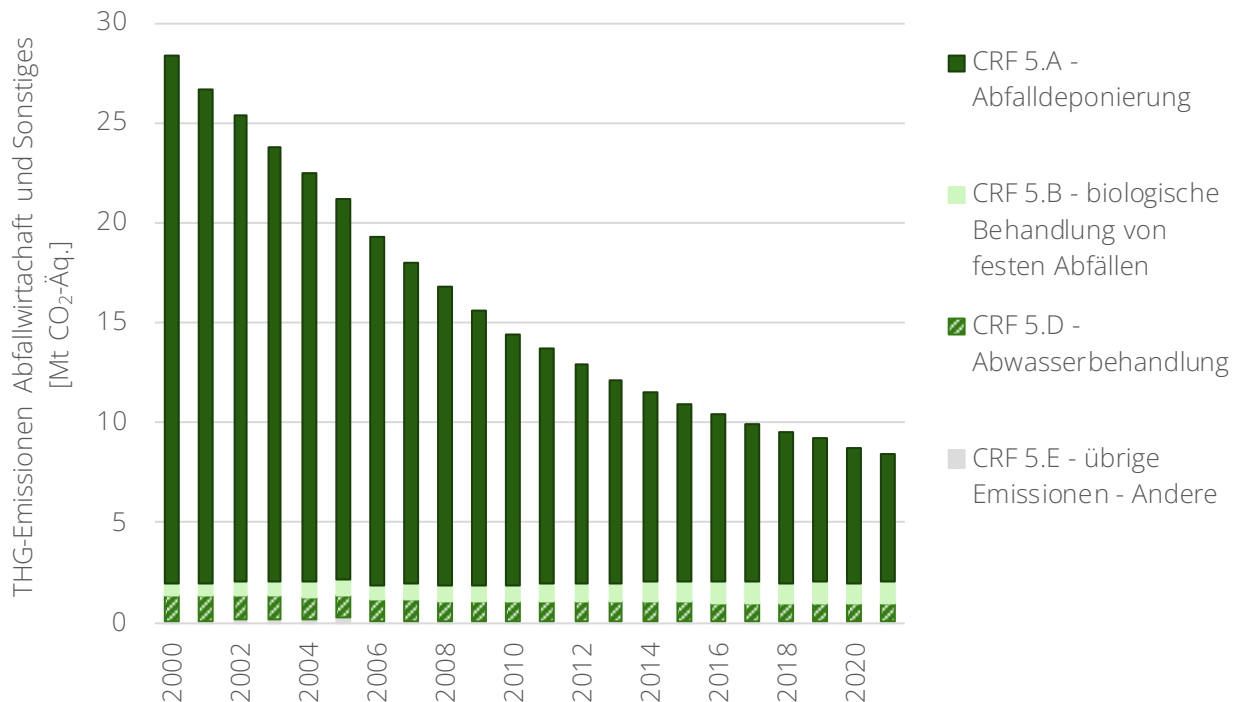
2.7 Abfallwirtschaft und Sonstiges

2.7.1 Entwicklung der Treibhausgasemissionen

177 Die THG-Emissionen im Sektor Abfallwirtschaft und Sonstiges (nachfolgend als „Abfallwirtschaft“ bezeichnet) konnten in den letzten beiden Jahrzehnten kontinuierlich und stark gemindert werden. Sie sanken von 28,4 Mt CO₂-Äq. im Jahr 2000 auf 8,4 Mt CO₂-Äq. im Jahr 2021 (siehe Abbildung 73). Dies entspricht einer Minderung der THG-Emissionen um 70,4 %. Bezogen auf das Basisjahr 2000 ist die Abfallwirtschaft damit der Sektor mit der mit Abstand höchsten relativen Minderungsrate über alle KSG-Sektoren hinweg. Die umfangreiche Minderung der Sektoremissionen ist auf die Entwicklung der THG-

Emissionen aus der Abfalldeponierung (CRF 5.A) zurückzuführen. Sie sanken kontinuierlich von 26,4 Mt CO₂-Äq. im Jahr 2000 auf 6,4 Mt CO₂-Äq. im Jahr 2021 (-75,8 %) (siehe Abbildung 73).

Abbildung 73: Entwicklung der THG-Emissionen des Sektors Abfallwirtschaft und Sonstiges nach Bundes-Klimaschutzgesetz im Zeitraum 2000-2021



Eigene Darstellung auf Basis der Trendtabellen 2022 (UBA 2022c). Die Daten für das Jahr 2021 basieren auf der Schätzung der Vorjahresemissionen, Inventardaten für 2021 liegen zum Zeitpunkt der Veröffentlichung noch nicht vor.

- 178 Von den verbleibenden THG-Emissionen des Sektors Abfallwirtschaft im Jahr 2021 entfallen 76,1 % auf das Entstehen von Deponiegasen (CRF 5.A), 12,2 % auf die biologische Behandlung von festem Bioabfall (CRF 5.B) zur Herstellung von Kompost oder Gärresten (Dünger) und 11,3 % auf die Abwasserbehandlung (CRF 5.D). In der Kategorie sonstige THG-Emissionen (CRF 5.E) werden THG-Emissionen aus der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung (MBA) dargestellt. Diese spielen jedoch nur eine untergeordnete Rolle (0,4 %) (UBA 2022n).
- 179 Das Aufkommen von Deponiegasen (CRF 5.A), welche den überwiegenden Anteil der THG-Emissionen in der Abfallwirtschaft ausmachen, ist nicht durch Aktivitätsdaten im betrachteten Zeitraum bedingt, sondern durch die THG-Emissionen aus Altdeponien. Deponiegase entstehen nach der Ablagerung zeitverzögert über einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten. Deshalb wird für den Sektor Abfallwirtschaft davon abgesehen eine Dekomposition der Emissionstreiber durchzuführen. Im Folgenden wird direkt auf die Ursachen und Trends in Bezug auf die Sektoremissionen eingegangen.

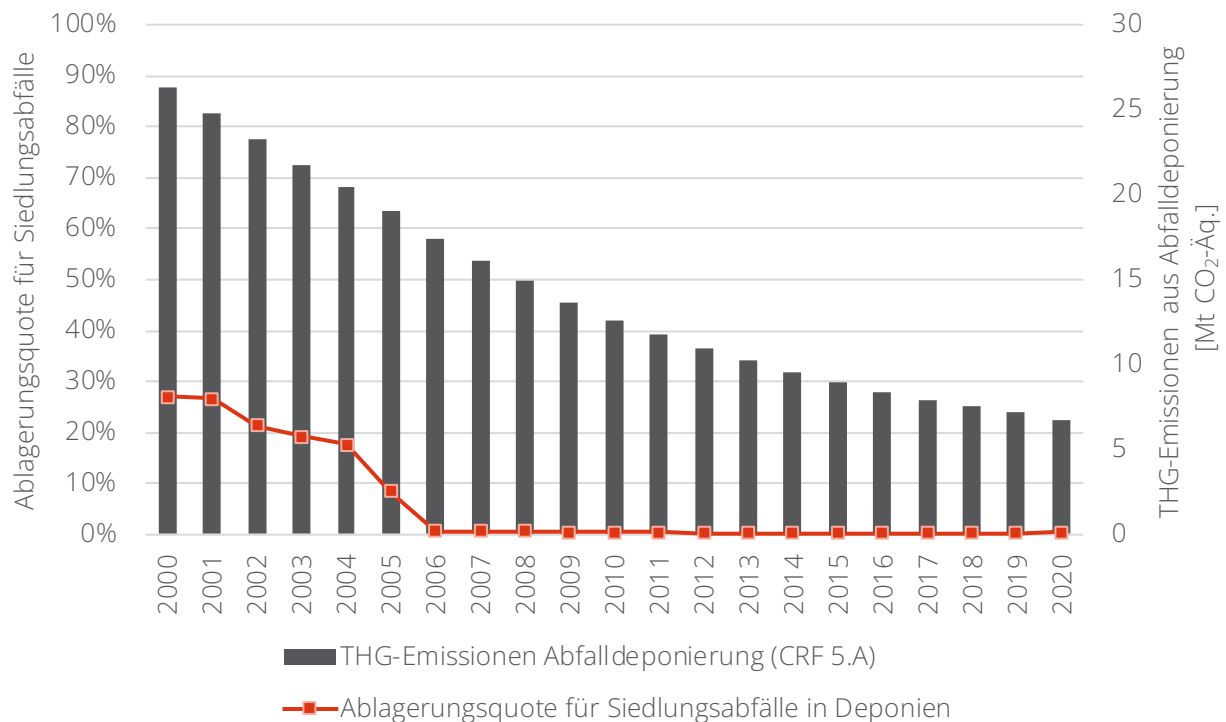
2.7.2 Diskussion von Ursachen der Entwicklung

Deponiegasentwicklung (CRF 5.A)

- 180 Die THG-Emissionen in der Abfallwirtschaft unterscheiden sich strukturell von denen in den anderen KSG-Sektoren, da der Großteil der THG-Emissionen in Deponien entsteht (CRF 5.A). Die THG-Emissionen aus Deponiegasen (CRF 5.A) werden im Gegensatz zu den THG-Emissionen in den anderen KSG-Sektoren nicht durch Aktivitäten im Bilanzierungszeitraum, sondern durch THG-Emissionen aus Altdeponien verursacht. Sie entstehen durch den biologischen Abbau des organischen Anteils der abgelagerten Abfälle. Diese Abbauprozesse erzeugen in unterschiedlichen Phasen über einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten hinweg THG-Emissionen. Dabei ist insbesondere die lang andauernde, anaerobe Abbauphase relevant, in der Methan und CO₂ entstehen (Rosenwinkel et al. 2015). Der Treibhauseffekt wird dabei vorwiegend durch die potenteren Methanemissionen hervorgerufen, die je nach Abbauphase bis zu 60 % der Deponiegasmenge ausmachen können. Eine genaue Messung von Deponieemissionen ist aufgrund der diffusen Art der Deponieemissionen in der Praxis nicht möglich. Daher werden die jährlichen THG-Emissionen aus der Deponierung auf der Grundlage von Annahmen über die historischen Mengen und Arten von Abfällen im Treibhausgasinventar des Umweltbundesamtes (UBA) mit Hilfe des *IPCC Waste Model* berechnet (UBA 2022b).
- 181 Aufgrund des langen Zeitzyklus der Deponiegasbildung über mehrere Jahrzehnte haben politische Maßnahmen, die bereits vor dem Jahr 2000 eingeführt wurden, einen wesentlichen Einfluss auf die heutige Deponiegasbildung. Dazu gehören insbesondere gesetzliche Regelungen und Vorgaben zur getrennten Erfassung von Bioabfällen aus Haushalten und Gewerbebetrieben sowie die getrennte Erfassung von anderen Wertstoffen mit organischem Anteil (z. B. Papier und Pappe, Holz). Durch die getrennte Sammlung von Bioabfällen und Wertstoffen, den Aufbau von Kapazitäten für die Abfallverbrennung und die mechanisch-biologische Abfallbehandlung sowie eine generelle Reduzierung der anfallenden Siedlungsabfallmenge konnte die Menge der deponierten Siedlungsabfälle bereits von über 40 Mt im Jahr 1990 auf weniger als 15 Mt im Jahr 2000 reduziert werden (UBA 2022b).
- 182 Die wichtigste politische Maßnahme, welche seit dem Jahr 2000 zusätzlich eingeführt wurde, und welche die historische und zukünftige Menge an deponierten Siedlungsabfällen und damit die Entstehung von zusätzlichen Deponiegasen (CRF 5.A) weiter reduziert hat, ist die Abfallablagerungsverordnung 2001 (AbfAbIV), deren Bestimmungen im Jahr 2009 in der Deponieverordnung (DepV) aufgegangen sind. Durch die Einführung der Bestimmungen der Abfallablagerungsverordnung durften ab Mitte 2005 nur noch Siedlungsabfälle mit einem Gesamtkohlenstoffgehalt (gemessen als *Total organic carbon (TOC)*) von weniger als 3 % für Deponieklasse 2 bzw. von 18 % für mechanisch-biologisch vorbehandelte Abfälle auf Deponien abgelagert werden.⁴¹
- 183 Die Einführung des Grenzwertes für den Gesamtkohlenstoffgehalt führte dazu, dass in der Praxis entweder eine thermische oder eine mechanisch-biologische Vorbehandlung von Siedlungsabfällen notwendig wurde. Entsprechend werden seit Mitte 2005 nur noch vorbehandelte Siedlungsabfälle auf Deponien abgelagert. Der Effekt, welcher sich durch die Einführung der Abfallablagerungsverordnung ergeben hat, ist in Abbildung 74 dargestellt. Während die Ablagerungsquote für Siedlungsabfälle im Jahr 2000 noch bei ca. 27 % lag, sank sie mit der Einführung der Ablagerungsbestimmungen sehr stark ab und lag im Jahr 2006 bei nur noch weniger als 1 % der angefallenen Menge Siedlungsabfälle.

⁴¹ Siehe hierzu die Bestimmungen in Anhang 3 der Deponieverordnung (DepV).

Abbildung 74: Entwicklung der Ablagerungsquote für Siedungsabfälle und die Entwicklung der THG-Emissionen aus Abfalldeponierung (CRF 5.A) im Zeitraum 2000-2020



Eigene Darstellung auf Basis von Destatis (2022a) und UBA (2022n).

184 Abbildung 74 verdeutlicht jedoch auch, dass sich die Bestimmungen der Abfallablagerungsverordnung nicht unmittelbar auf die Höhe der Deponieemissionen auswirken, sondern dass die geänderten Rahmenbedingungen für die Neuablagerung einen graduellen und langfristigen Wirkhorizont haben. Nach der Einführung der Verordnung nahmen die THG-Emissionen aus der Deponierung (CRF 5.A) mit weiterhin vergleichbaren Änderungsraten ab. Das liegt zum einen daran, dass aufgrund des geringen Anteils an organischem Material und der stark reduzierten Ablagerungsmenge die seit dem Jahr 2005 abgelagerten Abfälle nur für einen sehr geringen Teil der Deponieemissionen verantwortlich sind. Zum anderen wirken die Abbauprozesse der Ablagerungen von vor dem Jahr 2005, insbesondere diejenigen mit noch höheren organischen Anteilen, weiter fort und klingen nur langsam ab.

185 In der Langfristperspektive ist es unter den heutigen Rahmenbedingungen für die Ablagerung von Abfällen in Deponien jedoch sicher, dass die Deponiegasemissionen weiter abklingen und sich in einigen Jahrzehnten auf einem geringen Niveau für die Residualablagerungen stabilisieren werden. Neben der Vermeidung der Deponierung von Abfällen mit einem organischen Anteil, haben zudem auch Maßnahmen zur Deponiebelüftung und dem Auffangen von Deponiegasen zu einer Minderung beigetragen.

Weitere Entwicklungen und Effekte

186 Für die biologische Behandlung von festen Abfällen (CRF 5.B) (12,2 % der THG-Emissionen im Abfallsektor im Jahr 2021) sind es primär strukturelle Effekte, welche das Emissionsniveau beeinflussen. So sind die THG-Emissionen aus der Behandlung von Bioabfällen im Betrachtungszeitraum seit dem Jahr 2000 um ca. 0,4 Mt CO₂-Äq. (ca. +70 %) gestiegen (UBA 2022n), gleichzeitig sind aber auch die an

Bioabfallbehandlungsanlagen angelieferten Bioabfallmengen seit dem Jahr 2000 um knapp 50 % gestiegen (Destatis 2022a). Zur Steuerung der THG-Emissionen aus der Behandlung von Bioabfällen ist es also insbesondere relevant die Menge der Bioabfälle z. B. durch die Vermeidung von Lebensmittelabfällen zu reduzieren. Neben diesem strukturellen Effekt weisen Studien auch darauf hin, dass in der Praxis von Bioabfallbehandlungsanlagen häufig nicht die technische Ausstattung, sondern die betrieblichen Abläufe das Emissionsniveau beeinflussen. So können z. B. ungünstige Haldengeometrie, unzureichende Strukturanteile und Homogenisierung sowie mangelnde Umschlagshäufigkeit das THG-Emissionsniveau einer Anlage negativ beeinflussen (Cuhls et al. 2015).

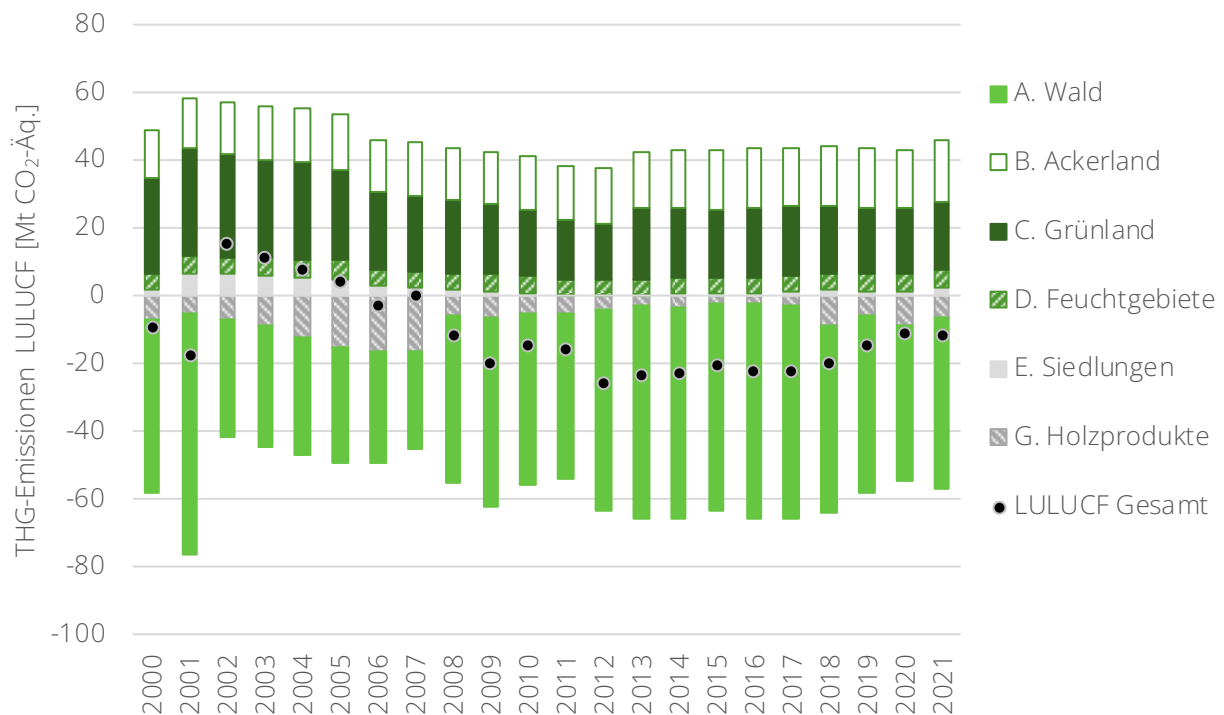
- 187 In der Abwasserbehandlung (CRF 5.C) (11,3 % der THG-Emissionen im Abfallsektor im Jahr 2021) sind es ebenso primär strukturelle Effekte, welche das Emissionsgeschehen beeinflussen. So sind die THG-Minderungen von ca. 0,4 Mt CO₂-Äq. (ca. -28 %) (UBA 2022n) primär auf eine seit dem Jahr 2001 um ca. 15 % gesunkene Abwassermenge (Destatis 2019) sowie auf die Art der Abwässer zurückzuführen.
- 188 Darüber hinaus ist es relevant, dass im Sektor Abfallwirtschaft nur die nicht-energetischen THG-Emissionen aus Abfall bilanziert werden. THG-Emissionen aus der energetischen Verwertung von Abfällen werden hingegen in den Sektoren bilanziert, in denen sie eingesetzt werden. Das umfasst zum einen Abfälle zur Verwertung in Müllverbrennungsanlagen, welche zur Strom- oder Wärmeerzeugung genutzt und deshalb in der Energiewirtschaft zur öffentlichen Strom- oder Wärmeerzeugung (CRF 1.A.1.a) oder im verarbeitenden Gewerbe (CRF 1.A.2) bilanziert werden. Gleiches gilt für Biogas aus Vergärungsanlagen, welches in dem Sektor bilanziert wird, in dem es eingesetzt wird. Ersatzbrennstoffe (insbesondere Kunststoffe), die in der Vorbehandlung von Abfällen anfallen, werden zudem in Ersatzbrennstoffkraftwerken (CRF 1.A.1.a/CRF 1.A.2), zur Mitfeuerung in Braunkohlekraftwerken (CRF 1.A.1.a) oder Industrieanlagen (bspw. in der Zementindustrie (CRF 2.A.1)) eingesetzt und entsprechend in diesen Sektoren bilanziert (UBA 2022b).
- 189 Nach der gleichen Logik hat das Recycling von Materialien in der Abfallwirtschaft auch eine emissionsmindernde Wirkung in anderen Sektoren, z. B. auf die Herstellung von Stahl- oder Aluminiumprodukten aus Sekundärrohstoffen. Durch die Rückgewinnung im Abfallwirtschaftssektor können THG-Emissionen in den anderen Sektoren vermieden werden. Diese Effekte spiegeln sich jedoch nicht direkt in den THG-Emissionen des Abfallwirtschaftssektors wider.

2.8 LULUCF

2.8.1 Entwicklung der Treibhausgasemissionen

- 190 Anders als die anderen Sektoren stellt der LULUCF-Sektor im zeitlichen Verlauf überwiegend eine THG-Senke dar. Dabei lässt sich die Entwicklung der THG-Emissionen im Zeitraum von 2000 bis 2021 grob in vier Phasen unterteilen (siehe Abbildung 75): Auf zwei Jahre in denen der Sektor LULUCF eine THG-Senke war, folgen die Jahre 2002 bis 2005, in denen der Sektor eine THG-Quelle war. In den darauffolgenden Jahren bis 2012 stieg die Senkenleistung des Sektors an, während sie seit dem Jahr 2012 tendenziell wieder sinkt, aber weiterhin als Senke erhalten bleibt.

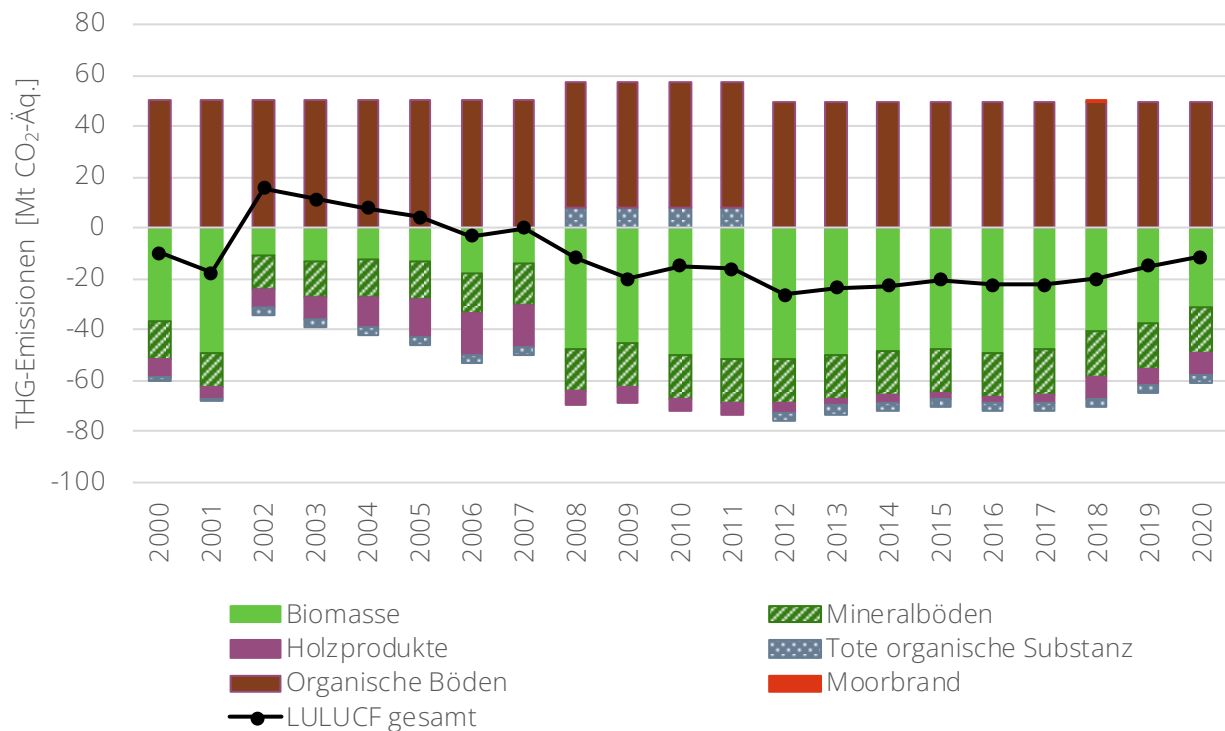
Abbildung 75: Entwicklung der THG-Emissionen des Sektors LULUCF nach Bundes-Klimaschutzgesetz im Zeitraum 2000-2021



Eigene Darstellung auf Basis der Trendtabellen des Treibhausgasinventars 2022 (UBA 2022c).

191 Im Sektor LULUCF wirken einige CRF-Kategorien als THG-Quelle, andere als Senke. Neben der Kategorie Holzprodukte, hat der Wald die größte Senkenwirkung, während v. a. Grünland und Ackerland, sowie Feuchtgebiete und Siedlungen als THG-Quelle wirken. Insgesamt werden die meisten Treibhausgase durch Biomasse aufgenommen, sowie von Mineralböden und Holzprodukten. Die THG-Emissionen stammen überwiegend aus gleichbleibend hohen THG-Emissionen organischer Böden, sowie in den Jahren 2008 – 2011 von toter organischer Substanz, welche ansonsten als Netto-Senke fungiert (siehe Abbildung 76).

Abbildung 76: Zeitreihe der THG-Emissionen im LULUCF-Sektor aufgeteilt nach Kohlenstoff-Pools

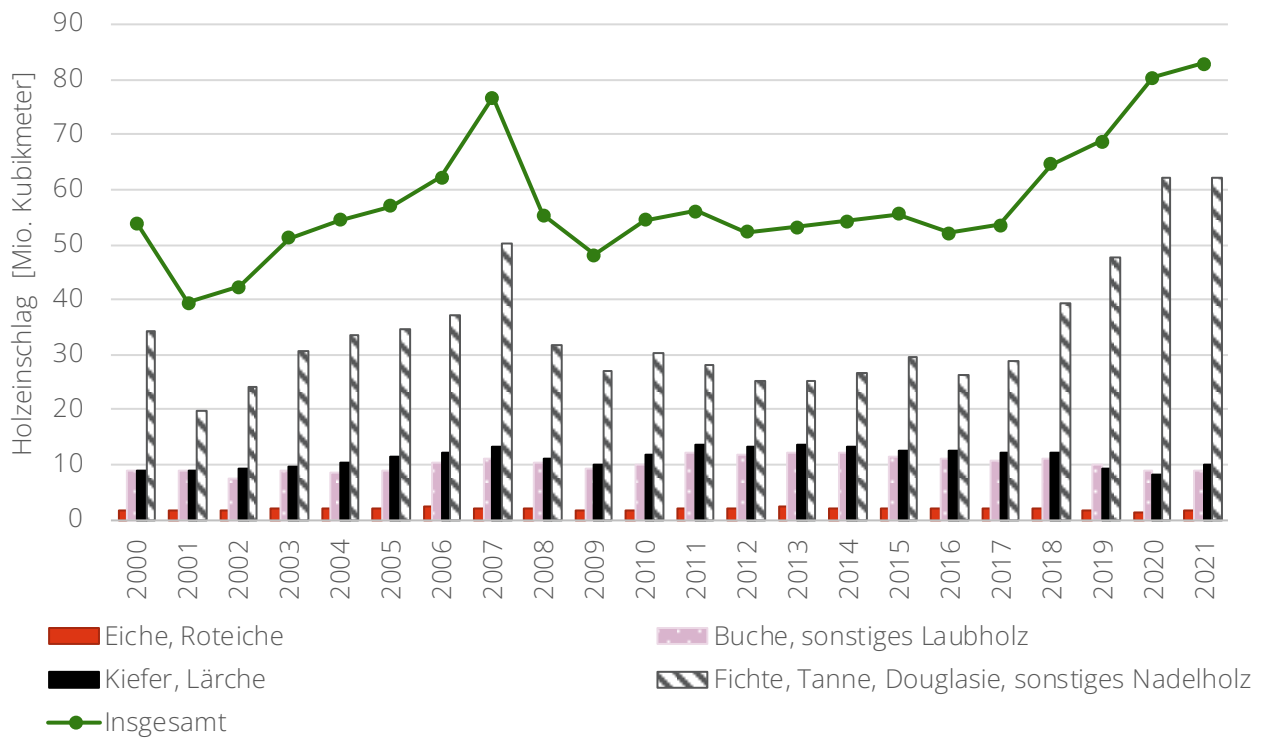


Eigene Darstellung. (Gensior et al. 2022).

2.8.2 Diskussion von Ursachen der Entwicklung

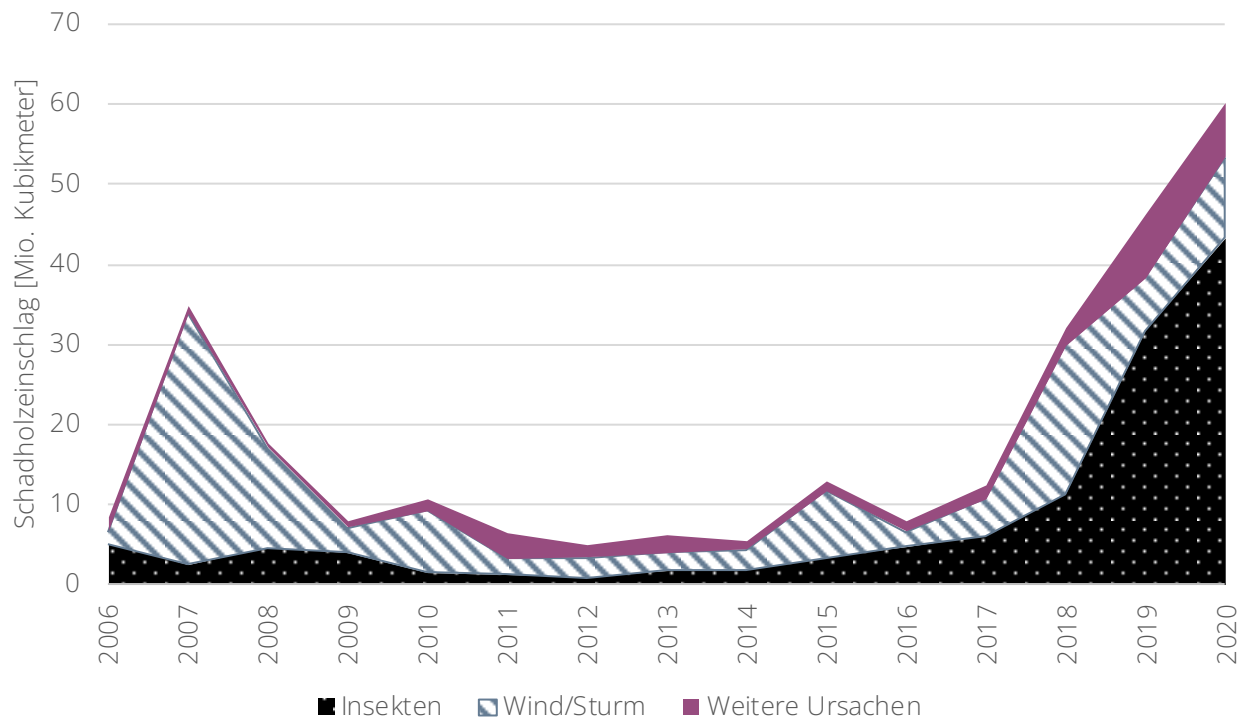
192 Im Zeitraum zwischen den Jahren 2012 und 2020 nahm die Senkenleistung der Wälder tendenziell ab. Besonders stark ausgeprägt ist dieser Trend in den Dürre Jahren von 2018 bis 2020, die das Waldsterben, v. a. in Mitteldeutschland, stark vorangetrieben haben (BMEL 2022b; Thonfeld et al. 2022). Laut Waldzustandserhebung 2021 (BMEL 2022b) wies lediglich 21 % aller Fichten und 16 % aller Kiefern keine Kronenverlichtung auf. Auch bei den Laubbäumen wiesen ein Großteil der Bäume Kronenverlichtungen auf, abgesehen von 16 % der Buchen und 19 % der Eichen. Da das gesamte Ausmaß der Schäden erst mit dem ausstehenden Ergebnis der Bundeswaldinventur 2022 abgeschätzt werden kann, dürfte die Senkenleistung der Wälder für diesen Zeitraum mit großer Wahrscheinlichkeit geringer ausfallen als berichtet (UBA 2022b). Einhergehend ist die Verteilung der Kohlenstoff-Pools (Biomasse, Totholz) mit Unsicherheiten behaftet. In den Jahren 2002 bis 2005 und im Jahr 2007 kompensierte die Waldbiomasse die THG-Emissionen aus organischen Böden nicht (siehe Abbildung 76), da der Holzeinschlag aufgrund von hoher Nachfrage nach Holz und durch die Bewältigung von Schadensereignissen (Kalamitäten) an den Pflanzen auf Grund von Sturm oder Schädlingen stieg und damit die Senkenwirkung reduziert wurde (siehe Abbildung 77). Wegen des Sturms Kyrill stieg der durch Sturm bedingte Schadholzeinschlag im Jahr 2007 stark an (siehe Abbildung 78). Aus der Dürre in den Jahren 2018 bis 2020 resultierte extremer Insektenbefall, so dass ab dem Jahr 2018 ein Anstieg des Schadholzeinschlags zu verzeichnen ist (siehe Abbildung 78).

Abbildung 77: Holzeinschlag nach Baumart und insgesamt für den Zeitraum von 2000 bis 2021



Eigene Darstellung auf Basis von Destatis (2022i).

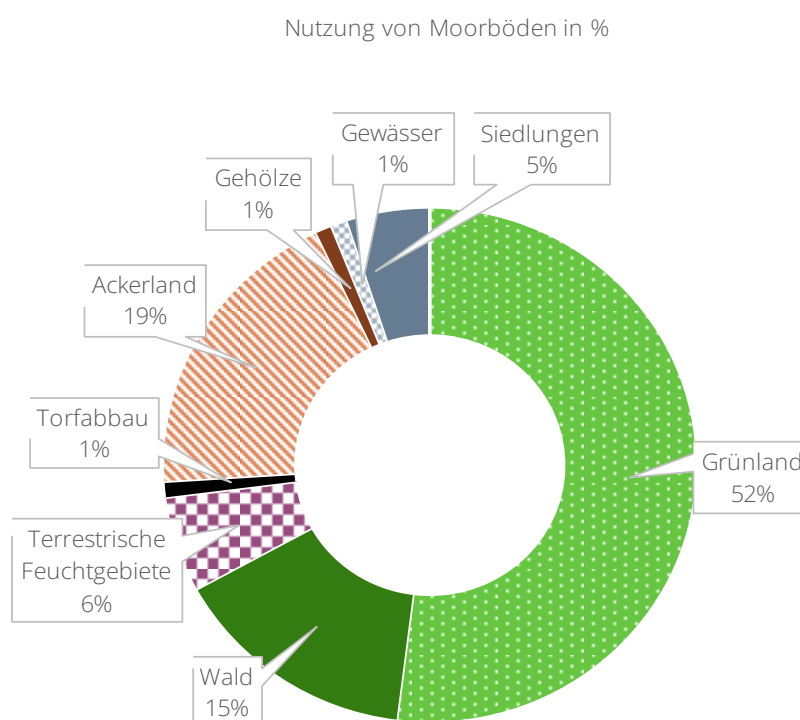
Abbildung 78: Schadholzeinschlag in Deutschland nach Ursachen



Eigene Darstellung auf Basis von Destatis (2021a).

- 193 Die THG-Emissionen aus Ackerland stiegen im betrachteten Zeitraum von 2000 bis 2020 leicht an, was v. a. in der Umwandlung von Grünland zu Ackerland begründet ist (UBA 2022b). Zwischen den Jahren 2001 und 2005 waren die THG-Emissionen aus Siedlungen rund dreimal so hoch wie im Jahr 2000 und dem Zeitraum ab 2006. Dies lag in der verstärkten Umwandlung von Grünland, Wald und Acker in Siedlungen begründet (UBA 2022b).
- 194 Um die Ökosysteme zu erhalten, an den Klimawandel anzupassen und die Senkenleistung des Sektors zu erhöhen, hat Deutschland einige Förderprogramme initiiert. Im Bereich Wald werden überwiegend Fördergelder für private und kommunale Waldbesitzer:innen zur Verfügung gestellt. Über die Gemeinschaftsaufgabe Agrarstruktur und Küstenschutz (GAK) können Gelder abgerufen werden, um Waldschäden, die durch Extremwetterereignisse entstanden sind, zu beheben und um eine Anpassung der Wälder an den Klimawandel vorzunehmen. Das im Juli 2022 gebilligte Konzept zur Honorierung der Ökosystemdienstleistungen des Waldes (BMEL 2022c) fördert die Einführung eines klimaangepassten Waldmanagements und die Extensivierung von ökologisch wertvollen Laubbaumbeständen. Für die nachhaltige Holznutzung gibt es Förderprogramme zur innovativen Holzverwendung.

Abbildung 79: Prozentuale Nutzung von Moorböden in Deutschland

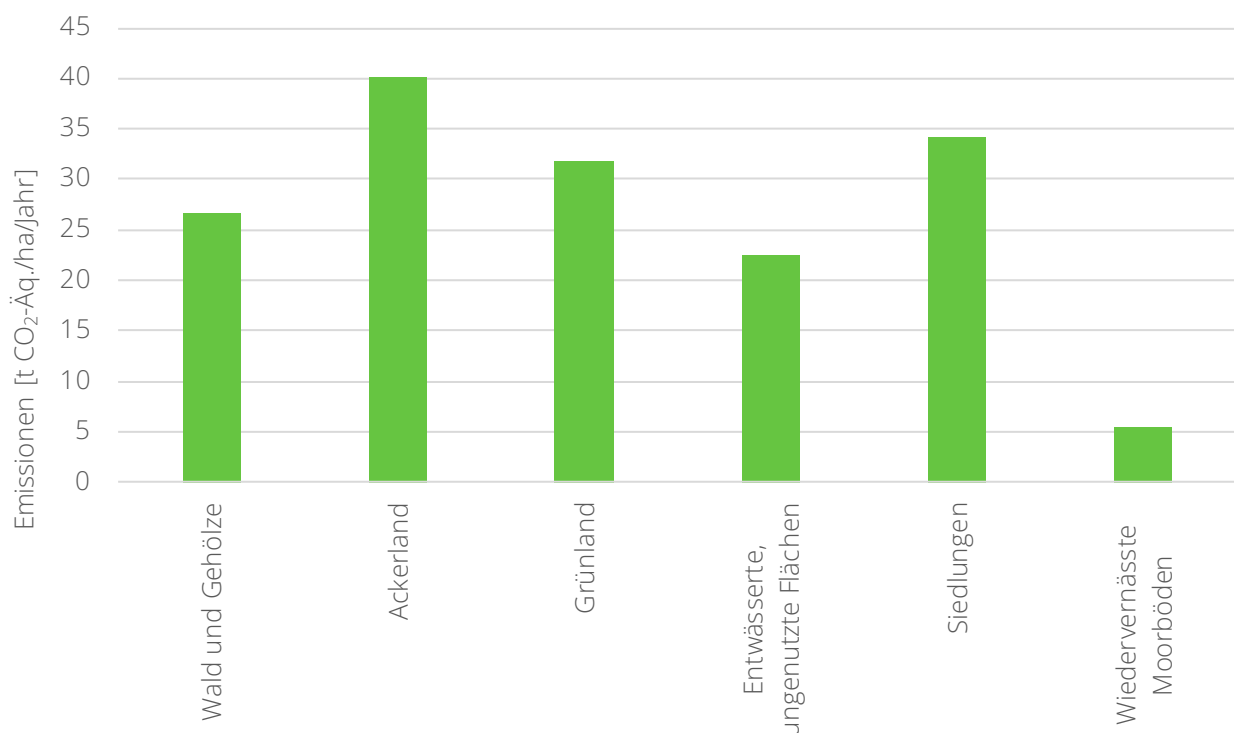


Eigene Darstellung. Daten: (Tabelle 362 UBA 2020c).

- 195 Das BMUV (ehemals BMU) und Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), sowie die zuständigen Länderressorts unterzeichneten im Oktober 2021 die Nationale Moorschutzstrategie (BMU 2021). Darüber werden seit dem Jahr 2022 mit 48 Millionen Euro (BMWK 2022c) vier Verbundvorhaben

zur Weiterentwicklung des Moorbodenschutzes gefördert. Ein weiteres Ziel der Bundesregierung ist die Reduzierung der Torfverwendung in Kultursubstraten (Nährböden z. B. im Gartenbau) (BMWK 2022c). Des Weiteren werden praxisnahe Demonstrationsverfahren zur Paludikultur – der Bewirtschaftung von nassen Mooren – gefördert (BMWK 2022c). Mit diesen Maßnahmen und im Rahmen der Moorschutzstrategie soll die Wiedervernässung von trockengelegten Mooren vorangetrieben werden, um die Senkenkapazität des Sektors auszubauen. Derzeit werden in Deutschland über 95 % der Moorböden bewirtschaftet (siehe Abbildung 79). Grünland (52 %), Ackerland (19 %) und Wald (15 %) machen dabei den größten Anteil aus. Pro Hektar unterscheiden sich die THG-Emissionen von Flächen dieser Landnutzungskategorie (siehe Abbildung 80).

Abbildung 80: THG-Emissionen aus Moorböden aufgliedert in Landnutzungskategorien



Eigene Darstellung. Daten: (Tiemeyer et al. 2020).

196 Im Jahr 2021 lag die Senkenwirkung bei rund 11,5 Mio t CO₂-Äq. (siehe Abbildung 75). Gemäß der LULUCF-Verordnung der EU (EU 2018) darf der LULUCF-Sektor zwischen den Jahren 2021 und 2030 keine Netto-Emissionen erzeugen, langfristig soll der Sektor zu einer Netto-Senke werden. Im Rahmen der LULUCF-Verordnung der EU wird für Deutschland für den Sektor ein nationales Senkenziel von 30,8 Mt CO₂-Äq. im Jahr 2030 diskutiert (Anhang IIa Europäische Kommission 2021). Das Bundes-Klimaschutzgesetz definiert in § 3 a Abs. 1 KSG lediglich drei Sollziele für den Sektor LULUCF: bis zum Jahr 2030 soll die Senke von LULUCF auf mindestens 25 Mt CO₂-Äq. ausgebaut werden, bis zum Jahr 2040 auf 35 Mt CO₂-Äq. und bis zum Jahr 2045 auf 45 Mt CO₂-Äq.

197 Durch das Fehlen von Zwischenzielen lässt sich der Pfad des Sektors nicht frühzeitig verfolgen und es besteht wenig Planungssicherheit für die Transformation des Sektors. Des Weiteren fehlen z. B. für das Monitoring des Waldzustands zeitlich hochaufgelöste Daten als Grundlage für Modellrechnungen (siehe

auch Unterkapitel 3.2.8). Es ist geplant, zukünftig auch im Projektionsbericht Fernerkundungsprodukte zu nutzen, die die Datenlage verbessern könnten. Forschungsprojekte wie das im Oktober 2022 gestartete „Integriertes Treibhausgas-Monitoringsystem (ITMS)“ (BMBF 2022) können mittelfristig die Datenlage, insbesondere im Sektor LULUCF verbessern. Derzeit besteht eine große Unsicherheit in der Abschätzung des Beitrags des LULUCF-Sektors, der je nach Annahme über die Waldschäden in einer substanziellen Größenordnung liegen kann und damit auch einen großen Einfluss auf die Erreichung des übergeordneten Ziels für das Jahr 2030 hat.

3 Trendbetrachtungen zur Zielerreichung bis 2030

- 198 Nach einer Diskussion der THG-Entwicklungen aus einer ex post Perspektive im vorherigen Kapitel (siehe Kapitel 2) wird in diesem Kapitel eine vorausschauende Sicht auf die Trends der Gesamtemissionen und in den einzelnen Sektoren eingenommen. Die Betrachtung von Trends umfasst zwei Elemente. Erstens wird sektorenübergreifend und auf Ebene aller KSG-Sektoren eine Extrapolation der Geschwindigkeit der Emissionsentwicklungen der letzten Jahre durchgeführt. Diese wird dann anhand der Prognosen des Projektionsberichts 2021⁴² (Öko-Institut et al. 2021) und den Sektorzielen des Bundes-Klimaschutzgesetzes bis zum Zieljahr 2030 eingeordnet. Zweitens werden die Betrachtungen auf Ebene der Sektoren durch Trends und Entwicklungen ausgewählter Indikatoren, die für die Erreichung der KSG-Ziele in den einzelnen Sektoren relevant sind, ergänzt.⁴³
- 199 Für die Extrapolation der historischen THG-Emissionen werden die Entwicklungen seit dem Jahr 2000 berücksichtigt. Es werden sowohl sektorenübergreifend als auch in den KSG-Sektoren zwei lineare Regressionsgeraden geschätzt, um einen Vergleich der Gradienten zu ermöglichen. Zum einen wird mit dem Ziel, einen langfristigen historischen Trend aufzuzeigen, eine Regressionsgerade über den gesamten Zeitraum 2000-2021 geschätzt und bis zum Jahr 2030 fortgeschrieben. Durch den langen betrachteten Zeitraum werden die Effekte der externen Schocks durch die Finanzkrise und die Covid-19-Pandemie mitbetrachtet. Zum anderen wird eine zweite Regressionsgerade geschätzt, welche sich auf einen kürzeren Zeitraum ab dem Jahr 2010 beschränkt und damit den Trend der vergangenen Dekade extrapoliert. Je nach Sektor werden hierbei die Jahre 2020 und 2021, welche durch die Effekte der Covid-19-Pandemie geprägt sind, berücksichtigt oder nicht. In den Sektoren Energie, Industrie, Gebäude und Verkehr, wo die Covid-19-Pandemie umfangreichere Auswirkungen auf die THG-relevanten Aktivitäten in den Sektoren hatte, werden diese Jahre nicht berücksichtigt. In den Sektoren Landwirtschaft und Abfallwirtschaft, in denen die THG-Emissionen weniger durch die Covid-19-Pandemie beeinflusst waren, werden auch die Jahre 2020 und 2021 miteinbezogen. Für den Sektor LULUCF wurde aufgrund der großen Unsicherheiten der Datenlage und der unvorhersehbaren Wetter- und Witterungsereignisse in der Zukunft keine Regression durchgeführt. Die Emissionsentwicklung der vergangenen Dekade wird zur Einordnung der Entwicklung mit den Sektorzielen des Bundes-Klimaschutzgesetzes bis zum Zieljahr 2030 verglichen.
- 200 Die ausgewählten Indikatoren, welche als zusätzliche Information in einigen der KSG-Sektoren gezeigt werden, sind relevant, weil davon auszugehen ist, dass Sie die zukünftige THG-Entwicklung der jeweiligen Sektoren maßgeblich beeinflussen. Entsprechend soll die Darstellung der Indikatoren zu einer differenzierteren Betrachtung der ex ante Perspektive beitragen. Hierbei wird neben der Einführung von treibhausgasneutralen Technologien besonders auch die Entwicklung des bestehenden fossilen Kapitalstocks in den Blick genommen. Die historische Entwicklung der Indikatoren wird in Bezug gesetzt zu politischen Zielen einerseits und Referenzwerten aus ausgewählten Klimaneutralitätsstudien andererseits. Die Auswahl der Klimaneutralitätsstudien wird im folgenden Abschnitt dargestellt.

⁴² Der letzte Projektionsbericht 2021 wurde am 15. Oktober 2021 veröffentlicht. Dieser berücksichtigt im Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) Gesetze und Maßnahmen, die bis August 2020 beschlossen wurden und bereits soweit implementiert waren, dass die erforderlichen Informationen für die Modellierung vorlagen. Maßnahmen auf EU-Ebene zur Umsetzung des EU-Klimaziels für 2030 („Fit for 55“-Paket) sind in diesem noch nicht berücksichtigt.

⁴³ Die Verwendung von Indikatoren ist an dieser Stelle ergänzend zu der Diskussion von Ursachen und Komponenten der vergangenen Emissionsentwicklung im Kapitel 2. Eine übergeordnete Einordnung zur Relevanz von Indikatoren für das Monitoring und die Governance von Klimazielen ist in Kapitel 5.1.2 zu finden.

3.1 Klimaneutralitätsstudien als Referenzpunkte

- 201 In den vergangenen Jahren sind mehrere umfassende Klimaneutralitätsstudien erschienen, die den Transformationspfad in Richtung Klimaneutralität beschreiben.⁴⁴ Die jüngst erschienenen Studien zeigen dabei normative Zielszenarien auf, die das Ziel der Klimaneutralität bis zum Jahr 2045, wie in der Novellierung des Bundes-Klimaschutzgesetzes 2021 festgelegt, darstellen. Hierzu zählen die Studien „Klimaneutrales Deutschland 2045“ von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende (Prognos et al. 2021), „Klimapfade 2.0 – Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft“ des BDI (BDI 2021), die dena-Leitstudie „Aufbruch Klimaneutralität“ (dena 2021a), die „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3“ im Auftrag des BMWK (Fraunhofer ISI et al. 2021) sowie der Modell- und Szenarienvergleich „Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045“ des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Kopernikus-Projekts Ariadne (Luderer et al. 2021). Diese fünf Studien werden auch als „Big 5“-Studien bezeichnet.
- 202 Für die vorausschauende Betrachtung der KSG-Zielerreichung bis zum Jahr 2030 und darüber hinaus sind die Szenarien der „Big 5“-Studien wichtige Referenzpunkte, da sie Transformationspfade modellieren, die im Einklang mit den deutschen Klimazielen stehen. In den Szenarien werden Modellwerte für wichtige Indikatoren in der Transformation generiert. In Tabelle 1 werden die Studien mit den für diesen Bericht ausgewählten Transformations-Szenarien dargestellt. Die Auswahl der Szenarien entspricht dabei dem auf der Website des Ariadne-Projekts veröffentlichten Vergleich der „Big 5“-Klimaneutralitätsszenarien (Kopernikus-Projekt Ariadne et al. 2022).
- 203 Grundsätzlich ist hierbei anzumerken, dass für die Berechnung der Transformationspfade unterschiedliche Modelle verwendet wurden, die sich in ihrer Modelllogik und den impliziten und expliziten Annahmen unterscheiden. In den folgenden Gegenüberstellungen wurden fünf Szenarien gewählt. Der Szenarienraum ist in der Realität größer, sodass auch die Bandbreiten vermutlich nicht das gesamte Spektrum abbilden (Ueckerdt et al. 2021). Dennoch liefern die hier ausgewählten Szenarien einen Ansatzpunkt über die Tendenzen der gewählten Indikatoren.

⁴⁴ Hierbei werden Energiesystemmodelle genutzt, deren Ziel meist ein kostenminimales Gesamtsystem unter Einhaltung von CO₂-Zielwerten oder eines CO₂-Budgets ist. Die Sektoren Energiewirtschaft, Verkehr, Gebäude und Industrie werden dabei jeweils explizit betrachtet. Die Sektoren Landwirtschaft und LULUCF werden meist nur implizit berücksichtigt.

Tabelle 1: Überblick über die betrachteten Klimaneutralitätsstudien 2045

Studie	Bearbeitende Institutionen	Auftraggeberin	Ausgewählte Szenarien
Klimaneutrales Deutschland 2045	Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut	Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende, Agora Verkehrswende	Klimaneutrales Deutschland 2045 (KNDE2045)
Klimapfade 2.0 – Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft	Boston Consulting Group (BCG)	Bundesverband der deutschen Industrie e. V. (BDI)	Klimapfade 2.0 Zielpfad
Aufbruch Klimaneutralität	EWI, FIW, ITG, Uni Bremen, Stiftung Umweltenergierecht, Wuppertal-Institut	Deutsche Energie-Agentur (dena)	Szenario Klimaneutralität 2045 (KN 100)
Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045	Ariadne-Projekt (Beteiligte Institutionen: PIK, MCC, PSI, RWI, IER, Hereon, Fhg-ISI, Fhg-ISE, Fhg-IEG, Fhg-IEE, DLR-VF, DLR-VE, DLR-FK)	Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)	REMIND-Mix ⁴⁵ REMod-Mix
Langfristszenarien 3 – Wissenschaftliche Analysen für die Dekarbonisierung Deutschland 3	Fraunhofer ISI, Consentec, TU Berlin, ifeu	Bundesministerium für Wirtschaft- und Klimaschutz (BMWK)	TN-Strom ⁴⁶

⁴⁵ Innerhalb der Studie „Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045“ wurden verschiedene Szenarienwelten betrachtet, von einer Fokussierung auf direkte Elektrifizierung zu einer Fokussierung auf der Verwendung synthetischer Energieträger (heimisch oder durch Importe). Das Mix Szenario stellt einen ausgewogenen Technologiemark dar, mit keiner Fokussierung innerhalb dieser Dimensionen.

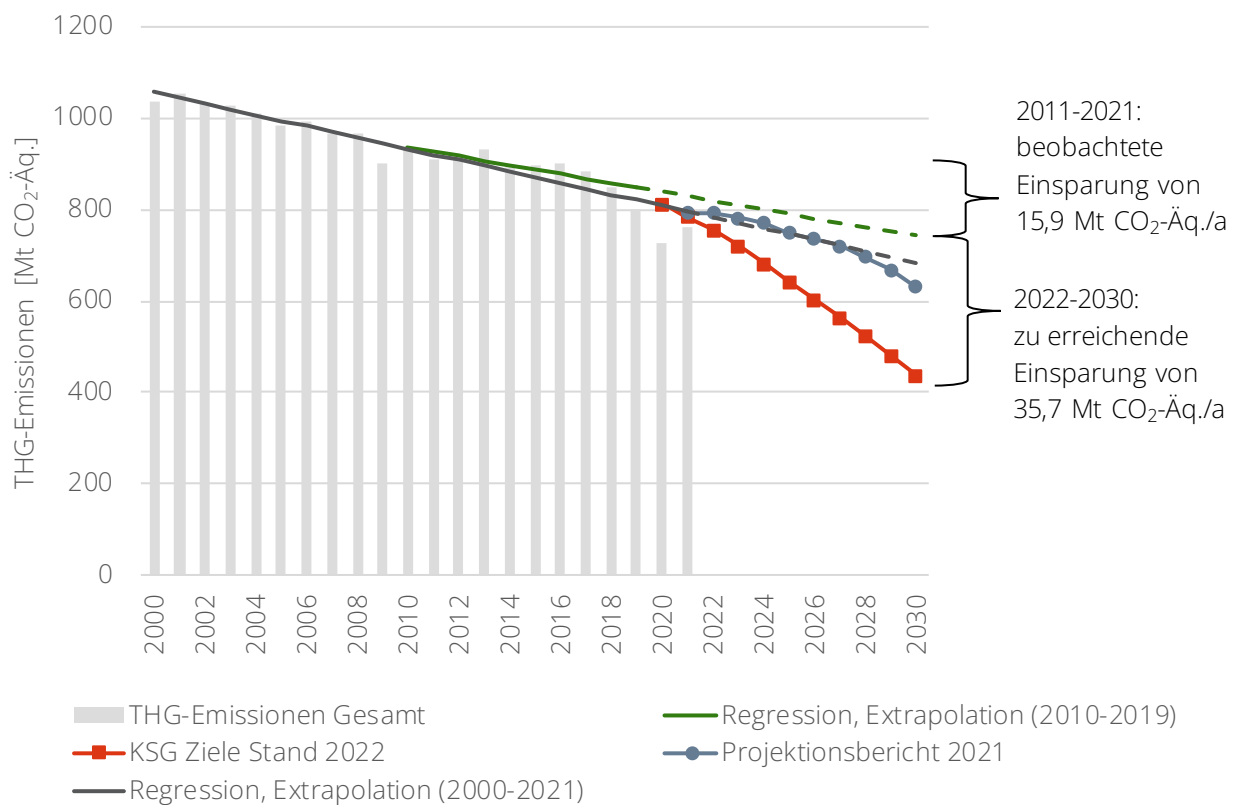
⁴⁶ Grundsätzlich zielen die Langfristszenarien des BMWK auf die Erreichung der Klimaneutralität bis 2050 ab und berücksichtigen damit nicht die nach dem Urteil des Bundesverfassungsgerichts verschärften Klimaziele inklusive einer Klimaneutralität für das Jahr 2045. Vorläufige Ergebnisse des Konsortiums deuten jedoch darauf hin, dass das Szenario TN-Strom das Zwischenziel für das Jahr 2030 erreicht und damit mit den aktuellen Klimazielen vereinbar ist (Lux et al. 2021). Neben dem „TN-Strom“ Szenario (sehr starker Einsatz von Strom) bilden die Langfristszenarien die Szenarien „sehr starker Einsatz von Wasserstoff“ (Szenario TN-H2) und „sehr starker Einsatz von synthetischen Kohlenwasserstoffen“ (Szenario TN-PtG/PtL) ab.

3.2 Betrachtung ausgewählter Trends

3.2.1 Sektorenübergreifende Entwicklungen

204 In Abbildung 81 ist der historische Verlauf der gesamten THG-Emissionen exklusive LULUCF seit dem Jahr 2000 dargestellt. Generell ist in den vergangenen 20 Jahren ein emissionsmindernder Trend zu beobachten, der sich in der negativen Steigung der beiden Regressionsgeraden niederschlägt. Es fällt auf, dass die Regressionsgerade für den Zeitraum 2000 bis 2021 steiler verläuft als die für den Zeitraum 2010 bis 2019. Dies weist auf eine Reduzierung der Geschwindigkeit der THG-Minderung in der letzten Dekade hin. Die Extrapolation der THG-Minderung der Jahre 2010-2019 weist daher auf höhere THG-Emissionen für das Jahr 2030 hin als die Extrapolation basierend auf den Jahren 2000-2021. Während die Projektion auf Basis der aktuell implementierten politischen Maßnahmen im Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) des Projektionsberichtes in den kommenden Jahren zwischen den beiden extrapolierten Zeitreihen liegt, projiziert dieser ab dem Jahr 2028 eine höhere Treibhausgas-minderung als die reine Fortschreibung der Zeitreihen.

Abbildung 81: Sektorenübergreifende THG-Emissionen - Rückblick, Projektion und Zielwertevergleich



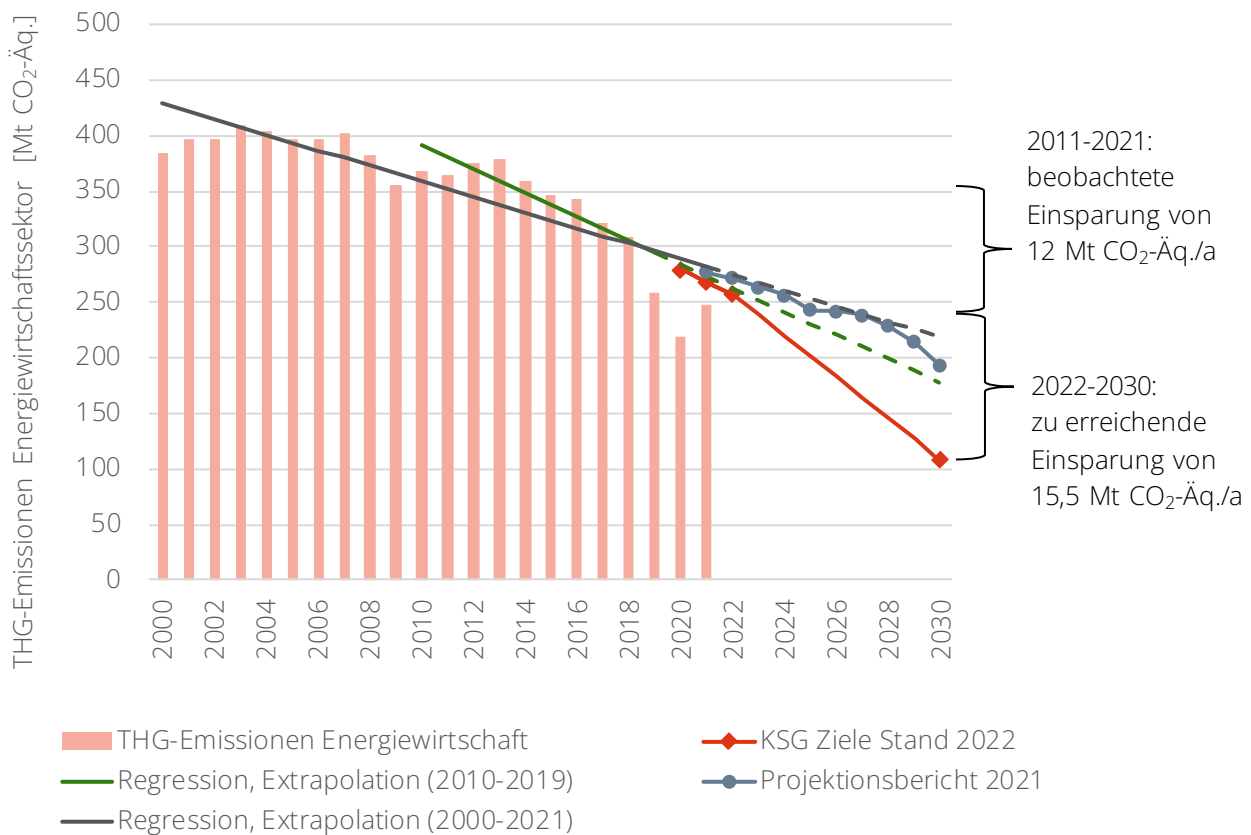
Eigene Darstellung auf Basis der Trendtabellen des Treibhausgasinventars 2022 (UBA 2022c). Für die Jahre 2000 bis 2020 werden die Inventardaten verwendet. Die Daten für das Jahr 2021 basieren auf der Berechnung der Vorjahresemissionen, Inventardaten liegen zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vor. Daten des MMS des Projektionsberichtes aus Öko-Institut et al. (2021). Das 95 % Konfidenzintervall der Extrapolation basierend auf der Regression 2010-2019 beträgt im Jahr 2030 +/- 128,9 Mt CO₂-Äq.

205 Sowohl die Extrapolationen als auch das MMS des Projektionsberichts zeigen eine deutliche Zielerreichungslücke zum KSG-Zielpfad. Zwischen den Jahren 2011-2021 wurde im Schnitt eine Minderungsrate von 15,9 Mt CO₂-Äq. pro Jahr beobachtet, während für die KSG-Zielerreichung 2030 eine 2,2-fach so große Minderungsrate von 35,7 Mt CO₂-Äq. pro Jahr notwendig ist. Es bedarf also mehr als einer Verdoppelung der Minderungsgeschwindigkeit für die Zielerreichung im Jahr 2030.

3.2.2 Energiewirtschaft

206 Der historische Verlauf der THG-Emissionen im Sektor Energiewirtschaft seit dem Jahr 2000 ist in Abbildung 82 dargestellt. Die Abbildung verdeutlicht, dass die Extrapolation, und damit die Minderungsrate, basierend auf den Jahren 2010 bis 2019 deutlich steiler ist als die Extrapolation basierend auf dem Zeitraum 2000 bis 2021. Dabei liegen beide Extrapolationen oberhalb der KSG-Ziele. Dies kann so interpretiert werden, dass die Geschwindigkeit der THG-Reduktion zwar in den letzten Jahren zugenommen hat, diese aber nicht ausreicht, um den KSG-Zielpfad bis zum Jahr 2030 zu erreichen. Der Pfad des MMS des Projektionsberichts 2021 liegt zwischen den Extrapolationen der zwei Regressionen. Zwischen 2011-2021 wurde durchschnittlich eine jährliche Minderung von 12 Mt CO₂-Äq. erreicht, während für die Zielerreichung bis zum Jahr 2030 eine 1,3-fach so große Minderungsrate, sprich eine durchschnittliche jährliche Minderung von 15,5 Mt CO₂-Äq. pro Jahr, notwendig wäre. Eine solche Absenkung erscheint möglich, wenn man mit einbezieht, dass in den vergangenen Jahren zeitgleich der weitgehende Ausstieg aus der Kernenergie erfolgte.

Abbildung 82: THG-Emissionen im Sektor Energiewirtschaft – Rückblick, Projektion und Zielwertevergleich

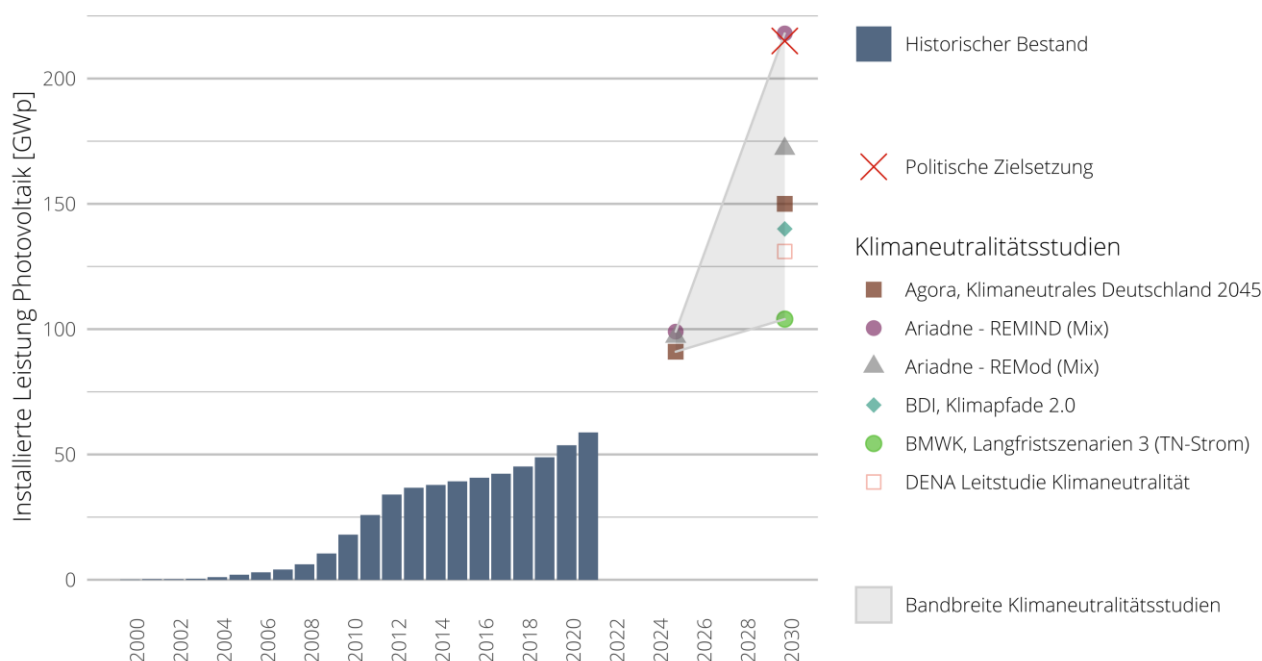


Eigene Darstellung auf Basis der Trendtabellen des Treibhausgasinventars 2022 (UBA 2022c). Für die Jahre 2000 bis 2020 werden die Inventardaten verwendet. Die Daten für das Jahr 2021 basieren auf der Berechnung der Vorjahresemissionen, Inventardaten liegen zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vor. Daten des MMS des Projektionsberichtes aus Öko-Institut et al. (2021). Das 95 % Konfidenzintervall der Extrapolation basierend auf der Regression 2010-2019 beträgt im Jahr 2030 +/- 103,4 Mt CO₂-Äq.

207 Ein zentrales Element der bisherigen und zukünftigen Dekarbonisierungsstrategie der Energiewirtschaft (BMWK 2022d) ist der Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern. Dies ist auch hinsichtlich eines steigenden zukünftigen Bruttostromverbrauchs relevant, der unter anderem von einer Elektrifizierung des Verkehrs- und des Gebäudesektors verursacht wird (Ueckerdt et al. 2021). Hinsichtlich des Ausbaus der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern werden im Folgenden die installierte PV-Leistung, die installierte Leistung der Windenergie an Land und die installierte Leistung der Windenergie auf See im zeitlichen Verlauf betrachtet (siehe Abbildung 83, Abbildung 84 und Abbildung 85). Die Abbildungen stellen dabei jeweils die historische Entwicklung des Bestandes, sowie die politischen Ziele des Osterpakets und die Werte der Klimaneutralitätsstudien für die Jahre 2025 und 2030 dar.

208 Aus Abbildung 83 wird deutlich, dass in den Jahren 2007 bis 2012 ein signifikanter Zubau der installierten PV Leistung stattgefunden hat. Ab dem Jahr 2012 zeigt sich ein Abflachen des Zubaus, der seit dem Jahr 2019 wieder zunimmt. Die Werte der installierten Leistung aus den „Big 5“-Studien liegen im Jahr 2025 bei ungefähr 100 GWp. Im Jahr 2030 decken die Szenarien aus den „Big 5“-Studien einen weiten Zielbereich von rund 100 GWp bis 220 GWp ab. Das politische Ziel des Osterpaketes befindet sich mit 215 GWp am oberen Rand der Klimaneutralitätsstudien.

Abbildung 83: Entwicklung der installierten Leistung der Photovoltaik im Vergleich zur politischen Zielsetzung sowie den Zielkorridoren der „Big 5“-Studien



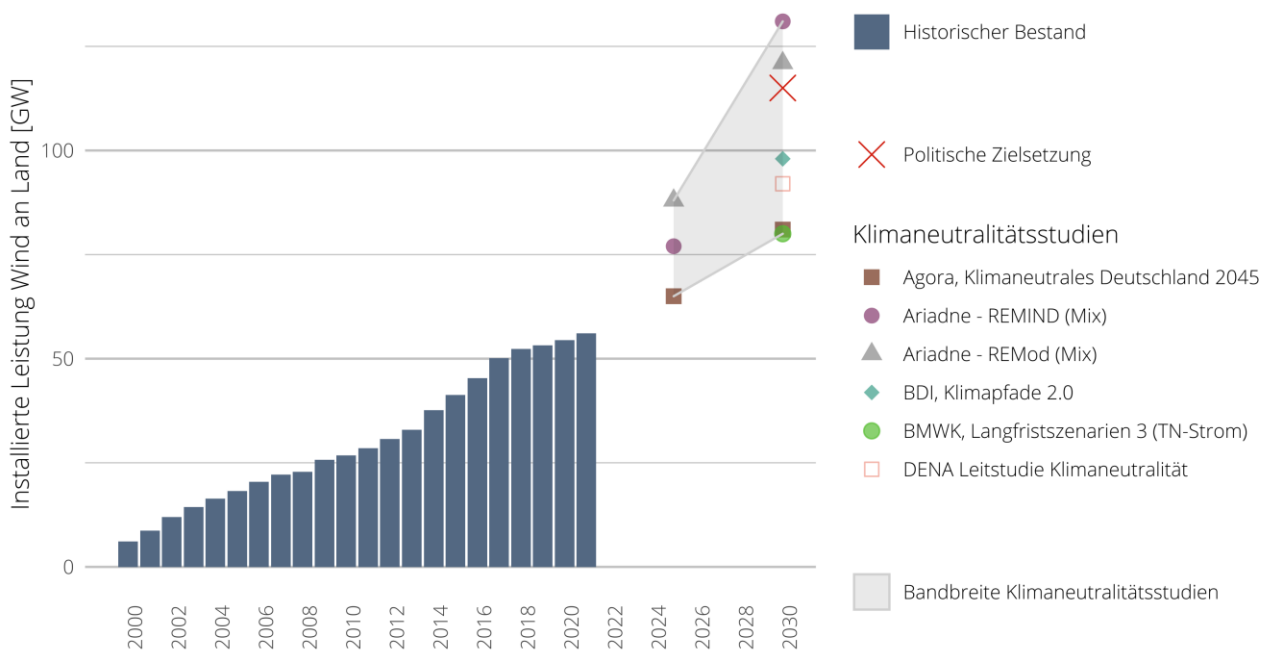
Eigene Darstellung auf Basis von AGEE-Stat (2022) und der in Kapitel 3.1 beschriebenen Klimaneutralitätsstudien. Das politische Ziel wurde dem Osterpaket (BMWK 2022d) entnommen.

209 Für die Erreichung des Ziels aus dem Osterpaket wäre ein Netto-Zubau von rund 150 GWp bzw. ein Brutto-Zubau (inkl. Ersatz altersbedingt ausscheidender Anlagen) von bis zu 170 GWp innerhalb der nächsten acht Jahre erforderlich. Dieses Ziel entspricht also einem durchschnittlichen jährlichen Brutto-Zubau von mehr als 20 GWp im laufenden Jahrzehnt. Zum Vergleich: Der jährliche Brutto-Zubau hat im vergangenen Jahrzehnt durchschnittlich 4 GWp pro Jahr betragen (Gierink et al. 2022), im Jahr 2021 5,3 GWp (ISE 2022) und im Jahr 2022 voraussichtlich bis rund 8 GWp. Der stärkste jährliche Zubau fand bisher in den Jahren 2011/2012 mit je rund 8 GWp statt (AGEE-Stat und UBA 2021). Eine derartig schnelle Skalierung wirft vielfältige Herausforderungen für die Lieferketten, das Handwerk sowie die Finanzierung auf. Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass das durchschnittliche Zubauziel Deutschlands knapp 10 % des aktuellen Weltmarkts für PV-Module betrifft und somit durchaus weltweite Preiseffekte auslösen könnte. Der Weltmarkt wird zu über 90 % von asiatischen bzw. zu 70 % von chinesischen Herstellern dominiert. Angesichts der momentanen Unsicherheiten steht die Realisierung der formulierten Ausbauziele daher auch unter diesem Aspekt unter Vorbehalt.

210 Der Ausbau von installierter Leistung der Windenergie an Land stieg bis zum Jahr 2015 gleichmäßig an (siehe Abbildung 84). Vor allem zwischen den Jahren 2015 bis 2018 lässt sich ein bedeutender Zuwachs der installierten Leistung von Windkraftanlagen erkennen, welcher ab dem Jahr 2018 wieder stark abflacht. Die „Big 5“-Studien liegen im Jahr 2025 zwischen rund 65 GW bis 90 GW und für das Jahr 2030 bei rund 80 GW bis 130 GW. Das politische Ziel des Osterpaketes liegt mit 115 GW im oberen Drittel der Zielwerte der Klimaneutralitätsstudien. Für die Erreichung des politischen Ausbauziels ist auch die entsprechende Flächenverfügbarkeit wichtig. Laut Koalitionsvertrag sollen 2 % der Flächen für Wind auf Land ausgewiesen werden. Der Gesetzesentwurf des „Windenergie-an-Land-Gesetz“ (Inkrafttreten am 1. Februar 2023) verpflichtet die Bundesländer dieses Ziel bis zum Jahr 2032 umzusetzen. Dabei gilt, dass, wenn die Vorgaben verfehlt werden, der Bund den Bundesländern die Durchsetzung der

Abstandsregeln verbieten darf. Bis zum Jahr 2027 sollen 1,4 % der Flächen für Wind auf Land zur Verfügung stehen. Aktuell sind bundesweit 0,8 % der Landesfläche ausgewiesen, sodass eine deutliche Anhebung notwendig ist (Bundesregierung 2022d).

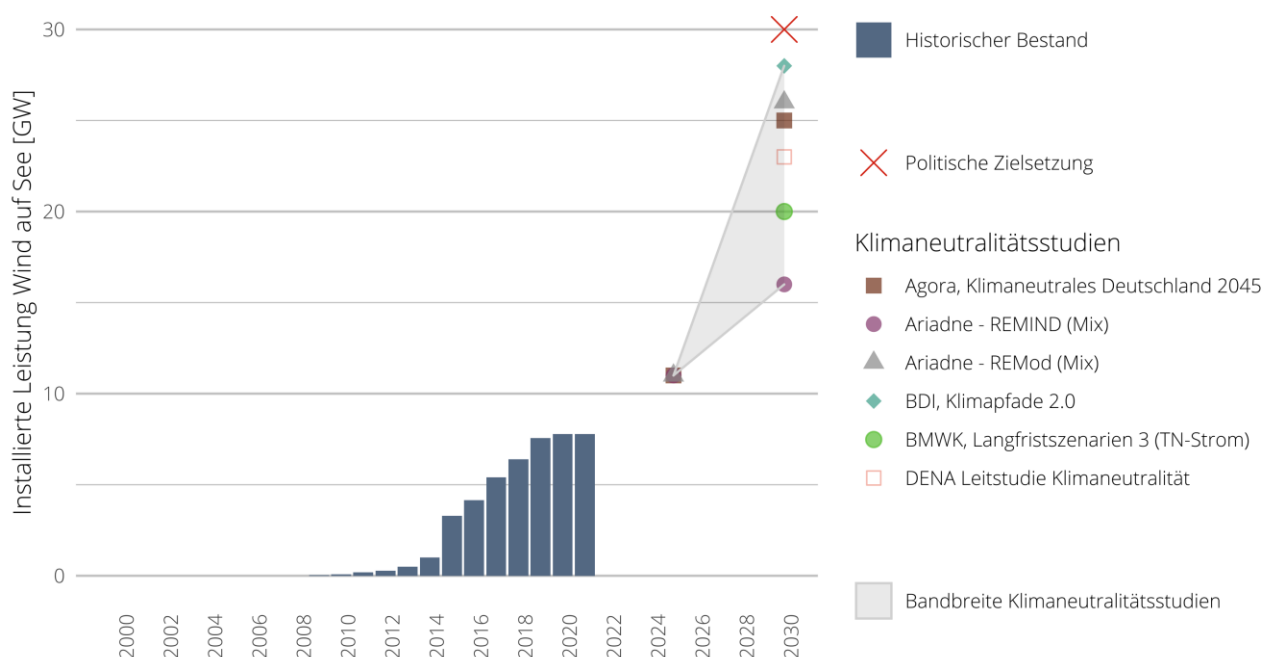
Abbildung 84: Entwicklung der Installierten Leistung von Wind an Land im Vergleich zur politischen Zielsetzung sowie den Zielkorridoren der „Big 5“-Studien



Eigene Darstellung auf Basis von AGEE-Stat (2022) und der in Kapitel 3.1 beschriebenen Klimaneutralitätsstudien. Das politische Ziel wurde dem Osterpaket (BMWK 2022d) entnommen.

- 211 Zur Erreichung des Ziels aus dem Osterpaket müsste ein Netto-Zubau von rund 65 GW zwischen 2023 und 2030 erreicht werden, brutto knapp 80 GW. Mit durchschnittlich 8 GW Brutto-Zubau pro Jahr liegt der geplante Aufwuchs um etwa den Faktor 2,7 über dem durchschnittlichen Zubau der Jahre 2010-2020, aber nur um den Faktor 1,6 über dem bisherigen Maximalzubau aus dem Jahr 2016 (5,1 GW). Auch hier ergeben sich Herausforderungen für die Lieferketten, die allerdings deutlich weniger stark ausgeprägt sind als bei der Photovoltaik. Allerdings spielen bei der Windenergie an Land Standort- und Genehmigungsfragen eine größere Rolle, die eine Zielerreichung erschweren können. Derartige Herausforderungen sind im Osterpaket umfangreich adressiert worden.
- 212 Im Gegensatz zu den installierten PV-Leistungen und der Windenergie an Land hat der Ausbau der installierten Leistung der Windenergie auf See erst ab dem Jahr 2009 stattgefunden (siehe Abbildung 85). In den Jahren 2015 bis 2019 hat die installierte Leistung stark zugenommen. In den letzten Jahren ist der Zubau nahezu stagniert. Die „Big 5“-Szenarien weisen im Jahr 2025 einen Wert von ungefähr 10 GW auf und decken im Jahr 2030 ein Bereich von rund 15 GW bis 28 GW ab. Das politische Ziel des Osterpakets liegt mit 30 GW im Jahr 2030 sogar über den Zielmarken der Klimaneutralitätsstudien.

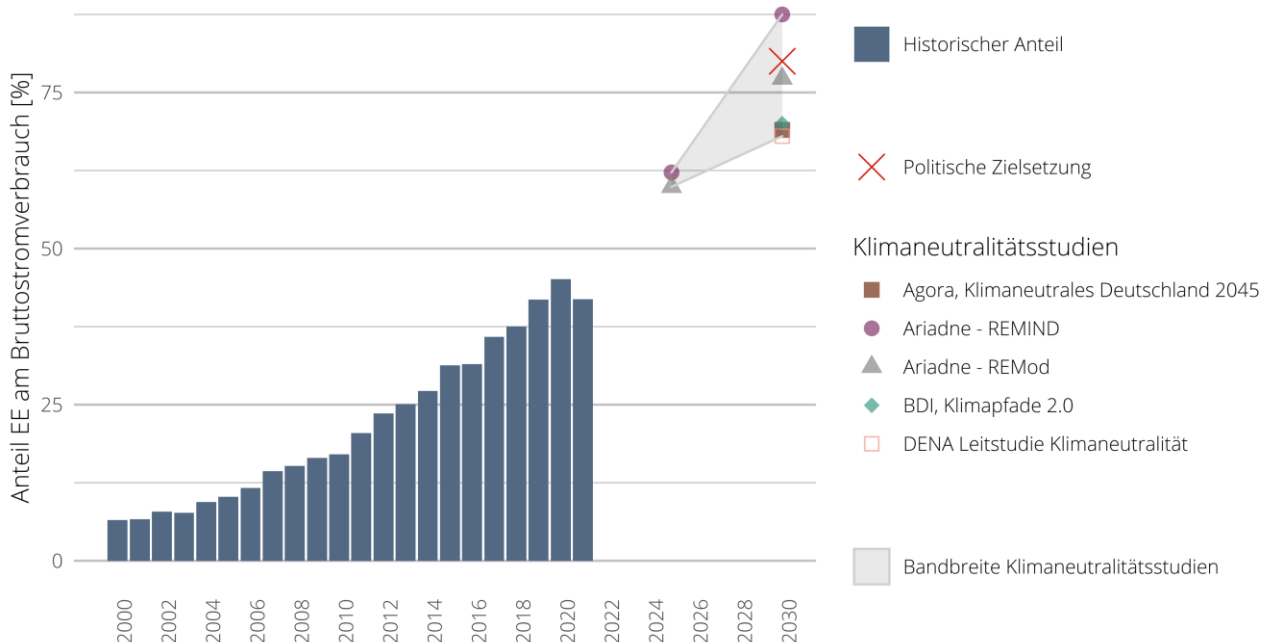
Abbildung 85: Entwicklung der Installierten Leistung von Wind auf See im Vergleich zur politischen Zielsetzung sowie den Zielkorridoren der „Big 5“-Studien



Eigene Darstellung auf Basis von AGEE-Stat (2022) und der in Kapitel 3.1 beschriebenen Klimaneutralitätsstudien. Das politische Ziel wurde dem Osterpaket (BMWK 2022d) entnommen.

- 213 Zur Erreichung des politischen Ziels aus dem Osterpaket müsste ein Netto-Zubau von knapp 22 GW in den Jahren 2023-2030 erfolgen, im Fall der Windenergie auf See brutto wie netto. Damit müsste das bisherige Ausbautempo (ca. 0,8 GW pro Jahr seit dem Jahr 2010) um einen Faktor von rund 3,5 erhöht werden. Auch hier sind der entsprechende Aufbau der Lieferketten und Fragen der Finanzierung wichtige Herausforderungen und entsprechend scheint die Realisierung der gesetzten Ziele im vorgesehenen Zeitraum mit erheblichen Anstrengungen verbunden zu sein.
- 214 Ein weiterer wichtiger Anhaltspunkt für die Bewertung der Dekarbonisierung der Energiewirtschaft ist der Anteil erneuerbare Energieträger am Stromverbrauch. Im Jahr 2021 betrug der Anteil der erneuerbaren Energieträger am Bruttostromverbrauch rund 41 % (siehe Abbildung 86). Im Vergleich zu einem Anteil vom ca. 45 % im Jahr 2020 ist ein Rückgang des Anteils erneuerbarer Energieträger am Bruttostromverbrauch zu sehen, der hauptsächlich auf ungünstige Bedingungen für das Dargebot der erneuerbaren Energieträger zurückzuführen ist (siehe Abbildung 15). Zusätzlich ging im ersten Covid-19-Pandemiejahr 2020 der Stromverbrauch zurück, so dass der Anteil erneuerbarer Energieträger trotz eines nur geringen Ausbaus erneuerbarer Energieträger stieg. Mit Ausnahme des Rückgangs im Jahr 2021 ist in den letzten Jahren ein Anstieg des Anteils erneuerbarer Energieträger am Bruttostromverbrauch zu beobachten. Das Ziel der Bundesregierung aus dem Koalitionsvertrag ist eine Steigerung des Anteils der erneuerbaren Energieträger am Bruttostromverbrauch bis zum Jahr 2030 auf 80 % (SPD Bündnis 90/Die Grünen und FDP 2021). Die Werte der Klimaneutralitätsstudien umfassen für das Jahr 2025 eine Bandbreite von 60 bis 62 % und für das Jahr 2030 68 bis 88 %.

Abbildung 86: Entwicklung des Anteils der Erneuerbaren Energieträger am Bruttostromverbrauch im Vergleich zur politischen Zielsetzung sowie den Zielkorridoren der „Big 5“-Studien



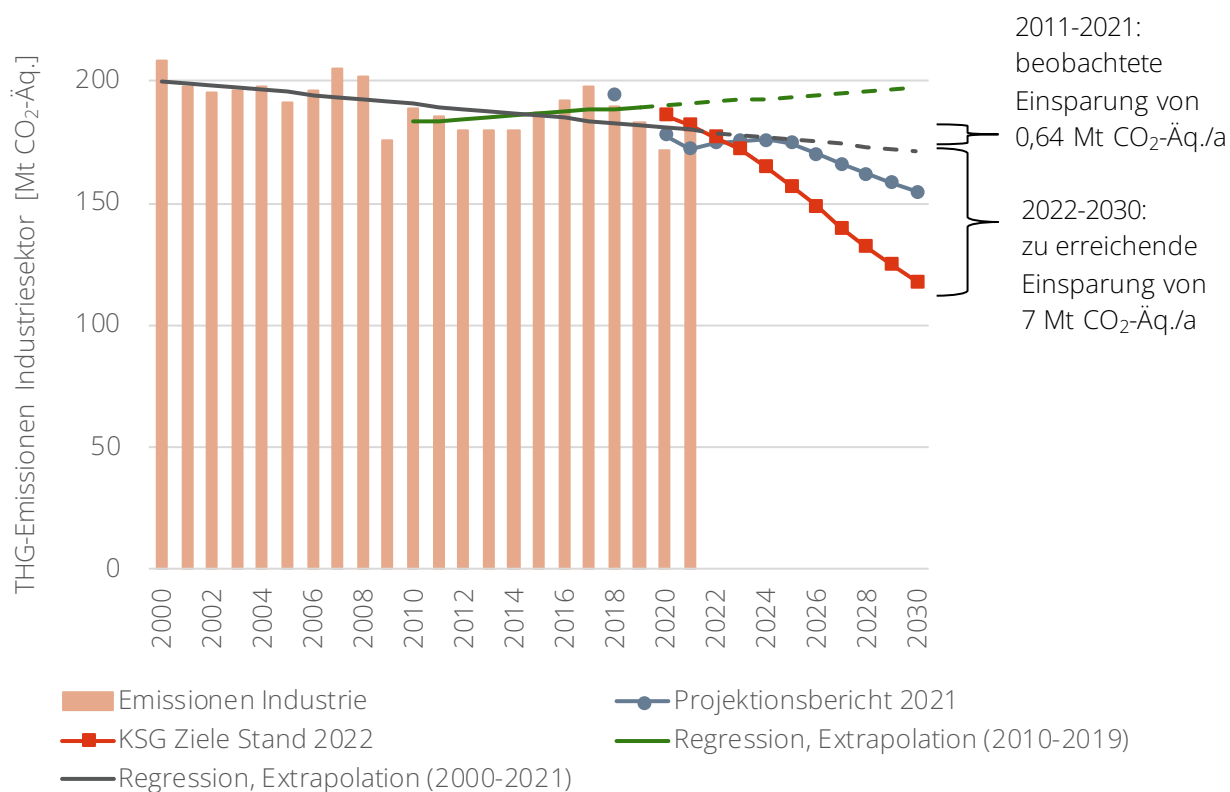
Eigene Darstellung auf Basis von AGEE-Stat (2022) und der in Kapitel 3.1 beschriebenen Klimaneutralitätsstudien. Das politische Ziel wurde dem Koalitionsvertrag (SPD Bündnis 90/Die Grünen und FDP 2021) entnommen.

215 Die Entwicklung des Anteils erneuerbarer Energieträger am Stromverbrauch ist von zwei Faktoren beeinflusst: Der Entwicklung der zukünftigen Stromnachfrage und dem Ausbau erneuerbarer Energieträger. Die Entwicklung der zukünftigen Stromnachfrage ist dabei stark vom Grad der direkten und indirekten Elektrifizierung durch Sektorenkopplung, aber auch zusätzlicher Effizienz insbesondere auf Nutzungsebene sowie der Reduktion von Aktivitätsgrößen abhängig. Im Koalitionsvertrag wird ein Bruttostrombedarf von 680 bis 750 TWh im Jahre 2030 unterstellt (SPD Bündnis 90/Die Grünen und FDP 2021), Klimaneutralitätsstudien gehen von einem signifikanten Anstieg der Stromnachfrage durch Sektorenkopplung (Elektrifizierung Verkehrssektor (Elektromobilität), Elektrifizierung der Industrieprozesse (z. B. Hochtemperaturwärmepumpen) oder Elektrifizierung der Bereitstellung von Gebäudewärme durch Wärmepumpen oder durch erneuerbare Energieträger gespeiste Wärmenetze) aus (Luderer et al. 2021). Ein gegenläufiger Effekt zeigt sich bedingt durch die steigenden Energiepreise. Auf den Terminmärkten zeigen sich zwar (vom aktuell extrem hohen Niveau) rückläufige, aber bis zum Ende der Dekade hohe Strompreise in Deutschland. Daraus könnte ein erheblicher Wettbewerbsdruck auf Produktionskapazitäten in der deutschen Industrie ausgelöst werden, in deren Folge die industrielle Stromnachfrage spürbar sinken könnte. In Verbindung mit den Unsicherheiten hinsichtlich des Fortschritts beim Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern erscheint also die Bandbreite der möglichen Entwicklungen beim Anteil des erneuerbaren Stroms am Bruttostromverbrauch groß zu sein und eine Beurteilung der Realisierbarkeit des politischen Ziels schwierig (Luderer et al. 2022). Es ist zu berücksichtigen, dass zusätzlich die Gesamtmenge des Stromverbrauchs auch direkten Einfluss auf die Höhe der THG-Emissionen hat.

3.2.3 Industrie

216 In Abbildung 87 ist der historische Verlauf der THG-Emissionen im Sektor Industrie seit dem Jahr 2000 dargestellt. Wird die lineare Regression der THG-Emissionen der Jahre 2010 bis 2019 extrapoliert, ergeben sich leicht steigende THG-Emissionen bis zum Jahr 2030, wohingegen eine Extrapolation der Regression des Gesamtzeitraums leicht fallende THG-Emissionen aufweist. In beiden Fällen liegen die extrapolierten THG-Emissionen ab dem Jahr 2022 über den Zielwerten des Bundes-Klimaschutzgesetzes und dem MMS des Projektionsberichts 2021. Zwischen den Jahren 2011 und 2021 wurde durchschnittlich eine jährliche Minderung von ca. 0,71 Mt CO₂-Äq. beobachtet. Die Minderung, die nötig ist, um im Jahr 2030 die KSG-Ziele zu erreichen, liegt dagegen bei 7,0 Mt CO₂-Äq. pro Jahr. Für die Zielerreichung im Jahr 2030 müsste die durchschnittliche jährliche Minderung der THG-Emissionen im Industriesektor in den Jahren 2022–2030 also ungefähr 10-mal höher ausfallen als im Zeitraum 2011–2021.

Abbildung 87: THG-Emissionen im Sektor Industrie - Rückblick, Projektion und Zielwertevergleich



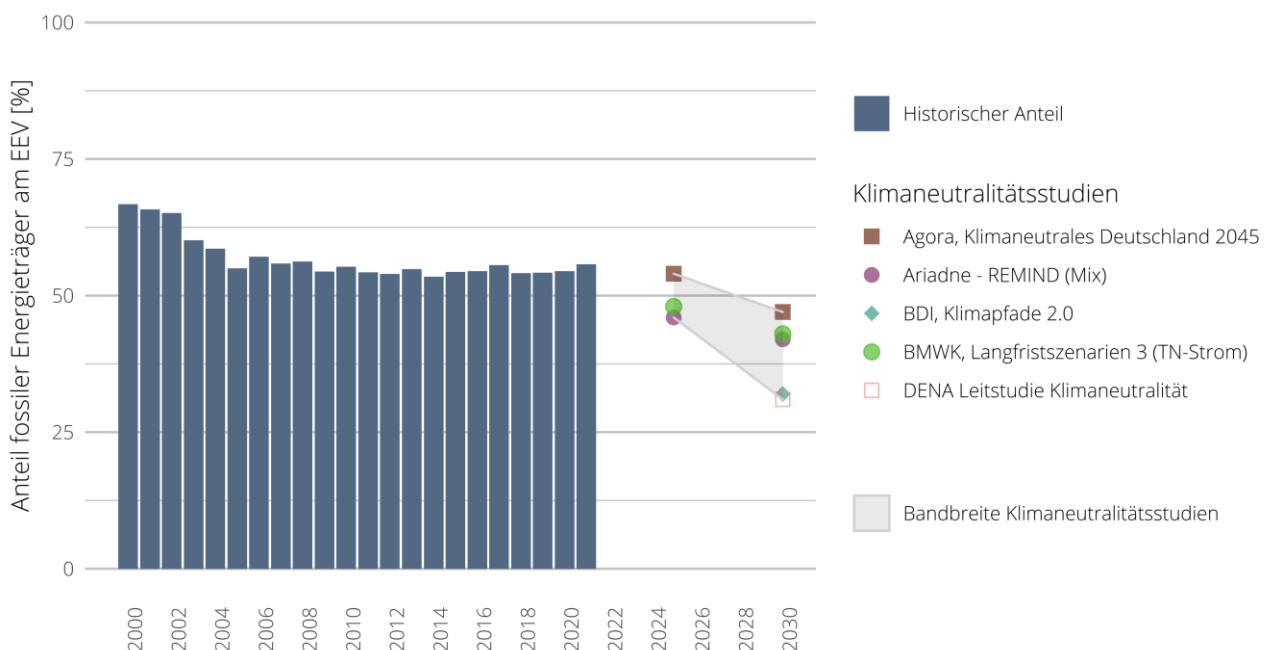
Eigene Darstellung auf Basis der Trendtabellen des Treibhausgasinventars 2022 (UBA 2022c). Die Daten für das Jahr 2021 basieren auf der Berechnung der Vorjahresemissionen, Inventardaten liegen zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vor. Daten des MMS des Projektionsberichtes aus Öko-Institut et al. (2021). Das 95 %-Konfidenzintervall der Extrapolation basierend auf der Regression 2010–2019 beträgt im Jahr 2030 +/- 31,8 Mt CO₂-Äq.

217 Laut Bundes-Klimaschutzgesetz darf der Industriesektor im Jahr 2030 nur noch knapp zwei Drittel seiner THG-Emissionen des Jahres 2021 ausstoßen. Zur näheren Einordnung der historischen Entwicklung anhand von Indikatoren werden im Folgenden der Anteil fossiler Energieträger am Endenergieverbrauch der Industrie (Abbildung 88), die Entwicklung des absoluten Endenergiebedarfs der Industrie (Abbildung

89), die Entwicklung von Strom am Endenergieverbrauch (als Indikator für den direkten Elektrifizierungsgrad) (Abbildung 90) und der Anteil von Erdgas am Endenergieverbrauch (Abbildung 91) dargestellt und mit den Zielszenarien der „Big 5“-Studien verglichen. Zusätzlich wird die Entwicklung der Energieträger auf Basis eines Bottom-up Industriemodells (FORECAST) zur Erreichung des Sektorziels im Industriesektor gegenüber der historischen Entwicklung dargestellt (Abbildung 92).

218 Die Werte der „Big 5“-Studien suggerieren, dass starke Minderungen im Einsatz von fossilen Energieträgern in der Industrie in den nächsten acht Jahren erreicht werden müssen, wenn das jeweils unterstellte Aktivitätsniveau in der Industrie erreicht bzw. aufrechterhalten werden soll. Für den Anteil der fossilen Energieträger am Endenergieverbrauch der Industrie werden für 2025 Werte von rund 46 % bis 54 % und für 2030 Werte von 31 % bis 47 % errechnet (siehe Abbildung 88).

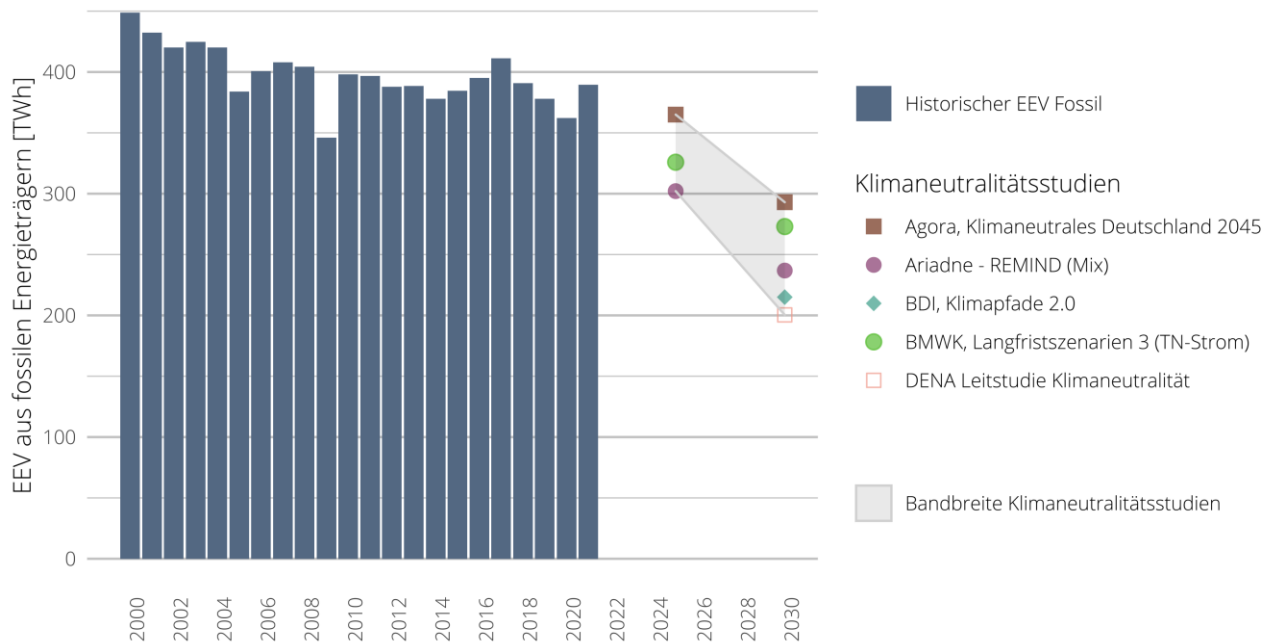
Abbildung 88: Entwicklung des Anteils der fossilen Energieträger am Endenergieverbrauch der Industrie im Vergleich zu den Zielkorridoren der „Big 5“-Studien



Eigene Darstellung auf Basis von AGEB (2021a). Der Wert für das Jahr 2021 beruht auf vorläufigen Daten. Die Klimaneutralitätsstudien werden in Kapitel 3.1 beschrieben.

219 Zudem unterstellen die Szenarien der Klimaneutralitätsstudien jeweils eine deutliche Reduktion des absoluten Endenergiebedarfs fossiler Energieträger in der Industrie. Die absoluten Werte der „Big 5“-Studien spannen Bandbreiten von ungefähr 302 bis 380 Terrawattstunden für das Jahr 2025 und 200 bis 293 Terrawattstunden für das Jahr 2030 auf. Das entspricht ca. 50–75 % des absoluten fossilen Endenergiebedarfs des Jahres 2021 (siehe Abbildung 89).

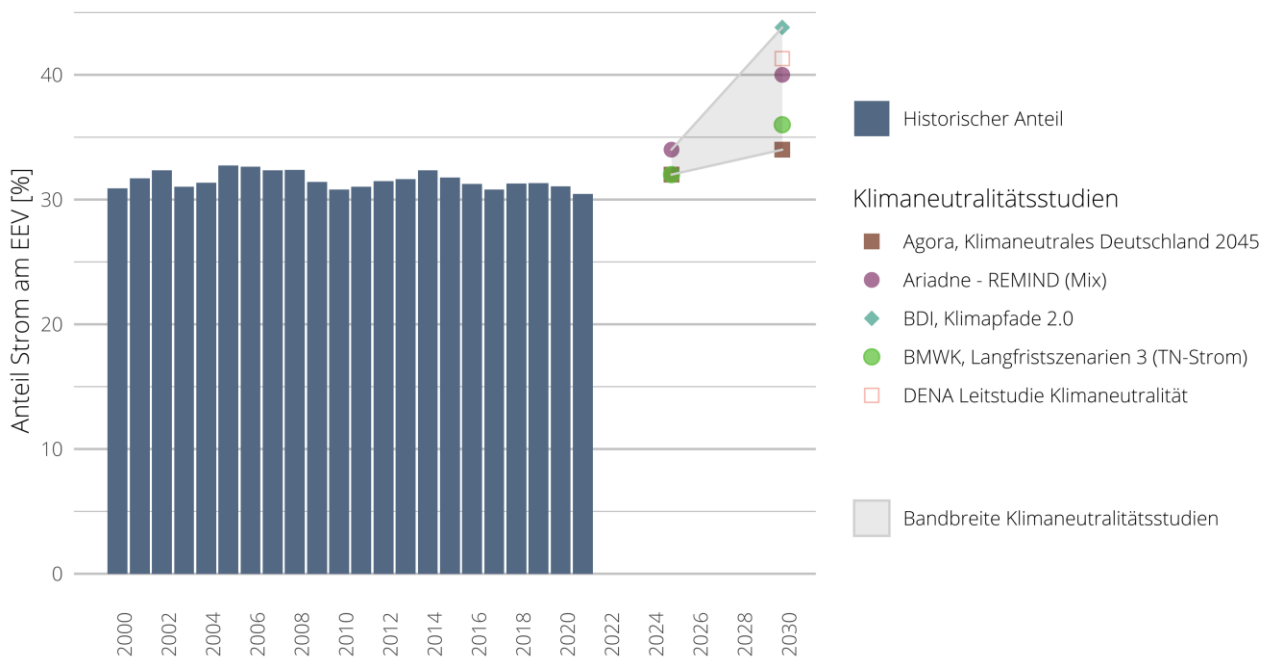
Abbildung 89: Entwicklung der absoluten Werte der fossilen Energieträger des Endenergieverbrauchs der Industrie im Vergleich zu den Zielkorridoren der „Big 5“-Studien



Eigene Darstellung auf Basis von AGEB (2021a). Der Wert für das Jahr 2021 beruht auf vorläufigen Daten. Die Klimaneutralitätsstudien werden in Kapitel 3.1 beschrieben.

220 Der in den Szenarien ausgewiesene Rückgang der fossilen Energieträger ist zum einen auf einen angenommen starken Anstieg der direkten Elektrifizierung im Rahmen der Dekarbonisierungsoptionen der Klimaneutralitätsstudien zurückzuführen (siehe Abbildung 90). Die „Big 5“-Studien errechnen für die kommenden Jahre einen deutlichen Zuwachs des Anteils von Strom am Endenergieverbrauch im Industriesektor, der im Jahr 2025 zwischen ca. 32 und 36 % und im Jahr 2030 zwischen rund 34 und 44 % liegen würde. Während der Stromanteil in den letzten Jahren eher stagnierend war (um die 30 %), müsste der Stromanteil in einem „Big 5“-kompatiblen System also um 4 bis 14 Prozentpunkte steigen.

Abbildung 90: Entwicklung des Anteils von Strom am Endenergieverbrauch der Industrie im Vergleich zu den Zielkorridoren der „Big 5“-Studien

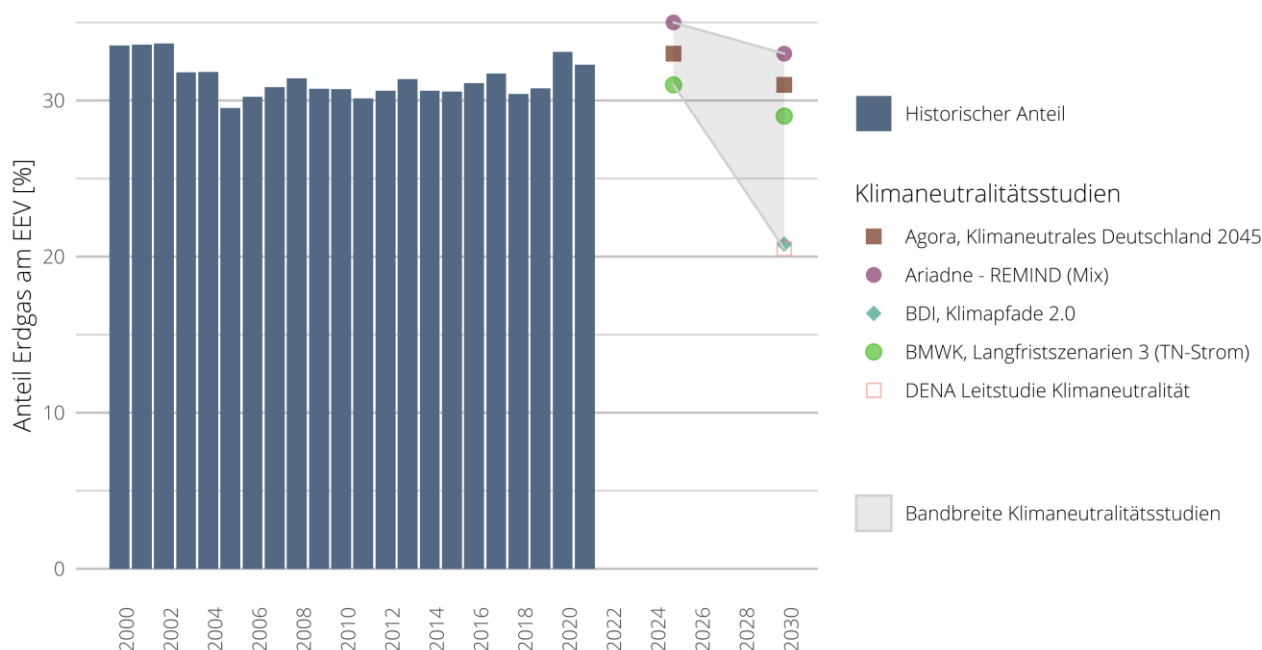


Eigene Darstellung auf Basis von AGEB (2021a). Der Wert für das Jahr 2021 beruht auf vorläufigen Daten. Die Klimaneutralitätsstudien werden in Kapitel 3.1 beschrieben.

221 Zudem enthalten die Zielszenarien einen starken Rückgang des Anteils von Gas am Endenergieverbrauch der Industrie (siehe Abbildung 91). Der Anteil von Erdgas am Endenergieverbrauch soll gemäß der Bandbreite der „Big 5“-Studien im Jahr 2025 zwar noch zwischen ungefähr 31 und 38 % liegen. Im Jahr 2030 soll der Endenergieverbrauch jedoch auf Werte zwischen ca. 21 und 33 % absinken, was einer Reduktion von bis zu 11 Prozentpunkten entspricht.⁴⁷

⁴⁷ Hierbei ist anzumerken, dass im Rahmen der Klimaneutralitätsstudien keine Gasknappheit im Zusammenhang mit der Energiepreiskrise berücksichtigt wurde, da die Szenarien vor dem starken Preisanstieg im Jahr 2021 und dem Beginn des Kriegs in der Ukraine entstanden sind. Neben dem Aspekt der Knappheit ist davon auszugehen, dass hohe Gaspreise in den Modellen zu einer weiteren Minderung des Gaseinsatzes in der Industrie führen würden.

Abbildung 91: Entwicklung des Anteils von Erdgas am Endenergieverbrauch der Industrie im Vergleich zu den Zielkorridoren der „Big 5“-Studien



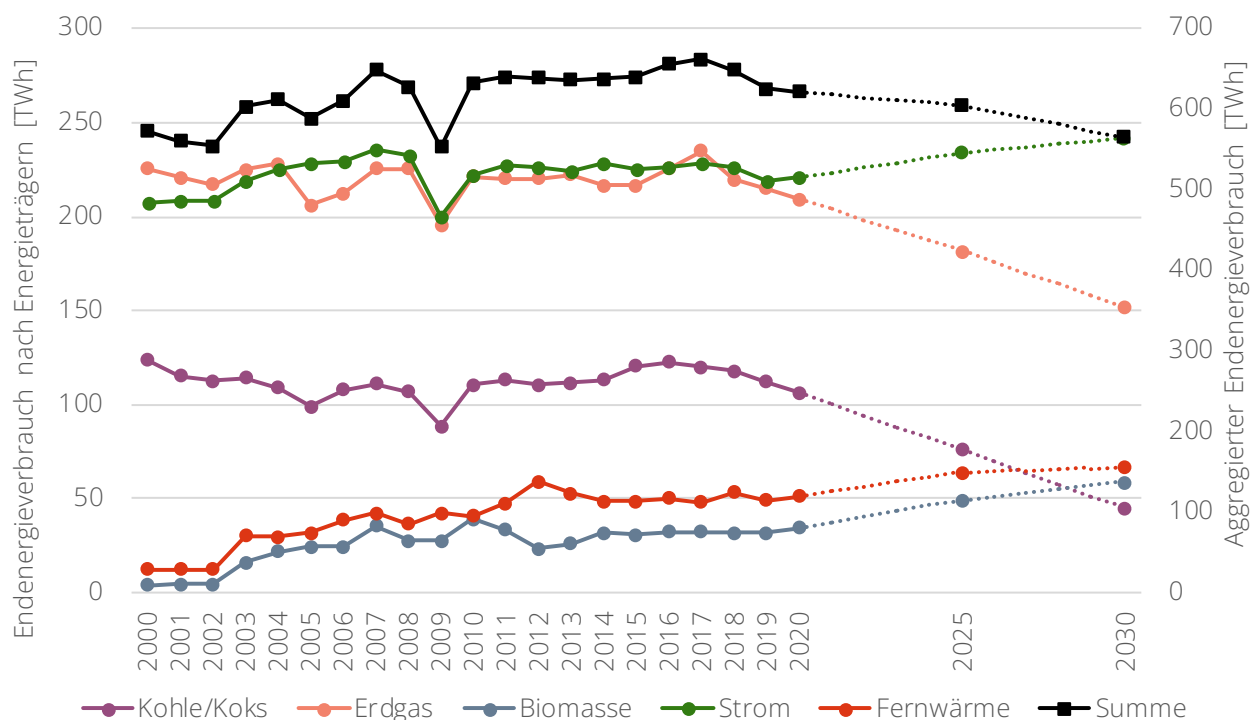
Eigene Darstellung auf Basis von AGEB (2021a). Der Wert für das Jahr 2021 beruht auf vorläufigen Daten. Die Klimaneutralitätsstudien werden in Kapitel 3.1 beschrieben.

222 Im Vergleich zu den sektorenübergreifenden normativen Zielsystemstudien hat Fleiter und Rehfeldt (2022) mit einem sektoralen Bottom-up Modell (FORECAST) untersucht, ob der aktuelle Politikmix (Stand Januar 2022) ausreicht, um die vorgegebenen Ziele für den Industriesektor zu erreichen.⁴⁸ Dazu wurden verschiedene Szenariovarianten modelliert, die unterschiedliche Annahmen im Hinblick auf die Preisentwicklung von CO₂ und Wasserstoff treffen. Abbildung 92 zeigt exemplarisch den historischen Endenergieverbrauch bis zum Jahr 2019 für verschiedene Energieträger sowie die modellierten Daten der Jahre 2025 und 2030 des Szenarios „CO₂-Preissprung und beschleunigter Anlagentausch“ aus Fleiter und Rehfeldt (2022). Dieses Szenario würde, wie die Szenarien aus den „Big 5“-Studien, ebenfalls das KSG-Ziel für die THG-Emissionen des Industriesektors erreichen und beruht zudem insgesamt auf ähnlichen Annahmen. In dieser Auswertung wird der enorme Bruch deutlich, der laut einem Zielszenario bei konstantem Aktivitätsniveau in der Industrie erforderlich wäre. Insgesamt sinkt der Verbrauch der betrachteten Endenergieträger für das Jahr 2030 in dem betrachteten Szenario fast auf die Menge des Krisenjahres 2009 ab und es kommt zu einer starken Substitution von Kohle und Erdgas durch Strom, Fernwärme und Biomasse. Hierfür müssten die entsprechenden Investitionen in der Industrie selbst und in die benötigten infrastrukturellen Voraussetzungen für einen beschleunigten Anlagentausch (Stromnetz, Wasserstoffnetz und -bereitstellung) getätigt werden. Werden diese nicht in der gebotenen

⁴⁸ Der Unterschied zwischen den sektoralen Energiesystemmodellen (wie REMod oder REMIND) zu FORECAST besteht darin, dass in den sektorenübergreifenden Energiesystemmodellen CO₂-Zielwerte oder Budgets vorgegeben werden und innerhalb bestimmter Nebenbedingungen der Transformationspfad des Energiesystems und dabei die Gesamtkosten minimiert werden. Dabei werden sektorenübergreifende Ziele/Budgets als Modellbedingung implementiert. Im Unterschied dazu wird in dem sektoralen Bottom-up-Simulationsmodell FORECAST die Entwicklung des Industriesektors explorativ auf Basis vorgegebener Rahmenbedingungen simuliert, ohne dabei Emissionsminderungen vorzugeben.

Geschwindigkeit realisiert, könnte das Treibhausgasziel für die Industrie laut dieser Modellierung nur noch durch eine deutliche Rückführung der industriellen Aktivitäten in Deutschland erreicht werden. Dies hätte allerdings Folgewirkungen für die Leistungsfähigkeit der deutschen Volkswirtschaft und damit indirekt auch für die Finanzierung der vielfältigen geplanten Investitionen in neuen emissionsarmen Kapitalstock. Im Vergleich zu den seit dem Jahr 2010 relativ konstanten Verläufen des Bedarfs an fossilen Energieträgern werden somit die Herausforderungen deutlich, vor denen der Industriesektor steht.

Abbildung 92: Entwicklung der absoluten Werte ausgewählter Energieträger des Endenergieverbrauchs der Industrie sowie die entsprechenden modellierten Datenpunkte 2025 und 2030 aus dem Szenario CO₂-Preissprung und beschleunigter Anlagentausch



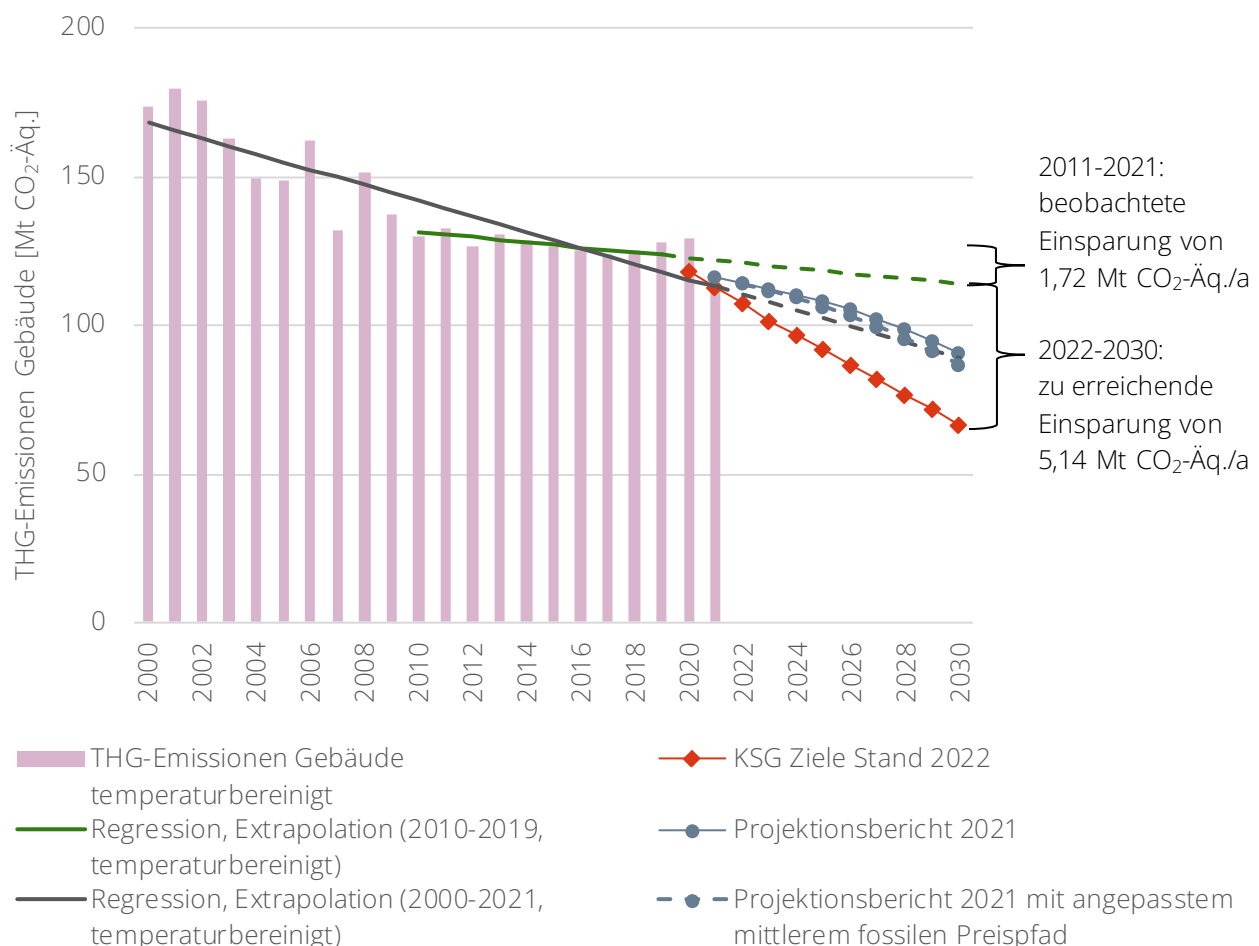
Eigene Darstellung auf Basis von AGEb (2021a) und Fleiter und Rehfeldt (2022).

223 Das im Vergleich zum Weltmarkt derzeit und gegebenenfalls noch auf mehrere Jahre hohe Energiepreinsniveau in Deutschland, insbesondere für Strom und Gas, könnte absehbar zu einem Rückgang industrieller Aktivität hierzulande führen, sofern die Effekte nicht staatlich kompensiert werden. Bei den Überlegungen, ob, in welchem Umfang und auf welche Dauer derartige staatliche Kompensationen angelegt werden, sind die sektoralen Klimaschutzziele in angemessener Weise zu berücksichtigen. Vor diesem Hintergrund erscheint es sinnvoll, ein „Zielbild Industrie 2030“ zu definieren, welches die wirtschaftlichen und die klimapolitischen Ziele für diesen Sektor zu einem tragfähigen Ausgleich bringt. Aus diesem Zielbild könnten die erforderlichen Maßnahmen zur Begleitung der Veränderungsprozesse in der Industrie abgeleitet werden.

3.2.4 Gebäude

224 Der historische Verlauf der THG-Emissionen im Sektor Gebäude seit dem Jahr 2000 ist in Abbildung 93 dargestellt. Die unterschiedlichen Steigungen der Regressionsgeraden verdeutlichen, dass die Geschwindigkeit der THG-Minderung in den letzten Jahren stark abgenommen hat. Dies wird besonders durch die Extrapolation bis zum Jahr 2030 deutlich. Während die Extrapolation der Regression basierend auf dem Zeitraum 2000 bis 2020 knapp unter dem Projektionsbericht für die Jahre 2023 bis 2029 liegt, ist die Extrapolation der Regression basierend auf den Jahren 2010 bis 2019 weit oberhalb dieser Verläufe. Der KSG-Pfad liegt wiederum weit unterhalb der Extrapolationen und des Projektionsberichtes. Im Schnitt wurde zwischen den Jahren 2011-2021 eine jährliche Minderung von ca. 1,72 Mt CO₂-Äq. beobachtet. Für die Zielerreichung des Bundes-Klimaschutzgesetzes wäre hingegen eine dreifach so große Minderungsrate, sprich im Schnitt eine jährliche Minderung von 5,14 Mt CO₂-Äq. pro Jahr, notwendig.

Abbildung 93: THG-Emissionen im Sektor Gebäude - Rückblick, Projektion und Zielwertevergleich

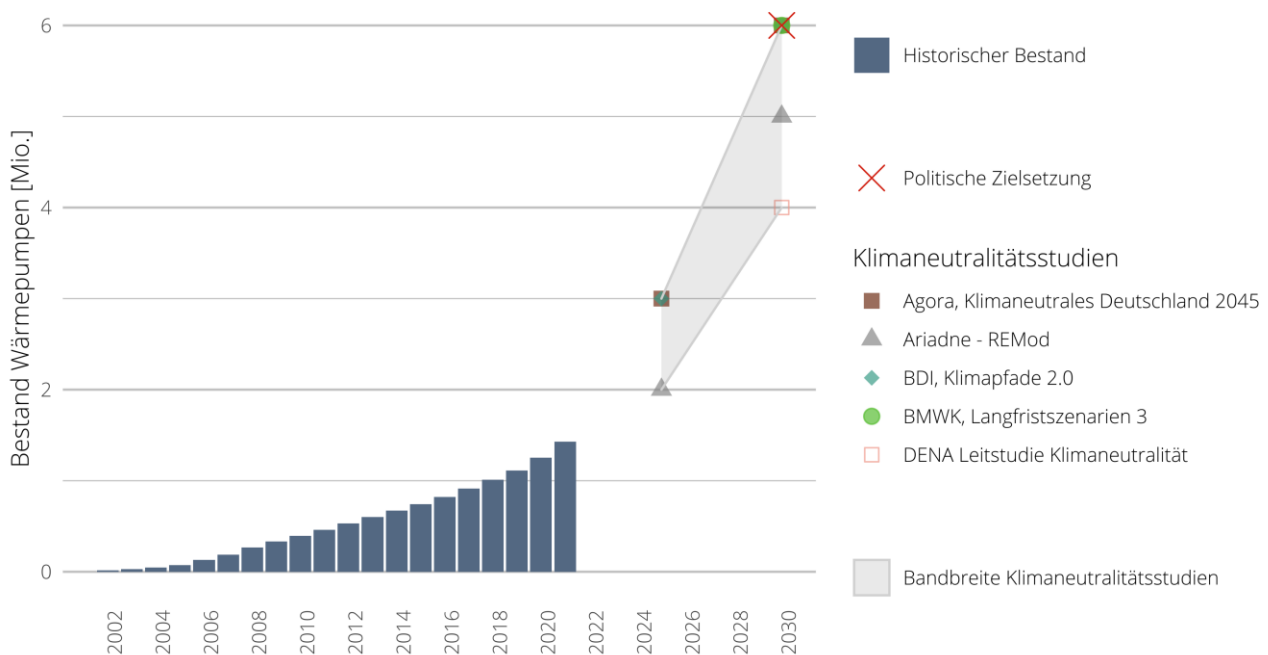


Eigene Darstellung auf Basis der Trendtabellen des Treibhausgasinventars 2022 (UBA 2022c). Für die Jahre 2000 bis 2020 werden die Inventardaten verwendet. Die Daten für das Jahr 2021 basieren auf der Berechnung der Vorjahresemissionen, Inventardaten liegen zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vor. Daten des MMS des Projektionsberichtes aus Öko-Institut et al. (2021). Das 95 % Konfidenzintervall der Extrapolation basierend auf der Regression 2010-2019 beträgt im Jahr 2030 +/- 3,82 Mt CO₂-Äq.

225 Für die weitere Entwicklung der THG-Emissionen im Gebäudesektor sind eine Vielzahl von Entwicklungen wichtig. An dieser Stelle werden drei relevante Trends für die zukünftige THG-Minderung des Gebäudesektors dargestellt, i) die Entwicklung des Wärmepumpenzubaus, ii) der Anteil von Öl- und Gaskesseln an der Beheizungsstruktur und iii) der Anteil der erneuerbaren Energieträger am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte. Diese Treiber werden jeweils zum politischen Ziel des Koalitionsvertrages für das Jahr 2030 und zu den Werten der Klimaneutralitätsstudien in Relation gesetzt.

226 Die Klimaneutralitätsstudien kommen alle zu dem Schluss, dass die Wärmepumpentechnologie, neben dekarbonisierter Fernwärme, einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion der THG-Emissionen im Gebäudesektor leisten kann. Die Entwicklung des Bestandes der Wärmepumpen weist in den vergangenen Jahren ein deutliches Wachstum auf (siehe Abbildung 94). Die Klimaneutralitätsstudien gehen für das Jahr 2025 von einem Bestand von zwei bis drei Millionen und für das Jahr 2030 von einem Bestand im Bereich von vier bis sechs Millionen Wärmepumpen aus. Das politische Ziel des Koalitionsvertrags weist sechs Millionen installierte Wärmepumpen für das Jahr 2030 aus. Auf dem Wärmepumpengipfel im Juni 2022 wurde durch Politik, Verbände der Wärmewirtschaft, Unternehmen und Handwerker:innen das Ziel gesetzt, ab dem Jahr 2024 jährlich 500 000 Wärmepumpen zu installieren.

Abbildung 94: Entwicklung des Bestands der Wärmepumpen im Vergleich zur politischen Zielsetzung sowie den Zielkorridoren der „Big 5“-Studien

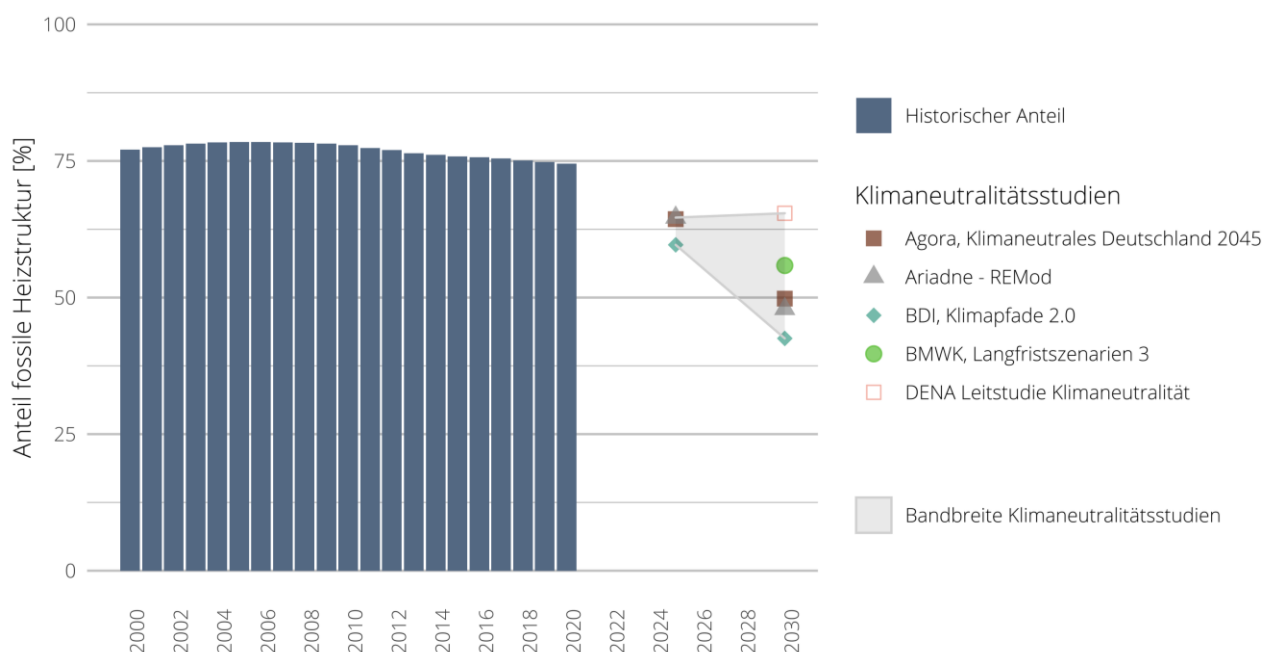


Eigene Darstellung auf Basis von BWP (2022). Die Bestandsdaten entsprechen den aggregierten Absätzen der Jahre 2002 bis 2021. Der Bestand beinhaltet Luft-, Sole-, Grundwasser- und Warmwasser-Wärmepumpen. Die Klimaneutralitätsstudien werden in Kapitel 3.1 beschrieben. Das politische Ziel wurde dem Koalitionsvertrag (SPD Bündnis 90/Die Grünen und FDP 2021) entnommen.

227 Insgesamt bietet die Wärmepumpe einen zielführenden Ansatz zur Reduktion der THG-Emissionen im Gebäudesektor. Allerdings sind die in den Klimaneutralitätsstudien und im Koalitionsvertrag dargelegten Steigerungsraten in der Verbauung von Wärmepumpen nur schwer zu erreichen. Insbesondere die Verfügbarkeit von Fachkräften zur Verbauung von Wärmepumpen, wie auch die benötigten Materialien, stellen, wie der Expertenrat für Klimafragen bereits in seinem Prüfbericht zu den Sofortprogrammen 2022 für den Gebäude- und Verkehrssektor (ERK 2022a) ausgeführt hat, eine Hürde für die Zielerreichung dar.

228 Abbildung 95 stellt den Verlauf des Anteils der Öl- und Gasheizungen an der gesamten Heizstruktur seit dem Jahr 2000 dar. Nach einem Anstieg um 1,4 Prozentpunkte bis ins Jahr 2006 sank der Anteil der Öl- und Gasheizungen bis zum Jahr 2020 auf 74,5 %. Die Werte aus den Klimaneutralitätsstudien von rund 60 bis 65 % für das Jahr 2025 und rund 43 bis 65 % für das Jahr 2030 liegen deutlich darunter.

Abbildung 95: Entwicklung des Anteils der fossilen Heizstruktur im Vergleich zu den Zielkorridoren der „Big 5“-Studien



Eigene Darstellung auf Basis von BDEW (2021a) und der in Kapitel 3.1 beschriebenen Klimaneutralitätsstudien.

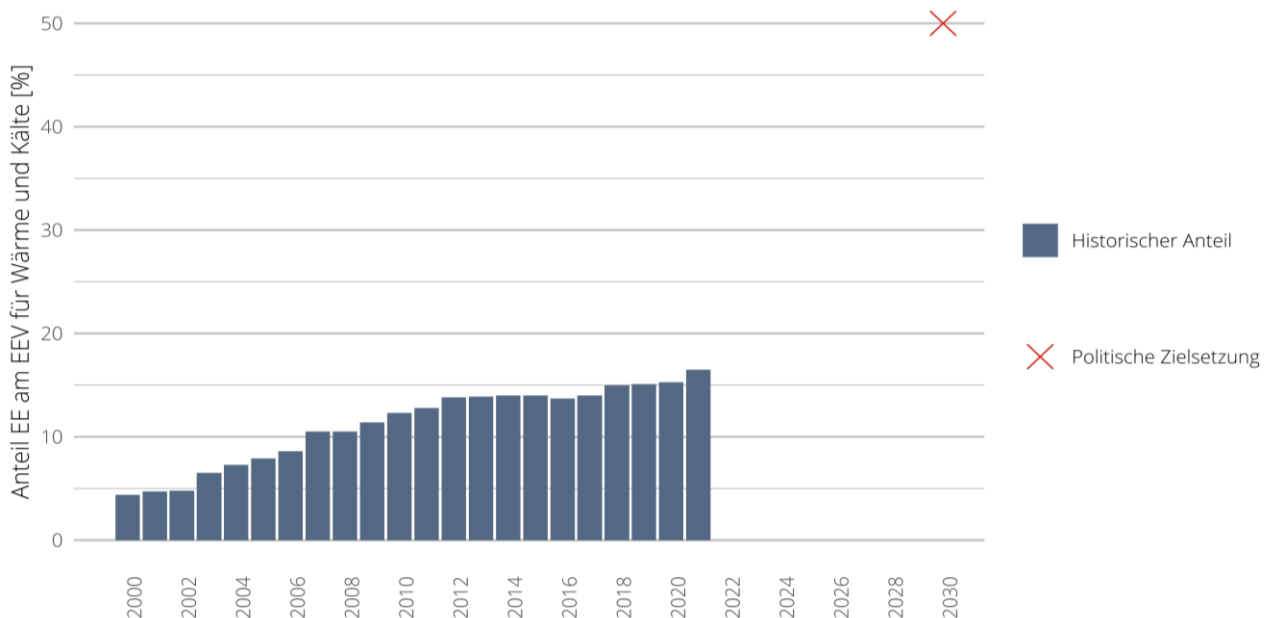
229 Die dargelegten Zahlen lassen den Schluss zu, dass in den vergangenen Jahrzehnten eher eine Substitution innerhalb der fossilen Technologien bei Heizungen als der Ersatz fossiler durch nichtfossile Technologien stattgefunden hat. Insbesondere die Verbauung von Gas- und Ölheizungen mit Brennwerttechnik wurde innerhalb der fossilen Heiztechnologien vorangetrieben. Um die Transformationspfade der Klimaneutralitätsstudien und die Ziele des Bundes-Klimaschutzgesetzes für 2030 zu erreichen, muss der Ersatz von fossilen durch nichtfossile Heiztechnologien aber deutlich dynamisiert werden.

230 Die Entwicklung des Anteils erneuerbarer Energieträger am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte für die Jahre 2000 bis 2020 ist auf Basis der Daten von AGEE-Stat (2022) in Abbildung 96 dargestellt. Hierbei ist grundlegend zu beachten, dass die Bilanzierung in AGEE-Stat (2022) von den KSG-Sektoren abweicht. Der Anteil der erneuerbaren Energieträger umfasst die direkt in den Sektoren vor Ort für die

Anwendungszwecke der Wärme und Kälte eingesetzten Energieträger, ohne Strom, inklusive Fernwärmeverbrauchs (Haushalte, GHD und Industrie). Im Jahr 2021 betrug der Anteil der erneuerbaren Energieträger am Endenergieverbrauch für Wärme 16,5 %⁴⁹ und stieg somit um 1,2 Prozentpunkte gegenüber dem Vorjahr an. Seit dem Jahr 2000 nimmt der Anteil der erneuerbaren Energieträger in dem Bereich Wärme jedoch nur langsam zu. Im Rahmen des Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG), das am 1. Januar 2009 in Kraft trat, wurde das gesetzliche Ziel aufgestellt, mindestens 14 % des Wärme- und Kälteenergiebedarfs Raum-, Kühl- und Prozesswärme sowie Warmwasser im Jahr 2020 durch erneuerbare Energieträger zu decken (§ 1 Abs. 2 EEWärmeG). Dieses Ziel wurde im Jahr 2017 erreicht. Die verschiedenen Formen der Biomasse dominieren die erneuerbare Wärmeversorgung, wobei die feste Biomasse den größten Anteil an erneuerbarer Wärme liefert. Neben der Biomasse wird erneuerbare Wärme auch in Solarthermie- und Geothermie-Anlagen erzeugt. Für das Jahr 2030 enthält der Koalitionsvertrag kein explizites Ziel für den Anteil erneuerbarer Energieträger an der Bereitstellung für Wärme und Kälte. Vielmehr wird angegeben, dass bis zum Jahr 2030 50 % der Wärme „klimaneutral“ erzeugt werden soll (SPD Bündnis 90/Die Grünen und FDP 2021). Es ist davon auszugehen, dass sich dieser Zielwert auf Haushalte, GHD und Industrie gleichermaßen bezieht und daher keine sektorspezifische Zielsetzung für den Gebäudesektor darstellt.

- 231 Der Einsatz erneuerbarer Energieträger für die Wärme- und Kälteerzeugung erfolgt bisher in einem viel zu geringen Maße, um die politischen Ziele der Bundesregierung für das Jahr 2030 zu erreichen. Es ist eine Verdreifachung des Anteils erneuerbarer Energieträger (sektorenübergreifend) nötig.

Abbildung 96: Entwicklung des Anteils der Erneuerbaren Energieträger am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte im Vergleich zur politischen Zielsetzung



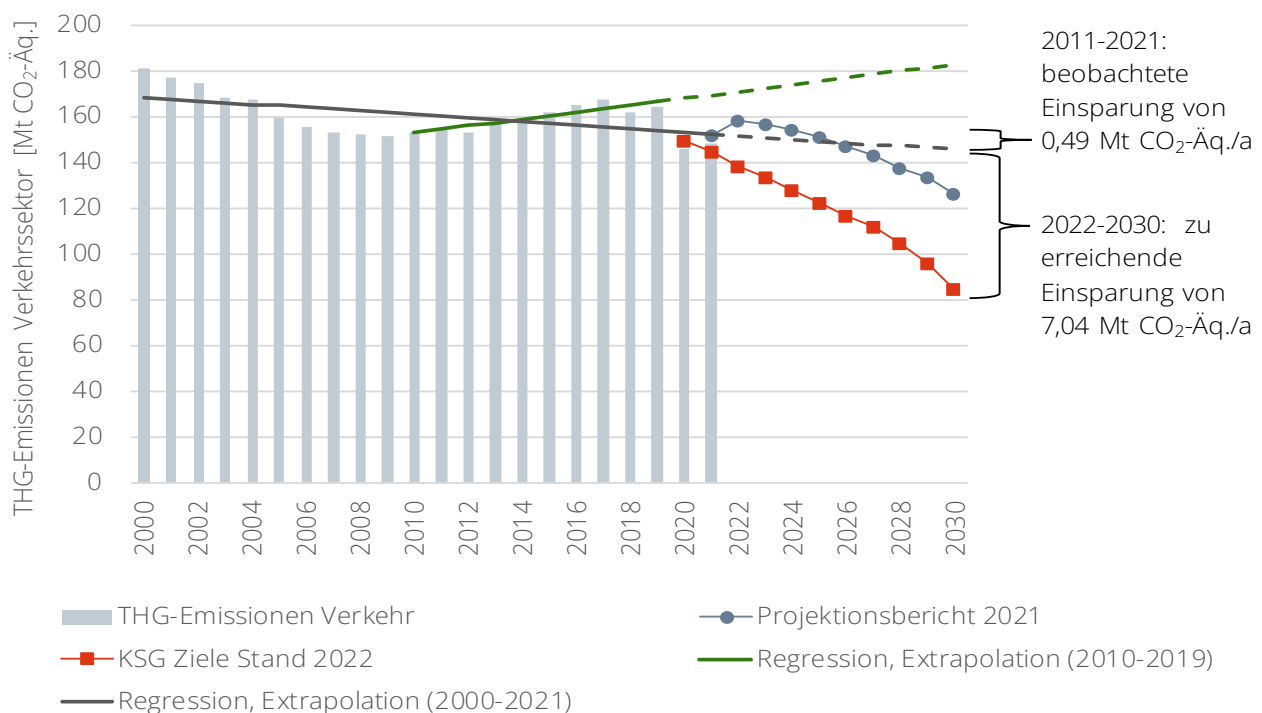
Eigene Darstellung auf Basis von AGEE-Stat (2022). Das politische Ziel wurde dem Koalitionsvertrag (SPD Bündnis 90/Die Grünen und FDP 2021) entnommen. Dargestellt ist der Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte inklusive Fernwärme für Haushalte, GHD und Industrie. Abweichend vom Vorgehen bei den anderen Indikatoren wird ein Vergleich mit den „Big 5“-Studien an dieser Stelle nicht durchgeführt, da dieser aufgrund von Abweichungen in den Bilanzierungen nicht möglich ist.

⁴⁹ Der Anteil erneuerbarer Energieträger am Endenergieverbrauch Wärme und Kälte betrug im Jahr 2021 in Haushalten 22,5 %, GHD 19,6 % und Industrie 7,6 % AGEE-Stat (2022).

3.2.5 Verkehr

232 Der historische Verlauf der THG-Emissionen im Verkehrssektor seit dem Jahr 2000 wird in Abbildung 97 dargestellt. Im Verkehrssektor ist die Abweichung zwischen dem Ziel-Pfad aus dem Bundes-Klimaschutzgesetz und der Projektion sowie den linearen Extrapolationen im Vergleich zu den anderen Sektoren besonders hoch. Die Extrapolation der THG-Emissionen der Jahre 2010-2019 zeigt sogar einen Anstieg bis zum Jahr 2030. Durch die beschlossenen Maßnahmen im MMS kann laut Projektionsbericht eine leichte Senkung der THG-Emissionen erreicht werden, welche jedoch nicht ausreicht, um die KSG-Ziele zu erreichen. Im Schnitt wurde zwischen den Jahren 2011-2021 eine jährliche Minderung von ca. 0,49 Mt CO₂-Äq. beobachtet. Für die Zielerreichung des Bundes-Klimaschutzgesetz wäre hingegen im Schnitt eine jährliche Minderung von rund 7 Mt CO₂-Äq. notwendig. Im Verkehrssektor ist daher etwa eine 14-fache Erhöhung der Reduktionsgeschwindigkeit notwendig zur Erreichung des Sektorziels für das Jahr 2030. Dass im Zeitraum 2011-2021 überhaupt eine Minderung von 0,49 Mt CO₂-Äq. beobachtet wurde, liegt vornehmlich an der starken THG-Minderung in den zwei Covid-19-Pandemie-Jahren 2020 und 2021. Wie die Regressionsgerade der Jahre 2010 bis 2019 verdeutlicht, war während der letzten Dekade generell ein Anstieg der THG-Emissionen zu verzeichnen.

Abbildung 97: THG-Emissionen im Sektor Verkehr - Rückblick, Projektion und Zielwertevergleich

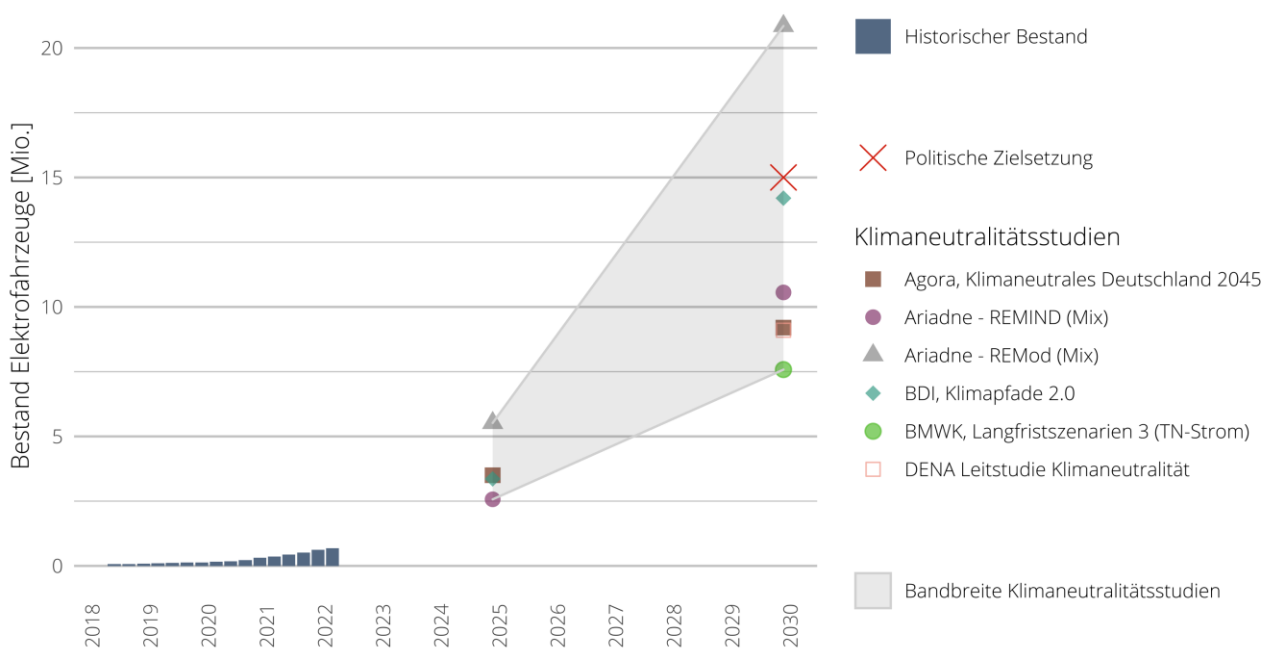


Eigene Darstellung auf Basis der Trendtabellen des Treibhausgasinventars 2022 (UBA 2022c). Für die Jahre 2000 bis 2020 werden die Inventardaten verwendet. Die Daten für das Jahr 2021 basieren auf der Berechnung der Vorjahresemissionen, Inventardaten liegen zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vor. Daten des MMS des Projektionsberichtes aus Öko-Institut et al. (2021). Das 95 % Konfidenzintervall der Extrapolation basierend auf der Regression 2010-2019 beträgt im Jahr 2030 +/- 4,3 Mt CO₂-Äq.

233 Eine THG-Reduktion im Verkehrssektor soll insbesondere durch eine Elektrifizierung des Verkehrs erreicht werden. Dazu ist ein massiver Ausbau der Flotte an Elektrofahrzeugen nötig (SPD Bündnis 90/Die Grünen und FDP 2021). Zudem sind die THG-Emissionen auch im Verkehrssektor dominiert vom

fossilen Kapitalstock, in diesem Falle dem Bestand an fossil-betriebenen Fahrzeugen. Deswegen wird auch die Entwicklung des Anteils des Pkw-Bestands mit fossilem Antrieb betrachtet und mit den „Big 5“-Studien⁵⁰ verglichen. Zuletzt wird der Anteil der Schiene an der Güterverkehrsleistung im historischen Verlauf aufgezeigt und zusammen mit den Werten der „Big 5“-Studien für die Jahre 2025 und 2030 und den politischen Zielen des Koalitionsvertrags dargestellt.

Abbildung 98: Entwicklung des Bestands an Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb im Vergleich zur politischen Zielsetzung sowie den Zielkorridoren der „Big 5“-Studien



Eigene Darstellung auf Basis von KBA (2022a) und der in Kapitel 3.1 beschriebenen Klimaneutralitätsstudien. Das politische Ziel wurde dem Koalitionsvertrag (SPD Bündnis 90/Die Grünen und FDP 2021) entnommen.

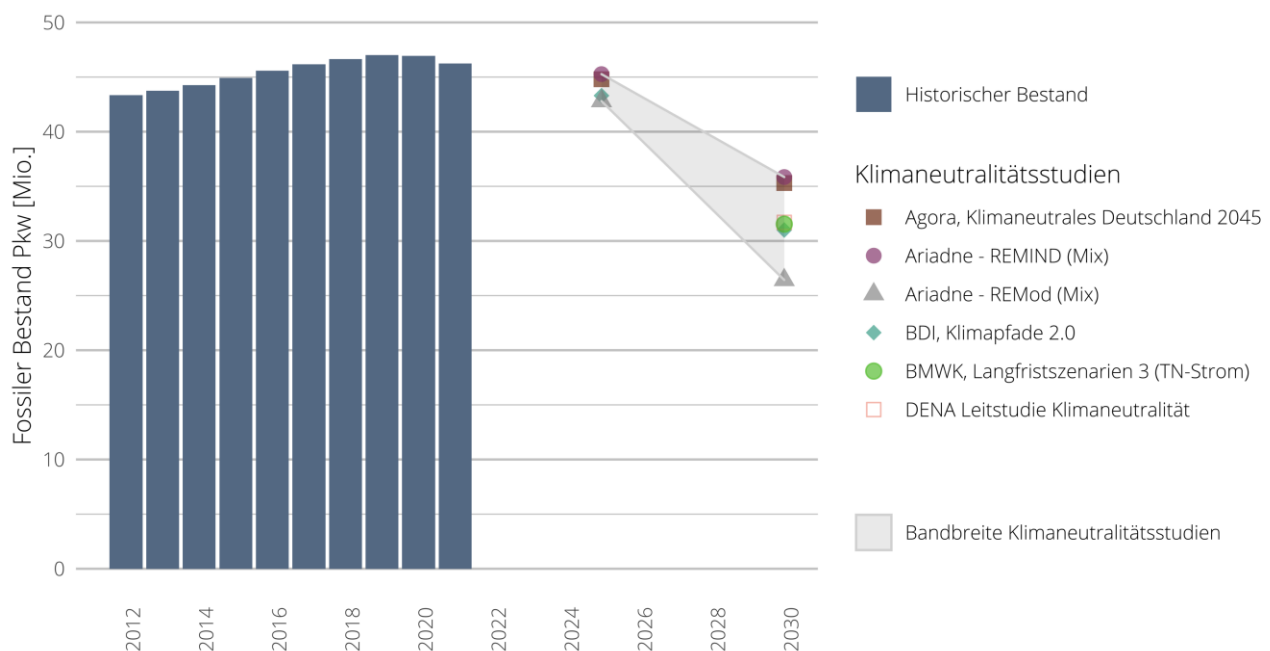
234 Der Koalitionsvertrag der Bundesregierung benennt ein politisches Ziel von mindestens 15 Millionen vollelektrischen Pkw bis zum Jahr 2030 (SPD Bündnis 90/Die Grünen und FDP 2021). Dieses Ziel befindet sich in der oberen Hälfte der durch die Klimaneutralitätsstudien errechneten Werte für das Jahr 2030, die eine Bandbreite von rund 7,5 bis 21 Millionen Elektrofahrzeugen aufspannen. In den letzten zwei Jahren ist mit jährlichen Dopplungsraten ein schneller Anstieg des Bestandes an Elektrofahrzeugen zu verzeichnen, wie in Abbildung 98 dargestellt.

235 Die Dynamik der Zulassungszahlen für Elektrofahrzeuge der letzten zwei Jahre lassen einen beschleunigten Ausbau nicht völlig unwahrscheinlich erscheinen, allerdings erscheint der Zielwert der Regierung weiterhin als sehr ambitioniert und nur unter sehr optimistischen Entwicklungen (technisch, ökonomisch und individuellen Präferenzänderungen) oder bei zielgerichteter Regulatorik als annähernd erreichbar.

⁵⁰ Hierbei ist zu beachten, dass der Modal-Switch innerhalb der Energiesystemmodelle nicht immer modellendogen quantifiziert wird. So wird z. B. innerhalb der REMod Modellierung im Modell die Substitution des bestehenden fossilen Kapitalstocks quantifiziert unter Berücksichtigung einer Annahme eines leichten Anstiegs der Entwicklung des Pkw Bestands.

- 236 Der Bestand an Pkw mit fossilem Antrieb ist in den Jahren von 2012 bis 2019 auf ca. 47 Millionen Fahrzeuge gestiegen (siehe Abbildung 99). Lediglich in den Jahren 2020 und 2021 ist eine Abnahme auf ungefähr 46 Millionen Fahrzeuge zu beobachten. Die Werte der „Big 5“-Studien umfassen für das Jahr 2025 eine Spanne von rund 43 bis 45 Millionen und für das Jahr 2030 eine Spanne von rund 26 bis 36 Millionen Pkw.
- 237 Während die Klimaneutralitätsszenarien sehr deutlich aufzeigen, dass es für die Zielerreichung auch einen Abbau des Bestands fossiler Pkw geben müsste, ist dieser Trend, der sich (laut Szenarien) spätestens ab dem Jahr 2025 abzeichnen müsste, noch nicht zu erkennen. Es erscheint unwahrscheinlich, dass ein Abbau des Bestands aus sich heraus erfolgt, vielmehr ist zu befürchten, dass zwar neue Elektroautos angeschafft werden, die alten Verbrenner-Autos aber als Zweitwagen weiter genutzt werden (siehe auch Analysen in Kapitel 2.5).

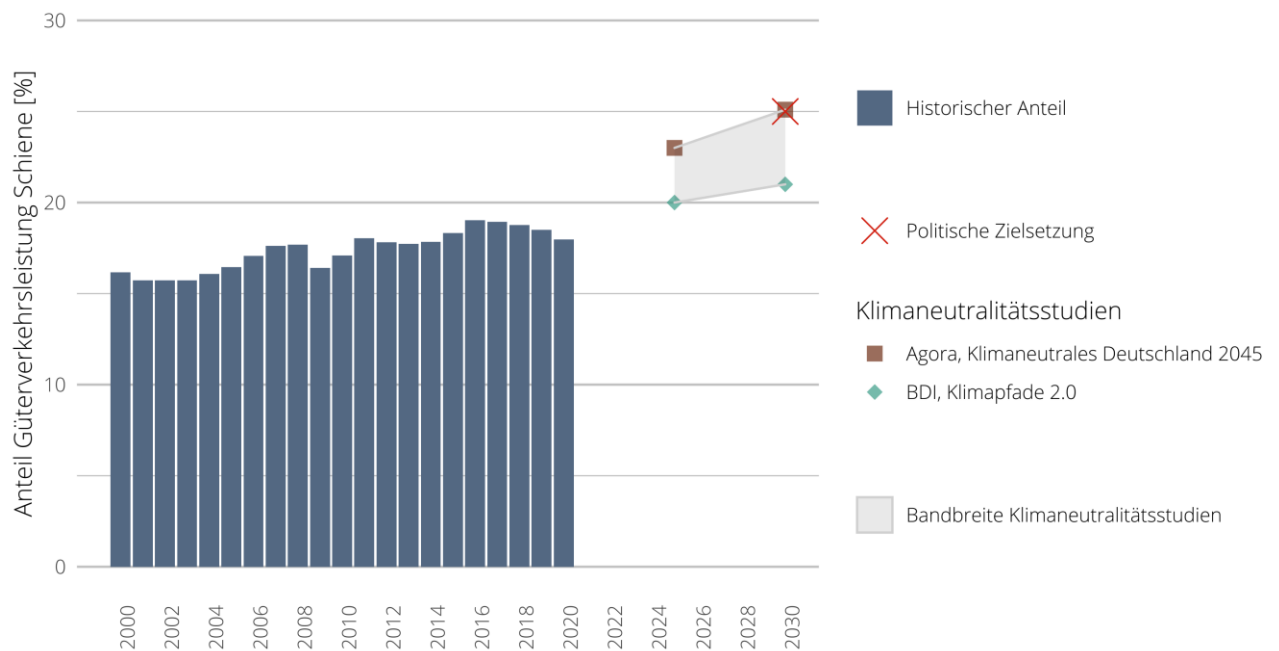
Abbildung 99: Entwicklung des Bestands an Fahrzeugen mit fossilem Antrieb im Vergleich zu den Zielkorridoren der „Big 5“-Studien



Eigene Darstellung auf Basis von KBA (2022b) und der in Kapitel 3.1 beschriebenen Klimaneutralitätsstudien.

- 238 Der Anteil der Verkehrsleistung der Schiene am Güterverkehr schwankte während der Jahre 2000 und 2020 zwischen ca. 16 und 19 % (siehe Abbildung 100). Die Klimaneutralitätsstudien quantifizieren eine Bandbreite für das Jahr 2025 zwischen 20 und 23 % und für das Jahr 2030 zwischen 21 und 25 %. Das Ziel der Bundesregierung im Koalitionsvertrag für das Jahr 2030 ist 25 % der Güterverkehrsleistung über die Schiene abzudecken.

Abbildung 100: Entwicklung des Anteils des Schienengüterverkehrs an der Güterverkehrsleistung im Vergleich zur politischen Zielsetzung sowie den Zielkorridoren der „Big 5“ Studien



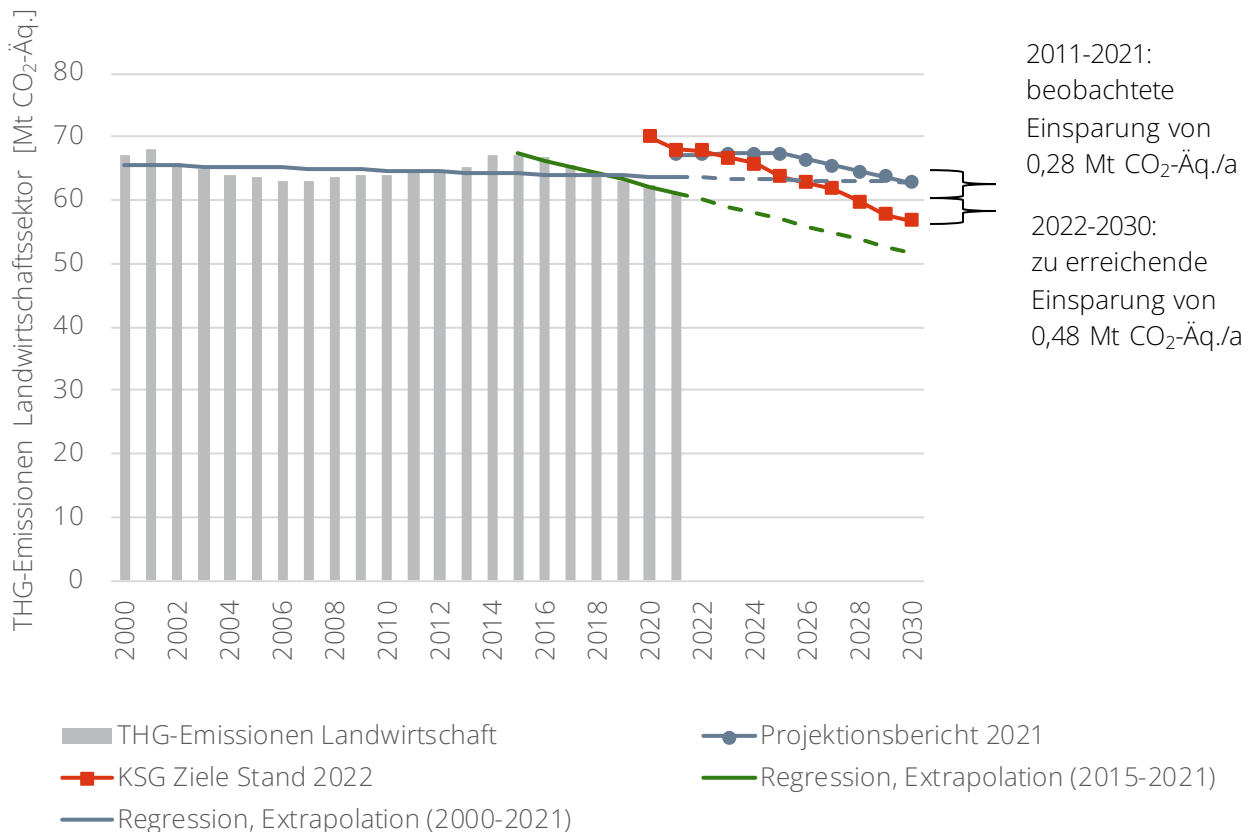
Eigene Darstellung auf Basis von BMDV (2021) und der in Kapitel 3.1 beschriebenen Klimaneutralitätsstudien Prognos et al. (2021) und BDI (2021). Das politische Ziel wurde dem Koalitionsvertrag (SPD Bündnis 90/Die Grünen und FDP 2021) entnommen.

239 Der Trend des Anteils des Schienengüterverkehrs ist seit dem Jahr 2016 abnehmend und zeigt damit eine andere Richtung auf, als in den Zielszenarien der beiden Klimaneutralitätsstudien Prognos et al. (2021) und BDI (2021) erforderlich. Gleichzeitig hat der Güterverkehr auf der Straße zwischen den Jahren 2012 und 2018 stetig zugenommen (siehe Abbildung 60). Die Erreichung der politischen Zielsetzung bei weiterwachsendem Güteraufkommen erscheint daher sehr ambitioniert und erfordert hohe Investitionen und politische Anstrengungen.

3.2.6 Landwirtschaft

240 Der historische Verlauf der THG-Emissionen im Sektor Landwirtschaft seit dem Jahr 2000 ist in Abbildung 101 dargestellt. Hier wurden, im Gegensatz zu den vorherigen Sektoren, die Jahre 2020 und 2021 nicht von der Regression ausgeschlossen, da die Covid-19-Pandemie die THG-Emissionen des Landwirtschaftssektors nicht beeinflusst hat. Als Anfangsjahr für die Regression über den kürzeren Zeitraum wurde das Jahr 2015 gewählt, um den Abwärtstrend der THG-Emissionen der vergangenen sieben Jahre, der sich durch den Rückgang der THG-Emissionen aus synthetischem Dünger und der Tierhaltung begründet (siehe Kapitel 2.6.3), abzubilden. Die Extrapolation der THG-Emissionen der Jahre 2015 bis 2021 zeigt einen deutlich sinkenden Verlauf, während die Extrapolation basierend auf den Jahren 2000 bis 2021 keine großen Änderungen der THG-Emissionen bis zum Jahr 2030 verzeichnet. Die KSG-Ziele sinken kontinuierlich und würden im Hinblick auf das MMS im Projektionsbericht ab dem Jahr 2023 und hinsichtlich der Extrapolation des Zeitraums 2000 bis 2021 ab 2026 nicht mehr erreicht werden. Laut der Extrapolation basierend auf den Jahren 2015 bis 2021 werden die KSG-Ziele hingegen stets unterschritten.

Abbildung 101: THG-Emissionen im Sektor Landwirtschaft - Rückblick, Projektion und Zielwertevergleich



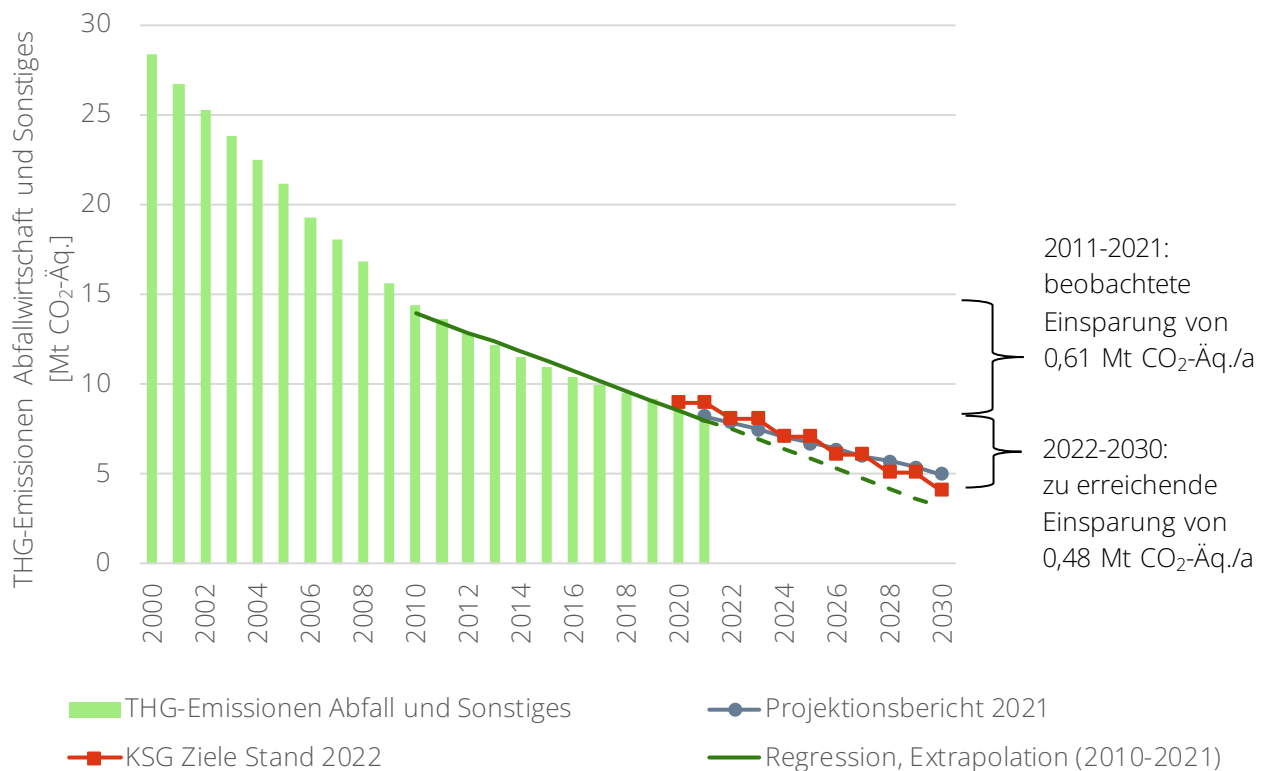
Eigene Darstellung auf Basis der Trendtabellen des Treibhausgasinventars 2022 (UBA 2022c). Für die Jahre 2000 bis 2020 werden die Inventardaten verwendet. Die Daten für das Jahr 2021 basieren auf der Berechnung der Vorjahresemissionen, Inventardaten liegen zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vor. Daten des MMS des Projektionsberichtes aus Öko-Institut et al. (2021). Das 95 % Konfidenzintervall der Extrapolation basierend auf der Regression 2015-2021 beträgt im Jahr 2030 +/- 1,4 Mt CO₂-Äq.

241 Die neue Berechnungsmethode für direkte Lachgasemissionen (Mathivanan et al. 2021), die für das Emissionsjahr 2021 erstmals angewendet wurde (siehe Kapitel 2.6.4), konnte im Projektionsbericht noch nicht berücksichtigt werden. Sie führte dazu, dass die THG-Emissionen um rund 6 Mt CO₂-Äq. pro Jahr verringert wurden. Unter Berücksichtigung des Ausgleichsmechanismus (§ 4 Abs. 3 KSG) würden die jährlichen Sektorziele im Landwirtschaftssektor bis zum Jahr 2030 selbst bei gleichbleibenden THG-Emissionen erreicht (siehe Abbildung 72).

3.2.7 Abfallwirtschaft und Sonstiges

242 Der historische Verlauf der Treibhausgasemission im Sektor Abfallwirtschaft und Sonstiges (nachfolgend als „Abfallwirtschaft“ bezeichnet) seit dem Jahr 2000 ist in Abbildung 102 dargestellt. Die THG-Emissionen stammen in erster Linie aus Altdeponien oder sind durch strukturelle Effekte wie den Anfall von Bioabfall oder den Wasserverbrauch bedingt, die durch die Covid-19-Pandemie nicht stark beeinflusst wurden. Daher werden die Jahre 2020 und 2021, wie auch im Sektor Landwirtschaft, in die Regression zur Fortschreibung des Trends in der letzten Dekade miteinbezogen. Wegen des logarithmischen Profils der Emissionsentwicklung wird davon abgesehen eine Fortschreibung auf Basis des gesamten Zeitraums zu machen.

Abbildung 102: THG-Emissionen im Sektor Abfallwirtschaft - Rückblick, Projektion und Zielwertevergleich



Eigene Darstellung auf Basis der Trendtabellen des Treibhausgasinventars 2022 (UBA 2022c). Für die Jahre 2000 bis 2020 werden die Inventardaten verwendet. Die Daten für das Jahr 2021 basieren auf der Berechnung der Vorjahresemissionen, Inventardaten liegen zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vor. Daten des MMS des Projektionsberichtes aus Öko-Institut et al. (2021). Das 95 % Konfidenzintervall der Extrapolation basierend auf der Regression 2010-2019 beträgt im Jahr 2030 +/- 3,9 Mt CO₂-Äq.

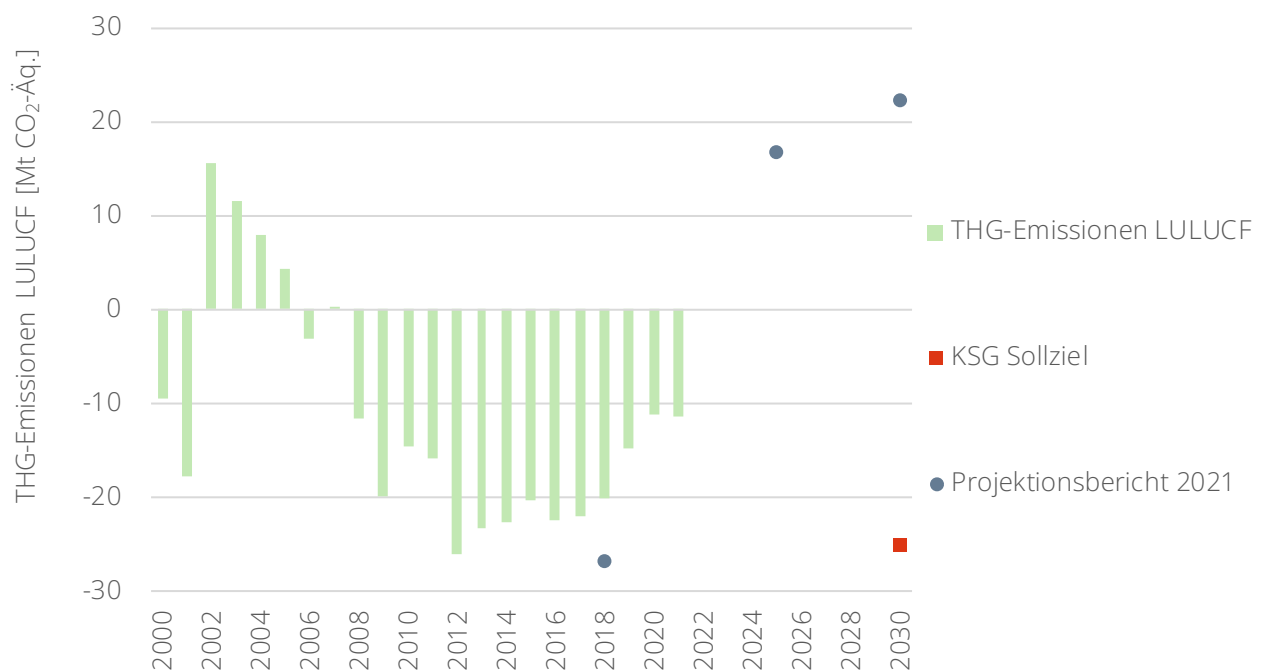
243 Für den Bereich der Abfallwirtschaft zeigt die lineare Extrapolation einen stärkeren Abwärtstrend als das MMS des Projektionsberichts 2021 und die KSG-Ziele. Jedoch ist zu beachten, dass der Großteil der THG-Emissionen des Sektors aus Altdeponien (CRF 5.A) stammt. Deren THG-Emissionen sinken zwar weiter, jedoch deuten Modellrechnungen darauf hin, dass die jährlichen Reduktionen in den kommenden Jahren aufgrund des langsamen Abklingens der Deponieemissionen geringer ausfallen werden als im letzten Jahrzehnt. Dementsprechend zeichnet das modellgestützte Szenario des Projektionsberichts 2021 einen realistischeren Zukunftspfad für die Entwicklung der THG-Emissionen im Abfallwirtschaftssektor bis zum Zieljahr 2030.

244 Für die Abfallwirtschaft ist zudem relevant, dass unter den heutigen Rahmenbedingungen des Sektors und den zur Ermittlung der Deponieemissionen verwendeten Modellparametern in den kommenden Jahren eine sektorale Zielverfehlung eintreten könnte. Dies wird in der Abbildung 102 dadurch deutlich, dass die KSG-Ziele (rote Linie) in den Jahren von 2028 bis 2030 unter dem Pfad des Projektionsberichts (blaue Linie) liegen. Dies ist insofern bedeutsam, als dass die Handlungsoptionen zur weiteren Vermeidung von THG-Emissionen in der Abfallwirtschaft im Vergleich zu den anderen Sektoren begrenzt sind.

3.2.8 LULUCF

245 Abbildung 103 zeigt die Entwicklung der THG-Emissionen im Sektor LULUCF, die in Kapitel 2.8.2 beschreiben werden. Die THG-Emissionen im Jahr 2021 lagen bei $-11,5 \text{ Mt CO}_2\text{-Äq.}$ Für das Jahr 2030 besteht eine Diskrepanz zwischen dem KSG-Ziel von $-25 \text{ Mt CO}_2\text{-Äq.}$ und den vom Projektionsbericht 2021 (Öko-Institut et al. 2021) projizierten $+22,3 \text{ Mt CO}_2\text{-Äq.}$ Der Projektionsbericht weist darauf hin, dass insbesondere die Waldsenke, die die stärkste Senkenleistung erbringt (UBA 2022c), nicht hinreichend aussagekräftig ist, da veraltete Daten verwendet wurden, die auch in der Vergangenheit zu einer Unterschätzung der Waldsenke geführt hatten. Umfangreiche methodische Änderungen und die Integration aktuellerer Datensätze sind für den anstehenden Projektionsbericht geplant, neue Daten der Bundeswaldinventur werden hingegen erst Ende des Jahres 2024 erwartet. Auch das Öko-Institut (Hennenberg et al. 2021) geht – mit Bezug auf den Projektionsbericht 2019 – auf Grund der veralteten Datengrundlage im WEHAM-Basiszenario (Thünen-Institut et al. 2017) davon aus, dass die Senkenkapazität des Waldes im Projektionsbericht derzeit unterschätzt wird. Das Öko-Institut schlägt daher vor, bis zu einer Aktualisierung der Daten mit verschiedenen Fortschreibungen basierend auf verschiedenen vergangenen Referenzzeiträumen mit unterschiedlichen Schadensausmaßen zu rechnen. Demnach würden nur die Fortschreibungen von starken und sehr starken Schäden zu Netto-Emissionen des LULUCF Sektors führen.

Abbildung 103: THG-Emissionen im Sektor LULUCF- Rückblick, Projektion und Zielwertvergleich



Eigene Darstellung auf Basis der Trendtabellen des Treibhausgasinventars 2022 (UBA 2022c). Für die Jahre 2000 bis 2020 werden die Inventardaten verwendet. Die Daten für das Jahr 2021 basieren auf der Berechnung der Vorjahresemissionen, Inventardaten liegen zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vor. Daten des MMS des Projektionsberichtes aus Öko-Institut et al. (2021).

246 Insgesamt ist die Berechnung und Projektion der THG-Emissionen im Sektor LULUCF von Unsicherheiten behaftet, die sich zum einen in der Datenlage, zum anderen in unvorhersehbaren Wetter- und Witterungsereignissen in der Zukunft begründen. Dies liegt an schwer zu erfassenden bzw. abzuschätzenden Daten (Inventarisierung), der Abhängigkeit von Umwelteinflüssen (Wetter und

Witterung, dem Einfluss von Schädlingen (Seidl et al. 2017)), sowie Unsicherheiten in Modellen und Szenarien bezüglich künftiger Wachstumsdynamiken unter Einfluss des Klimawandels, des Managements, und bezüglich Markteinflüssen, die die Holznachfrage bestimmen (Pilli et al. 2022; Scheel et al. 2022). Sollte der Sektor LULUCF die angestrebte Senkenleistung nicht erbringen können, hätte dies Auswirkungen im Rahmen des Bundes-Klimaschutzgesetzes und der anstehenden LULUCF-Verordnung der EU.

4 Betrachtungen zu klimapolitischen Maßnahmen und ihrer Wirksamkeit

4.1 Analyse klimapolitischer Instrumente im Zeitraum 2000 bis 2022

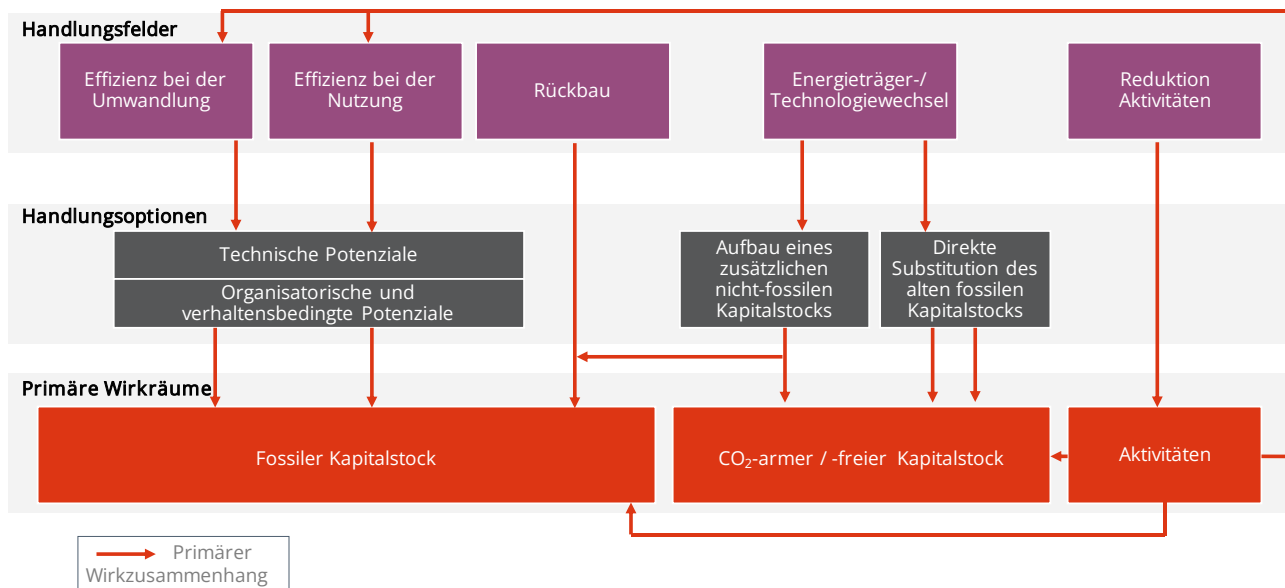
- 247 Die vorhergehende Analyse der THG-Emissionen hat gezeigt, dass deren Entwicklung in den letzten rund 20 Jahren durch u. a. markt(preis)induzierte Faktoren und autonomen technologischen Fortschritt beeinflusst wurde, die je nach Sektor und Zeitphase unterschiedlich stark und in unterschiedliche Richtung ausfielen. Diese Entwicklung wurde nicht nur durch u. a. markt(preis)induzierte Faktoren und (autonomen) technologischen Fortschritt geprägt, sondern nicht zuletzt auch durch klima- und energiepolitische Instrumente, die in diesem Zeitraum auf nationaler und EU-Ebene etabliert wurden. Ein Blick auf die Ansatzpunkte und die Wirksamkeit dieser Instrumente kann daher auch Hinweise auf zukünftige Anforderungen an den Instrumentenmix der Klimapolitik in Deutschland geben.
- 248 Die Dekompositionsanalyse weist darauf hin, dass das Emissionsgeschehen durch die Bevölkerungsentwicklung, das Niveau von Aktivitäten (je nach Sektor z. B. BIP pro Kopf, Wohnfläche pro Kopf oder km pro Kopf etc.) und die technischen Parameter des bestehenden Kapitalstocks (z. B. Energie- und Emissionsintensitäten) bestimmt wird. Da die Bevölkerungsentwicklung allgemein als vorgelagerte gesellschaftliche Größe angesehen wird, lassen sich daraus als wesentliche Wirkräume für eine Minderung der THG-Emissionen durch die Klimapolitik und sonstige politische Instrumente folgende Ansatzpunkte identifizieren:⁵¹ a) die Veränderung des Kapitalstocks, durch aa) Anpassungen innerhalb des Bestands (z. B. Sanierung bestehender Gebäude), ab) die Hinzufügung neuen Kapitalstocks mit besseren Emissions-Parametern als der Durchschnitt des Bestands (z. B. Aufbau von Windkraftanlagen) sowie ac) den Rückbau von Kapitalstock mit schlechteren Emissions-Parametern als der Durchschnitt des Bestands (z. B. Stilllegung von Kohlekraftwerken mit niedrigen Wirkungsgraden); und b) die Beeinflussung von zentralen Aktivitätsgrößen, die einen Wirkzusammenhang mit der Entwicklung der THG-Emissionen haben.
- 249 Auf dem Weg zur Klimaneutralität kann der Kapitalstock zusätzlich unterteilt werden in fossilen und nicht-fossilen Kapitalstock. Der fossile Kapitalstock könnte prinzipiell zwar auch unter den Bedingungen der Klimaneutralität weitergenutzt werden, insoweit er auf CO₂-arme Energieträger umgestellt werden könnte, zu denen unter bestimmten Voraussetzungen z.B. Wasserstoff, synthetische Gase oder Öle gehören könnten. Allerdings wird allgemein erwartet, dass die verfügbaren Mengen derartiger Energieträger deutlich geringer sein werden als die heute in der Volkswirtschaft verwendeten Mengen von Erdöl und Erdgas.
- 250 Den Zusammenhang zwischen Wirkräumen sowie Handlungsfeldern und -optionen illustriert Abbildung 104. Zur direkten Treibhausgasminderung im bestehenden, d. h. also vor allem im fossilen, Kapitalstock können Effizienzsteigerungen bei der Umwandlung und Nutzung sowie der Rückbau dieses Kapitalstocks (Abriss, Abwracken) beitragen. Zur Steigerung der Energieeffizienz auf der Nutzungsebene können dabei neben technischen Eingriffen in den Kapitalstock (wie beispielsweise die Sanierung von Bestandsgebäuden, s.o.) auch organisatorische und verhaltensbedingte Maßnahmen beitragen (wie die

⁵¹ Die nachfolgenden Betrachtungen beziehen sich primär auf die energiebedingten THG-Emissionen und THG-Emissionen aus Industrieprozessen. Die grundsätzlichen Überlegungen lassen sich jedoch auch auf die hier nicht primär adressierten Sektoren des KSG übertragen.

Reduzierung der Raumtemperatur, die Optimierung des Heiz- und des Lüftungsverhaltens, aber auch durch die Wahl eines kleineren Pkw oder die Entscheidung für eine CO₂-arme Ernährung). Der Aufbau von neuem, überwiegend nicht-fossilem Kapitalstock kann dabei entweder durch eine direkte Substitution des alten Kapitalstocks durch CO₂-arme oder -freie Technologien oder parallel durch den Aufbau eines neuen additiven, CO₂-armen oder -freien Kapitalstocks erfolgen. Wird im zweiten Fall der alte (fossile) Kapitalstock jedoch nicht vollständig substituiert oder verdrängt (z. B. bei Anschaffung eines Elektroautos ohne Austausch des alten Fahrzeugs, dem lediglich ergänzenden Einsatzes erneuerbarer Energieträger zur Erzeugung von Strom und Wärme oder dem Export des alten Kapitalstocks), werden THG-Emissionen nicht oder nicht vollständig vermieden oder fallen an anderem Ort an. Eine vollständige Vermeidung der THG-Emissionen kann nur durch einen entsprechenden Rückbau des fossilen Kapitalstocks erreicht werden.

- 251 Neben der Änderung des Kapitalstocks stellt die Reduktion zentraler Aktivitätsgrößen (z. B. Wohnfläche, Transportkilometer oder Produktionsmengen) einen zweiten wichtigen Wirkraum für die THG-Minderung dar. Wie der nachfolgende Überblick über das bisherige klimapolitische Instrumentarium zeigt, wurde dieser Wirkraum - anders als der Kapitalstock - in der Vergangenheit jedoch überwiegend nicht explizit durch klimapolitische Instrumente, sondern vornehmlich durch markt- und krisengetriebene Entwicklungen wie die Finanzkrise 2008 oder die Covid-19-Pandemie beeinflusst. Dabei ist zu berücksichtigen, dass aktivitätsbedingte THG-Minderungen wiederum Rückwirkungen auf die Entwicklung des bestehenden Kapitalstocks und Investitionen in den neuen Kapitalstock haben.
- 252 Grundsätzlich lassen sich klimapolitische Instrumente gemäß der Klassifizierung der UNFCCC systematisieren (UNFCCC 2000,). Für die Zwecke dieses Gutachtens stehen vor allem die Maßnahmen der Kategorien E (ökonomische Instrumente / economic instruments), F (fiskalische Instrumente), V (Verpflichtungserklärungen), R (Regulierung) sowie I (Information) im Vordergrund des Interesses. Dabei wird zwischen Maßnahmen auf europäischer und auf nationaler Ebene unterschieden. Wichtige Beispiele für die Instrumentenkategorien sind das EU-ETS und Energiesteuern (E), finanzielle Förderprogramme in Form von Zuschüssen oder verbilligten Krediten (F), freiwillige Vereinbarungen mit der Industrie, z. B. zum Thema KWK (V), Vorgaben zur Beimischung von Biokraftstoffen (R) und verpflichtende Stromsparchecks (I). Einen interessanten Sonderfall stellen umlagebasierte Förder-Instrumente wie das EEG oder das KWKG dar, welche ökonomische Anreize durch para-fiskalische Investitions Garantien (quasi F) mit umweltbezogenen Abgaben (E) verbunden haben. Sowohl der von der Maßnahme betroffene Wirkungskreis als auch die tatsächlich erzielte Wirkung kann sich zwischen den Maßnahmen in erheblicher Weise unterscheiden. So erfasst beispielsweise das EU-ETS im Jahr 2020 THG-Emissionen von mehr als 300 Mt CO₂-Äq. in einer Vielzahl von Anlagen vor allem der Energiewirtschaft und der Industrie, während beispielsweise Maßnahmen wie die Abfallablagereungsverordnung einen deutlich stärker abgegrenzten Anwendungsbereich haben.
- 253 Ökonomische Instrumente der Preis- und Mengensteuerung wie die Energiesteuer, der EU-ETS oder das BEHG wirken sowohl auf den bestehenden als auch auf den neuen Kapitalstock und können auch die Entwicklung der Aktivitäten beeinflussen. Sie adressieren somit alle primären Wirkräume gleichzeitig, wobei die genaue Ausprägung der Wirkung den Marktkräften überlassen bleibt, was wirtschaftliche Vor- und verteilungspolitische Nachteile nach sich ziehen kann (siehe ERK (2022b) RZ 124-125)). Andere Instrumententypen verfolgen demgegenüber typischerweise einen selektiveren Wirkzusammenhang.

Abbildung 104: Grundsätzliche Handlungsfelder zur Minderung von THG-Emissionen, die von der Politik beeinflusst werden können



Eigene Darstellung.

Periode 2000 bis 2009

254 Vor allem in den frühen 2000er Jahren wurde das klimapolitische Instrumentarium in vielen Bereichen erweitert und dabei zunehmend auch durch die EU-Ebene beeinflusst (siehe Abbildung 105). Besondere Bedeutung haben in der weiteren Folge die Einführung des EEG (2000), des KWKG (2002) sowie des EU-ETS (2005, siehe Infokasten 3) und die Einführung der Ökologischen Steuerreform aus dem Jahr 1999 mit ihren Novellen erlangt. Ergänzt wurde der Instrumentenmix durch mehrere Selbstverpflichtungen der Industrie und durch Vorschriften beispielsweise zur Energieeinsparung im Neubau (2002). Gegen Ende der Dekade nahmen die Maßnahmen noch einmal Schwung auf, vor allem in Folge von Entwicklungen auf europäischer Ebene (20-20-20-Ziele für das Jahr 2020). Diese mündeten vor allem in einer Verschärfung des EU-ETS für die dritte Handelsperiode (2013-2020) sowie verschiedenen ordnungsrechtlichen Vorgaben wie die Beimischungspflicht von Biokraftstoffen oder die Einführung von Flottengrenzwerten.

255 Die in dieser Periode etablierten Instrumente waren auf nationaler Ebene zunehmend in Klimaschutzprogramme eingebettet, die in Deutschland in den Jahren 2000 und 2007 von der Bundesregierung beschlossen wurden. Beide Programme zielten insbesondere darauf ab, die Erreichung der damals auf europäischer und internationaler Ebene zugesagten THG-Minderungsziele sicherzustellen. Für das Integrierte Energie- und Klimaprogramm (IEKP; (Bundesregierung 2007)) von 2007, das dazu beitragen sollte, die THG-Emissionen Deutschlands bis zum Jahr 2020 um 40 % zu verringern, wurde erstmals auch ein Monitoring-Prozess vorgesehen, mit dem die Programmwirkung qualitativ und quantitativ überprüft werden sollte (Doll et al. 2012).

256 Innerhalb dieser Periode wirkte das nationale klimapolitische Instrumentarium vor allem auf die Effizienz bei der Umwandlung fossiler Energieträger- (z. B. KWKG) und der Effizienz bei der Nutzung des fossilen Kapitalstocks (z. B. EnEV, CO₂-Gebäudesanierungsprogramm) sowie den Aufbau von neuem, nicht-fossilem Kapitalstock (z. B. EEG, MAP). Der Rückbau des fossilen Kapitalstocks wurde unter anderem

durch die Umweltprämie adressiert. Eine wichtige Rolle im Hinblick auf die Nutzung des fossilen Kraftwerksparks spielten zudem die mehrfachen Entscheidungen zur Atomenergie, die nach dem Reaktorunfall in Fukushima in den Ausstiegsbeschluss im Jahr 2011 mündeten. Das hat zum Teil die Auslastung des fossilen Kapitalstocks erhöht.

257 Der Rückgang der Wirtschaftsleistung im Zuge der Finanzkrise im Jahr 2008 hat die THG-Emissionen deutlich vermindert (siehe Kapitel 0). Diese Wirkung war politisch nicht intendiert, zeigt aber exemplarisch die Bedeutung der Aktivitätskomponente für das Emissionsgeschehen.

Abbildung 105: Wesentliche klimapolitische Programme und Instrumente in der Periode 2000 bis 2009



EU-Ebene; *umgangssprachlich „Dienstwagenprivileg“; **umgangssprachlich „Abwrackprämie“

Eigene Darstellung ohne Anspruch auf Vollständigkeit; basierend auf Matthes et al. (2008) und weiteren Quellen; Zuordnung der Instrumententypen nach UNFCCC (2000).

Periode 2010 bis 2019/2020

258 Mit dem im Jahr 2010 beschlossenen Energiekonzept wurde der Kanon des klimapolitischen Instrumentariums noch einmal erweitert (siehe Abbildung 106). Zu den bisherigen, mit wenigen Ausnahmen fortgeführten Instrumenten traten vermehrt fiskalische Instrumente hinzu, vor allem die Förderprogramme im Gebäude- und Industriebereich. Flankiert wurden diese durch einige zusätzliche Informations- und Beratungsangebote für private Haushalte und Unternehmen. Mit der Etablierung des Energie- und Klimafonds (EKF) als langfristiges Sondervermögen, welches neben Haushaltsmitteln auch aus den Einnahmen aus dem EU-ETS gespeist wird, änderte sich die Finanzierungsgrundlage für viele Programme im Energie- und Klimabereich. Ordnungsrechtliche Maßnahmen kamen in dieser Periode vor allem von der EU-Ebene (wie die Energieeffizienzrichtlinie oder die neuen Flottengrenzwerte). Im nationalen Ordnungsrecht waren in dieser Periode vor allem die Maßnahmen zum Rückbau der Kernkraftwerke von Bedeutung. Denn nach der Reaktorkatastrophe von Fukushima im Jahr 2011 und zwei gegensätzlichen Novellierungen des Atomgesetzes in den Jahren 2010 und 2011 wurde der Atomausstieg umfassend wirksam.

Abbildung 106: Wesentliche klimapolitische Programme und Instrumente in der Periode 2010 bis 2019/2020



EU-Ebene

Eigene Darstellung, erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, basierend auf Öko-Institut et al. (2021) und weiteren Quellen; Zuordnung der Instrumententypen nach UNFCCC (2000).

259 Erst gegen Ende dieser Periode wurden mit dem GEG, das allerdings in größeren Teilen der Umsetzung der EU-Gebäuderichtlinie dient, und dem Kohleverstromungsbeendigungsgesetz (KVBG), welches den Ausstieg aus der Kohleverstromung bis zum Jahr 2038 regelt, weitere ordnungsrechtliche Instrumente implementiert. Dabei beinhaltet das KVBG auch erhebliche Fördermittel zur Strukturanpassung in den betroffenen Regionen und damit neben Elementen der Klimapolitik auch starke Elemente der Struktur- und Verteilungspolitik. Dies war bei den bis dahin implementierten energie- und klimapolitischen Instrumenten nur in geringem Umfang der Fall (z. B. beim 2008 eingeführten Stromspar-Check, der sich explizit an einkommensschwache Haushalte richtete oder bei der 2009 kurzzeitig geltenden „Abwrackprämie“ für Pkw, die vor allem der Konjunkturstabilisierung dienen sollte). Ebenfalls am Schluss dieser Periode wurde mit dem Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) im Jahr 2019 ein weiteres ökonomisches Instrument der Preis- bzw. perspektivisch Mengensteuerung eingeführt, das die THG-

Emissionen in den Sektoren Gebäude, Verkehr und Teilen der Industrie adressiert. Damit ist in Deutschland der größte Teil der THG-Emissionen entweder im Rahmen des EU-ETS oder national einer Mengen- bzw. Preissteuerung unterworfen.

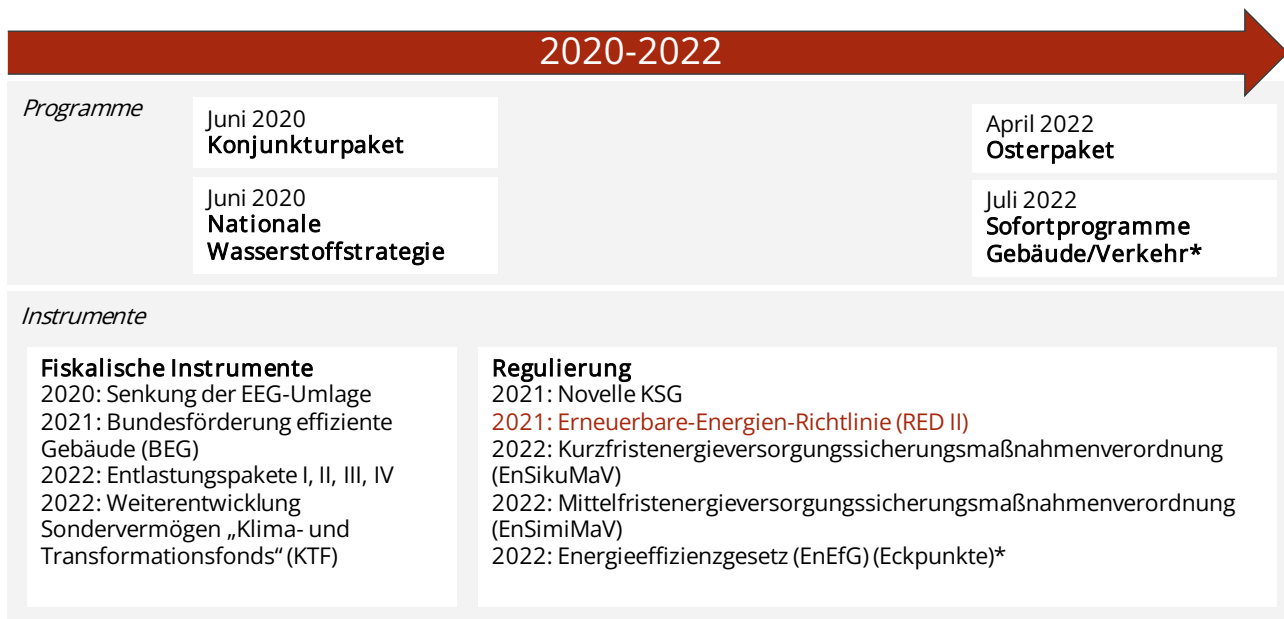
- 260 Programmseitig fielen in diese Phase zunächst das Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 (BMUB 2014), mit dem die im Energiekonzept (BMWi und BMU 2010b) festgelegten Ziele für die Minderung der THG-Emissionen, den Ausbau der erneuerbaren Energieträger und die Steigerung der Energieeffizienz bis 2020 umgesetzt werden sollten. Mit dem Klimaschutzplan 2050 (BMU 2016) wurde die langfristige Strategie zur Treibhausgasminderung und Erreichung der Treibhausgasneutralität im Jahr 2050 festgelegt. Der Plan enthielt erstmals auch sektorale Ziele zur THG-Minderung bis zum Jahr 2030, die mit dem Inkrafttreten des Bundes-Klimaschutzgesetzes im Dezember 2019 rechtsverbindlich wurden (KSG 2019). Ebenfalls beschlossen wurde im Herbst 2019 das Klimaschutzprogramm 2030 (Bundesregierung 2019), mit dem das Erreichen der sektoralen THG-Minderungsziele bis 2030 mit konkreten Maßnahmen unterlegt wurde.
- 261 Innerhalb dieser Periode wirkte das neu hinzugefügte klimapolitische Instrumentarium vor allem auf die Effizienz bei der Umwandlung (Energieeffizienzprogramm) und der Nutzung (Weiterführung von Förderprogrammen zur energetischen Sanierung, GEG, Heizungsoptimierung). Zudem wurde der Aufbau von neuem nicht-fossilen Kapitalstock nun auch in anderen Sektoren als in der Energiewirtschaft zunehmend finanziell gefördert bzw. reguliert (Förderung Elektromobilität (Umweltbonus) und Erneuerbare Heiztechnologien, Flottengrenzwerte, GEG, Novellierung des EEG). Auch der Rückbau des alten Kapitalstocks wird durch das Kohleausstiegsgesetz erstmals umfassend adressiert.

Periode 2020 bis 2022

- 262 Die Entwicklung der THG-Emissionen ab dem Jahr 2020 wird neben der expliziten Klimaschutzpolitik auch von der allgemeinen Krisenpolitik, d. h. den Maßnahmen zur Abmilderung der wirtschaftlichen und sozialen Folgen der Covid-19-Pandemie sowie der durch die Folgen des Ukraine-Kriegs verschärften Gas- und Energiepreiskrise stark beeinflusst (siehe Abbildung 107). So beinhaltete das im Juni 2020 infolge der Pandemie beschlossene Konjunkturpaket (BMWi 2020) zu großen Teilen auch klimapolitische Maßnahmen (wie die Aufstockung des CO₂-Gebäudesanierungsprogramms, die Anpassung der Kfz-Steuer sowie die Aufstockung der Umweltprämie). Parallel wurde die Nationale Wasserstoffstrategie, aufsetzend auf dem Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP), beschlossen. Auch die Novellierung des Bundes-Klimaschutzgesetzes im August 2021, mit der das Ziel der Treibhausgasneutralität auf 2045 vorgezogen, das Zwischenziel für 2030 auf 65 % gegenüber 1990 erhöht und die Sektorziele angehoben wurden, fiel in diese Phase. Im April 2022 wurde als weitere klimapolitische Maßnahme das Osterpaket (BMWK 2022d) vom Bundeskabinett verabschiedet, welches eine Gesetzesnovelle verschiedener energiepolitischer Gesetze beinhaltet (unter anderem das EEG, Windenergie-auf-See-Gesetz (WindSeeG), Bundesbedarfsplangesetz (BBPIG) sowie das Netzausbaubeschleunigungsgesetz (NABEG). Im Juli 2022 folgten die Sofortprogramme Gebäude (BMWi und BMI 2021) und Verkehr (BMDV 2022), die dem Expertenrat für Klimafragen zur Prüfung übermittelt wurden (ERK 2022a). Außerdem wurden seit Februar 2022 mehrere Entlastungspakete (Bundesregierung 2022a; 2022b) beschlossen, von denen derzeit noch nicht klar ist, in welche Richtung sie die THG-Emissionsentwicklung beeinflussen. Während einige der beschlossenen Maßnahmen die Anreizwirkung höherer Energie- bzw. CO₂-Preise mindern (wie die Aussetzung der Erhöhung des CO₂-Preises im Rahmen des BEHG für 2023, die zeitweise Senkung der Energiesteuer auf Kraftstoffe oder die Zuschüsse zu den Heizkosten), sind darin auch Maßnahmen enthalten, die emissionsmindernd wirken dürften (wie die Abschaffung der EEG-Umlage oder der ab dem 1.1.2023 vorgesehene Abbau

steuerlicher und bürokratischer Hürden für PV-Anlagen). Das gleiche gilt auch für die beiden Verordnungen zur kurz- und mittelfristigen Gaseinsparung (EnSikuMaV und EnSimiMaV) (BMWK 2022e; 2022f), die im Wesentlichen den Energieverbrauch im Gebäudebereich betreffen sowie das derzeit (Stand Ende Oktober 2022) noch im Entwurfsstadium befindliche Energieeffizienzgesetz (EnEfG) und auch die derzeit noch von der Bundesregierung geprüften Maßnahmen zur Einführung eines Strom- und Gaspreisdeckels (ExpertInnen-Kommission Gas und Wärme 2022).

Abbildung 107: Wesentliche klimapolitische Programme und Instrumente in der Periode 2020 bis 2022



EU-Ebene; *noch nicht beschlossen

Eigene Darstellung, erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit; Zuordnung der Instrumententypen nach UNFCCC (2000).

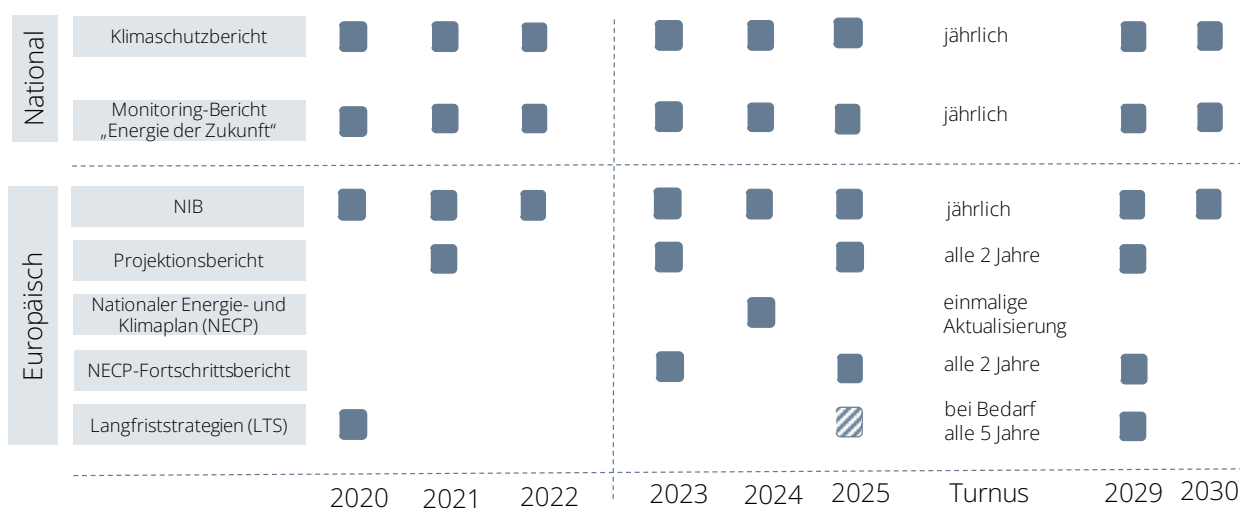
4.2 Betrachtungen zur Wirksamkeit

263 Eine Bewertung des oben dargestellten klimapolitischen Instrumentariums erfordert eine Einschätzung der Wirksamkeit der beschlossenen Einzelinstrumente und Instrumentenbündel im Hinblick auf die mit ihnen verfolgten THG-Minderungsziele. Die oben beschriebenen Klimaschutzprogramme - und damit auch die im Umfeld dieser Programme implementierten Einzelinstrumente - zielten im Wesentlichen darauf ab, die zum jeweiligen Zeitpunkt geltenden internationalen, europäischen und/oder nationalen THG-Minderungsziele sowie weitere Energieeffizienz- und Erneuerbare-Energien-Ziele zu erreichen. Damit steht auch bei der Frage nach der Wirksamkeit dieser Instrumente ihr Beitrag zur THG-Minderung und Energieverbrauchssenkung im Vordergrund, auch wenn weitere ökonomische, soziale und ökologische Folgewirkungen dieser Instrumente, wie sie auch in § 9 Abs. 2 KSG genannt werden, in einigen Bewertungsprozessen mit adressiert werden⁵². Denn beginnend mit dem IEKP von 2007 werden die Zielerreichung und die Wirksamkeit klimapolitischer Programme und Maßnahmen sowohl in Deutschland als auch auf EU-Ebene zunehmend einem Monitoring unterzogen und teilweise auch

detailliert evaluiert. Diese Prozesse beziehen sich teils auf die ex post-, teils auf die ex ante Wirkung und betrachten Einzelinstrumente oder Instrumentenbündel. Der Expertenrat für Klimafragen hatte bereits in seinem letzten Prüfbericht (ERK 2022b) auf die unterstützende Funktion dieser Berichtspflichten (siehe Abbildung 108) im Planungsprozess zur Erreichung der Klimaziele hingewiesen, allerdings auch angemerkt, dass daraus in den allermeisten Fällen keine Handlungspflichten z. B. bei Nichterreichung der Ziele entstehen. Der Expertenrat für Klimafragen wird im Folgenden auf die Ergebnisse einiger dieser Monitoring- und Evaluationsprozesse zurückgreifen, um daran beispielhaft die Wirksamkeit zentraler Instrumente der Klimaschutzpolitik zu diskutieren.

Abbildung 108: Berichtspflichten der Bundesregierung auf nationaler und europäischer Ebene

Berichtspflichten auf nationaler und europäischer Ebene



Eigene Darstellung nach ERK (2022b).

264 Im Zuge der wachsenden Bedeutung dieser Berichtspflichten wurden auch die methodischen Grundlagen für die Evaluation von klima- und energiepolitischen Maßnahmen kontinuierlich weiterentwickelt. Die generellen Standards für Evaluationen werden in Deutschland von der DeGEval (Gesellschaft für Evaluation e. V.) gesetzt (DeGEval 2016). Für das Monitoring von Maßnahmen der Energie- und Klimapolitik hat die Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“ (2015) 10 Leitsätze formuliert, die auch eine wichtige Grundlage für die Prüfberichte des Expertenrats für Klimafragen (ERK 2021b; 2022b) bilden. Auch die aktuellen Methodikempfehlungen für die Evaluation von Energieeffizienzmaßnahmen des BMWK (Fraunhofer ISI et al. 2020) und der Maßnahmen der Nationalen Klimainitiative (Öko-Institut et al. 2019) bauen auf diesen Grundlagen auf. Wesentliche Kriterien für die Instrumentenbewertung sind danach deren Relevanz, Effektivität und Effizienz im Hinblick auf die Zielerreichung, die Belastbarkeit der zugrundeliegenden Datenbasis, Methodik und Indiktorik, die Berücksichtigung weiterer indirekter Wirkungen wie Verteilungseffekte oder Langfristigkeit sowie die Transparenz und Neutralität des Prozesses. In der ex ante-Perspektive kommen aus methodischer Sicht insbesondere noch die Annahmen zu zentralen Rahmendaten (wie Energiepreisen), die Festlegung einer geeigneten Referenz (Baseline) für die Sicherstellung der

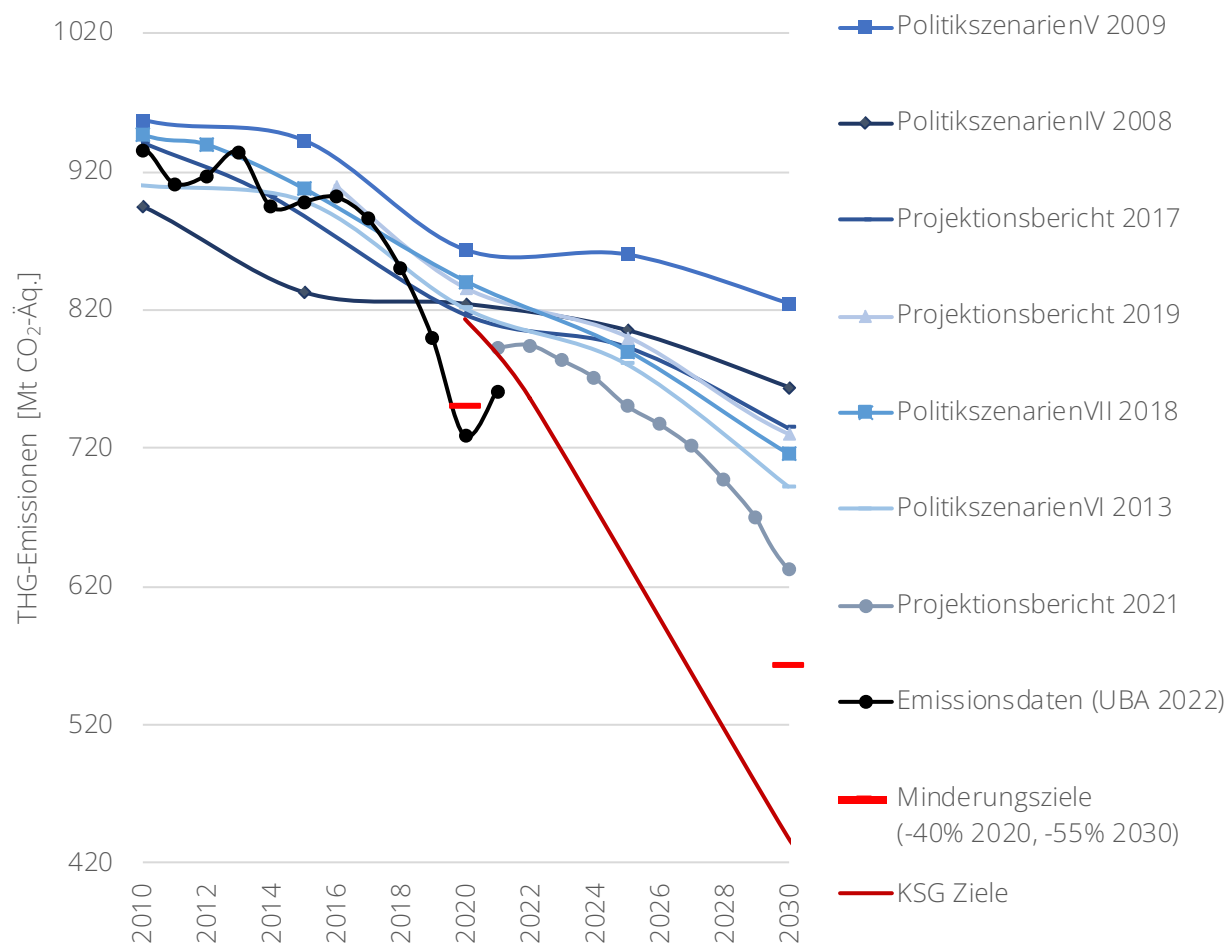
Zusätzlichkeit der Wirkung gegenüber dem Status-quo sowie der Umgang mit Unsicherheiten hinzu (Matthes et al. 2021; Schlomann et al. 2022).

- 265 Das MMS im Rahmen der Projektionsberichterstattung quantifiziert regelmäßig (alle 2 Jahre) die Entwicklung der THG-Emissionen in den einzelnen Sektoren unter Berücksichtigung der aktuellen Rahmenbedingungen für die nächsten rund 15 Jahre. Das prominente Ziel bis zum Klimaschutzprogramm 2030 war die Erreichung von -40 % THG-Minderung in 2020 gegenüber 1990. Die Projektionsberichte seit dem Jahr 2009 zeigten alle eine deutliche Lücke zur Erreichung dieses Zielwertes. Auch der aktuelle Projektionsbericht aus dem Jahr 2021 weist eine deutliche Lücke zur Erreichung des aktuellen THG-Minderungsziels im Jahr 2030 von -65 % gegenüber 1990 und auch zu dem zum Zeitpunkt seiner Erstellung noch geltenden Ziels von -55 % auf⁵³. Die in den Projektionsberichten konstatierten Zielverfehlungen lassen sich jedoch nicht allein auf die möglicherweise unzureichende Wirksamkeit der in den Szenarien jeweils hinterlegten Maßnahmen der Klimaschutzpolitik zurückführen. Denn in der im MMS abgebildeten Referenzentwicklung spiegelt sich neben der Instrumentenwirkung auch die Wirkung der Rahmenannahmen zur Aktivitäts- und Energiepreisentwicklung sowie der Einfluss des autonomen technischen Fortschritts wider⁵⁴. Dennoch zeigt diese Darstellung, dass unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen und der jeweils zugrundeliegenden Politikmaßnahmen die in den Projektionsberichten abgeschätzte Reduktion der THG-Emissionen bisher nicht ausreichte, um die gesetzten THG-Minderungsziele zu erreichen und dass insbesondere die Lücke zum verschärften Ziel für 2030 allein unter Berücksichtigung des bestehenden Instrumentenmix sehr groß ausfällt.

⁵³ Erst mit der Novelle des KSG im Jahr 2021 wurde das Ziel auf -65 % THG-Minderung gegenüber 1990 angehoben.

⁵⁴ Der große Einfluss dieser nicht politikgetriebenen Rahmenannahmen zeigt sich insbesondere im Jahr 2020, in dem das THG-Minderungsziel von 40 %, entgegen den Abschätzungen in den vorhergehenden Projektionsberichten, aufgrund der stark emissionsmindernd wirkenden Folgewirkung der Covid-19-Pandemie dennoch erreicht wurde (Shammugam et al. 2022).

Abbildung 109: Gegenüberstellung der THG-Minderungsziele für 2020 und 2030 und der in den Projektionsberichten (MMS) 2009-2021 jeweils abgeschätzten Entwicklung der THG-Emissionen



Eigene Darstellung, basierend auf den Projektionsberichten 2009 (Matthes et al. 2009) bis 2022 (Öko-Institut et al. 2021).

266 Eine genauere Einschätzung der Wirksamkeit von Klimaschutzinstrumenten im Hinblick auf die Zielerreichung erlauben die fünf Quantifizierungsberichte zum Aktionsprogramm Klimaschutz (APK) 2020 (Öko-Institut und ISI 2017-2021), die die quantitative Grundlage, für die seit 2016 jährlich veröffentlichten Klimaschutzberichte der Bundesregierung bilden (BMWK 2022c). Bewertet wird die Wirkung der im APK 2020 enthaltenen Instrumente gegenüber einer Referenzentwicklung ohne diese Maßnahmen, dem MMS des Projektionsberichts 2015. Das Programm enthält ein Bündel von rund 110 Maßnahmen aus allen THG-relevanten Sektoren und Handlungsfeldern. Insgesamt soll mit den beschlossenen Maßnahmen eine Emissionsminderung in Höhe von 62 bis 78 Mt CO₂-Äq. erreicht werden.⁵⁵ Tabelle 2 zeigt, dass mit den im APK 2020 enthaltenen Instrumenten die anvisierte THG-Minderungswirkung in der Summe nicht erreicht wurde. Im Jahr 2020 bestand eine Lücke zu der Ambition des Programms von rund 20 bis 26 Mt CO₂-Äq. Dass das hinter der Formulierung des

⁵⁵ Das Programmziel wurde abgeleitet aus der zum Zeitpunkt des Beschlusses im Jahr 2014 identifizierten Lücke zum THG-Minderungsziel für das Jahr 2020.

Programmzieles stehende THG-Minderungsziel von 40 % gegenüber 1990 im Jahr 2020 dennoch erreicht wurde, war - wie bei den Projektionsbericht-Szenarien - nicht in vollem Umfang der Wirkung der beschlossenen klimapolitischen Instrumente zuzuschreiben, sondern auch eine Folge der in den Rahmenannahmen nicht vorhergesehenen Folgewirkungen der Covid-19-Pandemie. Dass die im Programm enthaltenen Maßnahmen die ursprünglich abgeschätzten Wirkungen zum Teil nicht erfüllt haben, hat unterschiedliche Gründe. Dazu gehört, dass einige Maßnahmen nach den Ergebnissen der Evaluation erst deutlich später Wirkung entfalteten als ursprünglich angenommen. Außerdem mussten die Wirkungen aufgrund aktueller Evaluationen, die im späteren Verlauf insbesondere für viele der im APK enthaltenen fiskalischen Instrumente vorlagen, nach unten korrigiert werden (beispielsweise aufgrund der Unterschätzung von Mitnahmeeffekten). Auf der Ebene des gesamten Instrumentenbündels wurden zwar Überlagerungseffekte grundsätzlich berücksichtigt, deren quantitative Erfassung ist jedoch mit großen Unsicherheiten behaftet. Die mit der Wirkungsabschätzung verbundenen Unsicherheiten sowohl auf der Einzelinstrumentenebene als auch im Bündel, auf die auch der Expertenrat für Klimafragen wiederholt hingewiesen hat (ERK 2021a; 2022a), werden auch durch die relativ große Spannbreite der Bewertung deutlich (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Evaluationen zum Aktionsplan Klimaschutz 2020

Quantifizierungsberichte zum APK 2020	Abgeschätzter THG-Minderungseffekt für das Jahr 2020 (jeweils ohne LULUCF)
Minderungsziel des APK 2020: 62 bis 78 Mio. t CO ₂ -Äq.	
5. Quantifizierungsbericht (2020) (Öko-Institut und ISI 2021)	42,2 bis 51,7 Mt. CO ₂ -Äq. Lücke zum Ziel: 19,8 bis 35,8 Mt. CO ₂ -Äq.
4. Quantifizierungsbericht (2019) (Öko-Institut und ISI 2020)	Umsetzungsstand: 36,7 Mt. CO ₂ -Äq. bis 46,1 Mt. CO ₂ -Äq. Maßnahmen in Planung: 37,5 Mt. CO ₂ -Äq. bis 46,9 Mt. CO ₂ -Äq.
3. Quantifizierungsbericht (2018) (Öko-Institut und ISI 2019)	Umsetzungsstand: 31,3 Mt. CO ₂ -Äq. bis 42,3 Mt. CO ₂ -Äq. Maßnahmen in Planung: von 37,2 Mt. CO ₂ -Äq. bis 50,6 Mt. CO ₂ -Äq.
2. Quantifizierungsbericht (2017) (Öko-Institut und ISI 2018)	Umsetzungsstand: von 31,3 Mt. CO ₂ -Äq. bis 42,3 Mio. t CO ₂ -Äq. Maßnahmen in Planung: von 37,2 Mt. CO ₂ -Äq. bis 50,6 Mt. CO ₂ -Äq.
1. Quantifizierungsbericht (2016) (Öko-Institut und ISI 2017)	Umsetzungsstand: von 38,7 Mt. CO ₂ -Äq. bis 45,6 Mt. CO ₂ -Äq. Maßnahmen in Planung: von 45,5 Mt. CO ₂ -Äq. bis 55,1 Mt. CO ₂ -Äq.

Quelle: Öko-Institut und ISI (2017-2021); Umsetzungsstand bildet in einer statischen Betrachtung die aktuelle Beschlusslage ab; Planungsstand berücksichtigt Aktivitäten, deren Beschluss noch nicht feststeht, eine Absicht jedoch zu dem jeweiligen Zeitpunkt bereits formuliert ist.

267 Diese beispielhaften Betrachtungen zur Wirksamkeit des klimapolitischen Instrumentenmix der vergangenen Jahre lassen folgende Feststellungen zu. Zum einen lässt sich feststellen, dass die Wirkung der beschlossenen Instrumente allein bisher nicht ausreichte, um die Ziele der Klimaschutzpolitik zu erreichen. Dies gelang nur in Kombination mit externen - politisch nicht intendierten - Faktoren wie den emissionsmindernden Folgewirkungen der Covid-19-Pandemie. Insbesondere die Lücke zum nochmals verschärften THG-Minderungsziel für 2030 fällt auf Basis des derzeitigen Instrumentenmix und den in

den bisherigen Szenarien angenommenen Rahmendaten zur Wirtschafts- und Energiepreisentwicklung, die noch nicht die Folgen der Covid-19-Pandemie und des Krieges in der Ukraine enthalten, sehr groß aus (siehe Abbildung 109). Die Betrachtung zeigt jedoch auch, dass in der Programmplanung von deutlich höheren Minderungswirkungen ausgegangen wurde, als sie letztlich in der Umsetzung erzielt wurden. Dies war im Fall des APK 2020 vor allem auf die zeitverzögerte Umsetzung von Maßnahmen und eine geringere Effektivität einiger Maßnahmen (z. B. aufgrund von Mitnahme- und Überlagerungseffekten oder einer geringeren Ausschöpfung der Programmmittel) zurückzuführen, die sich erst später durch ex post-Evaluationen herausstellte. Die Betrachtung bestätigt damit auch die wichtige Rolle von ex post- und ex ante-Evaluationen von Maßnahmen und den dahinterstehenden Monitoringprozessen. Denn nur so lassen sich der Fortschritt der Umsetzung sowie die Umsetzungslücken zur intendierten Zielsetzung aufzeigen und transparent darstellen.

4.3 Diskussion und Ausblick

- 268 Die bisherigen Analysen haben gezeigt, dass die Instrumente der Klimaschutzpolitik in der Vergangenheit insbesondere auf die technische Verbesserung der Energieeffizienz bei der Umwandlung und Nutzung sowie den bisher überwiegend im Energiesektor stattgefundenen Aufbau eines neuen, nicht-fossilen Kapitalstocks gerichtet waren. So hat insbesondere die Erhöhung des technologischen Wirkungsgrads des fossilen Kapitalstocks mit dem Einsatz effizienter Gas-Brennwertkessel im Gebäudebereich, effizienterer Querschnittstechnologien in der Industrie und effizienterer (Diesel-)Motoren in Fahrzeugen wesentliche emissionsmindernd wirkende Beiträge geleistet (siehe Kapitel 2). Diese Handlungsoption wird jedoch in Zukunft nur noch in abnehmendem Maße zur THG-Minderung beitragen können, und zwar umso weniger, je höher die Marktdurchdringung mit bester verfügbarer Technologie fortgeschritten ist und umso mehr sich technische Anlagen den jeweiligen physikalischen Grenzwerten der energetischen Effizienz angenähert haben (z. B. Brennwerttechnik in der Gebäudeheizung). Dies heißt im Umkehrschluss jedoch, dass die übrigen Handlungsoptionen (siehe Abbildung 104) zukünftig einen erheblich größeren Beitrag leisten müssen, um den abnehmenden Beitrag der technologischen Verbesserungen auf der Umwandlungsseite nicht nur zu kompensieren, sondern auch noch die erheblich höheren THG-Minderungen als in der Vergangenheit, die zur Erreichung der Klimaziele für 2030 erforderlich sind (siehe Kapitel 3), zu erzielen.
- 269 Damit sind instrumentenseitig die technischen Effizienzpotenziale auf der Nutzungsebene noch stärker zu adressieren. Dazu gehören insbesondere die Gebäudesanierung im Bestand (besonders auch mit Blick auf „Worst-Performing Buildings“) sowie der beschleunigte Ersatz fossiler durch CO₂-arme bzw. -freie Technologien und die stärkere Nutzung der Potenziale der Ressourcen- und Materialeffizienz sowie der Kreislaufwirtschaft. Zum anderen kann die erforderliche Forcierung der THG-Minderung nur gelingen, wenn auch weitere Optionen, die bisher kaum oder gar nicht im Handlungsbereich der Klimapolitik lagen, in den Blick genommen werden. Dazu gehören i) nicht nur der Zubau von neuem CO₂-ärmeren oder -freien Kapitalstock, sondern verstärkt auch der Rückbau des alten emissionsintensiven Kapitalstocks, ii) die stärkere Ausschöpfung verhaltensbedingter Effizienzpotenziale bei der Nutzung, wie sie im Zuge der Gaskrise durch die aktuelle Politik bereits teilweise angesprochen werden, sowie iii) möglicherweise auch eine explizitere Adressierung der Reduktion zentraler Aktivitätsgrößen in einzelnen Sektoren als in der Vergangenheit, wenn die stärkere Adressierung der übrigen Handlungsfelder sich als nicht ausreichend zur Zielerreichung erweist.
- 270 Als weiteres wichtiges Handlungsfeld für die zukünftige Klimapolitik hat sich aus der ex post-Betrachtung der sektoralen Emissionsentwicklung eine der Treibhausgas-minderung nicht förderliche Anreizstruktur

im klimapolitischen Instrumentarium herausgestellt, die in der Vergangenheit in einigen Sektoren emissionssteigernd wirkte (siehe Kapitel 2). Dazu gehören i) die immer noch beträchtlichen finanziellen Summen an umwelt- und klimaschädlichen Subventionen sowie ii) eine dem Klimaschutz nicht förderliche Ausgestaltung von Instrumenten. Obwohl diese Punkte bereits in verschiedenen Monitoringprozessen angesprochen wurden (wie in Monitoringberichten zum IEKP (Nissler und Wachsmann 2011), im ersten Monitoringbericht „Energie der Zukunft“ (BMW und BMU 2012) oder durch den Sachverständigen Rat für Umweltfragen (SRU 2019; 2017; 2012)), hat auch die vom Expertenrat für Klimafragen durchgeführte Analyse gezeigt, dass hier weiterhin Handlungsbedarf besteht.

- 271 Betroffen von umweltschädlichen Subventionen sind gemäß einer Studie des Umweltbundesamtes (Burger und Bretschneider 2021) vor allem der Bereich der Energiebereitstellung- und Nutzung (unter anderem: Besondere Ausgleichsregelung des EEG für stromintensive Unternehmen und Schienenverkehr (Infokasten 6), Eigenstromprivileg der Industrie, Energiesteuervergünstigungen bei der Stromerzeugung oder Energiesteuervergünstigungen für Kohle), der Verkehrssektor (unter anderem Energiesteuervergünstigungen bei Diesel (Dieselprivileg), Entfernungspauschale, pauschale Besteuerung privatgenutzter Dienstwagen (1 %-Regel) (siehe Infokasten 12), Energiesteuerbefreiung des Kerosins, Mehrwertsteuerbefreiung internationaler Flüge sowie den Landwirtschaftssektor (unter anderem Mehrwertsteuerermäßigung für tierische Produkte).
- 272 Die Ausgestaltung von einigen Klimaschutzinstrumenten zielte in der Vergangenheit nicht immer auf die beste Klimaschutzwirkung ab. Hierzu zählt zum Beispiel:
- Im Gebäudesektor sind um die 50 % der Förderung der BEG und der Vorgängerprogramme bis zur aktuellen Novelle in den Wohnungsneubau und nicht in die Sanierung von Bestandsgebäuden geflossen und davon ein Großteil (70 %) für den Effizienzhaus Standard 50, während rund 20-30 % der Sanierungen der Bestandsgebäude den wenig ambitionierten Effizienzhaus-Standards KfW-Effizienzhaus 115 und KfW-Effizienzhaus 100 beantragt haben. Zudem zeigte sich eine kontinuierliche Verschlechterung der Fördereffizienzen (wobei die Fördereffizienz der Sanierung immer oberhalb derjenigen des Neubaus lag) (siehe Infokasten 8). Das Ordnungsrecht (EnEV, GEG) adressiert insbesondere den Neubau (siehe Infokasten 9) und nicht die Anforderungen an den Gebäudebestand (dies ist im Rahmen der EU-Gebäuderichtlinie in Diskussion). Zudem hat sich bisher in der Beheizungsstruktur des Gebäudebestands der Anteil von Öl- und Gaskesseln kaum verringert. Gaskessel machen in 2020 rund 50 %, Ölkessel rund 25 % des Energieträgeranteils aus (siehe Abbildung 35). Dies ist unter anderem auch darauf zurückzuführen, dass Gas- oder Ölkessel (als Brennwerttechnik oder Hybridsystem), bis zur aktuellen Novelle der BEG (BMWK 2022b) gefördert wurden (siehe Infokasten 8), was zwar zu Effizienzsteigerungen geführt hat, aber auch zu einem weiteren Aufbau des fossilen Kapitalstocks beigetragen hat.
 - Im Verkehrssektor sind die Flottengrenzwerte so ausgestaltet, dass für Flotten mit höherem Durchschnittsgewicht schwächere Flottengrenzwerte vorgegeben werden und in den Effizienzstandards nicht zwischen Batterieelektrischen und Plugin-Hybriden und Verbrennern unterschieden wird. Das führt dazu, dass Verbrenner weniger CO₂ einsparen müssen, je schneller mehr Elektroautos in den Markt kommen. Aus einer Klimaschutzperspektive erscheint weiterhin die Bevorteilung schwerer Fahrzeugflotten durch hohe Grenzwerte vor dem Hintergrund einer kontinuierlich steigenden Leermasse der Neuzulassungen retrospektiv als nicht förderlich (siehe Infokasten 13).

- Im Industriesektor führte die kostenlose Zuteilung von Zertifikaten dazu, dass alter fossiler Kapitalstock subventioniert wurde (siehe Infokasten 3).

273 Neben Fragen der Zielgenauigkeit und Effizienz von politischen Maßnahmen und Instrumenten ist ein weiterer Sachverhalt für deren Wirksamkeit relevant, der sich aus dem evolutionären Prozess ihrer (Weiter-) Entwicklung ergibt. Dieser Sachverhalt besteht in einer – in aller Regel wachsenden – Komplexität der Regelungen und Details der Ausführungsbedingungen einmal eingeführter und dann aus unterschiedlichsten Gründen angepasster und weiterentwickelter Maßnahmen und Gesetze, wie im Kontext dieses Berichts z. B. für die Entwicklung der Regulierung für den Gebäudebereich beschrieben. Der Sachverhalt wird auch in der wissenschaftlichen Literatur diskutiert.⁵⁶ Diese steigende Komplexität wird selbst zu einem wesentlichen Faktor im Hinblick auf den Umsetzungs- und damit Wirksamkeitserfolg der installierten Maßnahmen und Instrumente. Wird für die Akteure, die beispielsweise neue Anlagenkonzepte oder Geschäftsmodelle umsetzen wollen, der Handlungsrahmen so komplex und vielschichtig und die sich daraus ergebenden vielfältigen Anforderungen und Pflichten so hoch, dass der Transaktionsaufwand und die damit verknüpften Kosten nicht mehr angemessen erscheinen, werden Investitionen nicht getätigt, obwohl sie möglicherweise grundsätzlich aus betriebswirtschaftlicher Sicht rentabel wären.⁵⁷ Gerade vor dem Hintergrund der notwendigen Steigerung der Geschwindigkeit der Reduktion der THG-Emissionen zur Erreichung der Ziele des Bundes-Klimaschutzgesetzes und der damit verbundenen notwendigen Beschleunigung von Investitionen zum Umbau des Kapitalstocks von fossilen zu nicht-fossilen Anlagen scheint der Sachverhalt der hohen – und zumeist steigenden – Komplexität des regulatorischen Rahmens sich selbst zu einem Hemmnis zur Erreichung dieser Ziele zu entwickeln. Gleichzeitig tut sich dann ein Spannungsfeld auf, wenn dabei demokratische Wege der Prüfung und Einspruchsmöglichkeit betroffen sind. Bei der künftigen (Weiter-) Entwicklung von Maßnahmen und Instrumenten und deren Ausgestaltung sollte der Gesichtspunkt der steigenden Komplexität deshalb wesentliche Berücksichtigung finden.

⁵⁶ Siehe hierzu z. B. (Müller 2019, S. 382). Dort heißt es; „Es [das Umweltenergierecht] ist das zentrale Mittel zur Steuerung der Energiewende und eine unverzichtbare Bedingung für das Gelingen der Transformation der Energieversorgung. Über die Jahre ist in diesem Rechtsbereich in einem evolutionären Prozess ein vielschichtiger Instrumentenverbund im Mehrebenensystem entstanden. Dieser ist zum Teil lückenhaft und weist Defizite auf. Es fehlen insbesondere geeignete Instrumente zur Koordinierung der verschiedenen Ziele und Zwecke sowie übergreifende Regelungsstrukturen. Die entstandenen komplexen Regelungsstrukturen können zu Rechtsunsicherheit führen, die Leistungsfähigkeit des Rechts überfordern und die Effizienz des Transformationsprozesses reduzieren.“ und im gleichen Artikel (S. 394): „Trotz des lückenhaften Rechtsrahmens ist eine sehr hohe und zunehmende Komplexität des Umweltenergierechts zu beobachten. Zu den bestehenden technisch-ökonomisch-soziologischen Herausforderungen der Energietransformation, die tendenziell ohnehin die technische Komplexität erhöhen, tritt eine in der Art der gesetzlich Regelungen begründete Komplexität hinzu. Daraus ergeben sich Herausforderungen für den Gesetzgeber und die Normadressaten gleichermaßen. Der Gesetzgeber neigt im Umweltenergierecht zu einem sehr ausgeprägten Steuerungsanspruch und macht sehr detaillierte Vorgaben. Eine solche (Über-) Komplexität hat aber das Potenzial, die Investitionstätigkeiten zu hemmen, weil aus komplexen und unübersichtlichen Regelungsstrukturen Auslegungsschwierigkeiten entstehen könnten und sich so Rechtsunsicherheit breit machen könnte. Insoweit wäre der Gesetzgeber gut beraten, diese Regelungskomplexität zu reduzieren und das zersplitterte und unübersichtliche Energierecht zu vereinfachen und neu zu ordnen. [...] Die Probleme werden durch eine sehr hohe Änderungsfrequenz des Umweltenergierechts noch verschärft.“ (Müller 2019, S. 394)

⁵⁷ Als ein konkretes Beispiel können die „Pflichten von gemeinsam handelnden Eigenversorgern und Mieterstrom-Lieferanten“ dienen, die sich aus einer Vielzahl gesetzlicher Regelungen ergeben. Sowohl vor Inbetriebnahme entsprechender Anlagen (Erfüllung der Lieferantenpflichten – vorbereitende Pflichten) als auch später im Betrieb (Regelmäßige Meldepflichten vom Stromlieferanten gegenüber Regulierungsbehörden und Netzbetreibern) ist eine sehr große Anzahl an Anzeigen und Pflichten gegenüber einer Vielzahl unterschiedlicher Adressaten (Bundesnetzagentur, Hauptzollamt, Übertragungsnetzbetreiber, Verteilnetzbetreiber, Marktstammdatenregister, Finanzamt und weitere) erforderlich, und zwar über die beim Betrieb einer netz-einspeisenden Eigenstrom-Anlage ohnehin üblichen Pflichten hinaus. (BBEn)

- 274 Die Betrachtungen zur Wirksamkeit des derzeitigen Instrumentenmix der Klimapolitik im vorhergehenden Abschnitt und der Abgleich zentraler Treiber für die THG-Minderung mit den Klimaneutralitätsstudien (siehe Kapitel 3) haben gezeigt, dass das Erreichen der mit der Revision des Bundes-Klimaschutzgesetzes angehobenen THG-Minderungsziele bis 2030 nur dann wahrscheinlich ist, wenn alle in Zukunft noch verfügbaren Handlungsfelder effektiv von der Klimapolitik adressiert werden. Der Expertenrat für Klimafragen hat bereits in seinem letzten Prüfbericht eine politisch vorgegebene fixe Begrenzung von Emissionsmengen in Verbindung mit der Etablierung eines entsprechenden Handelssystems als grundsätzliche Alternative zu der im Bundes-Klimaschutzgesetz bisher angelegten Steuerungslogik dargestellt (ERK 2022b, Tz. 123ff). Diese Überlegungen werden hier wieder aufgegriffen. Denn aus Sicht des Expertenrates für Klimafragen ist die Erreichung der KSG-Minderungsziele nur dann mit Sicherheit möglich, wenn eine harte Mengenbegrenzung eingeführt wird. Diese würde durch den damit vermutlich verbundenen starken Preisanreiz grundsätzlich alle genannten Handlungsfelder adressieren und wäre sowohl effektiv im Hinblick auf die Zielerreichung und theoretisch (d. h. bei Vernachlässigung realwirtschaftlicher Friktionen) effizient hinsichtlich der Vermeidungskosten.
- 275 Wie vom Expertenrat für Klimafragen (ERK 2022b) und anderen (siehe z. B. High-Level Commission on Carbon Prices (2017) oder Edenhofer et al. (2021)) argumentiert, erfordert ein solcher Umstieg auf ein hartes Mengeninstrument jedoch die Begleitung durch eine weitere politische Instrumentierung, um i) die sozialen und wettbewerblichen Folgen der durch eine feste Emissionsobergrenze initiierten hohen CO₂- und Brennstoffpreise abzufedern und ii) spezifische Hemmnisse aufgrund von Marktunvollkommenheiten (wie zum Beispiel Sicherstellung notwendiger Planung (z. B. im Infrastrukturbereich), flankierende Maßnahmen zur Unterstützung des Umbaus des Kapitalstocks, Verhinderung von Lock-in-Effekten (ERK 2022b)) zu adressieren, die durch den höheren Preis allein nicht adressiert werden. Auf die möglichen Probleme, die es aufgrund der Abweichungen des theoretischen Modells des mengenbegrenzenden Zertifikatehandels von der realen Entwicklung politisch zu adressieren gilt, hat der Expertenrat für Klimafragen bereits in seinem letzten Prüfbericht (ERK 2022b, Tz. 123ff) hingewiesen. Dazu gehören das Fehlen vollständiger Transparenz und vollständigen Wettbewerbs, die Möglichkeit steigender Erträge, mangelnde Liquidität auf Zertifikatmärkten, eine unzureichende Fähigkeit des Staats zur Selbstbindung und Netzwerkeffekte in Bezug auf Infrastrukturen.
- 276 Solange keine harte Mengenbegrenzung für die THG-Emissionen besteht, sind die noch verfügbaren klimapolitischen Handlungsoptionen durch einen Instrumentenmix effektiver als in der Vergangenheit zu adressieren, der alle Handlungsfelder umfasst und der idealerweise darauf abzielt, sukzessive zu einer harten Mengenbegrenzung zu gelangen. Dies beinhaltet insbesondere auch Handlungsfelder wie den Rückbau des fossilen Kapitalstocks, die stärkere Ausschöpfung verhaltensbedingter Effizienzpotenziale und auch die Reduktion von Aktivitäten, die in der Vergangenheit noch wenig angegangen wurden. Der Abbau nicht förderlicher Anreizstrukturen und Überregulierungen, die den notwendigen Transformationsprozess zur Reduktion von THG-Emissionen hemmen, sind ein wichtiger Bestandteil eines solchen Instrumentenbündels. Ebenso können bisher in Deutschland nicht eingeführte Instrumente wie ein Bonus-Malus-System für den Verkehrssektor (siehe Infokasten 13), siehe dazu auch (Koch et al. 2022), die Effektivität einer solchen Instrumentierung erhöhen.
- 277 Zur effektiveren Begleitung der Klimapolitik ist ein besseres System des Monitorings erforderlich, das den Umsetzungsfortschritt transparent aufzeigt und Umsetzungslücken und Zielverfehlungen, nach Möglichkeit einschließlich ihrer Ursachen, frühzeitig erkennen lässt. Wesentliche Elemente eines solchen Prozesses sind i) eine konsequente ex post- und ex ante Evaluation der beschlossenen

Klimaschutzmaßnahmen, die die oben skizzierten methodischen Anforderungen erfüllen⁵⁸, ii) die stärkere Nutzung von ex post und ex ante Indikatoren für ein besseres Monitoring der Entwicklung der THG-Emissionen in den Sektoren (siehe Kapitel 5.1) in Verbindung mit einer Verbesserung der Datengrundlagen (siehe Kapitel 5.2) und iii) darauf aufbauend ein verbindlicher Prozess der Nachsteuerung bei der Feststellung von Umsetzungslücken und der Gefahr von Zielverfehlungen. Der Expertenrat für Klimafragen hat in seinem letzten Prüfbericht (ERK 2022b) darauf hingewiesen, dass aus Umsetzungsdefiziten oder Zielverfehlungen, die in den bereits etablierten Monitoringprozessen festgestellt werden, in den allermeisten Fällen keine Handlungspflichten resultieren. Dies gilt nicht zuletzt für die Prüfung der Sofortprogramme bei konstatierter Zielverfehlung durch den Expertenrat für Klimafragen (ERK 2021a; 2022a), obwohl dies in § 12 Abs. 2 KSG gesetzlich festgelegt ist.

- 278 Die erfolgreiche Erreichung der Treibhausgasminderungsziele setzt also ein geschicktes Zusammenspiel des Aufbaus von neuem Kapitalstocks und die Rückführung der Nutzung von altem Kapitalstock bis hin zu dessen Rückbau voraus. Ein harter Mengendeckel würde die erforderlichen Maßnahmen erzwingen, aber, wie dargestellt, zu einem wirtschaftlich wie gesellschaftspolitisch möglicherweise übermäßig hohen Preis. Ohne einen harten Mengendeckel müssen die erforderlichen Investitionen, Des-Investitionen und Nutzungsänderungen auf anderem Wege angereizt werden, und selbst mit einer harten Begrenzung wären aus den genannten Gründen flankierende Maßnahmen vermutlich unerlässlich. Somit stellt sich dem Staat eine Koordinationsaufgabe bei der Lenkung der entsprechenden wirtschaftlichen Prozesse, die er durch Marktkräfte allein (ob mit oder ohne harten Mengendeckel) auf dem politisch gewünschten Pfad nicht vollständig in der gesetzten Zeitspanne implementieren würde.

⁵⁸ Wobei darauf hinzuweisen ist, dass es für das im Herbst 2019 beschlossene Klimaschutzprogramm 2030 bisher kein begleitendes Monitoring gibt.

5 Weiterführende Betrachtungen

5.1 Indikatoren für Monitoring und Governance von Klimazielen

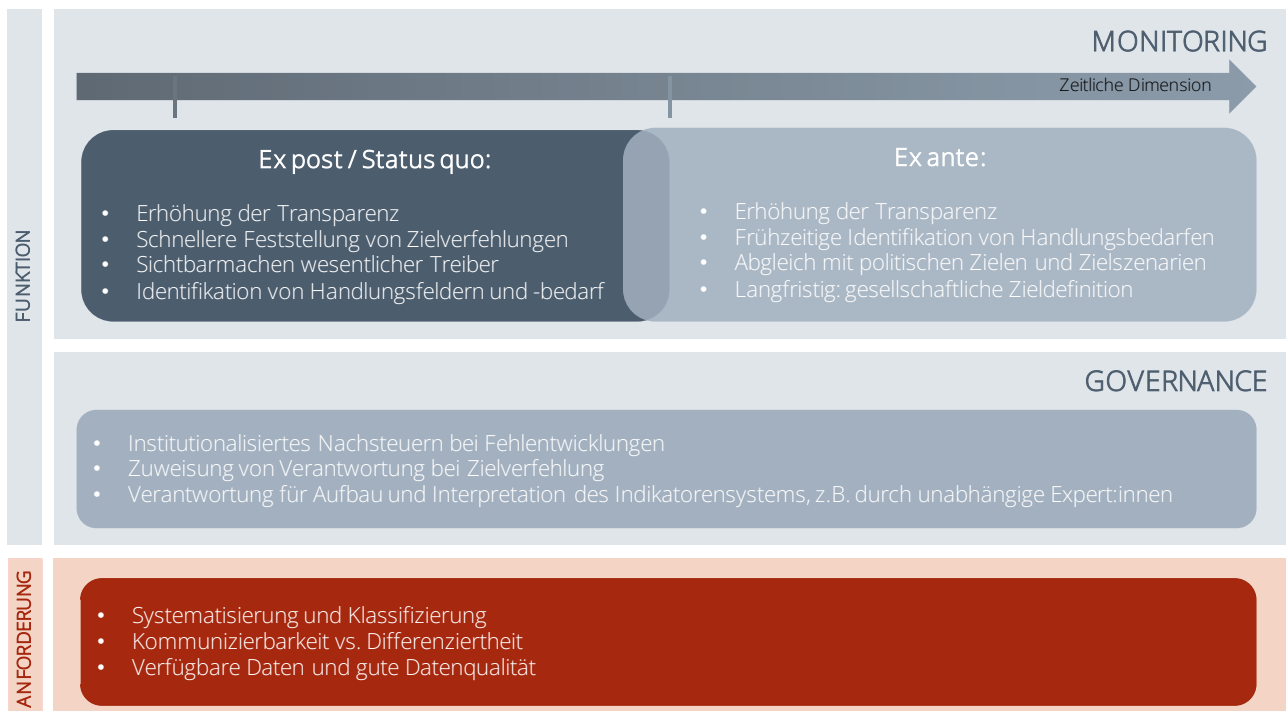
- 279 Die Analysen dieses Berichts haben gezeigt, dass mit einer Fortsetzung der Klimapolitik der vergangenen Jahre die Erreichung der Ziele des Bundes-Klimaschutzgesetzes unwahrscheinlich ist. Die tiefergehenden Analysen konnten an verschiedenen Stellen Treiber und Ursachen für das beobachtete Geschehen liefern, insbesondere auch dort, wo Ziele nicht erreicht wurden. Generell wäre es hilfreich, solche Analysen systematischer und frühzeitiger durchzuführen und zu bündeln, um i) ein vollständiges Bild der deutschen Klimapolitik als Basis zu haben und nicht nur auf sektorale THG-Ziele zu fokussieren und ii) bei Verfehlungen schneller nachsteuern zu können. Indikatoren⁵⁹ können dabei eine wichtige Funktion für Monitoring und Governance von Klimazielen einnehmen.
- 280 Es besteht eine große Bandbreite, wie Indikatorensysteme genutzt werden können, wobei das jeweilige Ziel der Anwendung von Indikatoren eine entscheidende Rolle für die Ausgestaltung derselben spielt. Im Folgenden wird neben den unterschiedlichen Funktionen, die Indikatoren in der Klima-Governance in Deutschland einnehmen könnten, und den Anforderungen an Indikatoren auch auf die bereits bestehende Umsetzung in anderen Ländern sowie auf Optionen für einen möglichen Prozess der Umsetzung eingegangen. Das Kapitel knüpft damit an frühere Überlegungen des Expertenrats für Klimafragen zum Monitoring und zur Weiterentwicklung des Bundes-Klimaschutzgesetzes an (ERK 2021b; 2022b). Zudem basieren einige Überlegungen in diesem Kapitel auf einem Expert:innenworkshop, der vom Expertenrat für Klimafragen durchgeführt wurde⁶⁰.
- 281 Generell kann zwischen einer Monitoring- und einer Governance-Funktion von Indikatoren unterschieden werden⁶¹. Die Monitoring-Funktion von Indikatoren ist vor allem in der Schaffung von Transparenz zu sehen, während die Governance-Funktion hauptsächlich in der Ausgestaltung der politischen Handlung liegt (siehe Abbildung 110). Dabei können die beiden Funktionen auch ineinandergreifen und ein Monitoring-Prozess Teil des Governance-Systems sein. Im Rahmen der Monitoring-Funktion können die Funktionen nochmals nach der zeitlichen Dimension (ex post und ex ante) eingeordnet werden, wobei dies teilweise ineinander übergeht und überlappen kann. Übergreifend bestehen zudem gewisse Anforderungen an Indikatoren, beispielsweise die Bereitstellung und Verfügbarkeit von Daten. Eine schematische Darstellung der Funktionen und Anforderungen für die Nutzung von Indikatoren und Indikatorensystemen stellt Abbildung 110 dar.

⁵⁹ Allgemein gesprochen ist ein Indikator eine „Kennzahl [...] die einen betrachteten Sachverhalt adäquat illustriert“ (UBA 2016). Im Kontext dieses Gutachtens werden Indikatoren als Kennzahlen zur Darstellung von Entwicklungen verstanden, welche Vergangenheit, Status Quo und mögliche zukünftige Entwicklungen abbilden. Beispiele hierfür sind die in den vergangenen Kapiteln gezeigten Indikatoren zur installierten Leistung von Photovoltaik, der Anzahl der installierten Wärmepumpen oder des Verkaufs an batterieelektrischen Fahrzeugen.

⁶⁰ Workshop des Expertenrats für Klimafragen „Die Rolle von Indikatoren für die Klima-Governance in Deutschland“ am 12.10.2022. Externe Teilnehmende waren: Daniela Fietze (Stiftung Umweltenergierecht), Andreas Löschel (Expertenkommission Energiewende-Monitoring), Thorsten Müller (Stiftung Umweltenergierecht), Karsten Neuhoff (DIW, Klimapolitik), Eberhard von Rottenburg (BDI), Wolf-Peter Schill (DIW, EVU) und Eike Karola Velten (Ecologic).

⁶¹ Unter Monitoring versteht der Expertenrat die Beobachtung oder Überwachung von Prozessen und unter der Governance das politische Steuerungs- und Regelungssystem.

Abbildung 110: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Funktionen und Anforderungen an Indikatoren



Eigene Darstellung.

282 Die in diesem Gutachten beschriebenen Entwicklungen in den KSG-Sektoren verdeutlichen, dass der alleinige Fokus auf die Emissionsentwicklung nicht ausreicht, um ein umfassendes Bild des Status quo der Transformation auf dem Weg zur Klimaneutralität in den einzelnen Sektoren zu zeichnen. Zusätzliche Indikatoren für ein ex post Monitoring ermöglichen hier eine erhöhte Transparenz zum Verständnis der Entwicklungen im Betrachtungszeitraum. Die vorangegangenen Analysen haben außerdem gezeigt, dass in einigen Sektoren eine große Umsetzungslücke zwischen den im Bundes-Klimaschutzgesetz festgesetzten jahresscharfen Sektorzielen und den bisher beschlossenen Maßnahmen besteht. Die Übersetzung der Emissionsziele auf die Ebene von Indikatoren kann hierbei eine schnellere Feststellung von Zielverfehlungen und eine Analyse der Ursachen und Treiber dieser Umsetzungslücke und fehlender Fortschritte bei wichtigen Stellschrauben zur Erreichung der Klimaziele ermöglichen. Dabei können Handlungsfelder und der Handlungsbedarf genauer identifiziert werden. Dabei könnten sowohl aktivitäts- als auch kapitalstockorientierte Aspekte erfasst werden (siehe Kapitel 2 und Kapitel 3.2). Aktivitätsorientierte Indikatoren könnten hierbei die Wohnfläche pro Kopf oder Personenkilometer pro Kopf sein. Indikatoren, die den (fossilen) Kapitalstock analysieren, wären hingegen zum Beispiel die Anzahl fossil betriebener Pkw, der Anteil fossiler Energieträger am Endenergieverbrauch der Industrie oder die installierte Leistung der Windenergie an Land. Die Betrachtung und Analyse von zusätzlichen Indikatoren können daher wichtige Funktionen für ein effektives Monitoring des Status quo der Transformation in den Sektoren erfüllen.

283 Das Konzept von Indikatoren als Monitoring-Tool für die Energiewende ist in Deutschland im Rahmen der Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“ bereits etabliert (Löschel et al. 2021). Die Kommission veröffentlicht über das federführende Ressort (BMWK) jedes Jahr einen Monitoring-Bericht mit Indikatoren aus verschiedenen Bereichen wie erneuerbare Energieträger,

Gebäude und Wärmewende sowie Verkehr; alle zwei Jahre wird außerdem ein ausführlicherer Fortschrittsbericht zur Energiewende vorgelegt. Hierbei liegt der Fokus auf der Darstellung vergangener Entwicklungen bei den ausgewählten Indikatoren.

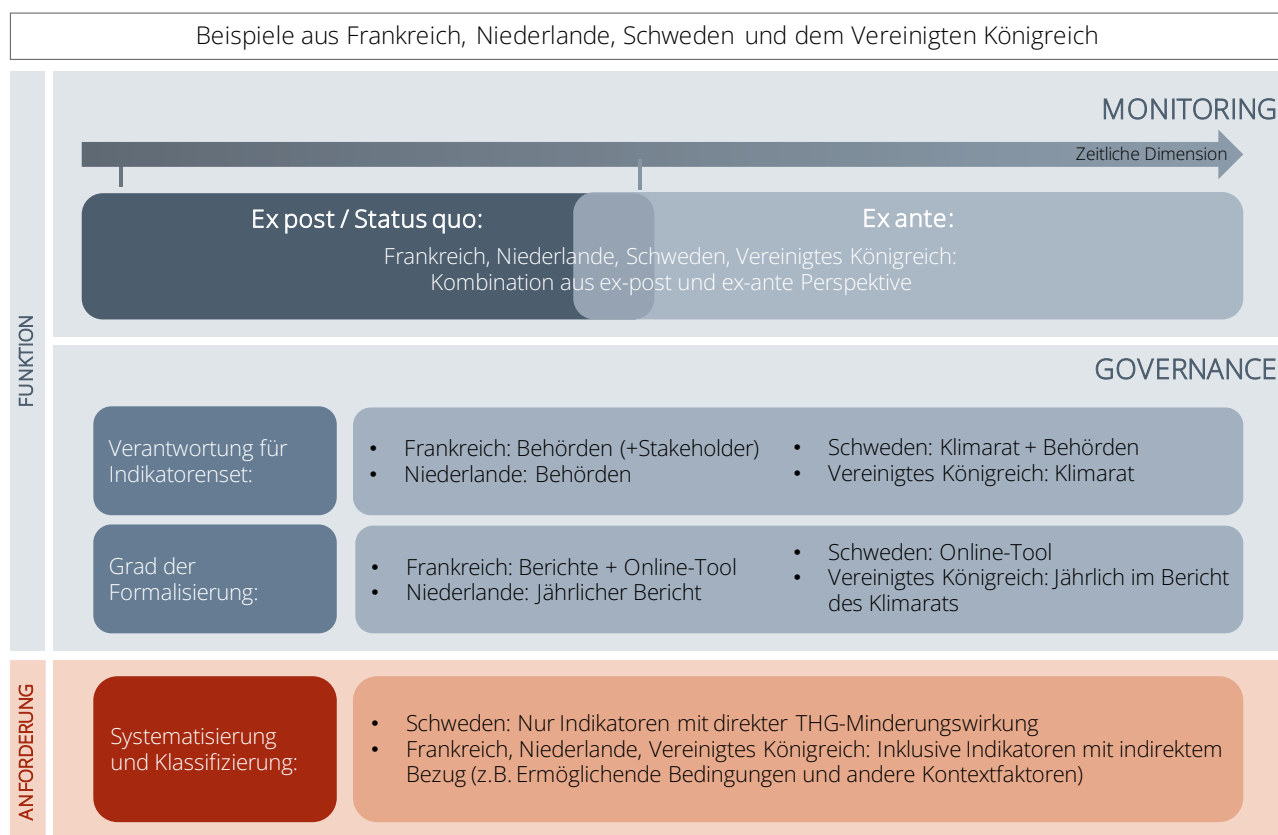
- 284 Indikatoren können auch eine vorausschauende (ex ante) Funktion haben, um schon frühzeitig Handlungsbedarfe zu identifizieren. Indikatoren stellen damit die notwendigen Informationen für das Management der Einführung von Politikmaßnahmen bereit (Cust 2009) und ermöglichen somit ein frühzeitiges Nachsteuern durch die Politik. Dabei kann der vergangene Trend relevanter Indikatoren mit politischen Zielen oder Zielszenarien abgeglichen werden. Dies wurde in Kapitel 3.2 exemplarisch für die Sektoren durchgeführt und wird auch zum Beispiel im Ampel-Monitor Energiewende (DIW 2022) bereits für einige Indikatoren umgesetzt. Auch im Projektionsbericht werden Indikatoren in Fünf-Jahresschritten bis zum Jahr 2040 ausgewiesen (Öko-Institut et al. 2021), auf dessen Basis ein Abgleich zwischen aktueller Projektion und Zielen möglich wäre. Eine weitere Möglichkeit für einen vorausschauenden Blick besteht darin, Indikatoren zu analysieren, die zeitlich vor dem Entstehen der THG-Emissionen ansetzen. Beispiele hierfür sind Flächenausweisungen für Solar- oder Windparks für eine Abschätzung des künftigen Ausbaus der erneuerbaren Energieträger; die Anzahl von Auszubildenden oder Stellenausschreibungen in bestimmten Handwerksbereichen, um einen möglichen künftigen Fachkräftemangel abschätzen zu können; Bestellungen von Solarpanelen, um mögliche Zubauten abschätzen zu können; der Fortschritt beim Infrastrukturausbau wie Netzausbau oder Ladepunkte für Elektromobilität. Hier liefern Matthes et al. (2022) und Fietze et al. (2021) erste Zusammenstellungen von sogenannten „Frühindikatoren“. Eine weitere ex ante Funktion, die Indikatoren einnehmen könnten und die über eine reine Monitoring-Funktion hinausgeht, ist die einer langfristigen gesellschaftlichen Zieldefinition, also eine Übersetzung des Ziels der Klimaneutralität auf konkrete Kennwerte in der Zukunft, die Teil der politischen und gesellschaftlichen Debatte sind.
- 285 Neben ihrer Monitoring-Funktion können Indikatoren auch unmittelbar für die Governance genutzt werden. Die Einbeziehung von Indikatoren könnte sowohl institutionalisiertes frühzeitiges Nachsteuern ermöglichen als auch eine klare Zuweisung von Verantwortlichkeiten bei Zielverfehlung ermöglichen, wie das im jetzigen Bundes-Klimaschutzgesetz auf Basis von Sektorzielen der Fall ist. Zuletzt wurden verschiedene Vorschläge gemacht, wie Indikatoren auch in der Governance des Bundes-Klimaschutzgesetzes stärker verankert werden könnten. Fietze et al. (2021) regen an, das bereits bestehende Monitoring von CO₂-Emissionen im Bundes-Klimaschutzgesetz (ex post Perspektive) um Indikatoren für Klimaschutz („Frühindikatoren“) zu ergänzen (ex ante Perspektive), um das Management der Energiewende zu verbessern und Regierungshandeln besser planbar und nachvollziehbar zu machen. Der ausschließliche Fokus auf Treibhausgasreduktionen auf Sektorebene (die aktuell die alleinige Zielgröße darstellen) erlaube es erst mit Verzögerung Fortschritte zu erkennen. Die den konkreten Emissionsminderungen vorgelagerten transformativen Maßnahmen (z. B. Netzausbau als Voraussetzung für den Ausbau erneuerbarer Energieträger) werden jedoch nicht abgebildet. In eine ähnliche Richtung argumentieren Matthes et al. (2022), welche die Schaffung der notwendigen Prozesse und Datengrundlagen für die Nutzung von Frühindikatoren anregen. Auf Basis der Frühindikatoren könnten Zielabweichungen für die Emissionsminderungspfade frühzeitig erkannt und entsprechende Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Auch Flachsland et al. (2021) schlagen vor, Leitindikatoren zu entwickeln, deren Analyse eine frühzeitige Nachsteuerung ermöglichen.

5.1.1 Die Funktion von Indikatoren für Monitoring und Governance in anderen Ländern

- 286 In einigen Ländern werden Indikatoren für das Monitoring des Fortschritts hin zur Klimaneutralität eingesetzt und sind auch in der Klimaschutz-Governance der Länder verankert. Im Folgenden werden beispielhaft ausgewählte Aspekte aus den bestehenden Systemen in Frankreich (Ministry for the Ecological and Solidary Transition 2020), den Niederlanden (EZK 2021), Schweden (Swedish Climate Policy Council 2022) und dem Vereinigten Königreich (CCC 2022) dargestellt. Die Indikatorensysteme in den vier Ländern wurden alle in den vergangenen Jahren neu aufgebaut und betten sich in die nationalen Zielsetzungen zur THG-Minderung ein. Gemeinsamkeit über alle Systeme hinweg ist die Zielsetzung, die Informationslage zu verbessern und zu ermitteln, wo Änderungen in der aktuellen Entwicklung erforderlich sind, um die nationalen Emissionsziele zu erreichen. In ihrer konkreten Ausgestaltung unterscheiden sich die Systeme jedoch. Eine graphische Übersicht, wie die vier Länder Indikatoren nutzen, befindet sich in Abbildung 111.
- 287 Unterschiede bestehen dahingehend, wer in den Ländern jeweils die Verantwortung für Aufbau und Interpretation der Indikatorensysteme trägt: die Regierung bzw. nationale Behörden oder eine unabhängige, wissenschaftliche Institution. Im Vereinigten Königreich hat der nationale Klimarat, das Climate Change Committee (CCC), den Rahmen für das Monitoring erstellt. Er greift hierbei auch auf öffentliche Statistiken zurück. In Schweden wurde das Monitoring-System durch den nationalen Klimarat, den Swedish Climate Policy Council, zusammen mit der nationalen Energieagentur und der nationalen Umweltbehörde aufgesetzt. In den Niederlanden sind es hingegen allein nationale Behörden, welche für den Aufbau des Indikatorensystems verantwortlich sind. In Frankreich ist es ebenso das Ministerium für Umwelt und nachhaltige Entwicklung, welches als nationale Stelle für den Aufbau und die Entwicklung des Indikatorensystems verantwortlich ist. In Frankreich wurden jedoch auch verschiedene gesellschaftlich relevante Interessengruppen in den Prozess der Auswahl von Indikatoren einbezogen.
- 288 Zudem bestehen Unterschiede im Formalisierungsgrad und der Governance. So wurden zum Beispiel im Vereinigten Königreich bereits in der Vergangenheit einzelne Indikatoren in den jährlichen Berichten an das Parlament dargestellt. Im Jahr 2022 wurden diese durch ein umfassendes Rahmenwerk mit sektoralen „Monitoring Maps“ formalisiert. In Frankreich werden jährliche Berichte zu einem kleinen Set von Indikatoren veröffentlicht, welches die Entwicklung der nationalen THG-Emissionen auf Basis des Inventars sowie zentrale Größen wie den Energieverbrauch in den Sektoren umfasst. Alle zwei Jahre werden Berichte zu einem umfassenderen Set von Indikatoren veröffentlicht, die eine genauere Perspektive auf die Entwicklungen in den Sektoren sowie auf Kontextfaktoren ermöglichen. Zudem werden die Indikatoren in einem Online-Tool veröffentlicht und somit für Externe nutzbar gemacht (Ministry for the Ecological Transition 2021). In den Niederlanden werden auf Basis des Bundes-Klimaschutzgesetzes jährliche Berichte des sogenannten Klimapolitik-Monitors („Monitor Klimaatbeleid“) als Beilage zum sogenannten Klimamemorandum („klimaatnota“) veröffentlicht, welches das Wirtschaftsministerium dem Parlament und dem Senat übergibt (Muinzer 2020). Die Indikatoren in den Niederlanden ergänzen den jährlichen „Klima- und Energieausblick“ (Klimaat- en Energieverkenning), der am ehesten dem deutschen Projektionsbericht entspricht. Die Indikatoren sollen die übergeordneten Emissionsprojektionen unterbrechen und die Politik bei der Entwicklung von Maßnahmen unterstützen. In Schweden wird das Monitoring in einem Online-Dashboard kommuniziert, auf das in den jährlichen Berichten des nationalen Klimarats Bezug genommen wird. Im Gegensatz zu den Systemen im Vereinigten Königreich oder den Niederlanden werden in den jährlichen Berichten des schwedischen Klimarats jedoch nicht systematisch alle Indikatoren gezeigt, sondern es wird nur auf die Relevanz einzelner Indikatoren für Aussagen im Bericht hingewiesen.

- 289 In allen vier Ländern wird eine Kombination von ex post und ex ante Perspektive für Indikatoren genutzt. Dies bezieht sich sowohl auf die Auswahl der Indikatoren, wobei sowohl Indikatoren zur Entwicklung des fossilen Kapitalstocks als auch von Transformationstechnologien dargestellt werden, als auch auf die Darstellung der ex ante-Perspektive von einzelnen Indikatoren. So verfügt zum Beispiel das Climate Change Committee (CCC) im Vereinigten Königreich über ein eigenes Klimaneutralitätsszenario („CCC Balanced Net Zero Pathway“) das mit dem aktuellen Bestand abgeglichen wird. Zudem wird auch ein Szenario der Regierung verwendet oder Indikatoren nicht fortgeschrieben, wenn diese in den Modellierungen nicht abgebildet sind.
- 290 Zudem bestehen Unterschiede in den Klassifizierungen der Indikatoren. Die Klassifizierungen bestimmen dabei auch indirekt wie weit der Fokus der jeweiligen Systeme ist. Während zum Beispiel im Fall von Schweden nur Indikatoren mit einer direkten Minderungswirkung auf die THG-Emissionen dargestellt werden, werden in Frankreich, den Niederlanden und dem Vereinigten Königreich auch Indikatoren mit einem indirekten Bezug dargestellt. Das Climate Change Committee erstellt beispielsweise Wirkungsräume (sogenannte „Monitoring Maps“) für die einzelnen Sektoren, die die Indikatoren entlang von notwendigen Outcomes (z. B. reduzierter Energiebedarf in Gebäuden), ermöglichenden Faktoren („Enablers“, wie z. B. Anzahl der qualifizierten Fachkräfte), Policies (z. B. Energieeffizienzstandards) und Kontextfaktoren (z. B. Großhandelspreis für Gas) klassifiziert CCC (2021).

Abbildung 111: Übersicht über Funktionen und Anforderungen an Indikatoren in ausgewählten anderen Ländern



Eigene Darstellung.

5.1.2 Umsetzung und Prozess

- 291 Im Bundes-Klimaschutzgesetz basiert sowohl das Monitoring als auch die Nachsteuerung bisher ausschließlich auf den sektoralen Jahresemissionsmengen bzw. vergangener Zielverfehlung bei der Einhaltung dieser Obergrenze. Weder werden zusätzliche Indikatoren zur besseren Einschätzung des Gesamtbilds betrachtet, noch sind Elemente einer vorausschauenden ex ante Betrachtung enthalten. Das kann dazu führen, dass strukturelle Fehlentwicklungen in einem Sektor zu spät erkannt werden und dass zudem immer nur mit kleinteiligen Sofortprogrammen nachgesteuert wird (siehe dazu auch die Ausführungen zur Weiterentwicklung des KSGs im Prüfbericht des Expertenrats (ERK 2022b)). Eine mögliche Abhilfe wäre, dass das bislang ausschließliche Monitoring der sektoralen Emissionswerte durch die Einbeziehung weiterer (Früh-)Indikatoren erweitert wird, die eine Abschätzung zu strukturellen Wirkungen klimapolitischer Maßnahmen erlauben. Zudem könnten auch Betrachtungen im Ausblick (ex ante) bei der Entwicklung klimapolitischer Maßnahmen einbezogen werden, um ein besseres Gesamtbild zu bekommen und auf dieser Basis zu einer besseren Steuerung zu gelangen, die auch um eine vorausschauende ex ante Betrachtung ergänzt werden könnte (ERK 2022b, Kap.7.3.2). Ob diese verpflichtend oder nur indikativ wären, ist dabei eine wichtige, aber nachgelagerte Frage. Wichtig ist, zunächst ein Indikatorensystem zu entwickeln, welches den im folgenden formulierten Ansprüchen genügt. Der Expertenrat für Klimafragen regt an, einen koordinierten Prozess zu starten, um eine verbesserte Nutzung von Indikatoren in der deutschen Klimapolitik zu ermöglichen.
- 292 Für die Umsetzung ist dabei zunächst wichtig zu klären, welches Ziel ein Indikatorensystem erfüllen soll, da dieses auch Auswirkungen auf die Auswahl der Indikatoren hat. Neben den Sektorzielen des KSG, deren jährliches Monitoring und Nachsteuerung über das Bundes-Klimaschutzgesetz geregelt ist, könnten weitere mögliche Indikatoren Bezug nehmen auf die im Koalitionsvertrag formulierten Ziele oder auf Europäische Ziele in Bezug auf Energieeffizienz oder den Ausbau der erneuerbaren Energieträger. In einem zweiten Schritt sollte für die Umsetzung die Rolle verschiedener Akteure geklärt werden und zwar hinsichtlich i) der Verantwortung für die Aufstellung eines (Kern-)Indikatorensystems, ii) der Verantwortung für den Aufbau bzw. die Bereitstellung und Pflege der Daten, sowie iii) der Interpretation der Indikatoren im Sinne der Zielerreichung. Zudem sind iv) die möglichen Rechtsfolgen und Verantwortlichkeiten im Falle von Verfehlungen von Zielindikatoren zu klären. Ob eine staatliche Stelle oder ein unabhängiges wissenschaftliches Gremium ein Indikatorensystem aufsetzt, ist eine Kernfrage für die Ausgestaltung der Governance. Der Expertenrat für Klimafragen hält es in einer ersten Einschätzung für sinnvoll, die Interpretation der Indikatoren und deren Zielerreichung und Zielkongruenz einem wissenschaftlichen Gremium zuzuweisen, um Unabhängigkeit im Prozess zu gewähren. In einer wissenschaftlichen Interpretation können zudem weitere Analysen oder Indikatoren herangezogen werden, um Evidenz zu erhärten. Wie die Governance-Funktion von Indikatoren in anderen Ländern bereits ausgestaltet ist, wird im vorangegangenen Kapitel beschrieben und ist in Abbildung 111 dargestellt.
- 293 Um ein geeignetes Indikatorensystem aufzustellen, könnte ein entsprechender Prozess definiert werden. Dieser könnte eine Evaluation und Abgleich mit den bestehenden Monitoring-Systemen bzw. den bereits verwendeten Indikatoren (z. B. der Monitoring-Kommission) und Best-Practice Analyse aus anderen Ländern beinhalten (siehe dazu Kapitel 5.1.1). Auch ein Abgleich mit den bereits ausgewiesenen Indikatoren und dem Prozess des Projektionsberichts alle zwei Jahre wäre sinnvoll. Denkbar ist auch eine Einbeziehung von weiteren Stakeholdern wie in Frankreich. Eine Vereinheitlichung von Kernindikatoren wäre für die Vergleichbarkeit mit anderen Ländern und auch für eine Analyse auf europäischer Ebene (s.u.) wünschenswert. Es könnten außerdem relevante Kriterien für die Auswahl definiert werden. Indikatoren könnten wissenschaftlich hergeleitet werden, jedoch auch mit anderen

Stakeholdern zum Beispiel aus Zivilgesellschaft und Wirtschaft gespiegelt werden. Dies könnte über sektorspezifische Expert:innenworkshops sichergestellt werden.

- 294 Die europäische Ebene ist bei diesem Prozess mitzudenken. Denn Indikatoren bzw. Indikatorsysteme spielen im Rahmen der Governance der EU-Energie- und Klimapolitik bereits eine wichtige Rolle. So werden im Rahmen der Nationalen Energie- und Klimapläne (NECPs) auf Grundlage der Durchführungsverordnung der Europäischen Kommission (Europäische Kommission 2020) von den Mitgliedstaaten neben den THG-Emissionen diverse andere sektorale und sektorenübergreifende Indikatoren an die Europäische Kommission berichtet. Viele der Indikatoren, die in der Durchführungsverordnung genannt werden (Anhang 1, Abschnitt B, Teil 2), wurden auch in diesem Bericht des Expertenrats dargestellt und analysiert. Die Erstellung eines Indikatorensystems für Deutschland sollte daher im Abgleich mit dem europäischen Berichtspflichten stattfinden, um von vorneherein Konsistenz und Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Auch der in diesem Jahr berufene europäische Klimarat (European Scientific Advisory Board on Climate Change)⁶² könnte in diese Überlegungen mit einbezogen werden.
- 295 Es gibt verschiedene Anforderungen, die ein Indikatorensystem erfüllen sollte und die relevant für die Auswahl von Indikatoren sind (siehe Abbildung 110). Unter anderem besteht ein Spannungsfeld zwischen der Anforderung der Kommunizierbarkeit eines Indikatorensystems, was ein kleineres und einfaches Set favorisieren würde, und der Differenziertheit des Systems, was ein breiteres und komplexeres Set nach sich ziehen würde. Eine Möglichkeit, dieses Spannungsfeld aufzulösen ist die Nutzung verschiedener Hierarchieebenen und einer Systematisierung und Klassifizierung des Indikatorensystems. Umsetzungsbeispiele und Klassifizierungen aus anderen Ländern wurden am Ende des letzten Unterkapitels 5.1.1 diskutiert. Da in den KSG-Sektoren unterschiedliche Herausforderungen der Dekarbonisierung bestehen, ist es sinnvoll, Indikatorensätze auf Ebene der Sektoren zu entwickeln. Eine grundsätzliche und notwendige Anforderung an Indikatoren ist die Datenverfügbarkeit und eine gute Datenqualität siehe UBA (2016). Diese stellt in einigen Sektoren ein zentrales Hindernis dar und wird daher im nachfolgenden Kapitel 5.2 diskutiert.

5.2 Anmerkungen zur Datenverfügbarkeit

- 296 Die Verfügbarkeit qualitativ hochwertiger, aussagekräftiger Daten bildet eine wesentliche Voraussetzung, um Fragen nach Gründen beobachteter Entwicklungen im Bereich der THG-Emissionen beantworten zu können. Dabei spielt neben der Verfügbarkeit der Daten als solcher auch die Bilanzgrenze für ihre Erhebung eine wichtige Rolle, um konsistente Ableitungen zum Beispiel zur Korrelation von THG-Emissionen und Energieverbräuchen treffen zu können. Während z. B. Emissionsdaten der Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention und dem Kyoto-Protokoll generell das Quellprinzip zugrunde legen, betrachten Energiestatistiken oftmals sämtliche Energieverbräuche in einem Sektor. In diesem Unterkapitel wird die Datenverfügbarkeit für die verschiedenen Sektoren schlaglichtartig betrachtet. Zusätzlich wird aufgezeigt, ob in den Sektoren ausreichend Daten verfügbar sind, um ein vollständiges Bild der gegebenen Situation zu zeichnen und an welchen Stellen Datenlücken bestehen.

⁶² Das European Scientific Advisory Board on Climate Change (ESABCC) wurde auf Basis des europäischen Klimagesetzes von 2021 im März 2022 berufen und umfasst 15 Mitglieder (ESABCC 2022).

- 297 Insgesamt ist die Datenverfügbarkeit und -qualität hinsichtlich wichtiger Indikatoren je nach Sektor sehr unterschiedlich. Einerseits ist oft eine Vielzahl von Daten vorhanden, die zum Beispiel auch aus verschiedenen Berichtspflichten resultieren. Andererseits stammen die Daten häufig aus sehr vielen verschiedenen Quellen und Berichtsarten und verfolgen unterschiedliche Zielsetzungen, was zu verschiedenen Bilanzierungen führt. Darüber hinaus sind viele Daten nicht öffentlich zugänglich. Zudem ist die zeitliche Abfolge der Datenveröffentlichung sehr unterschiedlich. Dies erschwert eine Gesamtbetrachtung erheblich, da die verschiedenen Daten oft nicht ohne weiteres zueinander in Bezug gesetzt werden können bzw. in einigen Fällen auch nicht zueinander passfähig sind. Demzufolge wäre, zumindest jeweils innerhalb eines Sektors, eine zentrale und vereinheitlichte Datenerhebung wünschenswert.
- 298 Im Sektor Energiewirtschaft ist generell eine sehr gute Datenverfügbarkeit gegeben. Allerdings ist vor allem für Genehmigungsprozesse und Genehmigungsdauern die Datengrundlage dünn, sodass der Einblick in die „Pipeline“ des Ausbaus insbesondere von Windkraftanlagen und PV-Anlagen fehlt. Außerdem sind die Daten teils schwer auffindbar und unübersichtlich gestaltet. Zusätzlich ist teilweise die zeitliche und räumliche Auflösung der Daten nicht ausreichend (dena 2022). Am häufigsten sind die Daten auf deutschlandweiter Ebene zu finden. Die Auflösung nach Bundesländern, Landkreisen oder Gemeinden ist nicht immer gegeben. Bei der zeitlichen Auflösung dominiert die jährliche Auflösung.
- 299 Im Industriesektor ist die Datenverfügbarkeit grundsätzlich gut, insbesondere, da durch die Industrieemissionsrichtlinie Berichtspflichten für Unternehmen bestehen (Europäisches Parlament 2010). Aus Geheimhaltungsgründen ist bei diesen Daten allerdings zum Teil eine Aggregation notwendig, die somit je nach Umfang weitere Analysen erschwert. Eine weitere große Hürde stellen die verschiedenen Bilanzierungstypen und Aufschlüsselungen dar. So werden zum Beispiel in den Inventardaten circa 70 % der THG-Emissionen der Brennstoffverbrennung in der CRF-Kategorie 1.A.2.gviii (Sonstige) gelistet. Solch mangelnde Aufschlüsselungen erschweren etwaige detailliertere Analysen innerhalb des Sektors sowie deckungsgleiche Vergleiche mit anderen Bilanzen und Datenquellen deutlich.
- 300 Die Verfügbarkeit öffentlich zugänglicher Daten im Sektor Gebäude ist eingeschränkt. In Deutschland gibt es amtliche Statistiken sowie wissenschaftliche und wirtschaftliche Statistiken wie Verbandszahlen oder Förderstatistiken, die Aufschluss über einzelne Merkmale des Gebäudebestands geben. Jedoch werden Änderungen des Gebäudebestands hinsichtlich der strukturellen Merkmale Heizsystem und energetische Qualität der Gebäudehülle nicht regelmäßig amtlich erhoben. Daher bestehen Datenlücken, die eine kontinuierliche Beobachtung der strukturellen Veränderung erschwert. Somit können wichtige Indikatoren bzw. Daten zu energetischen Sanierungsraten und dem energetischen Zustand des Gebäudebestands bzw. von Energieeffizienz-Labels nicht ausreichend gemessen werden. Der verschiedentlich diskutierte Aufbau eines bundesweiten Gebäude- und Wohnungsregisters würde erheblich helfen, eine vollständige Transparenz über den Sanierungsstatus und die technische Ausstattung des Gebäudesektors zu erhalten und somit wesentlich zu einem effektiven Monitoring der für die Emissionsentwicklung relevanten Ursachen beitragen. Ein Gebäude- und Wohnungsregister gibt es beispielsweise schon seit dem Jahr 2004 in Österreich. Zusätzlich besteht in Österreich eine Energieausweisdatenbank. Mittels dieser Daten ist neben Fragen der Wohnungspolitik und Fragen der örtlichen Raumplanung auch eine zielgenauere Entwicklung von Maßnahmen zur Erreichung der Klimaziele möglich. Die Erkenntnisse aus einer solchen Datenbank können beispielsweise direkte Auswirkungen auf Förderbestände und -höhen haben (Statistik Austria 2022).
- 301 Für den Sektor Verkehr ist die Datenverfügbarkeit grundsätzlich gut. Während die TREMOD-Daten, welche die Grundlage der nationalen Berichterstattung der THG-Emissionen darstellen, nicht öffentlich

verfügbar sind, ist eine Vielzahl an Daten allgemein zugänglich. Grundlegende Probleme bestehen darin, dass im Verkehrssektor lediglich modellbasierte Daten zu realen Verbräuchen und damit auch entsprechenden THG-Emissionen existieren. Zudem bestand in der Vergangenheit eine Diskrepanz zwischen den amtlich eingetragenen und realen Werten.

- 302 Die Datenverfügbarkeit im Sektor Landwirtschaft ist aufgrund von Landwirtschaftszählungen, Agrarstrukturerhebungen und jährlichen Berichtspflichten der landwirtschaftlichen Betriebe ebenfalls sehr gut. Die Daten sind öffentlich einsehbar, allerdings bei verschiedenen Behörden (u. a. BMEL, BZL, Destatis, Thünen-Institut) zu finden, sodass auch im Sektor Landwirtschaft eine zentrale und vereinheitlichte Datenerhebung fehlt. Datenlücken in der Landwirtschaft bestehen bei der Menge an ausgebrachtem Wirtschaftsdünger.
- 303 Im Sektor Abfallwirtschaft ist die Datenlage zu Abfallströmen grundsätzlich gut. Aus Perspektive der THG-Emissionen bestehen jedoch erhebliche Unsicherheiten in Bezug auf die tatsächliche Höhe der THG-Emissionen aus Altdeponien, da diese aufgrund der diffusen Art der THG-Emissionen aktuell nur modellbasiert geschätzt werden. Hier könnten ergänzende Methoden zur Erfassung von Deponiegasmengen dazu beitragen, Unsicherheiten zu verringern (Elpelt-Wessel 2022).
- 304 Ein weiterer Aspekt der begrenzten Datenverfügbarkeit ist, dass der Turnus der Datenaktualisierung zum Teil sehr langsam ist, wie beispielsweise im Sektor LULUCF. Für aktuell verwendete Methoden werden die benötigten Daten teils nur alle zehn Jahre neu erfasst, wie bei der Bundeswaldinventur. Somit ist die Aussagekraft von Modellierungen begrenzt. Allerdings sollen die Treibhausgasdaten in einem neuen Forschungsprojekt (BMBF 2022) zusammengetragen werden, wodurch die Zugänglichkeit mittelfristig verbessert werden kann.
- 305 Neben der sektorspezifischen Datenverfügbarkeit sollte auch die Datenverfügbarkeit von Verbrauchsdaten durch neue intelligente Messsysteme (Smart Metern) berücksichtigt werden. Mit dem Einbau von Smart Metern können die Stromverbräuche zeitlich hochaufgelöst und transparent nachverfolgt werden. Für Zwecke des Monitorings treibender Faktoren für die Emissionsentwicklung wäre es hilfreich, Daten aus Smart-Meter-Messungen in anonymisierter und ausreichend aggregierter Form verwenden zu können.⁶³
- 306 Ein weiterer Aspekt ist zeitliche Abfolge der Datenerhebung und Berichtsveröffentlichung. Der Projektionsbericht⁶⁴ wird in einem zweijährigen Turnus veröffentlicht. Der letzte Projektionsbericht wurde im Jahr 2021 veröffentlicht und beschreibt die Entwicklung der THG-Emissionen in Deutschland im Zeitraum 2021 bis 2040 unter besonderer Berücksichtigung der beschlossenen Klimaschutzmaßnahmen (Öko-Institut et al. 2021). Im aktuellen Veröffentlichungsturnus wird das Zweijahresgutachten des Expertenrats für Klimafragen und der Projektionsbericht nicht im selben Jahr

⁶³ Die dritten Binnenmarktrichtlinien Strom und Gas (2009/72/EU und 2009/73/EU) geben den Mitgliedstaaten vor, dass bis zum Jahr 2020 80 % der privaten Haushalte mit einem Smart Meter ausgestattet sein müssen. Auf Basis einer Kosten-Nutzen-Analyse, die auch in Deutschland durchgeführt wurde, ist ein anderer Ansatz möglich (Europäisches Parlament und Union 2009). In Deutschland besteht seit dem Jahr 2020 die Einbaupflicht von Smart Metern ab einem Stromverbrauch von 6000 kWh/Jahr. Schließlich sollen bis zum Jahr 2032 nach den Vorstellungen des BMWK (ehemals BMWi) alle analogen Zähler gegen digitale Stromzähler ausgetauscht werden. Bei einem Stromverbrauch unter 6 000 kWh/Jahr ist es außerdem möglich den digitalen Stromzähler freiwillig zu einem Smart Meter zu erweitern (BDEW 2017). Spitzenreiter im europäischen Vergleich bezüglich der Ausbauzahlen von Smart Metern ist Italien, das über 90 % der Zählerpunkte mit Smart Metern ausgestattet hat (36 Mio.), gefolgt von Schweden mit 26 Mio. (Stand 2018) (Gähns et al. 2021).

⁶⁴ Mit dem Projektionsbericht erfüllt die Bundesregierung eine europarechtliche Pflicht (Öko-Institut et al. 2021). Der Bericht beruht weitestgehend an den von der EU-Kommission im Jahr 2020 empfohlenen Rahmenparameter sowie den bis zum 31. August 2020 beschlossene Klimaschutzmaßnahmen (für weitere Details siehe (Öko-Institut et al. 2021)).

veröffentlicht, sodass eine zeitliche Diskrepanz besteht. Zumindest sollte deshalb das Jahr der Veröffentlichung beider Berichte synchronisiert werden. Erstrebenswert wäre eine höhere Frequenz der Datenerhebung und Berichtsveröffentlichung im jährlichen Rhythmus. Zusätzlich basiert der Projektionsbericht nur auf Punktschätzungen der Emissionsdaten, für eine bessere Schätzung sollten auch Konfidenzintervalle ausgewiesen werden. Zudem wäre auch für den Projektionsbericht angesichts seiner Relevanz als Referenz für die ex ante Betrachtung der Wirkung von Politikmaßnahmen eine Prüfung durch ein unabhängiges Gremium zu erwägen.

6 Anhang

A.1 Temperaturbereinigung

Im Gebäudesektor hat der Temperatureffekt im Vergleich zu den anderen Sektoren einen wichtigen Einfluss auf den Primärenergiebedarf und damit auch auf die THG-Emissionen der einzelnen Jahre. Dies ist darauf zurückzuführen, dass 93,5 % der THG-Emissionen im Gebäudesektor auf die Verbrennung von fossilen Brennstoffen in stationären Feuerungsanlagen in Haushalten sowie in GHD zurückzuführen sind. Diese stationären Feuerungsanlagen werden genutzt, um Heizwärme und Warmwasser bereit zu stellen, wobei Heizwärme hierbei den größeren Teil von ca. 80 % ausmacht (RWI 2021). Der Heizwärmebedarf in einem Jahr ist von der jeweiligen Witterung abhängig und somit auch der Primärenergiebedarf und die THG-Emissionen. Um eine Einschätzung des Temperatureffektes in einem Jahr vornehmen zu können, kann eine Temperaturbereinigung durchgeführt werden. Diese bereinigt den Emissionswert und den Primärenergiebedarf um den Effekt, welcher auf die Witterung zurückzuführen ist, indem die in einem spezifischen Jahr vorherrschende Witterung mit einem langjährigen Mittel verglichen wird.

Als Kennzahl für die Witterung oder auch Temperatur werden über das Jahr kumulierte Gradtagzahlen genutzt. Gradtagzahlen sind in Deutschland definiert als die Summe der Differenz zwischen allen Tagesmitteltemperaturen eines Jahres und einer mittleren Raumtemperatur von 20 °C, für alle Tage, an denen die Tagesmitteltemperatur unter der Heizgrenze von 15 °C liegt (VDI 2013). Je kälter es also in einem Jahr ist, desto höher ist die Summe der Gradtagzahlen über ein Jahr, da die Differenz zwischen Außentemperatur und mittlerer Raumtemperatur höher ist. Der Quotient aus den kumulierten Gradtagzahlen des langjährigen Mittels und den kumulierten Gradtagzahlen für das spezifische Jahr wird Klimafaktor genannt. Dieser kann genutzt werden, um die THG-Emissionen einer Temperaturbereinigung zu unterziehen, in dem der Teil der THG-Emissionen, der als temperaturabhängig eingestuft wird mit diesem Klimafaktor multipliziert wird.

In diesem Gutachten wird die Temperaturbereinigung anhand gewichteter Gradtagzahlen durchgeführt, welche vom BDEW berechnet und veröffentlicht wurden (BDEW 2022b). Die Gewichtung erfolgte anhand der Einwohner:innenzahlen auf Bundeslandebene. Da stationäre Feuerungsanlagen zu 80 % Heizwärme bereitstellen (RWI 2021) und der mobile Teil der THG-Emissionen im Gebäudesektor zu vernachlässigen ist (0,66 %), wird eine Temperaturbereinigung für 80 % der THG-Emissionen bzw. des Primärenergiebedarfs durchgeführt, während 20 % unbereinigt bleiben:

$$Daten_{temperaturbereinigt} = 0,8 \cdot K_{lima\ faktor} \cdot Daten_{nicht-temperaturbereinigt} + 0,2 \cdot Daten_{nicht-temperaturbereinigt}$$

Bei der Interpretation der temperaturbereinigten Daten muss berücksichtigt werden, dass das Verfahren unter Nutzung der Gradtagzahlen diversen Unsicherheiten unterworfen ist. Zum einen ist die Frage welcher Anteil der THG-Emissionen temperaturabhängig ist und für welchen Anteil somit eine Temperaturbereinigung durchgeführt werden sollte. Zum anderen ist auch die Bildung der Gradtagzahlen mit Unsicherheiten behaftet. Da die Gradtagzahlen auf täglichen Durchschnittstemperaturen für ganz Deutschland beruhen, muss zunächst eine Methode ausgewählt werden, wie diese Durchschnittstemperaturen gebildet werden. Übliche Verfahren sind zum Beispiel die Durchschnittstemperaturen der 42 Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) mit der Einwohner:innenzahl oder dem Gasabsatz zu gewichten. Beide Verfahren führen zu unterschiedlichen Ergebnissen, welche wiederum auch zu verschiedenen Ergebnissen bei den temperaturbereinigten

THG-Emissionen führen. Auch die Bildung des langjährigen Mittels ist Unsicherheiten unterworfen, weil hierfür ein adäquater Zeitraum ausgewählt werden muss (ifeu et al. 2022).

A.2 Dekomposition

A.2.1 Methodik

Bei der Indexdekompositionsanalyse (IDA) werden die THG-Emissionen als Funktion von zentralen, vorab definierten Komponenten ausgedrückt. IDA wird häufig verwendet, um die treibenden Kräfte hinter Veränderungen bei den THG-Emissionen zu analysieren (Goh und Ang 2019). Der Beitrag der treibenden Komponenten wird dabei in der gleichen Einheit wie die THG-Emissionen ausgedrückt (Mt CO₂-Äq.), so dass es möglich ist, den Einfluss von Faktoren darzustellen, die eigentlich mit unterschiedlichen Einheiten assoziiert sind (Förster et al. 2018). Für die Dekomposition gibt es verschiedene Methoden, die sich hinsichtlich ihrer Eigenschaften unterscheiden (De Boer und Rodrigues 2020). In diesem Bericht wird die additive Log-Mean-Divisia-Index-Methode (LMDI I) (Ang et al. 1998) angewendet, welche aufgrund ihrer positiven Eigenschaften im Vergleich zu anderen Dekompositionsmethoden (Ang 2004) regelmäßig verwendet wird (IEA 2020; Förster et al. 2018; Reuter et al. 2021; Shammugam et al. 2022).

Die allgemeine Dekompositionsidentität der THG-Emissionen THG eines Sektors in n treibende Faktoren $x_{1,j}, x_{2,j}, \dots, x_{n,j}$ ist gegeben als

$$THG = \sum_j THG_j = \sum_j x_{1,j} \cdot x_{2,j} \cdot \dots \cdot x_{n,j},$$

wobei THG_j die THG-Emissionen in Unterkategorie j (z. B. verschiedene Tierarten) bezeichnet (Ang 2005). Beispiele für die Faktoren x_k mit $k = 1, \dots, n$ sind Bevölkerungszahl oder Wirtschaftsentwicklung (BIP pro Kopf).

Die aggregierte Veränderung der THG-Emissionen von einem Zeitpunkt 0 zu einem Zeitpunkt T kann zerlegt werden in

$$\Delta THG = THG^T - THG^0 = \Delta THG_{x_1} + \Delta THG_{x_2} + \dots + \Delta THG_{x_n}.$$

ΔTHG_{x_k} entspricht dabei dem Beitrag zur Veränderung in den THG-Emissionen, der durch eine Veränderung im treibenden Faktor x_k zustande kommt. In der LMDI I Methode wird ΔTHG_{x_k} berechnet als

$$\Delta THG_{x_k} = \sum_j \frac{THG_j^T - THG_j^0}{\ln THG_j^T - \ln THG_j^0} \ln \left(\frac{x_{k,j}^T}{x_{k,j}^0} \right).$$

ΔTHG_{x_k} ist also proportional zur logarithmischen Veränderung des jeweiligen Faktors.

Als Basisjahr 0 wird in diesem Bericht das Jahr 2000 gewählt. Für jedes Folgejahr T im Zeitraum von 2001 bis 2020 wird die Dekompositionsanalyse in Bezug auf das Basisjahr durchgeführt und der Effekt der einzelnen Faktoren für das jeweilige Jahr T berechnet. Die Ergebnisse werden grafisch dargestellt. Dabei wird die Dekomposition zum einen in Form eines Liniendiagramms dargestellt, um den jährlichen Einfluss der jeweiligen Komponenten auf die THG-Entwicklung zum Basisjahr 2000 darzustellen. Zum anderen wird die Dekomposition in Form eines Wasserfalldiagramms dargestellt, um die periodenweise Veränderung gegenüber unterschiedlichen Basisjahren zu verdeutlichen. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss beachtet werden, dass die Dekompositionsmethode zwar nützlich für die Analyse der Triebkräfte von in der Vergangenheit beobachteten Trends ist, dass daraus jedoch keine Kausalität abgeleitet werden kann. Darüber hinaus ist bei der Interpretation von strukturellen Veränderungen in der Dekompositionsanalyse Vorsicht geboten (Roux und Plank 2022).

A.2.1 Komponenten

Die Auswahl der Komponenten lehnt sich an die Kaya-Identität (Yamaji et al. 1993) an. Für die einzelnen Sektoren werden die Komponenten weiter in relevante Komponenten zerlegt siehe Peters, Peters et al. (. Im Folgenden werden die verwendeten Komponenten und die detaillierte Datengrundlage für alle Sektoren dargestellt. Beiträge von THG-Emissionen, die keine CO₂-Emissionen sind, werden in CO₂-Äq. umgerechnet.

Sektorenübergreifende Betrachtung

Die sektorenübergreifende Dekomposition quantifiziert die Beiträge an den jährlichen Änderungen der THG-Emissionen (THG_{Gesamt}) der Bevölkerungszahl (Bev), Wirtschaftsentwicklung als BIP pro Kopf ($\frac{BIP}{Bev}$), der Energieintensität ($\frac{EEV}{BIP}$); der Umwandlungsverluste ($\frac{PEV}{EEV}$) und der Emissionsintensität ($\frac{THG_{Gesamt}}{PEV}$).

Die Dekomposition ist gegeben als:

$$THG_{Gesamt} = Bev \cdot \frac{BIP}{Bev} \cdot \frac{EEV}{BIP} \cdot \frac{PEV}{EEV} \cdot \frac{THG_{Gesamt}}{PEV}$$

Tabelle 3: Berechnungsgrundlage und Datenquellen der Dekomposition – Sektorenübergreifend

Kapitel:	Daten:	Quelle:	Details:
Gesamt	CO ₂ -Emissionen gesamt (ohne LULUCF)	(UBA 2022c)	Aus den Trendtabellen
	Bevölkerung	(Destatis 2022g)	Genesis Datenbank, Tabelle 12111-0001
	Bruttoinlandsprodukt	(Destatis 2022j)	Genesis Datenbank, Tabelle 81000-0001
	Primärenergieverbrauch	Treibhausgasinventar (UBA 2022n) AGEB-Energiebilanz (AGEB 2021a)	Aktivitätsdaten (in TJ) für fossiler Primärenergieverbrauch aus Tabelle 1.A(a)s1, Kategorie 1.A. des NIB. Aktivitätsdaten von Kernkraftwerken, Wasserkraftwerken,

			Windenergieanlagen, und Solarenergieanlagen sind den AGEB-Energiebilanzen entnommen.
	Endenergieverbrauch	AGEB-Energiebilanz (AGEB 2021a)	Entnommen aus den Energiebilanzen

Energiewirtschaft

Die Dekomposition der THG-Emissionen der Energiewirtschaft berücksichtigt THG-Emissionen aus der Erzeugung von Elektrizität und Wärme, von Raffinerien sowie der Herstellung fester Brennstoffe und anderer Energieindustrien.

Spezifische Treiber von CO₂-Emissionen im Sektor Energiewirtschaft sind dabei die Veränderung der Bevölkerungszahl (*Bev*), die Wirtschaftsentwicklung definiert als BIP pro Kopf ($\frac{BIP}{Bev}$), die Energieintensität des Primärenergieverbrauchs fossiler Energieträger ($\frac{PEV}{BIP}$), sowie der Änderungen der THG-Intensität der verschiedenen Energieträger ($\frac{THG_{Energiewirtschaft}}{PEV}$).

Die Dekomposition ist gegeben als:

$$THG_{Energiewirtschaft} = Bev \cdot \frac{BIP}{Bev} \cdot \frac{PEV}{BIP} \cdot \frac{THG_{Energiewirtschaft}}{PEV}$$

Tabelle 4: Berechnungsgrundlage und Datenquellen der Dekomposition – Energiewirtschaft

Kapitel:	Daten:	Quelle:	Details:
Energiewirtschaft	CO ₂ -Emissionen Energiewirtschaft (Elektrizität, Wärme)	Treibhausgasinventar (UBA 2022n)	Table1.A(a)s1, Kategorie 1.A.1.a. (86 % der Sektoremissionen über den betrachteten Zeitraum)
	Bevölkerung	(Destatis 2022g)	Genesis Datenbank, Tabelle 12111-0001
	Bruttoinlandsprodukt	(Destatis 2022j)	Genesis Datenbank,

			Tabelle 81000-0001
	Primärenergieverbrauch	Treibhausgasinventar (UBA 2022n) AGEB-Energiebilanz (AGEB 2021a)	Table 1.A(a)s1, Kategorie 1.A.1.a. Aktivitätsdaten (in TJ) für fossiler Primärenergieverbrauch aus Tabelle 1.A(a)s1, Kategorie 1.A.1.a des NIB. Aktivitätsdaten von Wasserkraftwerken, Windenergieanlagen und Solarenergieanlagen sind den AGEB-Energiebilanzen entnommen.

Industrie

Die Dekomposition der THG-Emissionen des Industriesektors unterscheidet zwischen THG-Emissionen aus der Verbrennung von Kraftstoffen sowie prozessbedingten THG-Emissionen. Die THG-Emissionen umfassen folgende Sektoren: Chemische Industrie, Metallindustrie, nicht energetische Produkte von Kraftstoffen und Lösemitteln, Elektroindustrie, Produktnutzungen als Ersatz für Ozonschicht schädigende Stoffe, andere Produkterzeugnisse und -nutzungen und sonstige (siehe Tabellen 2(I).A-H und 2(II)(3)).

Zunächst werden die THG-Emissionen aus der Verbrennung von Kraftstoffen betrachtet. Spezifische Komponenten sind dabei die gesamte Bruttowertschöpfung (BWS), der Anteil an der Bruttowertschöpfung des Industriesektors ($\frac{BWS_{Industrie}}{BWS_{gesamt}}$), die Energieintensität von verschiedenen Energieträgern ($\frac{PEV}{BWS_{Industrie}}$), sowie die THG-Intensität der eingesetzten Energieträger ($\frac{THG_{Brennstoffe}}{PEV}$).

Die Dekomposition ist gegeben als:

$$THG_{Brennstoffe} = BWS_{gesamt} \cdot \frac{BWS_{Industrie}}{BWS_{gesamt}} \cdot \frac{PEV}{BWS_{Industrie}} \cdot \frac{THG_{Brennstoffe}}{PEV}$$

Darüber hinaus werden die THG-Emissionen aus Industrieprozessen betrachtet. Die Formel ist analog zu den brennstoffbedingten THG-Emissionen. Aufgrund fehlender Daten fehlt die Energieintensität als Komponente, daher bezieht sich die THG-Intensität auf der Bruttowertschöpfung der Industrie.

Die Dekomposition ist gegeben als:

$$THG_{Industrieprozesse} = BWS_{gesamt} \cdot \frac{BWS_{Industrie}}{BWS_{gesamt}} \cdot \frac{THG_{Industrieprozesse}}{BWS_{Industrie}}$$

Tabelle 5: Berechnungsgrundlage und Datenquellen der Dekomposition – Industrie

Kapitel:	Daten:	Quelle:	Details:
Industrie	CO ₂ -Emissionen (Kraftstoffe)	Treibhausgasinventar (UBA 2022n)	Table1.A(a)s2, Kategorie 1.A.2
	CO ₂ -Emissionen (Prozesse)	Treibhausgasinventar (UBA 2022n)	Table2(l)s1 (Zusammen mit den Kraftstoffen 100 % der Sektoremissionen über den betrachteten Zeitraum)
	Bruttowertschöpfung	(Destatis 2021b)	Genesis Datenbank, Tabelle 81000-0103
	Bruttowertschöpfung Industrie	(Destatis 2021b)	Genesis Datenbank, Tabelle 81000-0103 Produzierendes Gewerbe ohne Baugewerbe und WZ08-19
	Primärenergieverbrauch Industrie	Treibhausgasinventar (UBA 2022n)	Table1.A(a)s2, Kategorie 1.A.2

Gebäude

Die Dekomposition der CO₂-Emissionen von Gebäuden unterscheidet zwischen THG-Emissionen aus Wohngebäuden sowie GHD und umfasst somit 99 % der Sektoremissionen, da Militär nicht mit betrachtet wird. Dabei werden für Haushalte hauptsächlich Raumwärme und Warmwassererzeugung erfasst. Da Strom in der Energiewirtschaft bilanziert wird, wird dieser hier nicht mit einbezogen. Um etwaige Wetter- bzw. Klimaeffekte zu berücksichtigen, wurde eine Bereinigung auf Basis der gewichteten Gradtagszahlen des BDEW durchgeführt. Die Zerlegung der THG-Emissionen der Gebäude privater Haushalte erfolgt in die Komponenten Bevölkerungsentwicklung (*Bev*), durchschnittliche Wohnfläche pro Kopf ($\frac{Wohnfläche}{Bev}$), spezifischer Primärenergieverbrauch pro Einheit Wohnfläche ($\frac{PEV}{Wohnfläche}$), und die THG-Intensität des Energieträgers ($\frac{THGWohngebäude}{PEV}$).

Die Dekomposition ist gegeben als:

$$THG_{Wohngebäude} = Bev \cdot \frac{Wohnfläche}{Bev} \cdot \frac{PEV}{Wohnfläche} \cdot \frac{THG_{Wohngebäude}}{PEV}$$

Tabelle 6: Berechnungsgrundlage und Datenquellen der Dekomposition – Wohngebäude und GHD

Kapitel:	Daten:	Quelle:	Details:
Gebäude (Wohnungen)	Bevölkerung	(Destatis 2022g)	Genesis Datenbank, Tabelle 12111-0001
	Wohnfläche	(Destatis 2022k)	Genesis Datenbank, Tabelle 31231-0001
	Primärenergieverbrauch	Treibhausgasinventar (UBA 2022n)	Table1.A(a)s4, Kategorie 1.A.4.b.
	CO ₂ -Emissionen	Treibhausgasinventar (UBA 2022n)	Table1.A(a)s4 Kategorie 1.A.4.b.
Gebäude (GHD)	Bruttoinlandsprodukt	(Destatis 2022j)	Genesis Datenbank, Tabelle 81000-0001
	Primärenergieverbrauch	Treibhausgasinventar (UBA 2022n)	Table1.A(a)s4, Kategorie 1.A.4.a.
	CO ₂ -Emissionen	Treibhausgasinventar (UBA 2022n)	Table1.A(a)s4, Kategorie 1.A.4.a.

Für den GHD-Bereich ist aufgrund einer limitierten Datenverfügbarkeit (fehlende Energieverbräuche und THG-Emissionen zu einzelnen Branchen innerhalb des Sektors, beheizte Flächen etc.) nur eine simplifizierte Zerlegung mit begrenzter Aussagekraft möglich. Die Dekomposition erfolgt in die Komponenten wirtschaftliche Entwicklung (*BIP*), Energieintensität ($\frac{PEV}{BIP}$) und THG-Intensität des Energieträgers ($\frac{THG_{GHD}}{PEV}$).

Die Dekomposition ist gegeben als:

$$THG_{GHD} = BIP \cdot \frac{PEV}{BIP} \cdot \frac{THG_{GHD}}{PEV}$$

Verkehr

Für die Dekomposition der THG-Emissionen des Verkehrssektors wird zwischen den Teilsektoren Personenverkehr und Güterverkehr differenziert. Im Detail werden hierbei die CRF-Kategorien 1.A.3.i (Pkw) sowie 1.A.3.iii (Lkw) betrachtet, die insgesamt 90 % der Sektoremissionen abdecken.

Wesentliche Komponenten der THG-Emissionen des Personenverkehrs (Pkw) sind dabei die Bevölkerungsentwicklung (Bev), Pkw-Kilometern gefahren pro Kopf ($\frac{km_{Pkw}}{Bev}$), die Energieintensität von Pkw ($\frac{EEV_{Verbrauch}}{km_{Pkw}}$), Tankverhalten ($\frac{EEV_{Absatz}}{EEV_{Verbrauch}}$), sowie die THG-Emissionsintensität von Pkw ($\frac{THG_{Pkw}}{EEV_{Absatz}}$).

Die Dekomposition ist gegeben als:

$$THG_{Pkw} = Bev \cdot \frac{km_{Pkw}}{Bev} \cdot \frac{EEV_{Verbrauch}}{km_{Pkw}} \cdot \frac{EEV_{Absatz}}{EEV_{Verbrauch}} \cdot \frac{THG_{Pkw}}{EEV_{Absatz}}$$

Komponenten der THG-Emissionen des Güterverkehrs sind die Wirtschaftsentwicklung (BIP), Transportintensität von Lkws ($\frac{km_{Lkw}}{BIP}$), Tankverhalten ($\frac{EEV_{Absatz}}{EEV_{Verbrauch}}$), die Energieintensität von Lkws ($\frac{EEV_{Verbrauch}}{km_{Lkw}}$), sowie die THG-Emissionsintensität von Lkws ($\frac{THG_{Lkw}}{EEV_{Absatz}}$).

$$THG_{Güterverkehr} = BIP \cdot \frac{km_{Lkw}}{BIP} \cdot \frac{EEV_{Verbrauch}}{km_{Lkw}} \cdot \frac{EEV_{Absatz}}{EEV_{Verbrauch}} \cdot \frac{THG_{Güterverkehr}}{EEV_{Absatz}}$$

Tabelle 7: Berechnungsgrundlage und Datenquellen der Dekomposition – Personen- und Güterverkehr

Kapitel:	Daten:	Quelle:	Details:
Personenverkehr	THG-Emissionen Personenverkehr	Treibhausgasinventar (UBA 2022n)	Table 1.A(a)s3, Kategorie 1.A.3.b.i
	Bevölkerung	Destatis (2021)	Genesis Datenbank, Tabelle 12111- 0001
	Kilometer gefahren in jeweiligen Modi von Personenverkehr	(UBA 2022o)	TREMODO-Daten
	EEV _{Absatz}	Treibhausgasinventar (UBA 2022n)	Table 1.A(a)s3, Kategorie 1.A.3.b.i
	EEV _{Verbrauch}	(UBA 2022o)	TREMODO-Daten
Güterverkehr	THG-Emissionen Güterverkehr	Treibhausgasinventar (UBA 2022n)	Table 1.A(a)s3, Kategorie 1.A.3.b.iii

	Bruttoinlandsprodukt	(Destatis 2022j)	Genesis Datenbank, Tabelle 81000-0001
	Kilometer gefahren in jeweiligen Modi von Güterverkehr	(UBA 2022o)	TREMODO-Daten
	EEV _{Absatz}	Treibhausgasinventar (UBA 2022n)	Table 1.A(a)s3, Kategorie 1.A.3.b.iii
	EEV _{Verbrauch}	(UBA 2022o)	TREMODO-Daten

Landwirtschaft

Für die Dekomposition der THG-Emissionen des Landwirtschaftssektors wird zwischen den THG-Emissionen aus der Nutztierhaltung und aus landwirtschaftlich genutzten Böden differenziert. Für die Berechnung der THG-Emissionen werden die Beiträge von Methan und Lachgas mit den für die Berichterstattung derzeit noch verwendeten Treibhausgaspotenziale des Vierten Sachstandsberichts (CH₄: 25, N₂O: 298, betrachtet für einen Zeitraum von 100 Jahren) in CO₂-Äq. umgerechnet und als THG-Emissionen bezeichnet. Für die Nutztierhaltung gehen die THG-Emissionen aus Wirtschaftsdüngermanagement (CRF-Kategorie 3.B) sowie aus der tierischen Verdauung (CRF-Kategorie 3.A) verschiedener Nutztiere in die Dekomposition ein. Die Nutztiere umfassen Rinder, Schweine, Geflügel und andere. Insgesamt werden somit 84 % der Sektoremissionen abgedeckt. Wesentliche Faktoren bzw. Komponenten der THG-Emissionen sind dabei die Bevölkerungsentwicklung (*Bev*), die Anzahl der Nutztiere relativ zur Bevölkerung ($\frac{\text{Nutztiere}_{\text{gesamt}}}{\text{Bev}}$), die Veränderung des relativen Anteils der verschiedenen Nutztiere ($\frac{\text{Nutztiere}_j}{\text{Nutztiere}_{\text{gesamt}}}$), sowie die THG-Intensität der Nutztierhaltung ($\frac{\text{THG}_j}{\text{Nutztiere}_j}$). Der Index *j* bezeichnet dabei die Tierart (Rind, Schaf, Schwein, und andere (hauptsächlich Geflügel)).

Die Dekomposition ist gegeben als:

$$\text{THG}_{\text{Tierhaltung}} = \sum_j \text{Bev} \cdot \frac{\text{Nutztiere}_{\text{gesamt}}}{\text{Bev}} \cdot \frac{\text{Nutztiere}_j}{\text{Nutztiere}_{\text{gesamt}}} \cdot \frac{\text{THG}_j}{\text{Nutztiere}_j}$$

In die Dekomposition zu den landwirtschaftlichen Böden gehen die Lachgasemissionen aus der Anwendung von synthetischem Dünger (CRF-Kategorie 3.D.a.1), die durch Ausscheidungen beim Weidegang der Tiere verursachten Lachgasemissionen (CRF-Kategorie: 3.D.a.3) sowie die Lachgasemissionen aus atmosphärischer Deposition (CRF-Kategorie 3.D.b.1) ein. Die THG-Emissionen gehen als CO₂-Äq. in die Dekomposition ein. Wesentliche Faktoren bzw. Komponenten der THG-Emissionen sind dabei die landwirtschaftlich genutzte Fläche (*Fläche*), die Menge von eingesetztem Düngemittel pro Flächeneinheit ($\frac{\text{Düngereinsatz}}{\text{Fläche}}$), sowie die THG-Intensität dieses Düngemiteleinsatzes ($\frac{\text{THG}_{\text{landw. Flächen}}}{\text{Düngereinsatz}}$).

Die Dekomposition ist gegeben als:

$$\text{THG}_{\text{landw. Flächen}} = \text{Fläche} \cdot \frac{\text{Düngereinsatz}}{\text{Fläche}} \cdot \frac{\text{THG}_{\text{landw. Flächen}}}{\text{Düngereinsatz}}$$

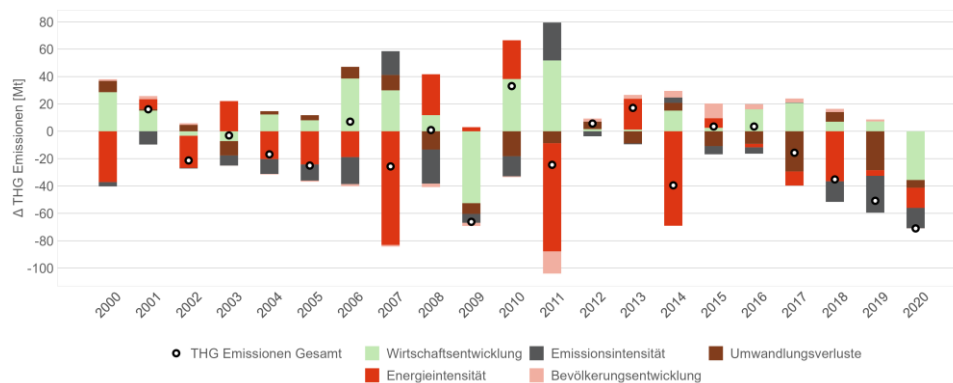
Tabelle 8: Berechnungsgrundlage und Datenquellen der Dekomposition - Landwirtschaft Nutztiere/landwirtschaftliche Böden

Landwirtschaft (Nutztierhaltung)	THG-Emissionen Nutztiere	Treibhausgasinventar (UBA 2022n)	Table3s1
	Bevölkerung	(Destatis 2022g)	Genesis Datenbank, Tabelle 12111-0001
	Neuer ausführlicherer Entwurf.	Treibhausgasinventar (UBA 2022n)	Table3.As1
	Anzahl Nutztiere Tierart	Treibhausgasinventar (UBA 2022n)	Table3.As1
	THG-Emissionen je Tierart	Treibhausgasinventar (UBA 2022n)	Table3.As1
Landwirtschaft (landwirtschaftliche Böden)	THG-Emissionen landwirtschaftliche Böden	Treibhausgasinventar (UBA 2022n)	Table3.D
	Landwirtschaftlich genutzte Fläche	(Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2021)	
	Menge von Düngemittel	Treibhausgasinventar (UBA 2022n)	Table3.C

A.3 Ergänzende Ergebnisdarstellungen

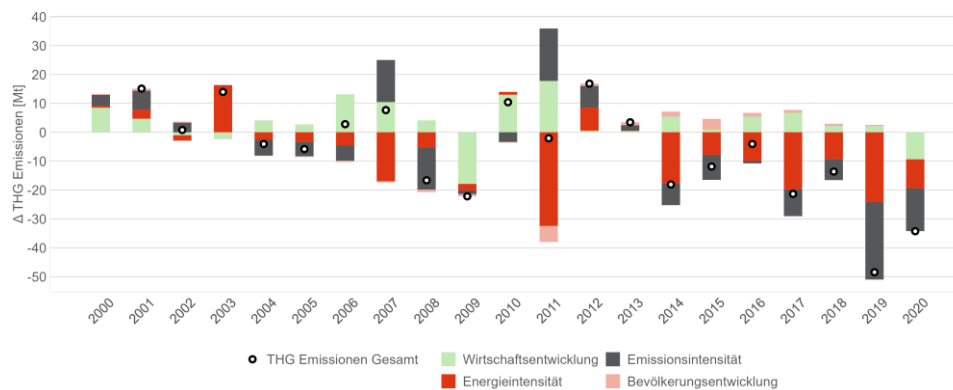
Im Berichtskapitel 2 wird die Entwicklung über den gesamten Betrachtungszeitraum mit dem Basisjahr 2000 in der Form von Liniendiagrammen sowie ergänzenden Wasserfallgrafiken mit den aggregierten Komponentenveränderungen über verschiedene Zeiträume dargestellt. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen ergänzend jeweils die Veränderungen der THG-Emissionen im Vergleich zum Vorjahr und den Beitrag der einzelnen Komponenten zu den Veränderungen.

Abbildung 112: Dekomposition der sektorenübergreifenden THG-Emissionen - Änderungen im Vergleich zum Vorjahr



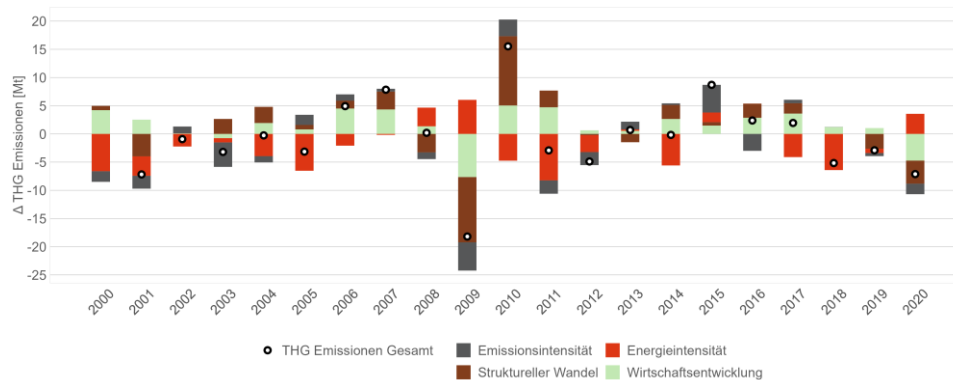
Eigene Darstellung.

Abbildung 113: Dekomposition der THG-Emissionen der Energiewirtschaft - Änderungen im Vergleich zum Vorjahr



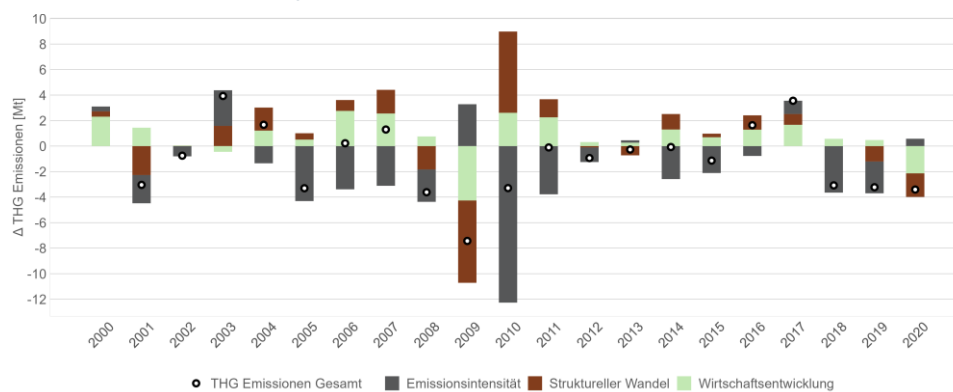
Eigene Darstellung.

Abbildung 114: Dekomposition der THG-Emissionen von der Energetischen Nutzung von Brennstoffen in der Industrie - Änderungen im Vergleich zum Vorjahr



Eigene Darstellung.

Abbildung 115: Dekomposition der THG-Emissionen von Industrieprozessen - Änderungen im Vergleich zum Vorjahr



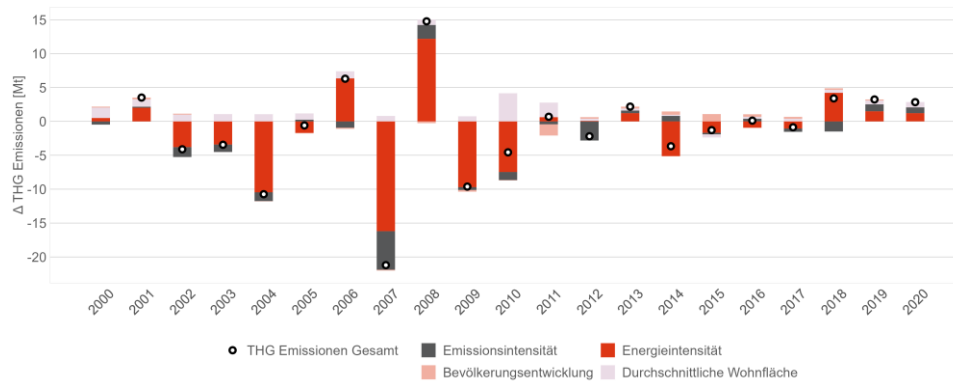
Eigene Darstellung.

Abbildung 116: Dekomposition der THG-Emissionen von Gebäuden in GHD (Gewerbe, Handel, Dienstleistungen) - Änderungen im Vergleich zum Vorjahr



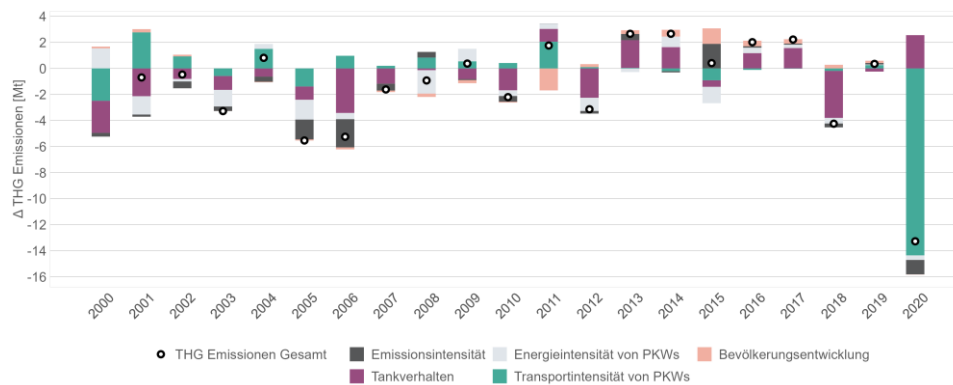
Eigene Darstellung.

Abbildung 117: Dekomposition der THG-Emissionen von Gebäuden privater Haushalte - Änderungen im Vergleich zum Vorjahr



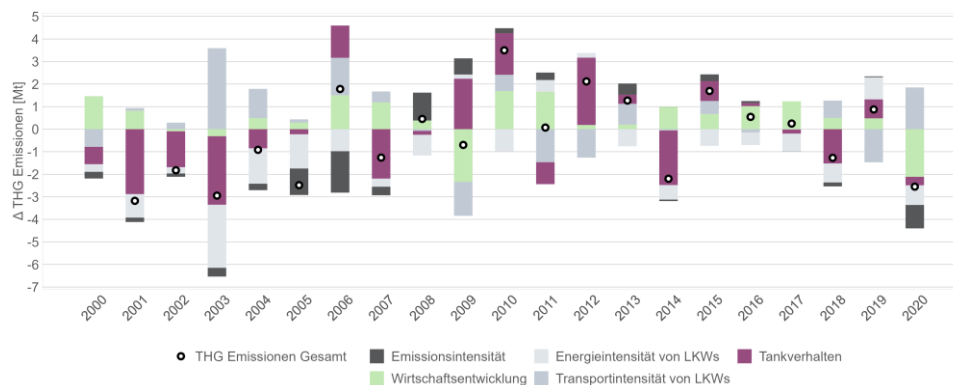
Eigene Darstellung.

Abbildung 118: Dekomposition der THG-Emissionen von Pkw - Änderungen im Vergleich zum Vorjahr



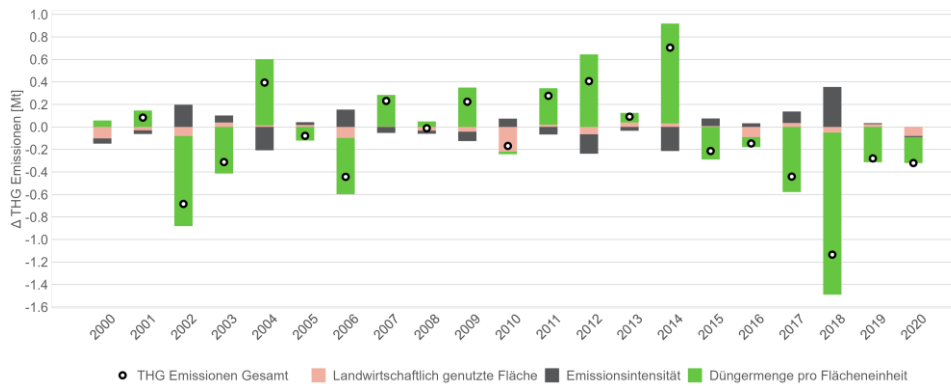
Eigene Darstellung.

Abbildung 119: Dekomposition der THG-Emissionen von Lkw - Änderungen im Vergleich zum Vorjahr



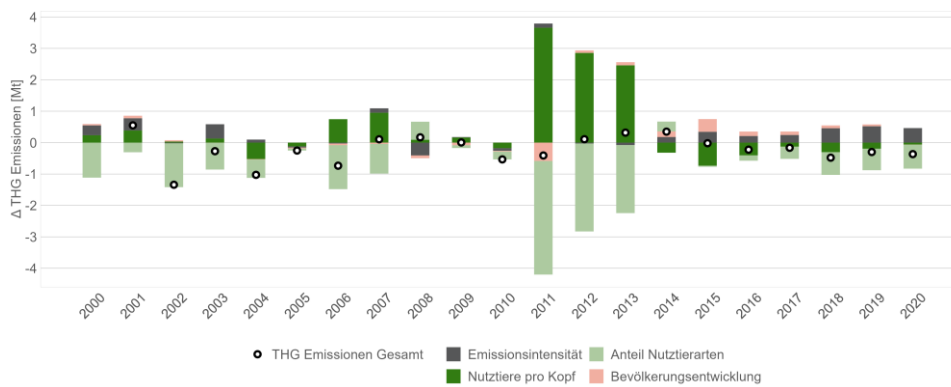
Eigene Darstellung.

Abbildung 120: Dekomposition der THG-Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden - Änderungen im Vergleich zum Vorjahr



Eigene Darstellung.

Abbildung 121: Dekomposition der THG-Emissionen der Nutztierhaltung in der Landwirtschaft - Änderungen im Vergleich zum Vorjahr



Eigene Darstellung.

7 Literaturverzeichnis

AGEB (2021a): Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland. Daten für die Jahre von 1990 bis 2021. Hg. v. AG Energiebilanzen e.V. (AGEB). Online verfügbar unter: https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2021/09/awt_2021_d.pdf (27.10.2022).

AGEB (2021b): Energieverbrauch in Deutschland. Daten für das 1. bis 4. Quartal 2021. Hg. v. AG Energiebilanzen e.V. (AGEB). Online verfügbar unter: https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2022/01/quartalsbericht_q4_2021.pdf (26.10.2022).

AGEB (2003-2022): Internetseite. Berichte. Energieverbrauch in Deutschland. Hg. v. AG Energiebilanzen e. V. (AGEB). Online verfügbar unter: <https://ag-energiebilanzen.de/presse/berichte/?from=2022&to=2022&arciv=0> (26.10.2022).

AGEE-Stat (2022): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland (Stand Februar 2022). Hg. v. Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) und Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Online verfügbar unter: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html (26.10.2022).

AGEE-Stat, UBA (2021): Erneuerbare Energien in Deutschland. Daten zur Entwicklung im Jahr 2020. Hg. v. Geschäftsstelle der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) und Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021_hgp_erneuerbareenergien_deutsch_bf.pdf (29.10.2022).

Agora Energiewende (2019): Klimaneutrale Industrie (Hauptstudie). Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Hg. v. Agora Energiewende. Online verfügbar unter: <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrale-industrie-hauptstudie/> (24.10.2022).

Agora Industrie, FutureCamp, Wuppertal Institut, Ecologic Institut (2022): Klimaschutzverträge für die Industrietransformation. Analyse zur Zementbranche. Hg. v. Agora Industrie. Online verfügbar unter: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_10_DE_KIT/A-EW_259_Klimaschutzvertraege-Industrietransformation-Zement_WEB.pdf (27.10.2022).

Allekotte, M., Biemann, K., Heidt, C., Colson, M., Knörr, W. (2020): Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990- 2018).

Andrew, R. M. (2022): Daten. Global CO₂ emissions from cement production (Version 220915). Hg. v. Zenodo. Online verfügbar unter: <https://zenodo.org/record/7081360#.Y1wbZHZByUk> (29.10.2022).

Andrew, R. M., Peters, G. P. (2021): Daten. The Global Carbon Project's fossil CO₂ emissions (Version 2021v34). Hg. v. Zenodo. Online verfügbar unter: <https://zenodo.org/record/5569235#.Y1wbw3ZByUm> (29.10.2022).

Ang, B. W. (2005): The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide. Energy Policy 33 (7), S. 867-871.

Ang, B. W. (2004): Decomposition analysis for policymaking in energy: which is the preferred method? Energy Policy 32 (9), S. 1131-1139.

Ang, B. W., Zhang, F. Q., Choib, K.-H. (1998): Factorizing changes in energy and environmental indicators through decomposition. Energy 23 (6), S. 489-495.

Antoci, A., Borghesi, S., Iannucci, G., Sodinief, M. (2021): Should I stay or should I go? Carbon leakage and ETS in an evolutionary model. Energy Economics 103.

Bach, S., Isaak, N., Kemfert, C., Kunert, U., Schill, W.-P., Schmalz, S., Wäger, N., Zaklan, A. (2019): CO₂-Bepreisung im Wärme- und Verkehrssektor: Diskussion von Wirkungen und alternativen Entlastungsoptionen. Hg. v. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW). Online verfügbar unter: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/203260/1/1676913750.pdf> (27.10.2022).

Bach, S., Kohlhaas, M., Meyer, B., Praetorius, B., Welsch, H. (2003): Auswirkungen und Perspektiven der Ökologischen Steuerreform in Deutschland. Eine modellgestützte Analyse. Perspektiven der Wirtschaftspolitik 4 (2), S. 223-238.

BAFA (2022): Merkblatt zum Förderprogramm. Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft – Zuschuss. Hg. v. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA). Online verfügbar unter: https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew_merkblatt_2022.html?nn=8062072 (25.10.2022).

Barckhausen, A., Rohde, C., Jensterle, M., Will, G., Neusel, L., Fritz, M., Adak, B. (2022): Monitoring der Initiative Energieeffizienz-Netzwerke. Fünfter Jahresbericht. Hg. v. adelphi. Online verfügbar unter: <https://www.adelphi.de/de/publikation/monitoring-der-initiative-energieeffizienz-netzwerke-4> (25.10.2022).

Bardt, H. (2020): Abbau im Aufschwung: Energieintensive Branchen reduzieren ihren Kapitalstock. IW-Kurzbericht (76).

BbEn Pflichten von gemeinsam handelnden Eigenversorgern und Mieterstrom-Lieferanten. Hg. v. Bündnis Bürgerenergie e.V. (BBEn). Online verfügbar unter: https://www.buendnis-buergerenergie.de/fileadmin/Aufwand_einer_WEG_aufgrund_des_geltenden_Energirechts_BBEn.pdf (01.11.2022).

BDEW (2022a): BDEW-Strompreisanalyse Juli 2022. Haushalte und Industrie. Hg. v. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW). Online verfügbar unter: https://www.bdew.de/media/documents/220727_BDEW-Strompreisanalyse_Juli_2022.pdf (28.10.2022).

BDEW (2022b): Die Energieversorgung 2021. Jahresbericht. Hg. v. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW). Online verfügbar unter: https://www.bdew.de/media/documents/Jahresbericht_2021_korrigiert_19Jan2022.pdf

BDEW (2022c): Entwicklung des Wärmeverbrauchs in Deutschland. Basisdaten und Einflussfaktoren. 6. Ausgabe (2022). Hg. v. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW). Online verfügbar unter: https://www.bdew.de/media/documents/20220511_W%C3%A4rmeverbrauchsanalyse_Foliensatz_2022_final.pdf (29.10.2022).

BDEW (2021a): Grafik. Entwicklung der Beheizungsstruktur des Wohnungsbestandes in Deutschland. Hg. v. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW). Online verfügbar unter: https://www.bdew.de/media/documents/Wohnungsbestand_Beheizungsstruktur_Entw_ab_1995_online_o_dw_jaehrlich_CMi_18072022.pdf (26.10.2022).

BDEW (2021b): Pressemitteilung. Zahl der Woche. Fernwärme: 126 Milliarden Kilowattstunden Wärme für die leitungsgebundene Wärmeversorgung wurden in Deutschland im Jahr 2020 erzeugt. Hg. v. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW). Online verfügbar unter: <https://www.bdew.de/presse/presseinformationen/zdw-fernwaerme-126-milliarden-kilowattstunden/> (25.10.2022).

BDEW (2019): Wie heizt Deutschland 2019?. BDEW-Studie zum Heizungsmarkt. Hg. v. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW). Online verfügbar unter: https://www.bdew.de/media/documents/Pub_20191031_Wie-heizt-Deutschland-2019.pdf (25.10.2022).

BDEW (2017): Internetseite. Smart Metering: Was Sie über intelligente Messsysteme wissen sollten. Die wichtigsten Hintergründe und Informationen rund um den Rollout intelligenter Messeinrichtungen (Smart Meter): Wer muss aufrüsten, welche Daten werden erhoben und wer trägt die Kosten? . Hg. v. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW). Online verfügbar unter: <https://www.bdew.de/energie/digitalisierung/welche-rolle-spielen-smart-meter-fuer-die-digitalisierung-der-energiewende/#Bei-wem-sollen-digitale-Stromzaehler-installiert-werden> (28.10.2022).

BDH (2021): Grafik. Marktentwicklung Wärmeerzeuger Deutschland 2011–2020. Hg. v. Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie e. V. (BDH). Online verfügbar unter: https://www.bdh-industrie.de/fileadmin/user_upload/Pressegrafiken/2021/Marktstruktur_zehn_Jahre_2020_DE.pdf (28.10.2022).

BDH (2011): Effizienz und Erneuerbare Energien. Die Doppelstrategie für den Wärmemarkt. Hg. v. Bundesindustrieverband der Deutschen Haus-, Energie- und Umwelttechnik e.V. (BDH). Online verfügbar unter: https://www.geea.info/fileadmin/Downloads/Bundeslaenderworkshop/Bundeslaenderworkshop1/BDH_Bundeslaenderworkshop.pdf (28.10.2022).

BDI (2021): Klimapfade 2.0 - Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft. Hg. v. Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. (BDI). Online verfügbar unter: <https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-2-0-ein-wirtschaftsprogramm-fuer-klima-und-zukunft/> (27.10.2022).

Bettgenhäuser, K., Boermans, T. (2011): Umweltwirkung von Heizungssystemen in Deutschland. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4070.pdf> (26.10.2022).

BMBF (2022): Internetseite. Fördermaßnahmen. Integriertes Treibhausgas-Monitoringsystem für Deutschland – ITMS. Hg. v. Bundesministerium für Bildung und Forschung, Unterabteilung Nachhaltigkeit; Zukunftsvorsorge (BMBF). Online verfügbar unter: <https://www.fona.de/de/massnahmen/foerdermassnahmen/ITMS.php> (26.10.2022).

BMDV (2022): Sofortprogramm für den Sektor Verkehr aufgrund einer Überschreitung der zulässigen Jahresemissionsmenge für das Jahr 2021 auf Grundlage von § 8 Absatz 1 KSG. Hg. v. Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV). Online verfügbar unter: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/presse/051-wissing-sofortprogramm-zur-einhaltung-der-klimaziele-im-verkehrssektor-anlage-2.pdf?__blob=publicationFile (11.08.2022).

BMDV (2021): Verkehr in Zahlen 2021/2022. 50. Jahrgang. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMDV). Online verfügbar unter: https://www.bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2021-2022-pdf.pdf?__blob=publicationFile (25.10.2022).

BMDV (2015): Verkehr in Zahlen 2015/2016. 44. Jahrgang. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMDV). Online verfügbar unter: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen_2015-pdf.pdf?__blob=publicationFile (25.10.2022).

BMEL (2022a): Entwicklung des Inlandsabsatzes von Düngemitteln - Korrektur. Hg. v. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Online verfügbar unter: <https://www.bmel-statistik.de/tabellen-finden/suchmaske> (25.10.2022).

BMEL (2022b): Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2021. Hg. v. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Online verfügbar unter: https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/ergebnisse-waldzustandserhebung-2021.pdf?__blob=publicationFile&v=8 (24.10.2022).

BMEL (2022c): Pressemitteilung. BMEL bringt Förderprogramm auf den Weg: 900 Millionen Euro für Wälder. Investitionen für mehr Klima- und Biodiversitätsschutz. Hg. v. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Online verfügbar unter: <https://www.bmel.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2022/93-wald-foerderprogramm.html> (27.10.2022).

BMEL (2022d): Pressemitteilung. BMEL fördert gezielt Treibhausgasminderung. Neue Richtlinie zur Förderung von Investitionen in emissionsmindernde Maßnahmen bei der Vergärung von Wirtschaftsdüngern. Hg. v. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Online verfügbar unter: <https://www.bmel.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2022/15-treibhausgasminderung.html> (13.10.2022).

BMEL (2021): Leistungen der kontrollierten Milchkühe und der Kühe insgesamt (Zeitreihe ab 1991). Hg. v. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Online verfügbar unter: <https://www.bmel-statistik.de/tabellen-finden/suchmaske/?stw=Milcherzeugung> (25.10.2022).

BMU (2021): Nationale Moorschutzstrategie. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU).

BMU (2020): Das System der CO₂-Flottengrenzwerte für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). Online verfügbar unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Luft/zusammenfassung_co2_flottengrenzwerte.pdf (27.10.2022).

BMU (2016): Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). Online verfügbar unter: <https://www.bmu.de/download/klimaschutzplan-2050> (28.10.2022).

BMUB (2014): Aktionsprogramm Klimaschutz 2020. Kabinettsbeschluss vom 3. Dezember 2014. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Online verfügbar unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Aktionsprogramm_Klimaschutz/aktionsprogramm_klimaschutz_2020_broschuere_bf.pdf (28.10.2022).

BMVBS (2009): Verkehr in Zahlen 2009/2010. 10. Jahrgang. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). Online verfügbar unter: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen_2009-pdf.pdf?__blob=publicationFile (25.10.2022).

BMWi (2021): Energieeffizienz in Zahlen. Entwicklungen und Trends in Deutschland 2021. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWi). Online verfügbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-entwicklungen-und-trends-in-deutschland-2021.pdf?__blob=publicationFile&v=6#:~:text=Die%20Prim%C3%A4renergieproduktivit%C3%A4t%20der%20gesamten%20Volkswirtschaft,%3A%20360%20Euro%20je%20GJ (27.10.2022).

BMWi (2020): Corona-Folgen bekämpfen, Wohlstand sichern, Zukunftsfähigkeit stärken. Ergebnis Koalitionsausschuss 3. Juni 2020. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Online verfügbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/eckpunktetpapier-corona-folgen-bekaempfen.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (31.10.2022).

BMWi, BMI (2021): Sofortprogramm auf Basis des § 8 Abs. 1 KSG für den Sektor Gebäude. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und Bundesministerium des Innern und für Heimat (BMI).

BMWi, BMU (2012): Erster Monitoring-Bericht „Energie der Zukunft“. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Online verfügbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/erster-monitoring-bericht-energie-der-zukunft.pdf?__blob=publicationFile&v=7 (01.11.2022).

BMWi, BMU (2010a): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. 28. September 2010. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Online verfügbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.html> (01.11.2022).

BMWi, BMU (2010b): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. 28. September 2010 Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Online verfügbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.pdf?__blob=publicationFile&v=5 (25.10.2022).

BMWK (2022a): Artikel. Energiedaten: Gesamtausgabe. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Online verfügbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html> (25.10.2022).

BMWK (2022b): Bekanntmachung. Änderungen von Richtlinien. Vom 21. Juli 2022. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). In Bundesanzeiger (BAz) AT 25.07.2022 V4. Online verfügbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/A/aenderungsbekanntmachung-beg-reform.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (19.08.2022).

BMWK (2022c): Klimaschutzbericht 2022 der Bundesregierung nach § 10 Absatz 1 des Bundes-Klimaschutzgesetzes. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Online verfügbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/klimaschutzbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (24.10.2022).

BMWK (2022d): Überblickspapier Osterpaket. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Online verfügbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/0406_ueberblickspapier_osterpaket.pdf?__blob=publicationFile&v=14 (18.08.2022).

BMWK (2022e): Verordnung der Bundesregierung. Verordnung zur Sicherung der Energieversorgung über kurzfristig wirksame Maßnahmen. (Kurzfristenergieversorgungssicherungsmaßnahmenverordnung – EnSikuMaV). Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Online verfügbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/ensikumav.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (01.11.2022).

BMWK (2022f): Verordnung der Bundesregierung. Verordnung zur Sicherung der Energieversorgung über mittelfristig wirksame Maßnahmen. (Mittelfristenergieversorgungssicherungsmaßnahmenverordnung – EnSimiMaV). Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Online verfügbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/ensimimav.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (01.11.2022).

BMWK (2022g): Zahlen und Fakten: Energiedaten. Nationale und internationale Entwicklung. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Online verfügbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html> (09.04.2022).

BMWK (2021): Energieeffizienz für eine klimaneutrale Zukunft 2045. Roadmap Energieeffizienz 2045. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Online verfügbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/XYZ/zwischenbericht-roadmap-energieeffizienz.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (25.10.2022).

BMWK (2019): Internetseite. Energieeffizienzstrategie 2050. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Online verfügbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienzstrategie-2050.html> (25.10.2022).

BNetzA, BKartA (2022): Monitoringbericht 2021. Monitoringbericht gemäß § 63 Abs. 3 i.V.m. § 35 EnWG und § 48 Abs. 3 i.V.m. § 53 Abs. 3 GWB. Stand: 15. März 2022. Hg. v. Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (BNetzA) und Bundeskartellamt (BKartA). Online verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Monitoringberichte/Monitoringbericht_Energie2021.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (28.10.2022).

Bundesregierung (2022a): Entlastungspaket I. Steuerliche Erleichterungen beschlossen. Hg. v. Bundesregierung. Online verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/suche/entlastungspaket-eins-2010636> (31.10.2022).

Bundesregierung (2022b): Entlastungspaket II. Weitere Erleichterungen auf dem Weg. Hg. v. Bundesregierung. Online verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/suche/entlastungspaket-zwei-2028052> (01.11.2022).

Bundesregierung (2022c): Glossarbeitrag. Spitzenlast. Hg. v. Presse- und Informationsamt der Bundesregierung. Online verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/spitzenlast-614922> (28.10.2022).

Bundesregierung (2022d): Internetseite. „Wind-an-Land-Gesetz“. Mehr Windenergie für Deutschland. Hg. v. Presse- und Informationsamt der Bundesregierung. Online verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/wind-an-land-gesetz-2052764> (25.10.2022).

Bundesregierung (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. Hg. v. Bundesregierung. Online verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/974430/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf?download=1> (28.10.2022).

Bundesregierung (2007): Bericht zur Umsetzung der in der Kabinettsklausur am 23./24.08.2007 in Meseberg beschlossenen Eckpunkte für ein integriertes Energie- und Klimaprogramm. Hg. v. Bundesregierung. Online verfügbar unter: <https://www.cducsu.de/sites/default/files/2007-12-05-integriertes-energie-und-klimaprogramm.pdf> (29.10.2022).

Burger, A., Bretschneider, W. (2021): Umweltschädliche Subventionen in Deutschland. Aktualisierte Ausgabe 2021. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_143-2021_umweltschaedliche_subventionen.pdf (28.10.2022).

BWP (2022): Grafik. Absatzzahlen und Marktanteile. Absatzentwicklung Wärmepumpen in Deutschland 2002-2021. Hg. v. Bundesverband Wärmepumpe e.V. (BWP). Online verfügbar unter: <https://www.waermepumpe.de/presse/zahlen-daten/> (31.10.2022).

BZL (2022a): Tabelle. Milcherzeugung und -verwendung 2021. Milcherzeugung in den Regionen in Deutschland nach Kalenderjahren. Hg. v. Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (BZL) und Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE). Online verfügbar unter: <https://bzl-datenzentrum.de/agrarmarkt/milch-und-milcherzeugnisse/milcherzeugung-und-verwendung> (25.10.2022).

BZL (2022b): Tabelle. Versorgungsbilanzen. Versorgung mit Fleisch in Deutschland seit 1991. Hg. v. Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (BZL) und Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE). Online verfügbar unter: <https://bzl-datenzentrum.de/agrarmarkt/fleisch> (25.10.2022).

CCC (2022): Internetseite. CCC Monitoring Framework. Assessing UK progress in reducing emissions. Hg. v. Climate Change Committee (CCC). Online verfügbar unter: <https://www.theccc.org.uk/publication/ccc-monitoring-framework/> (24.10.2022).

CCC (2021): Progress in reducing emissions: 2021 Report to Parliament.

CCFA (2021): The French automotive industry - Analysis and statistics 2020. Hg. v. Comité des Constructeurs Français d'Automobiles (CCFA). Online verfügbar unter: <https://ccfa.fr/edition-2020/> (28.10.2022).

CHECK24 (2019): Grafik. Durchschnittliche Motorleistung nach Bundesland. Hg. v. CHECK24 Vergleichsportal GmbH (CHECK24). Online verfügbar unter: https://www.check24.de/files/p/2019/c/6/8/14206-2019-7-30_check24_tabelle-ps-bundesland.pdf (01.11.2022).

co2online (2021): Internetseite. Energieverbrauch in der Pandemie. Hg. v. co2online gGmbH. Online verfügbar: <https://www.co2online.de/corona-energiebilanz/> (25.10.2022).

Crippa, M., Guizzardi, D., Solazzo, E., Muntean, M., Schaaf, E., Monforti-Ferrario, F., Banja, M., Olivier, J. G. J., Grassi, G., Rossi, S., Vignati, E. (2021): GHG emissions of all world countries - 2021 Report.

Cuhls, C., Mähl, B., Clemens, J. (2015): Ermittlung der Emissionssituation bei der Verwertung von Bioabfällen. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ermittlung-der-emissionssituation-bei-der> (28.10.2022).

Cust, J. (2009): Using intermediate indicators. lessons for climate policy. Climate Policy 9 (5), S. 450-463.

De Boer, P., Rodrigues, J. F. D. (2020): Decomposition analysis - when to use which method? Economic Systems Research 31 (1), S. 1-28.

DeGEval (2016): Standards für Evaluation. Revision 2016. Hg. v. Gesellschaft für Evaluation e.V. (DeGEval). Online verfügbar unter: https://www.degeval.org/fileadmin/Publikationen/DeGEval-Standards_fuer_Evaluation.pdf (01.11.2022).

DEHSt (2022): Treibhausgasemissionen 2021. Emissionshandelspflichtige stationäre Anlagen und Luftverkehr in Deutschland (VET-Bericht 2021). Hg. v. Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt). Online verfügbar unter: https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/VET-Bericht-2021.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (27.10.2022).

dena (2022): Die Datenökonomie in der Energiewirtschaft. Eine Analyse der Ausgangslage und Wege in die Zukunft der Energiewirtschaft durch die Datenökonomie. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur (dena). Online verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2022/ANALYSE_Die_Datenoeconomie_in_der_Energiewirtschaft.pdf (28.10.2022).

dena (2021a): Abschlussbericht. dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Online verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht_dena-Leitstudie_Aufbruch_Klimaneutralitaet.pdf (27.10.2022).

dena (2021b): dena-GEBÄUDEREPORT 2021. Fokusthemen für den Klimaschutz. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Online verfügbar unter: <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/dena-gebaeudereport-2021-fokusthemen-fuer-den-klimaschutz/> (01.11.2022).

Deschermeier, P., Henger, R. (2015): Die Bedeutung des zukünftigen Kohorteneffekts auf den Wohnflächenkonsum. Hg. v. Institut der deutschen Wirtschaft Köln (IW). Online verfügbar unter: https://www.iwkoeln.de/fileadmin/publikationen/2015/233983/IW-Trends_2015-03-02_Deschermeier_Henger.pdf (27.10.2022).

Destatis (2022a): Abfallbilanz - 2020. Hg. v. Statistisches Bundesamt (Destatis) Online verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/abfallbilanz-pdf-5321001.html> (26.10.2022).

Destatis (2022b): Baugenehmigungen und Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden (Neubau) nach Art der Beheizung und Art der verwendeten Heizenergie. Lange Reihen ab 1980 - 2021. Hg. v. Statistisches Bundesamt (Destatis). Online verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Publikationen/Downloads-Bautätigkeit/baugenehmigungen-heizenergie-pdf-5311001.html> (29.10.2022).

Destatis (2022c): Daten zur Energiepreisentwicklung - Lange Reihen bis August 2022. Hg. v. Statistisches Bundesamt (Destatis). Online verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Publikationen/Energiepreise/energiepreisentwicklung-pdf-5619001.html> (25.10.2022).

Destatis (2022d): Daten. Wohnungsbestand im Zeitvergleich. Hg. v. Statistisches Bundesamt (Destatis). Online verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Tabellen/liste-wohnungsbestand.html> (25.10.2022).

Destatis (2022e): Finanzen und Steuern. Stromsteuerstatistik. Hg. v. Statistisches Bundesamt (Destatis). Online verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Staat/Steuern/Verbrauchssteuern/Publikationen/Downloads-Verbrauchssteuern/stromsteuer-2140970217004.pdf;jsessionid=E989948936654BB33EB299B19FB36511.live742?_blob=publicationFile (28.10.2022).

Destatis (2022f): Internetseite. Umweltökonomische Gesamtrechnungen. 57,2 Milliarden Euro Einnahmen aus umwelt-bezogenen Steuern im Jahr 2021. Hg. v. Statistisches Bundesamt (Destatis). Online verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/steuern-weitere-abgaben/umweltbezogene-steuereinnahmen.html#:~:text=Im%20Jahr%202021%20beliefen%20sich,2021%20bei%207%2C5%20%25> (26.10.2022).

Destatis (2022g): Tabelle. 12111-0001. Bevölkerung (Zensus): Deutschland, Stichtag, Nationalität, Geschlecht. Hg. v. Statistisches Bundesamt (Destatis). Online verfügbar unter: <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=table&code=12111-0001&bypass=true&levelindex=0&levelid=1666791425471#abreadcrumb> (28.10.2022).

Destatis (2022h): Tabelle. 31111-0003. Baugenehmigungen im Hochbau: Bundesländer, Jahre, Bautätigkeiten, Gebäudeart/Bauherr. Hg. v. Statistisches Bundesamt (Destatis). Online verfügbar unter: <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?sequenz=tabelleErgebnis&selectionname=31111-0003&zeitscheiben=1#abreadcrumb> (28.10.2022).

Destatis (2022i): Tabelle. 41261-0001. Holzeinschlag: Deutschland, Jahre, Holzartengruppen. Hg. v. Statistisches Bundesamt (Destatis). Online verfügbar unter: <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=table&code=41261-0001&bypass=true&levelindex=0&levelid=1666345403238#abreadcrumb> (27.10.2022).

Destatis (2022j): Tabelle. 81000-0001. VGR des Bundes - Bruttowertschöpfung, Bruttoinlandsprodukt (nominal/preisbereinigt): Deutschland, Jahre. Hg. v. Statistisches Bundesamt (Destatis). Online verfügbar unter: <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=table&code=81000-0001&bypass=true&levelindex=0&levelid=1666791247971#abreadcrumb> (28.10.2022).

Destatis (2022k): Tabellen. Wohngebäude, Wohnungen, Wohnfläche: Deutschland, Stichtag, Anzahl der Wohnungen. Hg. v. Statistisches Bundesamt (Destatis). Online verfügbar unter: <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online#astructurehttps://www-genesis.destatis.de/genesis/online#astructure> (26.10.2022).

Destatis (2021a): Pressemitteilung. Waldschäden: Schadholzeinschlag durch Insektenbefall binnen fünf Jahren mehr als verzehnfacht. Hg. v. Statistisches Bundesamt (Destatis). Online verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/08/PD21_N050_41.html (27.10.2022).

Destatis (2021b): Tabelle. 81000-0103. VGR des Bundes - Bruttowertschöpfung (nominal/ preisbereinigt): Deutschland, Jahre, Wirtschaftsbereiche. Hg. v. Statistisches Bundesamt (Destatis). Online verfügbar unter: https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=previous&levelindex=0&step=0&titel=Tabellenaufbau&levelid=1666817929660&accept_cookies=false#abreadcrumb (26.10.2022).

Destatis (2021c): Verbraucherpreisindex für Deutschland. Online verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Konjunkturindikatoren/Basisdaten/vpi001j.html;jsessionid=069AC445EE1C0CB11005BA7F3A63920D.live712> (23.10.2022).

Destatis (2019): Fachserie / 19 / 2 / 1 / 2. Hg. v. Statistische Ämter des Bundes und der Länder. Online verfügbar unter: https://www.statistischebibliothek.de/mir/receive/DESerie_mods_00000929 (29.10.2022).

Dijkstra, F. A., He, M., Johansen, M. P., Harrison, J. J., Keitel, C. (2015): Plant and microbial uptake of nitrogen and phosphorus affected by drought using ¹⁵N and ³²P tracers. *Soil Biology and Biochemistry* 82, S. 135-142.

Dingil, A. E., Rupi, F., Esztergár-Kiss, D. (2021): An Integrative Review of Socio-Technical Factors Influencing Travel Decision-Making and Urban Transport Performance. *Sustainability* 13 (18).

DIW (2022): Internetseite. Ampel-Monitor Energiewende. Hg. v. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V. (DIW). Online verfügbar unter: https://www.diw.de/de/diw_01.c.841560.de/ampel-monitor_energiewende.html (26.10.2022).

- Doll, C., Eichhammer, W., Fleiter, T., Jochem, E., Köhler, J., Peters, A., Sensfuss, F., Wietschel, M., Schade, W., Schmidt-Sercander, B., Matthes, F., Hansen, P., Roser, A., Reitze, F., Köwener, D., Ziesing, H.-J. (2012): Ermittlung der Klimaschutzwirkung des Integrierten Energie- und Klimaschutzprogramms der Bundesregierung IEKP und Vorschlag für ein Konzept zur kontinuierlichen Überprüfung der Klimaschutzwirkung des IEKP. Zusammenfassung. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ermittlung-klimaschutzwirkung-des-integrierten-2> (28.10.2022).
- Dornoff, J., Tietge, U., Mock, P. (2020): On the way to "real-world" CO₂ values. The European passenger car market in its first year after introducing the WLTP. Hg. v. International Council on Clean Transportation (ICCT). Online verfügbar unter: https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/On-the-way-to-real-world-WLTP_May2020.pdf (01.11.2022).
- DUH (2021): Revision der EU CO₂-Standards für Pkw. Sieben Hebel zur Förderung emissionsfreier Mobilität. Hg. v. Deutsche Umwelthilfe (DUH). Online verfügbar unter: https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Verkehr/CO2-Minderung/DUH_CO2-Revision_Forderungspapier_final.pdf (27.10.2022).
- Dütschke, E., Engel, L., Theis, A., Hanss, D. (2022): Car driving, air travel or more sustainable transport? Socio-psychological factors in everyday mobility and long-distance leisure travel. *Travel Behavior and Society* 28, S. 115-127.
- Dütschke, E., Frondel, M., Schleich, J., Vance, C. (2018): Moral Licensing. Another Source of Rebound? *Frontiers in Energy Research* 6.
- DWD (2018): Pressemitteilung. Deutschlandwetter im Jahr 2018. Hg. v. Deutscher Wetterdienst. Online verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2018/20181228_deutschlandwetter_jahr2018_news.html (24.10.2022).
- Econsult (2018): Einsparungen von Endenergie und CO₂ beim Ersetzen alter Heizkessel durch Brennwertkessel. Eine detaillierte Betrachtung von Einsparpotentialen in Abhängigkeit der Ausgangslage. Hg. v. Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. (BEE). Online verfügbar unter: https://www.bee-ev.de/fileadmin/Redaktion/Dokumente/Meldungen/Studien/2018/20180323_BEE_Gutachten_Einsparungen_von_Endenergie_und_CO2_beim_Ersetzen_alter_Heizkessel_durch_Brennwertkessel.pdf (25.10.2022).
- Edenhofer, O., Kosch, M., Pahle, M., Zachmann, G. (2021): A whole-economy carbon price for Europe and how to get there. *Policy Contribution* (06/21).
- EEA (2022): Daten. Monitoring of CO₂ emissions from passenger cars – Regulation (EU) 2019/631. Hg. v. European Environment Agency (EEA). Online verfügbar unter: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/co2-cars-emission-22> (28.10.2022).
- EEA, Ember (2022): Preisentwicklung von CO₂-Emissionsrechten im europäischen Emissionshandel (EU-ETS) von 2005 bis 2021 (in Euro pro Tonne CO₂-Äquivalent).
- Elpelt-Wessel, I. (2022): Dissertation. Messtechnische Erfassung von Methanemissionen an Deponieoberflächen zur Abschätzung des Erfolgs von Maßnahmen zur Reduzierung von Treibhausgasen. Hg. v. FEI e.V. Eigenverlag. Online verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.18419/opus-12229> (01.11.2022).
- ERK (2022a): Prüfbericht zu den Sofortprogrammen 2022 für den Gebäude- und Verkehrssektor. Prüfung der den Maßnahmen zugrundeliegenden Annahmen gemäß § 12 Abs. 2 Bundes-Klimaschutzgesetz. Hg. v. Expertenrat für Klima (ERK). Online verfügbar unter: https://expertenrat-klima.de/content/uploads/2022/08/ERK2022_Pruefbericht-Sofortprogramme-Gebaeude-Verkehr.pdf (28.10.2022).
- ERK (2022b): Prüfbericht zur Emissionsberechnung der deutschen Treibhausgasemissionen für das Jahr 2021 - Prüfung und Bewertung der Emissionsdaten gemäß § 12 Abs. 1 Bundes-Klimaschutzgesetz. Hg. v. Expertenrat für Klimafragen (ERK). Online verfügbar unter: https://expertenrat-klima.de/content/uploads/2022/05/ERK2022_Pruefbericht-Emissionsdaten-des-Jahres-2021.pdf (19.08.2022).
- ERK (2022c): Technisches Begleitdokument zum Prüfbericht zur Berechnung der deutschen Treibhausgasemissionen für das Jahr 2021. Prüfung und Bewertung der Emissionsdaten gemäß § 12 Abs. 1 Bundes-Klimaschutzgesetz. Hg. v. Expertenrat für Klimafragen (ERK).
- ERK (2021a): Bericht zum Sofortprogramm 2020 für den Gebäudesektor. Prüfung der Annahmen des Sofortprogramms gemäß § 12 Abs. 2 Bundes-Klimaschutzgesetz. Hg. v. Expertenrat für Klimafragen (ERK). Online verfügbar unter: <https://www.expertenrat-klima.de/publikationen/>.

ERK (2021b): Bericht zur Vorjahresschätzung der deutschen Treibhausgasemissionen für das Jahr 2020. Prüfung und Bewertung der Emissionsdaten gemäß § 12 Abs. 1 Bundes-Klimaschutzgesetz. Hg. v. Expertenrat für Klimafragen (ERK). Online verfügbar unter: <https://www.expertenrat-klima.de/publikationen/> (08.04.2022).

ESABCC (2022): European Scientific Advisory Board on Climate Change. Annual work programme 2022. Hg. v. European Scientific Advisory Board on Climate Change (ESABCC) und European Environment Agency (EEA). Online verfügbar unter: <https://www.eea.europa.eu/about-us/climate-advisory-board/2022-work-programme-of-the/view> (27.10.2022).

EU (2018): Verordnung (EU) 2018/841 des europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 über die Einbeziehung der Emissionen und des Abbaus von Treibhausgasen aus Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft in den Rahmen für die Klima- und Energiepolitik bis 2030 und zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 525/2013 und des Beschlusses Nr. 529/2013/EU. Hg. v. Europäische Union (EU). Online verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32018R0841&from=DE> (26.10.2022).

EU (2014): Verordnung (EU) Nr. 517/2014 des europäischen Parlaments und des Rates vom 16. April 2014 über fluoridierte Treibhausgase und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 842/2006. Hg. v. Europäische Union (EU). Online verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0517&rid=1> (01.11.2022).

EU (1991): Richtlinie des Rates vom 12. Dezember 1991 zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigung durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen (91/676/EWG). Hg. v. Europäische Union (EU). Online verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31991L0676&from=DE> (24.10.2022).

Europäisches Parlament (2010): Richtlinie 2010/75/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 24. November 2010 über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung) (Neufassung). Online verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1439908584691&uri=CELEX:32010L0075> (02.11.2022).

Europäische Kommission (2022a): Internetseite. EU-Emissionshandelssystem (EU-EHS). Hg. v. Europäische Kommission. Online verfügbar unter: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_de (28.10.2022).

Europäische Kommission (2022b): Pressemitteilung. State aid: Commission approves additional German measures to support electricity production from renewable energy sources. Hg. v. Europäischer Kommission. Online verfügbar unter: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_5811 (29.10.2022).

Europäische Kommission (2021): Vorschlag für eine VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES zur Änderung der Verordnung (EU) 2018/841 hinsichtlich des Geltungsbereichs, der Vereinfachung der Compliance-Vorschriften, der Festlegung der Zielwerte der Mitgliedstaaten für 2030 und der Verpflichtung, bis 2035 gemeinsam Klimaneutralität im Sektor Landnutzung, Forstwirtschaft und Landwirtschaft zu erreichen, und zur Änderung der Verordnung (EU) 2018/1999 hinsichtlich der Verbesserung der Überwachung, der Berichterstattung, der Verfolgung der Fortschritte und der Überprüfung. COM/2021/554 final. Hg. v. Europäische Kommission. Online verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0554> (26.10.2022).

Europäische Kommission (2020): DURCHFÜHRUNGSVERORDNUNG (EU) 2020/1208 DER KOMMISSION vom 7. August 2020 über die Struktur, das Format, die Verfahren für die Vorlage und die Überprüfung der von den Mitgliedstaaten gemäß der Verordnung (EU) 2018/1999 des Europäischen Parlaments und des Rates gemeldeten Informationen und zur Aufhebung der Durchführungsverordnung (EU) Nr. 749/2014 der Kommission. Hg. v. Europäische Union (EU). Online verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R1208&from=DE> (26.10.2022).

Europäisches Parlament, Union, R. d. E. (2009): RICHTLINIE 2009/72/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 13. Juli 2009 über gemeinsame Vorschriften für den Elektrizitätsbinnenmarkt und zur Aufhebung der Richtlinie 2003/54/EG. Hg. v. Europäische Union (EU). Online verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=uriserv:OJ.L_.2009.211.01.0055.01.DEU (01.11.2022).

Eurostat (2022a): Daten. Einnahmen aus Umweltsteuer. Hg. v. Europäische Kommission. Online verfügbar unter: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_ac_tax/default/table?lang=de (26.10.2022).

Eurostat (2022b): Daten. Electricity prices for non-household consumers - bi-annual data (from 2007 onwards). Hg. v. Eurostat Online verfügbar unter: https://webgate.acceptance.ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/-/nrg_pc_205 (28.10.2022).

ExpertInnen-Kommission Gas und Wärme (2022): Sicher durch den Winter. Zwischenbericht. Hg. v. ExpertInnen-Kommission Gas und Wärme. Online verfügbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/expertinnen-kommission-gas-und-waerme.pdf?__blob=publicationFile&v=12 (28.10.2022).

EZK (2021): Monitor Klimaatbeleid 2021. Bijlage bij de Klimaatnota 2021. Hg. v. Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK). Online verfügbar unter: <https://open.overheid.nl/repository/ronl-1e645b98-96b3-4a30-bcf0-e8336a521a18/1/pdf/Monitor%20Klimaatbeleid%202021.pdf> (24.10.2022).

FA Wind, Tucci, F. (2022): Hemmnisse beim Ausbau der Windenergie an Land. Ergebnisse einer Branchenbefragung. Hg. v. Fachagentur Windenergie an Land e.V. (FA Wind). Online verfügbar unter: https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/Genehmigung/FA_Wind_Ergebnisse_Branchenumfrage_06-2022.pdf (28.10.2022).

fFe (2022): Internetseite. Veränderungen der Merit Order und deren Auswirkungen auf den Strompreis. Hg. v. Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (fFe). Online verfügbar unter: <https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/veraenderungen-der-merit-order-und-deren-auswirkungen-auf-den-strompreis/> (28.10.2022).

Fiedler, S., Joas, A., Mahler, A., Reuster, L., Runkel, M., Wronski, R., Großmann, A., Lutz, C. (2016): Ansätze für eine ökologische Fortentwicklung der öffentlichen Finanzen. Reform und Abbau umweltschädlicher Subventionen. Hg. v. Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft e.V. (FÖS) und Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung mbH (GWS). Online verfügbar unter: https://foes.de/publikationen/2016/2016-04_FOES-GWS_Abbau-umweltschaedlicher-Subventionen_Endbericht.pdf (26.10.2022).

Fietze, D., Kröger, M., Müller, T., Neuhoﬀ, K. (2021): Ein wirksames Klimaschutzgesetz braucht Frühindikatoren. DIW Wochenbericht. Online verfügbar unter: https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.826603.de/21-41-1.pdf.

Flachsland, C., aus dem Moore, N., Müller, T., Kemmerzell, J., Edmondson, D., Görlach, B., Kalkuhl, M., Knodt, M., Knopf, B., Levi, S., Luderer, G., Pahle, M. (2021): Kurzdossier: Wie die Governance der deutschen Klimapolitik gestärkt werden kann. Hg. v. Kopernikus-Projekt Ariadne. Online verfügbar unter: <https://ariadneprojekt.de/publikation/governance-der-deutschen-klimapolitik>.

Fleiter, T., Rehfeldt, M. (2022): Analyse: Instrumente für eine klimaneutrale Industrie. Eine modellgestützte Szenarioanalyse des aktuellen Instrumentenmixes. Hg. v. Kopernikus-Projekt Ariadne. Online verfügbar unter: <https://ariadneprojekt.de/publikation/instrumente-fur-eine-klimaneutrale-industrie/> (24.10.2022).

FNR (2022): Internetseite. Wirtschaftsdüngervergärung. Hg. v. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR). Online verfügbar unter: <https://biogas.fnr.de/wirtschaftsduenger/wirtschaftsduengervergaerung> (24.10.2022).

Förster, H., Emele, L., Graichen, J., Loreck, C., Fehrenbach, H., Abdalla, N., Knörr, W. (2018): Komponentenerlegung energiebedingter Treibhausgasemissionen mit Fokus auf dem Ausbau erneuerbarer Energien. Teilbericht 3: Dekomposition der energiebedingten THG-Emissionen Deutschlands. Dessau-Roßlau: Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/komponentenerlegung-energiebedingter> (08.04.2022).

FÖS, I. (2016): Umweltwirkungen von Diesel im Vergleich zu anderen Kraftstoffen. Bewertung der externen Kosten der Dieseltechnologie im Vergleich zu anderen Kraftstoffen und Antrieben Hg. v. Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft e.V (FÖS) und Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität – Recht, Ökonomie und Politik e.V. (IKEM). Online verfügbar unter: <https://foes.de/publikationen/2016/2016-05-FOES-IKEM-Studie-Umweltwirkungen-Diesel.pdf> (01.11.2022).

Fraunhofer ISI, Consentec, TU Berlin, ifeu (2021): Langfristszenarien 3 – Wissenschaftliche Analysen für die Dekarbonisierung Deutschlands Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI). Online verfügbar unter: <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/szenario-explorer/> (27.10.2022).

Fraunhofer ISI, ifeu, Prognos AG, Stiftung Umweltenergierecht (2020): Methodikleitfaden für Evaluationen von Energieeffizienzmaßnahmen des BMWi. (Projekt Nr. 63/15 – Aufstockung). Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Online verfügbar unter: https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Downloads/M-O/methodik-leitfaden-fuer-evaluationen-von-energieeffizienzmassnahmen.pdf?__blob=publicationFile (03.11.2022).

Fraunhofer ISI, Prognos, IER, Öko-Institut (2022): Evaluation Bundesförderung Energieeffizienz in der Wirtschaft. Jahresbericht 2020. Hg. v. Fraunhofer ISI.

Fraunhofer ISI, Prognos, ifeu, Stiftung Umweltenergierecht (2019): Evaluierung und Weiterentwicklung des Energieeffizienzfonds. Karlsruhe/Heidelberg/Basel/Würzburg: BMWi.

Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'Sullivan, M., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Le Quéré, C., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Anthoni, P., Bates, N. R., Becker, M., Bellouin, N., Bopp, L., Chau, T. T. T., Chevallier, F., Chini, L. P., Cronin, M., Currie, K. I., Decharme, B., Djutchouang, L. M., Dou, X., Evans, W., Feely, R. A., Feng, L., Gasser, T., Gilfillan, D., Gkritzalis, T., Grassi, G., Gregor, L., Gruber, N., Gürses, Ö., Harris, I., Houghton, R. A., Hurtt, G. C., Iida, Y., Ilyina, T., Luijkx, I. T., Jain, A., Jones, S. D., Kato, E., Kennedy, D., Klein Goldewijk, K., Knauer, J., Korsbakken, J. I., Körtzinger, A., Landschützer, P., Lauvset, S. K., Lefèvre, N., Lienert, S., Liu, J., Marland, G., McGuire, P. C., Melton, J. R., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S. I., Niwa, Y., Ono, T., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Rosan, T. M., Schwinger, J., Schwingshackl, C., Séférian, R., Sutton, A. J., Sweeney, C., Tanhua, T., Tans, P. P., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F., van der Werf, G. R., Vuichard, N., Wada, C., Wanninkhof, R., Watson, A. J., Willis, D., Wiltshire, A. J., Yuan, W., Yue, C., Yue, X., Zaehle, S., Zeng, J. (2022): Global Carbon Budget 2021. *Earth System Science Data* 14 (4), S. 1917-2005.

FutureCamp, DECHEMA (2019): Roadmap Chemie 2050. Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland. Hg. v. FutureCamp Climate GmbH (FutureCamp) und Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA). Online verfügbar unter: <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/2019-10-09-studie-roadmap-chemie-2050-treibhausgasneutralitaet.pdf> (28.10.2022).

Gähns, S., Weiß, J., Bluhm, H., Dunkelberg, E., Katner, J. (2021): Erkenntnisse zu Umweltwirkungen von Smart Metern. Erfahrungen aus dem Einsatz von Smart Metern in Europa. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-06_cc_34-2021_umweltwirkungen_smart_meter.pdf (29.10.2022).

GCP (2021): Interaktive Grafik. Global Carbon Atlas. Hg. v. Global Carbon Project (GCP). Online verfügbar unter: <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions> (29.10.2022).

Gensior, A., Fuß, R., Stümer, W., Rüter, S. (2022): Internetseite. Treibhausgas-Emissionen durch Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF). Hg. v. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Online verfügbar unter: <https://www.thuenen.de/de/themenfelder/klima-und-luft/emissionsinventare-buchhaltung-fuer-den-klimaschutz/standard-titel> (27.10.2022).

Ghazani, M. M., Jafari, M. A. (2021): The efficiency of CO₂ market in the phase III EU ETS: analyzing in the context of a dynamic approach. *Environmental Science and Pollution Research* volume 28, S. 61080–61095.

Gierink, M., Gruber, K., Wiedmann, M. (2022): Fit for 55 und Koalitionsvertrag – Auswirkungen auf den deutschen Strommarkt. Hg. v. Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI) gGmbH Online verfügbar unter: https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2022/01/EWI_Analyse_Fit-for-55-und-Koalitionsvertrag_-Auswirkungen-Strommarkt_220113-1.pdf (01.11.2022).

Goh, T., Ang, B. W. (2019): Tracking economy-wide energy efficiency using LMDI: approach and practices. *Energy Efficiency* 12, S. 829–847.

Günther, J., Lehmann, H., Nuss, P., Purr, K. (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität - RESCUE. Kurzfassung. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/rescue/kurzfassung> (27.10.2022).

Haberl, H., Wiedenhofer, D., Virág, D., Kalt, G., Plank, B., Brockway, P., Fishman, T., Hausknot, D., Krausmann, F., Leon-Gruchalski, B., Mayer, A., Pichler, M., Schaffartzik, A., Sousa, T., Streeck, J., Creutzig, F. (2020): A systematic review of the evidence on decoupling of GDP, resource use and GHG emissions, part II: synthesizing the insights. *Environmental Research Letters* 15.

Hamilton, I., Kennard, H., McGushin, A., Höglund-Isaksson, L., Kieseewetter, G., Lott, M., Milner, J., Purohit, P., Rafaj, P., Sharma, R., Springmann, M., Woodcock, J., Watts, N. (2021): The public health implications of the Paris Agreement. A modelling study. *The Lancet Planetary Health* 5 (2), S. E74-E83.

Hennenberg, K., Böttcher, H., Reise, J., Herold, A., Bohn, F., Gutsch, M., Reyer, C. P. O. (2021): Working Paper. Interpretation des Klimaschutzgesetzes für die Waldbewirtschaftung verlangt adäquate Datenbasis – Reaktion auf die Stellungnahme des Wissenschaftlichen Beirats für Waldpolitik beim BMEL (vom 22.06.2021). Hg. v. Öko-Institut e.V. (oeko). Online verfügbar unter: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/03-WP-Klimaschutzgesetz-Waldbewirtschaftung.pdf> (26.10.2022).

High-Level Commission on Carbon Prices (2017): Report of the High-Level Commission on Carbon Prices. Hg. v. International Bank for Reconstruction and Development and International Development Association (The World Bank). Online verfügbar unter:

https://static1.squarespace.com/static/54ff9c5ce4b0a53deccfb4c/t/59b7f2409f8dce5316811916/1505227332748/CarbonPricing_Full_Report.pdf (01.11.2022).

ICCT (2021): European vehicle market statistics. Pocketbook 2021/22. Hg. v. International Council on Clean Transportation Europe (ICCT). Online verfügbar unter: https://eupocketbook.org/wp-content/uploads/2021/12/Pocketbook_2021_Web.pdf (01.11.2022).

ICCT (2019): Benzin gegen Diesel. Vergleich der CO₂-Emissionen eines aktuellen PKW-Modells der Kompaktklasse, im Labor und auf der Strasse. Hg. v. International Council on Clean Transportation (ICCT). Online verfügbar unter: https://theicct.org/sites/default/files/Gas_%20v_%20Diesel_CO2_emissions_GR_Fact_%20Sheet_2019_05_07_0.pdf (26.10.2022).

Icha, P., Lauf, T., Kuhs, G. (2021): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2020. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-der-spezifischen-kohlendioxid-7> (28.10.2022).

IEA (2020): World Energy Outlook 2020. Hg. v. Internationale Energieagentur (IEA) Online verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>.

ifeu, Technopolis, DIW (2022): Klimaschutz im Gebäudebereich: Erklärungen für stagnierende CO₂-Emissionen trotz erfolgreicher Sanierungsmaßnahmen. Kurzstudie im Auftrag von Agora Energiewende. Hg. v. Agora Energiewende. Online verfügbar unter: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_02_Gebaeudekonsens/2022-09-21_Klimaschutz_im_Gebaeudebereich.pdf (25.10.2022).

infas (2019): Internetseite. Mobilität in Deutschland. Publikationen zur Erhebungswelle 2017. Hg. v. Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH (infas). Online verfügbar unter: <http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/publikationen2017.html> (26.10.2022).

IPCC (2020): Climate Change and Land. An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Summary for Policymakers. Hg. v. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Online verfügbar unter: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/02/SPM_Updated-Jan20.pdf (31.10.2022).

IPCC (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC (2006): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Hg. v. Simon Eggleston, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara, Kiyoto Tanabe. Veröffentlicht vom Institute for Global Environmental Strategies (IGES).

IREES, adelphi (2017): Analyse der Entwicklung des Marktes und Zielerreichungskontrolle für gesetzlich verpflichtende Energieaudits. Schlussbericht an das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA). Hg. v. Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES) und adelphi consult GmbH (adelphi). Online verfügbar unter: <https://www.adelphi.de/de/publikation/analyse-der-entwicklung-des-marktes-und-zielerreichungskontrolle-f%C3%BCr-gesetzlich> (01.11.2022).

ISE, F. (2022): Internetseite. Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Daten und Fakten. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer ISE). Online verfügbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.html> (01.11.2022).

IVT, P., STASA (2004): Analyse von Änderungen des Mobilitätsverhaltens - insbesondere der Pkw-Fahrleistung - als Reaktion auf geänderte Kraftstoffpreise. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMV). Online verfügbar unter: http://ivt-institut.de/pdf/Kraftstoffpreise_und_Mobilitaet.pdf (27.10.2022).

IWU, Cischinsky, H., Diefenbach, N. (2018): Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016. Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und hessischen Wohngebäudebestand. Hg. v. Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU). Online verfügbar unter: https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/2018_IWU_CischinskyEtDiefenbach_Datenerhebung-Wohngeb%C3%A4udebestand-2016.pdf (29.10.2022).

IWU, Hörner, M. (2021): Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude. Teilbericht Strukturdaten. Stand und Dynamik der energetischen Modernisierung der Gebäudehülle im Bestand der Nichtwohngebäude. Hg. v. Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU). Online

verfügbar unter: https://www.datanwg.de/fileadmin/user/iwu/211216_IWU_E4.2-1_Teilbericht_Strukturdaten-Modernisierung-Huelle.pdf (29.10.2022).

IWU, Hörner, M., Cischinsky, H., Bischof, J., Schwarz, S., Behnisch, M., Meinel, G., Spars, G., Busch, R. (2022): Forschungsdatenbank NichtWohnGebäude. Repräsentative Primärdatenerhebung zur statistisch validen Erfassung und Auswertung der Struktur und der energetischen Qualität des Nichtwohngebäudebestands in Deutschland. Hg. v. Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU). Online verfügbar unter: https://www.datanwg.de/fileadmin/user/iwu/BMWi-03ET1315_ENOBdataNWG_Schlussbericht_final.pdf (29.10.2022).

Jakob, M., Ward, H., Steckel, J. C. (2021): Sharing responsibility for trade-related emissions based on economic benefits. Global Environmental Change 66.

Javadi, A., Creutzig, F., Bamberg, S. (2020): Determinants of low-carbon transport mode adoption: systematic review of reviews. Environmental Research Letters 15 (10).

Jenkins, J., Nordhaus, T., Shellenberger, M. (2011): Energy emergence. Rebound & backfire as emergent phenomena. Hg. v. Breakthrough Institute. Online verfügbar unter: https://s3.us-east-2.amazonaws.com/uploads.thebreakthrough.org/legacy/blog/Energy_Emergence.pdf (28.10.2022).

Kander, A., Jiborn, M., Moran, D. D., Wiedmann, T. O. (2015): National greenhouse-gas accounting for effective climate policy on international trade. Nature Climate Change 5 (5), S. 431-435.

Kasten, P., Blanck, R. (2017): Die Umstellung von NEFZ auf WLTP und deren Wirkung auf die Effektivität und die Fortschreibung der CO₂-Emissionsstandards nach 2020. Hg. v. Öko-Institut e.V. Online verfügbar unter: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Umstellung-WLTP-zu-NEFZ.pdf> (01.11.2022).

KBA (2022a): Internetseite. Bestand nach ausgewählten Merkmalen (FZ 27). Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach ausgewählten Merkmalen (Bundesländern und Fahrzeugklassen), vierteljährlich (FZ 27). Hg. v. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA). Online verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz27_b_uebersicht.html (01.11.2022).

KBA (2022b): Internetseite. Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes 2022. Hg. v. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA). Online verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Jahresbilanz_Bestand/fz_b_jahresbilanz_node.html (31.10.2022).

KBA (2020): Daten. Neuzulassungen nach Motorisierung. Zeitreihen. Hg. v. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA). Online verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Motorisierung/2020/2020_n_motorisierung_zeitreihen.html?fromStatistic=3524542&fromStatistic=3524542&yearFilter=2020&yearFilter=2020 (26.10.2022).

KBA (2019): SUVs im Jahr 2019 erstmalig Spitzenreiter bei den Neuzulassungen. Hg. v. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA). Online verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Segmente/2019/2019_n_segmente_kurzbericht_pdf.pdf?blob=publicationFile&v=2 (29.10.2022).

Koch, N., Naumann, L., Pretis, F., Ritter, N., Schwarz, M. (2022): Attributing agnostically detected large reductions in road CO₂ emissions to policy mixes. Nature Energy 7, S. 844-853.

Kopernikus-Projekt Ariadne, Prognos, BCG, ISI, F., PIK (2022): Vergleich der „Big 5“ Klimaneutralitätsszenarien. Hg. v. Kopernikus-Projekt Ariadne. Online verfügbar unter: https://ariadneprojekt.de/media/2022/03/2022-03-16-Big5-Szenarienvergleich_final.pdf (01.11.2022).

Krieger, O., Offermann, M., Braungardt, S., Barckhausen, A., Schneller, A., Becker, S., Bründlinger, T., Lukas, H., Pehnt, M., Thamling, N., Langreder, N. (2019): Vorbereitende Untersuchungen zur Erarbeitung einer Langfristigen Renovierungsstrategie nach Art 2a der EU-Gebäuderichtlinie RL 2018/844 (EPBD). Ergänzung zum Endbericht – 16.09.2019. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Online verfügbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Studien/vorbereitende-untersuchungen-zur-langfristigen-renovierungsstrategie-ergaenzung.pdf?blob=publicationFile&v=6> (25.10.2022).

KSG (2019): Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513).

Lee, D. S., Fahey, D. W., Skowron, A., Allen, M. R., Burkhardt, U., Chen, Q., Doherty, S. J., Freeman, S., Forster, P. M., Fuglestad, J., Gettelman, A., De León, R. R., Lim, L. L., Lund, M. T., Millar, R. J., Owen, B., Penner, J. E., Pitari, G., Prather, M. J., Sausen, R., Wilcox, L. J. (2021): The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. Atmospheric Environment 244.

Leip, A., Billen, G., Garnier, J., Grizzetti, B., Lassaletta, L., Reis, S., Simpson, D., Sutton, M. A., Vries, W. d., Weiss, F., Westhoek, H. (2015): Impacts of European livestock production. Nitrogen, sulphur, phosphorus and greenhouse gas emissions, land-use, water eutrophication and biodiversity. *Environmental Research Letters* 10 (11).

Leisinger, C., Runkel, M. (2021): CO₂-Flottengrenzwerte auf dem Prüfstand. Laborwerte und reale Pkw-CO₂-Emissionen im Zeitverlauf. Hg. v. Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft (FÖS). Online verfügbar unter: https://foes.de/publikationen/2021/2021-03_FOES_CO2-Realemissionen.pdf (01.11.2022).

Leopoldina, a., Deutsche Akademie der Technikwissenschaften Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (2022): Impuls. Welche Auswirkungen hat der Ukrainekrieg auf die Energiepreise und Versorgungssicherheit in Europa? (Akademienprojekt „Energiesysteme der Zukunft“). Hg. v. Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina (Leopoldina), Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech) und Union der deutschen Akademien der Wissenschaften. Online verfügbar unter: https://www.akademienunion.de/fileadmin/au-uploads/publikationen/Publikationen_PDFs/2022/Sonderimpuls_Versorgungssicherheit.pdf (01.11.2022).

Liao, F., Molin, E., van Wee, B. (2017): Consumer preferences for electric vehicles. A literature review. *Transport Reviews* 37 (3), S. 252-275.

Limbers, J., Böhmer, M. (2022): Transformationspfade für die Stahlindustrie in Deutschland. Nicht-technische Fassung der Studie. Hg. v. Prognos AG. Online verfügbar unter: https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/202203_WVS_TransformationspfadeStahl_Prognos.pdf (27.10.2022).

Lopez, E., Schlomann, B., Reuter, M., Eichhammer, W. (2018a): Energy Efficiency Trends and Policies in Germany – An Analysis Based on the ODYSSEE and MURE Databases. Hg. v. Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI. Online verfügbar unter: <https://www.odyssee-mure.eu/publications/national-reports/energy-efficiency-germany.pdf> (01.11.2022).

Lopez, E., Schlomann, B., Reuter, M., Eichhammer, W. (2018b): Energy Efficiency Trends and Policies in Germany. An Analysis Based on the ODYSSEE and MURE Databases. Hg. v. Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI (Fraunhofer ISI). Online verfügbar unter: <https://www.odyssee-mure.eu/publications/national-reports/energy-efficiency-germany.pdf> (29.10.2022).

Löschel, A., Grimm, V., Lenz, B., Staiß, F. (2021): Stellungnahme zum achten Monitoring-Bericht der Bundesregierung für die Berichtsjahre 2018 und 2019. Expertenkommission „Energie der Zukunft“.

Luderer, G., Bartels, F., Blesl, M., Burkhardt, A., Edenhofer, O., Fahl, U., Gillich, A., Herbst, A., Hufendiek, K., Kaiser, M., Kittel, L., Koller, F., Kost, C., Pietzcker, R., Rehfeldt, M. (2022): Kurzdossier. Deutschland auf dem Weg aus der Gaskrise – Wie sich Klimaschutz und Energiesouveränität vereinen lassen. Hg. v. Kopernikus-Projekt Ariadne. Online verfügbar unter: <https://ariadneprojekt.de/publikation/deutschland-auf-dem-weg-aus-der-gaskrise/> (01.11.2022).

Luderer, G., Kost, C., Sörgel, D. (2021): Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich, (Ariadne-Report). Hg. v. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK) e. V. Online verfügbar unter: <https://doi.org/10.48485/pik.2021.006> (27.10.2022).

Lux, B., Sensfuß, F., Kiefer, C., Bernath, C., Deac, G. (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Treibhausgasneutrale Hauptszenarien Modul Energieangebot. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Online verfügbar unter: <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3-Langbericht-Energieangebot-final.pdf> (24.10.2022).

Madlener, R., Alcott, B. (2011): Herausforderungen für eine technisch-ökonomische Entkoppelung von Naturverbrauch und Wirtschaftswachstum. Unter besonderer Berücksichtigung der Systematisierung von Rebound-Effekten und Problemverschiebungen. Hg. v. Enquete-Kommission „Wachstum, Wohlstand, Lebensqualität“ des Deutschen Bundestages. Online verfügbar unter: <https://s7ecb19c0d84e5c0d.jimcontent.com/download/version/1554058976/module/14789786222/name/Enquete-Gutachten%20online.pdf> (31.10.2022).

Madlener, R., Hauertmann, M. (2011): Rebound Effects in German Residential Heating. Do Ownership and Income Matter?: Hg. v. Prof. Dr. Reinhard Madlener (Chair of Energy Economics and Management; Director, Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN), E.ON Energy Research Center (E.ON ERC), RWTH Aachen University). FCN Working Paper. Online verfügbar unter: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1887030> (01.11.2022).

Mariotte, P., Cresswell, T., Johansen, M. P., Harrison, J. J., Keitel, C., Dijkstra, F. A. (2020): Plant uptake of nitrogen and phosphorus among grassland species affected by drought along a soil available phosphorus gradient. *Plant and Soil* 448, S. 121–132.

Mathivanan, G. P., Eysholdt, M., Zinnbauer, M., Rösemann, C., Fuß, R. (2021): New N₂O emission factors for crop residues and fertiliser inputs to agricultural soils in Germany. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 322, S. 107640.

Matthes, F., Braungardt, S., Bürger, V., Emele, L., Görz, W. K., Hermann, H., Kasten, P., Kreye, K., Loreck, C., Repenning, J., Zerrahn, A. (2022): Klimaschutz 2030: Ziele, Instrumente, Emissionsminderungslücken sowie die Verbesserung der Überprüfungs- und Nachsteuerungsregularien. Online verfügbar unter: https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2022/04/2022-04-05-Stiftung-Klimaneutralitaet_Oeko-Institut_Analyse_Klimaschutz_2030.pdf.

Matthes, F., Renn, O., Mendelevitch, R., Camier, C., Kiesow, T. (2021): Orientierungshilfe „Good Practice“ für Ex-Ante-Evaluierungen von Klimaschutzmaßnahmen. Freiburg/Potsdam/Berlin: WKSP.

Matthes, F. C., Gores, S., Graichen, V., Harthan, R. O., Markewitz, P., Hansen, P., Kleemann, M., Krey, V., Martinsen, D., Diekmann, J., Horn, M., Ziesing, H.-J., Eichhammer, W., Doll, C., Helfrich, N., Müller, L., Schade, W., Schlomann, B. (2008): Politikszenerarien für den Klimaschutz IV. Szenarien bis 2030. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/politikszenerarien-fuer-den-klimaschutz-iv> (28.10.2022).

Matthes, F. C., Gores, S., Harthan, R. O., Mohr, L., Penninger, G., Markewitz, P., Hansen, P., Martinsen, D., Diekmann, J., Horn, M., Eichhammer, W., Fleiter, T., Köhler, J., Schade, W., Schlomann, B., Sensfuß, F., Ziesing, H.-J. (2009): Politikszenerarien für den Klimaschutz V - auf dem Weg zum Strukturwandel. Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/politikszenerarien-fuer-den-klimaschutz-v-auf-weg> (01.11.2022).

Mbow, C., Rosenzweig, C., Barioni, L. G., Benton, T. G., Herrero, M., Krishnapillai, M., Liwenga, E., Pradhan, P., Rivera-Ferre, M. G., Sapkota, T., Tubiello, F. N., Xu, Y. (2019): Food security. In: *Climate Change and Land. an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press. Online verfügbar unter: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/11/08_Chapter-5.pdf (31.10.2022).

Mellwig, P. (2021): Gebäude mit der schlechtesten Leistung (Worst performing Buildings) - Klimaschutzpotenzial der unsanierten Gebäude in Deutschland. Kurzstudie im Auftrag der Bundestagsfraktion Bündnis 90/ Die Grünen. Hg. v. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH (ifeu). Online verfügbar unter: https://www.gruene-bundestag.de/fileadmin/media/gruenebundestag_de/themen_az/bauen/PDF/210505-ifeu-kurzstudie-gebaeude-mit-schlechtester-leistung.pdf (28.10.2022).

Mellwig, P., Blauert, M., Kohen, J., Pehnt, M., Schütze, F., Stede, J. (2022): Klimaschutz im Gebäudebereich: Erklärungen für stagnierende CO₂-Emissionen trotz erfolgreicher Sanierungsmaßnahmen. Kurzstudie im Auftrag von Agora Energiewende. Ifeu, Technopolis, DIW Berlin. Im Erscheinen.: Kurzstudie im Auftrag von Agora Energiewende. Ifeu, Technopolis, DIW Berlin. Im Erscheinen.

Milne, G., Boardman, B. (2000): Making cold homes warmer: the effect of energy efficiency improvements in low-income homes. *Energy Policy* 28 (6-7), S. 411-424.

Ministry for the Ecological and Solidary Transition (2020): National low carbon strategy. The ecological and inclusive transition towards carbon neutrality. Hg. v. Ministry for the Ecological and Solidary Transition. Online verfügbar unter: https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/en_SNBC-2_summary.pdf (24.10.2022).

Ministry for the Ecological Transition (2021): Suivi des indicateurs de la stratégie nationale bas-carbone. Hg. v. Ministry for the Ecological and Solidary Transition. Online verfügbar unter: <http://indicateurs-snbc.developpement-durable.gouv.fr/> (24.10.2022).

Muinzer, T. L. (2020): National Climate Change Acts. The emergence, form and nature of national framework climate legislation.

Müller, T. (2019): Umweltenergierecht als Instrument transformativer Politik. *der moderne staat* 12 (2), S. 21-22.

Nissler, D., Wachsmann, U. (2011): Statusbericht zur Umsetzung des Integrierten Energie- und Klimaschutzprogramms der Bundesregierung. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/statusbericht-zur-umsetzung-des-integrierten> (29.10.2022).

- OEC (2021a): Daten. Bovine meat. Hg. v. Observatory of Economic Complexity (OEC). Online verfügbar unter: [https://oec.world/en/profile/hs/bovine-meat#:~:text=Historical%20Data,-%23permalink%20to%20section&text=In%202020%2C%20the%20top%20exporters,and%20Netherlands%20\(%241.44B](https://oec.world/en/profile/hs/bovine-meat#:~:text=Historical%20Data,-%23permalink%20to%20section&text=In%202020%2C%20the%20top%20exporters,and%20Netherlands%20(%241.44B) (25.10.2022).
- OEC (2021b): Daten. Pig Meat. Hg. v. Observatory of Economic Complexity (OEC). Online verfügbar unter: <https://oec.world/en/profile/hs/pig-meat> (24.10.2022).
- Öko-Institut, ifeu, Prognos, Forschungszentrum für Umweltpolitik (Ffu) (2019): Feinkonzept zur Evaluierung der Nationalen Klimaschutzinitiative – Methodenhandbuch. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMU).
- Öko-Institut, ISI, F. (2021): Umsetzung Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 – Begleitung der Umsetzung der Maßnahmen des Aktionsprogramms. 5. Quantifizierungsbericht (2020). Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und nukleare Sicherheit (BMU). Hg. v. Öko-Institut e.V. (Öko-Institut). Online verfügbar unter: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/APK-2020-Quantifizierungsbericht-2020.pdf> (01.11.2022).
- Öko-Institut, ISI, F. (2020): Umsetzung Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 – Begleitung der Umsetzung der Maßnahmen des Aktionsprogramms. 4. Quantifizierungsbericht (2019). Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und nukleare Sicherheit (BMU). Hg. v. Öko-Institut e.V. (Öko-Institut). Online verfügbar unter: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/APK-2020-Quantifizierungsbericht-2019.pdf> (01.11.2022).
- Öko-Institut, ISI, F. (2019): Umsetzung Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 – Begleitung der Umsetzung der Maßnahmen des Aktionsprogramms. 3. Quantifizierungsbericht (2018). Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und nukleare Sicherheit (BMU). Hg. v. Öko-Institut e.V. (Öko-Institut). Online verfügbar unter: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/APK-2020-Quantifizierungsbericht-2018.pdf> (01.11.2022).
- Öko-Institut, ISI, F. (2018): Umsetzung Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 – Begleitung der Umsetzung der Maßnahmen des Aktionsprogramms. 2. Quantifizierungsbericht (2017). Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Hg. v. Öko-Institut e.V. (Öko-Institut). Online verfügbar unter: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/APK-2020-Quantifizierungsbericht-2017-final.pdf> (01.11.2022).
- Öko-Institut, ISI, F. (2017-2021): Umsetzung Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 – Begleitung der Umsetzung der Maßnahmen des Aktionsprogramms (2016-2020). Hg. v. Öko-Institut e.V. (Öko-Institut). Online verfügbar unter: <https://www.oeko.de/publikationen/p-details/umsetzung-aktionsprogramm-klimaschutz-2020-begleitung-der-umsetzung-der-massnahmen-des-aktionsprogramms-1> (01.11.2022).
- Öko-Institut, ISI, F. (2017): Umsetzung Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 – Begleitung der Umsetzung der Maßnahmen des Aktionsprogramms. 1. Quantifizierungsbericht (2016). Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Hg. v. Öko-Institut e.V. (Öko-Institut). Online verfügbar unter: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/APK-2020-Quantifizierungsbericht-2016.pdf> (01.11.2022).
- Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES, Thünen-Institut (2021): Projektionsbericht 2021 für Deutschland. Gemäß Artikel 18 der Verordnung (EU) 2018/1999 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 663/2009 und (EG) Nr. 715/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates sowie §10 (2) des Bundes-Klimaschutzgesetzes. Berlin, Karlsruhe, Braunschweig: Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). Online verfügbar unter: https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/projektionsbericht_2021_bf.pdf.
- Paschotta, R. (2020): RP-Energie-Lexikon. Volllaststunden. Hg. v. Dr. Rüdiger Paschotta. Online verfügbar unter: <https://www.energie-lexikon.info/volllaststunden.html> (28.10.2022).
- Peters, G. P., Andrew, R. M., Canadell, J. G., Fuss, S., Jackson, R. B., Korsbakken, J. I., Le Quéré, C., Nakicenovic, N. (2017): Key indicators to track current progress and future ambition of the Paris Agreement. *Nature Climate Change* 7, S. 118-122.
- Peters, G. P., Davis, S. J., Andrew, R. (2012): A synthesis of carbon in international trade. *Biogeosciences* 9, S. 3247–3276.
- Pilli, R., Alkama, R., Cescatti, A., Kurz, W. A., Grassi, G. (2022): The European forest carbon budget under future climate conditions and current management practices. *Biogeosciences* 19, S. 3263–3284.

Plötz, P., Moll, C., Li, Y., Bieker, G., Mock, P. (2020): Real-world usage of plug-in hybrid electric vehicles. Fuel consumption, electric driving, and CO₂ emissions. Hg. v. International Council on Clean Transportation (ICCT). Online verfügbar unter: <https://theicct.org/publication/real-world-usage-of-plug-in-hybrid-electric-vehicles-fuel-consumption-electric-driving-and-co2-emissions/> (27.10.2022).

Poore, J., Nemecek, T. (2018): Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. Science 360 (6392), S. 987-992.

Prognos, Fraunhofer ISI, DLR, Öko-Institut, KIT (2016): Wissenschaftlicher Bericht zur Vorbereitung des Erfahrungsberichts zum EEWärmeG. Wesentliche Ergebnisse Hg. v. Prognos AG (Prognos). Online verfügbar unter: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/vorbereitung-des-zweiten-erfahrungsberichts-eeg-waermegesetz-ergebnisse.pdf> (29.10.2022).

Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Hg. v. Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende Online verfügbar unter: <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland-2045> (27.10.2022).

Puls, T. (2013): CO₂-Regulierung für Pkw. Fragen und Antworten zu den europäischen Grenzwerten für Fahrzeughersteller. Hg. v. Institut der deutschen Wirtschaft Köln (IW). Online verfügbar unter: https://www.iwkoeln.de/fileadmin/publikationen/2017/228037/Broschuere_CO2_Grenzwerte_Druck.pdf (28.10.2022).

Reuter, M., Narula, K., Patel, M. K., Eichhammer, W. (2021): Linking energy efficiency indicators with policy evaluation – A combined top-down and bottom-up analysis of space heating consumption in residential buildings. Energy and Buildings 244.

Rosenwinkel, K. H., Kroiss, H., Dichtl, N., Seyfried, C.-F., Weiland, P. (2015): Anaerobtechnik. Abwasser-, Schlamm- und Reststoffbehandlung, Biogasgewinnung. Hg. v. Karl-Heinz Rosenwinkel, Helmut Kroiss, Norbert Dichtl, Carl-Franz Seyfried und Peter Weiland.

Roux, N., Plank, B. (2022): The misinterpretation of structure effects of the LMDI and an alternative index decomposition. MethodsX 9.

RWI (2021): Erstellung der Anwendungsbilanzen 2020 für den Sektor der Privaten Haushalte und den Verkehrssektor in Deutschland. Endbericht - August 2021. Hg. v. RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung. Online verfügbar unter: https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2020/10/rwi_anwendungsbilanz_2020_priv_hh_und_verkehr_vorl_eb.pdf (25.10.2022).

Scheel, M., Lindeskog, M., Smith, B., Suvanto, S., Pug, T. A. M. (2022): Increased Central European forest mortality explained by higher harvest rates driven by enhanced productivity. Environmental Research Letters 17.

Scheer, J., Clancy, M., Hógáin, S. N. (2013): Quantification of energy savings from Ireland's Home Energy Saving scheme. An ex post billing analysis. Energy Efficiency 6, S. 35-48.

Schipper, L., Fulton, L. (2013): Dazzled by diesel? The impact on carbon dioxide emissions of the shift to diesels in Europe through 2009. Energy Policy 54, S. 3-10.

Schlomann, B., Brunzema, I., Kemmler, A., Bürger, V., Mendelevitch, R. (2022): Methodikpapier zur ex-ante Abschätzung der Energie- und THG-Minderungswirkung von energie- und Klimaschutzpolitischen Maßnahmen. Kurzpapier im Rahmen des Vorhabens «Projektionen zu nationalen und europäischen Energie- und Klimazielen und zu Wirkungen von Einzelmaßnahmen und Maßnahmenprogrammen» im Auftrag des BMWK Hg. v. Öko-Institut e.V. (oeko). Online verfügbar unter: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Ex-ante-Massnahmenbewertung.pdf> (29.10.2022).

Schulte, S., Arnold, F., Gruber, K. (2021): Der Strompreis in Zeiten von Covid-19.

Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano, G., Wild, J., Ascoli, D., Petr, M., Honkaniemi, J., Lexer, M. J., Trotsiuk, V., Mairota, P., Svoboda, M., Fabrika, M., Nagel, T. A., Reyher, C. P. O. (2017): Forest disturbances under climate change. Nature Climate Change 7, S. 395-402.

Shammugam, S., Schleich, J., Schlomann, B., Montrone, L. (2022): Did Germany reach its 2020 climate targets thanks to the COVID-19 pandemic? Climate Policy. Online verfügbar unter: <https://doi.org/10.1080/14693062.2022.2063247>

Sijm, J., Neuhoﬀ, K., Chen, Y. (2006): CO₂ cost pass-through and windfall profits in the power sector. *Climate Policy* 6 (1), S. 49-72.

Sorrell, S., Dimitropoulos, J., Sommerville, M. (2009): Empirical estimates of the direct rebound eﬀect. A review. *Energy Policy* 37 (4), S. 1356-1371.

SPD Bündnis 90/Die Grünen und FDP (2021): Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag 2021–2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), Bündnis 90/ Die Grünen und den Freien Demokraten (FDP). Online verfügbar unter: https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf.

Springmann, M., Wiebe, K., Mason-D'Croz, D., Sulser, T. B., Rayner, M., Scarborough, P. (2018): Health and nutritional aspects of sustainable diet strategies and their association with environmental impacts: a global modelling analysis with country-level detail. *The Lancet Planetary Health* 2 (10), S. E451-E461.

SRU (2019): Offener Brief. Für die Umsetzung ambitionierter Klimapolitik und Klimaschutzmaßnahmen. Hg. v. Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU). Online verfügbar unter: https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2016_2020/2019_09_Brief_Klimakabinett.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (01.11.2022).

SRU (2017): Sondergutachten. Umsteuern erforderlich: Klimaschutz im Verkehrssektor. Hg. v. Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU). Online verfügbar unter: https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2016_2020/2017_11_SG_Klimaschutz_im_Verkehrssektor.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (01.11.2022).

SRU (2012): Umweltgutachten 2012. Verantwortung in einer begrenzten Welt. Hg. v. Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU). Online verfügbar unter: https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2012_2016/2012_06_04_Umweltgutachten_HD.pdf?__blob=publicationFile (01.11.2022).

Statista (2022): Grafik. Durchschnittlicher Preis für Superbenzin in Deutschland in den Jahren 1972 bis 2022 (Cent pro Liter). Hg. v. Statista GmbH. Online verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/776/umfrage/durchschnittspreis-fuer-superbenzin-seit-dem-jahr-1972/> (01.11.2022).

Statistik Austria (2022): Internetseite. Adress-, Gebäude- und Wohnungsregister. Online verfügbar unter: <https://www.statistik.at/datenbanken/adress-gebaeude-und-wohnungsregister> (03.11.2022).

Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2021): Fachserie / 3 / 3 / 1 / 2. Hg. v. Statistische Ämter des Bundes und der Länder. Online verfügbar unter: https://www.statistischebibliothek.de/mir/receive/DESerie_mods_00000307 (01.11.2022).

Steiner, V., Cludius, J. (2010): Artikel. Ökosteuer hat zu geringerer Umweltbelastung des Verkehrs beigetragen. Hg. v. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW). Online verfügbar unter: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/151937/1/10-13-1.pdf> (27.10.2022).

Stocker, M., Baffes, J., Vorisek, D. (2018): Internetseite. What triggered the oil price plunge of 2014-2016 and why it failed to deliver an economic impetus in eight charts. Hg. v. World Bank. Online verfügbar unter: <https://blogs.worldbank.org/developmenttalk/what-triggered-oil-price-plunge-2014-2016-and-why-it-failed-deliver-economic-impetus-eight-charts> (01.11.2022).

Sunikka-Blank, M., Galvin, R. (2012): Introducing the prebound effect. The gap between performance and actual energy consumption. *Building Research & Information* 40 (3), S. 260-273.

Swedish Climate Policy Council, S. E. A., Swedish Environmental Protection Agency (2022): Internetseite. Sweden's pathway to net-zero. Transition plan for Sweden. Hg. v. Swedish Climate Policy Council, Swedish Energy Agency und Swedish Environmental Protection Agency. Online verfügbar unter: <https://app.climateview.global/public/board/48023530-bb99-4a82-a00e-c9e7aad71f5d> (24.10.2022).

Thomas, S. (2012): Energieeffizienz spart wirklich Energie – Erkenntnisse zum Thema „Rebound-Effekte“. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 62 (8), S. 8-11.

Thonfeld, F., Gessner, U., Holzwarth, S., Kriese, J., da Ponte, E., Huth, J., Kuenzer, C. (2022): A First Assessment of Canopy Cover Loss in Germany's Forests after the 2018-2020 Drought Years. Remote sensing 14 (3), S. 562.

Thünen-Institut, Universität Hamburg, Hochschule für Nachhaltige Entwicklung Eberswalde (2017): Internetseite. Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung. Die Projektlaufzeit des WEHAM-Verbundprojektes endete zum 30.6.2017. Hg. v. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Online verfügbar unter: <https://www.weham-szenarien.de/> (28.10.2022).

Tiemeyer, B., Freibauer, A., Borraz, E. A., Augustin, J., Bechtold, M., Beetz, S., Beyer, C., Ebli, M., Eickenscheidt, T., Fiedler, S., Förster, C., Gensior, A., Giebels, M., Glatzel, S., Heinichen, J., Hoffmann, M., Höper, H., Jurasinski, G., Laggner, A., Leiber-Sauheitl, K., Peichl-Brak, M., Drösler, M. (2020): A new methodology for organic soils in national greenhouse gas inventories. Data synthesis, derivation and application. Ecological Indicators 109, S. 105838.

Transport & Environment, Gimbert, Y. (2021): Electric car boom at risk: why the current EU car CO₂ rules will do little to accelerate the switch to zero-emissions mobility. Hg. v. Transport & Environment. Online verfügbar unter: https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/11/2021_11_car_co2_report_final.pdf (27.10.2022).

UBA (2022a): Berechnung der Treibhausgasemissionsdaten für das Jahr 2021 gemäß Bundesklimaschutzgesetz. Begleitender Bericht. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/220310_vjs_2021_-_begleitender_bericht_-_sauber_vbs_korr_kurzfassung.pdf.

UBA (2022b): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2022. Nationaler Inventarbericht Zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2020. Unveröffentlicht. Hg. V. Umweltbundesamt (UBA) (Climate Change).

UBA (2022c): Daten der Treibhausgasemissionen des Jahres 2021 nach KSG. 2022_03_15_trendtabellen_thg_nach_sektoren_v1.0.xlsx. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen>, heruntergeladen 24.03.2022.

UBA (2022d): Internetseite. Distickstoffoxid-Emissionen. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/distickstoffoxid-emissionen> (25.10.2022).

UBA (2022e): Internetseite. Emissionen fluorierter Treibhausgase („F-Gase“). Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/emissionen-fluorierter-treibhausgas-f-gase#entwicklung-in-deutschland-seit-1995> (26.10.2022).

UBA (2022f): Internetseite. Endenergieverbrauch und Energieeffizienz des Verkehrs. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/endenergieverbrauch-energieeffizienz-des-verkehrs> (28.10.2022).

UBA (2022g): Internetseite. Energiebedingte Emissionen. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energiebedingte-emissionen> (25.10.2022).

UBA (2022h): Internetseite. EU-Verordnung über fluorierte Treibhausgase. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/fluorierte-treibhausgase-fckw/rechtliche-regelungen/eu-verordnung-ueber-fluorierte-treibhausgase> (29.10.2022).

UBA (2022i): Internetseite. Fahrleistungen, Verkehrsleistung und "Modal Split". Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/fahrleistungen-verkehrsaufwand-modal-split> 29.10.2022).

UBA (2022j): Internetseite. Flugreisen. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/mobilitaet/flugreisen> (28.10.2022).

UBA (2022k): Internetseite. Indikator: Endenergieproduktivität. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-endenergieproduktivitaet#die-wichtigsten-fakten> (24.10.2022).

UBA (2022l): Internetseite. Kraftwerke: konventionelle und erneuerbare Energieträger. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/kraftwerke-konventionelle-erneuerbare> (25.10.2022).

UBA (2022m): Internetseite. Primärenergieverbrauch. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergieverbrauch> (26.10.2022).

UBA (2022n): Tabellen. Germany. 2022 Common Reporting Format (CRF) Table. Online verfügbar unter: <https://unfccc.int/documents/461716> (24.10.2022).

UBA (2022o): TREMOD-Datenübermittlung (unveröffentlicht). Hg. v. Umweltbundesamt (UBA).

UBA (2021a): 2021 Common Reporting Format (CRF) Table. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA).

UBA (2021b): Internetseite. Schwere Nutzfahrzeuge. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsstandards/schwere-nutzfahrzeuge> (29.10.2022).

UBA (2021c): Internetseite. Umweltbezogene Steuern und Gebühren. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/umweltbezogene-steuern-gebuehren> (26.10.2022).

UBA (2021d): Internetseite. Wohnfläche. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/wohnflaeche> (26.10.2022).

UBA (2021e): Klimaschutzinstrumente im Verkehr. Umgestaltung der Kfz-Steuer: Bonus-Malus-System. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/366/dokumente/uba-kurzpapier_bonus-malus-system_kliv.pdf (01.11.2022).

UBA (2021f): Vorjahreschätzung der deutschen Treibhausgas-Emissionen für das Jahr 2020 - 15.03.2021. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen>.

UBA (2020a): Internetseite. Binnenschiffe. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsstandards/binnenschiffe> (29.10.2022).

UBA (2020b): Status quo der Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland. Sachstandspapier. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/hgp_statusquo_kraft-waermekopplung_final_bf.pdf (25.10.2022).

UBA (2020c): Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol 2020. National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2018 Federal Environment Agency. Hg. v. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Online verfügbar unter: <https://unfccc.int/documents/226313> (26.10.2022).

UBA (2016): Methoden- und Indikatorenentwicklung für Kenndaten zum Klimaschutz im Energiebereich. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_12_2016_methoden_und_indikatoren_entwicklung_fuer_kenndaten_zum_klimaschutz.pdf (24.10.2022).

UBA (2008): Pressemitteilung. Klimaschutz: Treibhausgasemissionen im Jahr 2007 um 2,4 Prozent gesunken. Warmes Wetter, hohe Energiepreise und erneut starker Zuwachs bei den erneuerbaren Energien wirken dämpfend. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/klimaschutz-treibhausgasemissionen-im-jahr-2007-um> (29.10.2022).

UBA, Thünen-Institut (2022): Prozentuale Sektorziele ermöglichen mehr Klimaschutz – das aktuelle Fallbeispiel Landwirtschaft. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA) und Thünen-Institut. Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/factsheet_prozentuale_sektorziele_ermoeneglichen_mehr_klimaschutz.pdf (13.10.2022).

Ueckerdt, F., Pfluger, B., Odenweller, A., Günther, C., Knodt, M., Kemmerzell, J., Rehfeldt, M., Bauer, C., Verpoort, P., Gils, H. C., Luderer, G. (2021): Durchstarten trotz Unsicherheiten: Eckpunkte einer anpassungsfähigen Wasserstoffstrategie. Wie die Politik Wasserstoffpfade hin zur Klimaneutralität 2045 finden kann. Ein Ariadne-Kurzdossier. Hg. v. Kopernikus-Projekt Ariadne. Online verfügbar unter: <https://ariadneprojekt.de/publikation/eckpunkte-einer-anpassungsfahigen-wasserstoffstrategie/> (01.11.2022).

UNFCCC (2022): News. Climate Plans Remain Insufficient: More Ambitious Action Needed Now. Hg. v. United Nations Climate Change (UNFCCC). Online verfügbar unter: <https://unfccc.int/news/climate-plans-remain-insufficient-more-ambitious-action-needed-now> (31.10.2022).

UNFCCC (2014): Report of the Conference of the Parties on its nineteenth session, held in Warsaw from 11 to 23 November 2013. Addendum. Part two: Action taken by the Conference of the Parties at its nineteenth session. FCCC/CP/2013/10/Add.3.

UNFCCC (2000): Review of the implementation of commitments and of other provisions of the convention. UNFCCC guidelines on reporting and review (FCCC/CP/1999/7). Hg. v. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Online verfügbar unter: <https://unfccc.int/resource/docs/cop5/07.pdf> (01.11.2022).

Van den Bergh, J. C. J. M. (2011): Industrial energy conservation, rebound effects and public policy. Hg. v. United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). Online verfügbar unter: <https://www.unido.org/api/opentext/documents/download/9928767/unido-file-9928767> (28.10.2022).

VDI (2013): VDI-Richtlinien. VDI 3807 Blatt 1. Verbrauchskennwerte für Gebäude - Grundlagen. Hg. v. Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI). Online verfügbar unter: <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3807-blatt-1-verbrauchskennwerte-fuer-gebaeude-grundlagen-1> (29.10.2022).

Vos, C., Rösemann, C., Haenel, H.-D., Dämmgen, U., Döring, U., Wulf, S., Eurich-Menden, B., Freibauer, A., Döhler, H., Schreiner, C., Osterburg, B., Fuß, R. (2022): Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 – 2020: Input data and emission results. Hg. v. Open Agrar Repository. Online verfügbar unter: https://www.openagrar.de/receive/openagrar_mods_00078113 (25.10.2022).

Vos, C., Rösemann, C., Haenel, H.-D., Dämmgen, U., Döring, U., Wulf, S., Eurich-Menden, B., Freibauer, A., Döhler, H., Schreiner, C., Osterburg, B., Fuß, R. (2022): Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 – 2020: Report on methods and data (RMD) Submission 2022. Online verfügbar unter: https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-report/Thuenen_Report_91.pdf.

Yamaji, K., Matsushashi, R., Nagata, Y., Kayab, Y. (1993): A study on economic measures for CO₂ reduction in Japan. Energy Policy 21 (2), S. 123-132.

ZKL (2021): Zukunft Landwirtschaft. Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Empfehlungen der Zukunftskommission Landwirtschaft. Hg. v. Zukunftskommission Landwirtschaft (ZKL). Online verfügbar unter: https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/abschlussbericht-zukunftskommission-landwirtschaft.pdf?__blob=publicationFile&v=16 (31.10.2022).

Expertenrat für Klimafragen (ERK)

Seydelstr. 15

10117 Berlin

www.expertenrat-klima.de
