

Kurzstudie:

Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch und THG- Emissionen des deutschen Strom- mix im Jahr 2023 sowie Ausblicke auf 2030 und 2050

**Bericht für die HEA - Fachgemeinschaft für
effiziente Energieanwendung e. V.**

vorgelegt von

Uwe R. Fritsche

**Wissenschaftliche Leitung & Geschäfts-
führung:**

Uwe R. Fritsche uf@iinas.org

Postanschrift:

Mahalia-Jackson- Str. 27
64285 Darmstadt

info@iinas.org

Wissenschaftlicher Beirat:

Joseph Alcamo, CESR (DE)
Suani Coelho, CENBIO (BR)
Teresa Pinto Correia, ICAAM (PT)
Maria Curt, UPM (ES)
Marina Fischer-Kowalski, IFF (AT)
Bundit Fungtammasan, JGSEE KMUTT (TH)
Alison Goss Eng, EPA (US)
Eva Heiskanen, NCRC (FI)
Alois Heißenhuber, TU München (DE)
Edgar Hertwich, NTNU (NO)
Jorge Hilbert, INTA (AR)
Tetsunari Iada, ISEP (JP)
Thomas B. Johansson, Lund Univ. (SE)
Lev Nedorezov, INENKO RAS (RU)
Martina Schäfer, ZTG TU Berlin (DE)
Udo Simonis, WZB (DE)
Ralph Sims, Massey University (NZ)
Leena Srivastava, TERI University (IN)
Helen Watson, UKZN (ZA)
Sir Robert Watson, Tyndall Centre (UK)

Bankverbindung

Volksbank eG Darmstadt - Mainz
IBAN DE44 5519 0000 0555 4860 18
BIC MVBMD55

Handelsregister

HRB 90827
Amtsgericht Darmstadt

USt.-ID gem. § 27a UStG

DE 282876833

www.iinas.org

Darmstadt, September 2024

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	ii
Tabellenverzeichnis	ii
Abkürzungsverzeichnis.....	iii
1 Einführung	1
2 Recherche der Basisdaten.....	1
3 Die NECP-Szenarien für 2030 und 2050	4
4 Bilanzierung des KEV und der THG-Emissionen	5
4.1 Ergebnisse der Berechnungen bis zum Jahr 2023.....	5
4.2 Ergebnisdiskussion für die Entwicklung bis 2023.....	6
5 Ausblick auf 2030 und 2050	7
5.1 Ergebnisse der Szenarien für 2030 und 2050	7
5.2 Überblick zu den Ergebnissen von 2000 bis 2050	9
5.3 Robustheit der Ergebnisse	11
Literatur	13
Anhang: Methodische Hinweise zur Bilanzierung	14
A-1 Systemgrenzen der Bilanzierung	14
A-2 Anwendungsbereich („scope“)	15
A-3 Allokation	16
A-4 KEV und KEA	16
A-5 Komponenten des KEV	17
A-6 KEV- und THG-Bilanzierung und Stromkennzeichnung.....	17
Literatur zum Anhang	18

Abbildungsverzeichnis

Bild 1	KEV und THG-Emissionen von Strom bei Abgabe aus dem lokalen Netz für 2000 bis 2023 (nach Statistik) sowie 2030 bis 2050 (Szenarien)9
Bild 2	KEV und THG-Emissionen von Strom bei Abgabe aus dem Kraftwerkspark (ohne Netz- und Verteilverluste) für 2000 bis 2023 (nach Statistik) sowie 2030 bis 2050

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Entwicklung der deutschen Brutto-Stromerzeugung 2010 bis 2023 und Szenarien für 2030 und 2050.....2
Tabelle 2	KEV und THG-Emissionen der lokalen Strombereitstellung in Deutschland von 2000 bis 20235
Tabelle 3	KEV und THG-Emissionen der Strombereitstellung frei Kraftwerkspark in Deutschland von 2000 bis 2023.....6
Tabelle 4	KEV-Werte und THG-Emissionen von Strom für 2030 und 2050 nach NECP und NECP-update.....7
Tabelle 5	KEV und THG-Emissionen von Stromerzeugungsoptionen in 202011

Abkürzungsverzeichnis

AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
AKW	Atomkraftwerk
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BHKW	Block-Heizkraftwerk
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
DESTATIS	Statistisches Bundesamt
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
EC	European Commission
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbares-Energien-Gesetz
EU	Europäische Union
GEMIS	Globales Emissions-Modell integrierter Systeme
GuD	Gas- und Dampfturbine (Kombi-Kraftwerk)
H ₂	(molekularer) Wasserstoff
HEA	Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung e.V.
HKW	Heizkraftwerk
IEA	Internationale Energie-Agentur
IINAS	Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und –strategien
KEV	kumulierter Energie-Verbrauch
KEV _{ges}	gesamter kumulierter Energie-Verbrauch
KEV _{NE}	nichternewbarer kumulierter Energie-Verbrauch
KEV _{RE}	erneuerbarer (regenerativer) kumulierter Energie-Verbrauch
KW	Kraftwerk
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
MENA	Middle East and North Africa
MW	Megawatt
NECP	National Energy and Climate Plan
PV	Photovoltaik
RE	Regenerative (erneuerbare) Energien
THG	Treibhausgase
UN	United Nations (Vereinte Nationen)

1 Einführung

Die HEA - Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung e. V. - beauftragte IINAS mit einer Kurzstudie zu Daten über den kumulierten Energieverbrauch (KEV) des Mix zur Stromerzeugung in Deutschland im Jahr **2023** sowie **Ausblicke auf 2030 und 2050** (Szenarien). Parallel wurden die Emissionen von Treibhausgasen (THG) ermittelt. Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse dieser Kurzstudie zusammen und aktualisiert Ergebnisse vorheriger Arbeiten¹.

Die Bilanzierungen erfolgten mit dem Computermodell GEMIS Version 5.2, das alle Basisdaten enthält². GEMIS ermittelt auf Basis von Lebenswegdaten für Energie-, Stoff- und Transportsysteme die Umwelteffekte unter Einbeziehung vorgelagerter Prozesse im In- und Ausland sowie Herstellungsaufwände für die Prozesse.

Alle Kenndaten, mit denen gerechnet wurde, stehen in GEMIS für alle Nutzer vollständig transparent zur Verfügung. Damit können auch hier nicht dargestellte Umwelteffekte und Ressourcennutzungen sowie Kosten- und Beschäftigungseffekte eigenständig bilanziert und Detailanalysen zu den hier vorgestellten Ergebnissen durchgeführt werden.

2 Recherche der Basisdaten

Als Grundlage der Arbeiten wurden die zur Bilanzierung des nichterneuerbaren Energieverbrauchs und der THG-Emissionen notwendigen Basisdaten zum deutschen nationalen Stromerzeugungsmix des Jahres 2023 auf Basis von Statistiken recherchiert und Anteile der Kraftwerkstypen (nach Brennstoffen) sowie die Entwicklung der Nutzungsgrade sowie der Vorketten ermittelt.

Wie in früheren Berechnungen (IINAS 2023) wurden dabei aktualisierte statistische Grundlagen verwendet (u.a. AGEB 2024; BDEW 2024).

Die daraus resultierenden Stromerzeugungsmixe bis 2023 und die Szenarien für 2030 und 2050 zeigt die folgende Tabelle³.

¹ Siehe dazu IINAS (2023) für die Werte von 2022 und davor.

² GEMIS = Globales Emissions-Modell integrierter Systeme; kostenloser Bezug über www.gemis.de

³ Die dargestellten Werte geben nur die bundesdeutsche Erzeugung wieder, d.h. Stromimporte sind ausgenommen – Stromexporte sind dagegen enthalten.

Tabelle 1 Entwicklung der deutschen Brutto-Stromerzeugung 2010 bis 2023 und Szenarien für 2030 und 2050

Erzeugung [TWh]	Statistische Daten														Szenarien NECP (2020)		Szenarien NECP-update (2024)	
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2030	2050	2030	2050
AKW	140,6	108,0	99,5	97,3	97,1	91,8	84,6	76,3	76,0	75,1	64,4	69,0	34,7	7,2	0	0	0	0
Braunkohle	145,9	150,1	160,7	160,9	155,8	154,5	149,5	148,4	145,6	114,0	91,7	108,3	116,2	87,3	56	0	0	0
Steinkohle	117,0	112,4	116,4	127,3	118,6	117,7	112,2	93,6	82,6	57,5	42,8	54,3	64,4	40,6	39	0	0	0
Erdgas	89,3	86,1	76,4	67,5	61,1	62,0	81,3	86,7	81,6	90,0	95,0	89,0	79,8	77,7	97	18	132	50
Öl	8,7	7,2	7,6	7,2	5,7	6,2	5,8	5,6	5,1	4,8	4,7	4,8	4,4	4,9	3	1	3	1
Wasserkraft	27,4	23,5	27,9	28,8	25,4	24,9	26,1	26,2	17,7	19,7	18,3	19,1	17,5	19,6	21	21	20	21
Windkraft Land	37,6	48,3	49,9	50,8	55,9	71,4	67,6	87,9	90,5	101,2	104,8	92,9	100,2	118,2	137	224	181	346
Windkraft See	0,2	0,6	0,7	0,9	1,4	7,8	12,5	17,7	19,5	24,7	27,3	24,8	25,1	23,9	76	272	84	210
Solar-PV	11,7	19,6	26,4	31,0	36,1	38,7	38,1	39,4	45,8	46,4	48,6	49,0	60,8	61,2	94	183	198	400
Geothermie	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	3	2	0	0
Biomasse	29,6	32,8	38,2	40,1	42,2	44,6	45,0	45,0	44,7	44,4	45,0	45,0	44,6	43,6	42	35	29	35
Hausmüll ^a	4,7	4,8	5,0	5,4	6,1	5,8	5,9	6,0	6,2	5,8	5,8	5,7	5,6	5,6	6	7		
andere ^b	20,4	19,7	19,9	20,4	21,2	21,5	21,9	21,0	27,6	25,7	24,8	22,4	23,8	23,6	9	2	11	5
Summe^c	633,1	613,1	628,6	637,7	626,7	647,0	650,8	653,9	642,9	609,4	573,6	584,5	577,9	513,7	582	764	658	1068

^a = biogener Anteil, im NECP-update nicht extra ausgewiesen, aber in Biomasse enthalten; ^b = inkl. Gicht-/Kokereigas, nicht-biogener Hausmüll; ^c = ohne Pumpstrom; Abweichung der Summenwerte bedingt durch Rundung der Einzelwerte

Quelle: AGEB (2024) für 2010-2023; für 2030 und 2050: Prognos (2020a+b) sowie BMWK (2024)

Im Jahr 2023 ging die Bruttostromerzeugung deutlich zurück, was vor allem auf eine sich insgesamt abschwächende Konjunktur und eine milde Witterung zurückzuführen ist – insbesondere zeigte die stromintensive Industrie (Chemie, Metalle...) aufgrund sinkender Produktion eine geringere Nachfrage. Hinzu kam, dass die Importe von Strom höher waren als der Export.

Die Struktur der Stromerzeugung hat in GEMIS eine **höhere Auflösung** als in Tabelle 1 dargestellt, da das Modell für Stromerzeugungsprozesse die verschiedenen Brennstoffe (z.B. ost-/westdeutsche Braunkohle) bzw. Technologietypen (z.B. Gasturbinen- und GuD-Kraftwerke) abbildet und für Brennstoff-Vorketten (Lebenswege) auch Energie**importmixe** berücksichtigt.

Daher wurden die Daten aus Tabelle 1 auf Grundlage von Sekundärstatistiken auf die zur Definition der Stromerzeugung detaillierteren Zuordnungen zu Kraftwerkstypen in GEMIS umgerechnet.

Parallel wurden aufgrund der disruptiven Dynamiken für Erdgas- und Steinkohlebezug **auch die Importmixe für die entsprechenden Vorketten auf die Daten des Jahres 2023 aktualisiert** und für die Szenarien entsprechend angepasst.

3 Die NECP-Szenarien für 2030 und 2050

Über die statistischen Daten für die Jahre bis 2023 hinaus wurden ergänzend Szenarien für 2030 und 2050 berechnet, die auf dem **Zielszenario** des National Energy and Climate Plan (NECP) der Bundesregierung (Prognos et al. 2020) sowie **der NECP-Aktualisierung von 2024** (BMWK 2024) beruhen.

Die EU-Vorgaben zur Transparenz im Energiesektor verlangen von Mitgliedsstaaten, regelmäßig über die nationalen Pläne zur Energie- und Klimapolitik in einem einheitlichen Format zu berichten. Deutschland hat in einem intensiven ressortübergreifenden und teilweise öffentlichen Konsultationsprozess unter Federführung des BMWi einen NECP erstellt, der die geplante Entwicklung der Energie- und Klimapolitiken darstellt (BMWi 2020). Diesem NECP liegt eine mehrjährige Untersuchung zu Grunde, die auch die Entwicklung bis 2050 fort-schreibt (Prognos et al. 2020a+b).

Das Zielszenario des NECP bildet die **langfristige** Erreichung der Klimaschutz-Vorgaben (Paris, 2 °C-Ziel) und die Dekarbonisierung des Stromsektors ab, was einerseits höhere Anteile an Erneuerbaren erfordert und andererseits höhere Effizienz auf der Nachfrageseite.

Das NECP-Zielszenario aus dem Jahr 2020 bildet allerdings **nicht die mittlerweile erfolgte Vorziehung des Klimaneutralitätsziels auf 2045 ab und berücksichtigt auch nicht die geänderte energiewirtschaftliche Realität (Erdgas-/LNG-Importmixe, Preise...)** sowie das **80%-Ziel für regenerativen Strom im Jahr 2030 nach dem EEG**.

Die vom BMWK kürzlich vorgelegte **Aktualisierung des NECP** („NECP-update“) **berücksichtigt diese Entwicklungen**. Eine grobe Quantifizierung in einer Hintergrundpublikation (Harthan et al. 2024) bildet die Grundlage der hier bestimmten Ergebnisse für die NECP-update-Szenarien 2030 und 2050. Es wurden die Szenarien „mit weiteren Maßnahmen“ (MWMS) unterlegt.

4 Bilanzierung des KEV und der THG-Emissionen

Die recherchierten Daten wurden in das Computermodell GEMIS (Version 5.2) eingegeben und die Lebenswege der Stromerzeugung für das Jahr **2023** und für die Szenario-Jahre 2030 und 2050 nach dem NECP und dessen 2024-update **bilanziert**.

4.1 Ergebnisse der Berechnungen bis zum Jahr 2023

Die Ergebnisse für die **durchschnittliche kWh Strombereitstellung** aus dem lokalen Netz (Tabelle 2) sowie aus dem **Kraftwerkspark** (d.h. ohne Netz- und Verteilverluste) zeigen die folgenden Tabellen.

Tabelle 2 KEV und THG-Emissionen der lokalen Strombereitstellung in Deutschland von 2000 bis 2023

Option	Kumulierter Energieverbrauch (KEV) [kWh _{primär} /kWh _{el}]		THG-Emissionen [g/kWh _{el}]	
	KEV _{NE}	KEV _{ges}	CO ₂ Äq	CO ₂
Strom lokal 2000	2,71	2,86	679	639
Strom lokal 2005	2,54	2,77	635	602
Strom lokal 2010	2,34	2,74	600	569
Strom lokal 2011	2,21	2,68	610	579
Strom lokal 2012	2,13	2,65	612	580
Strom lokal 2013	2,10	2,64	612	581
Strom lokal 2014	2,04	2,64	594	564
Strom lokal 2015	1,91	2,55	559	531
Strom lokal 2016	1,92	2,54	566	538
Strom lokal 2017	1,76	2,44	520	494
Strom lokal 2018	1,71	2,40	504	480
Strom lokal 2019	1,55	2,29	424	405
Strom lokal 2020	1,37	2,25	383	366
Strom lokal 2021	1,45	2,32	409	389
Strom lokal 2022	1,34	2,19	439	422
Strom lokal 2023	1,02	2,11	381	367

KEV_{ges} = gesamter KEV; KEV_{NE} = KEV nicht-erneuerbar; CO₂-Äquivalente für GWP₁₀₀ nach IPCC (2013)

Quelle: eigene Berechnung mit GEMIS 5.2

Die Daten für 2023 zeigen, dass sich die Tendenz zur Senkung von KEV- und THG-Werten für die lokale Strombereitstellung weiter fortsetzt.

Die entsprechenden Werte für die Strombereitstellung aus dem deutschen Kraftwerksmix, d.h. ohne Netz- und Verteilverluste, zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 3 KEV und THG-Emissionen der Strombereitstellung frei Kraftwerkspark in Deutschland von 2000 bis 2023

Option	Kumulierter Energieverbrauch (KEV) [kWh _{primär} /kWh _{el}]		THG-Emissionen [g/kWh _{el}]	
	KEV _{NE}	KEV _{ges}	CO ₂ Äq	CO ₂
Kraftwerkspark 2000	2,63	2,77	659	619
Kraftwerkspark 2005	2,46	2,69	616	584
Kraftwerkspark 2010	2,27	2,66	582	552
Kraftwerkspark 2011	2,14	2,60	592	562
Kraftwerkspark 2012	2,06	2,57	593	563
Kraftwerkspark 2013	2,03	2,57	593	564
Kraftwerkspark 2014	1,98	2,56	576	547
Kraftwerkspark 2015	1,85	2,47	542	515
Kraftwerkspark 2016	1,86	2,46	549	522
Kraftwerkspark 2017	1,71	2,37	504	479
Kraftwerkspark 2018	1,66	2,33	488	465
Kraftwerkspark 2019	1,50	2,22	411	392
Kraftwerkspark 2020	1,33	2,18	370	355
Kraftwerkspark 2021	1,40	2,25	396	377
Kraftwerkspark 2022	1,30	2,12	426	409
Kraftwerkspark 2023	0,99	2,05	369	355

KEV_{ges}= gesamter KEV; KEV_{NE} = KEV nicht-erneuerbar; CO₂-Äquivalente für GWP₁₀₀ nach IPCC (2013)

Quelle: eigene Berechnung mit GEMIS 5.2

Die Ergebnisse zeigen, dass sich im Jahr 2023 auch beim Strom aus dem Kraftwerksmix die frühere Tendenz zur **Senkung** von KEV- und THG-Werten fortsetzte, wobei der KEV_{NE} erstmals **unter dem Wert von 1** liegt und die THG-Werte im gesamten Zeitraum seit 2000 **am niedrigsten** lagen.

4.2 Ergebnisdiskussion für die Entwicklung bis 2023

Die gegenüber dem Vorjahr niedrigeren KEV-Werte für 2023 ergeben sich durch **erhöhte** Anteile **erneuerbaren** Stroms – insbesondere aus Solar- und Windenergie - sowie den gesunkenen Anteilen von AKW-Strom (stretch-out-Betrieb bis April) und den ebenfalls **gesunkenen** Anteilen an Strom aus Braun- und Steinkohle (vgl. Tabelle 1).

Diese Verschiebungen im Erzeugungsmix führten bei den THG-Emissionen zu einer deutlichen Senkung gegenüber dem Vorjahr (Tabelle 2).

Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch und THG-Emissionen des deutschen Strommix im Jahr 2023 sowie Ausblicke auf 2030 und 2050

5 Ausblick auf 2030 und 2050

Nach 2023 wird sich die Umstrukturierung des deutschen Kraftwerksparks in Richtung höherer Anteile erneuerbarer und geringerer fossiler Energien sowie dem im April 2023 erfolgten Atomausstieg fortsetzen, so dass **künftig von weiter sinkenden** nichterneuerbaren KEV-Werten der Strombereitstellung auszugehen ist und dies tendenziell auch für die THG-Emissionen gilt.

5.1 Ergebnisse der Szenarien für 2030 und 2050

Die Ergebnisse der Szenarien für 2030 und 2050 zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 4 KEV-Werte und THG-Emissionen von Strom für 2030 und 2050 nach NECP und NECP-update

Strom aus	kumulierter Energieverbrauch (KEV) [kWh _{primär} /kWh _{el}]		THG-Emissionen [g/kWh _{el}]	
	KEV _{NE}	KEV _{ges}	CO ₂ Äq	CO ₂
Strom lokal 2030 NECP	0,78	1,75	261	254
Strom lokal 2030 NECP-update	0,47	1,41	113	109
Strom lokal 2050 NECP	0,07	1,27	30	27
Strom lokal 2050 NECP-update	0,11	1,22	31	29
Kraftwerkspark 2030 NECP	0,75	1,69	253	246
Kraftwerkspark 2030 NECP-update	0,45	1,37	109	105
Kraftwerkspark 2050 NECP	0,07	1,22	28	26
Kraftwerkspark 2050 NECP-update	0,11	1,18	29	27

KEV_{NE} = KEV nicht-erneuerbar; KEV_{ges} = gesamter KEV; CO₂-Äquivalente für GWP₁₀₀ nach IPCC (2013)

Quelle: eigene Berechnung mit GEMIS 5.2

Für **2030** ergeben sich im NECP-Zielszenario **verbraucherseitig** (also für lokale Stromnachfrage) einen KEV_{NE} von 0,78 kWh_{primär}/kWh_{el} und THG-Emissionen von gerundet 261 g CO₂Äq/kWh_{el}, sowie **erzeugerseitig** (Kraftwerkspark) ein KEV_{NE} von 0,75 kWh_{primär}/kWh_{el} und THG-Emissionen von gerundet 253 g CO₂Äq/kWh_{el}.

Das **NECP-update-Szenario** für 2030 zeigt dagegen verbraucherseitig nur noch einen KEV_{NE} von 0,47 kWh_{primär}/kWh_{el} und THG-Emissionen von gerundet 113 g CO₂Äq/kWh_{el}, sowie erzeugerseitig einen KEV_{NE} von 0,45 kWh_{primär}/kWh_{el} und THG-Emissionen von gerundet 109 g CO₂Äq/kWh_{el} – das NEP-update führt somit zu **drastisch niedrigen Ergebnissen**.

Für **2050** ergibt das **NECP-Zielszenario** verbraucherseitig einen KEV_{NE} von nur $0,07 \text{ kWh}_{\text{primär}}/\text{kWh}_{\text{el}}$ und THG-Emissionen von $30 \text{ g CO}_2\text{Äq}/\text{kWh}_{\text{el}}$. Erzeugerseitig ergeben sich ein KEV_{NE} von $0,07 \text{ kWh}_{\text{primär}}/\text{kWh}_{\text{el}}$ und THG-Emissionen von $28 \text{ g CO}_2\text{Äq}/\text{kWh}_{\text{el}}$.

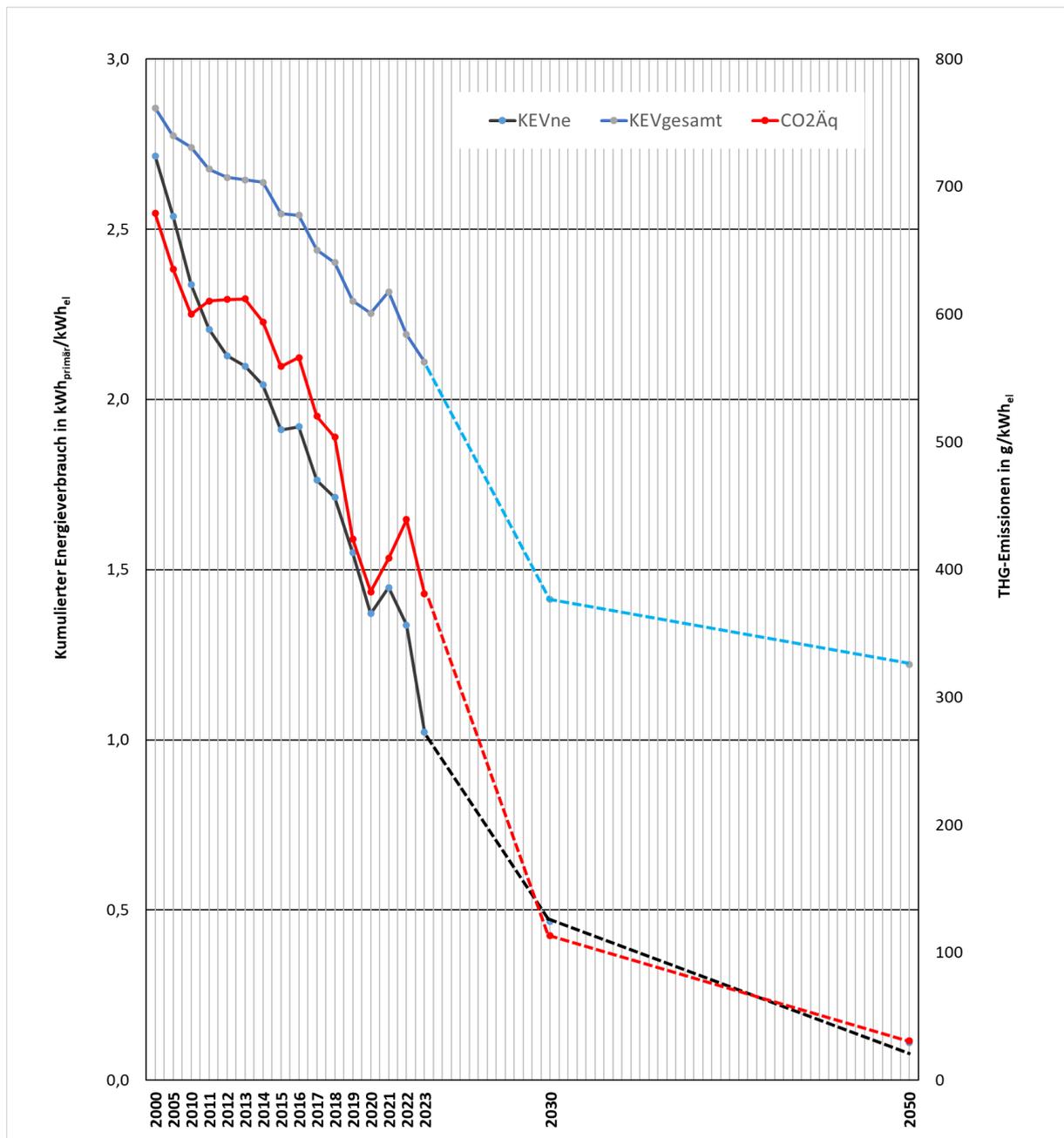
Demgegenüber führt das **NECP-update-Szenario** für 2050 verbraucherseitig zu einem KEV_{NE} von $0,11 \text{ kWh}_{\text{primär}}/\text{kWh}_{\text{el}}$ und THG-Emissionen von $31 \text{ g CO}_2\text{Äq}/\text{kWh}_{\text{el}}$. Erzeugerseitig ergeben sich ein KEV_{NE} von ebenfalls $0,11 \text{ kWh}_{\text{primär}}/\text{kWh}_{\text{el}}$ und THG-Emissionen von $29 \text{ g CO}_2\text{Äq}/\text{kWh}_{\text{el}}$.

Das NECP- update-Szenario für 2050 ergibt minimal höhere Werte als das NECP-Zielszenario, was aufgrund der insgesamt sehr niedrigen Werte aber eher unerheblich ist.

5.2 Überblick zu den Ergebnissen von 2000 bis 2050

Den Gesamtverlauf von 2000 bis 2023 (nach Statistik) sowie nach den Szenarien für 2030 und 2050 (nach NECP-update) zeigen die folgenden Abbildungen.

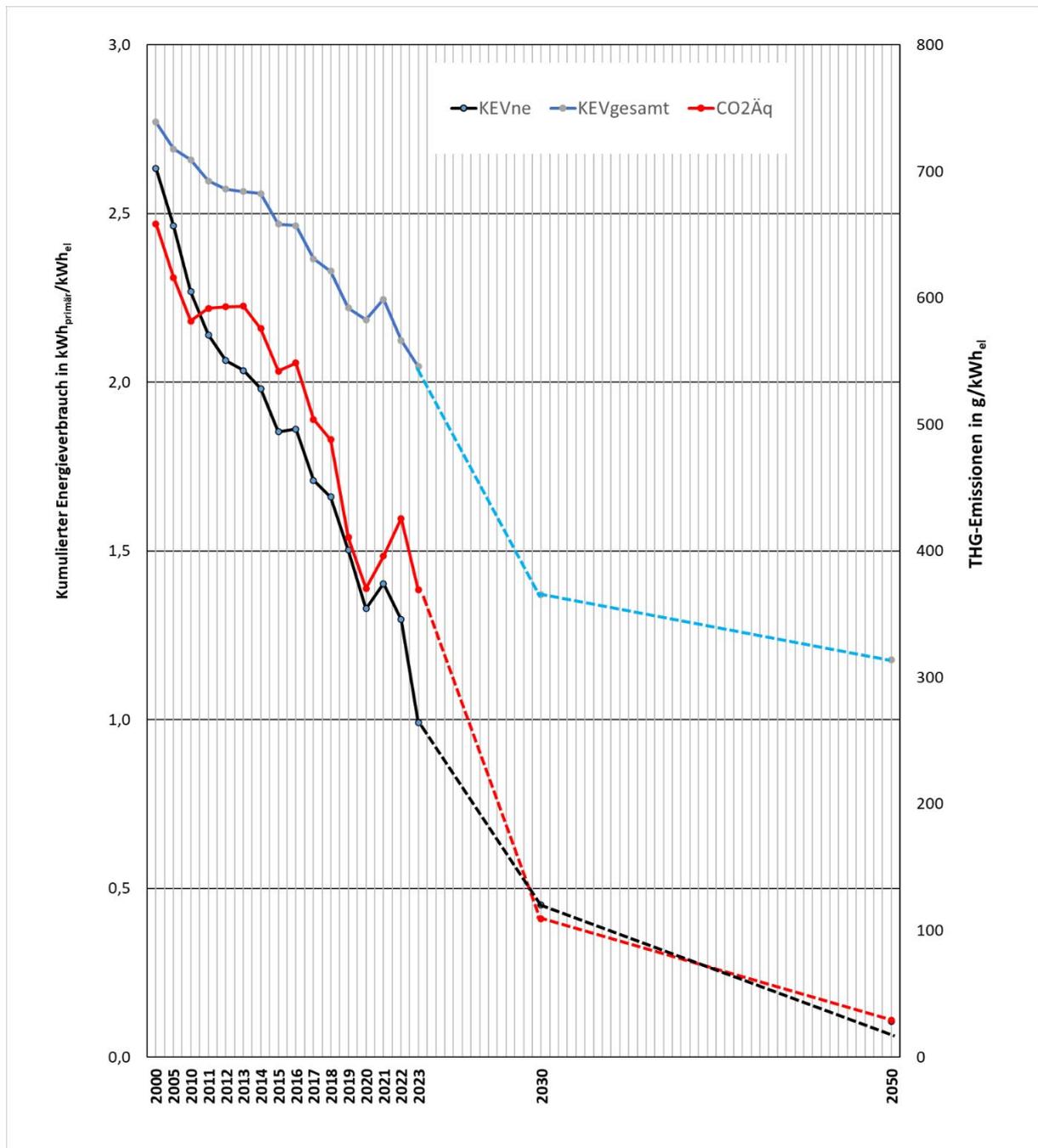
Bild 1 KEV und THG-Emissionen von Strom bei Abgabe aus dem lokalen Netz für 2000 bis 2023 (nach Statistik) sowie 2030 bis 2050 (Szenarien)



Quelle: eigene Berechnung mit GEMIS 5.2; gestrichelte Linien = interpolierte Werte

Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch und THG-Emissionen des deutschen Strommix im Jahr 2023 sowie Ausblicke auf 2030 und 2050

Bild 2 KEV und THG-Emissionen von Strom bei Abgabe aus dem Kraftwerkspark (ohne Netz- und Verteilverluste) für 2000 bis 2023 (nach Statistik) sowie 2030 bis 2050 (Szenarien)



Quelle: eigene Berechnung mit GEMIS 5.2; gestrichelte Linien = interpolierte Werte

Der Gesamttrend zu geringeren KEV-Werten seit 2000 ist gut sichtbar und setzt sich in den Szenario-Jahren 2030 und 2050 signifikant fort. Entsprechend den Szenario-Annahmen würde der KEV_{NE} bis 2030 auf unter 0,5 kWh_{primär}/kWh_{el} und bis 2050 auf knapp 0,1 kWh_{primär}/kWh_{el} sinken.

Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch und THG-Emissionen des deutschen Strommix im Jahr 2023 sowie Ausblicke auf 2030 und 2050

Die THG-Emissionen würden nach den Szenario-Annahmen in den Jahren 2030 bis 2050 weiter **stark absinken** und sowohl verbraucher- wie erzeugerseitig Werte um **110 g CO₂Äq/kWh_{el}** (2030) erreichen und bis 2050 auf Werte um **30 g CO₂Äq/kWh_{el}** sinken.

Ob - und wenn ja wie - dies real eintritt, ist offen, d.h. es bestehen die o.g. **Unsicherheiten** sowohl hinsichtlich des langfristigen Strom-Mix wie auch der Höhe der Stromnachfrage (und entsprechender Erzeugung).

5.3 Robustheit der Ergebnisse

Die hier dargestellten Ergebnisse sind abhängig vom Stromerzeugungsmix. Die Szenarien für 2030 und 2050 beruhen auf Annahmen, bei denen nicht nur die Wahl der erneuerbaren Erzeugungsanteile relevant ist, sondern auch die Anteile von Braun- und Steinkohle sowie Erdgas und Erdöl. Dies gilt insbesondere für die THG-Emissionen, während der KEV_{NE} bei den **fossilen** Kraftwerken in einem **relativ engen Fenster** von rund 1,8 (Erdgas-GuD-HKW) bis 2,3 (Braunkohle) kWh_{primär}/kWh_{el} liegt, wie Tabelle 5 für Stromerzeugungsoptionen im Jahr 2020 zeigt.

Tabelle 5 KEV und THG-Emissionen von Stromerzeugungsoptionen in 2020

Strom aus	kumulierter Energieverbrauch (KEV) [kWh _{primär} /kWh _{el}]		THG-Emissionen [g/kWh _{el}]	
	KEV _{NE}	KEV _{ges}	CO ₂ Äq	CO ₂
Strom Kraftwerkspark	1,33	2,18	370	355
Steinkohle-Kraftwerk (Import)	2,41	2,44	880	809
Braunkohle-Kraftwerk	2,37	2,37	996	988
Erdgas-GuD-Kraftwerk	1,85	1,88	378	365
Erdgas-GuD-Heizkraftwerk	1,76	1,80	361	348
Atomkraftwerk (AKW)	3,21	3,26	39	38
Wind Park onshore	0,02	1,02	9	8
Wind Park offshore	0,01	1,01	4	4
Solar-PV (polykristallin)	0,07	1,10	26	23
Biogas-Gülle-BHKW	0,09	2,64	41	27
Biogas-Mais-BHKW	0,21	2,76	176	53

Quelle: Berechnung mit GEMIS 5.1; KWK-Prozesse energiebezogen alloziert zwischen gekoppelt erzeugtem Strom und Wärme; KEV_{NE} = KEV nicht-erneuerbar; KEV_{ges} = gesamter KEV; CO₂-Äquivalente für GWP₁₀₀ nach IPCC (2013)

Der KEV_{NE} von AKW-Strom liegt mit 3,2 kWh_{primär}/kWh_{el} am höchsten, während Strom aus Erneuerbaren mit KEV_{NE}-Werten deutlich unter 0,3 kWh_{primär}/kWh_{el} um mehr als den **Faktor 10 niedriger** liegt.

Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch und THG-Emissionen des deutschen Strommix im Jahr 2023 sowie Ausblicke auf 2030 und 2050

Für die Entwicklung des KEV_{NE} des Strommixes sind daher weniger die Anteile von Kohle und Gas relevant als vielmehr die von AKW (**erhöhender** Effekt) und Erneuerbaren (**senkender** Effekt).

Die künftigen Null-Anteile vom AKW-Strom sind aufgrund des gesetzlich geregelten und mittlerweile erfolgten Ausstiegs ebenso wie die steigende Erzeugung durch Erneuerbare politisch „gesetzt“.

Die szenariogestützten Daten für den KEV_{NE} des **Strommixes** bis 2050 sind daher **als robust** anzusehen.

Bei den THG-Emissionen sind dagegen **alle** Erzeugungsanteile relevant, d.h. der angesetzte Mix fossiler und regenerative Energieträger bestimmt das Ergebnis. Durch den gesetzlich geregelten Kohleausstieg bleibt somit das Verhältnis von Erdgas und Erneuerbaren (inkl. „grünem“ H_2 und Power-to-Gas) die dominante Kenngröße.

Mit der Annahme, dass Deutschland die selbst gesetzten Klimaziele sowie die Vorgaben des Paris-Abkommens bis 2050 einhält, wird der mögliche Korridor der strombezogenen THG-Emissionen sehr eng, daher sind die hier berechneten Ergebnisse ebenfalls als robust anzusehen.

Damit ist die hier analysierte Entwicklung des KEV_{NE} sowie der THG-Emissionen unter der Annahme einer künftig früheren Klimaneutral-Zielerreichung für die Jahre 2030 und 2050 als **sehr konservativ** anzusehen.

Literatur

- AGEB (2024) Stromerzeugung nach Energieträgern (Strommix) von 1990 bis 2023 (in TWh) Deutschland insgesamt. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen. Berlin https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2024/04/STRERZ_Abg_02_2024_korr.xlsx
- BDEW (2024) Die Energieversorgung 2023 – Jahresbericht (Aktualisierte Fassung). Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. Berlin https://www.bdew.de/media/documents/Jahresbericht_2023_UPDATE_Mai_2024_final_V2.pdf
- BMWK (2023) Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Berlin <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fortschreibung-nationale-wasserstoffstrategie.pdf>
- BMWK (2024) Aktualisierung des integrierten nationalen Energie- und Klimaplan. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Berlin <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/20240820-aktualisierung-necp.pdf>
- BMWi (2020) Nationaler Energie- und Klima-Plan. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Berlin
- Hartan, Ralph et al. (2024) Technischer Anhang der Treibhausgas-Projektionen 2024 für Deutschland (Projektionsbericht 2024). Öko-Institut et al. i.A. des Umweltbundesamtes. Dessau https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/projektionen_technischer_anhang_0.pdf
- IINAS (2023) Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch und THG-Emissionen des deutschen Strommix im Jahr 2022 sowie Ausblicke auf 2030 bis 2050. Fritsche, Uwe R. & Greß, Hans-Werner. Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und –strategien. Kurzstudie für die Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendungen e.V. (HEA). Darmstadt https://iinas.org/app/uploads/2023/10/IINAS_2023_KEV_THG_Strom-2022_2030-2050.pdf
- Prognos et al. (2020a) Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050 - Dokumentation von Referenzszenario und Szenario mit Klimaschutzprogramm 2030. Prognos AG, FhG-ISI, GWS & IINAS i.A. des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Basel etc. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/klimagutachten.pdf>
- Prognos et al. (2020b) Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050 - Abschlussbericht. Prognos AG, FhG-ISI, GWS & IINAS i.A. des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Basel etc.

Anhang: Methodische Hinweise zur Bilanzierung

Die hier verwendete Bilanzierung von Lebenswegen folgt den Vorgaben der ISO 14040ff für Ökobilanzen, jedoch in vereinfachter Form (u.a. kein peer review).

A-1 Systemgrenzen der Bilanzierung

Die hier erfolgte Bilanzierung berücksichtigt **alle wesentlichen Stufen der Lebenswege** inklusive Herstellung von Anlagen, bei Importen auch im Ausland, sowie die entsprechenden **Transportaufwendungen**. Weiterhin werden Hilfsenergien (Strom, Wärme) und Hilfsstoffe (z.B. Schmiermittel, Kalkstein für Entschwefelung, NH₃ für DeNO_x) einbezogen, wenn diese mengenmäßig relevant sind (generelles 1%-Kriterium für den Massenstrom) oder spezifisch hohe Umwelteffekte zeigen (z.B. Edelmetalle als Katalysatoren).

Die Bilanzen klammern jedoch die **Entsorgung** aus⁴. Grund hierfür ist, dass in vielen Fällen stoffliche Komponenten wiederverwertet werden können (Aluminium, Beton, Glas, Stahl, Kupfer...) und die entsprechenden „Gewinne“ aus dem Recycling den Aufwand für Abriss und Rückbau übersteigen, insgesamt also eine Gutschrift erfolgen müsste. Da jedoch die künftigen Entsorgungssysteme sowie die künftig zu verrechnenden Gutschriften für vermiedene Primärmaterialien für Energiesysteme typische Lebensdauern von 15 bis 30 Jahren ungewiss sind, wird vereinfachend der Abriss und Rückbau **nicht** betrachtet.

Ebenfalls ausgeklammert wird die Entsorgung **kontinuierlich anfallender Reststoffe und Abfälle**, da hier ebenfalls einerseits Aufwände für deren schadlose Beseitigung entstehen (z.B. Transport und Deponierung), andererseits aber Komponenten wie z.B. Entschwefelungsprodukte und Aschen in hohem Maße recycelt werden und damit wiederum Gutschriften für vermiedene Primärmaterialien (z.B. Gips, Split) anzusetzen wären.

Sensitivitätsrechnungen mit GEMIS für Steinkohlekraftwerke haben gezeigt, dass die vernachlässigten Effekte im Bereich unter 1% für KEV und THG-Emissionen liegen und damit innerhalb der Datengüte.

Weiterhin ist zu beachten, dass sich die Berechnung auf die bundesdeutsche **Bruttostromerzeugung** bezieht, d.h. die für Exporte genutzte Stromerzeugung ist in den Werten **enthalten**. Umgekehrt werden die über Stromimporte aus dem Ausland induzierten Effekte **hier nicht** einbezogen.

Diese Vereinfachung führt eingedenk der bekannten Lastflüsse (Importe von Wasserkraftstrom aus Österreich und Schweiz, Kohlestrom aus Polen und der

⁴ Dies gilt nicht für AKW, da hier eine besondere Situation vorliegt. Die Aufwände für Abriss und Rückbau sowie für die direkte Endlagerung radioaktiver Abfälle sind als Aufschlag in den Daten enthalten.

Tschechischen Republik sowie Atomstrom aus Frankreich) zu keiner nennenswerten Verzerrung, da der anzusetzende Importmix zwar die deutsche Strombilanz belasten würde, aber für die Exporte entsprechende „vermiedene Erzeugung“ in – vorwiegend fossilen – Kraftwerken im Ausland gutgeschrieben werden müsste.

Zwar könnte mit einem EU-Mix für den Stromaustausch gerechnet – siehe z.B. die entsprechenden Daten in IINAS (2015) – und damit vereinfachend die „Netto“-Bilanz für Deutschland ermittelt werden, jedoch würde dies nicht die realen Lastflüsse und Grenzkraftwerksbedingungen in den im Stromaustausch einbezogenen Ländern reflektieren.

Würde dennoch eine solche Bilanz berechnet, würde sich ob des Exportüberschusses eine – allerdings nur leichte – Reduktion der hier ermittelten Werte ergeben. Die dargestellten Ergebnisse sind daher im Hinblick auf die Variation der Ex- und Importbilanz als robuste obere Grenze anzusehen⁵.

A-2 Anwendungsbereich („scope“)

Die hier vorgelegten Bilanzierungen dienen zur Bestimmung des KEV und der THG-Emissionen des bundesdeutschen **Strommixes** in den gegebenen Jahren für die **erzeugerseitige** Bereitstellung von Strom (Kraftwerkseinspeisung in Hochspannungsnetz) bzw. für die **verbraucherseitige** Bereitstellung (d.h. inkl. Netz- und Übertragungs- sowie Umspanverlusten).

Sie reflektieren die **durchschnittlichen** Effekte, die bei der Bereitstellung von Strom aus der öffentlichen Versorgung inklusiver vertraglich gesicherter Übergabeleistung des Bergbaus und der Industrie entstehen.

Dabei wurde die erneuerbare Stromerzeugung – unabhängig von **monetären** Flüssen der EEG-Vergütung und Marktprämien – proportional auf **alle** erzeugten Strommengen „umgelegt“. Dies erfolgt ebenfalls für die (relativ geringe) KWK-Stromerzeugung, d.h. auch hier wurde **unabhängig** von der monetären Vergütung für eingespeisten KWK-Strom die erzeugten kWh auf die gesamte Stromerzeugung proportional umgerechnet.

Dies entspricht den statistischen Zurechnungen von DESTATIS und AGEB und den Vorgaben der IEA-Energiestatistik.

⁵ Beim KEV wäre diese Bilanz durchaus sinnvoll, jedoch nicht bei den THG-Emissionen, da hier das EU-Emissionshandelsystem erlaubt, im Ausland „vermiedene“ Emissionen im Rahmen der Verpflichtungsperiode durch Emissionen an anderer Stelle zu kompensieren. Das **territorial** orientierte Konzept der THG-Bilanzierung nach IPCC spricht daher für die hier verwendete Bruttobilanz.

A-3 Allokation

Wie in A-2 dargestellt, erfolgt in der hier vorgelegten Bilanzierung eine **rein energetische** Zurechnung von Strommengen aus bestimmten Erzeugungstypen (RE, KWK...) auf den nationalen Strommix durch proportionale Anteile der jeweiligen Erzeugung im Gesamtmix. Eine „monetäre“ Allokation auf bestimmte Verbrauchergruppen, die besondere Vergütungsleistungen (nach dem EEG bzw. KWK-Gesetz) über die Strompreise erbringen, erfolgt also **nicht**⁶.

Es bleibt die Frage, wie die Stromerzeugung mittels Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) bilanziert wird.

Hierfür gibt es verschiedene Ansätze, die jedoch bezogen auf den KEV und die THG-Emissionen des **gesamten** Strommixes wenig ergebniswirksam sind (vgl. Fritsche & Rausch 2008).

Um kompatibel mit den EU-Regelungen zur KWK sowie den statistischen Daten zu bleiben, wurde für die Bilanzierung eine **energiewertbezogene** Allokation zwischen KWK-Strom und KWK-Wärme angesetzt, die der sog. „finnischen Methode“ der EU-KWK-Richtlinie folgt.

A-4 KEV und KEA

Der kumulierte Energieaufwand (KEA) wird schon seit den 1970er-Jahren weltweit als Kennzahl für Energiesysteme verwendet. Anfang der 1990er-Jahre entwarfen Experten des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) mit Beteiligung des Umweltbundesamts ein Regelwerk zur Bestimmung des KEA, die VDI-Richtlinie 4600 (VDI 1997). Diese Richtlinie enthält Definitionen, Rechenmethoden und Beispiele für KEA-Anwendungen. Sie ist Grundstein aller heutigen KEA-Arbeiten und präzisiert, was mit dem kumulierten Energieaufwand gemeint ist.

Die KEA-Richtlinie stellte erstmals deutlich heraus, dass der Primärenergieaufwand auch unter Umweltgesichtspunkten eine wichtige Größe ist.

In einem Forschungsprojekt des Umweltbundesamtes wurde Ende der 1990er Jahre der sog. kumulierte **Energieverbrauch** (KEV) eingeführt (vgl. Fritsche et al. 1999 + 2003)⁷. Der KEV repräsentiert wie der KEA die **Summe aller Primärenergieinputs**, inklusive solcher zur Materialherstellung, klammert aber den Energieinhalt von Brennstoffen aus, die **stofflich** genutzt werden (z.B. Bauholz).

⁶ Siehe A-6 für eine kurze Diskussion der Frage, welche Bilanzen für den Stromverbrauch einzelner Verbrauchergruppen (z.B. Haushalte) erstellt werden können.

⁷ Physikalisch gesehen kann Energie nicht verbraucht, sondern nur in andere Formen umgewandelt werden. Der Ausdruck „Verbrauch“ wurde gewählt, um eine Kompatibilität mit dem statistischen Primärenergieverbrauch herzustellen.

Weiterhin setzt der KEV **definitiv** den Nutzungsgrad **jeder** Primärenergiegewinnung auf 100% (z.B. Bergbau, Solarzelle, Wasserkraftwerk), d.h. alle Förderverluste gehen zu Lasten des Lagers (bei fossilen und nuklearen Energieträgern) bzw. des Reservoirs (bei Wasserkraft) oder natürlichem Energiefluss (z.B. bei Solar- und Windenergie). Damit ist die Kompatibilität mit UN-, IEA-, EUROSTAT- und DESTATIS-Energiebilanzen gewährleistet.

A-5 Komponenten des KEV

Wichtig ist die Unterscheidung in KEV_{Summe} (gesamter KEV) sowie die Komponenten

- KEV_{NE} = nichterneuerbare (fossile + nukleare) Primärenergien
- KEV_{RE} = regenerative (erneuerbare) Primärenergien

Diese Unterscheidung wird auch international verwendet und dient dazu, den KEV_{NE} als „Leitindikator“ für vereinfachte Ökobilanzen verwenden zu können (Fritsche u.a. 1999):

Der **gesamte** KEV ist zwar für ressourcenorientierte Fragen relevant, aber **nicht** „richtungssicher“ in Bezug auf Umweltaspekte wie THG-Emissionen und Versauerungspotenzial (vgl. Fritsche et al. 2003). Wird dagegen auf den KEV_{NE} abgestellt, ergibt sich eine tendenziell gute Übereinstimmung mit den Werten für THG-Emissionen. Zudem wird die Erfüllung der **politischen Zielsetzung**, den Anteil Erneuerbarer zu steigern, notwendig mit höheren KEV_{NE} -Anteilen einhergehen, und dies würde in der alleinigen Verwendung des gesamten KEV nicht sichtbar sein. Daher wird in der hier vorgelegten Bilanzierung vorwiegend auf den KEV_{NE} abgestellt und der KEV_{ges} nur nachrichtlich ausgewiesen.

A-6 KEV- und THG-Bilanzierung und Stromkennzeichnung

Der hier ermittelte KEV für den durchschnittlichen Strom (vgl. A-1) kann nicht herangezogen werden, um belastbare Aussagen über **Teilmengen** der Stromerzeugung oder des Stromverbrauchs abzuleiten.

Verbraucherseitig ist die **Stromkennzeichnung** ein zunehmend wichtiges Instrument, um Kunden über die Umweltaspekte des bezogenen Produkts zu informieren.

Die Stromkennzeichnung verwendet jedoch **andere** Bilanzgrenzen – sie orientiert sich an den Unternehmen und deren Bezüge und kann z.B. die Anteile von Erneuerbaren gezielt auf Kundengruppen (etwa entsprechend der von ihnen gezahlten EEG-Umlage) zurechnen.

Literatur zum Anhang

- EN ISO 14041 Umweltmanagement Ökobilanz - Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz. Deutsche Fassung prEN ISO 14041:1997
- Fritsche, Uwe et al. (1999) KEA: mehr als eine Zahl - Basisdaten und Methoden zum Kumulierten Energieaufwand (KEA). Ergebnisse des F&E-Vorhabens "Erarbeitung von Basisdaten zum Energieaufwand und der Umweltbelastung von energieintensiven Produkten und Dienstleistungen für Ökobilanzen und Öko-Audits". Öko-Institut, IREB, IFIB, DIW, ISI. i.A. des UBA. Darmstadt usw.
http://www.iinas.org/tl_files/iinas/downloads/GEMIS/1999_g3-kea-brosch.pdf
- Fritsche, Uwe et al. (2003) Anwendung und Kommunikation des Kumulierten Energieverbrauchs (KEV) als praktikabler umweltbezogener Bewertungs- und Entscheidungsindikator für energieintensive Produkte und Dienstleistungen. FfE, Ecofys, IFEU, ÖKO & TH Karlsruhe Endbericht zum F&E-Vorhaben i.A. des UBA. München usw.
<http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2779.pdf>
- Fritsche, Uwe & Rausch, Lothar (2008) Bestimmung spezifischer Treibhausgas-Emissionsfaktoren für Fernwärme. Endbericht zum F&E-Vorhaben FKZ 360 16 008 des Öko-Instituts i.A. des UBA. Darmstadt
<http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3476.pdf>
- Fritsche, Uwe & Rausch, Lothar (2009) Life Cycle Analysis of GHG and Air Pollutant Emissions from Renewable and Conventional Electricity, Heating, and Transport Fuel Options in the EU until 2030. Oeko-Institut. ETC/ACC Technical Paper 2009/18. Darmstadt
http://acm.eionet.europa.eu/reports/docs//ETCACC_TP_2009_18_LCA_GHG_AE_2013-2030.pdf
- Fritsche, Uwe & Rausch, Lothar (2010) GEMIS-Emissionsfaktoren für Treibhausgase und KWK-Zurechnung. Öko-Institut. Kurzpapier für die Landeshauptstadt München. Darmstadt
http://www.iinas.org/tl_files/iinas/downloads/GEMIS/2010_GEMIS_EF_KWK-LHM.pdf
- Fritsche, Uwe (2016) Primärenergetische Bewertung von Strom in Deutschland: Stand und Ausblick. EnEV aktuell Heft 4/2016: 14-16
- IINAS (2015) Development of the Primary Energy Factor of Electricity Generation in the EU-28 from 2010-2013. Fritsche, Uwe R. & Gress, Hans-Werner. International Institute for Sustainability Analysis and Strategy. Prepared for EHPA. Darmstadt
http://www.iinas.org/tl_files/iinas/downloads/GEMIS/2015_PEF_EU-28_Electricity_2010-2013.pdf
- VDI (1997) VDI Richtlinie 4600 - Kumulierter Energieaufwand - Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden. Düsseldorf