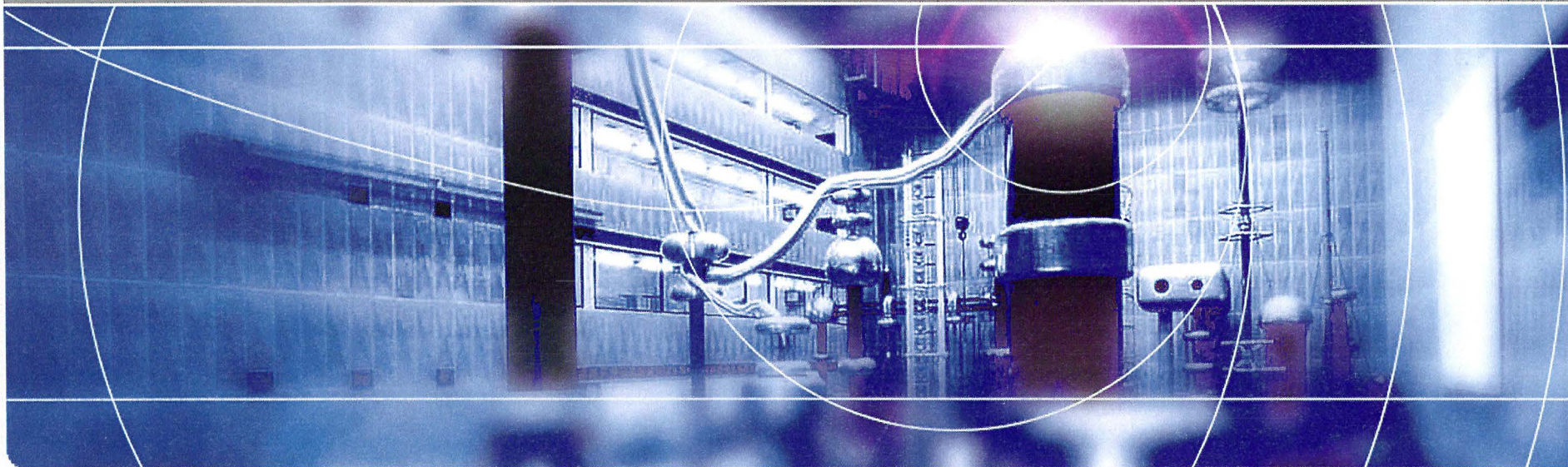


Erzeugung elektrischer Energie

Dr.-Ing. Bernd Hoferer

INSTITUT FÜR ELEKTROENERGIESYSTEME UND HOCHSPANNUNGSTECHNIK (IEH)



Grundlagen

Voraussetzung für Wohlstand einer Nation:

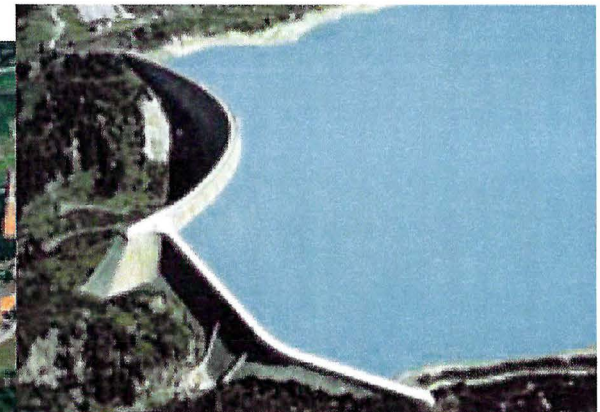
Rohstoffe

Produktion

Voraussetzung für Produktion:

**hochzuverlässige Verfügbarkeit elektrischer
Energie**

Elektrische Energie ist höchstwertige Energieform. Sie ist reine Exergie und kann daher mit nur geringen Verlusten in praktisch alle anderen Nutzenergieformen umgewandelt werden.



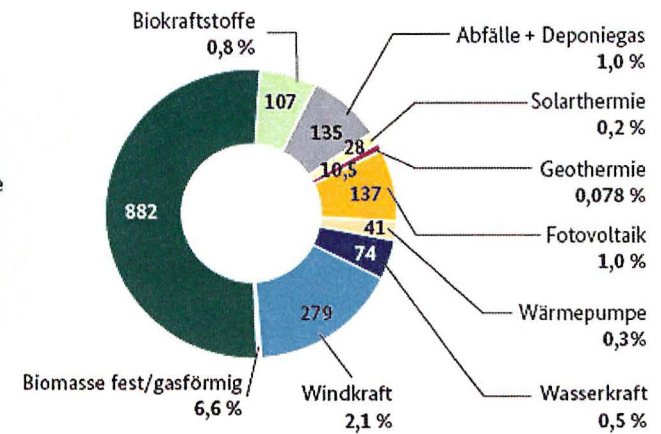
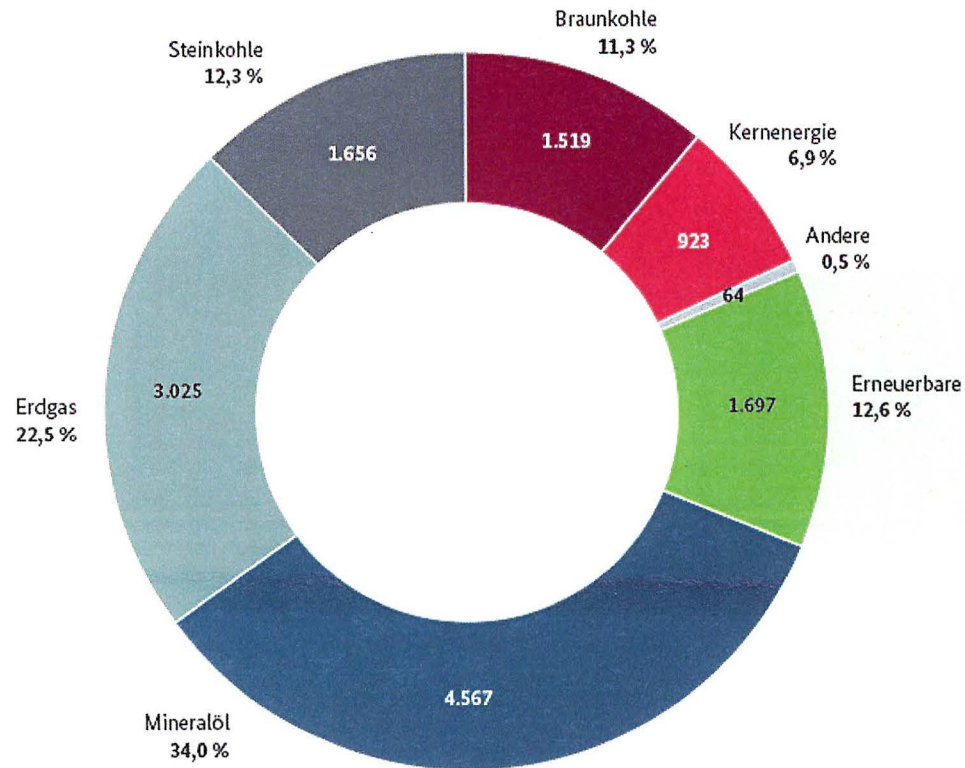
Grundlagen

Die üblicherweise verwendete Metrik für den Lebensstandard einer Volkswirtschaft ist das Bruttoinlandsprodukt.

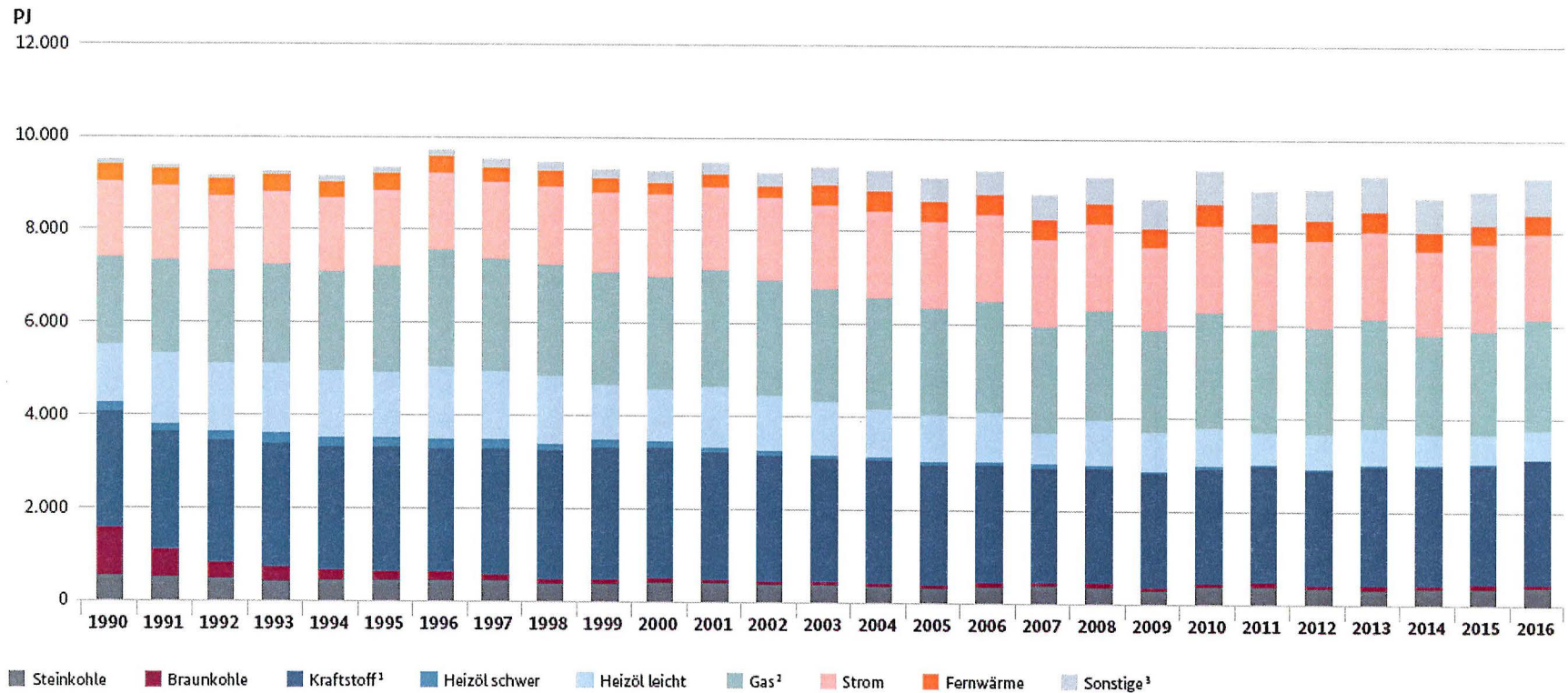
Seit den Anfängen der Erzeugung elektrischer Energie durch Maschinen haben sich Erzeugung und Verbrauch über fast ein Jahrhundert etwa alle 10 Jahre verdoppelt, was ca. 7 %/a entspricht.

Diese Zuwachsrate diente bis zum Ölpreisschock Anfang der 70er Jahre als Planungsgrundlage für den Ausbau von Elektroenergiesystemen.

Nach diesem Schock sind die Wachstumsraten zurückgegangen. In Deutschland wird nun mit einem jährlichen Wachstum von etwa 1 % gerechnet, global betrachtet mit einer Verdoppelung von 1990 bis 2020.



Primärenergieverbrauch in Deutschland 2016 (13.451 PJ)



Endenergieverbrauch in Deutschland

Grundlagen

Primärenergieverbrauch weltweit:

Heutiger Verbrauch: 15 Mrd. t SKE/a

Zukünftiger Verbrauch: 20 – 50 Mrd. t SKE/a

Energieverbrauch geprägt durch

Bevölkerungswachstum

Pro-Kopf-Verbrauch

6 t SKE/a in Industrieländern

0,6 t SKE/a in Entwicklungsländern

Aber durch Bevölkerungswachstum steigt absoluter Energiebedarf

Preisproblematik

Umweltproblematik

Primärenergieressourcen

Die Deckung unseres Energiebedarfs erfolgt durch Umwandlung der von den Ressourcen unseres Planeten bereitgestellten Primärenergie. Unter Ressourcen versteht man allgemein den natürlichen Reichtum eines Landes, unter Energieressourcen speziell die Gesamtheit aller auf der Erde verfügbaren Primärenergieträger, unabhängig davon, ob und in welchem Umfang sie mit heute absehbaren technischen und finanziellen Mitteln genutzt werden können. Ressourcen mit begrenztem Energieinhalt nennt man erschöpflich, Ressourcen, denen sich über einen für die Menschheit relevanten Zeitraum unbegrenzt Energie entnehmen läßt, nennt man unerschöpflich.

Erschöpfliche Primärenergieträger: Kohle, Erdöl, Erdgas, Uran etc.

Unerschöpfliche Primärenergieträger: Wasser, Sonne, Wind, Gezeiten

Primärenergieressourcen

Bei ersteren lässt sich der Energieinhalt zahlenmäßig in Joule angeben, man spricht synonym auch von Energievorräten. Häufig werden Vorräte auch als vielfaches einer sogenannten Steinkohleeinheit (SKE) angegeben:

$$1 \text{ t SKE} = 29,3 \cdot 10^9 \text{ Joule} = 8,14 \cdot 10^3 \text{ kWh}$$

	kJ	kwh	kcal	Kg SKE
1 kJ	1	$2,778 \cdot 10^{-4}$	0,2389	$3,412 \cdot 10^{-5}$
1 kWh	$3,6000 \cdot 10^3$	1	$8,5985 \cdot 10^2$	0,1228
1 kWa	$3,1536 \cdot 10^7$	8760	$7,5323 \cdot 10^6$	$1,0760 \cdot 10^3$
1 kcal	4,1868	$1,163 \cdot 10^{-3}$	1	$1,4286 \cdot 10^{-4}$
1 kg SKE	$29,308 \cdot 10^3$	8,141	7000,2	1
1 Btu	1,0551	$2,9308 \cdot 10^{-4}$	0,2520	$3,5999 \cdot 10^{-5}$
1 Toe	$4,187 \cdot 10^7$	$1,1631 \cdot 10^4$	$1,0000 \cdot 10^7$	$1,4286 \cdot 10^3$
1 Tce	$2,4722 \cdot 10^7$	$6,8690 \cdot 10^3$	$5,9063 \cdot 10^6$	$8,4374 \cdot 10^2$

Primärenergieressourcen

Unterer Heizwert H_U :

Maximale Energie in kJ, die aus 1kg Brennstoff gewonnen werden kann.

Heizwerte verschiedener Energieträger:

Energieträger:	Heizwert in kJ:
Braunkohle	8347
Steinkohle	29719
Erdöl	42622
Flüssiggas	45887
Uran	$8,64 \cdot 10^{10}$

Primärenergieressourcen

Abhängig von ihrer Verfügbarkeit kann man Ressourcen in nutzbare und nicht nutzbare Ressourcen einteilen. Nutzbare erschöpfliche Ressourcen werden auch als Reserven, nutzbare unerschöpfliche Ressourcen auch als Energiepotentiale bezeichnet. Nur ein Bruchteil der Ressourcen - Reserven und Energiepotentiale - erlaubt die Extraktion von Primärenergie mit vertretbarem technischen und finanziellen Aufwand. Der Rest ist entweder mit den heute absehbaren technischen Möglichkeiten nicht nutzbar oder die Gewinnungskosten liegen heute über den marktüblichen Preisen für andere Primärenergieträger. Die Grenze ist jedoch fließend und kann den nutzbaren Bereich für einzelne Primärenergieträger durch technische Innovationen und Preisänderungen am Markt dramatisch erhöhen.

Primärenergieressourcen – Erschöpfliche Ressourcen

Steinkohle ist der Energierohstoff mit den weltweit größten Lagerstättenpotentialen und Vorratsmengen, die noch für viele Jahrhunderte die Versorgung sicherstellen können. Angesichts der sich heute abzeichnenden Verknappung von Erdöl und des zunehmenden Energiebedarfs von Schwellenländern wie China und Indien ist davon auszugehen, dass die Bedeutung der Steinkohle als Energierohstoff zunehmen wird.

1.	Reserven, weltweit:	785 Mrd. t
	Ressourcen, weltweit:	4.060 Mrd.t
2.	Produktion pro Jahr, weltweit:	4.629 Mio. t
	Verbrauch pro Jahr, weltweit:	4.646 Mio. t
3.	Reichweite weltweit bei statischer Betrachtung	
	Reserven:	169 Jahre
	Ressourcen:	874 Jahre
4.	Preisentwicklung für Kraftwerksteinkohle 2000-2016:	
	75 % Zunahme von rd. 42 €/t SKE auf rd. 74 €/t SKE	

Primärenergieressourcen – Erschöpfliche Ressourcen

Braunkohle ist ebenso wie die Steinkohle für viele Jahrhunderte verfügbar. Für Deutschland ist sie ein wichtiger heimischer Energierohstoff. Der Einsatz der Braunkohle ist auf die Stromerzeugung vor Ort der bergbaulichen Gewinnung begrenzt.

- | | | |
|----|--|-------------|
| 1. | Reserven, weltweit: | 204 Mrd. t |
| | Ressourcen, weltweit: | 923 Mrd. t |
| 2. | Produktion pro Jahr, weltweit: | 898 Mio. t |
| | Verbrauch pro Jahr, weltweit: | 898 Mio. t |
| 3. | Reichweite weltweit bei statischer Betrachtung | |
| | Reserven: | 227 Jahre |
| | Ressourcen: | 1.028 Jahre |
| 4. | Preisentwicklung 2000-2016: | |
| | keine Angabe möglich, da Braunkohle international nicht gehandelt wird | |

Primärenergieressourcen – Erschöpfliche Ressourcen

Erdöl kann voraussichtlich nur noch über wenige Jahrzehnte den weiterhin steigenden weltweiten Bedarf vollständig decken. Wann das weltweite Maximum der Rohölförderung überschritten sein wird, ist in Expertenkreisen umstritten, da die weitere Entwicklung von zahlreichen Unwägbarkeiten bestimmt sein wird.

1.	Reserven, weltweit (konventionell):	160 Mrd. t
	- Schwerstöl, Ölsande, Ölschiefer	66 Mrd. t
	Ressourcen, weltweit (konventionell):	82 Mrd. t
	- Schwerstöl, Ölsande, Ölschiefer	250 Mrd. t
2.	Produktion pro Jahr, weltweit (konventionell):	3847 Mio. t
	Verbrauch pro Jahr, weltweit:	3789 Mio. t
3.	Reichweite weltweit bei statischer Betrachtung	
	Reserven (konventionell):	42 Jahre
	- Schwerstöl, Ölsande, Ölschiefer	17 Jahre
	Ressourcen (konventionell):	21 Jahre
	- Schwerstöl, Ölsande, Ölschiefer	66 Jahre
4.	Preisentwicklung 2000-2017:	
	Zunahme um 83 % von rd. 29 \$/bbl auf rd. 53 \$/bbl	

Primärenergieressourcen – Erschöpfliche Ressourcen

Erdgas wird noch viele Jahrzehnte als Energierohstoff zur Verfügung stehen. Durch die Notwendigkeit des Pipeline-Transports bleibt in der mittelbaren Zukunft eine enge Bindung der Verbraucherländer an wenige Hauptlieferländer bestehen.

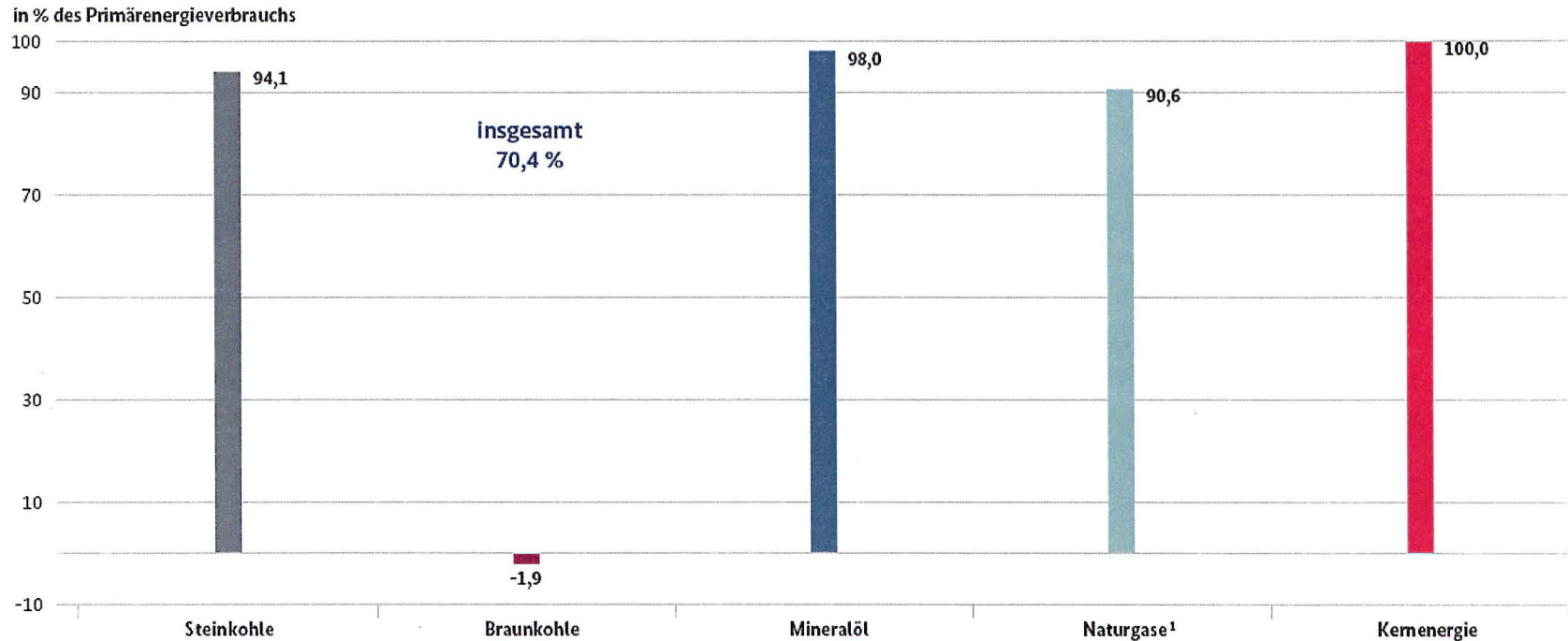
1.	Reserven, weltweit:	176.000 Mrd. m ³
	Ressourcen, weltweit:	207.000 Mrd. m ³
2.	Produktion pro Jahr, weltweit:	2794 Mrd. m ³
	Verbrauch pro Jahr, weltweit:	2790 Mrd. m ³
3.	Reichweite weltweit bei statischer Betrachtung	
	Reserven:	63 Jahre
	Ressourcen:	74 Jahre
4.	Preisentwicklung 2000-2016:	
	55 % Zunahme von rd. 1,1 ct/kWh auf rd. 1,7 ct/kWh	

Primärenergieressourcen – Erschöpfliche Ressourcen

Uran steht als Energierohstoff noch für Jahrhunderte zur Verfügung, insbesondere in Verbindung mit technologischen Weiterentwicklungen bei der friedlichen Kernenergienutzung. Uran wird derzeit überwiegend aus politisch stabilen Ländern importiert.

- | | | |
|----|--|------------|
| 1. | Reserven, weltweit: | 4,74 Mio t |
| | Ressourcen, weltweit: | 10 Mio t |
| 2. | Produktion pro Jahr, weltweit: | 55.000 t |
| | Verbrauch pro Jahr, weltweit: | 70.000 t |
| 3. | Reichweite weltweit bei statischer Betrachtung | |
| | Reserven: | 68 Jahre |
| | Ressourcen: | 143 Jahre |
| 4. | Preisentwicklung 2000-2017: | |
| | 120 % Zunahme von rd. 9 \$ / lb U_3O_8 auf rd. 20 \$ / lb U_3O_8 | |

Primärenergieressourcen – Erschöpfliche Ressourcen



Heimische Energiegewinnung und Importabhängigkeit

Primärenergieressourcen – Unerschöpfliche Ressourcen

Unterschiedliches Potential zur Steigerung regenerativer Energien:

Wasserkraft: - Begrenztes Potential durch hohen Ausbaugrad

- Verschiedene Darbietungsrhythmen

Windkraftanlagen: - Niedriger Ausbaugrad

- Schwankung in der Darbietung

- Ort der Erzeugung weit entfernt von Verbrauchszentren

Solarenergie: - Schwankung in der Darbietung

- Antizyklisch im Verhältnis zum Verbrauch

Primärenergie steht kostenlos zur Verfügung und ist unerschöpflich, allerdings erfordert das nichtdeterministische Anfallen der Primärenergie den Zubau zusätzlicher Reserveleistung in Form konventioneller Kraftwerke.

Erzeugung und Verbrauch elektrischer Energie

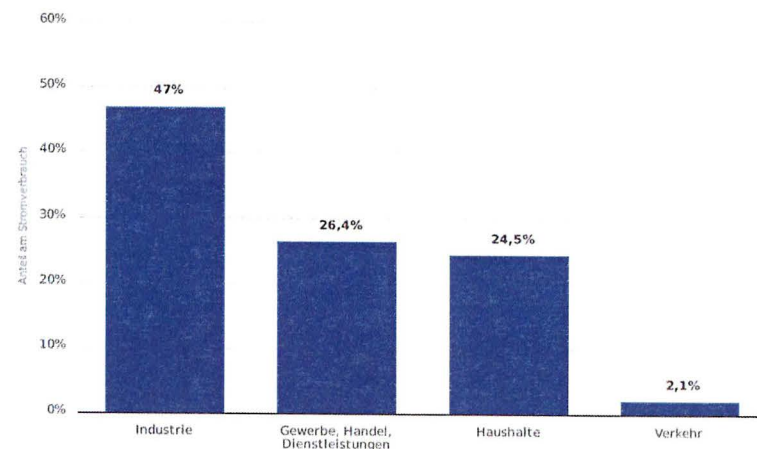
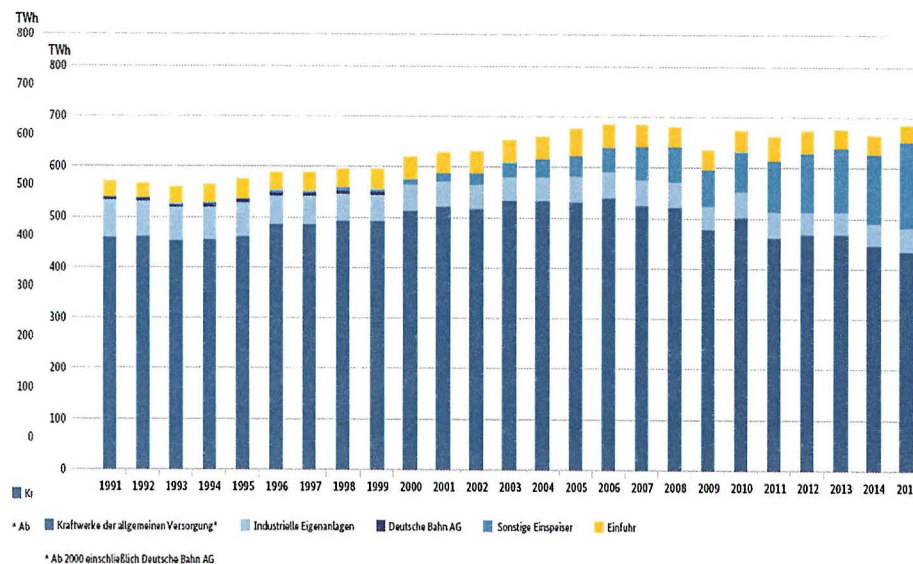
Etwa 30 % des Primärenergieverbrauchs in Deutschland wird in elektrische Energie umgewandelt, die ihrerseits etwa 20 % des Endenergieverbrauchs ausmacht. Elektrische Energie ist unverzichtbar, da sie vielseitig einsetzbar ist und außerdem die Verwertung anderer Primärenergien, z.B. Kernenergie, Braunkohle, Müll etc. technisch und wirtschaftlich erst möglich macht.

Der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung in Deutschland ist mit einem Anteil von ca. 29 %, Steinkohle liegt bei etwa 17 %, Braunkohle hat einen Anteil von ungefähr 23 % und Kernenergie liegt bei ca. 13 %.

Erzeugung und Verbrauch elektrischer Energie

65 % der in Deutschland verbrauchten elektrischen Energie wird von Großkraftwerken der vier Verbundunternehmen EnBW, E.ON, RWE und Vattenfall geliefert. Ferner gibt es noch industrielle Eigenanlagen (Großindustrie), die vorrangig der Eigenbedarfsdeckung und der wirtschaftlichen Erzeugung von Prozeßwärme dienen, mit etwaigen freien Kapazitäten aber auch ins öffentliche Netz einspeisen (etwa 10 % des gesamten öffentlichen Stromaufkommens). Die verbleibenden 25 % werden von privaten Betreibern erzeugt.

Erzeugung und Verbrauch elektrischer Energie



Zusammensetzung der Erzeugung und des Verbrauchs elektrischer Energie in Deutschland

Erzeugung und Verbrauch elektrischer Energie

Bei den Verbrauchern gibt es drei maßgebliche Gruppen, einerseits die privaten Haushalte und andererseits die Industrie , sowie Gewerbe und Sondervertragskunden. Betrachtet man den Gesamt- bzw. Endenergieverbrauch, das heißt die Summe aus Primär- und Sekundärenergieverbrauch der verschiedenen Verbrauchergruppen, liegen die Privathaushalte mit über 30 % an erster Stelle. Ihr Endenergieverbrauch setzt sich zusammen aus

54 % Heizung

31 % Auto

8 % Warmwasser

5 % Hausgeräte

1 % Beleuchtung

1 % Informationstechnik

Erzeugung und Verbrauch elektrischer Energie

in TWh

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
AUFKOMMEN																									
Kraftwerke der allgemeinen Versorgung 1)	459,1	460,9	452,7	455,5	461,4	485,6	486,8	493,0	494,4	512,9	523,0	518,4	532,8	533,1	531,8	539,9	523,8	523,1	478,6	501,3	462,1	469,3	468,1	445,5	434,4
Industrielle Eigenanlagen	74,2	70,0	66,7	65,1	66,8	57,7	55,5	53,5	50,2	51,2	48,1	47,0	48,2	48,3	50,1	51,1	53,2	49,4	46,0	53,0	50,6	44,1	44,9	45,4	50,2
Deutsche Bahn AG	6,1	6,2	6,3	6,2	6,6	7,0	7,5	6,9	6,8																
Sonstige Einspeiser	0,8	1,1	1,3	1,7	1,9	2,4	2,6	3,8	4,8	12,5	15,3	21,3	27,9	36,2	40,6	48,6	63,6	68,2	71,0	78,1	99,4	115,2	124,6	135,7	162,3
Inlandserzeugung insgesamt (brutto)	540,2	538,2	527,0	528,5	536,8	552,7	552,3	557,2	556,2	576,6	586,4	586,7	608,8	617,5	622,6	639,6	640,6	640,7	595,6	632,4	612,1	628,6	637,7	626,7	646,9
davon aus:																									
Wasser	19,5	22,4	23,6	25,1	27,0	24,3	23,5	24,2	24,7	29,4	27,8	28,4	22,9	26,5	26,4	26,8	28,1	26,5	24,7	27,4	23,5	27,9	28,8	25,4	24,9
Wärme	372,4	355,8	348,4	350,0	352,8	363,3	363,9	365,0	354,0	365,5	372,6	372,0	394,1	388,5	391,9	395,8	407,1	395,0	362,4	383,7	377,9	383,6	386,1	365,4	364,8
Kernenergie	147,4	158,8	153,5	151,2	154,1	161,6	170,3	161,6	170,0	169,6	171,3	164,8	165,1	167,1	163,0	167,4	140,5	148,8	134,9	140,6	108,0	99,5	97,3	97,1	91,8
Erneuerbare (Wind, Biomasse, PV)	1,0	1,2	1,6	2,2	2,9	3,5	4,6	6,4	7,6	12,1	14,8	21,5	26,7	35,4	41,2	49,7	64,9	70,5	73,6	80,8	102,7	117,7	125,5	138,7	165,4
Einfuhr	30,4	28,4	33,6	35,9	39,7	37,4	38,0	38,3	40,6	45,1	43,5	46,2	45,8	44,2	53,4	46,1	44,3	40,2	40,6	42,2	49,7	44,2	38,4	38,9	33,6
Aufkommen insgesamt	570,6	566,6	560,7	564,4	576,6	590,1	590,3	595,5	596,9	621,7	629,9	632,9	654,5	661,7	676,0	685,7	684,8	680,9	636,2	674,6	661,8	672,8	676,1	665,5	680,4
VERWENDUNG																									
Inlandsverbrauch																									
nach Verbrauchergruppen																									
Industrie	232,1	228,7	218,2	222,9	226,1	222,4	227,4	229,6	227,3	239,1	240,3	243,1	244,8	248,5	249,7	253,7	255,3	252,4	226,1	249,7	249,6	244,6	245,1	244,4	245,5
Verkehr	12,6	12,3	12,4	12,7	13,4	13,7	13,9	13,3	13,1	13,1	13,0	13,1	13,1	12,9	13,2	12,7	12,3	11,1	11,6	12,1	12,2	12,1	12,0	11,6	11,7
Öffentliche Einrichtungen	39,9	40,0	40,0	40,6	40,1	41,1	39,9	39,9	41,0	42,9	44,0	45,1	46,9	47,8	47,6	48,5	49,6	51,4	50,1	51,6	51,3	52,4	53,2	51,8	53,5
Landwirtschaft	9,3	8,8	8,7	8,2	8,0	7,8	7,7	7,8	7,5	7,5	8,0	8,0	8,2	8,3	8,3	8,3	8,5	8,7	8,6	9,0	9,0	9,6	9,6	9,6	9,7
Haushalte	122,2	122,8	126,1	124,5	127,2	134,2	130,8	130,5	131,3	130,5	134,4	136,5	139,1	140,4	141,3	141,5	140,2	139,5	139,2	141,7	136,9	138,0	137,0	129,7	132,0
Handel u. Gewerbe	56,8	54,6	56,7	56,1	57,9	60,6	63,1	66,4	68,3	68,3	68,0	70,4	72,9	74,0	74,1	74,9	75,3	75,3	73,7	76,5	76,5	77,7	78,8	77,0	78,2
zusammen	472,9	467,2	462,1	465,1	472,6	479,7	482,9	487,5	488,5	501,4	507,7	516,2	525,0	531,9	534,2	539,6	541,2	538,4	509,3	540,6	535,5	534,3	535,7	524,0	530,6
Verluste, Eigenverbrauch und Pumpstromverbrauch	66,4	65,4	65,5	65,0	68,2	66,7	66,1	69,1	68,7	78,2	77,4	78,2	75,7	78,3	79,9	80,2	80,3	79,8	72,0	74,8	71,3	72,8	69,2	68,2	69,4
Ausfuhr	31,0	33,7	32,8	33,6	34,9	42,7	40,4	38,9	39,6	42,1	44,8	45,5	53,8	51,5	61,9	65,9	63,4	62,7	54,9	59,9	56,0	67,3	72,2	74,5	85,4
Verwendung insgesamt	570,3	566,3	560,3	563,7	575,7	589,1	589,4	595,5	596,8	621,7	629,9	639,9	654,5	661,7	676,0	685,7	684,8	680,9	636,2	675,3	662,8	674,3	677,2	666,7	685,4

Aufkommen und Verwendung von Strom in Deutschland

KIT
Karlsruhe Institute of Technology

Quelle: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Statistisches Bundesamt, Arbeitsgruppe Erneuerbare
Energie-Statistik (AGEE-Stat)

- 1) ab 1998: Kapazität aus gesamten Windkraftanlagen gemäß
AGEE-Stat
- 2) bis 1997 einschließlich Windkraftanlagen der öffentlichen
Versorgungsunternehmen
- 3) bis 1997 einschließlich Windkraftanlagen öffentlicher Versorgungsunternehmen, ab 1998 einschließlich
aller Windkraftanlagen
- 4) Kapazität aus gesamten Windkraftanlagen gemäß
AGEE-Stat
- 5) unter Berücksichtigung
der Atomgesetznovelle vom
31.07.2011 zum Ausstieg
aus der Kernenergie

Hinweis: Differenzen zu den Werten auf den vorangehenden Seiten aufgrund unterschiedlicher Datenquellen, Erhebungszeiten und Erhebungsumfänge
1) Einschließlich Netzverluste und Eigenverbrauch
Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen

INSTITUT FÜR ELEKTROENERGIESYSTEME
UND HOCHSPANNUNGSTECHNIK

Erzeugung und Verbrauch elektrischer Energie

Beitrag erneuerbarer Energien zum Primärenergieverbrauch -
in PJ

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Wasserkraft	58	53	62	64	67	77	66	66	63	71	92	86	90	64	72	70	72	76	74	69	75	64	78	83	71	68	74
Windkraft	.	.	.	.	.	6	7	11	17	20	35	38	55	67	92	98	111	143	146	139	136	176	182	186	206	285	279
Photovoltaik	.	.	.	.	.	0,03	0,04	0,06	0,12	0,11	0,3	0,4	0,7	1,1	2,0	4,6	8,0	11,1	15,9	24	42,1	69,6	95,0	111,6	129,8	139,4	137,4
Holz, Stroh u. a. feste Stoffe	59	60	60	62	80	124	125	185	205	209	210	227	221	273	311	338	368	388	418	465	532	511	458	525	479	505	534
Biodiesel u.a.flüssige																											
Brennstoffe						2	2	4	4	5	13	17	21	42	62	110	190	217	195	174	191	168	130	121	125	117	117
Müll, Deponiegas	80	84	85	102	106	45	46	54	65	73	39	31	33	60	64	88	102	120	102	99	106	110	114	127	131	129	138
Klärgas einschl. Biogas	.	.	.	.	.	14	16	16	17	17	20	22	23	39	33	43	69	140	165	198	292	321	268	283	308	326	339
Sonstige Erneuerbare ¹⁾	.	.	.	.	.	7	7	8	8	8	9	11	13	14	15	17	19	22	32	35	39	43	60	62	68	74	79
Insgesamt	196	197	207	228	253	275	270	344	379	403	417	432	455	561	650	769	939	1.117	1.147	1.201	1.413	1.463	1.385	1.499	1.519	1.644	1.697
prozentualer Anteil am Primärenergieverbrauch	1,3	1,3	1,4	1,6	1,8	1,9	1,8	2,4	2,6	2,8	2,9	2,9	3,2	3,8	4,5	5,3	6,3	7,9	8,0	8,9	9,9	10,8	10,3	10,8	11,5	12,4	12,6

Entwicklung der Erzeugung (GWh) und installierten Leistung (MW) der
Stromerzeugungsanlagen aus erneuerbaren Energien

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Wasserkraft																											
GWh	17.426	14.891	17.397	17.878	19.930	21.780	21.957	17.357	17.216	19.647	21.732	22.733	23.124	17.722	20.095	19.638	20.008	21.170	20.443	19.031	20.953	17.671	22.091	22.998	19.587	18.977	21.000
MW	3.982	4.033	4.049	4.117	4.211	4.348	4.305	4.296	4.369	4.547	4.831	4.831	4.937	4.953	5.186	5.210	5.193	5.137	5.164	5.340	5.407	5.625	5.607	5.590	5.580	5.589	5.598
Anteil am gesamten Stromverbrauch	3,16	2,76	3,26	3,39	3,75	4,02	4,01	3,16	3,09	3,53	3,75	3,89	3,94	2,95	3,29	3,20	3,23	3,41	3,31	3,27	3,41	2,92	3,65	3,81	3,31	3,19	3,53
Windkraft																											
GWh	71	100	275	600	909	1.500	2.032	2.966	4.489	5.528	9.513	10.509	15.786	18.713	25.509	27.229	30.710	39.713	40.574	38.648	37.795	48.891	50.681	51.721	57.379	79.206	77.412
MW	55	106	174	326	618	1.121	1.549	2.089	2.877	4.435	6.097	8.738	11.976	14.381	16.419	18.248	20.474	22.116	22.794	25.732	26.903	28.712	30.979	33.477	38.614	44.541	49.534
Anteil am gesamten Stromverbrauch	0,01	0,02	0,05	0,11	0,17	0,28	0,37	0,54	0,81	0,99	1,64	1,80	2,69	3,12	4,18	4,43	4,95	6,39	6,56	6,65	6,15	8,07	8,37	8,57	9,71	13,31	13,02
Biomasse																											
GWh	222	260	296	432	569	662	755	876	1.638	1.845	2.887	3.355	4.099	6.603	8.218	11.102	14.793	19.832	23.121	26.308	29.179	32.136	38.265	40.112	42.232	44.553	45.600
MW	129	135	139	174	208	227	261	301	461	548	703	827	1.030	1.428	1.687	2.352	3.010	3.392	3.681	4.871	5.463	6.424	6.753	7.036	7.260	7.364	7.578
Anteil am gesamten Stromverbrauch	0,04	0,05	0,06	0,08	0,11	0,12	0,14	0,16	0,29	0,33	0,50	0,57	0,70	1,10	1,35	1,81	2,39	3,19	3,74	4,53	4,75	5,30	6,32	6,64	7,14	7,49	7,67
Biogener Anteil des Abfalls*)																											
GWh	1.213	1.211	1.262	1.203	1.306	1.348	1.343	1.397	1.618	1.740	1.844	1.859	1.949	2.238	2.253	3.252	3.907	4.531	4.671	4.323	4.746	4.755	4.951	5.415	6.069	5.768	6.000
MW	550	550	550	564	499	509	551	527	540	555	585	585	585	902	943	1.174	1.273	1.228	1.351	1.441	1.526	1.486	1.429	1.860	1.888	1.924	1.944
Anteil am gesamten Stromverbrauch	0,22	0,22	0,24	0,23	0,25	0,25	0,25	0,25	0,29	0,31	0,32	0,32	0,33	0,37	0,37	0,53	0,63	0,73	0,76	0,74	0,77	0,78	0,82	0,90	1,03	0,97	1,01
Photovoltaik																											
GWh	1	1	4	3	7	7	12	18	35	30	60	76	162	313	557	1.282	2.220	3.075	4.420	6.583	11.729	19.599	26.380	31.010	36.056	38.726	38.171
MWp	2	2	6	9	12	18	28	42	54	70	114	176	296	435	1.105	2.056	2.899	4.170	6.120	10.566	17.944	25.429	33.033	36.337	38.343	39.799	41.275
Anteil am gesamten Stromverbrauch	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,003	0,006	0,005	0,010	0,013	0,028	0,052	0,091	0,209	0,358	0,495	0,715	1,132	1,908	3,235	4,356	5,135	6,100	6,508	6,419
Geothermie																											
GWh	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	19	28	19	25	80	98	134	151
MW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	8	8	8	19	30	33	39
Anteil am gesamten Stromverbrauch	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,003	0,005	0,003	0,004	0,013	0,017	0,023	0,025
Stromerzeugung gesamt in GWh	18.933	16.463	19.234	20.116	22.721	25.297	26.099	22.614	24.996	28.790	36.036	38.532	45.120	45.589	56.632	62.503	71.638	88.321	93.247	94.912	104.430	123.071	142.393	151.336	161.421	187.364	188.334
Anteil am Brutto-Stromverbrauch	3,44	3,05	3,61	3,81	4,28	4,67	4,77	4,11	4,49	5,17	6,22	6,59	7,68	7,59	9,28	10,18	11,56	14,21	15,08	16,33	16,99	20,32	23,51	25,06	27,31	31,55	31,67
Anteil an der Brutto-Stromerzeugung	3,44	3,05	3,57	3,82	4,30	4,71	4,72	4,09	4,49	5,18	6,25	6,57	7,69	7,49	9,17	10,04	11,20	13,79	14,55	15,93	16,51	20,11	22,65	23,73	25,76	29,02	29,05

Erneuerbare Energien in Deutschland

Betriebsergebnisse Kernkraftwerke 2013

Kernkraftwerk	Nennleistung brutto/MWe	Brutto-Stromerzeugung MWh	Zeitverfügbarkeit % ¹	Arbeitsverfügbarkeit % ²
GKN II Neckarwestheim	1.400	10.895.100	90,25	90,05
KBR Brokdorf	1.480	11.715.033	92,56	92,12
KKE Emsland	1.400	11.494.826	95,08	94,95
KKG Grafenrheinfeld	1.345	10.245.768	89,57	89,23
KKI 2 Isar	1.485	12.040.698	95,90	94,31
KKP 2 Philippsburg	1.468	9.224.840	73,32	73,17
KRB B Gundremmingen	1.344	10.145.229	87,27	85,90
KRB C Gundremmingen	1.344	10.509.741	89,62	89,19
KWG Grohnde	1.430	11.018.502	89,58	89,39
gesamt	12.696	97.289.737	89,24	88,67

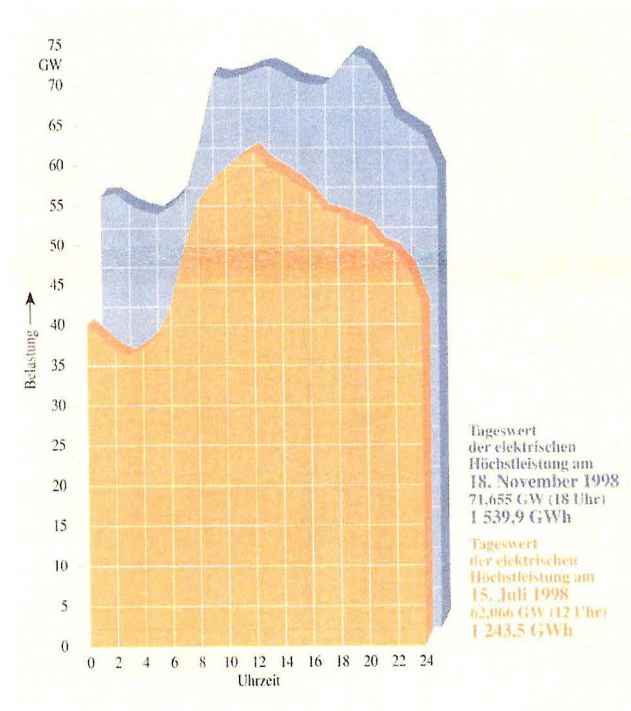
¹ Maß für die zeitliche Einsatzfähigkeit eines Kraftwerks in Prozent. Ergibt sich aus dem Bezugszeitraum (z. B. Kalenderjahr) und der Zeit, in der die Anlage in diesem Zeitraum für die Stromerzeugung zur Verfügung stand.

² Maß für die technisch und betrieblich mögliche Stromerzeugung eines Kraftwerks in Prozent. Ergibt sich aus der Nennarbeit (maximal mögliche Stromerzeugung ohne jegliche Einschränkung) einer Anlage im Bezugszeitraum (z. B. Kalenderjahr) und der tatsächlich erzeugten Strommenge zuzüglich der darüber hinaus technisch und betrieblich möglichen Stromerzeugung. Auf Nettobasis ermittelte Werte.

Quelle: VGB PowerTech, 15.01.2014

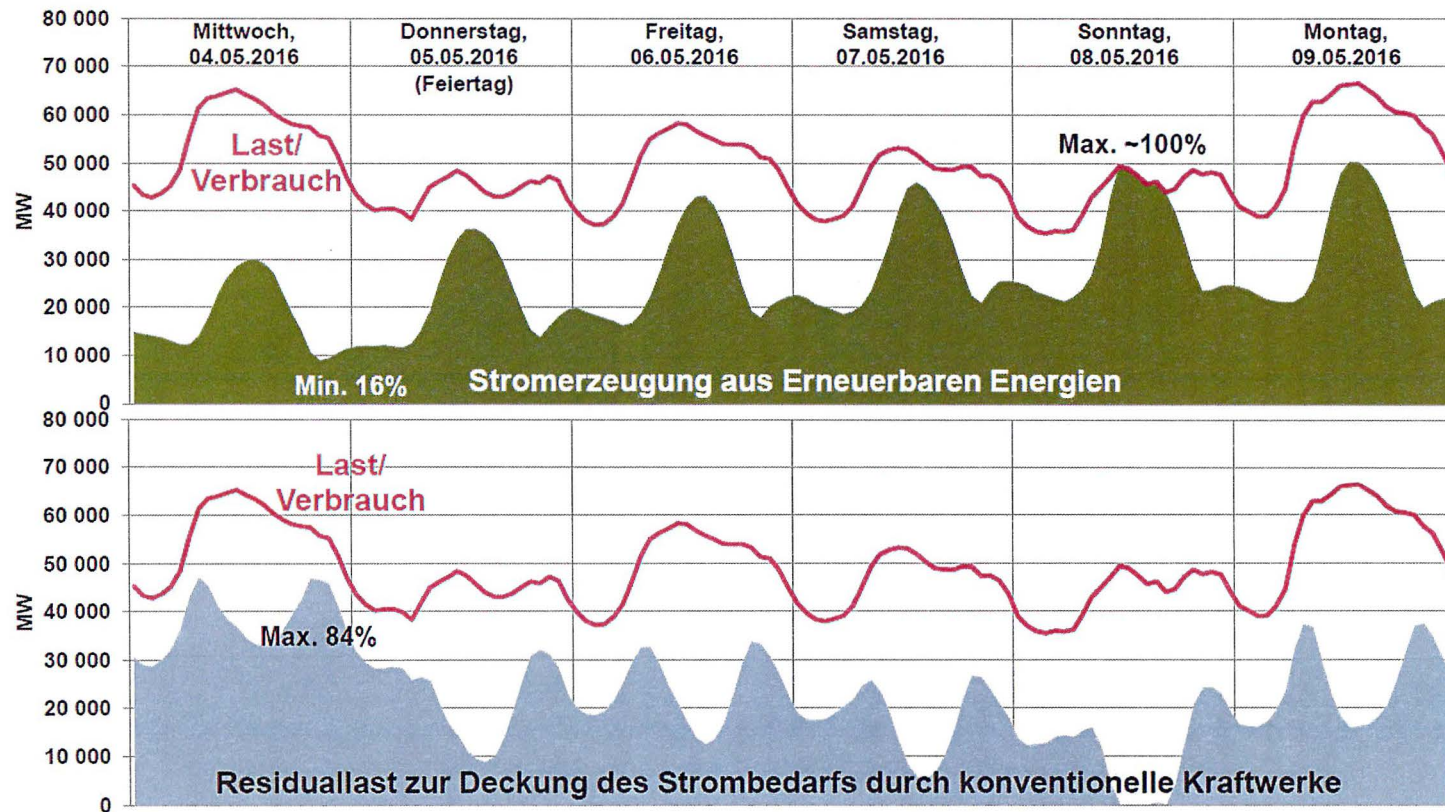
Kernkraftwerke in Deutschland

Der Verbrauch elektrischer Energie unterliegt je nach Tageszeit, Wochentag und Monat zeitlichen Schwankungen, die in Belastungsdiagrammen graphisch dargestellt werden.



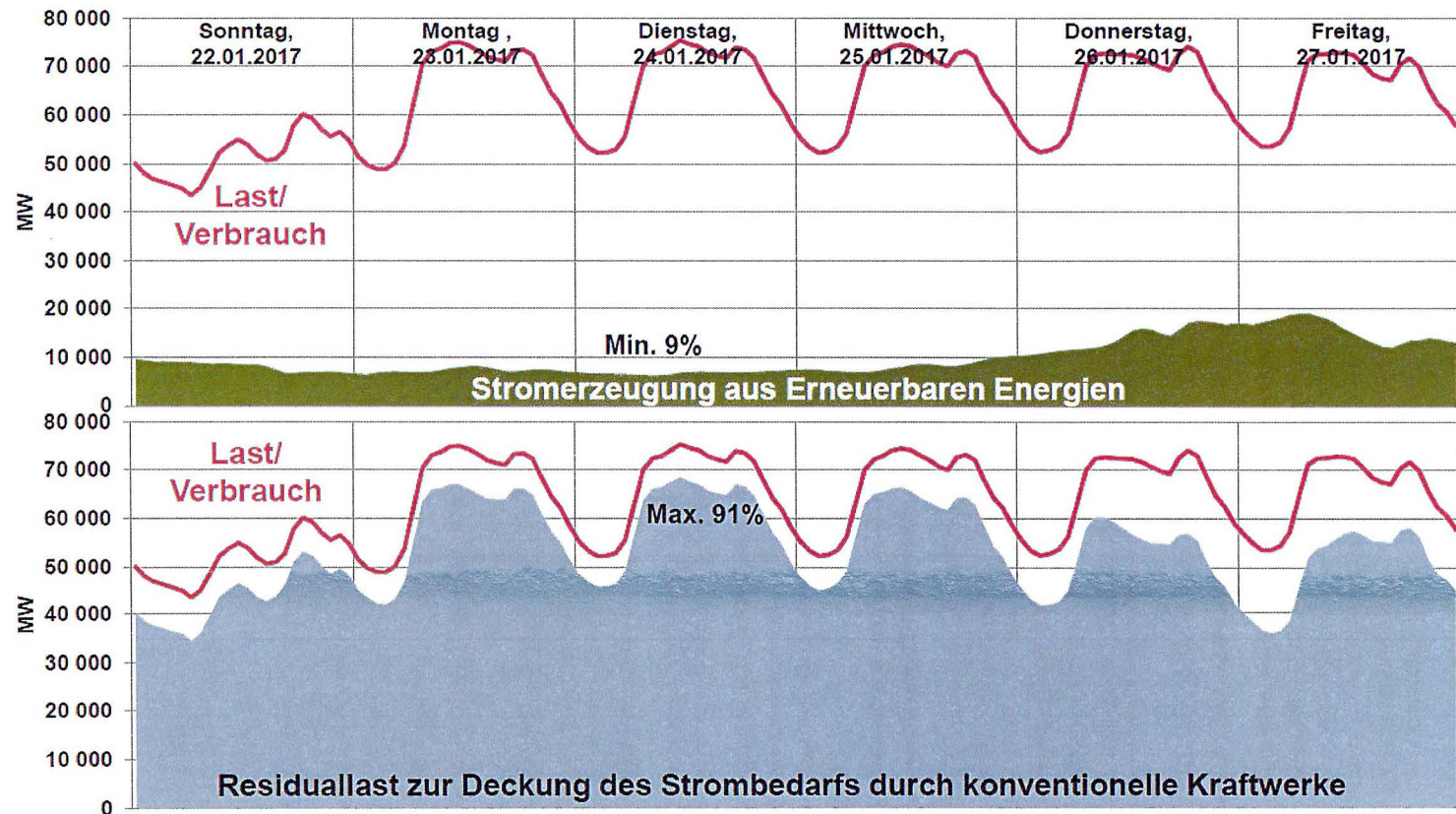
Tagesbelastungskurve höchster und niedrigster Spitzenlast

Volatilität der Einspeisung aus erneuerbaren Energien: Situation hohe Eispeisung



Quelle: BDEW (eigene Berechnung auf Basis entso-e und Veröffentlichungen der ÜNB); Prozentwerte: Lastdeckung in Prozent

Volatilität der Einspeisung aus erneuerbaren Energien: Situation niedrige Einspeisung



Quelle: BDEW (eigene Berechnung auf Basis entso-e und Veröffentlichungen der ÜNB); Prozentwerte: Lastdeckung in Prozent

Erzeugung und Verbrauch elektrischer Energie

Besonderheiten elektrischer Energie:

- Nennenswert nicht speicherfähig
- Speicherfähig im Vor- und Endprodukt
- Bedarf muß gedeckt werden, d.h. Versorgungssicherheit
- Aus allen Energieformen herstellbar
- In alle Nutzenergien umwandelbar
- Beliebig fein dosierbar

Erzeugung elektrischer Energie:

Arten von Kraftwerken

Wärmekraftwerke:

- Dampfkraftwerke
- Gasturbinenkraftwerke
- GuD-Kraftwerke
- Kernkraftwerke

Wasserkraftwerke:

- Laufwasserkraftwerke
- Pumpspeicherkraftwerke
- Speicherkraftwerke
- Gezeitenkraftwerke

Windenergieanlagen:

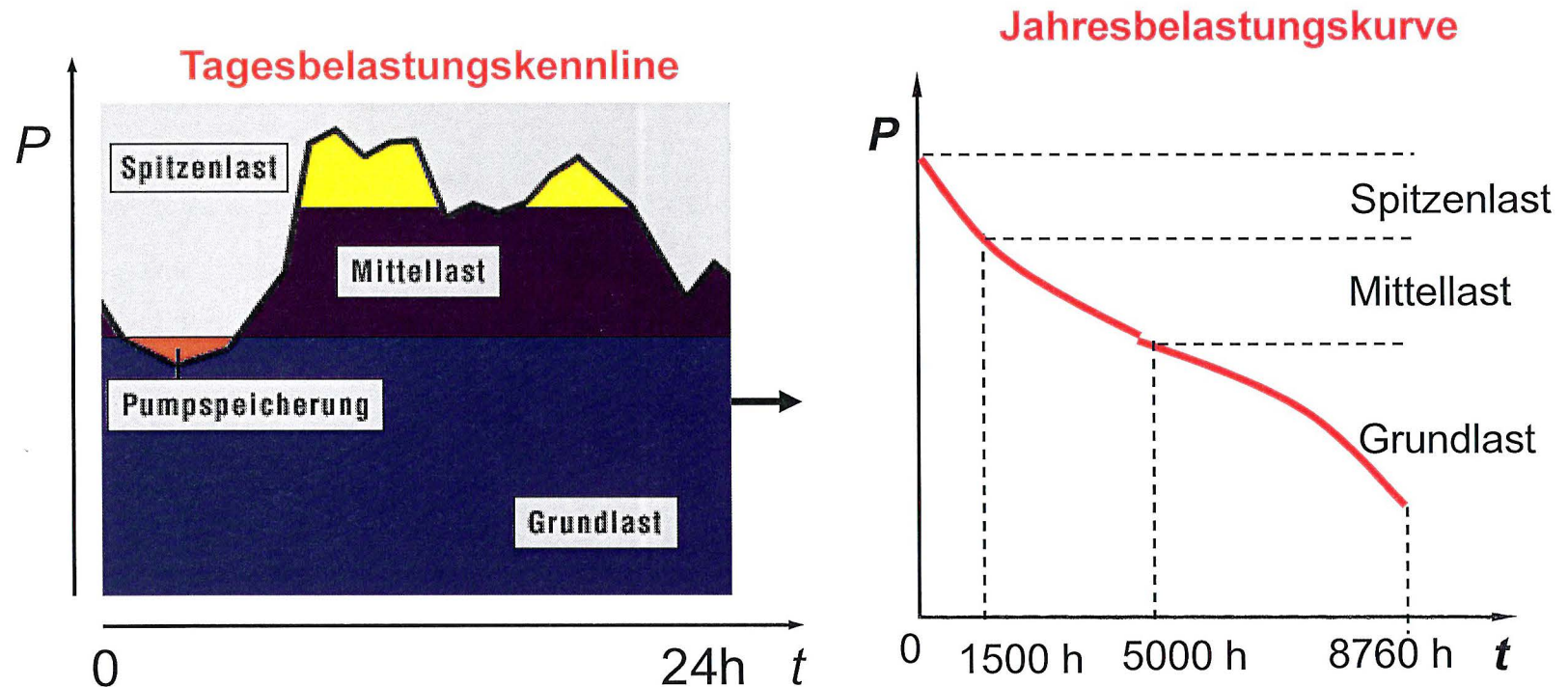
- Off-shore-Anlagen
- On-shore-Anlagen

Solarenergieanlagen:

- Photovoltaikanlagen
- Solarthermische Anlagen

Biomasseanlagen

Nutzung von Kraftwerken (I)



Grundlastkraftwerke:

- Braunkohle-KW
- Laufwasser-KW
- Kernkraftwerke

Spitzenlastkraftwerke:

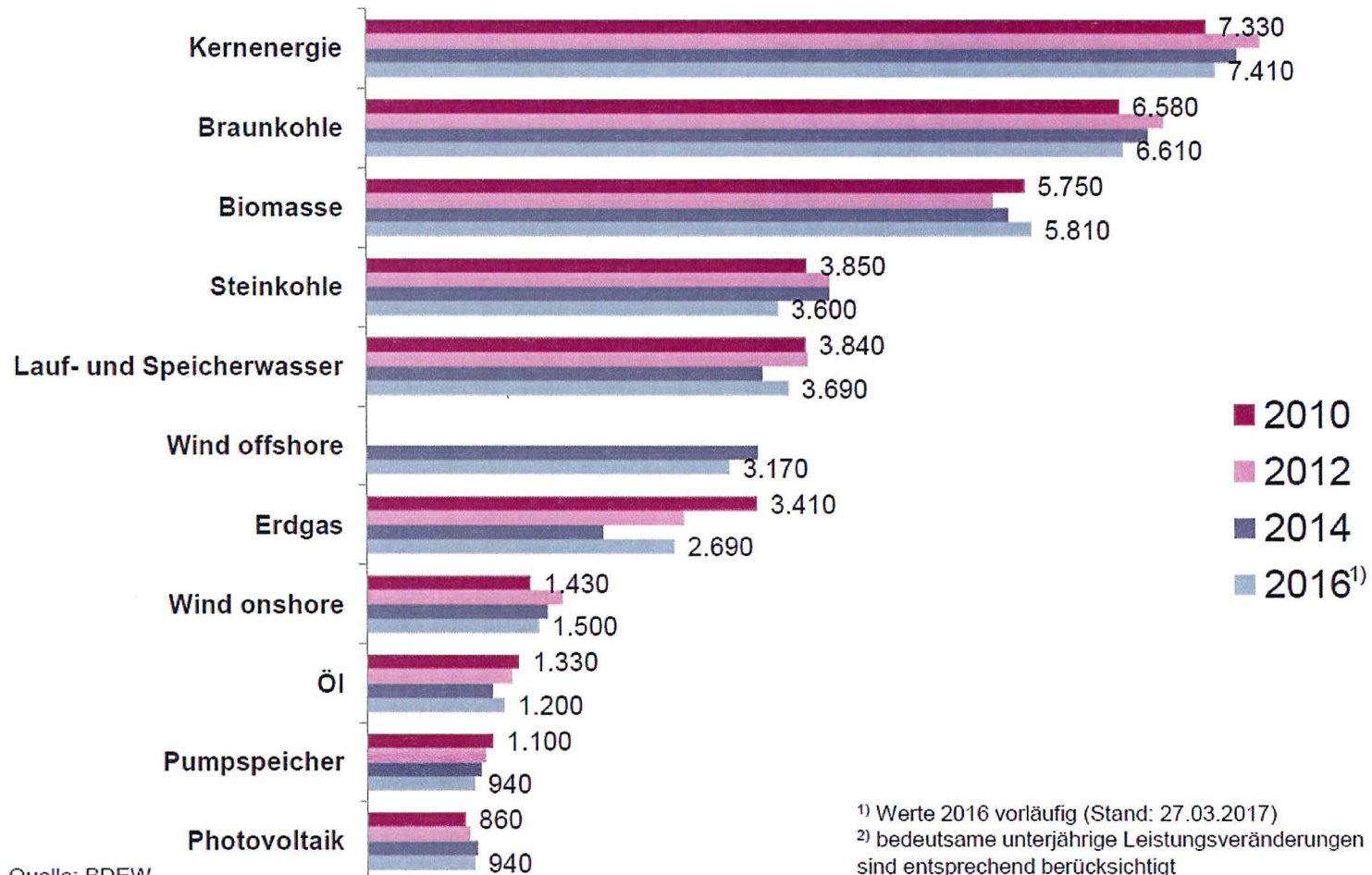
- Pumpspeicherkraftwerke
- Gasturbinenkraftwerke

Mittellastkraftwerke:

- Steinkohle-KW
- Speicher-KW
- Pumpspeicher-KW

Nutzung von Kraftwerken (II)

Jahresvolllaststunden – Gesamte Elektrizitätswirtschaft



Nutzung von Kraftwerken (III)

Für die Arten der Kraftwerke gilt:

Grundlastkraftwerke: hohe Investitionskosten, geringe Betriebskosten

Spitzenlastkraftwerke: geringe Investitionskosten, hohe Betriebskosten

Von Wärme- und Wasserkraftwerken erzeugte Energie ist deterministisch verfügbar und kann somit bei der Kraftwerkseinsatzplanung gezielt verplant werden. Bei den anderen Technologien fällt die Primärenergie nicht immer dann an, wenn sie gebraucht wird (z.B. Windenergieanlagen, Photovoltaikanlagen,...). Sie können bei der Kraftwerksplanung daher nur mit einer geringeren Verfügbarkeit eingeplant werden. Das bedeutet, daß zusätzliche Reserven an deterministisch verfügbaren Kraftwerken vorgehalten werden müssen.

Die Kraftwerkseinsatzplanung erfolgt durch Lastverteiler, welche rechnergestützt die erforderliche Leistung abhängig von den Betriebskosten auf die Kraftwerke verteilen. Die vorhandenen Kraftwerke sollen möglichst optimal eingesetzt werden.

Energie und Umwelt (I)

Klimatisch wirksame Spurengase:

- CO_2
- FCKW
- Methan
- N_2O
- Ozon

Toxisch wirksame Spurengase:

- SO_2
- NO_x
- CO
- Stäube

Energie und Umwelt (II)

CO₂ – Kreislauf:

Atmosphärischer Treibhauseffekt:

Der CO₂ – Kreislauf der Erde ist bestimmt durch den Austausch von Kohlendioxid zwischen der Atmosphäre, dem Ozean und der Biosphäre. Lange Zeit herrschte dabei ein dynamisches Gleichgewicht

Anthropogener Treibhauseffekt:

Der Mensch greift in diesen Kreislauf ein. Zusätzliches CO₂ entsteht, indem der Mensch Holz, Kohle, Erdgas und Erdöl verbrennt, Wälder rodet. Hierbei spricht man vom anthropogenen (= vom Menschen verursachten) Treibhauseffekt.

Die Pflanzen und die Ozeane speichern zwar einen Teil des CO₂, der Rest verbleibt in der Atmosphäre und führt dort zum klimawirksamen CO₂ – Anstieg.

Verweildauer in der Atmosphäre:	100 Jahre
Konzentration in der Atmosphäre im Jahr 1750:	280ppm
Konzentration in der Atmosphäre im Jahr 2016:	400ppm

FCKW:

In der Stratosphäre wird Ozon ständig erzeugt und abgebaut: Das natürliche Gleichgewicht ist jedoch durch FCKW gestört. Diese sehr stabilen und langlebigen Stoffe wandern langsam in die Stratosphäre, wo sie durch UV-Strahlung gespalten werden. Dabei entstehen chemisch aktive Chloratome und Chlormonoxid, die Ozonmoleküle (O_3) zu gewöhnlichem Sauerstoff (O_2) umwandeln.

Verweildauer in der Atmosphäre:	über 10.000 Jahre
Konzentration in der Atmosphäre im Jahr 1750:	-
Konzentration in der Atmosphäre im Jahr 2016:	75ppt

Methan (CH_4):

Natürliche Hauptquellen des Methan sind Moorgebiete und der amazonische Regenwald. Die Methankonzentration in der Atmosphäre hat mit der Bevölkerungsexplosion stark zugenommen. Der Anteil des Menschen an der Methanemission beträgt fast 75%: durch Aktivitäten wie verstärkten Reisanbau, Massentierhaltung und Müllentsorgung.

Verweildauer in der Atmosphäre:	12 Jahre
Konzentration in der Atmosphäre im Jahr 1750:	800ppb
Konzentration in der Atmosphäre im Jahr 2016:	1850ppb

Lachgas (N_2O):

Lachgas entsteht durch die Aktivität von Bakterien in Böden, Ozeanen und Seen. Andererseits spielen menschliche Aktivitäten eine Rolle. Beispielsweise führt die Düngung in der Landwirtschaft zu Stickstoffüberschüssen, die teilweise in Form von N_2O an die Luft abgegeben werden.

Verweildauer in der Atmosphäre:	120 Jahre
Konzentration in der Atmosphäre im Jahr 1750:	284ppb
Konzentration in der Atmosphäre im Jahr 2016:	327ppb

Energie und Umwelt (VI)

Ozon (O_3):

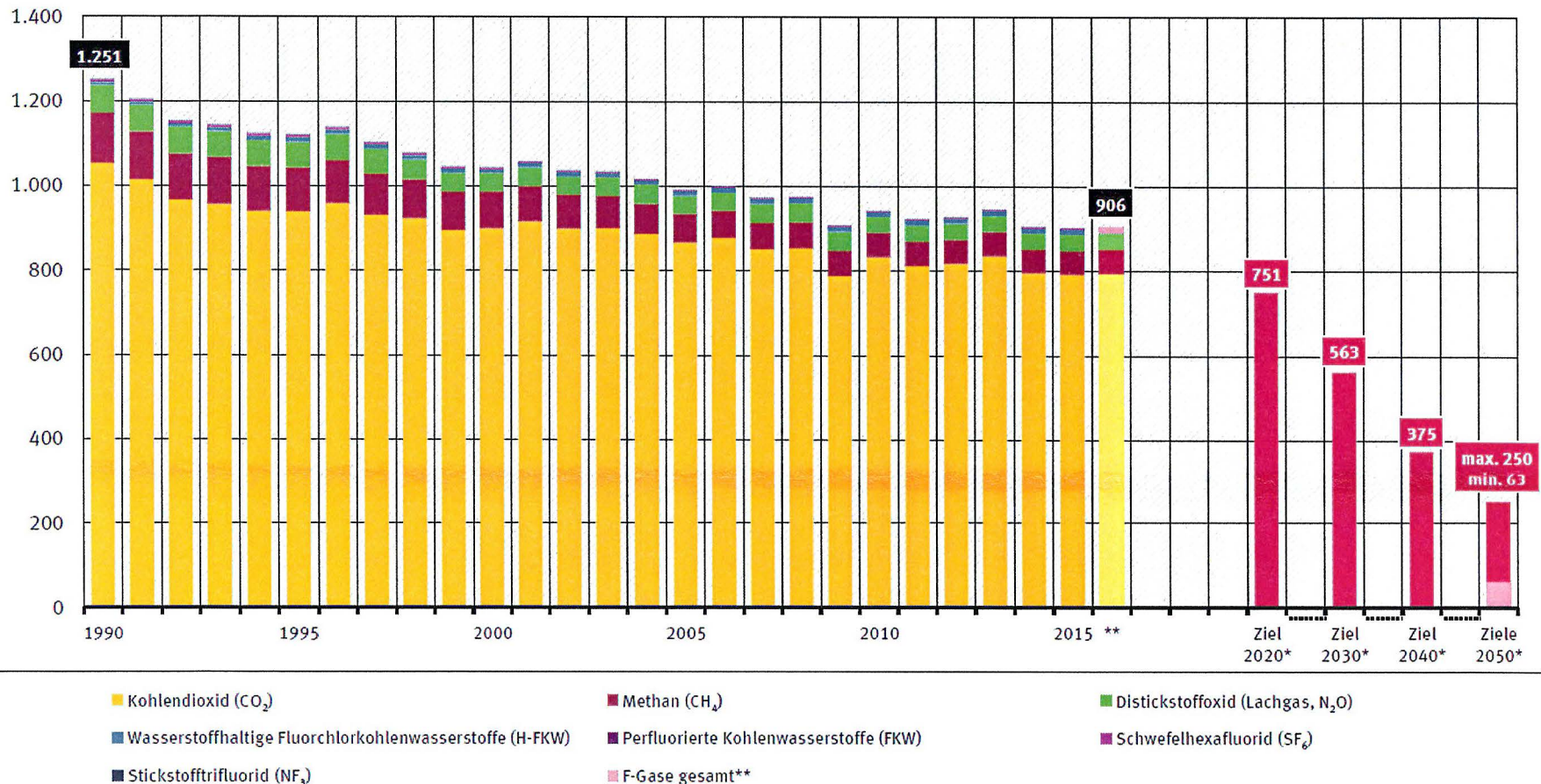
Durch die Abgase aus Industrie und Verkehr reichern sich Stickoxide in der Luft an. Das Sonnenlicht wirkt auf diese Gase ein: NO_2 wird in $NO + O$ gespalten. Der atomare Sauerstoff reagiert mit Luftsauerstoff zu O_3 .

Verweildauer in der Atmosphäre:	einige Tage
Konzentration in der Atmosphäre im Jahr 1750:	10-20ppb
Konzentration in der Atmosphäre im Jahr 2016:	337ppb

Energie und Umwelt (VII)

Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen

Millionen Tonnen Kohlendioxid-Äquivalente



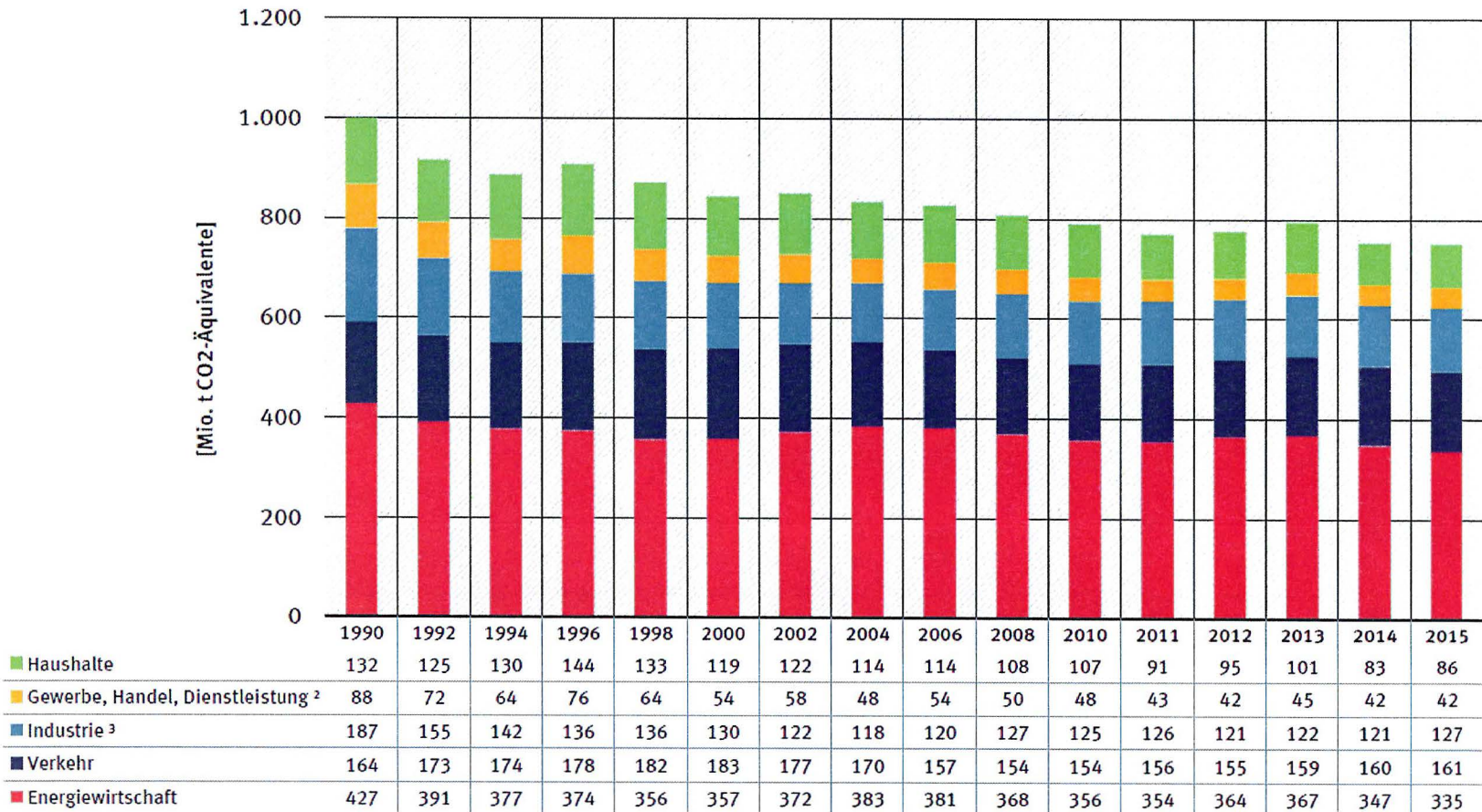
* Ziele 2020 bis 2050: Energiekonzept der Bundesregierung (2010)

** Schätzung 2016

Quelle: Umweltbundesamt, Nationale Treibhausgas-Inventare 1990 bis 2015 (Stand 02/2017) und Schätzung für 2016 (Stand 03/2017)

Energie und Umwelt (VIII)

Entwicklung der energiebedingten Treibhausgas-Emissionen



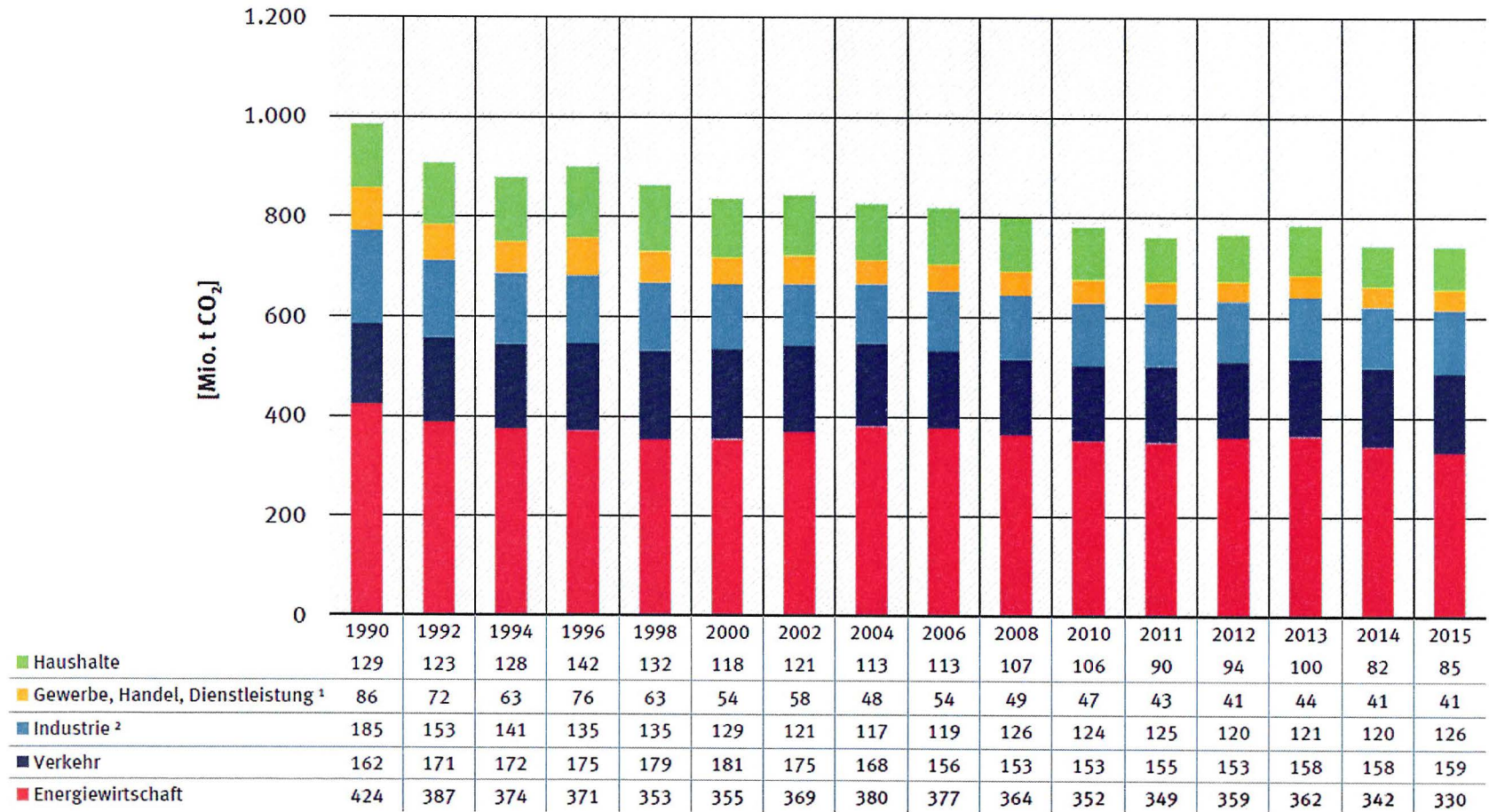
Angaben ohne diffuse Emissionen bei der Gewinnung, Umwandlung und Verteilung von Brennstoffen.

1 in CO₂-Äquivalenten, berücksichtigt CO₂, CH₄, N₂O

2 einschließlich Militär und Landwirtschaft (energiebedingt)

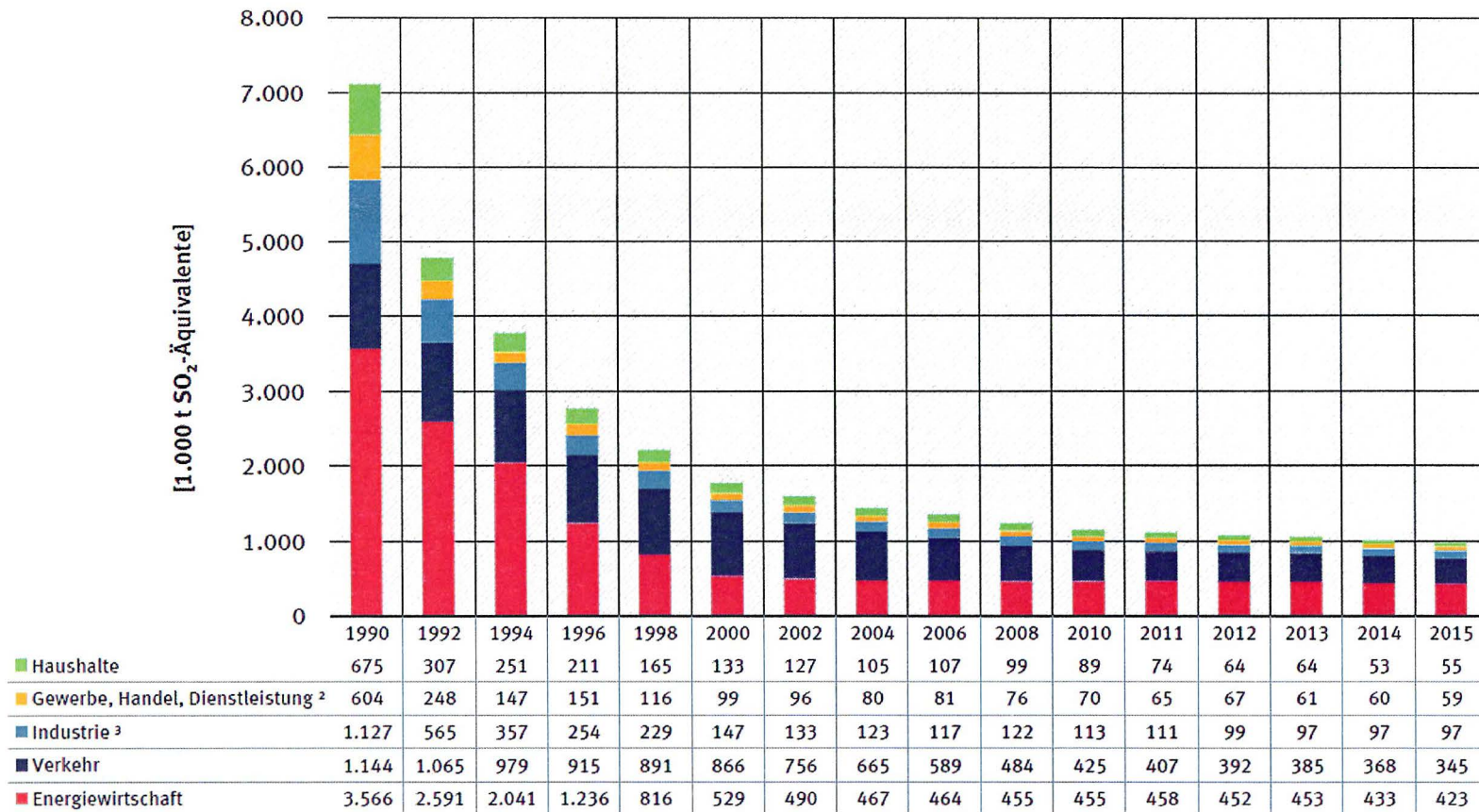
3 enthält nur Emissionen aus Industrief Feuerungen, keine Prozessemissionen

Umweltbundesamt: Nationale Trendtabellen für die deutsche
Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990-2015,
Stand Januar 2017



Energie und Umwelt (X)

Entwicklung der energiebedingten Emissionen von NO_x, SO₂ und NH₃



Angaben ohne diffuse Emissionen bei der Gewinnung, Umwandlung und Verteilung von Brennstoffen.

1 in SO₂-Äquivalenten, berücksichtigt SO₂, NO_x, NH₃

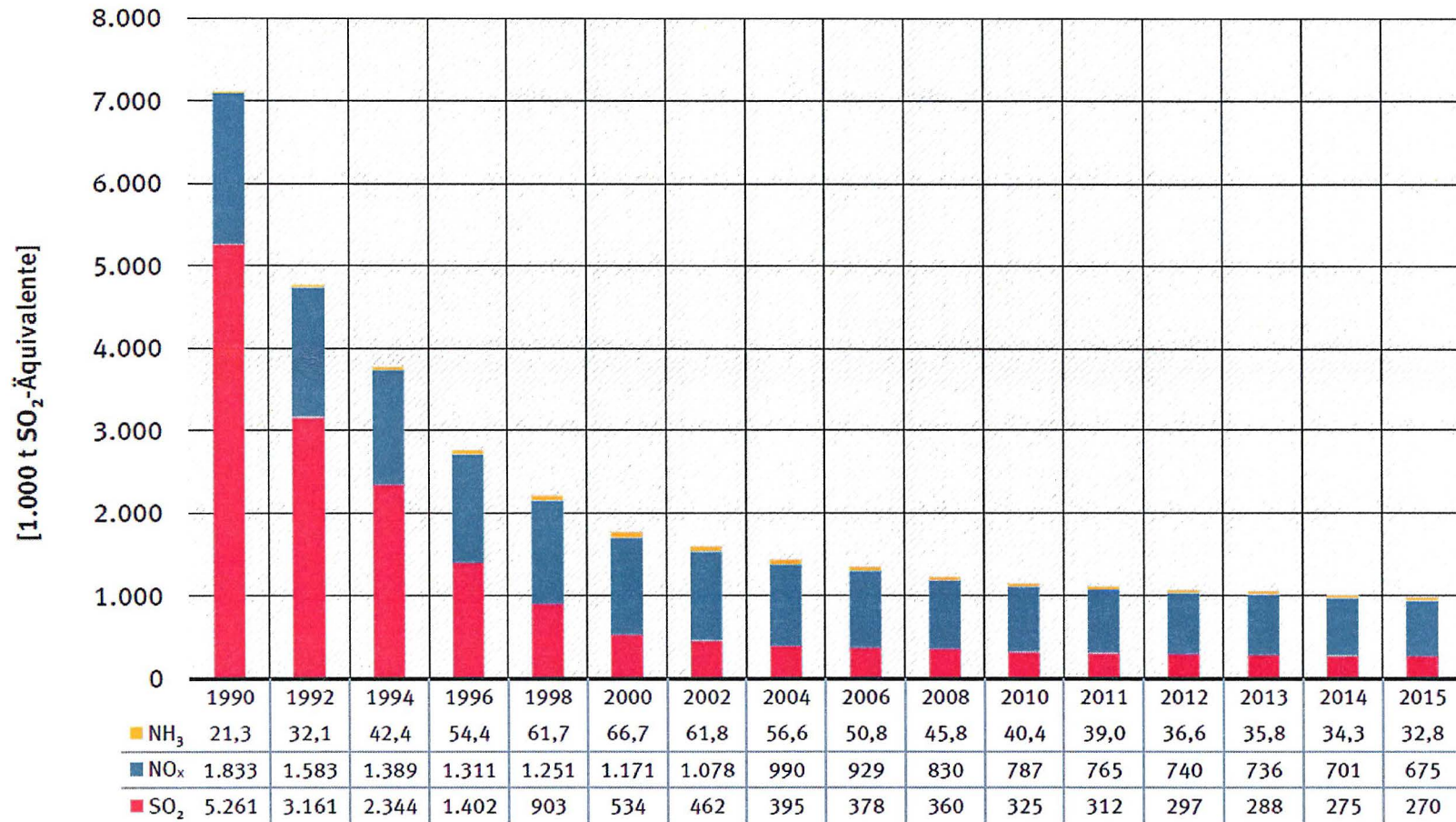
2 einschließlich Militär und Landwirtschaft (energiebedingt)

3 enthält nur Emissionen aus Industriefeuerungen, keine Prozessemissionen

Umweltbundesamt: Nationale Trendtabellen für die deutsche
Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990-2015,
Stand Januar 2017

Energie und Umwelt (XI)

Entwicklung der energiebedingten Emissionen von NO_x, SO₂ und NH₃

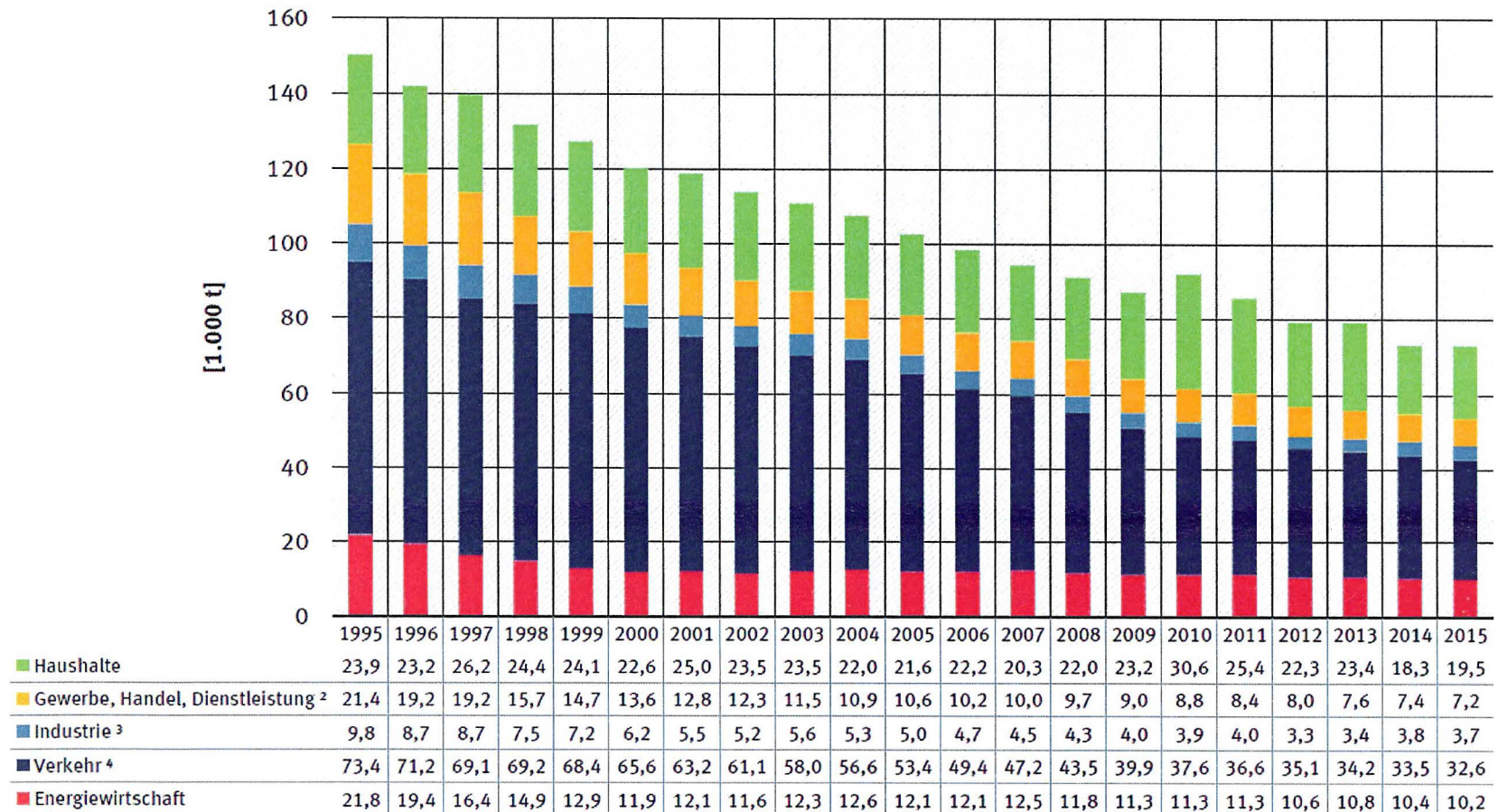


Angaben ohne diffuse Emissionen bei der Gewinnung, Umwandlung und Verteilung von Brennstoffen.
1 in SO₂-Äquivalenten

Umweltbundesamt: Nationale Trendtabellen für die deutsche
Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990-2015,
Stand Januar 2017

Energie und Umwelt (XII)

Entwicklung der energiebedingten Feinstaub-Emissionen



Angaben ohne diffuse Emissionen bei der Gewinnung, Umwandlung und Verteilung von Brennstoffen.

1 angegeben sind nur Feinstaubemissionen für Partikelgrößen bis zu 10 Mikrometer (PM 10)

2 einschließlich Militär und Landwirtschaft (energiebedingt)

3 enthält nur Emissionen aus Industrief Feuerungen, keine Prozessemissionen

4 einschließlich Abrieb von Reifen und Bremsen

Umweltbundesamt: Nationale Trendtabellen für die deutsche
Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990-2015,
Stand Januar 2017

Energie und Umwelt (XIII)

Entwicklung der energiebedingten Emissionen

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ - Äquiva- lente ¹	SO ₂	NO _x ²	NH ₃	SO ₂ - Äquiva- lente ³	CO	NM VOC	Staub
	[Mio t]	[1000 t]	[1000 t]	[Mio t]	[1000 t]	[1000 t]	[1000 t]	[1000 t]	[1000 t]	[1000 t]	[1000 t]
1990	990	1.609	22,6	1.037	5.311	2.643	12,0	7.173	11.282	1.865	1.392
1991	956	1.506	21,2	1.000	3.896	2.420	13,9	5.607	9.126	1.438	809
1992	911	1.377	20,3	951	3.172	2.281	17,1	4.791	7.842	1.257	529
1993	901	1.413	20,0	942	2.841	2.182	20,4	4.399	7.096	1.103	373
1994	882	1.272	19,9	920	2.355	2.002	22,6	3.791	5.680	887	254
1995	881	1.224	20,0	918	1.675	1.955	25,6	3.084	5.338	822	182
1996	903	1.178	19,9	939	1.411	1.888	28,9	2.780	4.953	757	172
1997	873	1.154	19,6	907	1.159	1.824	31,4	2.488	4.757	711	170
1998	866	1.041	18,8	898	911	1.801	32,8	2.226	4.335	649	160
1999	841	1.080	18,4	873	730	1.773	32,4	2.025	4.066	584	154
2000	839	1.003	18,0	870	541	1.686	35,5	1.781	3.751	522	148
2001	862	909	18,2	890	526	1.624	34,1	1.721	3.621	486	146
2002	847	858	17,0	874	467	1.551	32,9	1.608	3.377	448	141
2003	844	795	17,1	869	440	1.495	31,6	1.540	3.202	412	138
2004	830	686	17,2	852	399	1.424	30,1	1.446	2.954	384	136
2005	811	616	16,5	832	381	1.354	28,0	1.376	2.776	354	131
2006	822	553	16,9	841	382	1.336	27,0	1.363	2.688	339	125
2007	797	512	17,4	815	364	1.267	25,0	1.293	2.547	319	123
2008	802	504	17,6	820	364	1.193	24,4	1.240	2.485	302	119
2009	745	458	17,0	762	325	1.118	22,8	1.146	2.326	289	116
2010	784	480	18,2	802	328	1.132	21,5	1.156	2.495	291	120
2011	764	476	18,7	781	315	1.100	20,8	1.120	2.402	276	115
2012	769	529	18,5	788	300	1.064	19,4	1.077	2.062	251	108
2013	788	515	18,6	806	291	1.058	19,1	1.064	2.016	248	109
2014	747	482	18,2	764	278	1.008	18,3	1.014	1.888	238	103
2015	744	498	18,3	762	273	971	17,4	982	1.843	233	102

Angaben einschließlich der diffusen Emissionen bei der Gewinnung, Umwandlung und Verteilung von Brennstoffen.

1 berücksichtigt sind CO₂, CH₄ und N₂O

2 berechnet als NO₂

3 berücksichtigt sind SO₂, NO_x und NH₃

Quelle: Umweltbundesamt: Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990-2015, Stand 01/2017

Literatur

Schwab: Elektroenergiesysteme – Springer Verlag

EnBW: Die Wertschöpfungskette des EnBW-Konzerns

EnBW: Fossile Energie

EnBW: Wasser ist Energie

BMWi: Energiedaten

BDEW: Zahlen, Daten, Graphiken