

Kurzstudie:

Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch und THG- Emissionen des deutschen Strom- mix im Jahr 2015 sowie Ausblicke auf 2020 und 2030

Bericht für die Fachgemeinschaft für
effiziente Energieanwendung e.V. (HEA)

vorgelegt von

Uwe R. Fritsche

Hans-Werner Greß

Wissenschaftliche Leitung:

Uwe R. Fritsche uf@iinas.org

Kaufmännische Leitung:

Thomas Stetz ts@iinas.org

Büro Darmstadt:

Heidelberger Straße 129 ½
64285 Darmstadt

t (06151) 850-6077

f (06151) 850-6080

Büro Berlin:

Marienstr.19-20
10117 Berlin

t (030) 28482-190

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)

Alan Hecht, 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 Srivastara, TERI (IN)

Helen Watson, UKZN (ZA)

Sir Robert Watson, Tyndall Centre (UK)

Bankverbindung

Volksbank eG Darmstadt

IBAN DE5450890000055548609

BIC GENODEF1VBD

Handelsregister

HRB 90827

Amtsgericht Darmstadt

USt.-ID gem. § 27a UStG

DE 282876833

www.iinas.org

Darmstadt, November 2016

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	ii
Tabellenverzeichnis.....	ii
Abkürzungsverzeichnis.....	iii
1 Einführung.....	1
2 Recherche der Basisdaten	1
3 Bilanzierung des KEV und der THG-Emissionen.....	4
4 Ergebnisdiskussion und Ausblick	5
4.1 Ergebnisdiskussion für 2010-2015.....	5
4.2 Ausblick auf 2020 und 2030.....	5
4.3 Sensitivität der Ergebnisse.....	9
Literatur.....	10
Anhang: Methodische Hinweise zur Bilanzierung	A-1
A-1 Systemgrenzen der Bilanzierung	A-1
A-2 Anwendungsbereich („scope“).....	A-2
A-3 Allokation	A-3
A-4 KEV und KEA	A-3
A-5 Komponenten des KEV.....	A-4
A-6 KEV- und THG-Bilanzierung und Stromkennzeichnung	A-4

Abbildungsverzeichnis

Bild 1	KEV und THG-Emissionen von Strom bei Abgabe aus dem lokalen Netz für 2010-2015 (nach Statistik) sowie 2020 und 2030 (Szenarien)	7
Bild 2	KEV und THG-Emissionen von Strom bei Abgabe aus dem Kraftwerkspark (ohne Netz- und Verteilverluste) für 2010-2015 (nach Statistik) sowie 2020 und 2030 (Szenarien).....	8

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Entwicklung der deutschen Brutto-Stromerzeugung 2010-2015 und Ausblick auf 2020 und 2030	2
Tabelle 2	KEV und THG-Emissionen von Strom in 2010-2015	4
Tabelle 3	KEV und THG-Emissionen von Strom für 2020 und 2030.....	5
Tabelle 4	KEV und THG-Emissionen von Stromerzeugungsoptionen in 2020	9

Abkürzungsverzeichnis

AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
AKW	Atomkraftwerk
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BHKW	Block-Heizkraftwerk
BMU	Bundesministerium für Umwelt (jetzt: BMUB)
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
DESTATIS	Statistisches Bundesamt
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
EC	European Commission
EEG	Erneuerbares-Energien-Gesetz
EU	Europäische Union
GEMIS	Globales Emissions-Modell integrierter Systeme
GuD	Gas- und Dampfturbine (Kombi-Kraftwerk)
HEA	Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung e.V.
HKW	Heizkraftwerk
IEA	Internationale Energie-Agentur
IINAS	Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und –strategien
IWES	Fraunhofer-Institut für Windenergie-Systeme
KEV	kumulierter Energie-Verbrauch
KEV _{NE}	nichterneuerbarer kumulierter Energie-Verbrauch
KEV _{RE}	erneuerbarer (regenerativer) kumulierter Energie-Verbrauch
KW	Kraftwerk
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
MW	MegaWatt
ORC	Organic Rankine Cycle
PV	Photovoltaik
RE	Regenerative (erneuerbare) Energien
SK	Deutscher Steinkohle-Verband
THG	Treibhausgase
UN	United Nations (Vereinte Nationen)

1 Einführung

Die Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendungen e.V. (HEA) beauftragte IINAS mit einer Kurzstudie zu Daten über den kumulierten Energieverbrauch (KEV) des Mix zur Stromerzeugung in Deutschland im Jahr 2015 sowie einem Ausblick für 2020 und 2030 (Szenarien). Parallel wurden jeweils auch die Emissionen an 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 4.9, das kostenlos erhältlich ist und alle Basisdaten enthält². GEMIS ermittelt auf Grundlage von Lebenswegdaten für Energie-, Stoff- und Transportsysteme die Umwelteffekte unter Einbeziehung vorgelagerter Prozessketten im In- und Ausland sowie Herstellungsaufwände für die Prozesse.

Alle Kenndaten, mit denen in diesem Papier 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 notwendigen Basisdaten zum deutschen nationalen Stromerzeugungsmix des Jahres 2015 auf Basis von Statistiken recherchiert und Anteile der Kraftwerkstypen (nach Brennstoffen), die Entwicklung der Nutzungsgrade sowie der Vorketten ermittelt.

Wie in früheren Berechnungen (IINAS 2012-2015) wurden dabei aktualisierte statistische Grundlagen verwendet (u.a. AGEB 2016; BAFA 2016; BMWi 2016a+b), die daraus resultierenden Stromerzeugungsmixe der letzten Jahre sowie die gegenüber IINAS (2015) **aktualisierten** Projektionen für 2020 und 2030 (Szenarien) zeigt die folgende Tabelle.

¹ Siehe dazu IINAS (2015) für die Werte des Jahres 2014 und davor.

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

Tabelle 1 Entwicklung der deutschen Brutto-Stromerzeugung 2010-2015 und Ausblick auf 2020 und 2030

Erzeugung [TWh]	Statistische Daten						Szenario-Daten	
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2020	2030
AKW	140,6	108,0	99,5	97,3	97,1	91,8	65,0	0,0
Braunkohle	145,9	150,1	160,7	160,9	155,8	155,0	130,0	105,0
Steinkohle	117,0	112,4	116,4	127,3	118,6	118,0	113,8	105,0
Erdgas	89,3	86,1	76,4	67,5	61,1	59,6	65,0	105,0
Öl	8,7	7,2	7,6	7,2	5,7	5,4	3,3	0,0
Wasserkraft	21,0	17,7	22,1	23,0	19,6	19,3	22,8	28,0
Windkraft onshore	37,6	48,3	49,9	50,8	55,9	79,3	107,3	140,0
Windkraft offshore	0,2	0,6	0,7	0,9	1,4	8,7	22,8	70,0
Solar-PV	11,7	19,6	26,4	31,0	36,1	38,4	52,0	70,0
Geothermie	0,03	0,02	0,03	0,08	0,10	0,13	0,7	1,4
Biomasse	29,6	32,8	39,7	41,2	43,3	44,2	44,9	61,6
Hausmüll*	4,7	4,8	5,0	5,4	6,07	5,8	9,8	10,5
andere**	20,4	19,7	19,9	20,4	21,2	20,3	22,8	3,5
Summe o. Pumpstrom	627	607	624	627	622	646	660	700

*= biogener Anteil; **= inkl. Gicht-/Kokereigas, nicht-biogener Hausmüll

Quelle: AGEB (2016) und BMWi (2016a+b) für 2010-2015; für 2020 und 2030: Nitsch (2016) sowie eigene Abschätzung von IINAS

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

Daher wurden die Daten aus Tabelle 1 auf Grundlage von Sekundärstatistiken³ auf die zur Definition der Stromerzeugung detaillierteren Zuordnungen zu Kraftwerkstypen in GEMIS umgerechnet.

³ Vgl. BAFA (2016) und SK (2016).

Ergänzend wurden **Projektionen zur Stromerzeugung** in 2020 und 2030 entwickelt, die absehbare Entwicklungen durch das EEG 2016 für Biomasse, Solar- und Windstrom einbeziehen sowie ab **2017 ein Steigen der CO₂-Zertifikatspreise** im EU-Emissionshandelssystem annehmen.

Dieser Logik folgend ist einerseits der Zuwachs bei Wind, PV und Biomasse gegenüber früheren Szenarien **gebremst**, andererseits verlieren Braun- und Steinkohle gegenüber 2010-2015 leicht Erzeugungsanteile zu Gunsten von Erdgas.

Diese Szenarien beruhen weiterhin **grundsätzlich** auf der BMU-Leitstudie (DLR, IWES, IfnE 2012), gegenüber der Darstellung in IINAS (2015) wurden allerdings einige Daten auf Basis von EC (2016) und Nitsch (2016) und eigenen Annahmen **geändert**: es wurde für 2020 und 2030 auf RE-Importe verzichtet und Erdgas- und RE-Anteile aktualisiert.

Dabei ist zu beachten, dass die mögliche Entwicklung von 2020 bis 2030 durch **starke Unsicherheiten** geprägt ist: Einerseits hat die Bundesregierung mit dem EEG 2016 die Ausbaukorridore für erneuerbare Energien **eingengt**, andererseits kann die sog. "Sektorkopplung" zu **erheblich höheren Strombedarfen** führen⁴ und ein möglicher "Kohleausstieg" bis 2040 erfordert **zusätzliche Ersatzkapazitäten** schon in 2030. Durch die Klimaschutz-Vorgaben (Paris, 2 °C-Ziel) ist die Dekarbonisierung des Stromsektors notwendig, was einerseits höhere Anteile an Erneuerbaren erfordert und andererseits höhere Effizienz auf der Nachfrageseite. Bei steigendem PtX-Einsatz kommen signifikante Umwandlungs- und Speicherverluste hinzu, die die Bruttostromerzeugung erhöhen.

Eine "Referenzentwicklung" bis 2030 ist daher durch **hohe Unsicherheiten** sowohl hinsichtlich des Kraftwerksmixes wie auch der Höhe der Stromnachfrage (und entsprechender Erzeugung) gekennzeichnet.

Daher gibt Abschnitt 4.2 eine Diskussion der „Robustheit“ der im Abschnitt 3 dargestellten Ergebnisse.

⁴ Unter den Stichworten „power-to-gas“ (PtG) und „power-to-liquids“ (PtL) wird zunehmend über die Nutzung von erneuerbarem „Überschussstrom“ zur Bereitstellung von erneuerbaren gasförmigen (PtG) und flüssigen (PtL) Energieträgern diskutiert (vgl. z.B. Sterner et al. 2016). Zur Sektorkopplung, bei der solche „power-to-anything“ (PtX)-Optionen im Wärmemarkt sowie im Verkehrssektor als nutzbar angesehen werden und die erheblich höhere Strombedarfe impliziert, siehe Quaschnig (2016).

3 Bilanzierung des KEV und der THG-Emissionen

Die recherchierten Daten wurden in das Computermodell GEMIS (Version 4.9) eingegeben und die Lebenswege der Stromerzeugung für die Jahre 2010-2014 sowie 2020 aktualisiert sowie für 2015 und 2030 neu bilanziert.

Die Ergebnisse für die **durchschnittliche kWh Strombereitstellung** aus dem lokalen Netz sowie aus dem **Kraftwerkspark** (d.h. ohne Netz- und Verteilungsverluste) zeigt folgende Tabelle.

Tabelle 2 KEV und THG-Emissionen von Strom in 2010-2015

Strom aus	kumulierter Energieverbrauch (KEV) in kWh _{primär} /kWh _{el}		THG-Emissionen in g/kWh _{el}	
	nichterneuerbar	gesamt	CO ₂ Äq	CO ₂
Stromnetz-lokal 2010	2,35	2,76	605	575
Stromnetz-lokal 2011	2,21	2,68	612	581
Stromnetz-lokal 2012	2,13	2,66	613	582
Stromnetz-lokal 2013	2,11	2,65	613	583
Stromnetz-lokal 2014	2,06	2,64	600	571
Stromnetz-lokal 2015	1,92	2,55	565	537
Strom Kraftwerkspark 2010	2,28	2,68	587	557
Strom Kraftwerkspark 2011	2,15	2,60	593	564
Strom Kraftwerkspark 2012	2,07	2,58	594	565
Strom Kraftwerkspark 2013	2,05	2,57	595	566
Strom Kraftwerkspark 2014	2,00	2,56	581	554
Strom Kraftwerkspark 2015	1,86	2,47	547	521

Quelle: eigene Berechnung mit GEMIS 4.9

Diese **aktualisierten** Daten für 2010 bis 2014 führen gegenüber den früher publizierten Ergebnissen (IINAS 2015) zu fast unveränderten KEV-Werten, auch bei den THG gibt es nur minimale Änderungen.

Die hier ermittelten **neuen** Werte für 2015 zeigen, dass sich die Tendenz zur Senkung von KEV- und THG-Werten **fortsetzt**.

4 Ergebnisdiskussion und Ausblick

4.1 Ergebnisdiskussion für 2010-2015

Gegenüber den Daten von 2010-2014 zeigt sich, dass die ermittelten Daten zum **nichtererneuerbaren KEV** (KEV_{NE}) von Strom aus dem bundesdeutschen **Kraftwerkspark** (erzeugerseitig) in 2015 mit $1,86 \text{ kWh}_{\text{primär}}/\text{kWh}_{\text{el}}$ deutlich niedriger sind als in den Jahren davor (vgl. Tabelle 2).

Für die Abgabe aus dem **lokalen Stromnetz** (verbraucherseitig) sind die Werte für den KEV_{NE} des Jahrs 2015 von $1,92 \text{ kWh}_{\text{primär}}/\text{kWh}_{\text{el}}$ gegenüber den Vorjahren ebenfalls gesunken.

Die geringeren Werte für 2015 gegenüber den Vorjahren ergeben sich durch steigende Anteile **erneuerbarer** Stromerzeugung, deren KEV_{NE} **erheblich unter** dem der fossilen und nuklearen Stromerzeugung liegt (vgl. Tabelle 4 in Kapitel 4.3), sowie den weiter gesunkenen Anteil an Strom aus AKW (vgl. Tabelle 1), der vergleichsweise hohe spezifische KEV_{NE} -Werte aufweist.

Bei den THG-Emissionen ergibt sich ein ähnliches Bild: Seit 2014 sinken die Emissionen und liegen in 2015 unter dem Niveau von 2010 (siehe Tabelle 2).

4.2 Ausblick auf 2020 und 2030

Nach 2015 wird sich die Umstrukturierung des deutschen Kraftwerksparks in Richtung höherer Anteile erneuerbarer Energien fortsetzen, so dass auch **künftig** von **weiter sinkenden** nichterneuerbaren KEV-Werten der Strombereitstellung auszugehen ist.

Die Ergebnisse der aktualisierten Szenarien für 2020 und 2030 zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 3 KEV und THG-Emissionen von Strom für 2020 und 2030

Strom aus	kumulierter Energieverbrauch (KEV) in $\text{kWh}_{\text{primär}}/\text{kWh}_{\text{el}}$		THG-Emissionen in $\text{g}/\text{kWh}_{\text{el}}$	
	nichtererneuerbar	gesamt	$\text{CO}_2\text{Äq}$	CO_2
Stromnetz-lokal 2020	1,60	2,28	484	460
Stromnetz-lokal 2030	1,07	1,96	386	365
Strom Kraftwerkspark 2020	1,55	2,22	469	446
Strom Kraftwerkspark 2030	1,04	1,90	374	354

Quelle: eigene Berechnung mit GEMIS 4.9

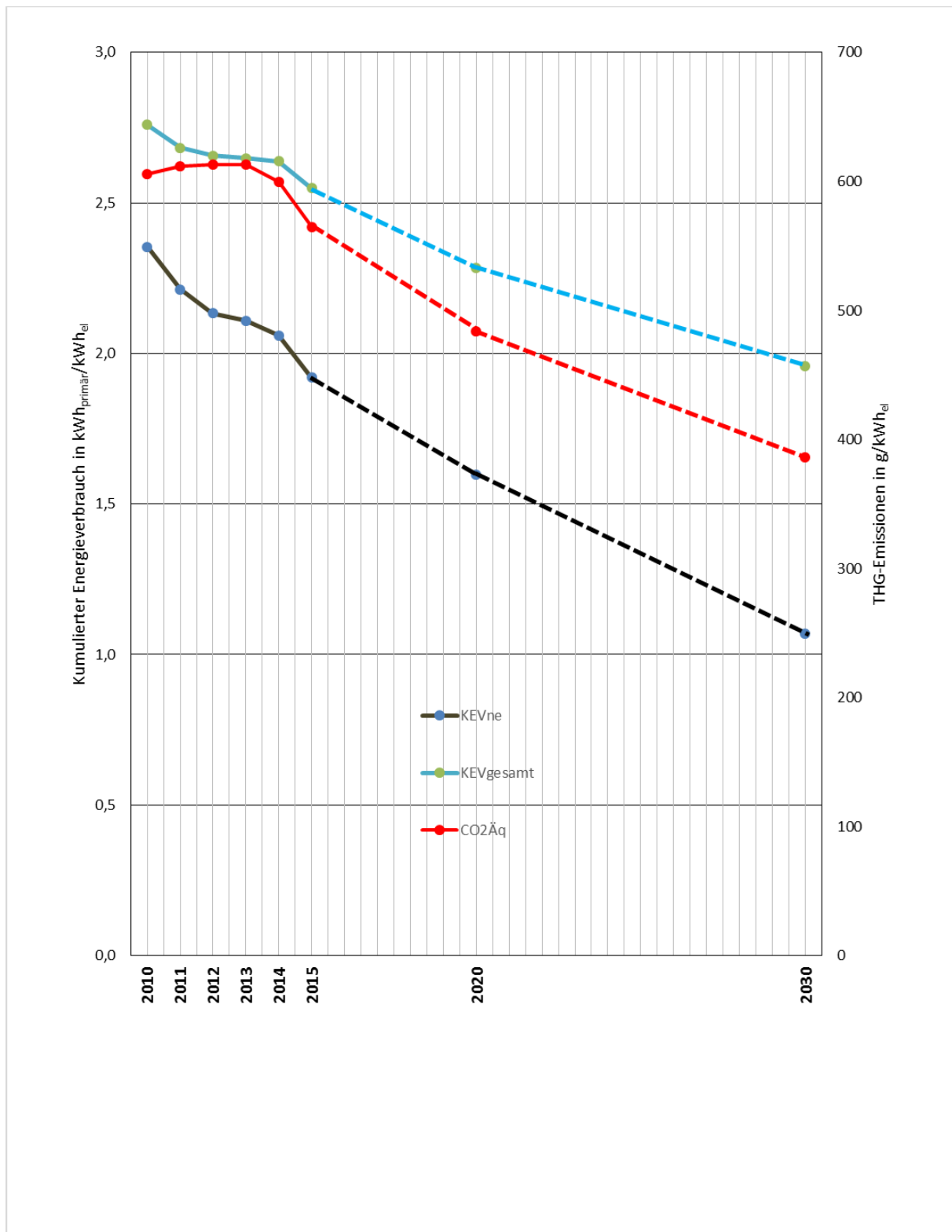
Auf Basis des Szenarios für das **Jahr 2020** ergeben sich erzeugungsseitig ein KEV_{NE} von $1,57 \text{ kWh}_{\text{primär}}/\text{kWh}_{\text{el}}$ und $469 \text{ g CO}_2\text{Äq}/\text{kWh}_{\text{el}}$ bzw. verbraucherseitig $1,60 \text{ kWh}_{\text{primär}}/\text{kWh}_{\text{el}}$ sowie $484 \text{ g CO}_2\text{Äq}/\text{kWh}_{\text{el}}$.

Erzeugerseitig ergibt sich **für 2030** ein KEV_{NE} von $1,04 \text{ kWh}_{\text{primär}}/\text{kWh}_{\text{el}}$ und THG-Emissionen von $374 \text{ g CO}_2\text{Äq}/\text{kWh}_{\text{el}}$. Verbraucherseitig ergeben sich ein KEV_{NE} von $1,07 \text{ kWh}_{\text{primär}}/\text{kWh}_{\text{el}}$ und $386 \text{ g CO}_2\text{Äq}/\text{kWh}_{\text{el}}$.

Die hier **für 2020 ermittelten** Werte liegen **minimal höher** als in der früheren Projektion (IINAS 2015), da nun ein deutlich geringerer Erdgasanteil angesetzt wurde, was aufgrund der aktuellen energiewirtschaftlichen Dynamik gerechtfertigt ist.

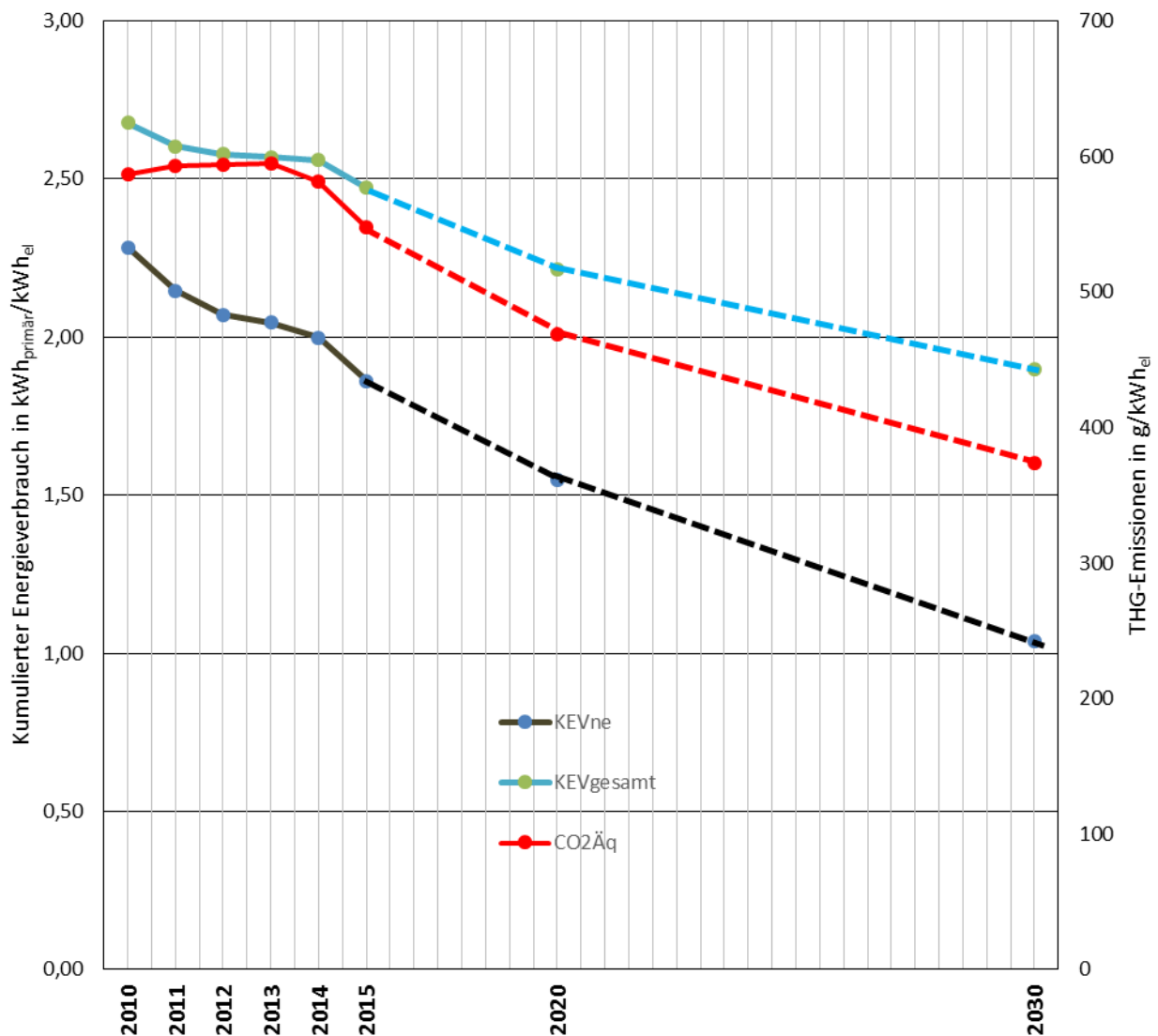
Den aktualisierten Gesamtverlauf von 2010-2015 (nach Statistik) sowie 2020 und 2030 (Szenarien) zeigen die folgenden Abbildungen.

Bild 1 KEV und THG-Emissionen von Strom bei Abgabe aus dem lokalen Netz für 2010-2015 (nach Statistik) sowie 2020 und 2030 (Szenarien)



Quelle: eigene Berechnung mit GEMIS 4.9; gestrichelte Linien = interpolierte Werte

Bild 2 KEV und THG-Emissionen von Strom bei Abgabe aus dem Kraftwerkspark (ohne Netz- und Verteilverluste) für 2010-2015 (nach Statistik) sowie 2020 und 2030 (Szenarien)



Quelle: eigene Berechnung mit GEMIS 4.9; gestrichelte Linien = interpolierte Werte

Der Gesamttrend zu geringeren KEV-Werten seit 2010 ist deutlich sichtbar und wird sich in den Szenario-Jahren 2020 und 2030 fortsetzen.

Bei den THG-Emissionen wurde der von 2010-2012 erfolgte Anstieg im Jahr 2013 gestoppt, ab 2014 und 2015 sanken die Emissionen. In den Szenario-Jahren 2020 und 2030 werden die THG-Emissionen weiter sinken und sowohl erzeuger- wie auch verbraucherseitig Werte deutlich unter 500 g CO₂Äq/kWh_{el} (2020) bzw. weit unter 400 g CO₂Äq/kWh_{el} (2030) erreichen.

4.3 Sensitivität der Ergebnisse

Die o.g. Ergebnisse sind abhängig vom gewählten Kraftwerkspark – die Projektionen zu 2020 und 2030 sind Szenarien, für die nicht nur die Wahl der erneuerbaren Stromerzeugungsanteile relevant ist, sondern auch die Anteile von Braun- und Steinkohle sowie Erdgas. Dies gilt insbesondere für die THG-Emissionen, während der KEV_{NE} bei den fossilen Kraftwerken in einem **relativ engen Fenster** von 1,9 (Erdgas) bis 2,3 (Braunkohle) kWh_{primär}/kWh_{el} liegt, wie folgende Tabelle für Stromerzeugungsoptionen in Deutschland in 2020 zeigt.

Tabelle 4 KEV und THG-Emissionen von Stromerzeugungsoptionen in 2020

Werte für 2020	kumulierter Energieverbrauch (KEV) in kWh _{primär} /kWh _{el}		THG-Emissionen in g/kWh _{el}	
	nichtererneuerbar	gesamt	CO ₂ Äq	CO ₂
Stromnetz-lokal	1,60	2,28	484	460
Strom-Kraftwerkspark	1,55	2,22	469	446
Steinkohle-Kraftwerk (heimisch)	2,22	2,22	839	748
Steinkohle-Kraftwerk (Import)	2,16	2,17	785	742
Braunkohle-Kraftwerk	2,29	2,29	962	954
Erdgas-GuD-Kraftwerk	1,86	1,86	390	366
Erdgas-GuD-HKW 100 MW	1,77	1,77	373	349
Atomkraftwerk (AKW)	3,27	3,29	55	53
Wind Park onshore	0,03	1,03	10	9
Wind Park offshore	0,02	1,02	5	5
Solar-PV (polykristallin)	0,08	1,10	28	25
Geothermie (ORC)	0,25	1,35	78	74
Biogas-Gülle-BHKW	0,10	2,64	45	31
Biogas-Mais-BHKW	0,22	2,76	181	58

Quelle: eigene Berechnung mit GEMIS 4.9

Der KEV_{NE} von Atomstrom **dominiert** mit fast 3,3 kWh_{primär}/kWh_{el}, während Erneuerbare um mehr als **eine Größenordnung niedrigere** Werte aufweisen.

Für die Entwicklung des KEV_{NE} des Stromerzeugungsmixes sind daher weniger die Anteile von Kohle und Gas ergebnisrelevant als vielmehr die von AKW (erhöhender Effekt) und Erneuerbaren (senkender Effekt). Die AKW-Anteile sind aufgrund des gesetzlich geregelten Ausstiegs gut ableitbar und die Erzeugung durch Erneuerbare ist zumindest tendenziell ansteigend. Die 2020-Daten für den KEV_{NE} des **Strommixes** sind daher **als robust** anzusehen.

Bei den THG-Emissionen sind dagegen alle Erzeugungsanteile ergebnisrelevant.

Literatur

- AGEB (2016): Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2015. Berlin http://www.ag-energie-bilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_jahresbericht2015_20160317_final.pdf
- BAFA (2016): Entwicklung der Erdgaseinfuhr in die Bundesrepublik Deutschland Bilanzen 1960-2015. Eschborn http://www.bafa.de/bafa/de/energie/erdgas/ausgewaehlte_statistiken/egashist_xls.xls
- BMWi (2016a): Energiedaten - Nationale und Internationale Entwicklung. Berlin <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/Binaer/energie-daten-gesamt,property=blog,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.xls>
- BMWi (2016b): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. Berlin <http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2015-excel.xlsx?blob=publicationFile&v=6>
- DLR, IWES & IfnE (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Nitsch, Joachim et al. i.A. des BMU. Stuttgart, Kassel, Teltow http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2011_bf.pdf
- Ecofys (2014): Primary Energy Demand of Renewable Energy Carriers Part 2 Policy Implications. Surmeli-Anac N et al. Commissioned by the European Copper Institute. Utrecht http://www.leonardo-energy.org/sites/leonardo-energy/files/documents-and-links/ecofys_buide14268_pef_20140509_final.pdf
- EN ISO 14041: Umweltmanagement Ökobilanz - Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz, Deutsche Fassung prEN ISO 14041:1997
- EC (2016) EU Reference Scenario 2016. Brussels https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/REF2016_report_FINAL-web.pdf
- 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](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
- IINAS (2012): Der nichterneuerbare Primärenergieverbrauch des nationalen Strommix in Deutschland im Jahr 2011. Fritsche, Uwe R. & Greß, Hans-Werner. Kurzstudie für die Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendungen e.V. (HEA). Darmstadt [http://www.iinas.org/tl_files/iinas/downloads/GEMIS/IINAS_2012_KEV-Strom-2011_\(HEA\).pdf](http://www.iinas.org/tl_files/iinas/downloads/GEMIS/IINAS_2012_KEV-Strom-2011_(HEA).pdf)
- IINAS (2013): Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch des deutschen Strommix im Jahr 2012. Fritsche, Uwe R. & Greß, Hans-Werner. Kurzstudie für die Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendungen e.V. (HEA). Darmstadt http://www.iinas.org/tl_files/iinas/downloads/GEMIS/IINAS_2013_KEV-Strom-2012_HEA.pdf
- IINAS (2014): Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch des deutschen Strommix im Jahr 2013. Fritsche, Uwe R. & Greß, Hans-Werner. Kurzstudie für die Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendungen e.V. (HEA). Darmstadt http://www.iinas.org/tl_files/iinas/downloads/GEMIS/IINAS_2014_KEV-Strom-2013_HEA.pdf
- IINAS (2015): Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch und THG-Emissionen des deutschen Strommix im Jahr 2014 sowie Ausblicke auf 2015 und 2020. Fritsche, Uwe R. & Greß, Hans-Werner. Kurzstudie für die Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendungen e.V. (HEA). Darmstadt http://www.iinas.org/tl_files/iinas/downloads/GEMIS/IINAS_2015_KEV-Strom-2014_HEA.pdf
- IINAS (2015b): Development of the Primary Energy Factor of Electricity Generation in the EU-28 from 2010-2013. Fritsche, Uwe R. & Gress, Hans-Werner. Prepared for EHPA. Darmstadt http://www.iinas.org/tl_files/iinas/downloads/GEMIS/2015_PEF_EU-28_Electricity_2010-2013.pdf
- Itten, R & Frischknecht, Rolf (2014): Primärenergiefaktoren von Energiesystemen, v2.2+ Stand 2014. im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) und der Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren (KBOB). Uster http://treeze.ch/fileadmin/user_upload/downloads/Publications/Case_Studies/Energy/itten-2014-PEF-Energiesysteme-v2.2plus.pdf
- Kirchner, Almut et al. (2016): Black Swans (Risiken) in der Energiewende - Risikomanagement für die Energiewende. Studie von Prognos, EWI und GWS i.A. des BMWi. Basel <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/Studien/black-swans-risiken-in-der-energiewende,property=pdf,be-reich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>
- Kirchner, Almut et al. (2016): Black Swans (Risiken) in der Energiewende - Risikomanagement für die Energiewende. Studie von Prognos, EWI und GWS i.A. des BMWi. Basel <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/Studien/black-swans-risiken-in-der-energiewende,property=pdf,be-reich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>

- Nitsch, Joachim (2016): Die Energiewende nach COP 21 – Aktuelle Szenarien der deutschen Energieversorgung. Kurzstudie für den BEE. Stuttgart [http://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Studien/Joachim Nitsch Energiewende nach COP21.pdf](http://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Studien/Joachim_Nitsch_Energiewende_nach_COP21.pdf)
- PE (2014): Primary Energy Demand of Renewable Energy Carriers Part 1: Definitions, accounting methods and their applications with a focus on electricity and heat from renewable energies. Stoffregen, A & Schuller, O. Commissioned by the European Copper Institute. Leinfelden – Echterdingen [http://www.leonardo-energy.org/sites/leonardo-energy/files/documents-and-links/pe primary energy demand of renewable energy carriers 20140527.pdf](http://www.leonardo-energy.org/sites/leonardo-energy/files/documents-and-links/pe_primary_energy_demand_of_renewable_energy_carriers_20140527.pdf)
- Quaschnig, Volker (2016): Sektorkopplung durch die Energiewende. Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zum Erreichen der Pariser Klimaschutzziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung. Hochschule für Technik und Wirtschaft. Berlin <http://www.volker-quaschnig.de/publis/studien/sectorkopplung/Sektorkopplungsstudie.pdf>
- Sterner, Michael et al. (2016): Bedeutung und Notwendigkeit von Windgas für die Energiewende in Deutschland. Forschungsstelle Energienetze und Energiespeicher (FENES) OTH Regensburg & Energy Brainpool. Studie im Auftrag von Greenpeace Energy. Regensburg, Hamburg, Berlin [http://www.greenpeace-energy.de/fileadmin/docs/pressematerial/Windgas-Studie 2015 FENES GPE lang.pdf](http://www.greenpeace-energy.de/fileadmin/docs/pressematerial/Windgas-Studie_2015_FENES_GPE_lang.pdf)
- SK (2016): Zur Lage des Kohlenbergbaus in der Bundesrepublik Deutschland – Jahr 2015. Herne, Köln http://www.kohlenstatistik.de/files/lb_statistik_2015.pdf
- VDI (1997): VDI Richtlinie 4600 - Kumulierter Energieaufwand - Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden. Düsseldorf

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** aus⁵. 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 bei für Energiesysteme typischen Lebensdauern von 15-30 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 rezykliert 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, da Deutschland einen signifikanten Stromexport-Überschuss aufweist, der auch bis 2020 – wenn auch reduziert – andauern wird.

⁵ 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.

Diese Vereinfachung führt eingedenk der bekannten Lastflüsse (Importe von Wasserkraftstrom aus Österreich und der Schweiz, Kohlestrom aus Polen und der 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 werden – siehe z.B. die entsprechenden Daten in IINAS (2015b) – 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 anzusehen⁶.

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 Umspannverlusten).

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.

⁶ Beim KEV wäre diese Bilanz durchaus sinnvoll, jedoch nicht bei den THG-Emissionen, da hier das EU-Emissionshandels-system erlaubt, im Ausland „vermiedene“ Emissionen im Rahmen der Verpflichtungsperiode durch Emissionen an anderer Stelle zu kompensieren. Das **territorial** orientierte Konzept der THG-Bilanzierung 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 das nationale 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**⁷.

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 u.a. 1999 + 2003)⁸. 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).

⁷ Siehe A-6 für eine kurze Diskussion der Frage, welche Bilanzen für den Stromverbrauch einzelner Verbrauchergruppen (z.B. Haushalte) erstellt werden können.

⁸ 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 eine Kompatibilität mit den 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 (vgl. Ecofys 2014; Fritsche & Rausch 2009 + 2011; Itten & Frischknecht 2014; PE 2014) 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 u.a. 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_{RE} -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_{Summe} 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.