
Erneuerbare Energien im Strommarkt – wie geht es mit ihrem Ausbau vor dem Hintergrund der Sektorenkopplung weiter?



Hans-Martin Henning

Fraunhofer-Institut für Solare
Energiesysteme ISE, Freiburg

IK Stromerzeugung –
6. Kraftwerkskonferenz

23. November 2017

Becker / Büttner / Held
Berlin

Fraunhofer ISE

Geschäftsfelder

Rund 1100 Beschäftigte
Betriebshaushalt rund 80 Mio €

Energietechnologien und -systeme Hans-Martin Henning

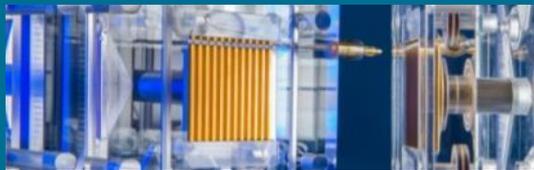
Solarthermie



Gebäude-
energie-
technik



Wasserstoff-
technologien



Energie-
system-
technik

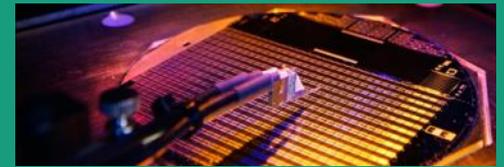


Photovoltaik Andreas Bett

Silicium-
Photovoltaik



III-V- und
Konzentrator-
Photovoltaik



Neuartige
Photovoltaik-
Technologien



Photovoltaische
Module und
Kraftwerke



Inhalt

Einleitung

Optimierung von Transformationspfaden - Methodologie

Ergebnisse ausgewählter Szenarien

Die nächste Phase der Energiewende

Zusammenfassung

Inhalt

Einleitung

Optimierung von Transformationspfaden - Methodologie

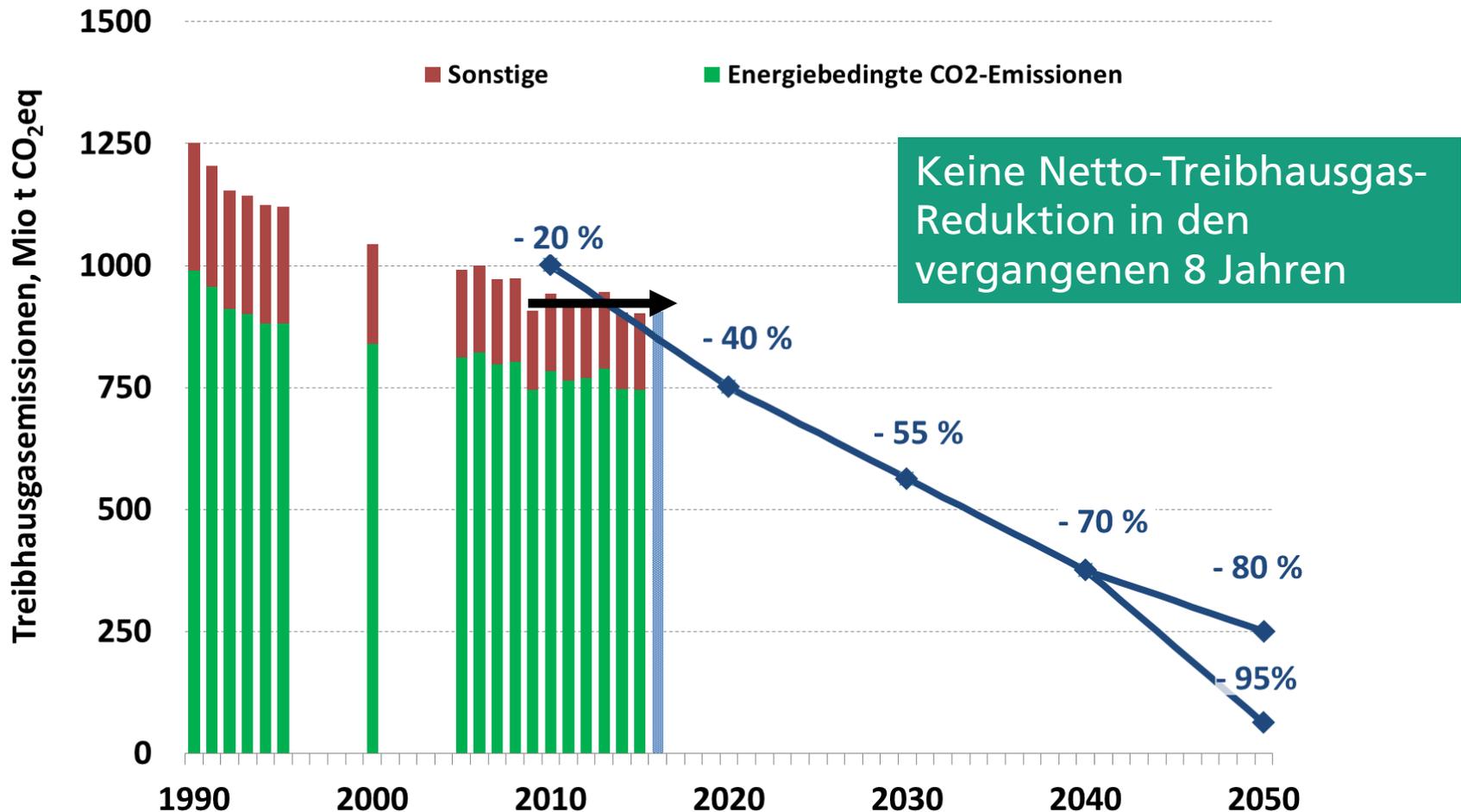
Ergebnisse ausgewählter Szenarien

Die nächste Phase der Energiewende

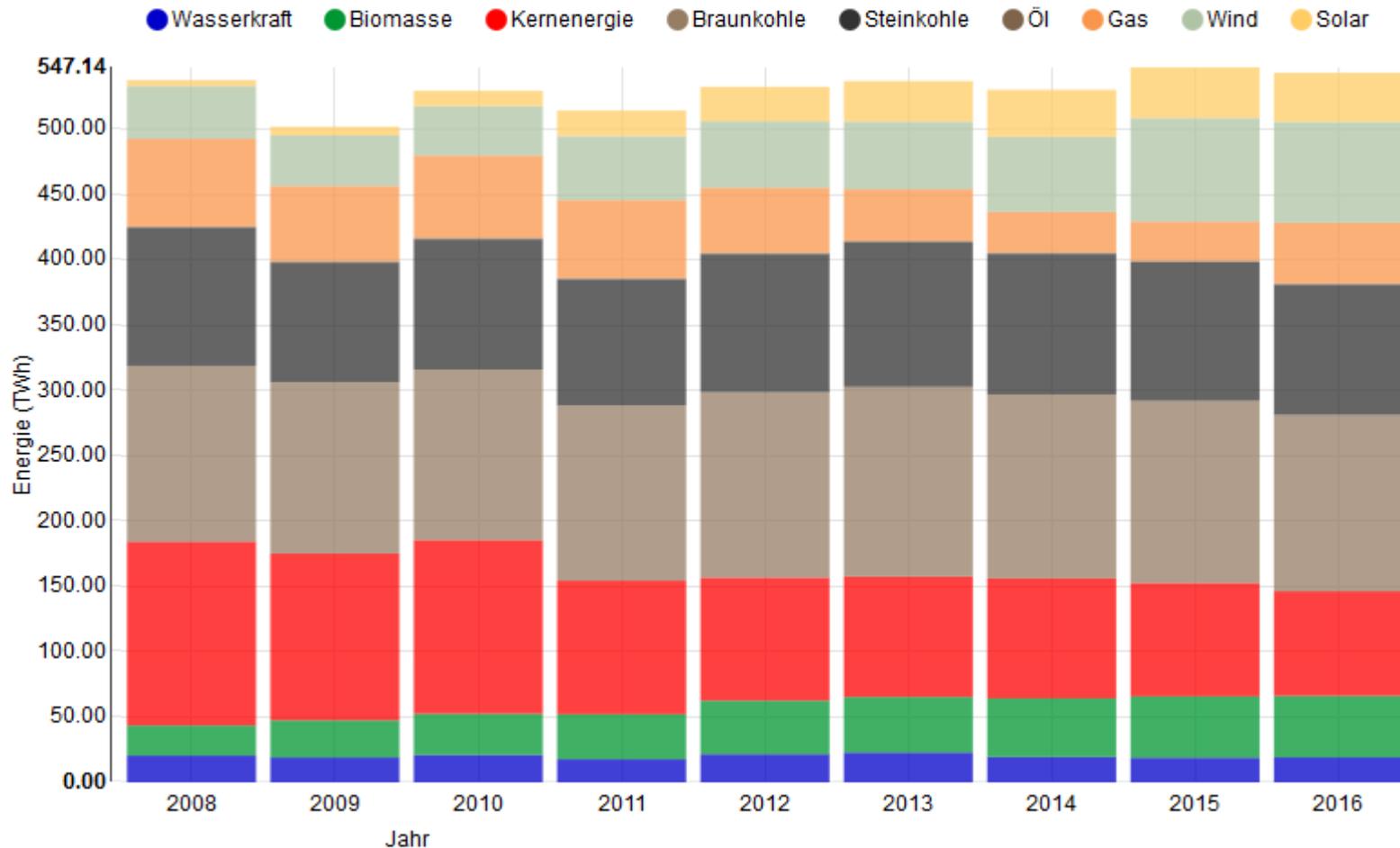
Zusammenfassung

Treibhausgasemissionen Deutschland

Historie und Ziele

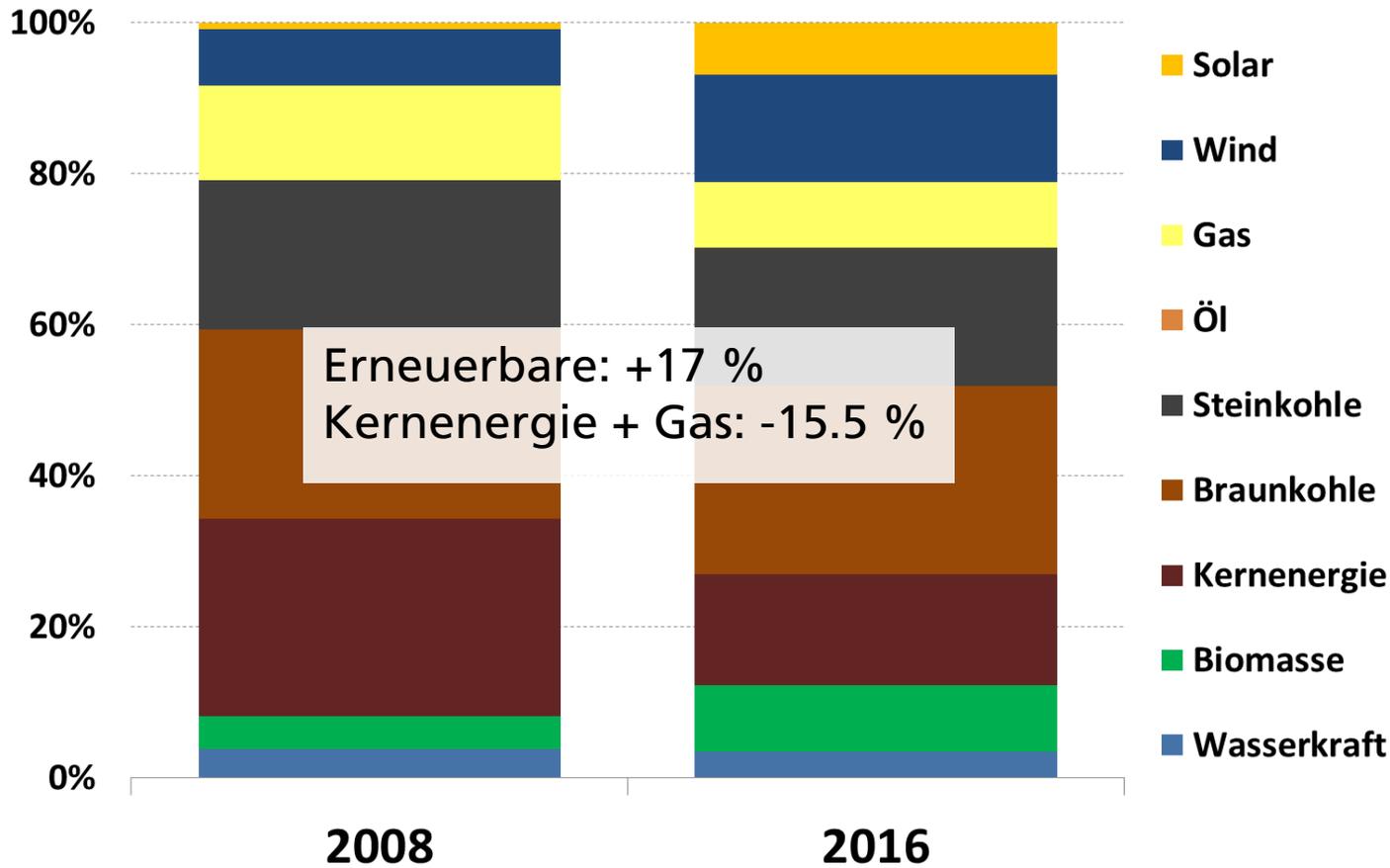


Stromerzeugung in den vergangenen neun Jahren



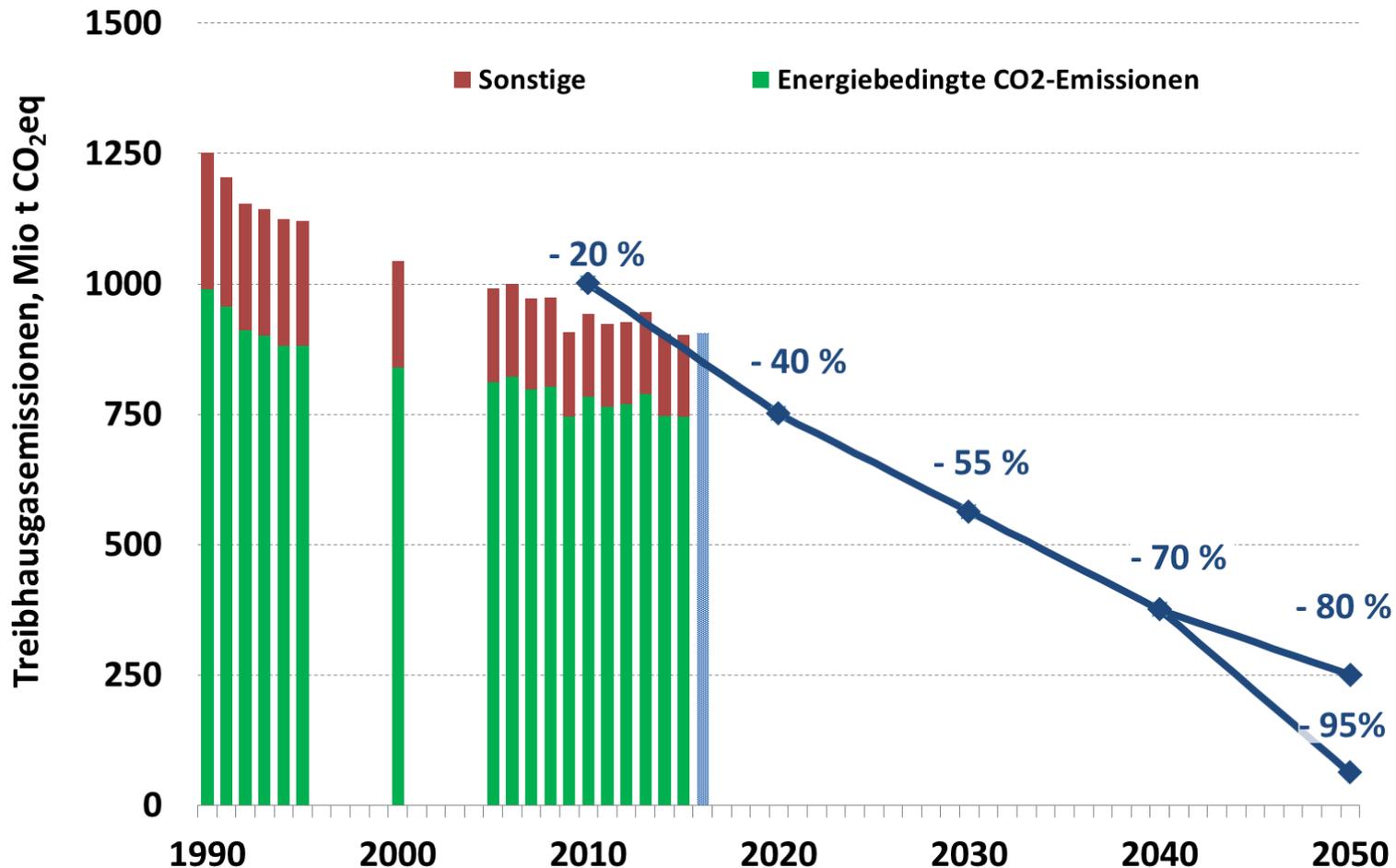
Stromerzeugung 2008 vs. 2016

Verteilung



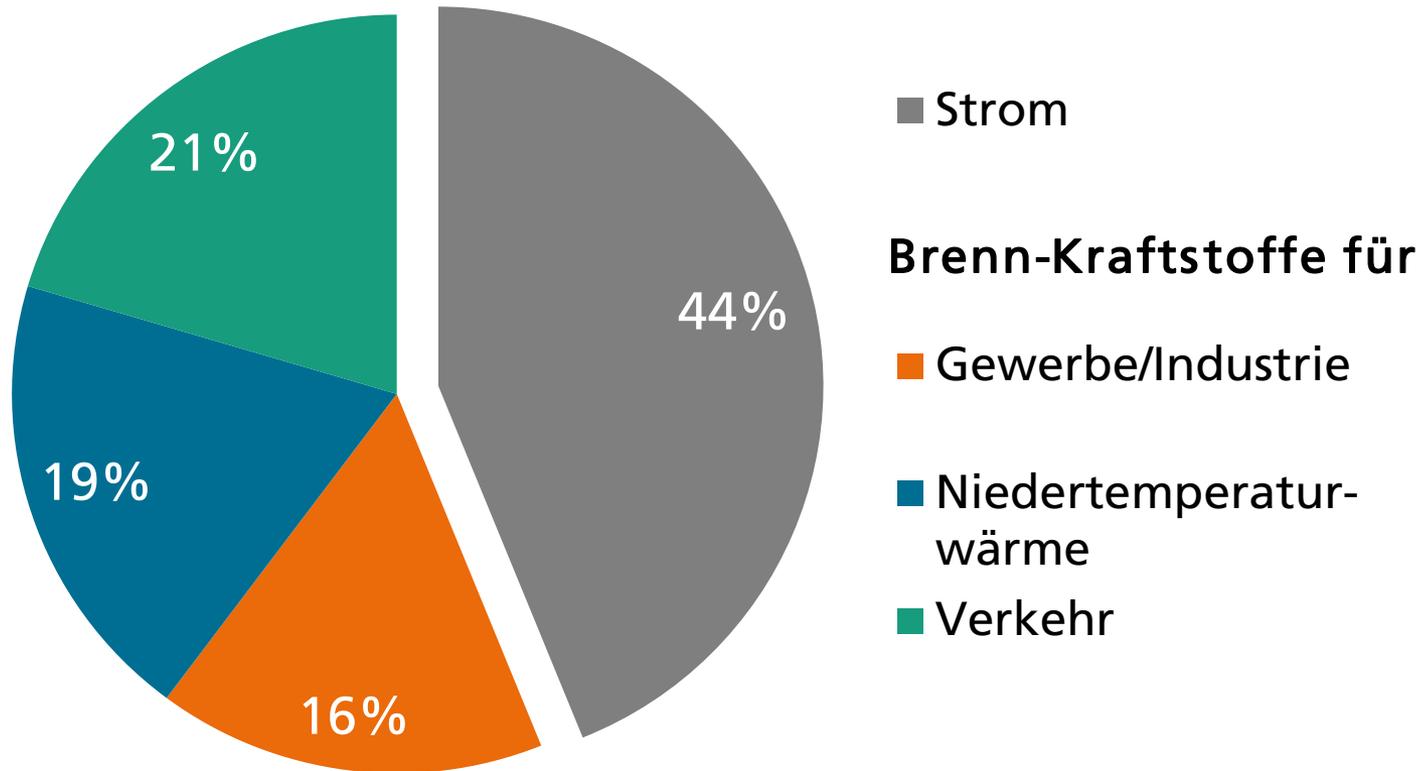
Treibhausgasemissionen Deutschland

Historie und Ziele



Energiebedingte CO₂-Emissionen – Deutschland

Aufteilung Sektoren



Inhalt

Einleitung

Optimierung von Transformationspfaden - Methodologie

Ergebnisse ausgewählter Szenarien

Die nächste Phase der Energiewende

Zusammenfassung

Leitfrage

Was ist der kostenoptimale Pfad

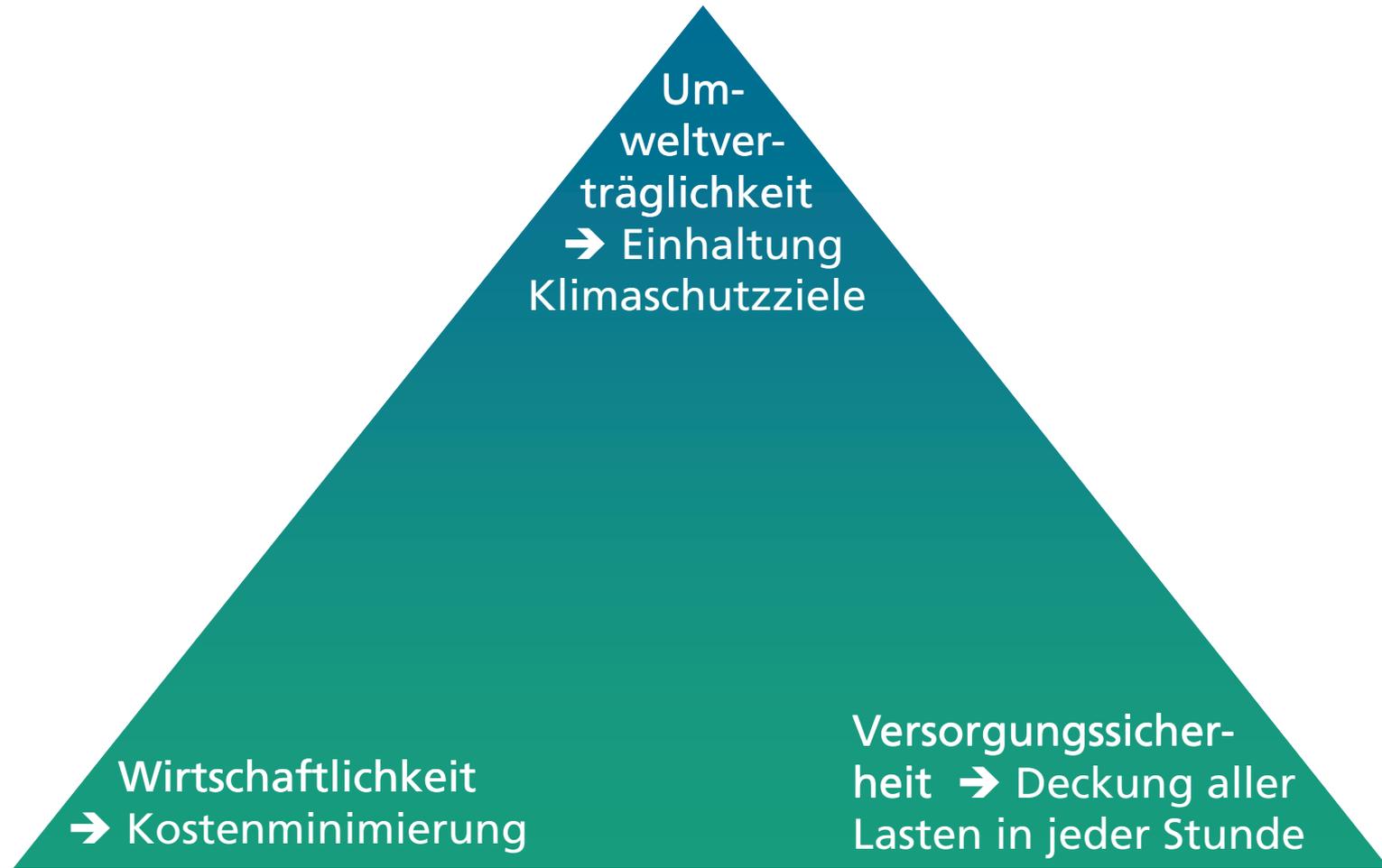
- zur Transformation von Energiesystemen
- unter Einbeziehung aller Energieträger
- unter Einbeziehung aller Verbrauchssektoren
- unter Einhaltung der gesetzten Klimaschutzziele
- sowohl im Zieljahr 2050 als auch auf dem Weg dorthin?



Randbedingung für Deutschland

- Kernenergieausstieg bis 2022

Energiepolitisches Zieldreieck



Regenerative Energien Modell »REMod«

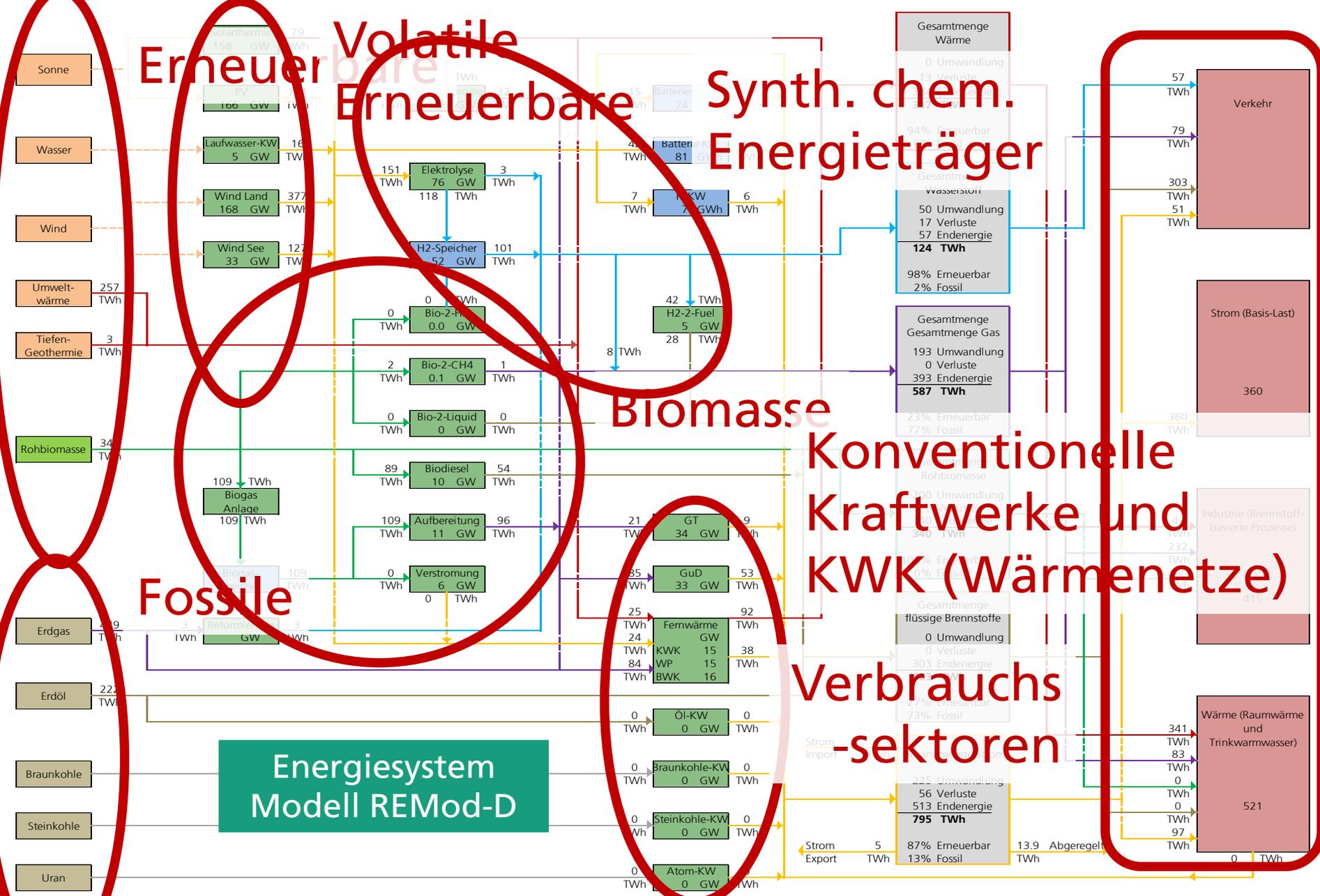
Modell zur Simulation und Optimierung der Entwicklung nationaler Energiesysteme

Einbeziehung aller Verbrauchssektoren und Energieträger

Minimierung der Transformationskosten

Stundengenaue Modellierung

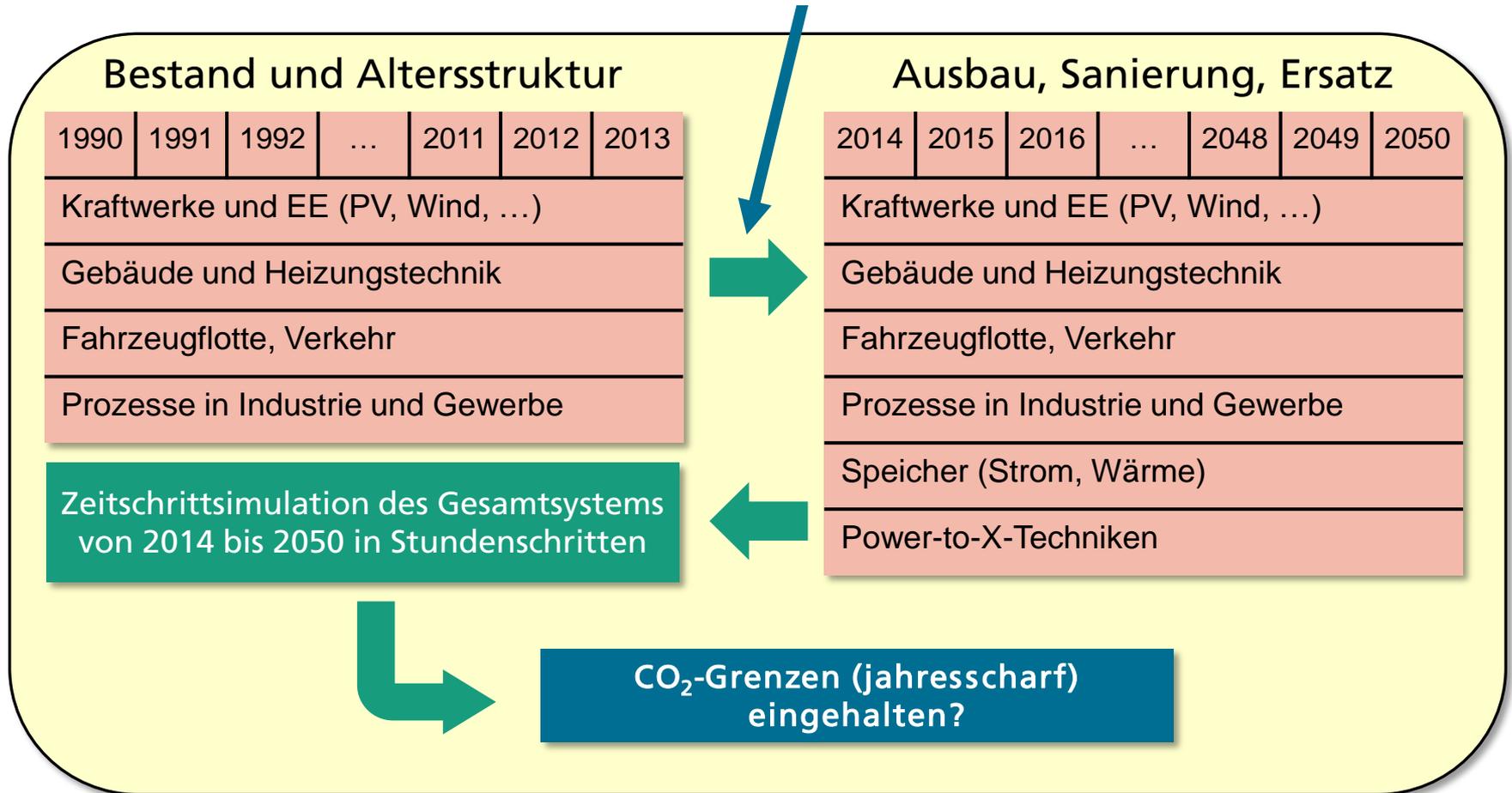




Regenerativ-energiequellen	Nachwachsende Rohstoffe	Fossile Primär-energeträger	Energiewandler	Speicher	Verbrauchs-sektor	Wasserstoff Wärme Gas	Rohbiomasse Flüssige Brennstoffe Strom	CO2-Emission 1990 (Bezugsjahr)	990	Mio t CO ₂
								CO2-Emission 2050	146	Mio t CO ₂
								CO2-Reduktion bezogen auf 1990 um:	85%	

Methodisches Vorgehen

Optimierung von Ausbau, Sanierung, Ersatz
Zielfunktion: minimale kumulative Gesamtkosten 2014-2050



Was kann ein derartiges Modell ...

...nicht beantworten?

- So wird's kommen
- Wie sehen Geschäftsmodelle für Marktteilnehmer aus
- Wie funktioniert Preisbildung

...beantworten?

- Wie kann aus systemtechnischer Perspektive – basierend auf bestem Wissen über heute grundsätzlich verfügbare Technologien und deren Kosten- und Performanceprojektion – die Entwicklung von Gesamtsystemen aussehen?
- Welche systemischen Gesamtkosten sind damit verknüpft?

Inhalt

Einleitung

Optimierung von Transformationspfaden - Methodologie

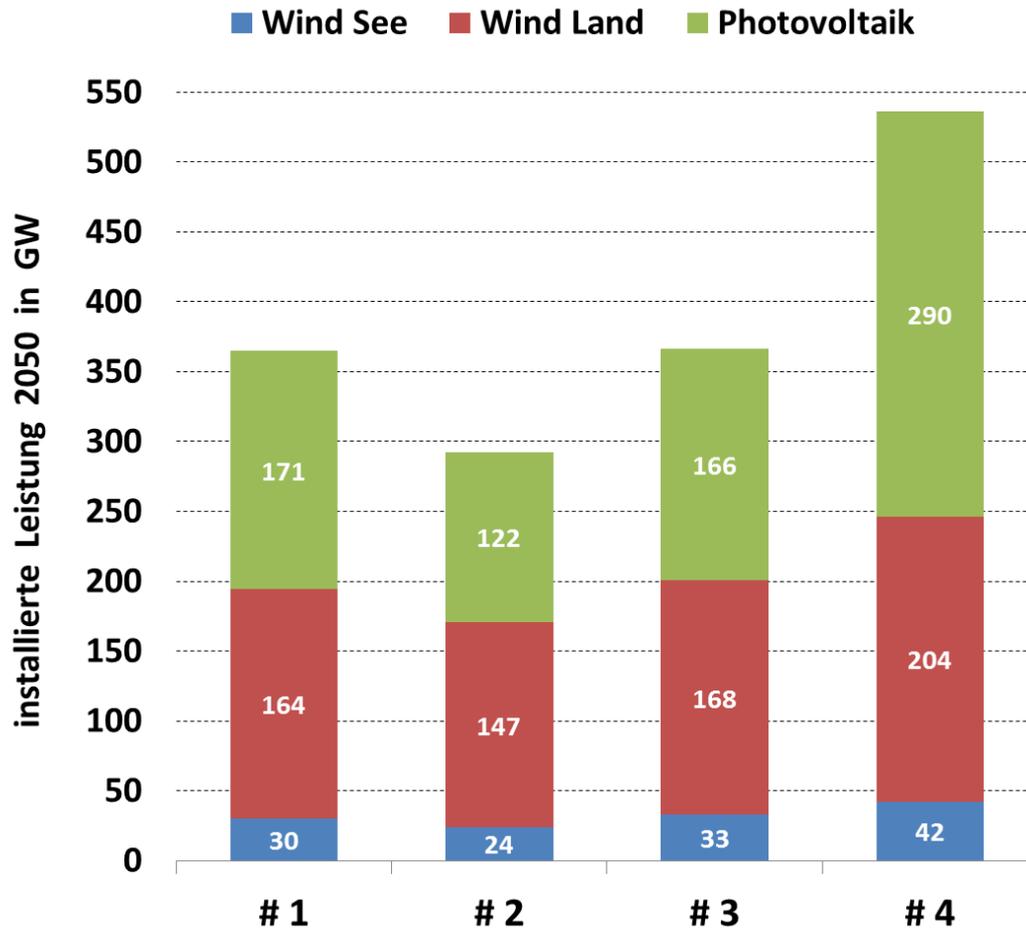
Ergebnisse ausgewählter Szenarien

Die nächste Phase der Energiewende

Zusammenfassung

Szenarienergebnisse

Fluktuierende erneuerbare Energien im Jahr 2050



#1 -80 % CO₂, Ausstieg Kohle nicht beschleunigt

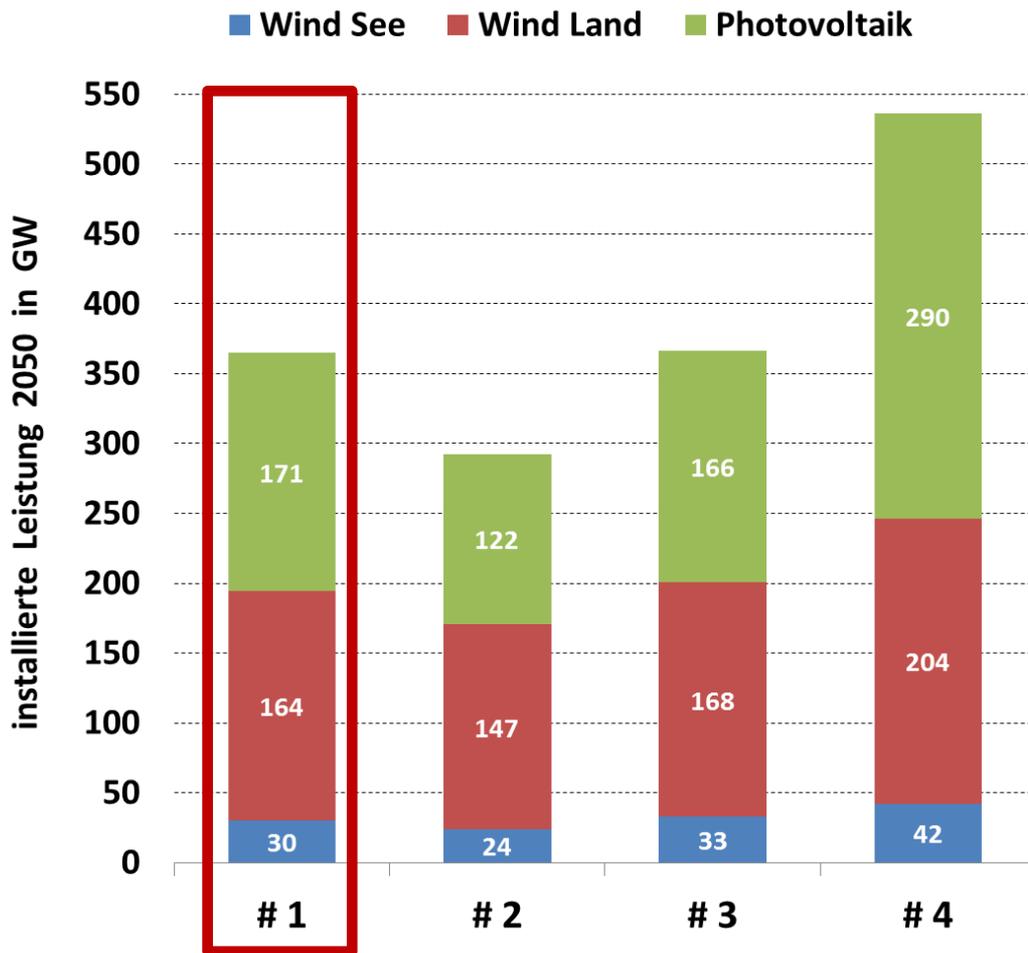
#2 -80 % CO₂, Ausstieg Kohle beschleunigt

#3 -85 % CO₂, Ausstieg Kohle beschleunigt

#4 -90 % CO₂, Ausstieg Kohle beschleunigt

Szenarienergebnisse

Fluktuierende erneuerbare Energien im Jahr 2050



#1 -80 % CO₂, Ausstieg Kohle nicht beschleunigt

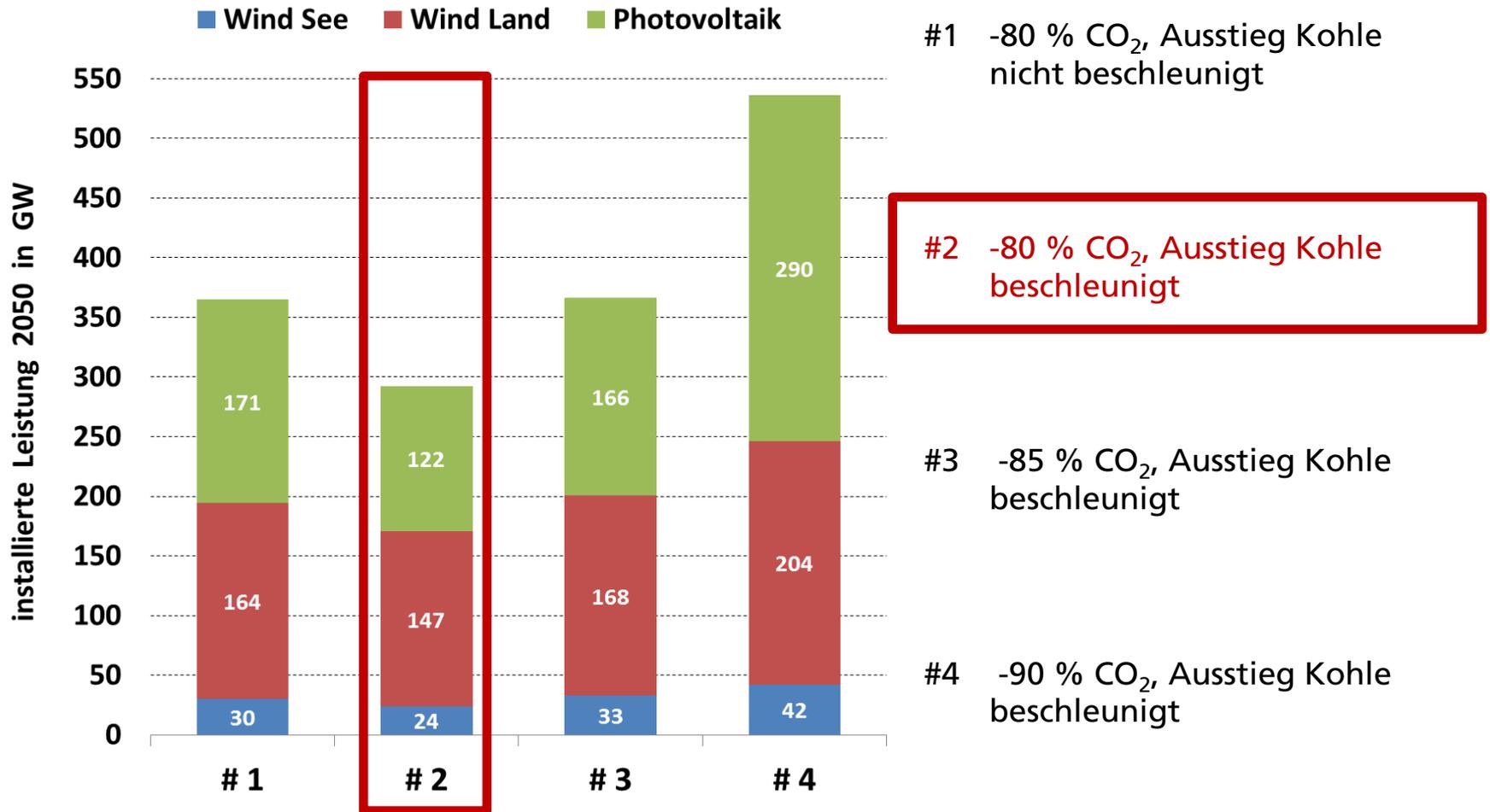
#2 -80 % CO₂, Ausstieg Kohle beschleunigt

#3 -85 % CO₂, Ausstieg Kohle beschleunigt

#4 -90 % CO₂, Ausstieg Kohle beschleunigt

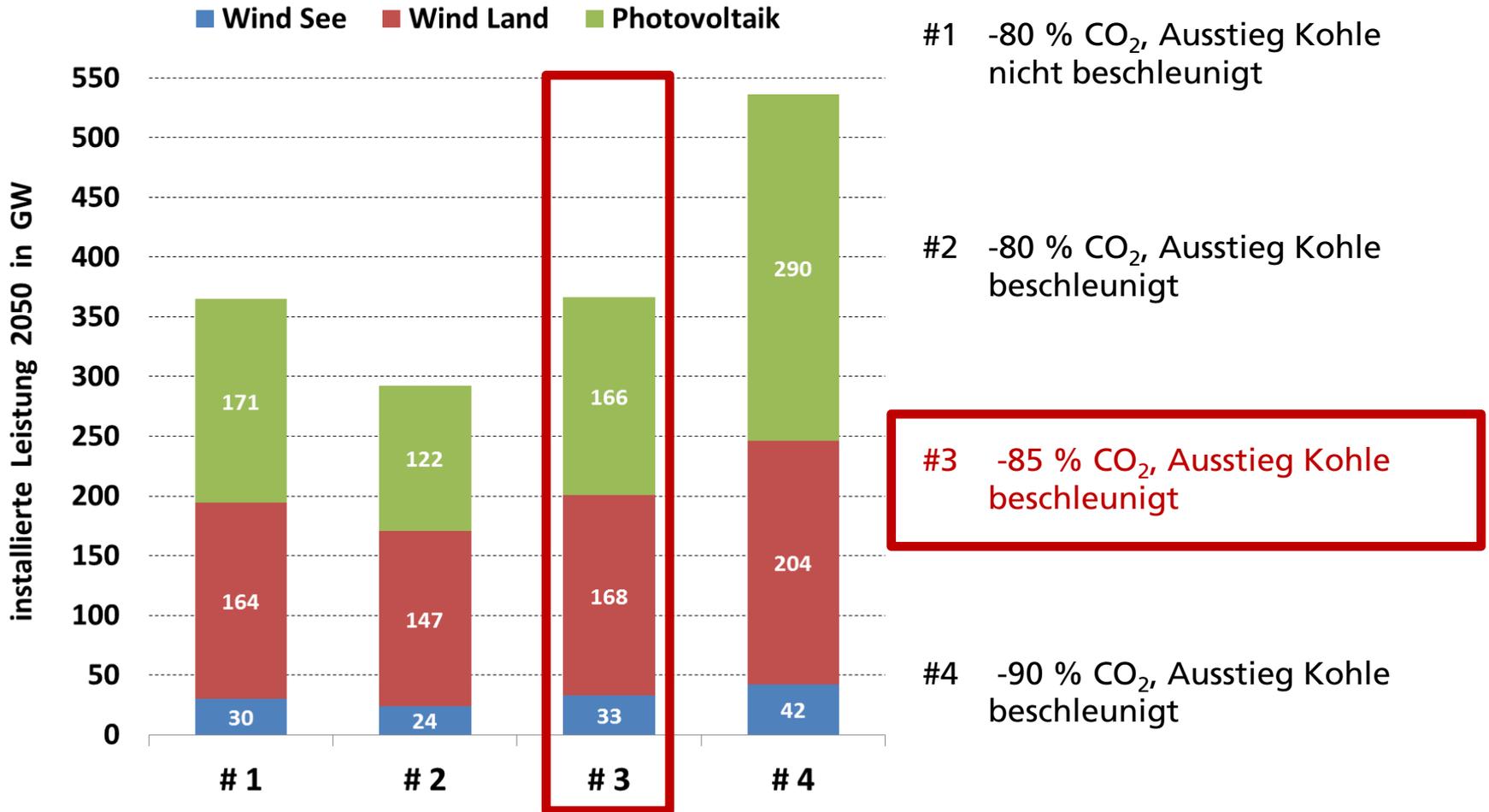
Szenarienergebnisse

Fluktuierende erneuerbare Energien im Jahr 2050



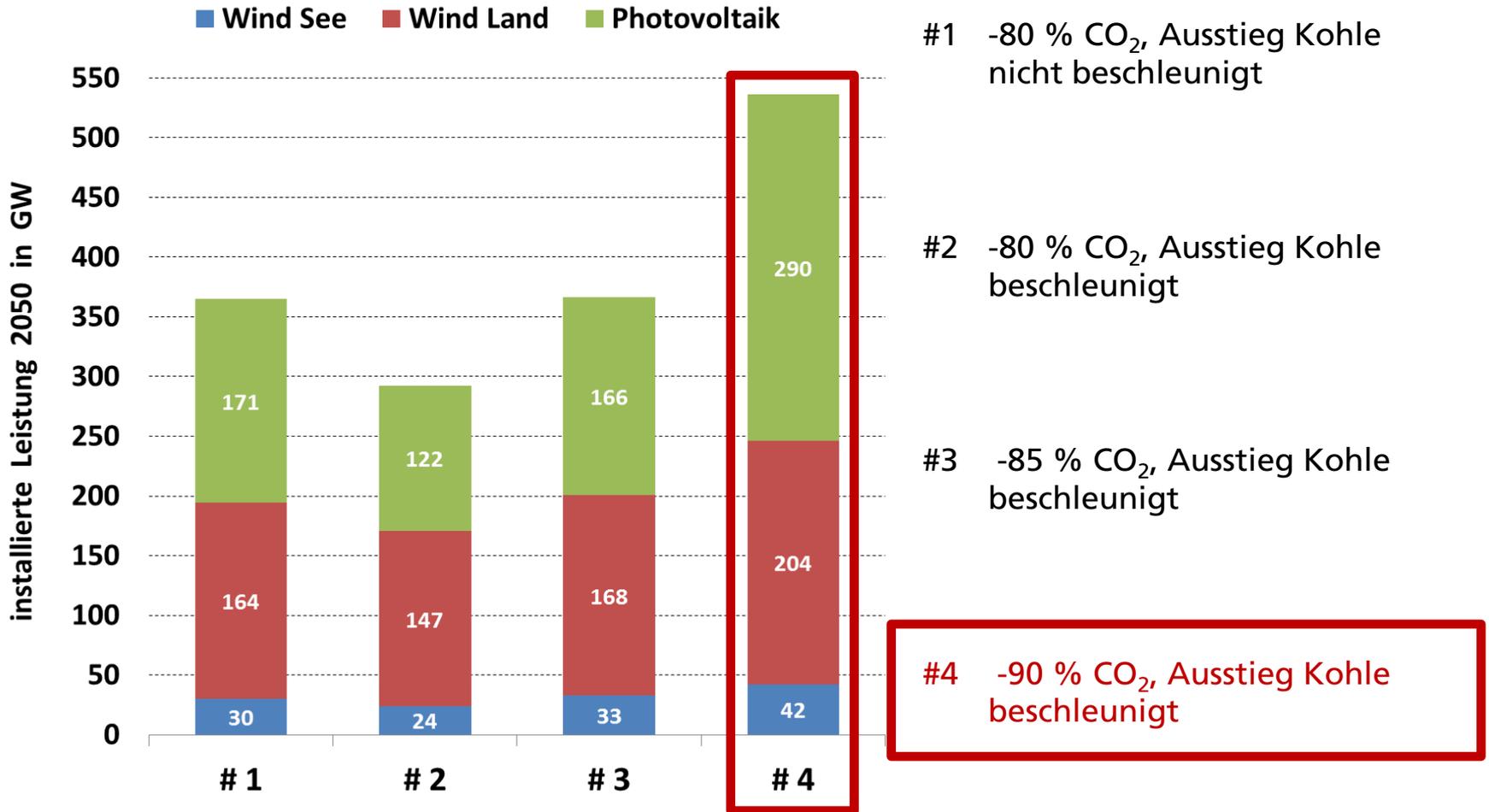
Szenarienergebnisse

Fluktuierende erneuerbare Energien im Jahr 2050



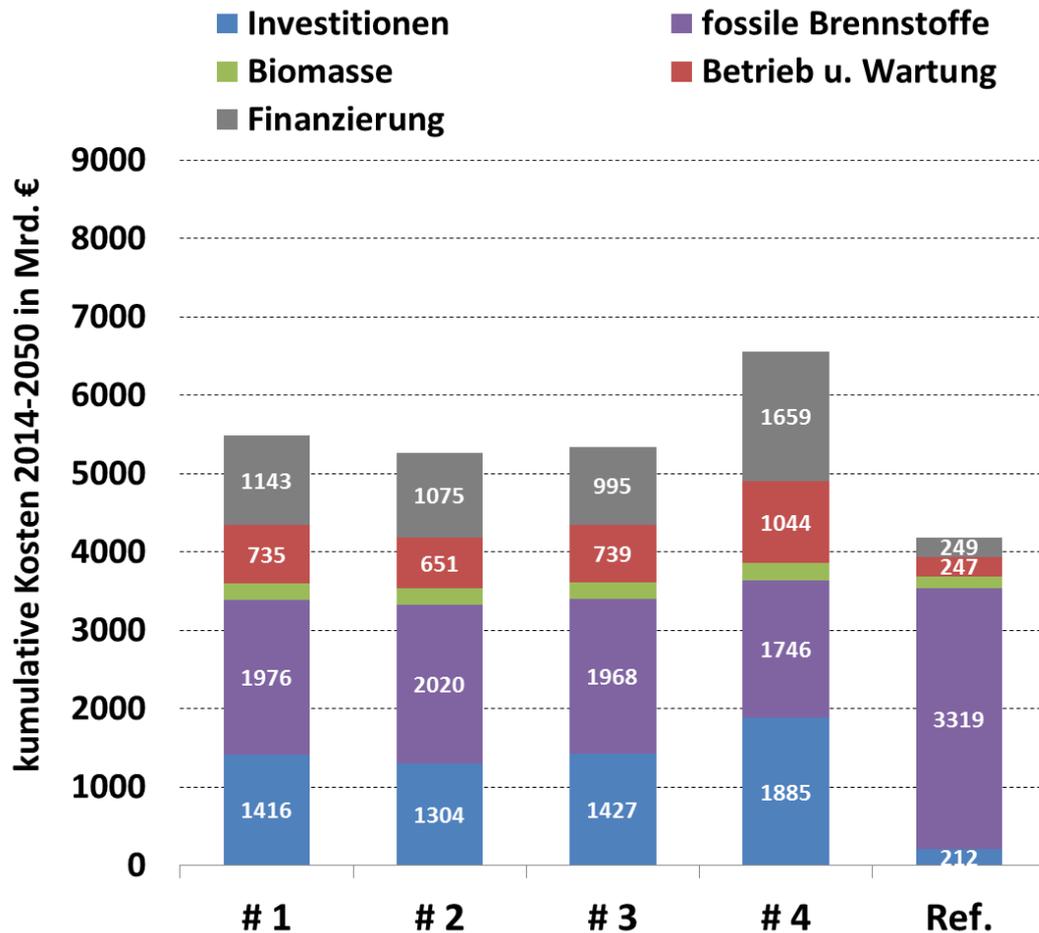
Szenarienergebnisse

Fluktuierende erneuerbare Energien im Jahr 2050



Szenarienergebnisse

Kumulative Gesamtkosten im Vergleich



■ Ohne Kosten für CO₂-Emissionen
■ Konstante Preise für fossile Energieträger

#1 -80 % CO₂, Ausstieg Kohle nicht beschleunigt

#2 -80 % CO₂, Ausstieg Kohle beschleunigt

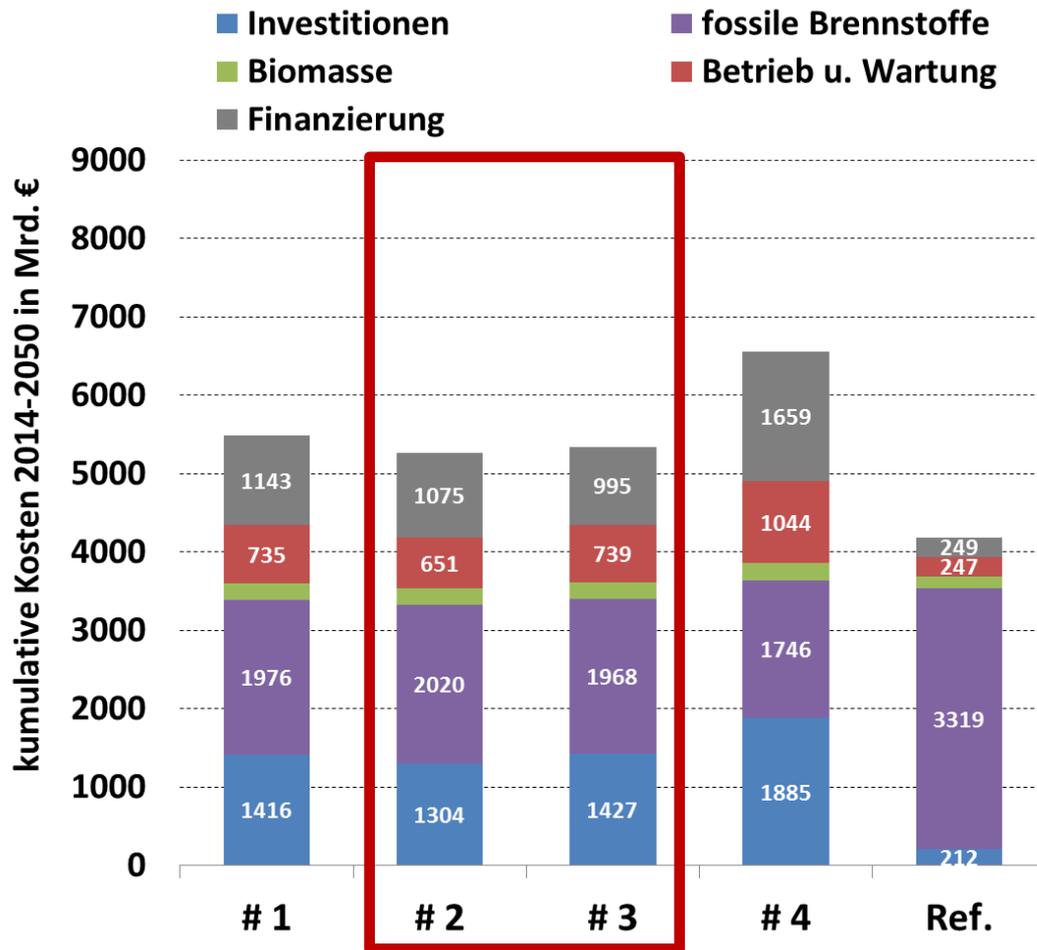
#3 -85 % CO₂, Ausstieg Kohle beschleunigt

#4 -90 % CO₂, Ausstieg Kohle beschleunigt

Ref heutiges System „eingefroren“

Szenarienergebnisse

Kumulative Gesamtkosten im Vergleich



Ohne Kosten für CO₂-Emissionen

Konstante Preise für fossile Energieträger

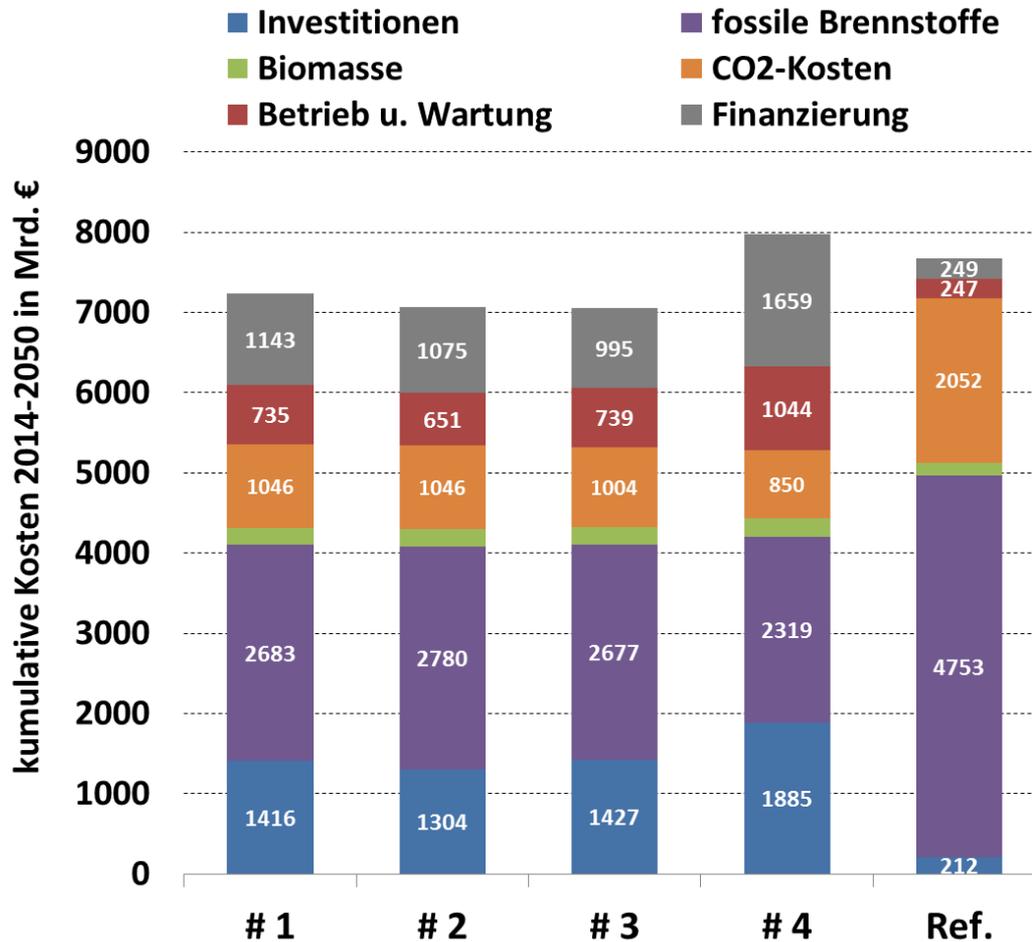
Kumulative Mehrkosten der Szenarien # 2 und # 3 rund 1100 Mrd. € für den Zeitraum 2014 – 2050 (entspricht rund 0.8 % des deutschen BIP)

#2 -80 % CO₂, Ausstieg Kohle beschleunigt

#3 -85 % CO₂, Ausstieg Kohle beschleunigt "

Szenarienergebnisse

Kumulative Gesamtkosten im Vergleich



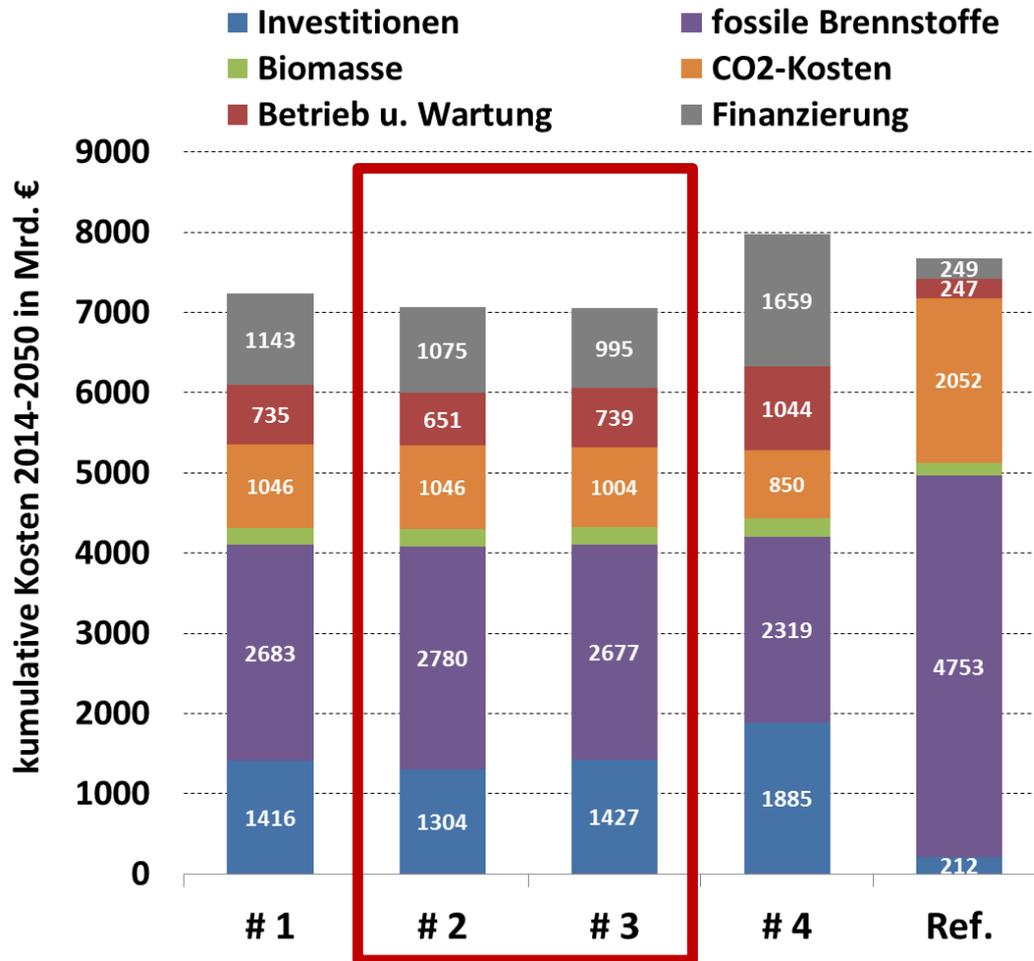
- Kosten für CO₂-Emissionen ansteigend bis 100 € pro Tonne in 2030; dann fix
- Preiserhöhung fossile Energieträger 2 % p.a.

- #1 -80 % CO₂, Ausstieg Kohle nicht beschleunigt
- #2 -80 % CO₂, Ausstieg Kohle beschleunigt
- #3 -85 % CO₂, Ausstieg Kohle beschleunigt
- #4 -90 % CO₂, Ausstieg Kohle beschleunigt

Ref heutiges System „eingefroren“

Szenarienergebnisse

Kumulative Gesamtkosten im Vergleich



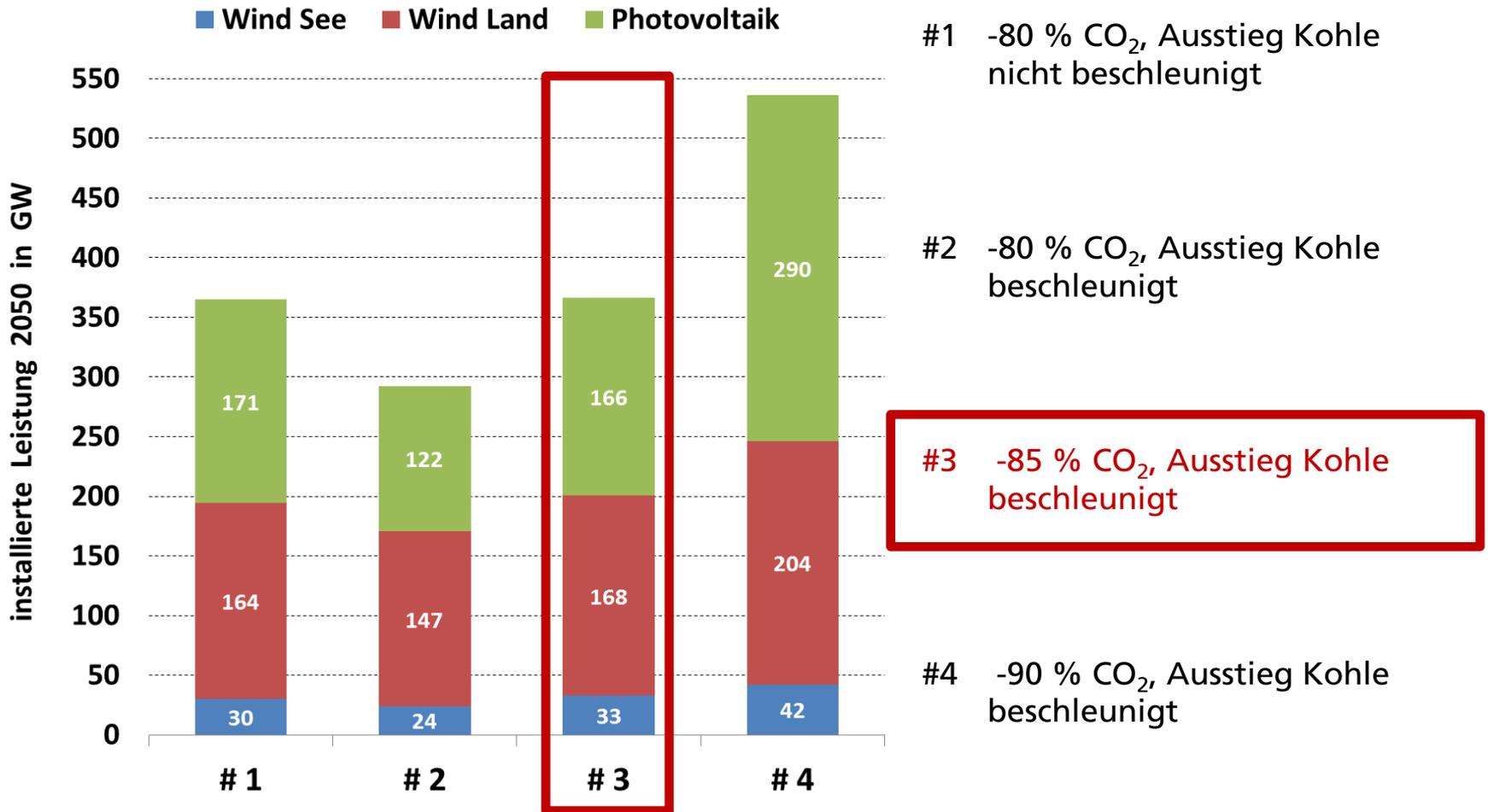
- Kosten für CO₂-Emissionen ansteigend bis 100 € pro Tonne in 2030; dann fix
- Preiserhöhung fossile Energieträger 2 % p.a.

Kumulative Minderkosten der Szenarien # 2 und # 3 rund 600 Mrd. € für den Zeitraum 2014 – 2050

- #2 -80 % CO₂, Ausstieg Kohle beschleunigt
- #3 -85 % CO₂, Ausstieg Kohle beschleunigt "

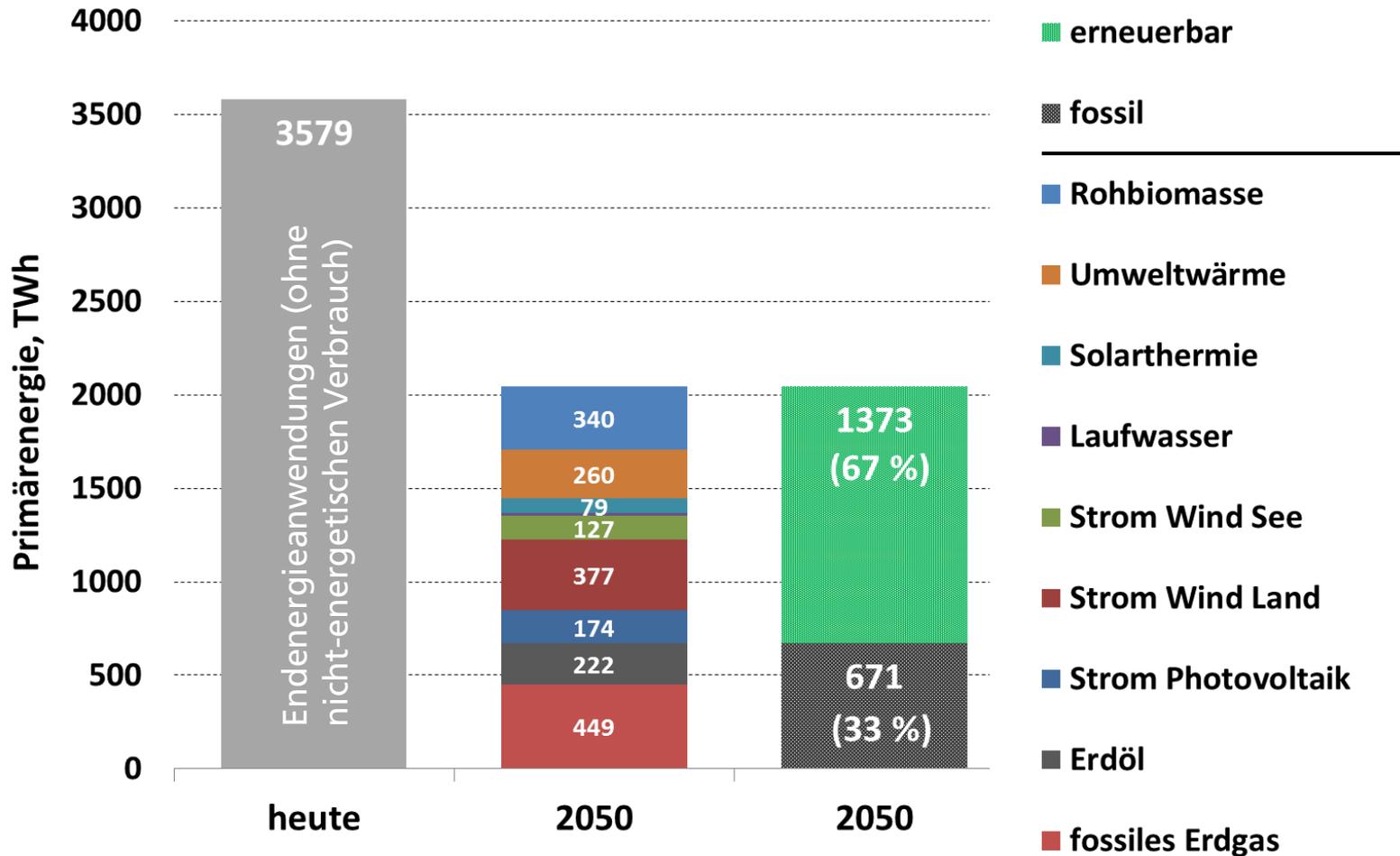
Szenarienergebnisse

Fluktuierende erneuerbare Energien im Jahr 2050

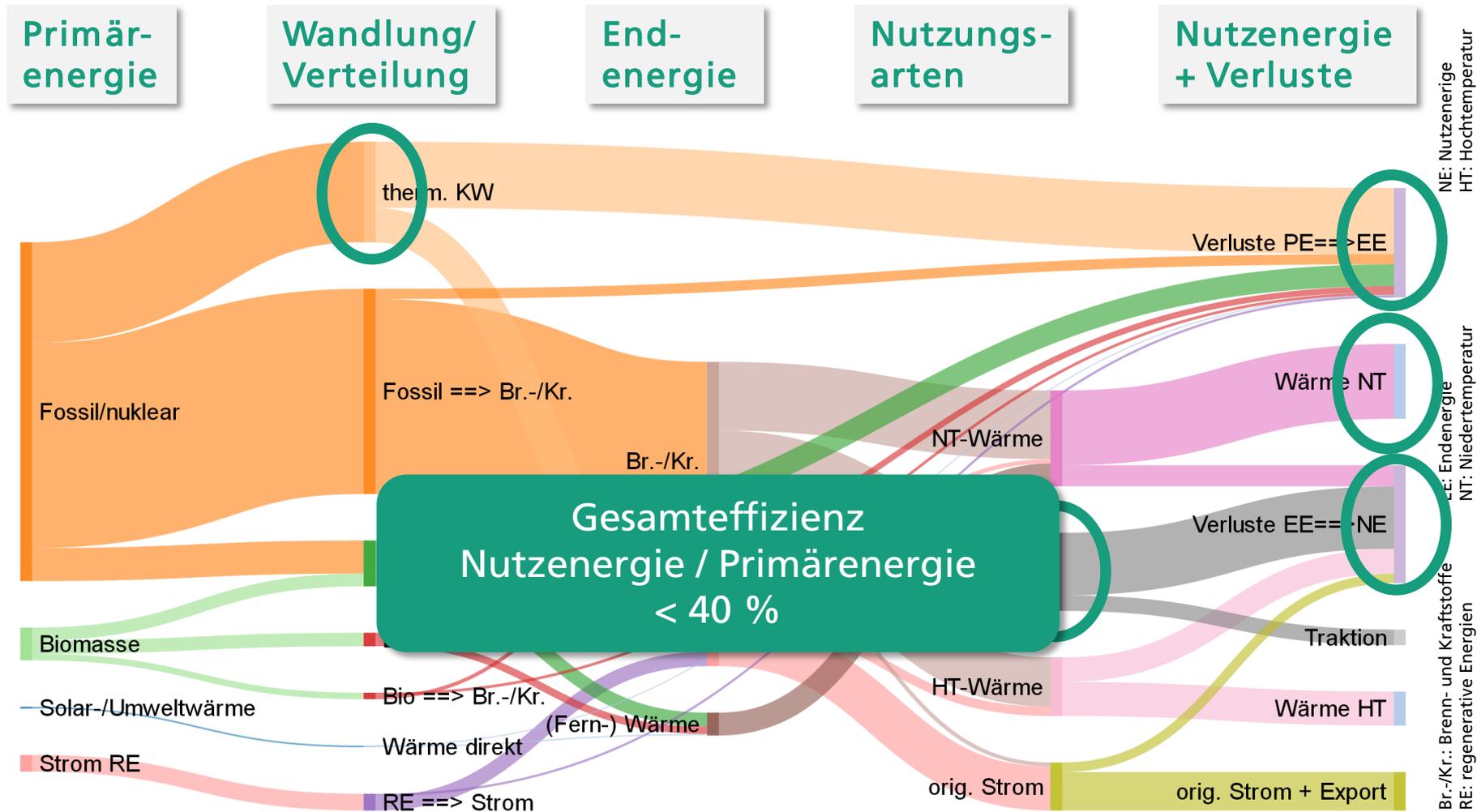


Primärenergie 2050

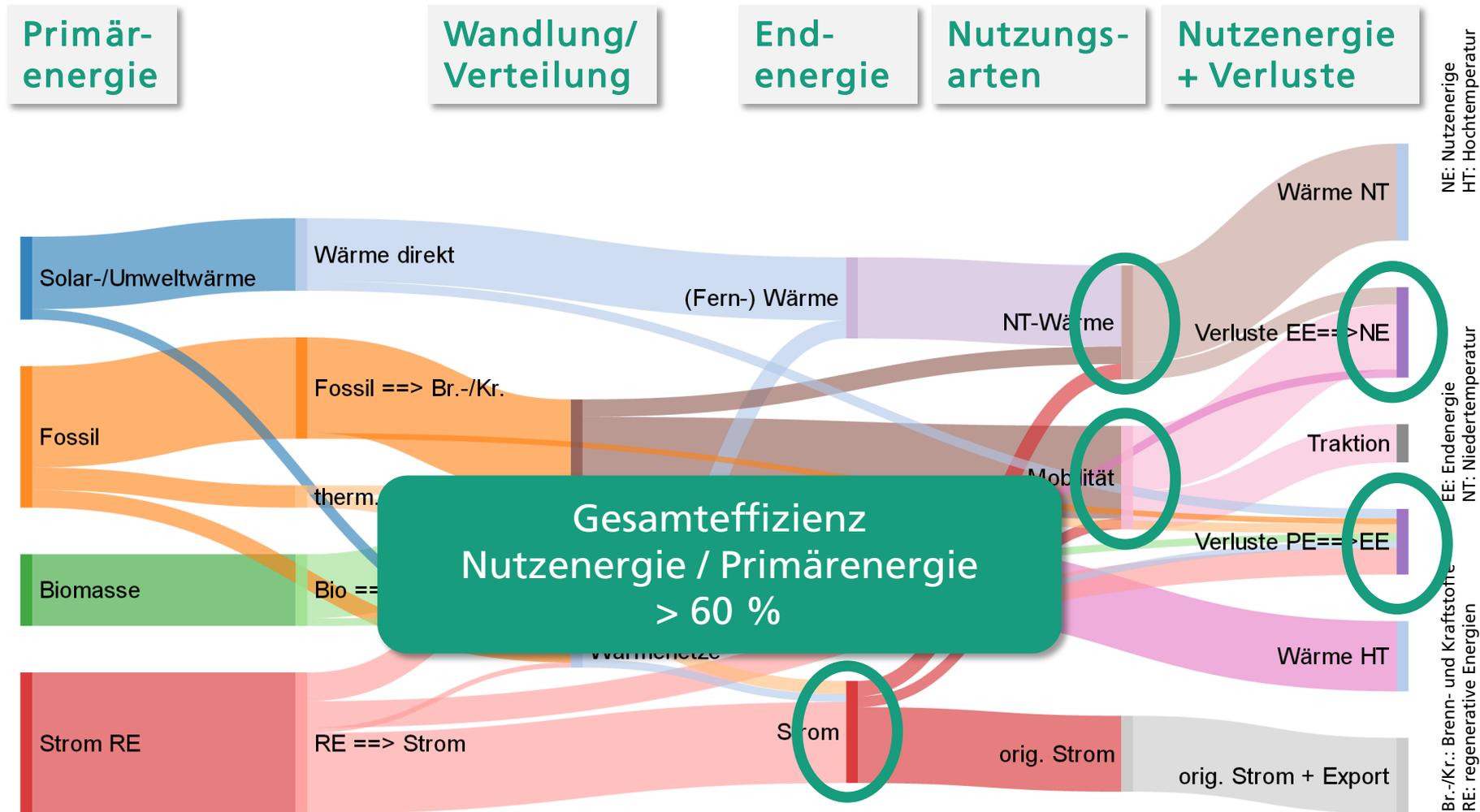
- 85 % - Szenario



Energiefluss im dt. Energiesystem 2013 (vereinfacht)

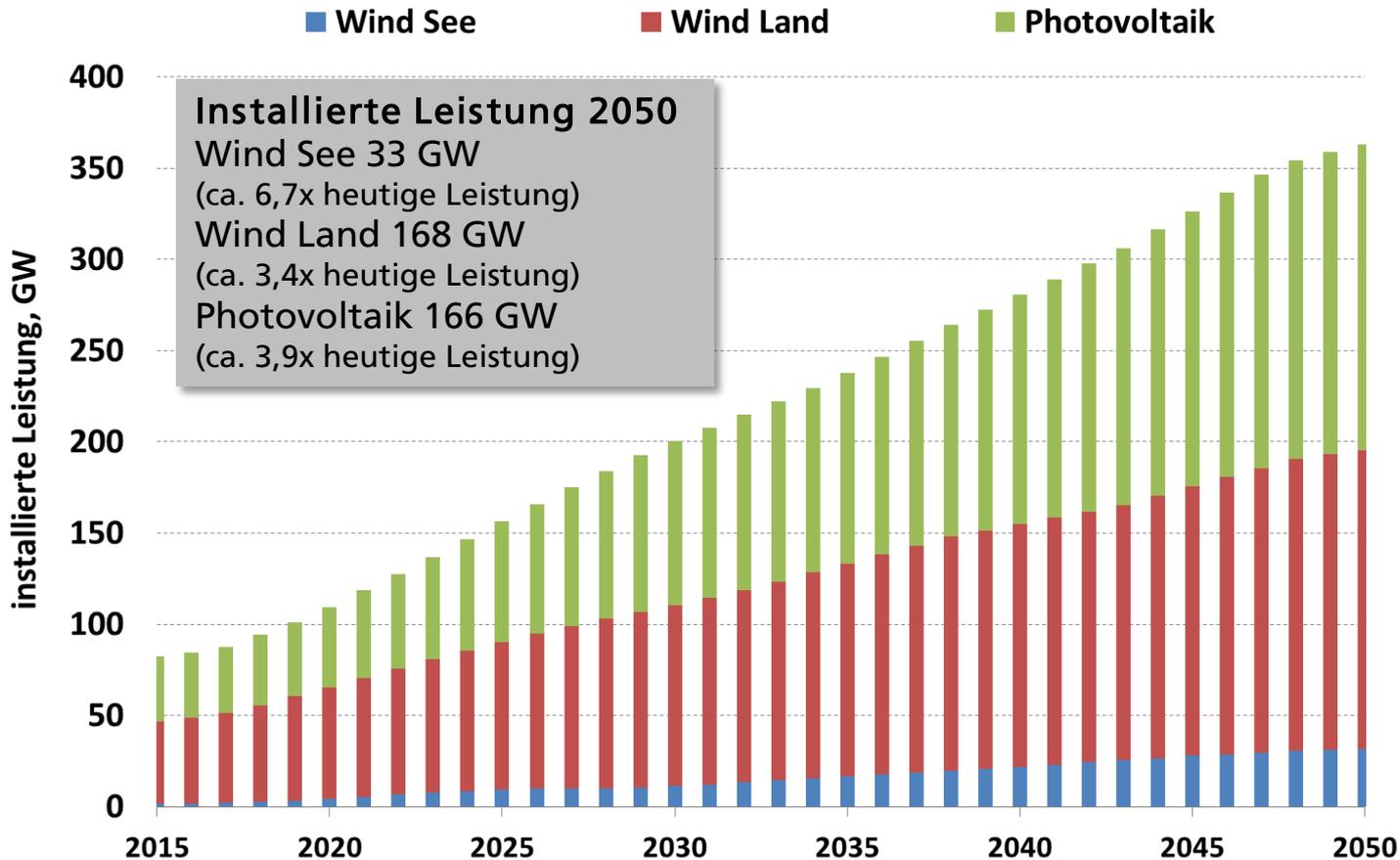


Energiefluss Energiesystem 2050 (-85%-Szenario)

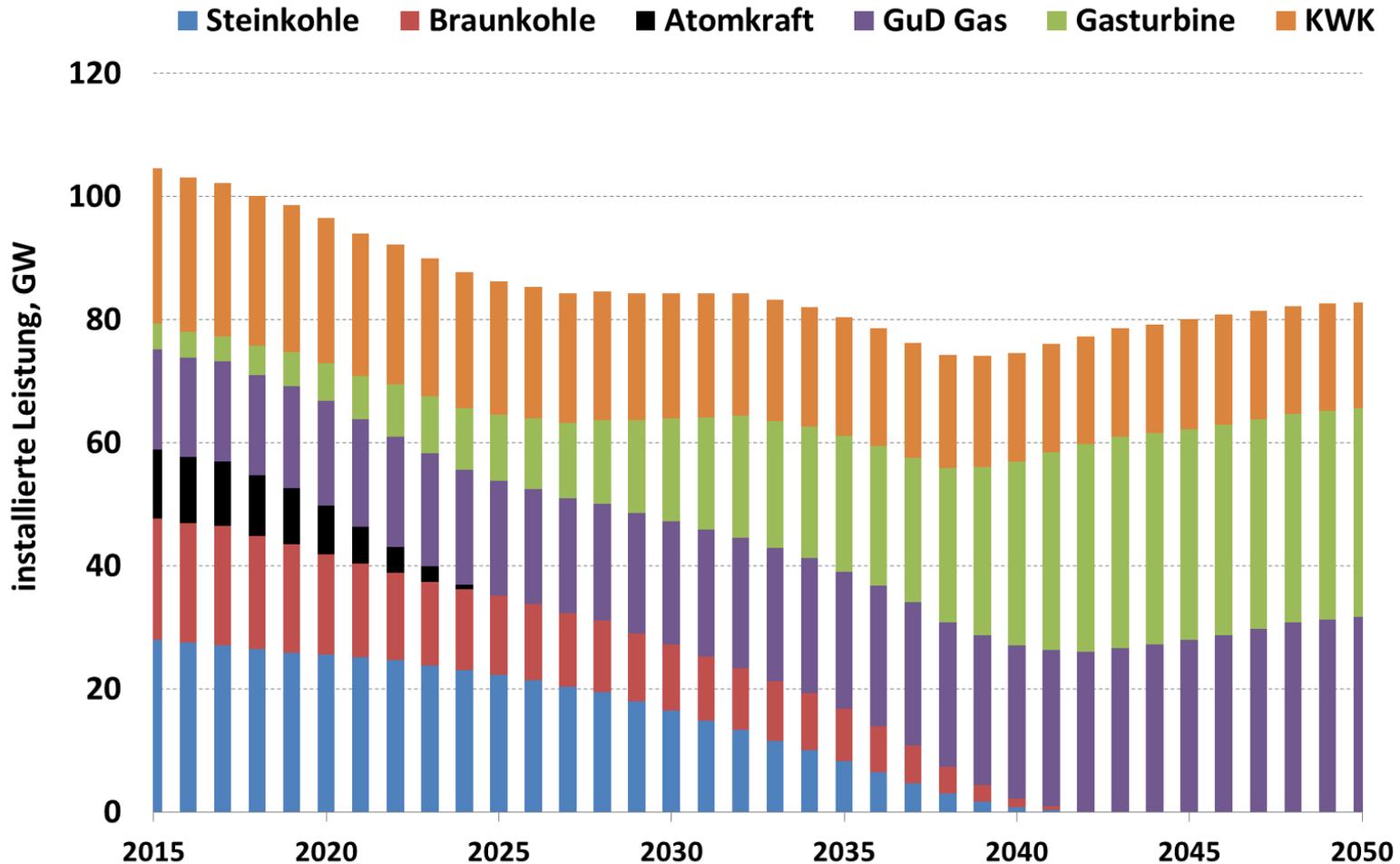


Entwicklung fluktuierende erneuerbare Energien

– 85%-Szenario

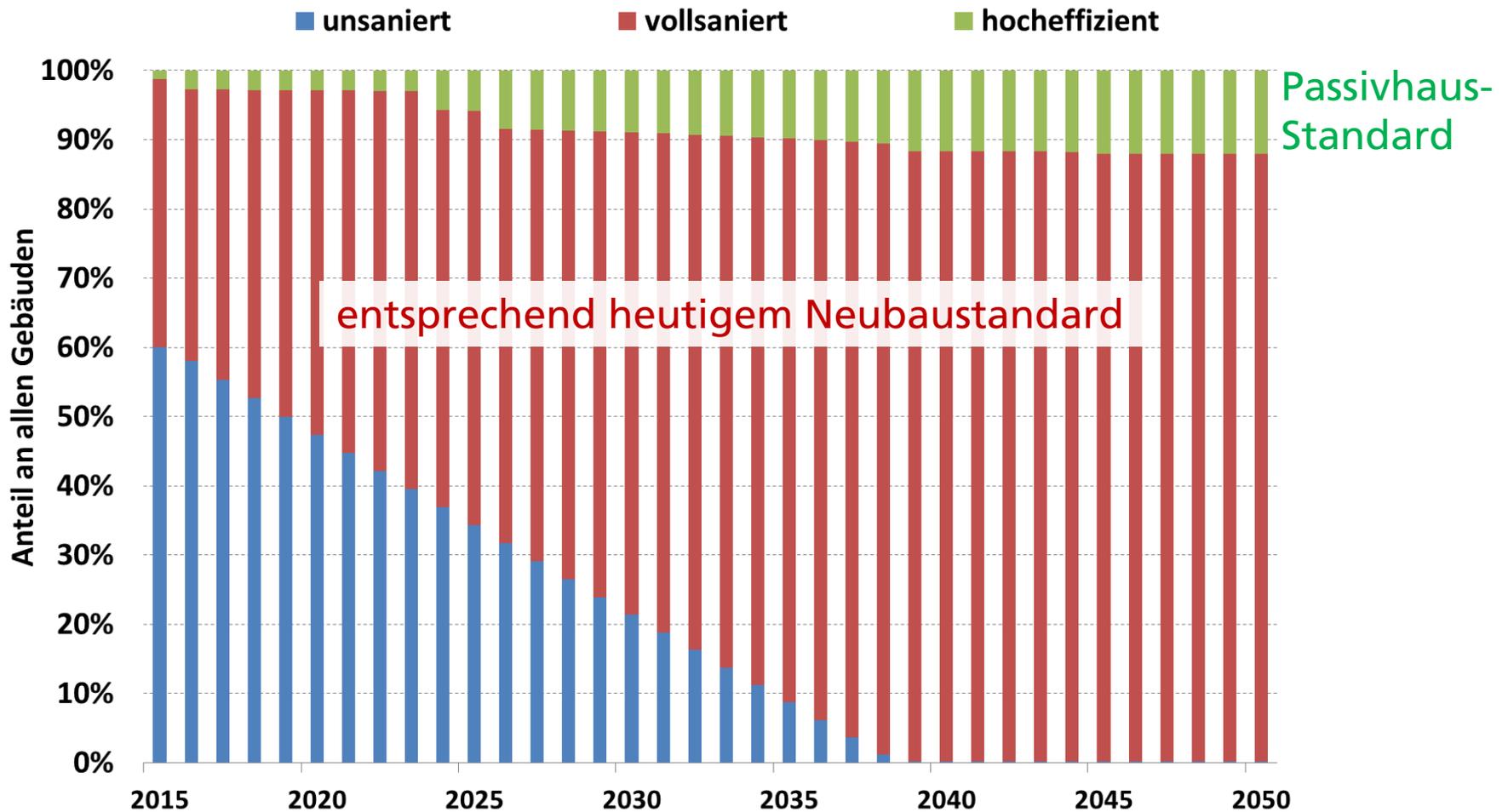


Entwicklung thermische Kraftwerke und KWK – 85%-Szenario



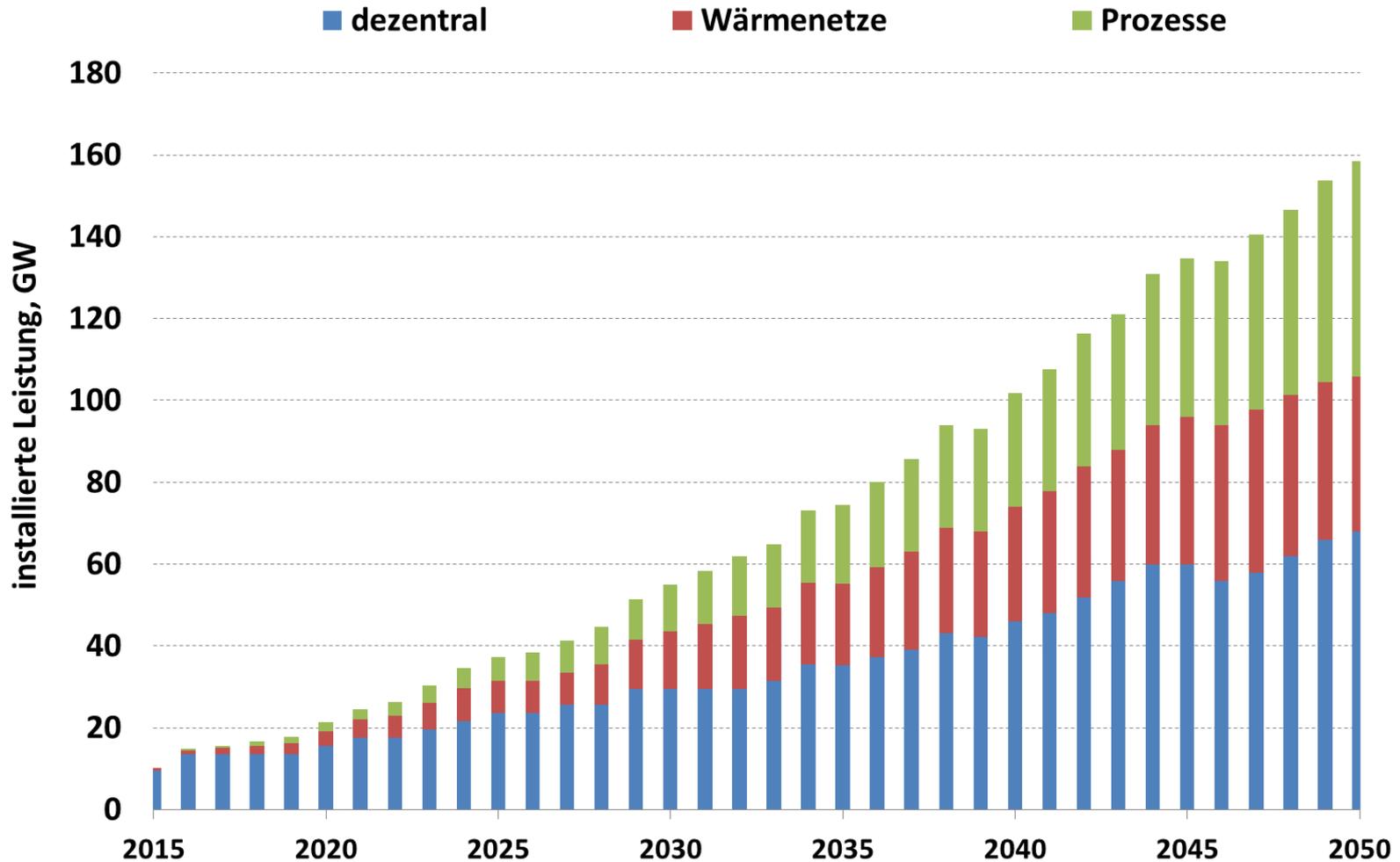
Entwicklung Gebäude

– 85%-Szenario



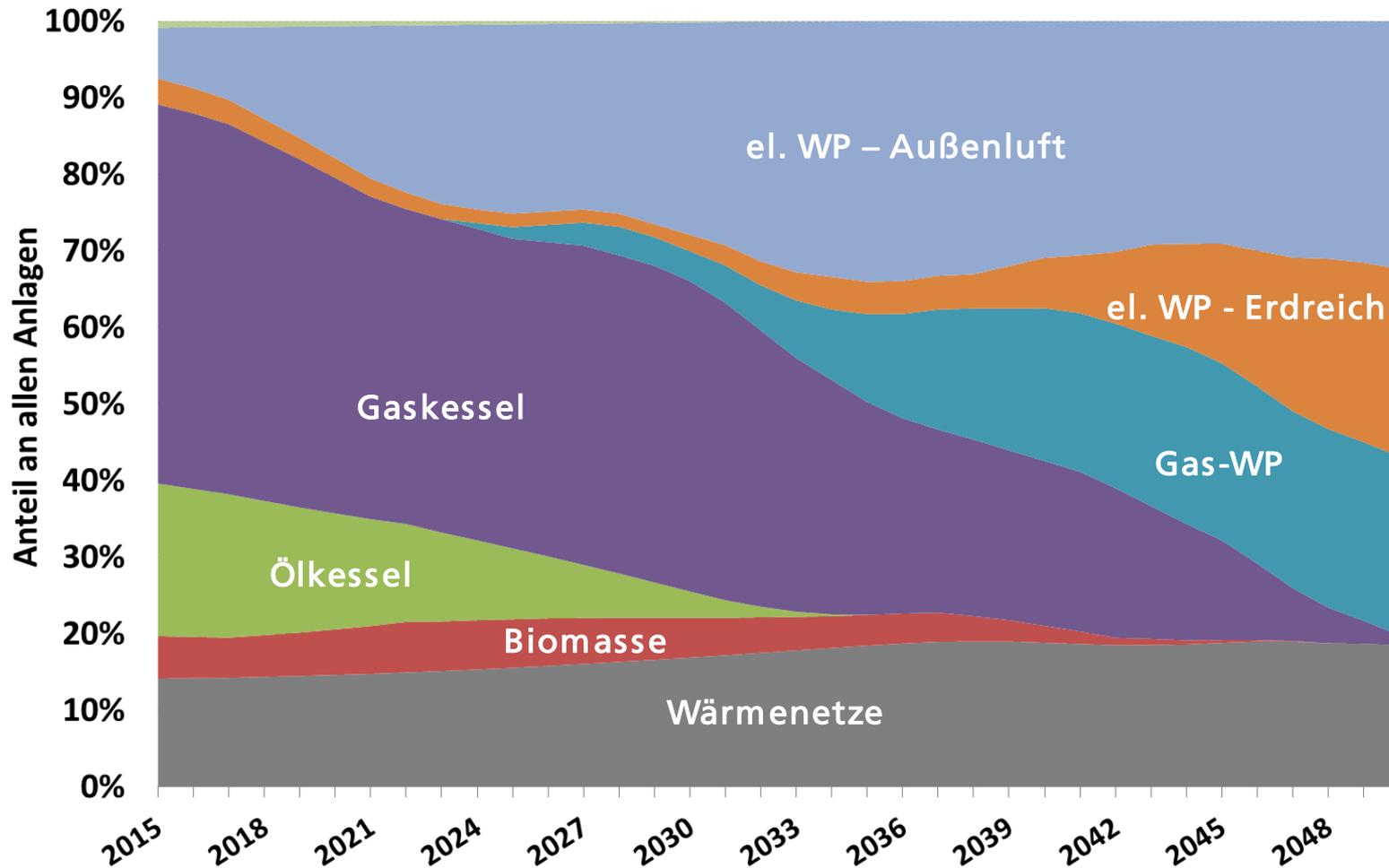
Entwicklung Solarthermie

– 85%-Szenario



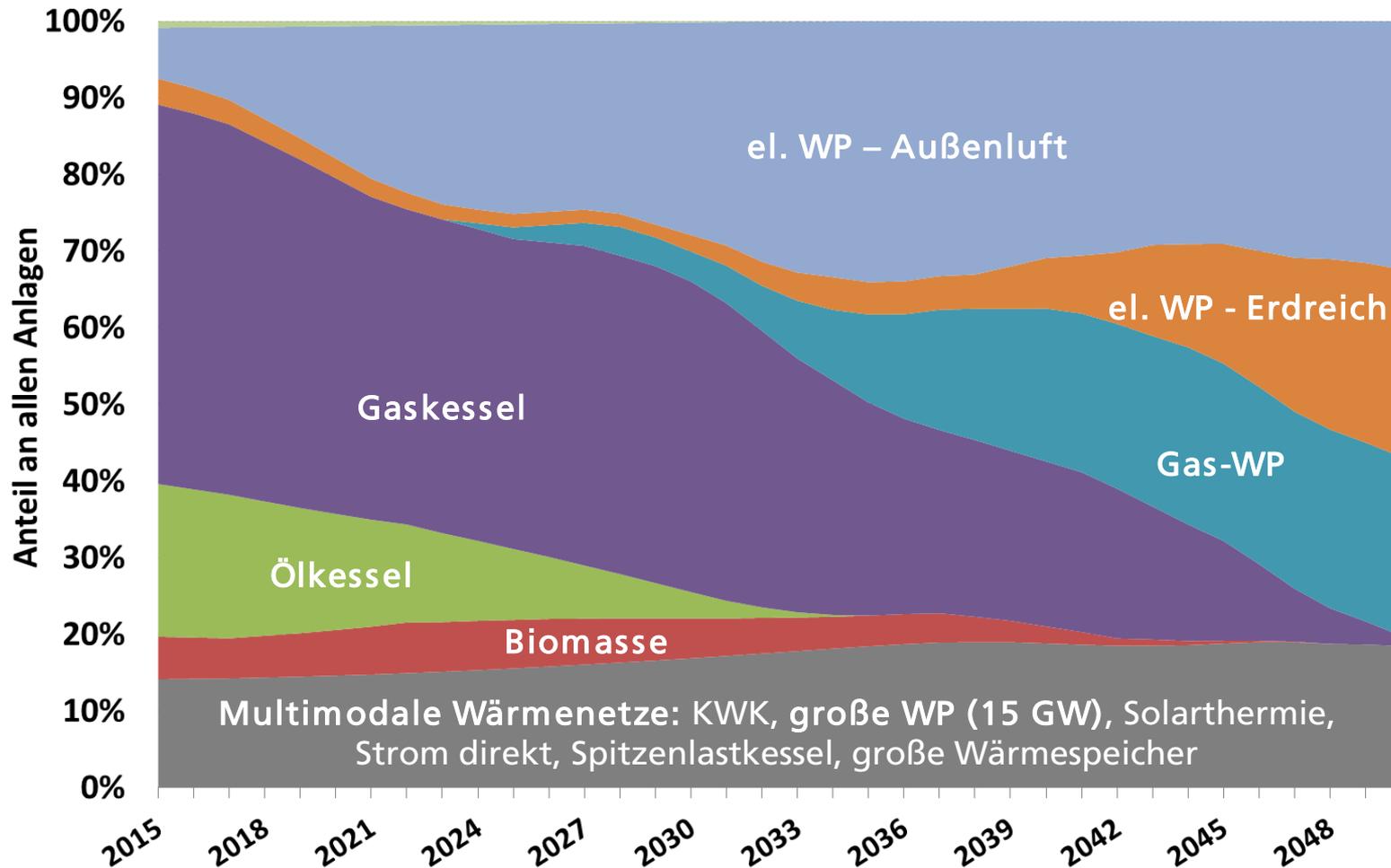
Entwicklung Heizungstechniken

– 85%-Szenario



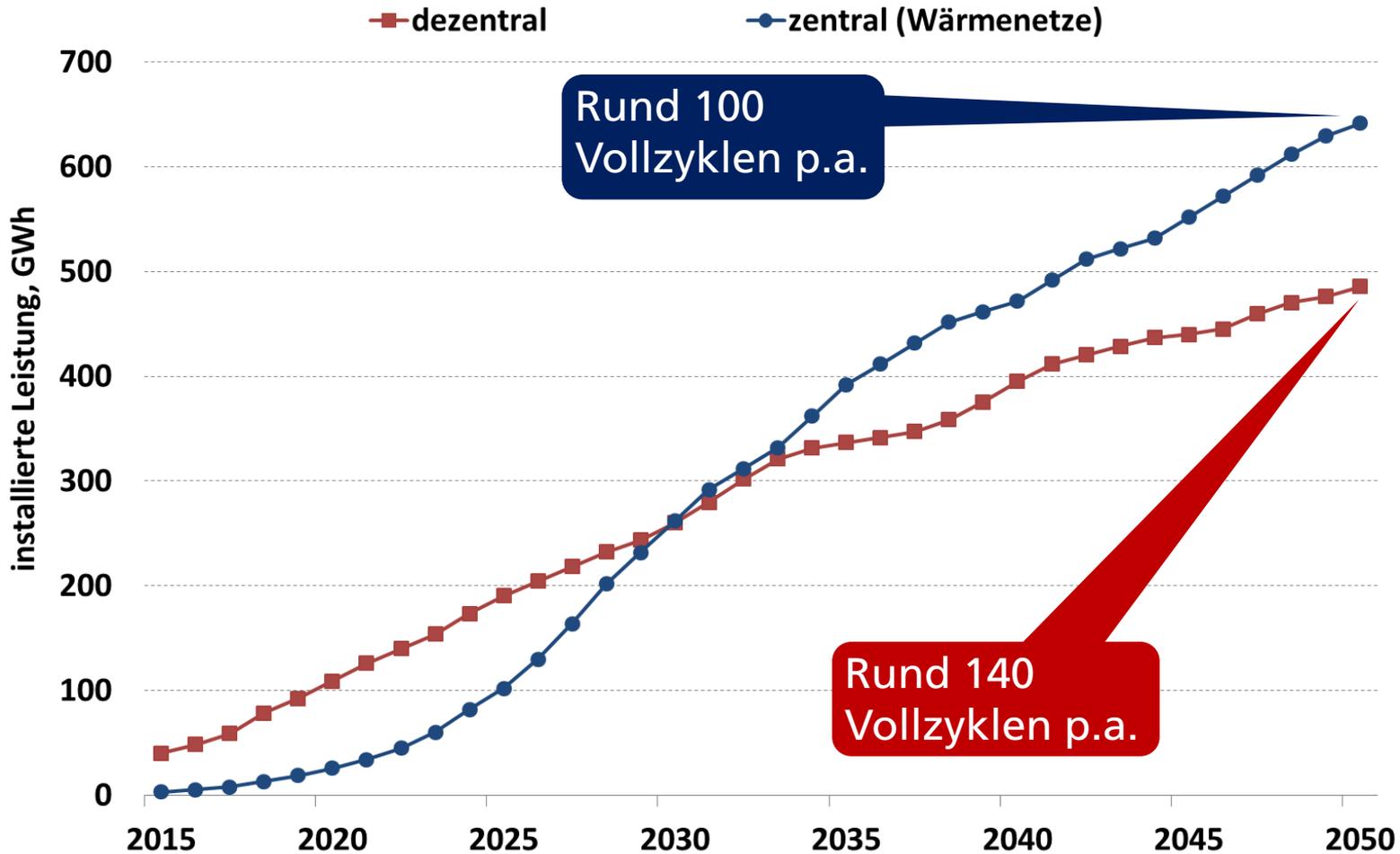
Entwicklung Heizungstechniken

– 85%-Szenario



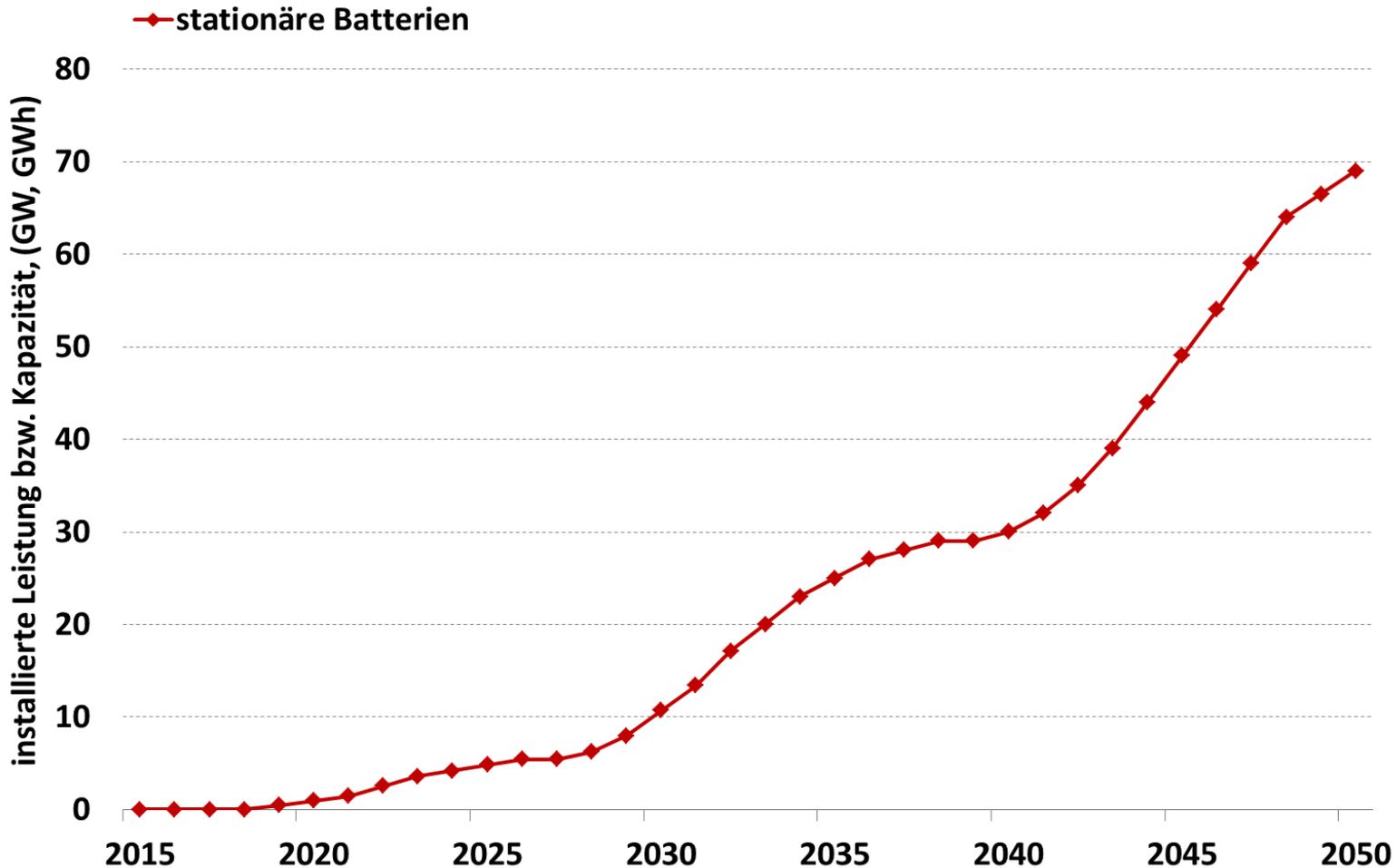
Entwicklung Wärmespeicher

– 85%-Szenario



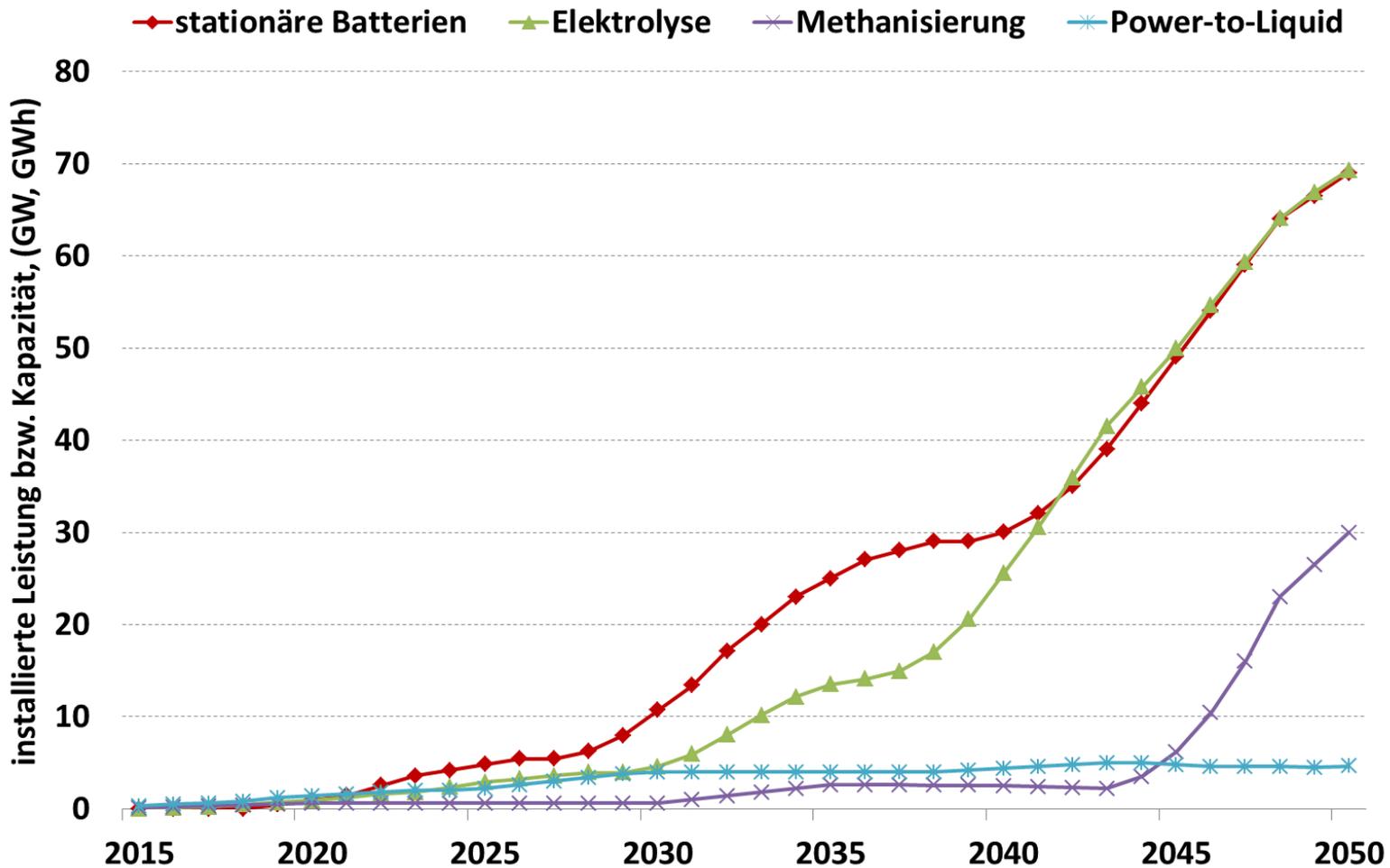
Stationäre Batterien

– 85%-Szenario



Stationäre Batterien und synthetische Energieträger

– 85%-Szenario



Inhalt

Einleitung

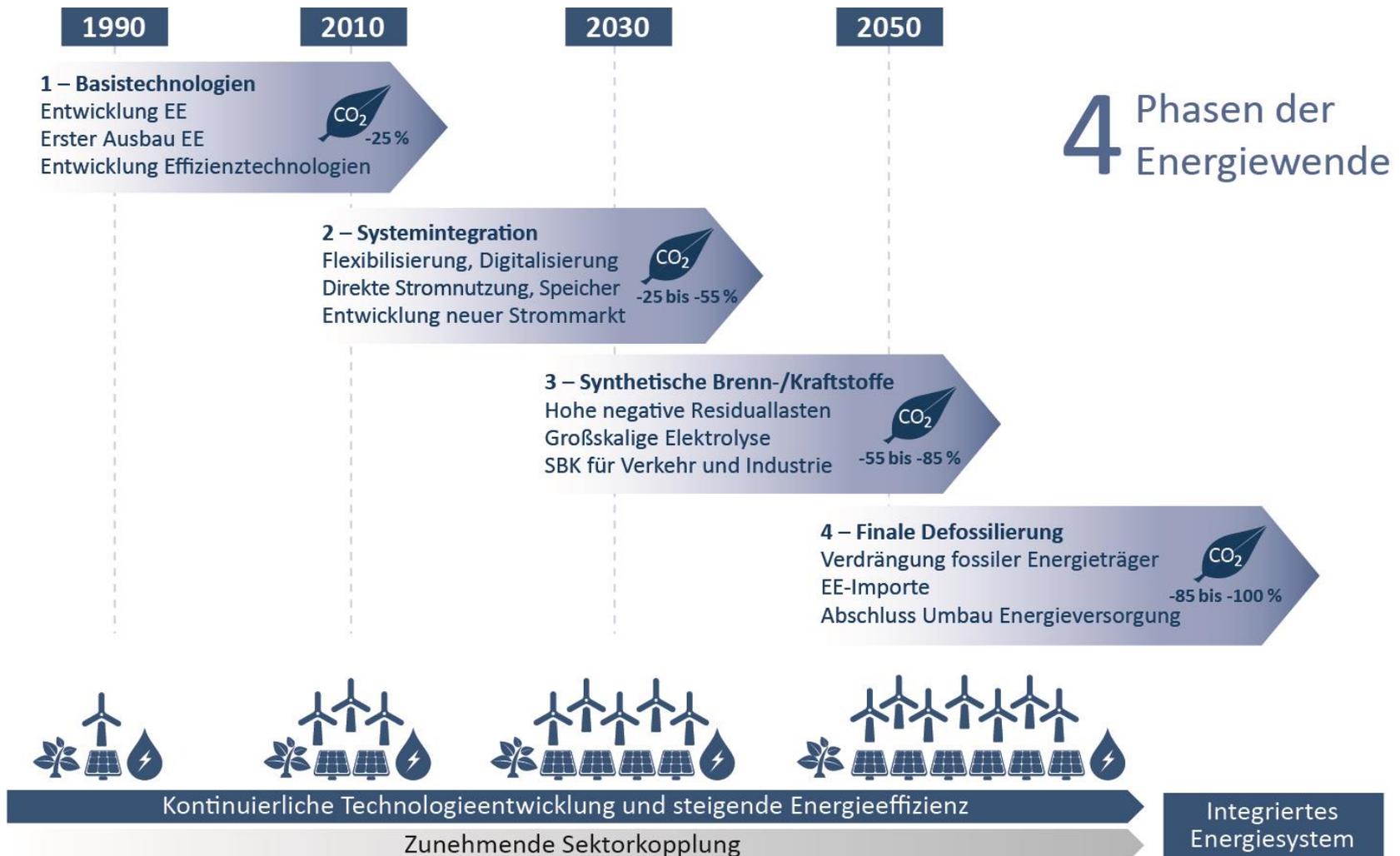
Optimierung von Transformationspfaden - Methodologie

Ergebnisse ausgewählter Szenarien

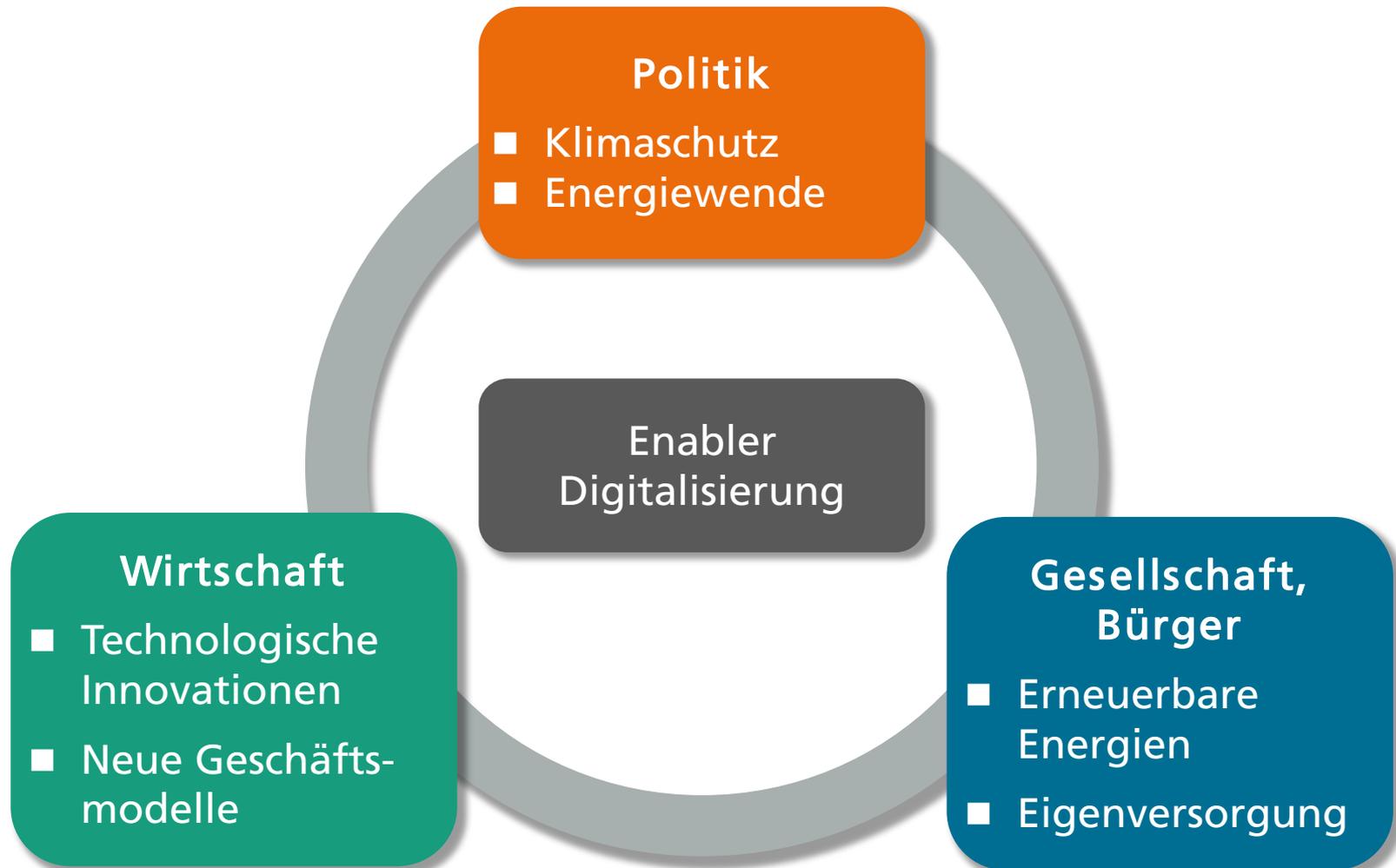
Die nächste Phase der Energiewende

Zusammenfassung

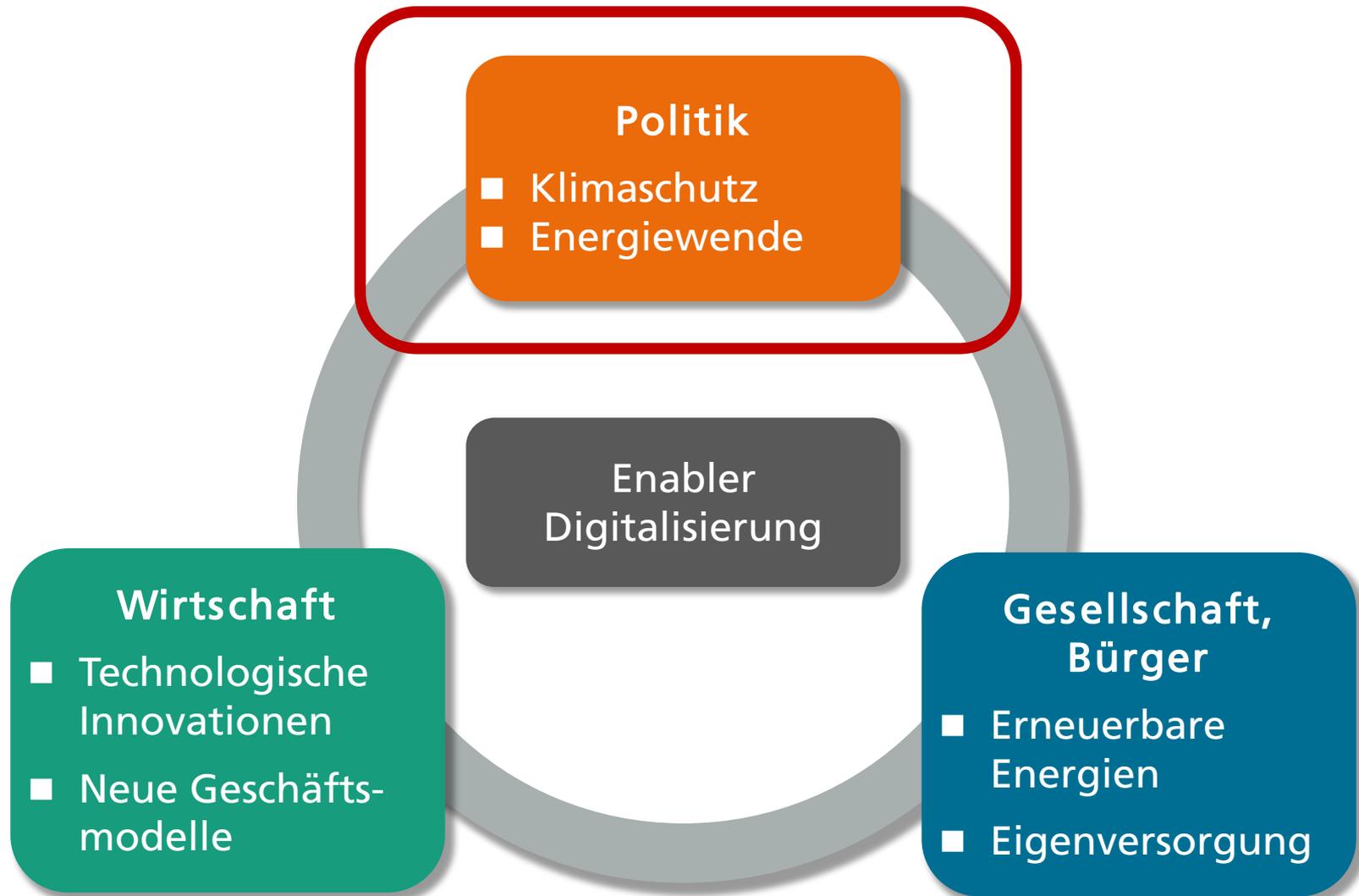
Phasen der Energiewende



Treiber für die Sektorenkopplung



Treiber für die Sektorenkopplung



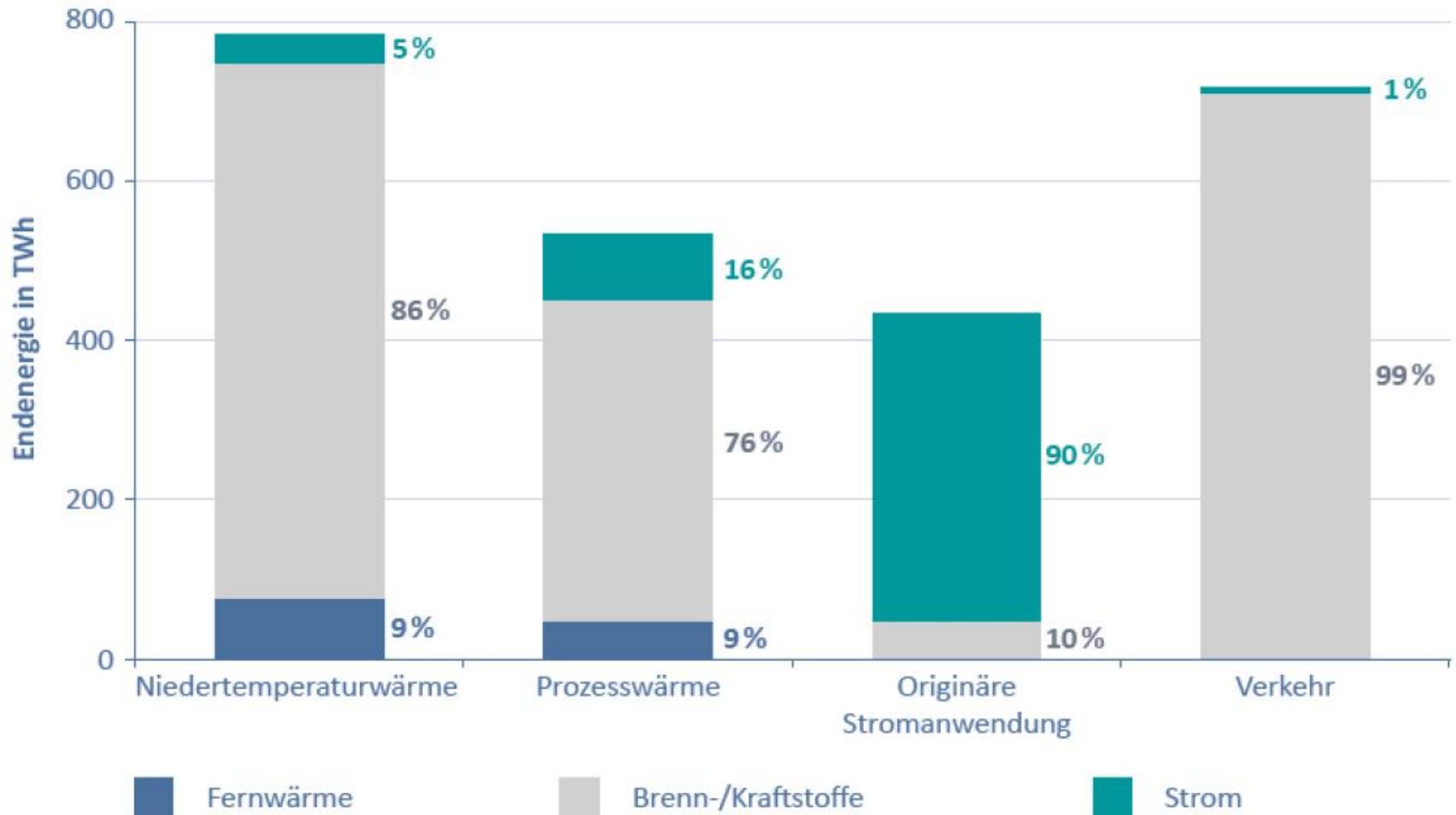
Was bedeutet Sektorenkopplung?

- Heute: jeder Sektor verwendet dominierende Form von Energieträgern
 - **Wärme/Gebäude: Brennstoffe** (Erdgas, Heizöl, Biomasse)
 - **Verkehr: Kraftstoffe** (Benzin, Diesel, biogene Beimischung)
 - **Industrie: Brennstoffe**
- Zukünftig: Optionen der Sektorenkopplung
 - **Direkte Stromnutzung:** Verwendung von Strom in Sektoren, die heute von anderen Energieträgern dominiert werden
 - **Wasserstoff:** Konversion von EE-Strom in Wasserstoff und dessen Nutzung in unterschiedlichen Bereichen (Verkehr, Chemie, Strom)
 - **Synthetische Brenn- und Kraftstoffe:** Kohlenwasserstoffe aus Weiterkonversion von EE-Wasserstoff mit CO₂ und deren Nutzung in unterschiedlichen Bereichen

Was bedeutet Sektorenkopplung?

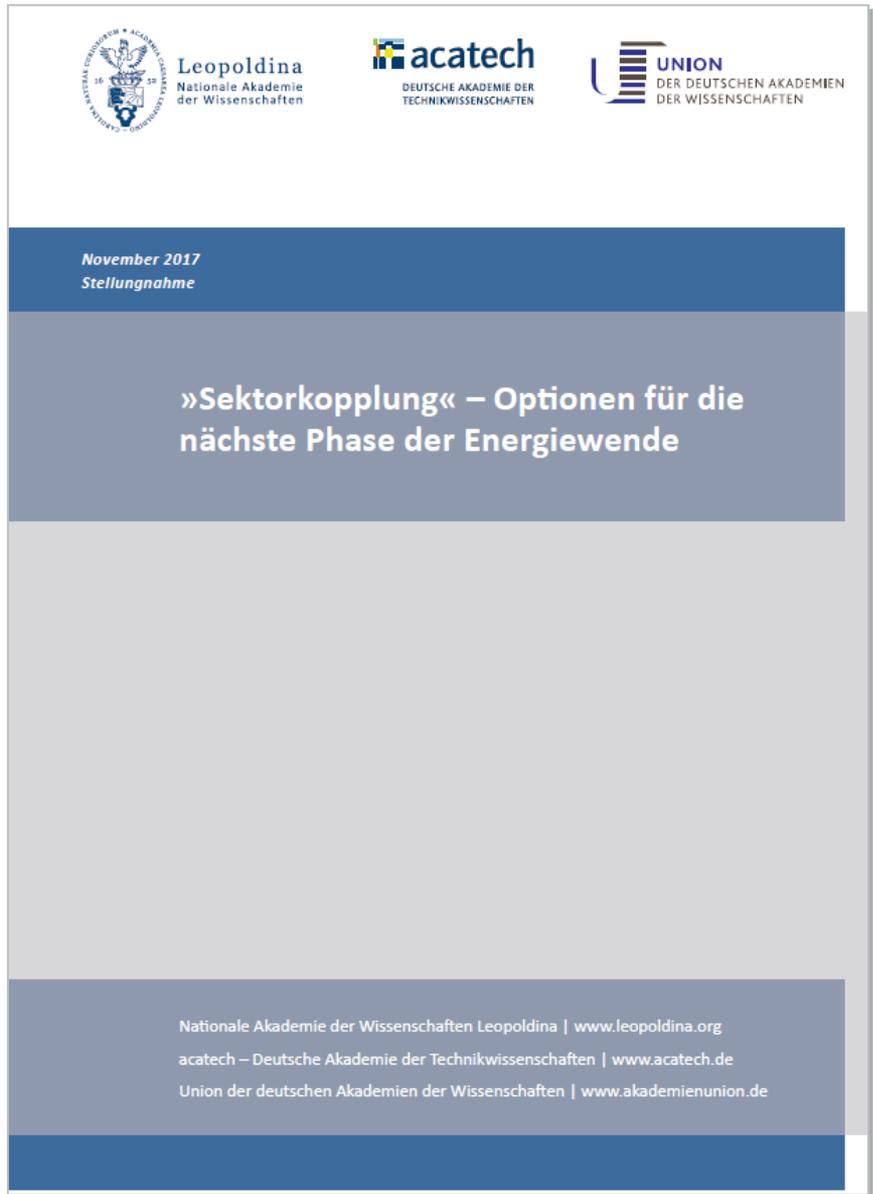
- Heute: jeder Sektor verwendet dominierende Form von Energieträgern
 - **Wärme/Gebäude: Brennstoffe** (Erdgas, Heizöl, Biomasse)
 - **Verkehr: Kraftstoffe** (Benzin, Diesel, biogene Beimischung)
 - **Industrie: Brennstoffe**
 - Zukünftig: Optionen der Sektorenkopplung
 - **Direkte Stromnutzung:** Verwendung von Strom in Sektoren, die heute von anderen Energieträgern dominiert werden
 - **Wasserstoff:** Konversion von EE-Strom in Wasserstoff und dessen Nutzung in unterschiedlichen Bereichen (Verkehr, Chemie, Strom)
 - **Synthetische Brenn- und Kraftstoffe:** Kohlenstoff aus Biomasse, Weiterkonversion von EE-Wasserstoff mit CO_2 aus anderen Nutzung in unterschiedlichen Bereichen
- Indirekte Stromnutzung

Endenergieverteilung heute nach Sektoren/Anwendungen



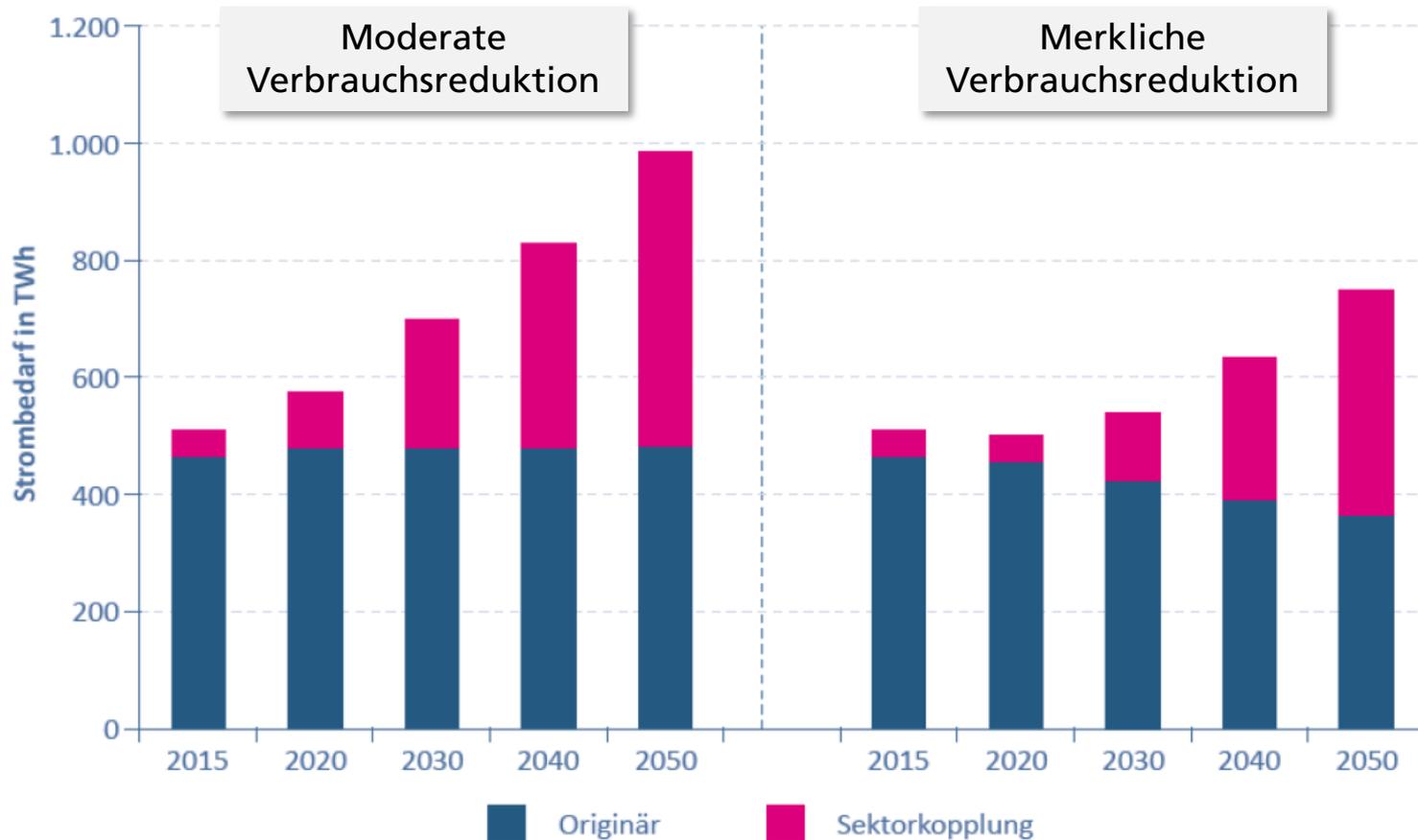
Aktuelle Veröffentlichung

- Stellungnahme der Wissenschaftsakademien
- Entstanden im Projekt »Energiesysteme der Zukunft (ESYS)«
- Arbeitsgruppe »Sektorkopplung«
- Leitung Prof. Dr. Eberhard Umbach und Prof. Dr. Hans-Martin Henning
- Veröffentlicht am 14.11.2017



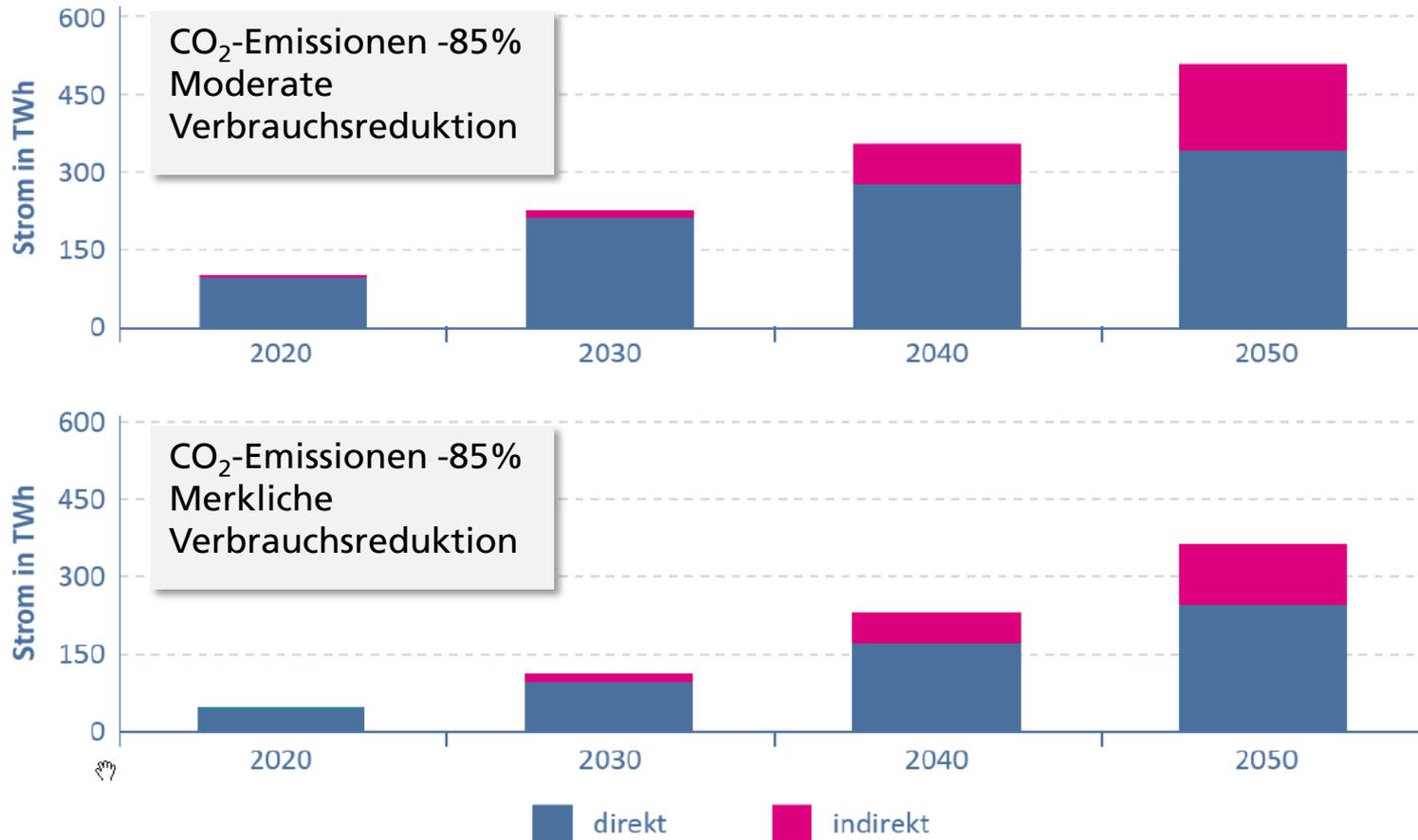
Ergebnisse

Entwicklung des Strombedarfs (CO₂-Emissionen -85%)



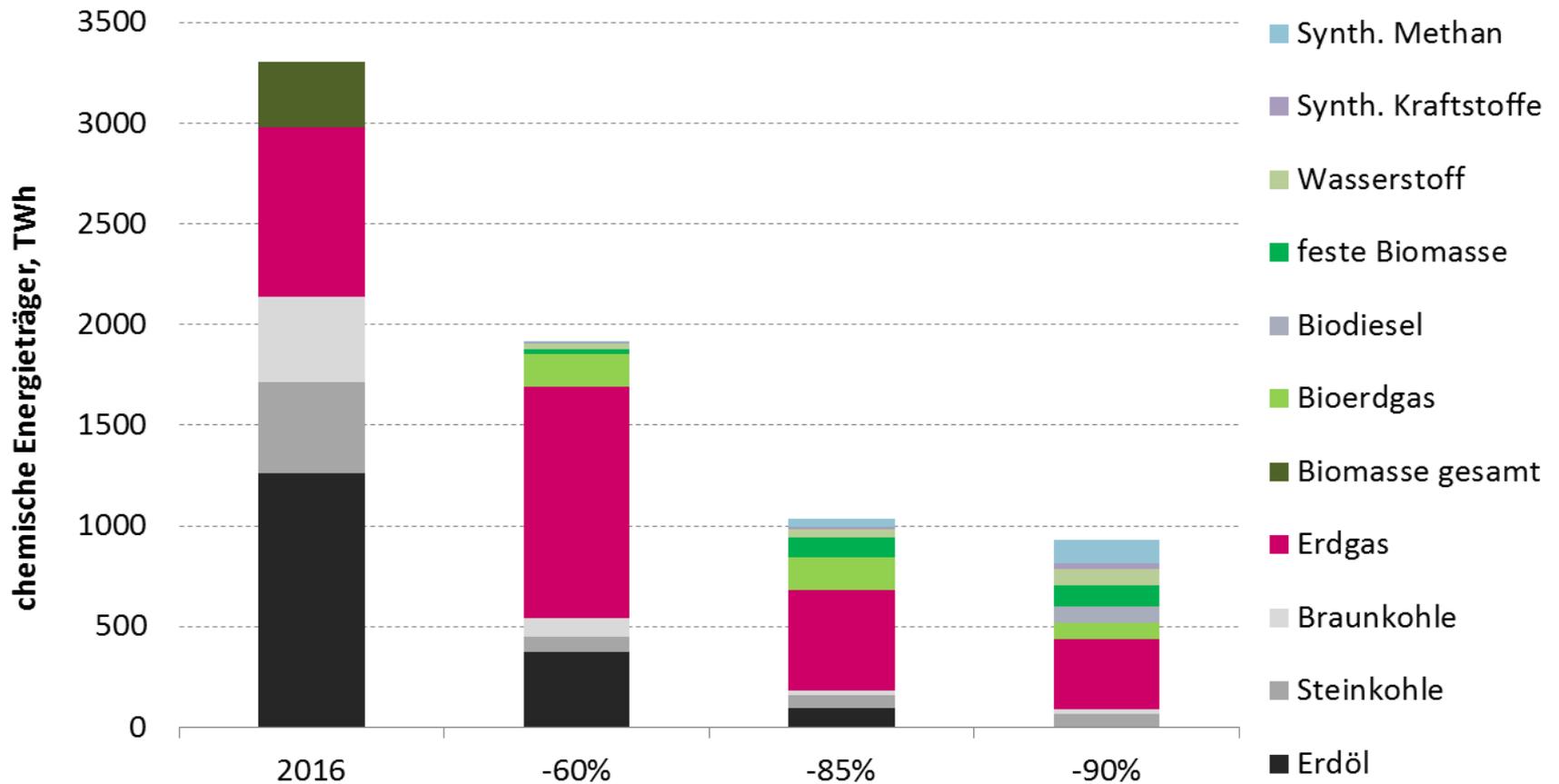
Ergebnisse

Entwicklung des Strombedarfs für Sektorenkopplung

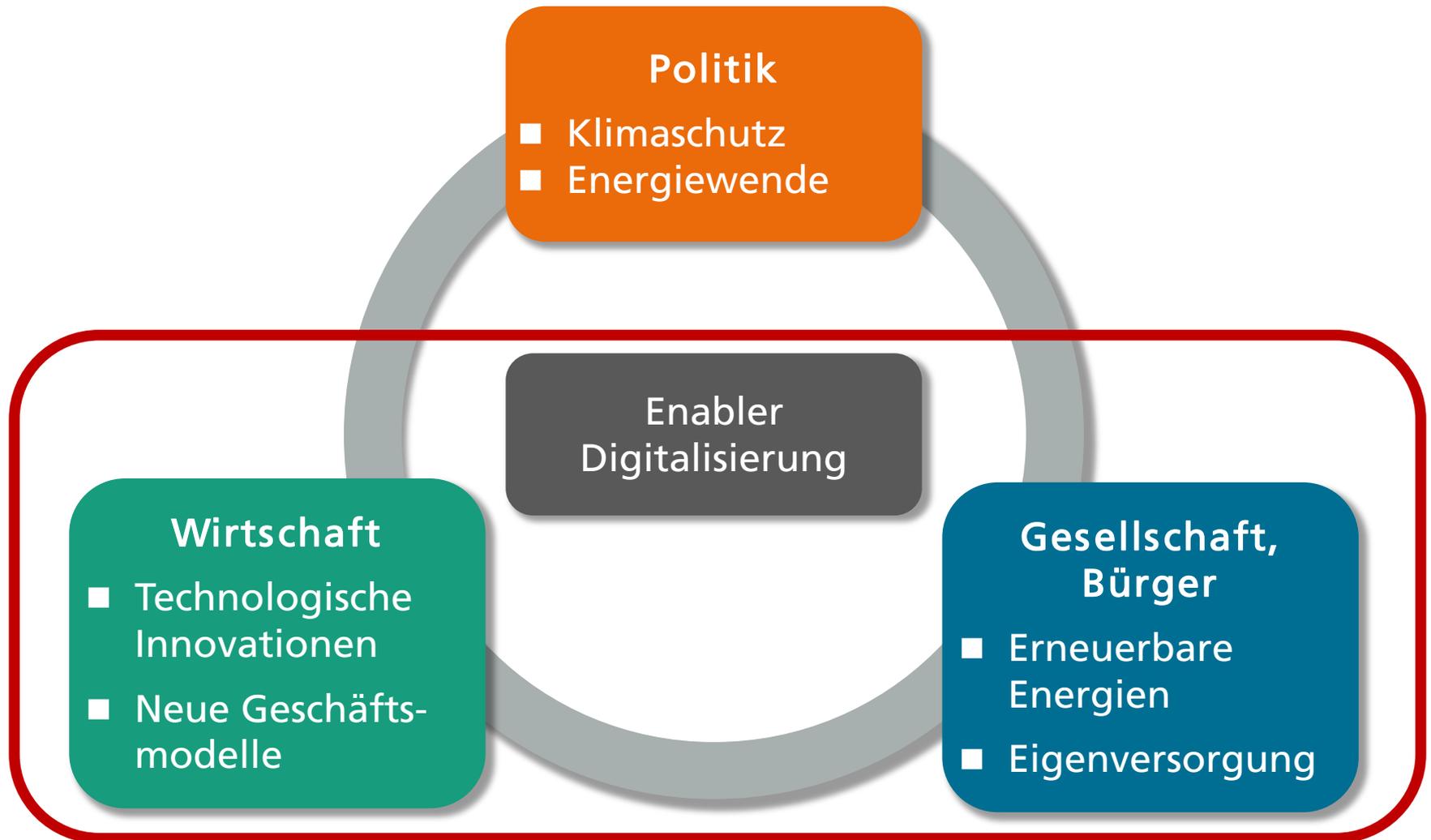


Ergebnisse

Chemische Energieträger für unterschiedliche Klimaziele



Treiber für die Sektorenkopplung



Treiber Wirtschaft und Gesellschaft

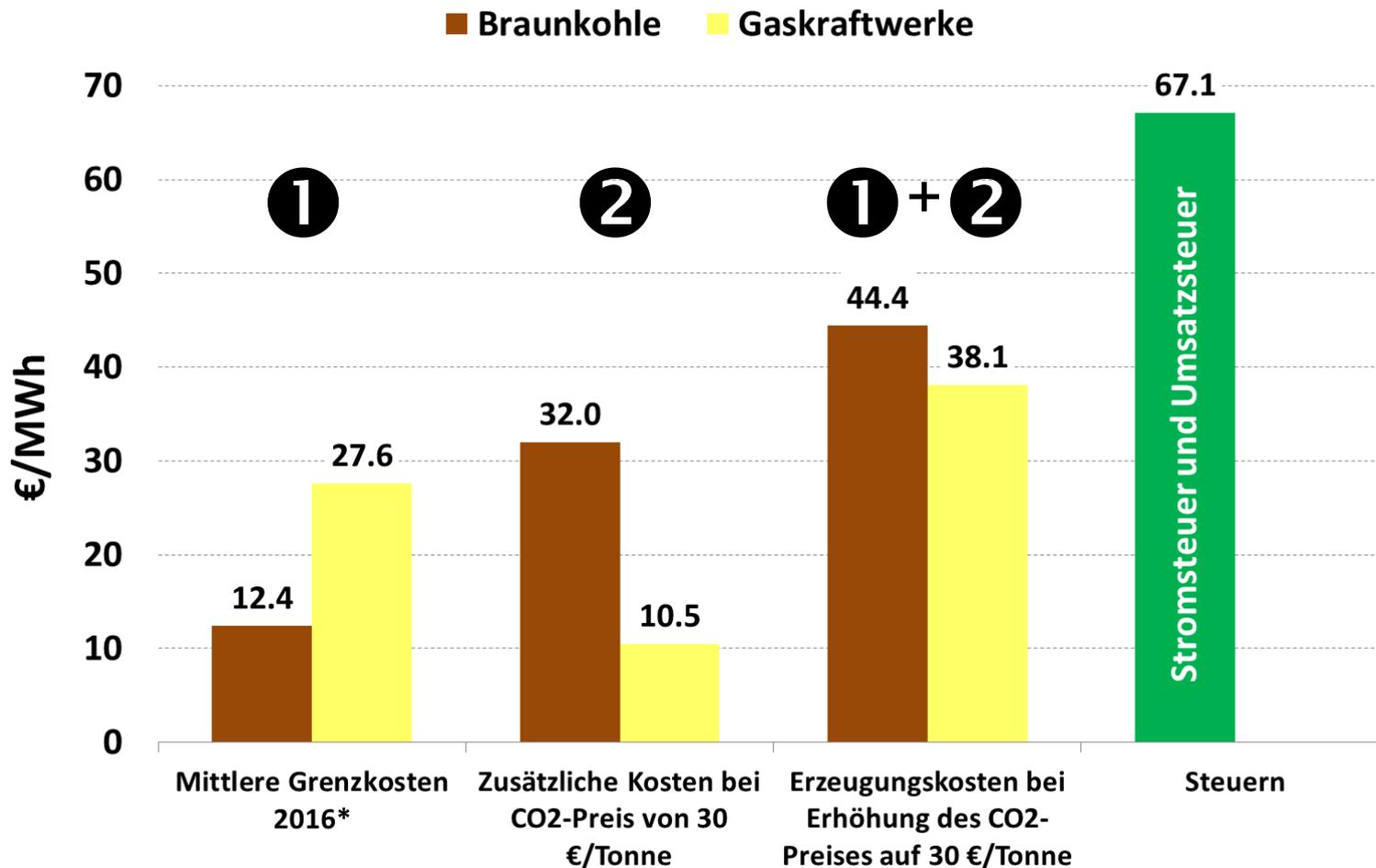
- Für viele **Verbraucher** (privat, gewerblich) ist Strom aus erneuerbaren Energien günstiger als Strom aus Netzbezug
 - Maximierung **Eigenverbrauch**
 - Einsatz von **Speichern**
 - Nutzung für Wärme und Fahrzeugladung → **Sektorenkopplung**
- Neue **Geschäftsmodelle** und neue **Marktteilnehmer**, z.B.
 - **Energie-Komplettlösungen** für Gebäudebesitzer oder gewerbliche Liegenschaften einschl. Energiemanagementsysteme
 - Daten-basierte **Energieüberwachung** und **Betriebsführung**, einschl. Einbeziehung von Vorhersage (Model Predictive Control)
 - **Mieterstrom-Modelle**, z.B. durch Wohnungsbaugesellschaften
 - **Quartierskonzepte** und Gebäude-übergreifende Optimierung
 - **Poolösungen**: virtuelle Kraftwerke und virtuelle Großverbraucher

Erfordernisse

- Damit die nächste Phase der Energiewende umgesetzt werden kann, ist eine Änderung des Marktrahmens notwendig
- Wichtigste übergreifende Elemente dabei
 - Einheitliches, wirksames, Sektoren übergreifendes CO₂-Preissignal
 - Abbau ungleicher Steuer- und Umlagenbelastung von Energieträgern
 - Zeitvariable Stromtarife
 - Geänderte Bepreisung für Bereitstellung von Netzkapazität und residualer Kraftwerksleistung
- Digitalisierung zentral für Markt- und Systemorganisation

Wirkung eines erhöhten Preises für CO₂-Emissionen

Beispiel 30 € pro Tonne



Inhalt

Einleitung

Optimierung von Transformationspfaden - Methodologie

Ergebnisse ausgewählter Szenarien

Die nächste Phase der Energiewende

Zusammenfassung

Zusammenfassung 1/2

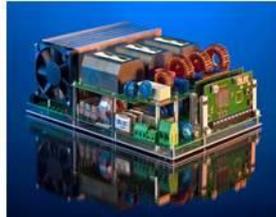
- Eine **klimaschutzkompatible Transformation** des Energiesystems scheint technisch grundsätzlich machbar
- Die Bedeutung von **elektrischem Strom** nimmt zu und dies wird zu einem signifikant steigenden Strombedarf führen
- **Fluktuierende Erneuerbare Energien** (Sonne, Wind) bestimmen die Stromerzeugung
- Wichtige **Technologie-Felder**: Wandler erneuerbarer Energien, Kurzzeitspeicher Strom und Wärme, Leistungselektronik, Wärmepumpen, dynamische thermische Kraftwerke (ggf. direkt mit H₂), CO₂-Abscheidung und Nutzung (gasförmige und flüssige, synthetische Brenn-/Kraftstoffe)
- **Kopplung der Sektoren** Strom, Wärme (Gebäude, Industrie) und Verkehr
- **Digitalisierung** wird eine Schlüsselrolle spielen, um den Betrieb und das Zusammenspiel des komplexen Energiesystems zu organisieren

Zusammenfassung 2/2

- **Transformationskosten** stark abhängig von Preisentwicklung fossiler Energie (Weltmarkt) und der Kostenbelastung von CO₂-Emissionen
- Nach erfolgter Transformation liegen die **jährlichen Gesamtkosten** in ähnlicher Höhe wie heute und sind viel unabhängiger von internationalen Energiemärkten
- Positive **volkswirtschaftliche Effekte** (nationale Wertschöpfung, Beschäftigung) sowie **externe Kosten** (z.B. Kosten für Gesundheit, Rückbau, Naturschutz) sind in der Betrachtung nicht berücksichtigt
- Wichtige Politikinstrumente: einheitliches, wirksames, Sektorenübergreifendes **CO₂-Preissignal** und **Abbau ungleicher Steuer- und Umlagenbelastung** von Energieträgern

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Fotos © Fraunhofer ISE



Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Hans-Martin Henning, Andreas Palzer

www.ise.fraunhofer.de

hans-martin.henning@ise.fraunhofer.de

andreas.palzer@ise.fraunhofer.de