Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

JÜLICH
FORSCHUNGSZENTRUM

Ausstieg aus der Kohleverstromung

Dr. Peter Markewitz

Institut für Energie- und Klimaforschung – Systemforschung und Technologische Entwicklung (IEK-STE)

Forschungszentrum Jülich GmbH

10. Master Class Course „Renewable Energies“ 2015

Berlin/Eberswalde, 2. Dezember 2015

Gliederung

- Ausgangslage
- „Klimabeitrag“ – Ursprüngliche Vorstellungen u. Kompromiss
- Versorgungsaufgaben von Kohlekraftwerken
- Zukünftige Anforderungen an Kohlekraftwerke
- Fazit

JÜLICH FORSCHUNGSZENTRUM

CO_2-Emissionen 2014

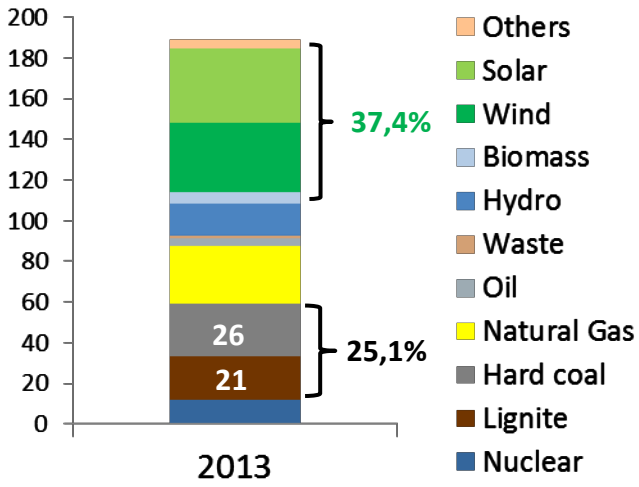
Weltweit	32.637 Mio. t	100%	Änderung 2014/2013: + 168 Mio. t
USA	5.568 Mio. t	17,1%	Änderung 2014/2013: + 49 Mio. t
China	8.553 Mio. t	26,2%	Änderung 2014/2013: + 75 Mio. t
EU-28	3.452 Mio. t	10,5%	Änderung 2014/2013: - 194 Mio. t
Deutschland	794 Mio. t	2,4%	Änderung 2014/2013: - 47 Mio. t
Davon[1)]			
Umwandlung		43,8%	
Haushalte		11,4%	
Verkehr		18,7%	
Industrie		20,4%	
GHD		5,7%	

1) Prozentuale Anteile Deutschland : Zahlen 2012

Quelle: Ziesing, Energiewirtschaftliche Tagesfragen Heft 9 (2013), Heft 9 (2015)

Stromerzeugung durch Kohlekraftwerke

Installierte Kapazität (GW)



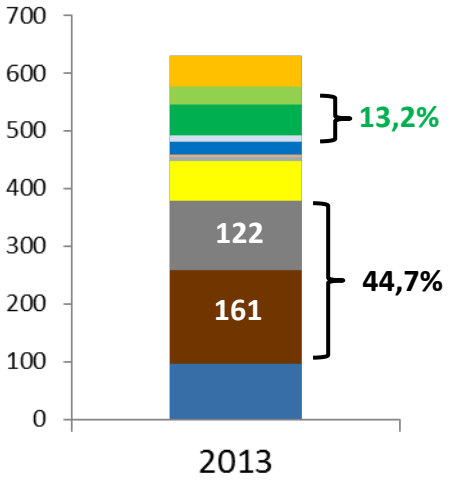
CO_2 Emissionen im Jahr 2014

Steinkohle: ca. 100 Mio. t
Braunkohle: ca. 162 Mio. t

ca. 262 Mio. t
(≈ **33%** der deutschen CO_2 Emissionen)

Quelle: Schiffer et 3/2015, eigene Schätzung

Bruttostromerzeugung (TWh)



Quelle: BMWi Energiedaten 2015

Volllastbenutzungsstunden

	2009	2010	2011	2012	2013
Braunkohle	6661	6600	6850	6800	7030
Steinkohle	3544	3849	3791	4189	4441
Kernenergie	6234	6495	6472	7804	7633
Erdgas	3122	3365	3120	2754	2312

Quelle: BDEW 2015

Beschäftigungszahlen – Kohleverstromung u. -förderung

JÜLICH FORSCHUNGSZENTRUM

- **Direkt Beschäftigte**

Braunkohle	2014
Rheinland (94 Mio. t)	10.146
Lausitz (62 Mio.t)	8.245
Mitteldeutschland (21 Mio.t)	2.536
Helmstedt (1,8 Mio. t)	479
Summe (ca. 178 Mio. t[2]))	**21.406**

(Inkl. Beschäftige in Braunkohlekraftwerken 5.430)

Zum Vergleich:

Opel Bochum	ca. 5.000
VW Wolfsburg	ca. 70.000
Siemens D	ca. 115.000

- **Indirekt Beschäftigte[1]: ca. 53.000**

Gesamtsumme: ca. 74.000 Beschäftigte

- **Direkt Beschäftigte**

Steinkohle	2014
Ruhr (5,7 Mio. t)	4.040
Saar (-)	78
Ibbenbüren (1,9 Mio. t)	1.160
Summe (7,6 Mio. t [3])	**10.194**

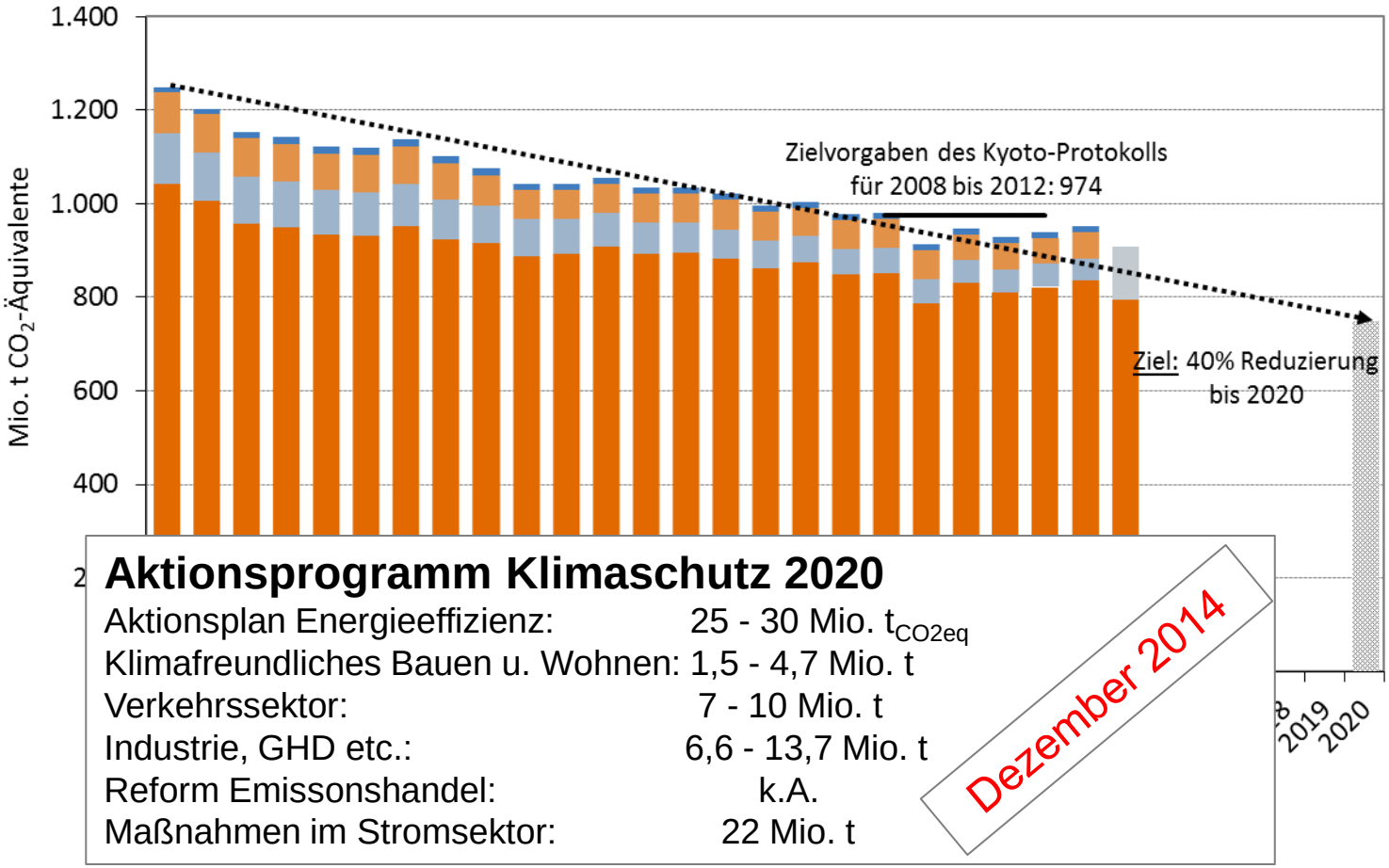
(Ohne Beschäftigte in Steinkohlekraftwerken)

- **Indirekt Beschäftigte: keine Angabe**

1) vgl. EEFA, 2011
2) Ca. 93% für Stromerzeugung

3) ca. 88% für Stromerzeugung
SK Stromerzeugung: 82% Importkohle

Treibhausgasemissionen in Deutschland



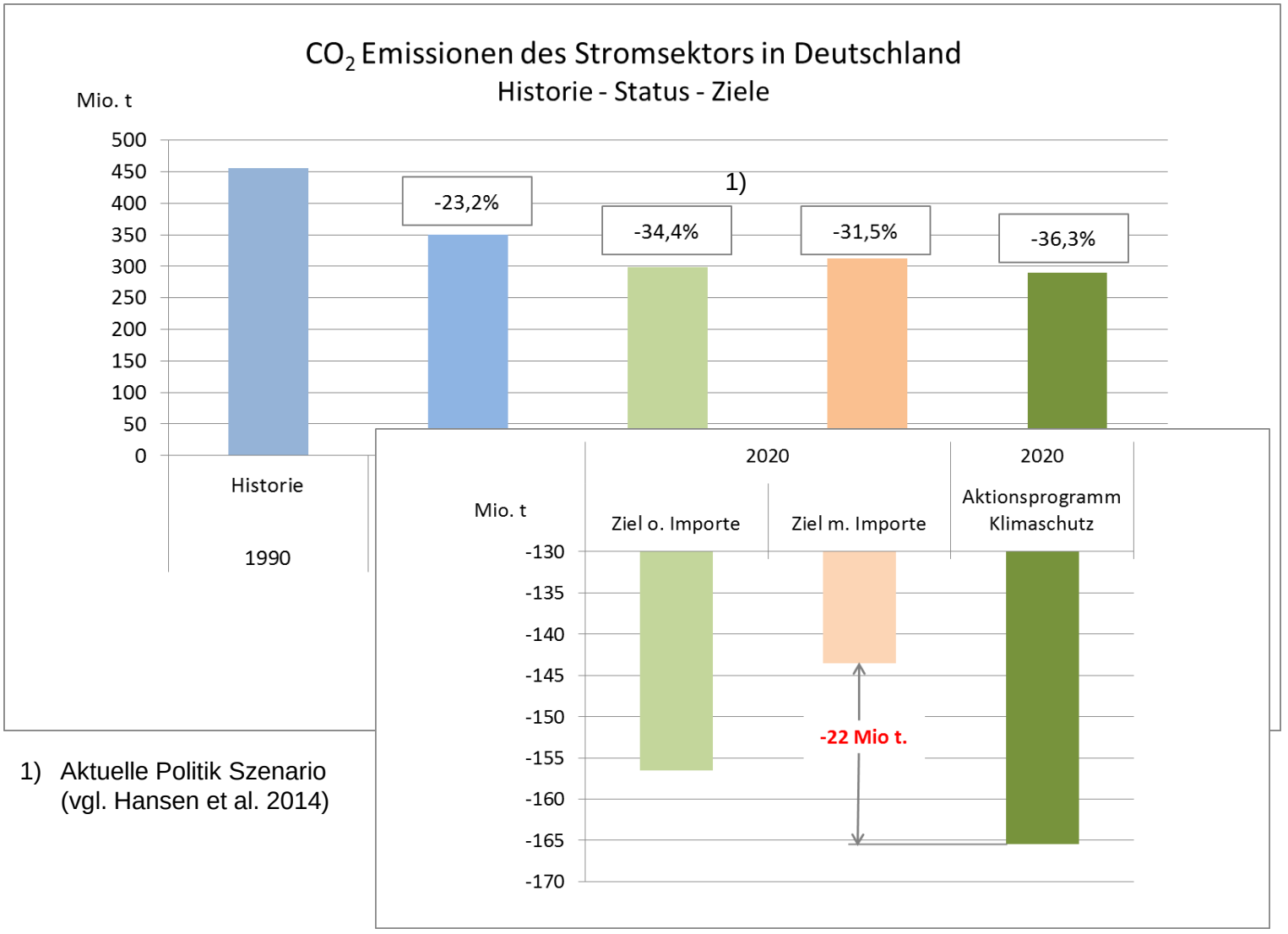
Aktionsprogramm Klimaschutz 2020

Aktionsplan Energieeffizienz:	25 - 30 Mio. t_{CO2eq}
Klimafreundliches Bauen u. Wohnen:	1,5 - 4,7 Mio. t
Verkehrssektor:	7 - 10 Mio. t
Industrie, GHD etc.:	6,6 - 13,7 Mio. t
Reform Emissonshandel:	k.A.
Maßnahmen im Stromsektor:	22 Mio. t

Dezember 2014

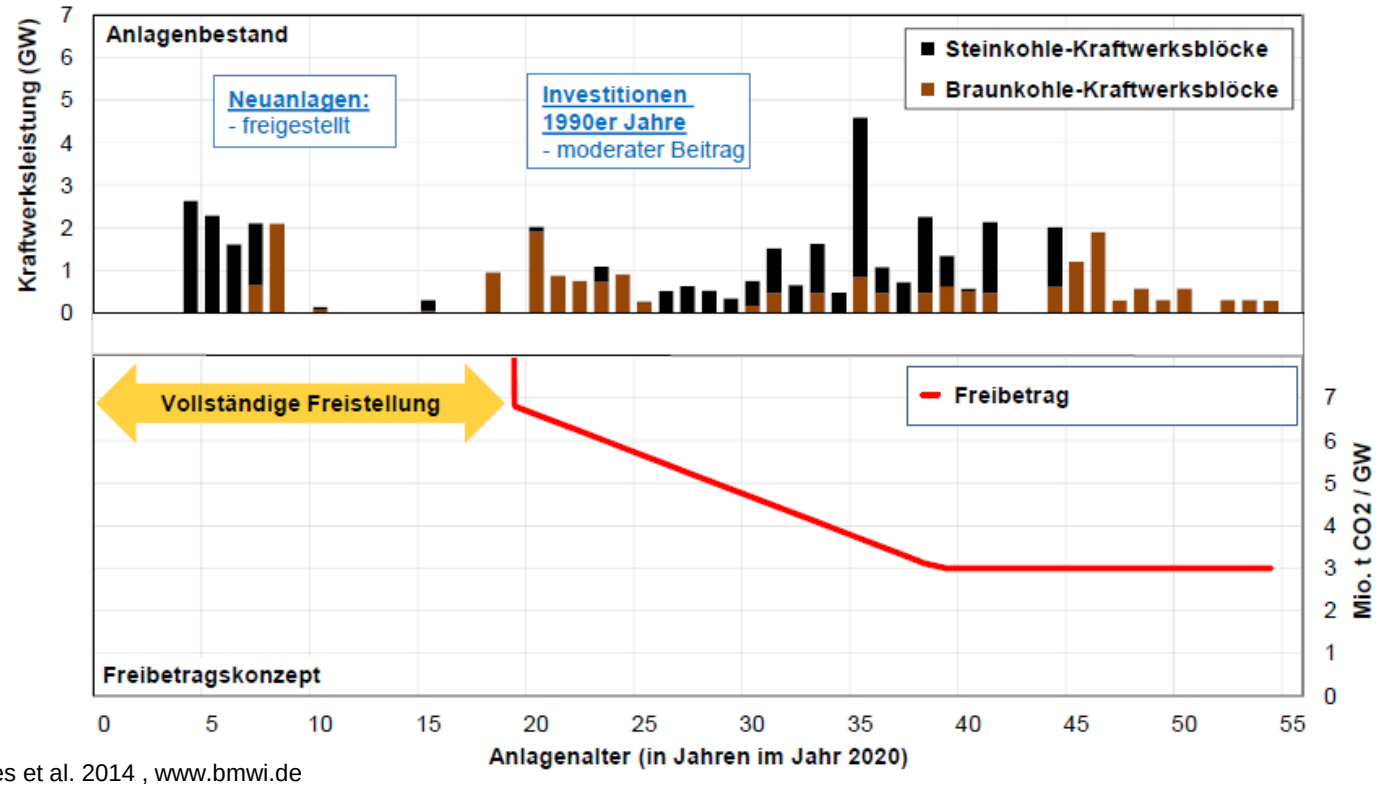
Quelle: Monitoringbericht 2014, Wert für 2014 (vorläufig): Ziesing, et Heft 9 (2015)

Klimaschutzbeitrag



1) Aktuelle Politik Szenario (vgl. Hansen et al. 2014)

Ursprünglicher Vorschlag des BMWi

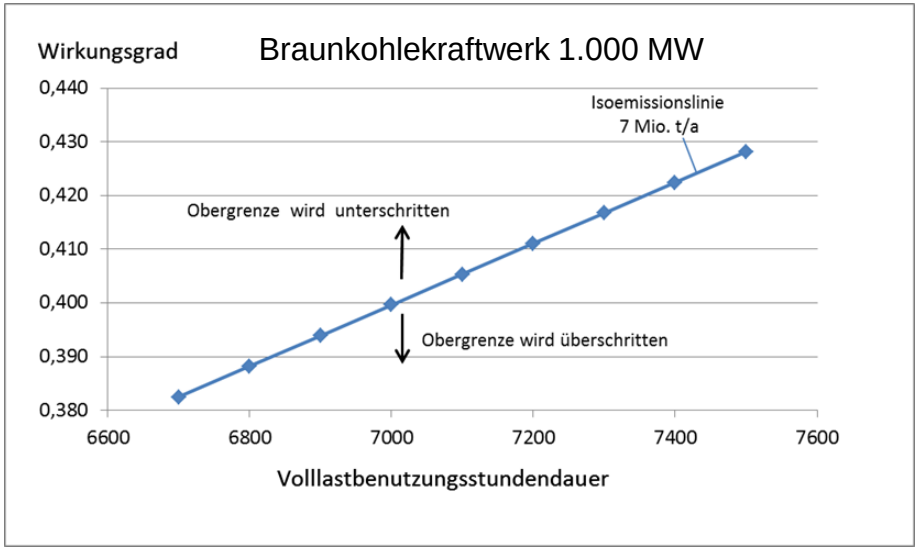


Quelle: Matthes et al. 2014 , www.bmwi.de

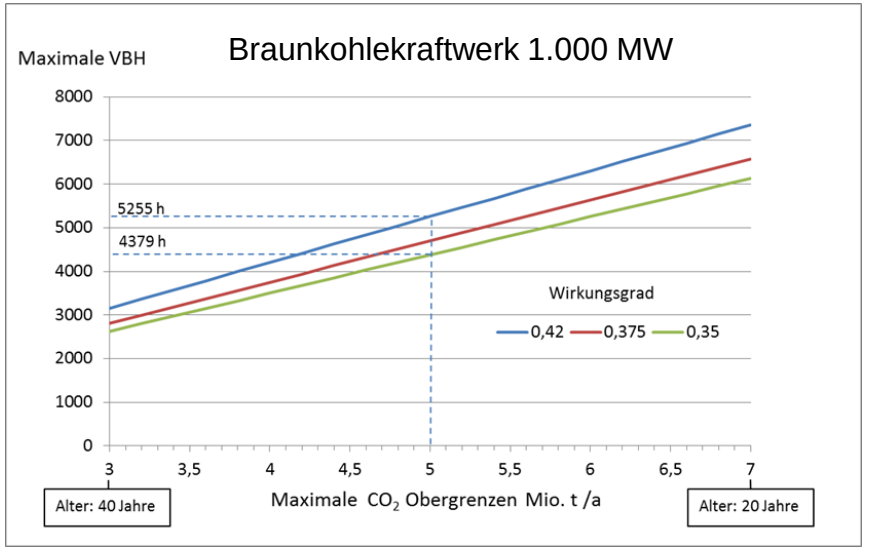
- Für Anlagen >20 Jahre (ca. 60% der heutigen Kap.) : Emissionsobergrenze 7 Mio. t/GW
- Ab Betriebsjahr 21 bis 40: Sukzessives Abschmelzen des Freibetrages (von 7 auf 3 Mio.t/GW)
- Bei Überschreitung der Emissionsobergrenze: Zahlung einer Pönale (ca. 20 €/tCO_2)

Auswirkungen des Klimabeitrages I

Abhängigkeit von Wirkungsgrad und der Auslastung bei einer Obergrenze von 7 Mio. t/a (Alter der Anlage: 20 Jahre)



CO_2 Obergrenzen in Abhängigkeit vom Wirkungsgrad und der Auslastung



Beispiel: Kraftwerk Weisweiler (E,F,G,H)

Installierte Leistung: 1.800 MW[1)]

Alle Blöcke > 40 Jahre alt

1.600 Beschäftigte (Kraftwerk, Tagebau Inden)

Alternative 1: 170 Mio. €/a Pönale

Alternative 2: Auslastung < 3.000 Stunden

1) Ohne Vorschaltturbinen 2 x 190 MW

Fragen zum BMWi Vorschlag

- Wie werden sich die EVU verhalten ? Lenkungswirkung des Vorschlags ?
  - Pönale zahlen
  - Abschaltung von Kraftwerken, wieviel Anlagen ? KWK Anlagen ?
- Strompreiserhöhungen ? Auswirkungen auf die EEG-Umlage ?
- Auswirkungen auf die (Strom-)Im- und Exportbilanz ?
- Emissionsseitige Auswirkungen im europäischen Kontext ?
  EU Netto-Emissionsreduzierung oder nur „Face lifting“?
- Beschäftigungsseitige Auswirkungen ?
- Netzseitige Auswirkungen ?
- Reservebedarf bei gleichzeitigem Kernkraftausstieg ?
- Auswirkungen auf den Emissionshandel ?
- Verstoß gegen EU-Wettbewerbsrecht ?

Der Kompromiss: Vereinbarung zwischen Bundesregierung und Energieversorgungsunternehmen

Aus dem Eckpunktepapier der Bundesregierung vom 1.7.2015

Maßnahmen	Zusätzlicher CO^2-Minderungsbeitrag pro Jahr	Kosten
Kapazitätsreserve mit 2,7 GW Braunkohlekraftwerken	11,0 bis 12,5 Mio. t CO^2	Umlage ca. 230 Mio. € pro Jahr BMWi Pressemitteilung vom 25.10.2015
Ggf. zusätzliche Minderung der Braunkohlewirtschaft	1,5 Mio. t CO^2	Zu klären
Zusätzliche KWK-Förderung	4 Mio. t CO^2	500 Mio. Euro/Jahr über KWK-Umlage umzulegen
Effizienz im Gebäudebereich	2,5 Mio. t CO^2	Öffentliche Mittel
Effizienz in den Kommunen	1,0 Mio. t CO^2	Öffentliche Mittel
Effizienz in der Industrie	1,0 Mio. t CO^2	Öffentliche Mittel
Effizienz bei der DB AG	1,0 Mio. t CO^2	Öffentliche Mittel
Gesamt	**22 Mio. t CO^2**	

Der Kompromiss: Vereinbarung zwischen Bundesregierung und Energieversorgungsunternehmen vom 25.10.2015 (im Strommarktgesetz vom 4. November 2015 enthalten)

JÜLICH FORSCHUNGSZENTRUM

Überführung in die Reserve bzw. Stilllegung von Braunkohlekraftwerken

	Leistung (netto)	Inbetriebnahme	KWK	Verfügbarkeitsreserve	Stilllegung	Alter (Reserve)	Alter (Stilllegung)	Bemerkungen	
Frimmersdorf P	284	1966	Ja	01.10.2017	01.10.2021	51	55		
Frimmersdorf Q	278	1970	Nein	01.10.2017	01.10.2021	47	51		
Niederaussem E	296	1970	Nein	01.10.2018	01.10.2022	48	52		
Niederaussem F	301	1971	Nein	01.10.2018	01.10.2022	47	51		
Neurath C	292	1973	Nein	01.10.2019	01.10.2023	46	50		
Jänschwalde E	463	1987	Ja	01.10.2019	01.10.2023	32	36	Modernisiert 1996	
Jänschwalde F	463	1987	Ja	01.10.2018	01.10.2022	31	35	Modernisiert 1996	
Buschhaus	330	1985	Nein	01.10.2016	01.10.2020	31	35		
Summe	**2707**								
Summe RWE	**1451**								
Summe Vattenfall	**926**								
Summe Mibrag	**330**								
Anmerkungen: Leistungsangaben stammen aus der Kraftwerksdatei, Stilllegungsdaten aus EVU Pressemitteilungen									

Zum Vergleich

Stilllegung der Kernkraftwerke bis 2022: 12 GW (≈ 92 TWh[1)])
Stilllegung der Braunkohlekraftwerke bis spätestens 2023: 2,7 GW (≈ 18 TWh[2)] ≈ 20 Mio. tCO_2)

1) Stromerzeugung im Jahr 2014, 2) Auslastung im Jahr 2014

Versorgungsaufgaben von Kohlekraftwerken

- **Deckung der Lastnachfrage (Dipatch), ca. 45% der deutschen Stromversorgung**
- **Fernwärmeerzeugung (Kraft-/ Wärmekopplung)**
- **Bereitstellung von Regelleistung** (Primär-, Sekundär- und Tertiärregelleistung)
  - Spannungsqualität (Spannungshöhe, Frequenz etc.)
  - Regelleistung (z.B. Abweichungen von Soll- und Isteinspeisung)
- **Redispatch**
- **Deckung des Blindleistungsbedarfs**
- **Reservekraftwerke** (nehmen nicht am Markt teil)
- **....**

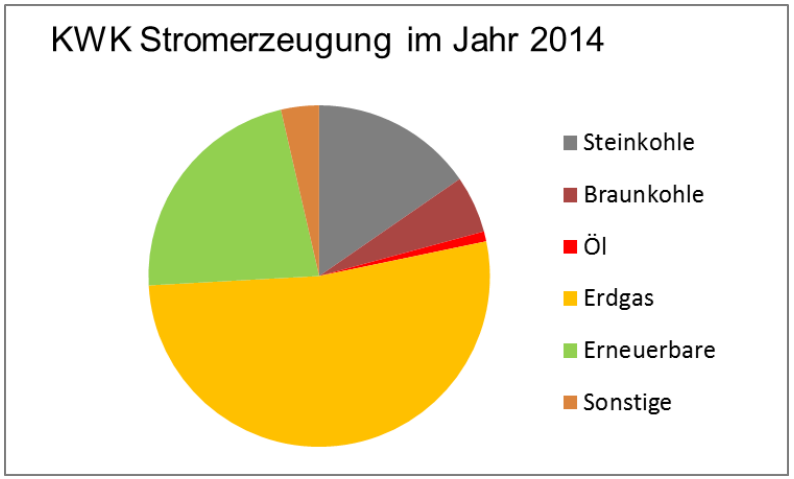
Fernwärmeerzeugung durch Kohlekraftwerke

Anteil an der gesamten KWK Stromerzeugung im Jahr 2014: ca. 20,8% (19,6 TWh[1)])

davon

- Braunkohle: 5,4%
- Steinkohle: 15,4%

1) Berechnet gemäß FW308



Quelle: Fahl et al. 2015, BWK 5/2015

KWK Anteil (Leistung)

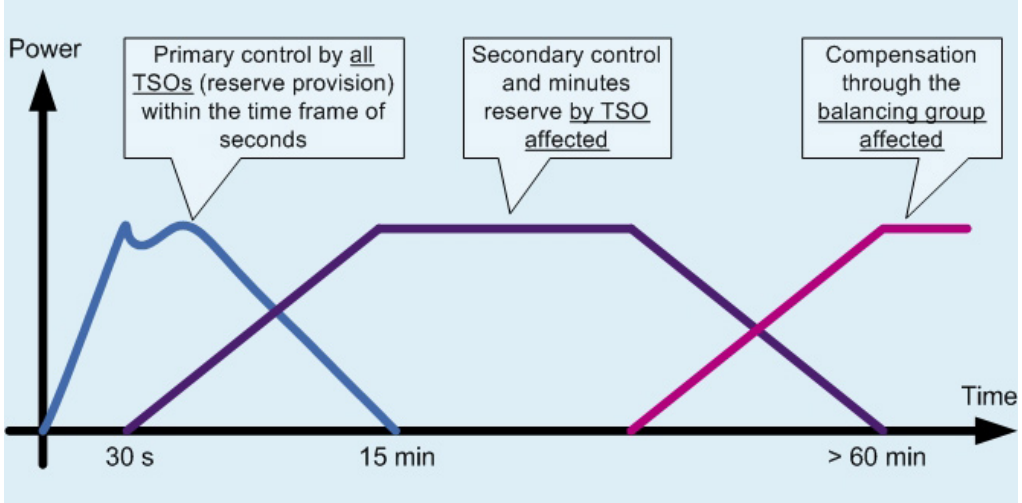
Steinkohlekraftwerke:	ca. 65%
Braunkohlekraftwerke:	ca. 56%

KWK Anteil (Blockanzahl)

Steinkohlekraftwerke:	ca. 83 (= 74%)
Braunkohlekraftwerke:	ca. 23 (= 56%)

Quelle: FZ Jülich, 2015

Regelleistung



Quelle: regelleistung.net

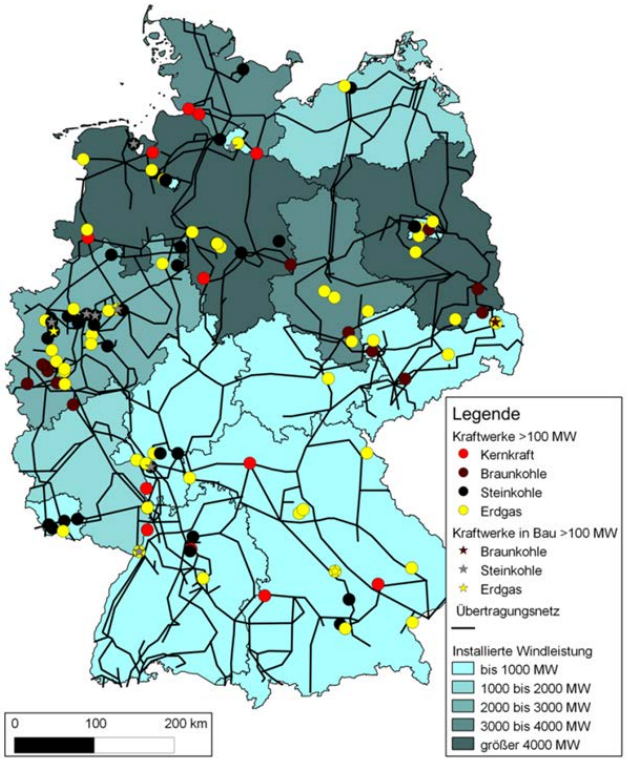
	Primärregelung	Sekundärregelung	Minutenreserve
Aktivierung	30 Sekunden	5 Minuten	15 Minuten
Dauer	0 < t < 15 min	30 sec > t < 60 min	15 min < t < 60 min
Marktgröße (MW)	550	± 2.000 - 2.400	± 2.440 – 3.200
Minimumangebot	± 1 MW	± 5 MW	± 5 MW
Anbieter 2014[1)]	21	28	42
Saldierte Kosten 2013	85 Mio. €	353 Mio. €	156 Mio. €
Heutige Techniken	Dampf-/Gasturbinen	Gas-/Kohlekraftwerke, Pumpspeicher	Gas-/Kohlekraftwerke, Pumpspeicher, abschaltbare Verbraucher

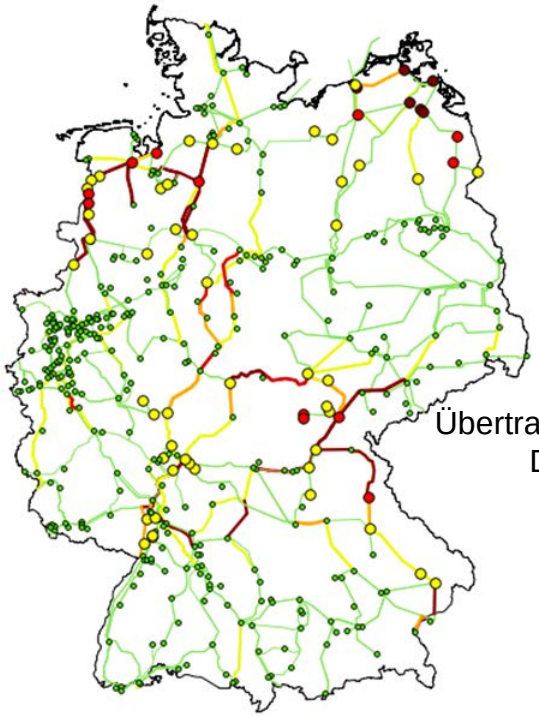
1) präqualifiziert

Quelle: BNA Monitoringbericht 2014

Redispatch

Unter **Redispatch** sind Eingriffe in die Erzeugungsleistung von Kraftwerken zu verstehen, um Leitungsabschnitte vor einer Überlastung zu schützen. Droht an einer bestimmten Stelle im Netz ein Engpass, so werden Kraftwerke diesseits des Engpasses angewiesen, ihre Einspeisung zu drosseln, während Anlagen jenseits des Engpasses ihre Einspeiseleistung erhöhen müssen. Auf diese Weise wird ein Lastfluss erzeugt, der dem Engpass entgegenwirkt. Die eingespeiste Wirkleistung bleibt in Summe unverändert.





Übertragungsstromnetz in Deutschland

Quelle: Pesch, 2012

Redispatch: Heute und zukünftig

JÜLICH FORSCHUNGSZENTRUM

Entwicklung von Redispatchmaßnahmen

	2010	2011	2012	2013	2014
Anzahl der Stunden	1589	5000	7160	7966	8116
Volumen (GWh)	n.V.	n.V.	2566	2278	5131
Kosten für Redispatch (Saldo) Mio. €	48	129	165	n.V.	n.V.

Quelle: Bundesnetzagentur 2014: Monitoringbericht, BMWi 2015

Prognostizierter Redispatchbedarf (Konventionell und Reserve)

	2015/2016	2016/2017
Konventioneller Redispatchbedarf	5.100 MW	5.500 MW
Zusätzlicher Netzreservebedarf	*6.000 MW*	*7.000 MW*
Davon		
- Reservekraftwerke in Deutschland	2.600 MW	3.900 MW
- Netzreservekapazität im Ausland	3.400 MW	3.100 MW

Quelle: Bundesnetzagentur 2014: Bericht gemäß §3.1 ResKV

Reservekraftwerke

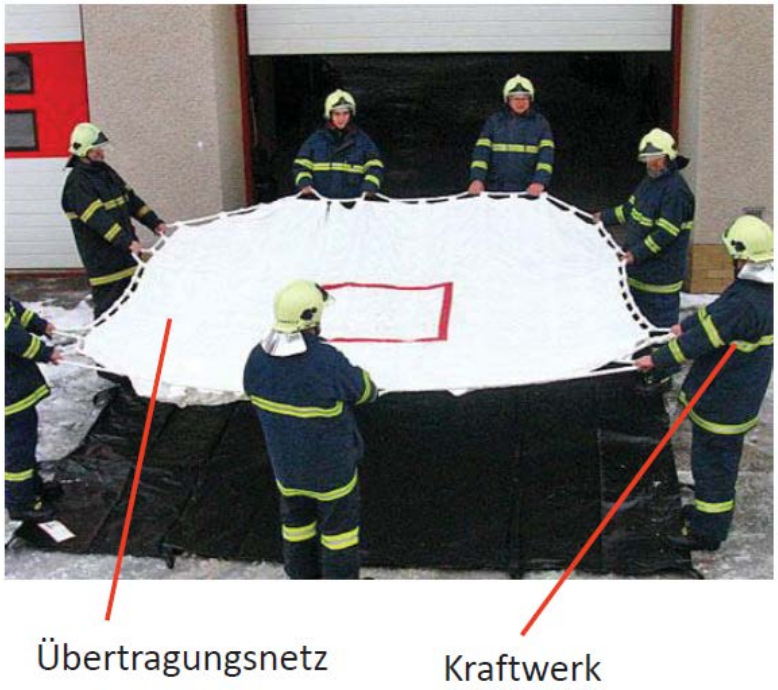
Kraftwerke, die von den Betreibern zur Stilllegung angezeigt wurden und von der Bundesnetzagentur gemäß ResKV als systemrelevant eingestuft wurden.

Kraftwerkstyp	Leistung
Steinkohle	494 MW
Erdgas	1.372 MW
Öl	1.196 MW
Summe	***3.062 MW***

Quelle: BNA Kraftwerksliste 2015, Stand: 25.9.2015

Blindleistungsversorgung

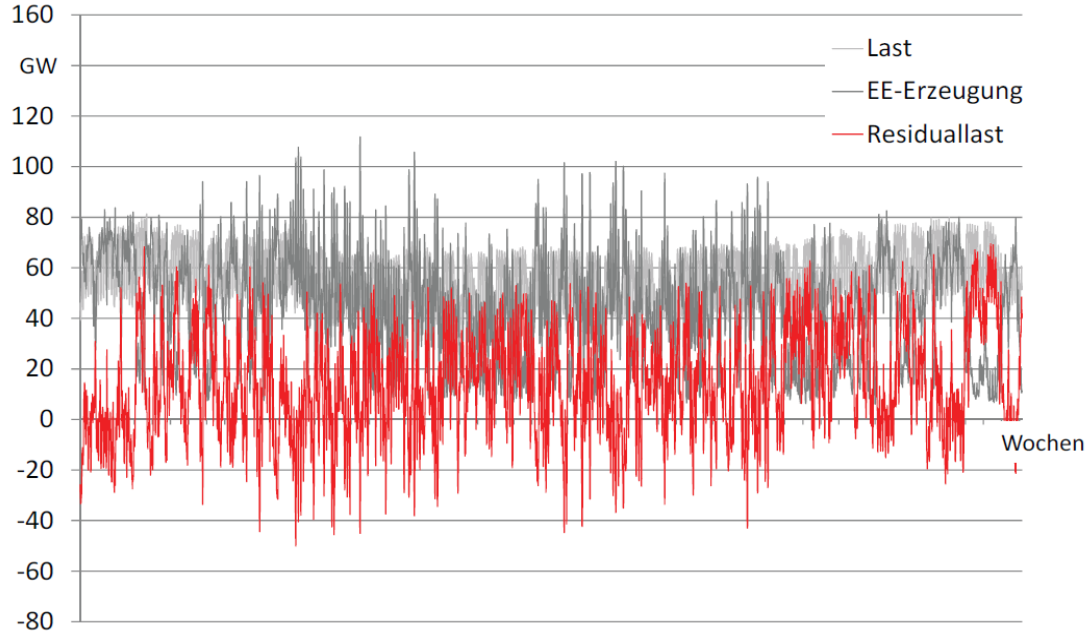
- Hohe, gleichmäßige und starre Spannung für Stabilität im Übertragungsnetz unverzichtbar:
  - stabiler Kraftwerksbetrieb
  - stabiler Netzbetrieb
- Kraftwerke tragen lokal zur Spannungshaltung im Netz bei:
  - Blindleistungsbereitstellung
  - Kurzschlussleistung
- Sicherung der Stabilität
  - räumliche Verteilung der Erzeugung
  - engmaschiges Übertragungsnetz



Quelle: Moser, 2011

Marktvolumen (Saldierte Kosten) 2013: 33 Mio. € (Quelle: BNA, Monitoringbericht 2014)

Last, EE-Erzeugung, Residuallast



80% EE

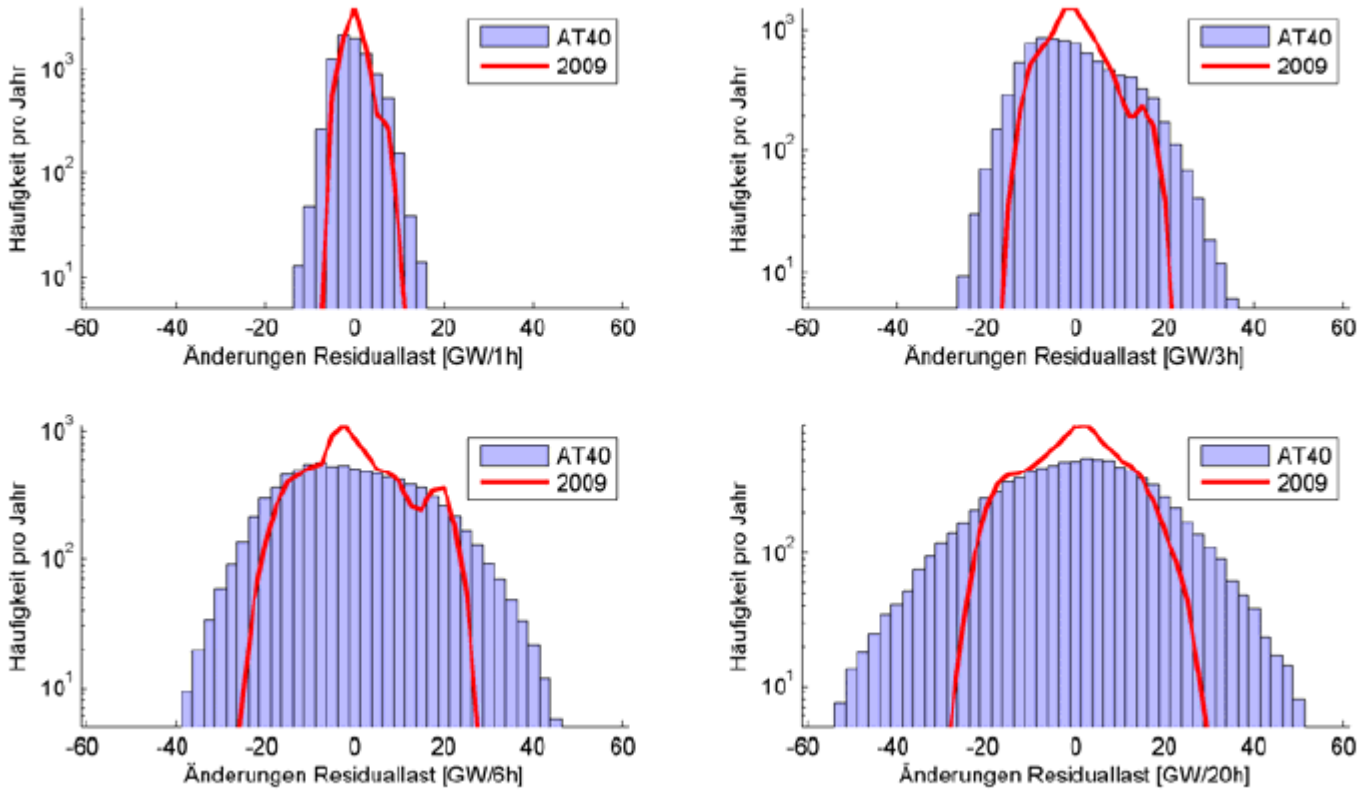
Quelle: VDE, Energiespeicher für die Energiewende (2012)

Last = Verbrauchernachfrage (Haushalte, GHD, Industrie, Verkehr, Export/Importe)

Residuallast = Last – Stromeinspeisung durch Erneuerbare (Must run)

Positive Residuallast: Last > Einspeisung bzw. Erzeugung
Negative Residuallast: Last < Einspeisung bzw. Erzeugung (= Überschussstrom)

Prognose der Residuallastcharakterisitik



Quelle: VDE, 2012

Zukünftig: - Zunahme der Häufigkeit der Lastgradienten
- Deutlich höhere Gradienten

Anmerkung: Szenario AT40: Anteil erneuerbarer Stromerzeugung bis 2020: 40%

Zukünftige Anforderungen an konventionelle Kraftwerke

JÜLICH FORSCHUNGSZENTRUM

	Braunkohle-Staubfeuerung			Steinkohle-Staubfeuerung		
	Heute		2025	Heute		2025
	Bestand	Neu	Neu[1)]	Bestand	Neu	Neu[1)]
Typische Größenklassen [MW]	150 - 900	1100	k.A.	100 - 860[9)]	1000	k.A.
Nenn-Wirkungsgrad [%]	30 - 43	43,5	45	33 - 45	46	48
Abnahme bei Teillast [%-Punkte] [2)]	bis 6[8)]	k.A.	k.A.	bis 6	bis 6	k.A.
Minimallast [%P_n] [4)]	60	50	25[3)]- 40	30 - 40	25	20[5)7)]
Lastgradient [%P_n/min]	1	3	4	1,5	3 - 4	6
	(im Lastbereich 50 – 90 % P_n)			(im Lastbereich 40 – 90 % P_n)		
Anfahrzeit [h]: Heißstart (< 8 h) [6)]	6	4	2	3	2,5	1 - 2
Anfahrzeit [h]: Kaltstart (>48 h)	10	5	4	10	8	6

k.A.: Es liegen keine Angabe vor

1) Zielvorstellungen bzw. Optimierungspotenzial

2) Höchstwert: Teillastwirkungsgrade bei Mindestlast (vgl. Jeschke et al. 2012)

3) mit BoAPlus Design theoretisch möglich

4) Duo-Blocks ermöglichen kleinere Minimallasten einer Gesamtanlage

5) Direkte Feuerung, gilt auch für Bestandsanlagen

6) In einigen Publikationen wird der Heißstart differenziert: für Heißstart nach 2 h werden für SK-KW Anfahrzeiten von 1,5 Stunden genannt (vgl. Trautmann et al. 2007).

7) Indirekte Feuerung < 10% (vgl. Jeschke et al. 2012)

8) Bereich 70 – 90% P_n : 1 bis 2% vgl. (Haase, 2012)

9) Bei einer Vielzahl von Blöcken ist die Kapazität deutlich <100 MW.

Quelle: Markewitz et al., 2015

Fazit

- Grundbasislast (thermisch, steuerbar) notwendig für den Betrieb des Stromnetzes (zukünftig jährlicher Monitoringbericht der BNA)
- Starker Anstieg von Redispatchmaßnahmen prognostiziert, da verzögerter Netzausbau. Dies bedeutet: Zusätzlicher Bedarf an **steuerbarer** thermischer Kapazität
- Zukünftig: Höhere Flexibilität von thermischen Kraftwerken notwendig (Investitionsmehrbedarf für Maßnahmen)
- Derzeit keine ausreichenden Anreize für viele Versorgungsaufgaben bei derzeitigem Marktdesign
- Kohleausstieg führt zu höheren Strompreisen
- Bis 2022: Ausstieg aus der Kernenergie und Wegfall von Braunkohle-kraftwerken (Stromproduktion: ca. 110 TWh)
  Wer übernimmt die Versorgungsaufgaben??

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !
Fragen ?