

Die Energiewende im Stromsektor

*Stand der Dinge, Trends und
Herausforderungen*

Letzte Aktualisierung:
14.10.2015



Agora Energiewende – Wer wir sind



Think Tank mit 20 Experten
unabhängig und überparteilich

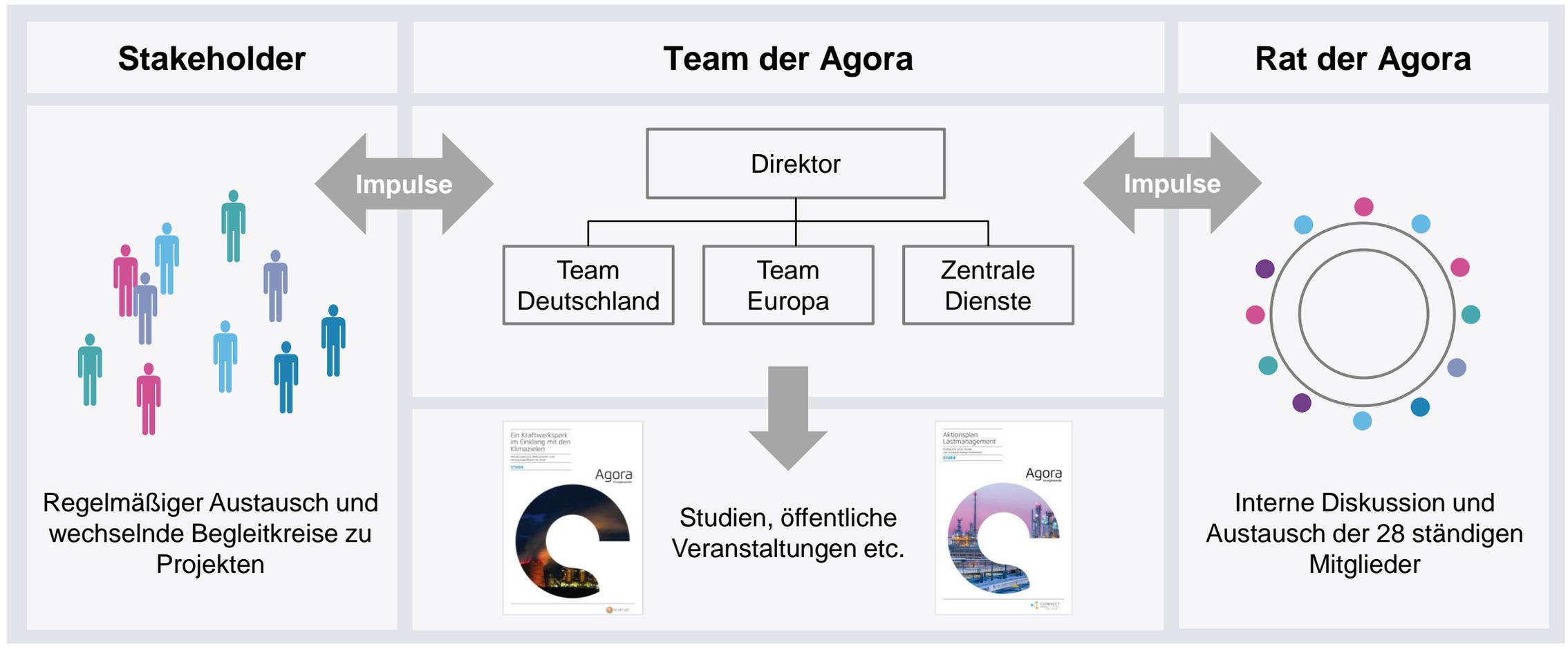
Projektdauer 2012-2017

Finanziert mit rund 14 Mio. Euro durch
die Stiftung Mercator & ECF

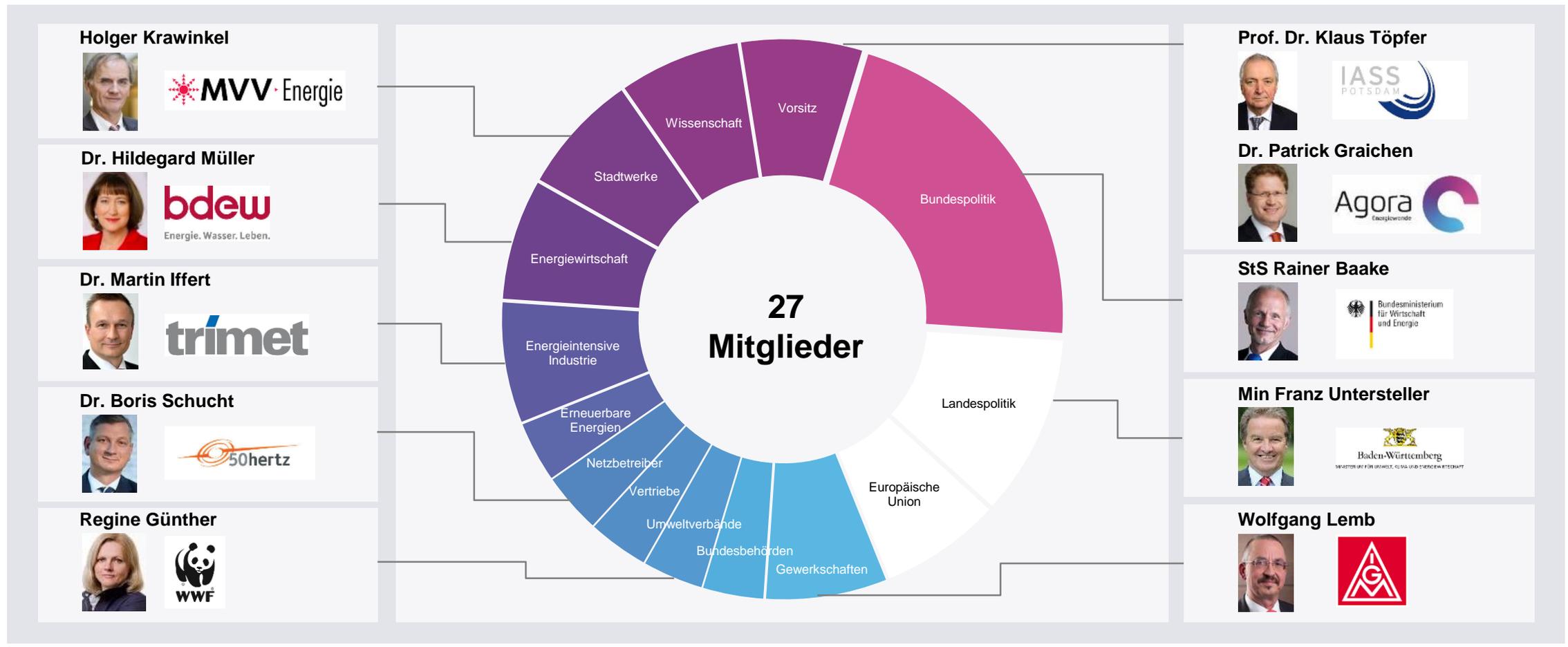
Aufgabe: Die Energiewende in
Deutschland zur Erfolgsgeschichte
machen

Methoden: Analysen, Studien,
Expertenaustausch, Dialog der
Entscheidungsträger, Rat der Agora

Agora Energiewende – Wie wir arbeiten



Agora Energiewende – Der Rat der Agora

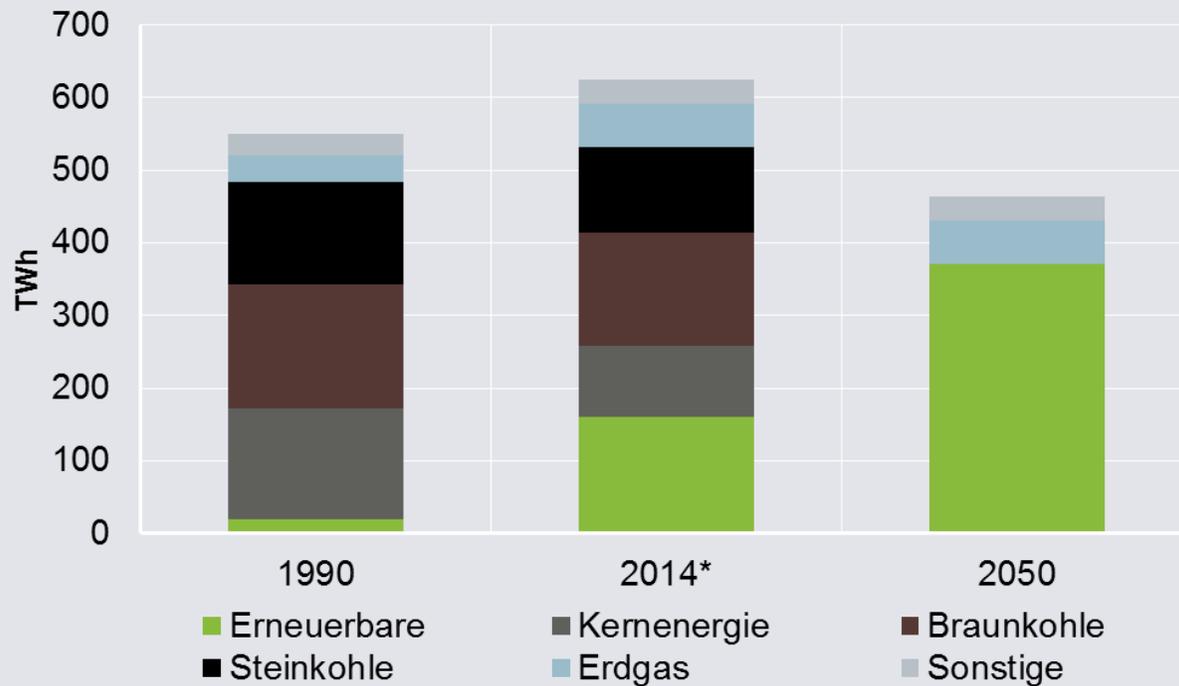




**Was bedeutet die
Energiewende für
den Stromsektor?**

Die Energiewende bedeutet den Komplett-Umbau der Stromversorgung: Weg von Kernenergie und Kohle, hin zu Erneuerbaren Energien und Effizienz

Bruttostromerzeugung 1990, 2014 und 2050



Ausstieg aus der Kernenergie

Schrittweise Stilllegung aller Kernkraftwerke bis 2022

Reduktion der Treibhausgase

Schrittweise Reduktion gegenüber 1990:

- 40% bis 2020; - 55% bis 2030; - 70% bis 2040;
- 80% bis - 95% in 2050

Ausbau der Erneuerbaren Energien

Anteil am Bruttostromverbrauch: 40 - 45% in 2025; 55 - 60% in 2035; ≥ 80% in 2050

Steigerung der Effizienz

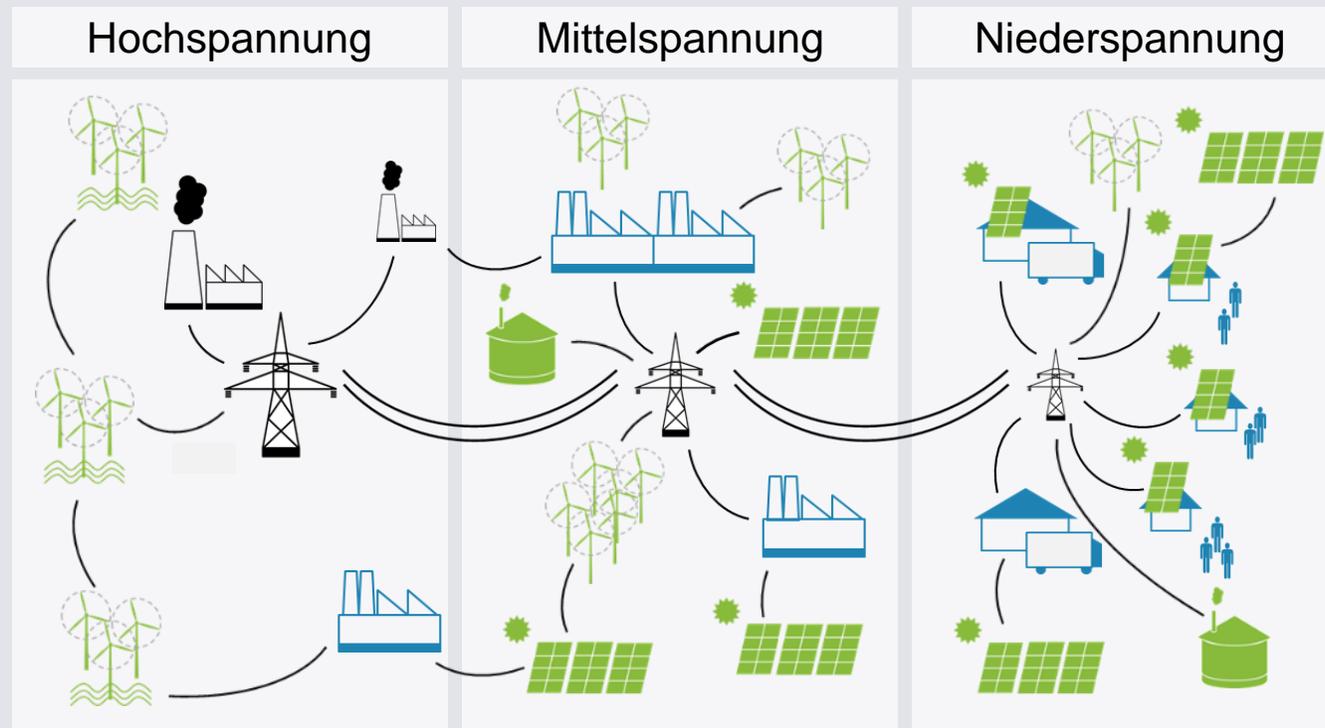
Reduktion des Stromverbrauchs gegenüber 2008:

- 10% in 2020; - 25% in 2050

AGEB (2015a), BReg (2010), EEG (2014), eigene Berechnungen * vorläufig

Die Energiewende führt in ein neues Stromsystem, das von Flexibilität, Dezentralität und Akteursvielfalt geprägt sein wird

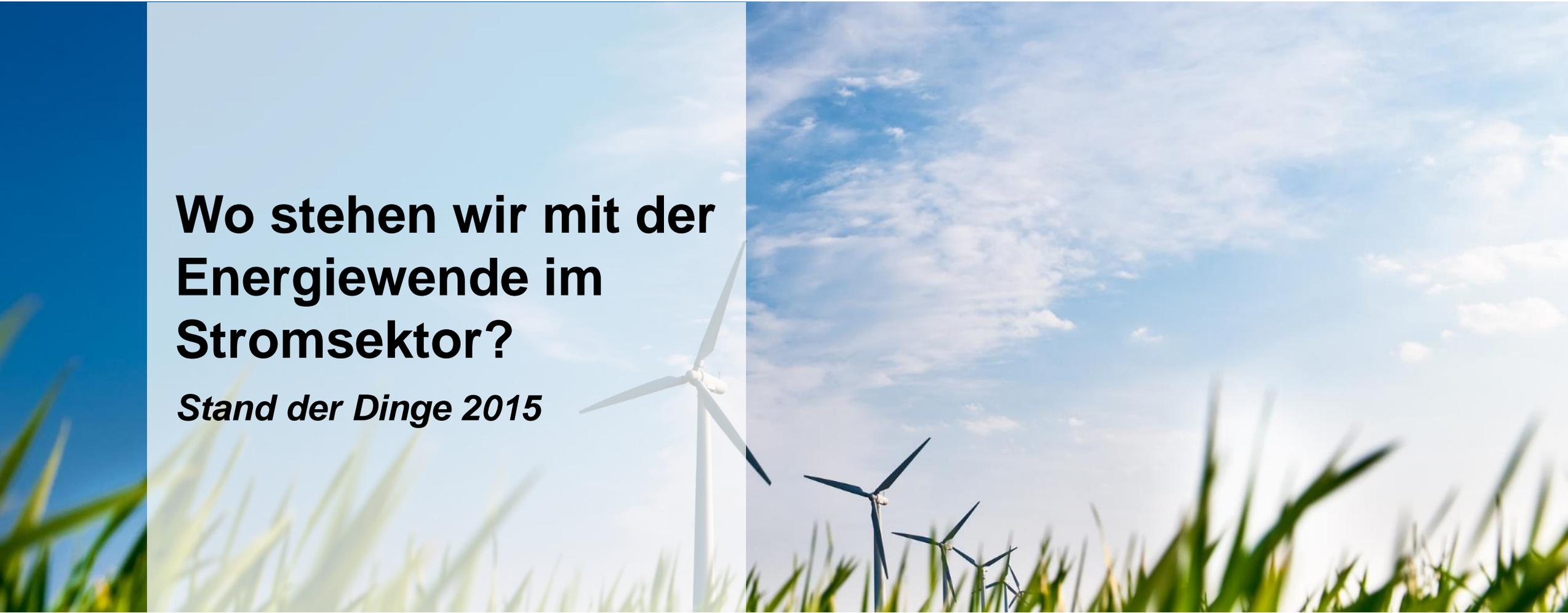
Illustrative Darstellung des alten und neuen Stromsystems



Eigene Darstellung

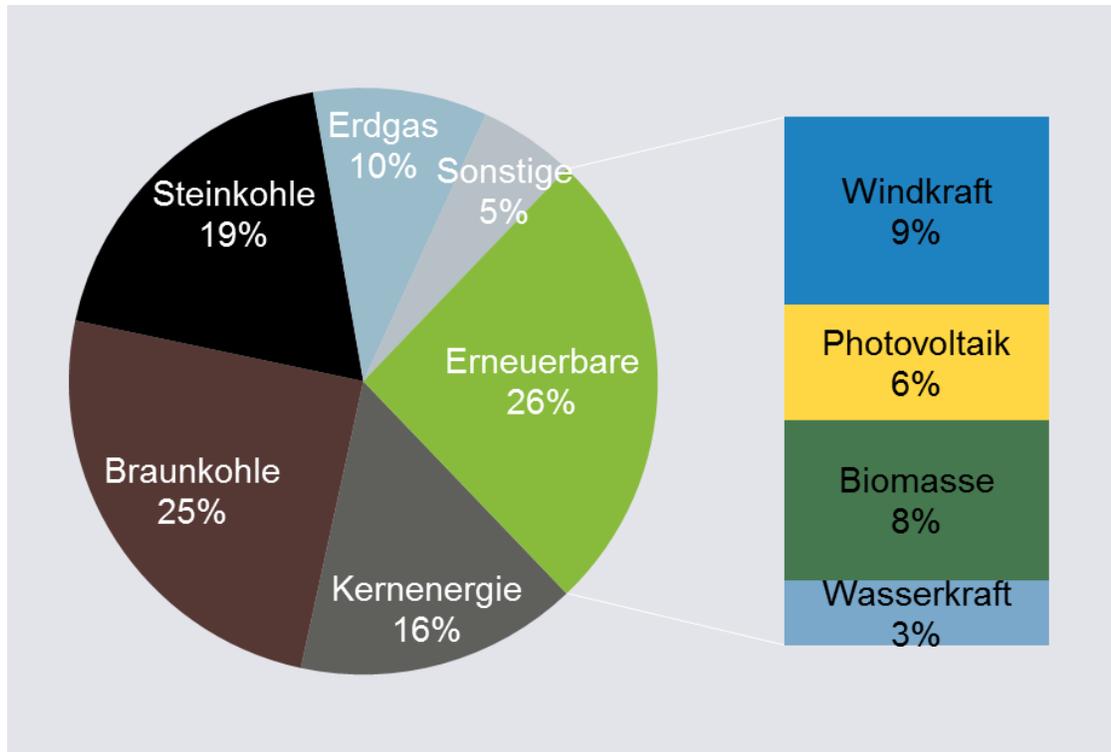
Wo stehen wir mit der Energiewende im Stromsektor?

Stand der Dinge 2015



Erneuerbare Energien stehen an erster Stelle im Stromsystem – gefolgt von Braun- und Steinkohle

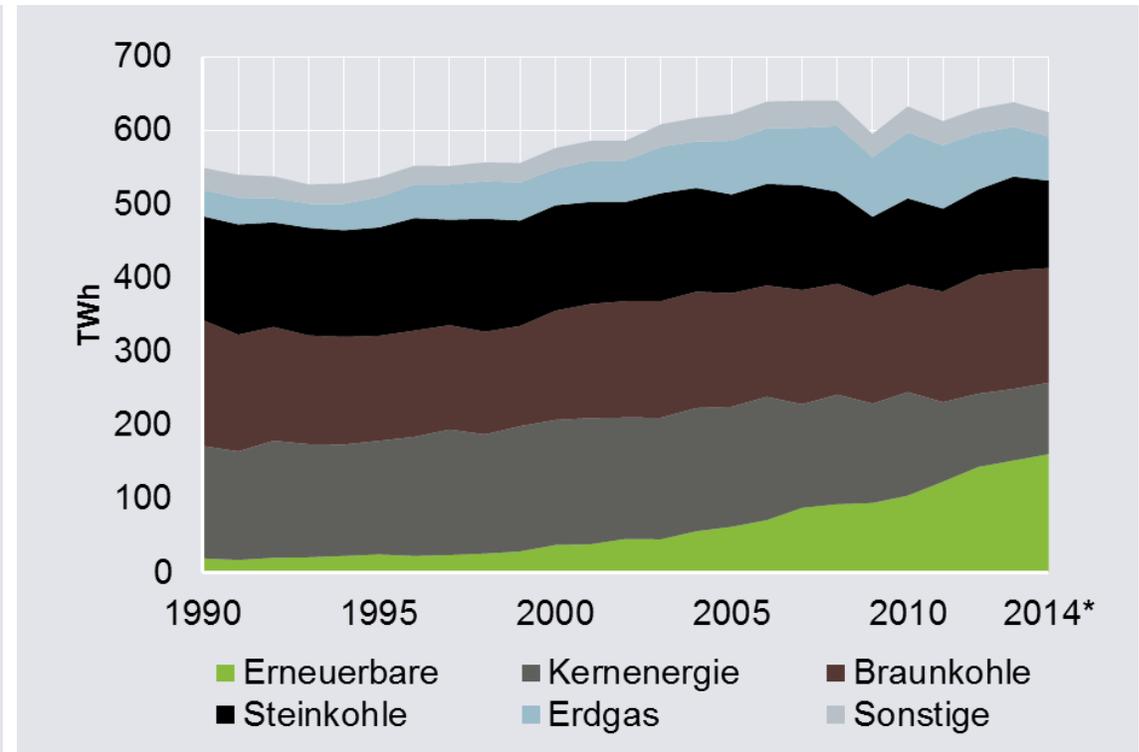
Anteil der Energieträger an der Bruttostromerzeugung 2014



AGEB (2015a)

* vorläufig

Bruttostromerzeugung nach Energieträgern 1990 – 2014

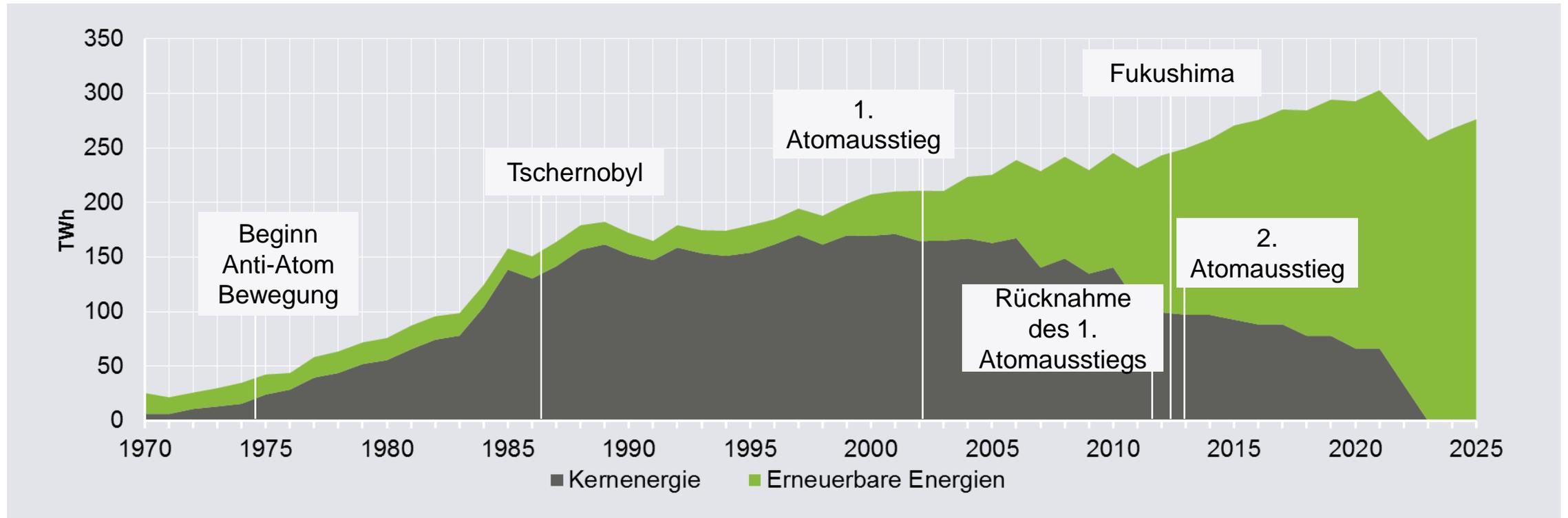


AGEB (2015a)

* vorläufig

Von den 24 Kernkraftwerken, die 1990 in Deutschland am Netz waren, sind derzeit noch 8 in Betrieb - diese werden laut Atomgesetz bis 2022 nach und nach stillgelegt

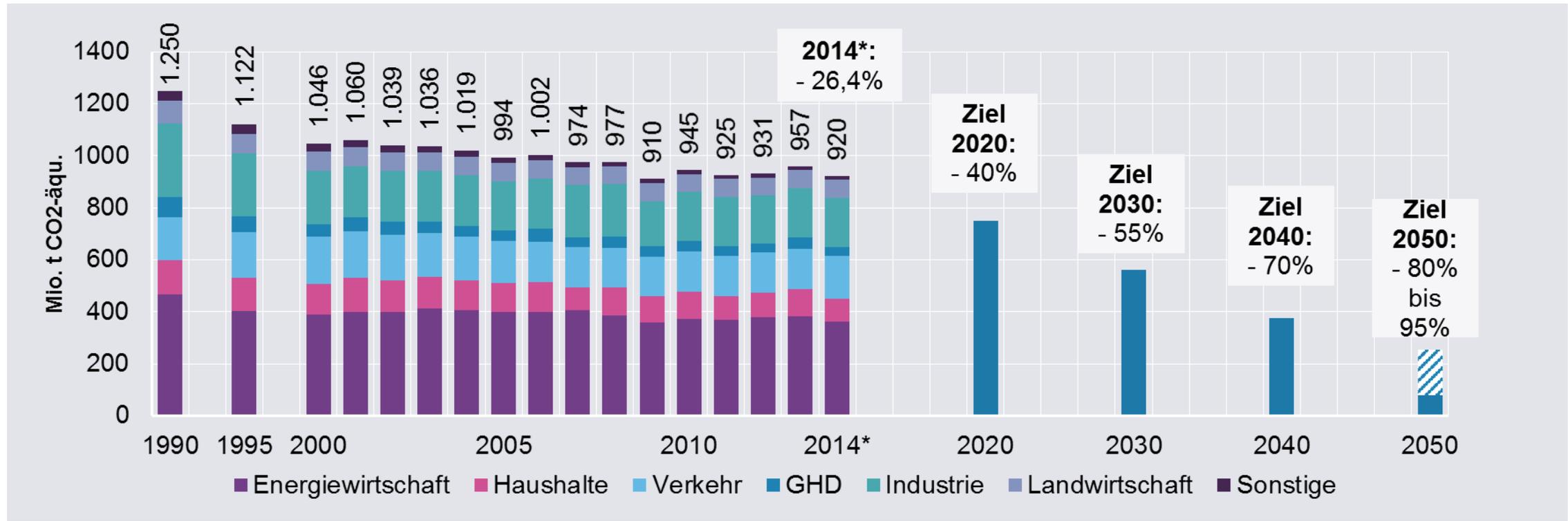
Bruttostromerzeugung aus Kernenergie und Erneuerbaren Energien 1970 – 2025



AGEB (2015a), AGEE (2015), BNetzA (2014), Statistisches Jahrbuch der DDR (1973 - 1988), eigene Berechnungen

Bis 2014 sind die Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 um 26 Prozent zurückgegangen - der Sektor mit den meisten Emissionen ist die Energiewirtschaft

Treibhausgasemissionen nach Sektoren 1990 - 2014 und Klimaschutzziele laut Energiekonzept (2010) 2020 - 2050

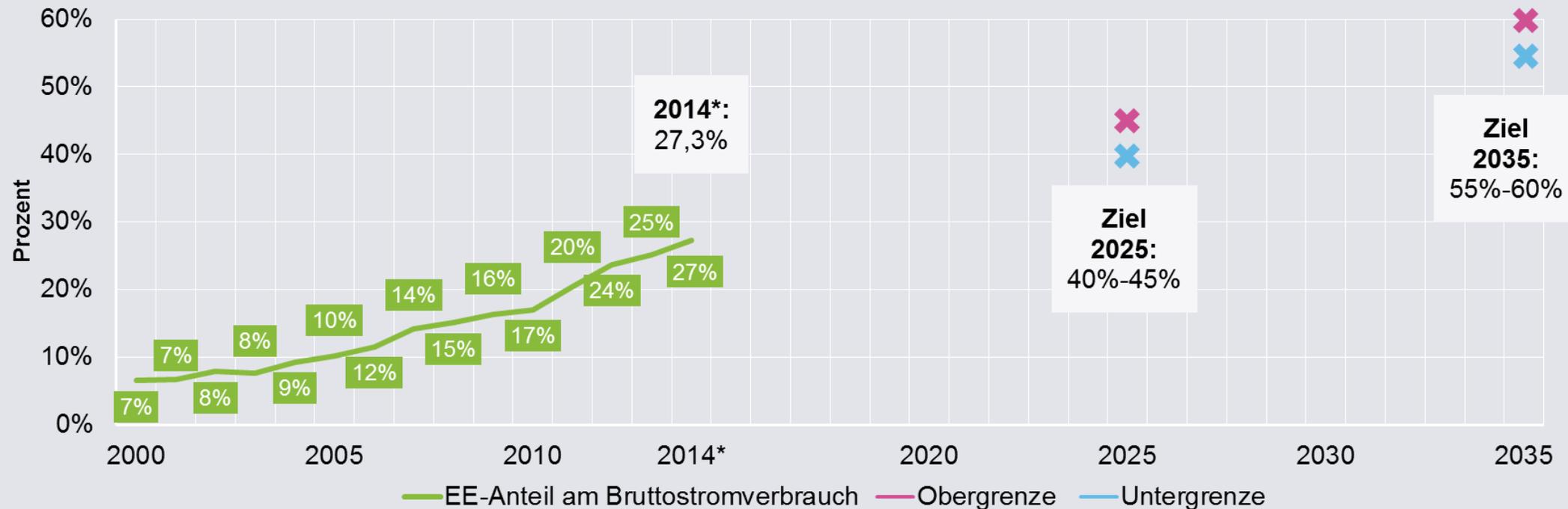


AGEB (2015a), UBA (2015), eigene Berechnungen

*vorläufig

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz sieht einen steigenden Anteil der Erneuerbaren Energien auf 40 - 45% bis 2025 und auf 55 - 60% bis 2035 vor

Anteil der Erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch 2000 - 2014 und Ausbauziele laut EEG (2014) 2025 - 2035

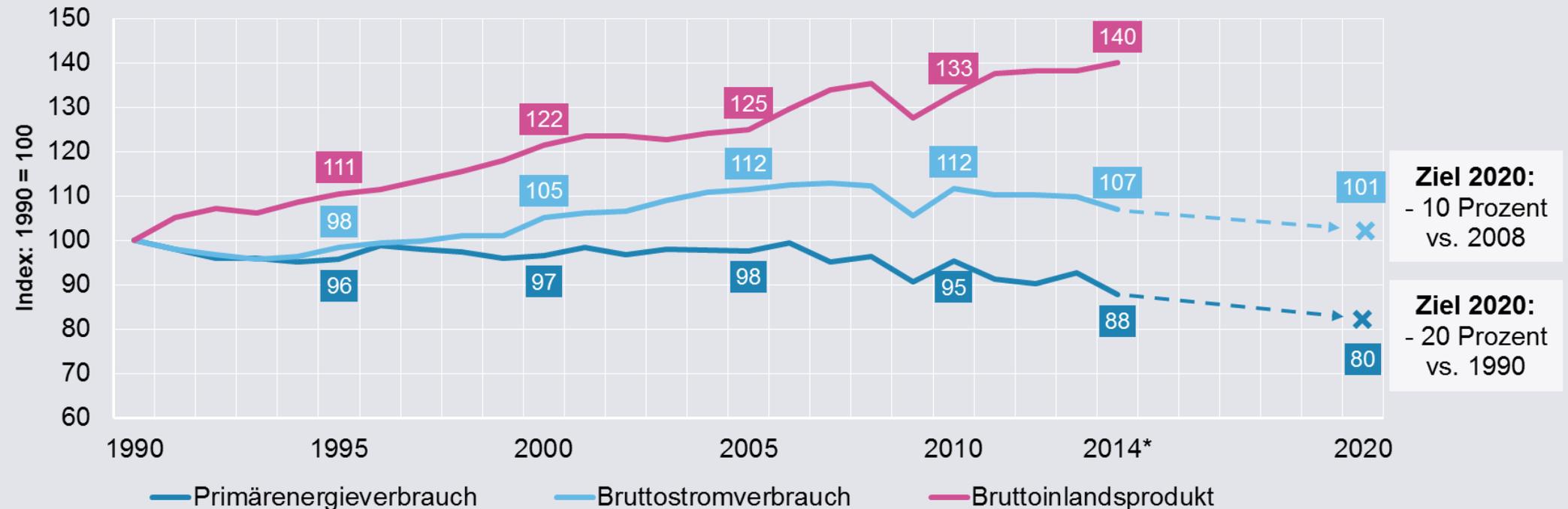


AGEB (2015a), EEG (2014)

*vorläufig

Deutschland hat das Wirtschaftswachstum vom Energie- und Stromverbrauch entkoppelt – aber zur Erreichung der Effizienzziele 2020 sind weitere Anstrengungen nötig

Primärenergieverbrauch, Bruttostromverbrauch und Bruttoinlandsprodukt 1990 - 2014 und Effizienzziele laut Energiekonzept 2020

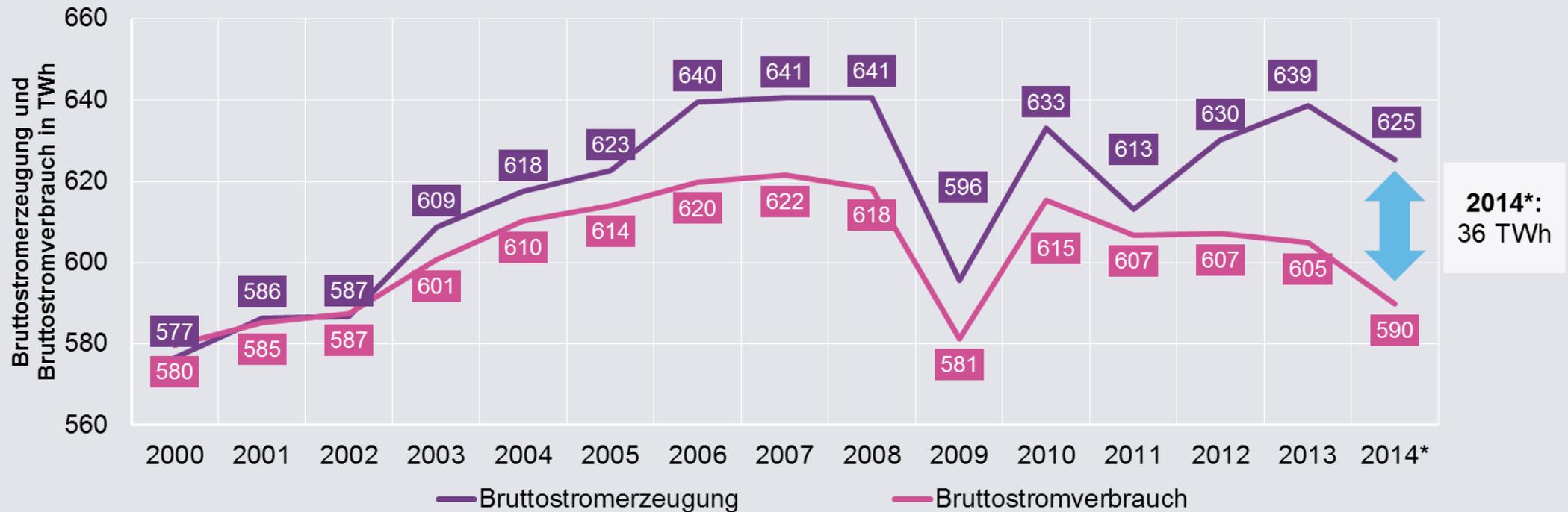


BMWi (2015) nach AGEb (2015a), AGEb (2015b), Destatis (2015c); BReg (2010)

*vorläufig

Seit 2002 erzeugt Deutschland mehr Strom als es verbraucht – im Jahr 2014 gab es erneut einen Rekord: Etwa 6% der deutschen Stromerzeugung floss in die Nachbarländer

Bruttostromerzeugung und Bruttostromverbrauch 2000 - 2014

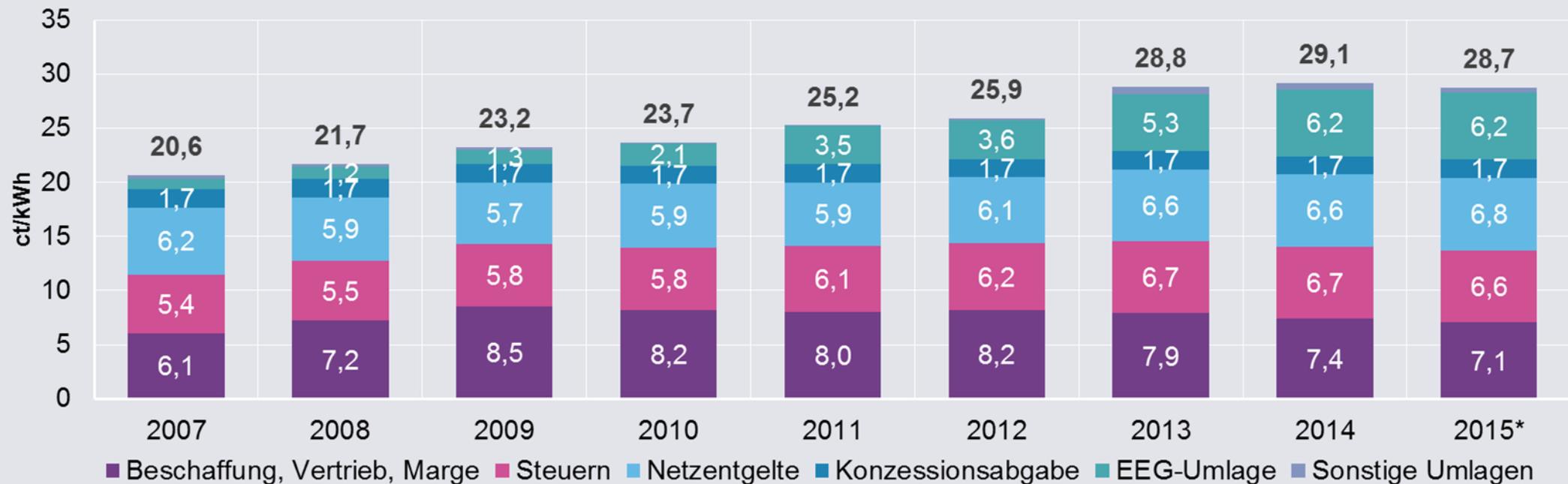


AGEB (2015a)

*vorläufig

Die Strompreise für Haushaltskunden sind – nach den deutlichen Anstiegen der Vorjahre – seit 2013 relativ stabil

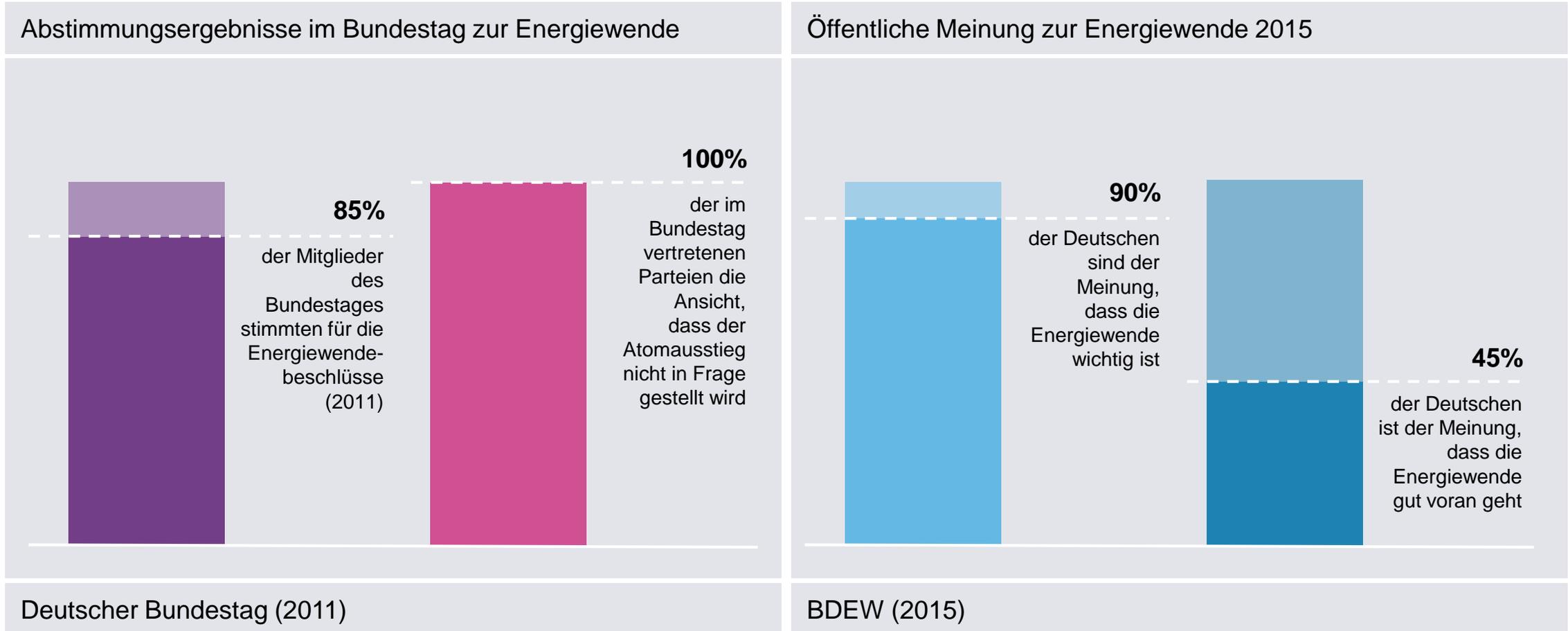
Durchschnittlicher Strompreis für einen 3-Personen-Haushalt 2007 - 2015



BDEW (2015b)

* vorläufig

Die Energiewende selbst fußt auf einem breiten gesellschaftlichen Konsens – die öffentliche Debatte dreht sich vor allem um die konkrete Umsetzung



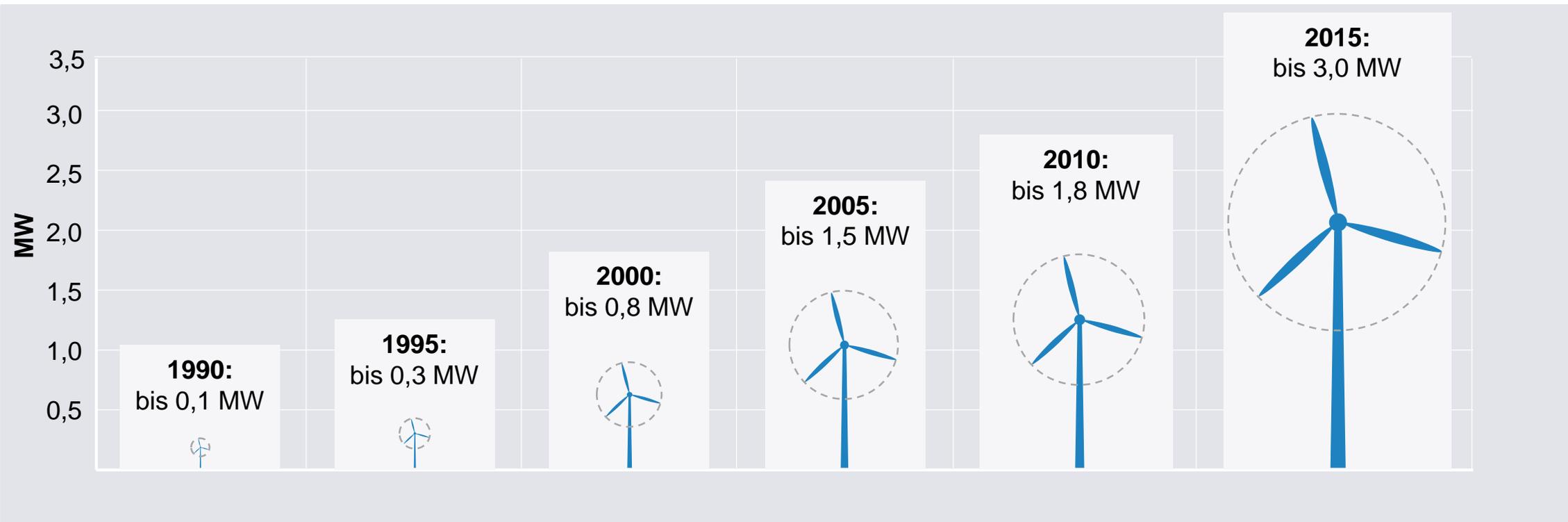
**Der 1. Hauptsatz der
Energiewende lautet:**

**Im Mittelpunkt stehen
Wind und Solar!**



Windkraftanlagen sind eine ausgereifte Technologie, bei der Anlagengrößen von 2-3 MW heute der Stand der Technik sind

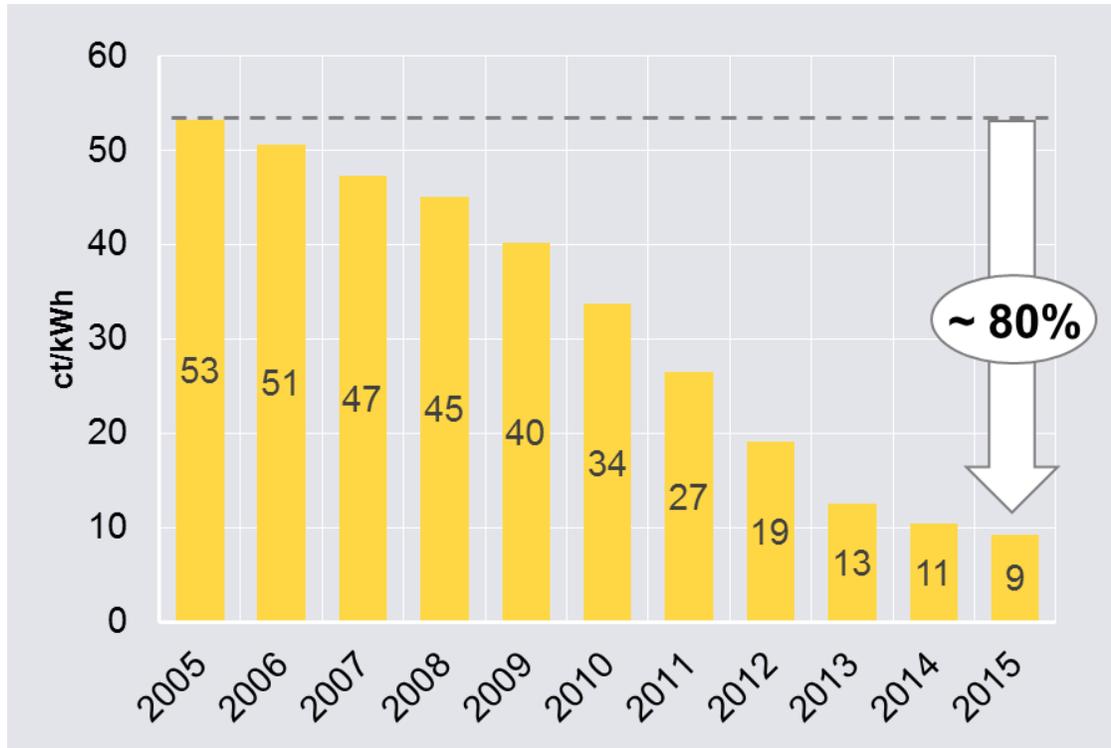
Entwicklung der Anlagengröße von Windturbinen 1990 - 2015



IEA (2013)

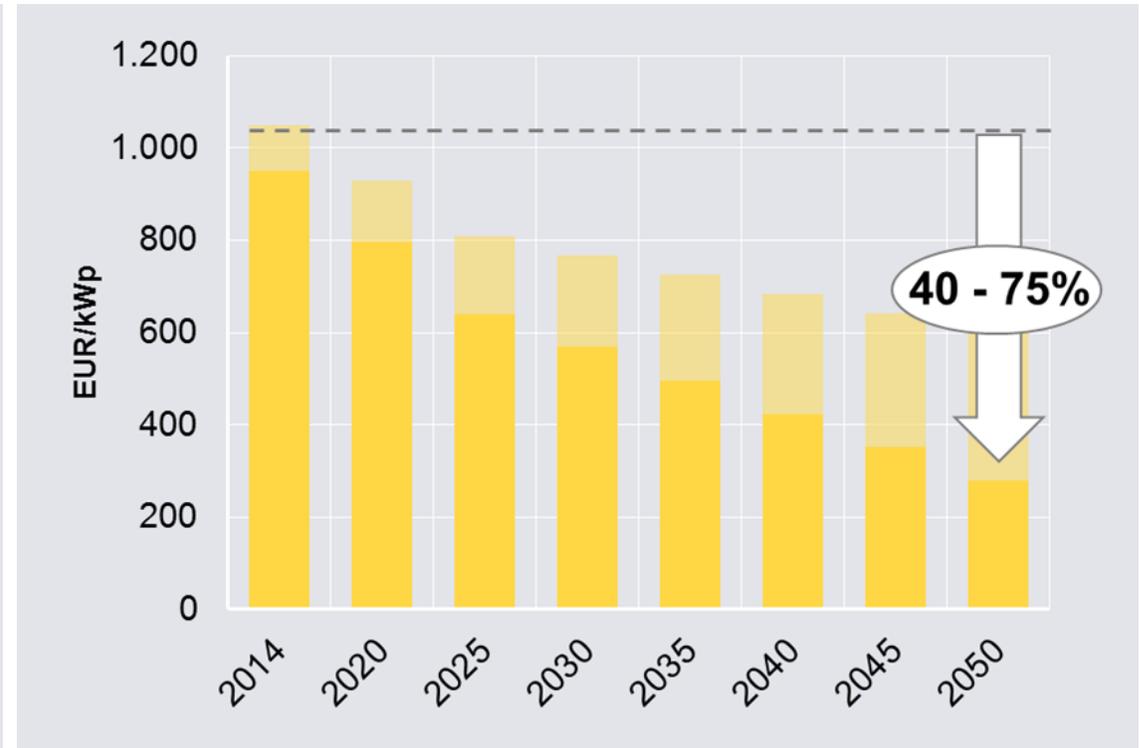
Die Vergütung für Solaranlagen wurde aufgrund stetig sinkender Modulpreise in den letzten Jahren deutlich gesenkt – und das Ende der Kostensenkung ist noch nicht erreicht

Durchschnittliche PV - Vergütung für Neuanlagen 2005 - 2015



ZSW et. al (2014), eigene Berechnungen

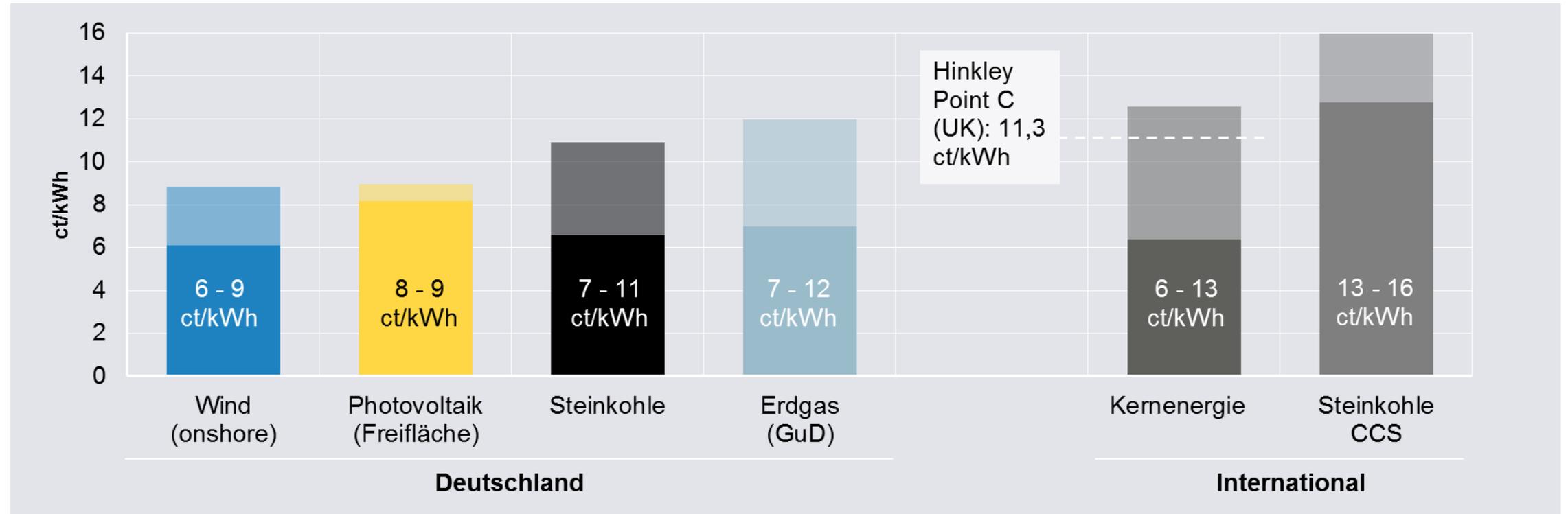
Erwartete Kostendegression für Freiflächensysteme 2014 - 2050



Fraunhofer ISE (2015)

Gegenüber neuen konventionellen Kraftwerken sind Wind- und Photovoltaikanlagen bereits heute wettbewerbsfähig

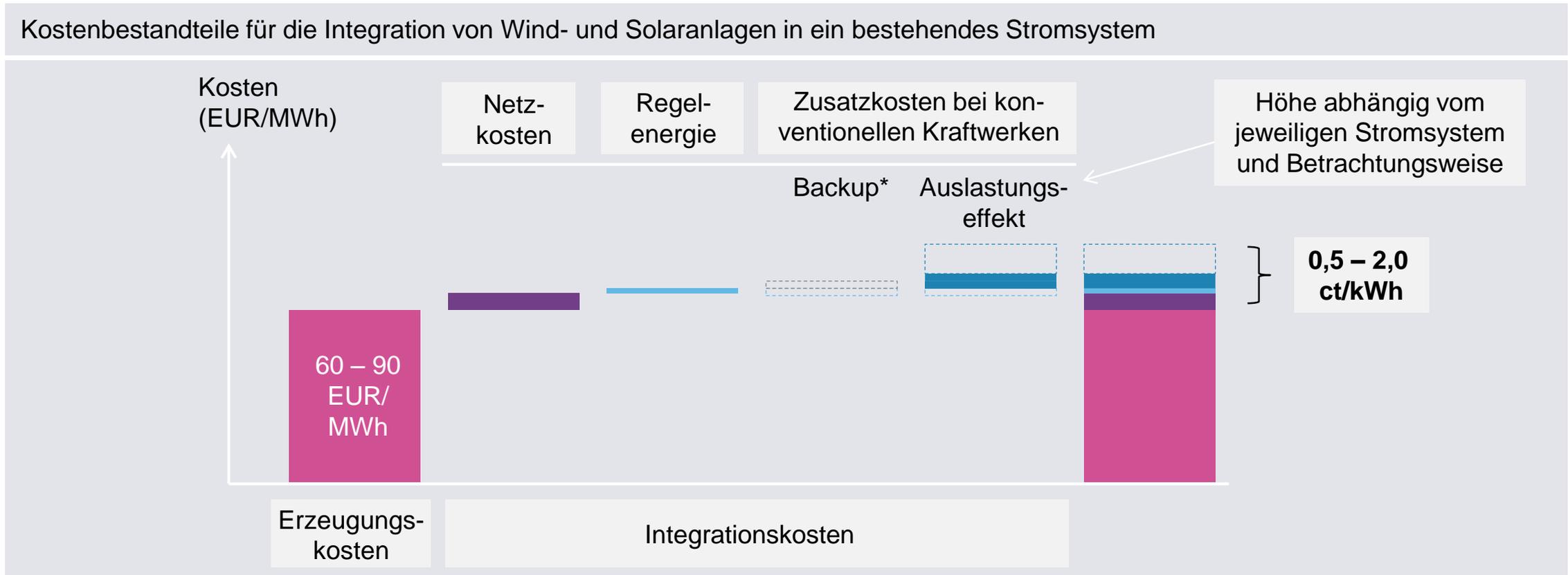
Bandbreite* der Stromgestehungskosten (LCOE) 2015



Agora Energiewende (2015e)

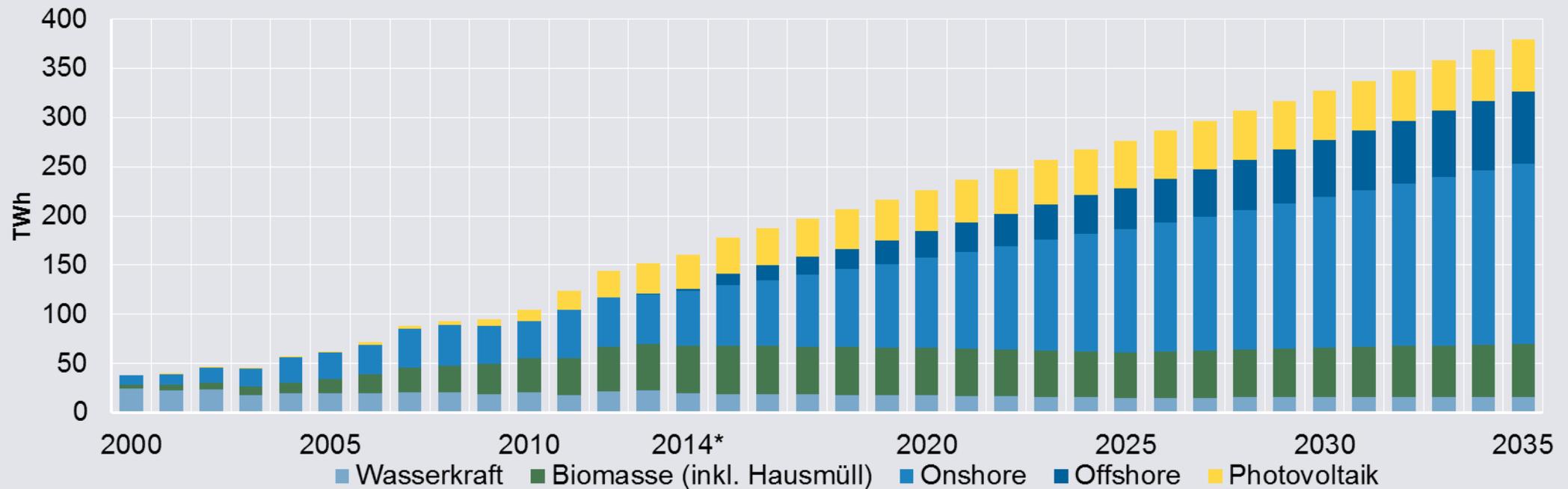
* basierend auf variierender Auslastung, CO₂-Preisen und Investitionskosten

Auch mit Integrationskosten (ca. 0,5 bis 2,0 ct/kWh) bleiben Wind- und Solaranlagen kostengünstige Technologien



Der 1. Hauptsatz der Energiewende lautet daher: Im Mittelpunkt stehen Wind und Solar!

Bruttostromerzeugung aus Erneuerbaren Energien 2000 - 2014 und gemäß Leitszenario der Bundesnetzagentur 2015 - 2035

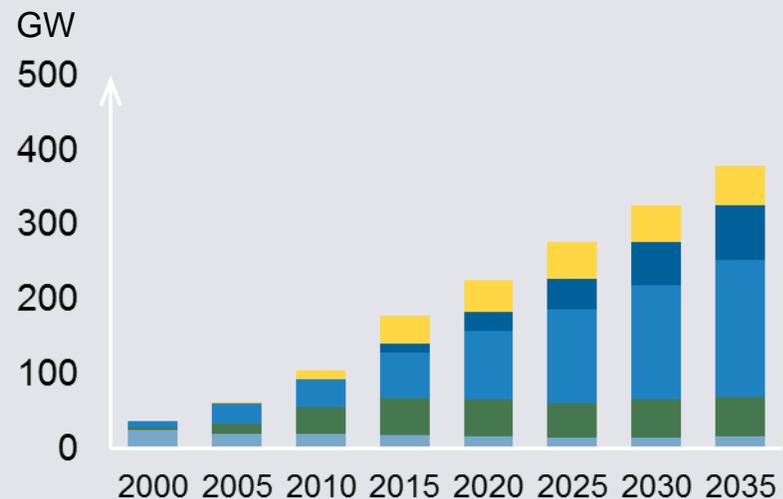


2000 – 2014: AGEB (2015a); 2015 – 2035: eigene Berechnungen auf Basis BNetzA (2014)/BNetzA (2015b)

* vorläufig

Wind- und Solarenergie als zentrale Technologien ändern das Stromsystem grundlegend

Bruttostromerzeugung aus Erneuerbaren Energie
2000 - 2035

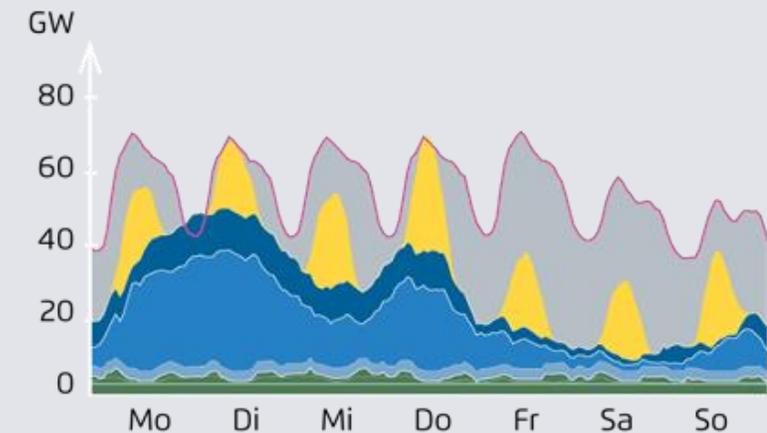


AGEB (2015a), BNetzA (2014), BNetzA (2015b),
eigene Berechnungen

Spezifische Eigenschaften von Wind und PV

- 1 Dargebots-
abhängig
- 2 Hohe
Kapitalkosten
- 3 Geringe
Betriebskosten

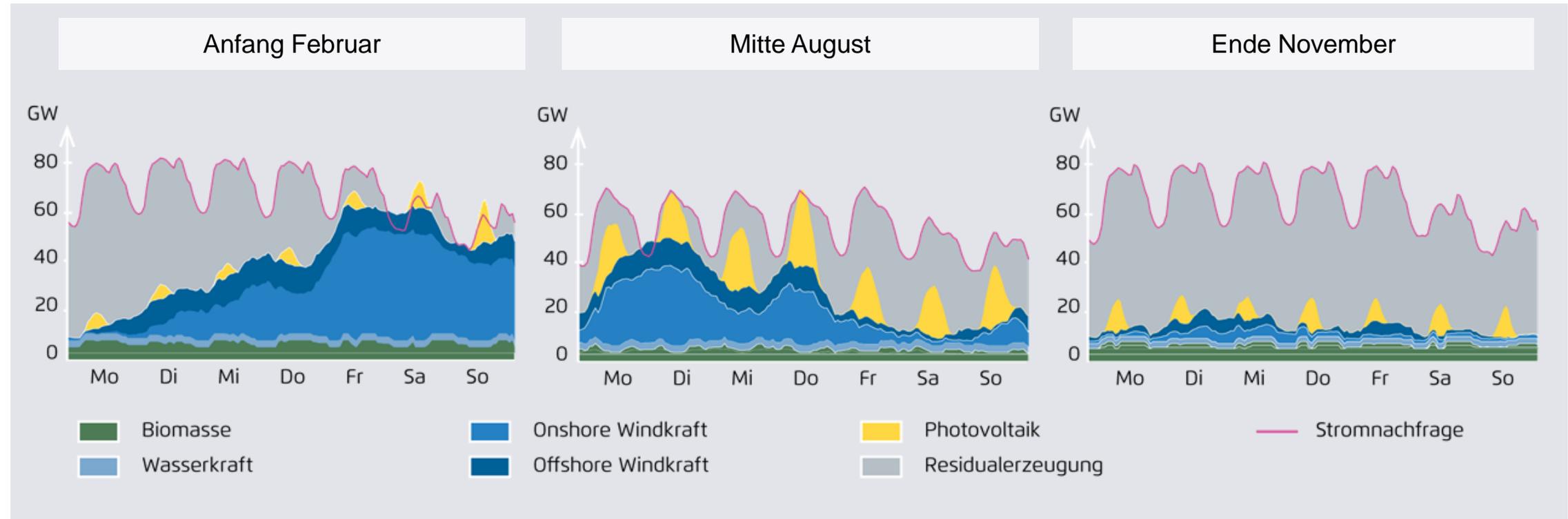
Stromerzeugung und –verbrauch in einer
Beispielwoche 2023



Fraunhofer IWES (2013)

Das Stromsystem und der Strommarkt müssen sich immer mehr an eine stark schwankende Stromproduktion aus Wind- und Solaranlagen anpassen

Stromerzeugung* und Stromverbrauch* in drei Beispielwochen 2023

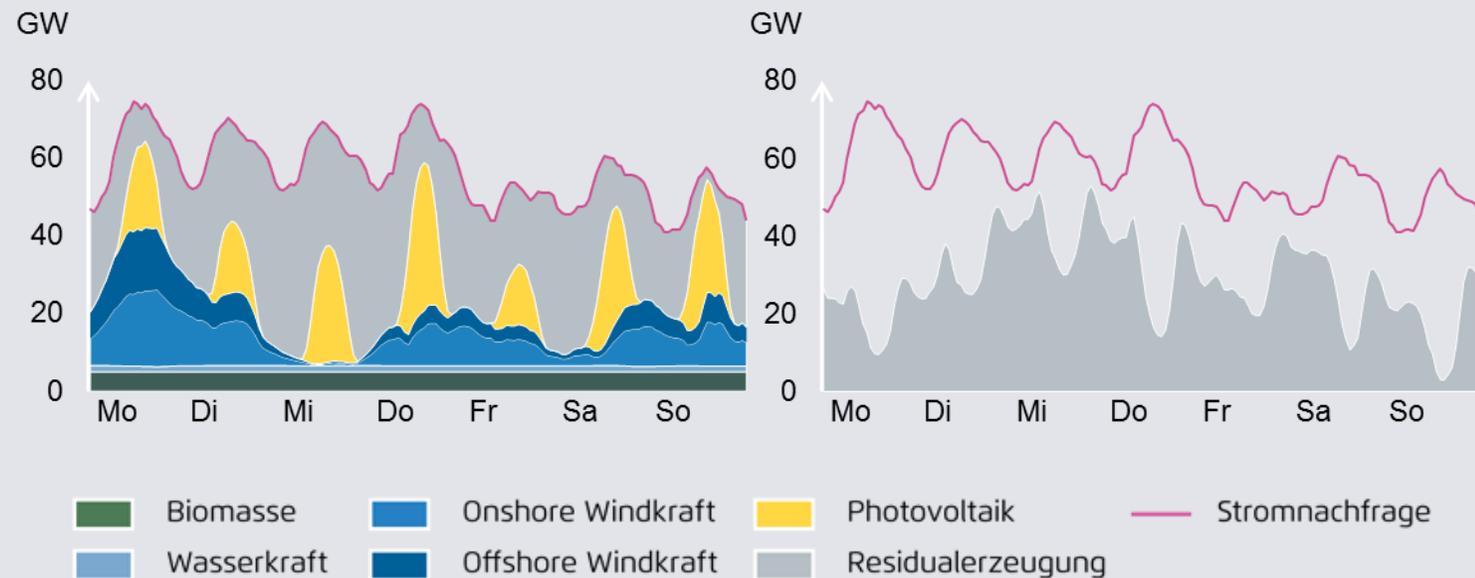


Fraunhofer IWES (2013)

* Modellierung auf Basis der Wetter- und Verbrauchsdaten des Jahres 2011

Flexibilität ist das Paradigma des neuen Stromsystems – Grundlastkraftwerke werden hingegen nicht mehr gebraucht

Stromerzeugung und Stromverbrauch in einer Beispielwochen mit 50% EE-Anteil



Zentrale Flexibilitätsoptionen

Flexible Fahrweise von fossilen und Biomasse-Kraftwerken (inkl. KWK)

Stromnetze und Übertragungskapazitäten für Exporte/Importe

Flexible Steuerung der Nachfrage (Lastmanagement)

Speichertechnologien (Batterien, Power-to-Gas)

Stärkere Integration der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr (Power-to-Heat, Elektromobilität)

Eigene Berechnungen auf Basis von Agora Energiewende (2015b)

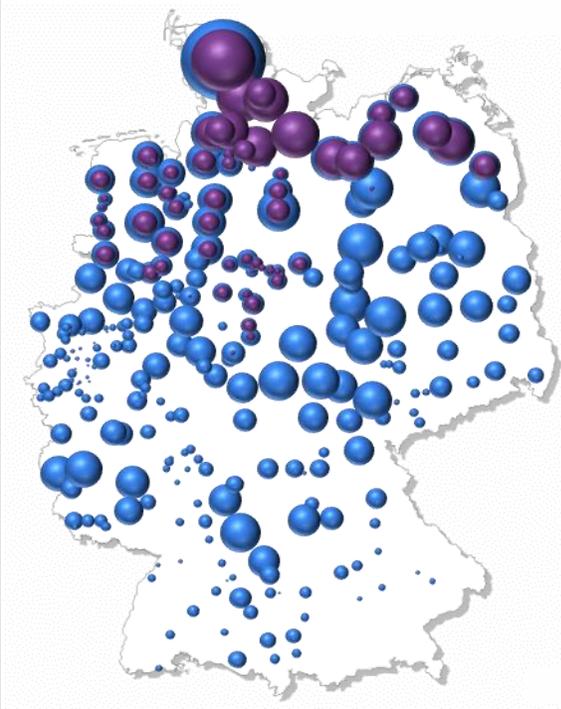
**Zentrale
Herausforderungen
auf dem Weg zu 50%
Erneuerbaren
Energien**



Herausforderung 1: Stromnetzausbau

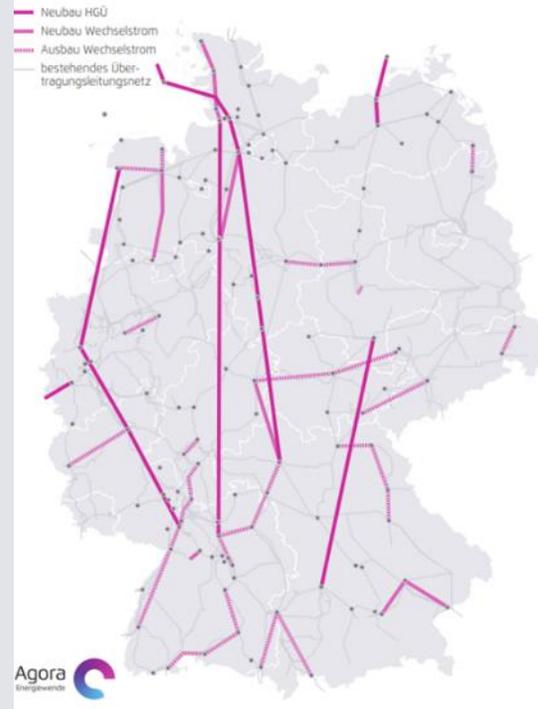
Ein erfolgreicher Netzausbau erfordert neue Planungs- und Beteiligungsprozesse – 2016 kommt neuer Bundesbedarfsplan

Geplanter Übertragungsnetzausbau bis 2022



Fraunhofer IWES (2013)

Geplanter Übertragungsnetzausbau bis 2022



Bundesbedarfsplangesetz (2013)

Der Windausbau wird v.a. im Norden Deutschlands stattfinden, viele Verbrauchszentren liegen im Süden (Bayern, B-W)

Daher neue Stromleitungen von Nord nach Süd notwendig, um Windstrom abzutransportieren

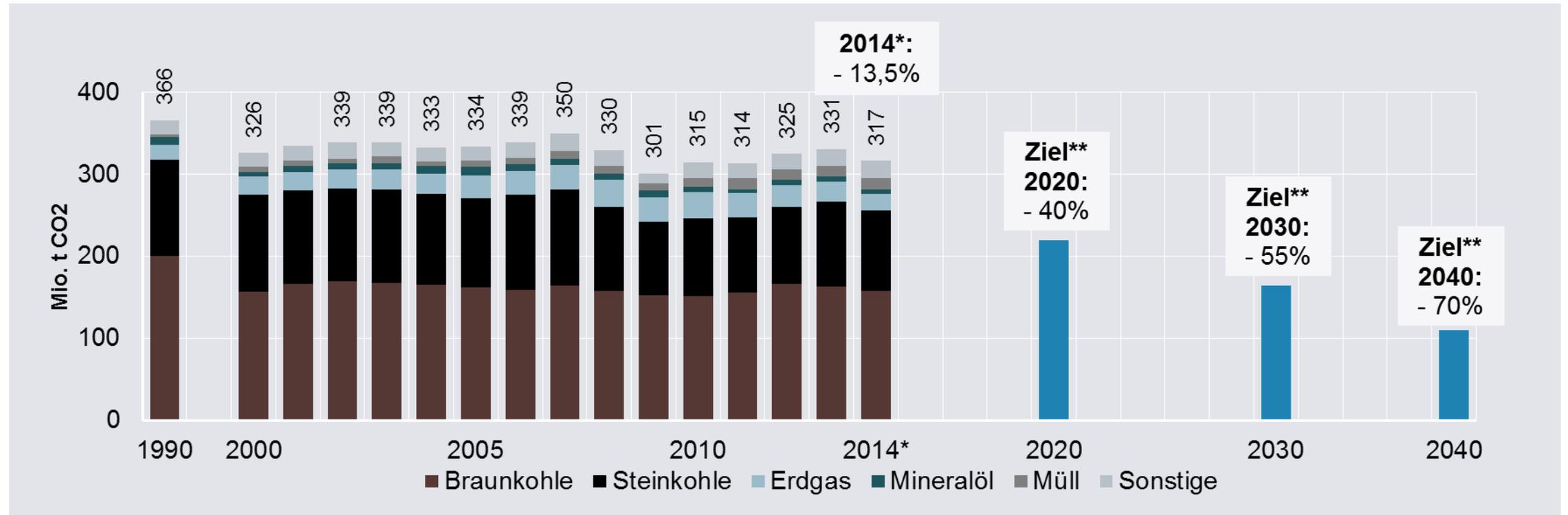
Bundesbedarfsplangesetz 2016 wird Netzbedarf neu berechnen und vorrangige Erdverkabelung bei Neubautrassen ermöglichen

Maßnahmen zur Minderung der Betroffenheit und Kompensation für die regional Betroffenen müssen bei Trassenplanung von Anfang an eingeplant werden

Herausforderung 2: Klimaschutz

Der schrittweise Kohle-Abschied ist geboten – für 2017 ist eine Kohle-Reserve geplant, für 2030/2040 ist Kohle-Konsens nötig

CO₂-Emissionen der Stromerzeugung 1990 - 2014 und Klimaschutzziele** 2020 - 2040



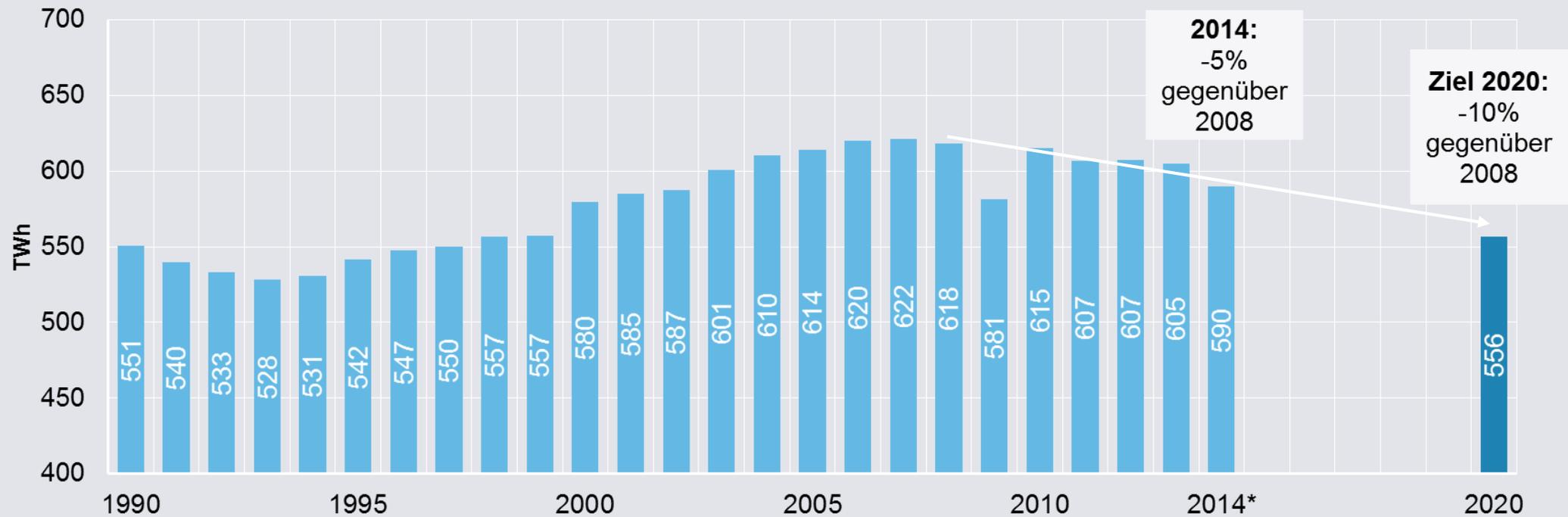
UBA (2015), eigene Berechnungen

* vorläufig, ** bei Anwendung der nationalen Gesamt-Ziele auf die Stromerzeugung

Herausforderung 3: Energieeffizienz

Konsequente Umsetzung des Aktionsplan Energieeffizienz von Ende 2014 ist notwendig, um Ziele zu erreichen

Bruttostromverbrauch 1990 - 2014



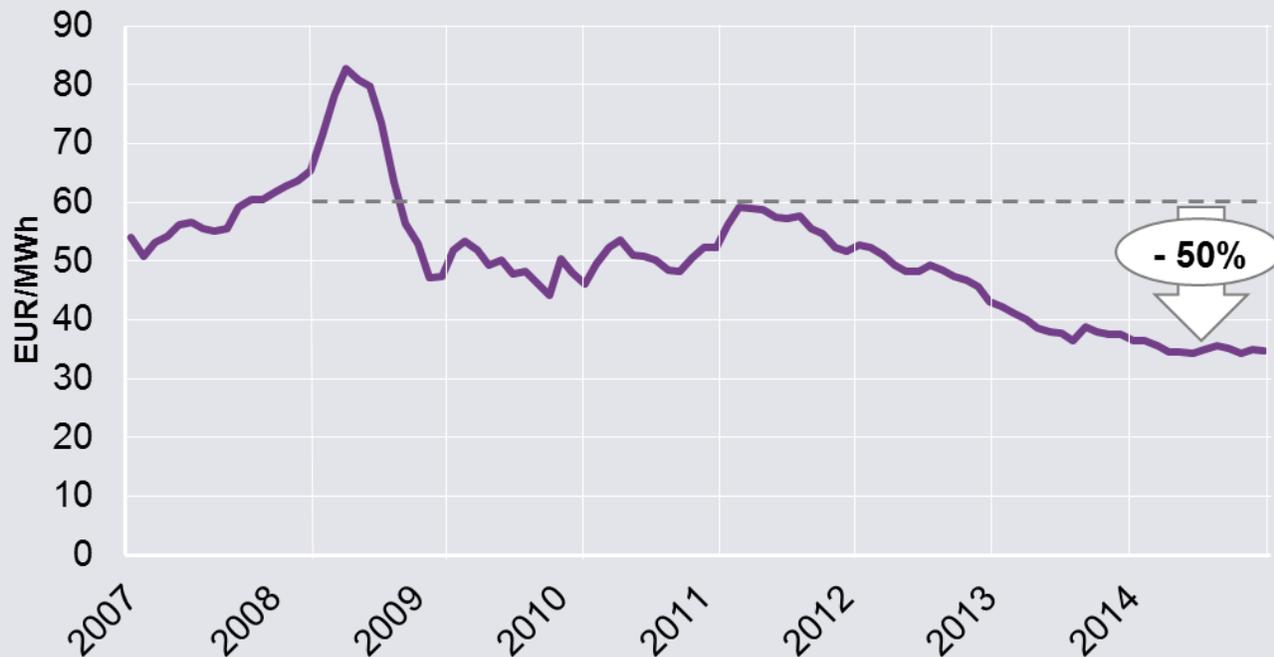
AGEB (2015a)

* vorläufig

Herausforderung 4: Strommarktdesign

Am aktuellen Strommarkt rentieren sich keine neuen Kraftwerke – weder fossile noch erneuerbare

Börsenstrompreis* (Baseload) 2007 - 2014



EEX (2015)

*rollierender Jahresfuture

Ursachen für den Strompreisverfall

- **CO₂-Preis-Absturz:** CO₂-Preise im EU-Emissionshandel sind seit 2008 um ca. 70% gesunken wg. hohen Zertifikate-Überschüssen
- **Sinkende Rohstoffpreise:** Kohlepreise sind seit 2008 um ein Drittel gesunken
- **Merit-Order-Effekt:** Steigende Stromproduktion durch Erneuerbare Energien verdrängt teure Kraftwerke vom Markt
- **Sinkende Nachfrage:** Stromnachfrage sinkt seit 2007 kontinuierlich (-5% bis 2014)
- **Überkapazitäten:** Große Mengen an Braun- und Steinkohle-Kraftwerkskapazitäten verdrängen Gaskraftwerke vom Markt

Herausforderung 4: Strommarktdesign

Die Bundesregierung plant für 2016 ein Strommarktgesetz und ein neues Erneuerbare-Energien-Gesetz

Illustrative Darstellung des im BReg-Weißbuch geplanten Strommarktdesigns

Angebot und Nachfrage koordinieren

Strommarkt 2.0
(ergänzt um flexible Regenergiemärkte)

Versorgungssicherheit und EE-Ausbau sicherstellen

Versorgungssicherheit
Kapazitätsreserve (teilweise mit alten Braunkohlekraftwerken)

Erneuerbare Energien
Auktionen für große Wind- und Solaranlagen, feste Vergütungen für kleine EE

Klimaschutz gewährleisten

EU-Emissionshandel

Eigene Darstellung

Strommarkt 2.0

Strommarkt soll hochflexibel werden, damit fossile Kraftwerke, EE-Anlagen, Nachfrage, Speicher kontinuierlich miteinander interagieren

Versorgungssicherheit

Spitzenpreise in Knappheitssituationen sollen fossile Backup-Kraftwerke finanzieren; für Notfälle steht Kapazitätsreserve bereit

Erneuerbare Energien

EE-Anlagen erhalten Marktprämien, Höhe soll für große Wind- und Solaranlagen ab 2017 durch Auktionen festgelegt werden

EU-Emissionshandel

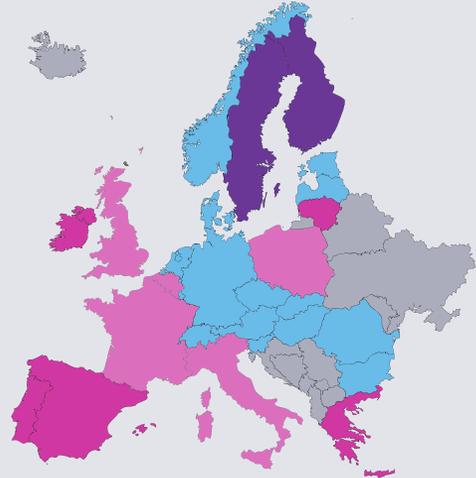
CO₂-Preis soll durch EU-ETS-Reform mit starker Marktstabilitätsreserve und geringerer Neuzuteilung von Zertifikaten wiederhergestellt werden

Herausforderung 5: Europäische Kooperation

Die Integration des europäischen Strommarktes und die Kooperation mit den Nachbarländern weiter fördern

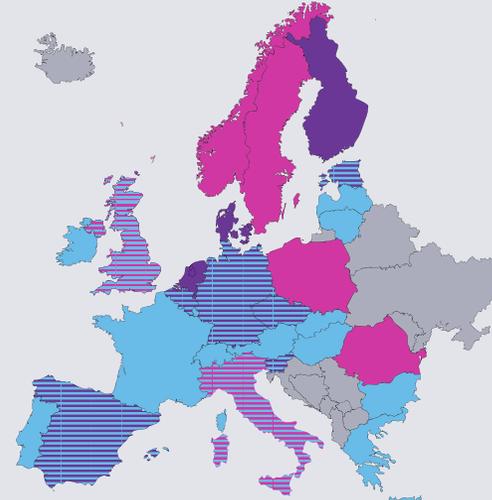
Kapazitätsmechanismen und EE-Fördersysteme in Europa 2013

Kapazitätsmechanismen



- Keine Kapazitätsmechanismen bzw. Diskussion in einem frühen Stadium
- Kapazitätsmechanismen im Gesetzgebungsprozess bzw. in Planung
- Volle oder partielle Kapazitätsmechanismen implementiert
- Kapazitätsreserve implementiert

Erneuerbaren-Energien-Fördersysteme



- Einspeisevergütung
- Quoten
- Einspeise-Prämie
- Kombination aus Quote und Einspeisevergütung
- Kombination aus Einspeise-Prämie und Einspeisevergütung

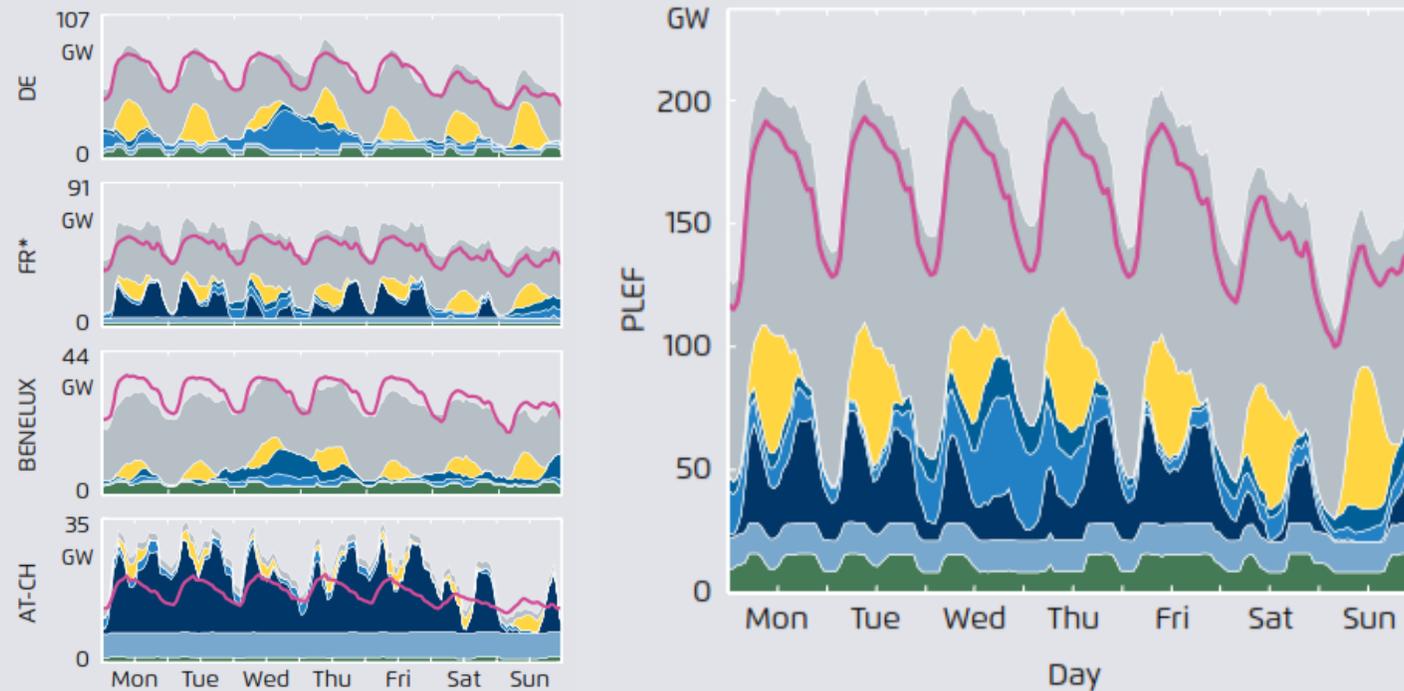
Eigene Darstellung

**Geht Deutschland mit
der Energiewende
einen Sonderweg?**



Europa: Die 2030-Ziele der EU implizieren für Europas Stromsektor einen EE-Anteil von rund 50% – mit entsprechend hohen Wind- und Solarstrommengen in allen Mitgliedstaaten

Stromerzeugung und -verbrauch in Zentral-Westeuropa* in einer Beispielwoche 2030

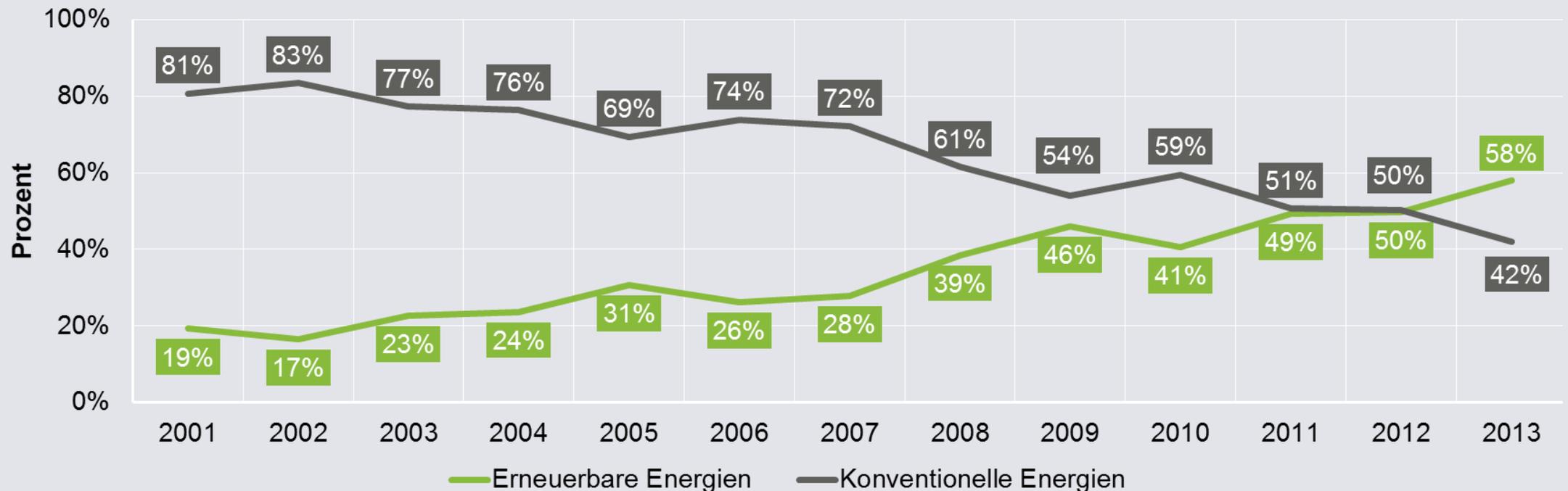


Fraunhofer IWES (2015)

* Deutschland, Frankreich, Benelux, Österreich, Schweiz

Welt: Inzwischen werden global deutlich mehr erneuerbare Energien als konventionelle Erzeugungskapazitäten (Kohle, Gas, Kernenergie) zugebaut

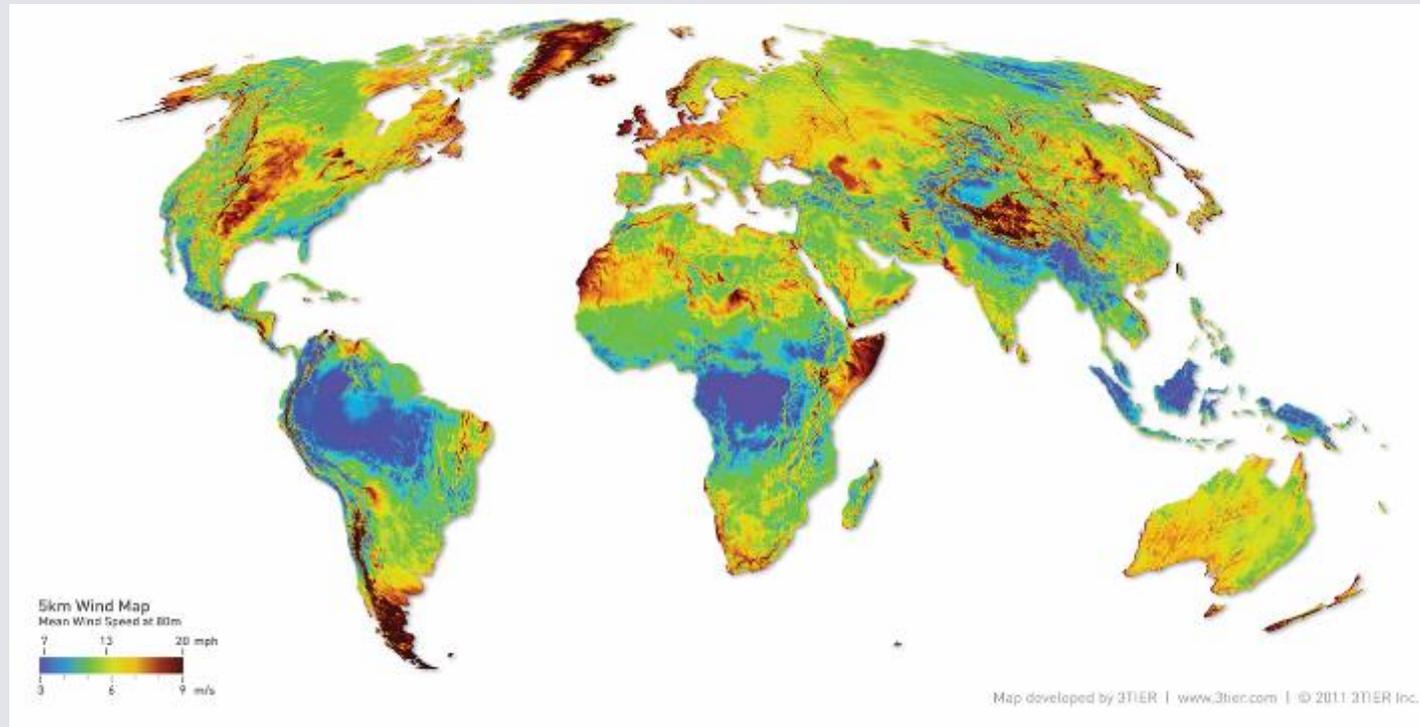
Anteil am globalen Kapazitätszubau 2001 - 2013



IRENA (2014)

Wind ist auf der ganzen Welt verfügbar...

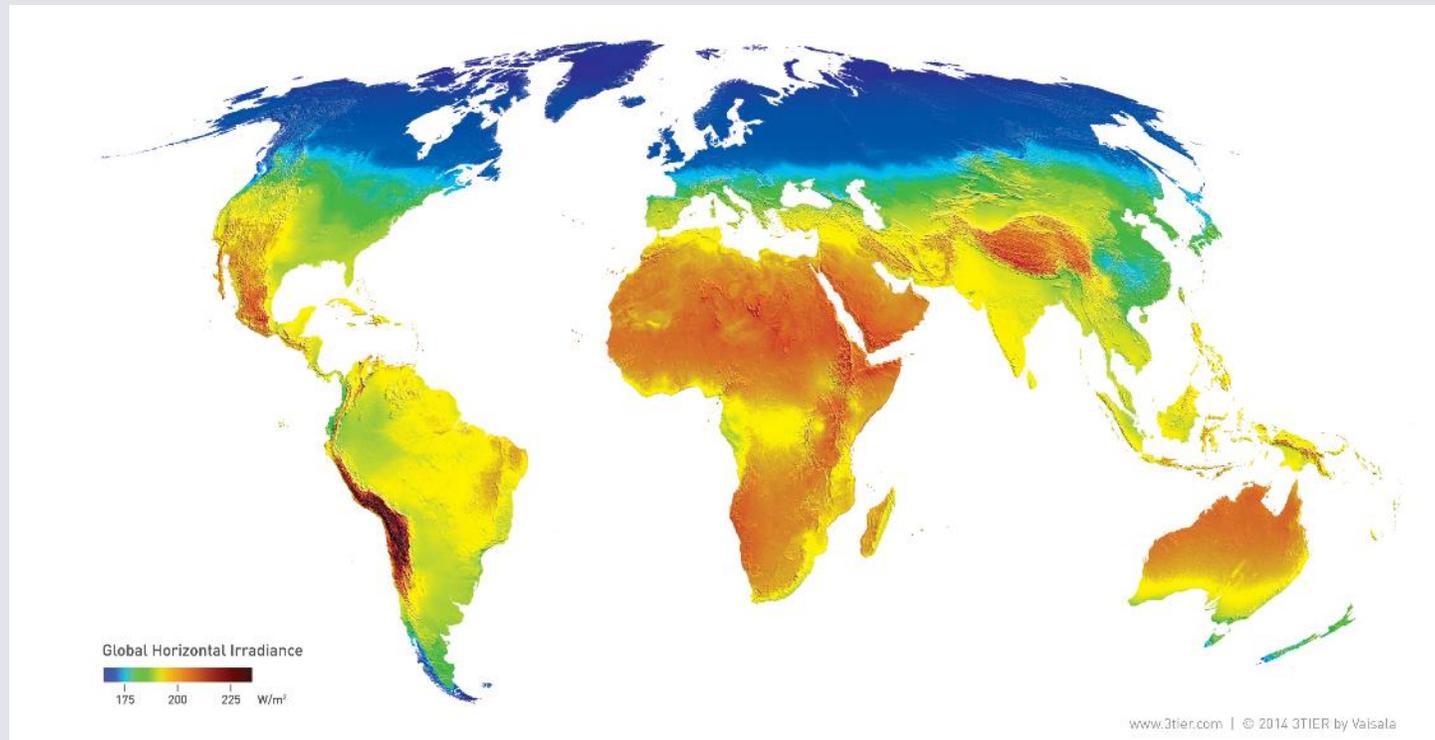
Durchschnittliche Windgeschwindigkeit auf 80m



3TIER (2011)

....und die Sonne scheint nahezu überall mehr als in Deutschland!

Durchschnittliche jährliche Sonneneinstrahlung



3TIER (2011)

Weitere Informationen und Studien verfügbar unter www.agora-energiewende.de

12 Thesen
zur Energiewende

IMPULSE

November 2012

Agora
Energiewende



Aktionsplan
Lastmanagement

Endbericht einer Studie
von Connect Energy Economics

STUDIE

Agora
Energiewende



CONNECT
ENERGYECONOMICS
connect the dots ...

Ein Kraftwerkspark
im Einklang mit den
Klimazielen

Handlungslücke, Maßnahmen und
Verteilungseffekte bis 2020

STUDIE

Agora
Energiewende



enervis

Agora Energiewende
Rosenstraße 2
10178 Berlin

T +49 (0)30 284 49 01-00
F +49 (0)30 284 49 01-29

@ info@agora-energiewende.de
 www.twitter.com/AgoraEW



**Neuigkeiten auf unserer
Website? Abonnieren sie
unser Info-Update!**

Agora Energiewende ist eine gemeinsame Initiative der
Stiftung Mercator und der European Climate Foundation.



Literaturverzeichnis „Die Energiewende im Stromsektor“ (1)

- AGEB (2015a). Bruttostromerzeugung nach Energieträgern. Berlin, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen.
- AGEB (2015b). Primärenergieverbrauch nach Energieträgern. Berlin, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen.
- AGEE (2015). Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. Berlin, Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik.
- Agora Energiewende (2014). Stromerzeugungskostenrechner. Berlin, Agora Energiewende.
- Agora Energiewende (2015a). Integration cost of wind and solar power. Berlin, Agora Energiewende (im Erscheinen).
- Agora Energiewende (2015b). Agorameter. Berlin, Agora Energiewende.
- Agora Energiewende (2015c). Die Rolle des Emissionshandels in der Energiewende. Berlin, Agora Energiewende.
- Agora Energiewende (2015d). Stromexport und Klimaschutz in der Energiewende. Berlin, Agora Energiewende.
- Agora Energiewende (2015e). Understanding the German Energy Transition. Berlin, Agora Energiewende.
- BDEW (2015a). BDEW-Energiemonitor 2015: Das Meinungsbild der Bevölkerung. Berlin, BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
- BDEW (2015b). Strompreisanalyse August 2015. Berlin, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
- BMWi (2014). Erster Fortschrittsbericht zur Energiewende. Datenanhang. Berlin, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
- BMWi (2015). Energiedaten. Berlin, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
- BNetzA (2014). Netzentwicklungsplan Strom 2014, 2. Entwurf. Berlin, Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen.
- BNetzA (2015a). Monitoringbericht 2014. Berlin, Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen.
- BNetzA (2015b). Genehmigter Szenariorahmen für einen Netzentwicklungsplan Strom 2015. Berlin, Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen.
- Breg (2010). Energiekonzept. Berlin, Bundesregierung.
- Bundesbedarfsplangesetz (2013). Gesetz über den Bundesbedarfsplan (Bundesbedarfsplangesetz - BBPIG).
- Bundestag (2011). Die Beschlüsse des Bundestages am 30. Juni und 1. Juli. Berlin, Deutscher Bundestag.
- CEER (2015). CEER Benchmarking Report 5.2 on the Continuity of Electricity Supply. Brussels, Council of European Energy Regulators.
- DECC (2013). Electricity generation costs 2013. London, UK Department of Energy and Climate Change.

Literaturverzeichnis „Die Energiewende im Stromsektor“ (2)

DEHSt (2015). Berichte der DEHSt zur Versteigerung von Emissionsberechtigungen in Deutschland. Berlin, Deutsche Emissionshandelsstelle.

Destatis (2014). Fachserie 4. Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden. Bonn, Statistisches Bundesamt

Destatis (2015a). Konsumausgaben der privaten Haushalte. Bonn, Statistisches Bundesamt.

Destatis (2015b). Außenhandel. Bonn, Statistisches Bundesamt.

Deutscher Bundestag (2011). Plenarprotokoll 17/177. Berlin, Deutscher Bundestag.

EEG (2014). Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbaren-Energien-Gesetz – EEG 2014).

EEX (2015). EEX Transparency platform. Leipzig, European Energy Exchange.

Energytransition.org (2014). Nuclear phase out. Berlin, energytransition.org.

Enervis (2015). Ein Kraftwerkspark im Einklang mit den Klimazielen. Studie im Auftrag von Agora Energiewende. Berlin, enervis energy advisors GmbH.

Fraunhofer ISE (2015). Current and future cost of Photovoltaics. Development, System Prices and LCOE of Utility-Scale PV Systems. Study on behalf of Agora Energiewende. Berlin, Fraunhofer ISE.

Fraunhofer IWES (2013). Kostenoptimaler Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland. Studie im Auftrag von Agora Energiewende. Berlin, Fraunhofer IWES.

Fraunhofer IWES (2015). The European Power System in 2030: Flexibility Challenges and Integration Benefits. An Analysis with a Focus on the Pentalateral Energy Forum Region. Studie im Auftrag von Agora Energiewende. Berlin, Fraunhofer IWES.

IEA (2013). Technology Roadmap. Wind Energy. Paris, International Energy Agency.

IRENA (2014). Rethinking Energy. Abu Dhabi, International Renewable Energy Agency.

Öko-Institut (2015). EEG-Rechner. Excel-Tool im Auftrag von Agora Energiewende. Berlin.

Statistische Jahrbücher der DDR (1973 – 1988).

World Energy Council (2015). Online data platform. London, World Energy Council.

UBA (2015). Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2014. Berlin, Umweltbundesamt.

UBA (2015). Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland. Berlin, Umweltbundesamt.

ZSW et. al (2014). Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des Erfahrungsberichts 2014 gemäß § 65 EEG. Vorhaben Ilc Solare Strahlungsenergie. Wissenschaftlicher Bericht erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Berlin, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff- Forschung Baden-Württemberg, Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, Bosch & Partner GmbH, GfK SE.

Literaturverzeichnis „Die Energiewende im Stromsektor“ (3)

3Tier (2011): Global Mean Wind Speed at 80m.

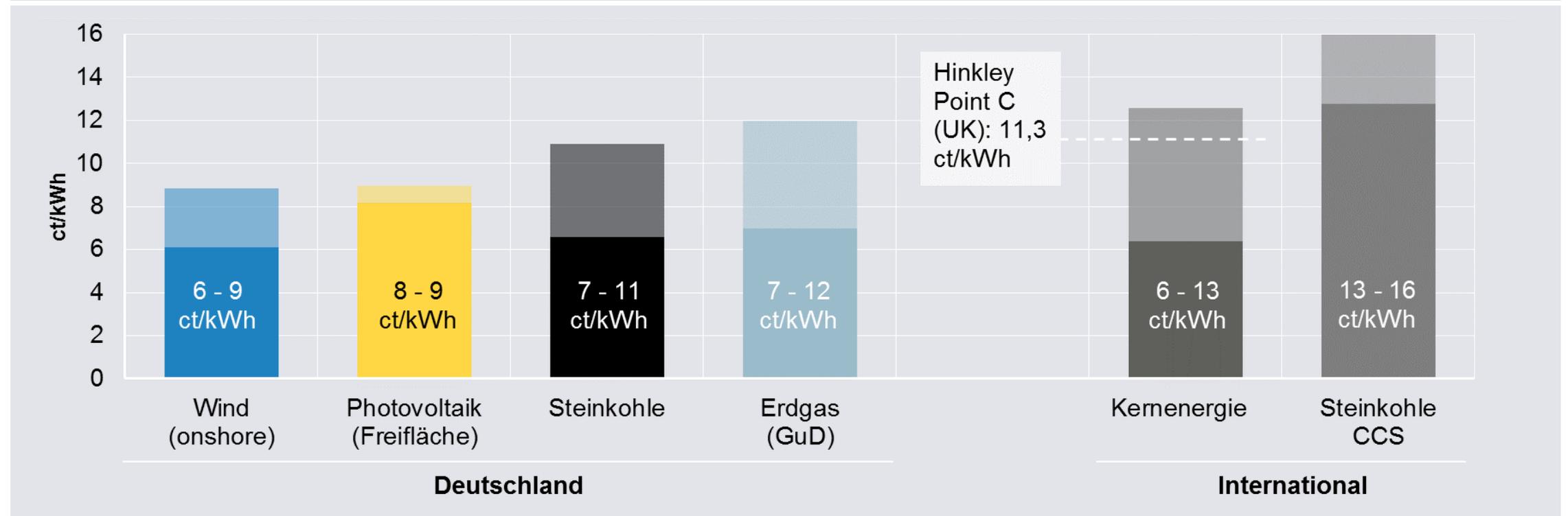
3Tier (2011): Global Mean Solar Irradiance.

Berechnung der Stromgestehungs- kosten (LCOE)



Gegenüber neuen konventionellen Kraftwerken sind Wind- und Photovoltaikanlagen bereits heute wettbewerbsfähig

Bandbreite* der Stromgestehungskosten (LCOE) 2015

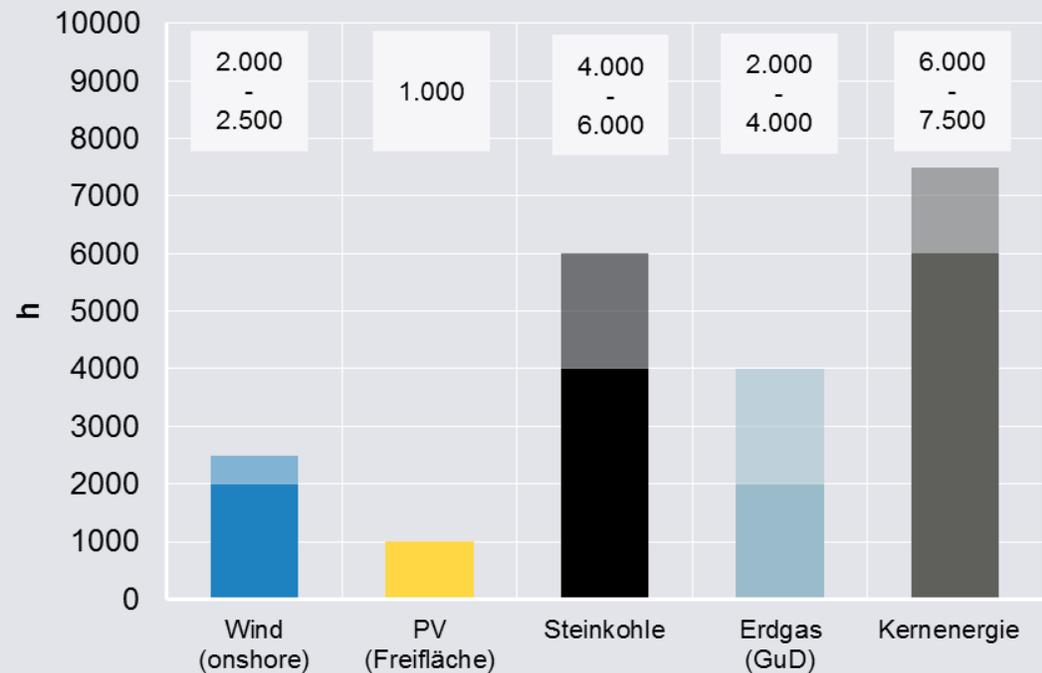


Agora Energiewende (2015e)

* basierend auf variierender Auslastung, CO₂-Preisen und Investitionskosten

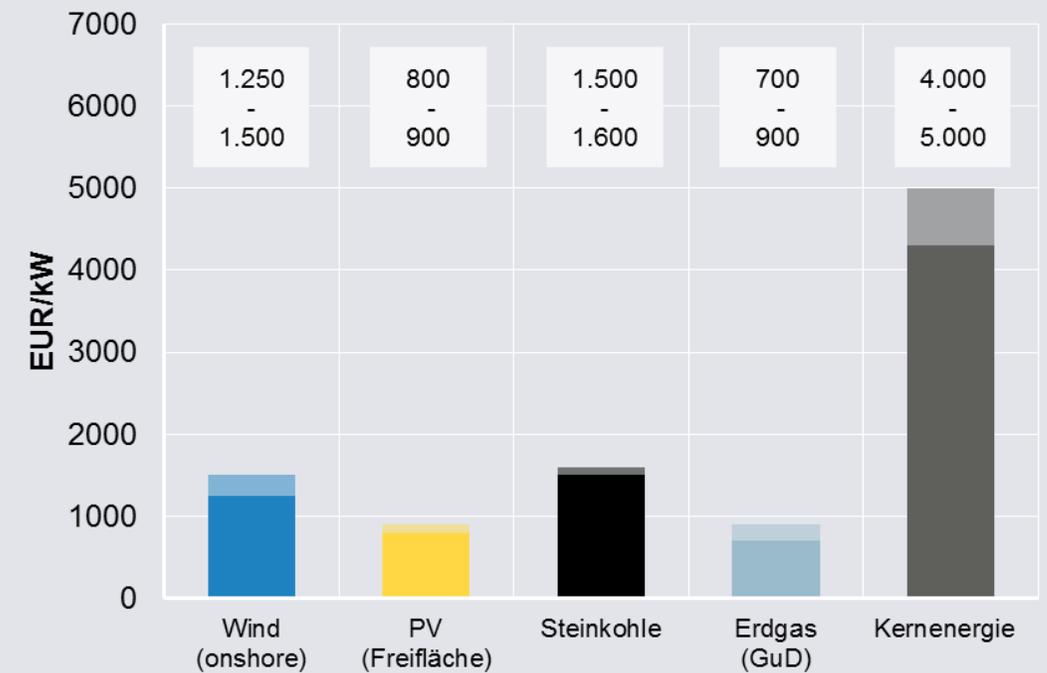
Annahmen (1)

Bandbreite der Volllaststunden



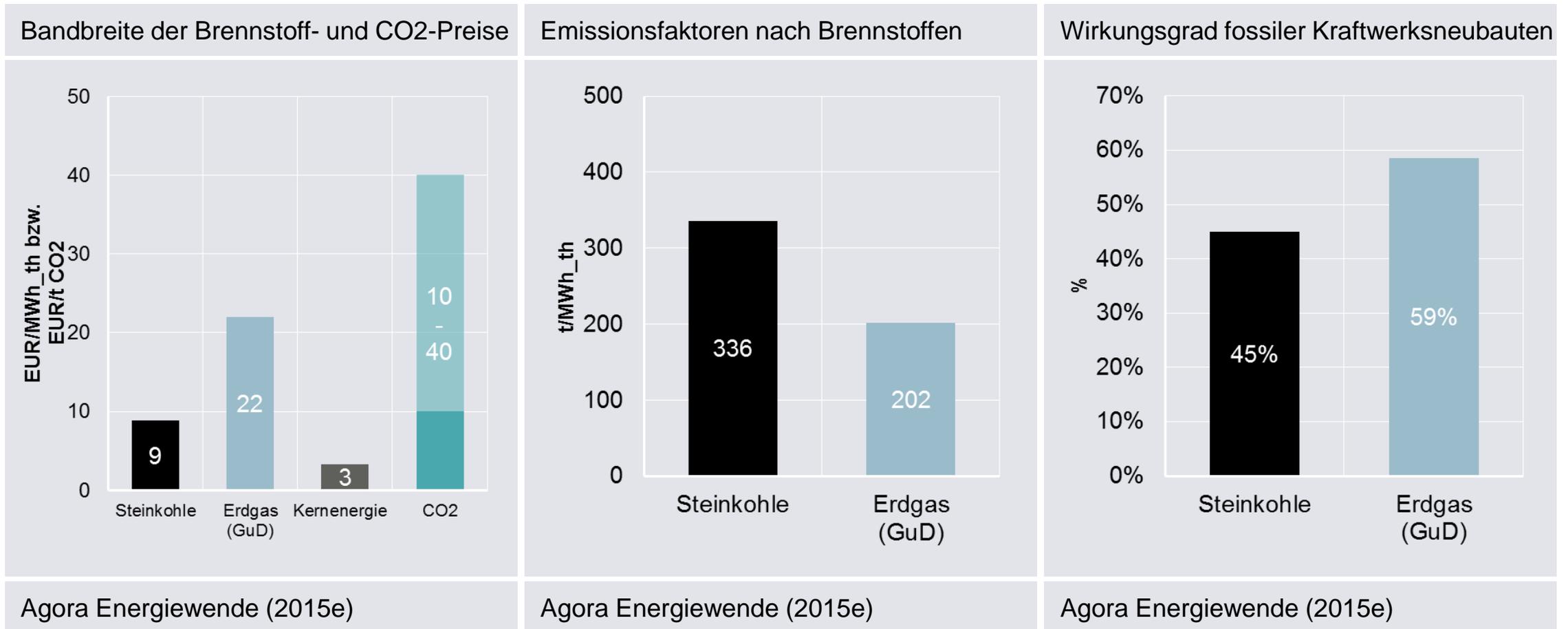
Agora Energiewende (2015e)

Bandbreite der Investitionskosten



Agora Energiewende (2015e)

Annahmen (2)



Annahmen (3)

- **WACC:** Wind und PV 7%, Steinkohle und Erdgas 12%, Kernenergie 7% – 12%
- **Technische Lebensdauer:** Wind 20 Jahre, PV 30 Jahre, Steinkohle 40 Jahre, Erdgas 25 Jahre, Kernenergie 40 Jahre
- **Fixe Betriebskosten:** Wind 35 EUR/kW/a, PV 17 EUR/kW/a, Steinkohle 34 EUR/kW/a, Erdgas 19 EUR/kW/a, Kernenergie 90 EUR/kW/a
- **Variable Betriebskosten:** Wind 0 EUR/kW/a, PV 0 EUR/kW/a, Steinkohle 3 EUR/kW/a, Erdgas 2 EUR/kW/a, Kernenergie 1 EUR/kW/a

Quelle: Agora Energiewende (2015e)

Die Stromgestehungskosten (LCOE) berechnen sich auf Basis der Gesamtkosten und der Stromerzeugung einer Anlage über ihre gesamte technische Lebensdauer

Verwendete Formeln zur Berechnung der Stromgestehungskosten (LCOE)

Berechnung der Stromgestehungskosten je Technologie

$$p_{Tech} = \frac{\sum \text{Gesamte Kosten}}{\sum \text{Gesamte Stromerzeugung}}$$

$$p_{Tech} = \left(\frac{\sum_{BZ} (I_t + BB_t + Z_t)}{\sum_{BZ} E_t} \right)_{Tech}$$

p_{Tech} = Stromerzeugungskosten je Technologie

$\sum_{BZ} ()$ = Summe aller Werte über den Benutzungszeitraum

I_t = Kapitalausgaben im Jahr t

BB_t = Betriebs- und Brennstoffkosten im Jahr t

Z_t = CO₂-Zertifikatekosten im Jahr t

E_t = Stromerzeugung im Jahr t

Kapitalkosten im Jahr t

$$I_t = I_{gesamt} \times \frac{i \times (1+i)^{BZ}}{(1+i)^{BZ} - 1}$$

I_{gesamt} = Gesamte Investitionskosten für das Kraftwerk

für die gesamte Benutzungsdauer, diskontiert auf $t = 0$, [in $\frac{EUR}{kW}$]

i = Kalkulatorischer Zinssatz für die gesamte Investition
(Summe aus Eigenkapital und Fremdkapital) [in %]

BZ = Benutzungszeitraum [in Jahren]

Die Stromgestehungskosten (LCOE) berechnen sich auf Basis der Gesamtkosten und der Stromerzeugung einer Anlage über ihre gesamte technische Lebensdauer

Verwendete Formeln zur Berechnung der Betriebs-, Brennstoff- und CO₂-Zertifikatskosten

Betriebs- und Brennstoffkosten im Jahr t

$$BB_t = M_{fix,t} + M_{var,t} + B_t$$

$M_{fix,t}$ = Fixe Betriebskosten im Jahr t (z. B. Personal, zeitabhängige Wartung),
[in EUR/kW/Jahr]

$M_{var,t}$ = Variable Betriebskosten im Jahr t (z. B. nutzungsabhängige Wartung)

$$M_{var,t} = E_t \times m_{var}$$

m_{var} = Variable Betriebskosten pro erzeugter Strommenge [in EUR/MWh_{elekt}]

B_t = Brennstoffkosten im Jahr t

$$B_t = \frac{E_t}{W} \times b$$

W = Wirkungsgrad der Umwandlung der Energie vom Brennstoff in Strom [in %]

b = Kosten je Einheit des eingesetzten Brennstoffs [in EUR/MWh_{therm}]

CO₂ - Zertifikatskosten im Jahr t

$$Z_t = \frac{E_t}{W} \times EF_{Brennstoff} \times z$$

$EF_{Brennstoff}$ = Emissionsfaktor des eingesetzten Brennstoffs [in tCO₂/MWh_{therm}]

z = Kosten für CO₂ - Emissionszertifikate [in EUR/tCO₂]

Stromerzeugung im Jahr t

$$E_t = P \times FLH$$

P = Maximale Kraftwerksleistung [in MW]

FLH = Vollaststunden pro Jahr [in h]

Literaturverzeichnis „Berechnung der Stromgestehungskosten (LCOE)“

Agora Energiewende (2015e). Understanding the German Energy Transition. Berlin, Agora Energiewende.

IER Stuttgart (2008). Stromerzeugungskosten im Vergleich. Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung.