
100% Erneuerbare Energien für Strom und Wärme in Deutschland



Hans-Martin Henning

Fraunhofer-Institut für Solare
Energiesysteme ISE

Veranstaltung der BAG-Energie
„100% Erneuerbare Energien –
Konzepte für die Energiewende“

Berlin, 18. Januar 2013

www.ise.fraunhofer.de

Agenda

- Einführung
- Methodik
- Technische Potenziale
- Ergebnisse
 - 100 % EE für Strom und Wärme
 - Weniger als 100 %
- 100 % für den gesamten Energiesektor?
- Zusammenfassung

Agenda

- Einführung
- Methodik
- Technische Potenziale
- Ergebnisse
 - 100 % EE für Strom und Wärme
 - Weniger als 100 %
- 100 % für den gesamten Energiesektor?
- Zusammenfassung

Einführung 1/2

Leitfragen

- Ist es möglich, den Energiebedarf Deutschlands mit 100% EE zu decken?
- Falls ja: wie sehen optimale, konsistente Systeme aus?
- Und was kosten sie?

Vorgehen

- Erster Schritt
 - Umfassendes Modell für Strom und Wärme (Heizung, Warmwasser), d.h. Elektrizitäts- und Gebäudesektor (Wohnungs- und Nichtwohnungsbau)
 - Extremszenario
 - Kein Strom-Austausch mit Nachbarländern
 - Nur inländische EE

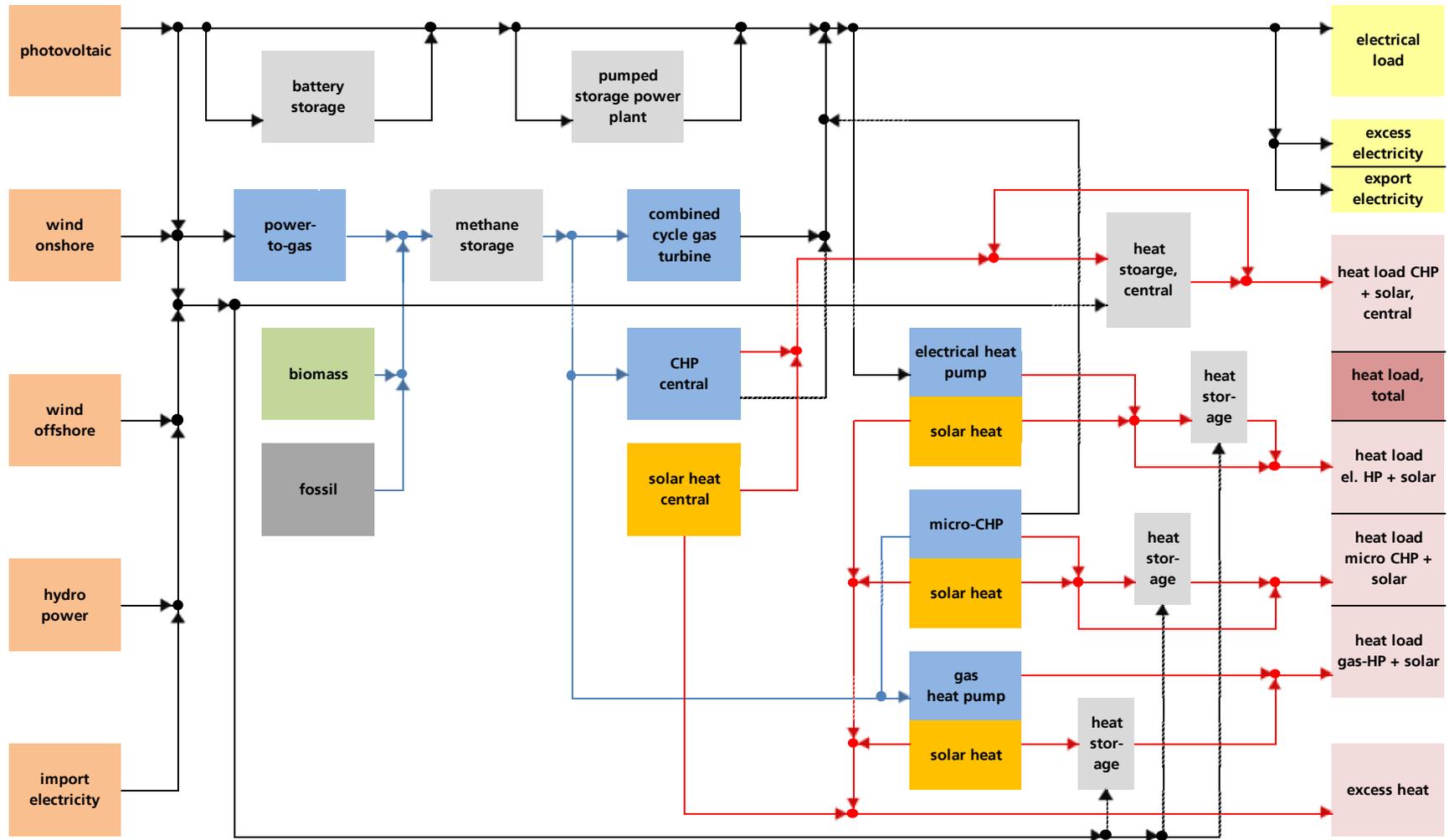
Einführung 2/2

- Zunächst nicht einbezogen
 - Mobilität auf Basis fossiler Brennstoffe
 - Industrielle Prozesse auf Basis fossiler Brennstoffe
- Die detaillierte Analyse umfasst somit 62 % des heutigen Primärenergiebedarfs
- Gesamtenergiebedarf wird in zweitem Schritt bilanziell erfasst

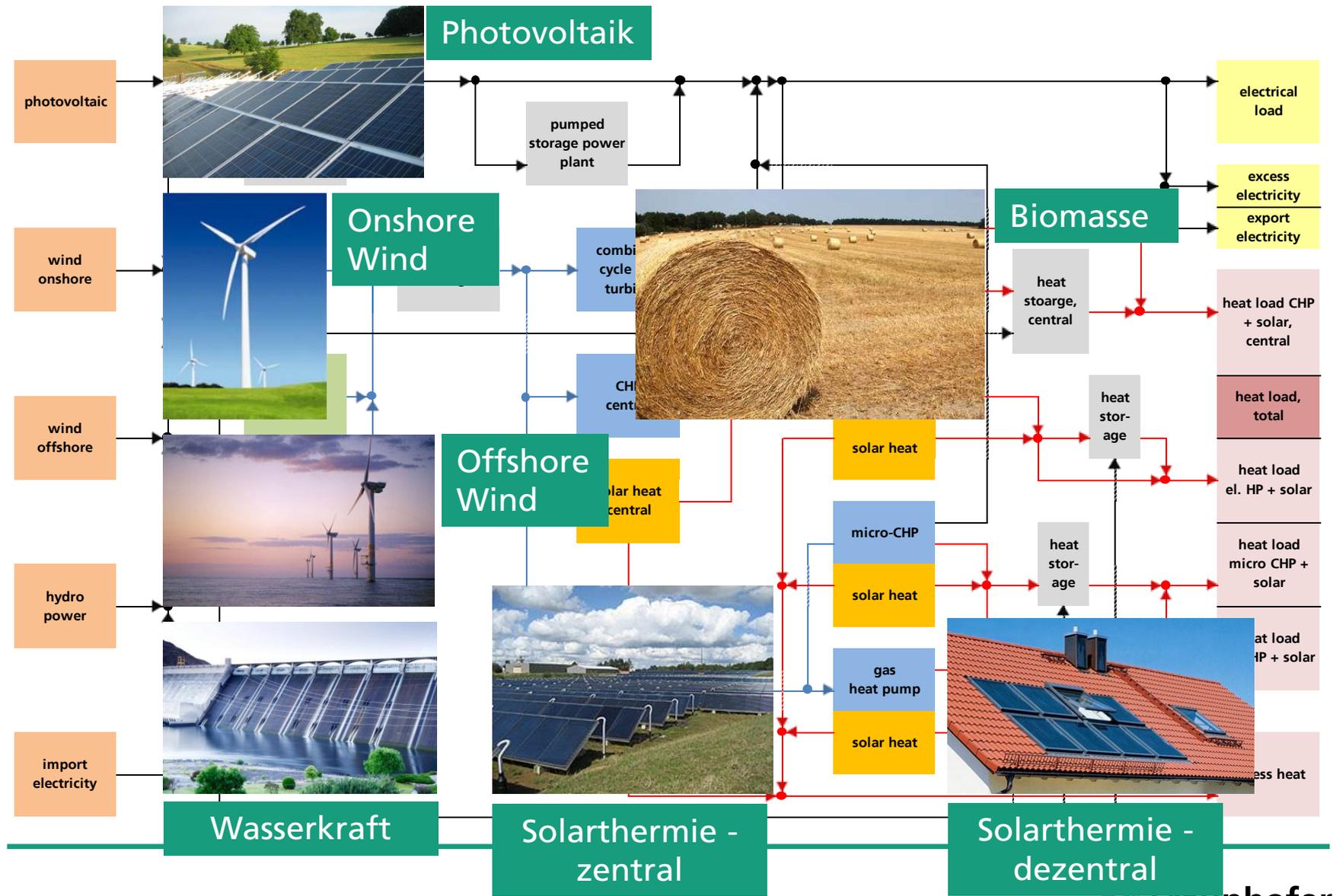
Agenda

- Einführung
- Methodik
- Technisches Potential
- Ergebnisse
 - 100 % EE für Strom und Wärme
 - Weniger als 100 %
- 100 % für den gesamten Energiesektor?
- Zusammenfassung

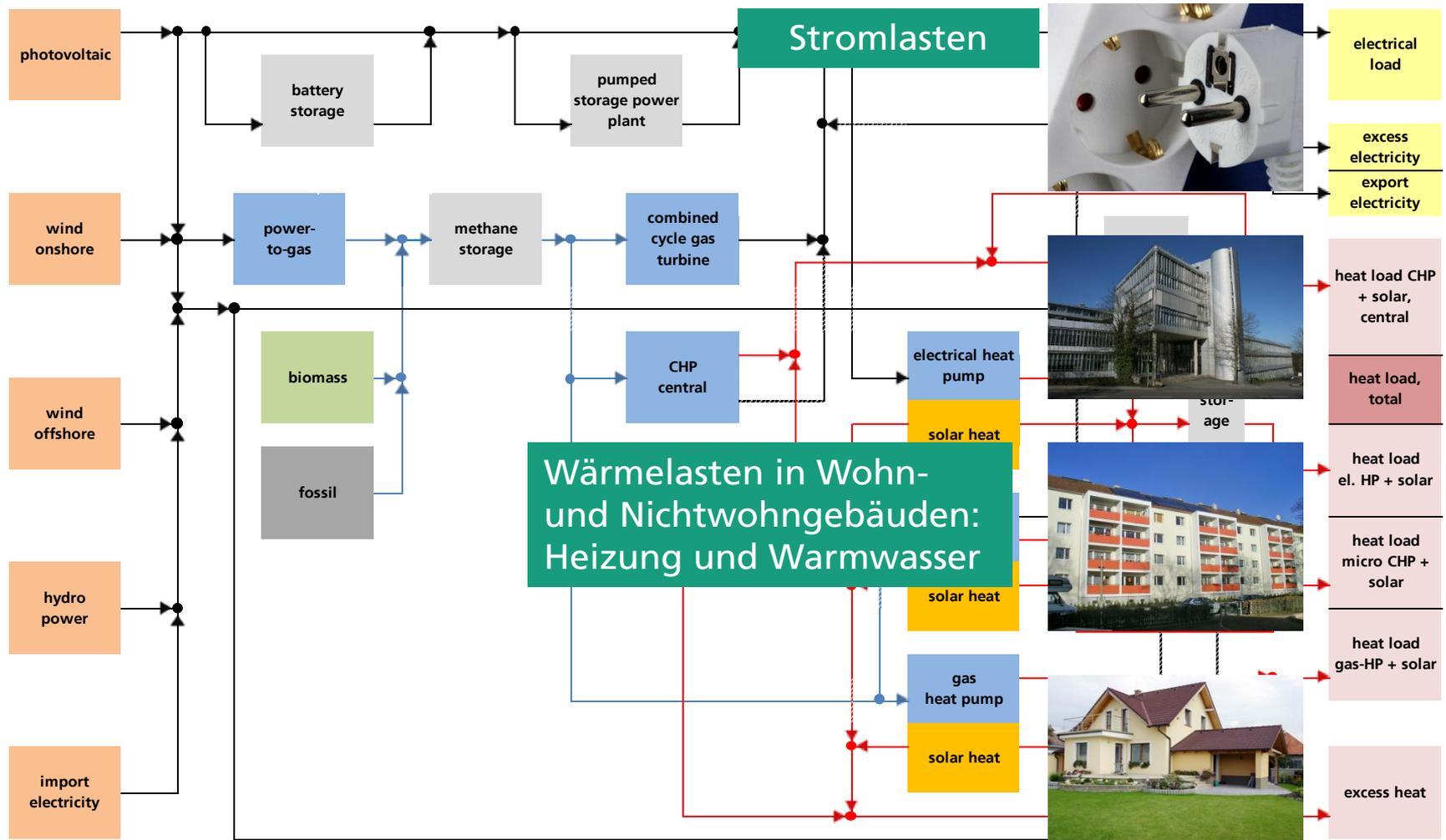
Methodik – Struktur des Energiesystems



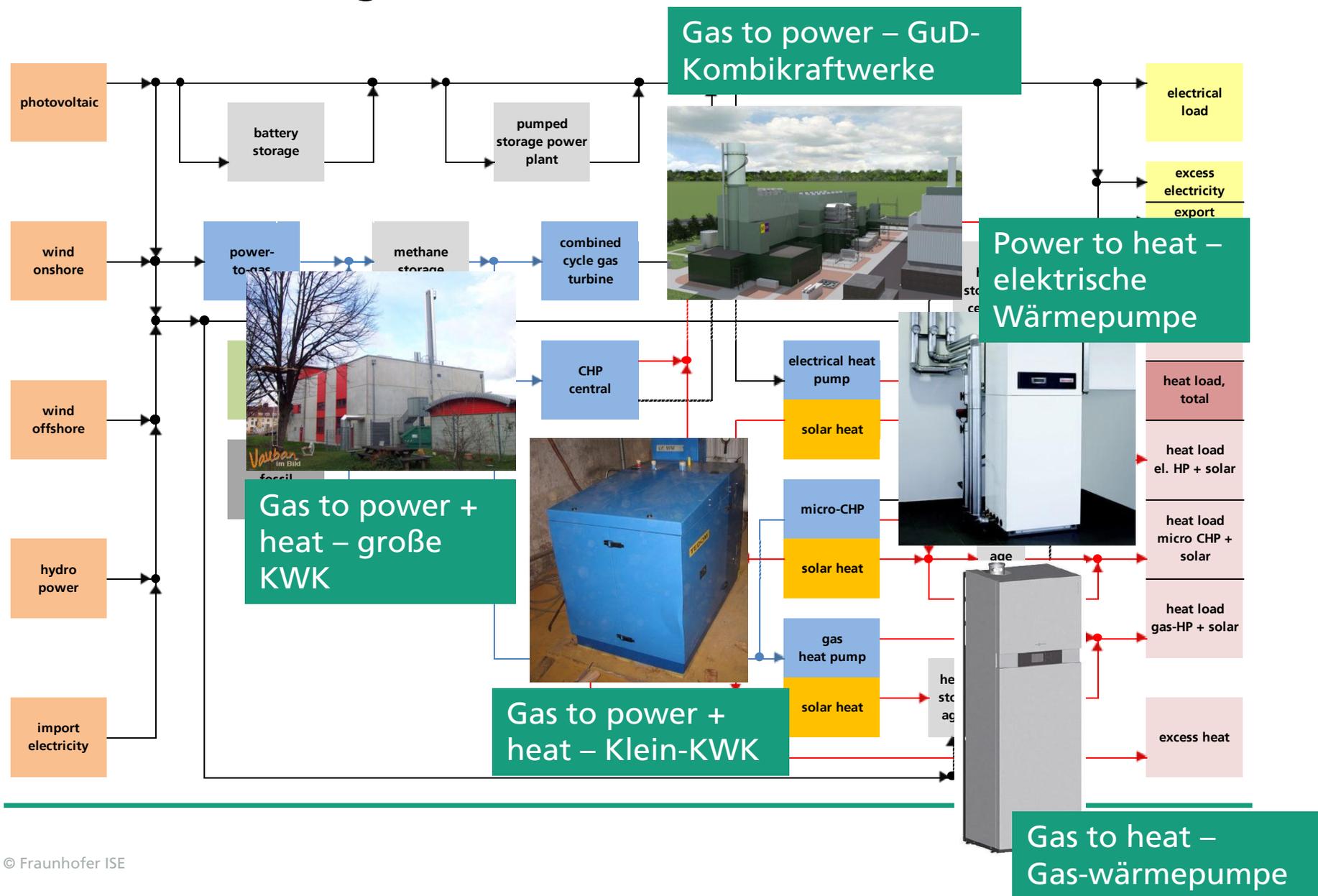
Methodik – Wandler erneuerbarer Energien



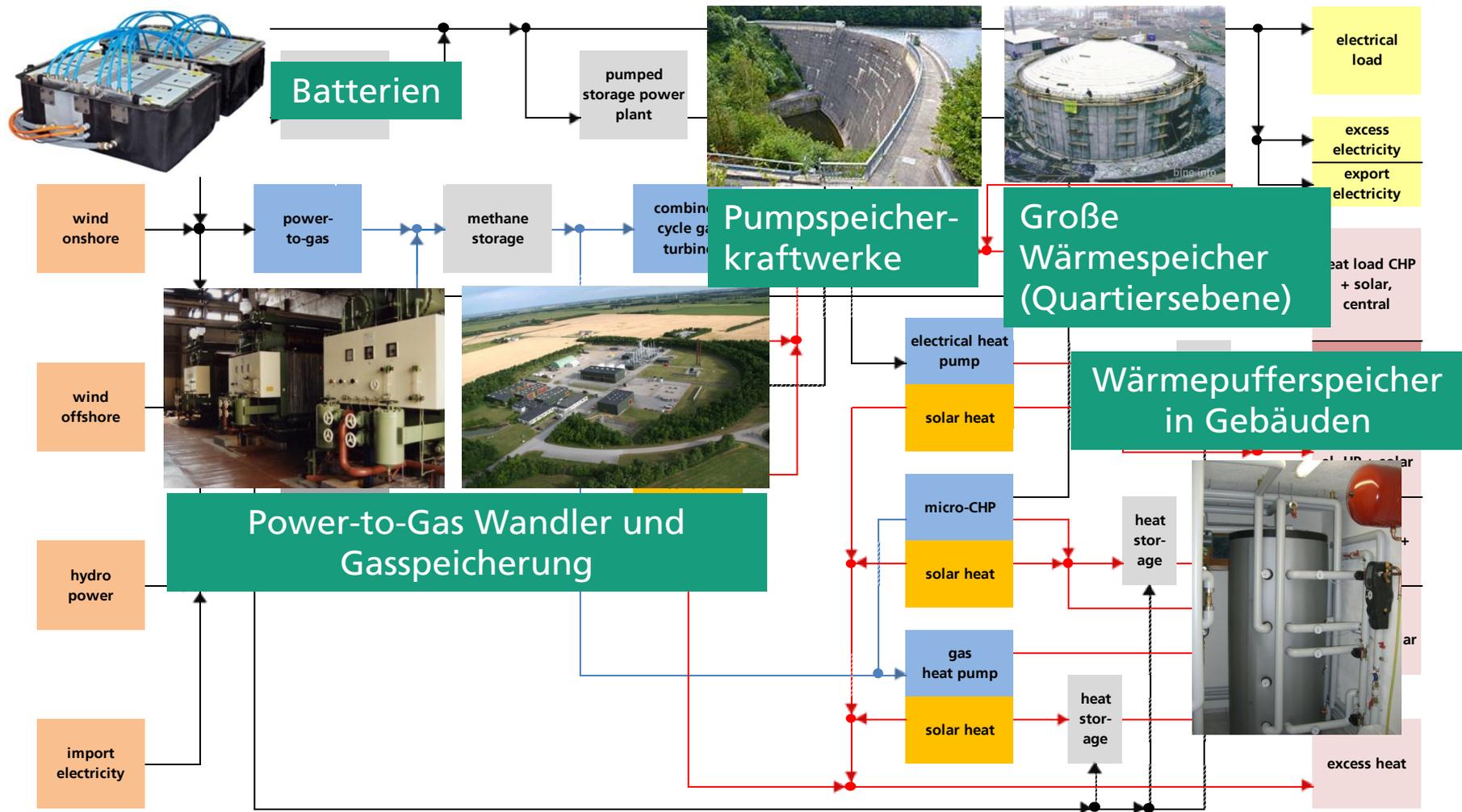
Methodik – Lasten



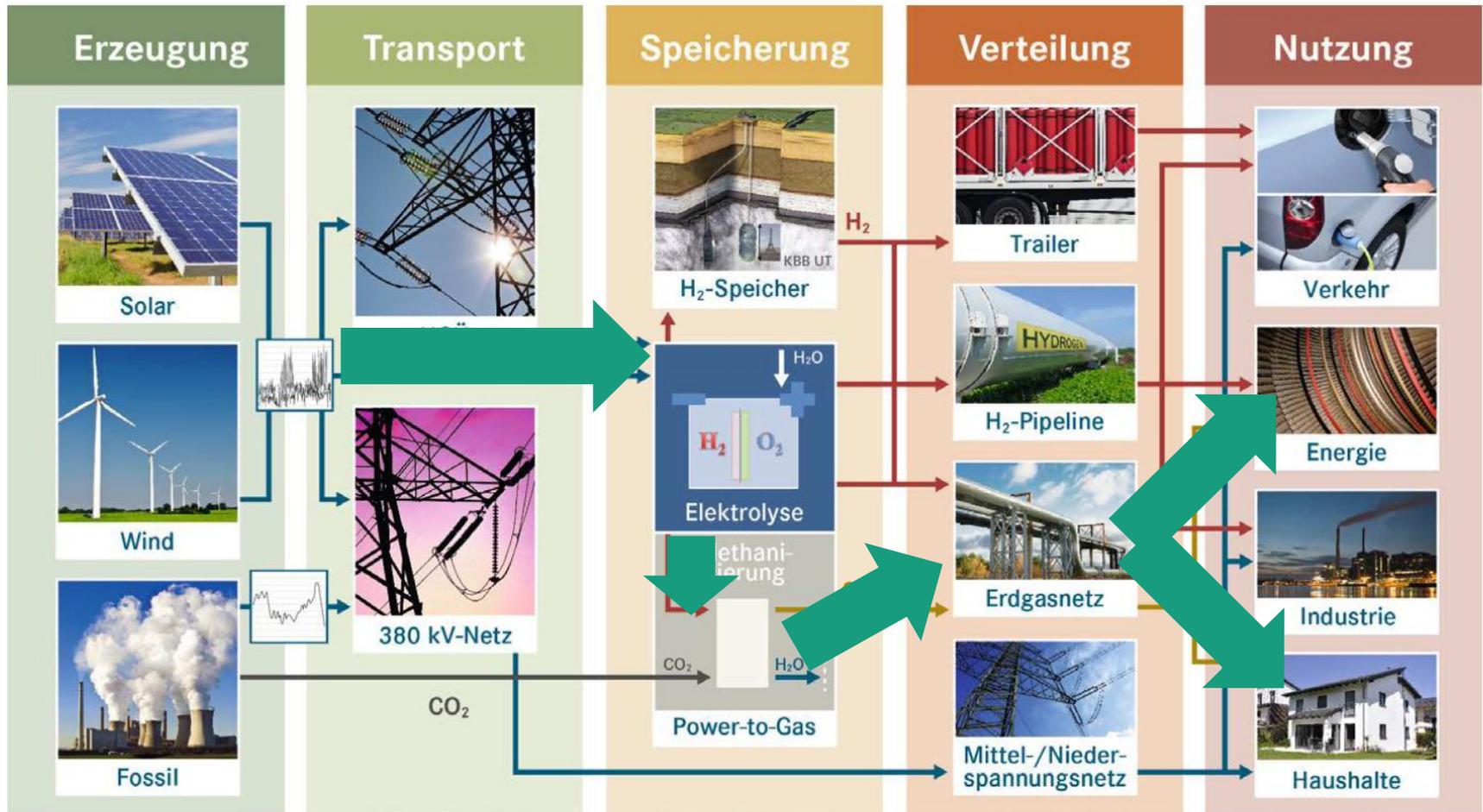
Methodik - Energiewandler



Methodik – Speicher



Power-to-Gas



aus: Mergel, Emonts et al.: Wasserelektrolyse und regenerative Gase als Schlüsselfaktoren für die Energiesystemtransformation. FVEE - Jahrestagung 2012: Zusammenarbeit von Forschung und Wirtschaft für Erneuerbare und Energieeffizienz

Methodik – Annahmen und Voraussetzungen

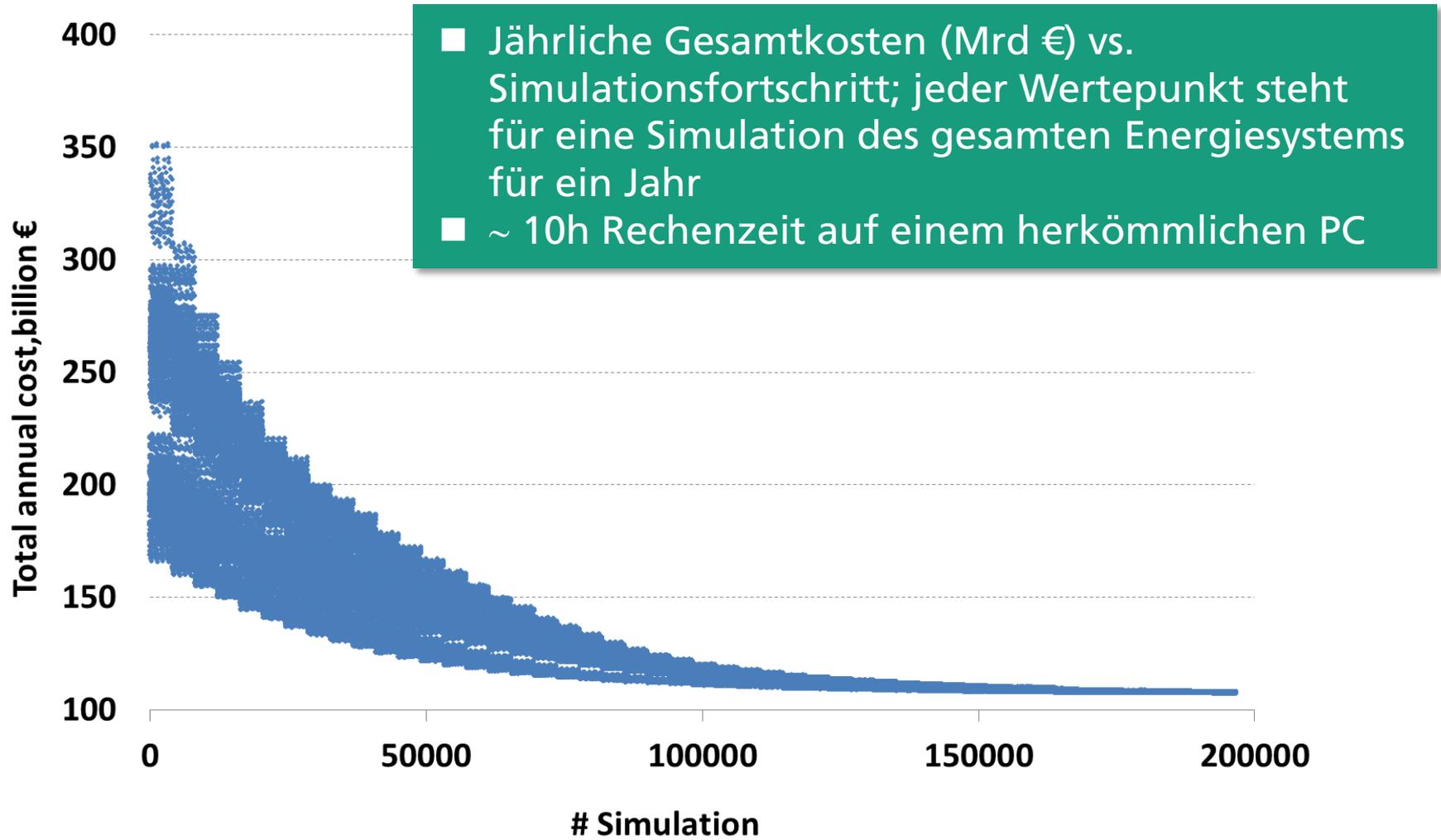
- Jahresmodell auf Stundenbasis
- Stromerzeugung durch Wind, PV und Wasserkraft: normierte Profile mit Stundenwerten von 2011
- Biomasse: 50 TWh fix für Strom und Wärme (Gesamtwert Biomasse einschl. Müll in Deutschland 2010: über 300 TWh)
- Strombedarf und Energiebedarf für Heizung: normiertes Profil mit Stundenwerten von 2011
- Jahreswerte Endenergiebedarf:
 - Heutiger Strombedarf von ca. 500 TWh (ohne Heizung und Warmwasser): wird als konstant angenommen
 - Heutiger Heizwärmebedarf von 781 TWh: energetische Optimierung von Gebäuden Bestandteil der Modellierung
 - Heutiger Warmwasserbedarf 105 TWh: wird als konstant angenommen

Methodik – Optimierung 1/2

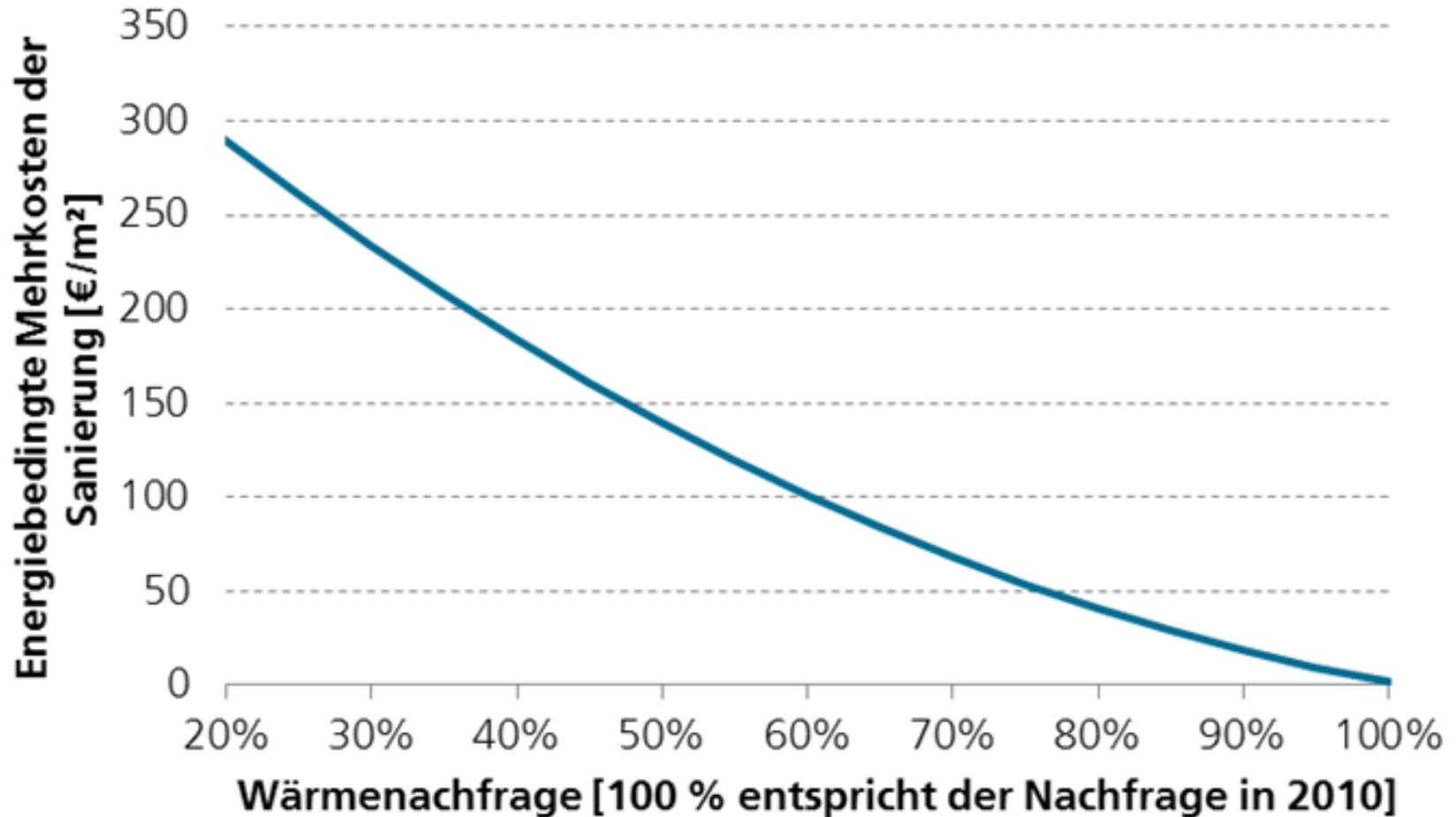
- Bestimmung der optimalen Größe und Zusammensetzung aller Wandler und Speicher einschließlich energetischer Sanierung von Gebäuden
- Optimal: **minimale jährliche Gesamtkosten** (Invest, Finanzierungen, Wartung/Betrieb)
- Netzbezogene Kosten (Hochspannungsübertragung, Verteilung, Fernwärme) in den Gesamtkosten enthalten; die Netzgröße ergibt sich aus der Kapazität der entsprechenden Komponenten (Wind, PV)
- Identifikation der Minima im mehrdimensionalen Parameterraum durch schnellen mathematisch-numerischen Optimierer
- Kosten für Komponenten: Kosten „weit unten“ auf Lernkurve, die nach langjährigem FuE und breiter Markteinführung erreicht werden (industrielle Herstellung, Skaleneffekte) ¹⁾

(1) Quelle für meiste Kostenwerte: International Energy Agency (IEA) (Ed.), Energy technology perspectives 2010. Scenarios & strategies to 2050

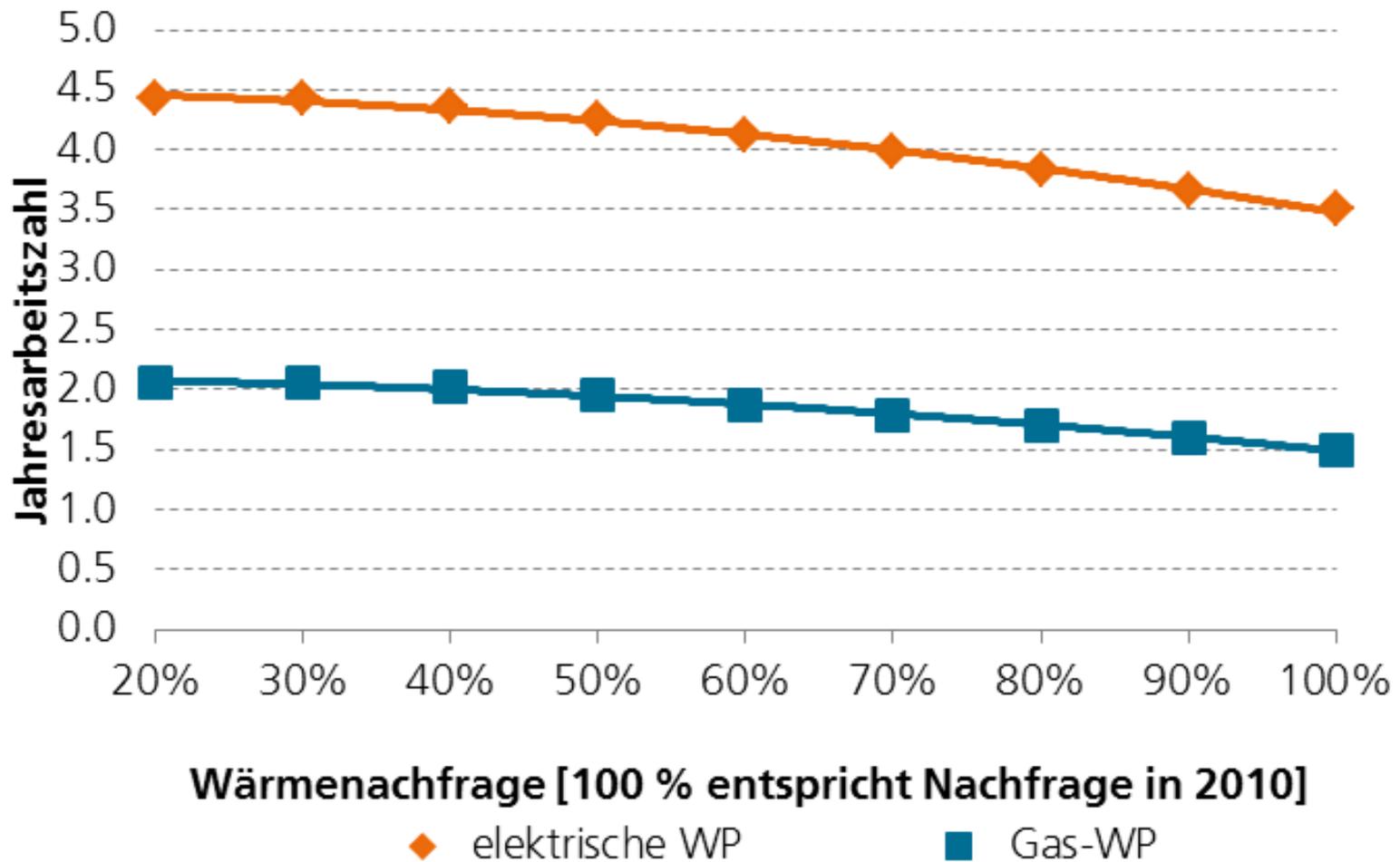
Methodik – Optimierung 2/2



Methodik: verwendete Kostenfunktion für die Mehrkosten energetischer Sanierung



Methodik: Zusammenhang JAZ Wärmepumpen und Sanierungsrate

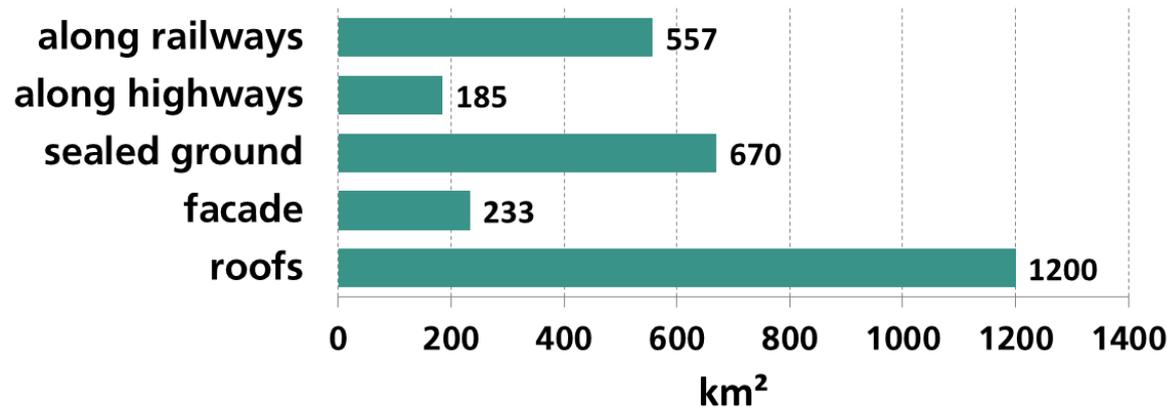


Agenda

- Einführung
- Methodik
- Technische Potenziale
- Ergebnisse
 - 100 % EE für Strom und Wärme
 - Weniger als 100 %
- 100 % für den gesamten Energiesektor?
- Zusammenfassung

Technische Potenziale

- Onshore Wind: max 200 GW ⁽¹⁾
- Offshore Wind: max 85 GW ⁽¹⁾
- Für Solarenergiewandler (PV und Solarthermie) in Frage kommende Flächen: insg. 2845 km² ⁽²⁾



Quellen:

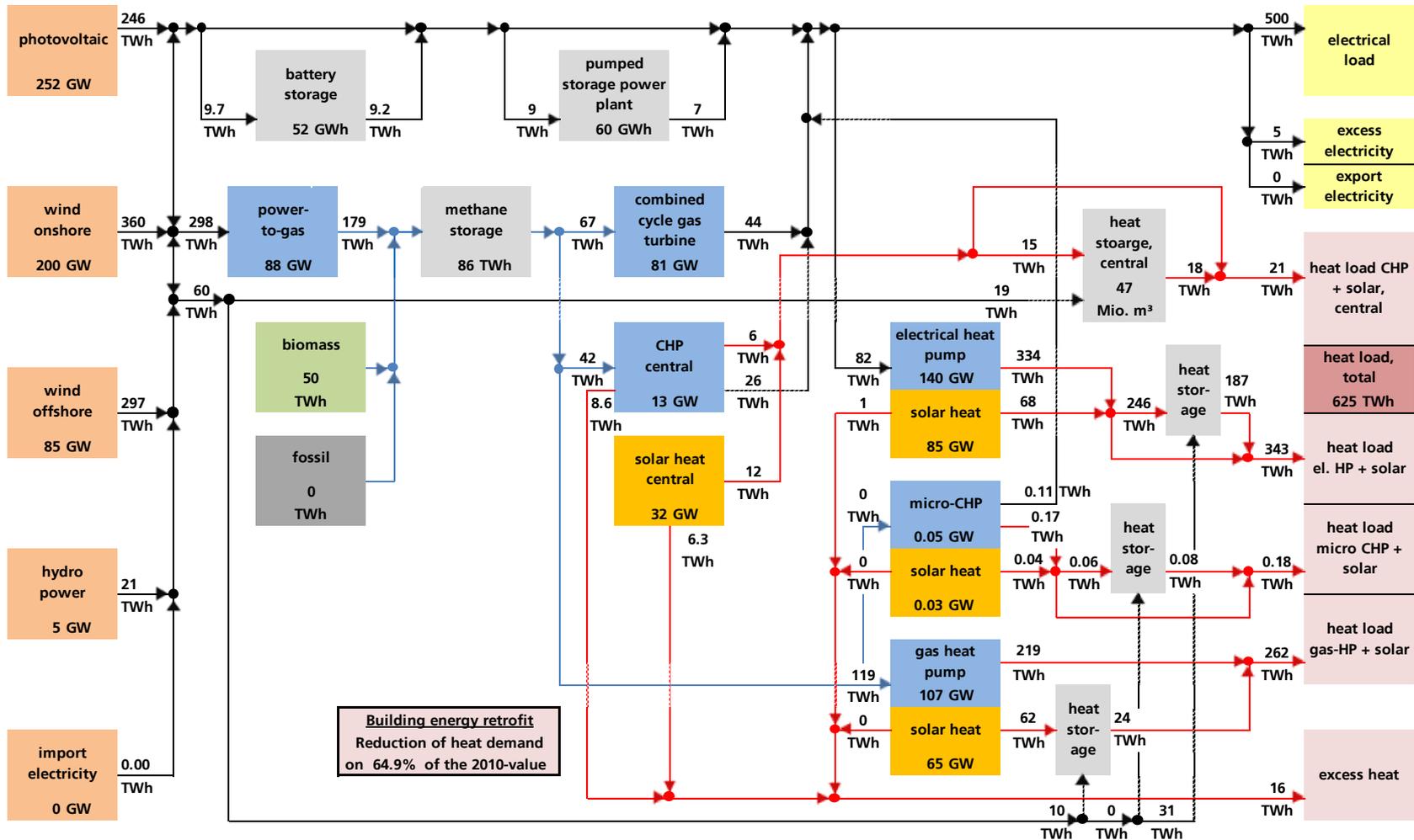
(1) Windenergie Report Deutschland 2011. Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES. In this study the annual technical potential for offshore wind is estimated as 300 TWh which corresponds to 85 GW (3500 full load hours)

(2) Vorstudie zur Integration großer Anteile Photovoltaik in die elektrische Energieversorgung. Studie im Auftrag des BSW . Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Kassel, November 2011 (Ergänzte Fassung vom 29.05.2012)

Agenda

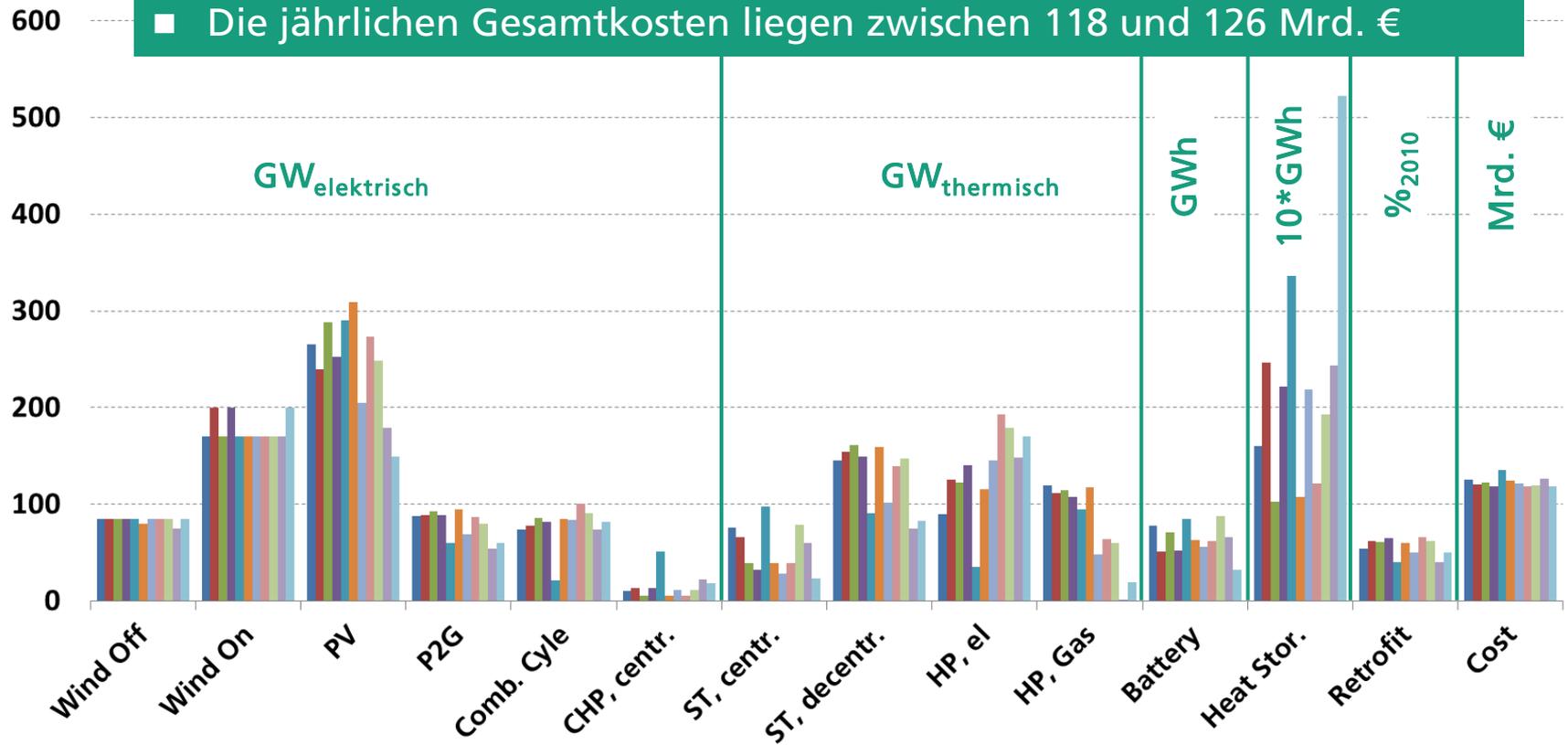
- Einführung
- Methodik
- Technische Potenziale
- Ergebnisse
 - 100 % EE für Strom und Wärme
 - Weniger als 100 %
- 100 % für den gesamten Energiesektor?
- Zusammenfassung

Ergebnisse - System mit minimalen Kosten (119 Mrd. € p.a.)

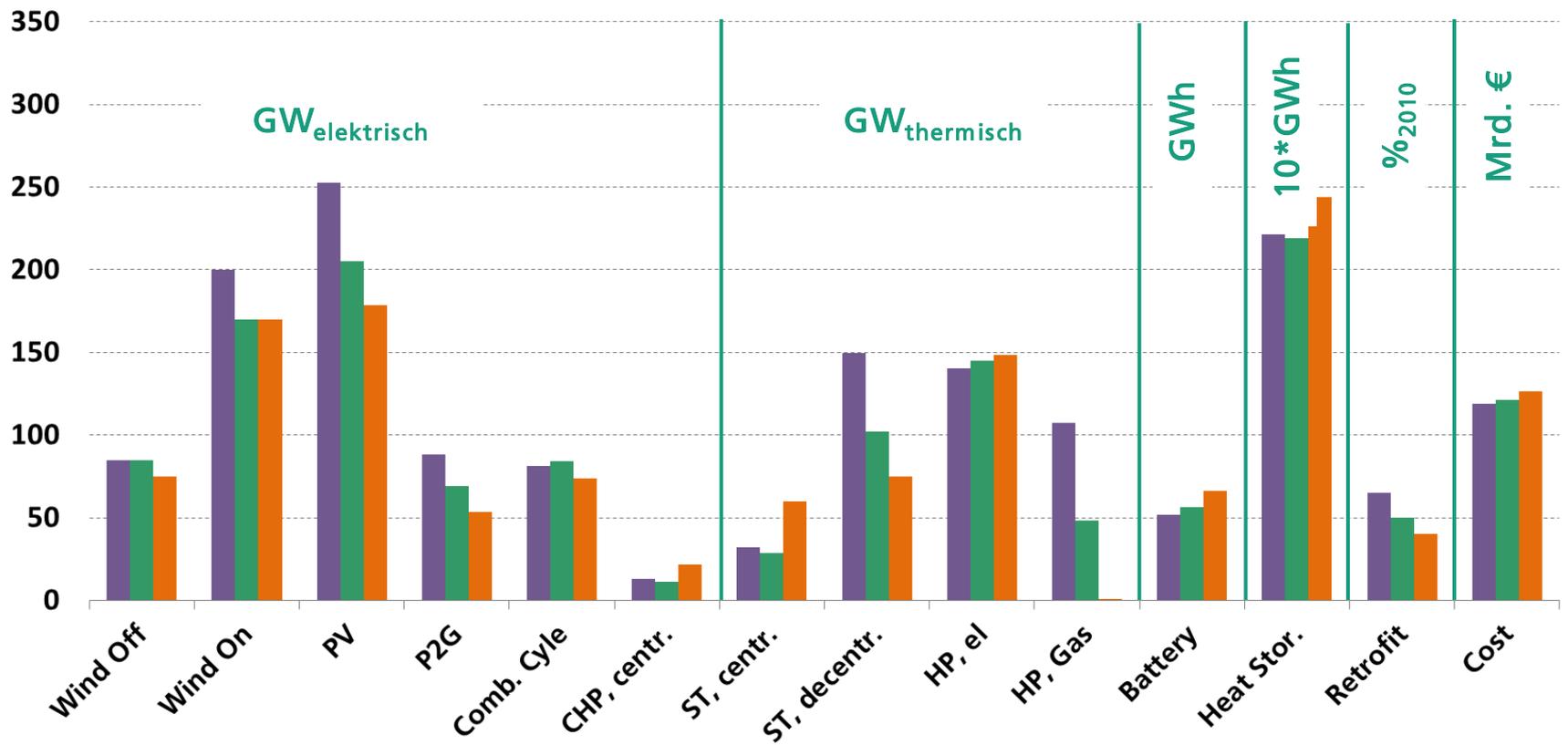


Ergebnisse – Vielfalt Systemkombinationen

- Alle Lösungsansätze decken Strom und Wärme mit 100 % EE
- Unterschiedliche Kombination/Nutzung von EE-Wandlern, Speichern, Wandlern und Umfang energetischer Gebäudesanierung
- Die jährlichen Gesamtkosten liegen zwischen 118 und 126 Mrd. €

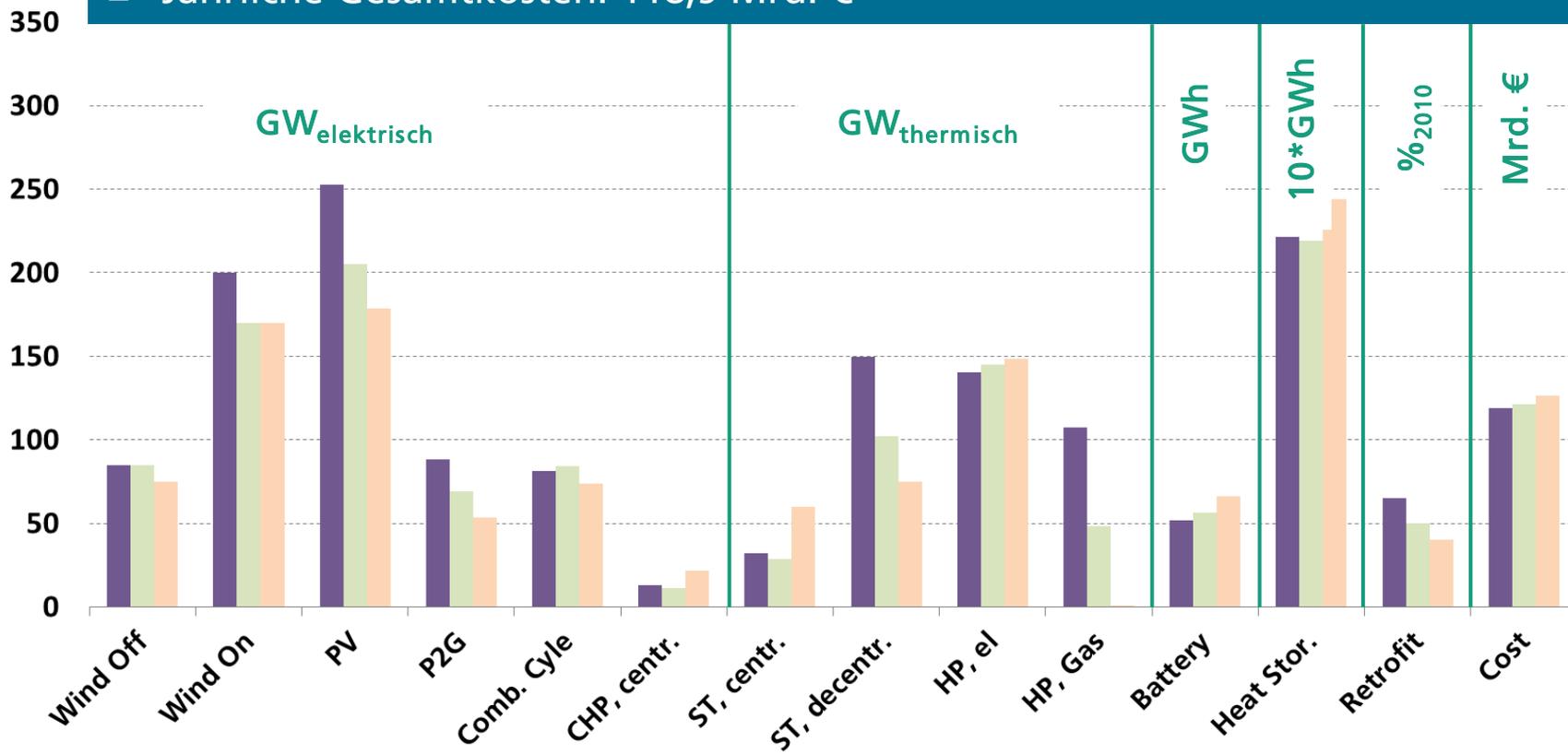


Ergebnisse – drei ausgewählte Systeme



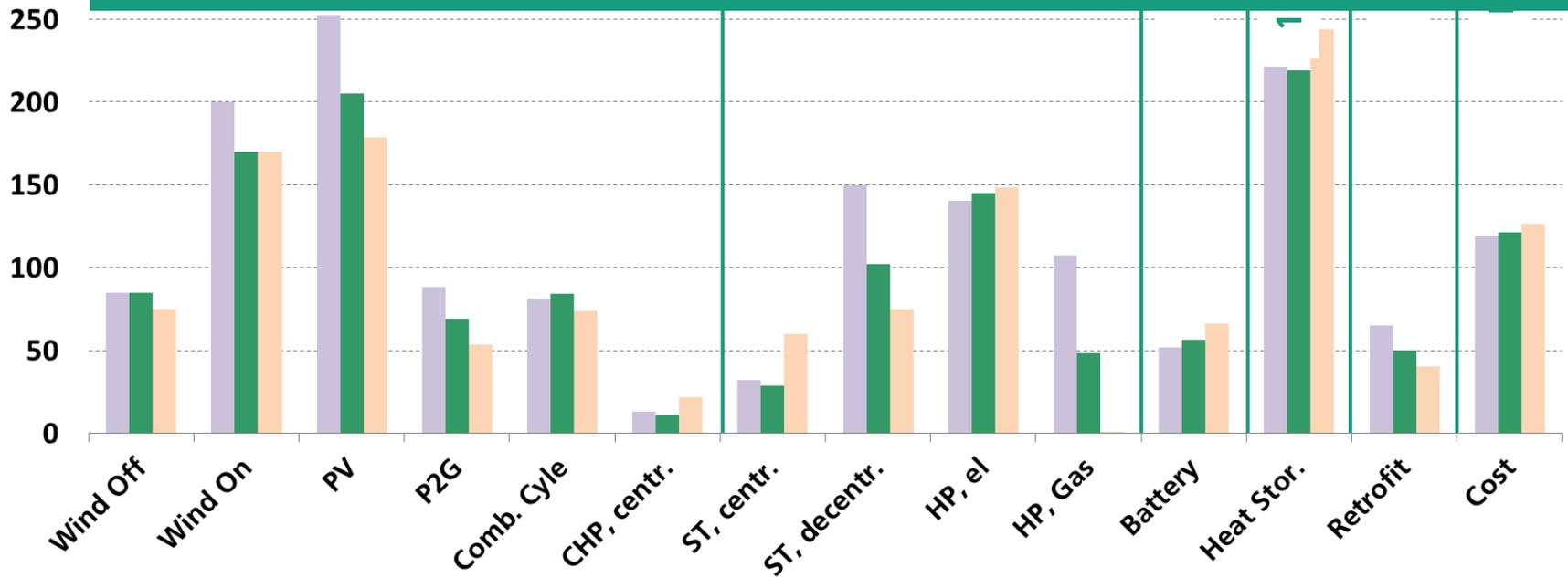
Ergebnisse – drei ausgewählte Systeme: „EE-max“

- Maximalkapazität für Wind onshore (200 GW) und offshore (85 GW)
- Photovoltaik 252 GW
- Energetische Sanierung: Wärmebedarf reduziert auf 65 % des Wertes von 2010
- Jährliche Gesamtkosten: 118,9 Mrd. €



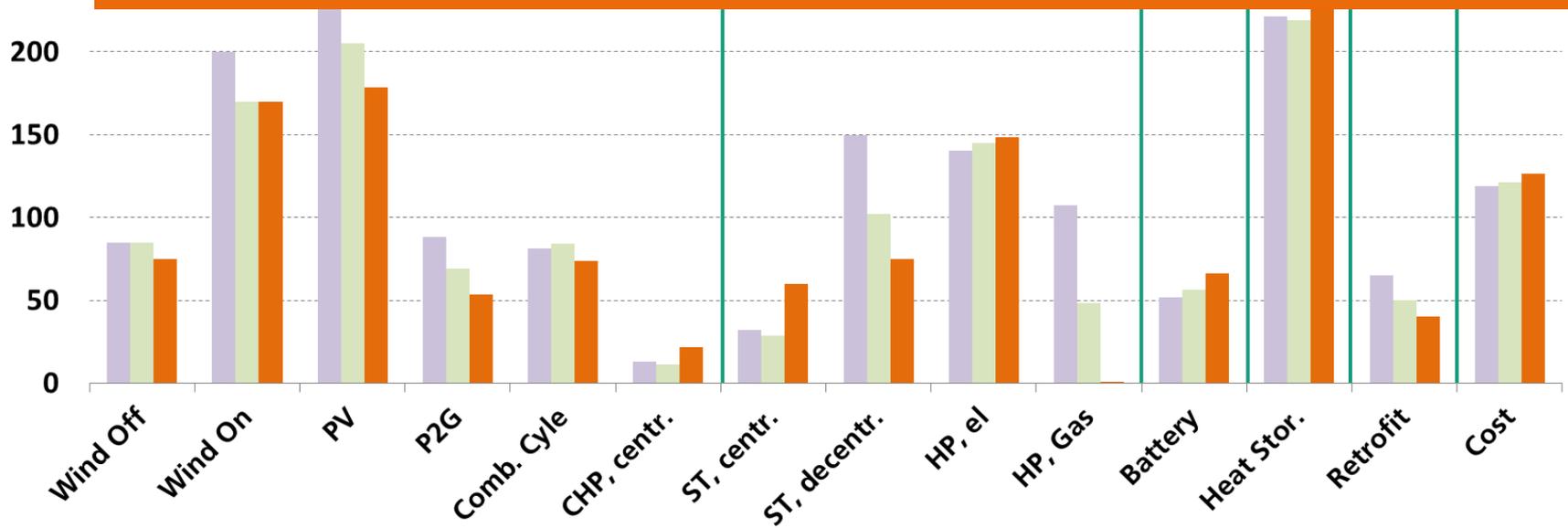
Ergebnisse – drei ausgewählte Systeme: „Medium“

- Maximalkapazität für Wind offshore (85 GW)
- Wind onshore 170 GW
- Photovoltaik 206 GW
- Weniger Solarthermie, weniger Power-to-Gas, weniger Gaswärmepumpen
- Energetische Sanierung: Wärmebedarf reduziert auf 50 % des Wertes von 2010
- Jährliche Gesamtkosten: 121,3 Mrd. €

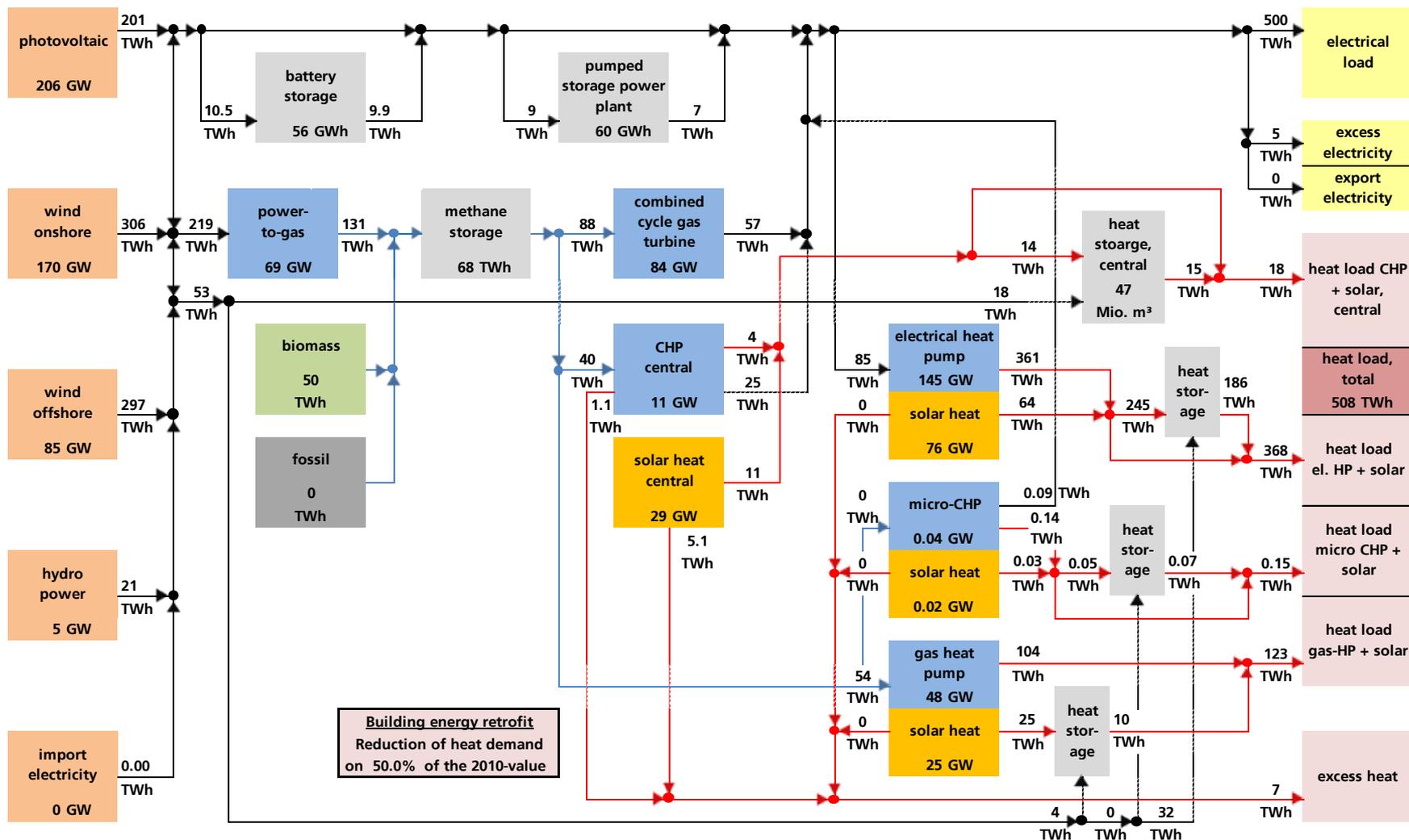


Ergebnisse – drei ausgewählte Systeme: „RetrofitMax“

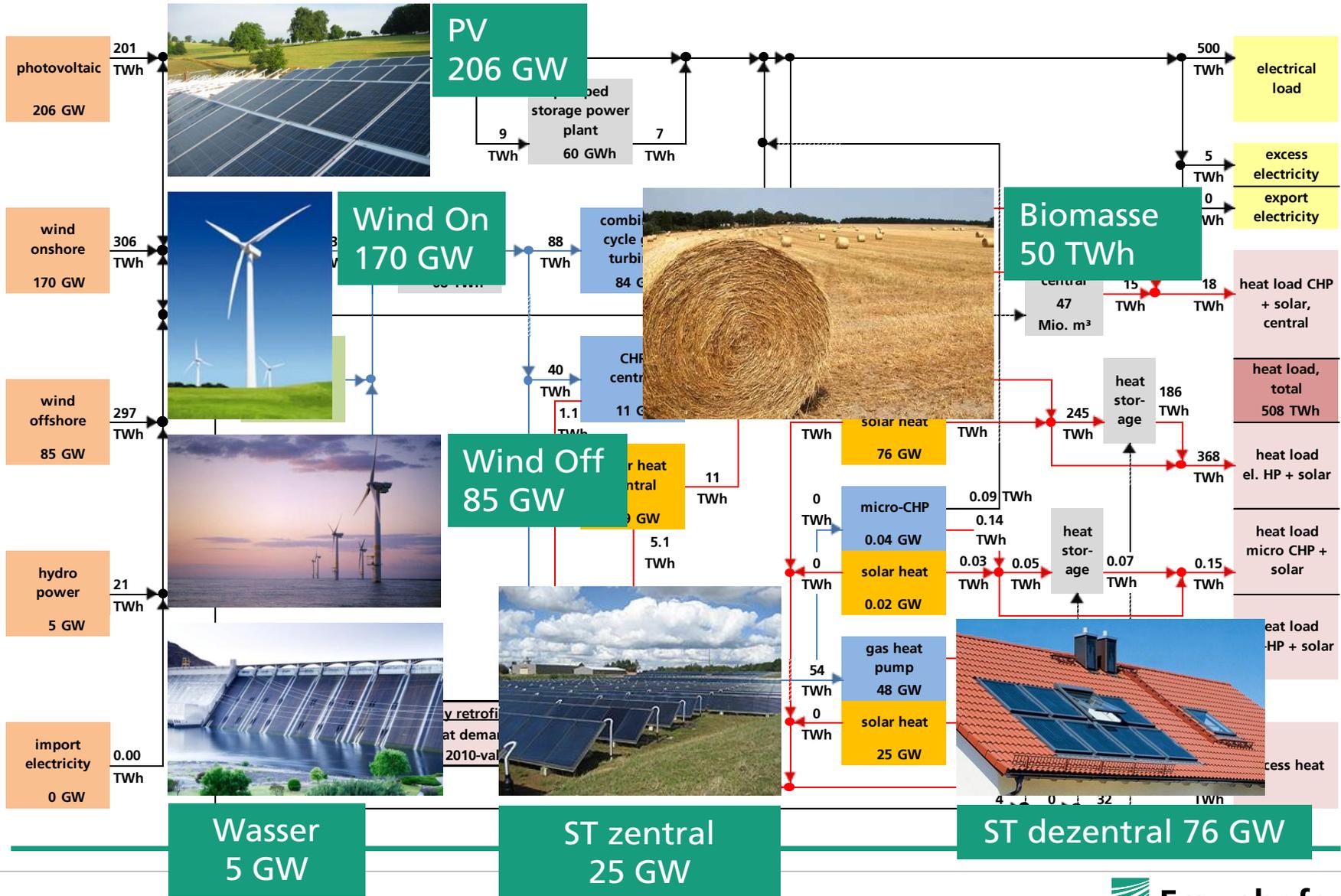
- Wind offshore 75 GW, Wind onshore 170 GW
- Photovoltaik 170 GW
- Weniger Power-to-Gas, nahezu Verzicht auf Gaswärmepumpen, mehr Wärmespeicherung nötig
- Energetische Sanierung: Wärmebedarf reduziert auf 40 % des Wertes von 2010
- Jährliche Gesamtkosten: 126,4 Mrd. €



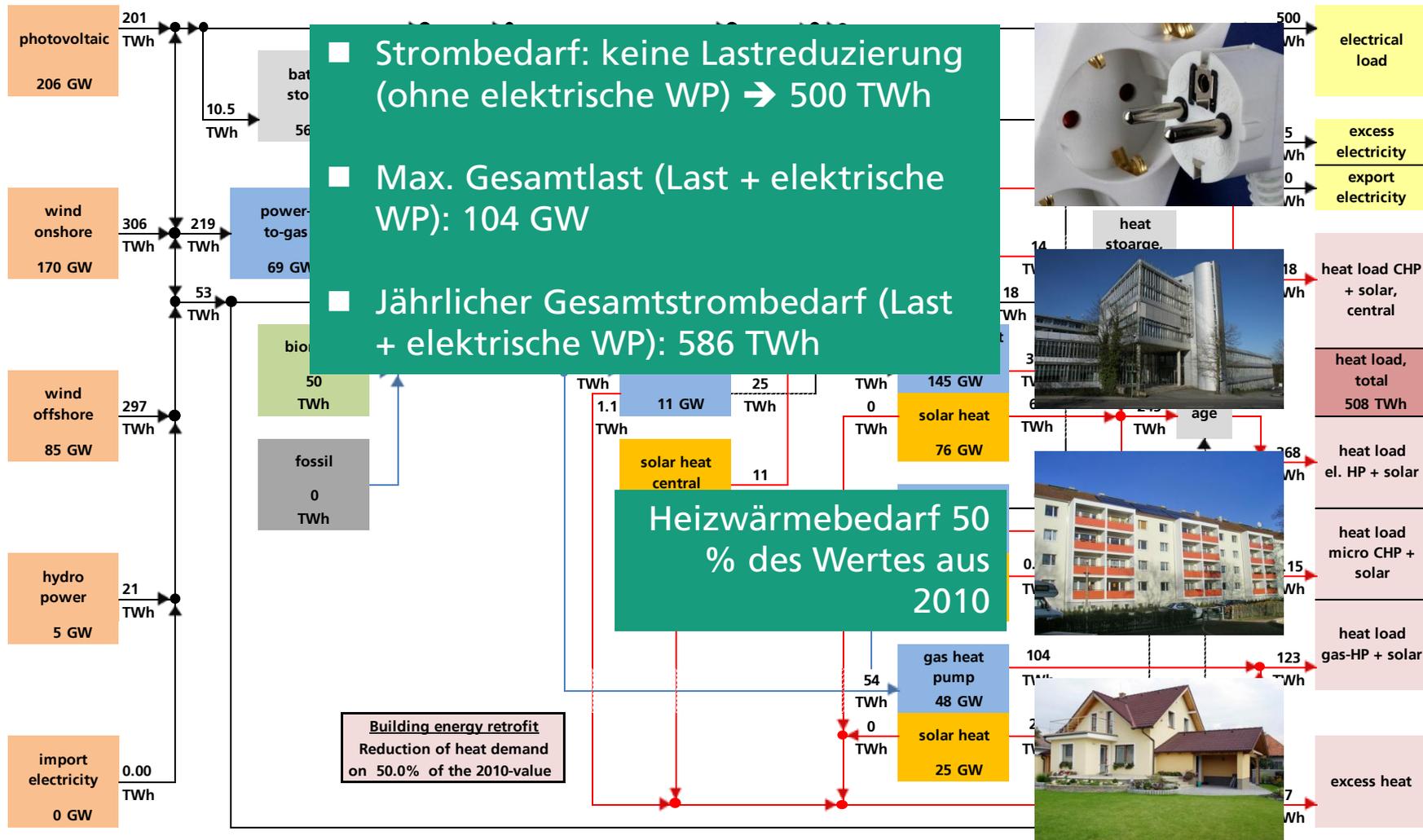
Ergebnisse – 2. System „Medium“



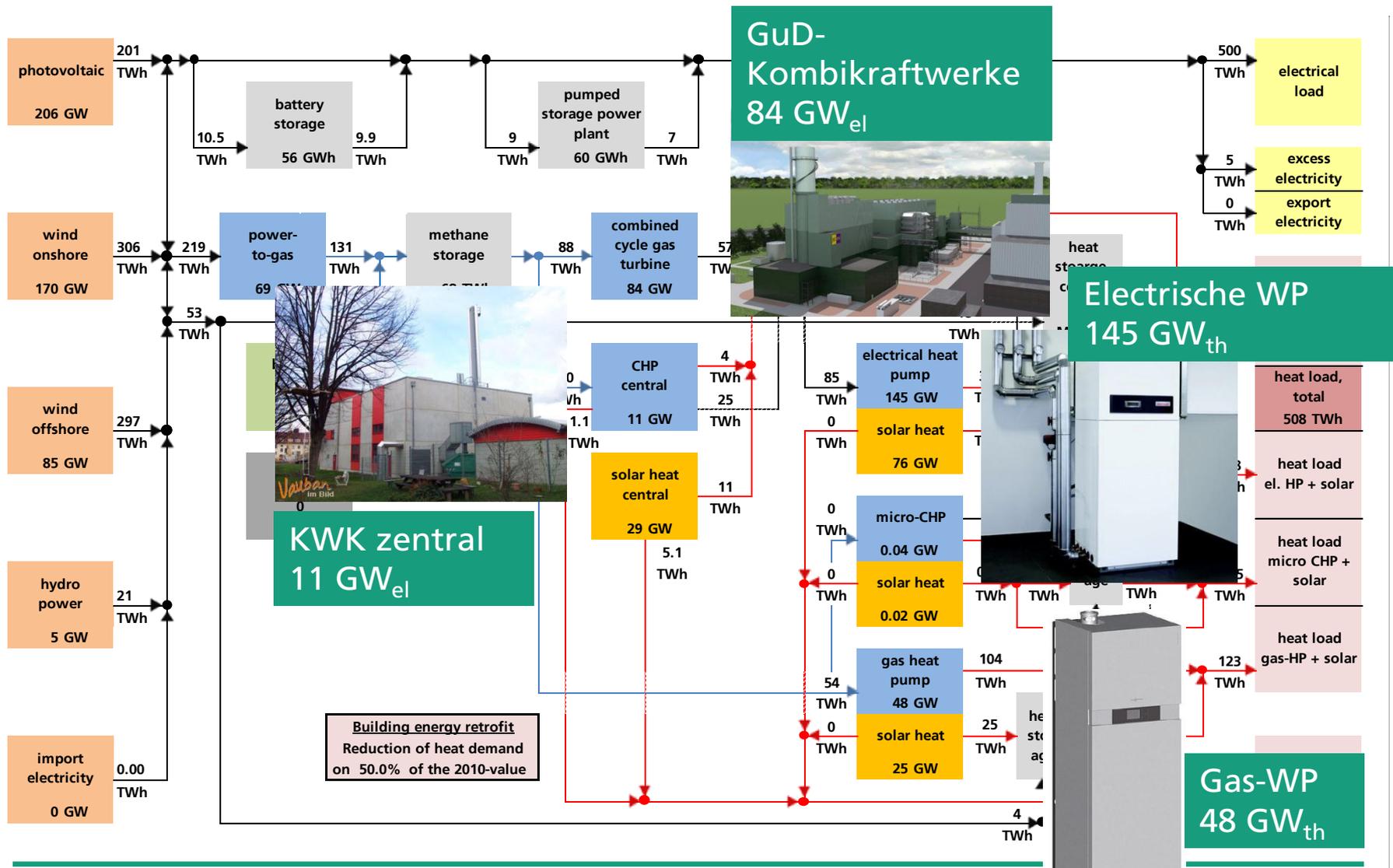
Ergebnisse – EE Wandler „Medium“



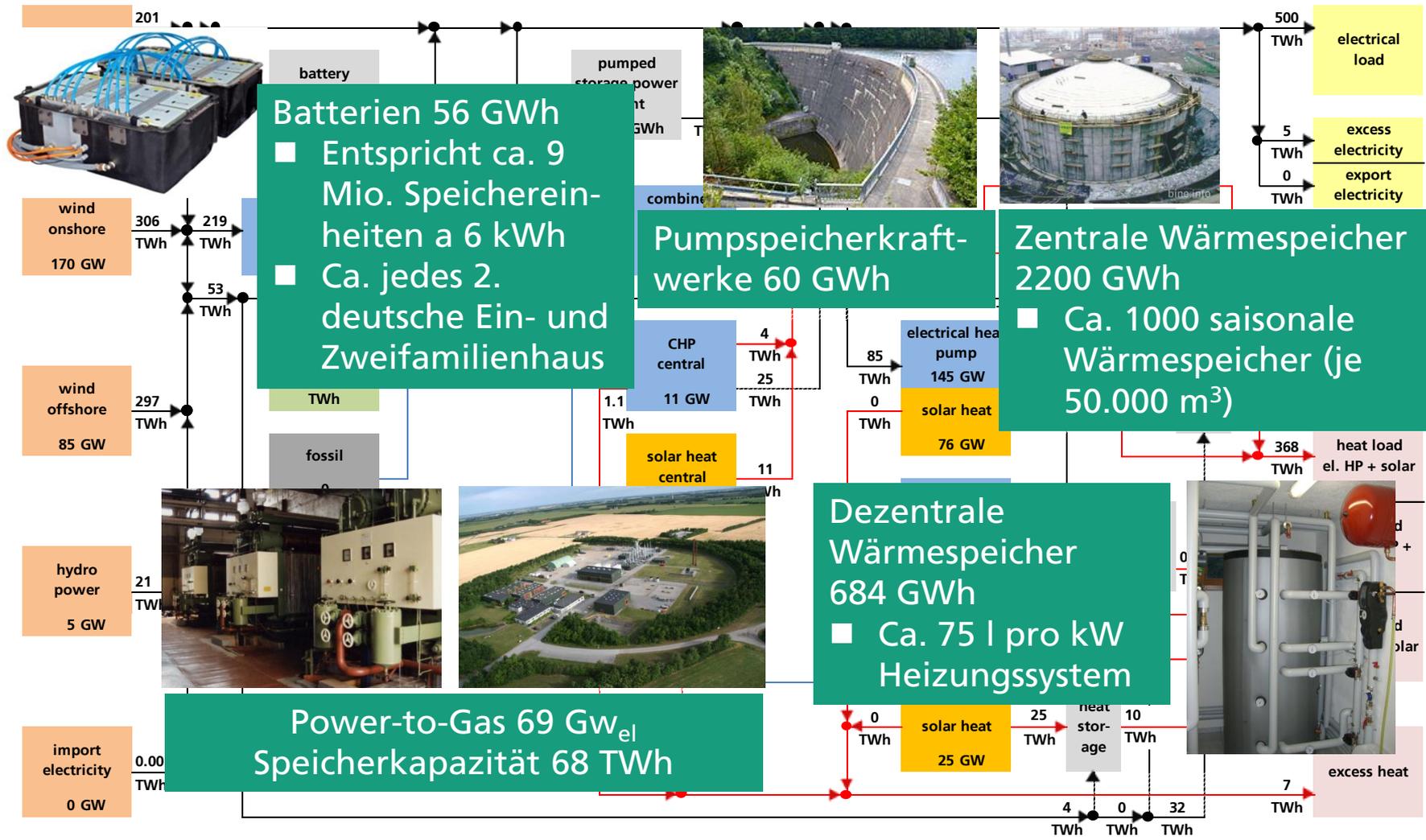
Ergebnisse – Lastenreduzierung „Medium“



Ergebnisse – Wandler „Medium“

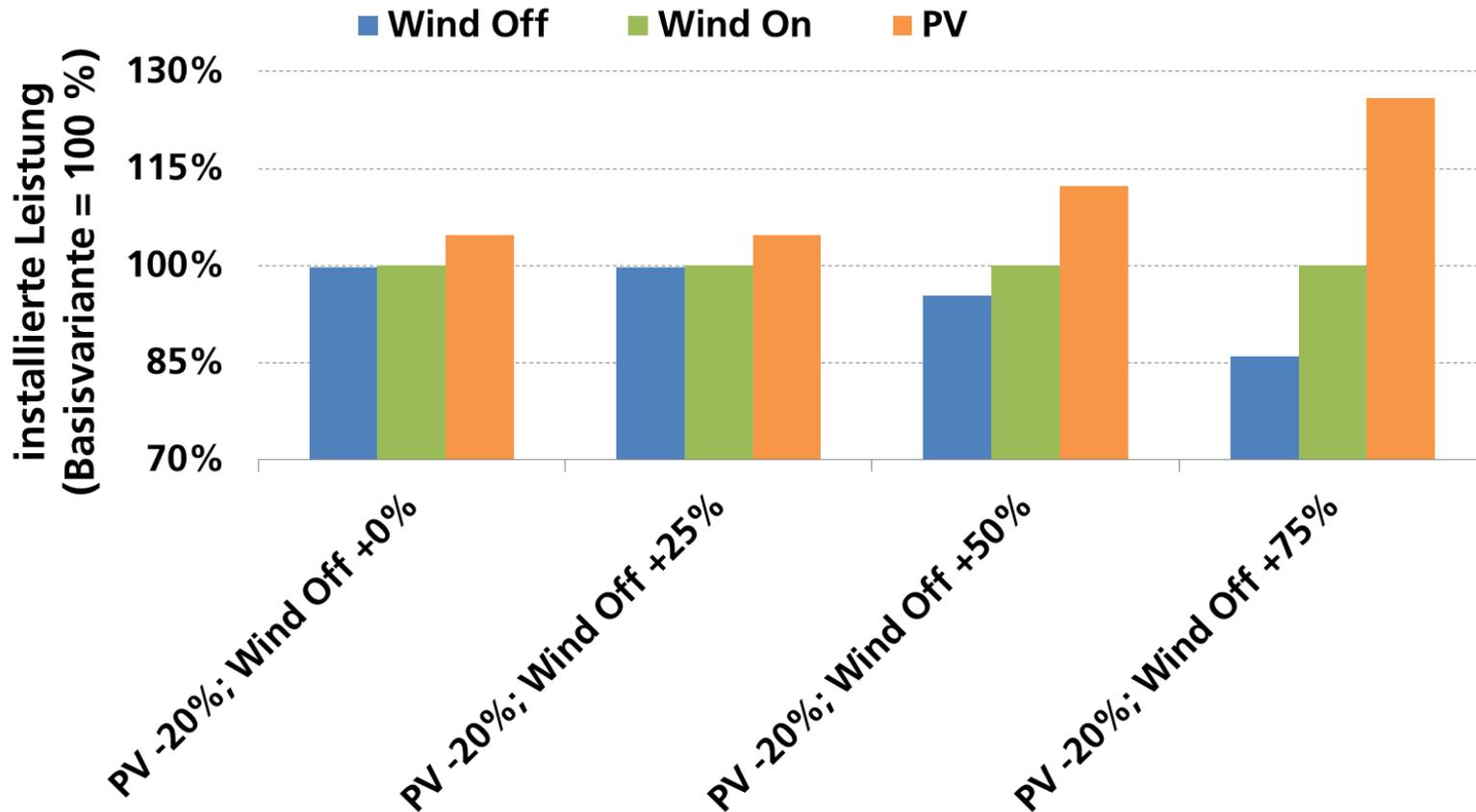


Ergebnisse – Speichersysteme „Medium“

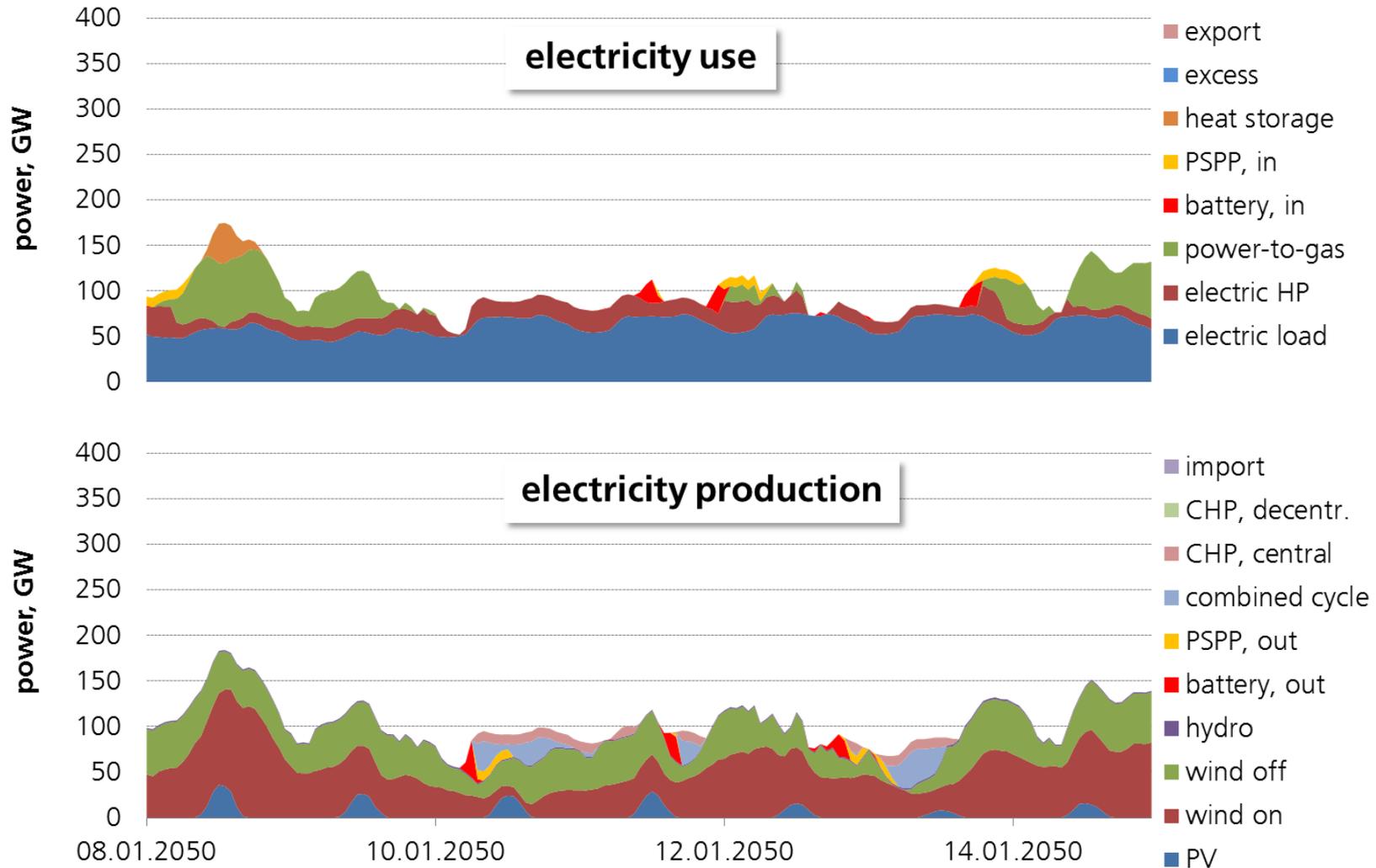


Geänderte Kosten Wind-Offshore und Photovoltaik

Randbedingung: 100 % Erneuerbare Energien für Strom und Wärme

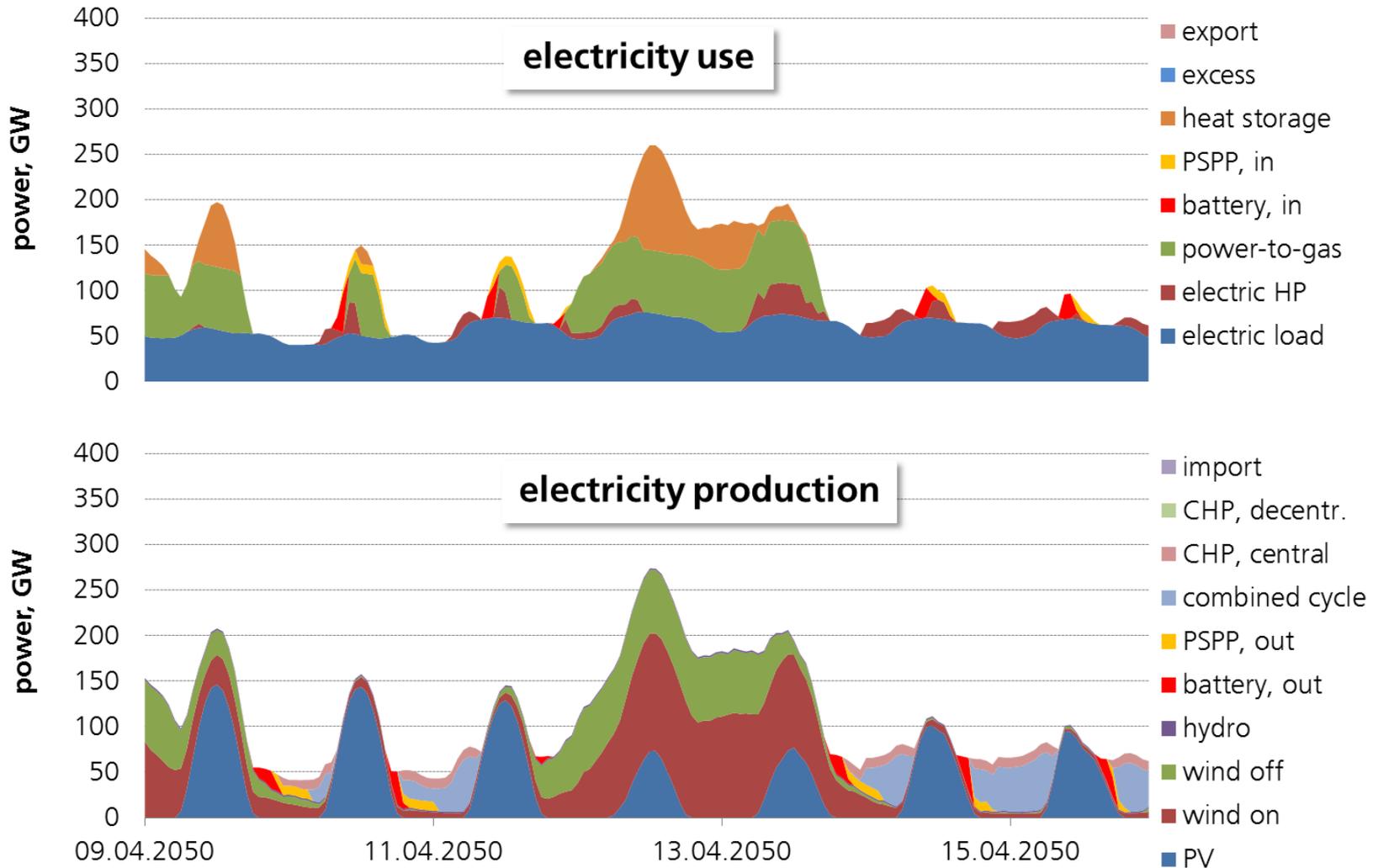


Ergebnisse – Strom in einer Winterwoche („Medium“)



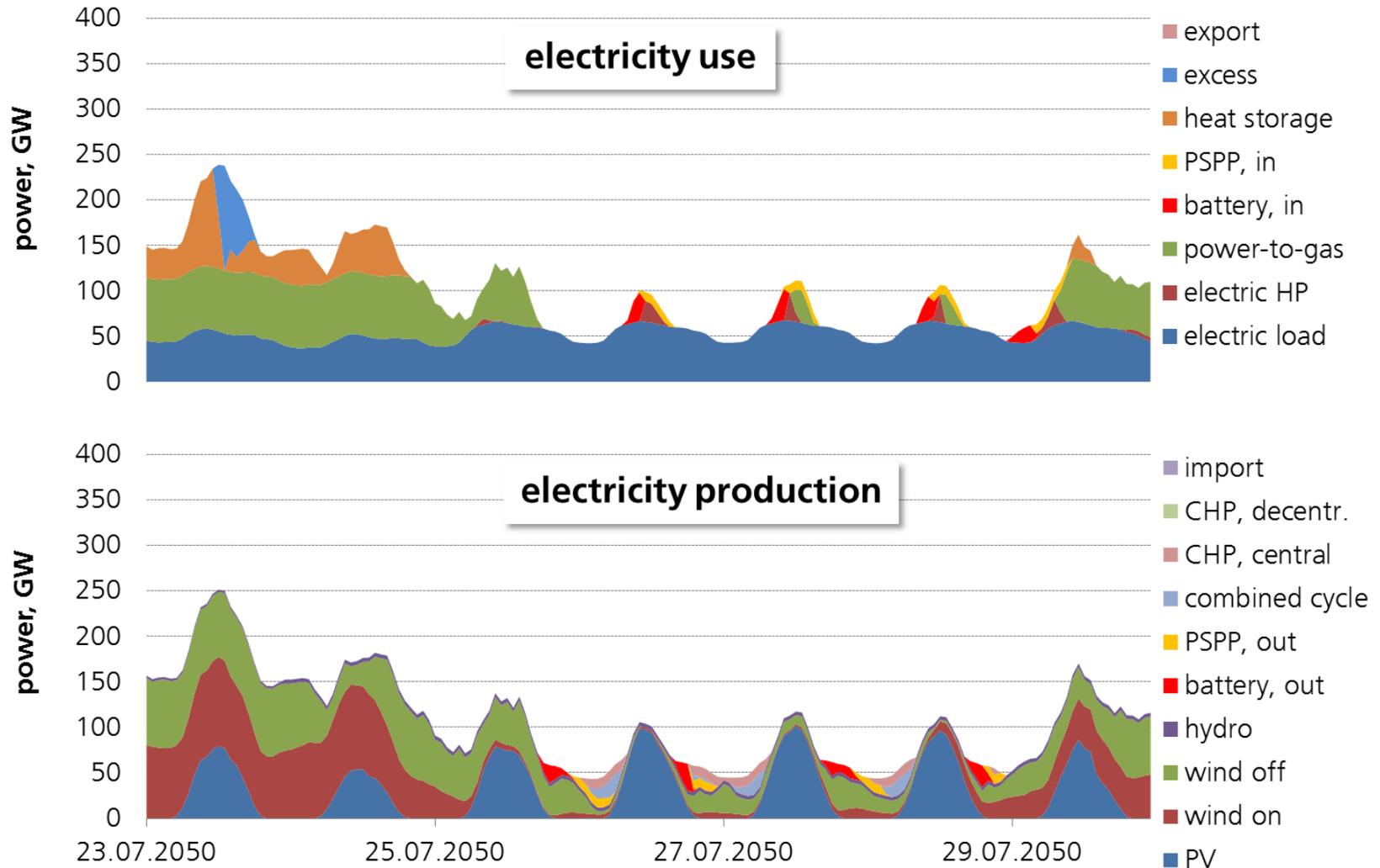
PSPP = pumped storage power plant; CHP = combined heat and power

Ergebnisse – Strom in einer Frühjahrswoche („Medium“)



PSPP = pumped storage power plant; CHP = combined heat and power

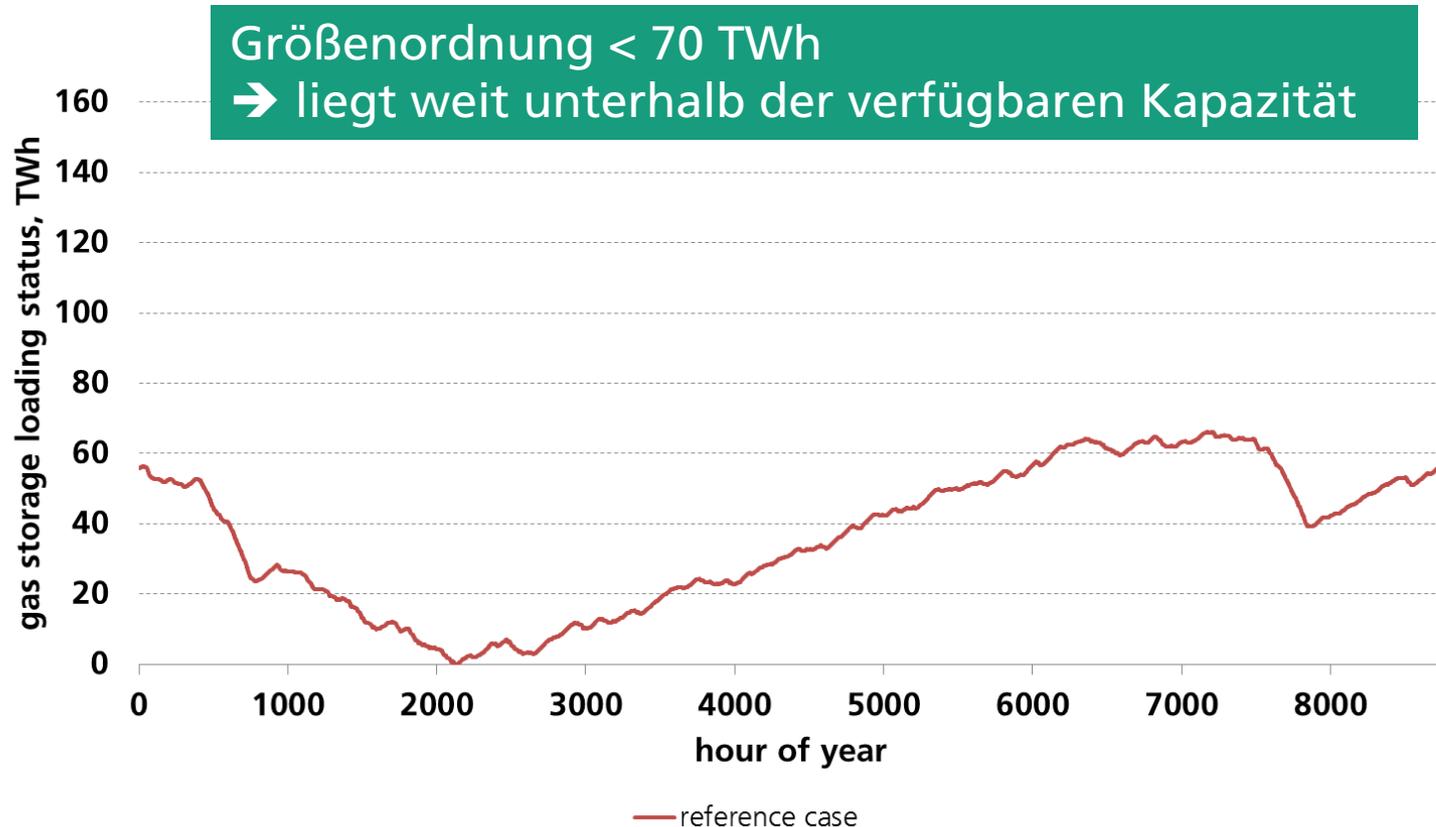
Ergebnisse – Strom in einer Sommerwoche („Medium“)



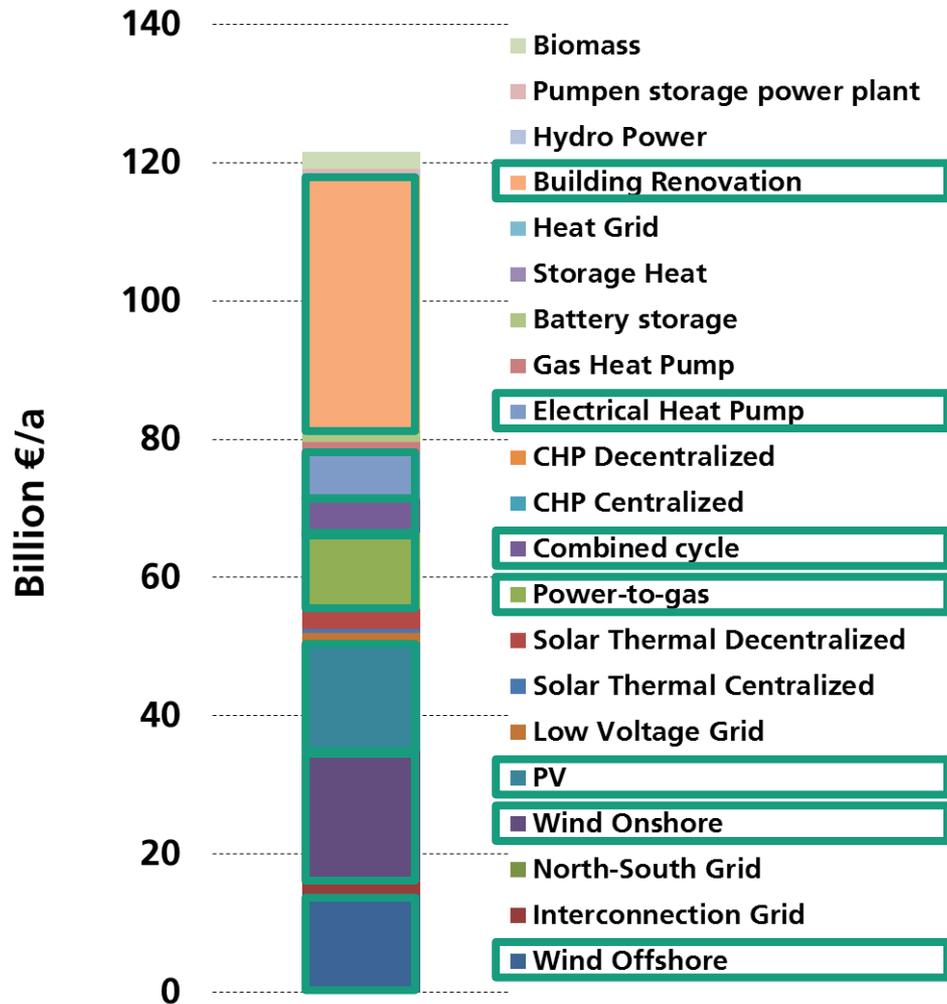
PSPP = pumped storage power plant; CHP = combined heat and power

Ergebnisse – Zeitlicher Verlauf der Gasspeicherung

Referenz

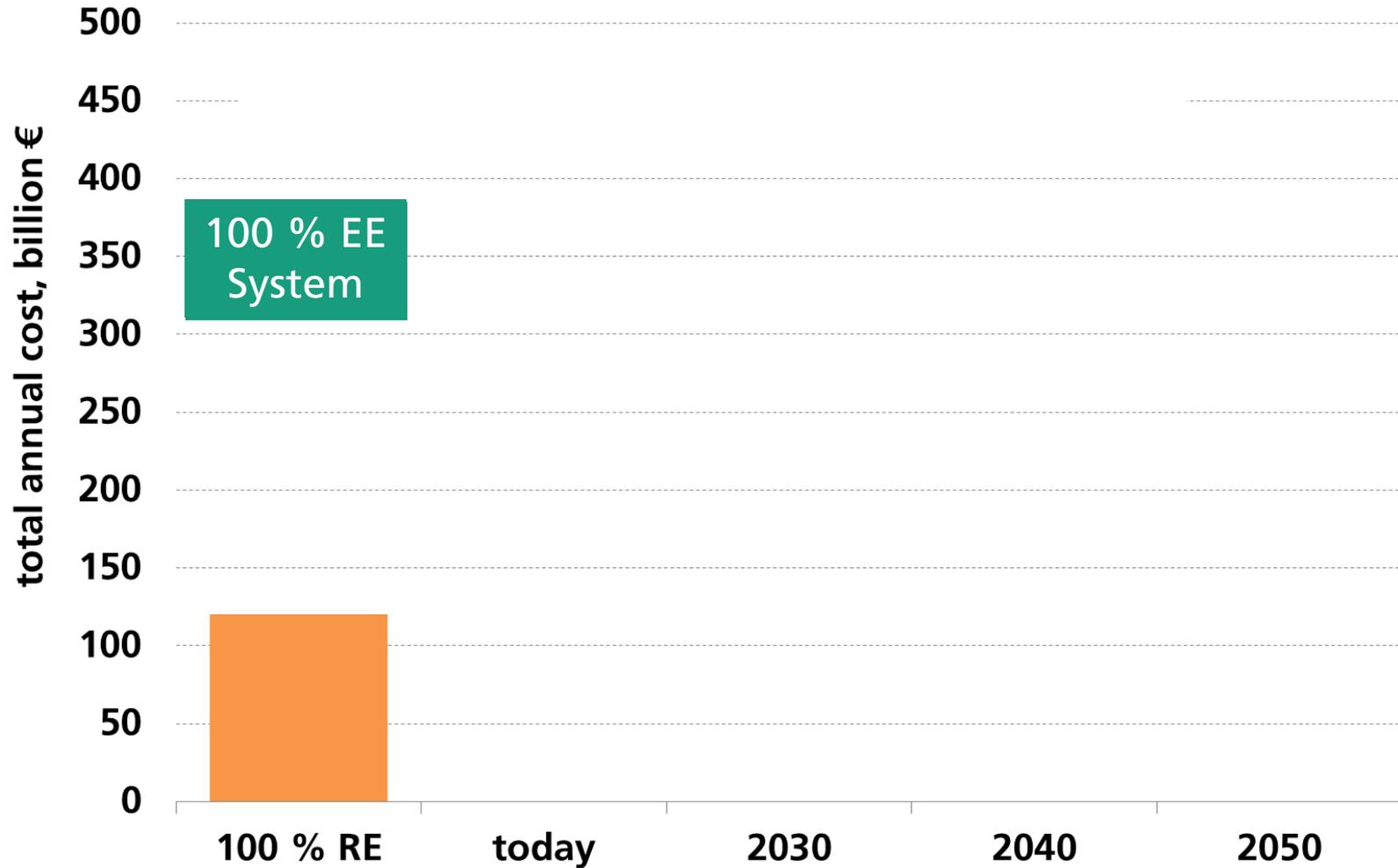


Ergebnisse – Zusammensetzung Kosten („Medium“)

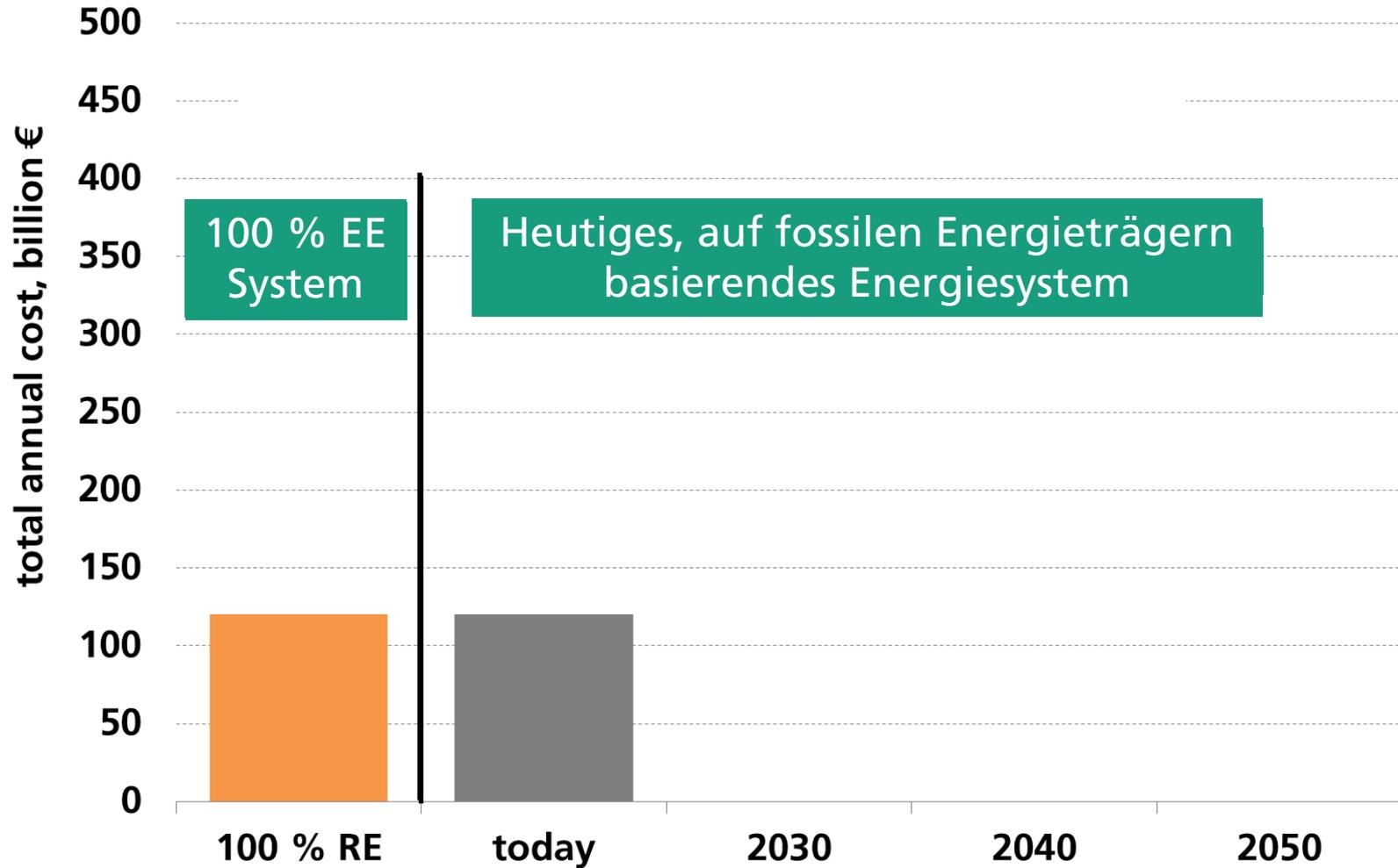


**Wichtigste
Kosten-
beiträge**

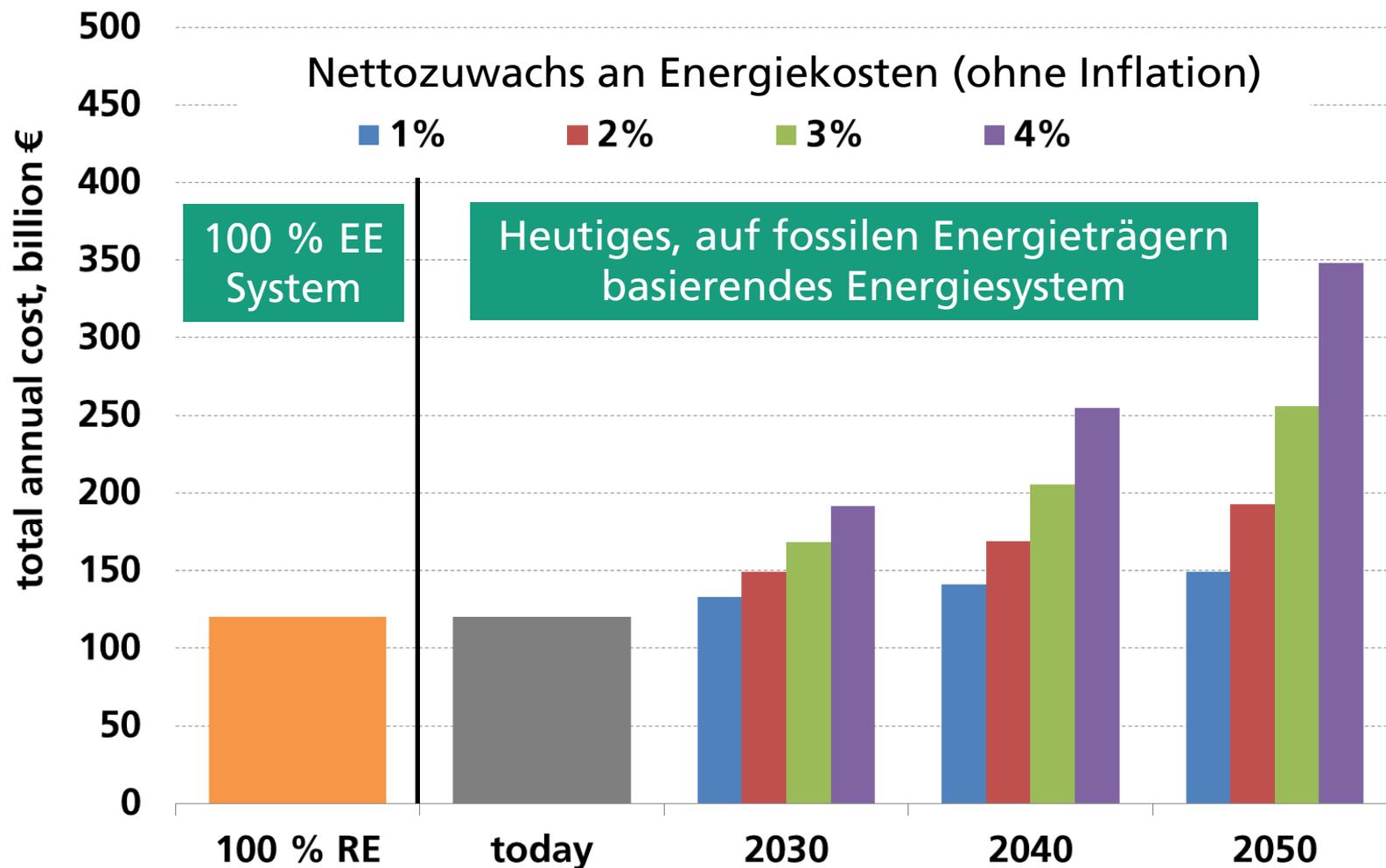
Ergebnisse - Kostenvergleich



Ergebnisse - Kostenvergleich



Ergebnisse - Kostenvergleich

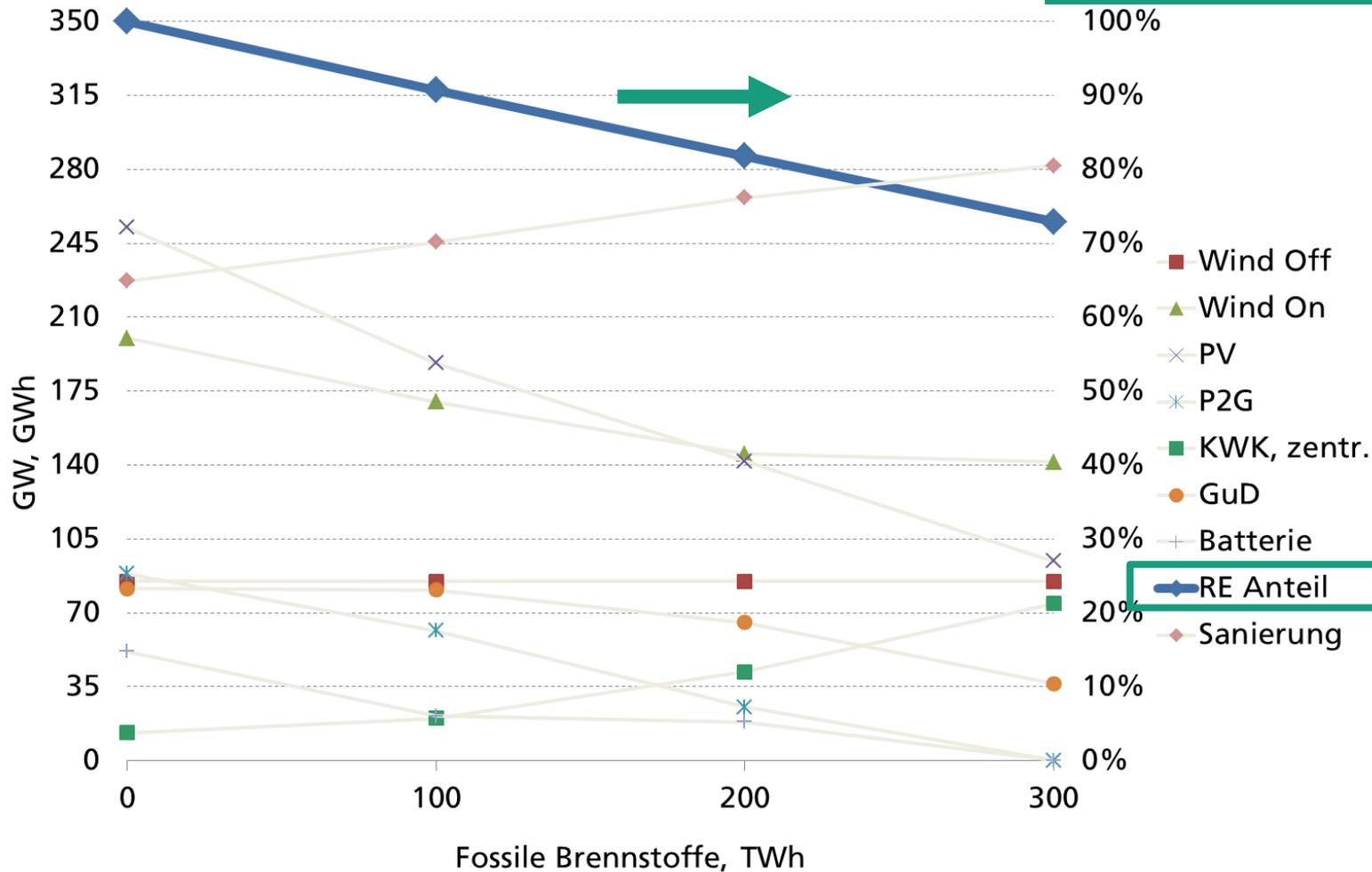


Agenda

- Einführung
- Methodik
- Technische Potenziale
- Ergebnisse
 - 100 % EE für Strom und Wärme
 - **Weniger als 100 %**
- 100 % für den gesamten Energiesektor?
- Zusammenfassung

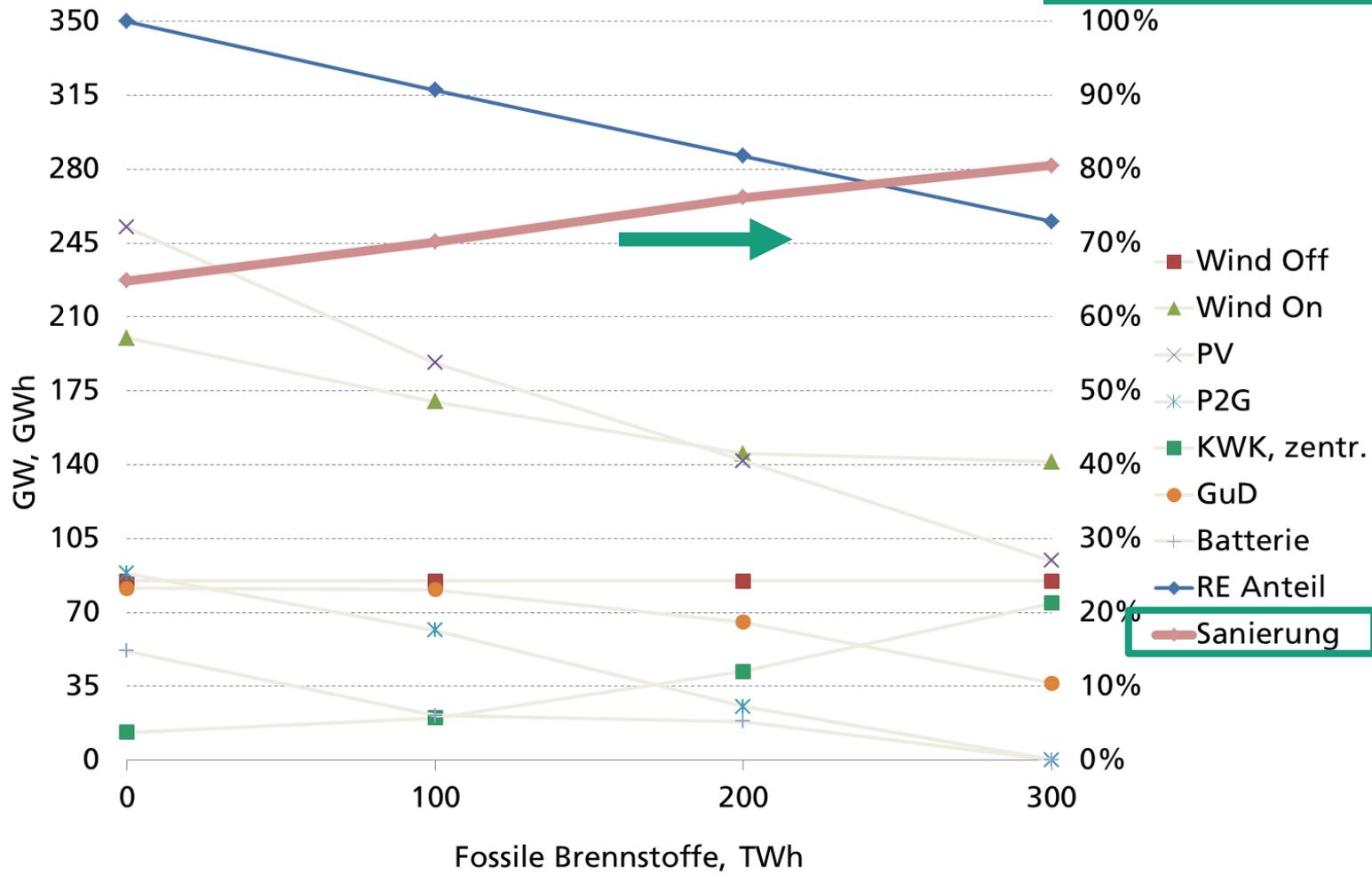
Ergebnisse – Weniger als 100 % EE

Optimalsystem für einen gegebenen Betrag an fossilen Energieträgern



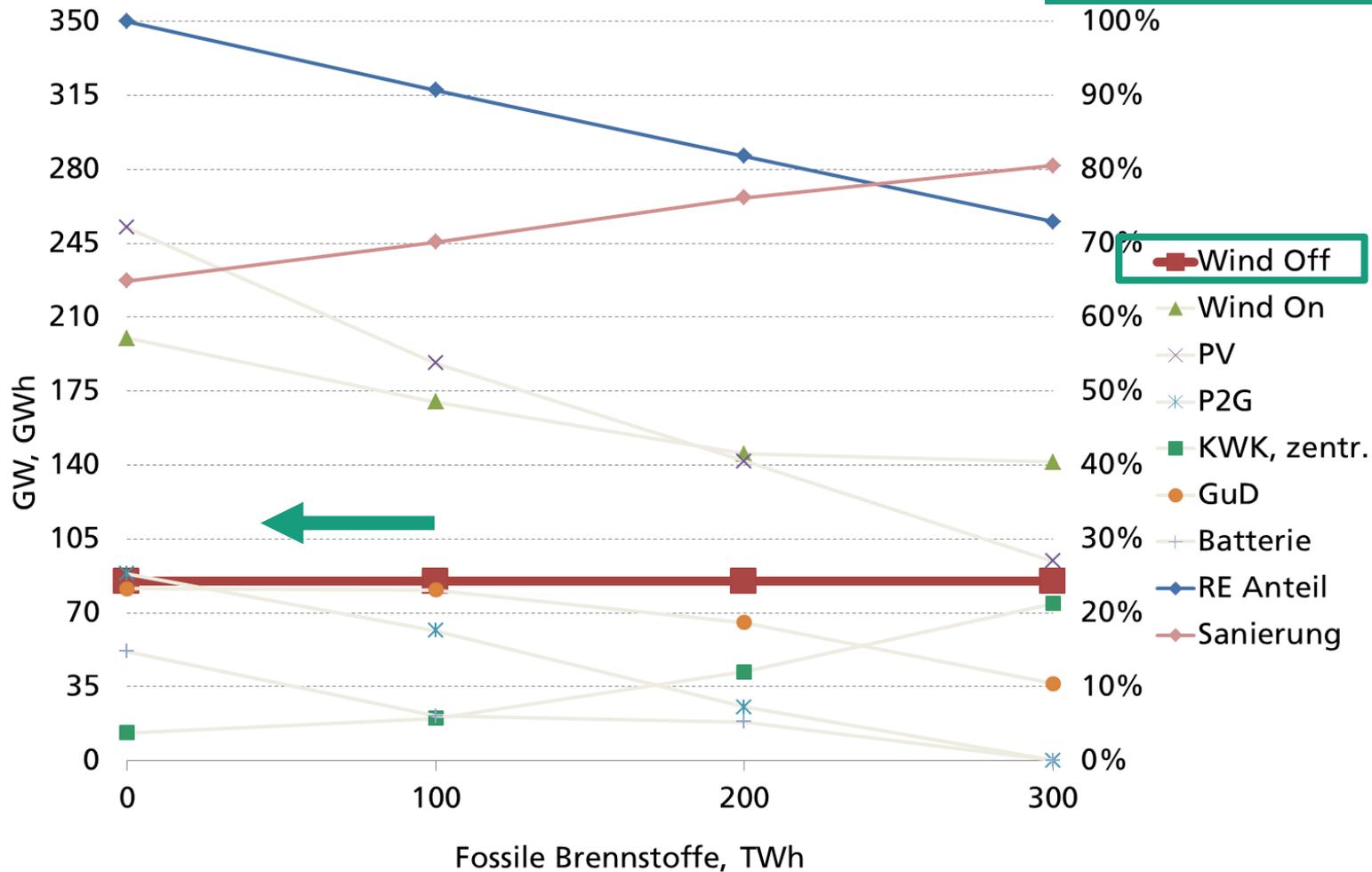
Ergebnisse – Weniger als 100 % EE

Optimalsystem für einen gegebenen Betrag an fossilen Energieträgern



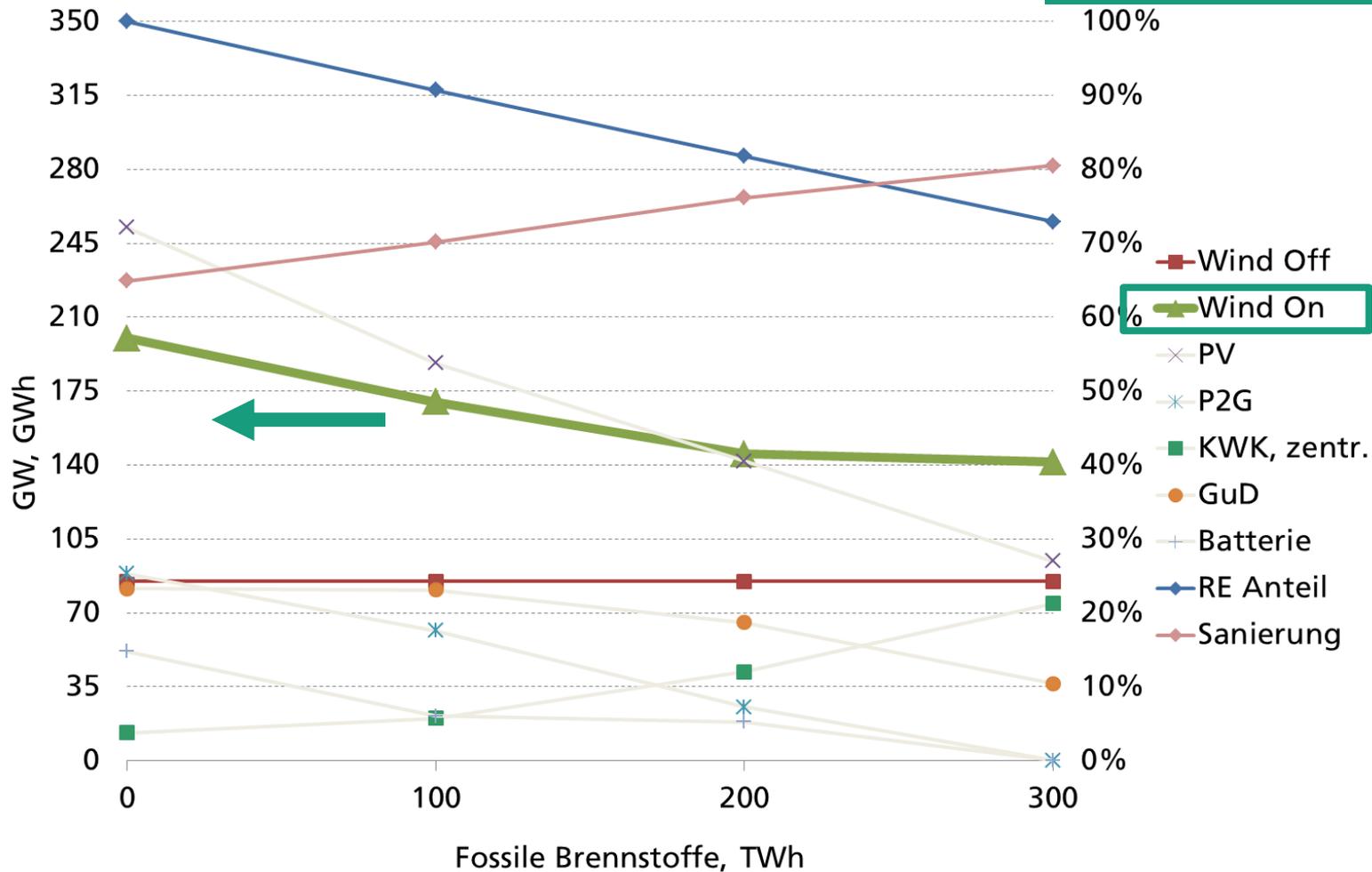
Ergebnisse – Weniger als 100 % EE

Optimalsystem für einen gegebenen Betrag an fossilen Energieträgern



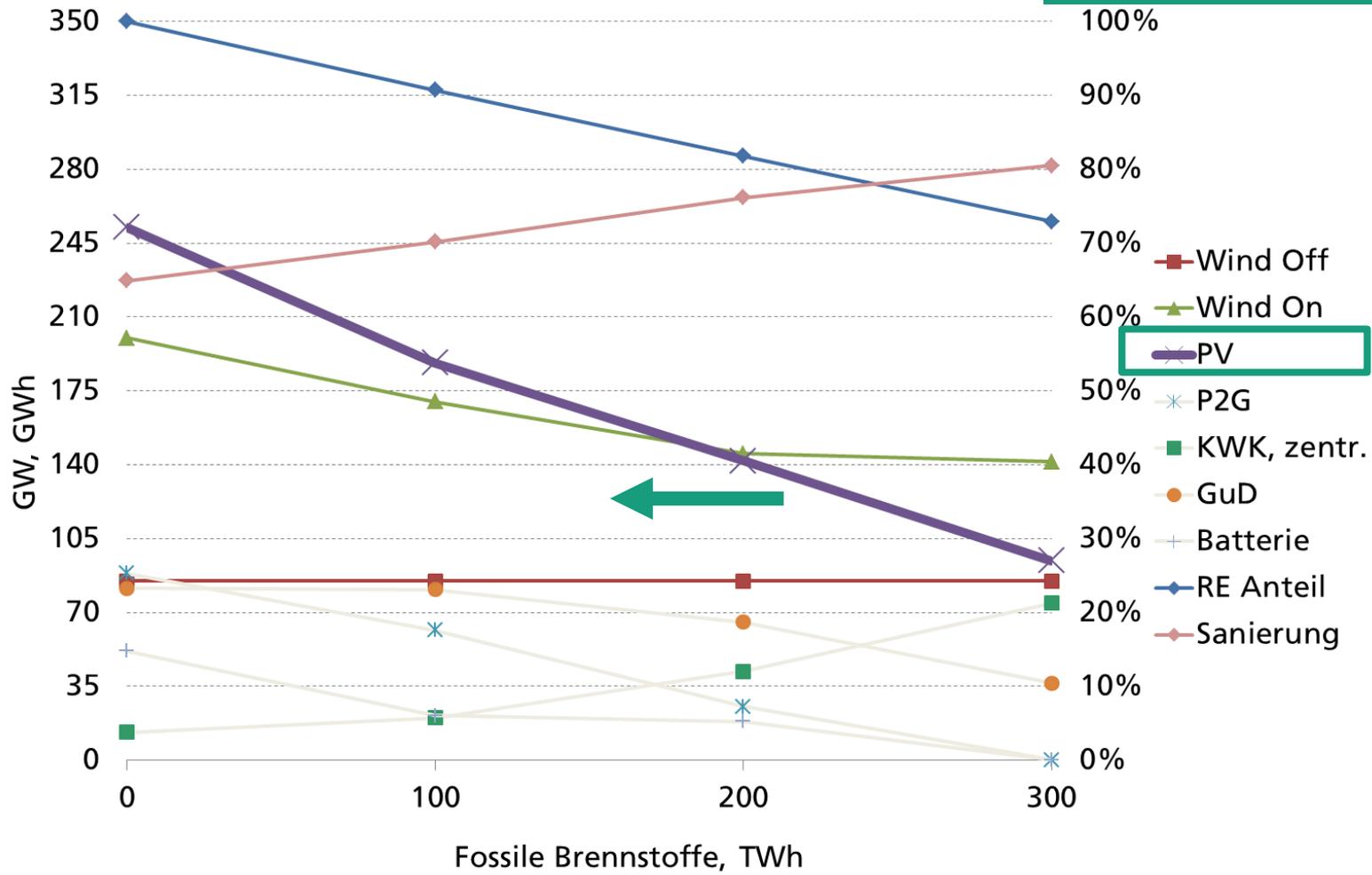
Ergebnisse – Weniger als 100 % EE

Optimalsystem für einen gegebenen Betrag an fossilen Energieträgern



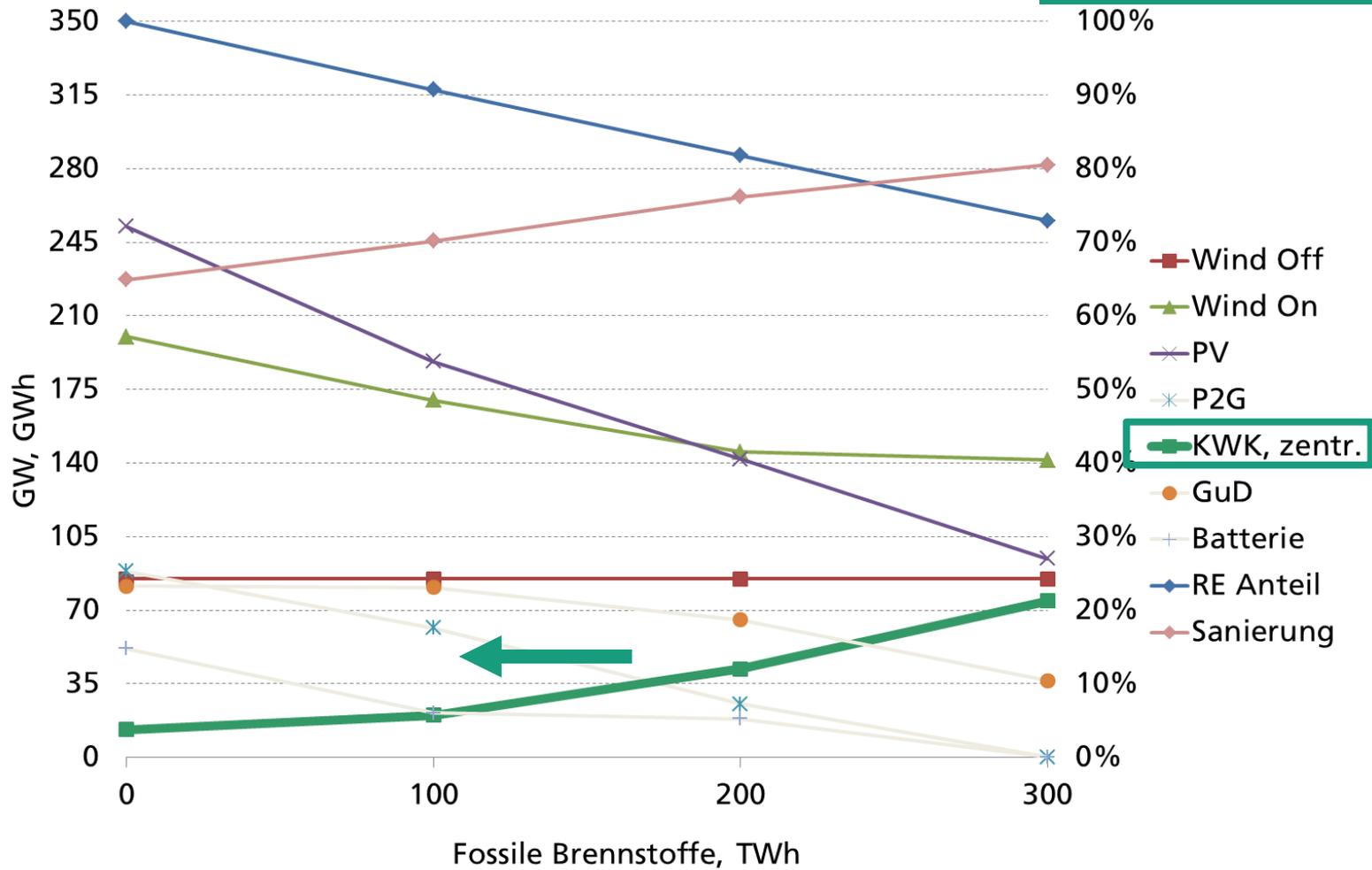
Ergebnisse – Weniger als 100 % EE

Optimalsystem für einen gegebenen Betrag an fossilen Energieträgern



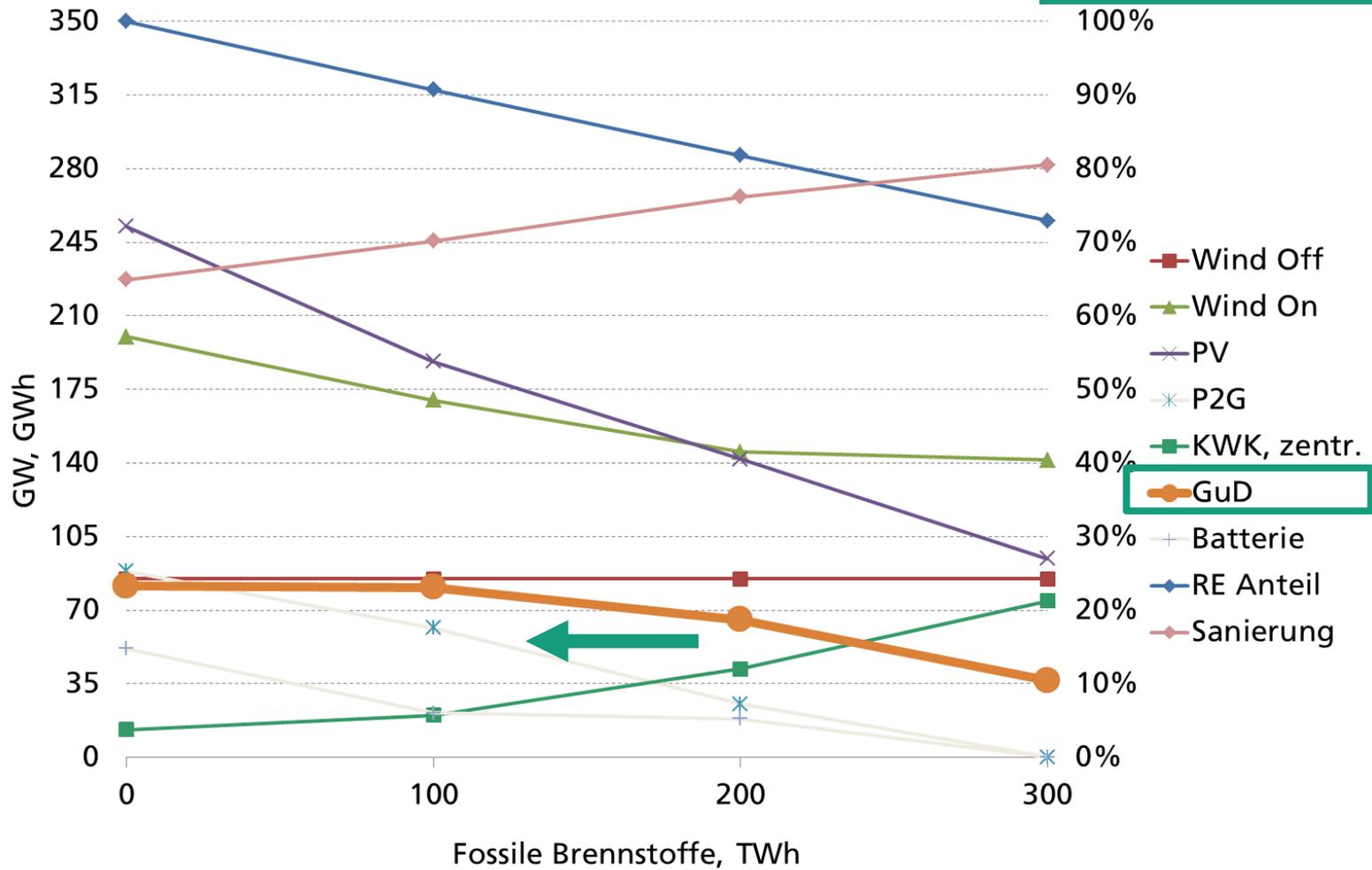
Ergebnisse – Weniger als 100 % EE

Optimalsystem für einen gegebenen Betrag an fossilen Energieträgern



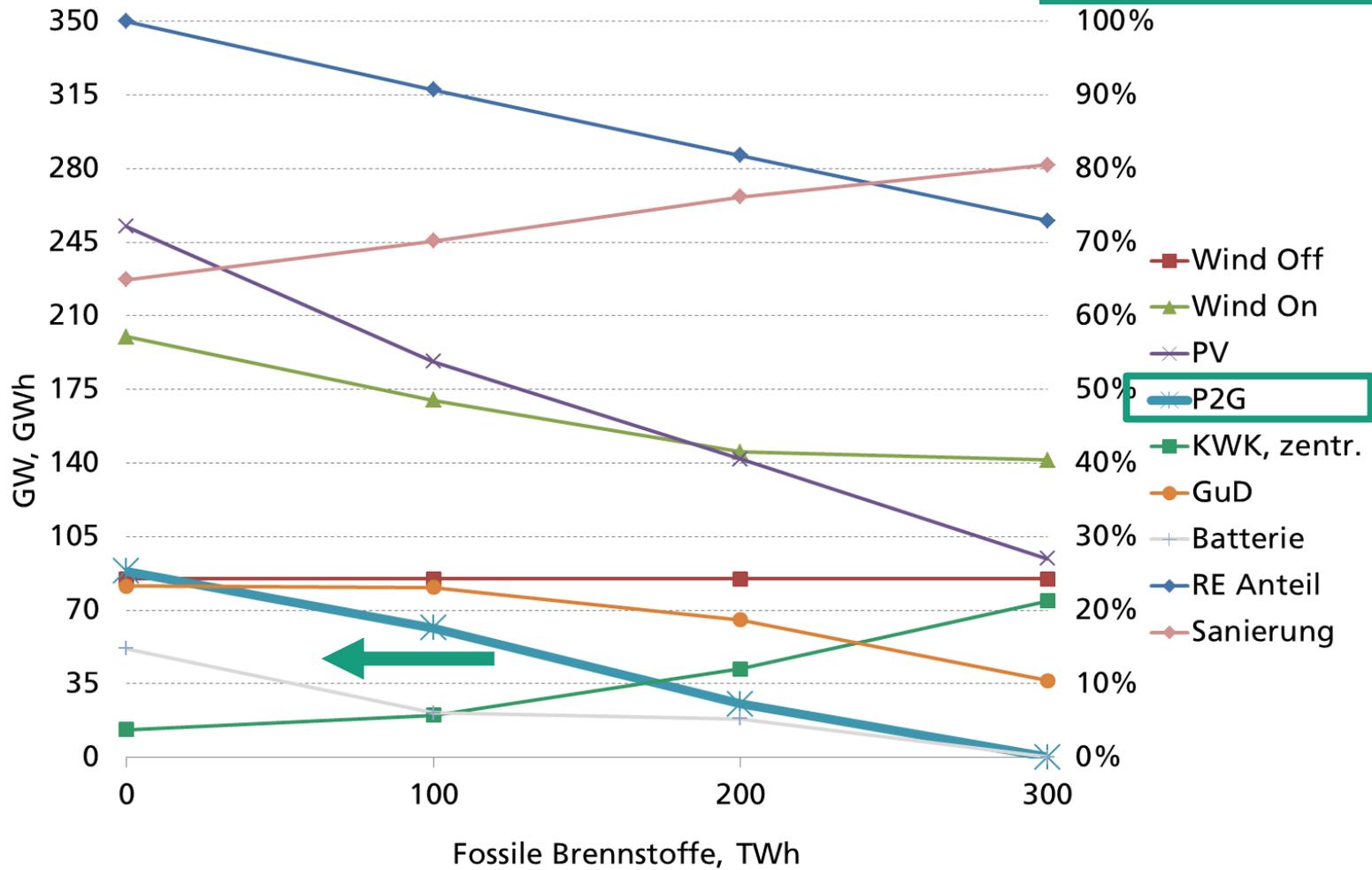
Ergebnisse – Weniger als 100 % EE

Optimalsystem für einen gegebenen Betrag an fossilen Energieträgern



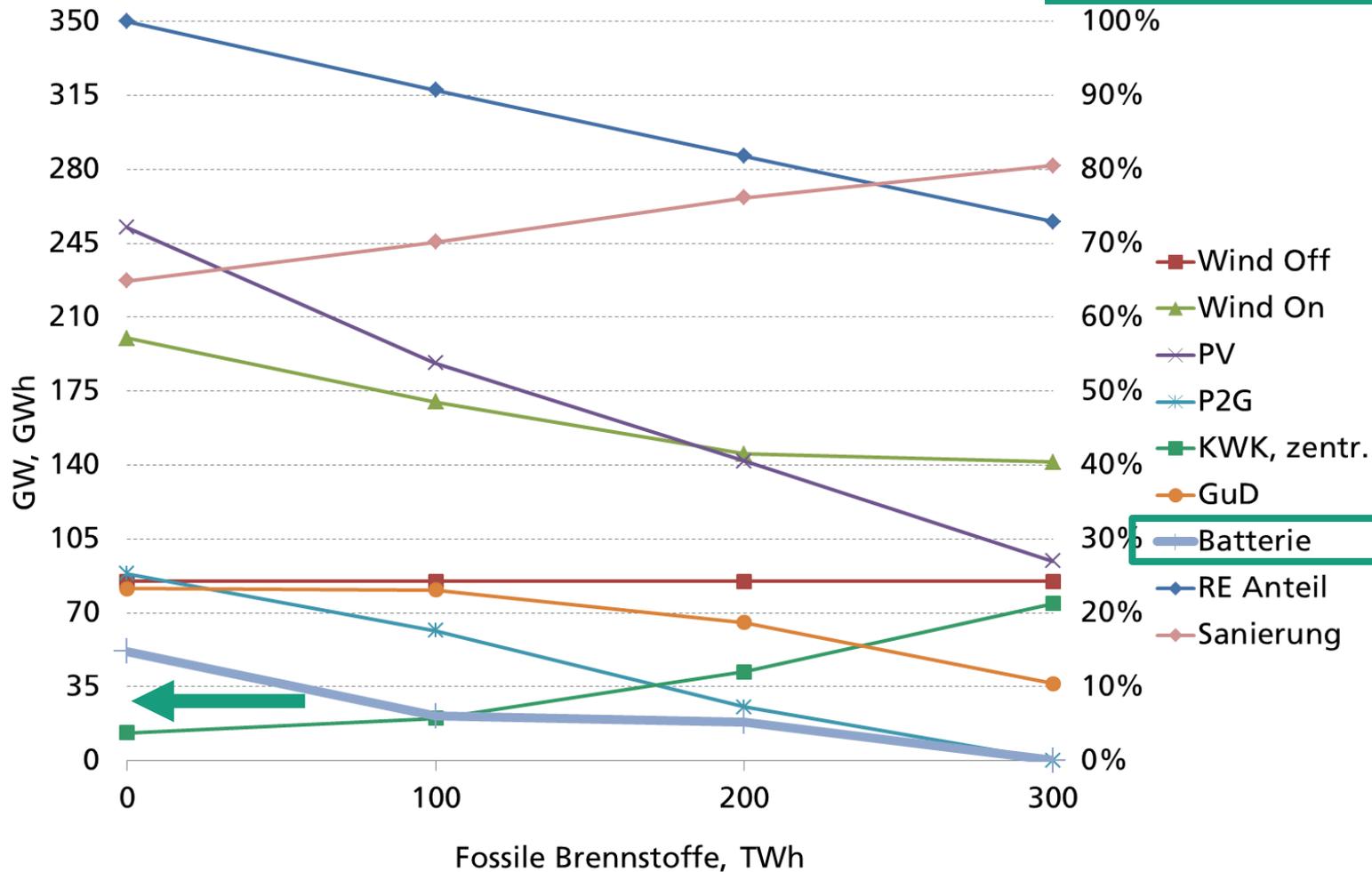
Ergebnisse – Weniger als 100 % EE

Optimalsystem für einen gegebenen Betrag an fossilen Energieträgern



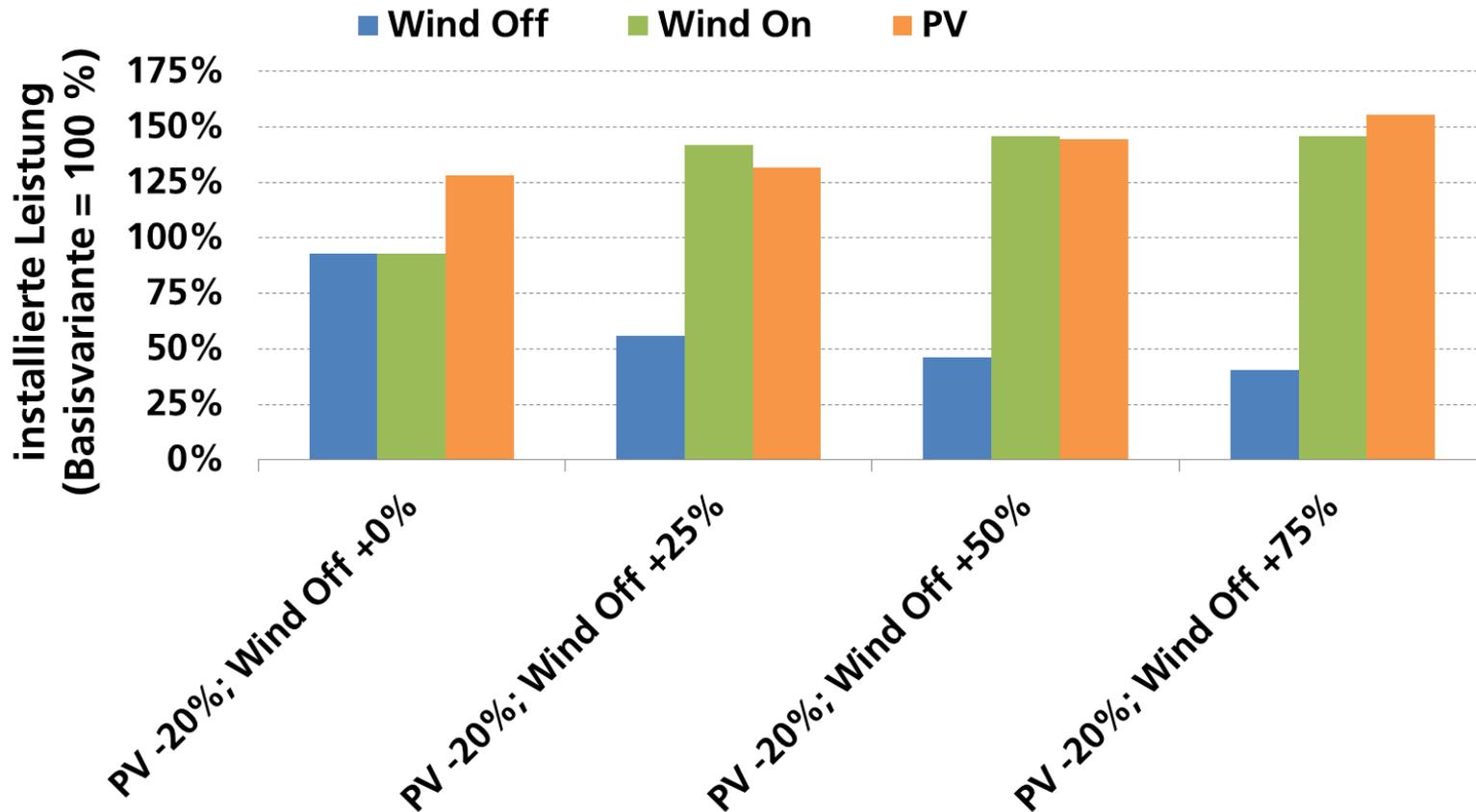
Ergebnisse – Weniger als 100 % EE

Optimalsystem für einen gegebenen Betrag an fossilen Energieträgern

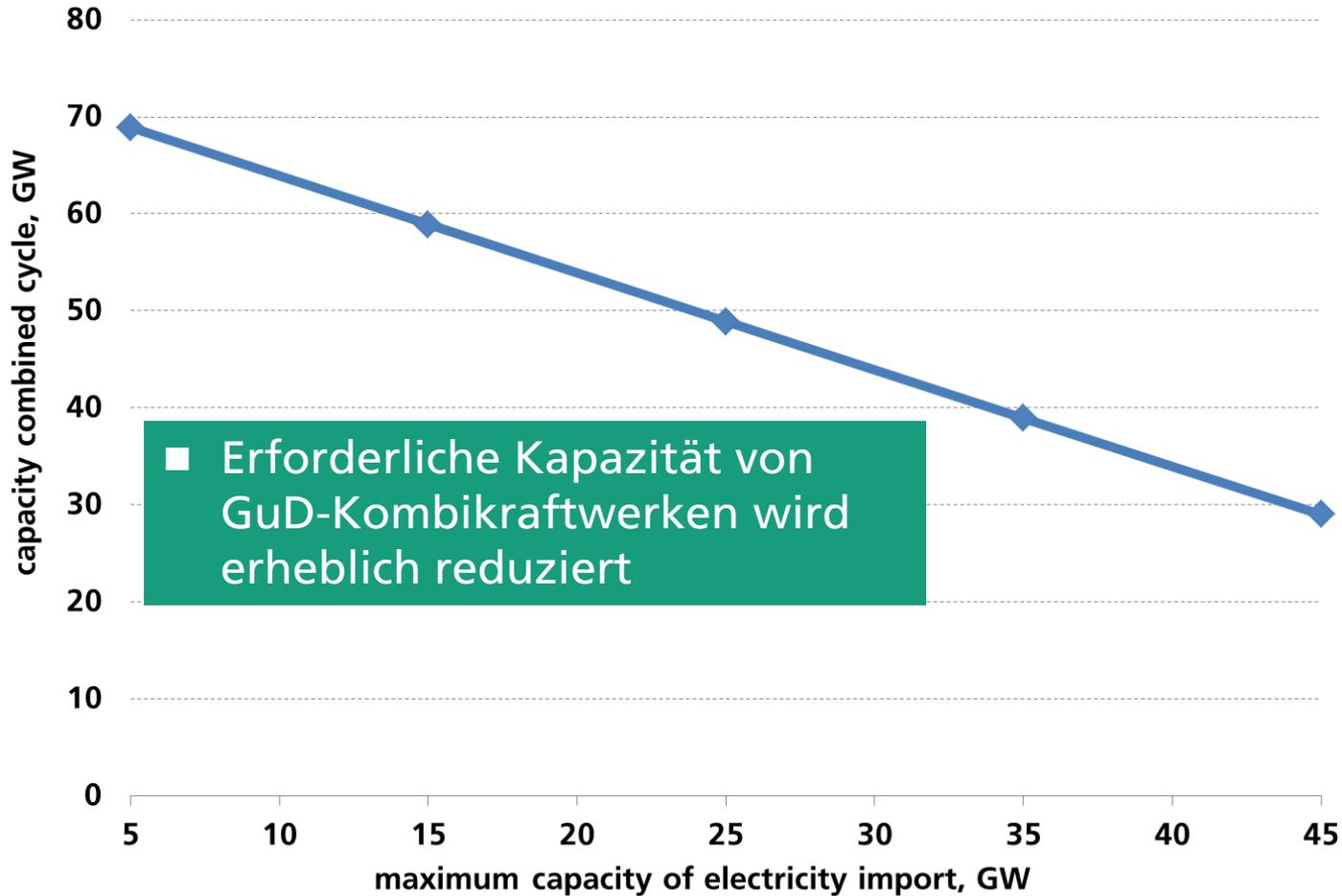


Geänderte Kosten Wind-Offshore und Photovoltaik

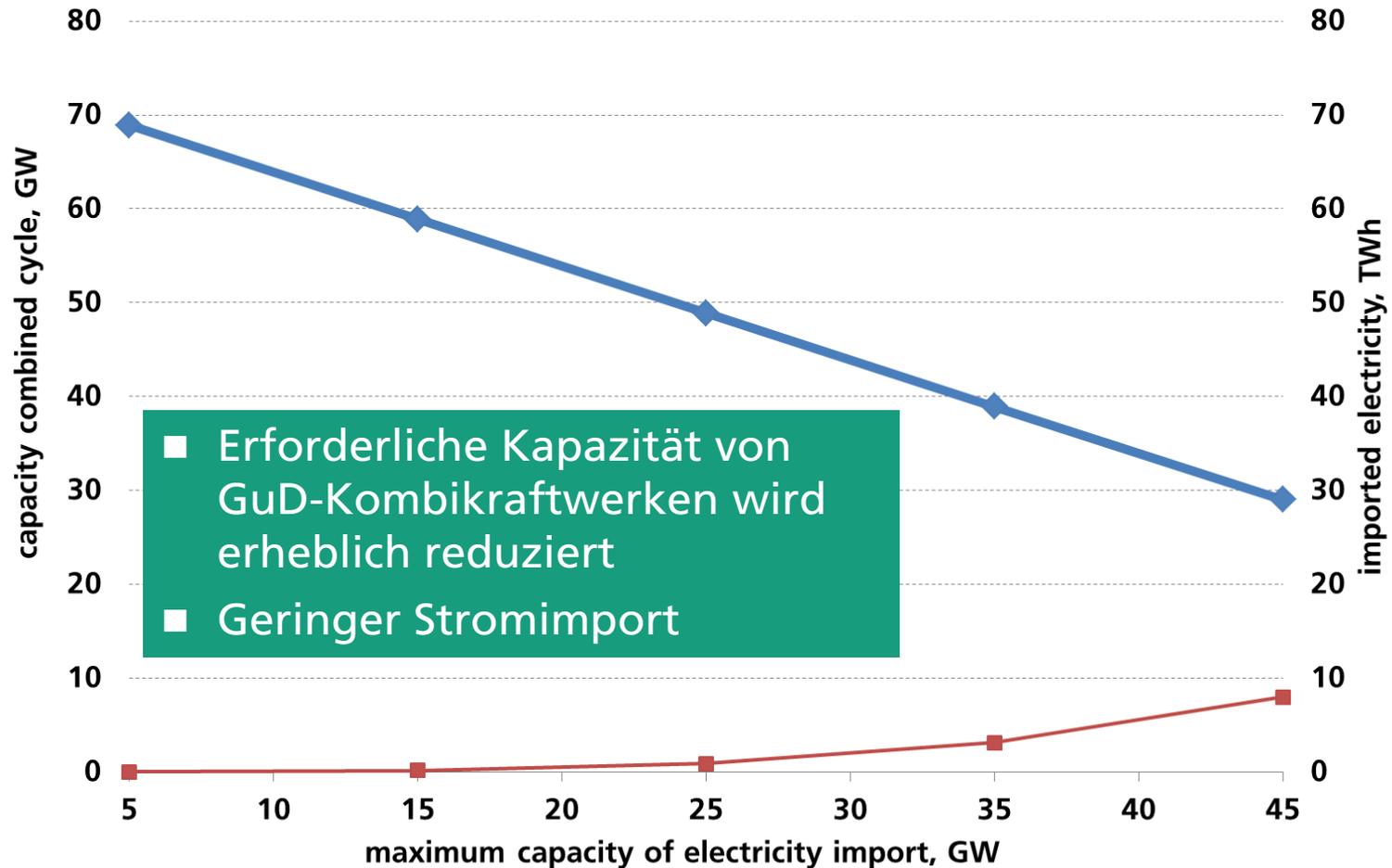
Randbedingung: 200 TWh fossile Energie



Ergebnisse – Stromimport



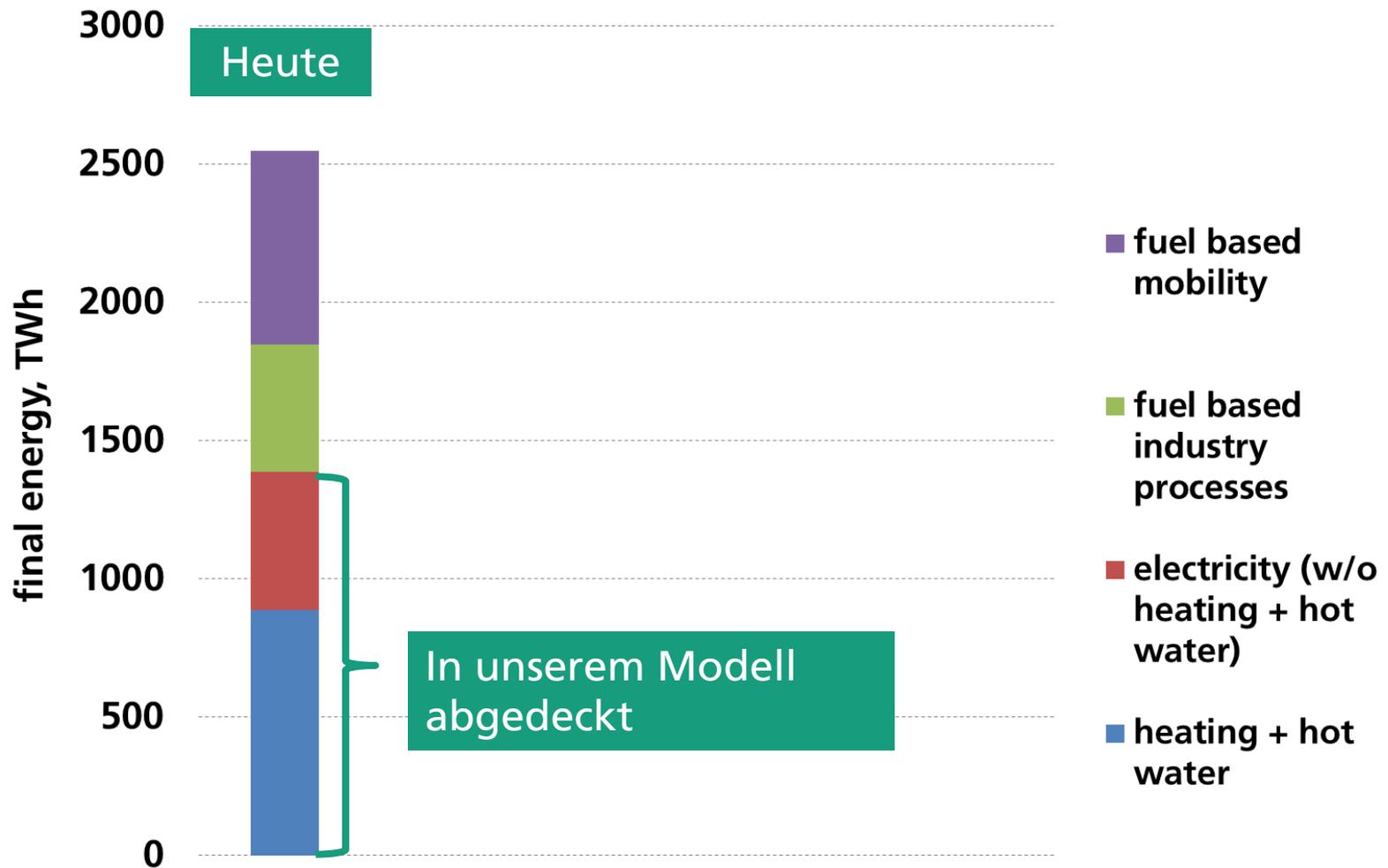
Ergebnisse – Stromimport



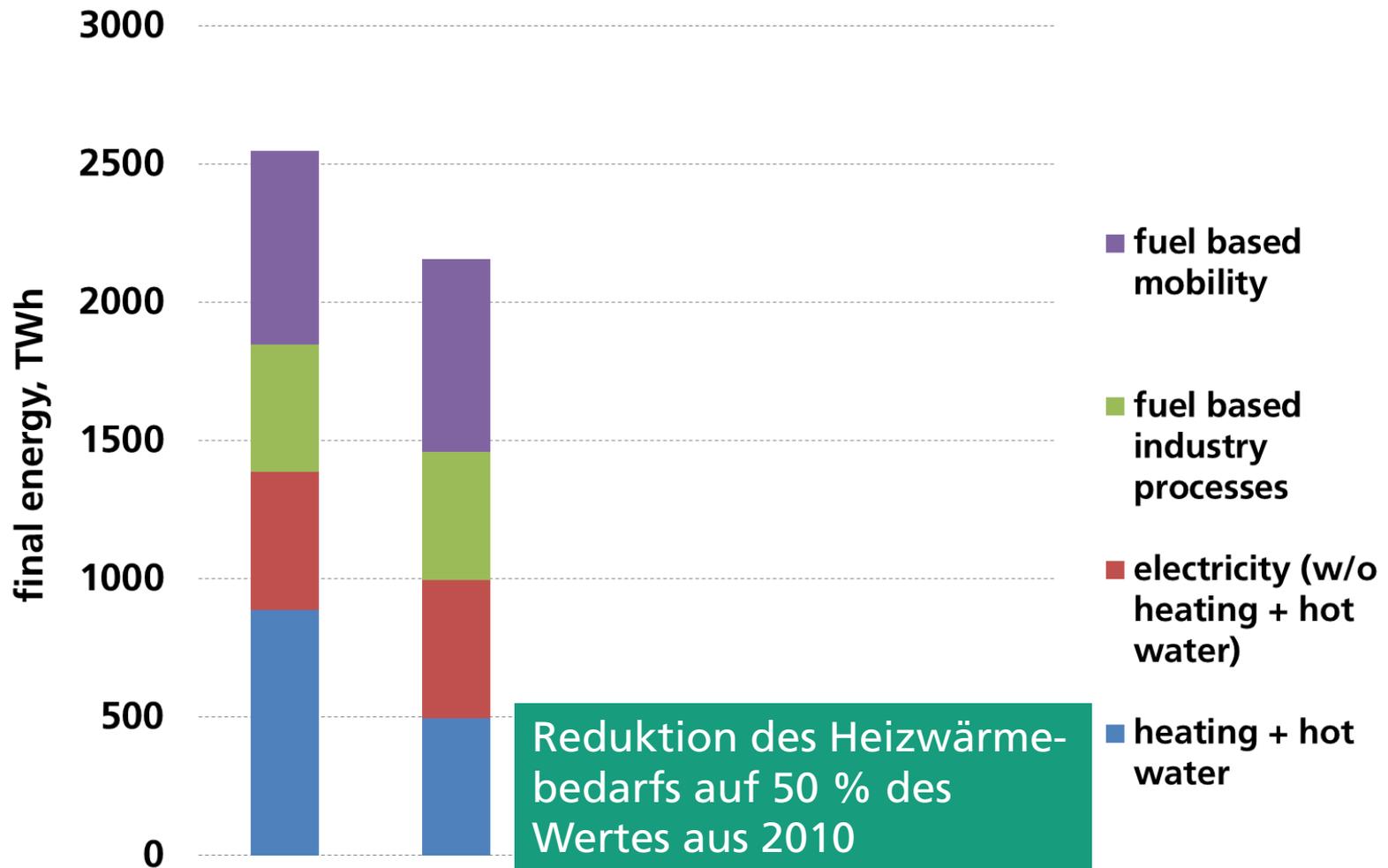
Agenda

- Einführung
- Methodik
- Technische Potenziale
- Ergebnisse
 - 100 % EE für Strom und Wärme
 - Weniger als 100 %
- 100 % für den gesamten Energiesektor?
- Zusammenfassung

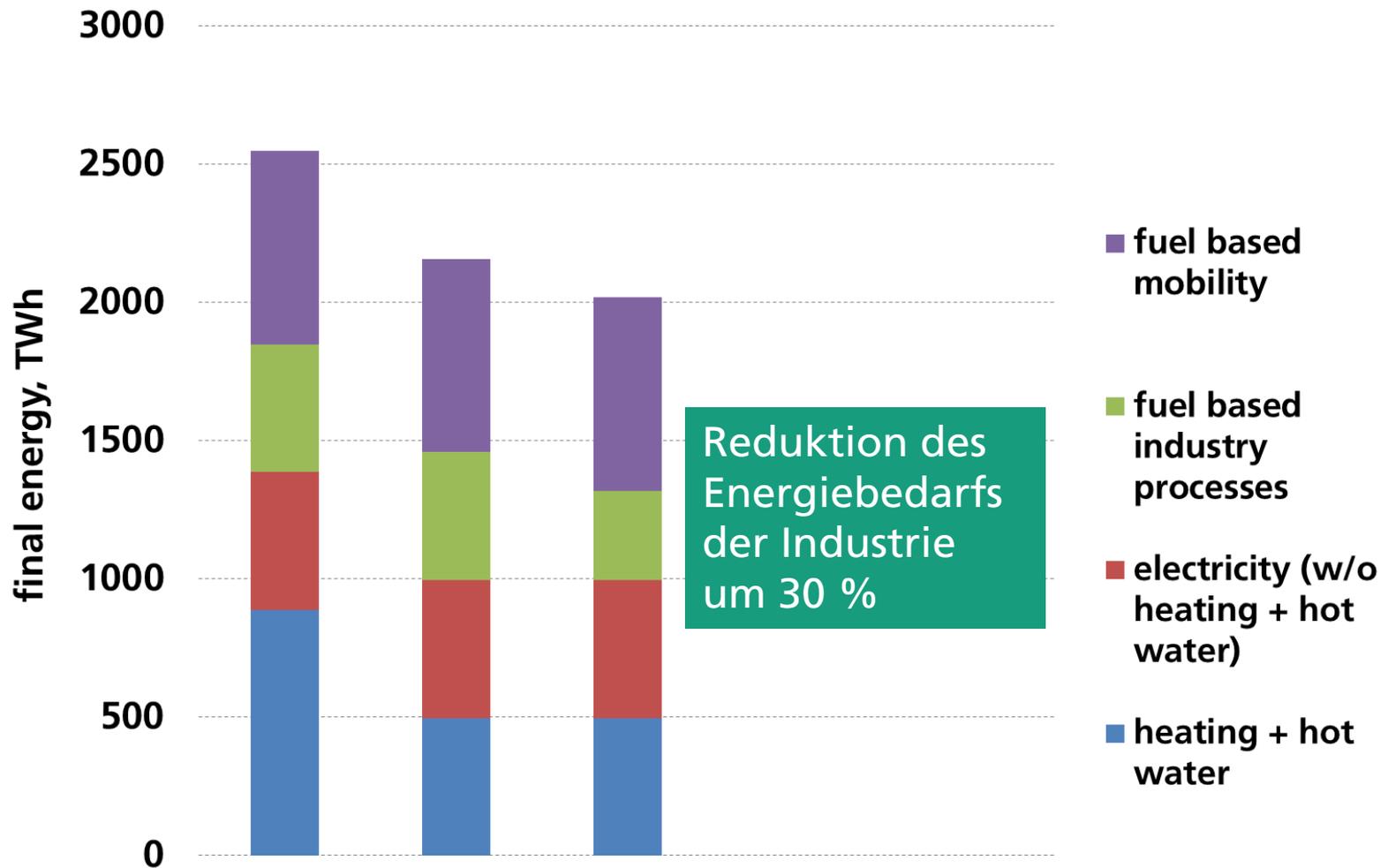
100 % für den gesamten Energiesektor?



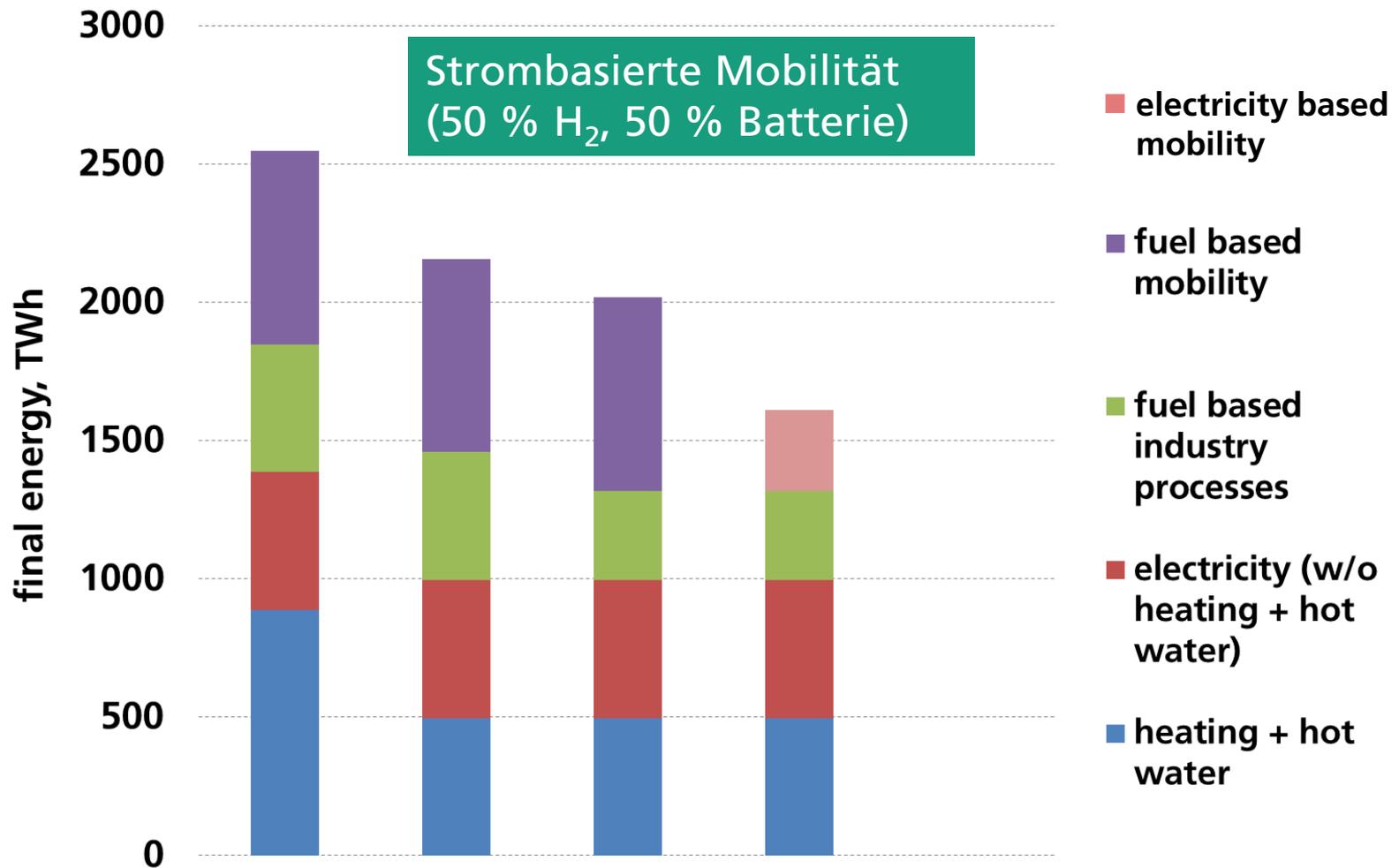
100 % für den gesamten Energiesektor?



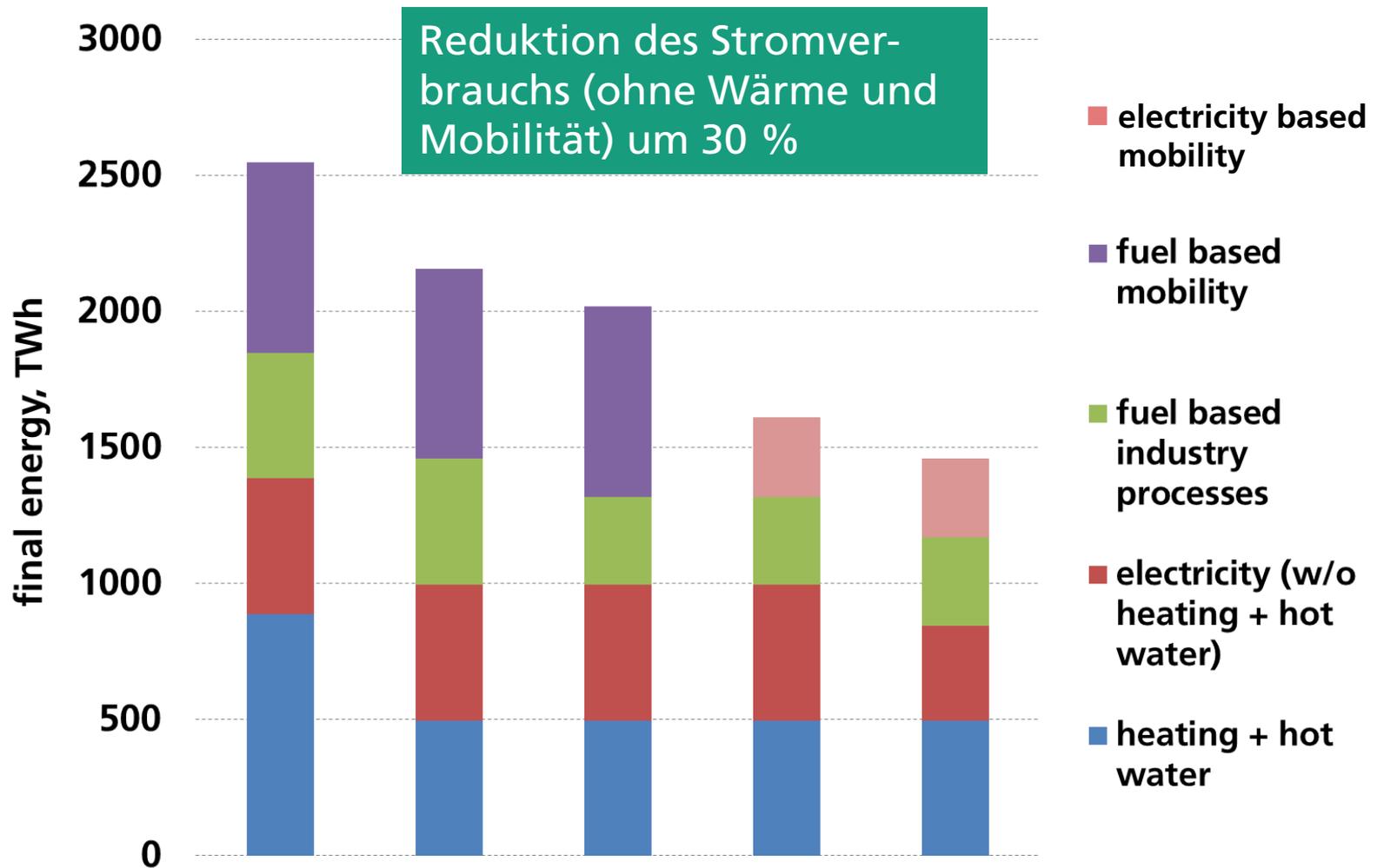
100 % für den gesamten Energiesektor?



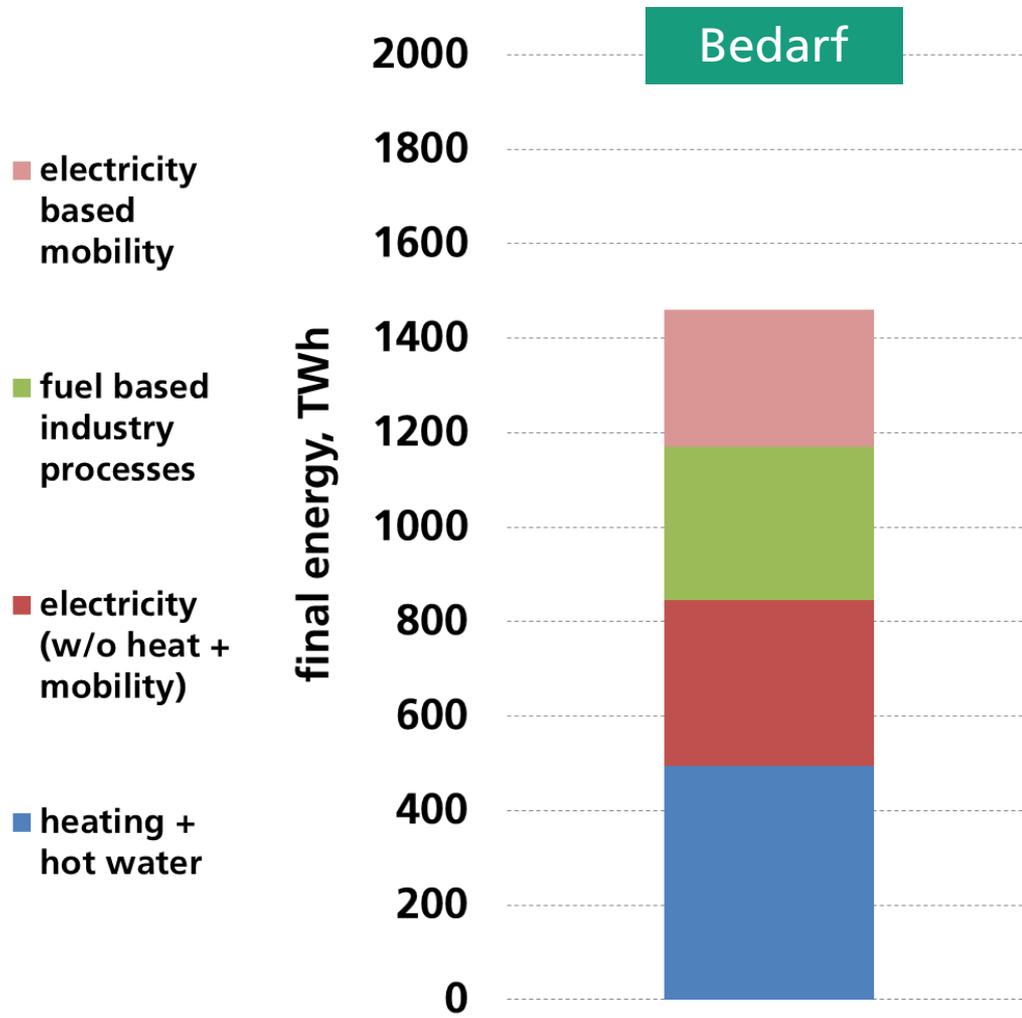
100 % für den gesamten Energiesektor?



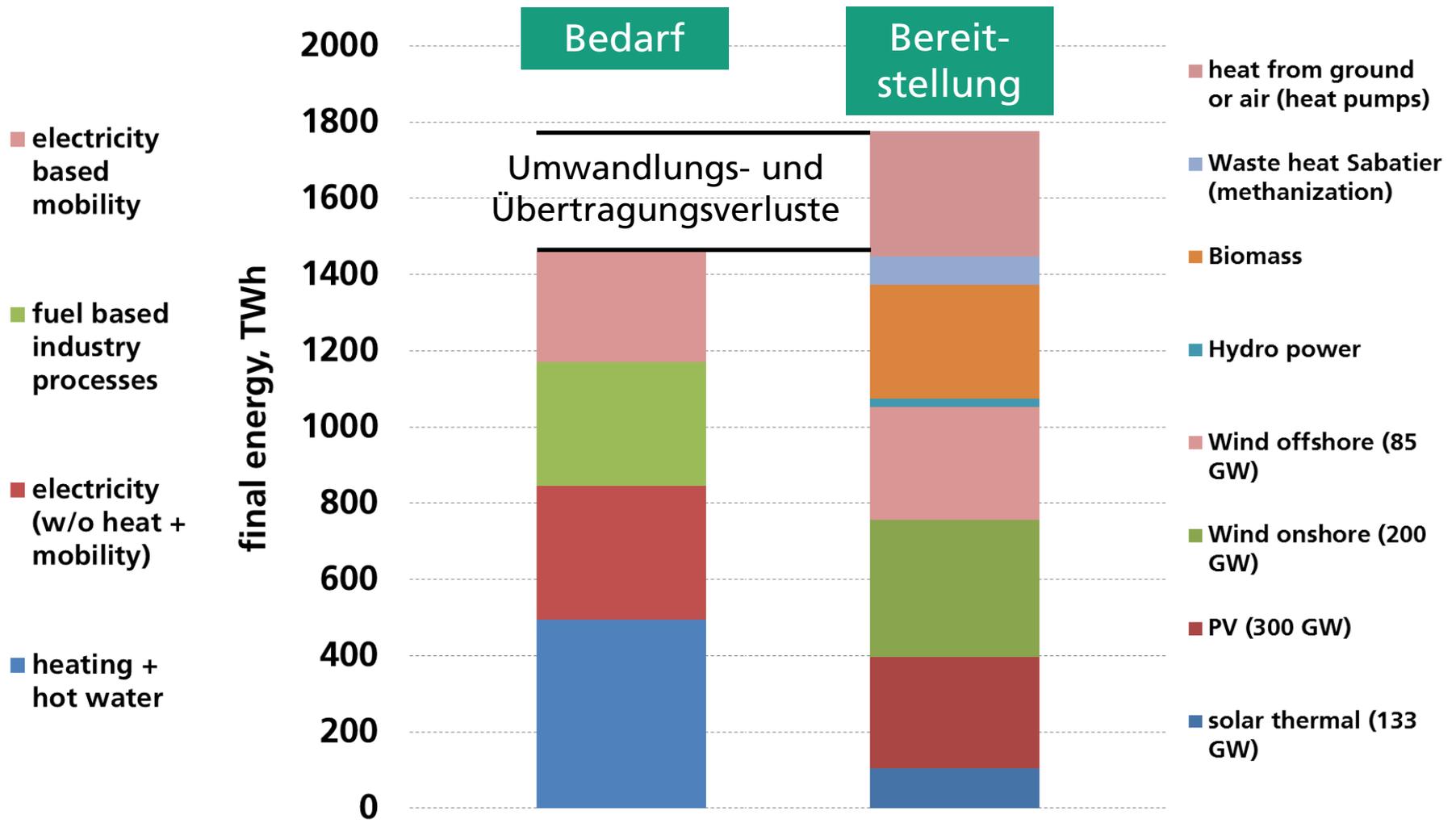
100 % für den gesamten Energiesektor?



100 % für den gesamten Energiesektor?



100 % für den gesamten Energiesektor?



Agenda

- Einführung
- Methodik
- Technische Potenziale
- Ergebnisse
 - 100 % EE für Strom und Wärme
 - Weniger als 100 %
- 100 % für den gesamten Energiesektor?
- Zusammenfassung

Zusammenfassung 1/2

- 100 % EE für Strom und Wärme sind möglich
 - Wichtig: energetische Gebäudesanierung → Reduktion des Heizenergiebedarfs um 50-60 %
 - Weitgehende Ausnutzung der technischen Potenziale der EE, insbesondere Wind
 - Für Solartechnologien benötigte Flächen ca. 1200 - 1800 km² (technisches Potential >2800 km²)
- Jährliche Gesamtkosten liegen zwischen 118 und 126 Mrd. € für sinnvoll dimensionierte Gesamtsysteme
- Entspricht in etwa den Kosten des heutigen deutschen Energiesystems (ca. 120 Mrd. € für Strom und Wärme)

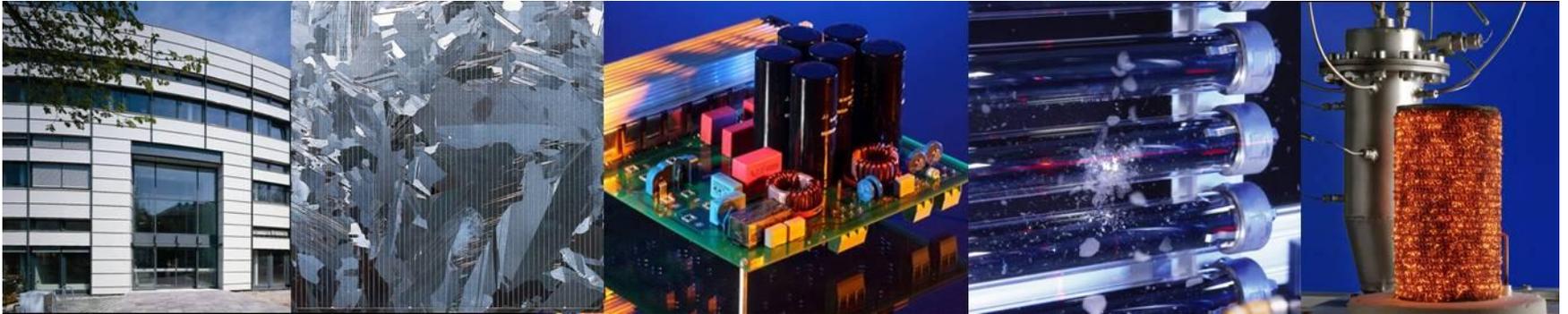
Zusammenfassung 2/2

- EE Anteil < 100 % führt zu Reduktionen in der erforderlichen Kapazität der Hauptwandler
 - Insbesondere: kein Power-to-Gas für EE Anteil nötig < ca. 70 %
- 100 % EE für alle Sektoren einschließlich Industrie und Mobilität ambitioniert: nur möglich in Verbindung mit signifikanter Reduktion des Energiebedarfs in allen Sektoren
- Leistungsfähiges ganzheitliches Modell für Strom und Wärme und deren Interaktion einschließlich energetischer Gebäudesanierung
- Weiterentwicklung
 - Einbeziehung Mobilität und Brennstoffe in Industrie in Modellierung
 - Ausweitung auf Europa (EU-27 + Norwegen und Schweiz) (Voraussetzung: Projektfinanzierung)

Fragestellungen, die über rein technische Aspekte hinausgehen ...

- Ressourcenverfügbarkeit: genug Ressourcen um als globales Modell zu dienen?
- Kompatibel mit anderen Zielen (z.B. Biodiversität)?
- Gesellschaftliche Akzeptanz?
- Implementierung
 - Geschäftsmodelle für Investitionen und Betrieb: viel mehr Beteiligte als heute, neue Beteiligte aus unterschiedlichen Bereichen
 - Modelle für Bürger-Beteiligung
- EE und Energieeffizienz: aber auch Suffizienz („wieviel brauchen wir?“)?
- FuE wichtig, um Technologien (weiter) zu entwickeln
- FuE in Gesellschaftswissenschaften und Ökonomie essenziell
 - Beteiligung, gesellschaftliche Prozesse, Akzeptanz
 - Geänderte Wohlstands- bzw. Wohlfahrtsmodelle

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit...



Fraunhofer-Institut für Solare Energiesystems ISE

Hans-Martin Henning

www.ise.fraunhofer.de

Hans-martin.henning@ise.fraunhofer.de