

---

# DIE ENERGIEWENDE AUS SYSTEMTECHNISCHER PERSPEKTIVE

Zusammenspiel der Sektoren und Energieträger und die Rolle flexibler Energieumwandlung

---



Hans-Martin Henning

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Netzwerktreffen des BMWi-Forschungsnetzwerks  
„Flexible Energieumwandlung“

24. September 2019, Köln

[www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de)

# Inhaltsübersicht

Einführung: Motivation und Methodik

Ergebnisse der Systemanalyse

Zusammenfassung, Fazit

# Inhaltsübersicht

Einführung: Motivation und Methodik

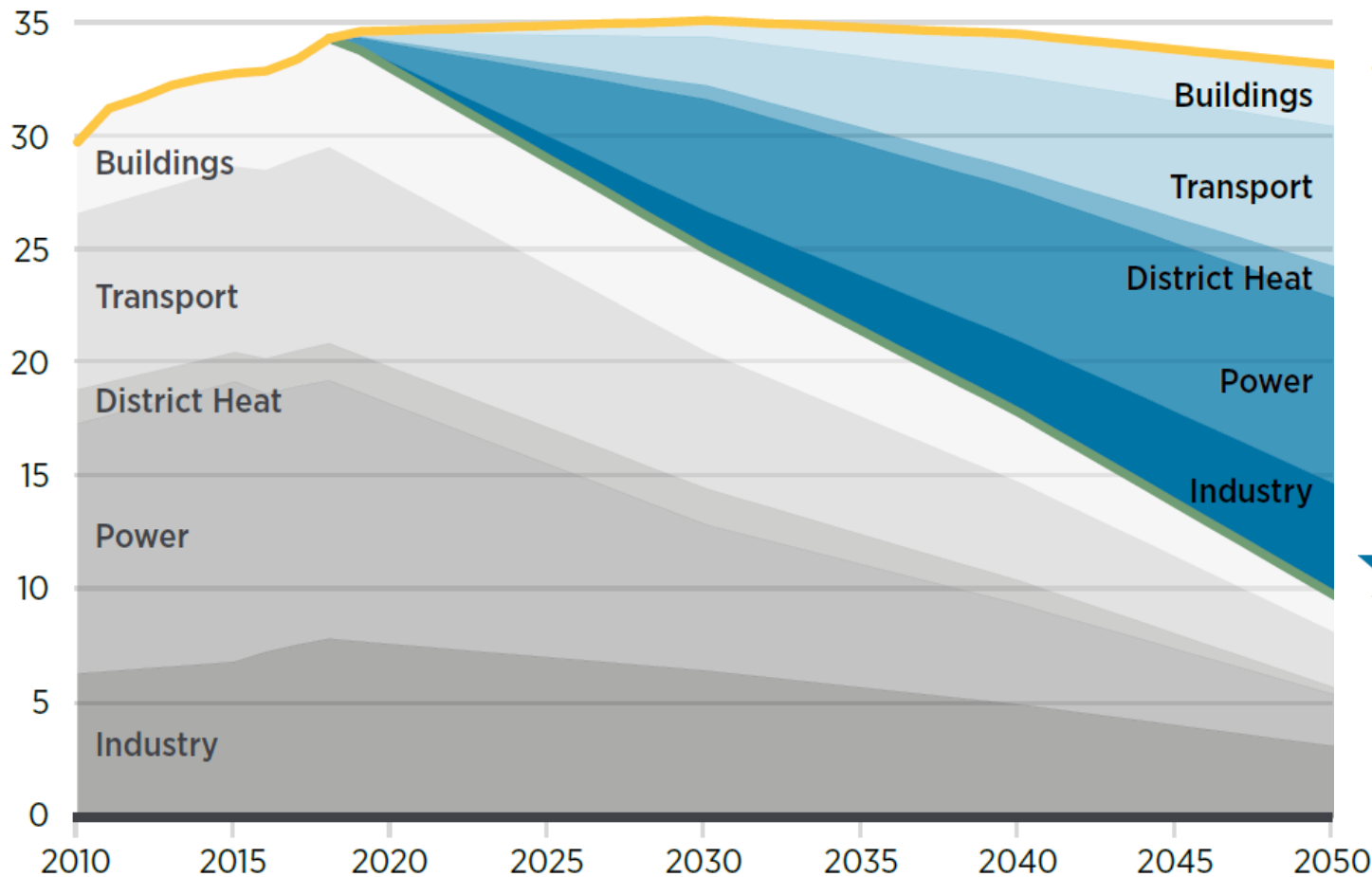
Ergebnisse der Systemanalyse

Zusammenfassung, Fazit

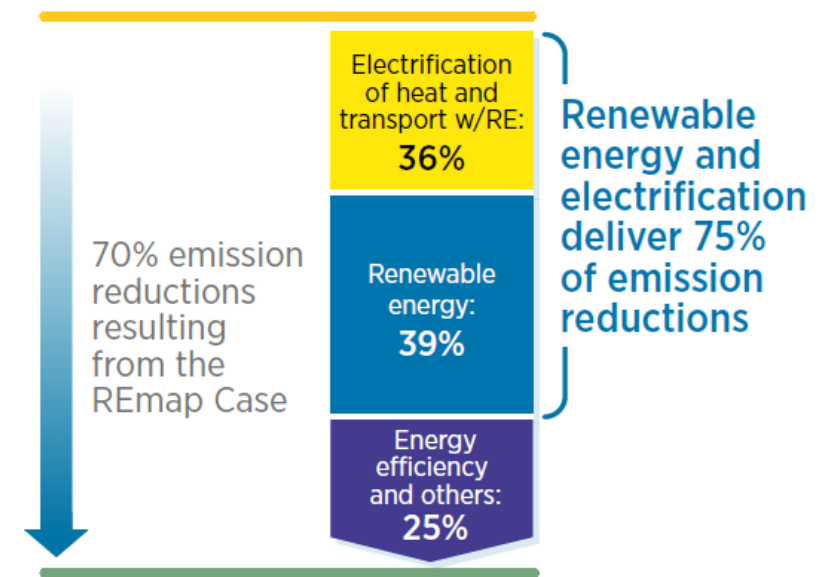
# Energiewende – Global

## Jährliche energiebezogene CO<sub>2</sub>-Emissionen

Annual energy-related CO<sub>2</sub> emissions, 2010-2050 (Gt/yr)



Reference Case: 33 Gt in 2050

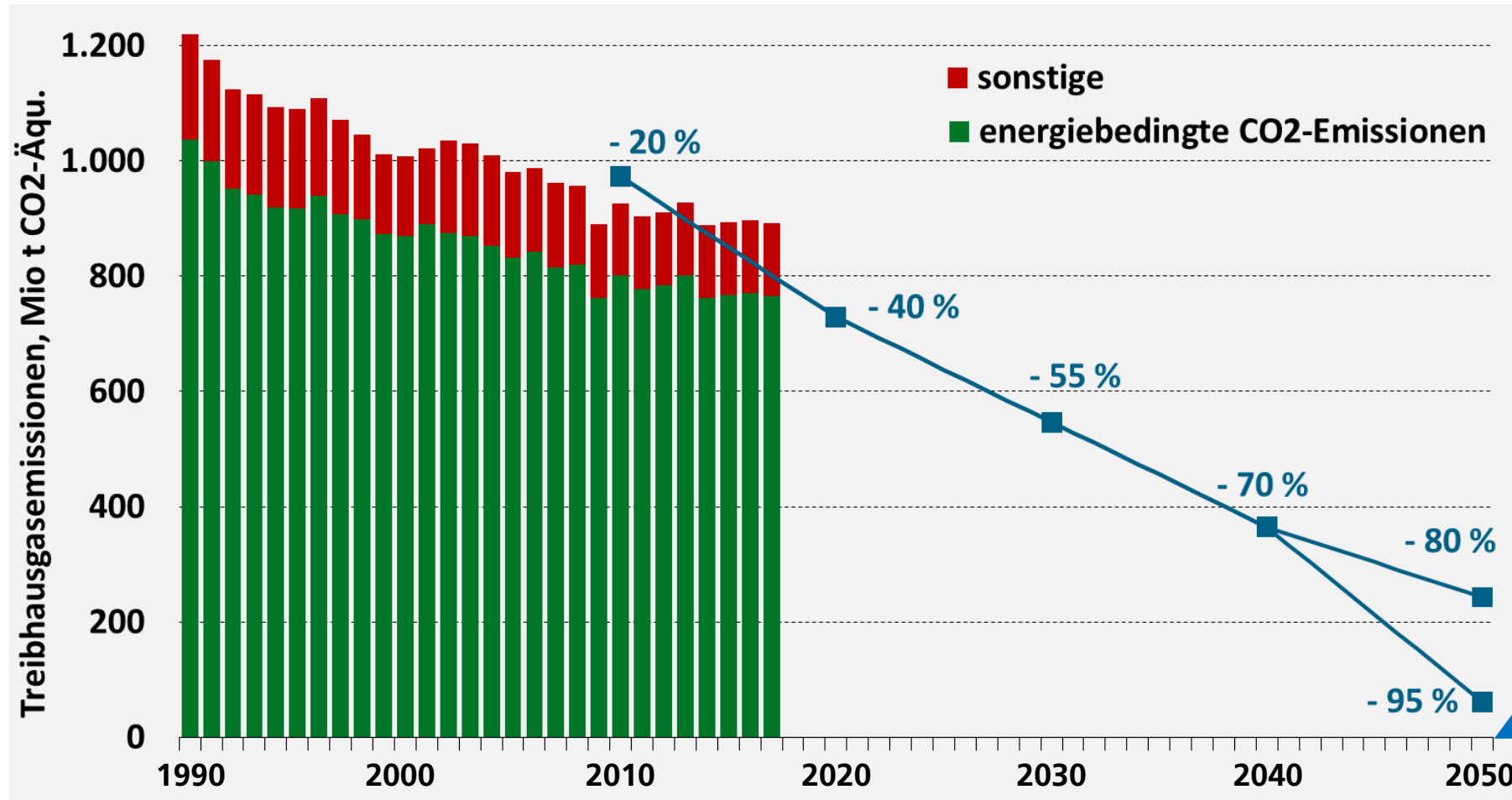


REmap Case: 9.8 Gt in 2050

- ➔ Erneuerbare Energien
- ➔ Elektrifizierung
- ➔ Energieeffizienz

# Motivation

## Treibhausgasemissionen Deutschland – Historie und Ziele



Bundeskanzlerin Merkel  
Mitte Mai 2019 und UN-  
Klimagipfel September  
2019

# Systemanalyse – Strom, Wärme, Verkehr

## Studien mit Beteiligung von Instituten der Fraunhofer-Gesellschaft (Auswahl)



Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland  
**BMWi**



Leitstudie Strommarkt  
**BMWi**

Wärmewende 2030  
**Agora Energiewende**



Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr  
**BMWi**



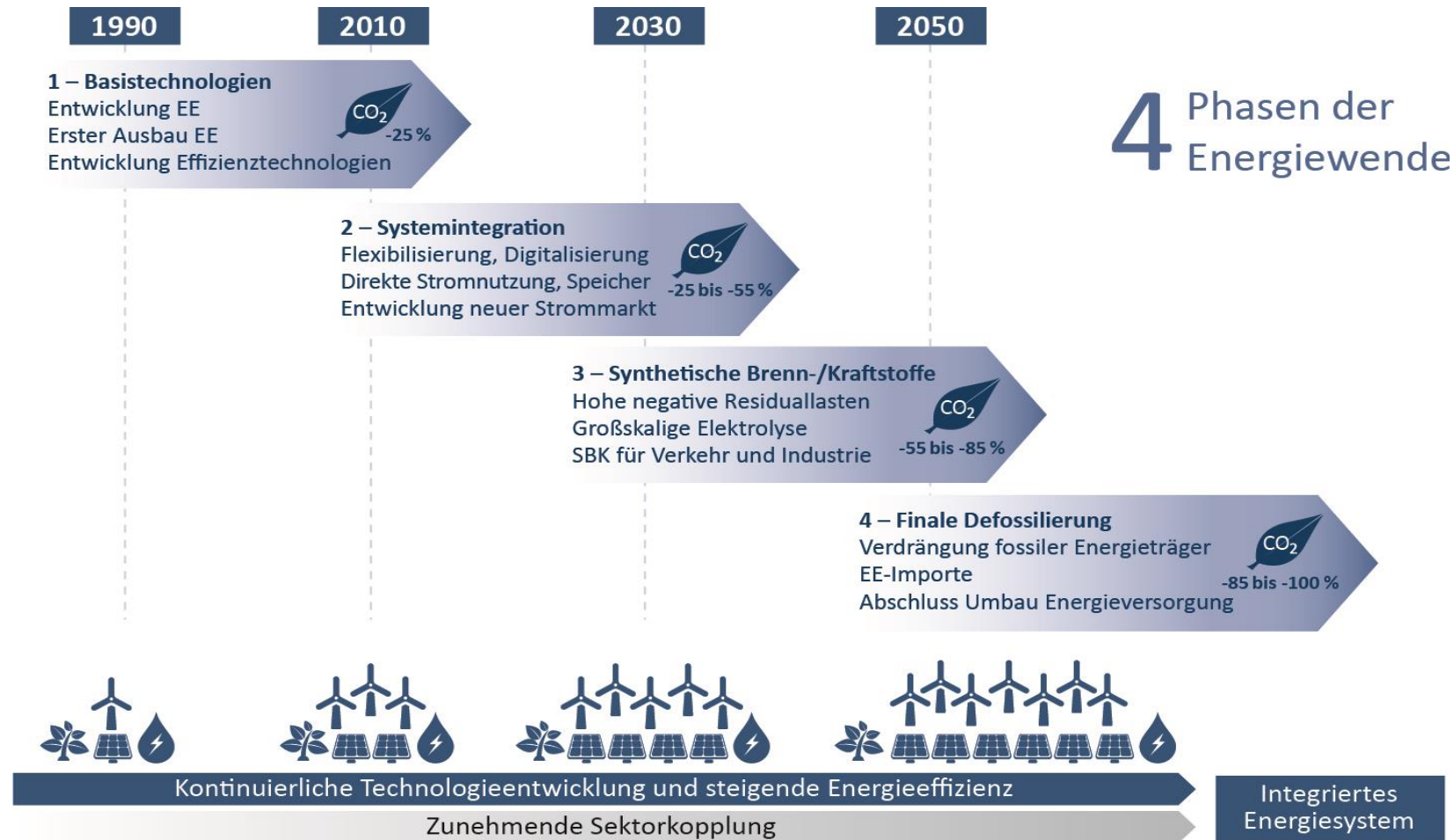
Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland  
**BMVI**



Energiesysteme der Zukunft – Sektorkopplung  
**BMBF**

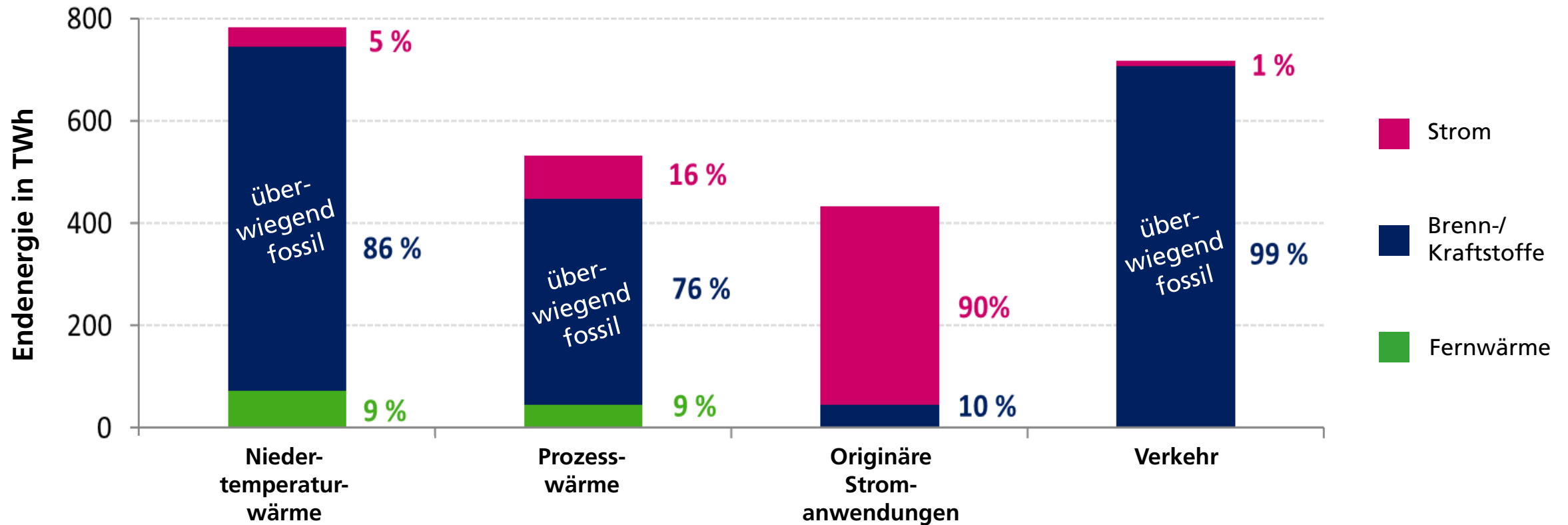
# »Sektorkopplung« – Optionen für die nächste Phase der Energiewende

## Phasen der Energiewende



# »Sektorkopplung« – Optionen für die nächste Phase der Energiewende

## Deutscher Energieverbrauch von heute in den vier Nutzungsbereichen





# Systemanalyse

## Regenerative Energien Modell »REMod«

Modell zur Simulation und Optimierung  
der Entwicklung nationaler Energiesysteme

Einbeziehung aller  
Verbrauchssektoren und  
Energieträger

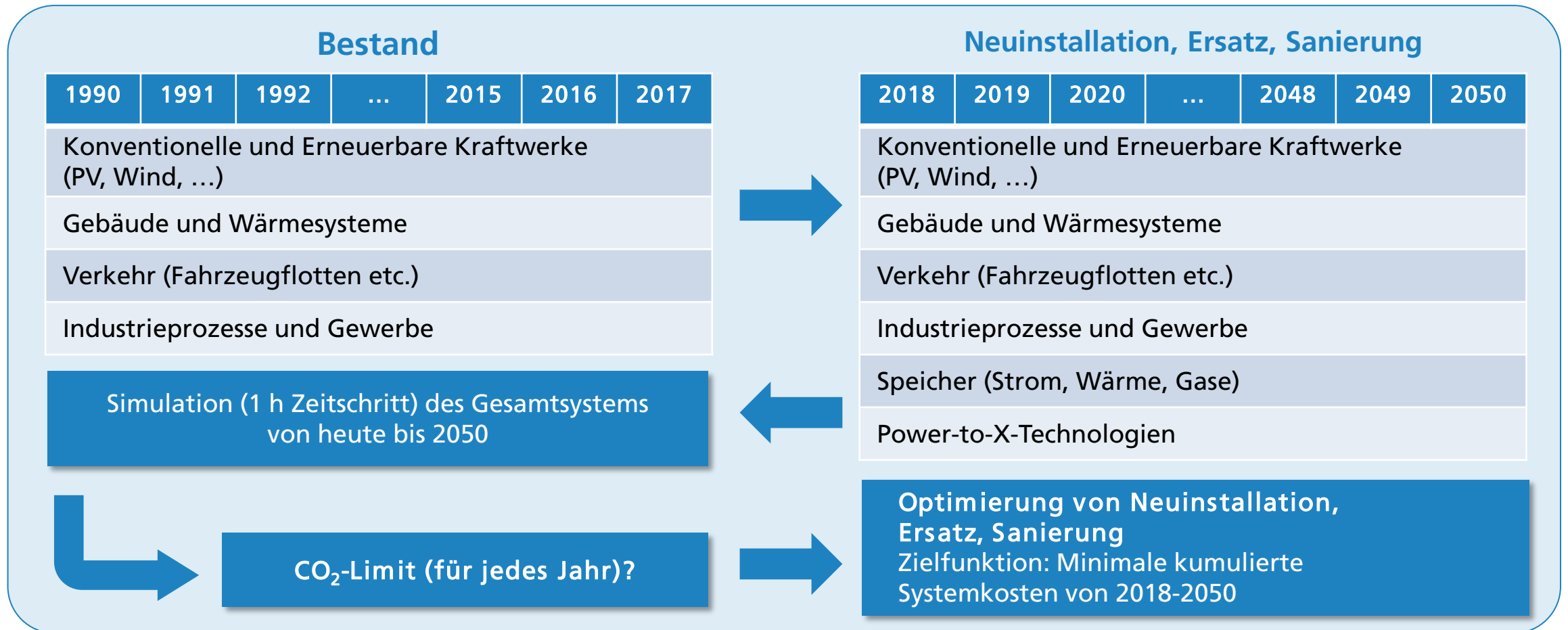
Minimierung der  
Transformationskosten

Stundengenaue Modellierung



# Systemanalyse

## Methodik



# Systemanalyse

## Untersuchte Transformationspfade (Auswahl)

Name	CO <sub>2</sub> Ziel	Wesentliche Charakteristika
Keine Restriktionen	Minus 85 % in 2050 (verglichen mit 1990)	<input type="checkbox"/> Keine Begrenzung direkter Stromnutzung (z.B. Wärmepumpen, Verkehr)
Wasserstoff		<input type="checkbox"/> Hoher Wasserstoffanteil im Verkehr (Brennstoffzellen-Antriebe) <input type="checkbox"/> Hoher Anteil von H <sub>2</sub> im Gasnetz
Power-to-Gas Power-to-Liquid (P2G/P2L)		<input type="checkbox"/> Hoher Anteil von Methan bzw. flüssigen Kraftstoffen im Autoverkehr <input type="checkbox"/> Methannutzung auch noch in Gebäuden <input type="checkbox"/> Effizienzgewinne im Bereich der Industrie
Hocheffizienz		<input type="checkbox"/> Keine Begrenzung direkter Stromnutzung <input type="checkbox"/> Wesentliche Fortschritte bei der Implementierung von Effizienztechnologien <input type="checkbox"/> Wesentliche Fortschritte Reduktion Verbrauch



AG »Sektorkopplung« im BMBF-geförderten Projekt »Energiesysteme der Zukunft (ESYS)«, durchgeführt von den deutschen Wissenschaftsakademien unter Federführung von acatech (Leitung Eberhard Umbach, Hans-Martin Henning)

Veröffentlichungen November 2017

# Inhaltsübersicht

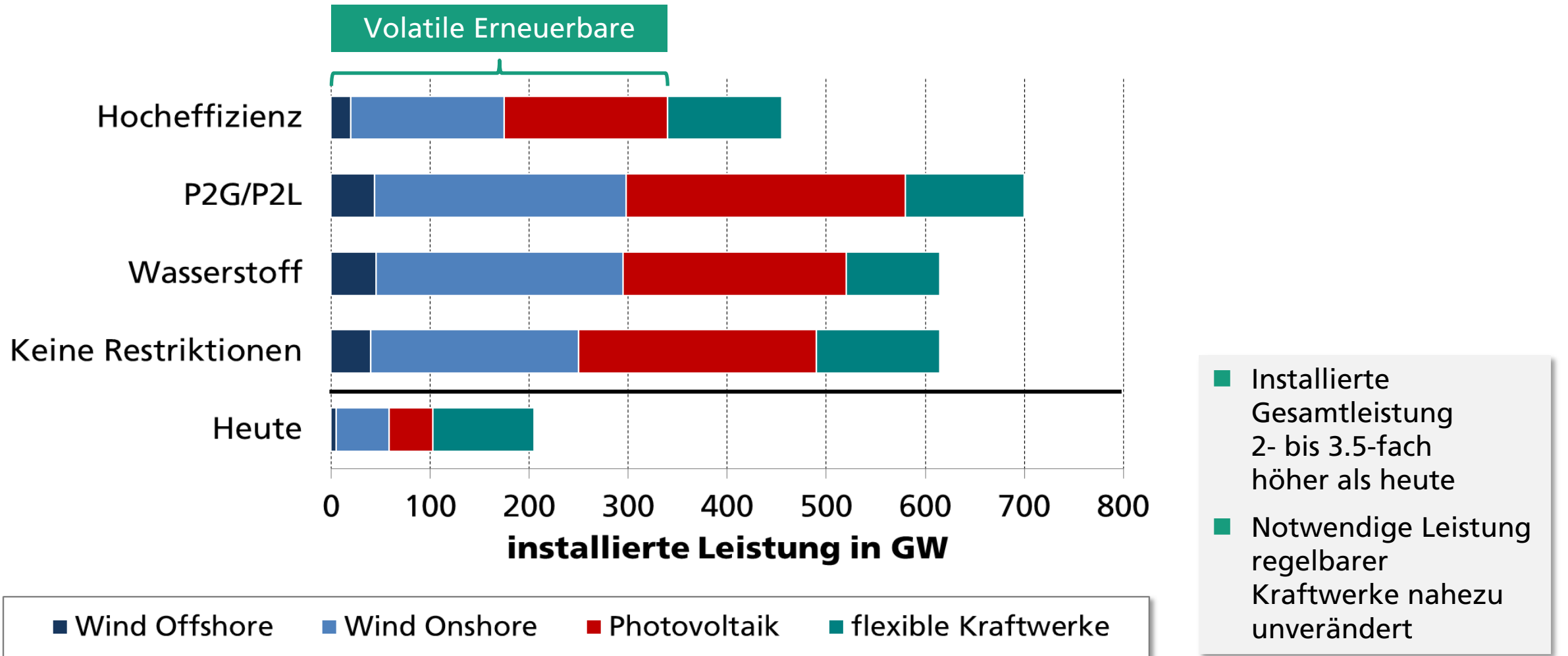
Einführung: Motivation und Methodik

**Ergebnisse der Systemanalyse**

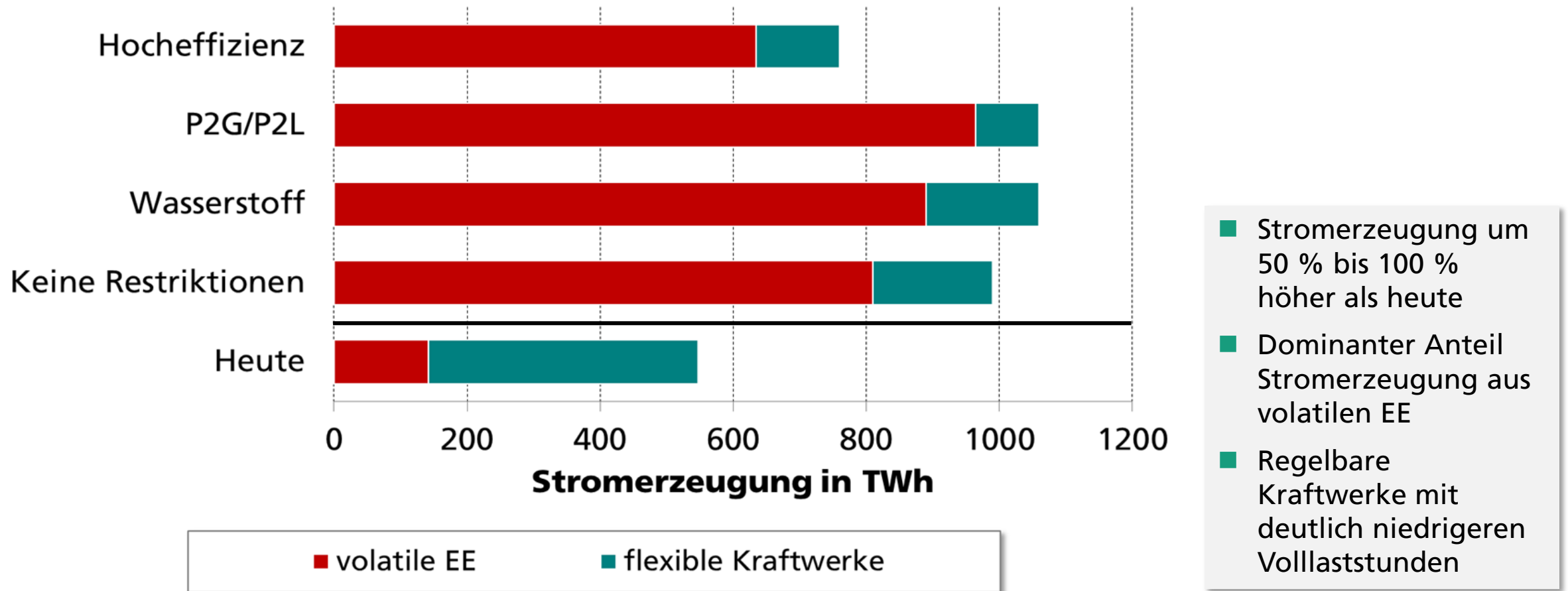
Zusammenfassung, Fazit

# Systemanalyse – Installierte Leistung in GW

## Heute und 2050 (CO<sub>2</sub>-Absenkung 85 %)

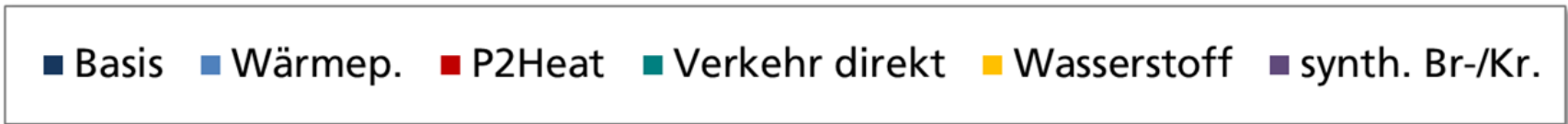
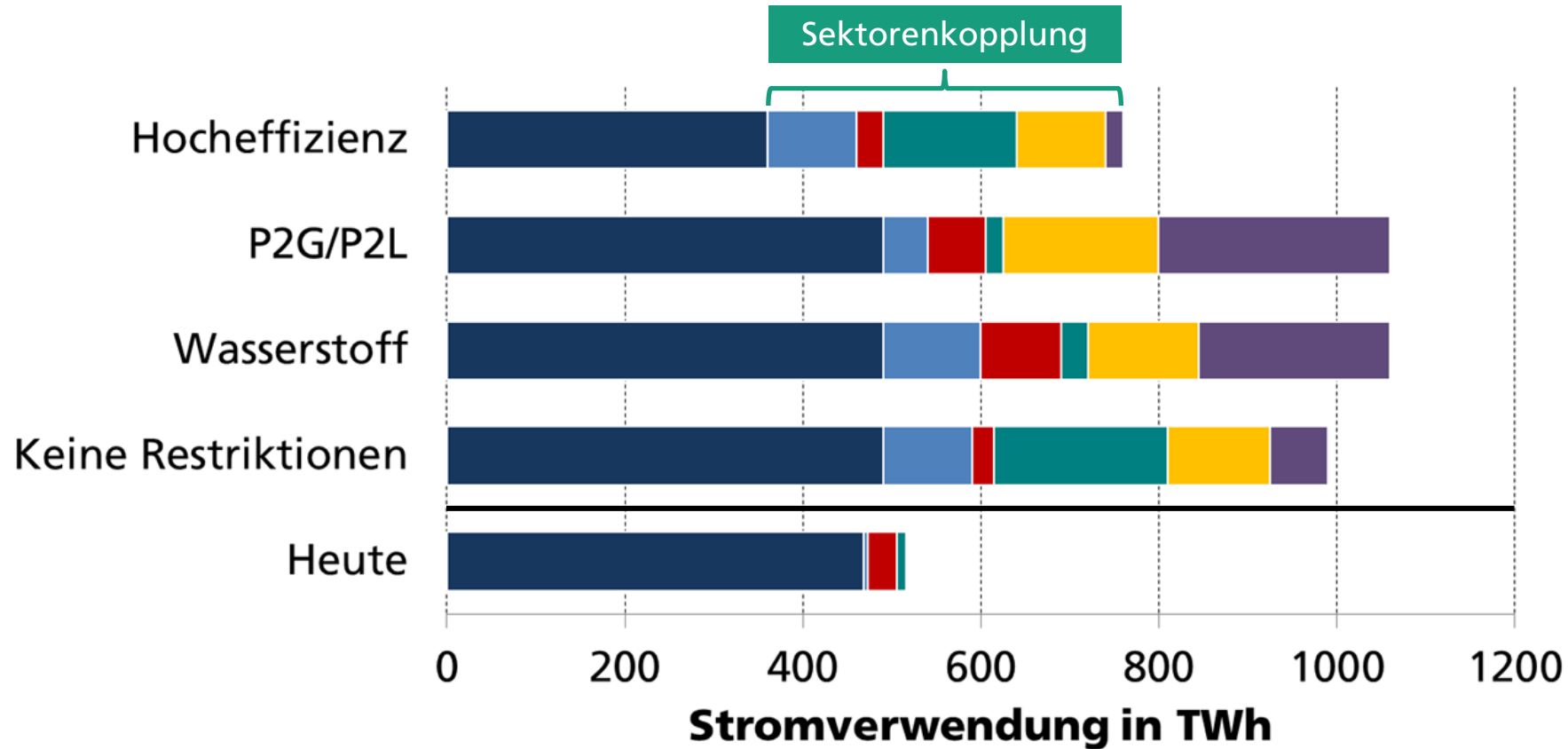


# Systemanalyse – Jährliche Stromerzeugung (netto) in TWh Heute und 2050 (CO<sub>2</sub>-Absenkung 85 %)



# Systemanalyse – Stromverwendung in TWh

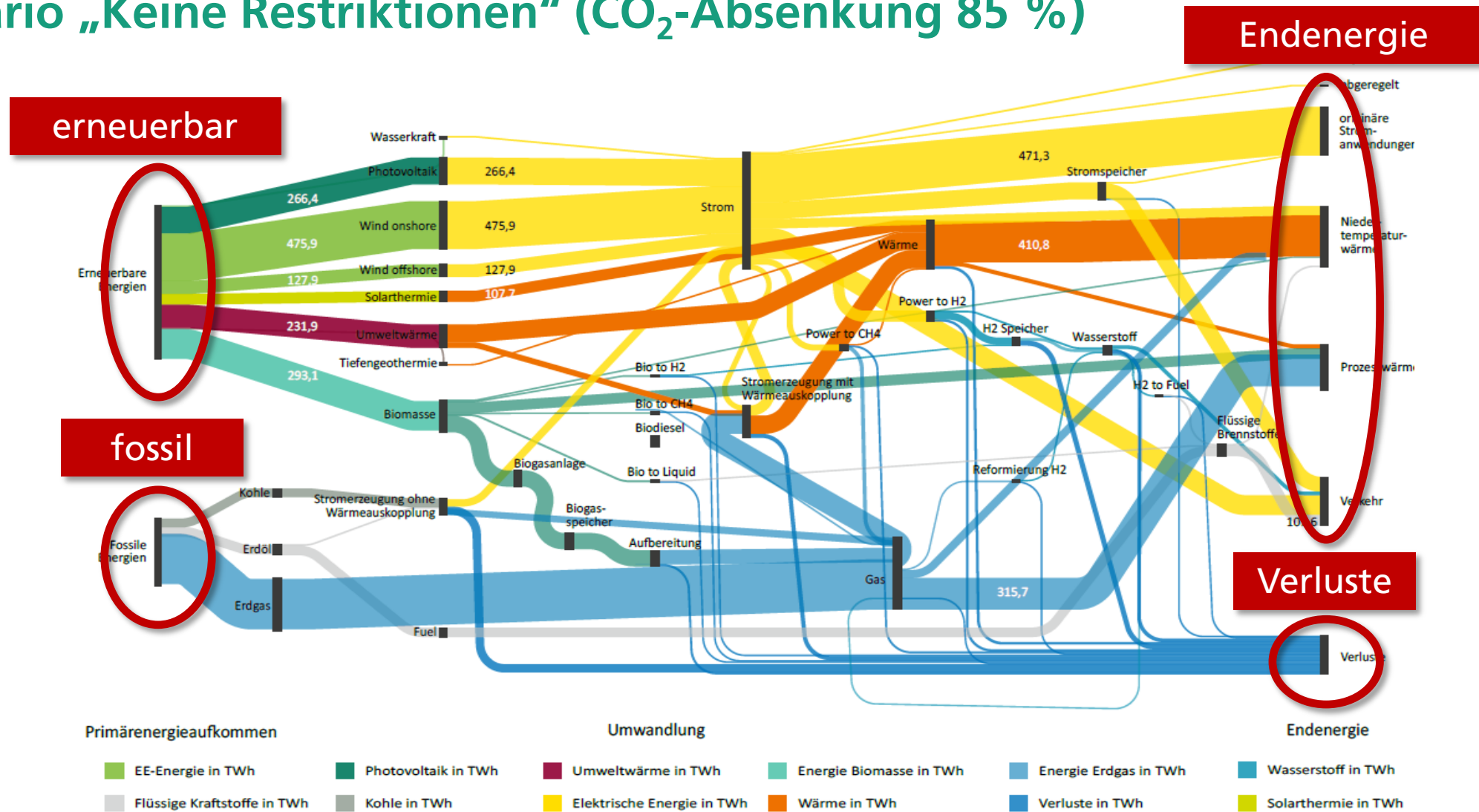
## Heute und 2050 (CO<sub>2</sub>-Absenkung 85 %)



- Stromerzeugung um 50 % bis 100 % höher als heute aufgrund Sektorenkopplung
- Direkte und indirekte (H<sub>2</sub>, PtG, PtL) Stromnutzung in Wärme, Verkehr und Industrie

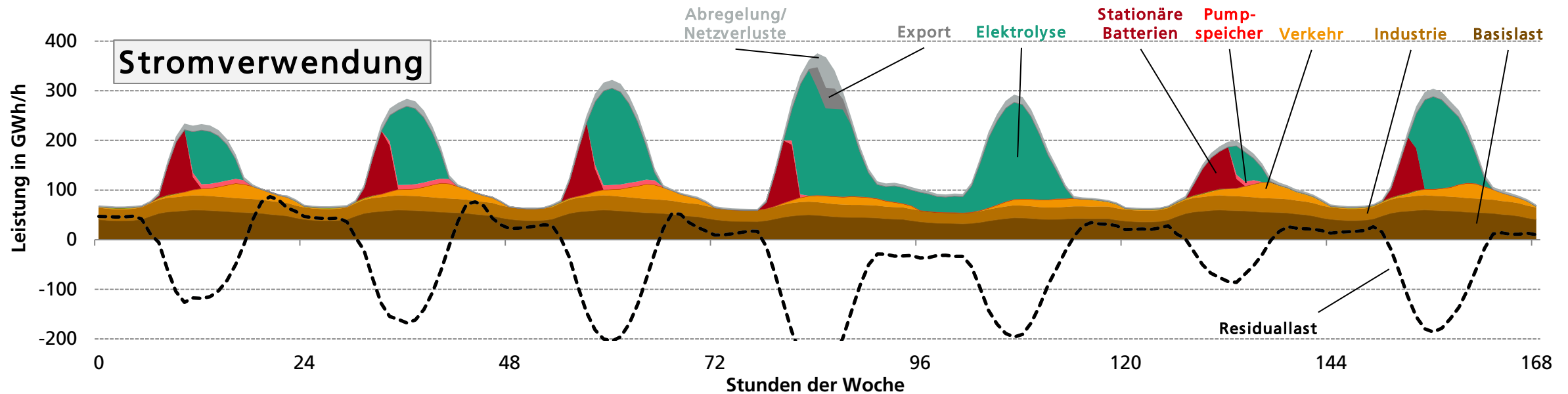
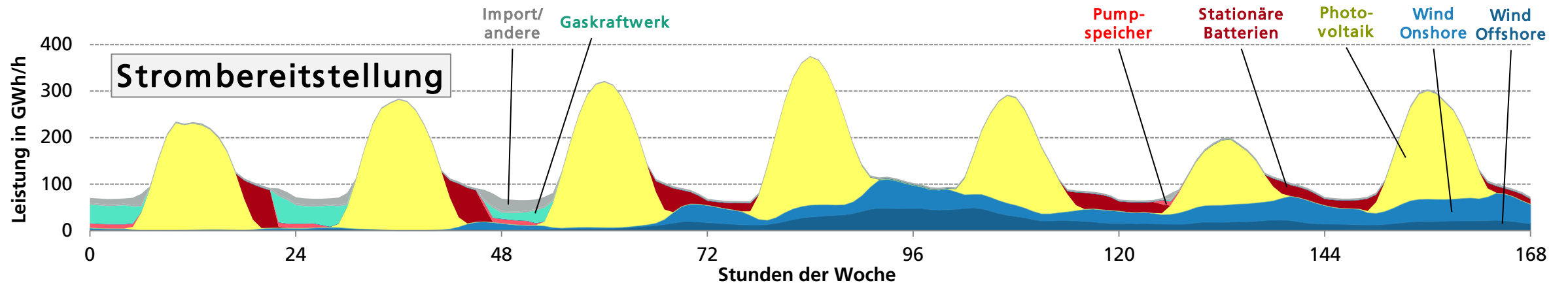
# Systemanalyse – Sektorgekoppelte Energieflüsse im Jahr 2050

## Szenario „Keine Restriktionen“ (CO<sub>2</sub>-Absenkung 85 %)

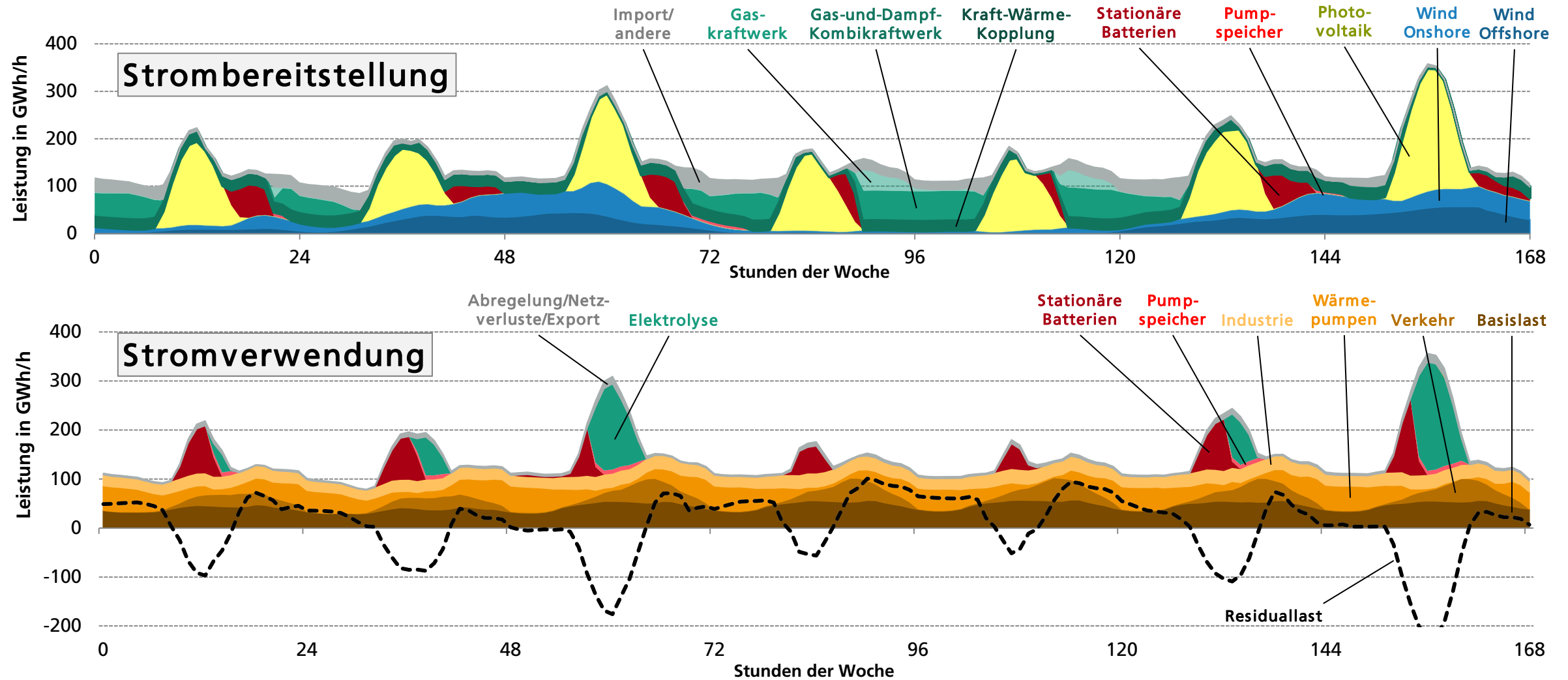




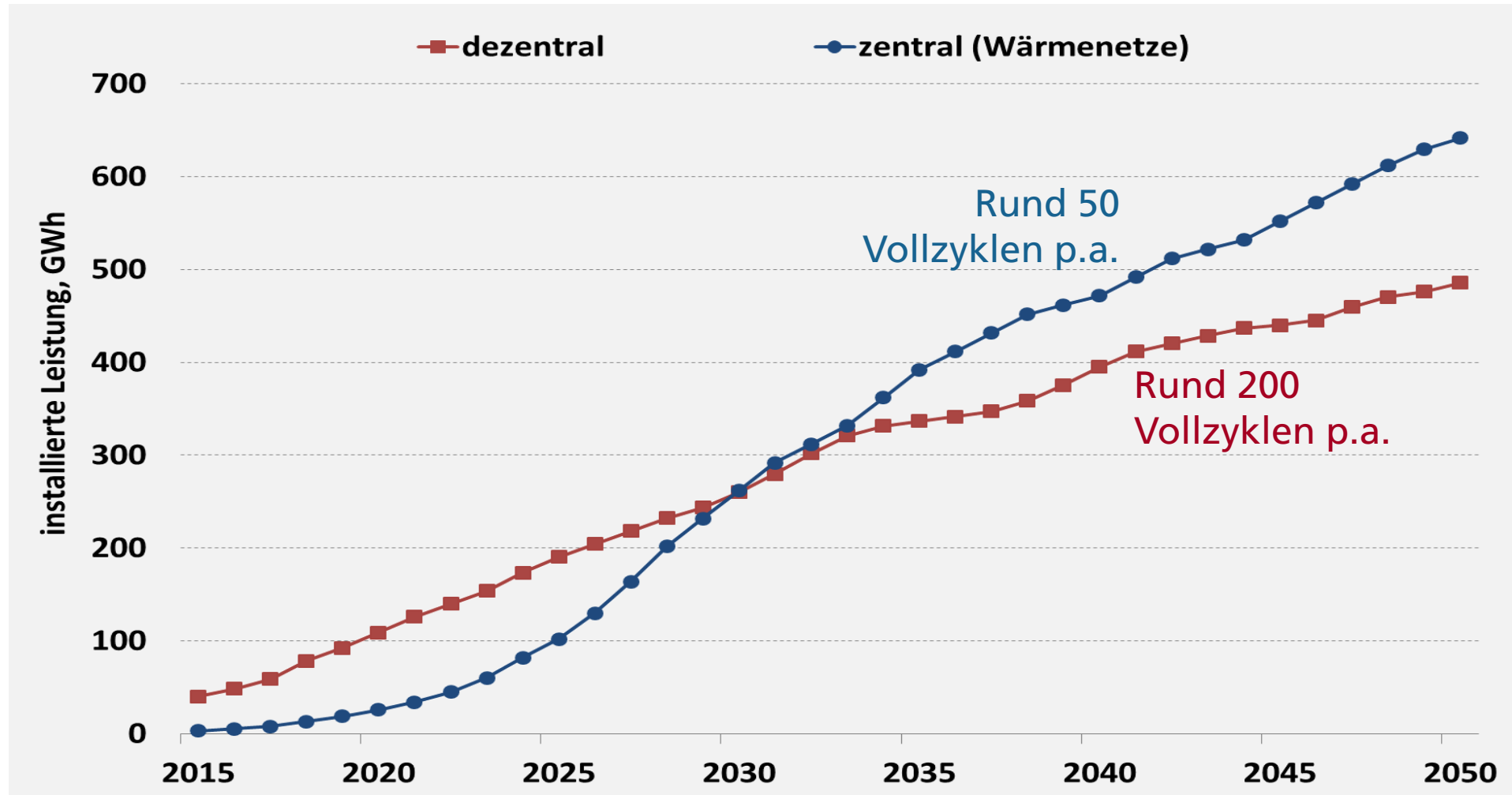
# Systemanalyse – Beispiel Zeitverlauf Sommerwoche 2050



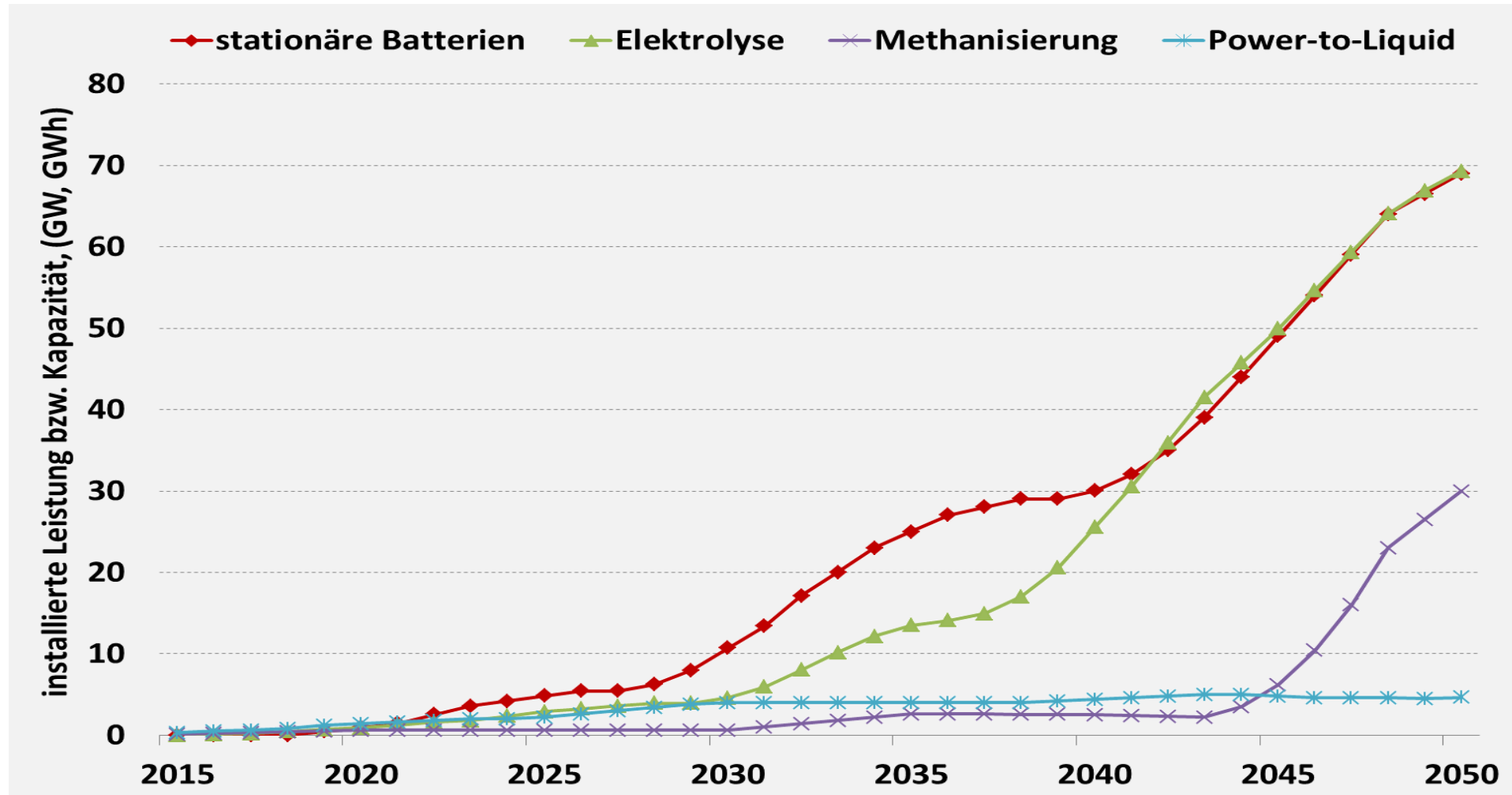
# Systemanalyse – Beispiel Zeitverlauf Winterwoche 2050



# Systemanalyse – Entwicklung Wärmespeicher (CO<sub>2</sub>-Absenkung 85 %)

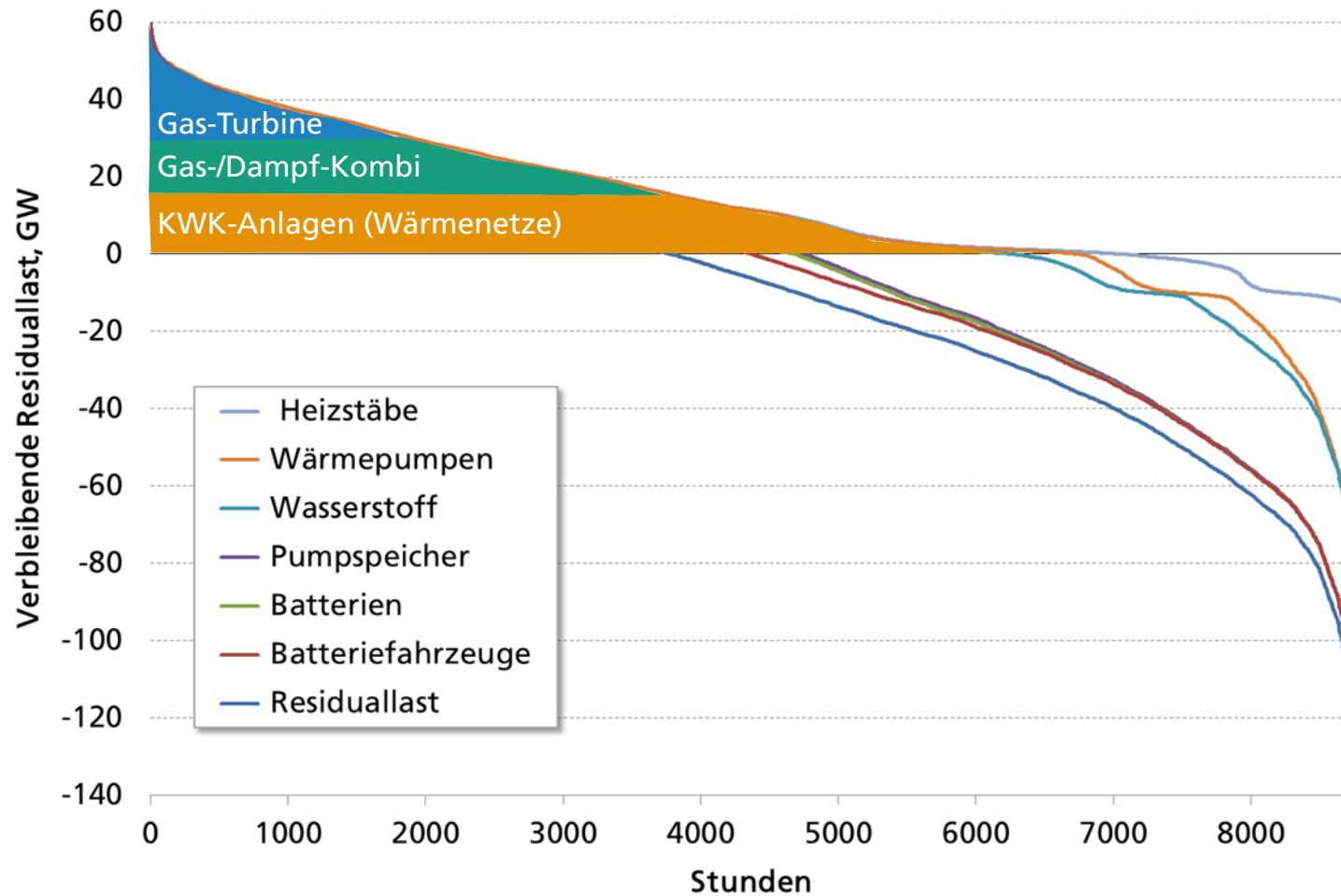


# Systemanalyse – Entwicklung stationärer Batterien und synthetischer Energieträger (CO<sub>2</sub>-Absenkung 85 %)



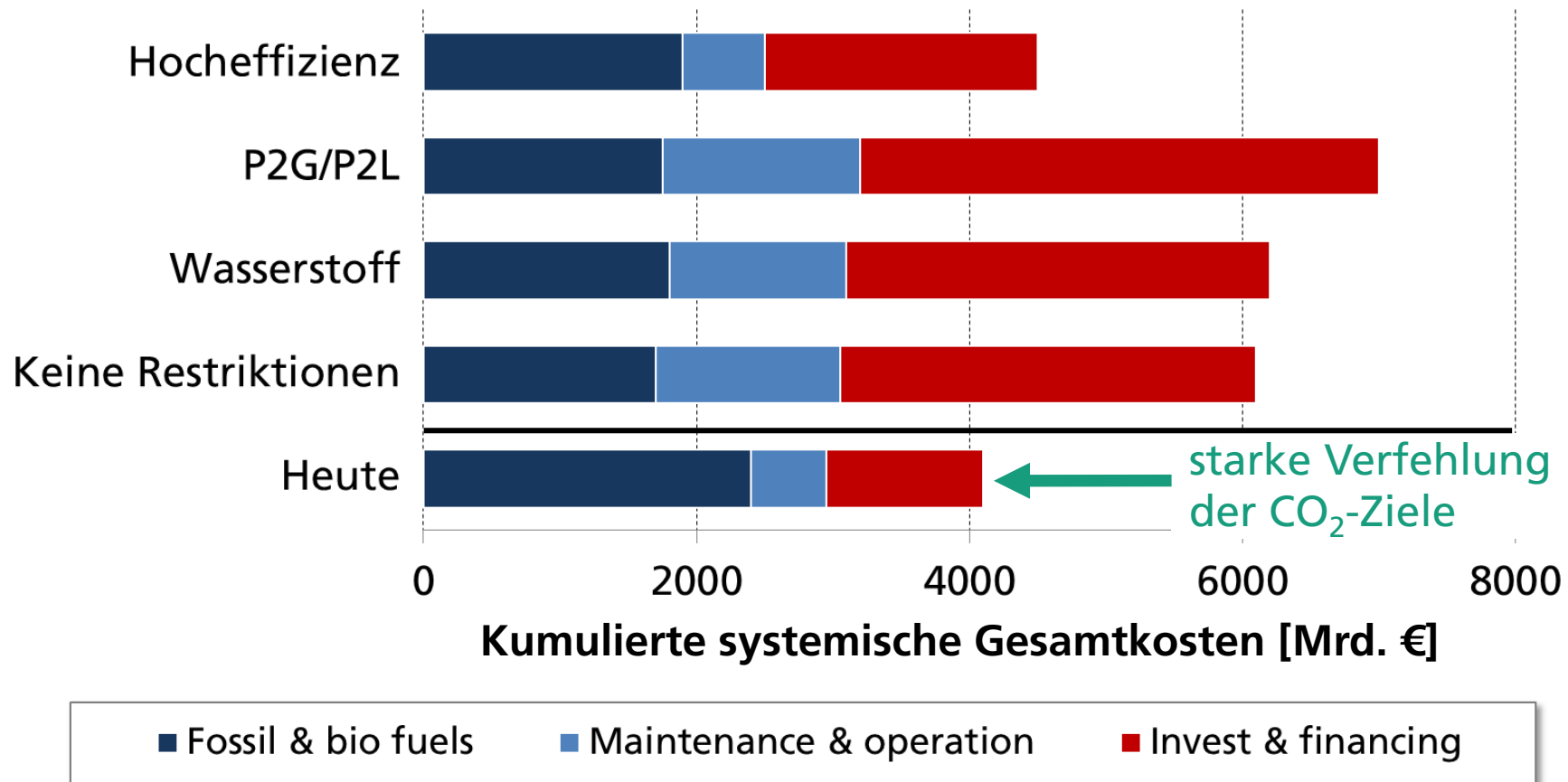
# Regelbare Kraftwerke

## Sequentielle Abdeckung verbleibender positiver Residuallast



Jahresdauerlinien Residuallast unter Einbeziehung der verschiedenen (anteilig) regelbaren Lasten

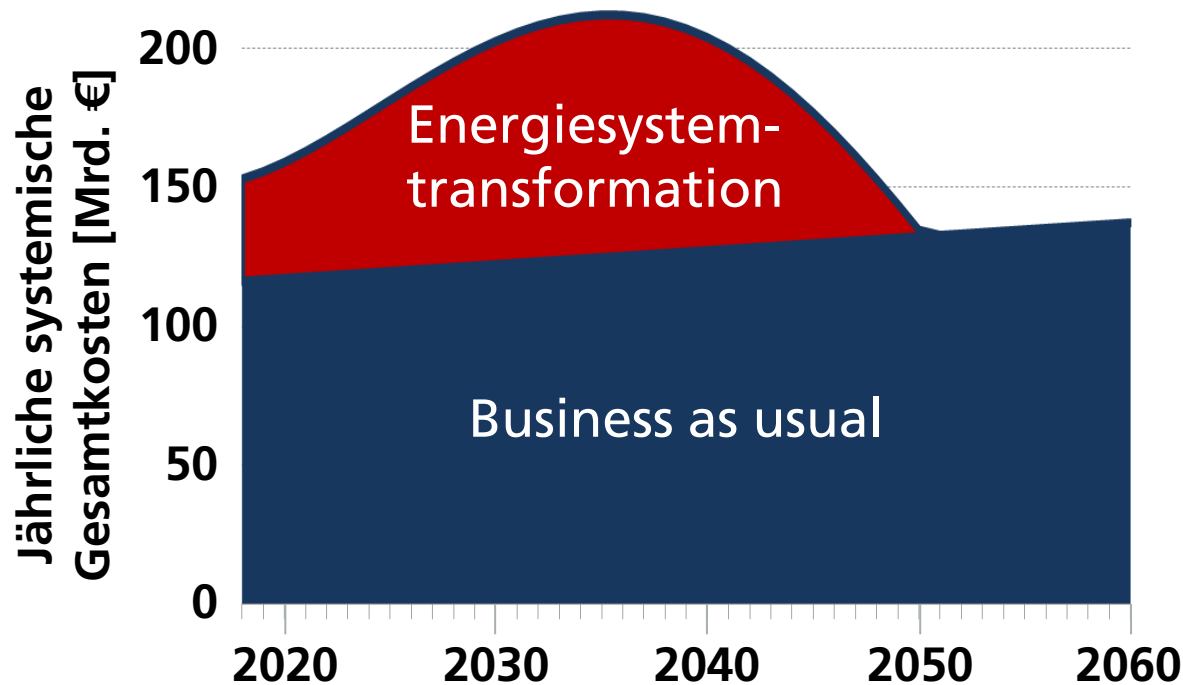
# Systemanalyse – Kumulierte systemische Gesamtkosten bis 2050 in Mrd. €



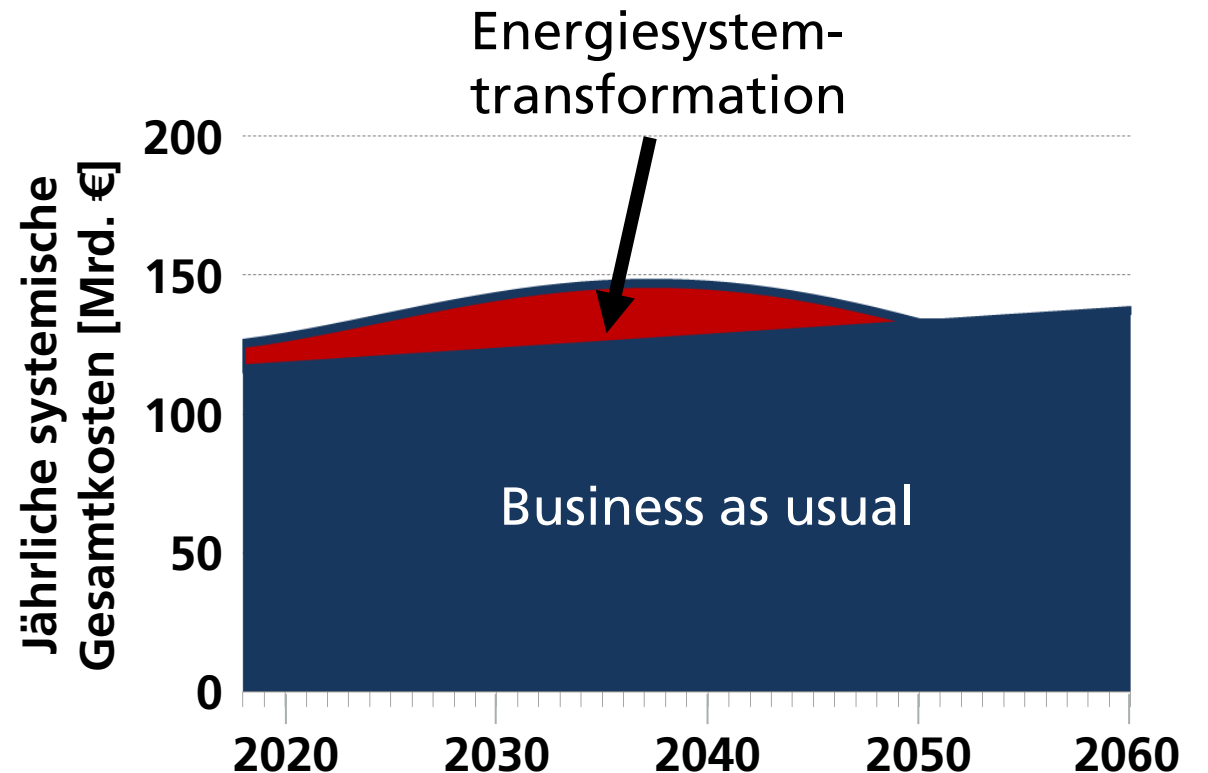
■ Kumulierte systemische Mehrkosten der Klimaschutzpfade 500 Mrd. € bis 2500 Mrd.€ (15 Mrd. € bis 75 Mrd. € p.a. entsprechend 0.5 % bis 2.5 % des BIP<sub>2018</sub>)

# Systemanalyse – Entwicklung der jährlichen systemischen Gesamtkosten in Mrd. €

## Szenario »Keine Restriktionen«



## Szenario »Hocheffizienz«



# Inhaltsübersicht

Einführung: Motivation und Methodik

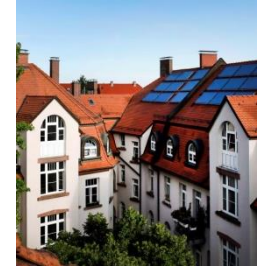
Ergebnisse der Systemanalyse

**Zusammenfassung, Fazit**



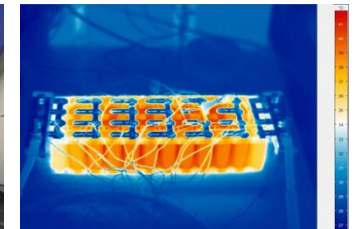
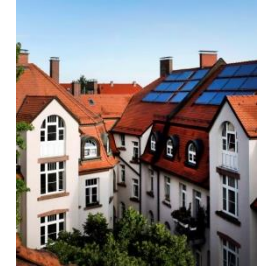
# Fazit aus Sicht der Systemanalyse 1/2

- Transformation des Energiesystems unter Einhaltung der klimapolitischen Ziele scheint grundsätzlich **technisch machbar**
- Erneuerbare Energien (insbesondere PV und Wind) werden **dominant**
- Effizienz und **Verbrauchsreduktion** essentiell (Kosten, Akzeptanz)
- Bedeutung von **Strom** steigt → Zunahme um 50 % bis 100 %
- **Sektorenkopplung** → Nutzung von Strom (direkt, indirekt) für Wärme, Verkehr und Industrie
- **Systemintegration** der (volatilen) EE
  - **Flexible Stromerzeugung**: regelbare Kraftwerke → KWK (thermische KW, Brennstoffzellen), GuD, Gasturbinen
  - **Flexible Stromnutzung**: Lastmanagement
  - **Speichertechnologien**

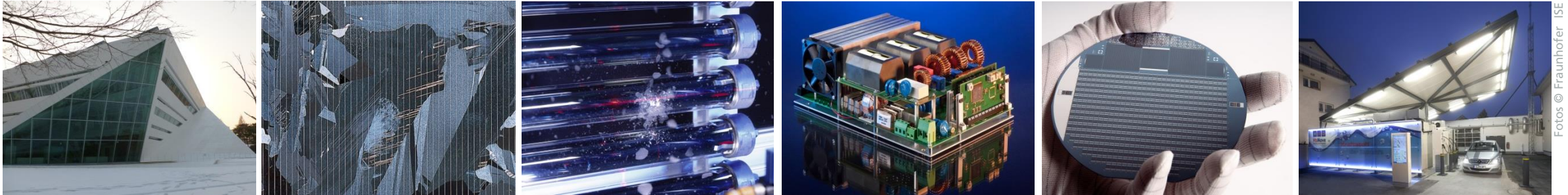


# Fazit aus Sicht der Systemanalyse 2/2

- Speichertechnologien: Vielfalt im Kontext des Sektor-gekoppelten Gesamtsystems
  - **Batterieentwicklung** getrieben durch Elektromobilität
  - Bei **Wärmespeicherung** wichtigste Entwicklungsbedarfe bei Hochtemperatur und auf Systemebene
  - **Wasserstoff** zentraler Energieträger für Sektorkopplung und vielfältigen Einsatz in Mobilität und Industrie
- Wichtige Elemente für **Weiterentwicklung des Marktrahmens**
  - Einheitlicher, wirksamer **Preis für CO<sub>2</sub>-Emissionen** – über alle Sektoren und Energieträger
  - Anreizmechanismen für **flexiblen, systemdienlichen Betrieb** von Erzeugern und Lasten



# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Prof. Dr. Hans-Martin Henning

[www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de)

[hans-martin.henning@ise.fraunhofer.de](mailto:hans-martin.henning@ise.fraunhofer.de)