

CLIMATE CHANGE

20/2023

Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2022

von

Petra Icha, Dr. Thomas Lauf,
Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

Unter Mitarbeit von
Gunter Kuhs
Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

Herausgeber: Umweltbundesamt

CLIMATE CHANGE 20/2023

Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2022

von

Petra Icha, Dr. Thomas Lauf
Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 [/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Abschlussdatum:

April 2023

Redaktion:

Fachgebiet V 1.5 Energiedaten Geschäftsstelle der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat)
Petra Icha

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Mai 2023

Kurzbeschreibung

Das Umweltbundesamt veröffentlicht jährlich seine Berechnungsergebnisse zur Entwicklung des Kohlendioxid-Emissionsfaktors des deutschen Strommix in der Zeitreihe ab 1990, der als Indikator für die Klimaverträglichkeit der Stromerzeugung angesehen werden kann. Er darf jedoch nicht losgelöst von der Entwicklung des Stromverbrauchs insgesamt und den gesamten aus der Stromerzeugung entstehenden Kohlendioxidemissionen betrachtet werden. Dargestellt werden daher die Kohlendioxidemissionen der Stromerzeugung, der jeweilige Stromverbrauch mit und ohne Berücksichtigung des Stromhandelssaldos und der **CO₂-Emissionsfaktor für den deutschen Strommix**, der **CO₂-Emissionsfaktor für den Strominlandsverbrauch für den deutschen Strommix** und der **CO₂-Emissionsfaktor unter Berücksichtigung des Stromhandelssaldos**. Die Kohlendioxidemissionen der Stromerzeugung unter Berücksichtigung des Stromhandelssaldos werden zusätzlich ausgewiesen.

Die jährliche Fortschreibung und Aktualisierung der spezifischen CO₂-Emissionen des deutschen Strommix erfolgt auf Basis der Emissionen entsprechend dem Berichtsstand der Treibhausgasberichterstattung an das Klimasekretariat sowie der Stromerzeugung entsprechend der Daten der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, des statistischen Bundesamtes und der Arbeitsgruppe Erneuerbarer Energien-Statistik (AGEE - Stat) für die Zeitreihe 1990 –2021. Dabei werden im Veröffentlichungsjahr x für das Jahr „x-1“ hochgerechnete Datensätze und für das Jahr „x-2“ vorläufige Basisdatensätze zur Berechnung herangezogen.

Änderungen durch Neuberechnungen der Quellen (Energiebilanzen, Bruttostromerzeugung, Emissionsfaktoren) werden – soweit sie zum Zeitpunkt der Aktualisierung veröffentlicht waren – berücksichtigt. Eine Aktualisierung von Emissionsfaktoren in den Treibhausgasinventaren bedingt Veränderungen im Bereich der Emissionen aus der Stromerzeugung, eine Aktualisierung im Bereich der erneuerbaren Energien verursacht Rückwirkungen auf die Bruttostromerzeugung und eine Neubewertung des Stromhandelssaldos hat Veränderungen im Stromverbrauch für den deutschen Strommix zur Folge (siehe auch Kapitel ergänzende Hinweise zu den Datengrundlagen).

Deutschland weist seit dem Jahr 2003 beim Stromexport einen Überschuss auf, der im Jahr 2017 mit einem Stromhandelssaldo von 52,5 TWh einen Höchststand erreicht hat und seither bis zum Jahr 2021 auf 18,6 TWh zurück gegangen und in 2022 wieder auf 27 TWh gestiegen ist. Der Anteil des Stromhandelssaldos an der Bruttostromerzeugung beziffert sich in 2022 auf 4,7 % und verursacht rund 12 Mio t. CO₂ Emissionen. Um diese Menge würden sich die deutschen CO₂-Emissionen aus dem Stromsektor reduzieren, wenn das Stromhandelssaldo ausgeglichen wäre.

Das Jahr 2021 ist geprägt durch die Konjunkturelle Erholung nach den Folgen des Corona-Pandemie Jahres 2020. Gegaart wird diese Entwicklung mit einer vergleichsweise geringen witterungsbedingten Stromerzeugung aus Wind. Das Jahr 2022 ist wiederum beeinflusst durch die Auswirkungen des russischen Angriffskrieges in der Ukraine. Zwar kommt es aufgrund der daraus resultierenden Gaskrise zu einer Reduktion des Stromverbrauchs, dieser wird jedoch vermehrt durch die emissionsintensive Kohle gedeckt.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	6
Abkürzungen.....	7
1 Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix.....	8
2 Methode zur Berechnung.....	13
2.1 CO ₂ -Emissionsfaktor für den deutschen Strommix	13
2.2 CO ₂ -Emissionsfaktor Strominlandsverbrauch für den deutschen Strommix	13
2.3 CO ₂ -Emissionsfaktor unter Berücksichtigung des Stromhandelssaldos	13
2.4 Kohlendioxidemissionen aus der gesamten Stromerzeugung	13
2.5 Kohlendioxidemissionen der inländischen Stromerzeugung	14
2.6 Für den Endverbrauch zur Verfügung stehende Strommenge inländischer Erzeugung	15
2.7 Inländischer Stromverbrauch	15
2.8 THG-Emissionsfaktor des deutschen Strommix	16
2.9 Vorketten für den THG-Emissionsfaktor des deutschen Strommix	16
3 Entwicklung der Emissionsfaktoren des deutschen Strommix.....	18
4 Zusammenfassung.....	25
5 Ergänzende Hinweise zu den Datengrundlagen.....	27
6 Quellenverzeichnis	28
A Anhang 1: CO ₂ -Emissionen der Stromerzeugung gemäß Datenbank ZSE in Mio. t.....	29
B Anhang 2: Aus der Bruttostromerzeugung berechneter Stromverbrauch	30
C Anhang 3: Emissionsfaktoren entsprechend ZSE	32

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Entwicklung der absoluten Kohlendioxidemissionen der Stromerzeugung und der Entwicklung des Stromverbrauchs im Vergleich	18
Abb. 2:	Brutto-Inlandsstromverbrauch und Stromaustauschsaldo Ausland prägen den aktuellen Trend der Bruttostromerzeugung in Deutschland	22
Abb. 3:	Anteil der Energieträger an der Bruttostromerzeugung – „Deutscher Strommix“	23
Abb. 4:	Anteil der Energieträger an der Bruttostromerzeugung im Jahr 2022*	23
Abb. 5:	Entwicklung der absoluten und der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen der Stromerzeugung im Vergleich (unter Beachtung des Stromhandelssaldos)	25

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Gerundete Ausgangsgrößen und Berechnungsergebnis: Emissionen der Stromerzeugung, Stromverbrauch und Emissionsfaktor des Stroms.....	10
Tabelle 2:	CO ₂ und THG-Emissionsfaktoren zum Stromverbrauch im deutschen Strommix mit und ohne Berücksichtigung der Vorkette für das Jahr 2022	17
Tabelle 3:	CO ₂ -Emissionsfaktoren fossiler Brennstoffe im Vergleich mit dem CO ₂ -Emissionsfaktor des deutschen Strommix 2022*	19
Tabelle 4:	Durchschnittliche Brennstoffausnutzungsgrade bezogen auf die Bruttostromerzeugung ¹	20

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
AGEB	Arbeitsgemeinschaft für Energiebilanzen e.V.
AGEE - Stat	Arbeitsgruppe Erneuerbarer Energien - Statistik
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
EB	Energiebilanz
EU	Europäischer Union
CO ₂	Kohlendioxid
Destatis	Statistisches Bundesamt
EF	Emissionsfaktor
EM	Emission
g	Gramm
HW	Heizwert
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
Mio.	Millionen
Mrd.	Milliarden
NIR	Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar
PSE	Pumpstromezeugung, ohne Erzeugung aus natürlichem Zufluss
THG	Treibhausgase
TWh	Terrawattstunden
UBA	Umweltbundesamt
ZSE	Zentrales System der Emissionen (interne Datenbank des Umweltbundesamtes zur Internationalen Emissionsberichterstattung)

1 Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix

Das Umweltbundesamt berechnet jährlich mehrere Indikatoren, die die Klimaverträglichkeit der Stromerzeugung und die Entwicklung ab dem Jahr 1990 charakterisieren.

Die „direkten CO₂-Emissionen je Kilowattstunde Strom“ werden als **„Emissionsfaktor für den deutschen Strommix“** bezeichnet.

Bei der Erzeugung einer Kilowattstunde Strom für den Endverbrauch ohne Berücksichtigung des Stromhandelssaldos wurden in Deutschland im Jahr 2020 durchschnittlich 369 g Kohlendioxid als direkte Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger emittiert. Das sind 395 g CO₂/kWh oder ca. 51,7 % weniger als im Jahr 1990.

Für das Jahr 2021 sind dies auf der Basis vorläufiger Daten 410 g CO₂/kWh. Hochgerechnete Werte für das Jahr 2022 ergeben 434 g CO₂/kWh.

Der spezifischen Emissionsfaktor der Treibhausgase beträgt 769 g CO₂-Äquivalente/kWh für das Jahr 1990. Berücksichtigt man darüber hinaus die Emissionen der Vorketten, ergibt sich ein spezifischen Emissionsfaktor der Treibhausgase mit Vorketten von ca. 860 g CO₂-Äquivalente/ kWh für das gleiche Basisjahr 1990.

Bis zum Jahr 2020 ist ein stetiger Rückgang des spezifischen Emissionsfaktors der Treibhausgase ohne Vorketten auf 377 g CO₂-Äquivalente /kWh und mit Vorketten auf 432 g CO₂-Äquivalente /kWh zu verzeichnen. Für das Jahr 2021 betragen die spezifischen Emissionsfaktoren der Treibhausgase ohne Vorkette 418 g CO₂-Äquivalente /kWh und mit Vorkette 475 g CO₂-Äquivalente /kWh. Die Schätzungen weisen für das Jahr 2022 für die CO₂-Äquivalente ohne Vorketten einen Wert von 442g/CO₂-Äquivalente und mit Vorketten einen Wert von 498 g/CO₂-Äquivalente aus.

Die wirtschaftliche Erholung nach dem Pandemiejahr 2020 führte gepaart mit einer witterungsbedingten geringeren Windenergieerzeugung zu einer vermehrten Nutzung emissionsintensiver Kohleverstromung, wodurch sich der die spezifischen Emissionsfaktoren im Jahr 2021 wieder erhöhten. Dieser Effekt beschleunigte sich noch einmal im Jahr 2022. Ursache hierfür sind neben der durch den russischen Angriffskrieg in der Ukraine ausgelösten Gaskrise, u.a. der fortschreitende Kernenergieausstieg in Deutschland, sowie die Dürre- und Revisionsbedingte Reduktion der französischen Kernenergieerzeugung, welche zu höheren Stromexporten von Deutschland nach Frankreich führte.

Gemäß internationalen Bilanzierungsvorgaben (1) sind alle Emissionen der Stromerzeugung – also auch Stromhandelsüberschüsse – dem Land zuzurechnen, in dem sie entstehen. Der diese Bilanzierungsvorgaben berücksichtigende CO₂-Faktor erhöht sich damit entsprechend dem Stromhandelssaldo.

Deutschland weist seit dem Jahr 2003 beim Stromexport einen Überschuss auf, der im Jahr 2017 mit einem Stromhandelssaldo von 52,5 TWh einen Höchststand erreicht hat und seither bis zum Jahr 2021 auf 18,6 TWh zurück gegangen und in 2022 wieder auf 27 TWh gestiegen ist. Der Anteil Stromhandelssaldos an der Bruttostromerzeugung beziffert sich in und 2022 auf 4,7 %.

Zur Berücksichtigung dieser Effekte wird ein CO₂-Emissionsfaktor für den deutschen Strommix unter Berücksichtigung des Stromhandelssaldos – im Folgenden genannt **„Emissionsfaktor Strominlandsverbrauch für den deutschen Strommix“**. Die Entwicklung dieses Faktors ist neben dem „Emissionsfaktor Strommix“ in Tabelle 1 dargestellt. Der Unterschied zwischen beiden Bilanzierungsmethoden liegt im Jahr 2022 bei 24 g CO₂/kWh bzw. ca. 12 Mio. t CO₂. Um diese Menge

würden sich die deutschen CO₂-Emissionen aus dem Stromsektor reduzieren, wenn das Stromhandelssaldo ausgeglichen wäre.

Seit dem Jahr 2020 wird neben den direkten Verbrennungsemissionen die Systemgrenze noch um eine Lebenszyklusbetrachtung erweitert, sodass auch die indirekten Emissionen angegeben werden. Hierzu zählen Emissionen, die außerhalb der Umwandlungsprozesse in den sog. Vorketten entstehen, wie z. B. bei der Herstellung von Anlagen zur Energieumwandlung oder der Gewinnung und Bereitstellung von Primär- und Sekundärenergieträgern. Dieser CO₂-Emissionsfaktor inkl. Vorketten-Emissionen wird im Rahmen der Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger (14) verwendet. In diesem Kontext werden auch die THG-Emissionen (in CO₂-Äquivalenten) der deutschen Stromerzeugung ermittelt. (vgl. hierzu Tabelle 2).

Methodenverbesserungen und Datenaktualisierungen entsprechend dem Stand der Energiestatistik und der internationalen Emissionsberichterstattung wurden übernommen (siehe auch Kapitel ergänzende Hinweise zu den Datengrundlagen).

Die Details sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Gerundete Ausgangsgrößen und Berechnungsergebnis: Emissionen der Stromerzeugung, Stromverbrauch und Emissionsfaktor des Stroms

Jahr	Kohlendi-oxidemis-sionen der Strom-erzeu-gung ¹ [Mio. t]	Strom-ver-brauch ² [TWh]	CO ₂ -Emissions-faktor Strommix ³ [g/kWh]	Strom-verbrauch unter Berücksichtigung des Strom-handels-saldos ⁴ [TWh]	CO ₂ -Emissions faktor Strom-inlands-ver-brauch ⁵ [g/kWh]	Kohlendi-oxidemis-sionen der Strom-erzeugung unter Berücksichtigung Handels-saldo ⁶ [Mio. t]	THG-Emissions-faktor ohne Vorketten [g CO ₂ -Äqui-valente /kWh]	THG-Emissions-faktor mit Vorketten [g CO ₂ -Äqui-valente /kWh]	THG-Emis-sionen der Strom-erzeugung [Mio. t CO ₂ -Äqui-valente] ⁷
1990	366	479	764	480	763	367	769	860	369
1991	361	473	764	473	765	361	769	864	364
1992	345	472	730	467	739	341	735	827	347
1993	335	462	726	462	725	335	731	825	337
1994	335	464	722	467	718	337	727	821	338
1995	335	470	713	475	706	338	718	812	337
1996	336	490	684	485	692	332	689	782	338
1997	325	486	668	483	673	323	673	764	327
1998	329	491	670	490	671	328	675	767	331
1999	318	492	647	493	645	319	652	739	321
2000	327	507	644	510	640	329	649	736	329
2001	335	509	659	512	655	337	664	748	338
2002	338	517	653	524	645	342	658	740	340
2003	340	535	635	532	639	338	640	721	343
2004	333	541	615	539	618	331	620	698	336
2005	333	545	611	540	616	330	616	677	336
2006	339	562	604	545	623	329	609	672	342
2007	350	563	622	547	641	340	628	693	354
2008	328	564	581	544	602	316	587	650	331
2009	299	528	567	515	580	292	573	635	302
2010	313	563	556	548	571	305	562	636	317
2011	310	546	568	542	572	308	575	647	314
2012	321	559	574	539	595	309	581	653	325
2013	326	568	573	536	607	307	580	654	330
2014	312	558	559	525	595	293	566	639	316
2015	304	576	528	528	576	279	535	600	309

Jahr	Kohlendi-oxidemis-sionen der Strom-erzeu-gung ¹ [Mio. t]	Strom-ver-brauch ² [TWh]	CO ₂ -Emissions-faktor Strommix ³ [g/kWh]	Strom-verbrauch unter Berücksichtigung des Strom-handels-saldos ⁴ [TWh]	CO ₂ -Emissions faktor Strom-inlands-ver-brauch ⁵ [g/kWh]	Kohlendi-oxidemis-sionen der Strom-erzeugung unter Berücksichtigung Handels-saldo ⁶ [Mio. t]	THG-Emissions-faktor ohne Vorketten [g CO ₂ -Äqui-valente /kWh]	THG-Emissions-faktor mit Vorketten [g CO ₂ -Äqui-valente /kWh]	THG-Emis-sionen der Stromer-zeugung [Mio. t CO ₂ -Äqui-valente] ⁷
1990	366	479	764	480	763	367	769	860	369
2016	303	579	524	529	574	277	531	595	308
2017	283	582	486	530	535	258	494	552	287
2018	271	572	473	524	517	248	480	537	275
2019	223	542	411	510	437	209	418	474	227
2020	189	511	369	492	383	182	377	432	192
2021*	215	523	410	505	425	207	418	475	219
2022* *	223	513	434	486	459	211	442	498	227

2021 *vorläufig 2022 ** geschätzt

Quellen: Umweltbundesamt eigene Berechnung April 2023

1 UBA Berechnungen auf Grundlage des deutschen Treibhausgasinventares 1990-2022

2 Stromverbrauch = Bruttostromerzeugung (eigene Berechnung AGEb und AGEE-Stat) - Kraftwerkseigenverbrauch - Pumpstrom-Leitungsverluste

3 UBA-Berechnungen auf der Grundlage der Daten der Emissionsinventare auf Datenbasis der AGEb (Veröffentlichung AGEb Energiebilanz 2021. und des Statistischen Bundesamtes

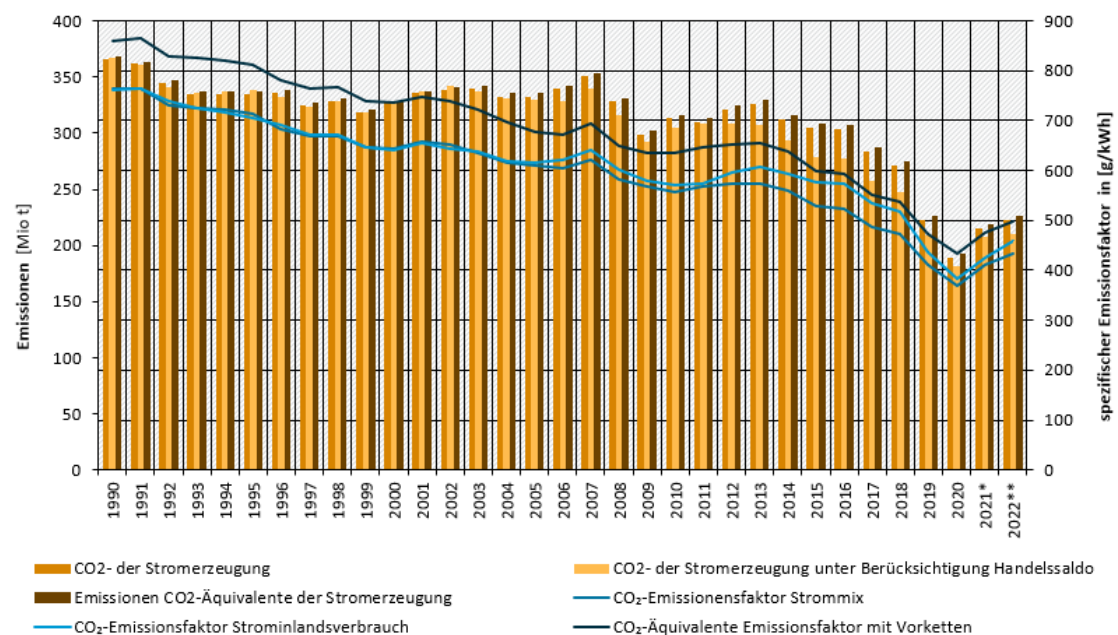
4 Stromverbrauch incl. Stromhandelssaldo = Bruttostromerzeugung (AGEb + AGEE-Stat) - Kraftwerkseigenverbrauch - Pumpstrom-Leitungsverluste + (Stromhandelssaldo Destatis)

5 UBA Berechnungen unter Berücksichtigung des Stromhandelssaldos (Destatis)

6 Emissionen der Stromerzeugung abzüglich der Emissionen die dem Stromhandelssaldo zugerechnet wurden

7 UBA Berechnungen unter Berücksichtigung CH₄ und N₂O

Entwicklung der spezifischen Emissionen des deutschen Strommix 1990-2021 und erste Schätzungen 2022 im Vergleich zu Emissionen der Stromerzeugung



2021* vorläufig 2022** geschätzt

Quellen: Umweltbundesamt eigene Berechnungen April 2023

Jahr	Kohlendioxid-emissionen der Stromerzeugung [Mio. t]	CO ₂ -Emissionsfaktor Strommix [g/kWh]	Kohlendioxid-emissionen der Stromerzeugung unter Berücksichtigung Handelssaldo [Mio. t]	CO ₂ -Emissionsfaktor Strominlandsverbrauch [g/kWh]	Emissionen Kohlendioxid-äquivalente der Stromerzeugung [Mio. t]	CO ₂ -Äquivalente Emissionsfaktor mit Vorketten [g/kWh]
1990	366	764	367	763	369	860
1991	361	764	361	765	364	864
1992	345	730	341	739	347	827
1993	335	726	335	725	337	825
1994	335	722	337	718	338	821
1995	335	713	338	706	337	812
1996	336	684	332	692	338	782
1997	325	668	323	673	327	764
1998	329	670	328	671	331	767
1999	318	647	319	645	321	739
2000	327	644	329	640	329	736
2001	335	659	337	655	338	748
2002	338	653	342	645	340	740
2003	340	635	338	639	343	721
2004	333	615	331	618	336	698
2005	333	611	330	616	336	677
2006	339	604	329	623	342	672
2007	350	622	340	641	354	693
2008	328	581	316	602	331	650
2009	299	567	292	580	302	635
2010	313	556	305	571	317	636
2011	310	568	308	572	314	647
2012	321	574	309	595	325	653
2013	326	573	307	607	330	654
2014	312	559	293	595	316	639
2015	304	528	279	576	309	600
2016	303	524	277	574	308	595
2017	283	486	258	535	287	552
2018	271	473	248	517	275	537
2019	223	411	209	437	227	474
2020	189	369	182	383	192	432
2021*	215	410	207	425	219	475
2022**	223	434	211	459	227	498

* vorläufig ** geschätzt

2 Methode zur Berechnung

Eine Aktualisierung der Emissionsfaktoren in den Treibhausgasinventaren für „sonstige Gase“ führt zu einer Neubewertung der Emissionen aus der Stromerzeugung und die Aktualisierung der Anteile erneuerbaren Energien sowie des Stromhandelssaldos in der Bruttostromerzeugung hat Veränderungen im Stromverbrauch für den deutschen Strommix zur Folge.

2.1 CO₂-Emissionsfaktor für den deutschen Strommix

Der Emissionsfaktor für den deutschen Strommix wird berechnet aus den direkten CO₂-Emissionen, die bei der gesamten Stromerzeugung entstehen, und dem für den Endverbrauch netto zur Verfügung stehenden Strom aus der Stromerzeugung in Deutschland.

$$Emissionsfaktor = \frac{\text{direkte CO}_2\text{-Emissionen}}{\text{Stromverbrauch}}$$

Die für die Berechnung zugrunde gelegten CO₂-Emissionen aus der Stromerzeugung für die einzelnen Brennstoffe sind in Anhang 1 aufgeführt, der aus der Bruttostromerzeugung berechnete Stromverbrauch in Anhang 2. Die zur Berechnung herangezogene Bruttostromerzeugung wird im UBA auf der Grundlage der Daten der AGEb für die konventionellen Brennstoffe und der der Erneuerbaren Energien auf der Grundlage von der AGE-Stat ermittelt.

2.2 CO₂-Emissionsfaktor Strominlandsverbrauch für den deutschen Strommix

Der Emissionsfaktor Strominlandsverbrauch für den deutschen Strommix wird berechnet aus den direkten CO₂-Emissionen, die bei der gesamten Stromerzeugung entstehen (I), und einem inländischen Stromverbrauch. Dieser entspricht dem Endverbrauch netto im Inland (IV) abzüglich des Stromhandelssaldos (III). Ab 2019 wurde für die Berechnung auf den Stromhandelssaldo aus der amtlichen Statistik „Monatsbericht der Elektrizitätsversorgung“ des Statistischen Bundesamtes abgestellt.

$$Emissionsfaktor \text{ Inlandsverbrauch} = \frac{\text{direkte CO}_2\text{-Emissionen}}{\text{Stromverbrauch} - \text{Stromhandelssaldo}}$$

2.3 CO₂-Emissionsfaktor unter Berücksichtigung des Stromhandelssaldos

Der Emissionsfaktor unter Berücksichtigung des Stromhandelssaldos wird iterativ berechnet. Die direkten CO₂-Emissionen, die bei der Stromerzeugung entstehen (I), werden korrigiert um den Wert des mit dem Emissionsfaktor für den deutschen Strommix bewerteten Stromhandelssaldos (IV).

$$Emissionsfaktor \text{ unter Berücksichtigung des Handelssaldos} = \frac{\text{direkte CO}_2\text{-Emissionen} - (\text{Stromhandelssaldo} \cdot \text{Emissionsfaktor})}{\text{Stromverbrauch} - \text{Stromhandelssaldo}}$$

2.4 Kohlendioxidemissionen aus der gesamten Stromerzeugung

I. Menge der direkten Kohlendioxidemissionen eines Kalenderjahres aus der Verbrennung fossiler Energieträger zur Stromerzeugung in der Bundesrepublik Deutschland.

In dieser Angabe sind Kohlendioxidemissionen aus den der Stromerzeugung vorgelagerten Erzeugungsstufen (Vorketten) wie z.B. Brennstoffgewinnung und -transport, die so genannten „indirekten Emissionen“ (Vorketten), nicht enthalten. Die Kohlendioxidemissionen für die

Stromerzeugung werden aus der Datenbank des Umweltbundesamtes (Zentrales System der Emissionen – ZSE) (3) für die Stromerzeugung in Deutschland gefiltert. Anhang 1 weist die für die Berechnung zugrunde gelegten CO₂-Emissionen aus der Stromerzeugung für die einzelnen Brennstoffe aus.

Die Kohlendioxidemissionen werden durch Multiplikation der Brennstoffeinsätze mit den brennstoffbezogenen Kohlendioxidemissionsfaktoren berechnet. Als Brennstoffeinsätze werden die Energiebilanzzeilen „Öffentliche Wärmekraftwerke“ und „Industriewärmekraftwerke“ aus der Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland herangezogen. Diese Datenbanksätze weisen ausschließlich den Brennstoffeinsatz zur Stromerzeugung aus, auch wenn es sich dabei um gekoppelte Stromerzeugung in einer Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage handelt. Die Verteilung von Strom und Wärme aus der Kraft-Wärmekopplung erfolgt mittels der „finnischen Methode“ auf der Ebene der Erstellung der Energiebilanz für Deutschland (2).

Die dem Inventar zugrunde gelegten Emissionsfaktoren wurden aus der Liste der „CO₂-Emissionsfaktoren für die Erstellung der nationalen CO₂-Inventare“ abgeleitet. Eine nähere Beschreibung der Methodik zur Ableitung der Emissionsfaktoren findet sich im nationalen Inventarbericht (9). Anhang 3 weist die für die Berechnung zugrunde gelegten Emissionsfaktoren aus (9 sowie 10). In die Berechnung der Kohlendioxidemissionen aus der Stromerzeugung ist der Einsatz von Abfällen als Brennstoff (Hausmüll/Siedlungsabfall sowie Industriemüll) einbezogen. Berücksichtigt wird nur der fossile Anteil der Abfallmengen. Dieser wird mit 50 % des Energiegehaltes angenommen. Dabei werden die Abfallmengen aus der Fachserie 19 Reihe 1 des Statistischen Bundesamtes (Destatis) (5) mit entsprechenden Heizwerten und Emissionsfaktoren multipliziert und berichtet.

Um die Konsistenz zu den weiteren Treibhausgasemissionen herzustellen wurde im Zuge der Aktualisierung die Kohlendioxid - Emissionen der Rauchgasentschwefelung (REA-) in die Berechnung der CO₂-Emissionen mit aufgenommen.

CO₂-Emissionen aus erneuerbaren Energien werden gemäß Bilanzierungsregeln des UNFCCC zur Treibhausgasberichterstattung unter dem Kyoto-Protokoll als CO₂-neutral bilanziert und gehen in die Berechnung der Emissionen mit dem Wert „0“ ein.

Die Kohlendioxidemissionen der Stromerzeugung aus der Kernkraft werden in die Berechnung mit dem Wert „0“ einbezogen.

Die Berechnungen der Kohlendioxidemissionen sind für Jahr x-2 vorläufig und für das Jahr x-1 geschätzt. Das Jahr X ist definiert als das Vorjahr des Veröffentlichungsjahres.

Anhang 1 weist die Emissionen der Stromerzeugung nach Brennstoffen entsprechend der Emissionsdatenbank „Zentrales System der Emissionen“ (ZSE) aus.

2.5 Kohlendioxidemissionen der inländischen Stromerzeugung

II. Menge der direkten Emissionen (unter 2.1 berechnet) iterativ verringert um die Emissionen, die dem Stromhandelssaldo zugerechnet werden können.

$$\begin{aligned} & \text{Emissionen unter Berücksichtigung des Stromhandelssaldos} \\ & = \text{Emissionen laut ZSE} - (\text{Stromhandelssaldo} * \text{Emissionsfaktor}) \end{aligned}$$

Im Ergebnis werden die Emissionen ausgewiesen, welche dem tatsächlich in der Bundesrepublik verbrauchten Strom zugeordnet werden können.

2.6 Für den Endverbrauch zur Verfügung stehende Strommenge inländischer Erzeugung

III. Die gesamte, im jeweiligen Kalenderjahr für den Endverbrauch zur Verfügung stehende Strommenge, welche in der Bundesrepublik Deutschland erzeugt wurde (umfasst fossil, nuklear und regenerativ erzeugten Strom).

Diese berechnet sich durch den Abzug des Kraftwerkseigenverbrauchs, der Leitungsverluste und der Pumpstromarbeit von der gesamten Bruttostromerzeugung. Die Angaben zu Pumpströmen wurden auf die Pumparbeit aktualisiert, welche in der amtlichen Statistik „Monatsbericht der Energieerzeugung“ des Statistischen Bundesamtes ausgewiesen wird. Die Größe gibt in Quantität und Qualität sehr gut den in Haushalt, Gewerbe und Industrie zum Endverbrauch zur Verfügung stehenden Strom wieder, berücksichtigt jedoch nicht Stromimporte und Exporte. Daher ist sie nicht mit dem inländischen Stromverbrauch gleichzusetzen. Die Datenbasis für die konventionellen Brennstoffe für die Bruttostromerzeugung ist die Tabelle „Bruttostromerzeugung in Deutschland von 1990 bis 2022 nach Energieträgern“ welche im Auftrag des BMWi erarbeitet und auf der Seite der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. veröffentlicht wird (6). Für die Erneuerbaren Energien wurde ab 2018 auf die von der AGEE-Stat berechneten und beim BMWi veröffentlichten Daten zur Stromerzeugung Bezug genommen. Gleiches gilt für den Außenhandelssaldo (12 und 13).

Zur Ermittlung der Leitungsverluste wird die in der Energiebilanzzeile 41 „Fackel- und Leitungsverluste“ unter Strom verbuchte Gesamtmenge den einzelnen Energieträgern ihrem Anteil an der Stromerzeugung entsprechend zugeordnet. Die gleiche Vorgehensweise wird für die Gesamtsumme Strom der Kraftwerkseigenverbräuche aus der Datenquelle Energiebilanzzeile 36 „Kraftwerke“ angewandt (8 und 11).

Die Pumparbeit (Pumpstromverbrauch) der Wasserspeicherkraftwerke ist ab 2018 aus den Monatsberichten des Statistischen Bundesamtes zugrunde gelegt worden (12).

Strommenge Endverbrauch

$$= \text{Bruttostromerzeugung} - \text{Kraftwerkseigenverbrauch} - \text{Leitungsverluste} - \text{Pumparbeit}$$

2.7 Inländischer Stromverbrauch

IV. Der gesamte **inländische Stromverbrauch** berücksichtigt den Stromhandelssaldo im Endenergieverbrauch (inländischer Stromverbrauch = Bruttostromerzeugung abzüglich Kraftwerkseigenverbrauch, Pumparbeit, Leitungsverluste und Stromhandelssaldo absolut). Hier liegt die Annahme zugrunde, dass Stromexport und -import im Netz dem gleichen Strommix unterliegen und somit der gleiche Spezifische CO₂-Faktor angewendet werden kann.

inländischer Stromverbrauch

$$= \text{Bruttostromerzeugung} - \text{Kraftwerkseigenverbrauch} - \text{Leitungsverluste} - \text{Pumparbeit} - \text{Stromhandelssaldo (absolut)}$$

2.8 THG-Emissionsfaktor des deutschen Strommix

Bei der Ermittlung des Treibhausgas (THG)-Emissionsfaktors des deutschen Strommix wird die Berechnung um die Treibhausgase Methan (CH₄) und Distickstoffoxid (Lachgas, N₂O) erweitert. Die entsprechenden Emissionen für die Stromerzeugung werden aus der Datenbank Zentrales System der Emissionen (ZSE) des Umweltbundesamtes abgeleitet.

$$\text{direkter THG – Emissionsfaktor} = \frac{\text{direkte CO}_2 \text{ Äq.-Emissionen}}{\text{Stromverbrauch}}$$

Die betrachteten Treibhausgase tragen in unterschiedlicher Weise zur Erderwärmung bei. Um die Wirkung der einzelnen Gase vergleichen zu können, wird ihnen ein Faktor - das relative Treibhausgaspotenzial (THP) auf Basis des fünften Sachstandsberichts des IPCC zugeordnet, das sich auf die Referenzsubstanzen Kohlenstoffdioxid (CO₂) bezieht. Das Treibhausgaspotential gibt an, welche Menge an CO₂ in einem Betrachtungszeitraum von 100 Jahren die gleiche Treibhauswirkung entfalten würde wie das betrachtete Referenzgas. Die Emissionsangaben für die einzelnen Gase können nach Multiplizieren mit dem jeweiligen Äquivalenz-Faktor aufaddiert werden, so dass die Summe der Treibhausgase als CO₂-Äquivalent (CO₂-Äq.) ausgewiesen werden kann.

2.9 Vorketten für den THG-Emissionsfaktor des deutschen Strommix

Bisher wurden nur die direkten Verbrennungsemissionen des deutschen Stromverbrauchs in den Blick genommen. Die Systemgrenze lässt sich jedoch um eine Lebenszyklusbetrachtung erweitern, sodass sowohl die direkten Emissionen, als auch die indirekten Emissionen, die außerhalb der Umwandlungsprozesse in den sog. Vorketten z. B. bei der Herstellung von Anlagen zur Energieumwandlung oder der Gewinnung und Bereitstellung von Primär- und Sekundärenergieträgern entstehen, berücksichtigt werden können.

$$\text{THG – Emissionsfaktor der Vorkette} = \frac{\sum \text{Emissionsfaktor der Vorkette} * \text{Stromerzeugung}}{\text{Stromverbrauch}}$$

Grundlage für die Berechnung eines THG-Emissionsfaktors des Strommix, welcher die vorgelagerten Emissionen der jeweiligen Energieträger berücksichtigt, ist die Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger (UBA 2022). Um einen Strombezug der Emissionsfaktoren herzustellen werden die im Kapitel 4 aufgeführten primärenergiebezogenen Emissionsfaktoren mit den dazugehörigen Nutzungsgraden verrechnet. Im nächsten Schritt werden diese strombezogenen Emissionsfaktoren der jeweiligen Energieträger mit der energieträgerspezifischen Stromerzeugung multipliziert und aufsummiert. Durch die anschließende Division mit dem gesamten Stromverbrauch ergibt sich der THG – Emissionsfaktor der Vorkette. Danach wird der THG-Emissionsfaktor der Vorkette mit dem direkten THG-Emissionsfaktor des deutschen Stromverbrauchs addiert, um den THG-Emissionsfaktor des deutschen Stromverbrauchs unter Berücksichtigung der Vorketten Emissionen zu erhalten.

Einen Überblick zu den unterschiedlichen Emissionsfaktoren des deutschen Stromverbrauchs für das aktuelle Randjahr bietet Tabelle 2.

Tabelle 2: CO₂ und THG-Emissionsfaktoren zum Stromverbrauch im deutschen Strommix mit und ohne Berücksichtigung der Vorkette für das Jahr 2022

Indikator	Schadstoff	Einheit	2022
Direkter CO ₂ -Emissionsfaktor des Stromverbrauchs	CO ₂	g/kWh	434
Direkter THG - Emissionsfaktor des deutschen Stromverbrauchs	CO ₂ -Äquivalente	g/kWh	442
CO ₂ -Emissionsfaktor des Stromverbrauchs unter Berücksichtigung der Vorkettenemissionen	CO ₂	g/kWh	467
THG-Emissionsfaktor des Stromverbrauchs unter Berücksichtigung der Vorkettenemissionen	CO ₂ -Äquivalente	g/kWh	498

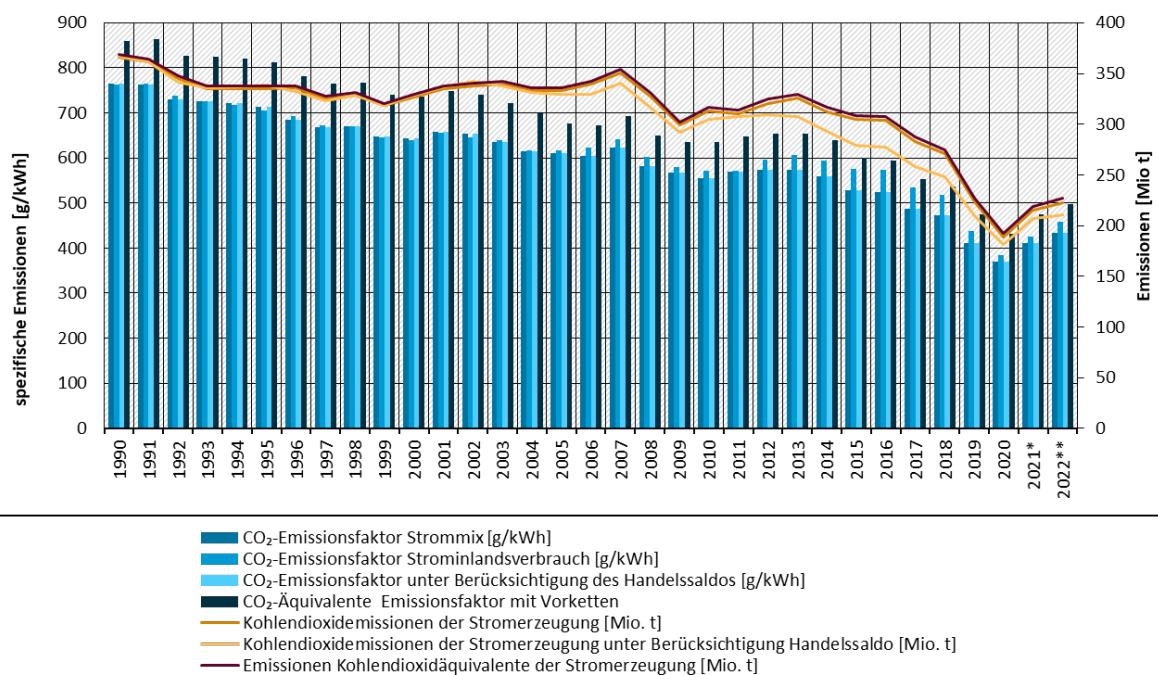
Quelle: UBA, Datenstand 04/2023

3 Entwicklung der Emissionsfaktoren des deutschen Strommix

Die durchschnittlichen Kohlendioxidemissionen ohne Berücksichtigung des Stromhandelssaldos einer Kilowattstunde Strom (Spezifischer Emissionsfaktor) sinken in den Jahren 1990 bis 2020 von 764 g CO₂/kWh auf 369 g CO₂/kWh (siehe Abbildung 1). Das entspricht einer Reduzierung der Kohlendioxidemissionen um ca. 51 % pro Kilowattstunde Strom. Für die Folgejahre 2021 und 2022 erfolgte die Berechnung mit vorläufigen und geschätzten Daten. Die vorläufigen Ergebnisse für 2021 weisen einen Anstieg auf 410 g CO₂/kWh aus, während für 2022 auf der Grundlage von geschätzten Daten 434 g CO₂/kWh ermittelt werden.

Die Entwicklung bis zum Jahr 2020 ist insbesondere durch die Erhöhung des Anteils Erneuerbarer Energien an der Bruttostromerzeugung erklärbar, welcher zudem durch die coronabedingte konjunkturelle Abkühlung im selben Jahr auf einen Wert von ca. 45% an der Bruttostromerzeugung gestiegen ist. Im Jahr 2021 stieg der Stromverbrauch u.a. aufgrund der einsetzenden konjunkturellen Erholung wieder an. Gepaart wird diese Entwicklung mit einer vergleichsweise geringen witterungsbedingten Stromerzeugung aus Wind und einen Preisanstieg für Gas zum Ende des Jahres. Hierdurch kam die emissionsintensive Kohleverstromung wieder vermehrt zum Einsatz. Dieser Effekt beschleunigte sich noch einmal im Jahr 2022. Ursache hierfür sind neben der durch den russischen Abgriffskrieg in der Ukraine ausgelösten Gaskrise, u.a. der fortschreitende Kernenergieausstieg in Deutschland, sowie die Dürre- und Revisionsbedingte Reduktion der französischen Kernenergieerzeugung, welche zu höheren Stromexporten von Deutschland nach Frankreich führte. Diese Entwicklungen konnten trotz einer Rekorderzeugung von 254 Mrd. kWh und einen Anteil von über 46% an der Bruttostromerzeugung nicht durch die Erneuerbaren Energien ausgeglichen werden (13).

Abb. 1: Entwicklung der absoluten Kohlendioxidemissionen der Stromerzeugung und der Entwicklung des Stromverbrauchs im Vergleich



2021* vorläufig 2022** geschätzt

Quelle: eigene Berechnungen Umweltbundesamt April 2023

Zwei wesentliche Einflussgrößen bestimmen die Höhe des Emissionsfaktors im deutschen Strommix:

Die Anteile einzelner Brennstoffe an der Stromerzeugung, dem sogenannten Strommix (Abbildung 3):

Sinkt der Anteil eines Energieträgers mit hohem CO₂-Emissionsfaktor, wie Braun- oder Steinkohle, zu Gunsten eines Energieträgers mit niedrigerem CO₂-Emissionsfaktor, wie eines erneuerbaren Energieträgers (Null angerechnete CO₂-Mengen) oder Erdgas, so sinkt auch der Emissionsfaktor des Strommix. Tabelle 2 zeigt die direkten Emissionsfaktoren der drei wichtigsten fossilen Brennstoffe im Vergleich zum Emissionsfaktor des deutschen Strommix gesamt.

Tabelle 3: CO₂-Emissionsfaktoren fossiler Brennstoffe im Vergleich mit dem CO₂-Emissionsfaktor des deutschen Strommix 2022*

	CO ₂ -Emissionsfaktor bezogen auf den Brennstoffeinsatz [g/kWh]	Brennstoffaus- nutzungsgrad netto bezogen auf den Stromverbrauch [%]	CO ₂ -Emissionsfaktor bezogen auf den Stromverbrauch [g/kWh]	Vergleich CO ₂ - Emissionsfaktor Strommix [g/kWh]
Erdgas	201	53	381	
Steinkohle	338	40	853	375
Braunkohle	407	36	1.137	

Quelle: eigene Berechnungen Umweltbundesamt April 2023

*vorläufig

Ein weiterer wesentlicher Einflussfaktor ist der durchschnittliche Wirkungsgrad konventioneller Kraftwerke – also der Kraftwerke, die Strom durch die Verbrennung fossiler Energieträger erzeugen:

Erhöht sich der durchschnittlich realisierte Wirkungsgrad im konventionellen Kraftwerkspark, so wird zur Erzeugung einer Kilowattstunde Strom eine geringere Menge kohlenstoffhaltigen Brennstoffs eingesetzt – der Emissionsfaktor des Strommix sinkt. Da ein durchschnittlicher Wirkungsgrad aller Kraftwerke nur mit hohen Unsicherheiten berechnet werden könnte, nutzt das UBA ersatzweise den Brennstoffnutzungsgrad aus dem Brennstoffeinsatz zur Stromerzeugung und der Bruttostromerzeugung nach Energieträgern (Input/Output-Relation) (Tabelle 4).

In dieser Berechnung wird der Brennstoffeinsatz in KWK-Anlagen durch die „Finnische Methode“ der Strom- und Wärmerzeugung zugeordnet. Diese wird im Vorwort der Energiebilanzen näher erläutert. Diese rechnerische Methode führt zu Verschiebungen, besonders im Bereich der Stromerzeugung durch Erdgas.

Tabelle 4: Durchschnittliche Brennstoffausnutzungsgrade bezogen auf die Bruttostromerzeugung¹

Jahr	Steinkohlen	Braunkohlen	Erdgas ²	Summe Energieträger
1990	47%	37%	40%	55%
1991	46%	37%	41%	54%
1992	47%	37%	43%	57%
1993	47%	37%	43%	57%
1994	46%	37%	40%	56%
1995	40%	35%	43%	38%
1996	40%	36%	45%	38%
1997	40%	37%	46%	38%
1998	40%	37%	47%	38%
1999	40%	37%	48%	38%
2000	41%	38%	45%	39%
2001	40%	37%	50%	39%
2002	40%	37%	50%	39%
2003	43%	38%	52%	40%
2004	43%	38%	51%	41%
2005	42%	38%	52%	40%
2006	40%	38%	51%	40%
2007	41%	38%	54%	41%
2008	41%	38%	54%	41%
2009	41%	38%	53%	41%
2010	42%	38%	56%	41%
2011	42%	38%	57%	43%
2012	42%	39%	56%	45%
2013	41%	39%	56%	45%
2014	41%	39%	56%	45%
2015	43%	39%	57%	47%
2016	43%	39%	57%	47%
2017	44%	39%	57%	49%
2018	44%	39%	54%	50%
2019	44%	40%	55%	51%
2020	44%	39%	56%	54%
2021*	44%	40%	56%	52%
2022**	44%	40%	58%	55%

Quellen: eigene Berechnungen Umweltbundesamt April 2023 * vorläufig ** geschätzt

¹ Die Trennung zwischen Strom- und Wärmeerzeugung in KWK -Anlagen erfolgt über die finnische Methode

² Bei der Finnischen Methode wird die Stromerzeugung in gasbetriebenen KWK-Anlagen durch die Referenzwirkungsgrade höher bewertet

Von 1990 bis 2005 sinkt der Emissionsfaktor mit deutlichen Schwankungen in einzelnen Jahren, die auf signifikante Veränderungen im Kraftwerkspark zurückzuführen sind. Es lassen sich verschiedene Phasen in der Entwicklung des Indikators unterscheiden (siehe Abbildung 2). In der ersten Phase von 1990 bis 2000 sinkt der Emissionsfaktor wegen Wirkungsgradverbesserungen im konventionellen Kraftwerkspark, bedingt durch die Abschaltung ineffizienter Altanlagen in den neuen Bundesländern. Der Anstieg zwischen 2000 bis 2001 ist auf die Inbetriebnahme neuer Braunkohlenkraftwerke zurückzuführen. Ab 2003 führt der steigende Anteil erneuerbarer Energieträger an der Stromerzeugung wieder zu einer Senkung des Emissionsfaktors. Im Jahr 2007 führte der prozentual gestiegene Anteil der konventionellen Brennstoffe zur Stromerzeugung kurzfristig zu einem Anstieg des CO₂-Emissionsfaktors. Ab dem Jahr 2008 setzte sich die Verminderung des CO₂-Emissionsfaktors im deutschen Strommix aufgrund des weiter steigenden Anteils erneuerbarer Energien fort. Diese Wirkung wird im Jahr 2009 aufgrund geringerer Stromverbräuche ausgelöst durch die Wirtschaftskrise verstärkt. Mit der Folge, dass der CO₂-Emissionsfaktor für den deutschen Strommix nach der wirtschaftlichen Erholung durch den sich erhöhenden Stromverbrauch und der Änderungen im Strommix durch die Energiewende in den Folgejahren wieder leicht ansteigt.

Ab 2014 ergibt sich trotz Anstieg des Stromverbrauchs auf Grund der gleichzeitig erhöhten Anteile von CO₂-freier bzw. CO₂-armer Stromerzeugung und einer Verbesserung des Brennstoffausnutzungsgrades bei neu in Betrieb gegangenen fossilen Kraftwerken eine Senkung des spezifischen CO₂-Emissionsfaktors. Ebenfalls positiv auf den spezifischen Kohlendioxidemissionsfaktor des Strommix wirken sich der verminderte Einsatz der Steinkohlen ab 2014 und Braunkohlen ab 2019, sowie die Erhöhung des Gaseinsatzes ab 2016 zur Stromerzeugung aus. Der weiter steigende Anteil der erneuerbaren Energien, der Umbau des Einsatzes der fossilen Brennstoffe und die Verringerung des Einsatzes von Kohle hin zu Gas führt in den weiteren Jahren zu sinkenden Spezifischen CO₂-Emissionsfaktoren für den deutschen Strommix. Diese Entwicklung findet im Jahr 2020 vorläufig ihren Höhepunkt. Verbunden mit der coronabedingte konjunkturellen Abkühlung fällt der spezifische CO₂-Emissionsfaktor auf seinen bisher geringsten Wert.

Ab dem Jahr 2021 steigt der spezifische Emissionsfaktor wieder. Aufgrund der wirtschaftlichen Erholung nach dem ersten Pandemiejahr und der gleichzeitigen Verteuerung des Gaspreises infolge des russischen Angriffskrieges in der Ukraine wird wieder verstärkt Kohle zur Stromerzeugung verwendet. Dieser Effekt beschleunigt sich noch einmal im Jahr 2022, wozu auch die Entwicklung der Kernenergie beiträgt (vgl. Abbildung 3).

Entsprechend der Annahme, dass die in Deutschland durch die Stromerzeugung verursachten Emissionen dem deutschen Strommix zuzurechnen sind, werden beim Ansatz des „CO₂-Emissionsfaktors für den Strominlandsverbrauch“ die Emissionen nicht korrigiert. Dies führt zu einer Bewertung des Stromhandelsimports mit den CO₂-Emissionsfaktoren, die für das Inland berechnet wurden. Diese Methode ist im Sinne einer konservativen Berechnung des „Spezifischen Kohlendioxidemissionsfaktors im Inland“ angemessen. Dieses Vorgehen führt im Jahr 1995 mit dem bis dahin größten Stromimportsaldo von 4,8 Mrd. kWh zu einer Überschätzung des „Emissionsfaktors Strominlandsverbrauch“ von 1,1 % zum „Emissionsfaktor“ und ist in der Zeitreihenbetrachtung ab dem Jahr 2003 nicht mehr relevant, da seither ein permanenter Stromhandelsexportüberschuss zu verzeichnen ist.

So kann für die Jahre 1990 bis 2005 von sehr geringen Abweichungen zum CO₂-Emissionsfaktor (ohne Berücksichtigung des Stromhandelssaldos) gesprochen werden, da dieser Stromhandelssaldo sowohl Export- als auch importseitig bis zu einem Maximalwert von 5 TWh

schwankt und somit ca. 1 % der Bruttostromerzeugung beträgt. Ab 2006 überwiegen die Stromflüsse ins Ausland gegenüber den Importen und somit steigt der Einfluss des Stromhandelssaldos auf den CO₂-Emissionsfaktor.

Der Stromexportüberschuss im Jahr 2017 hat mit 52,5 Mrd. kWh ein Rekordniveau erreicht und verringert sich in den Folgejahren in 2020 auf 18,9 Mrd. kWh um in 2021 weiter auf 18,6 Mrd. kWh zu sinken. In 2022 ist ein Anstieg auf 27 Mrd. kWh zu verzeichnen (vgl. Abbildung 2).

Abb. 2: Brutto-Inlandsstromverbrauch und Stromaustauschsaldo Ausland prägen den aktuellen Trend der Bruttostromerzeugung in Deutschland

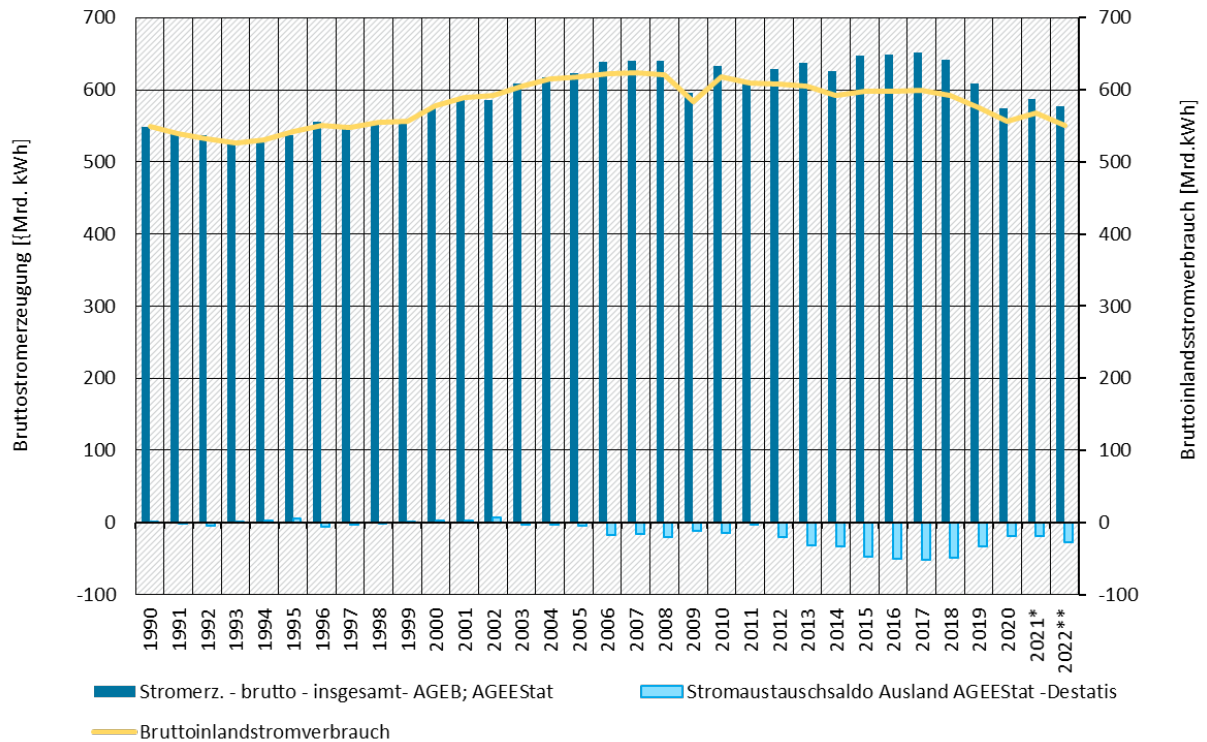
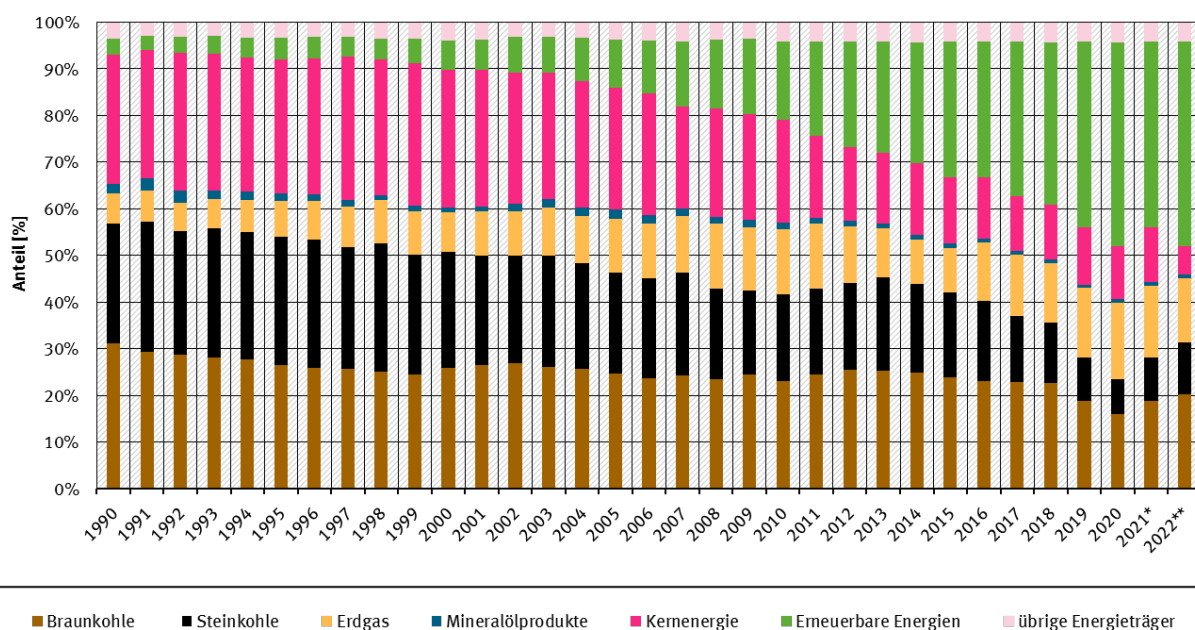


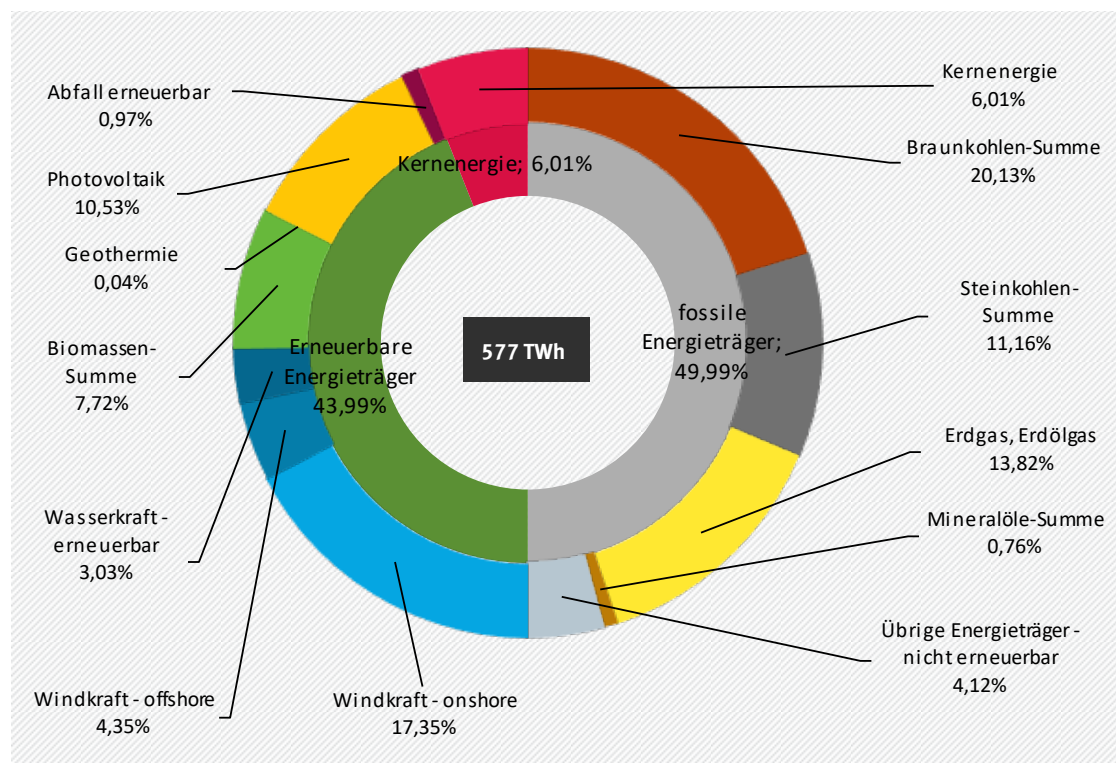
Abb. 3: Anteil der Energieträger an der Bruttostromerzeugung – „Deutscher Strommix“

* vorläufige Zahlen z.T. geschätzt, ** einschließlich Netzverluste und Eigenverbrauch

Quelle: UBA auf Basis von AGEb und AGEE-Stat Stand Februar 2023

Abb. 4: Anteil der Energieträger an der Bruttostromerzeugung im Jahr 2022*

[TWh]



*vorläufige Daten

Quelle: AGEb Bruttostromerzeugung und AGEE-Stat-eigene Berechnungen, Stand April 2023

* vorläufig z.T. geschätzt

Quelle: UBA auf Basis von AGEb und AGEE-Stat Stand Februar 2023

Es lässt sich festhalten, dass ab dem Jahr 1999 die Bedeutung erneuerbarer Energieträger an der Bruttostromerzeugung im deutschen Strommix deutlich zunimmt. So steigt der Anteil regenerativ erzeugten Stroms an der Bruttostromerzeugung zwischen 1998 und 2020 von ca. 4,7 % auf ca. 45 %. Für das Jahr 2021 ist aufgrund eines schwachen Windjahres ein Rückgang auf ca. 41 % zu verzeichnen, um 2022 wieder auf ca. 46 % anzusteigen.

Da die Stromerzeugung aus regenerativen Quellen per Definition keine direkten CO₂-Emissionen und insbesondere Wind und PV nur geringe vorgelagerte Emissionen verursachen, sinkt mit ihrer Zunahme der Emissionsfaktor für den Strommix. Überlagert wird dieser Effekt anfänglich durch die schon erwähnte Inbetriebnahme neuer fossiler Kraftwerkskapazitäten in den Jahren 1999 bis 2001. Erst ab dem Jahr 2002 wird der steigende Anteil erneuerbarer Energien und der Wechsel zwischen dem Brennstoffeinsatz Kohle und Erdgas zur Stromerzeugung in der Entwicklung des Indikators sichtbar.

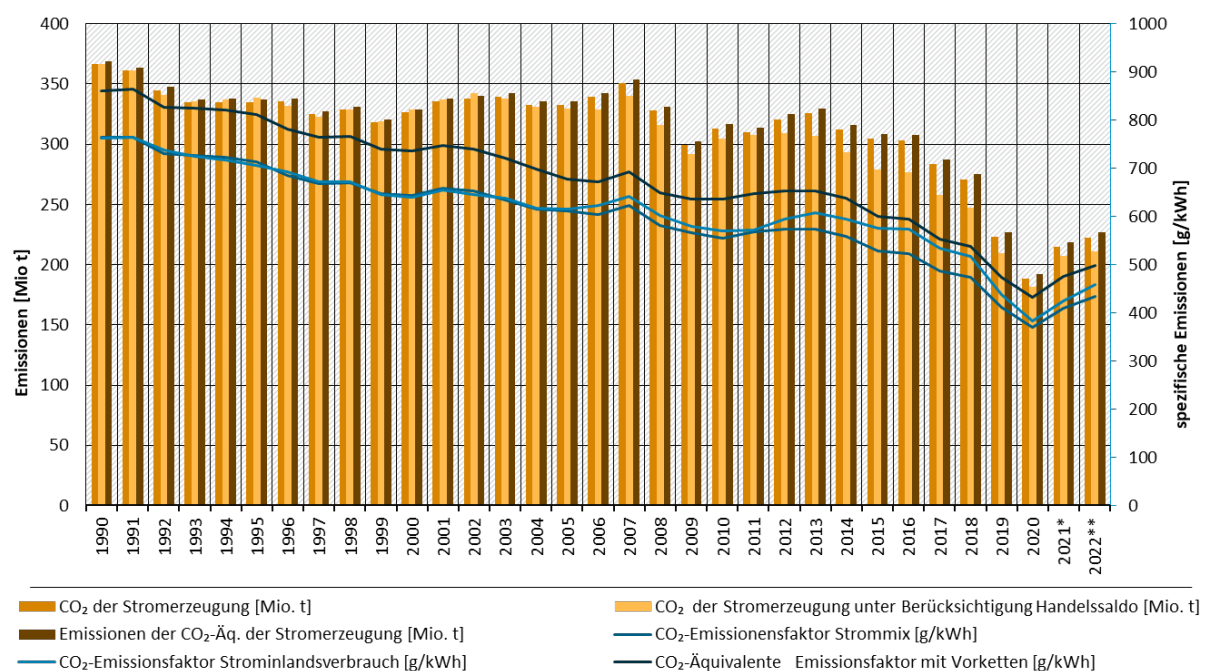
In den Jahren 2013 und 2014 haben auch die Änderungen bei den Brennstoffpreisen (höhere Preise für Erdgas) und der damit einhergehende höhere Einsatz von Brennstoffen mit höherem Kohlenstoffgehalt den Strommix beeinflusst. Dieser Trend hat sich 2016 zu Gunsten des Erdgases vorläufig umgekehrt. Insbesondere seit Mitte des Jahres 2021 führten die gestiegenen Erdgaspreise und die Auswirkungen des russischen Angriffskrieges in der Ukraine dazu, dass wieder vermehrt Kohle zur Stromerzeugung eingesetzt wurde. Begleitet werden diese Entwicklungen von dem im April 2023 abgeschlossenen Kernenergieausstieg. (Abbildung 3).

4 Zusammenfassung

Der Kohlendioxid-Emissionsfaktor für den deutschen Strommix ist ein Indikator für die Klimaverträglichkeit der Stromerzeugung. Er darf jedoch nicht losgelöst von der Entwicklung des Stromverbrauchs im Inland insgesamt und den gesamten aus der Stromerzeugung entstehenden Kohlendioxidemissionen sowie des Stromhandelssaldos betrachtet werden.

Die bisherige Entwicklung des in Summe sinkenden Trends von 764 g CO₂/kWh im Jahr 1990 (Emissionsfaktor Strommix) auf 369 g CO₂/kWh im Jahr 2020 ist positiv zu bewerten. Für 2021 hat das UBA auf der Grundlage vorläufiger Daten „Spezifischen Kohlendioxid -Emissionsfaktor“ von 410 g/kWh errechnet und für 2022 wird ein weiterer Anstieg auf 434 g/kWh geschätzt. Für die Spezifischen Emissionen der Kohlendioxidäquivalente ohne Vorketten für 2021 beträgt der Wert 418 g/kWh und 442 g/kWh für 2022. Berücksichtigt man zusätzlich die Vorketten-Emissionen der Stromerzeugung ergeben sich 475 g/kWh CO₂-Äquivalente für 2021 und für 2022 vorläufig 498 g/kWh (vgl. Abbildung 5).

Abb. 5: Entwicklung der absoluten und der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen der Stromerzeugung im Vergleich (unter Beachtung des Stromhandelssaldos)



2021* vorläufig 2022** geschätzt

Quelle: eigene Berechnungen Umweltbundesamt April 2023

Der bemerkenswerte Ausbau der erneuerbaren Energien hat eine spürbare Senkung des Kohlendioxid-Emissionsfaktors zur Folge. Dieser Effekt wird allerdings für die Jahre 2010 bis 2013 stark überlagert durch den Umbau des fossilen Kraftwerksparks. Eine verstärkte Verstromung von Kohle durch den Zubau neuer Kohlenkraftwerke führte sowohl zu steigenden absoluten, als auch spezifischen Kohlendioxidemissionen aus der Stromerzeugung. Ab dem Jahr 2014 führt der wieder gesunkene Stromverbrauch sowie der weitere Anstieg der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien zu einer Verringerung der absoluten und spezifischen CO₂-Emissionen.

Für 2017 wird trotz leicht gestiegenem Stromverbrauch eine Verringerung der Emissionen der Stromerzeugung und der spezifischen CO₂-Emissionen ausgewiesen. Ab 2018 ist ein Sinken der Bruttostromerzeugung zu verzeichnen. Dies ist auf den weiter stark gestiegenen Anteil der

Erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung, die Steigerung der elektrischen Wirkungsgrade bei neu gebauten Kraftwerken und den erhöhten Anteil von Erdgas bei der Stromerzeugung zurück zu führen.

Ursache für den Rückgang der spezifischen Emissionen bis zum Jahr 2020 sind der gestiegene Anteil der Erneuerbaren Energien im Strommix, der gesunkene Anteil der Stromerzeugung aus Kohlen sowie der gestiegene Anteil der Stromerzeugung aus Erdgas. Der Trend wird zudem durch die Corona Pandemie und die damit eingehende Reduktion der Stromnachfrage verstärkt.

Die wirtschaftliche Erholung trotz Weiterbestehen der Pandemie in 2021 und die geringe Erzeugung der Erneuerbaren Energien im Vergleich zum Vorjahr führt im Jahr 2021 wieder zu höheren Emissionen. Verstärkt wird diese Entwicklung durch die gestiegenen Erdgaspreise, wodurch vermehrt Kohle zur Stromerzeugung eingesetzt wird. Mit Beginn des russischen Angriffskrieges in der Ukraine im Jahr 2022 verstärkt sich die Entwicklung noch einmal, wozu auch die Entwicklung der Kernenergie beiträgt

Der stetig von 2004 bis 2017, mit Ausnahme des Jahres 2011, wachsende Stromhandelsexport-Überschuss führt zu einem steigenden Anteil der CO₂-Emissionen, welche nicht dem im Inland verbrauchten Strom zuzuordnen sind. Entsprechend der internationalen Berichtskonventionen sind Emissionen in dem Land zu bilanzieren, wo sie entstehen (Verursacher-/Quellenprinzip). Dies führt zu einer methodenbedingten Verzerrung des spezifischen CO₂-Faktors für den in Deutschland verbrauchten Strom.

Seit 2018 ist ein Rückgang des Stromhandelsexportüberschusses zu verzeichnen. Dieser wird für 2021 mit fast 18 Mrd. kWh ausgewiesen. In 2022 steigt der Stromhandelssaldo wieder auf ca. 27 Mrd. kWh.

Für das Erreichen der Klimaziele ist es notwendig, dass die absoluten Kohlendioxidemissionen aus der Stromerzeugung weiter stark sinken. Weitere Anstrengungen zur Reduzierung der Kohlendioxidemissionen aus der Stromerzeugung sind dringend notwendig.

Dazu gehört vor allem der weitere Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, die weitere Reduzierung des Stromhandelsexportüberschusses, die Fortsetzung des Ausstiegs aus der Kohleverstromung und der Ausbau der Kraft-Wärmekopplung sowie die Effizienzsteigerung bei der Stromerzeugung. Allem voranist der sparsame Umgang mit Strom ein wichtiges Mittel für die Kohlendioxidreduzierung.

5 Ergänzende Hinweise zu den Datengrundlagen

Die Berechnungen zu den spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix unterliegen kontinuierlichen Methodenverbesserungen und Datenaktualisierungen entsprechend dem Stand der Energiestatistik und der internationalen Emissionsberichterstattung. Diese wurden vorwiegend in den Kapiteln 2 und 3 dargelegt, und sollen an dieser Stelle wie folgt ergänzt werden:

Überarbeitungen im Bereich der Abfall- und Ersatzbrennstoffe und Aktualisierungen der Datenquellen für die Emissionsberechnungen, zum Beispiel der Energiebilanzen und der Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien, führten zu Korrekturen im Bereich der absoluten Kohlendioxidemissionen gegenüber der Erstveröffentlichung.

Die Aktualisierung der Energiebilanzen seitens der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) wurde im Bericht „Revision der Energiebilanzen 2003 bis 2009“ mit Stand vom 08.10.2012 dokumentiert und ist auf der Internetseite der AGEB abrufbar (8).

Die Aktualisierungen zu Berechnungen der Emissionen aus Abfällen und Sekundärbrennstoffen sind im Nationalen Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar (NIR) dokumentiert (9).

Die Daten zur Bruttostromerzeugung aus Erneuerbaren Energien sind auf der Internetseite der AGEE-Stat veröffentlicht. (13)

Ab 2018 wurden für die Berechnung des Stromverbrauches die Daten für die konventionellen Brennstoffe die Veröffentlichung der Bruttostromerzeugung der AGEB und für die Brennstoffe der Erneuerbaren Energien die Daten der AGEE-Stat in der Zeitreihe ab 1990 zugrunde gelegt.

Die Daten für den Stromhandelssaldo entsprechen den Meldungen an das Statistische Bundesamt (12).

Im Jahr 2019 erfolgte die Umstellung der Datengrundlage für den Stromhandelssaldo von der Tabelle der Bruttostromerzeugung der AGEB auf die amtliche Statistik „Monatsbericht der Elektrizitätsversorgung“ des Statistischen Bundesamtes.

Im Jahr 2019 erfolgte eine Überarbeitung der Berechnungen im Bereich der Energieerzeugung aus sonstigen Brennstoffen.

Im Jahr 2021 wurden die Emissionen aus der Rauchgasentschwefelung berücksichtigt. Zudem wurden die spezifischen Treibhausgas-Emissionsfaktoren sowohl ohne als auch unter Berücksichtigung der vorgelagerten Emissionen des Strommix in die Publikation mit aufgenommen.

6 Quellenverzeichnis

- (1) IPCC-Guidelines 2006
<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/> (aufgerufen am 20.04.2015)
- (2) AGEb; Stand April 2010 "Vorwort zu den Energiebilanzen für die Bundesrepublik Deutschland" Seite 10
<http://www.ag-energiebilanzen.de/files/vorwort.pdf> (aufgerufen am 20.04.2015)
- (3) UBA; Datenbank Zentrales System der Emissionen (ZSE) Stand 02/2022(4) Umweltbundesamt: Eigene Berechnungen auf Grundlage der Tabelle „Stromerzeugung nach Energieträgern 1990-2022“ der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEb) unveröffentlicht
- (5) Destatis, 2020, Stand Februar 2023, Fachserie 19 Reihe 1
- (6) Bruttostromerzeugung in Deutschland von 1990 bis 2022 nach Energieträgern Stand April 2023.
https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ausdruck_strenz_abgabe_feb2021_a10.pdf (zum Stand der Berechnung unveröffentlicht)
- (7) Kraftwerksdatenbank des UBAs-UBA-interne Angaben zu Wirkungsgraden
<https://www.umweltbundesamt.de/dokument/datenbank-kraftwerke-in-deutschland> (aufgerufen im März 2023)
- (8) AGEb, Stand 08.10.2012 Revision der Energiebilanzen 2003 bis 2009
<http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=63> (aufgerufen am 01.02.2013)
- (9) Umweltbundesamt, Nationaler Inventarbericht Deutschland – 2021, Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2021, Nationaler Inventarbericht Zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2021,
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2023_01_16_em_entwicklung_in_d_trendtabelle_thg_v1.0.xlsx
(aufgerufen 15.03.2023)
- (10) ÖKO-INSTITUT, 2004c CO₂ Emissionsfaktoren für die Erstellung der nationalen Inventare. Teilbereich für den nationalen Inventarbericht 2004Veröffentlichung in
http://unfccc.int/files/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/application/zip/deu_2004_nir_30apr.zip, Kapitel 13.8
- (11) AGEb, Stand Februar 2022, Energiebilanzen 2021 (Stand Februar 2023),
<https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2023/03/Bilanz-2021.xlsx>(aufgerufen 16.03.2023)
- (12) Destatis; 2020; Stand März-2023, Monatserhebung der Elektrizitätsversorgung;–Code 43311-0003
<https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/logon?language=de&sequenz=tabelleErgebnis&selectionname=43311-0003> (aufgerufen am 16.03.2023)
- (13) AGEE - Stat; Stand Februar 2023, Tabelle 3 „Bruttostromerzeugung aus Erneuerbaren Energien 1990-2022“
https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html
(aufgerufen am 15.03.2023)
- (14) UBA; "Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger – Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2021", Stand Dezember 2022; www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energetraeger-2021

A Anhang 1: CO₂-Emissionen der Stromerzeugung gemäß Datenbank ZSE in Mio. t

	Braunkohlen	Steinkohlen	Erdgas	Mineralöle	Müll (fossil)	sonstige	gesamt
1990	200	118	18	9	4	17	366
1991	187	126	18	11	4	17	361
1992	180	120	15	10	4	16	345
1993	171	123	15	8	3	14	335
1994	168	122	18	8	4	16	335
1995	162	124	19	7	6	17	335
1996	159	128	21	7	6	15	336
1997	155	120	21	6	6	17	325
1998	149	127	22	6	7	18	329
1999	148	119	22	6	6	17	318
2000	157	118	22	6	6	17	327
2001	166	115	22	7	7	18	335
2002	170	113	23	7	6	20	338
2003	167	115	24	8	8	17	340
2004	165	111	25	8	7	17	333
2005	162	109	28	9	8	17	333
2006	159	116	29	8	9	18	339
2007	164	118	29	7	10	22	350
2008	158	102	33	7	8	20	328
2009	153	89	30	7	8	12	299
2010	151	95	32	6	8	20	313
2011	156	91	30	5	9	19	310
2012	166	94	27	5	9	19	321
2013	163	104	24	5	9	21	326
2014	159	97	22	5	10	19	312
2015	157	92	22	4	9	20	304
2016	153	88	29	4	10	20	303
2017	149	70	30	4	9	20	283
2018	146	62	30	4	9	19	271
2019	115	44	33	4	9	18	223
2020	93	33	34	3	9	17	189
2021**	110	42	33	3	8	18	215
2022**	116	49	29	3	8	17	223

* vorläufige Daten

** geschätzte Daten

Rundungen können zu abweichenden Summen führen

Quellen: Umweltbundesamt, ZSE; April 2023

B Anhang 2: Aus der Bruttostromerzeugung berechneter Stromverbrauch

Jahr	Kern- energie	Steinkohle	Braunkohle	Erdgas	Mineralöl- produkte	Wasserkraft	Wind- energie	Biomasse	Photovoltaik	Geothermie	Müll	Übrige Energieträge r	Pumpstrom	Stromver- brauch insgesamt	Einfuhr	Ausfuhr	Strom- handels- saldo
	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]
1990	135	124	151	32	10	15	0	0	0	0,0	1	17	5	479	32	31	1
1991	131	133	140	32	13	13	0	0	0	0,0	1	14	5	473	30	31	-1
1992	141	126	137	29	12	15	0	0	0	0,0	1	14	5	472	28	34	-5
1993	136	130	131	29	9	16	1	0	0	0,0	1	14	5	462	34	33	1
1994	134	128	130	32	9	18	1	1	0	0,0	1	15	5	464	36	34	3
1995	137	130	126	36	8	19	1	1	0	0,0	1	16	6	470	40	35	5
1996	144	136	129	41	7	20	2	1	0	0,0	1	15	6	490	37	43	-5
1997	152	128	127	43	7	16	3	1	0	0,0	1	16	6	486	38	40	-3
1998	144	137	124	45	6	15	4	1	0	0,0	1	17	5	491	38	39	-1
1999	152	128	122	46	6	18	5	2	0	0,0	2	18	5	492	41	40	1
2000	151	128	132	44	5	19	9	3	0	0,0	2	20	6	507	45	42	3
2001	151	122	136	49	5	20	9	3	0	0,0	2	19	6	509	43	45	3
2002	147	120	141	50	8	21	14	4	0	0,0	2	16	6	517	46	46	7
2003	147	131	141	56	9	16	17	6	0	0,0	2	17	8	535	49	52	-3
2004	149	126	141	56	10	19	23	7	1	0,0	2	18	9	541	48	51	-3
2005	145	119	137	64	11	17	25	10	1	0,0	3	21	10	545	57	61	-5
2006	149	123	135	67	10	18	28	13	2	0,0	3	22	9	562	48	65	-17

Jahr	Kern- energie	Steinkohle	Braunkohle	Erdgas	Mineralöl- produkte	Wasserkraft	Wind- energie	Biomasse	Photovoltaik	Geothermie	Müll	übrige Energieträge r	Pumpstrom	Stromver- brauch insgesamt	Einfuhr	Ausfuhr	Strom- handels- saldo
	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]	[Mrd. kWh]
2007	126	127	139	69	9	19	36	18	3	0,0	4	23	9	563	46	63	-17
2008	133	111	135	79	8	18	37	21	4	0,0	4	22	8	564	42	62	-20
2009	121	97	131	72	9	17	35	24	6	0,0	4	19	8	528	42	54	-12
2010	127	106	132	80	8	19	35	26	11	0,0	4	24	9	563	43	58	-15
2011	97	101	135	77	6	16	45	29	18	0,0	4	23	8	546	51	55	-4
2012	90	105	145	69	7	20	47	35	24	0,0	4	23	8	559	46	67	-21
2013	88	115	145	61	6	21	48	36	28	0,1	5	24	8	568	39	71	-32
2014	88	107	141	55	5	18	53	38	32	0,1	5	24	8	558	40	74	-34
2015	83	106	140	56	5	17	73	40	34	0,1	5	25	8	576	37	85	-48
2016	77	101	135	73	5	19	72	41	34	0,2	5	25	7	579	28	79	-51
2017	69	84	134	78	5	18	96	41	35	0,2	5	25	8	582	28	80	-52
2018	69	75	132	74	5	16	100	40	40	0,2	6	25	8	572	32	80	-49
2019	68	52	103	81	4	18	114	40	41	0,2	5	23	8	542	40	73	-33
2020	58	39	83	86	4	17	119	41	45	0,2	5	22	9	511	48	67	-19
2021*	62	49	100	82	4	18	104	40	45	0,2	5	22	7	523	52	70	-19
2022**	31	58	105	72	4	16	113	40	55	0,2	5	21	8	513	50	78	-27

* vorläufige Daten ** geschätzte Daten Rundungen können zu abweichenden Summen führen. Der Stromverbrauch errechnet sich aus der Bruttostromerzeugung abzüglich der anteiligen Verluste durch Kraftwerkseigenbedarf, Leitungsverluste (Anteils an der Bruttostromerzeugung) und Pumparbeit (nur Wasserkraft Pumpspeicher!). Quellen: Umweltbundesamt, eigene Berechnungen, Rundungen können zu Abweichungen führen; April 2023

C Anhang 3: Emissionsfaktoren entsprechend ZSE

Material	[kg CO ₂ /TJ]
Andere Mineralölprodukte	81870
Braunkohlenbriketts	99169
Braunkohlenstaub-/Wirbelschichtkohle	97527
Deponiegas	111396
Dieselmkraftstoff	74027
Erdgas	55786
Flüssiggas	66333
Gicht- u. Konvertergas	254486
Grubengas	68118
Hartbraunkohle	93550
Hausmüll/Siedlungsabfall fossil	91510
Heizöl, leicht	74020
Heizöl, schwer	79466
Industriemüll fossil	71133
Klärgas	104894
Kokerei-/Stadtgas	41459
Petrolkoks	101794
Raffineriegas	57070
Rohbraunkohle Helmstedt	97920
Rohbraunkohle Hessen	102472
Rohbraunkohle Lausitz	111008
Rohbraunkohle Mitteldeutschland	103228
Rohbraunkohle Rheinland	113148
Rückstände Papierindustrie, fossil	86222
Sonderabfall	82989
Sonstige hergestellte Gase	1770 kg/1000m ³
Steinkohle	93932
Steinkohlenbriketts	95913
Steinkohlenkoks	107846

Quelle: Umweltbundesamt, ZSE aktuell Stand 04/2023