
Energiesystem Deutschland 2050

Sektor- und Energieträgerübergreifende, modellbasierte, ganzheitliche Untersuchung zur langfristigen Reduktion energiebedingter CO₂-Emissionen durch Energieeffizienz und den Einsatz Erneuerbarer Energien



Hans-Martin Henning
Fraunhofer-Institut für Solare
Energiesysteme ISE
und
Karlsruher Institut für Technologie KIT

Arbeitskreis Energie der Deutschen
Physikalischen Gesellschaft DPG

Frühjahrssitzung 2015

Bad Honnef, 16. April 2015

Inhaltsübersicht

- Einleitung
- Energiesystem Deutschland auf Basis regenerativer Energien – ein Blick in das Jahr 2050
 - Methodik
 - Ergebnisse Parameterstudie
 - Ausgewähltes Beispielsystem
 - Investitionen
- Zusammenfassung und Ausblick

Inhaltsübersicht

- **Einleitung**
- Energiesystem Deutschland auf Basis regenerativer Energien – ein Blick in das Jahr 2050
 - Methodik
 - Ergebnisse Parameterstudie
 - Ausgewähltes Beispielsystem
 - Investitionen
- Zusammenfassung und Ausblick

Energiewende Deutschland

Ziele der deutschen Bundesregierung für 2050

Insgesamt

- Reduktion der Treibhausgasemissionen um 80 bis 95 % (bezogen auf 1990)
- Halbierung des Primärenergieverbrauchs (bezogen auf 2008)
- Anteil erneuerbarer Energien von 60 % am Endenergieverbrauch

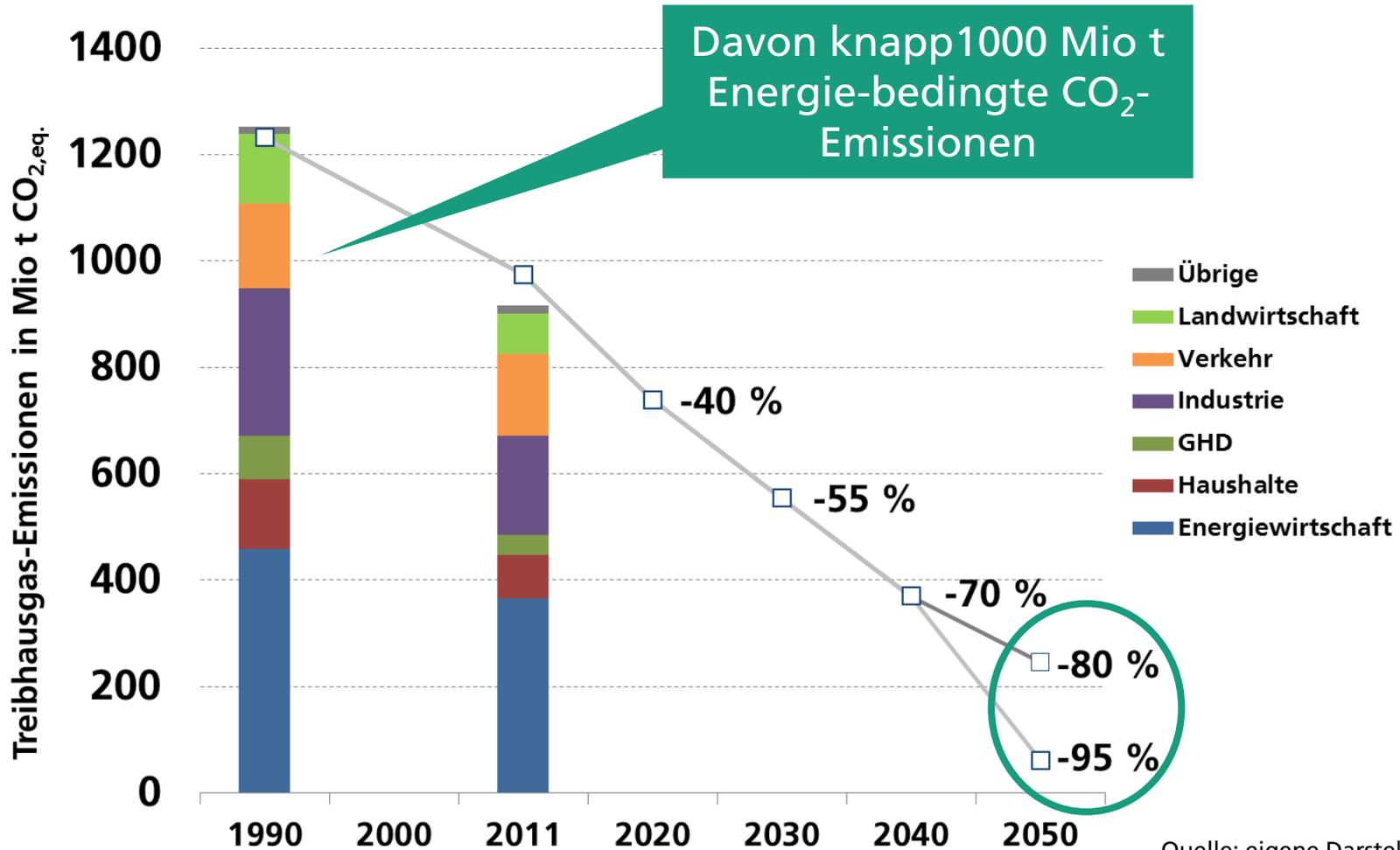
Strom

- Reduktion Verbrauch um 25 % (bezogen auf 2008)
- Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch 80 %

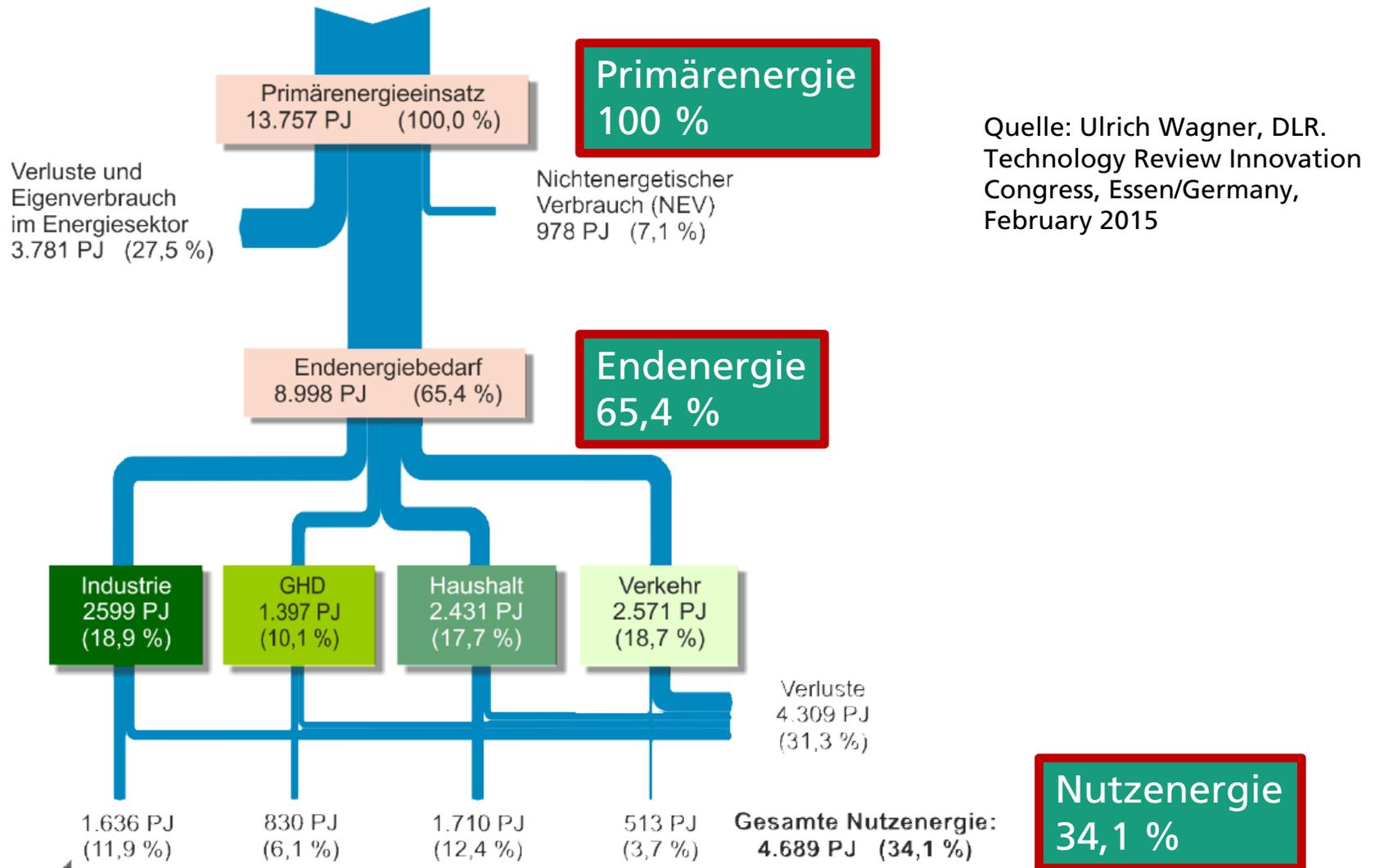
Gebäudesektor

- Nahezu „klimaneutraler Gebäudesektor“
- Reduktion fossil bereit gestellter Primärenergie um 80 %

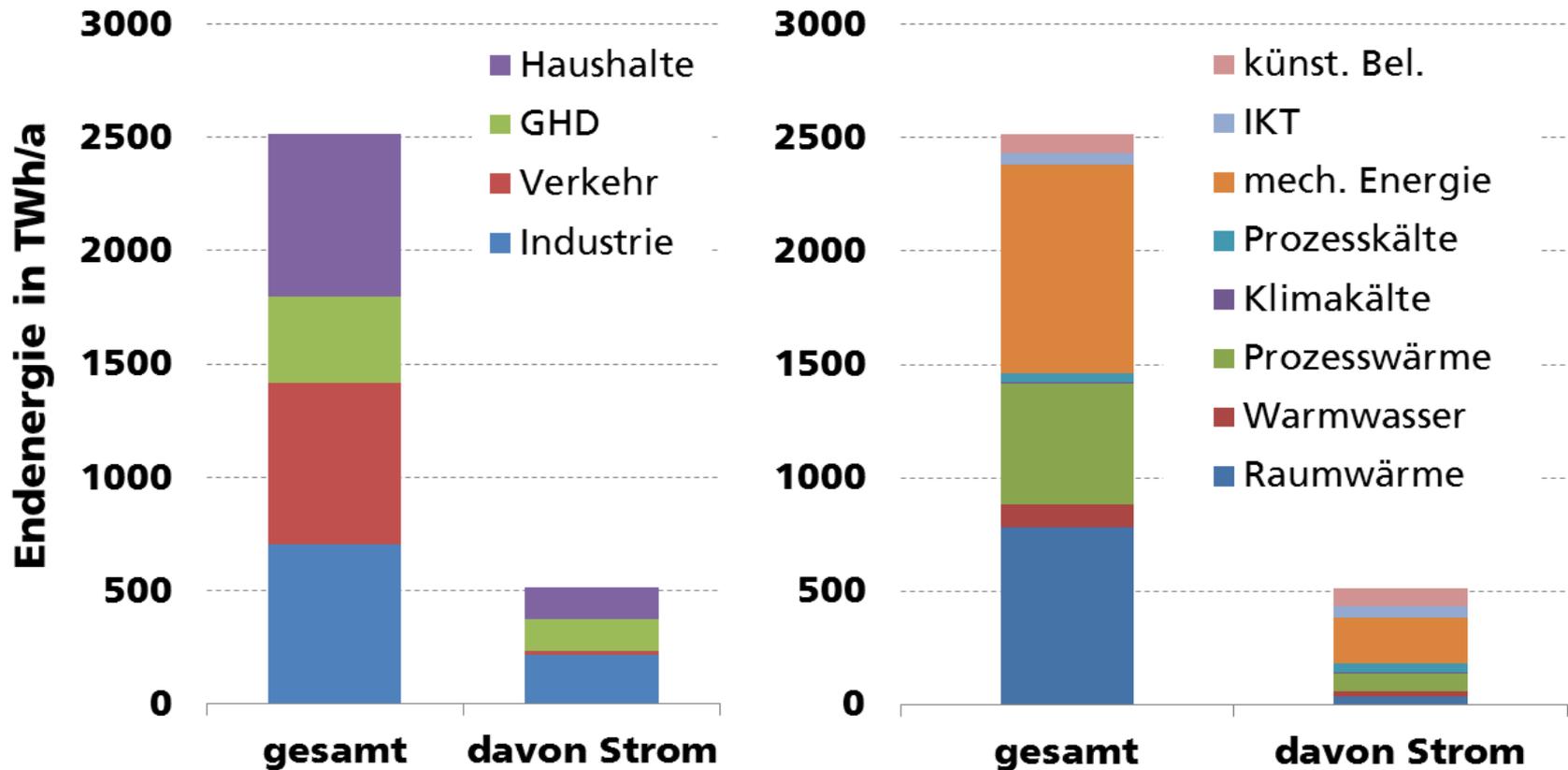
(Soll-) Entwicklung Treibhausgas-Emissionen Deutschland



Energiesystem Deutschland (2012)



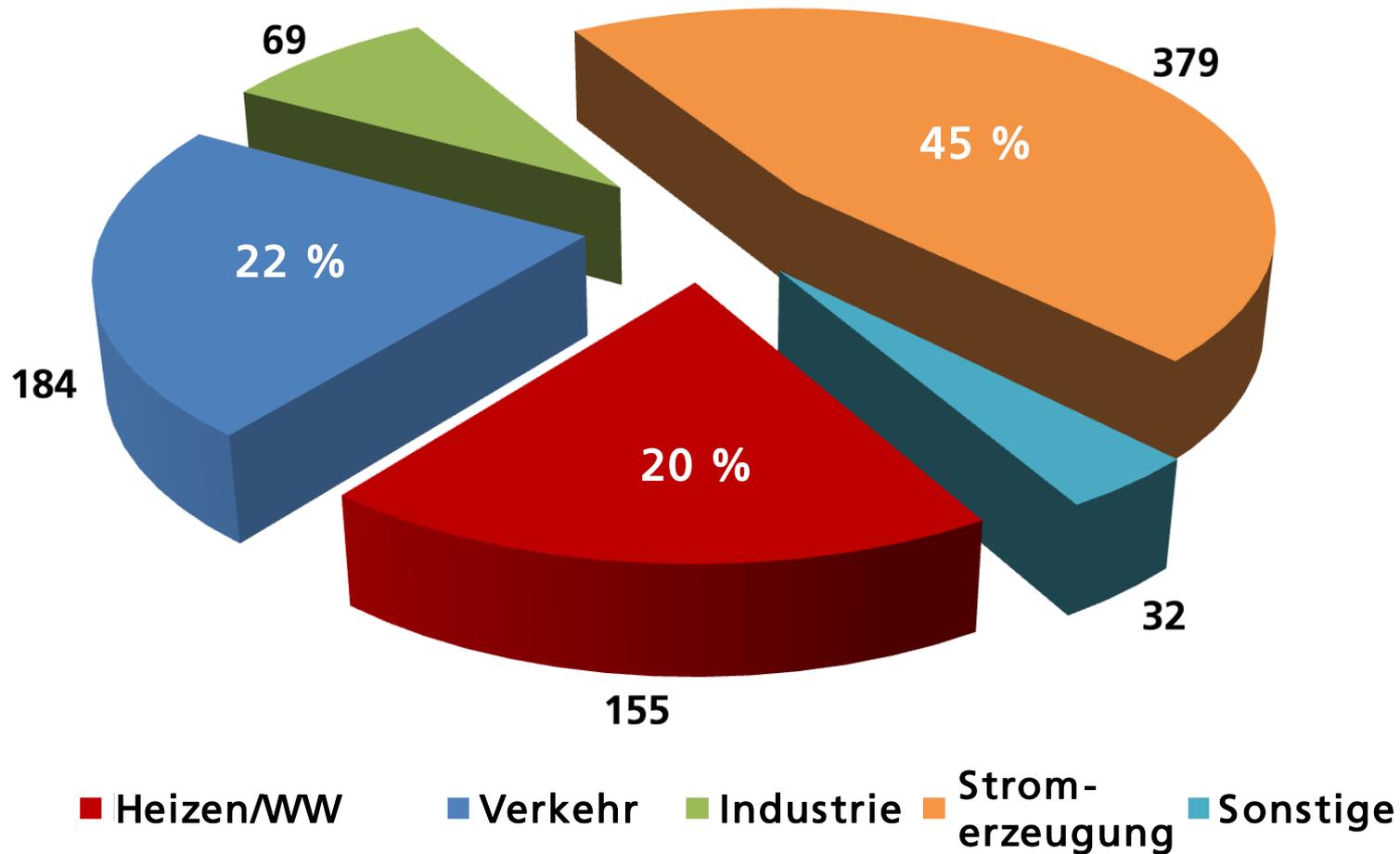
Endenergie Deutschland heute



Quelle: eigene Darstellung auf Basis Daten AG Energiebilanzen

Energiebedingte CO₂-Emissionen Deutschlands (2008)

Verteilung nach Verbrauchssektoren (in Mio. Tonnen)



Quelle: "Politikscenarien für den Klima-schutz VI - Treibhausgas-Emissions-szenarien bis zum Jahr 2030.", Öko-Institut et al. im Auftrag des Umwelt-bundesamtes (UBA), März 2013

Inhaltsübersicht

- Einleitung
- **Energiesystem Deutschland auf Basis regenerativer Energien – ein Blick in das Jahr 2050**
 - **Methodik**
 - Ergebnisse Parameterstudie
 - Ausgewähltes Beispielsystem
 - Investitionen
- Zusammenfassung und Ausblick

Leitfragen

- Ist es möglich, die Klimaschutzziele Deutschlands überwiegend oder vollständig auf Basis von Energieeffizienz und erneuerbaren Energien zu decken?
 - ➔ Modell, das alle Verbrauchs-Sektoren und Energieträger einschließt
 - Wie sehen konsistente Systeme aus (Lastdeckung zu jedem Moment)?
 - ➔ hohe Zeitauflösung (Stunden)
 - Wie sehen kostenoptimale Systeme aus (Technologiemix, Struktur)?
 - ➔ Minimierung jährlicher Vollkosten in „eingeschwungenem“ Zustand
 - Welche Rolle spielen zentrale Effizienzmaßnahmen, z.B. energetische Sanierung Gebäude?
 - ➔ Einbeziehung Mehrkosten energetische Sanierung in Kostenanalyse
- ➔ Langfrist-Perspektive, volkswirtschaftliche Betrachtung, »Helikopterblick«

Methodik

- **Stündliche Modellierung** der Energieflüsse unter Berücksichtigung aller Komponenten des Energiesystems (Erzeugung, Speicherung, Verbrauch)
- (Struktur-) **Optimierung** → Minimierung **jährlicher Gesamtkosten** zum Erhalt und Betrieb des Gesamtsystems
- Betriebsführung: **“Merit Order“** nach **thermodynamischer Effizienz** (2. Hauptsatz)
- **Nicht-lineares** Problem mit sehr vielen Freiheitsgraden (generischer Optimierer auf Basis »particle swarm«)
- **Randbedingungen** (exogene Vorgaben): erlaubte Menge CO₂, verfügbare Biomasse, Traktionsenergie Verkehr, Basis-Stromverbrauch „klassische Lasten“ (z.B. Beleuchtung, Industrie), Brennstoffbedarf Industrie

Regenerative Energien Modell – Deutschland (REMod-D)

Ganzheitliche
Analyse des
Gesamtsystems



Struktur eines
Energiesystems mit
dominantem Anteil
erneuerbarer
Energien

- Alle Verbrauchs-
sektoren
- Schwerpunkt
Strom-Wärme
- Stundengenaue
Modellierung

Stromerzeugung und
-speicherung



Brennstoffe (inkl.
Biomasse und Power-
to-Gas/Fuel)



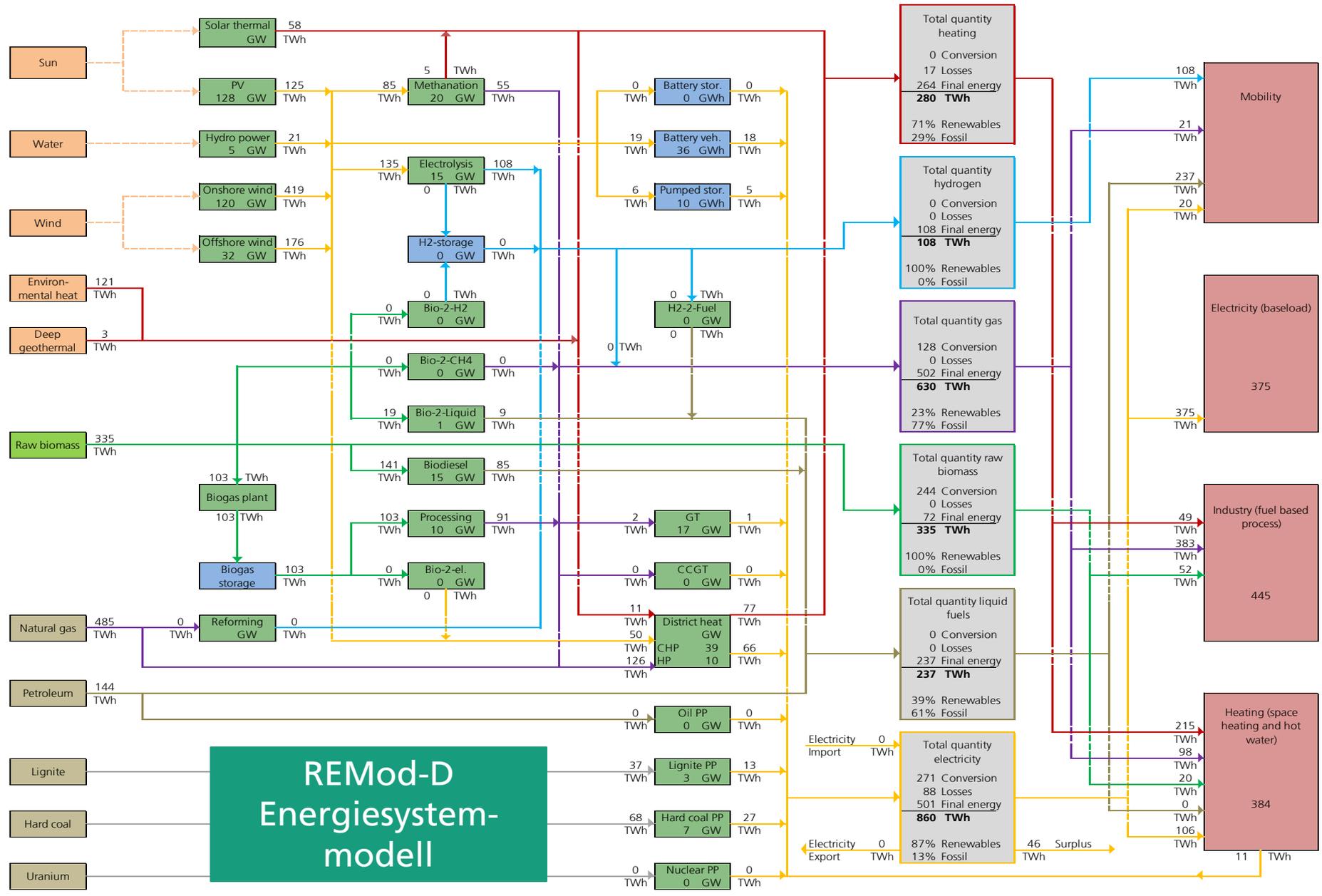
Verkehr
(Batterie-
elektrisch,
Wasserstoff,
konventionell)



Wärme
(Gebäude,
inkl.
Fernwärme
und Speicher)



Prozesse in
Gewerbe und
Industrie



REMod-D Energiesystemmodell

Renewable energy sources	Renewable raw materials	Primary fossil energy carrier	Energy conversion	Storage	Consumption sector	Hydrogen	Raw biomass	CO2 emissions 1990 (reference year)	990 Mio t CO ₂
						Heat	Liquid fuels	CO2 emissions	196 Mio t CO ₂
						Gas	Electricity	CO2 reduction related to 1990:	80%

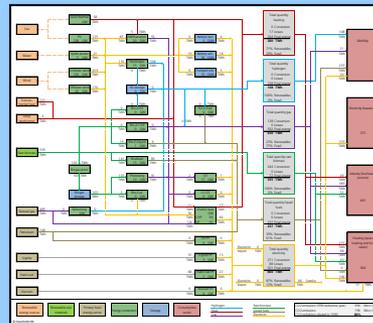
Modell-Ansatz

Exogene Vorgaben

CO₂-Emissionen →
verfügbare Menge
fossiler Energieträger

Weitere externe
Randbedingungen (z.B.
verfügbare Biomasse,
konventioneller
Kraftwerkspark,
Zusammensetzung
Fahrzeugsektor...)

Optimierer
Optimierung
Gesamtsystem
(Minimierung
jährliche
Gesamtkosten)



Ergebnisse

Installierte Leistung
aller Komponenten

Größe Speicher

Umfang
energetische
Sanierung Gebäude

Wärmeversorgungs-
techniken Gebäude-
sektor (Wärme-
netze, dezentral)

Inhaltsübersicht

- Einleitung
- **Energiesystem Deutschland auf Basis regenerativer Energien – ein Blick in das Jahr 2050**
 - Methodik
 - **Ergebnisse Parameterstudie**
 - Ausgewähltes Beispielsystem
 - Investitionen
- Zusammenfassung und Ausblick

Parameterstudie Wärmeversorgung

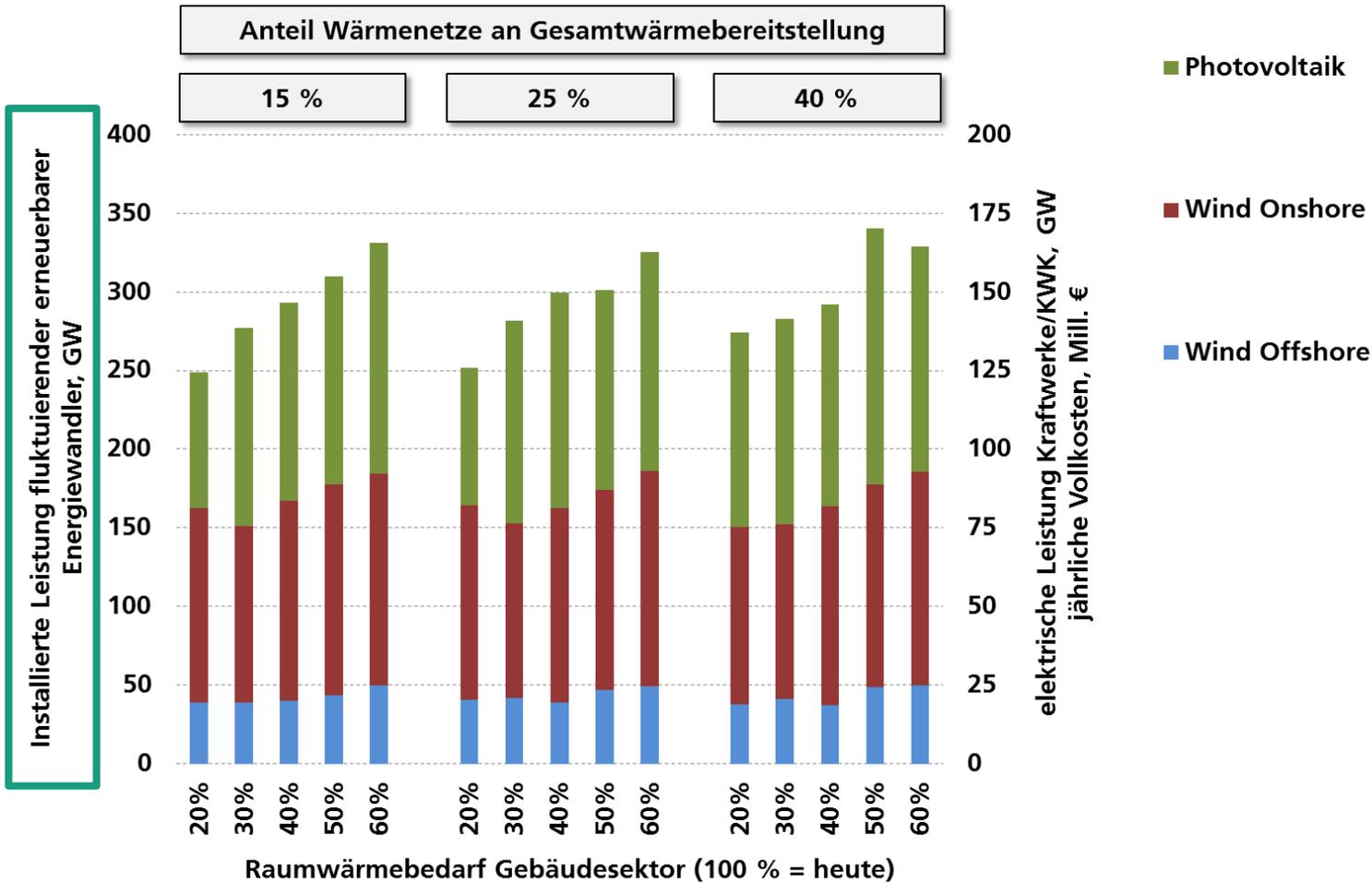
Variation der Wärmeversorgung

→ Untersuchung des Einflusses folgender Größen auf das Gesamtsystem

- Umfang Wärmenetze
- Raumwärmebedarf (Umfang energetische Sanierung)

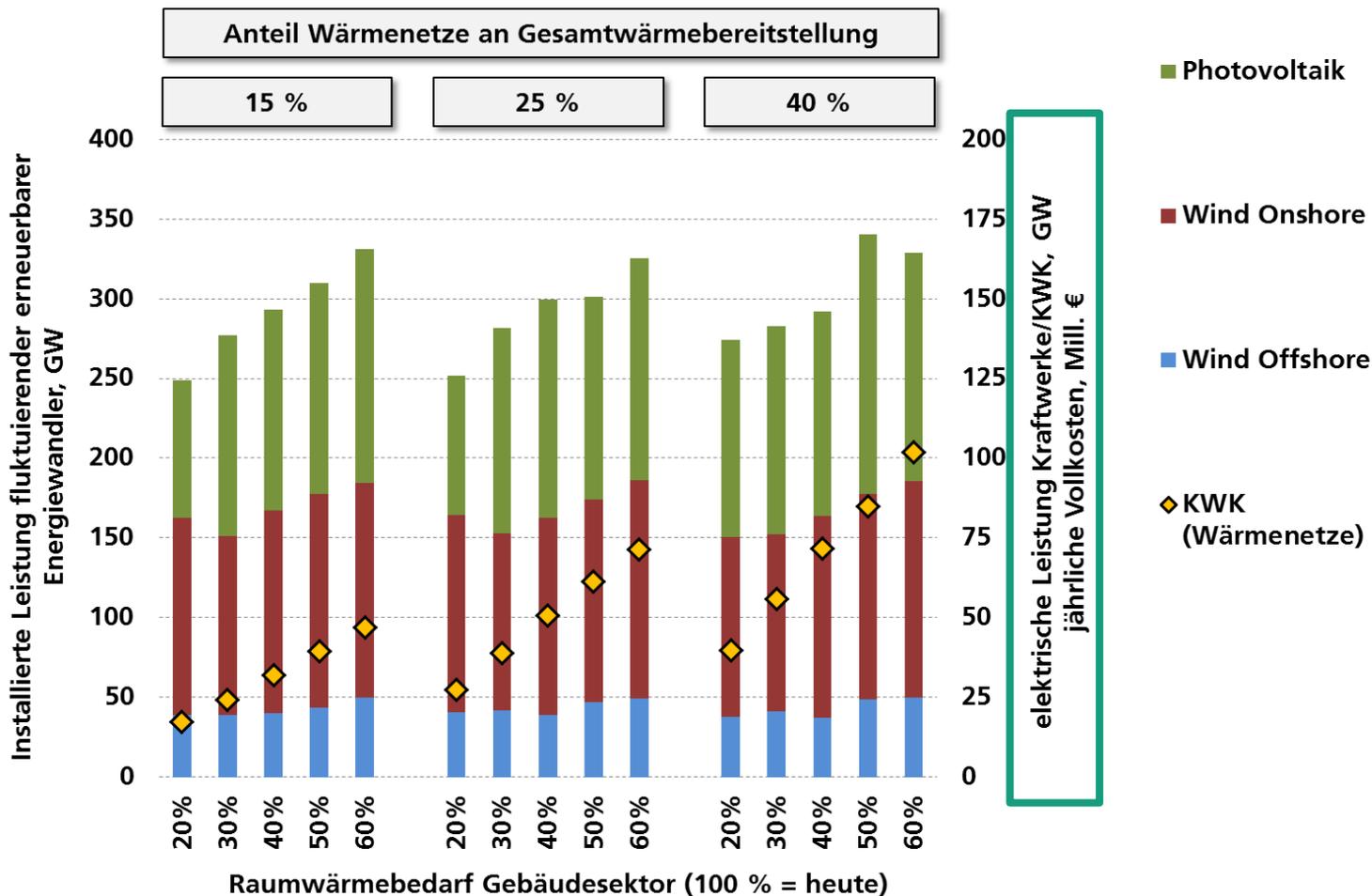
Fluktuierende erneuerbare Energien

Installierte Leistung in GW



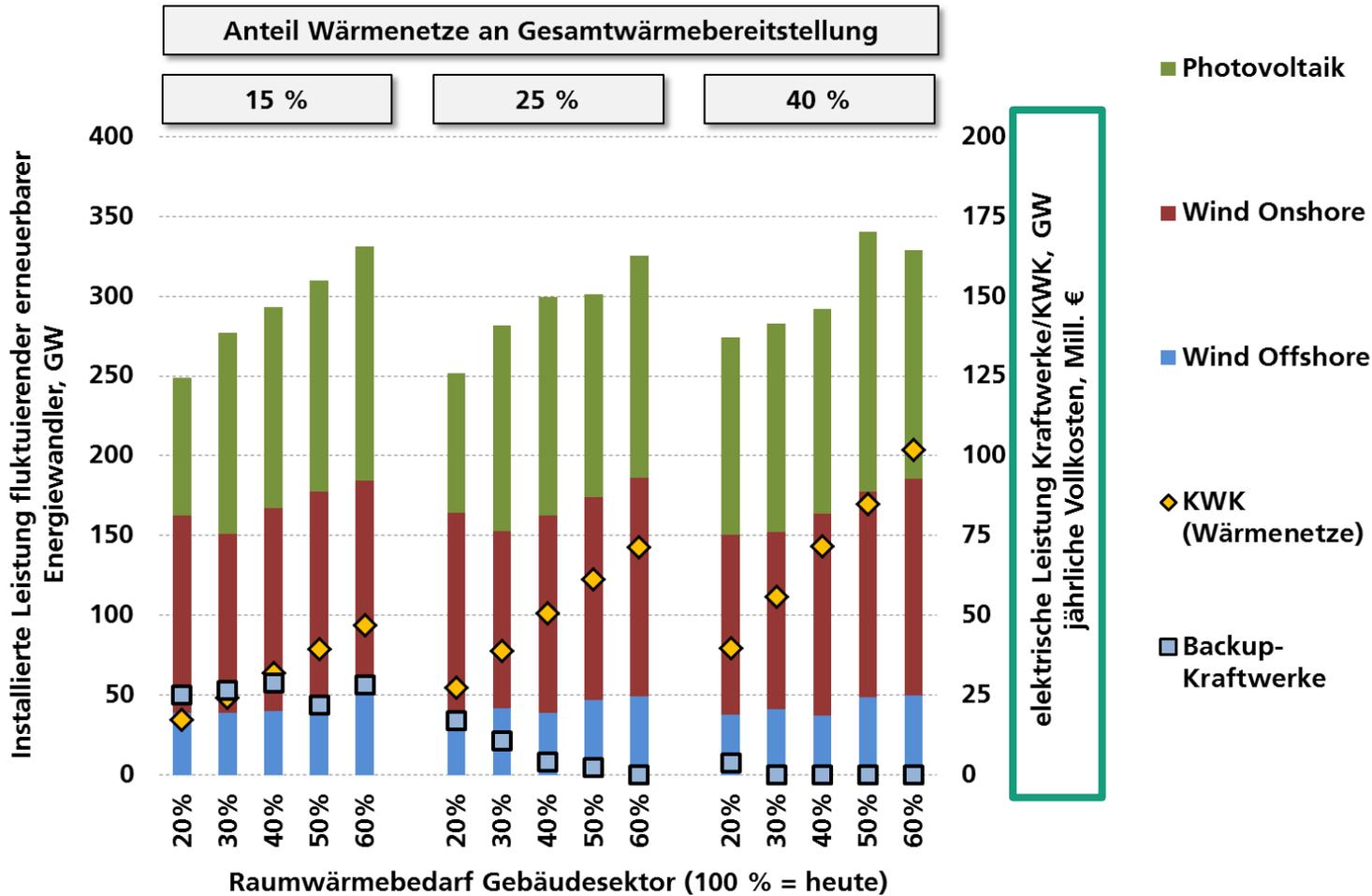
KWK in Wärmenetzen

Installierte elektrische Leistung in GW



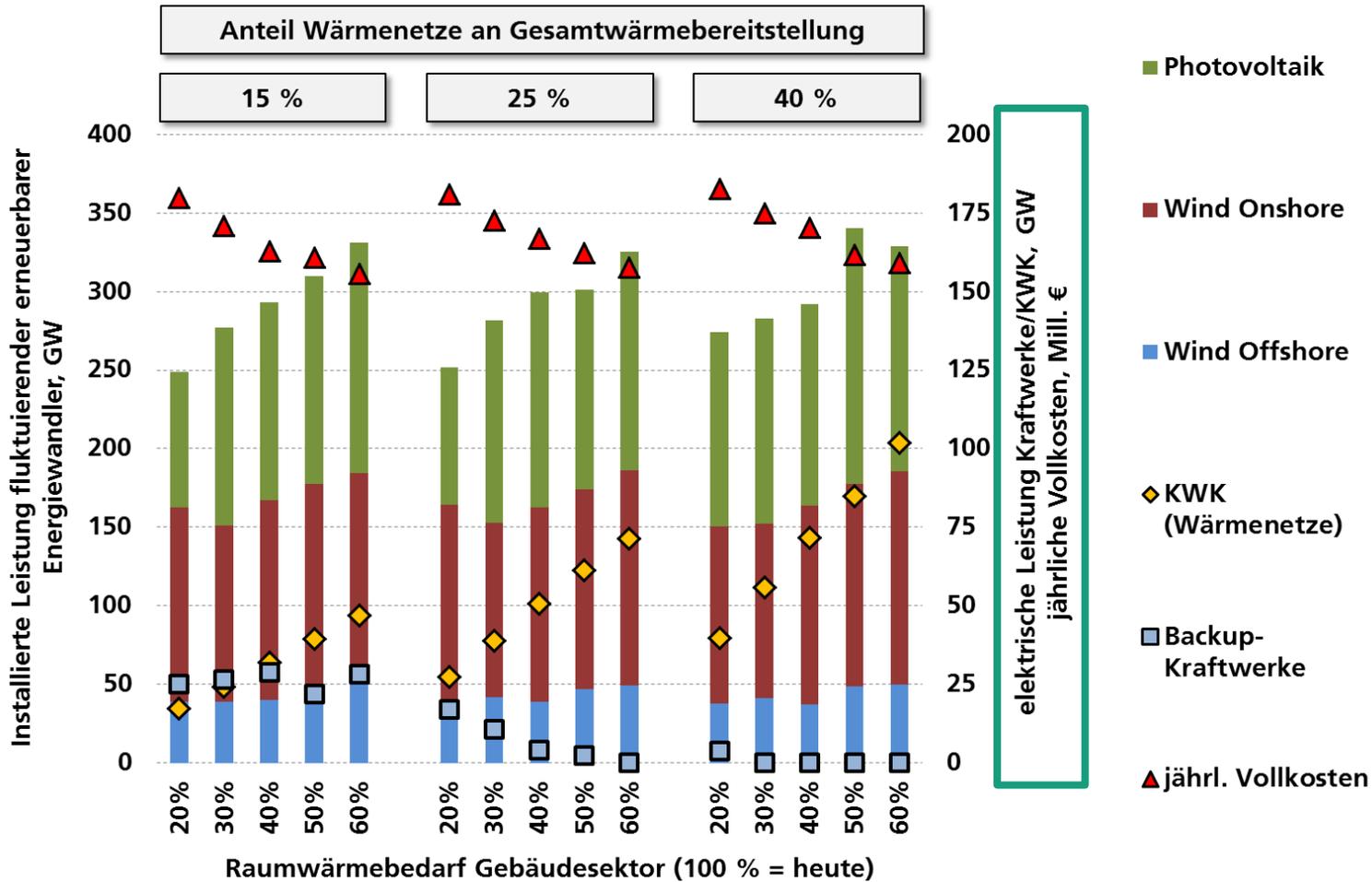
Backup-Kraftwerke

Installierte elektrische Leistung in GW

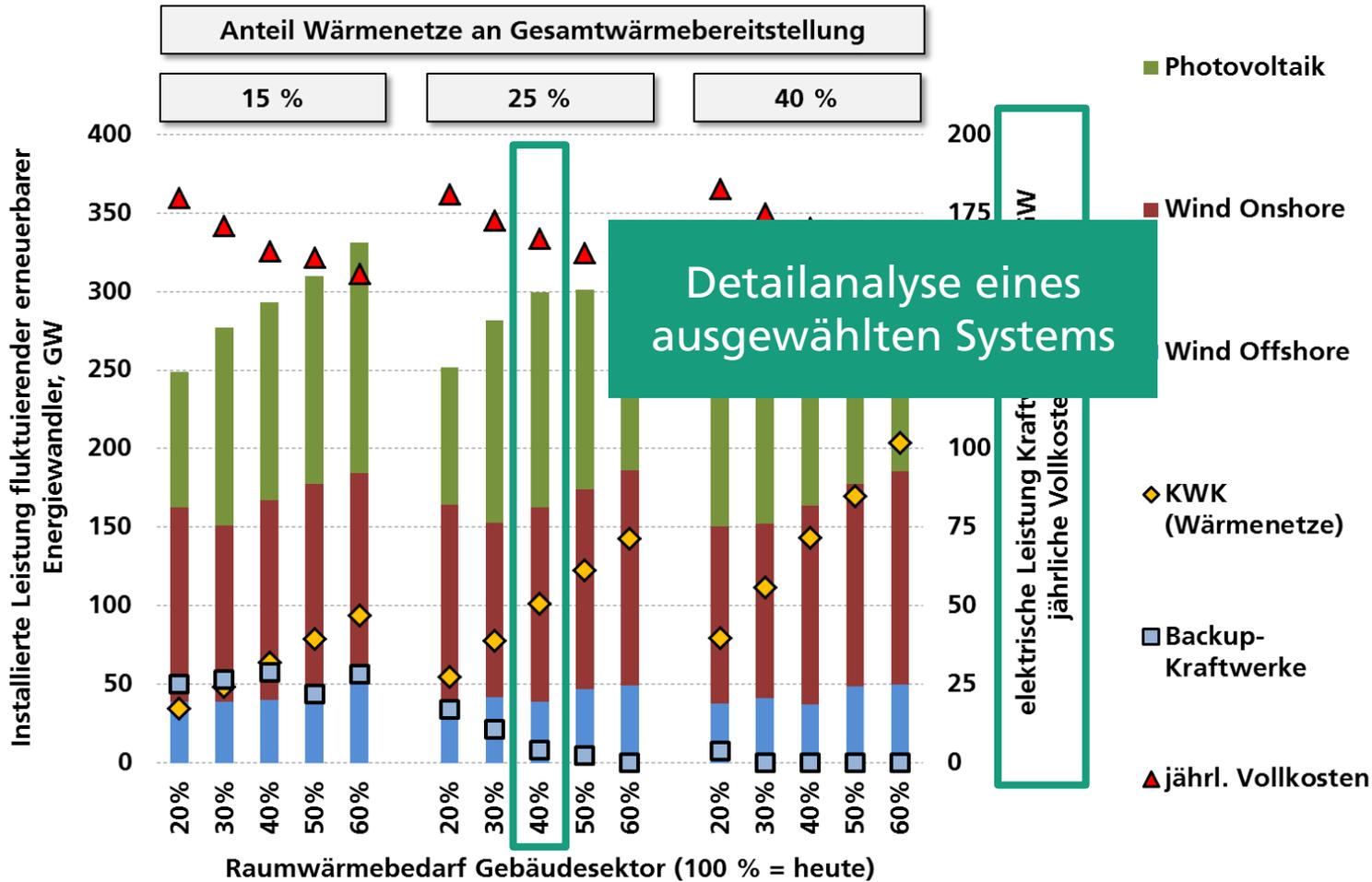


Jährliche Vollkosten

Milliarden € p.a.



Jährliche Vollkosten Milliarden € p.a.



Inhaltsübersicht

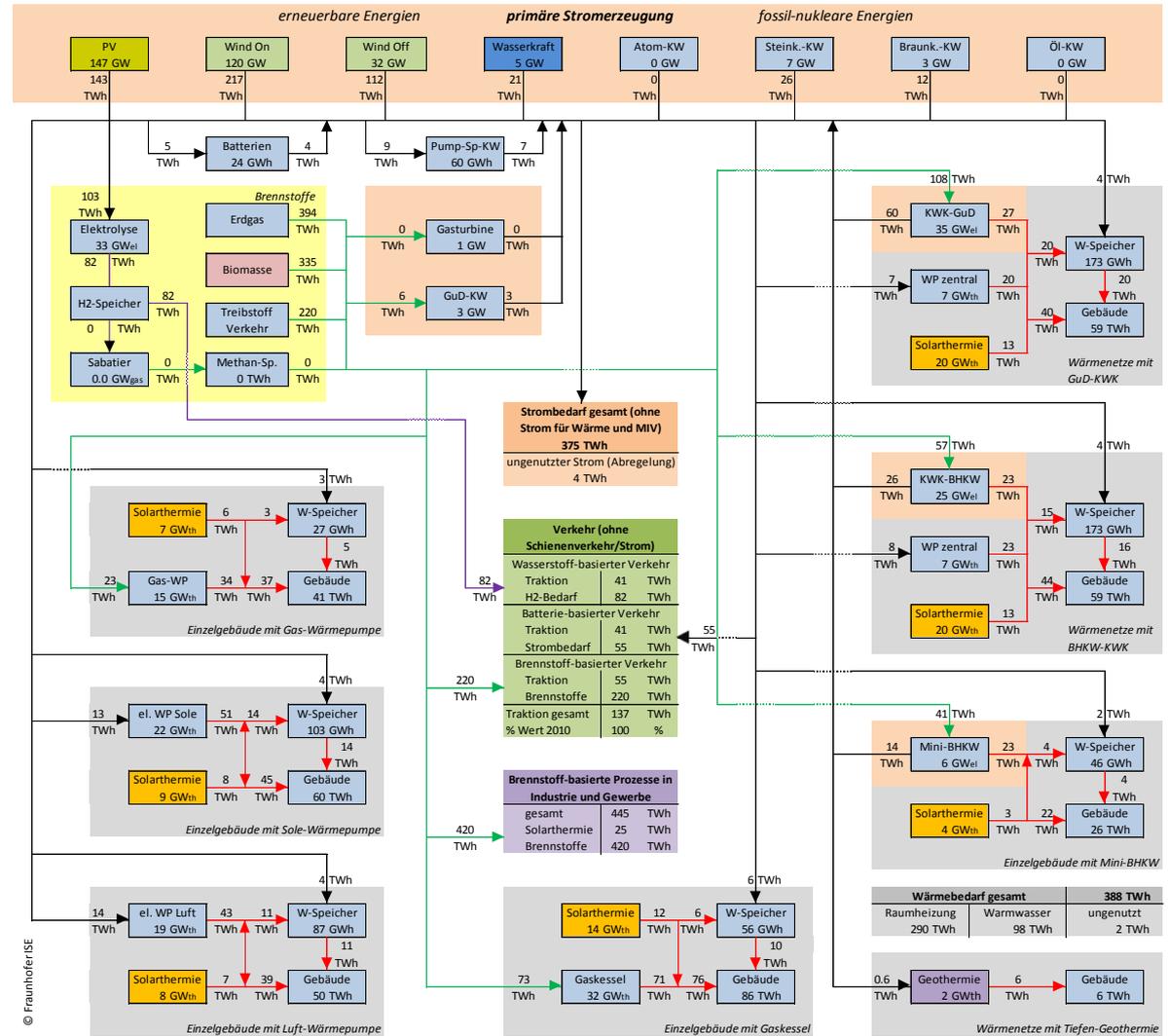
- Einleitung
- **Energiesystem Deutschland auf Basis regenerativer Energien – ein Blick in das Jahr 2050**
 - Methodik
 - Ergebnisse Parameterstudie
 - **Ausgewähltes Beispielsystem**
 - Investitionen
- Zusammenfassung und Ausblick

Kosten-optimales System

Kosten-optimales System, das Klimaschutzziele erreicht (Absenkung Energie-bedingter CO₂-Emissionen um 81 %)

Raumwärmebedarf Gebäude 40 % des heutigen Wertes

Anteil Wärmenetze 25 %



Optimiertes System – Strom



Photovoltaik
~ 147 GW_{el}



Onshore
Wind
~ 120 GW_{el}



Offshore Wind
~ 32 GW_{el}

Mittlere und große
KWK (Wärmenetze)
~ 60 GW_{el}



Optimiertes System – Wärme



Energetische Sanierung
auf ~ 40 % des heutigen
Raumwärmebedarfs



Solarthermie
~ 82 GW_{th}



Wärmepumpen

- ~ 22 GW_{th} (el., Erdreich)
- ~ 19 GW_{th} (el., Luft)
- ~ 15 GW_{th} (Gas)



KWK ~ 60 GW_{el}
Groß-WP ~ 15 GW_{th}

Optimiertes System – Speicher



Stationäre Batterien
~ 24 GWh (d.h. 8 Mio
Einheiten á 3 kWh)



Pumpspeicher-KW
42 Einheiten mit
insgesamt 60 GWh



Elektrolyseure mit
insgesamt ~ 33 GW_{el}
(Verkehr, Transport)

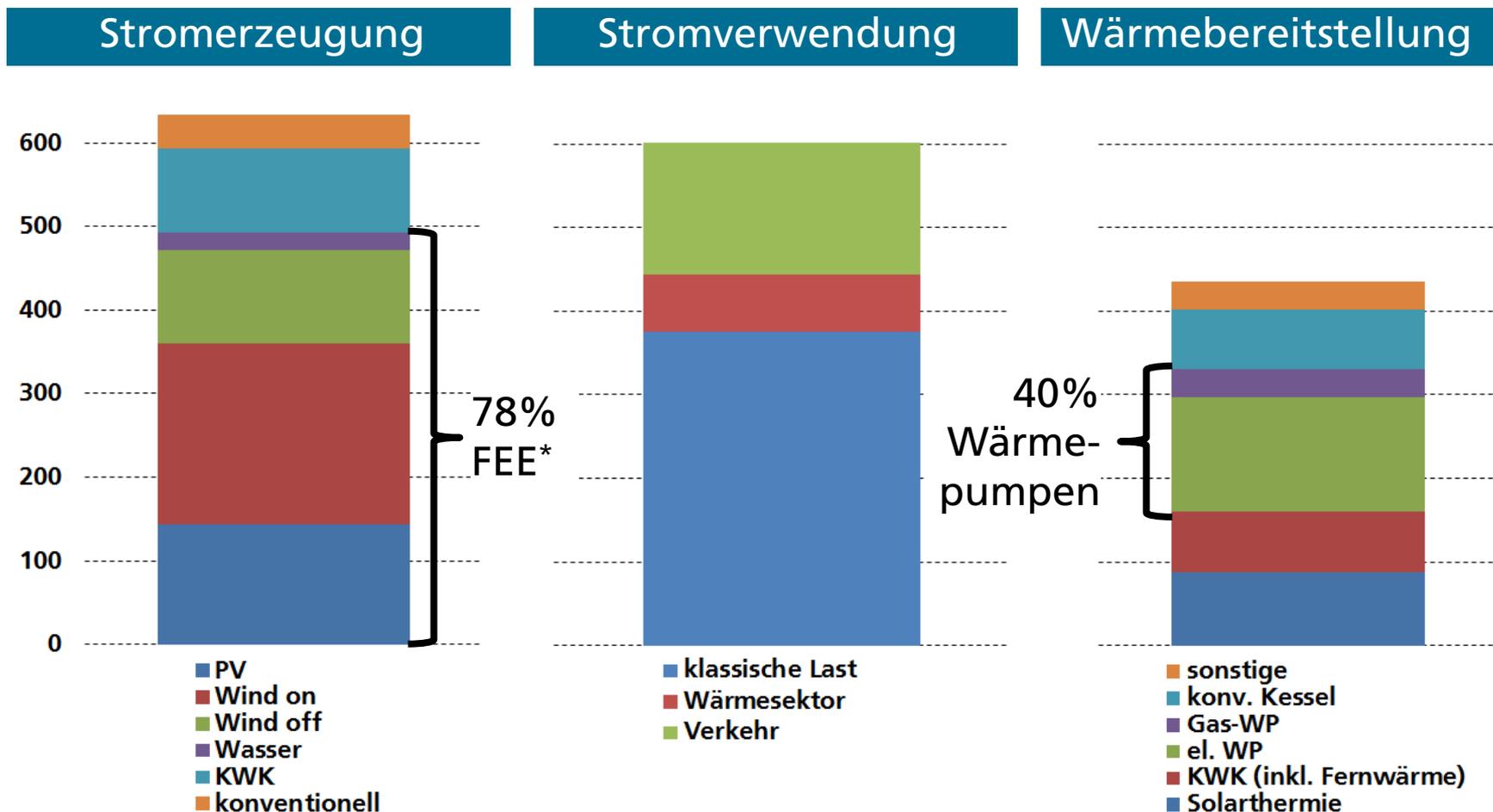


Wärmespeicher in Gebäuden
~ 320 GWh (d.h. 7 Mio
Einheiten á 800 Liter)



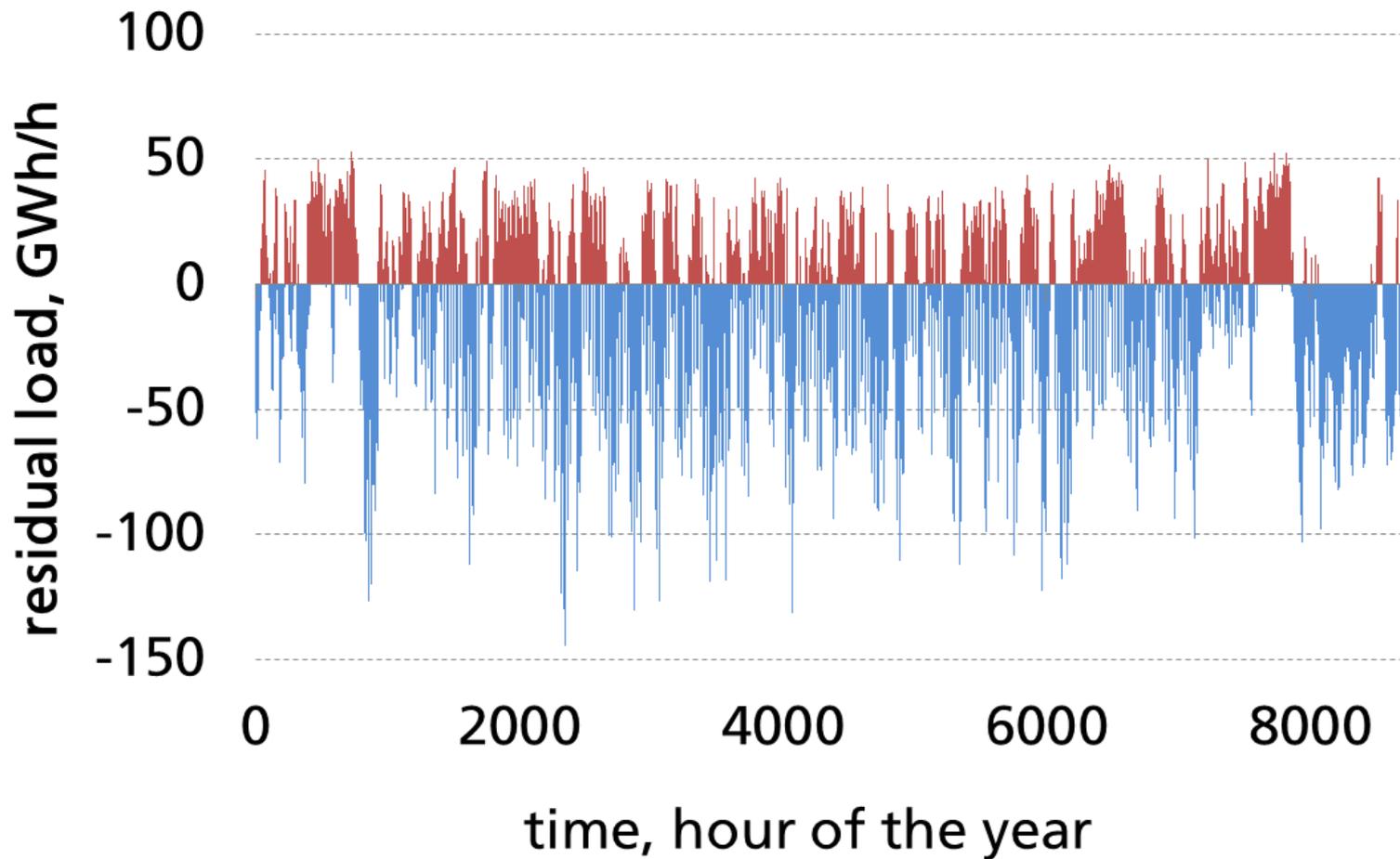
Großwärmespeicher in
Wärmenetzen
~ 350 GWh (d.h. 150
Einheiten á 50.000 m³)

Bilanzen Strom u. Wärme (TWh)

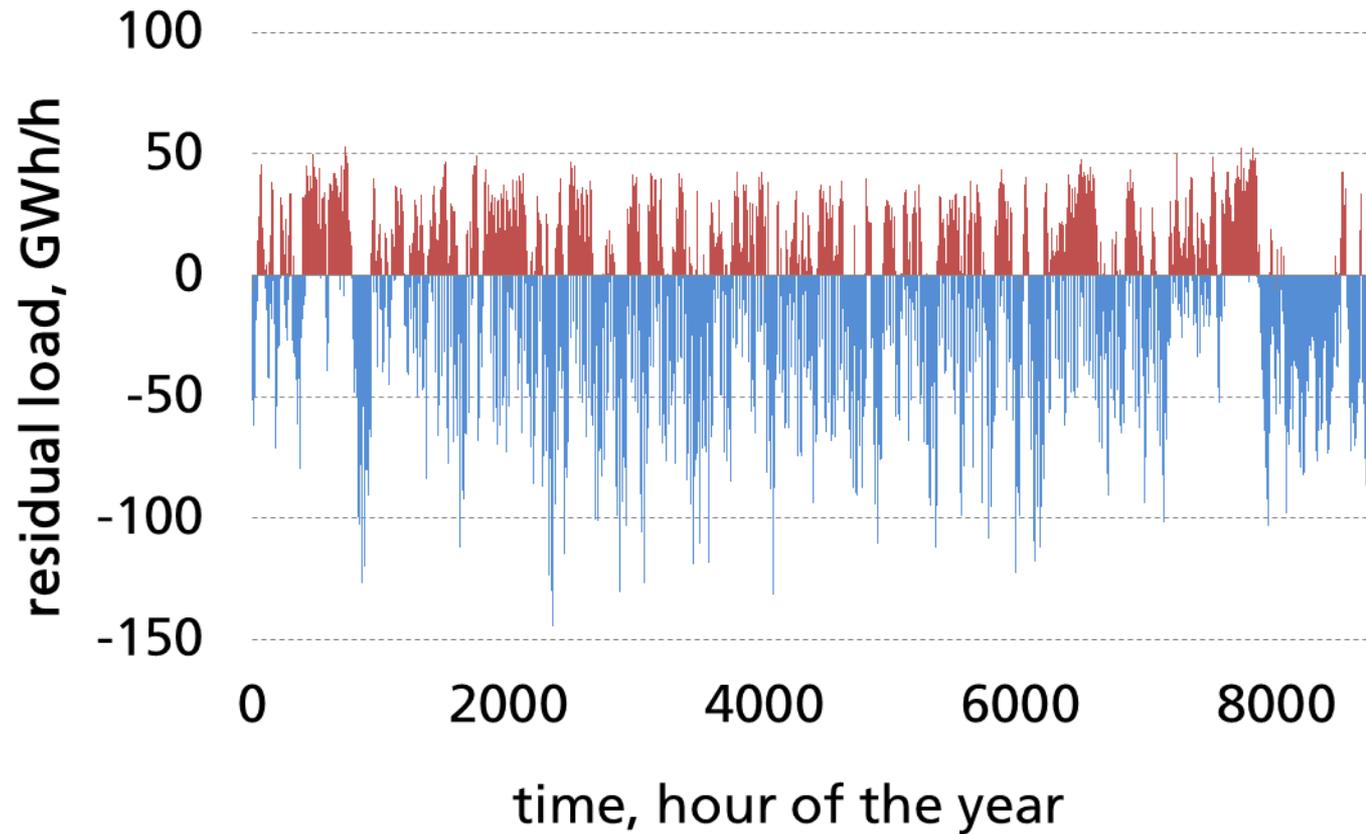


* FEE = fluktuierende erneuerbare Energien

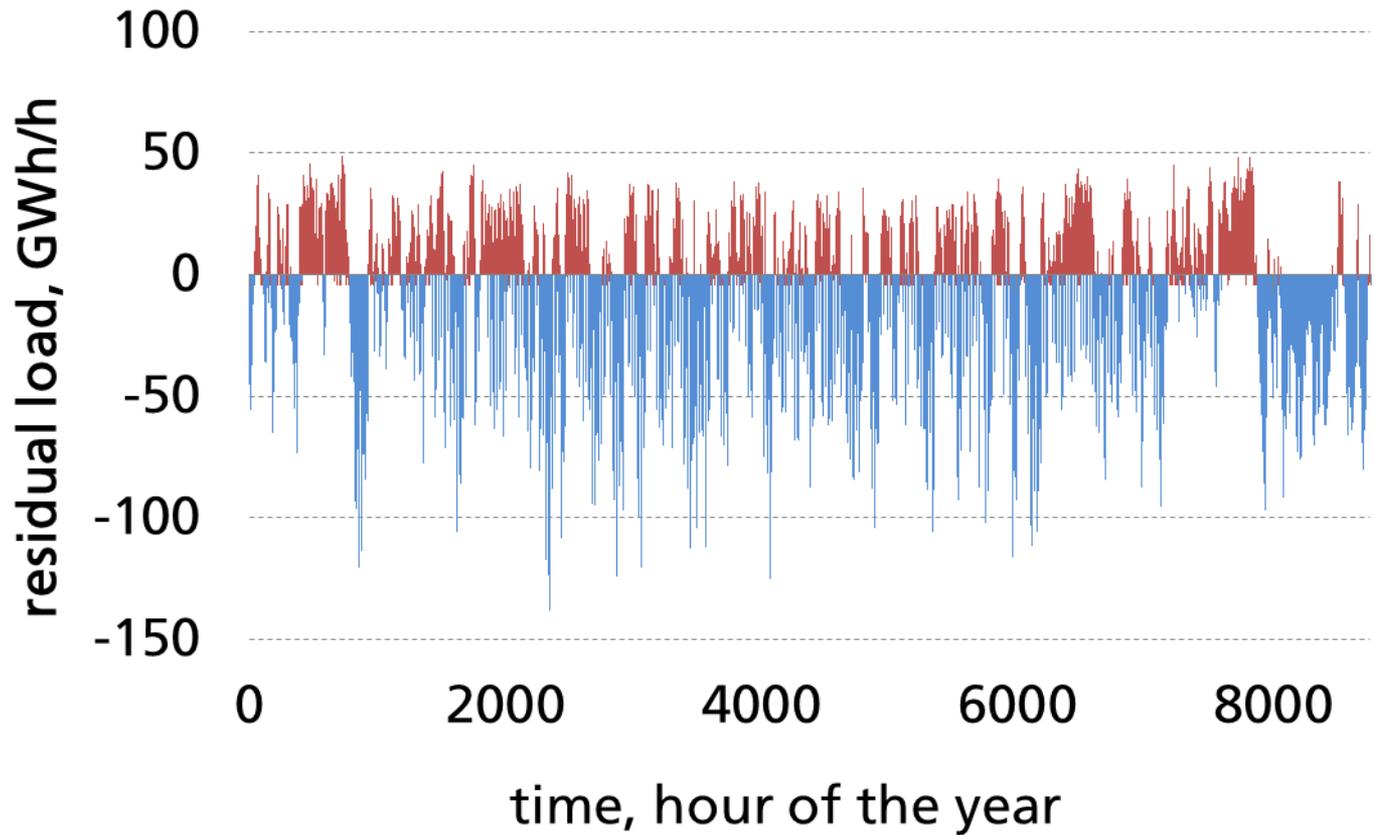
Residuallast 2050



Ausgleich Residuallasten



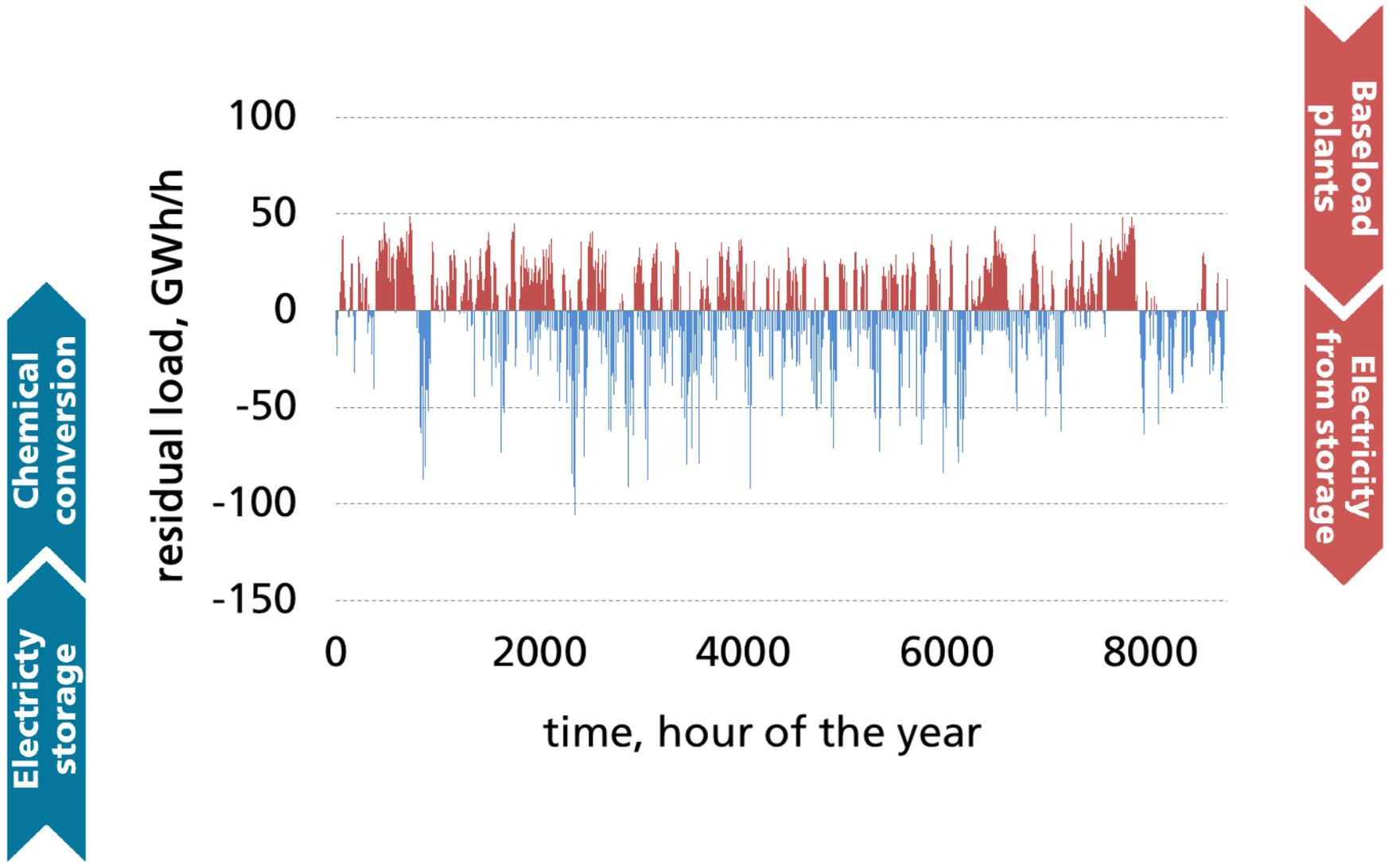
Ausgleich Residuallasten



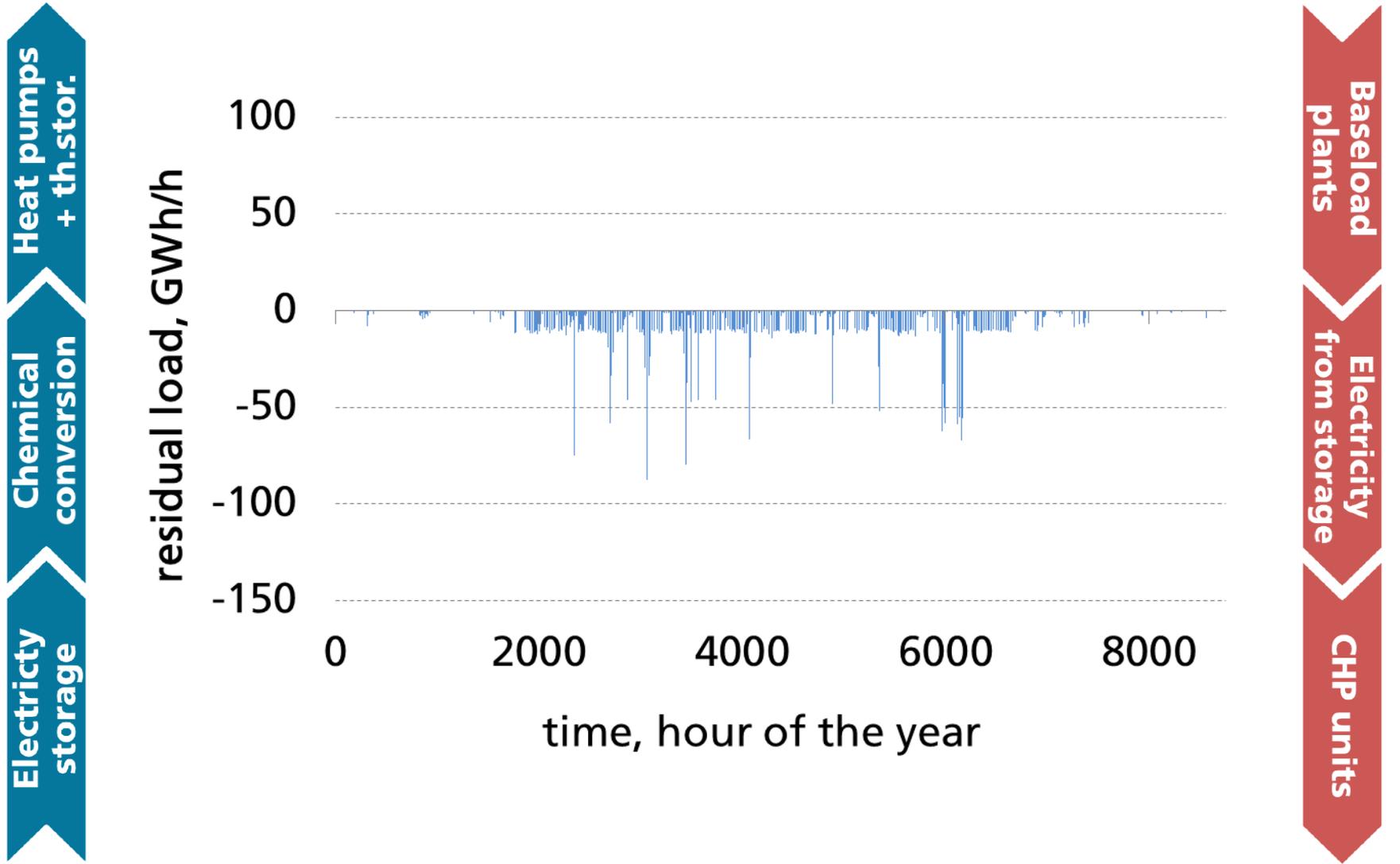
Electricity
storage

Baseload
plants

Ausgleich Residuallasten

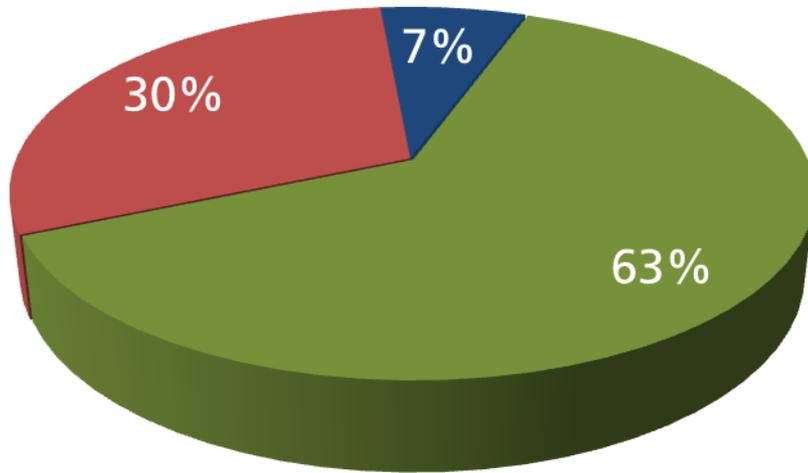


Ausgleich Residuallasten



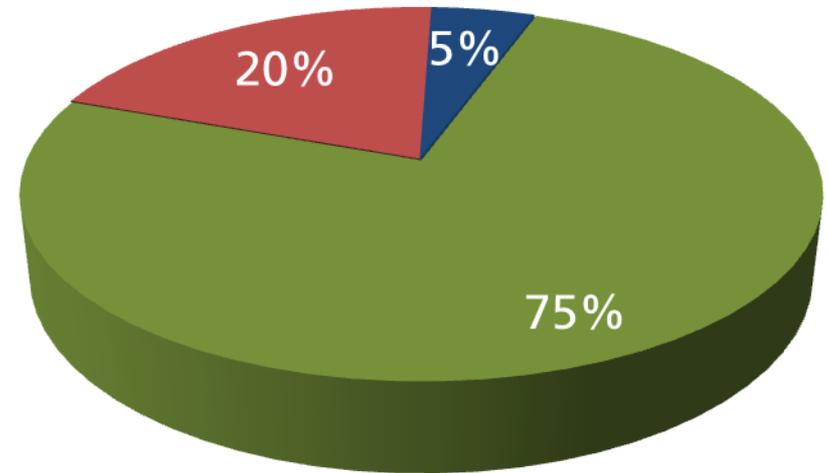
Stromherkunft elektrischer Wärmepumpen

Wärmepumpen in Einzelgebäuden



■ Erneuerbare ■ KWK ■ konventionell

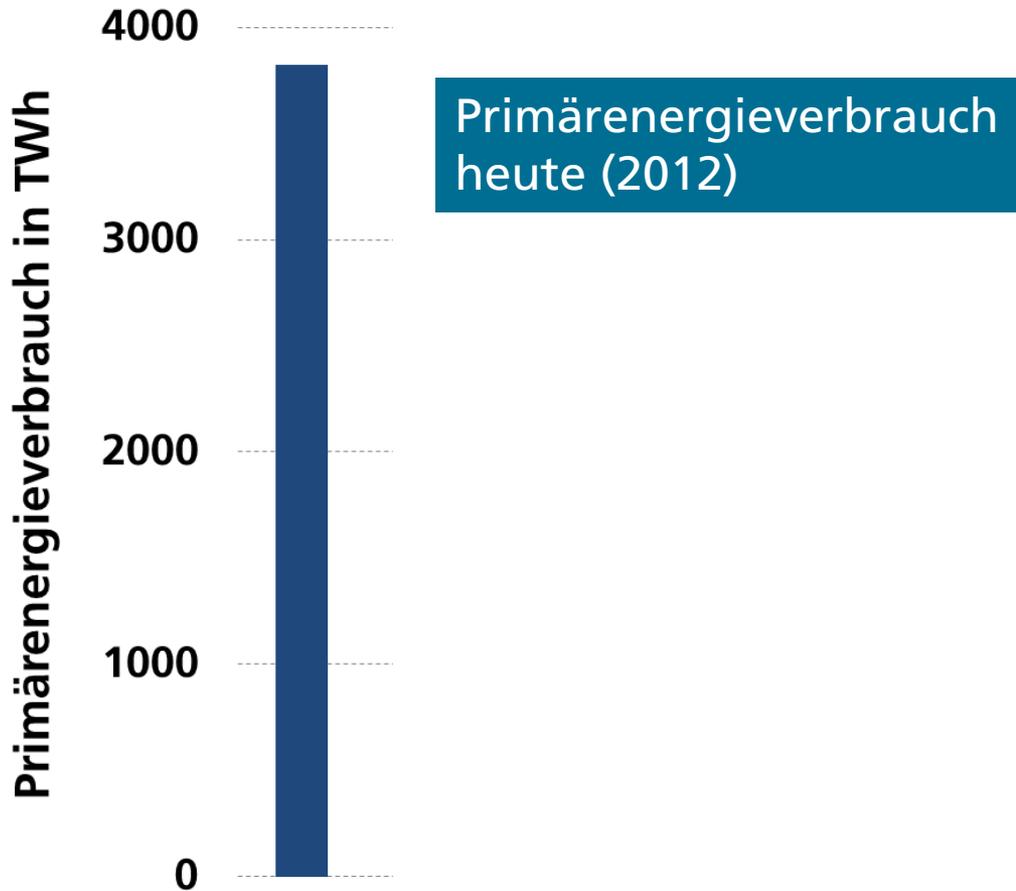
Wärmepumpen in Wärmenetzen



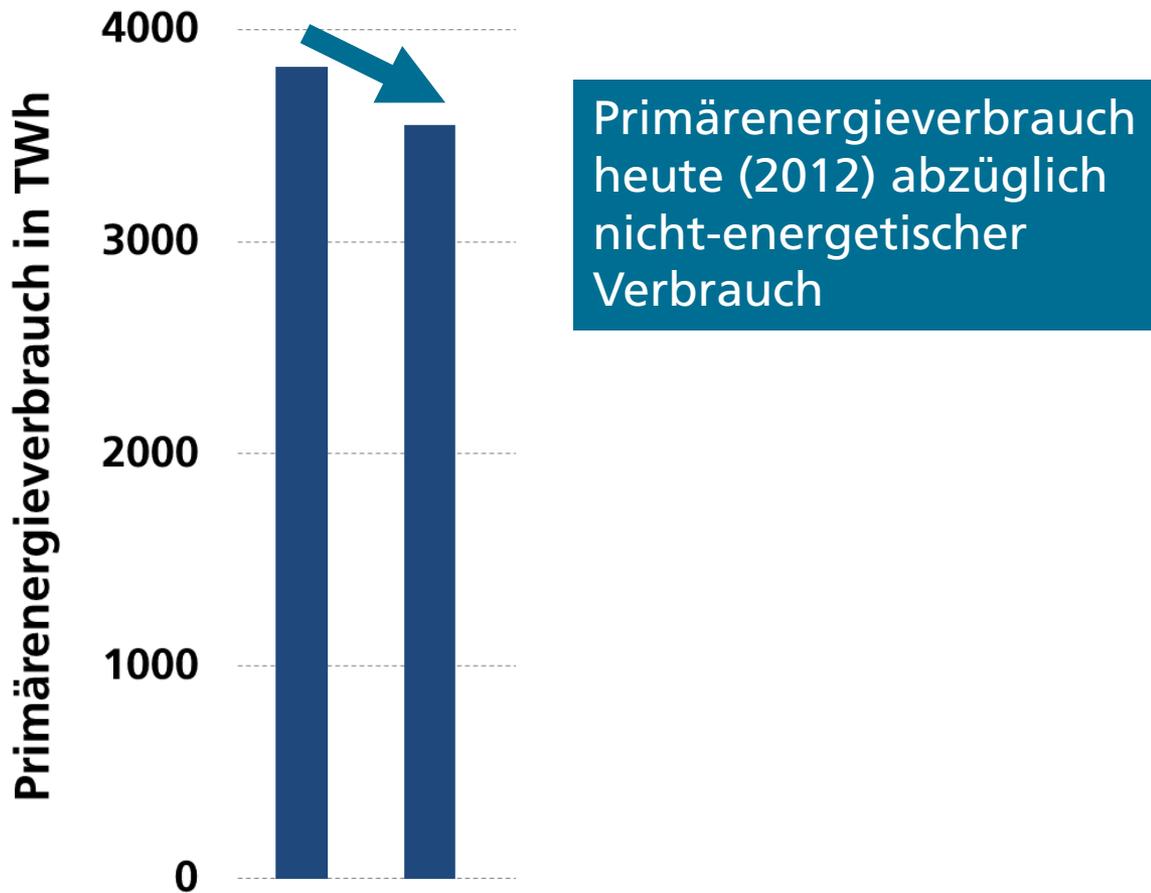
■ Erneuerbare ■ KWK ■ konventionell

- Ergebnis basiert auf stündlicher Analyse der Zusammensetzung der Stromerzeugung
- Strom erneuerbarer Energien dominant
- Einsatz thermischer Speicher wichtig zur Flexibilisierung des Einsatzes

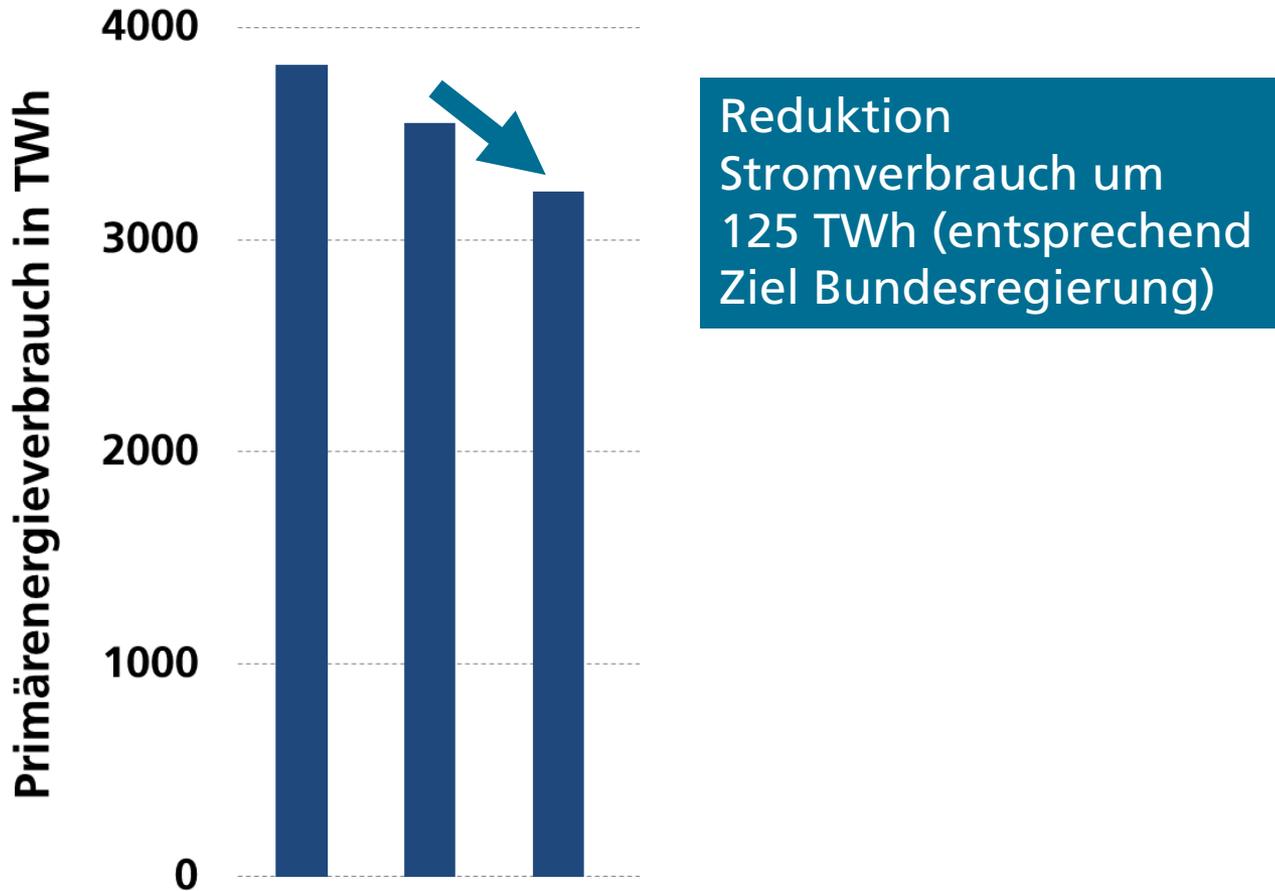
Beiträge zur Reduktion Primärenergie



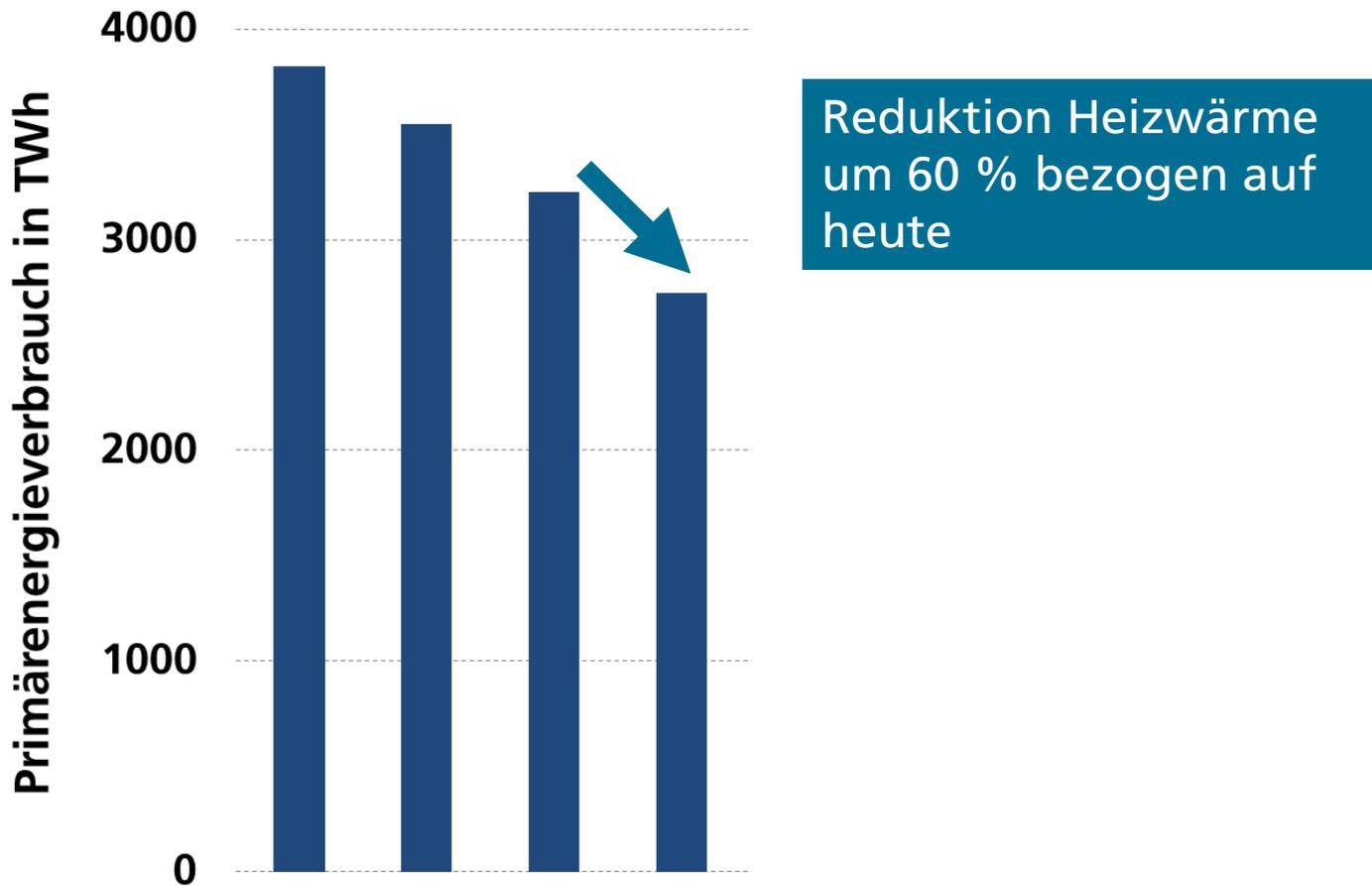
Beiträge zur Reduktion Primärenergie



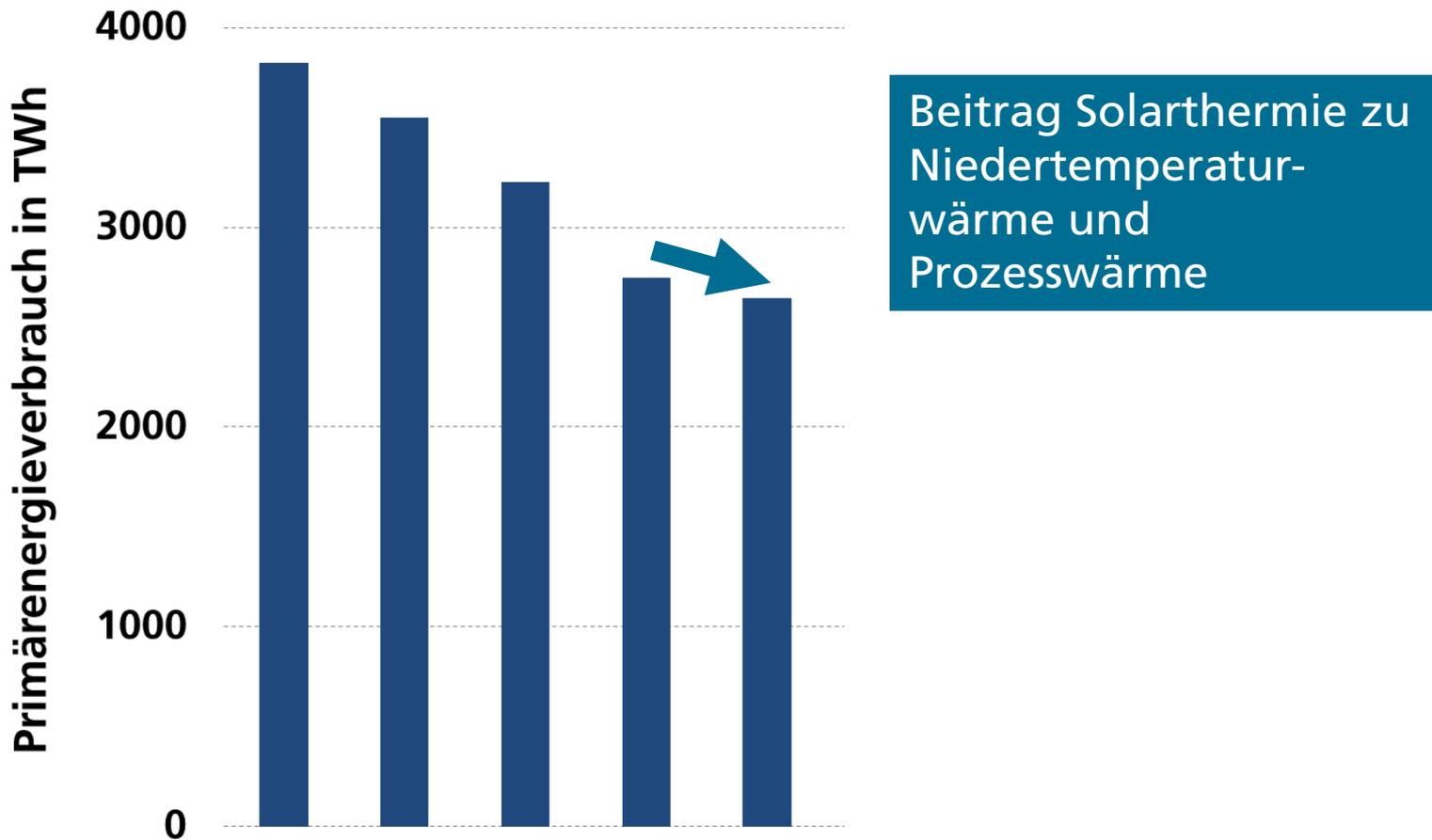
Beiträge zur Reduktion Primärenergie



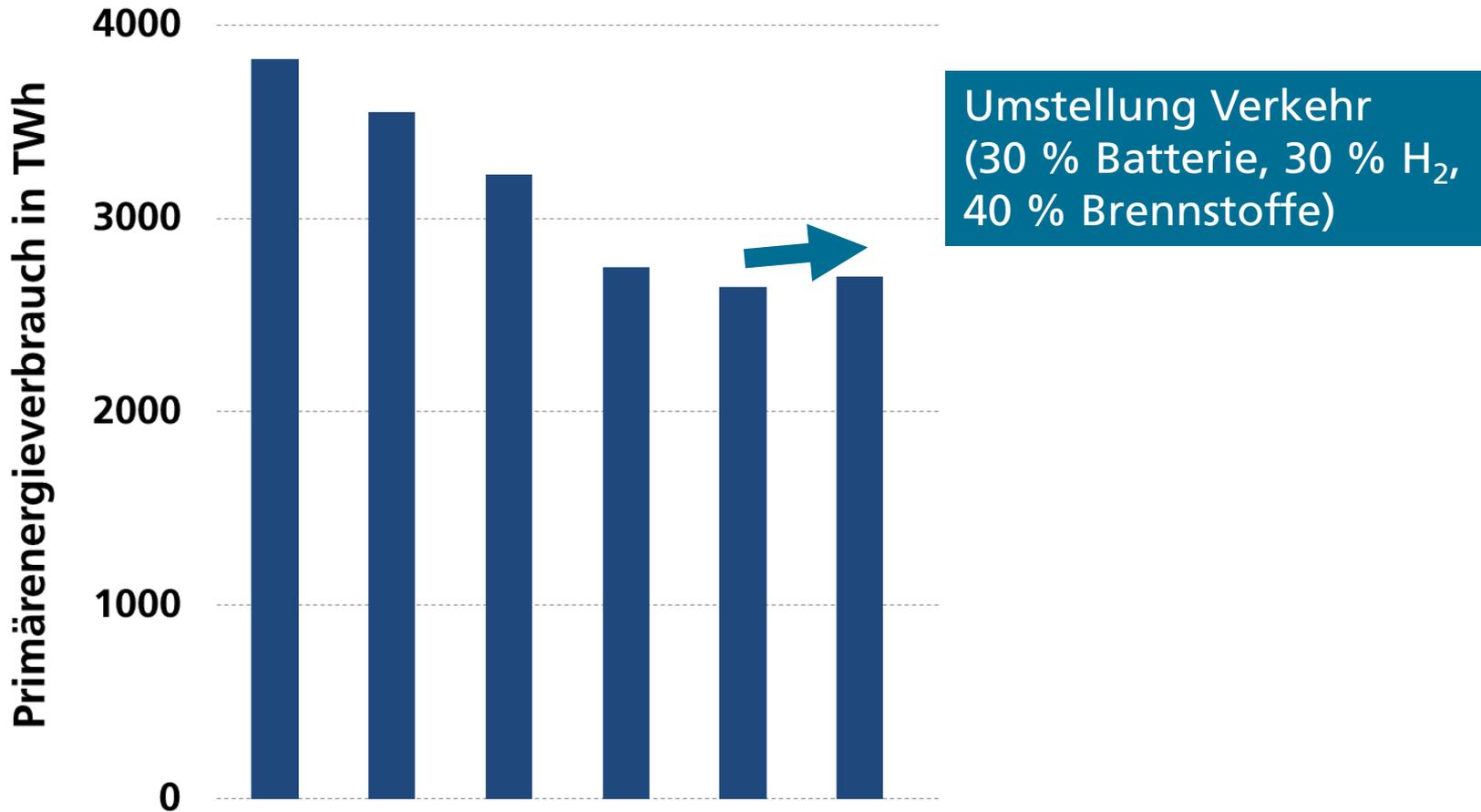
Beiträge zur Reduktion Primärenergie



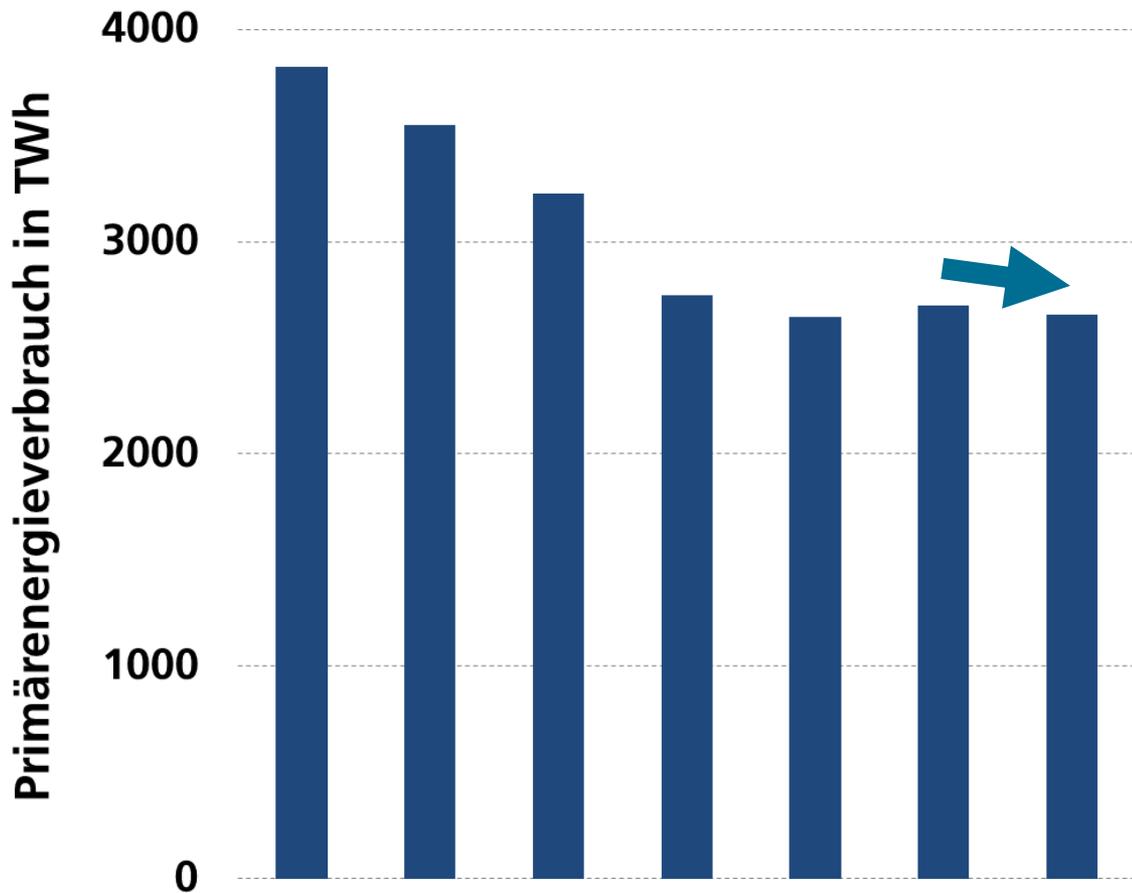
Beiträge zur Reduktion Primärenergie



Beiträge zur Reduktion Primärenergie

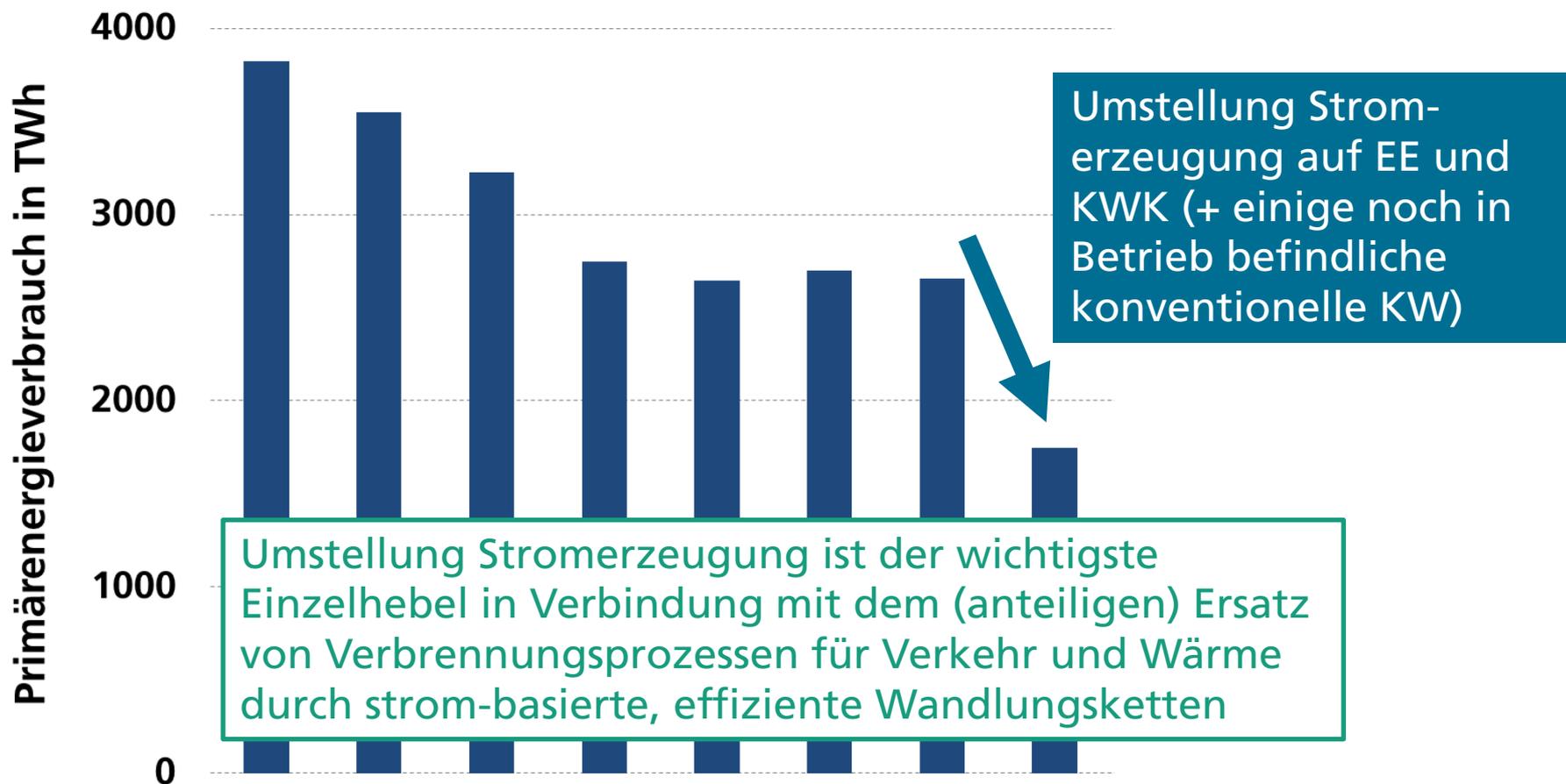


Beiträge zur Reduktion Primärenergie



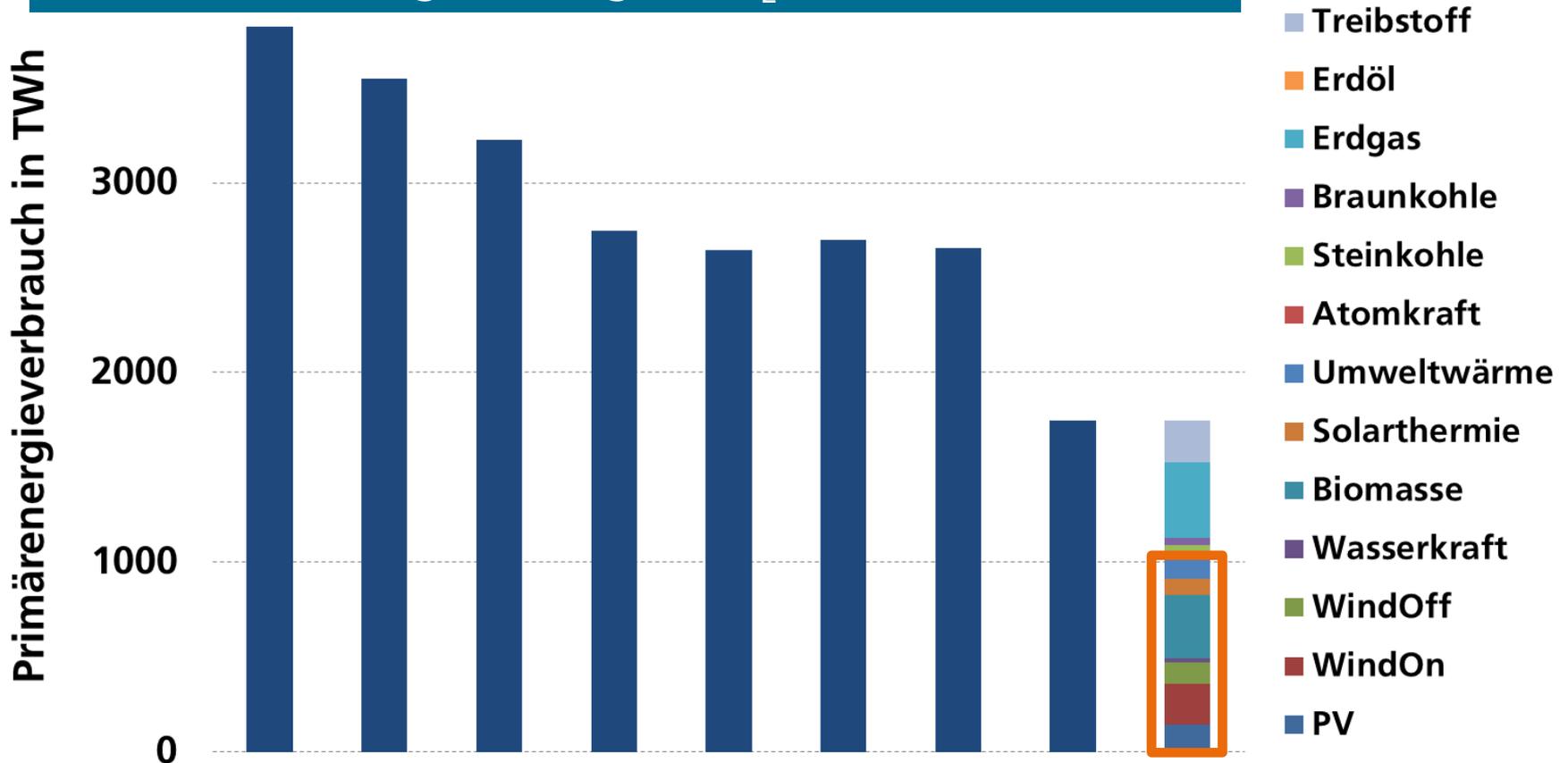
Elektrische Wärmepumpen (rund 1/3 der Niedertemperaturwärme)

Beiträge zur Reduktion Primärenergie



Zusammensetzung Primärenergie

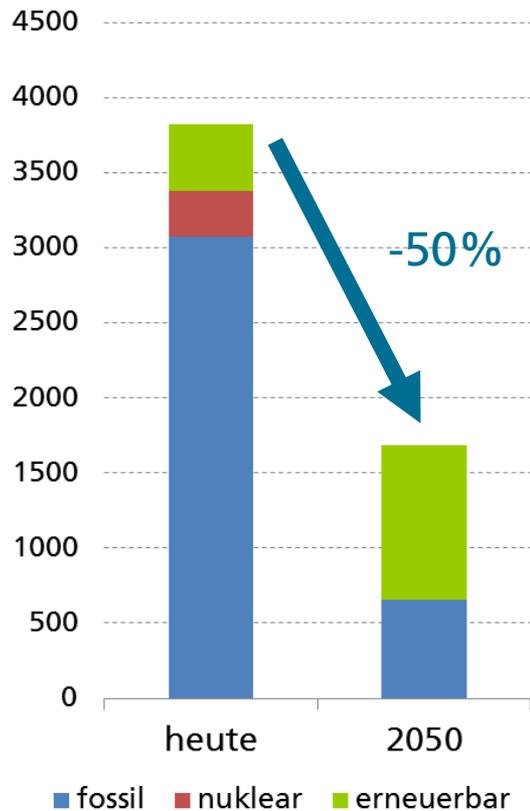
- In etwa Halbierung Primärenergieverbrauch (für EDL)
- Anteil Erneuerbare Energien am PEV rd. 60 %
- Reduktion energie-bedingte rCO₂-Emissionen um 81 %



Vergleich

Heutiges System vs. optimiertes System 2050

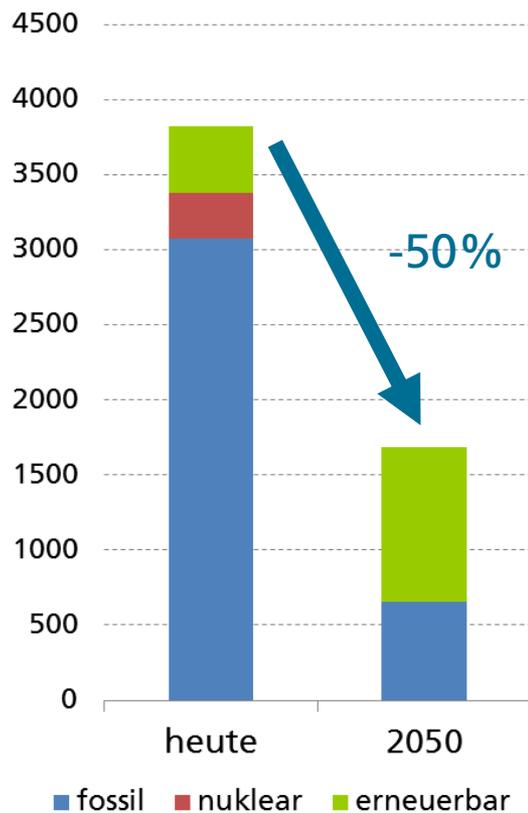
Primärenergie (TWh)



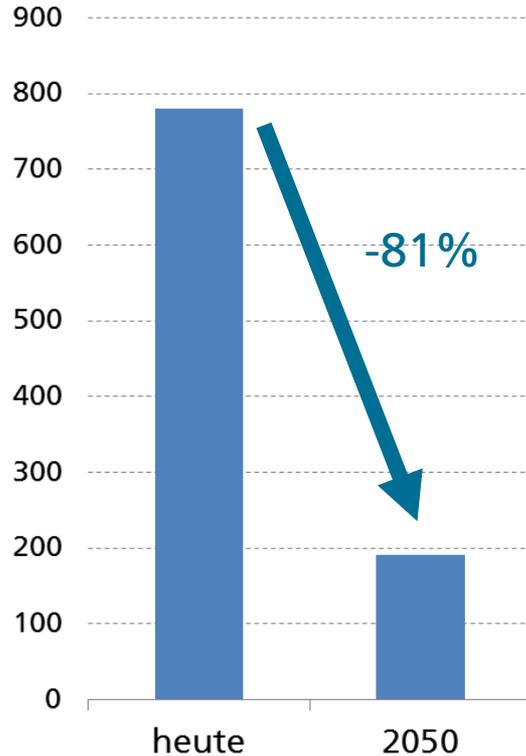
Vergleich

Heutiges System vs. optimiertes System 2050

Primärenergie (TWh)



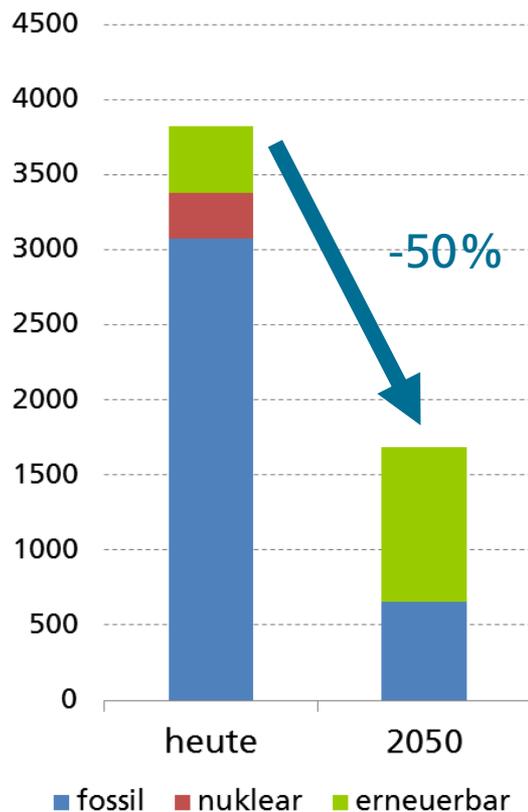
CO₂-Emissionen (Mio t)



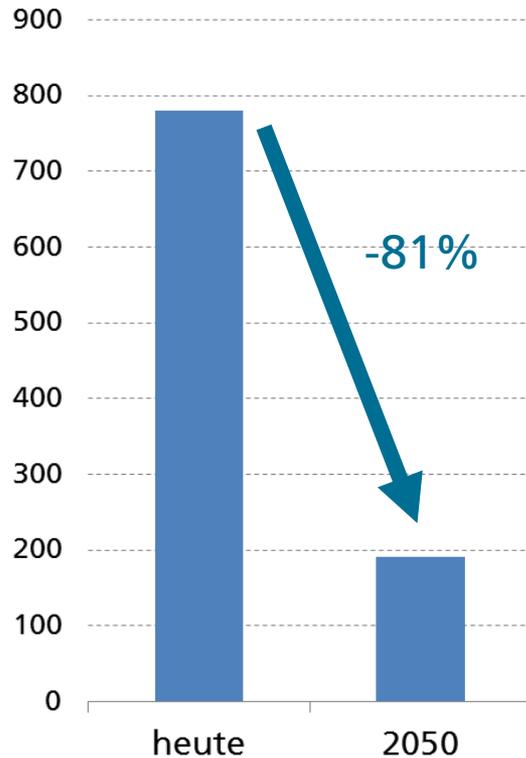
Vergleich

Heutiges System vs. optimiertes System 2050

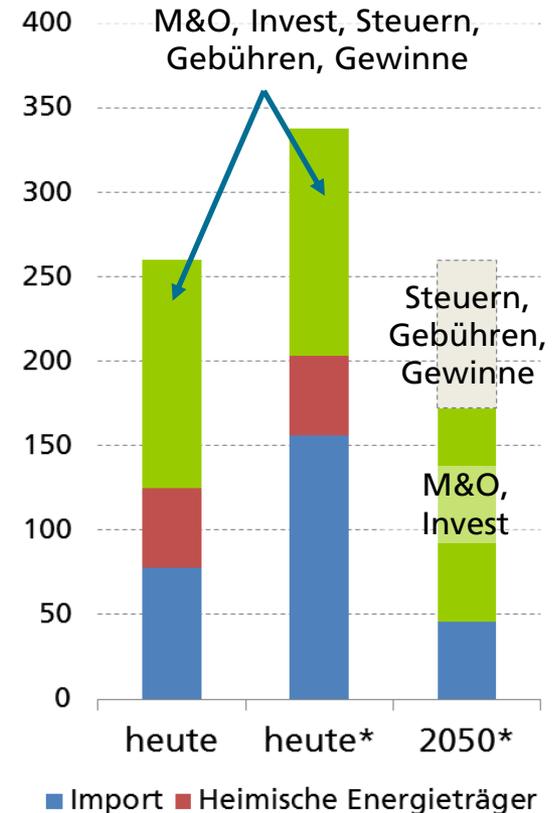
Primärenergie (TWh)



CO₂-Emissionen (Mio t)

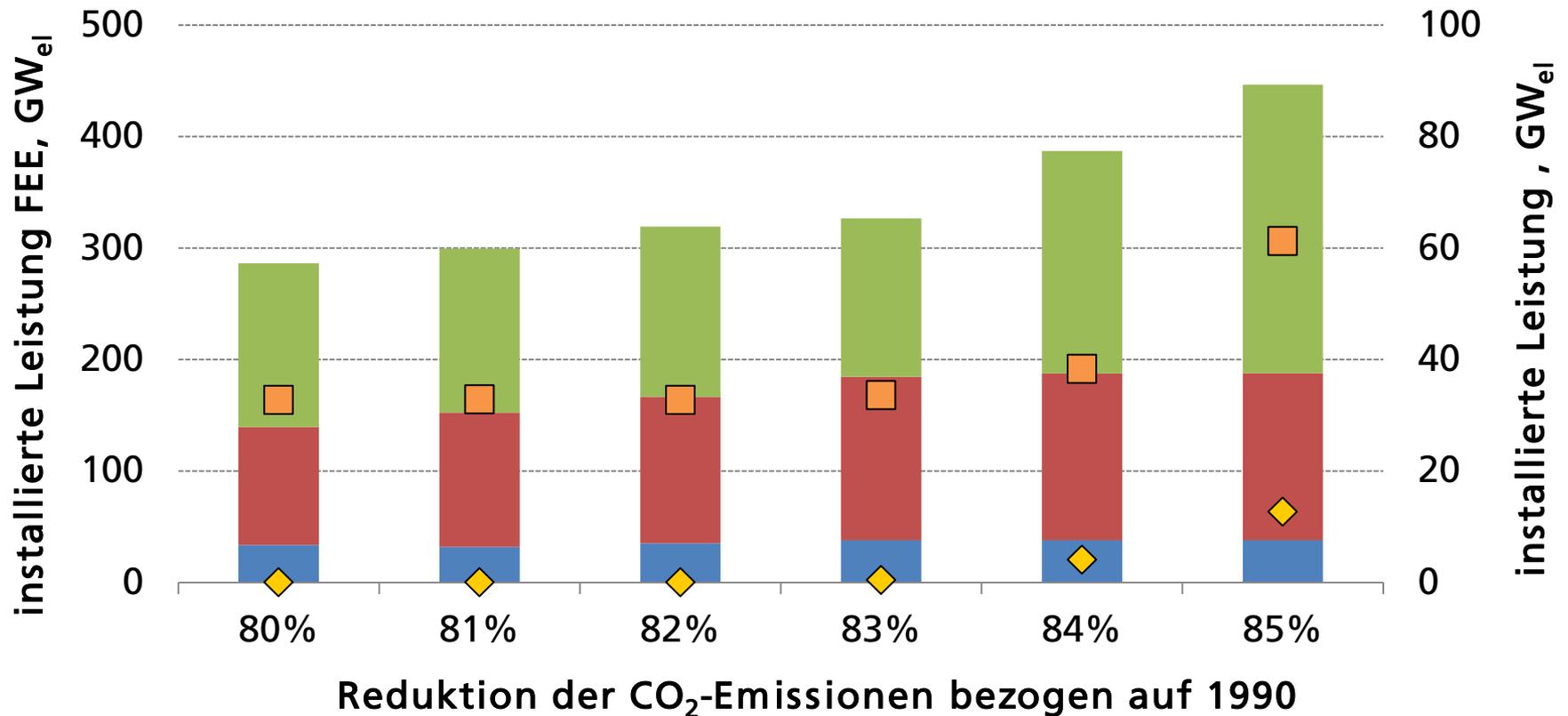


Vollkosten (Mrd. € p.a.)



*Angenommene Verdopplung fossiler Energiepreise bis 2050

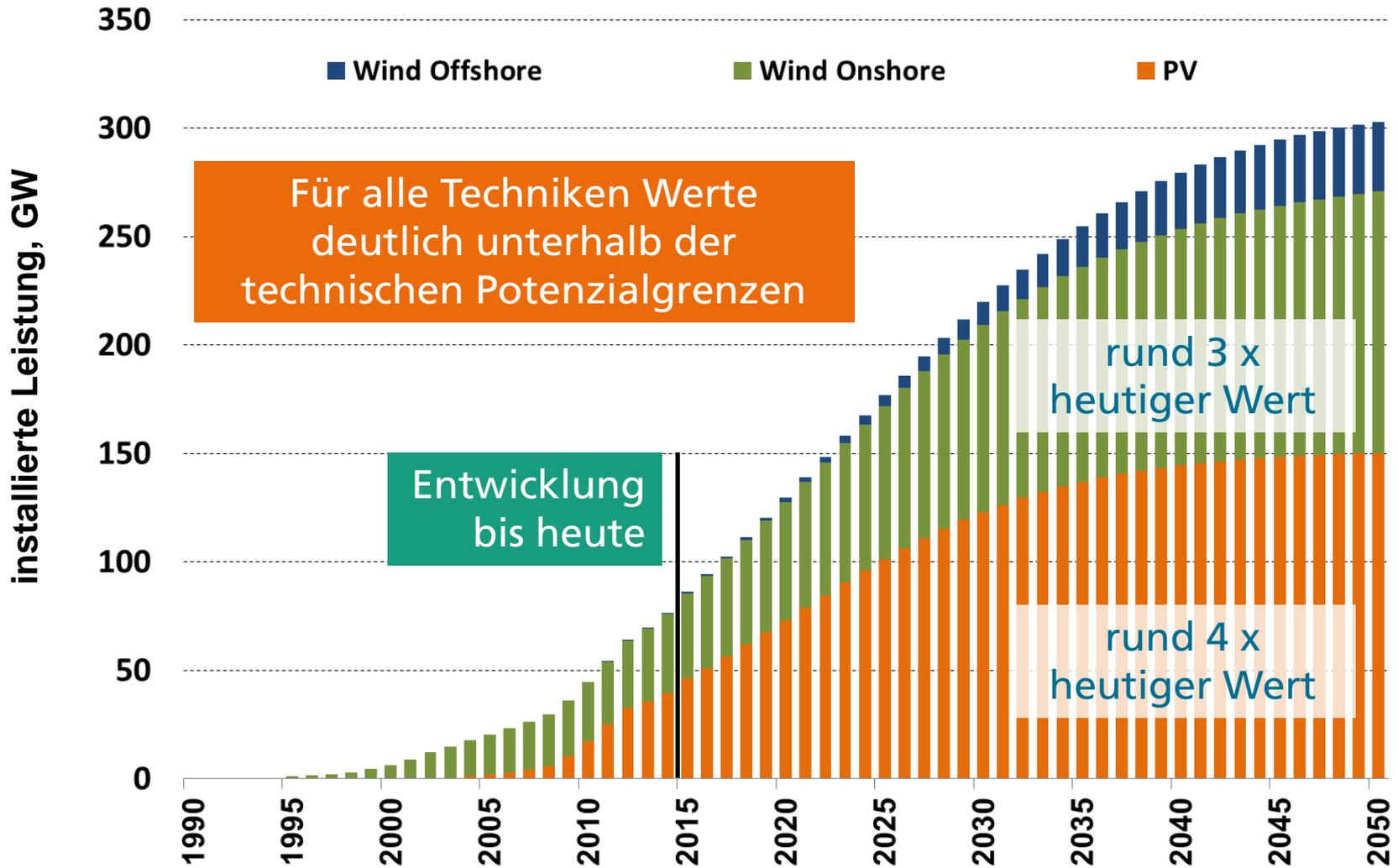
Leistung FEE bei zunehmender CO₂-Reduktion



Inhaltsübersicht

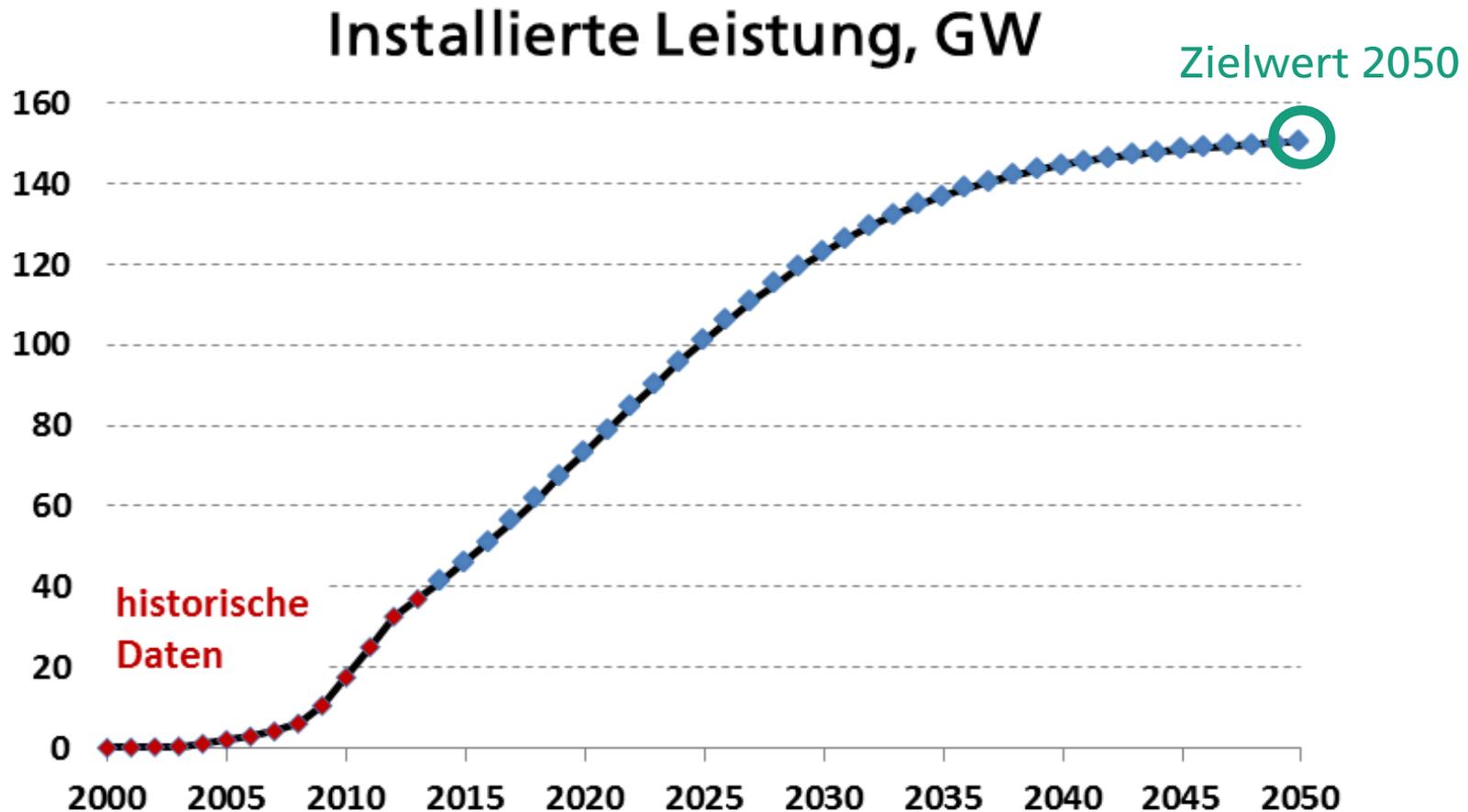
- Einleitung
- **Energiesystem Deutschland auf Basis regenerativer Energien – ein Blick in das Jahr 2050**
 - Methodik
 - Ergebnisse Parameterstudie
 - Ausgewähltes Beispielsystem
 - **Investitionen**
- Zusammenfassung und Ausblick

Ausbau erneuerbare Energien für Strom



Analyse der Investitionen von heute bis 2050

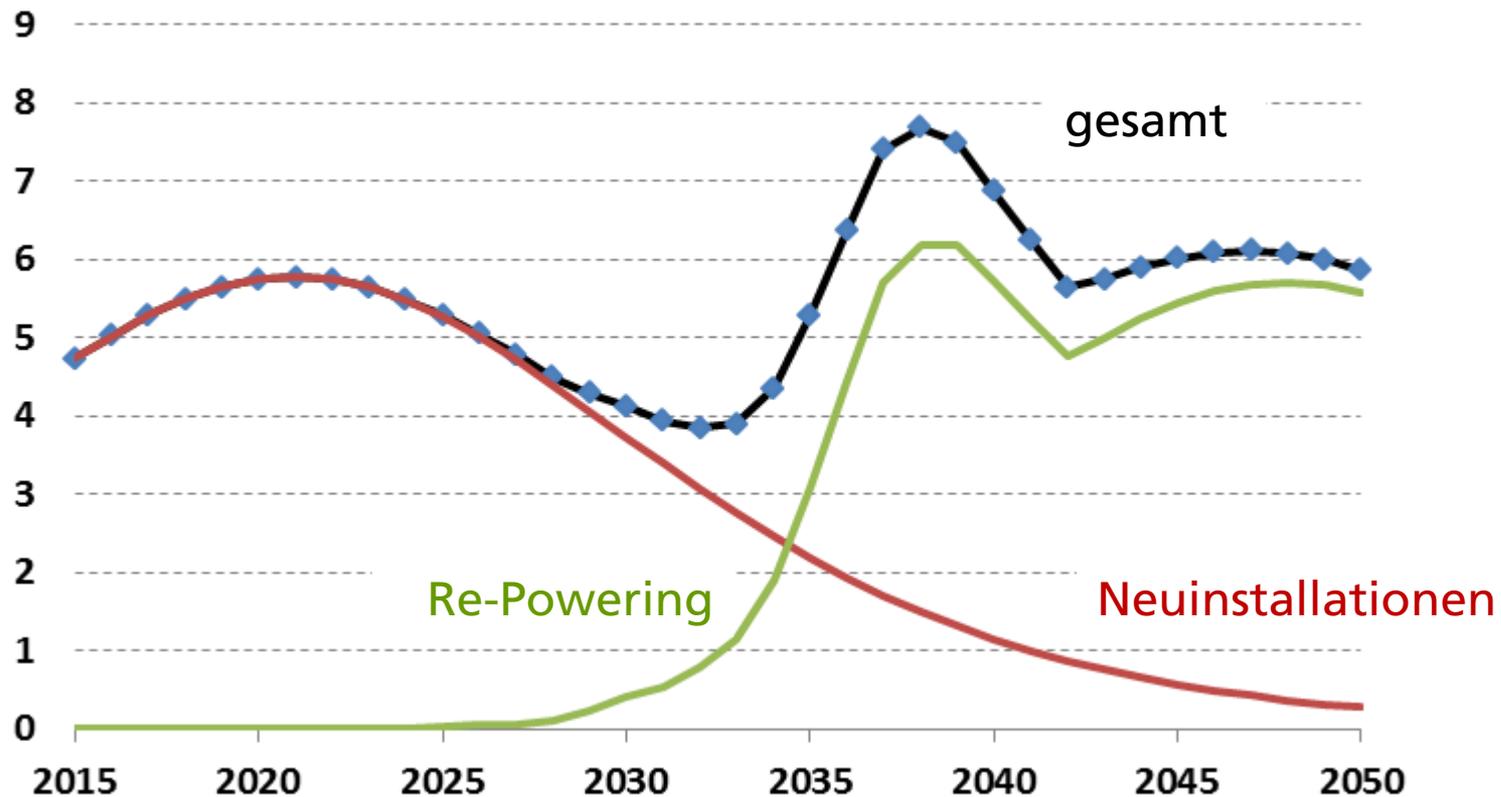
Beispiel Photovoltaik



Analyse der Investitionen von heute bis 2050

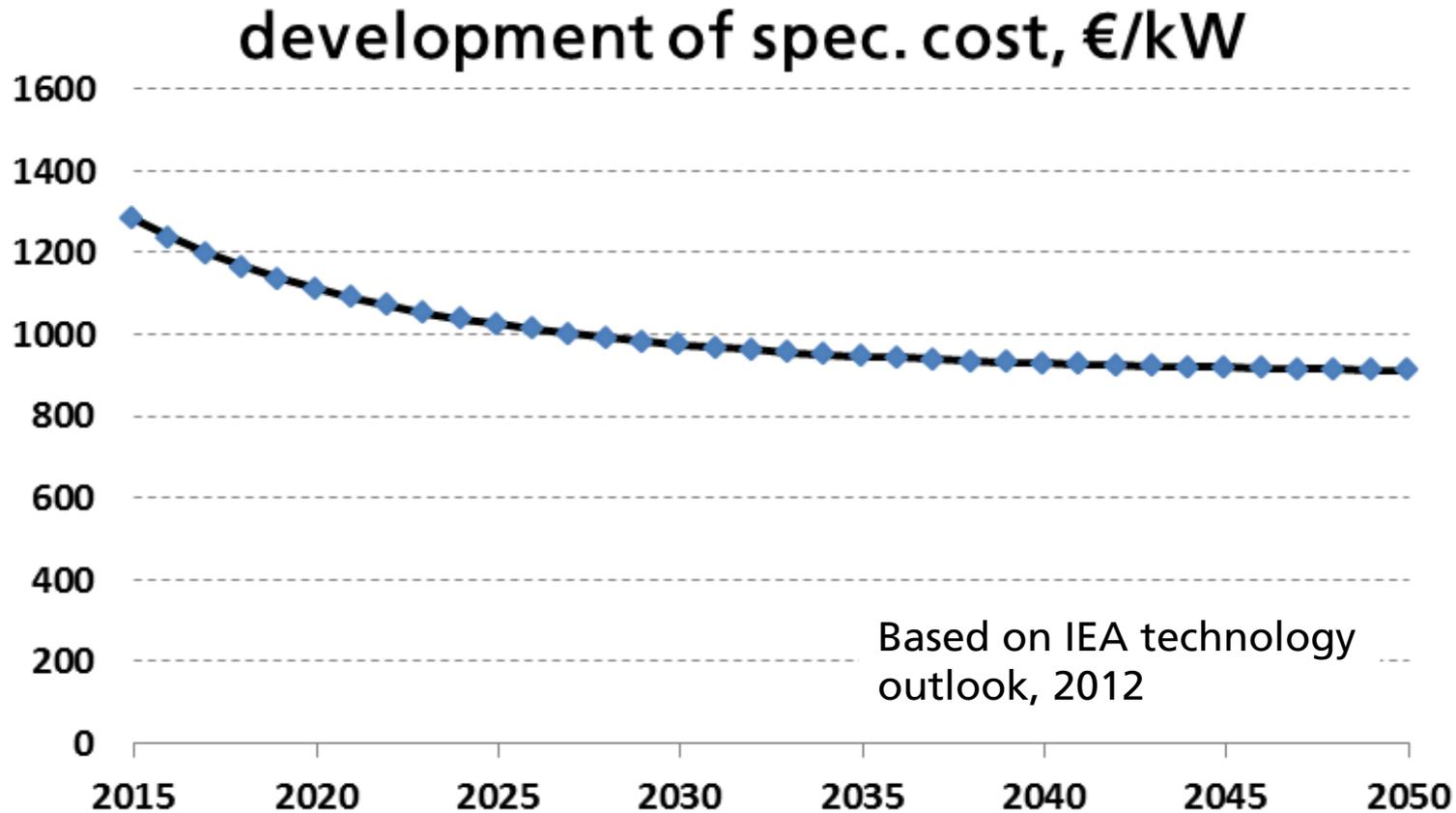
Beispiel Photovoltaik

Neuinstallation und Ersatz, GW/a



Analysis of investments from today until 2050

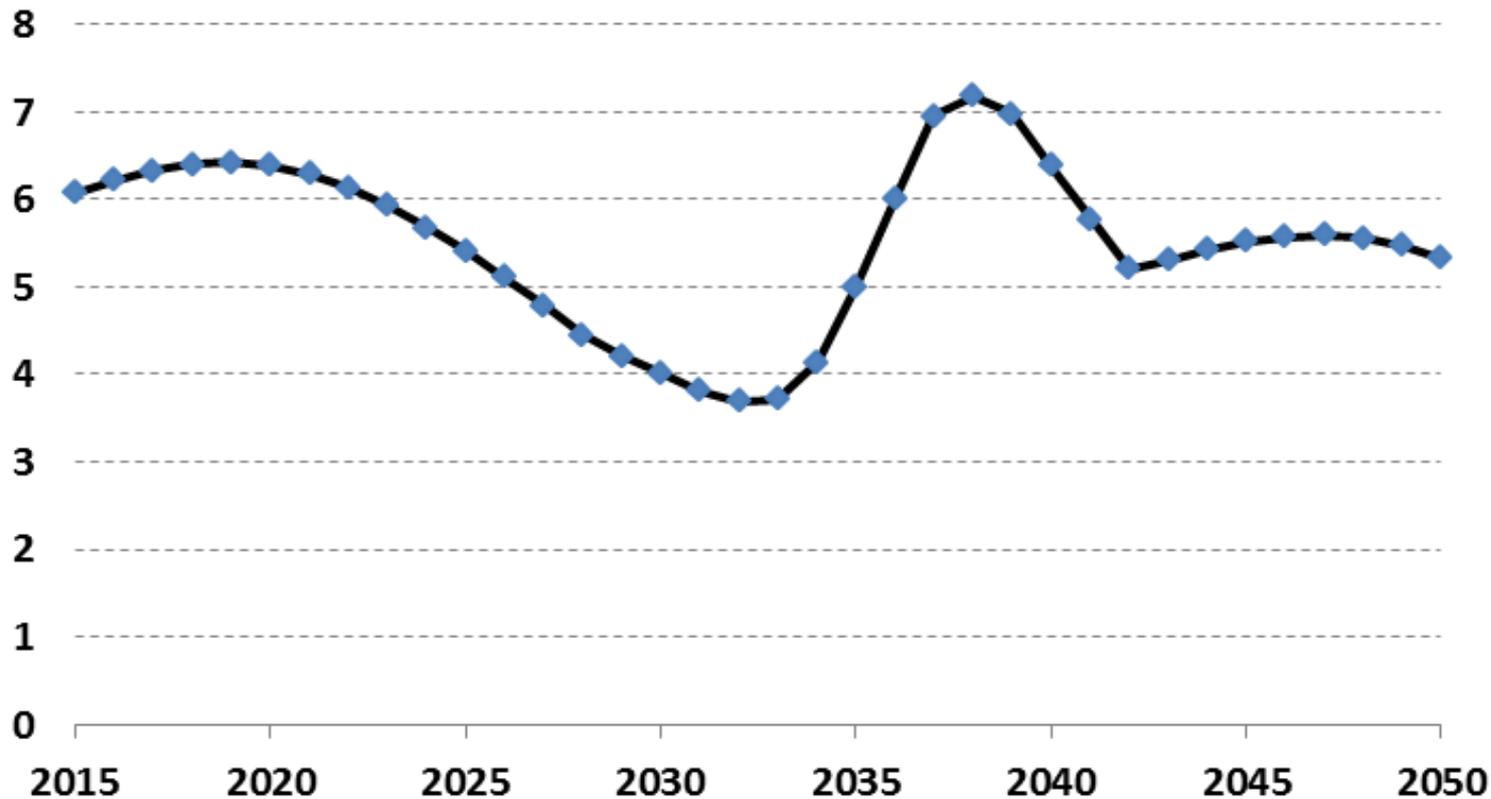
Example photovoltaics



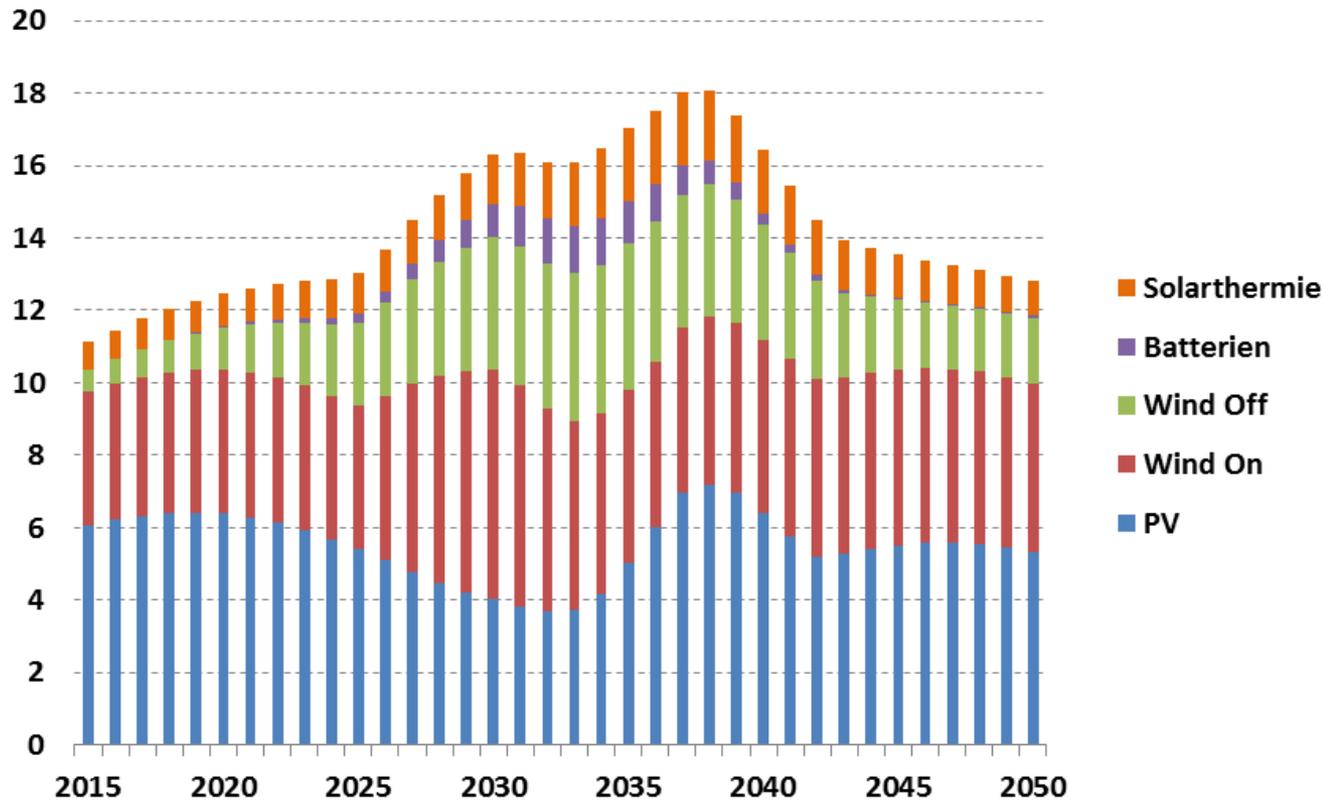
Analyse der Investitionen von heute bis 2050

Beispiel Photovoltaik

Jährliche Investitionen, Mrd. € p.a.



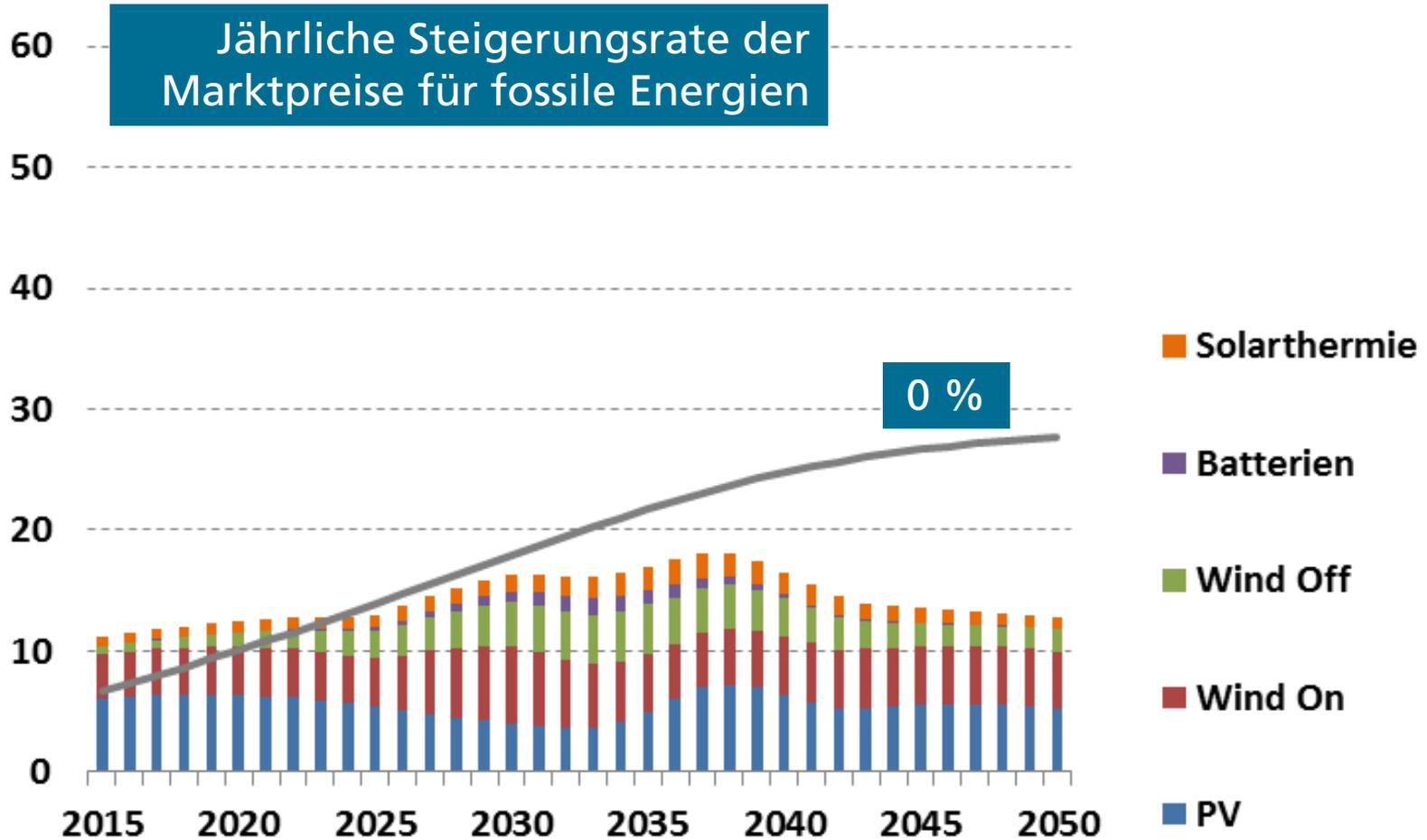
Investitionen für EE (Wind, Solar) & stationäre Batterien Mill € p.a.



Gesamtinvestitionen (ohne Finanzierungskosten, inkl. Re-powering)
von 2015 bis 2050: 515 Mill. €₂₀₁₄

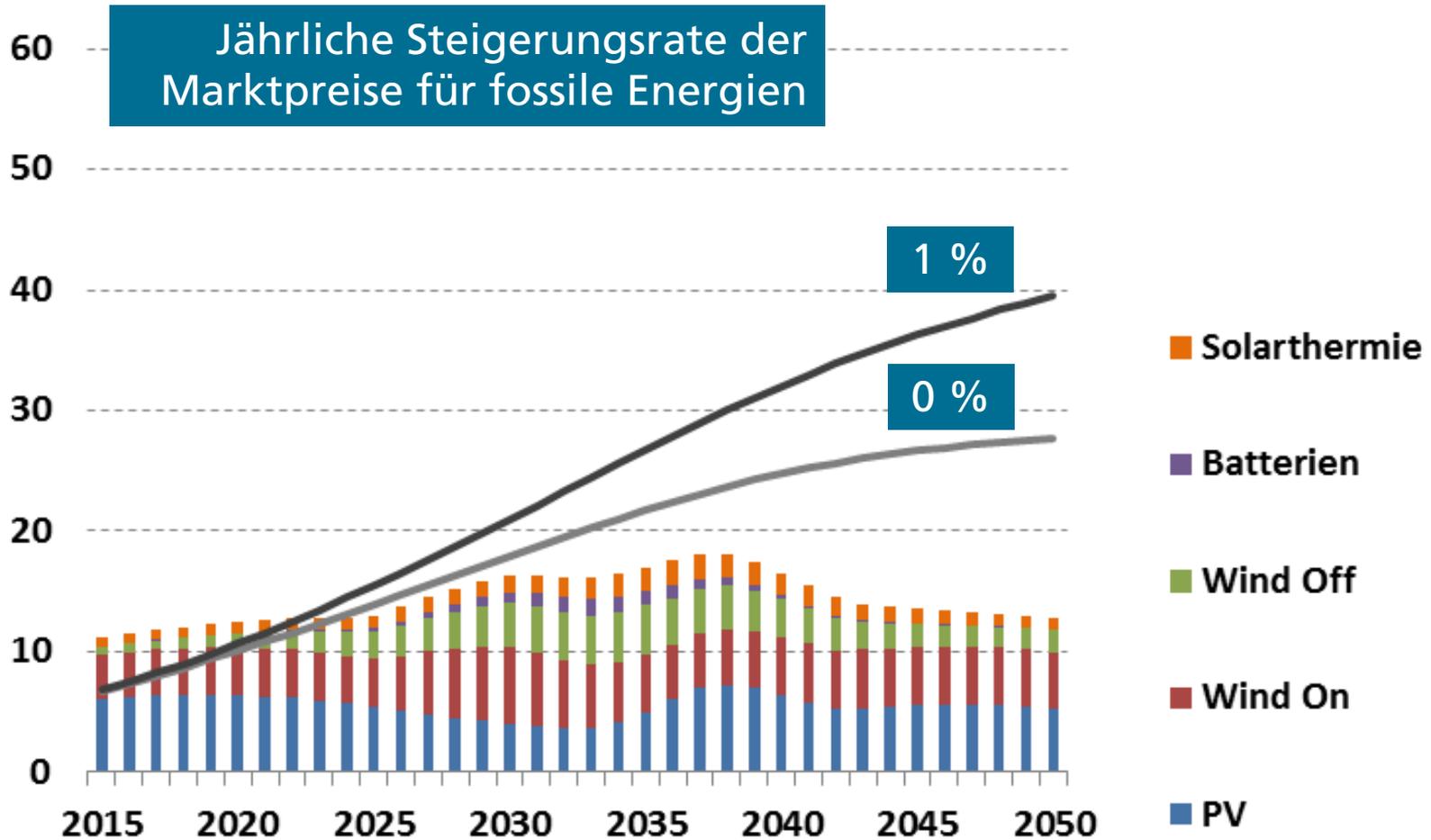
Investitionen vs. eingesparte Energie-Importkosten

Mill. € p.a.



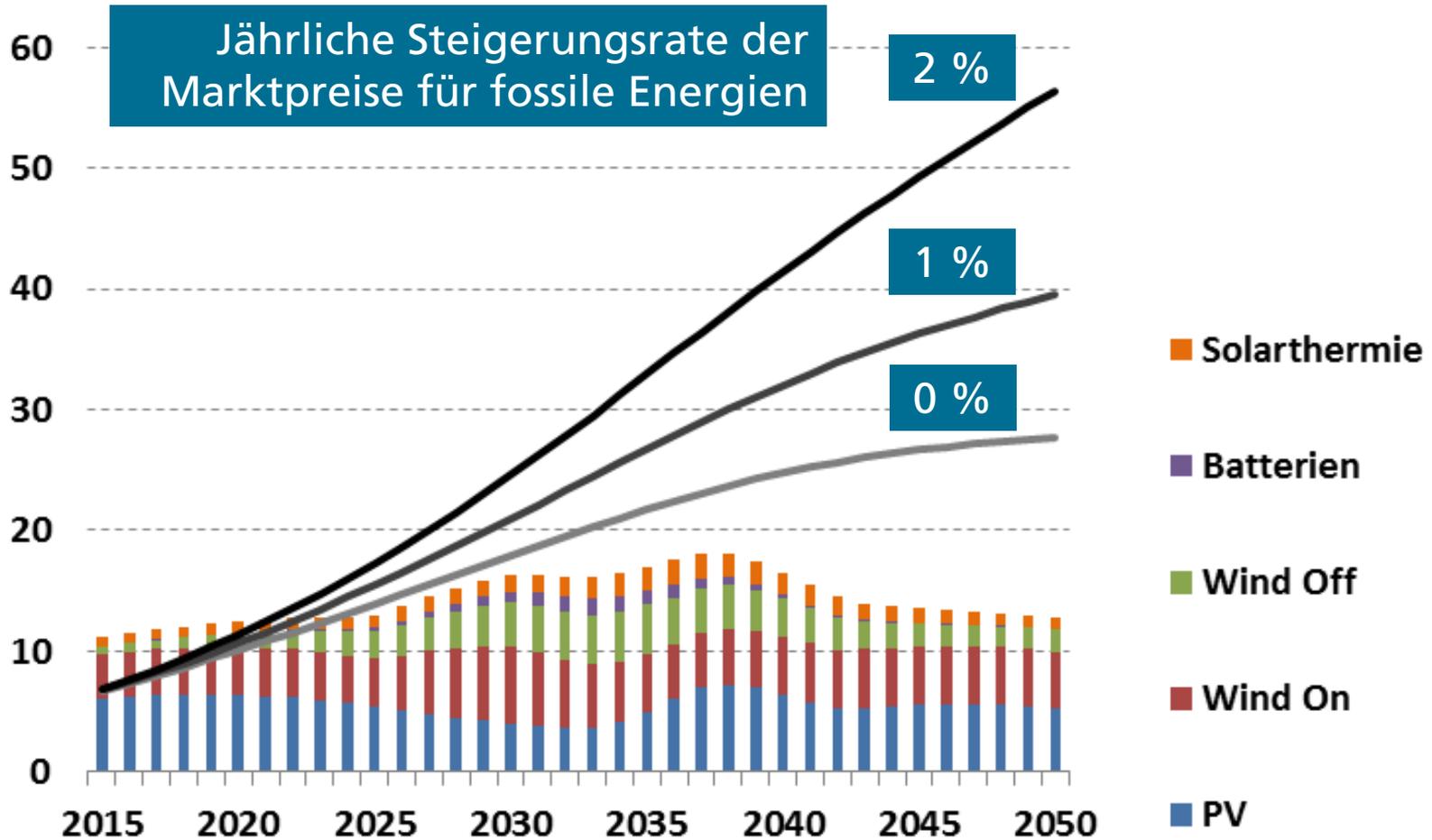
Investitionen vs. eingesparte Energie-Importkosten

Mill. € p.a.



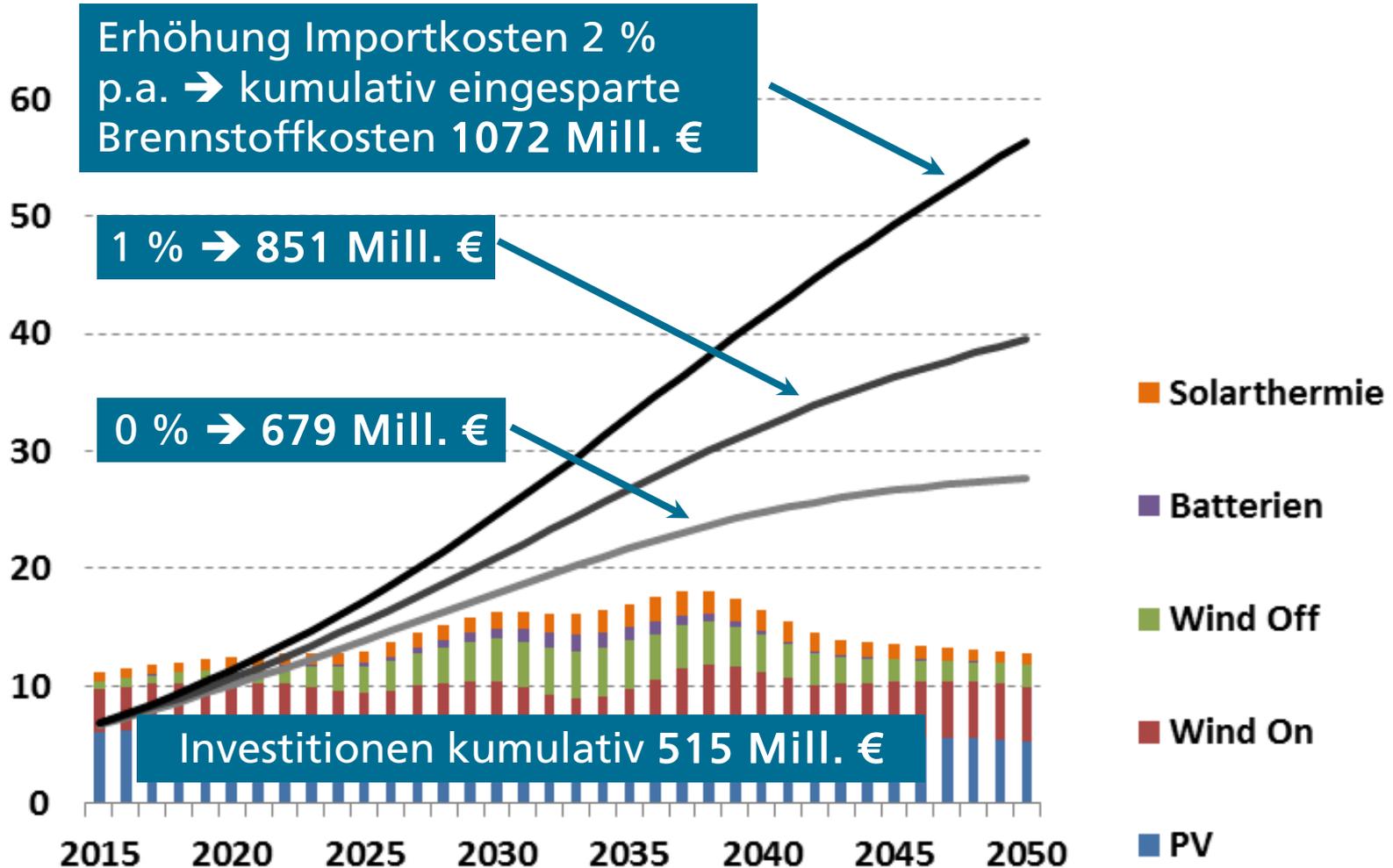
Investitionen vs. eingesparte Energie-Importkosten

Mill. € p.a.

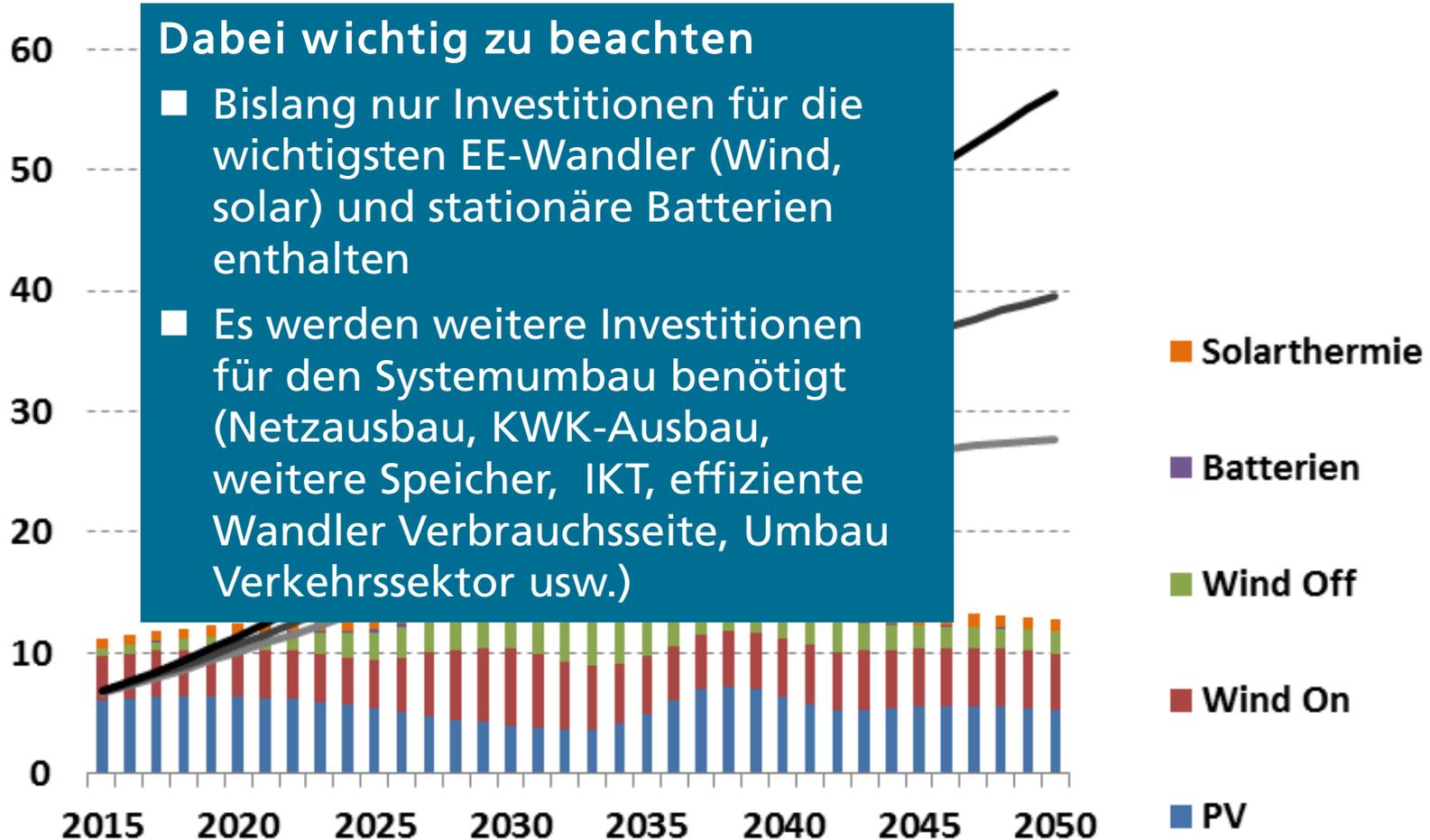


Investitionen vs. eingesparte Energie-Importkosten

Mill. € p.a.

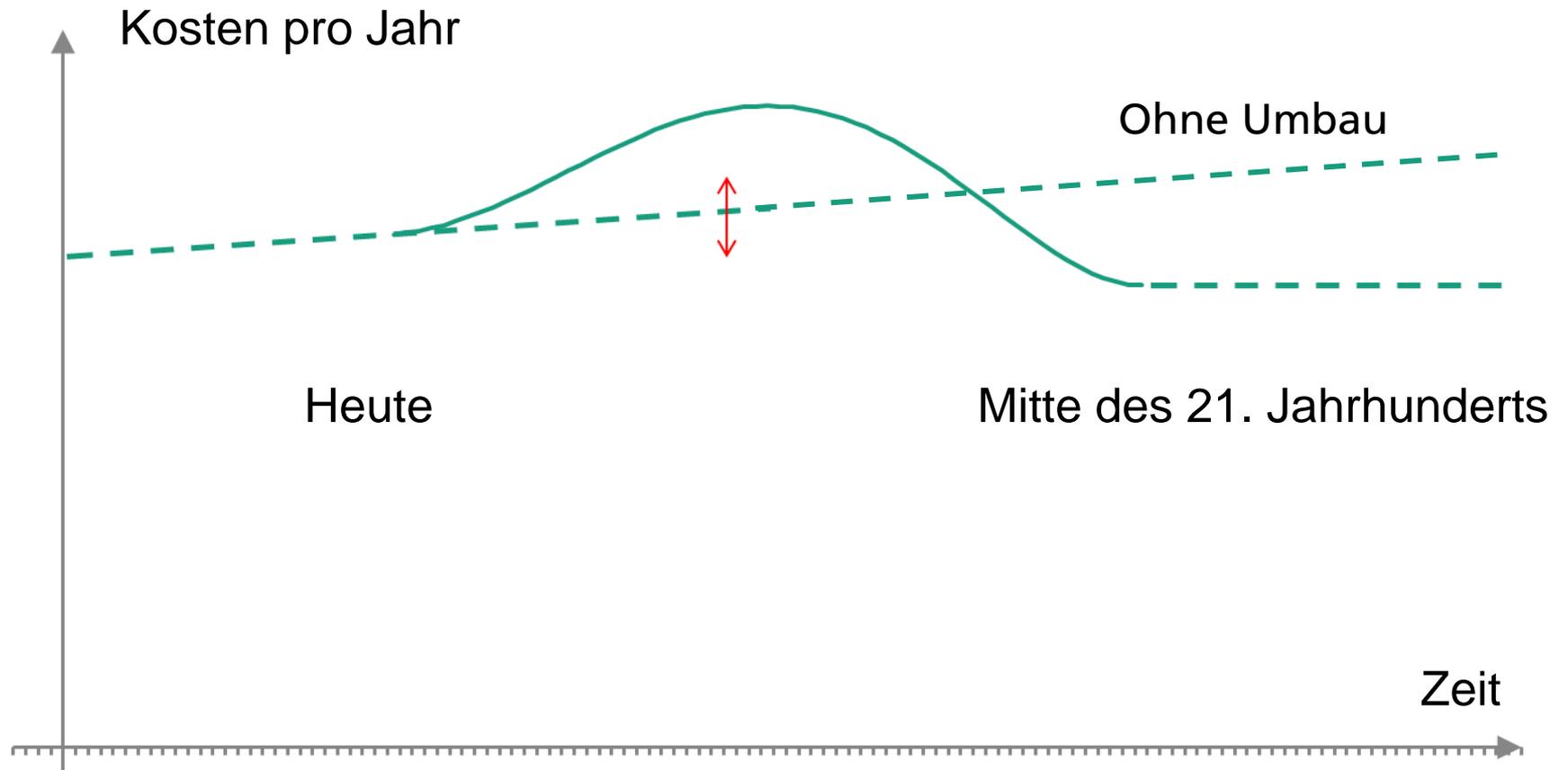


Investitionen vs. eingesparte Brennstoffkosten



Umbau des Energiesystems

Qualitativer Trend jährlicher Gesamtkosten



Inhaltsübersicht

- Einleitung
- Energiesystem Deutschland auf Basis regenerativer Energien – ein Blick in das Jahr 2050
 - Methodik
 - Ergebnisse Parameterstudie
 - Ausgewähltes Beispielsystem
 - Investitionen
- Zusammenfassung und Ausblick

Phasen der Transformation des Energiesystems

Phase 1 „Entwicklung EE“	Phase 2 „Systemintegration“	Phase 3 „Synth. Brennstoffe“	Phase 4 „EE-Import“
CO ₂ -Reduktion ~ 0-20%	CO ₂ -Reduktion ~ 20-60%	CO ₂ -Reduktion ~ 60-80%	CO ₂ -Reduktion ~ 80-100 %
<ul style="list-style-type: none"> ■ Entwicklung Basistechnologien ■ Wesentliche Kostenreduktionen ■ Markteinführung und Ausbau ohne signifikante Implikationen für Gesamtsystem 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Aktivierung von Flexibilitäten bei residualer Stromerzeugung und -nutzung ■ Konvergenz Wärme- und Stromsektor ■ Demand Side Management ■ Kurzzeitspeicher 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Signifikante negative Residullasten ■ Nutzung von EE-Strom zur Erzeugung synthetischer Brenn- und Kraftstoffe ■ Verwendung insbesondere für Mobilität 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Vollständige Verdrängung fossiler Ressourcen in allen Nutzungsbereichen ■ Import von erneuerbaren Energieträgern, z.B. aus sonnenreichen Regionen
<ul style="list-style-type: none"> ■ Kontinuierliche Erhöhung der Effizienz auf der Nutzungsseite <ul style="list-style-type: none"> ➢ baulicher Wärmeschutz Gebäude ➢ Reduktion Stromverbrauch in klassischen Verbrauchsbereichen (z.B. Beleuchtung, Pumpen und Antriebe, ...) ■ Kontinuierlicher Ausbau erneuerbarer Energien (Sonne, Wind, Geothermie) 			

siehe auch: Hans-Martin Henning, Andreas Palzer, Carsten Pape, Frieder Borggreffe, Henning Jachmann und Manfred Fishedick, Phasen der Transformation des Energiesystems. Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Ausgabe 01/02, 2015

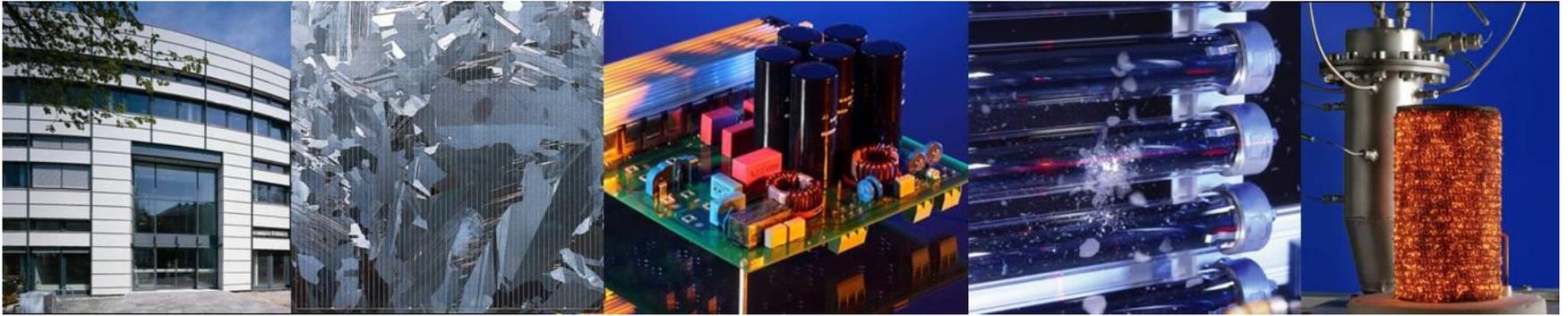
Wesentliche Erkenntnisse

- 80 % CO₂-Absenkung machbar mit Mix aus Verbrauchsreduktion (Strom/ klassische Verbrauchsbereiche, Raumwärme), effizienten Wanklungs-ketten (Strom, Wärme, Verkehr) und erneuerbaren Energien
- Eher niedrigere (Voll-) Kosten als für heutige Versorgung bei deutlich geringeren nicht internalisierten Kosten
- Ca. Faktor 3 bei Wind Onshore und Faktor 4 bei PV
- Energetische Sanierung Gebäude wichtig, aber nicht auf Passivhausniveau
- Städtische KWK hat wichtige Rolle; Wärmenetze nützlich für Energie-management; Wärmepumpen wichtigste Heizungstechnik Einzelgebäude
- Sektor-übergreifende Systemintegration und Nutzung von Flexibilitäten essentiell; Wärmesektor bietet naheliegendste Optionen
- Synthetische Energieträger aus EE-Strom mittel- und langfristig notwendig, Nutzung am sinnvollsten im Verkehrssektor

Wesentliche Erkenntnisse und Ausblick

- Investitionen übersteigen vermiedene Brennstoffkosten im Wesentlichen in den nächsten 15-25 Jahren
- Bei CO₂-Emissionsminderungen > 80 % Import von EE sinnvoll
- Wesentliche Modell-Erweiterungen und Anwendungen
 - Gebäudetypologie (abgeschlossen)
 - Detaillierung Brennstoffe, Brennstoffwandlungsketten, Antriebskonzepte Verkehr (abgeschlossen)
 - Anwendung auf andere Länder/Regionen (laufend)
 - Optimierung Transformationspfad (in Bearbeitung)

...vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



Fraunhofer-Institut für Solare Energiesystems ISE

Hans-Martin Henning, Andreas Palzer
www.ise.fraunhofer.de
hans-martin.henning@ise.fraunhofer.de
andreas.palzer@ise.fraunhofer.de