



Kampf der Studien

Dipl.-Ing. Alexander Buttler
Lehrstuhl für Energiesysteme
Technische Universität München

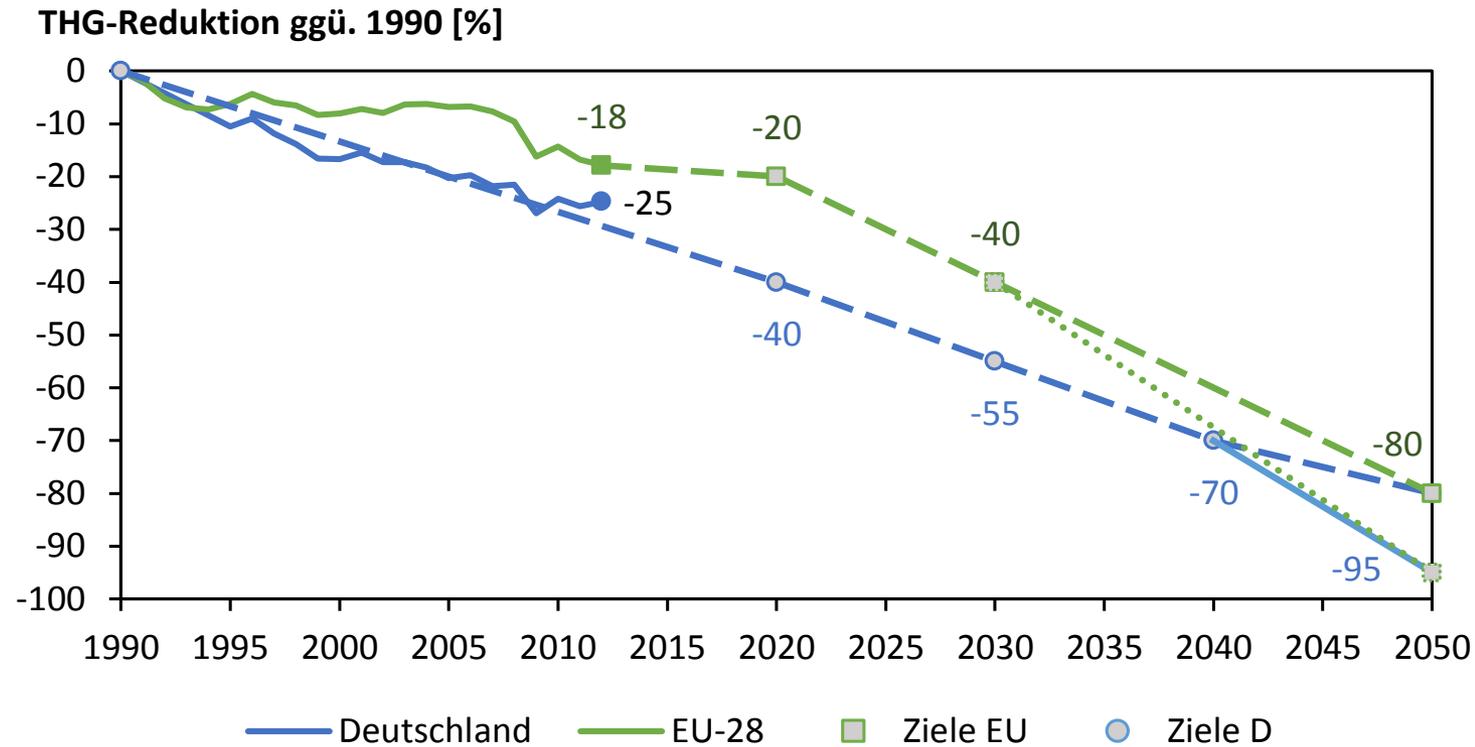
VDI Vortragsreihe Kraftwerkstechnik, 12.01.2015

Gliederung

- Einleitung
 - Klimapolitische Zielvorgaben in D und EU
 - Maßnahmen zur Reduktion der THG-Emission
- Zentrale Fragestellungen von Energiesystemstudien
- Studienüberblick
- Beispiel Methodik
- Auswertungen der Studien und Vergleich mit der historischen Entwicklung
 - Reduktion der THG-Emissionen
 - CO₂- und Brennstoffpreise
 - Entwicklung der Bruttostromnachfrage
 - Ausbau der erneuerbaren Energien (EE)
 - Import/Export
 - Auswirkungen auf konventionelle Kraftwerke
 - Speicherbedarf
 - Handlungsempfehlungen
- Zusammenfassung

Klimapolitische Ziele in Europa und Deutschland

Energiekonzept der Bundesregierung (2010)
EU Klima und Energiepaket (2009), EU Klimagipfel (2014)

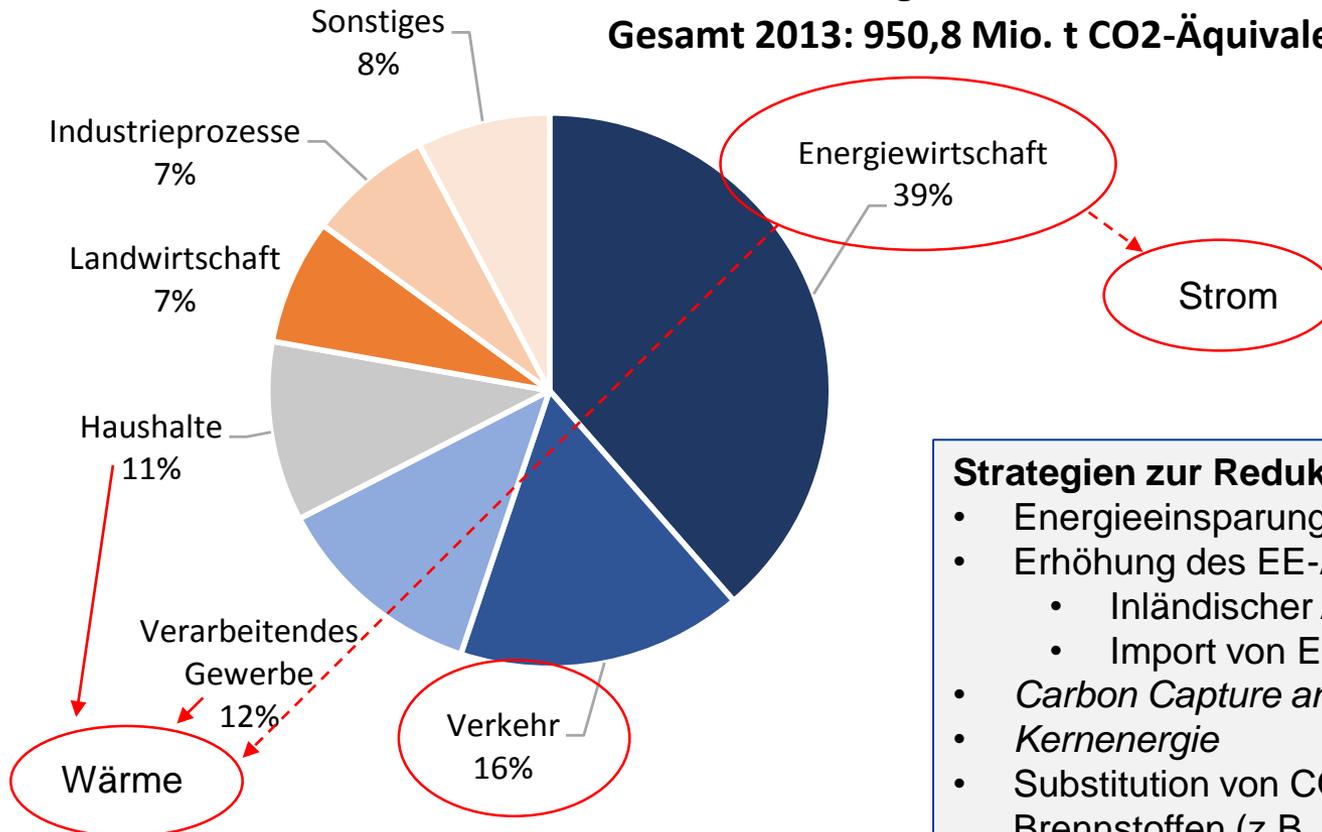


Daten: UBA 2014, EEA via Eurostat 2014

Welche Maßnahmen sind notwendig?

THG-Emissionen in Deutschland nach Quellkategorien:

Gesamt 2013: 950,8 Mio. t CO₂-Äquivalent



Strategien zur Reduktion der THG-Emissionen:

- Energieeinsparung (z.B. Effizienzsteigerungen)
- Erhöhung des EE-Anteils (am PEV)
 - Inländischer Ausbau der EE-Kapazitäten
 - Import von EE (Treibstoffe, Strom)
- *Carbon Capture and Storage (CCS)*
- *Kernenergie*
- Substitution von CO₂-intensiven fossilen Brennstoffen (z.B. Kohle durch Erdgas)

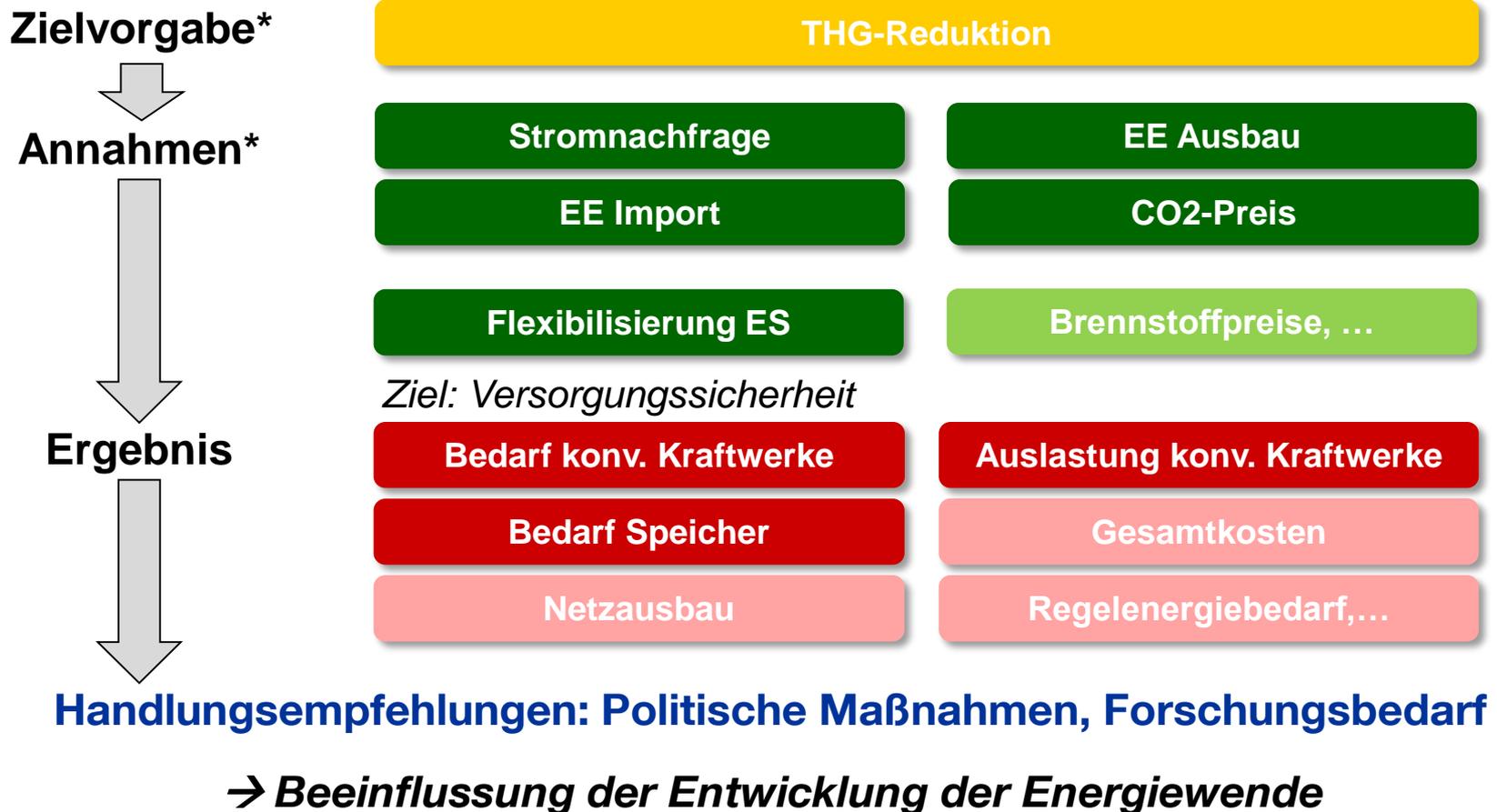
Daten: UBA Emissionssituation, Stand 25.02.2014

Besonderheiten des Stromsektors

- Stromerzeugung ist einer der größten THG-Emittenten (ca. 33 % an Gesamtemissionen 2013)
- Stromanwendungen ermöglichen Substitution fossiler Brennstoffe in anderen Sektoren:
 - Chemieindustrie: Chemiegrundstoffe (Power-to-X)
 - Verkehrssektor: Flüssige und gasförmige Treibstoffe (Power-to-X), Elektromobilität
 - Wärmesektor: Wärmepumpen, Power-to-Heat
- **Systemstabilität erfordert Echtzeitausgleich zwischen Erzeugung und Verbrauch**
- Schwierige Speicherung von Strom

→ **Vielzahl an Stromsektorstudien zur detaillierten (dynamischen) Analyse der Versorgungssicherheit (inkl. Regelleistung)**

Energiesystemstudien sind bedingte Prognosen basierend auf Szenarien



*Können auch als Ergebnis angesehen werden

Untersuchte Studien und Szenarien (I)

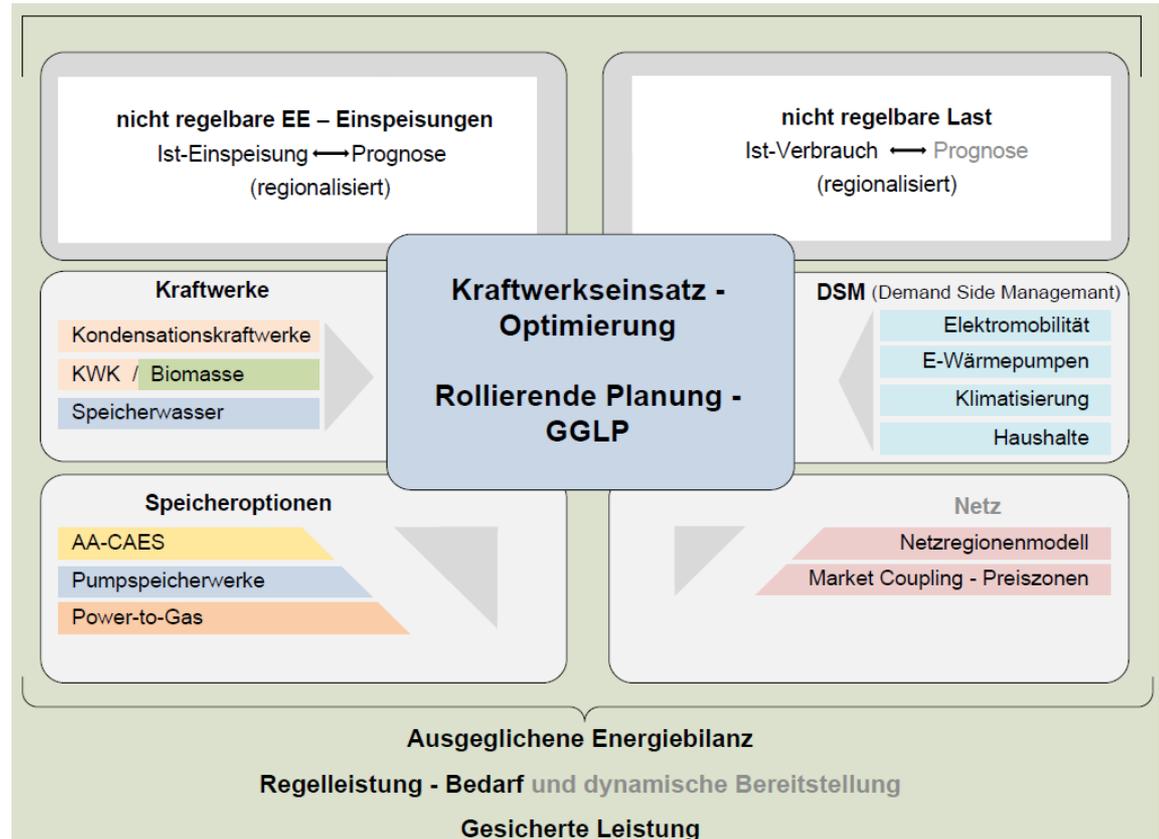
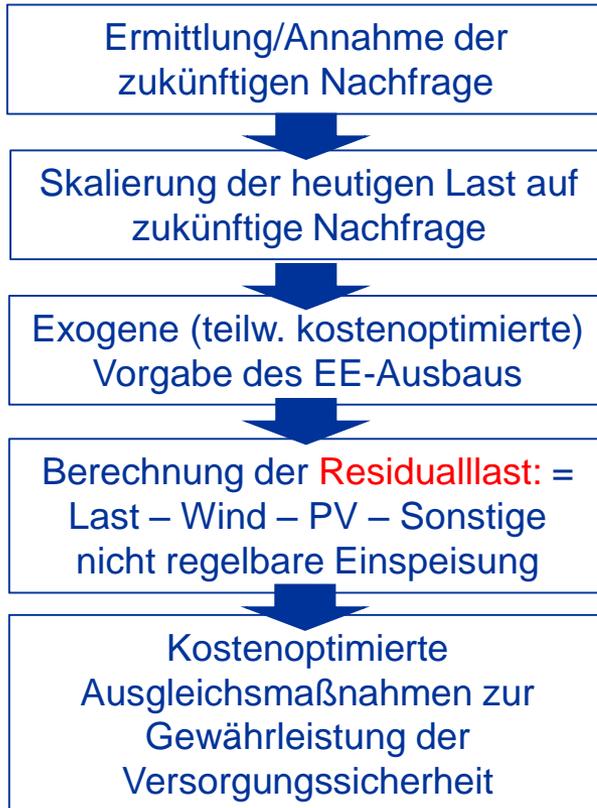
Kurztitel	Name der Studie	Auftraggeber	Bearbeitende Institute	Szenarien	Beschreibung	Datum
WWF (2009)	Modell Deutschland - Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken	WWF Deutschland	Prognos AG, Öko-Institut	Referenz	Buisness as Usual	Okt 09
WWF (2009) CCS				Innovation ohne CCS	Verstärkte Effizienz und EE ohne CCS	
				Innovation mit CCS	Verstärkte Effizienz und EE mit CCS	
BMWi (2011)	Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung / Energieszenarien 2011	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)	Prognos AG, EWI, GWS	Referenz	Buisness as usual	August 2010 / Juli 2011
				I A	Unterschiedliche Annahme der Laufzeitverlängerung der Kernenergie (I bis IV: 4-28 Jahre) und Nachrüstkosten (A/B)	
				II A		
				III A		
				IV A		
				I B		
				II B		
				III B		
	IV B					
UBA (2010)	Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen	Umweltbundesamt	Fraunhofer IWES	Regionenverbund	100 % EE in 2050	Jul 10
SRU (2011) 1.a	Wege zu 100 % erneuerbaren Stromversorgung	Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU)	DLR, Fraunhofer IWES	1.a	Selbstversorgung isoliert, Nachfrage 500 TWh	Jan 11
				1.b	Selbstversorgung isoliert, Nachfrage 700 TWh	
				2.1.a	Netto-Selbstversorgung, Austausch DK/NO, 500 TWh	
				2.1.b	Netto-Selbstversorgung, Austausch DK/NO, 700 TWh	
SRU (2011) 2.2.a				2.2.a	Maximal 15 % Nettoimport aus DK/NO, 500 TWh	
				2.2.b	Maximal 15 % Nettoimport aus DK/NO, 700 TWh	
				3.a	Maximal 15 % Nettoimport aus EUNA, 500 TWh	
				3.b	Maximal 15 % Nettoimport aus DK/NO, 500 TWh	
BMU (2012)	Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global	Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)	DLR, Fraunhofer IWES, IFNE	2011 A	E- und H2-Kfz	Mrz 12
				2011 B	Szenario A aber mit SNG statt H2	
				2011 C	100 % E-Kfz	
				2011 A'	Sz. A mit geringerer Effizienzsteigerung	
				THG 95	THG-Reduktion um 95 %	

13 Studien, 42 Szenarien: Auswahl basierend auf Relevanz und Vielfalt

Untersuchte Studien und Szenarien (II)

Kurztitel	Name der Studie	Auftraggeber	Bearbeitende Institute	Szenarien	Beschreibung	Datum
VDE (2012)	Energiespeicher für die Energiewende - Speicherungsbedarf und Auswirkungen auf das Übertragungsnetz für Szenarien bis 2050	VDE ETG	IAEW RWTH Aachen u.a.	Variannte A	kein Speichereubau (EE-Abregelung + flexible KW)	Jun 12
				Variannte B	Max. Kurzzeitspeichereubau	
				Variannte C	Max. Langzeitspeichereubau	
				Variannte D	Max. Kurz- und Langzeitspeichereubau	
				Variante E	halbierte Einspeicherleistung von D (teilw. Abregelung)	
RWE dena (2012)	Integration der erneuerbaren Energien in den deutsch-europäischen Strommarkt.	RWE AG	dena, IAEW RWTH Aachen		EE basierend auf BMU Leitszenario 2009	Aug 12
BEE (2013)	Möglichkeiten zum Ausgleich fluktuierender Einspeisung aus erneuerbaren Energien	Bundesverband Erneuerbare Energie e.V.	BET			Apr 13
BMWi (2014) Trend	Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose	BMWi	EWI, GWS, Prognos	Trendszenario	Fortschreibung aktueller Trends im Bereich Politik usw.	Jun 14
BMWi (2014) Ziel				Zielszenario	Einhaltung der Ziele des Energiekonzepts	
BMU(2014) AMS	Klimaschutzszenarien 2050	BMU	Öko-Institut, Fraunhofer ISI	AMS	Entwicklung basierend auf aktuellen Maßnahmen, EE-Ausbau nach BMU-Leitstudie 2011 Sz. A	Aug 14
BMU(2014) KS 80				KS 80	Zielszenario Energiekonzept mit 80 % EE in 2050, EE-Ausbau nach BMU-Leitstudie 2011 Sz. A	
BMU(2014) KS 90				KS 90	Zielszenario Energiekonzept mit 90 % EE in 2050	
Agora (2014)	Stromspeicher in der Energiewende	Agora Energiewende	FENES OTH Regensburg, IAEW RWTH Aachen, ef. Ruhr GmbH, ISEA RWTH Aachen	Flexibel unflexibel	Basierend auf NEP 2013	Sep 14
BMWi (2014) Roadmap	Roadmap Speicher	BMWi	Fraunhofer IWES, IAEW RWTH Aachen, Stiftung Umweltenergierecht		basierend auf BMU (2012) und aktueller Entwicklung	Nov 14
NEP (2014)	Netzentwicklungsplan Strom 2014 - Zweiter Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber	ÜNB: TransnetBW, 50Hertz, Amprion, Tennet	k.A.	A 2024	moderater Anstieg EE	Nov 14
B 2024				mittlerer Anstieg EE		
B 2034				Fortschreibung B 2024 um 10 Jahre		
C 2024				Starken Anstieg EE (abgeleitet aus den Zielen der Bundesländer)		

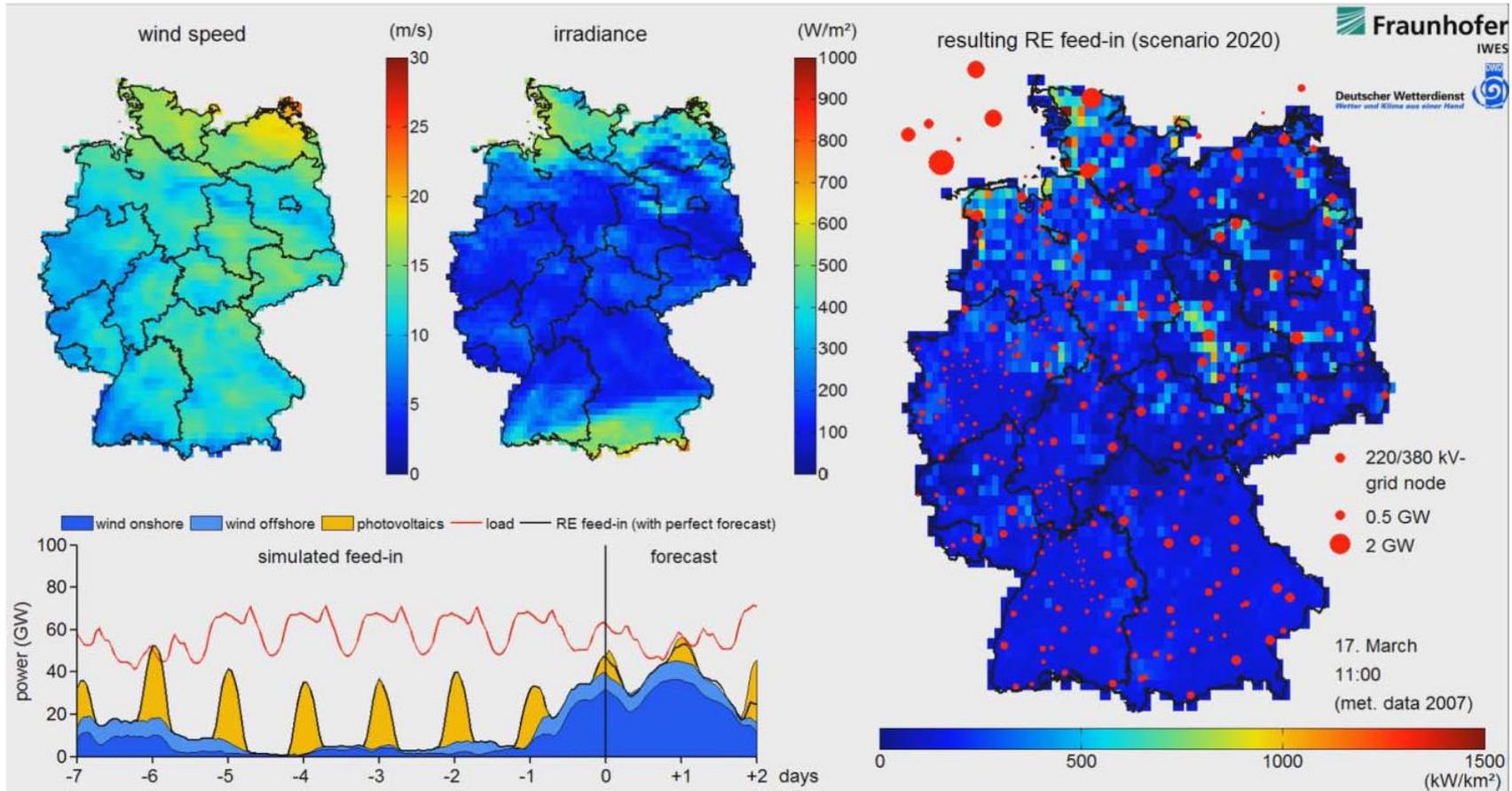
Methodik – Generelles Vorgehen



Quelle: BMU 2012

Analyse basiert meistens auf einem exemplarischen Jahr

Methodik – Räumlich und zeitlich aufgelöste Simulation fluktuierender EE

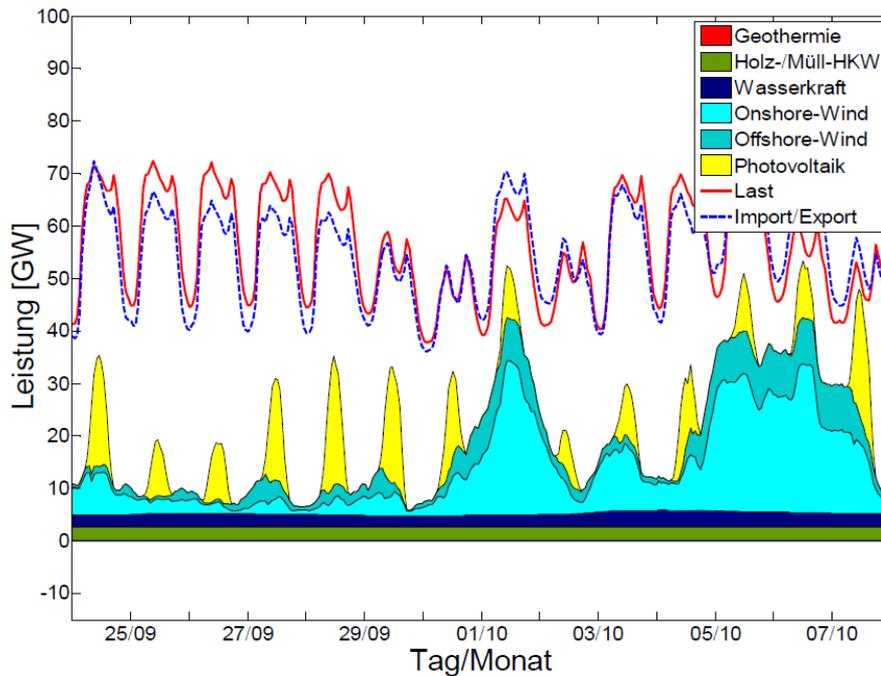


Quelle: BMU 2012

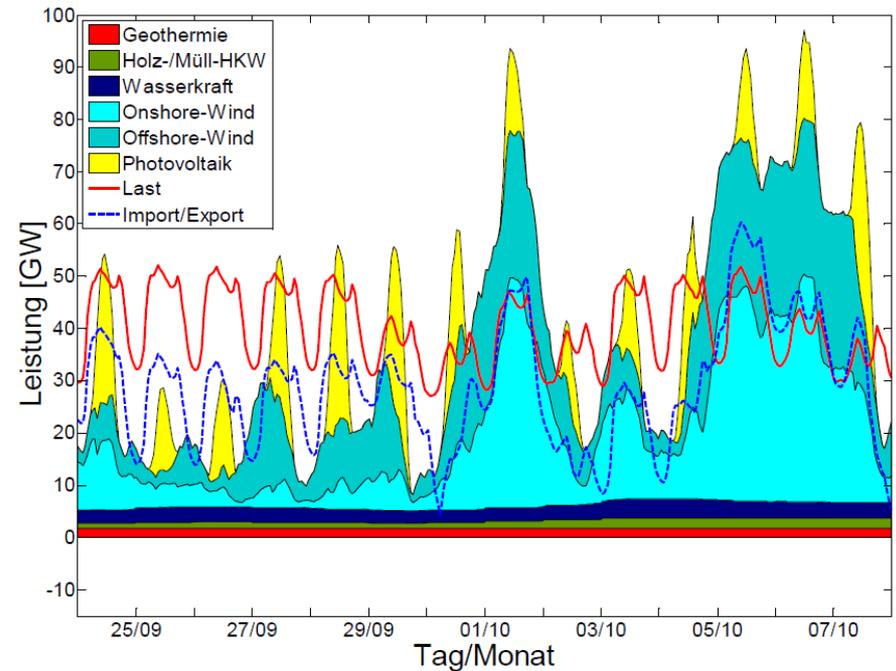
Übersetzung in Einspeisung durch Leistungskennlinien

Methodik – EE-Ausbau, Import/Export

2020



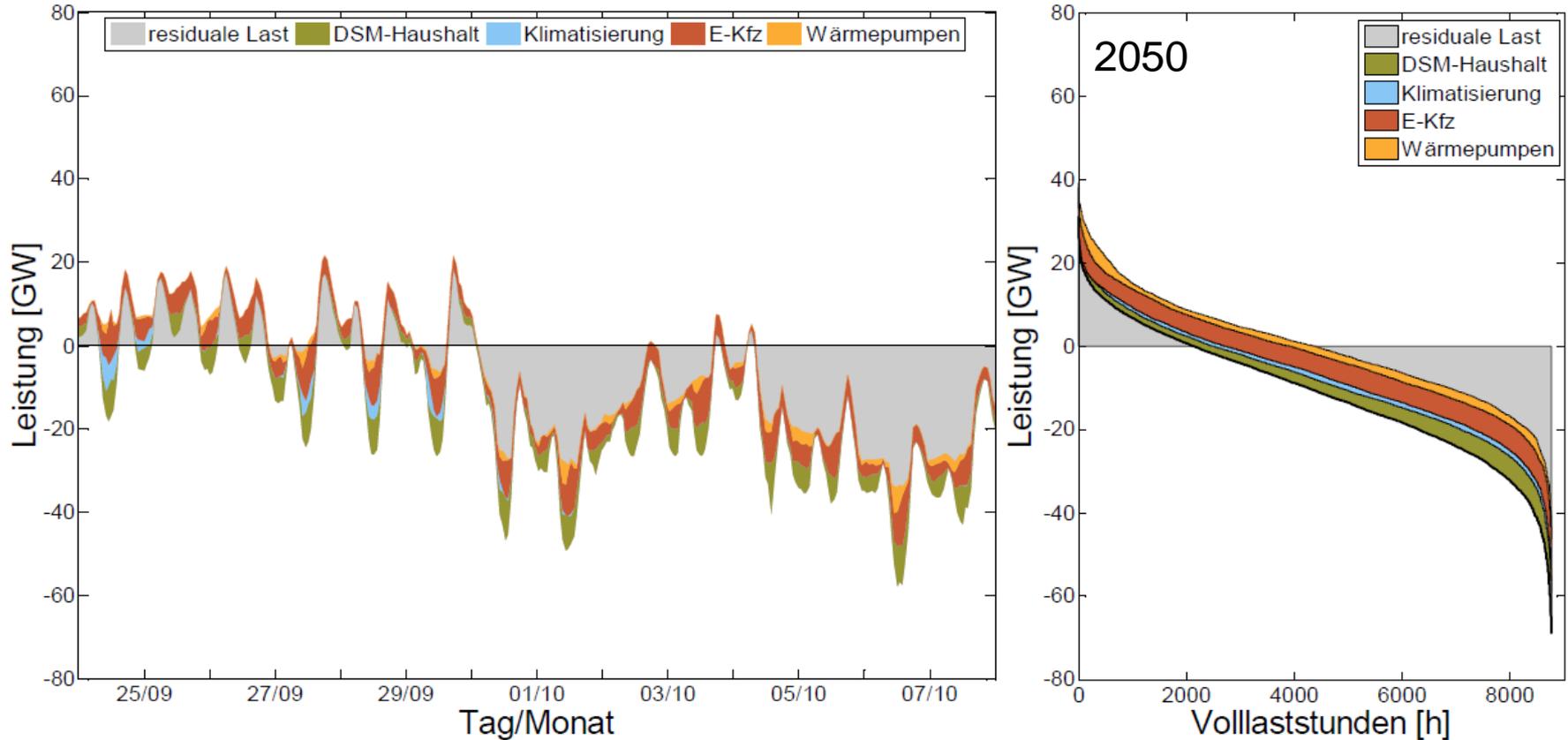
2050



Quelle: BMU 2012

Optimierter geographischer Ausbau in Deutschland

Methodik – Ausgleichsmaßnahme DSM

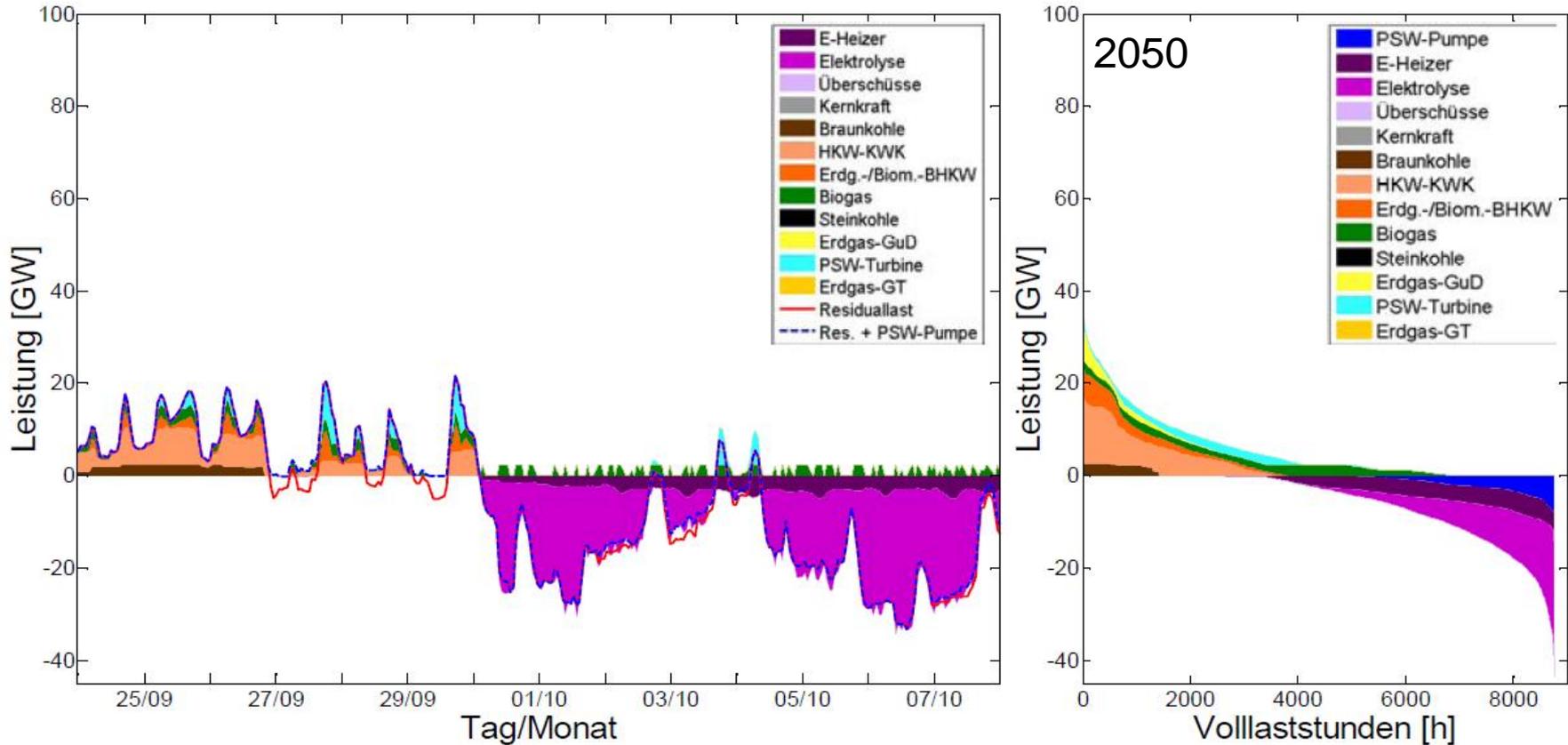


Quelle: BMU 2012

**Große Lastmanagementpotential werden zukünftig bei Elektromobilität
gesehen**

Verschiebeleistung und Verschiebezeit entscheidend

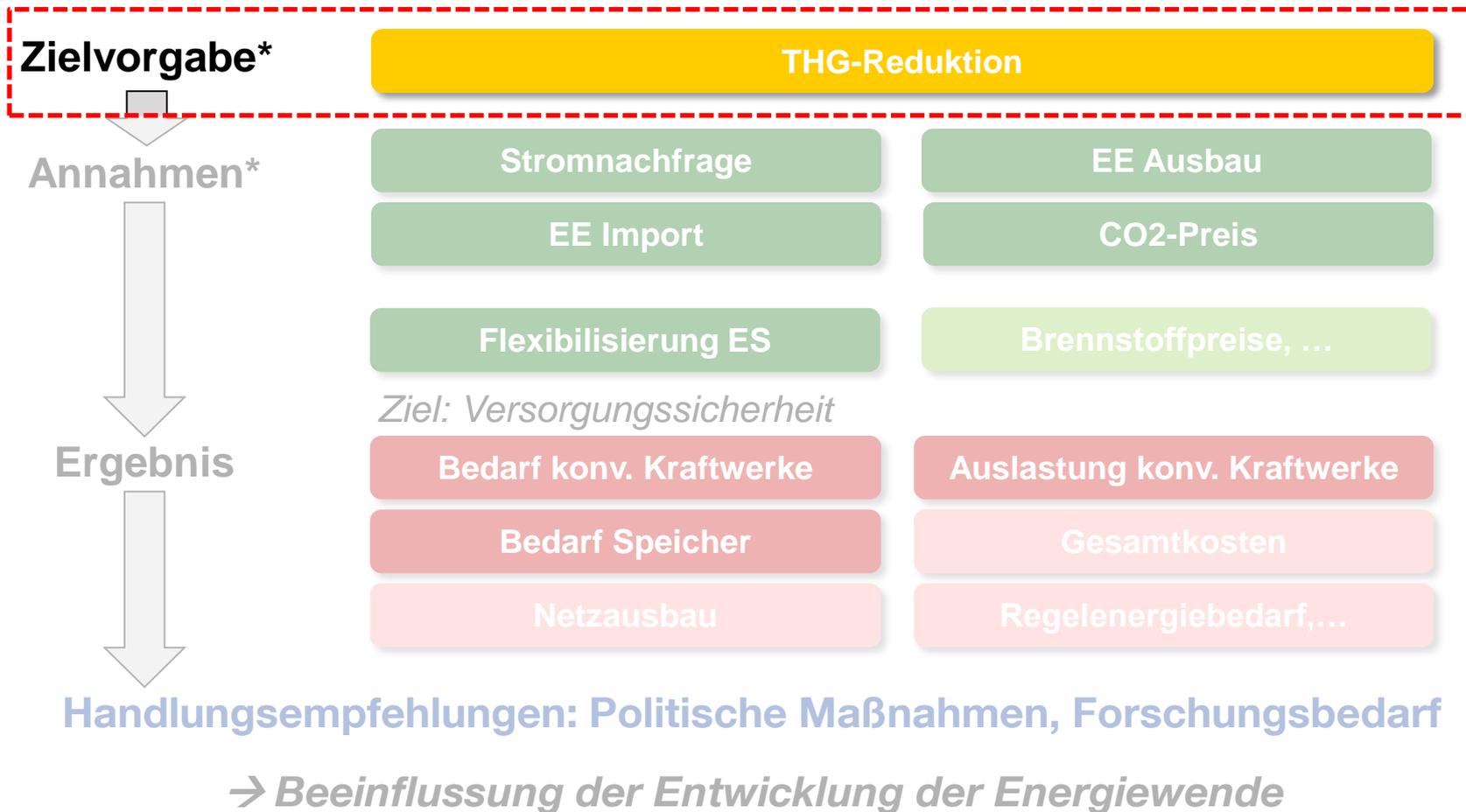
Methodik – Kostenoptimierter Speicher- und Kraftwerkseinsatz



Quelle: BMU 2012

Volkswirtschaftlich optimierte Deckung der Residuallast unter Berücksichtigung technischer Limitierungen (z.B. Anfahrdauer)

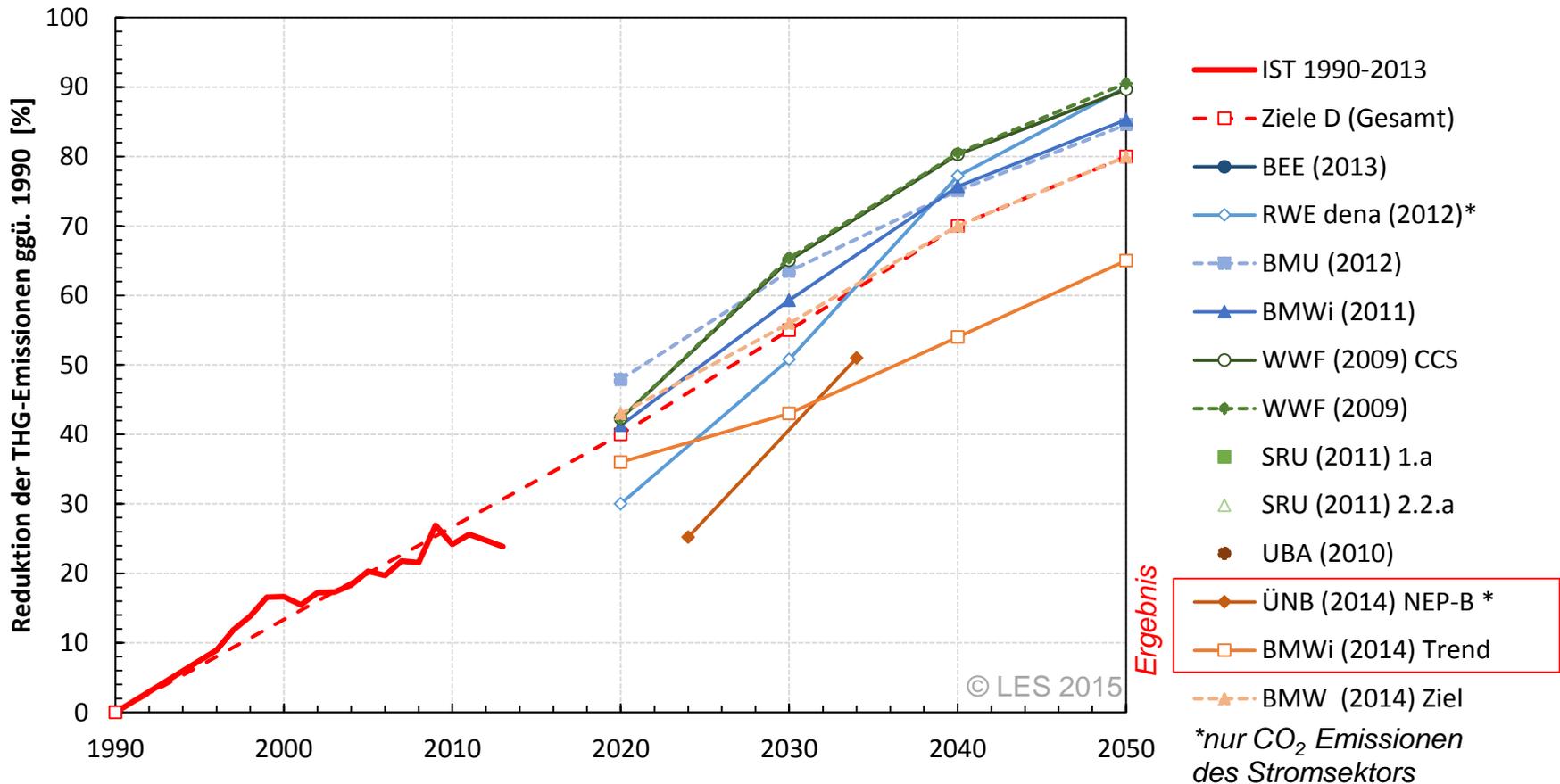
Energiesystemstudien sind bedingte Prognosen basierend auf Szenarien



*Können auch als Ergebnis angesehen werden

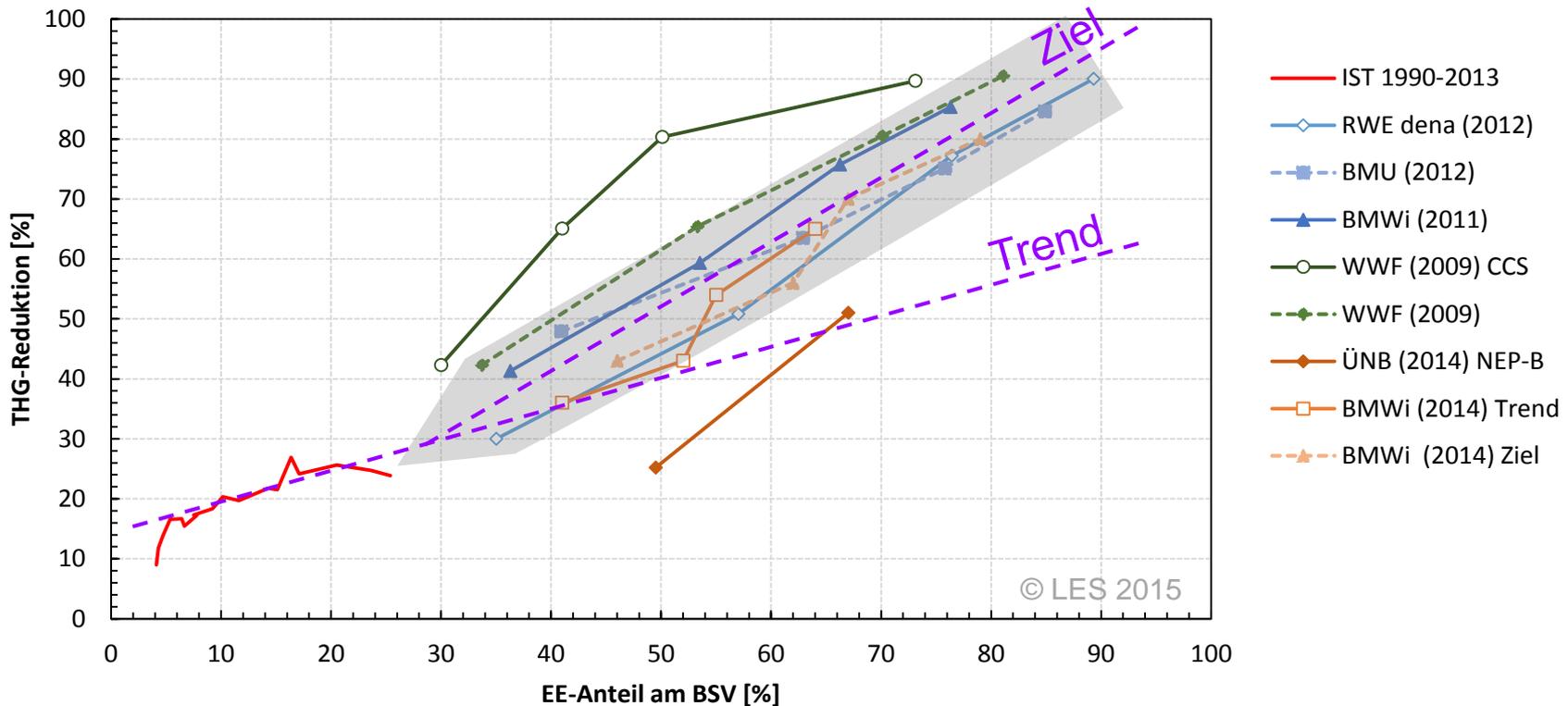
THG-Reduktion

Zielvorgabe/Ergebnis: Rückgang der (Energiebedingten) THG-Emissionen



Studien übertreffen die Mindestziele der THG-Emissionsreduktion

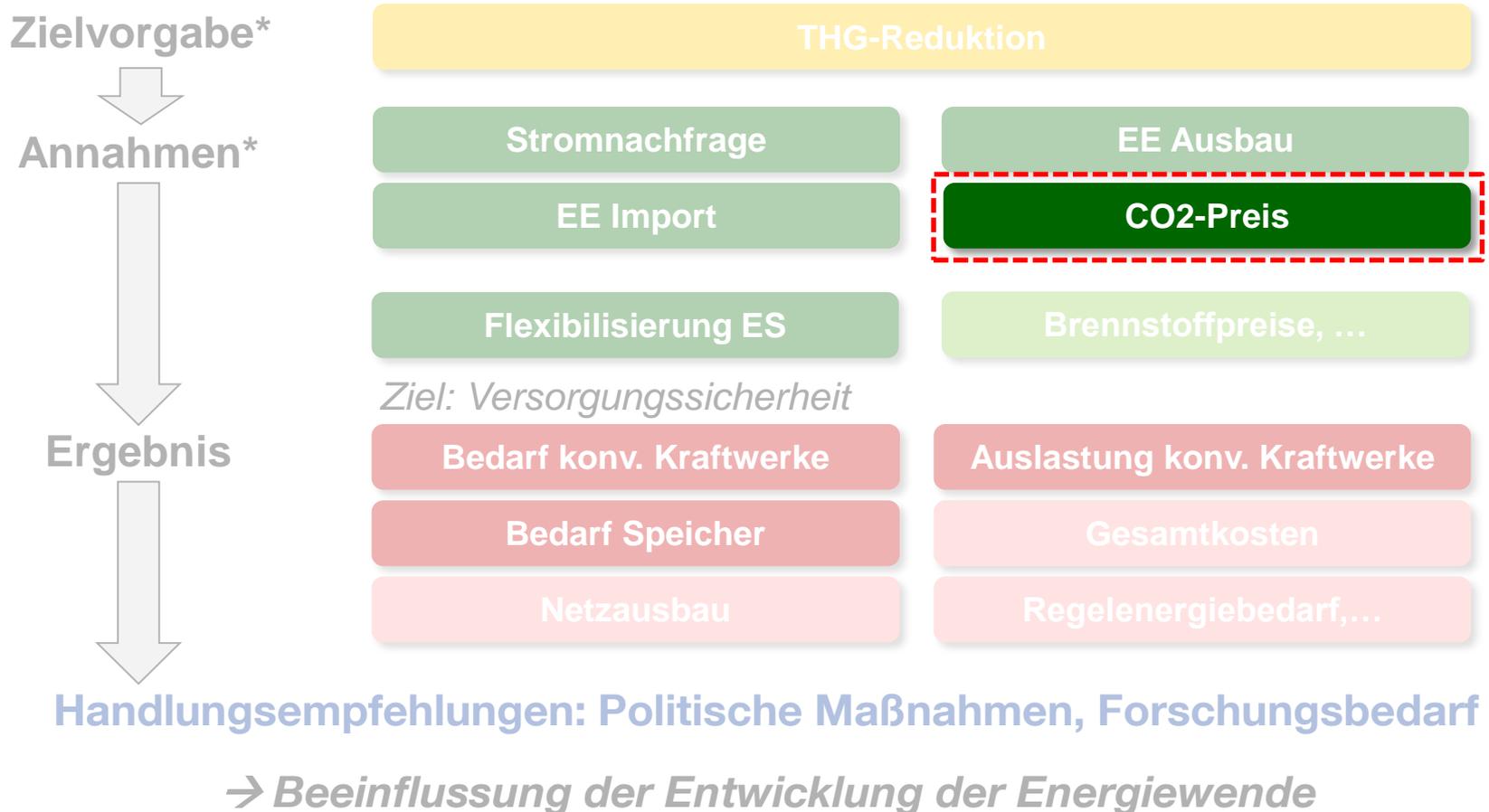
Benötigter EE-Anteil zur Reduktion der THG-Emissionen



Ursachen für Spreizung:

- Annahmen zu Rückgang des Bruttostromverbrauchs
- Zusammensetzung des restlichen Kraftwerkparcs (inkl. CCS)
- Stromexport von konventionellen Kraftwerken

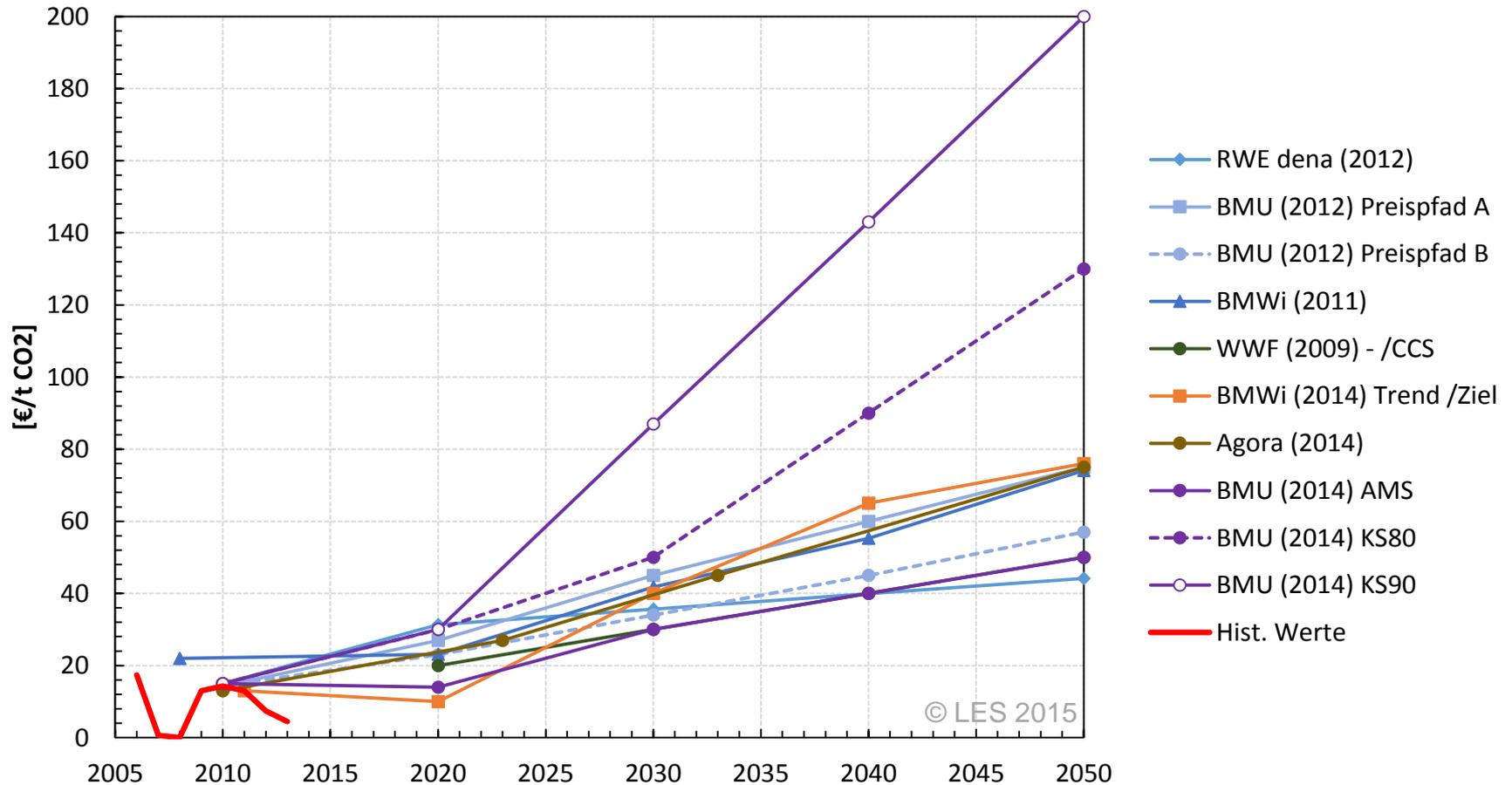
Energiesystemstudien sind bedingte Prognosen basierend auf Szenarien



*Können auch als Ergebnis angesehen werden

CO2-Preis

Entwicklung der CO2-Preise



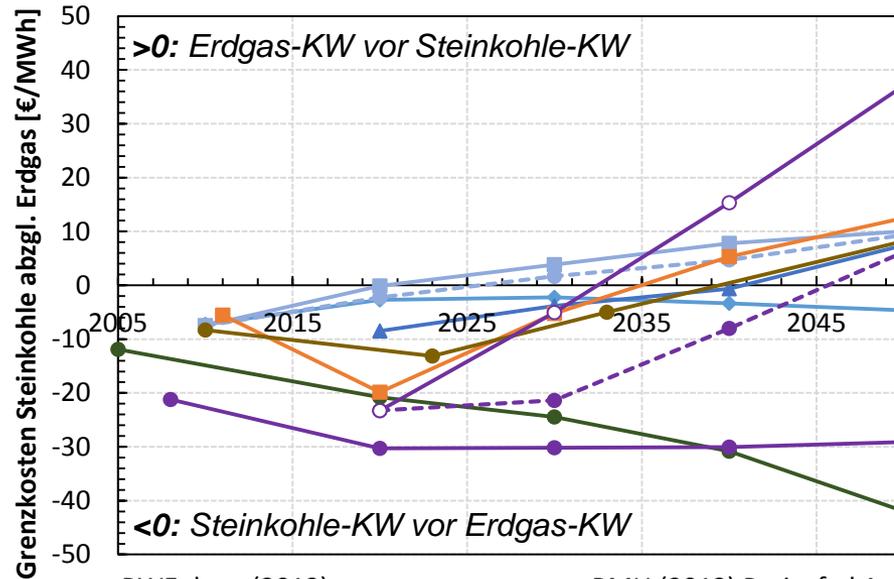
Steuerung der THG-Reduktion durch CO2-Preis:

→ Notwendiger CO2-Preis zur Einhaltung der THG-Reduktionsziele

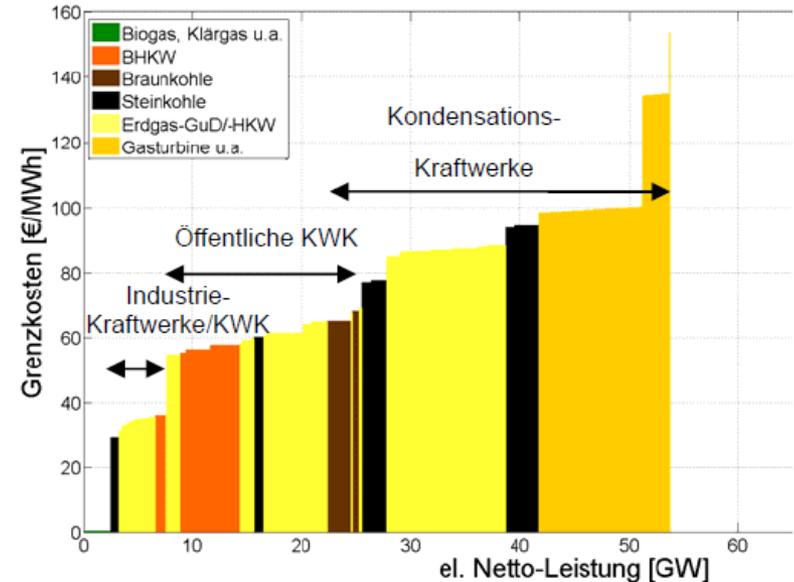
Auswirkung auf die Auslastung einzelner Kraftwerke

Differenz zwischen Steinkohle und Erdgas-KW hinsichtlich Brennstoff- und CO₂-Kosten
(~Stellung in Merit-Order) mit $\eta_{SK}=42\%$; $\eta_{EG}=54\%$:

$$\Delta_{SK-EG} \left[\frac{\text{Brennstoffpreis} + \text{Emissionsfaktor} \cdot \text{CO}_2\text{-Preis}}{\eta_{el}} \right]$$



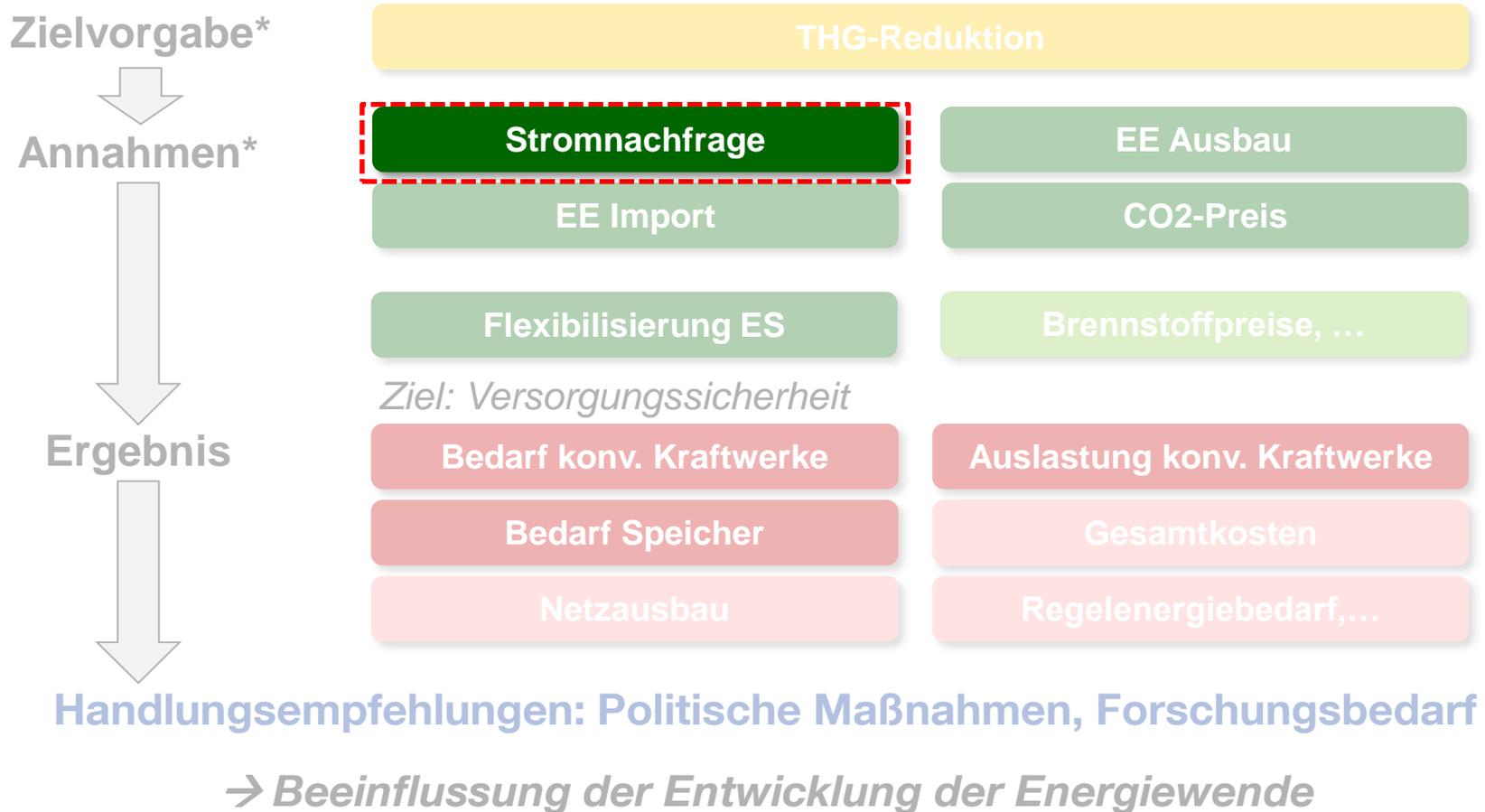
- RWE dena (2012)
- BMU (2012) Preispfad A
- BMU (2012) Preispfad B
- BMWi (2011)
- WWF (2009) - /CCS
- BMWi (2014) Trend /Ziel
- Agora (2014)
- BMU (2014) AMS
- BMU (2014) KS80
- BMU (2014) KS90



Bsp: Merit-Order 2050 BMU(2012) Preispfad B

Erdgas bis 2050 niedrigere Grenzkosten als SK
Nachrangiger Einsatz CO₂-intensiver fossiler Brennstoffe

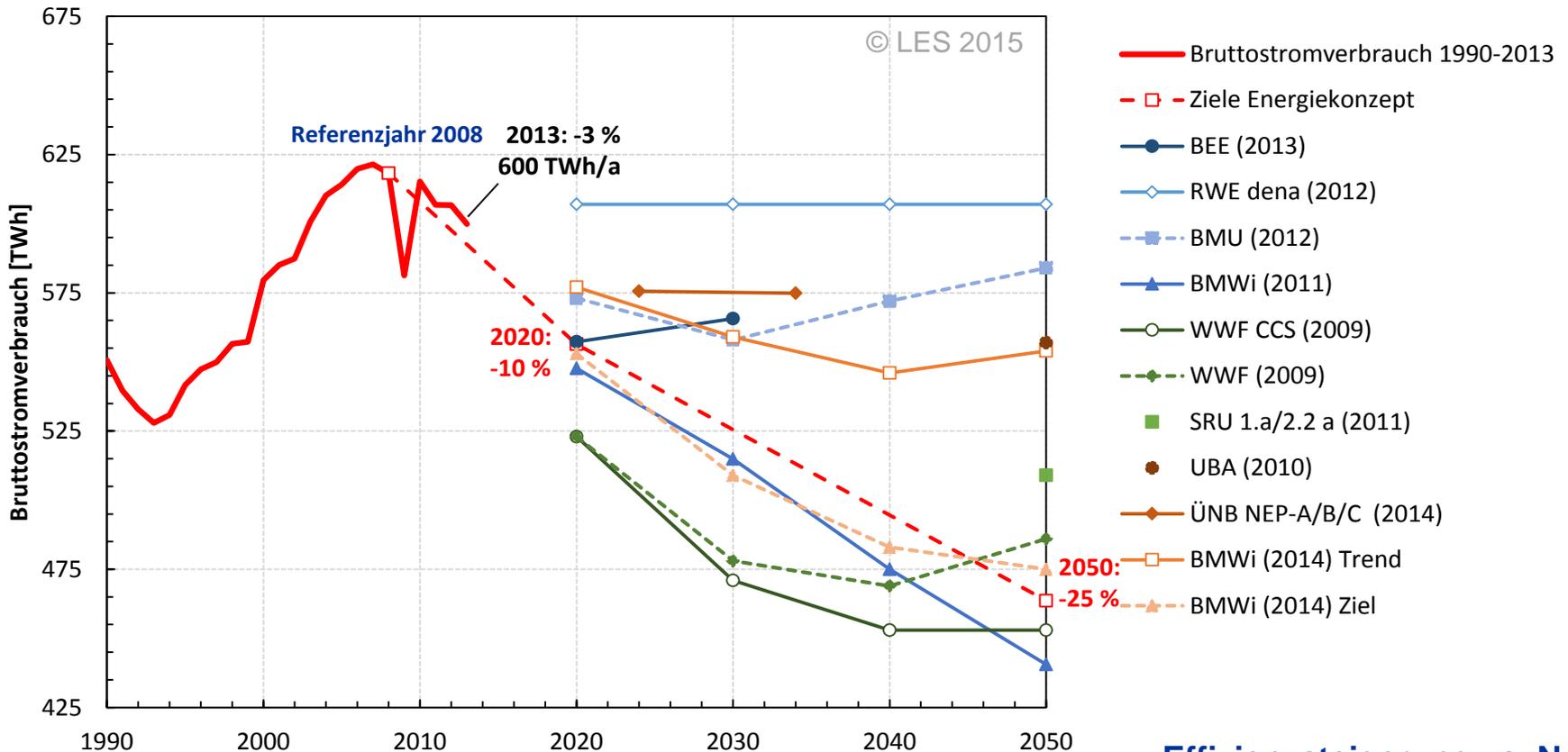
Energiesystemstudien sind bedingte Prognosen basierend auf Szenarien



*Können auch als Ergebnis angesehen werden

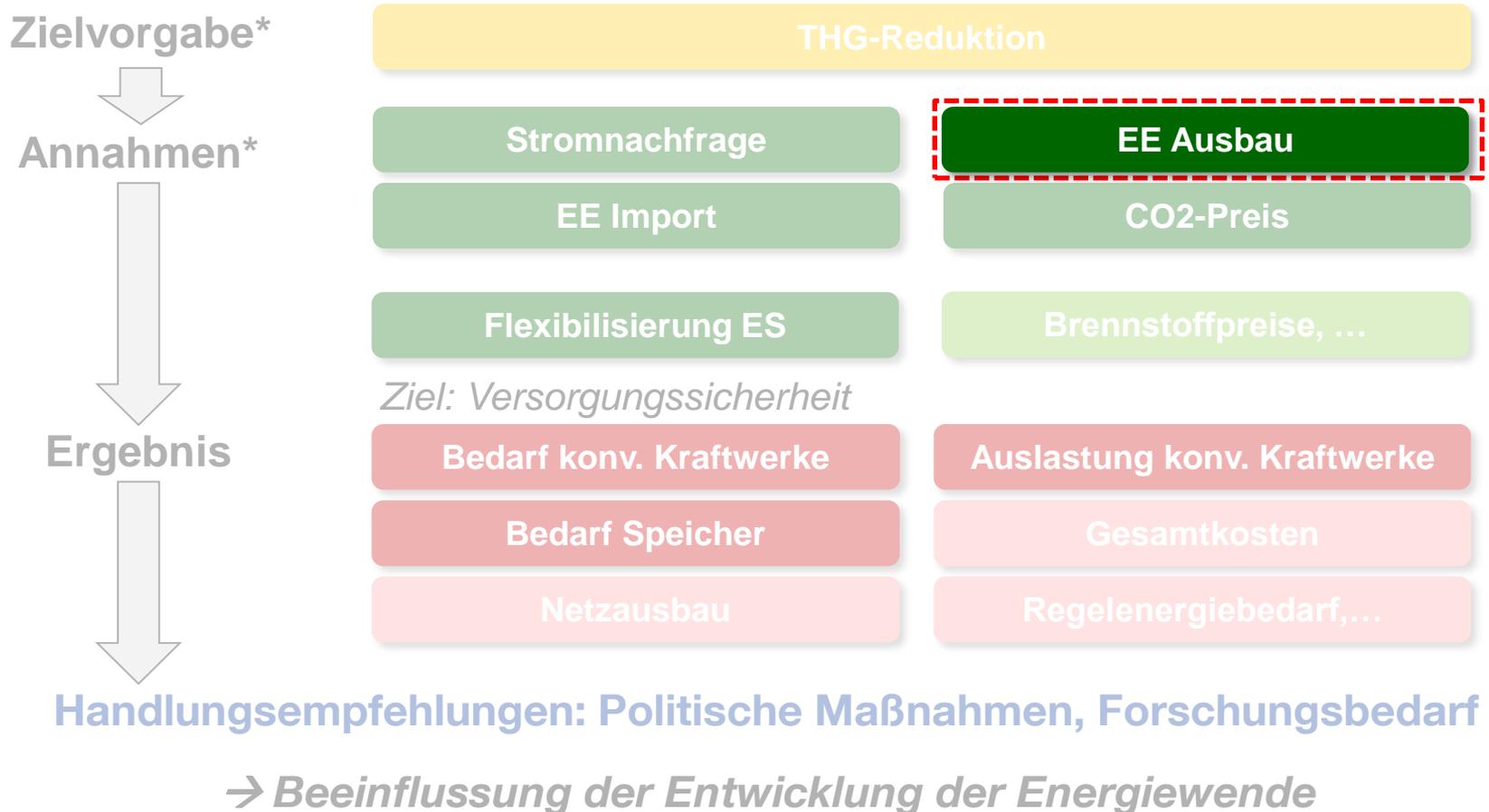
Stromnachfrage

Annahmen zur Entwicklung der Bruttostromnachfrage



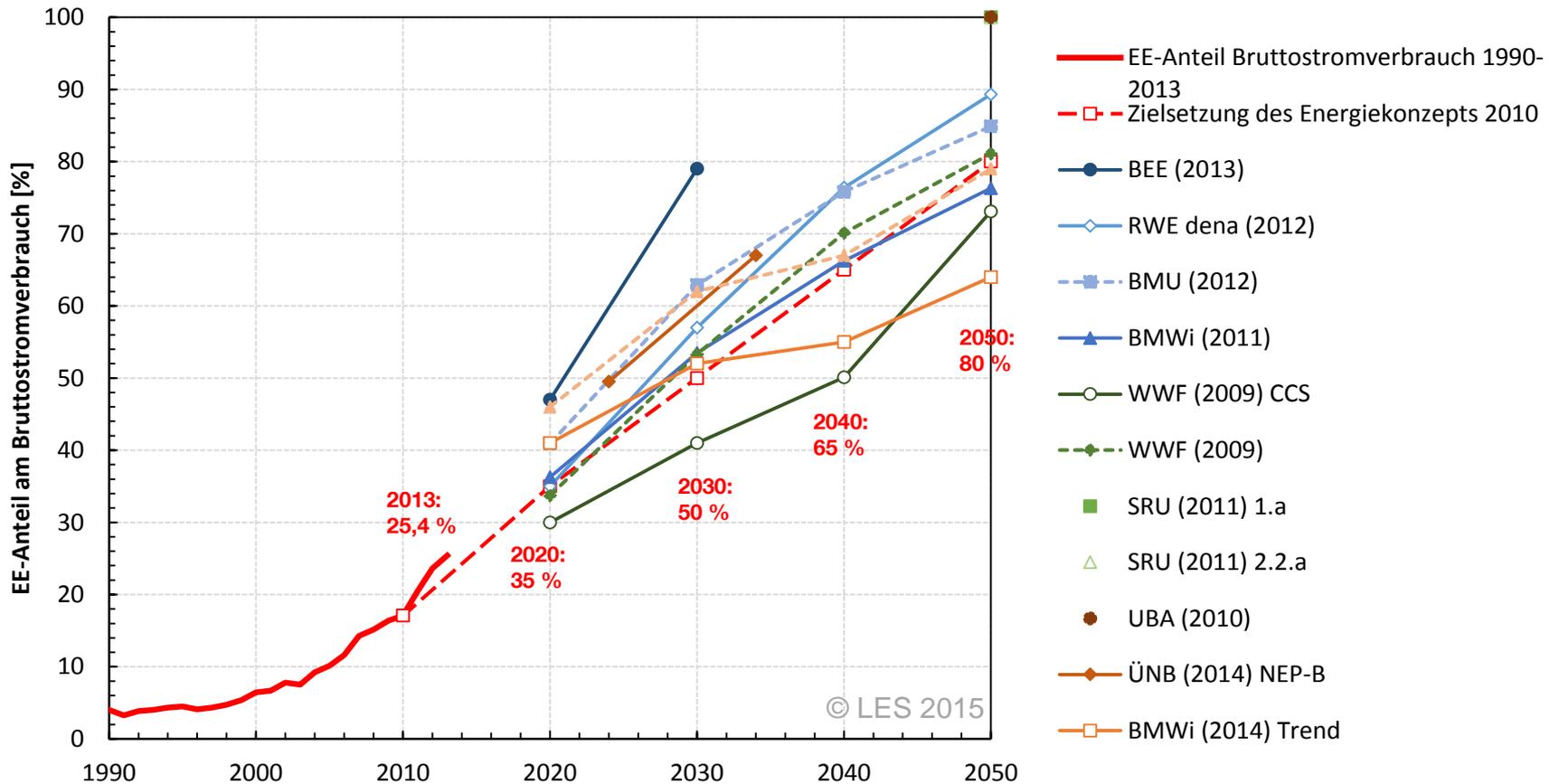
**Effizienzsteigerung vs. Neue
Verbraucher (E-Kfz,
Raumklimatisierung)**

Energiesystemstudien sind bedingte Prognosen basierend auf Szenarien



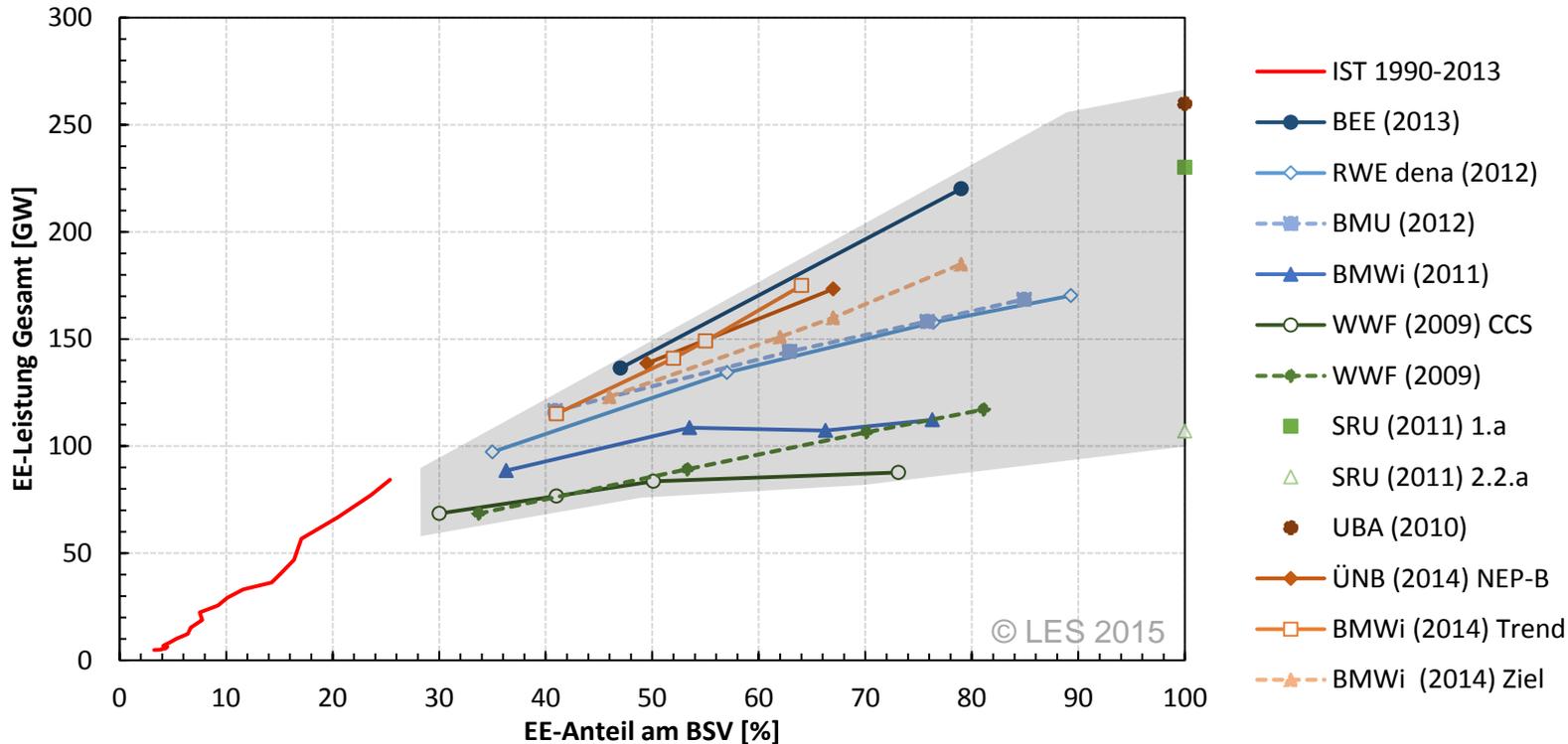
*Können auch als Ergebnis angesehen werden

Entwicklung des EE-Anteils



Studien übertreffen die Zielsetzung des Energiekonzepts

Benötigte installierte EE-Leistung in Abhängigkeit des EE-Anteils

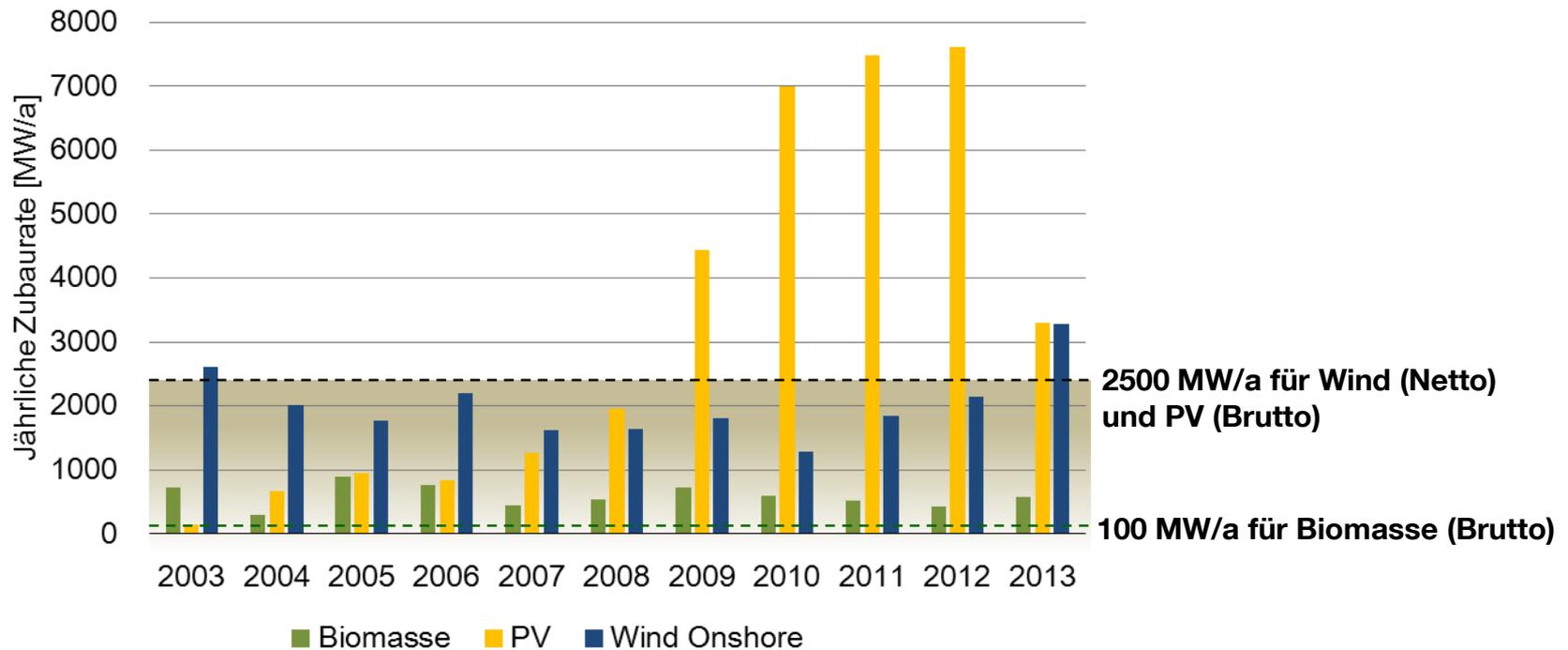


Ursachen für große Spreizung:

- Annahmen zu Rückgang des Bruttostromverbrauchs
- EE-Integration (Speicherverluste)
- Zusammensetzung des EE-Mixes und angenommener Jahresnutzungsgrad der EE
- EE-Import (ausländische EE-Erzeugungskapazitäten)

EE-Ausbau

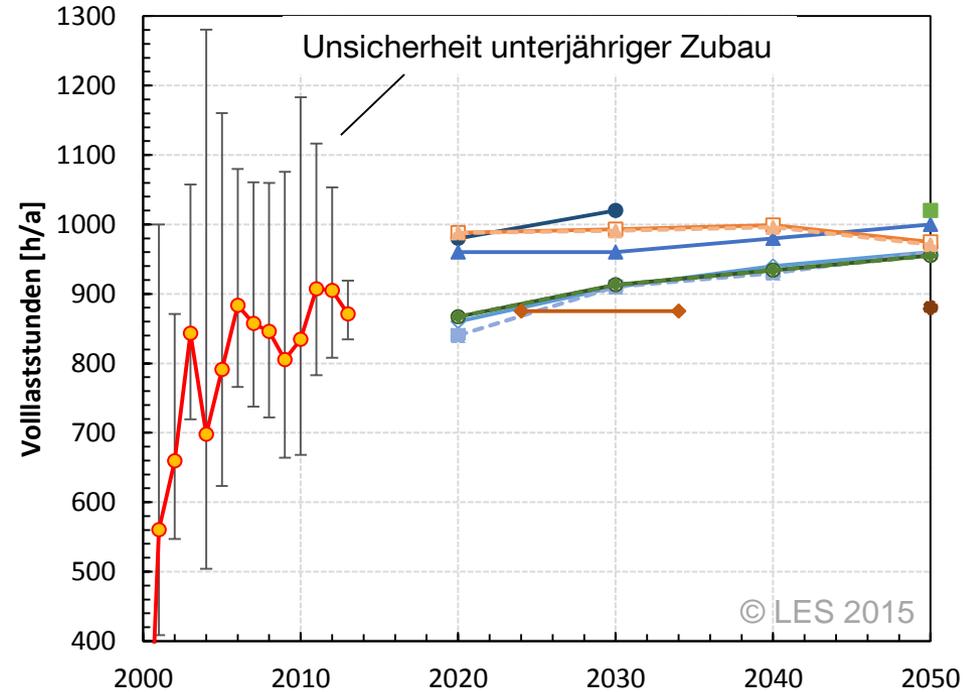
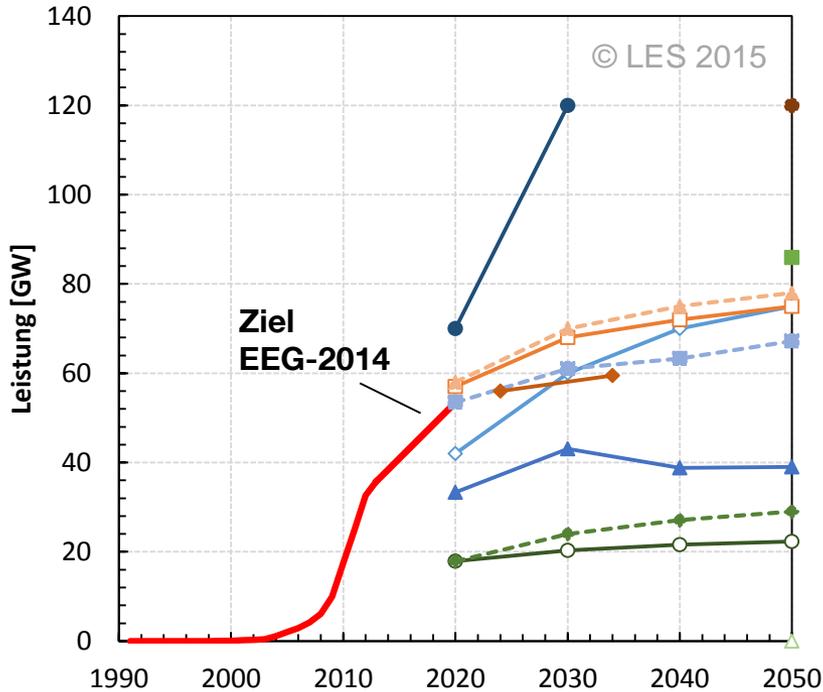
Ausbaukorridore der EE gemäß EEG 2014 im Vergleich zu historischem Ausbau



Drosselung des Biomasse- und PV-Ausbaus
Wind lag 2004-2012 unter 2,5 GW-Marke

EE-Ausbau

Ausbau der erneuerbaren Energien: PV



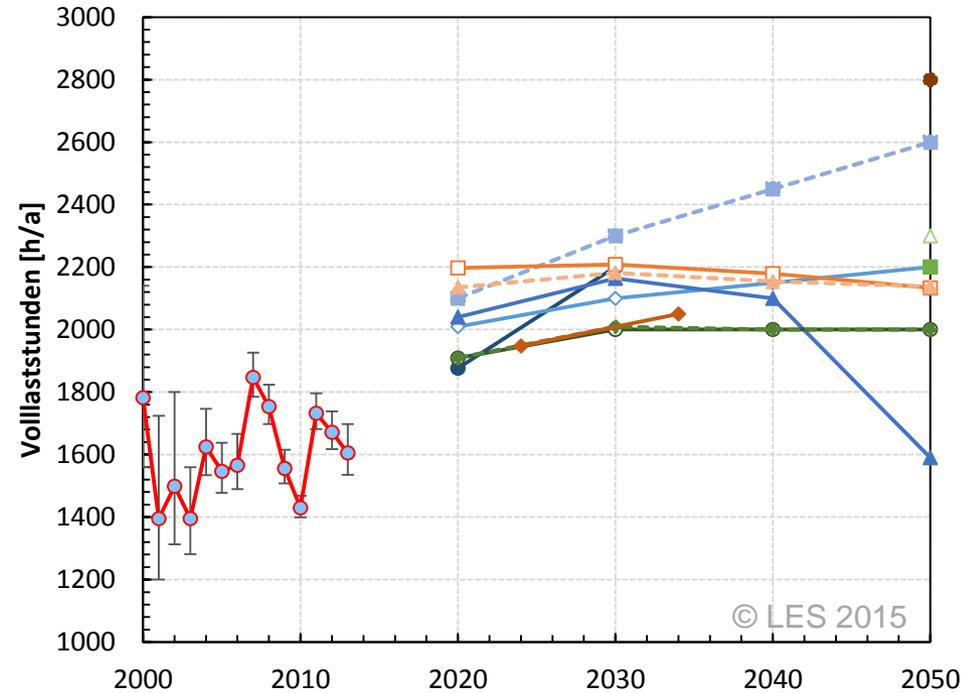
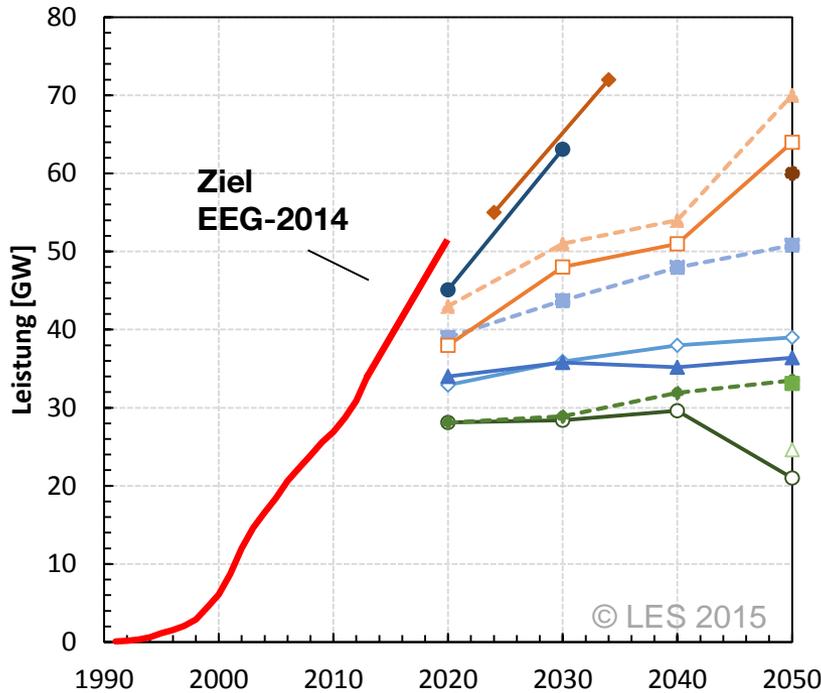
- IST 1990-2013
- BEE (2013)
- RWE dena (2012)*
- - - BMU (2012)
- BMWi (2011)
- WWF (2009) CCS
- - - WWF (2009)
- SRU (2011) 1.a
- △ SRU (2011) 2.2.a
- UBA (2010)
- ◆ ÜNB (2014) NEP-B *
- BMWi (2014) Trend
- - - BMW (2014) Ziel

**Aktuelle Entwicklung übertrifft
viele Szenarien**

Auslastung: 800 – 1000 VLh

EE-Ausbau

Ausbau der erneuerbaren Energien: Wind-Onshore



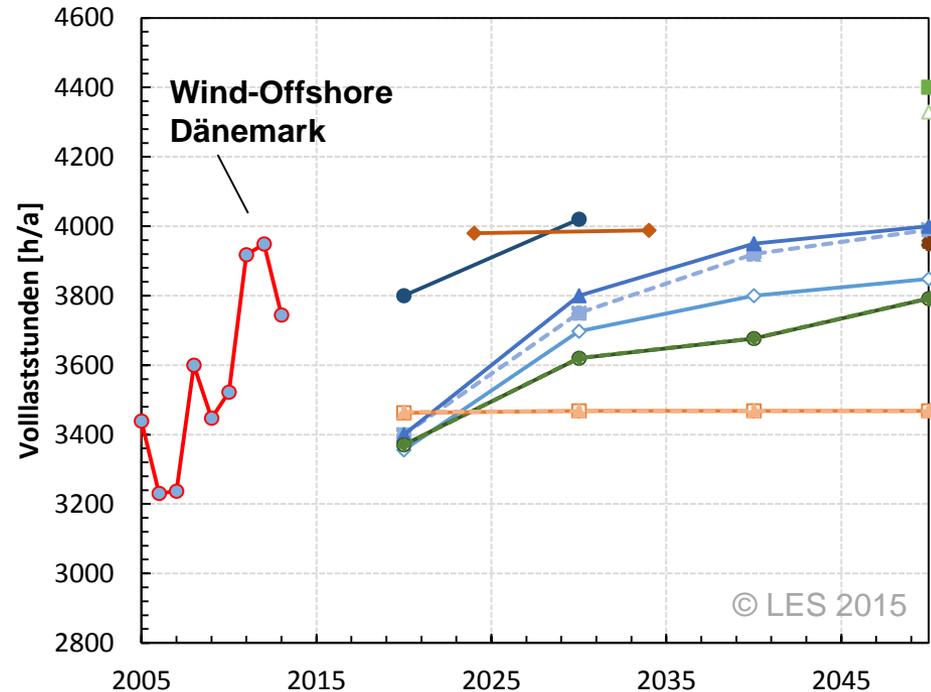
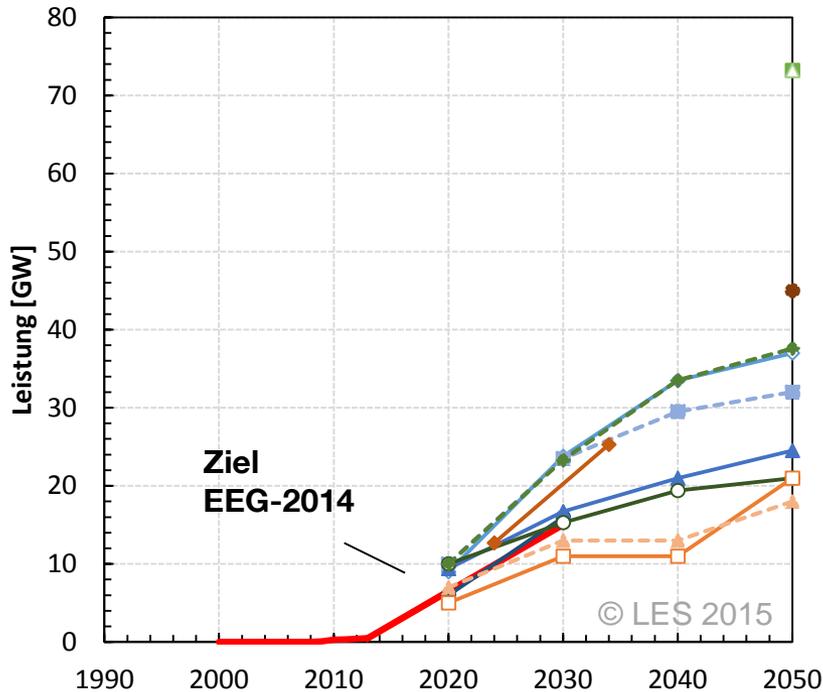
- IST 1990-2013
- BEE (2013)
- ◇— RWE dena (2012)*
- BMWi (2012)
- ▲— BMWi (2011)
- WWF (2009) CCS
- ◆— WWF (2009)
- SRU (2011) 1.a
- △— SRU (2011) 2.2.a
- UBA (2010)
- ◆— ÜNB (2014) NEP-B *
- BMWi (2014) Trend
- ▲— BMW (2014) Ziel

Aktuelle Entwicklung übertrifft viele Szenarien

Angenommener Nutzungsgrad liegt über historischen Werten

EE-Ausbau

Ausbau der erneuerbaren Energien: Wind-Offshore



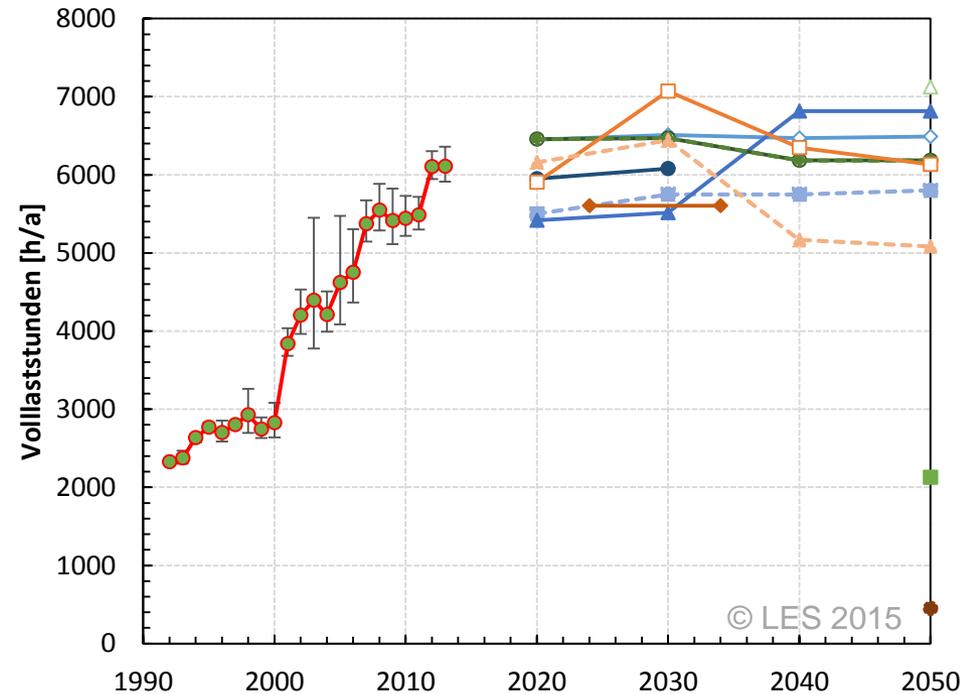
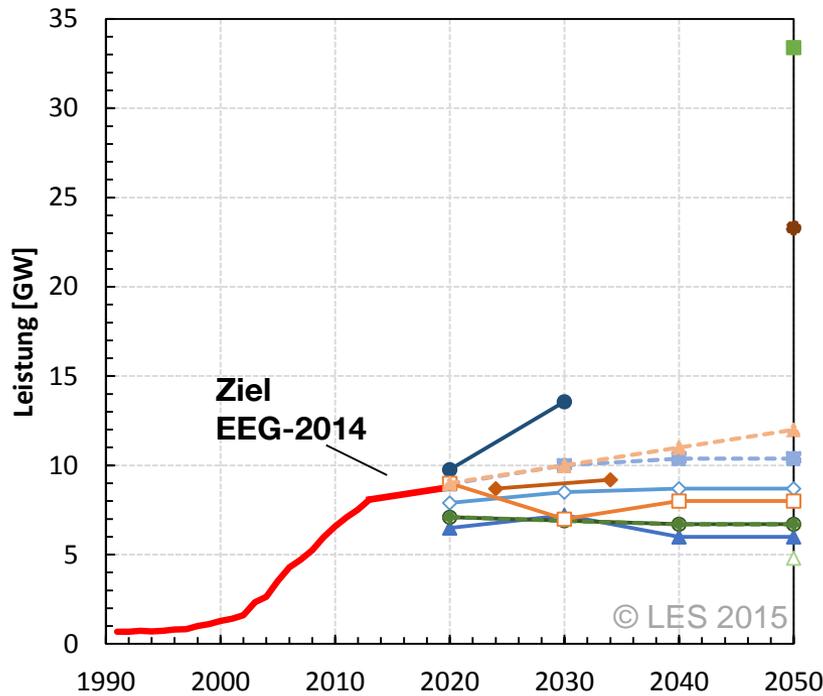
- IST 1990-2013
- - - BMU (2012)
- - - WWF (2009)
- UBA (2010)
- - - BMW (2014) Ziel
- BEE (2013)
- ▲ BMWi (2011)
- SRU (2011) 1.a
- ◆ ÜNB (2014) NEP-B *
- ◇ RWE dena (2012)*
- WWF (2009) CCS
- △ SRU (2011) 2.2.a
- BMWi (2014) Trend

Ausbau Wind-Offshore liegt unter den Erwartungen

Deutliche Zunahme der Volllaststunden (2050: 3800-4400 VLh)

EE-Ausbau

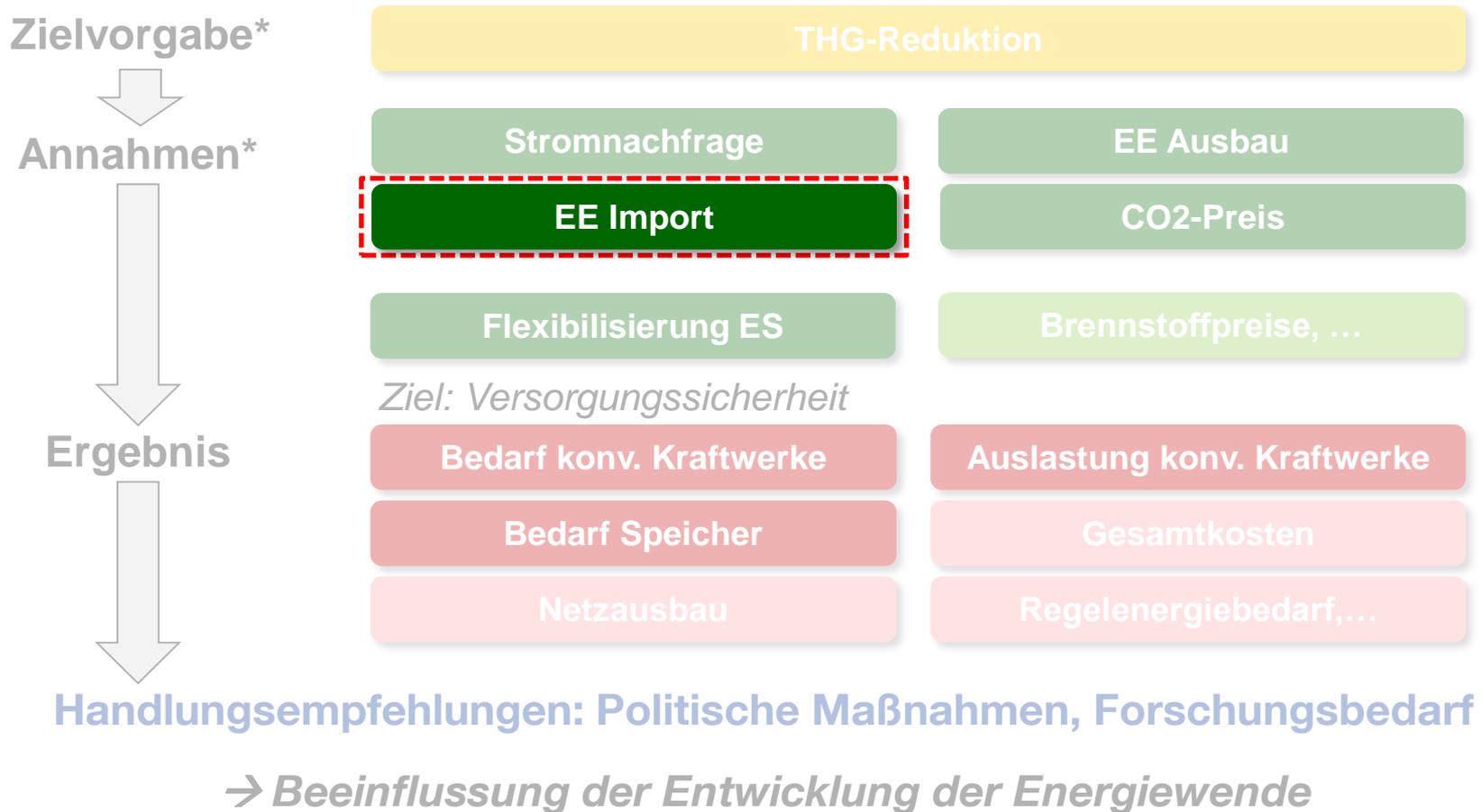
Ausbau der erneuerbaren Energien: Biomasse



- IST 1990-2013
- BEE (2013)
- RWE dena (2012)*
- - - BMU (2012)
- BMWi (2011)
- WWF (2009) CCS
- - - WWF (2009)
- SRU (2011) 1.a
- △ SRU (2011) 2.2.a
- UBA (2010)
- ÜNB (2014) NEP-B *
- BMWi (2014) Trend
- - - BMW (2014) Ziel

**Einsatz überwiegend im Mittel-
und Grundlastbereich**
**Ausnahme: 100%-Szenarien mit
Spitzenlasteinsatz**

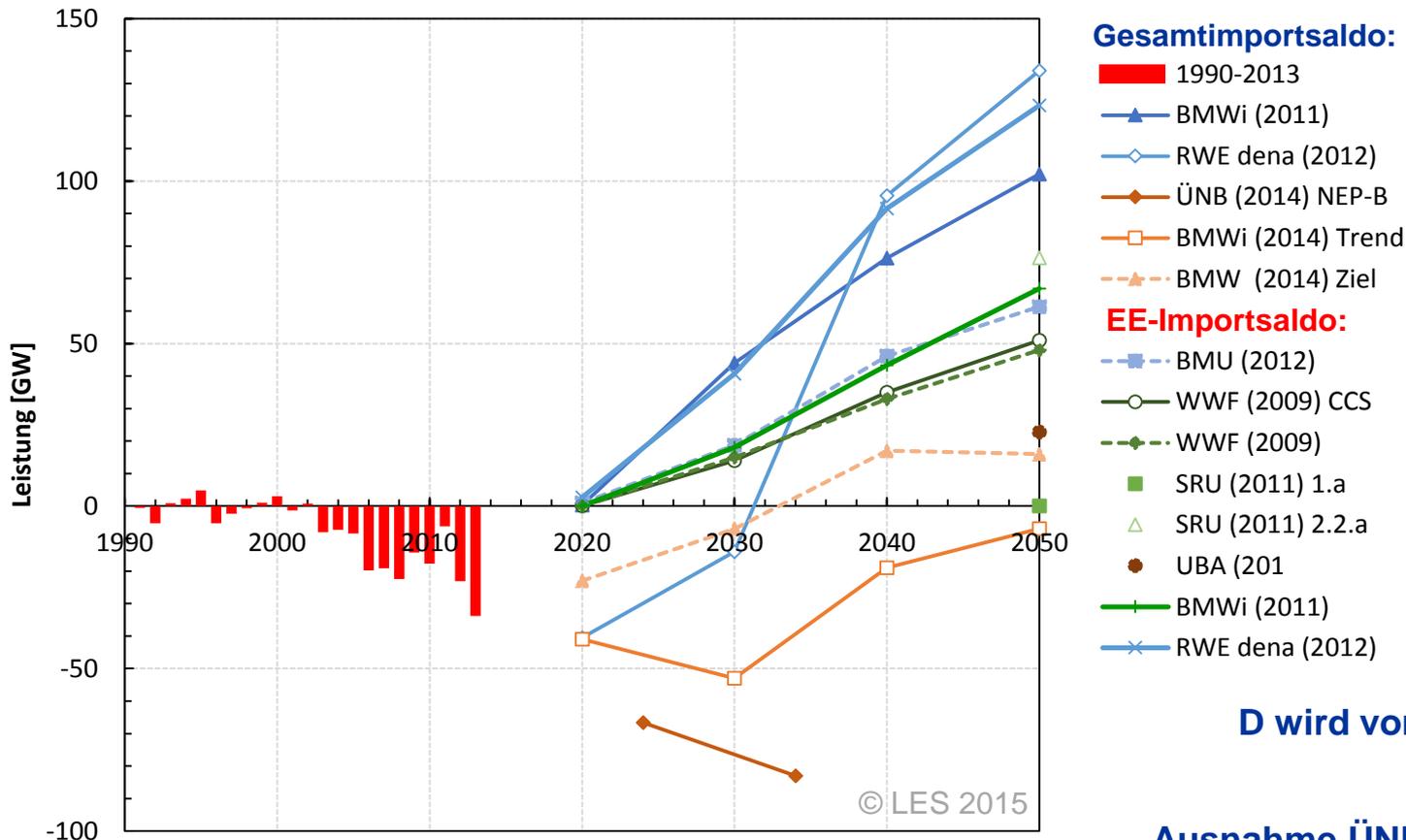
Energiesystemstudien sind bedingte Prognosen basierend auf Szenarien



*Können auch als Ergebnis angesehen werden

EE-Import

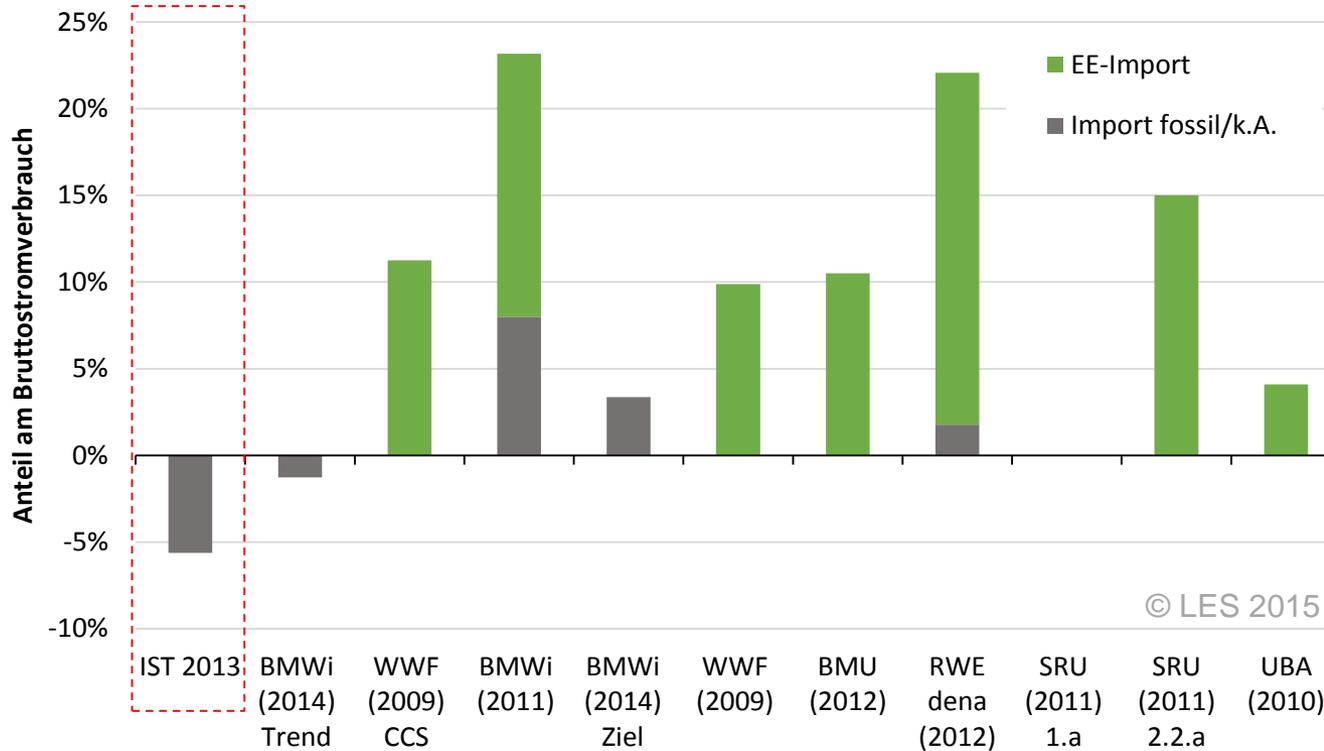
Direktimport von Strom aus erneuerbaren Energien



D wird vom Exporteur zum Importeur

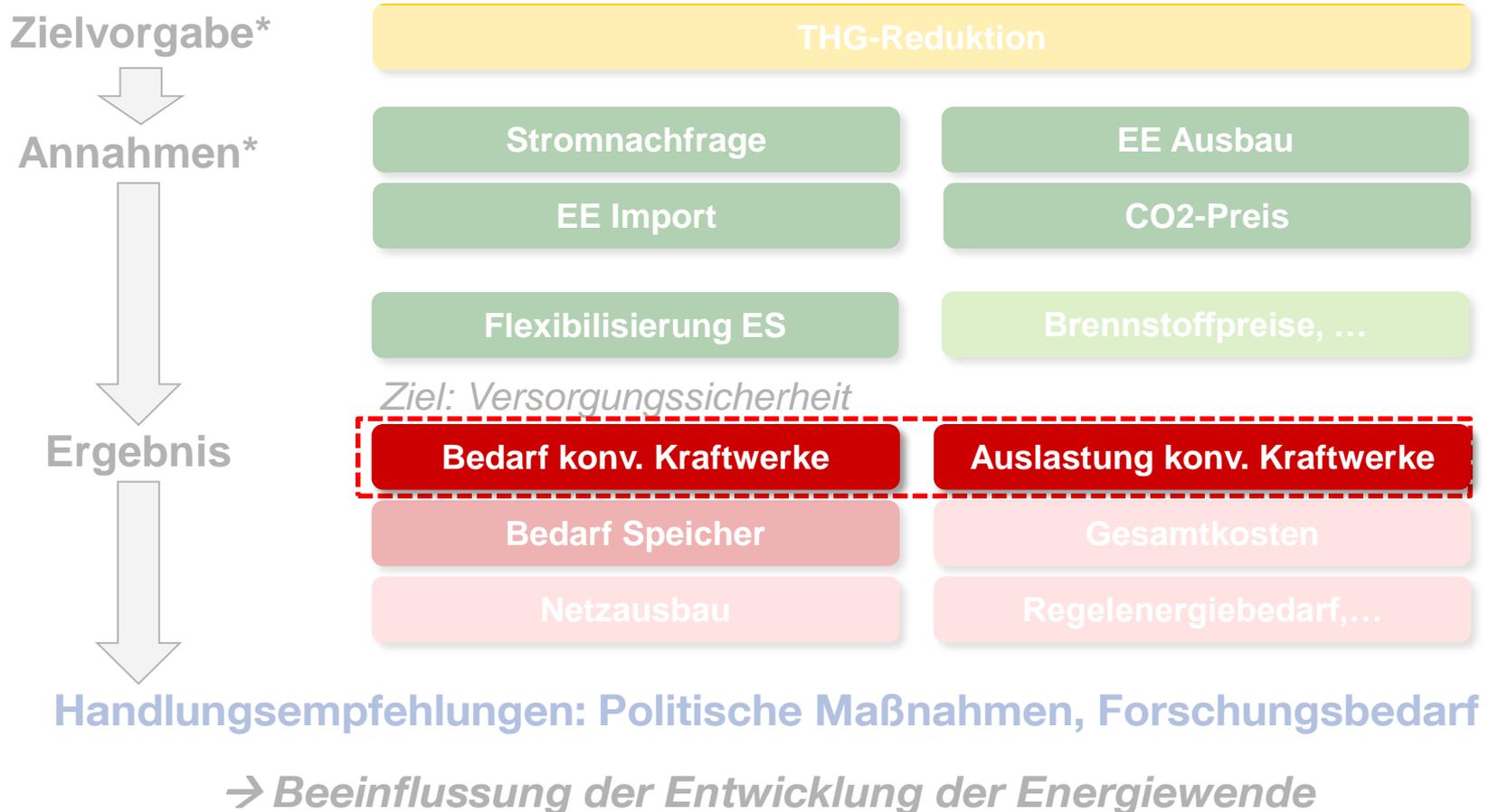
Ausnahme ÜNB NEP und BMWi (2014) mit z.T. hohem Export

Anteil des Import am Bruttostromverbrauch 2050



**Import 2050 bis zu 23 % des
Bruttostromverbrauchs**

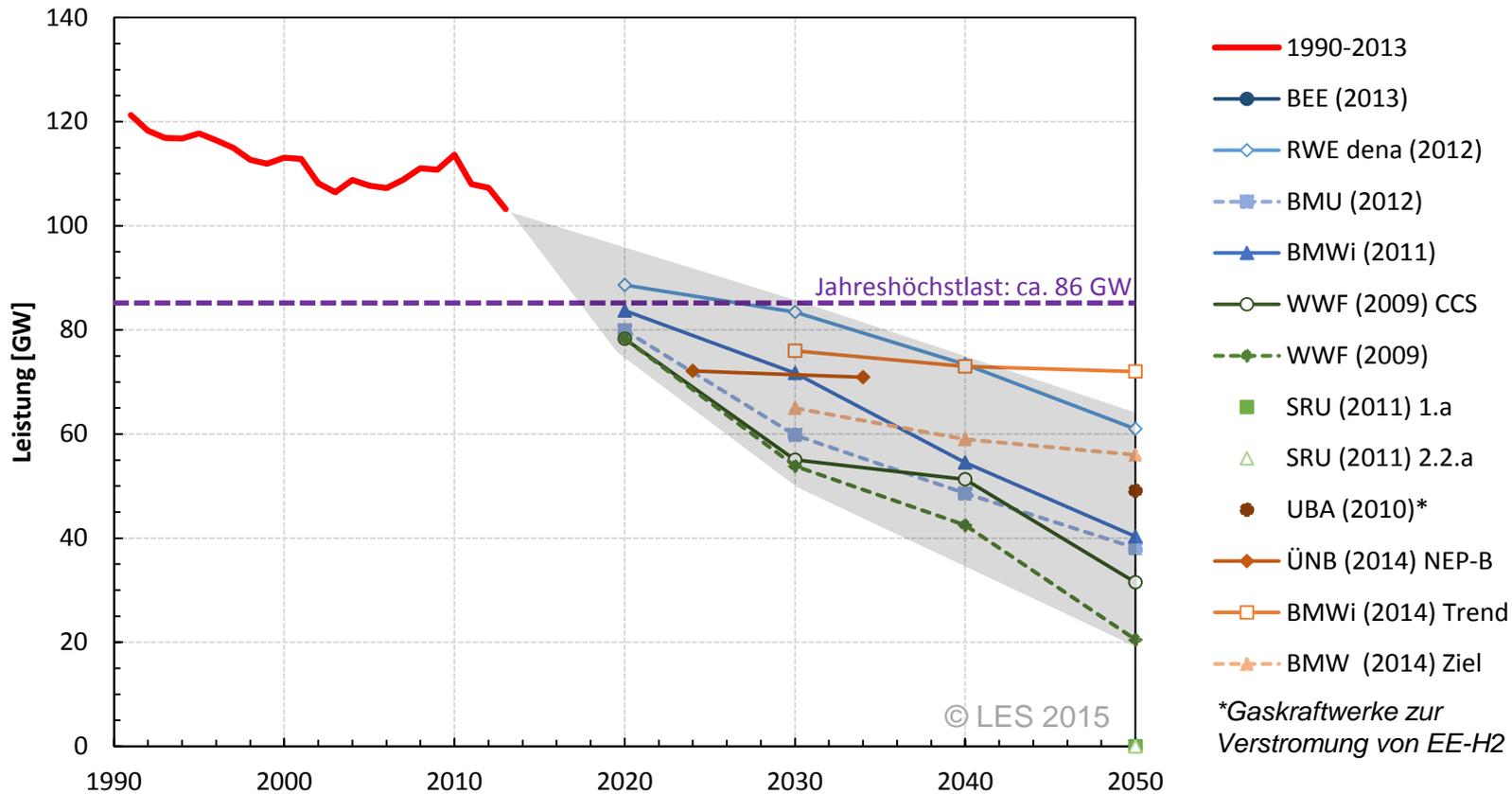
Energiesystemstudien sind bedingte Prognosen basierend auf Szenarien



*Können auch als Ergebnis angesehen werden

Kraftwerke

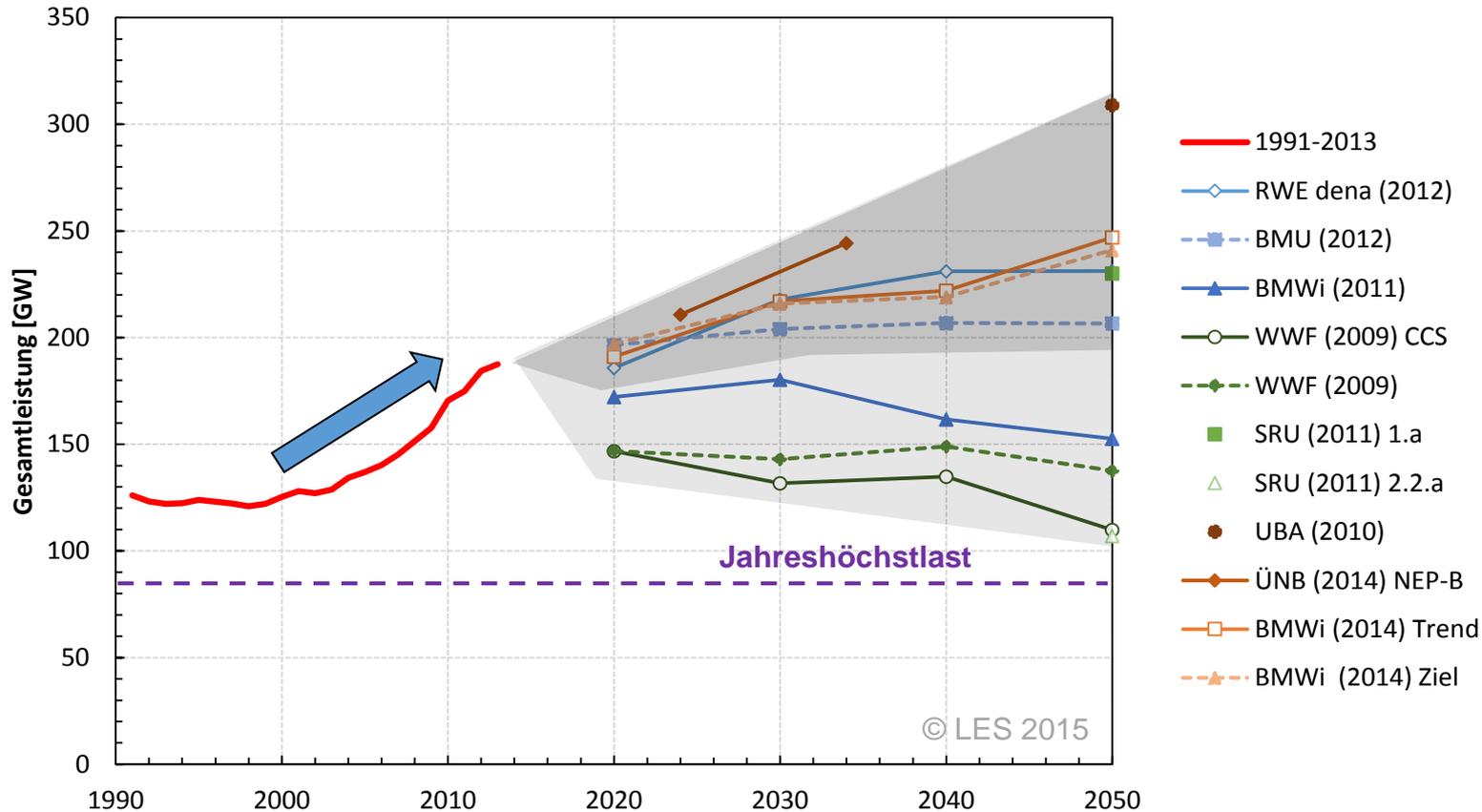
Bedarf an konventionellen Kraftwerken



Ab 2020: gesicherte Leistung der konventionellen KW unter Jahreshöchstlast

Bedarf von 20-60 GW in 2050 für Versorgungssicherheit (überwiegend Gas)

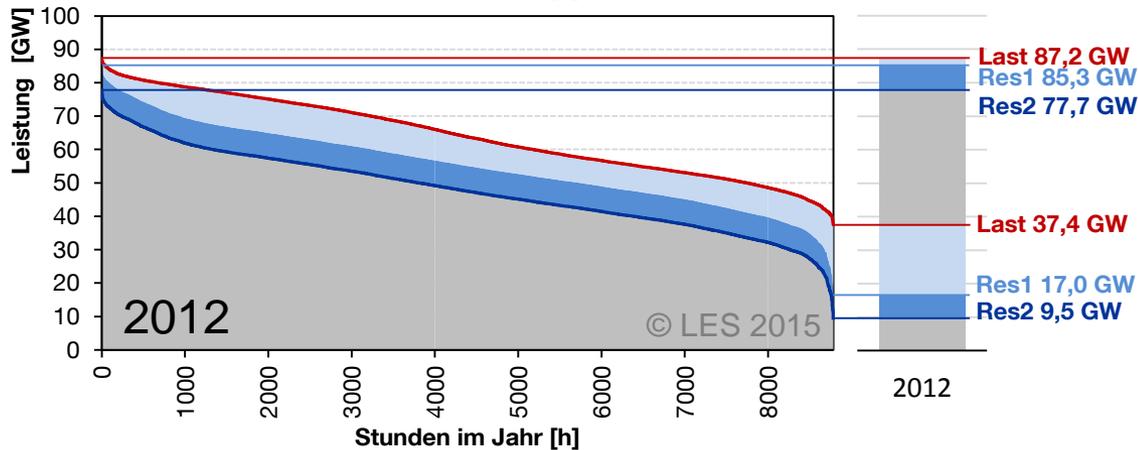
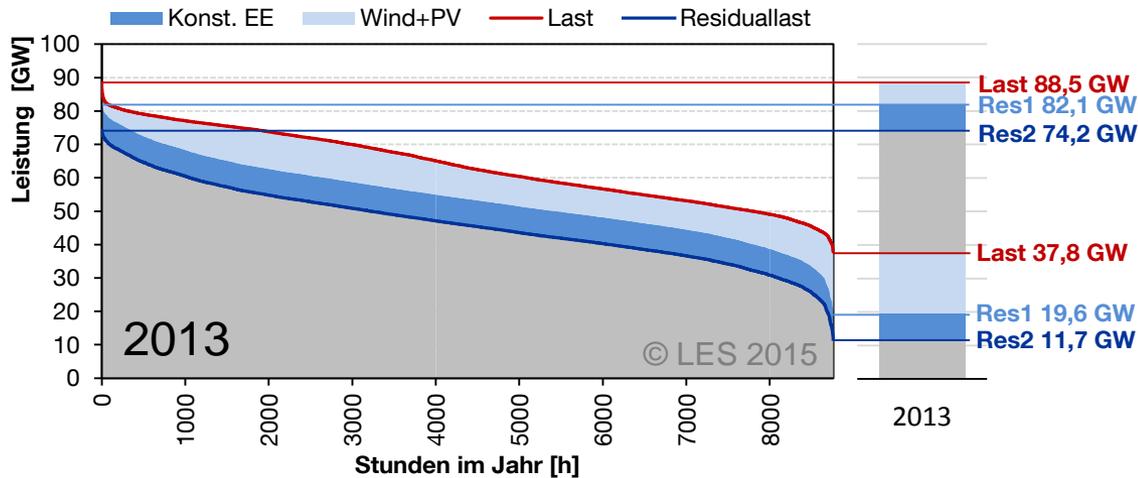
Installierte Gesamtleistung



Installierte Gesamtleistung übertrifft die Jahreshöchstlast deutlich

Starker Anstieg seit 2000

Analyse der Residuallast 2012 und 2013

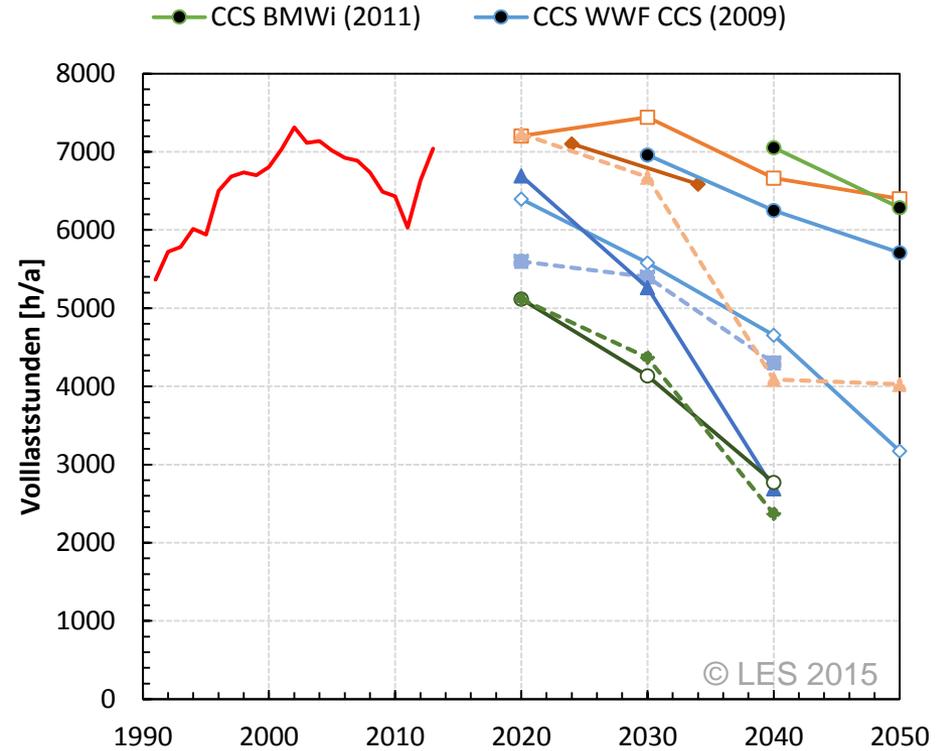
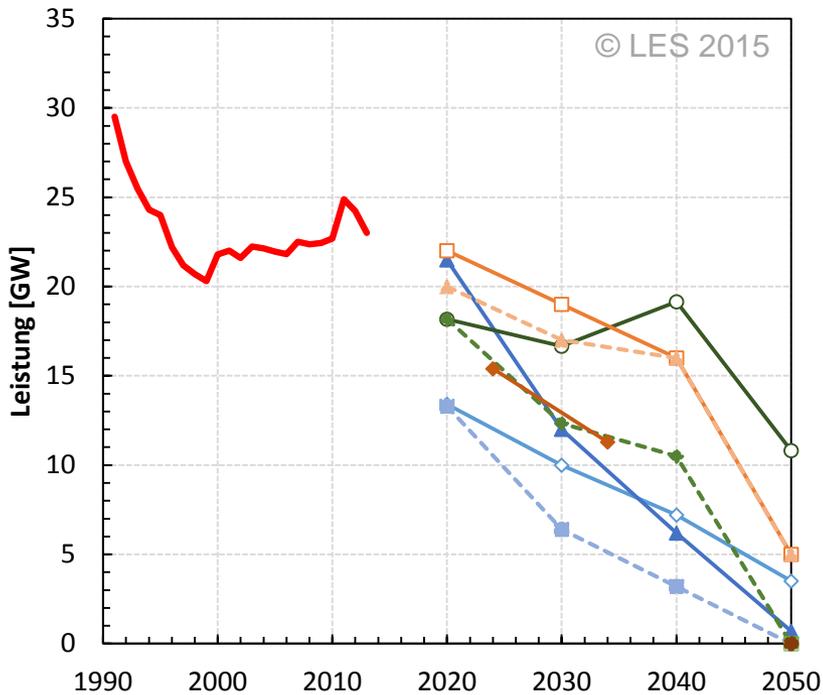


**Wind+PV senken Spitzenlast
nur geringfügig**

**Deutliche Reduzierung der
minimalen Residuallast**

Kraftwerke

Konventionelle Kraftwerke: Braunkohle

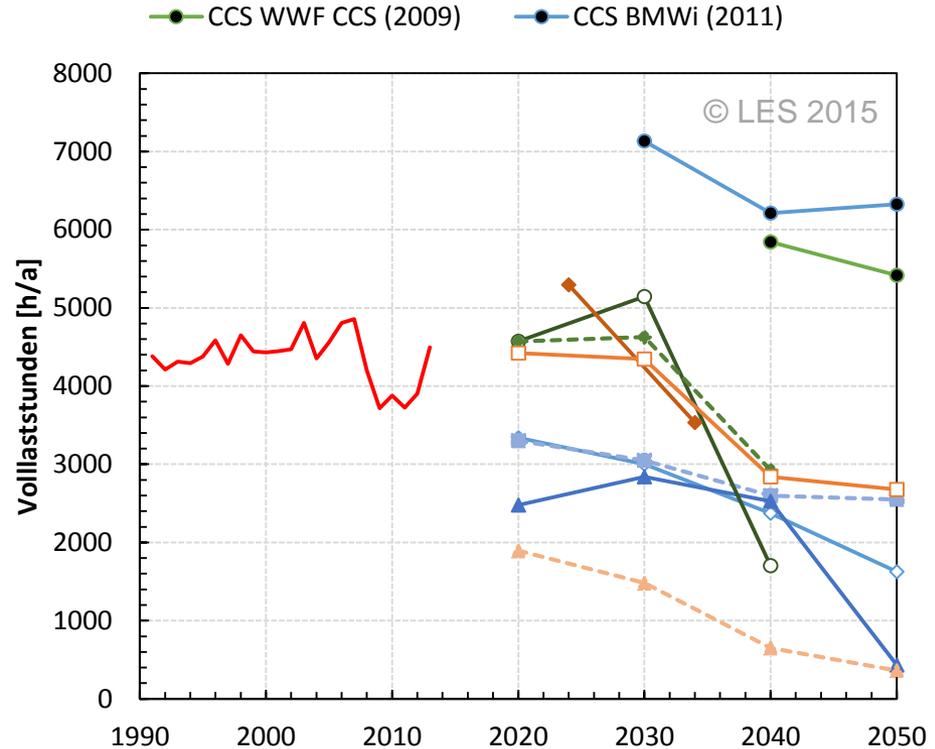
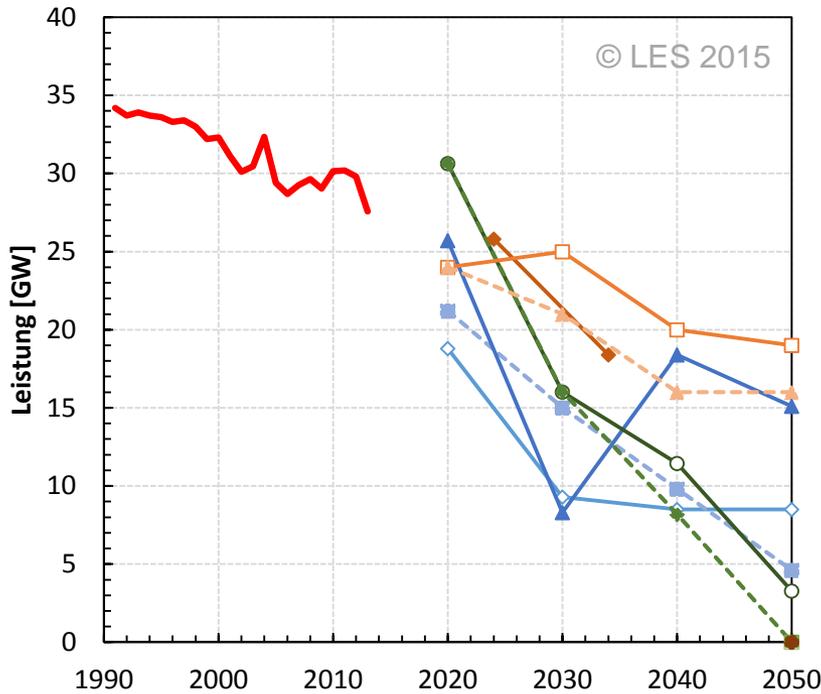


- IST 1990-2013
- - - BMU (2012)
- - - WWF (2009)
- UBA (2010)
- - - BMW (2014) Ziel
- BEE (2013)
- ▲ BMWi (2011)
- SRU (2011) 1.a
- ◆ ÜNB (2014) NEP-B *
- ◇ RWE dena (2012)*
- WWF (2009) CCS
- △ SRU (2011) 2.2.a
- BMWi (2014) Trend

Sehr starker Rückgang der installierten Leistung
Hohe Auslastung 2050 nur mit CCS

Kraftwerke

Konventionelle Kraftwerke: Steinkohle



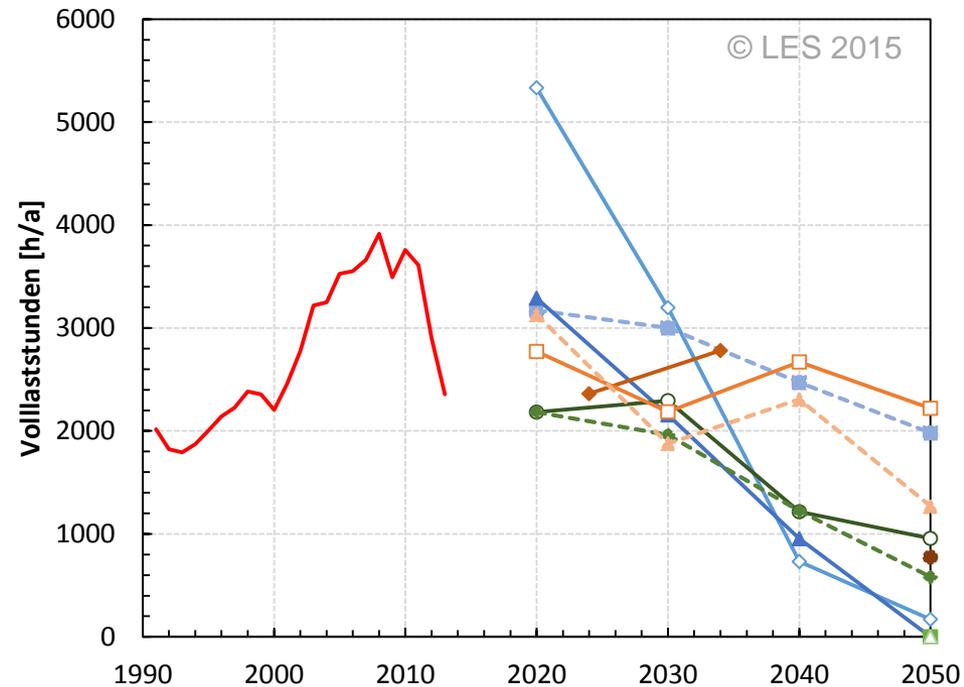
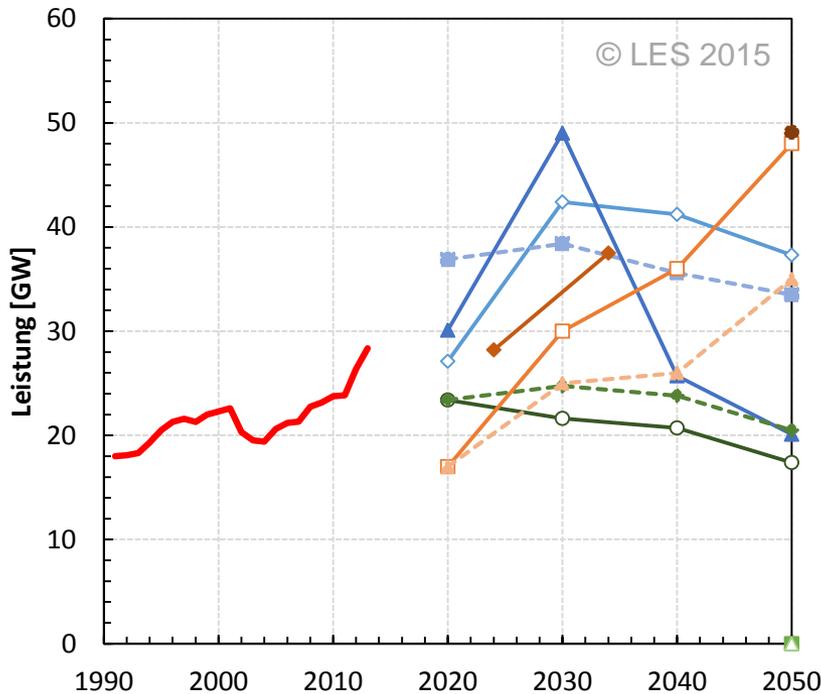
- IST 1990-2013
- - - BMU (2012)
- - - WWF (2009)
- UBA (2010)
- - - BMW (2014) Ziel
- BEE (2013)
- ▲ BMWi (2011)
- SRU (2011) 1.a
- ◆ ÜNB (2014) NEP-B *
- ◇ RWE dena (2012)*
- WWF (2009) CCS
- △ SRU (2011) 2.2.a
- BMWi (2014) Trend

Moderater Rückgang der installierten Leistung

Ohne CCS Auslastung <3000 VLh ab 2040

Kraftwerke

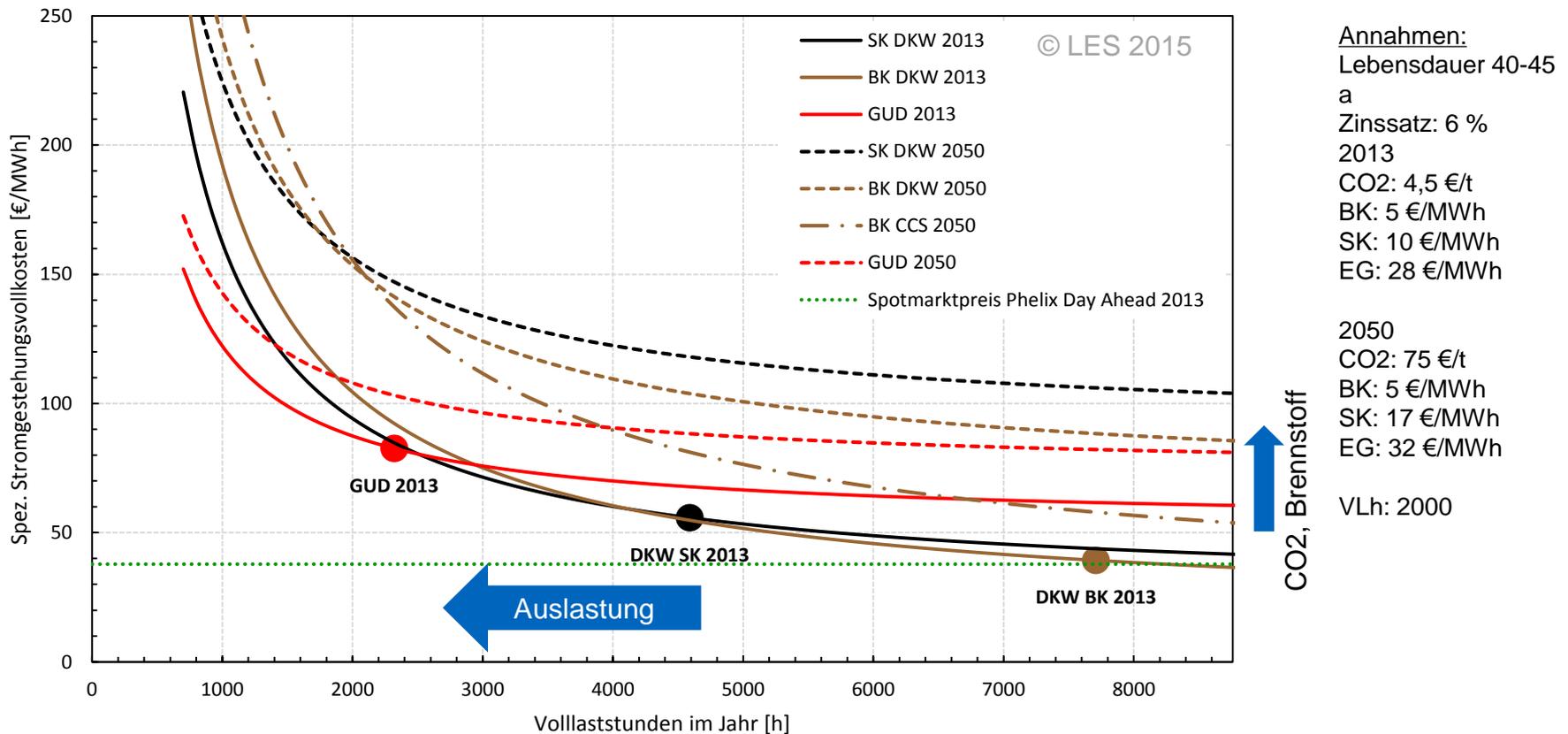
Konventionelle Kraftwerke: Gas



- IST 1990-2013
- - - - - BMW (2014) Ziel
- BEE (2013)
- ▲ BMWi (2011)
- SRU (2011) 1.a
- ◆ ÜNB (2014) NEP-B *
- ◇ RWE dena (2012)*
- WWF (2009) CCS
- △ SRU (2011) 2.2.a
- BMWi (2014) Trend

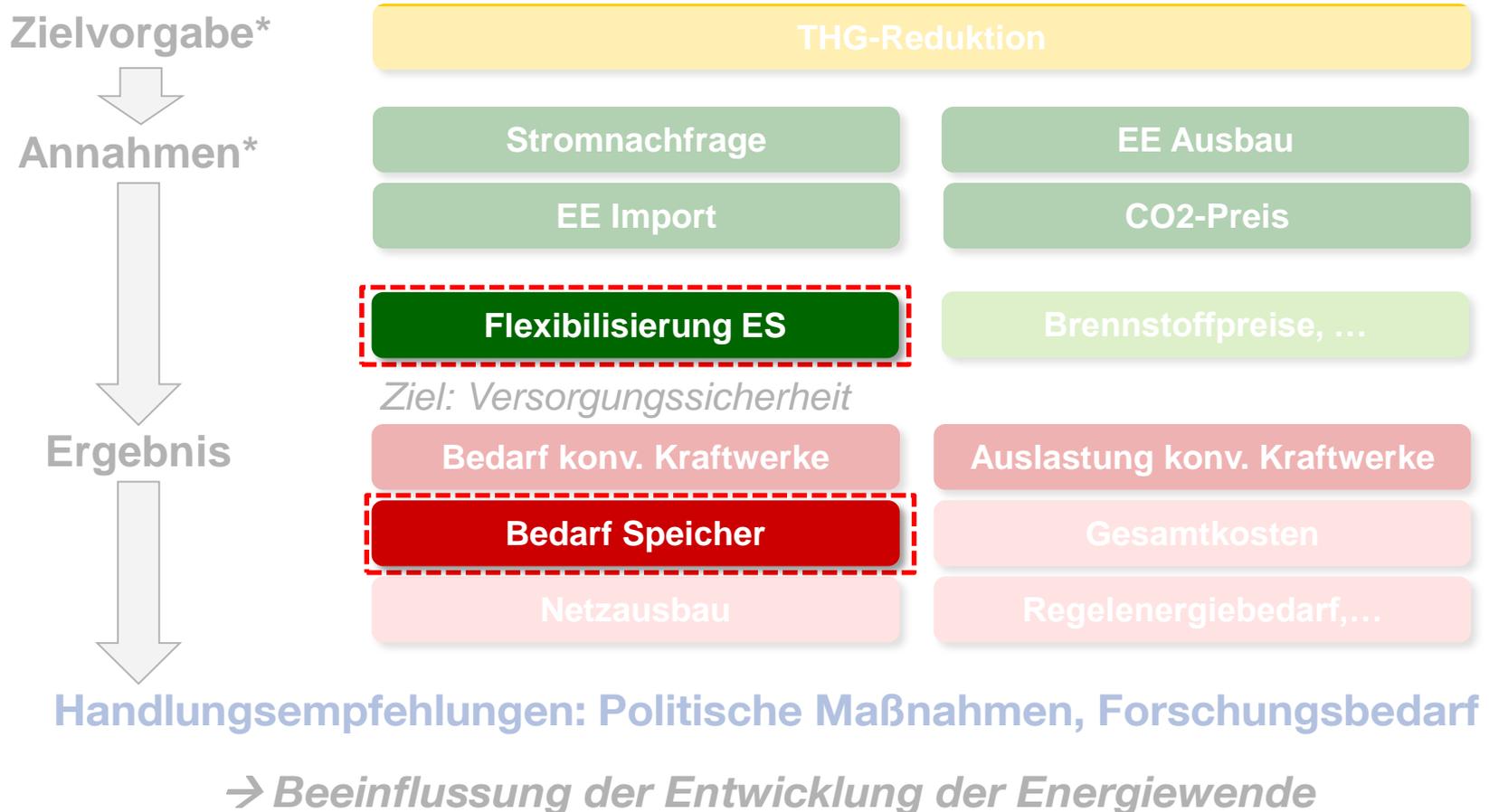
Zubau von Gaskraftwerken
Sinkende durchschnittliche Auslastung (2050 < 2000 VLh)

Auswirkungen des Auslastungsrückgangs auf die Stromgestehungsvollkosten



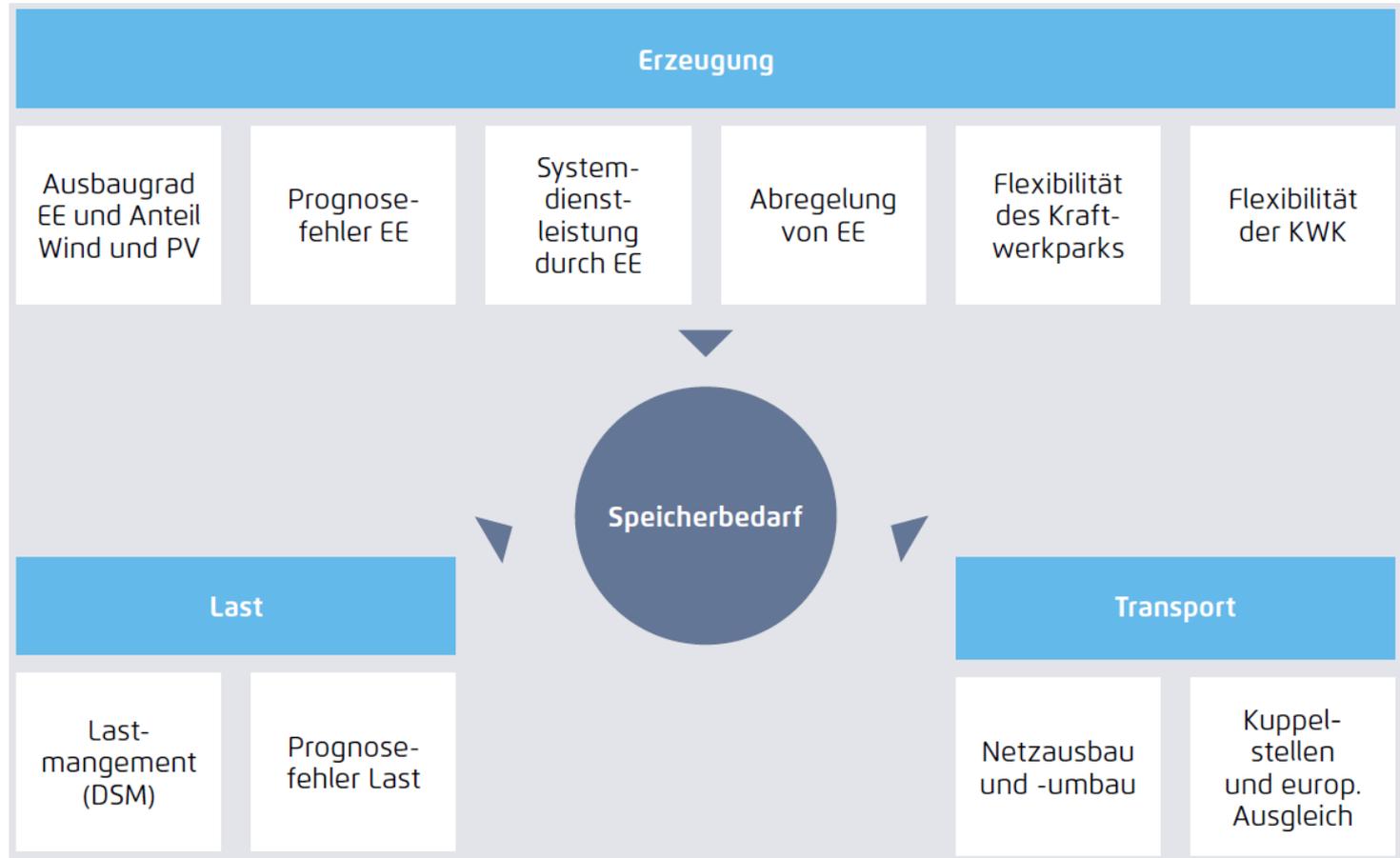
Sinkende Auslastung erschwert Wirtschaftlichkeit der konventionellen Kraftwerke

Energiesystemstudien sind bedingte Prognosen basierend auf Szenarien



*Können auch als Ergebnis angesehen werden

Bestimmende Faktoren des Stromspeicherbedarfs



Quelle: Sterner 2014

Speicher

Zusätzlicher Speicherbedarf zu bestehenden Pumpspeichern

EE-Anteil

Speicherbedarf	2020	2030	2040	2050
WWF (2009) CCS	-	x	x	x
BMWi (2014) Trend	-	-	-	-
BMWi (2011)	-	-	-	-
BMWi (2014) Ziel	-	-	-	-
VDE (2012) E	-			x
WWF (2009)	-	x	x	x
BMU (2012)	-	o1	o1	o1
BMWi Roadmap (2014) A	-	_*		-
BMWi Roadmap (2014) B				o2
BMWi Roadmap (2014) C				x
Agora (2014)	-	_**		x
SRU (2011) 2.2.a				x
SRU (2011) 1.a				x
UBA (2010)				x
1 Aufnahme von Überschüssen durch Wasserstoffelektrolyse für den Mobilitätssektor				
2 Abhängig von Annahmen zu DSM				

*2030: Batteriespeicher für Primärregelenergiemarkt gesamtwirtschaftlich sinnvoll (BMWi Roadmap 2014)

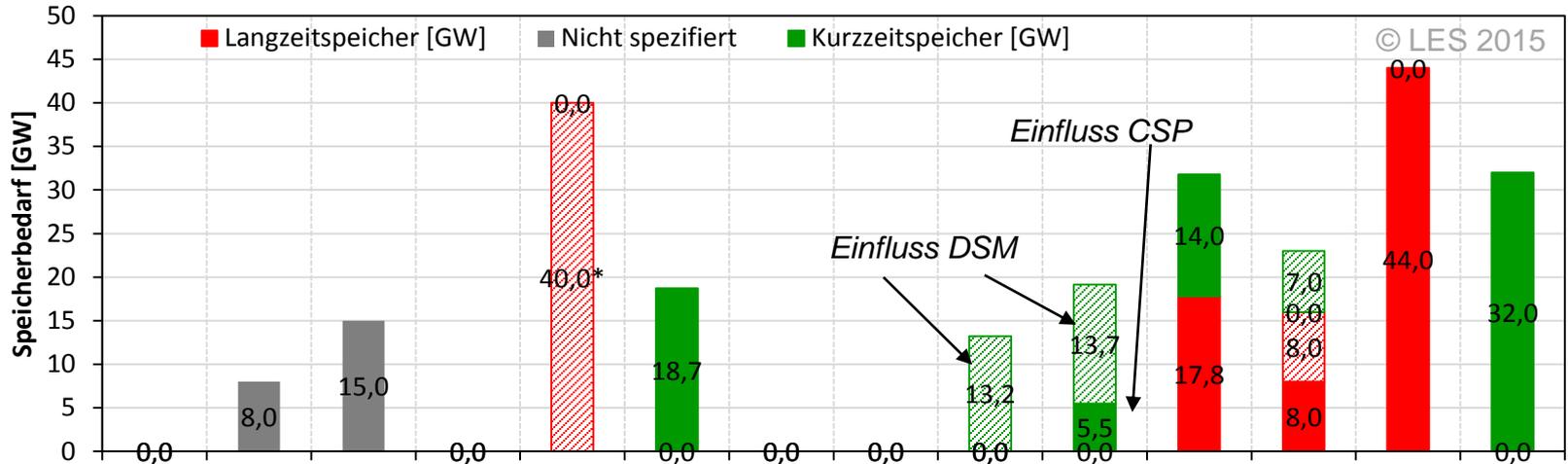
**Netzentlastung durch Hausspeicher zur Eigenverbrauchsoptimierung nur bei ausreichender Dimensionierung (Agora 2014)

Zusätzlicher Speicherbedarf zur EE-Integration erst nach 2030

Voraussetzung: Flexibilisierung des ES (DSM, stromgeführte KWK,...) und Netzausbau

Speicher

Identifizierter Speicherbedarf 2050



* Pauschale H2-Produktion für den Mobilitätssektor

	BMW (2011)	WWF (2009) CCS	WWF (2009)	BMW (2014) Trend	BMU (2012)	SRU (2011) 2.2.a	BMW (2014) Ziel	BMW Rdmp (2014) A	BMW Rdmp (2014) B	BMW Rdmp (2014) C	VDE (2012) E	Agora (2014)	UBA (2010)	SRU (2011) 1.a
--	------------	----------------	------------	------------------	------------	------------------	-----------------	-------------------	-------------------	-------------------	--------------	--------------	------------	----------------

Berücksichtigte Speicheroptionen

H2 (Langzeit)					x	x		x	x	x	x	x	x	x
Druckluft (Kurzzeit)					o	x		o	o	o	x	x	o	x
Batterie (Kurzzeit)					o	o		x	x	x	o	x	o	o

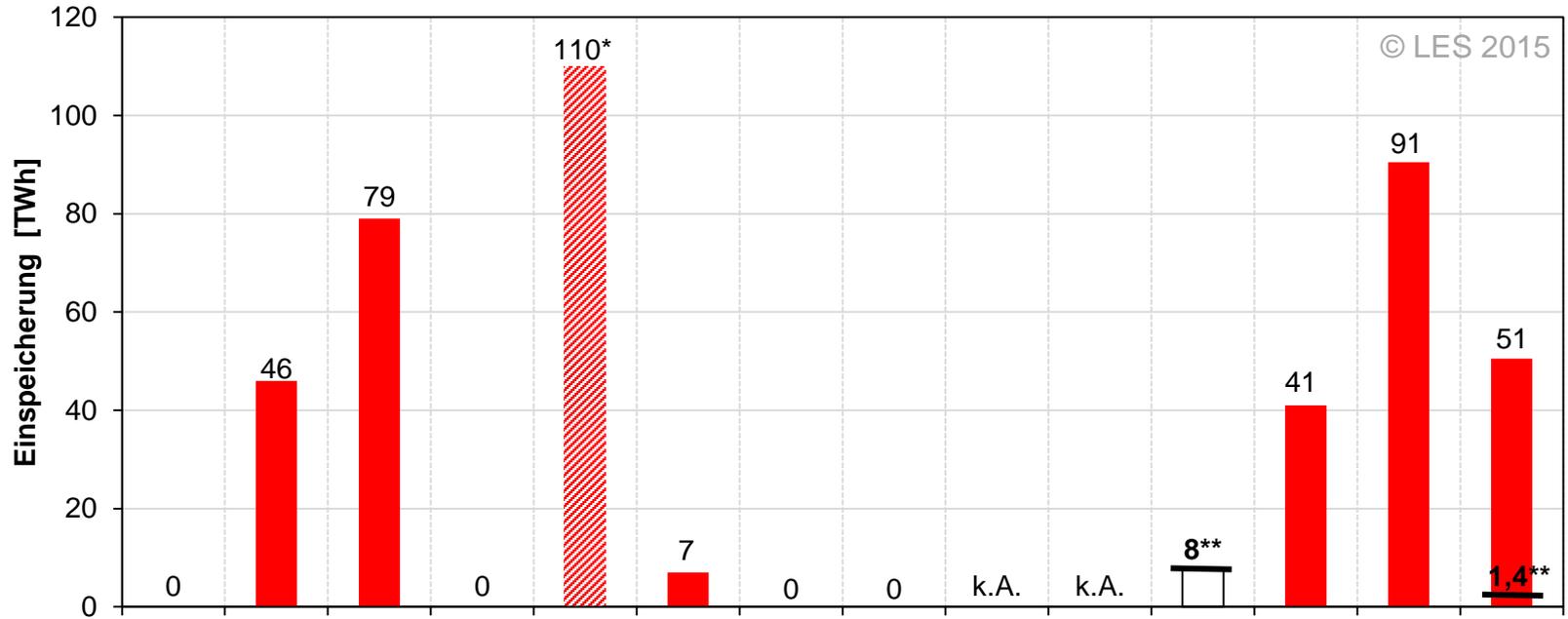
Flexibilitätsbedarf und -optionen

Wind+PV [GW]	99,9	73,5	100,1	160	150,01	97,8	166	164,2	164,2	198,8	144,3	279	225	192,2
Import/Export	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	o	x	o	o
DSM [GW]	3,2	o	o	18TWh	~20-50	o	26TWh	~27	~0-27	~0-29	50	14,3	41,5	o
Regelbare CSP EUNA [GW]	50-75	ja	ja	o	79,6	o	k.A.	79,6	25,1	o	o	o	k.A.	o
Abregelung [TWh]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0,5	k.A.	1	2,5-4,2	4,9-6,1	0,4	14-32	1,2	53,3

Vorrangiger Bedarf von Kurz- oder Langzeitspeicher umstritten

Speicher

Eingespeicherte Überschussstrommenge und Speicherkapazität

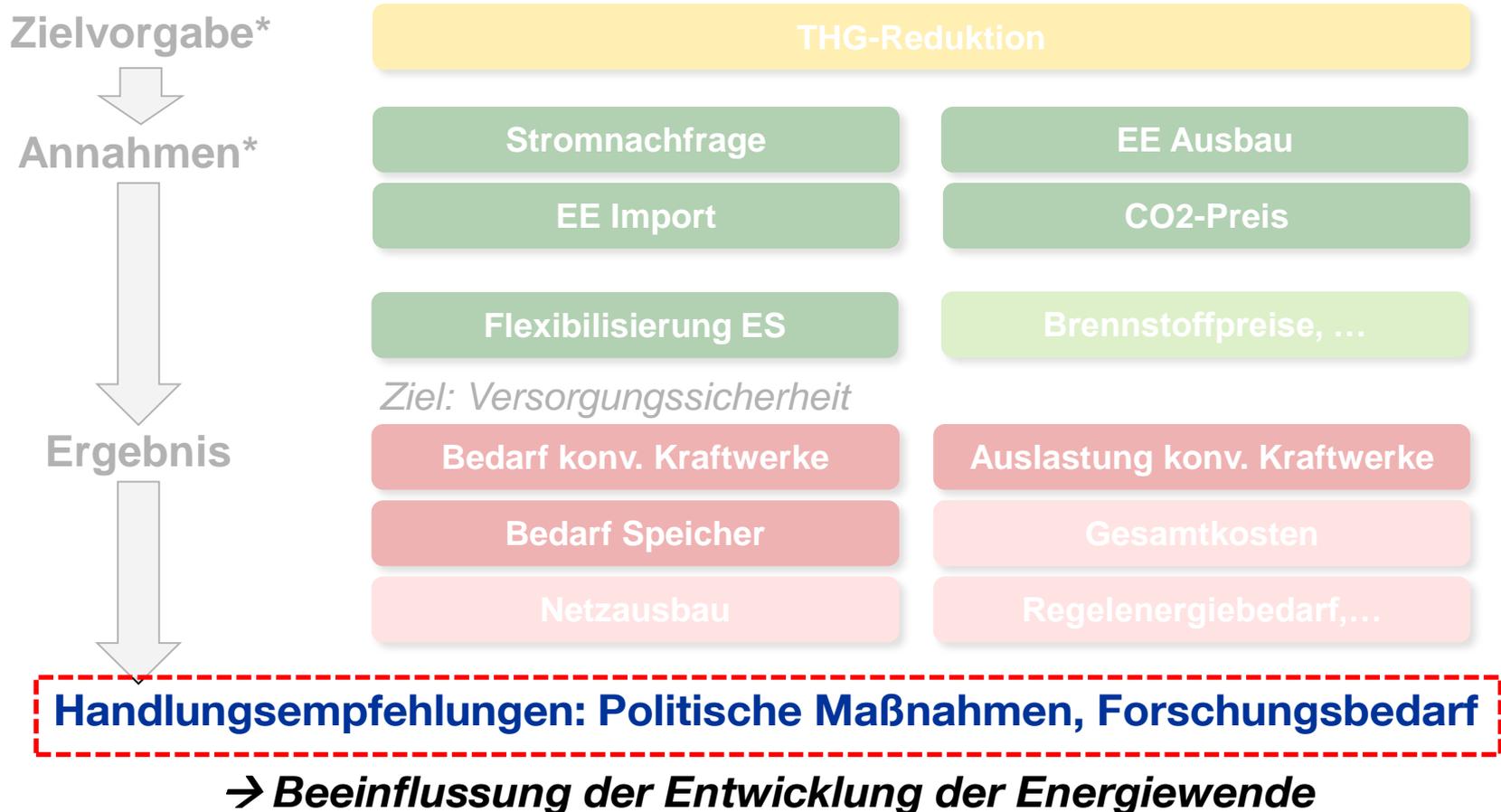


	BMWi (2011)	WWF (2009) CCS	WWF (2009)	BMWi (2014) Trend	BMU (2012)	SRU (2011) 2.2.a	BMWi (2014) Ziel	BMWi Rdmp (2014) A	BMWi Rdmp (2014) B	BMWi Rdmp (2014) C	VDE (2012) E	Agora (2014)	UBA (2010)	SRU (2011) 1.a
--	-------------	----------------	------------	-------------------	------------	------------------	------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------	--------------	------------	----------------

* Pauschale H2-Produktion für den Mobilitätssektor ** Benötigte Speicherkapazität

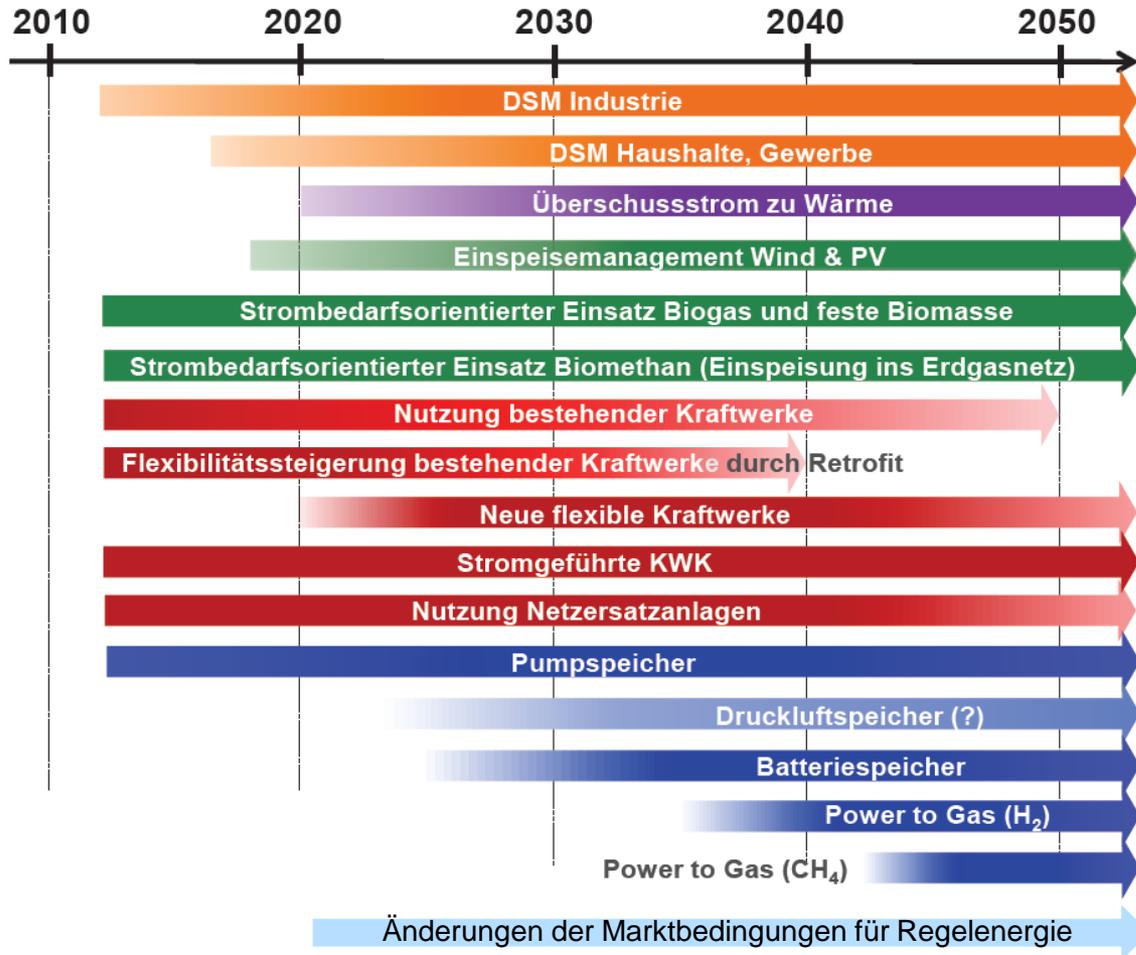
**Überschussstrommenge bis zu 10-15 % des
Bruttostromverbrauchs**

Energiesystemstudien sind bedingte Prognosen basierend auf Szenarien



*Können auch als Ergebnis angesehen werden

Maßnahmen für Versorgungssicherheit



Quelle: BEE 2013

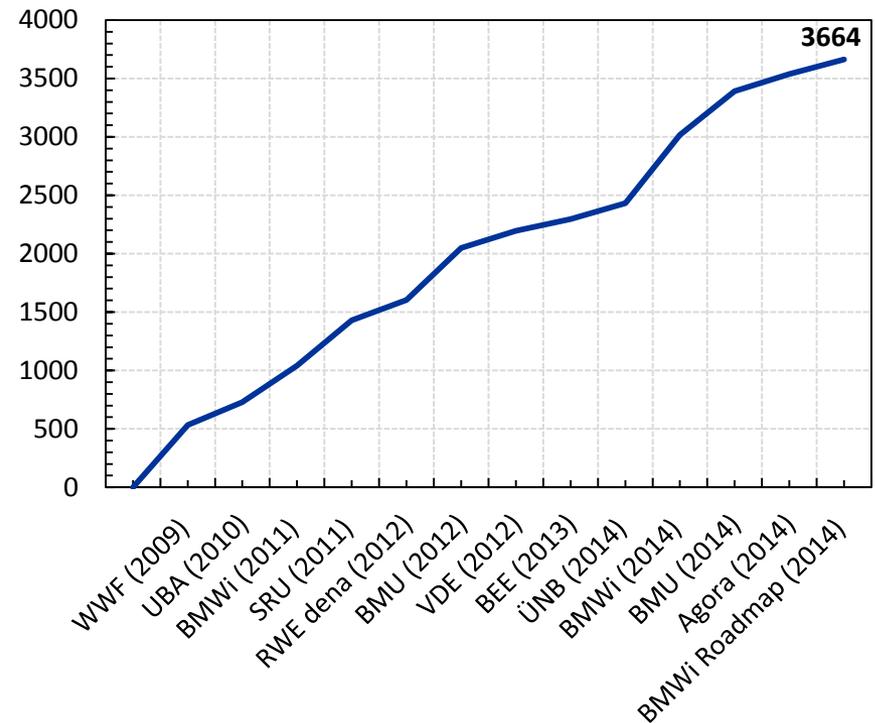
Netzausbau und Europaweite Strategie

Zusammenfassung

- Benötigter CO₂-Preis für 80%-THG-Reduktion: >75 €/t CO₂
- 80 % EE benötigt eine Verdopplung der Installierten EE-Leistung (ca. 150-200 GW)
- Ausbau Wind-Onshore unterschätzt, Wind-Offshore überschätzt
- Deutschland wird vom Strom-Exporteur zum Importeur
- Bedarf an konventionellen Kraftwerken sinkt bis 2050 auf 20-60 GW bei stark sinkender Auslastung (Wirtschaftlichkeit?)
- Speicherbedarf erst nach 2030 (>60 % EE) bei ausreichender Flexibilisierung des Energiesystems
- Zusätzliche Stromspeicher (~10-30 GW) zur EE-Integration bei >80 % EE-Anteil benötigt (Kurzzeit- / Langzeitspeicher?)



Seitenzahl

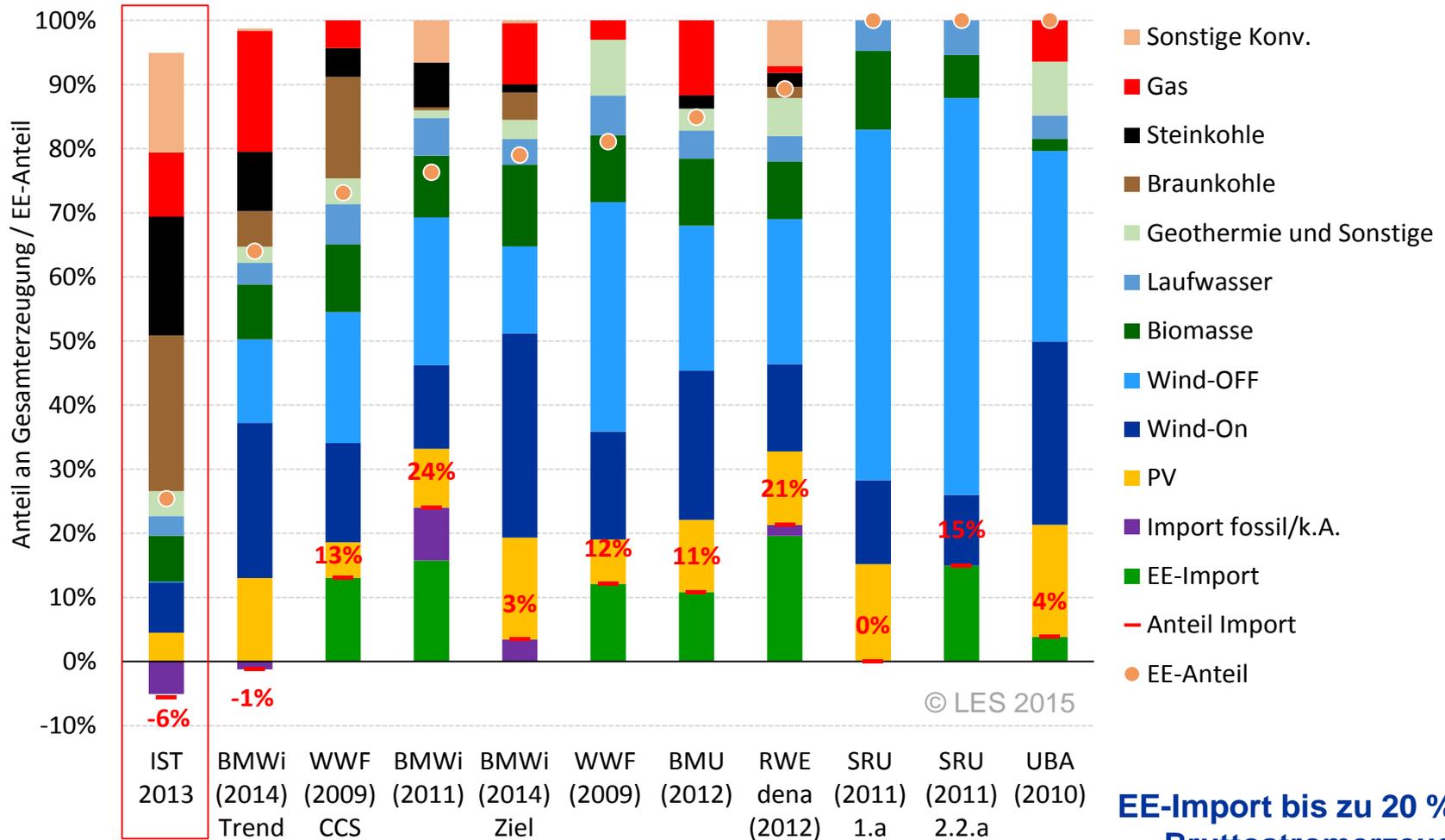


Vielen Dank für die Aufmerksamkeit

Dipl.-Ing. Alexander Buttler
Lehrstuhl für Energiesysteme
Technische Universität München

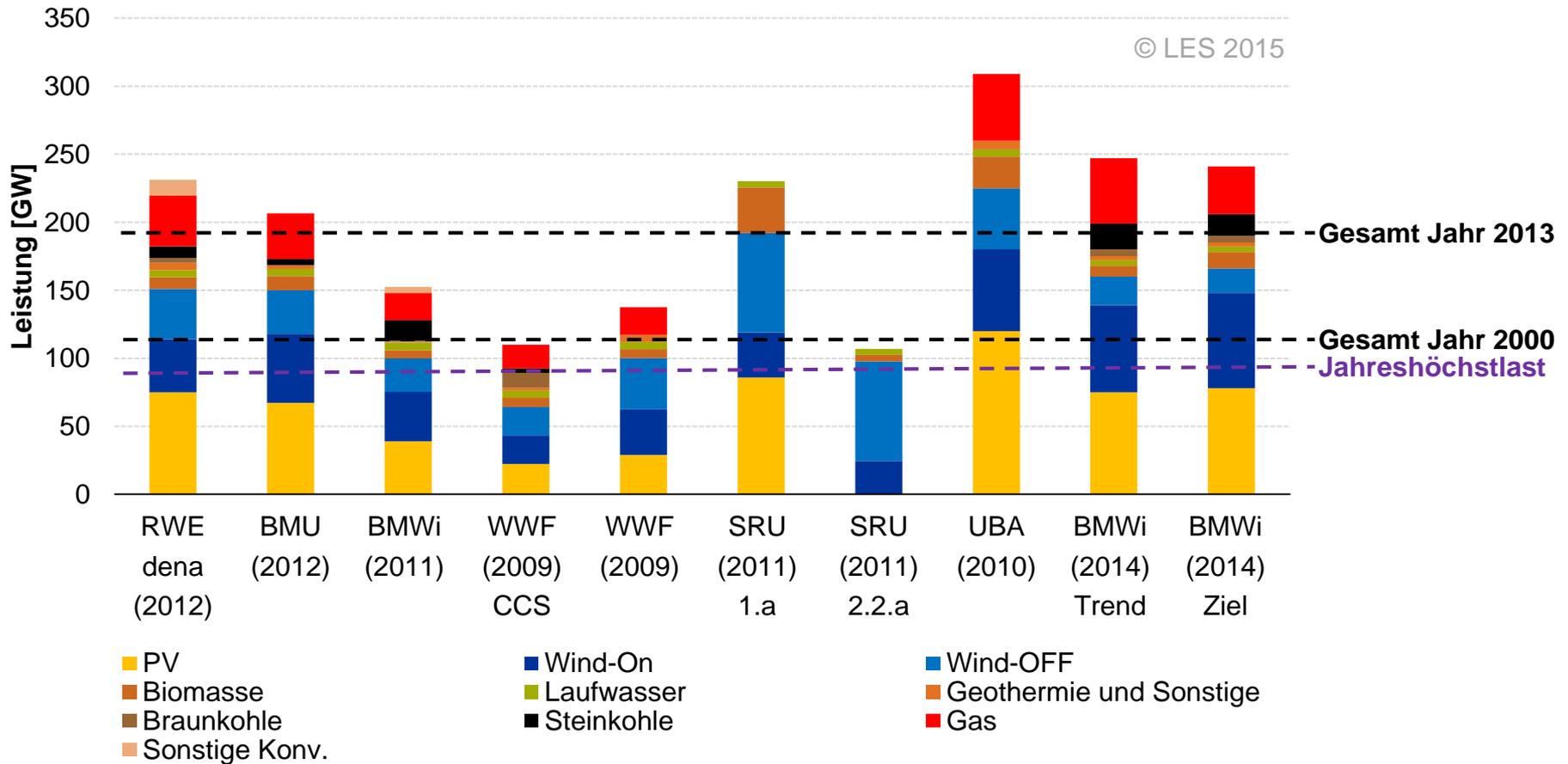
VDI Vortragsreihe Kraftwerkstechnik, 12.01.2015

Vergleich 2050 - Struktur der Stromerzeugung



**EE-Import bis zu 20 % der
Bruttostromerzeugung**

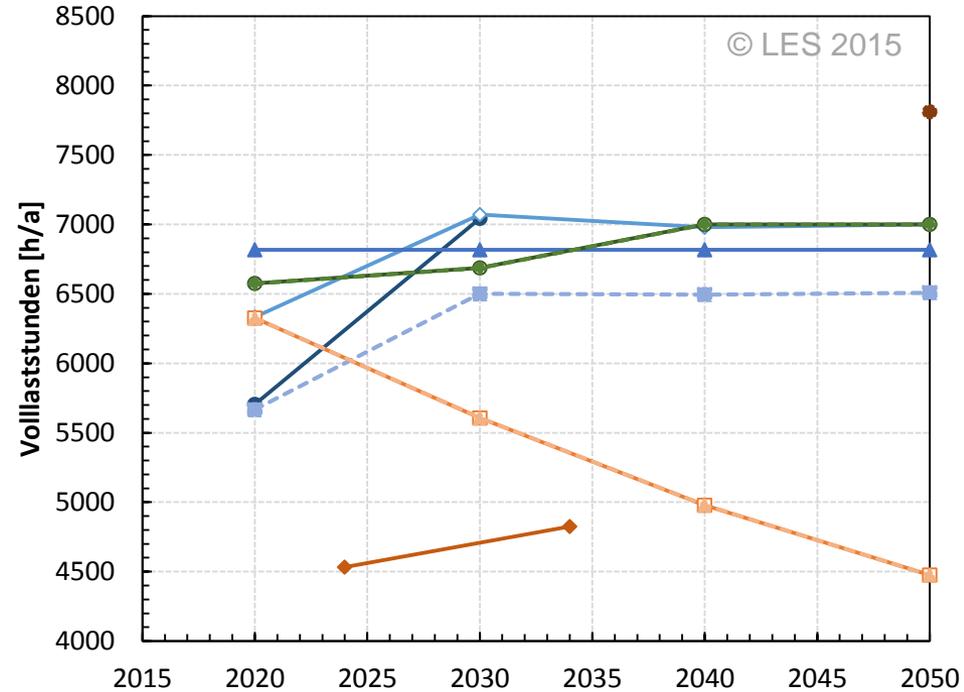
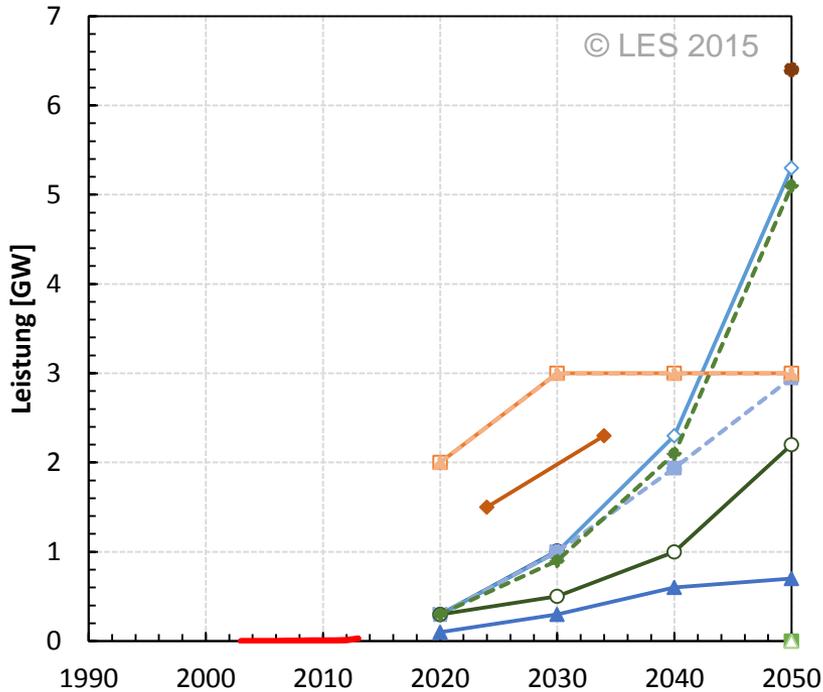
Vergleich 2050 - Installierte Leistung



Installierte Gesamtleistung übertrifft die Jahreshöchstlast deutlich

EE-Ausbau

Ausbau der erneuerbaren Energien: Geothermie



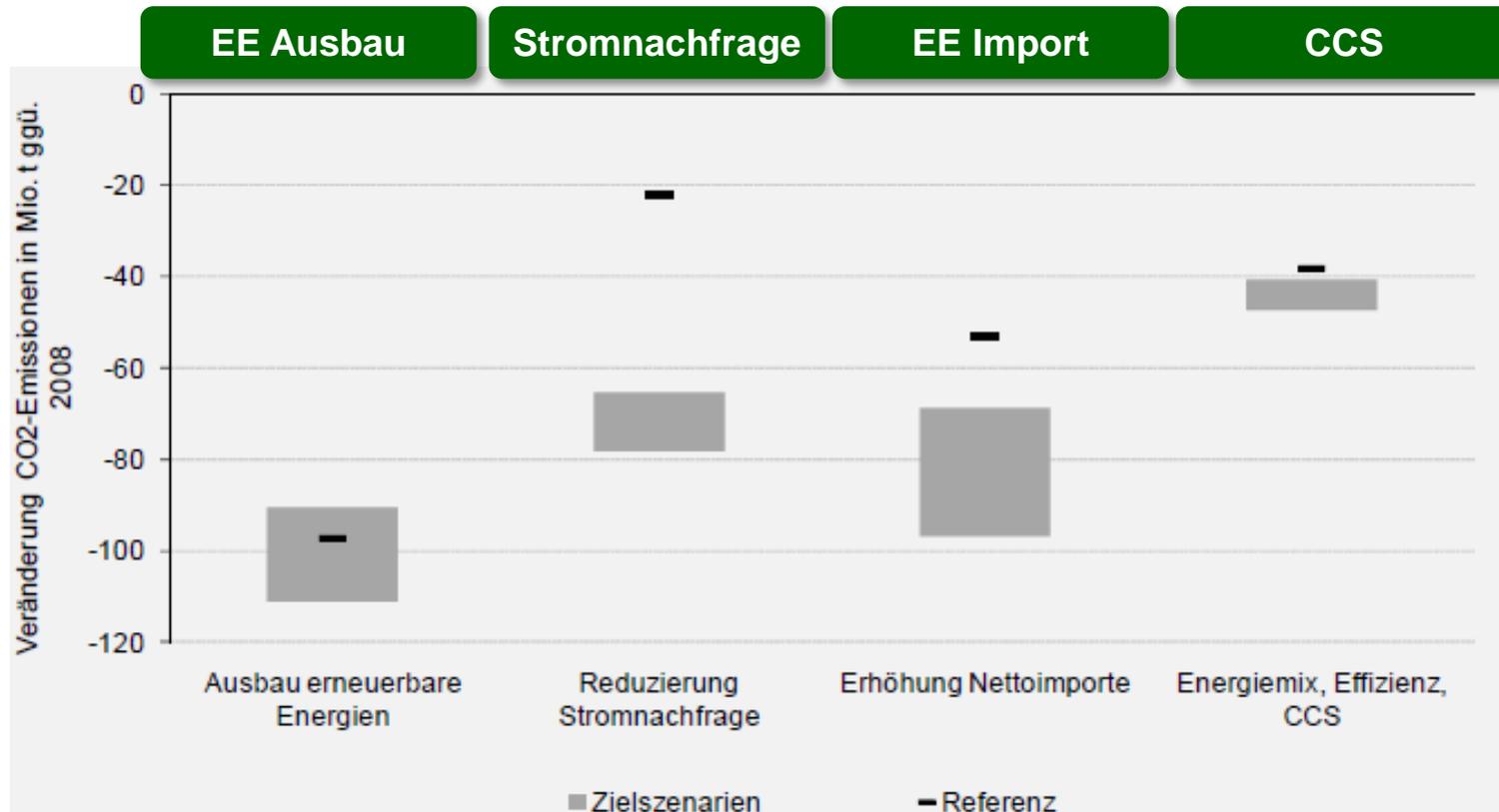
- IST 1990-2013
- BEE (2013)
- ◇- RWE dena (2012)*
- BMW (2014) Ziel
- ▲- BMWi (2011)
- WWF (2009) CCS
- △- SRU (2011) 2.2.a
- ◆- WWF (2009)
- SRU (2011) 1.a
- ◇- ÜNB (2014) NEP-B *
- BMWi (2014) Trend

2013 nur 31 MW installierte Leistung

**Einsatz im Grund- und
Mittellastbereich**

THG-Reduktion

Beispiel BMWi(2010): Beiträge der einzelnen Maßnahmen zur THG-Reduktion

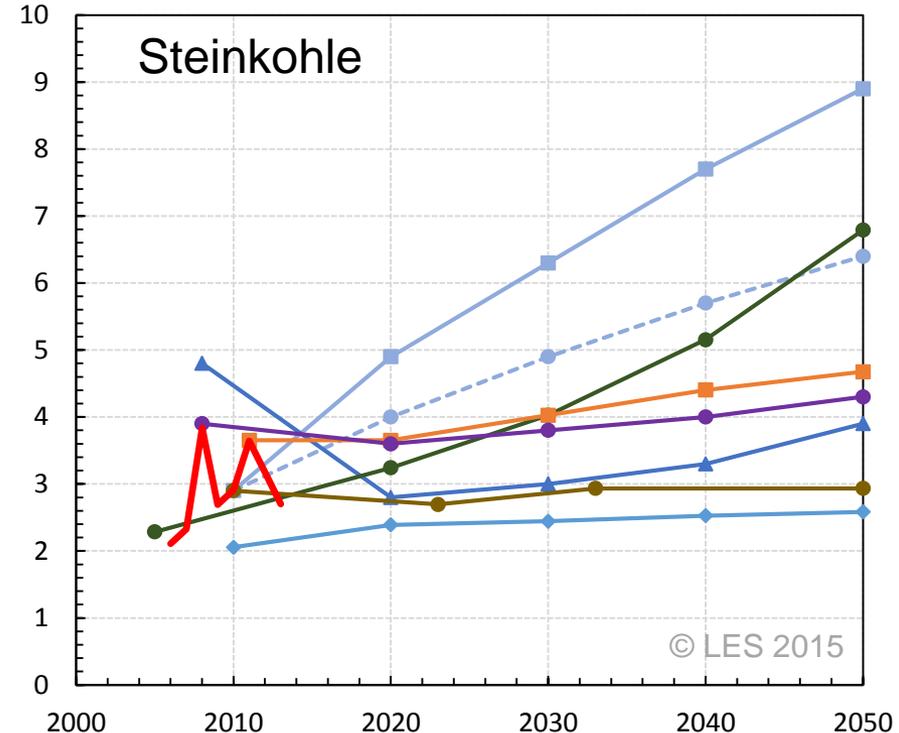
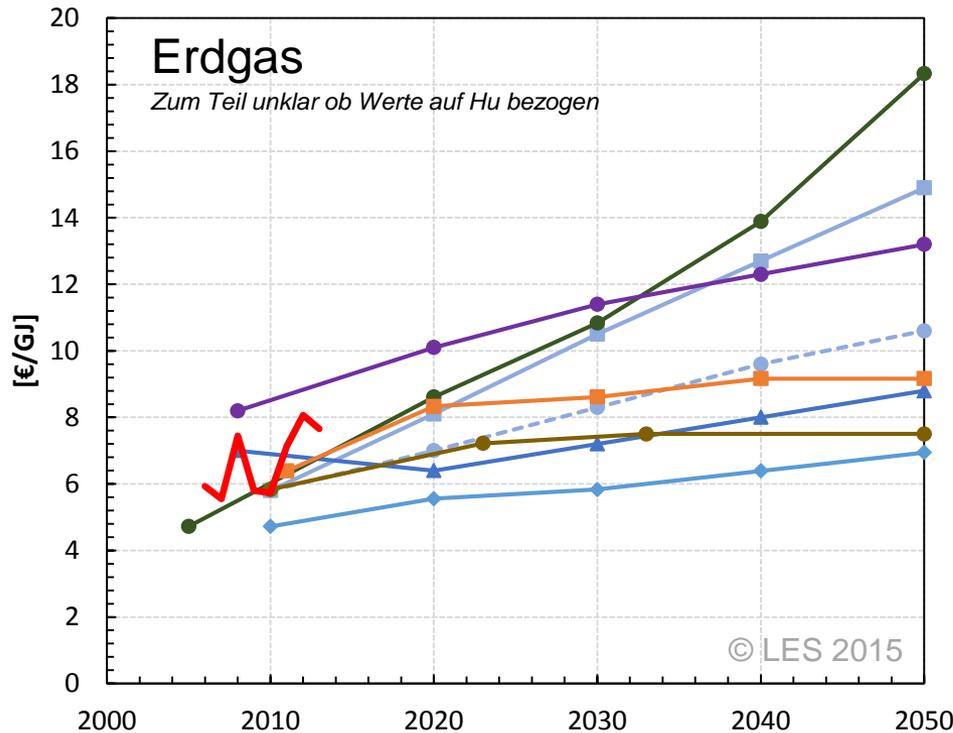


CO2-Reduktion im Stromsektor im Jahr 2050 ggü. 2008 in BMWi (2010)

Nutzung aller Möglichkeiten zur Erreichung des THG-Reduktionsziels

Brennstoffpreis

Entwicklung der Brennstoffpreise



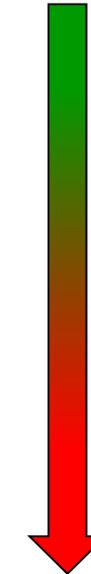
- ◆— RWE dena (2012)
- BMU (2012) Preispfad A
- BMU (2012) Preispfad B
- ▲— BMWi (2011)
- WWF (2009) - /CCS
- BMWi (2014) Trend /Ziel
- Agora (2014)
- BMU (2014)
- Hist. Werte

**Anstieg der Erdgas- und Steinkohlepreise
moderat bis stark**

Überblick Brennstoff- und CO2-Preise

Kosten	Steinkohle	Erdgas	CO2
RWE dena (2012)	Green	Green	Green
Agora (2014)	Green	Green	Yellow
BMWi (2014) Trend /Ziel	Yellow	Yellow	Yellow
BMWi (2011)	Yellow	Yellow	Yellow
BMU (2012) Preispfad B	Red	Yellow	Green
BMU (2014) AMS	Yellow	Red	Green
WWF (2009) - /CCS	Red	Red	Green
BMU (2012) Preispfad A	Red	Red	Yellow
BMU (2014) KS80	Yellow	Red	Red
BMU (2014) KS90	Yellow	Red	Red

Niedrig



Hoch

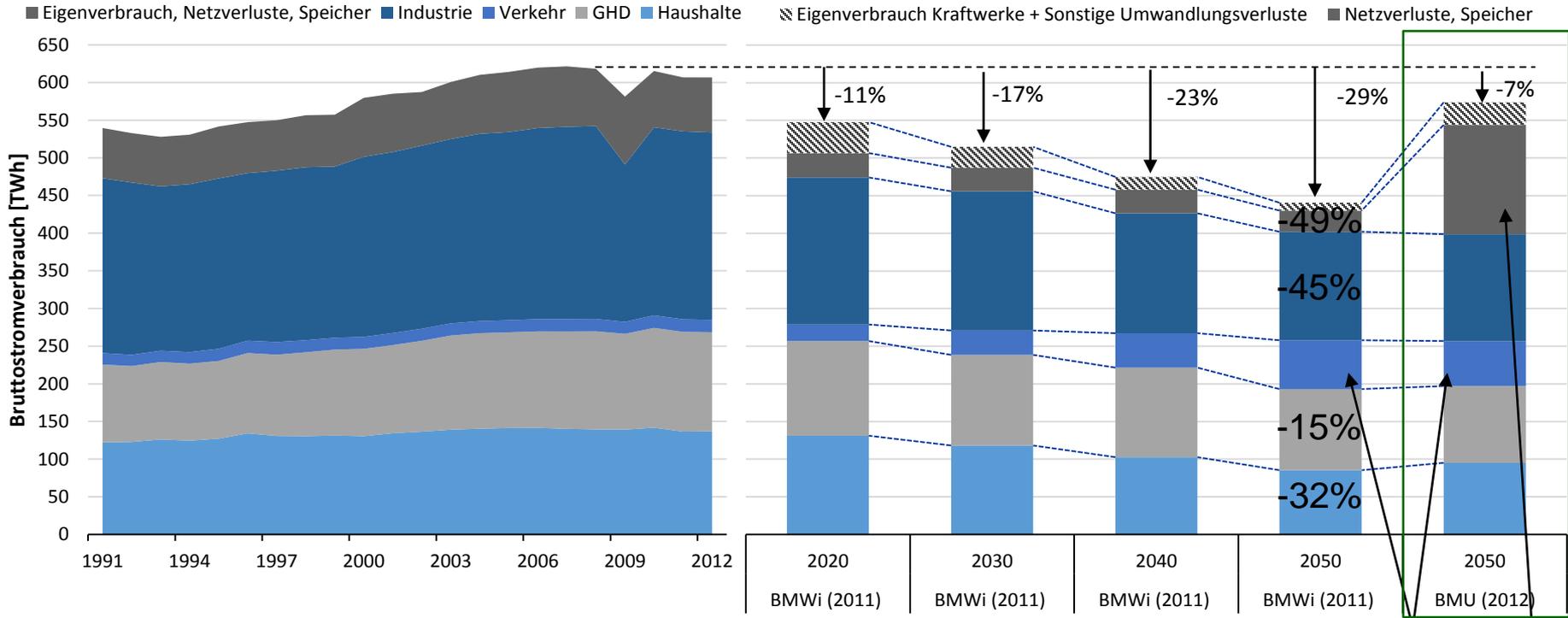
Stromgestehungskosten
konv. Kraftwerke



CO2- und Brennstoffpreis bestimmt Zusammensetzung des konventionellen Kraftwerksparks und Konkurrenzfähigkeit ggü. EE-Anlagen

Stromnachfrage

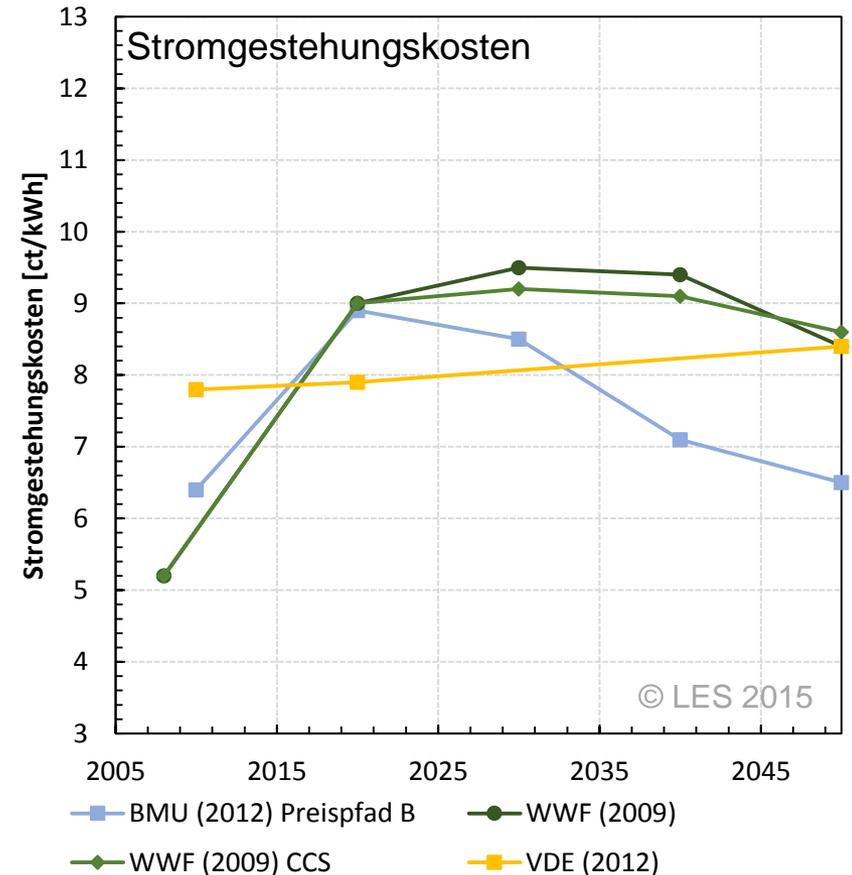
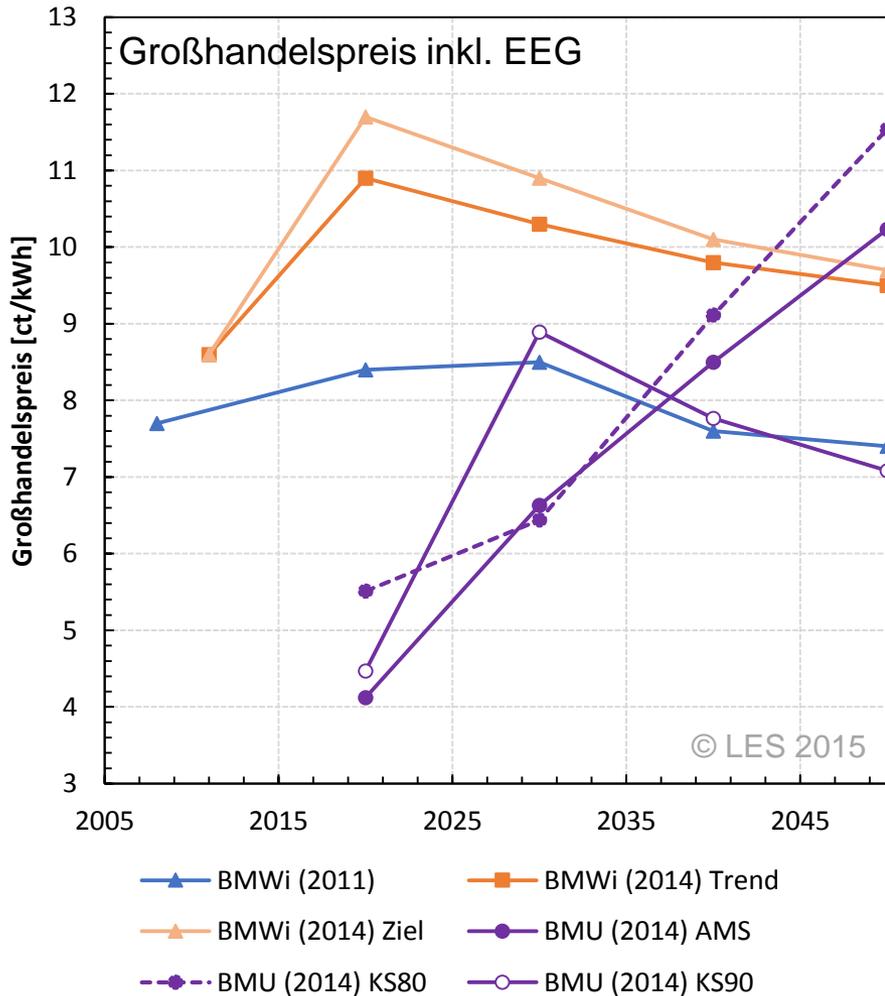
Detaillierte Betrachtung des Nachfragerückgangs



+ca. 45 TWh E-Kfz
101 TWh H₂

Bruttostromverbrauch stark abhängig von Entwicklung Verkehr (H₂, E-Kfz)

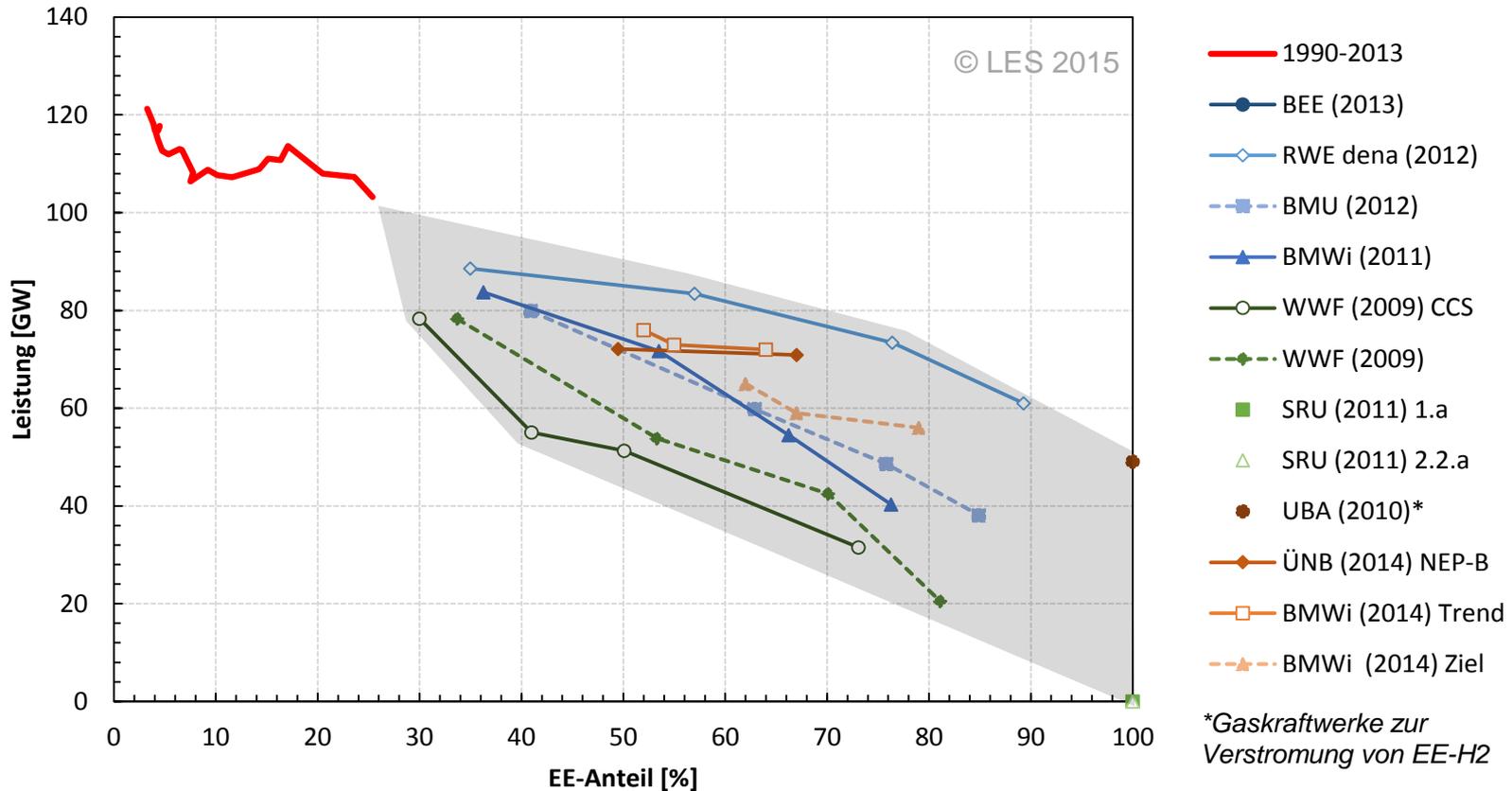
Gesamtkosten Ergebnis Kosten



**Preis langfristig auf heutigem Niveau durch
Lernkurveneffekte der EE**

Kraftwerke

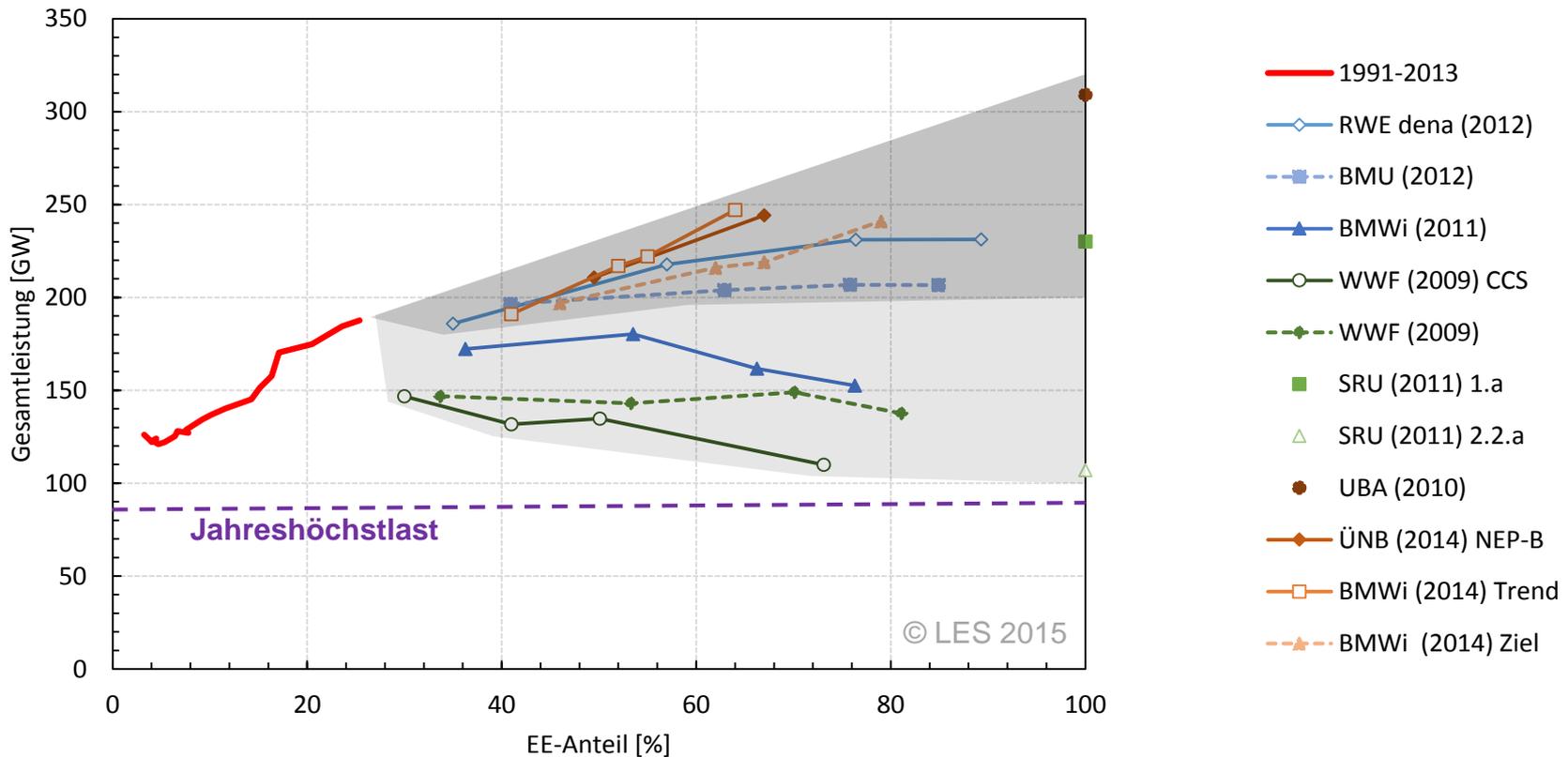
Bedarf an konventionellen Kraftwerken



*Gaskraftwerke zur
Verstromung von EE-H2

Bedarf von 20-70 GW in 80 % EE-Szenarien

Vergleich 2050 - Installierte Leistung



Installierte Gesamtleistung übertrifft die Jahreshöchstlast deutlich