

Bis zu 100 % Erneuerbare Energien für Strom und Wärme in Deutschland?



Hans-Martin Henning

Fraunhofer-Institut für Solare
Energiesysteme ISE

3. VDI-Fachkonferenz
„Energiespeicher für die
Energiewende 2013“

Mainz, 4. Juni 2013

www.ise.fraunhofer.de

Agenda

- Einführung
- Methodik
- Ergebnisse
- Nachtrag: Einbeziehung Verkehr, Industrieprozesse
- Zusammenfassung, Fazit

Agenda

- Einführung
- Methodik
- Ergebnisse
- Nachtrag: Einbeziehung Verkehr, Industrieprozesse
- Zusammenfassung, Fazit

Ziele der Bundesregierung für 2050

Insgesamt

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

Strom

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

Gebäudesektor

- Nahezu „klimaneutraler Gebäudesektor“
- Reduktion Primärenergie um 80 %

Leitfragen unserer Untersuchung

- Ist es möglich, den Energiebedarf Deutschlands überwiegend oder vollständig mit erneuerbaren Energien zu decken?
- Falls ja: wie sehen kostenoptimale, konsistente Systeme aus?
- ➔ Langfrist-Perspektive, volkswirtschaftliche Betrachtung

Modellumfang

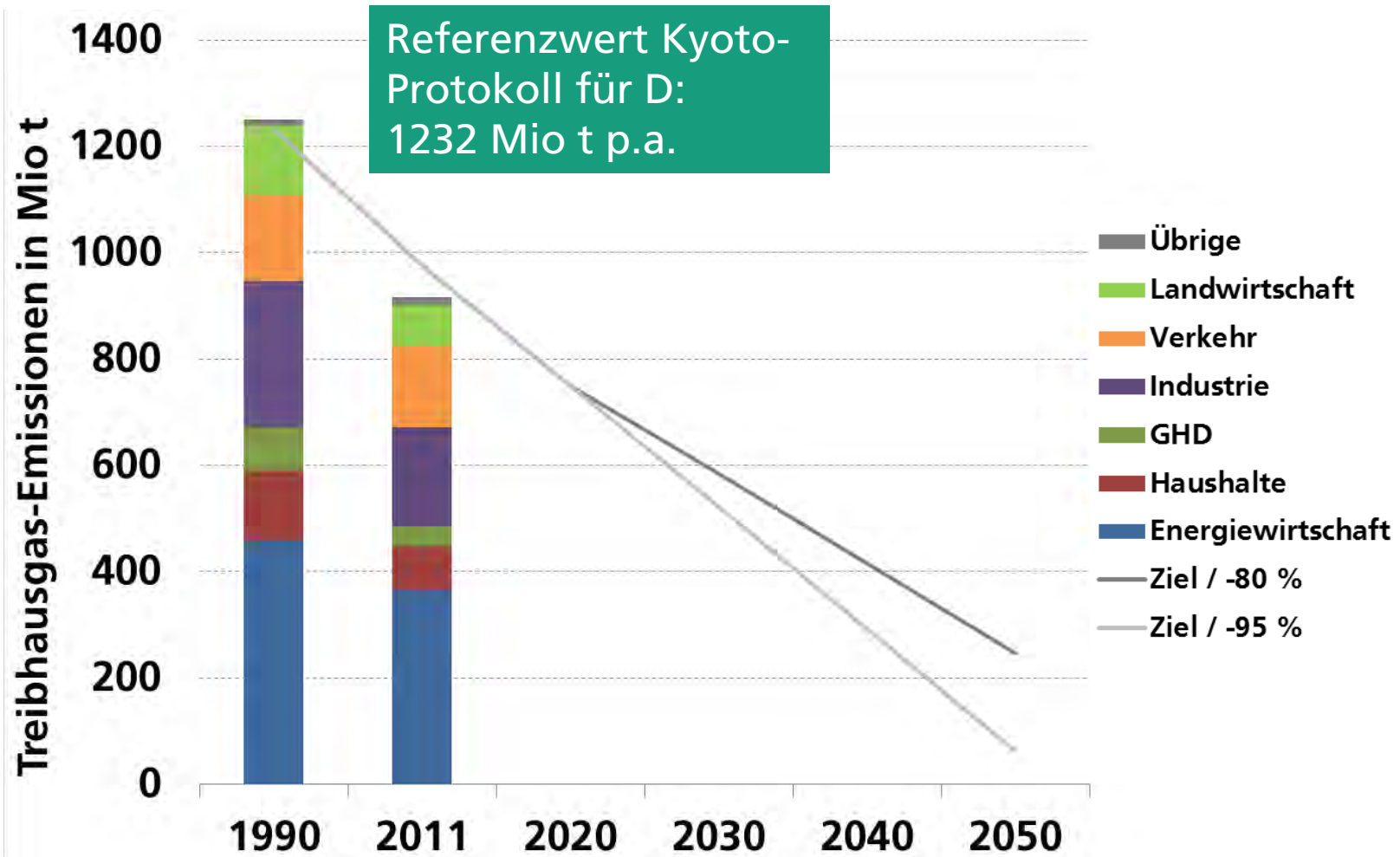
Enthalten

- Umfassendes Modell für Strom und Wärme (Heizung, Warmwasser)
 - ➔ umfasst Elektrizitäts- und Gebäudesektor (Wohnungs- und Nichtwohnungsbau) einschließlich energetische Gebäudesanierung
- Nur inländische EE

(Noch) nicht einbezogen

- Mobilität, die heute auf fossilen Brennstoffen basiert
- Industrie-Prozesse, die heute auf fossilen Brennstoffen basieren
- ➔ Modell erfasst Sektoren, die 62 % des heutigen Primärenergiebedarfs und knapp 54 % der THG-Emissionen ausmachen

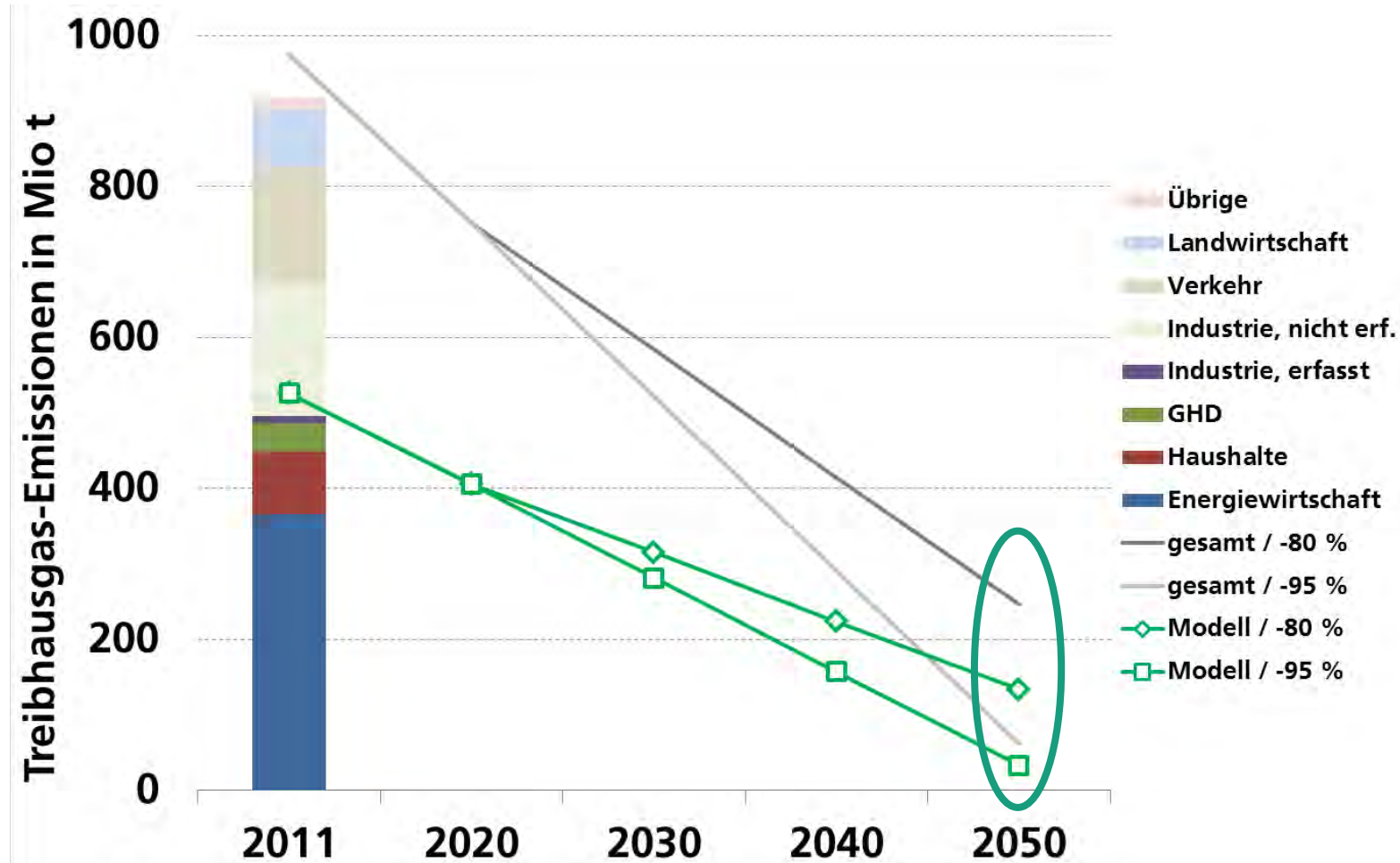
Die (Soll-) Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen



Die (Soll-) Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen

Im Modell erfasster Anteil

© VDI Wissensforum 2013 - Veranstaltungunterlagen - nur zum persönlichen Gebrauch



Agenda

- Einführung
- **Methodik**
- Ergebnisse
- Nachtrag: Einbeziehung Verkehr, Industrieprozesse
- Zusammenfassung, Fazit

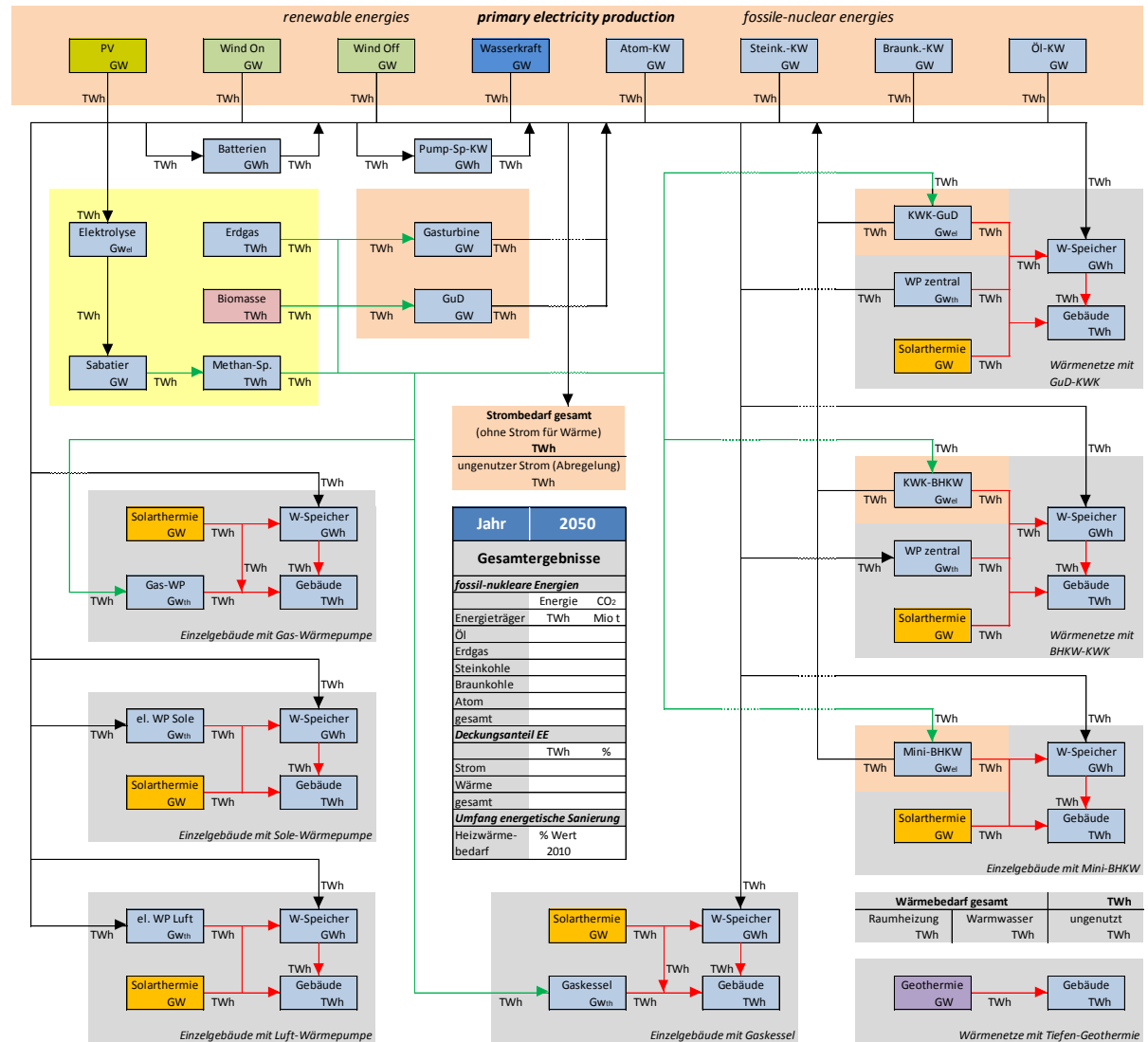
Modellstruktur REMod-D

Regenerative

Energien

Modell

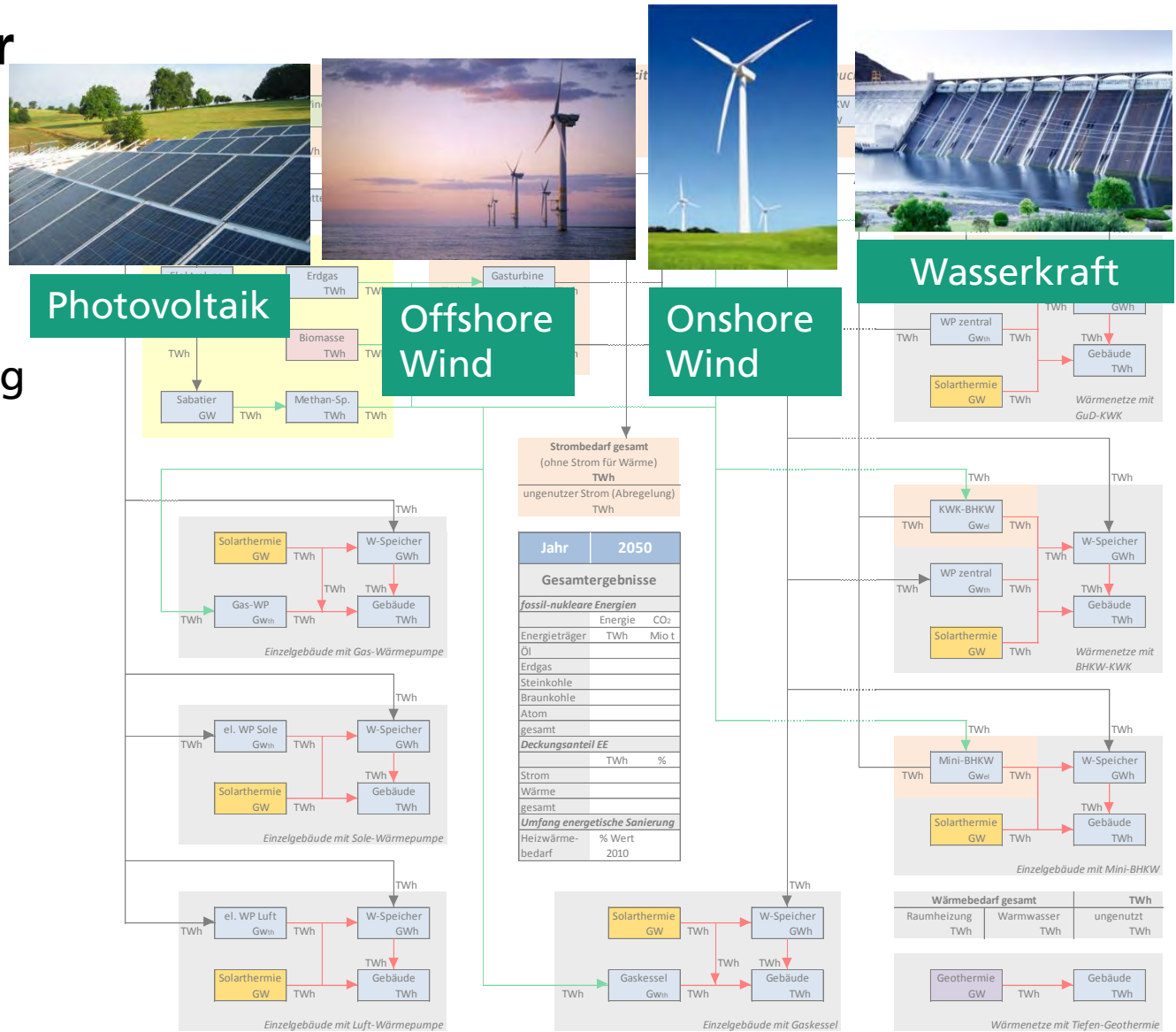
Deutschland



© Fraunhofer ISE

Modellstruktur REMod-D

EE-Stromerzeugung

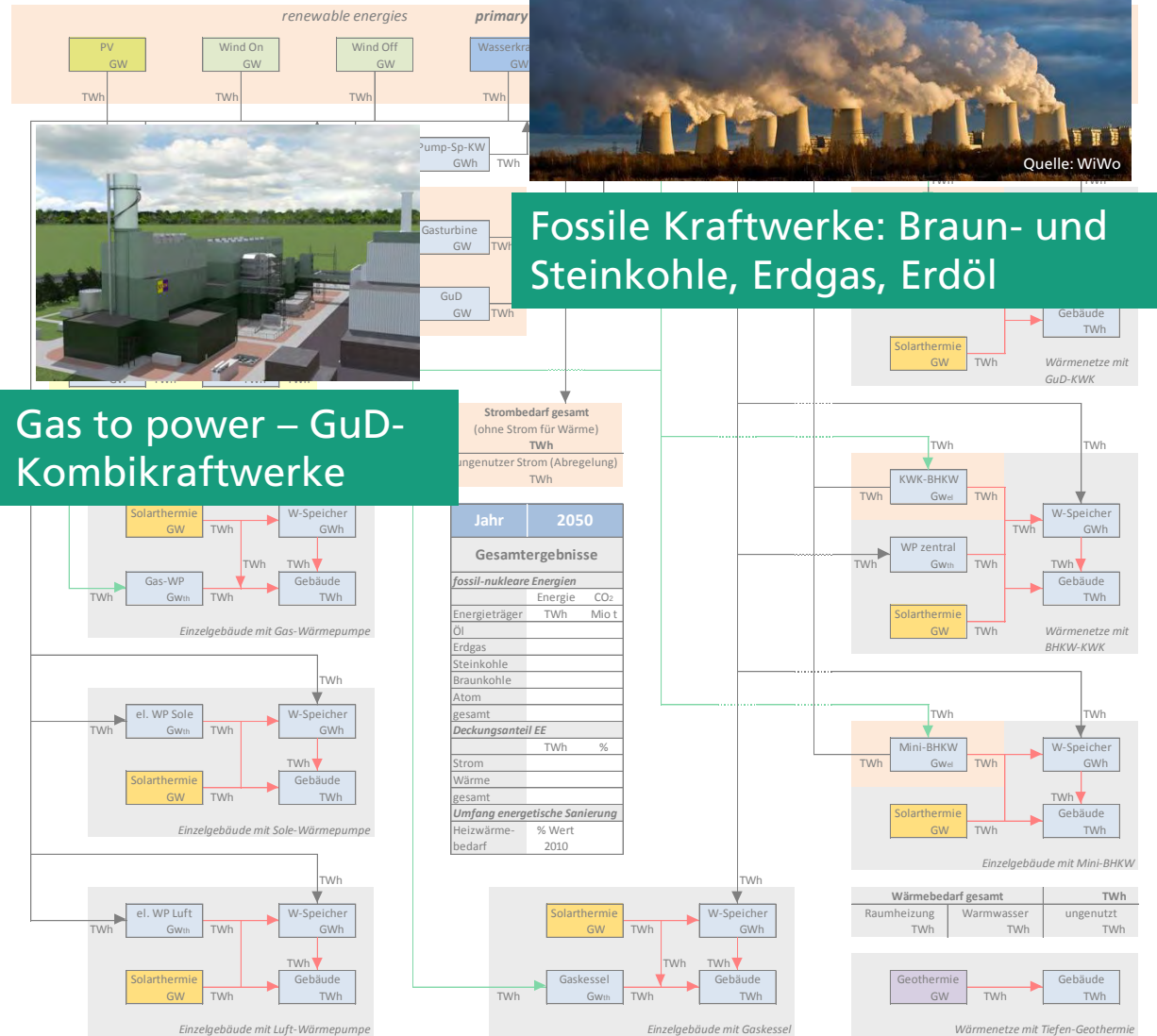


© Fraunhofer ISE

Modellstruktur REMod-D

EE-Stromerzeugung

Konventionelle
Stromerzeugung



© Fraunhofer ISE

Modellstruktur REMod-D

EE-Stromerzeugung

Konventionelle
Stromerzeugung

Lasten



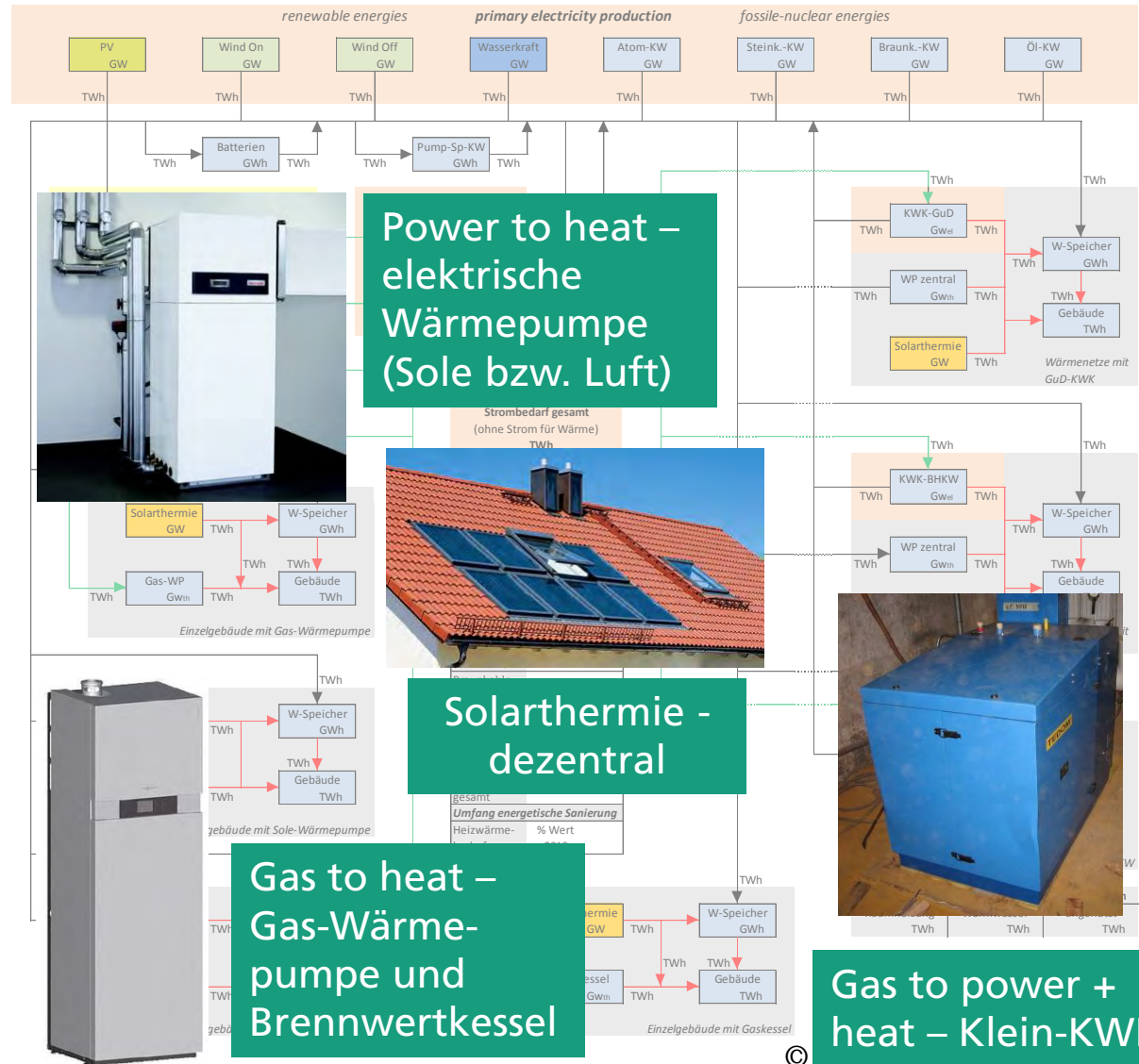
Modellstruktur REMod-D

EE-Stromerzeugung

Konventionelle
Stromerzeugung

Lasten

Wärmeversorgung
Einzelgebäude



Modellstruktur REMod-D

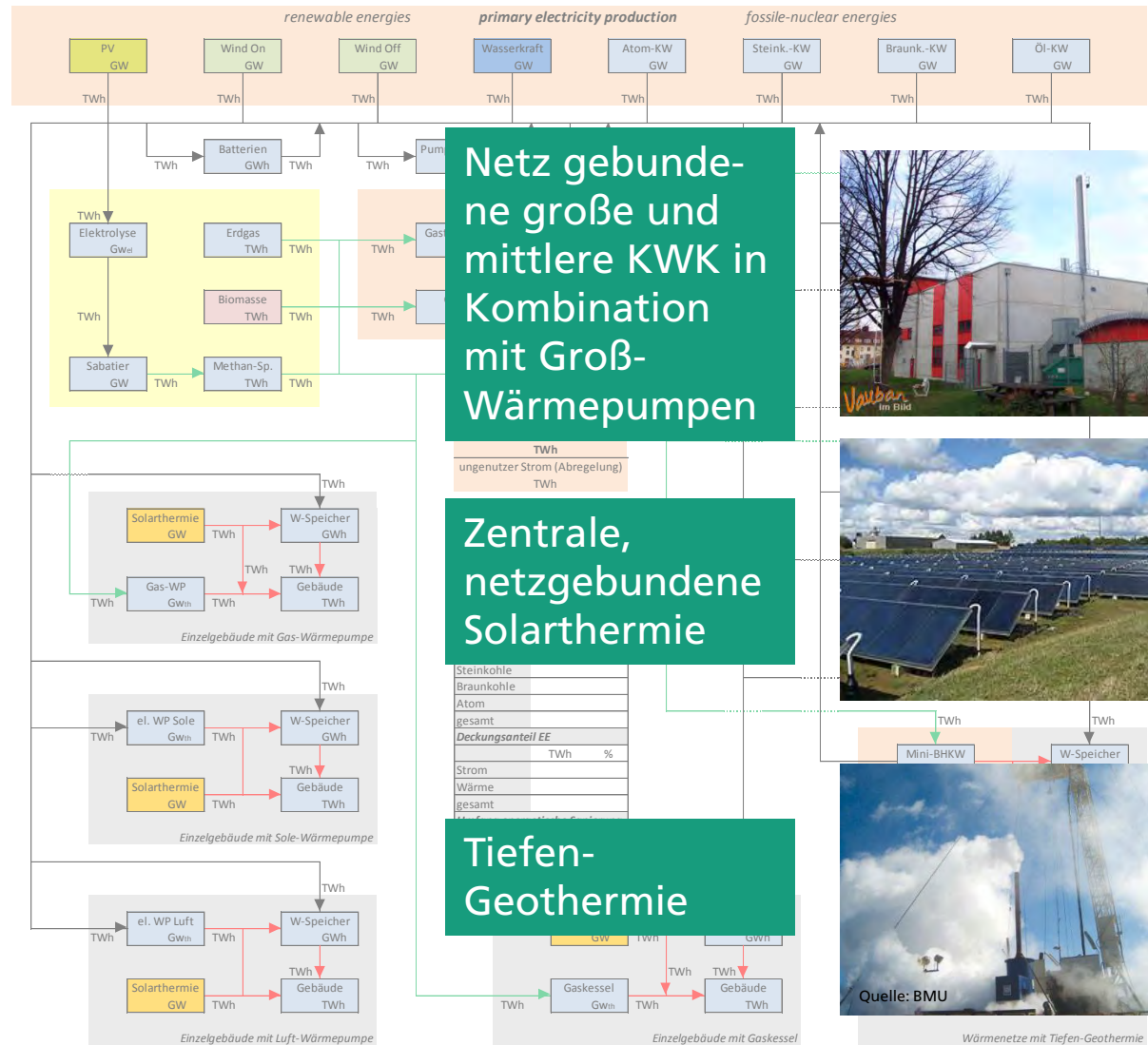
EE-Stromerzeugung

Konventionelle
Stromerzeugung

Lasten

Wärmesysteme
in Einzelgebäuden

Wärmesysteme
Zentral/netzgebunden



© Fraunhofer ISE

Modellstruktur REMod-D

EE-Stromerzeugung

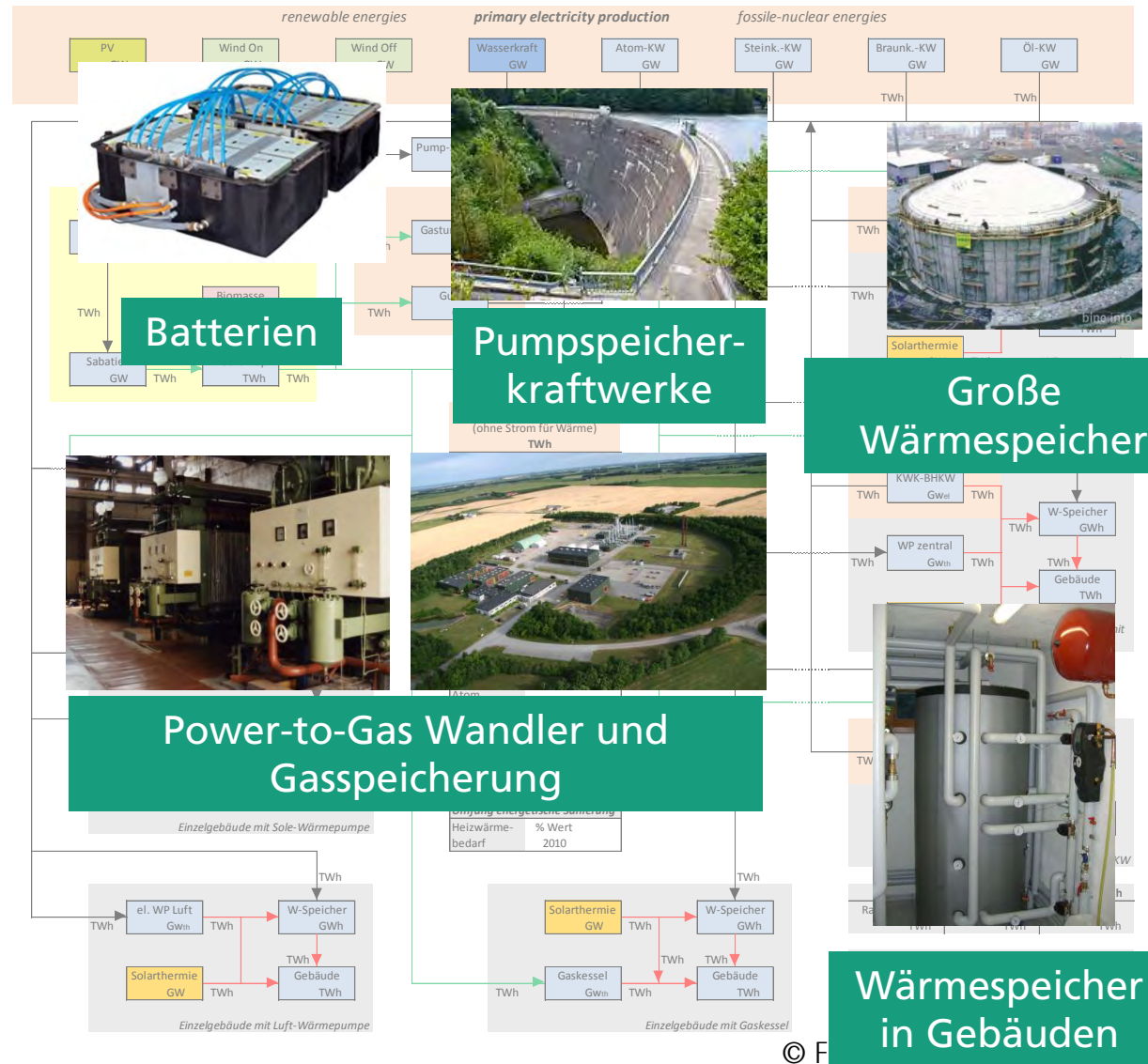
Konventionelle
Stromerzeugung

Lasten

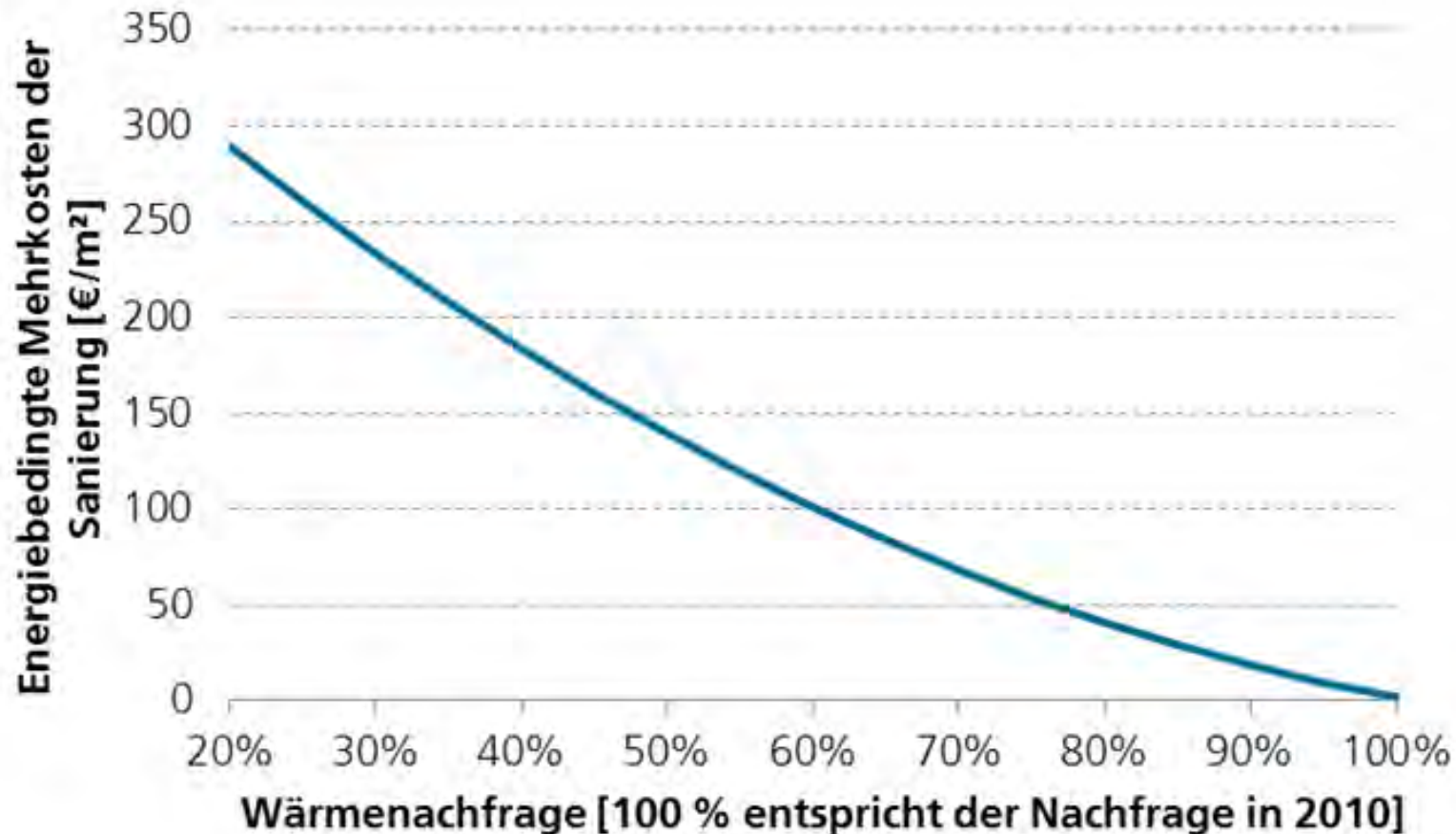
Wärmesysteme
in Einzelgebäuden

Wärmesysteme
Zentral/netzgebunden

Speicher



Kostenfunktion für die Mehrkosten energetischer Sanierung



Vorgehen, Annahmen und Voraussetzungen

- Jahresmodell auf Stundenbasis
- Profile mit Stundenwerten von 2011
 - Stromerzeugung durch Wind, PV, Wasserkraft und restliche konventionelle Kraftwerke
 - Lasten: Strombedarf und Energiebedarf für Heizung
- Biomasse: 50 TWh/a fix für Strom und Wärme (Gesamtwert Biomasse einschl. Müll in Deutschland 2010: >300 TWh)
- Strombedarf: zwei untersuchte Varianten
 - 500 TWh/a (ohne Heizung und Warmwasser), also keine Änderung
 - Verbrauchsreduktion auf 375 TWh/a in 2050
- Heizwärmebedarf: energetische Optimierung von Gebäuden Bestandteil der Modellierung (heutiger Werte 780 TWh/a (Endenergie))
- Warmwasserbedarf: wird als konstant angenommen (105 TWh/a)

Optimierung

- Bestimmung der optimalen Größe und Zusammensetzung aller Wandler und Speicher einschließlich Umfang der energetischen Sanierung des Gebäudebestandes unter Berücksichtigung technischer Potenziale
- Optimal: **minimale jährliche Gesamtkosten** (Invest, Finanzierung, Wartung/Betrieb, Brennstoffkosten)
- Kosten für Komponenten: Kosten „weit unten“ auf Lernkurve, d.h. Werte die nach langjähriger FuE und breiter Markteinführung erreicht werden (industrielle Herstellung, Skaleneffekte) *

* Quelle für die meisten Kostenwerte: International Energy Agency (IEA) (Ed.), Energy technology perspectives 2012. Scenarios & strategies to 2050

Modell-Ansatz

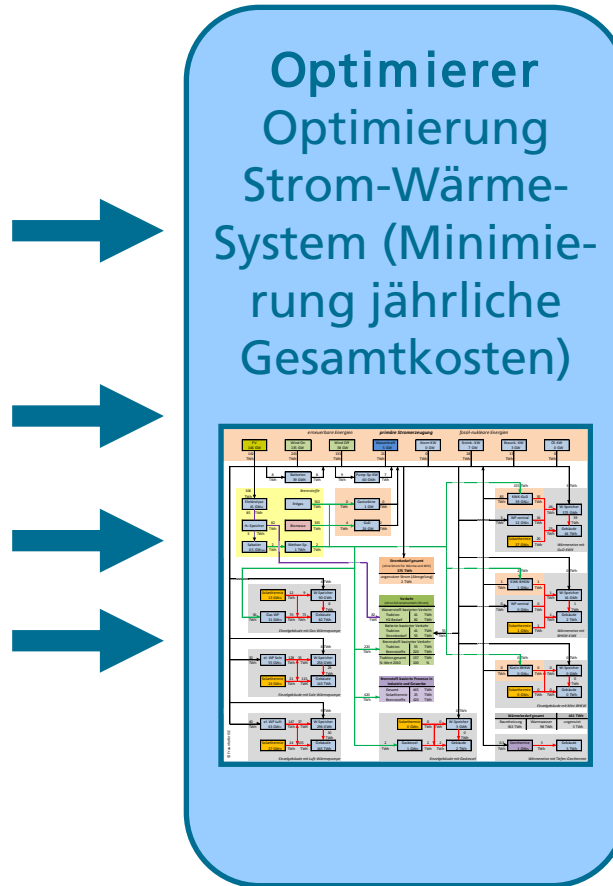
Exogene Vorgaben

CO₂-Emissionen →
verfügbare Menge
fossiler Energieträger

Strombedarf (ohne Strom
für MIV und Wärme)

Verfügbare Biomasse

Konventionelle KW



Ergebnisse

Installierte Leistung
aller Komponenten

Größe Speicher

Umfang
energetische
Sanierung Gebäude

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

Agenda

- Einführung
- Methodik
- **Ergebnisse**
- Nachtrag: Einbeziehung Verkehr, Industrieprozesse
- Zusammenfassung, Fazit

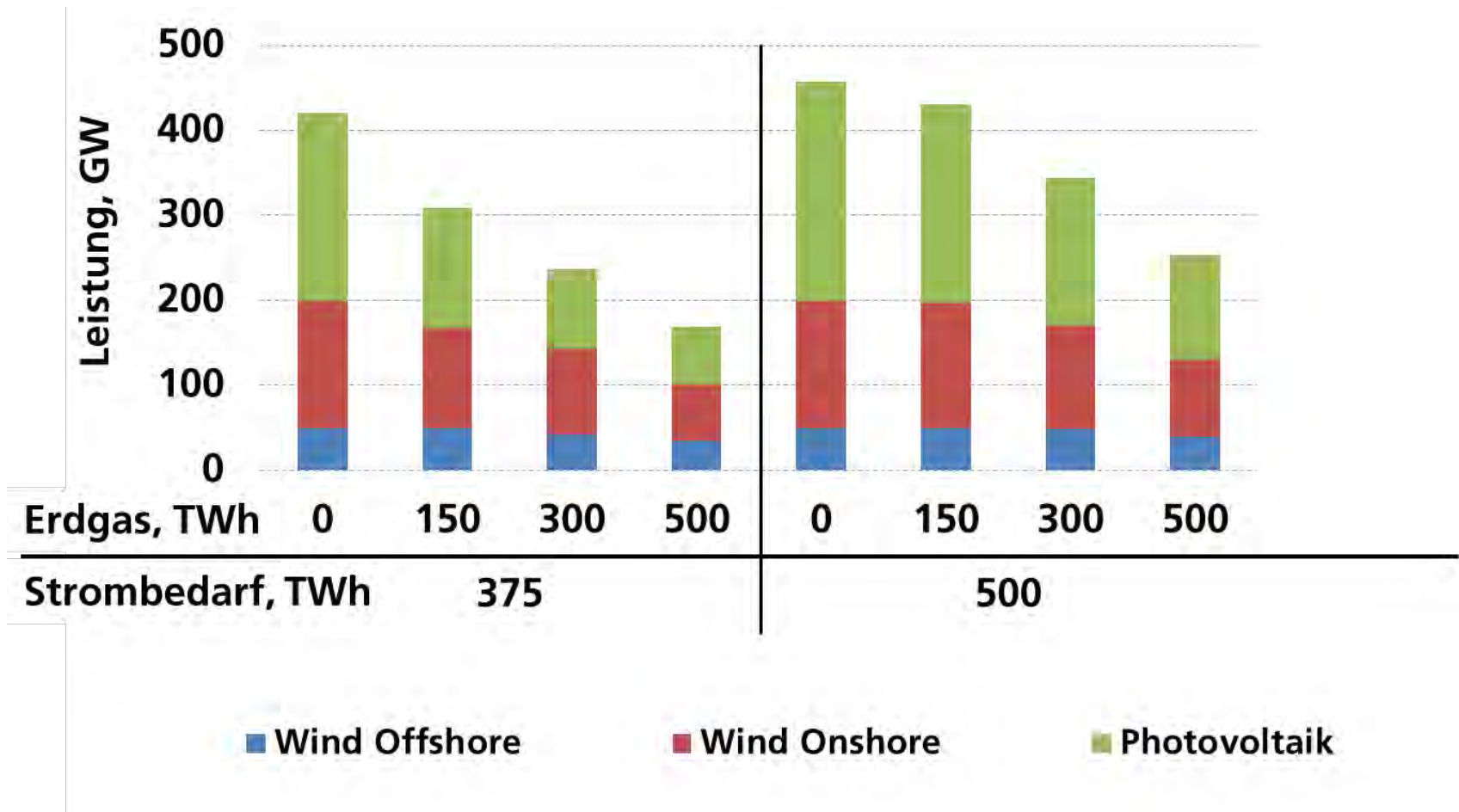
Freie Optimierung für verschiedene Szenarien

Strombedarf	TWh	375				500			
Erdgas	TWh	0	150	300	500	0	150	300	500
Wind Offshore	GW	50	49	42	34	50	50	48	40
Wind Onshore	GW							122	91
Photovoltaik	GW							173	123
Power-to-Gas	GW							10	0
Heizwärmebedarf	% ₂₀₁₀	72%	77%	82%	88%	45%	76%	78%	84%
CO ₂ -Emissionen	Mio t	36	66	97	137	42	66	97	137
Reduktion um	%	95%	90%	85%	79%	94%	90%	85%	79%

Grafik auf nächster Folie

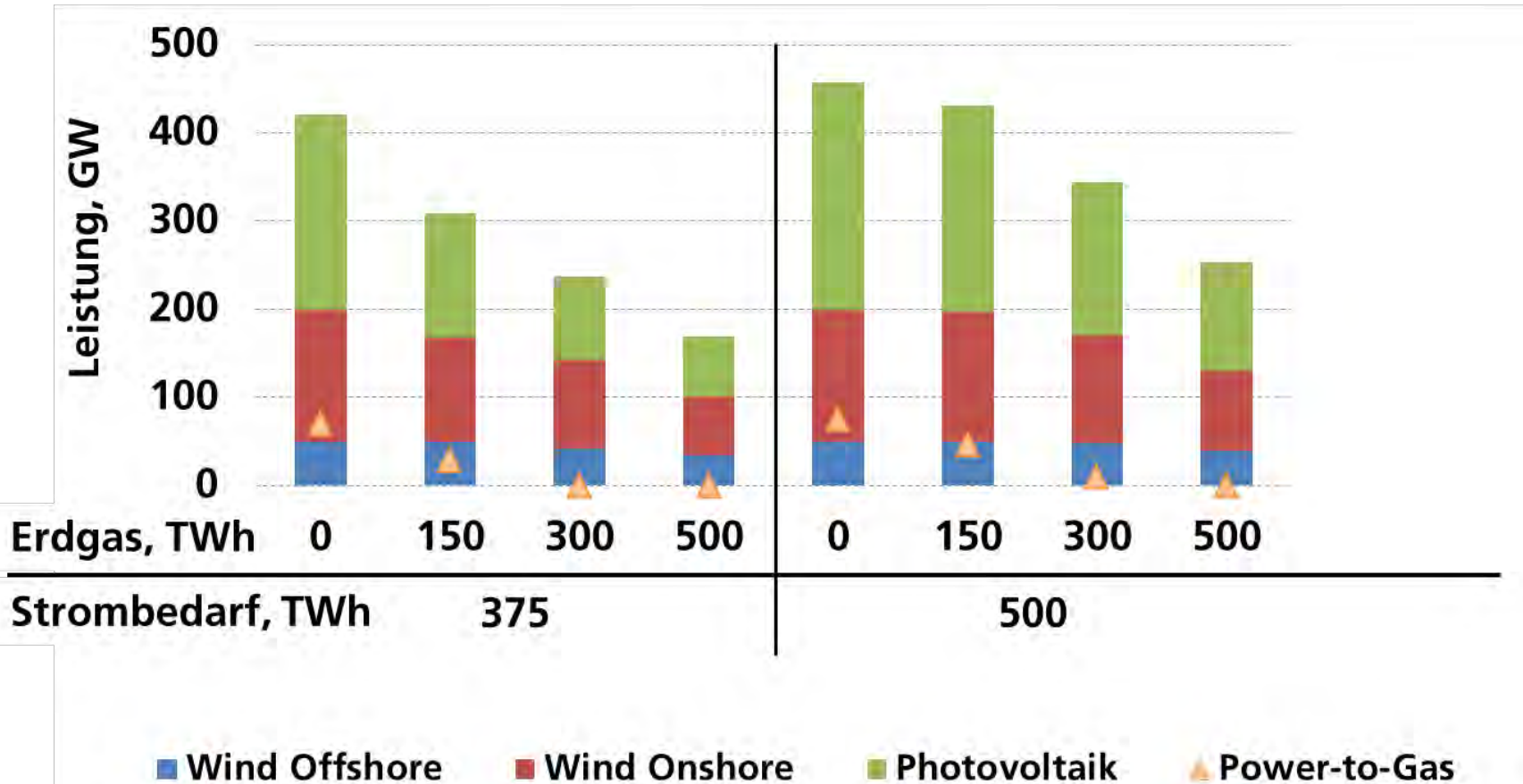
Freie Optimierung für verschiedene Szenarien

Fluktuierende EE



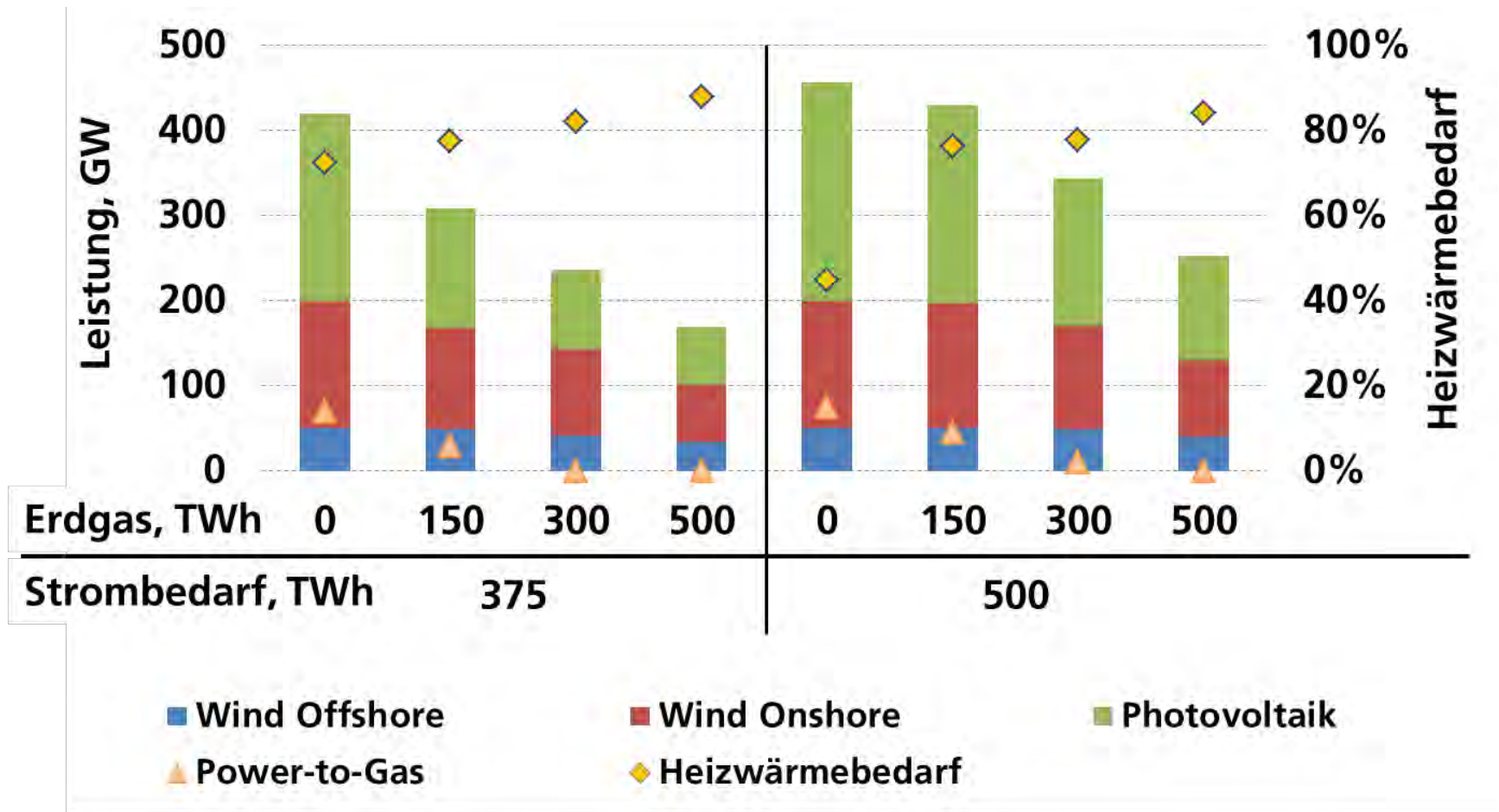
Freie Optimierung für verschiedene Szenarien

Power-to-Gas



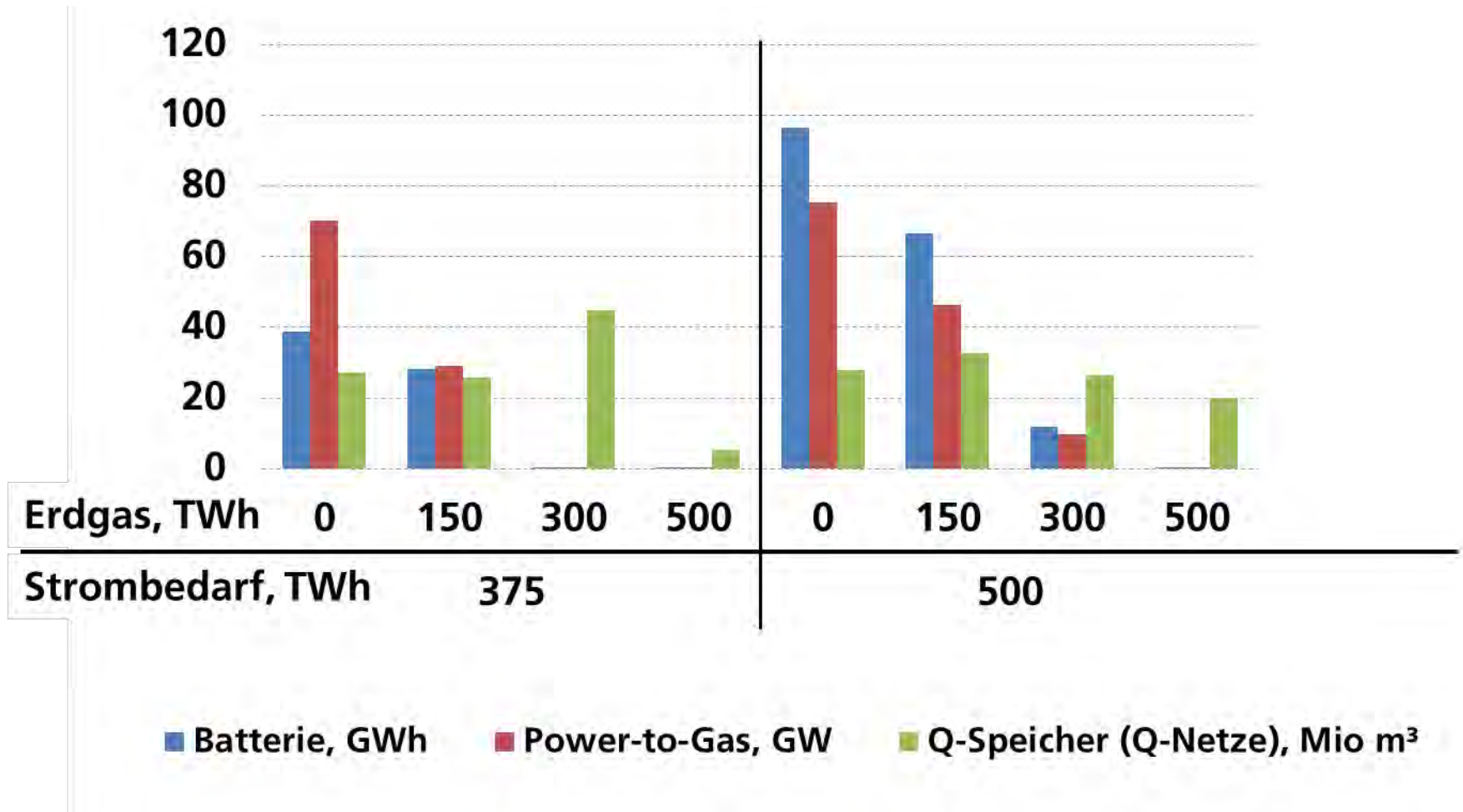
Freie Optimierung für verschiedene Szenarien

Energetische Sanierung – Heizwärmebedarf in %₂₀₁₀



Freie Optimierung für verschiedene Szenarien

Speichergrößen

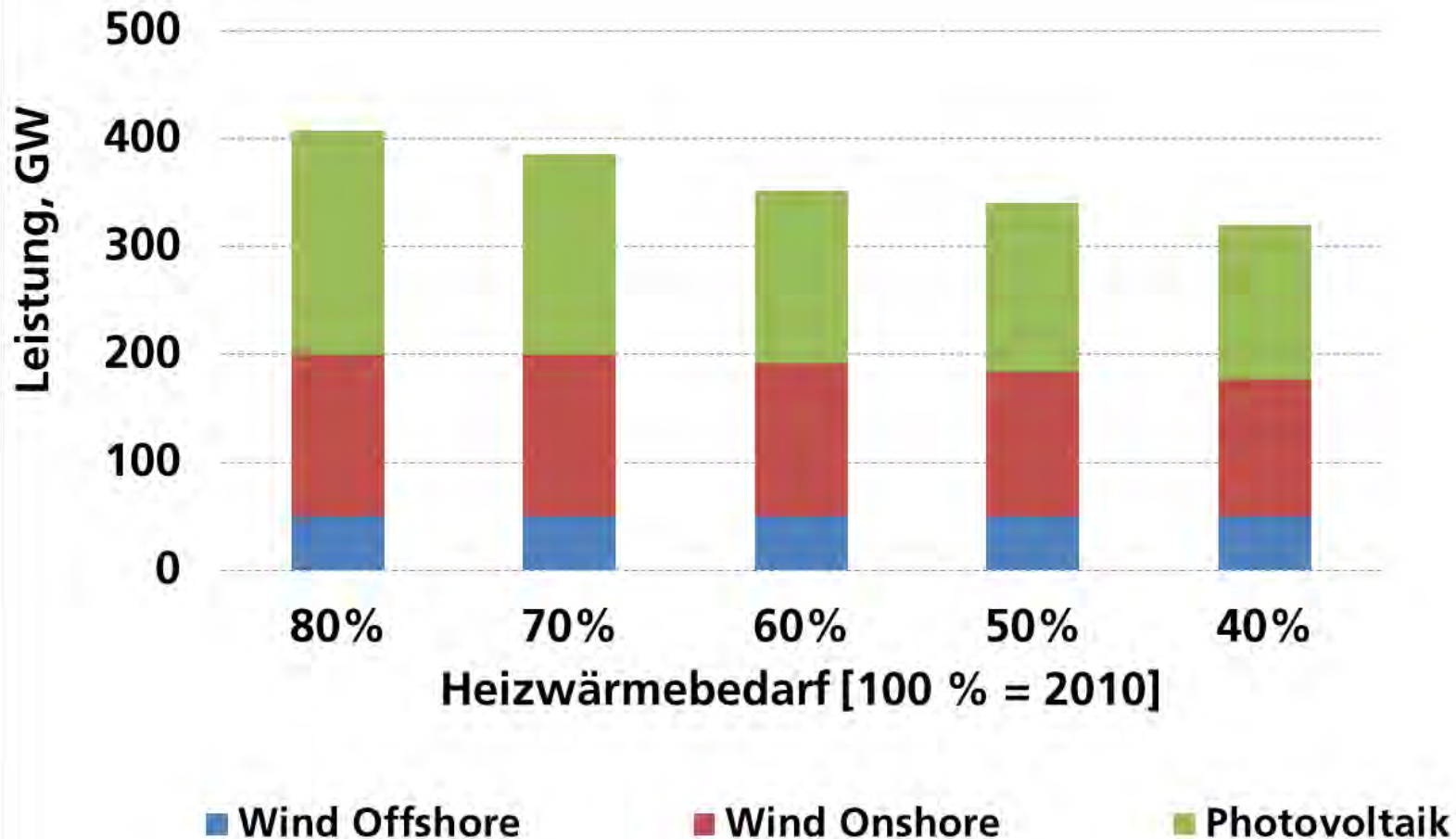


Zwischen-Fazit – freie Optimierung

- Je nach verwendeter Menge Erdgas führen die Systeme zu einer Reduktion der Treibhausgas-Emissionen im Strom-Wärme-System zwischen 95 % (150 TWh Erdgas) und knapp 80 % (500 TWh Erdgas)
 - Installierte Leistung fluktuierender erneuerbarer Energien und Umfang energetischer Sanierung hängt signifikant ab von
 - Entwicklung Strombedarf
 - Verfügbarem Erdgas für Strom-Wärme-Sektor
 - Hypothesen
 - Eher Übererfüllung CO₂-Reduktion im Strom-Wärme-Sektor notwendig, da in Verkehr und Industrie deutlich schwieriger zu erreichen
 - Eventuelle Reduktion im Stromverbrauch wird kompensiert durch höheren Verbrauch in Verkehr (Batterie, H₂) und Industrie (Verlagerungseffekte von Brennstoffen)
- ➔ Weitere Betrachtung mit **Strombedarf 500 TWh** und **150 TWh Erdgas**

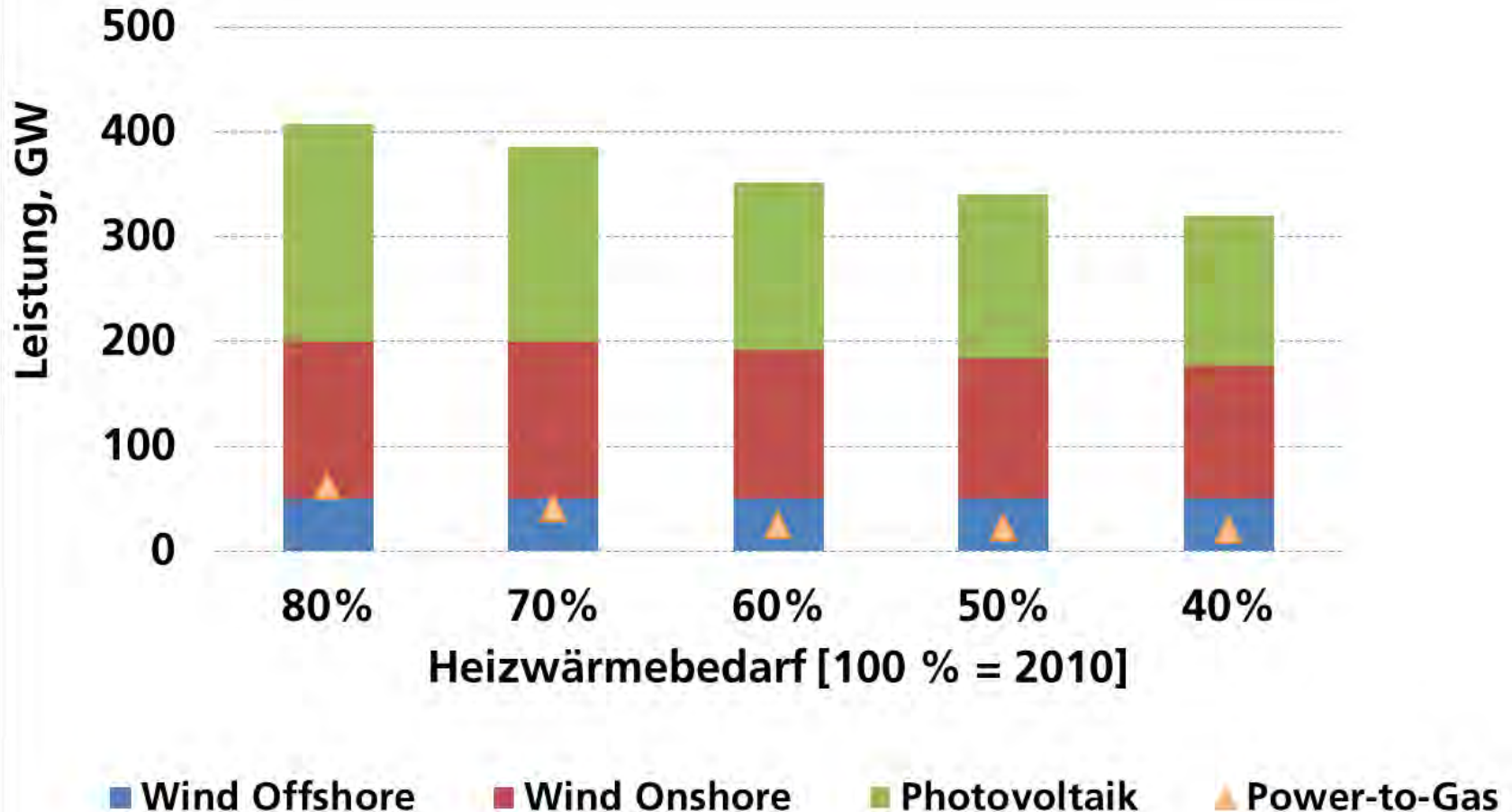
Sensitivitätsanalyse energetische Sanierung

Fluktuierende Erneuerbare Energien



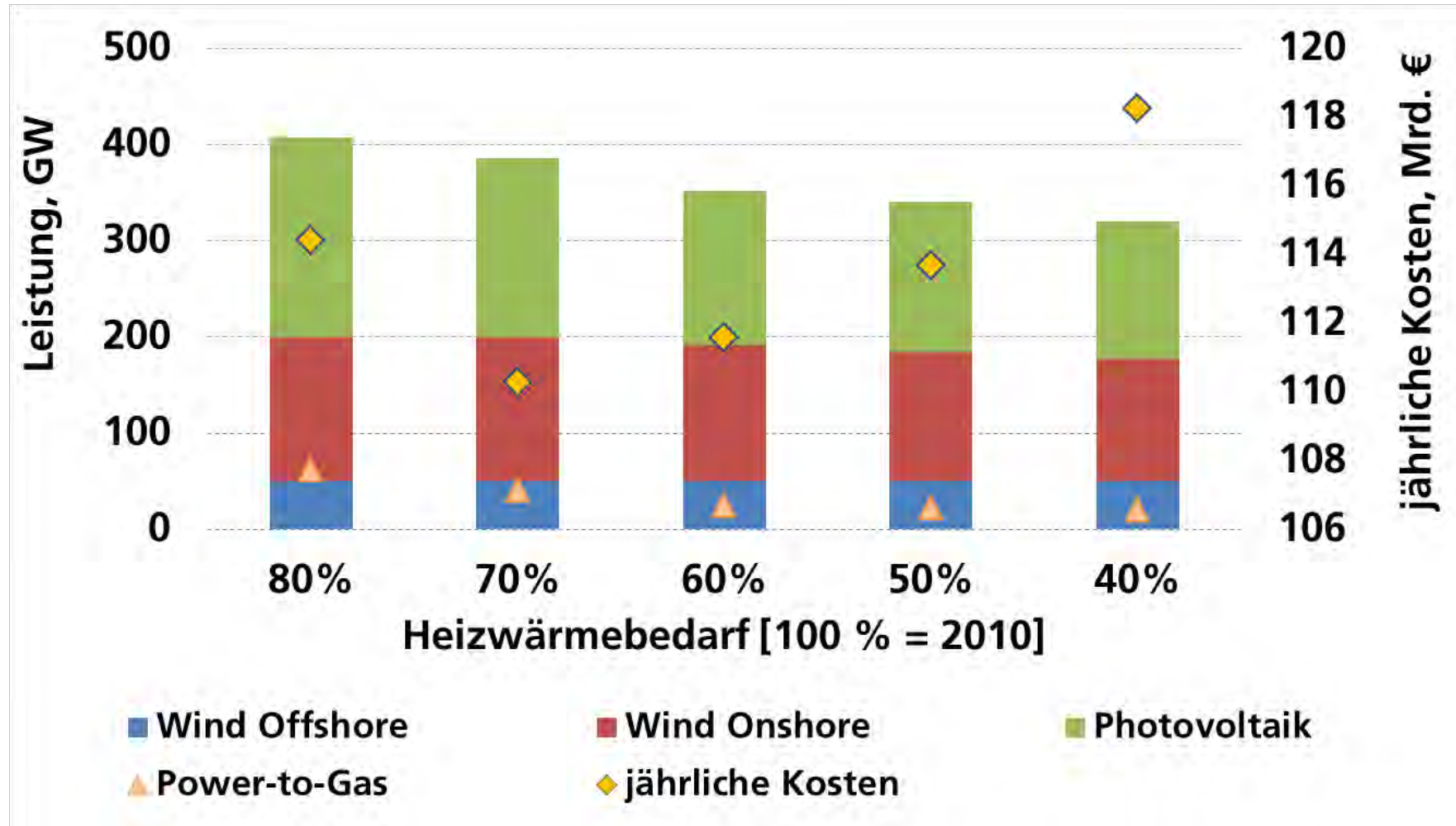
Sensitivitätsanalyse energetische Sanierung

Power-to-Gas



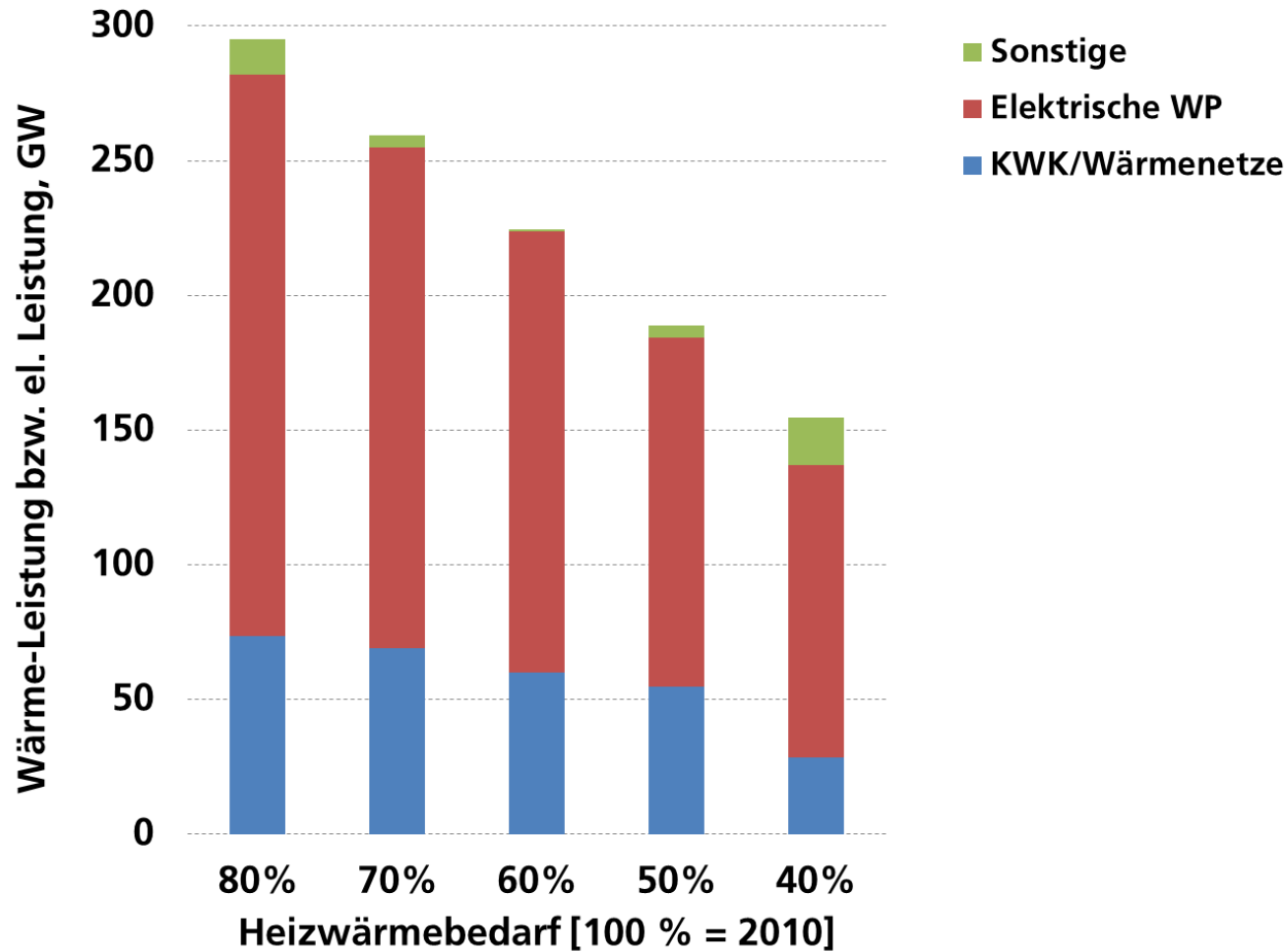
Sensitivitätsanalyse energetische Sanierung

jährliche Kosten



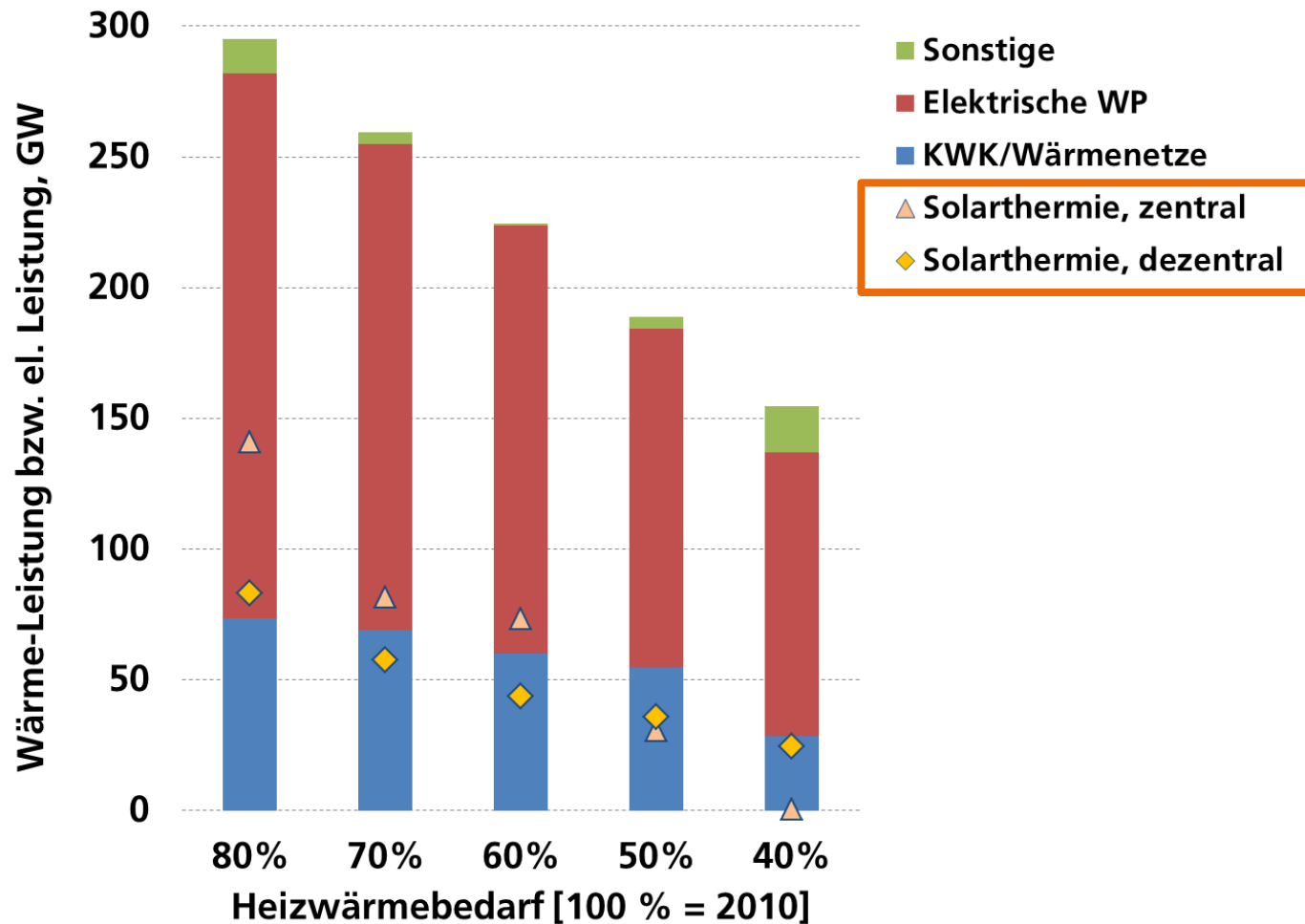
Sensitivitätsanalyse energetische Sanierung

Basiswärmeversorgung



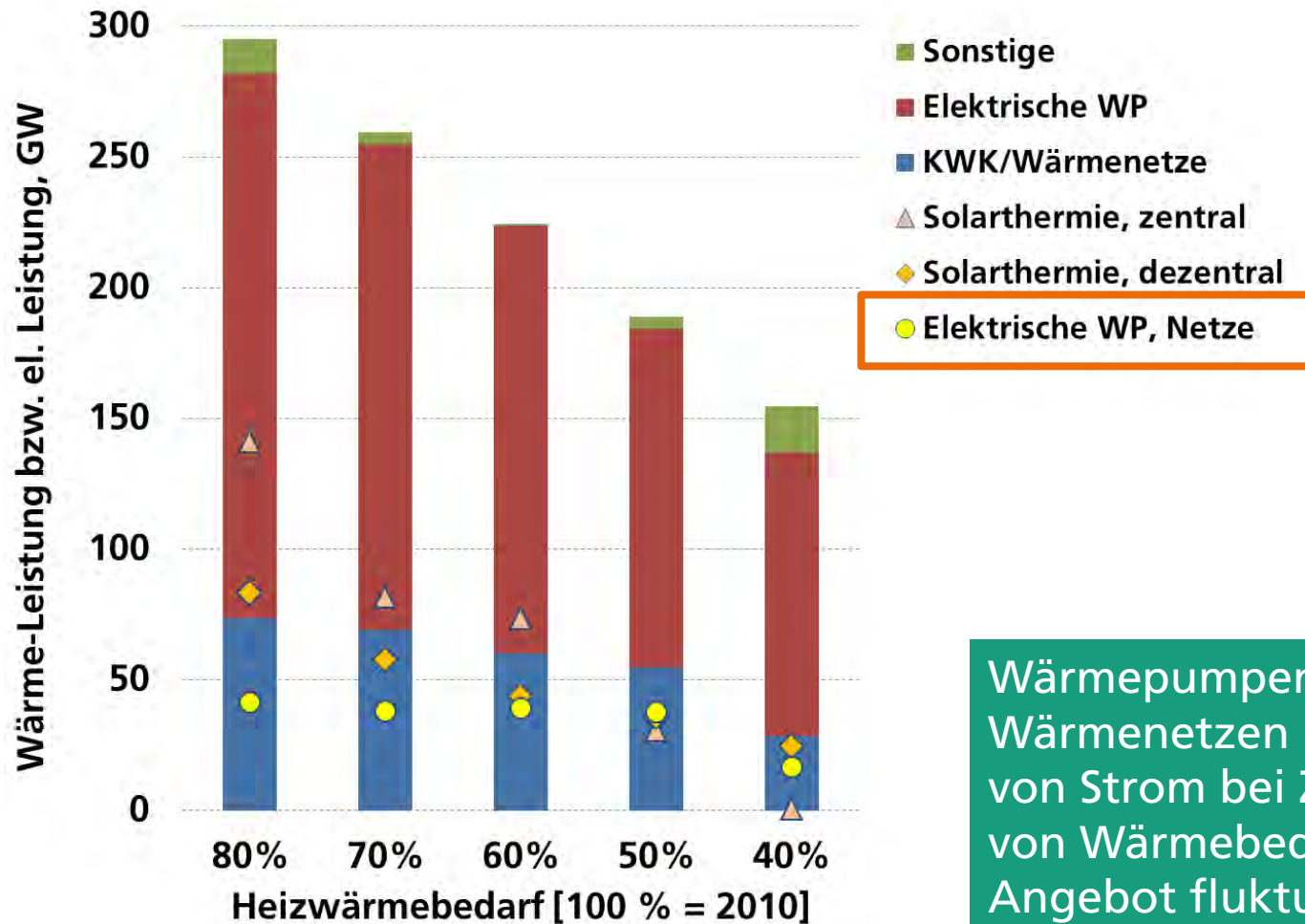
Sensitivitätsanalyse energetische Sanierung

Solarthermie



Sensitivitätsanalyse energetische Sanierung

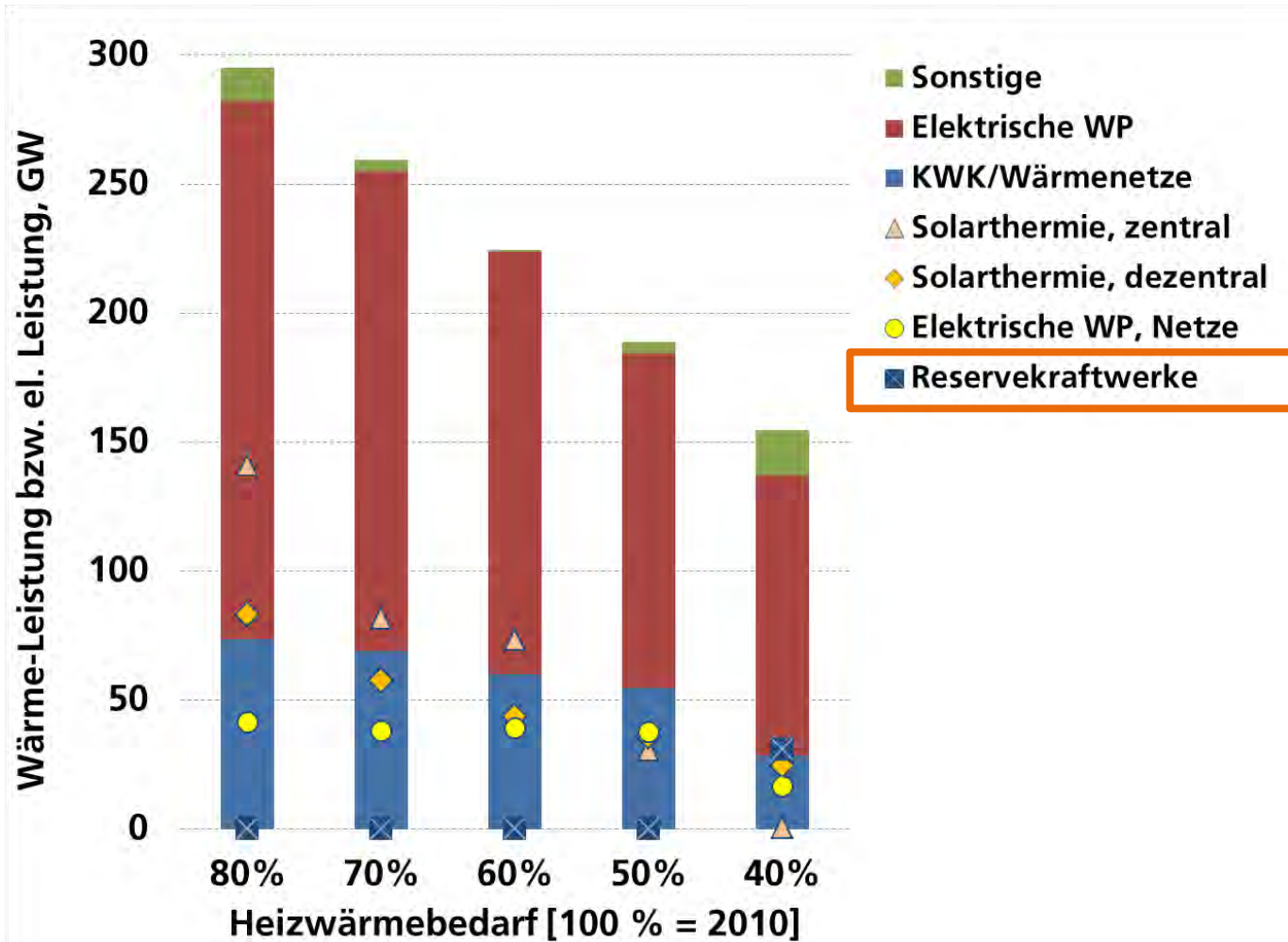
Wärmepumpen in Wärmenetzen



Wärmepumpen in Wärmenetzen → Nutzung von Strom bei Zeitgleichheit von Wärmebedarf und hohem Angebot fluktuierender EE

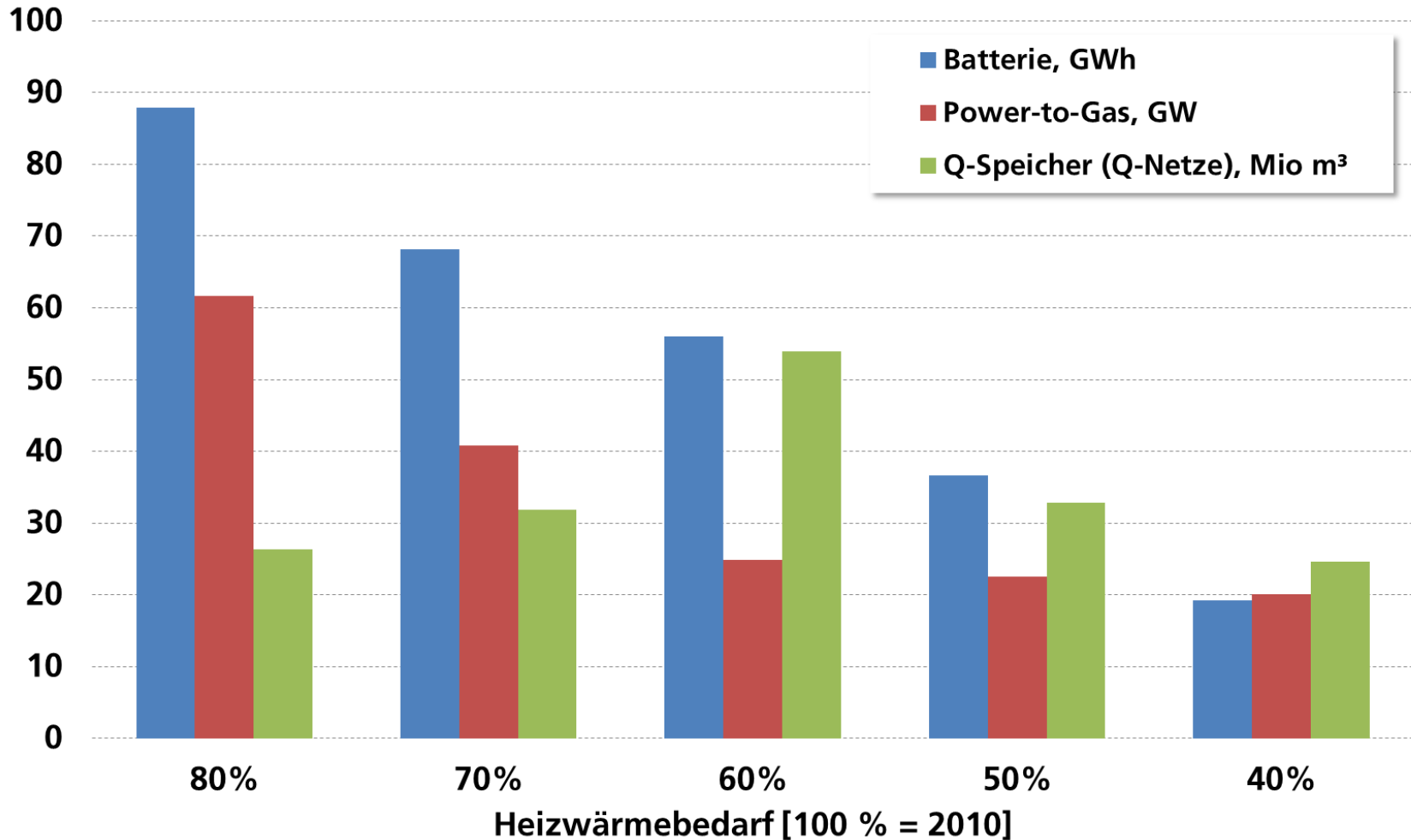
Sensitivitätsanalyse energetische Sanierung

Benötigte elektrische Reserveleistung



Sensitivitätsanalyse energetische Sanierung

Speichergrößen



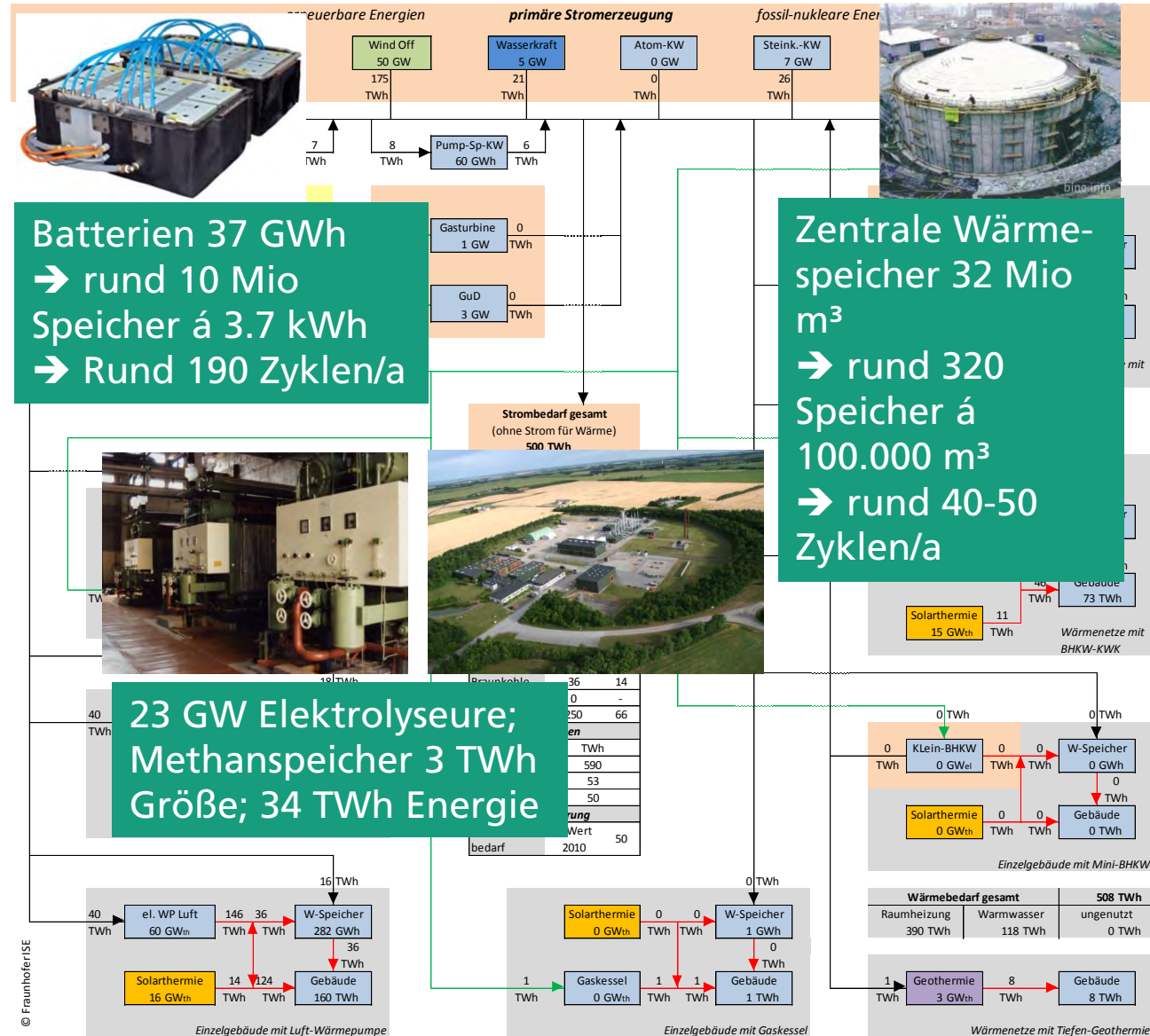
Fazit Sensitivitätsanalyse energetische Sanierung

- Energetische Sanierung auf 50 % Heizwärmebedarf führt zu jährlichen Mehrkosten von knapp 5 % bezogen auf kostenoptimalen Wert
- Erscheint dennoch sinnvoll, da wesentlich geringere installierte Leistung von fluktuierenden EE sowie Kraftwerkskapazität
- Komplementärstromversorgung wird nahezu vollständig durch Wärmenetz-gebundene KWK übernommen
- Rund 30 % aller Gebäude sind an Wärmenetze angeschlossen
- Wärmepumpen in Wärmenetzen stellen eine wichtige Flexibilisierungsoption dar → Nutzung von Strom bei Zeitgleichheit von Wärmebedarf und hohem Angebot fluktuierender EE
- Zentrale Wärmespeicher (Beispiel DK) spielen eine wichtige Rolle für die Flexibilisierung
- Elektrische Wärmepumpen dominante dezentrale Heiztechnik
- Wichtig: Direktstromheizung nur als letzte Nutzungsoption (20-40 TWh); monovalente Direktstromheizung hochgradig systemschädlich

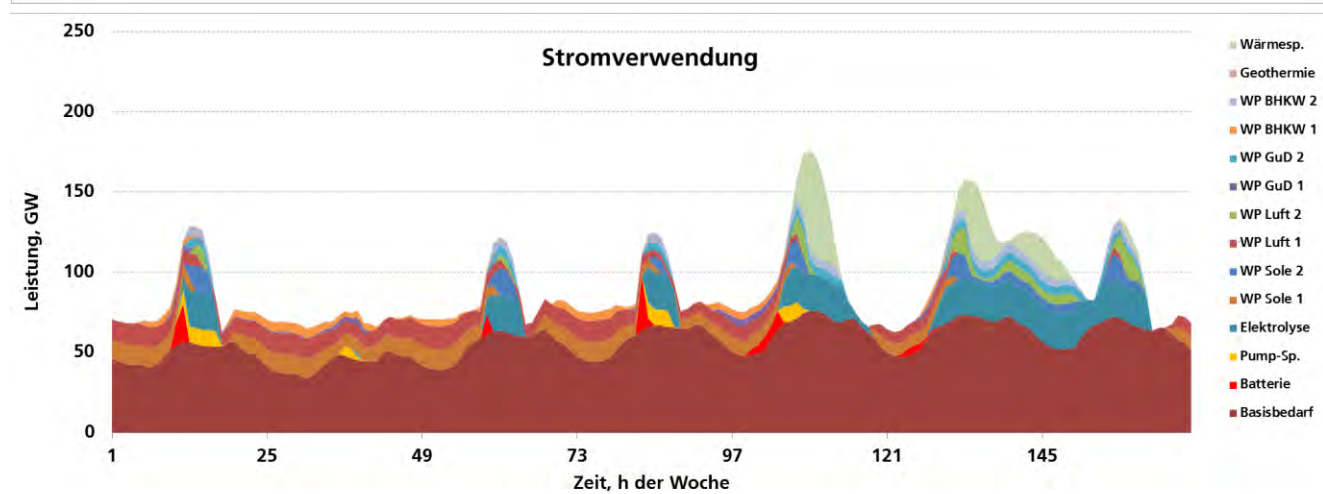
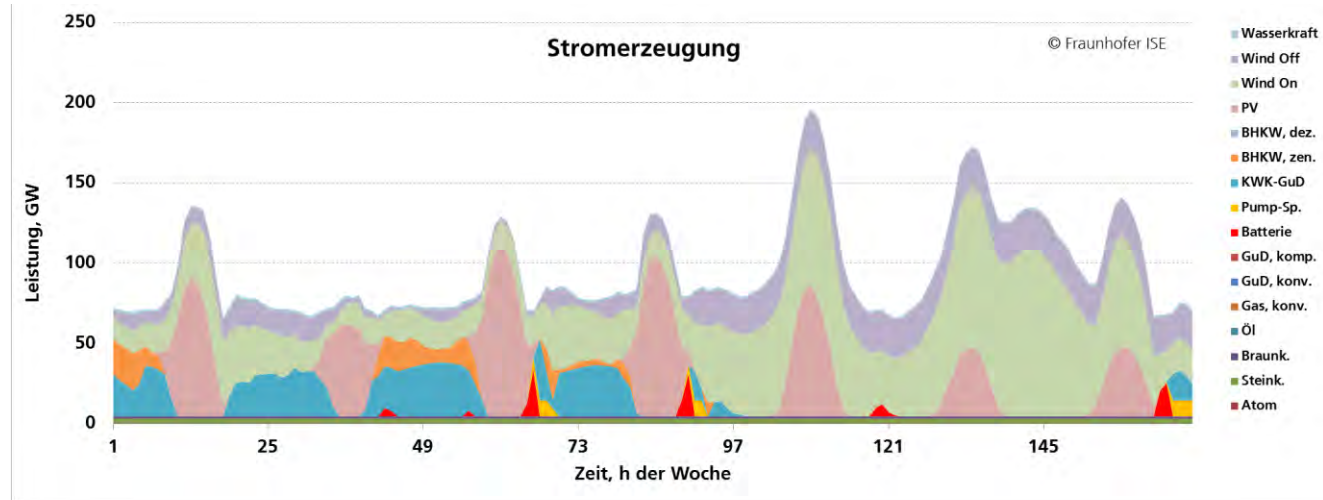
Beispiel Zielsystem 2050

Szenario

- Energetische Sanierung:
Heizwärmebedarf
50 % bezogen auf
heutigen Wert
- Strombedarf: 500
TWh
- Erdgas: 150 TWh

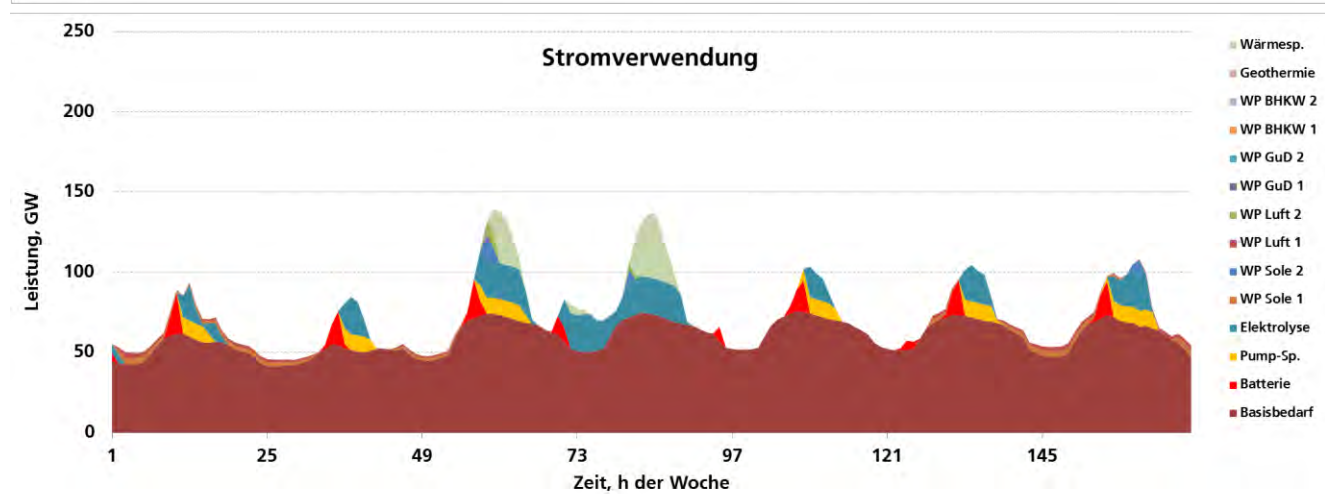
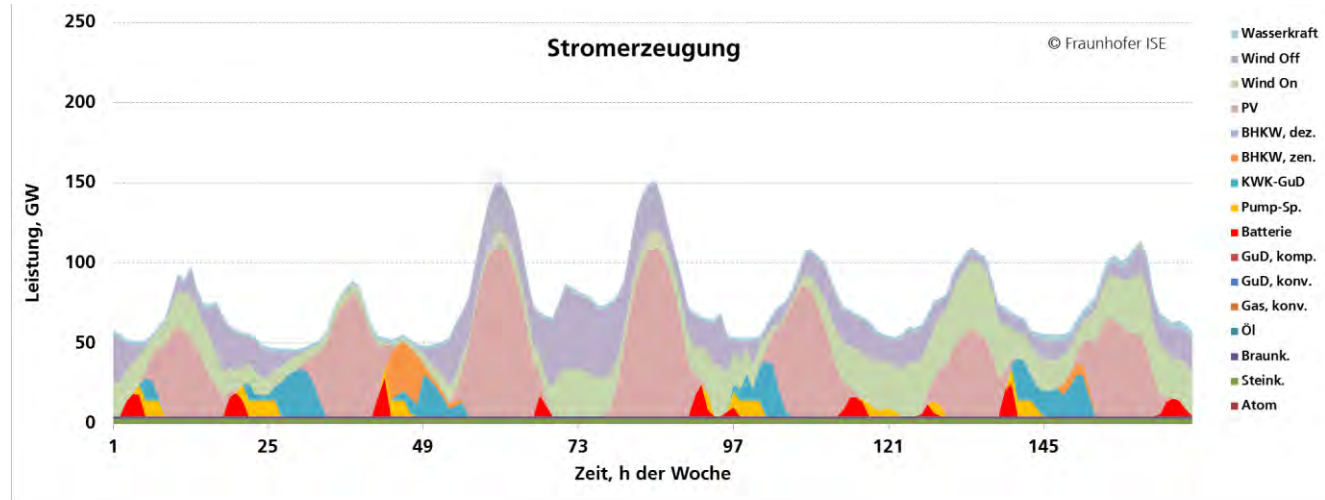


Zeitverlauf Stromerzeugung und -verwendung



Woche Ende
Februar

Zeitverlauf Stromerzeugung und -verwendung



Woche Ende
Juni

Agenda

- Einführung
- Methodik
- Ergebnisse
- **Nachtrag: Einbeziehung Verkehr, Industrieprozesse**
- Zusammenfassung, Fazit

Nachtrag

Modell erweitert um Verkehr und Brennstoffe für Prozesse in Industrie und Gewerbe

- ➔ Alle heutigen Verbrauchssektoren erfasst
- Strom-basierter Verkehr stunden-genau berücksichtigt
- Bilanziell erfasst
 - anteilig Brennstoffe für Verkehr (Schwerlast, Luftfahrt)
 - Brennstoffe für Prozesse in Gewerbe und Industrie

Techniken für motorisierten Individualverkehr

Batterie

- + Hohe Effizienz
- Niedrige Reichweite
- Keine Langzeitspeicherung im System



Wasserstoff

- + Hohe Reichweite
- + Langzeitspeicher im System
- Geringere Effizienz



Nachtrag

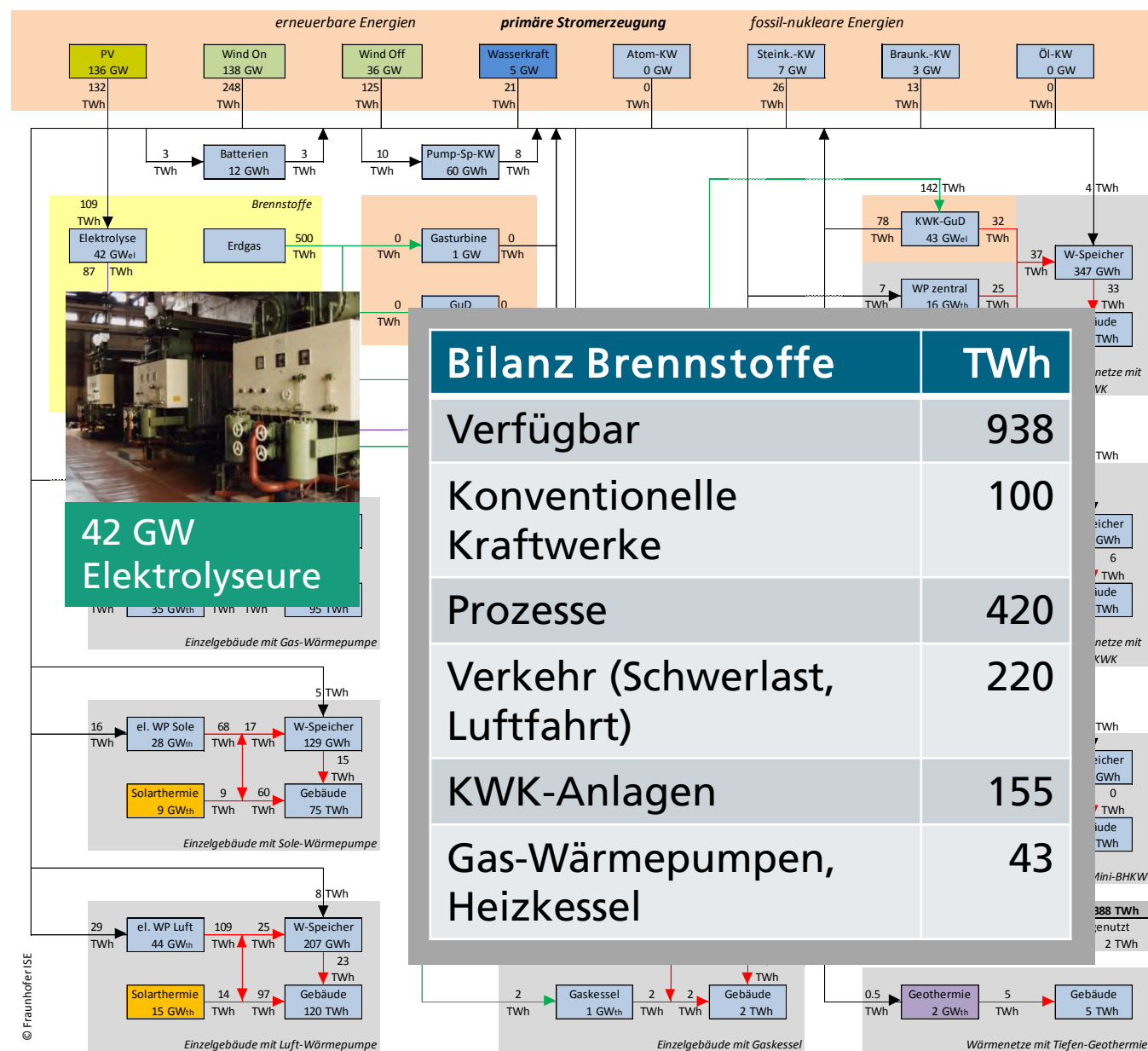
Annahmen / Randbedingungen

- Nachhaltiges Biomassepotenzial 335 TWh
- 500 TWh Erdgas im System (→ Absenkung CO₂-Emissionen 86 %₁₉₉₀)
- Mobilität: Fahrleistung (Traktionsenergie) gleichbleibend
 - 30 % Batterie-basiert (Kurzstrecken individual, urban)
 - 30 % Wasserstoff / Brennstoffzelle (Langstrecken individual, öffentlicher Nahverkehr urban)
 - 40 % Brennstoffe (vor allem Schwerlast und Luftfahrt)
- Gleichbleibender Brennstoffbedarf für Gewerbe- und Industrieprozesse (entspricht Entwicklung der vergangenen 20 Jahre)

Ergebnis

Szenario

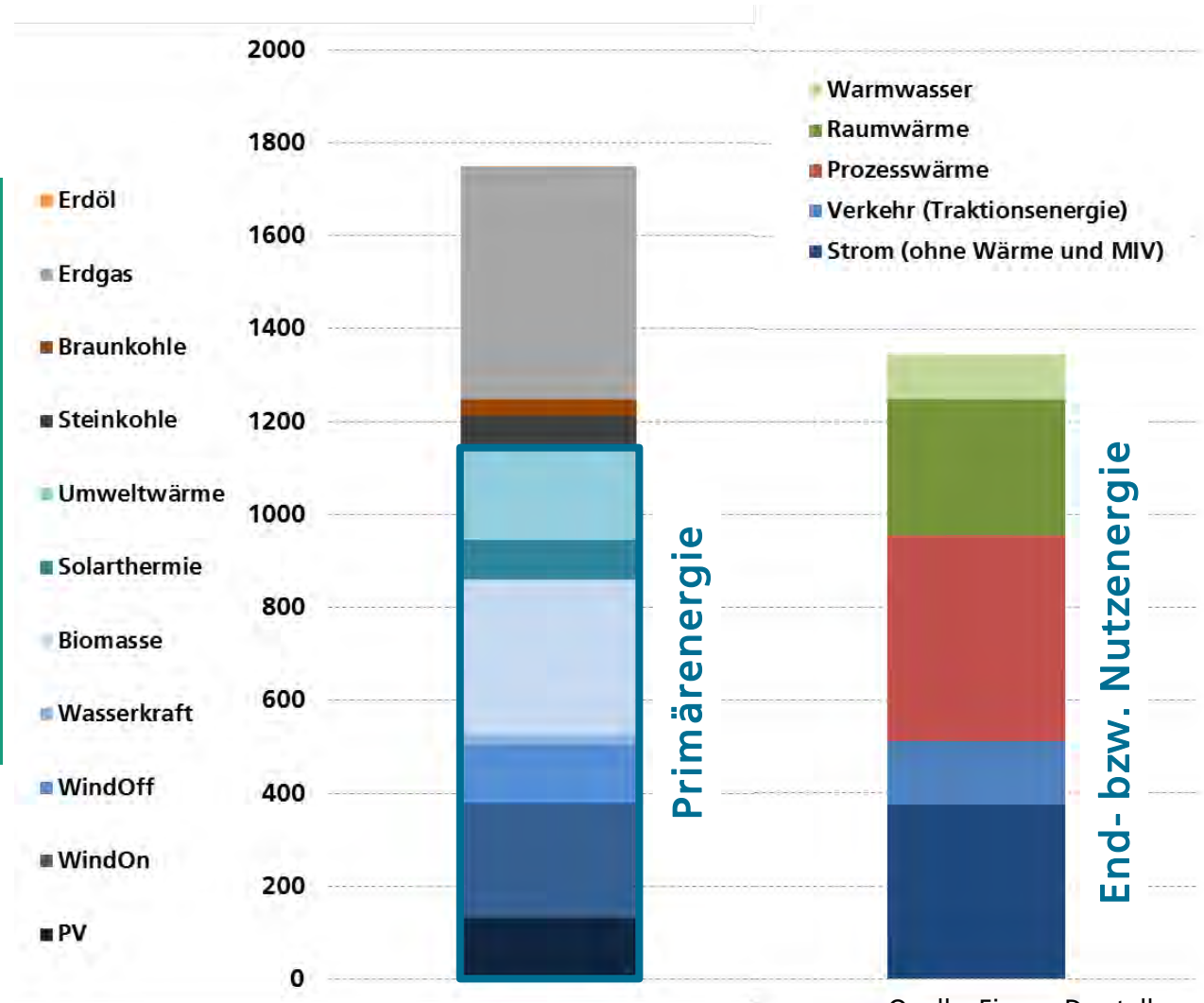
- Energetische Sanierung: Heizwärmebedarf 40 % des heutigen Wertes
- Strombedarf (ohne Wärme und MIV): 375 TWh (25 % Reduktion bezogen auf heute)



Jährliche Gesamtenergiebilanz (TWh)

Anteil erneuerbarer Energien am PE-Aufkommen: **66 %**

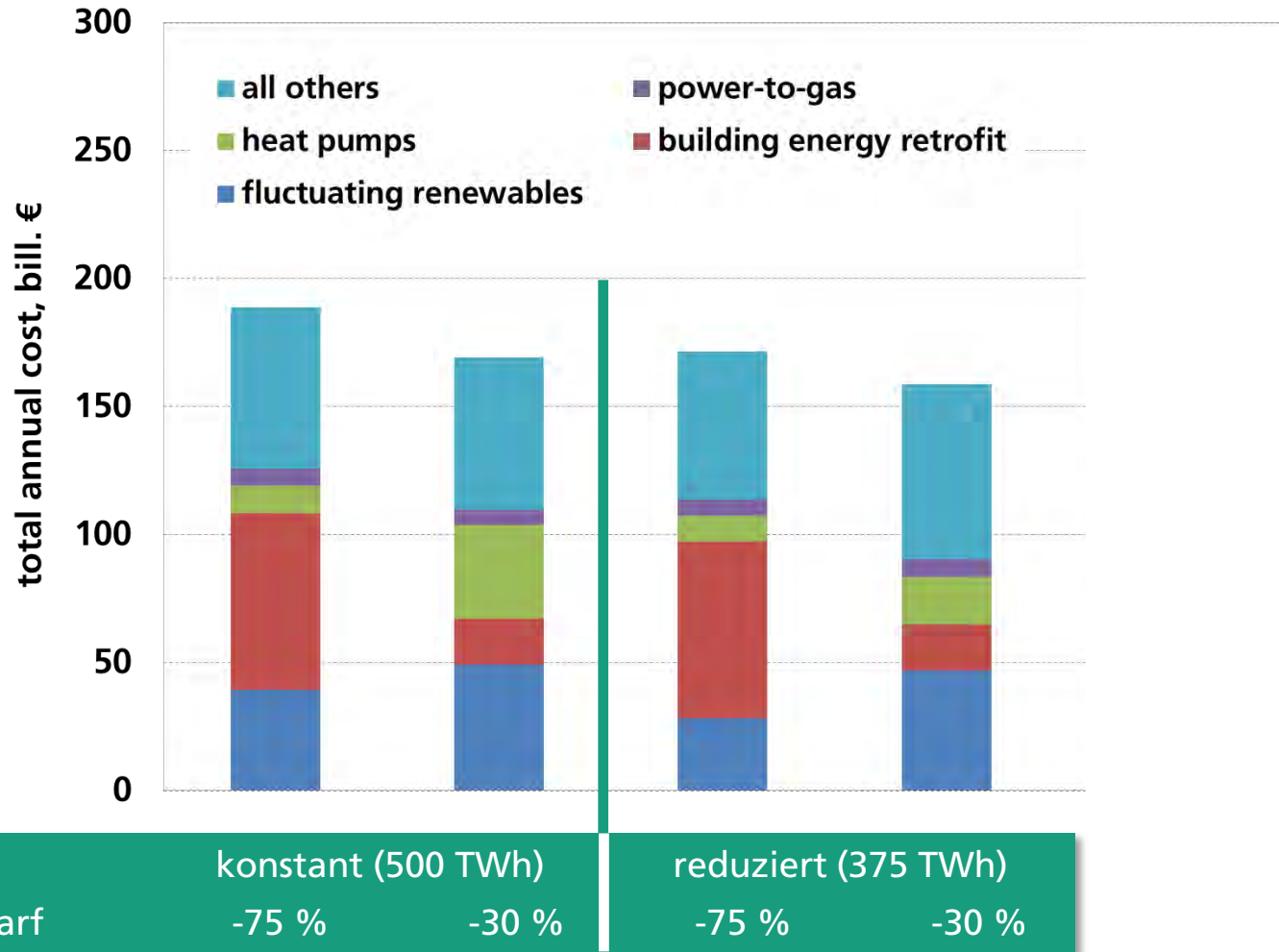
Reduktion CO₂-Emissionen des Energiesektors (Bezugsj. 1990): **86 %**



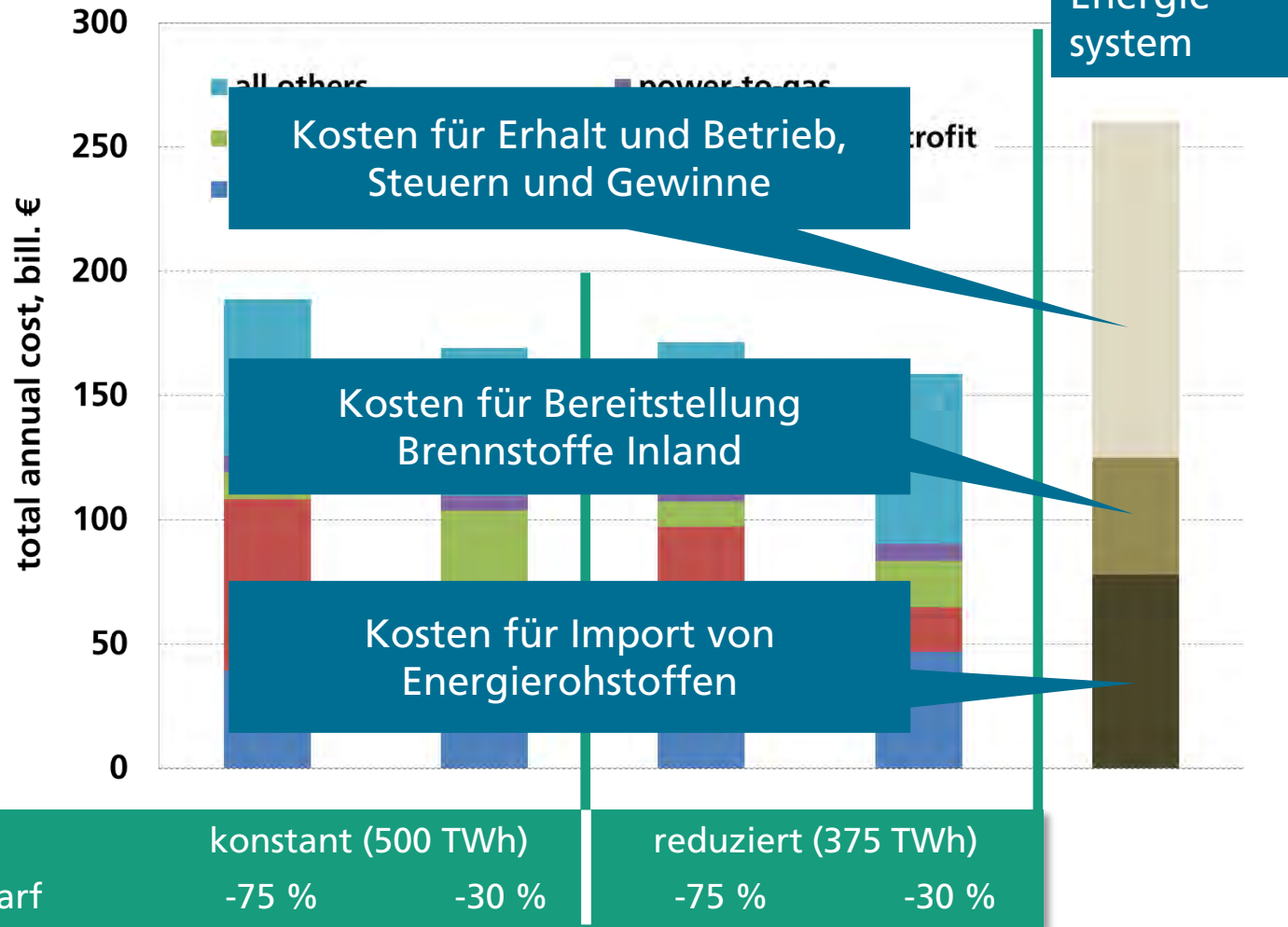
Quelle: Eigene Darstellung

Kostenvergleich

Jährliche Gesamtkosten 2050 exkl. Steuern und Profite im eingeschwungenen Zustand (ohne Mehrkosten für veränderten Fahrzeugpark)



Kostenvergleich



Agenda

- Einführung
- Methodik
- Ergebnisse
- Nachtrag: Einbeziehung Verkehr, Industrieprozesse
- **Zusammenfassung, Fazit**

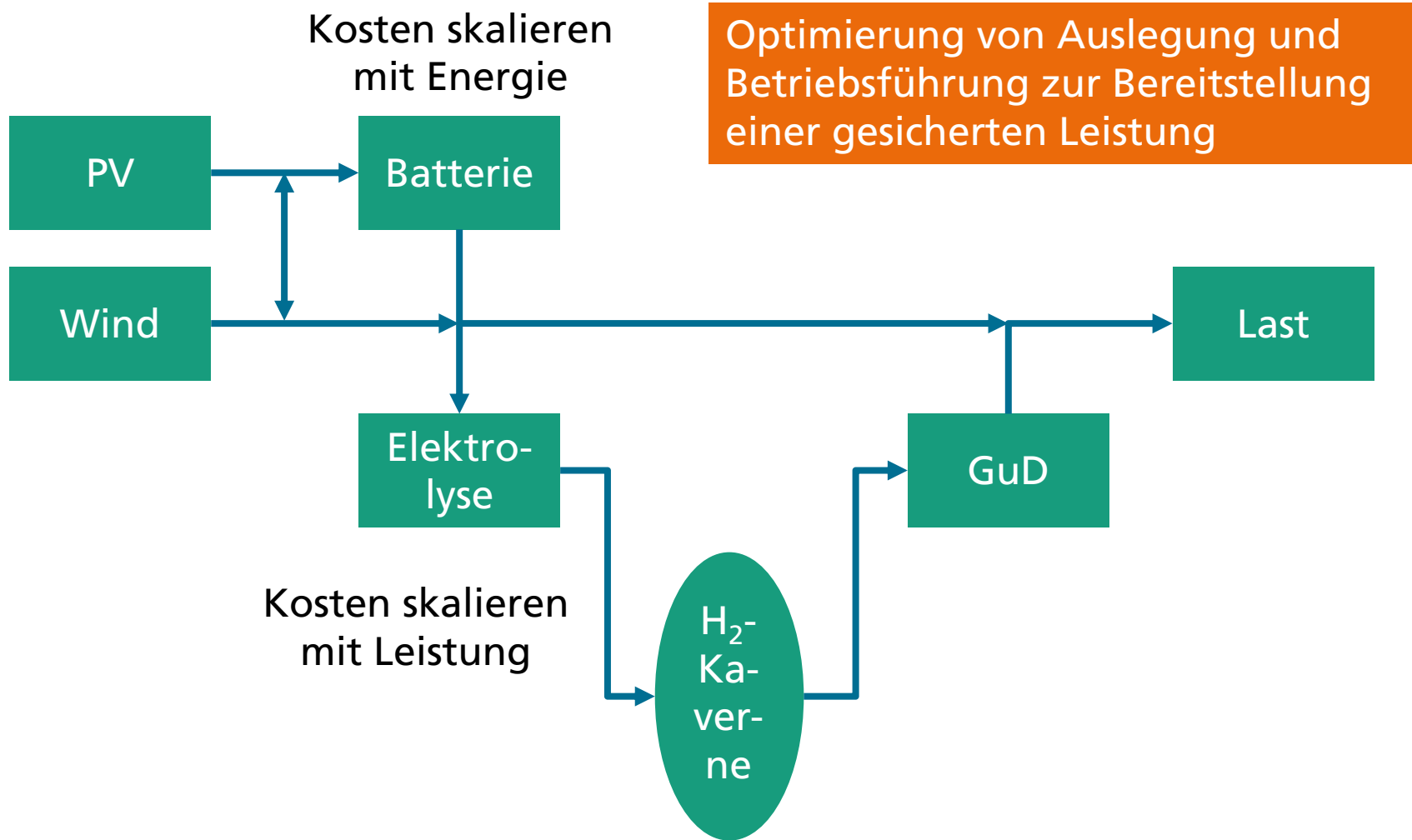
Zusammenfassung

- Modellierung liefert ein mögliches, in sich stimmiges Bild für die Energieversorgung in 2050
- Energetische Sanierung: Reduktion Heizwärmebedarf des Gebäudesektors auf rund 40-50 % des heutigen Wertes sinnvoll, vor allem auch um notwendigen Umfang fluktuierender EE zu begrenzen
- Wärmenetze mit Wärmespeichern und KWK für komplementäre Stromerzeugung spielen zentrale Rolle
- Wärmepumpen in zentralen Netzen wichtig → Flexibilisierung
- Wärmepumpen (Strom, Gas) dominante Technik für Wärmeversorgung von Einzelgebäuden
- Batteriespeicher und Power-to-Gas im großen Stil aus Gesamtsystemsicht erst erforderlich bei sehr hohem Anteil erneuerbarer Energien bzw. sehr geringem Einsatz von fossilen Brennstoffen
- Kosten nach erfolgter Transformation vergleichbar zu heute

Fazit

- Energiewende stärker vom Ziel her denken
- Wichtige Weichenstellungen müssen heute getroffen werden
 - Wärmenetze → Langfristinvestitionen
 - Energetische Sanierung Gebäude → hohe Trägheit
- Elektrolyse zunächst vor allem für Mobilität
- Langfristig als Option auch für Energiewirtschaft (Methanisierung)
 - Notwendiger Umfang hängt entscheidend ab
 - Von der Erreichung von Effizienzzielen (Gebäude, Stromverbrauch)
 - Dem akzeptierten Rest an fossilen Brennstoffen im System
- Ausblick: gesicherte Strombereitstellung aus fluktuierenden EE als Geschäftsmodell in weiter Zukunft

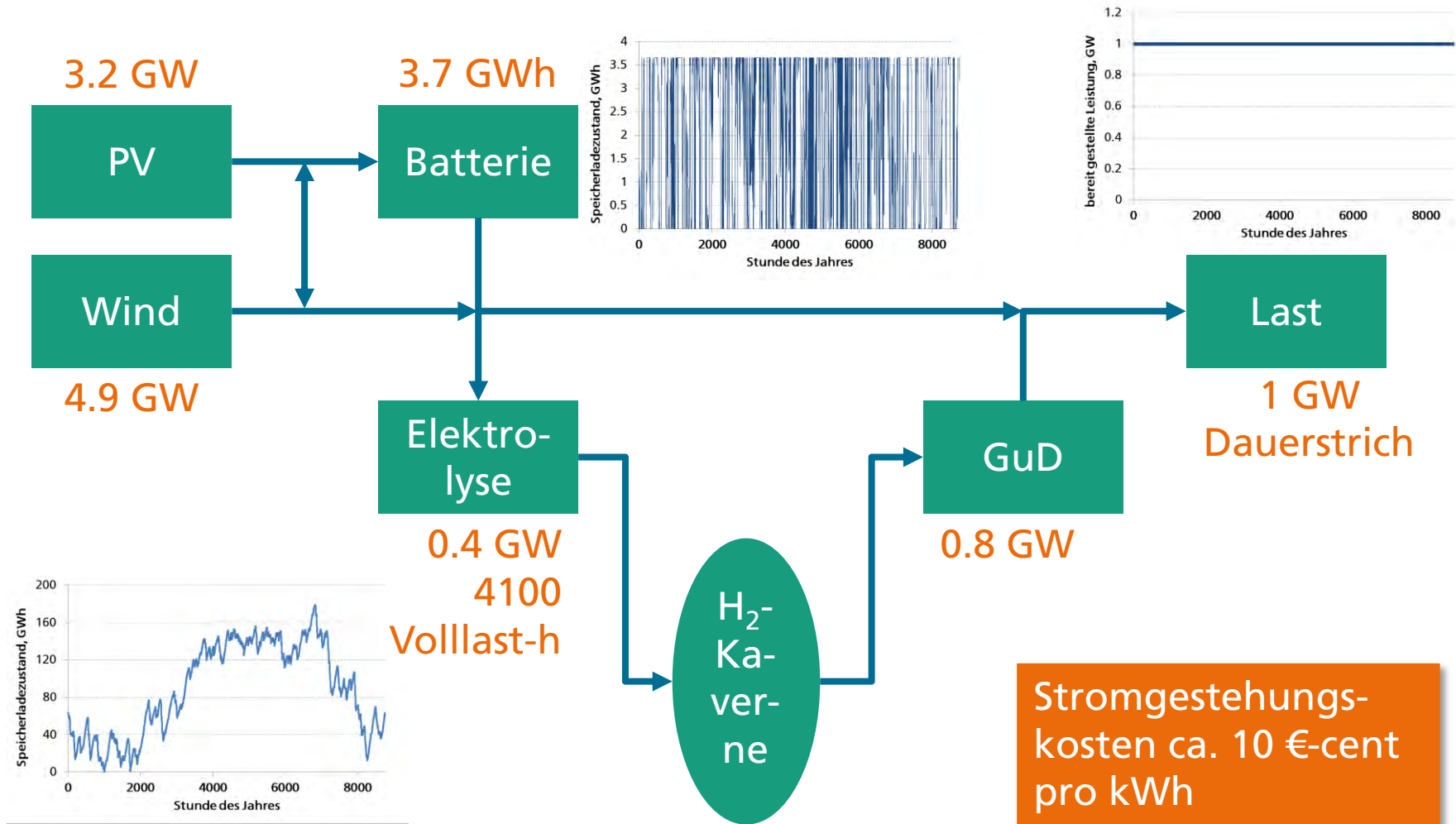
Garantierte Stromerzeugung aus fluktuierenden EE



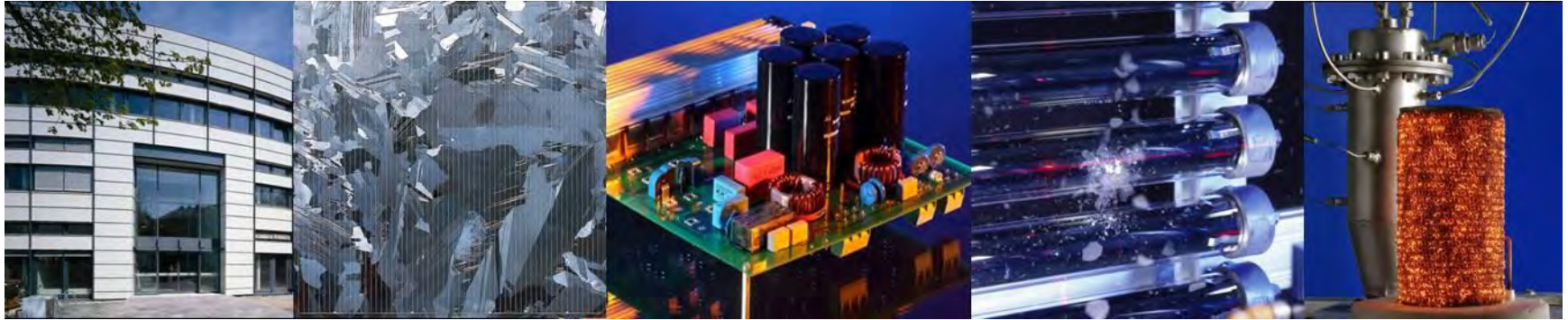
Garantierte Stromerzeugung aus fluktuierenden EE

Beispiel Wetterdaten Hannover – Optimierung Auslegung und Betriebsführung

© VDI Wissensforum 2013 – Veranstaltungsinhalte – nur zum persönlichen Gebrauch



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit...



Fraunhofer-Institut für Solare Energiesystems ISE

Hans-Martin Henning

www.ise.fraunhofer.de

hans-martin.henning@ise.fraunhofer.de