

# Methoden, Modelle und Annahmen in der BMU- Leitstudie 2011

Tobias Naegler, Joachim Nitsch, Thomas Pregger,  
Yvonne Scholz, Dominik Heide, Diego Luca de Tena,  
Franz Trieb, Kristina Nienhaus



Wissen für Morgen



# Überblick

- 1) Leitstudie im Rahmen des Energiekonzepts
- 2) Energiesystem-Modell MESAP
- 3) Mengengerüste der Leitstudie 2011
- 4) Szenario-Validierung
  - a) Versorgungssicherheit Strom
  - b) Validierung PKW-Szenario
- 5) ökonomische Aspekte
- 6) wesentliche Schlussfolgerungen der Leitstudie 2011



# Überblick

- 1) Leitstudie im Rahmen des Energiekonzepts
- 2) Energiesystem-Modell MESAP
- 3) Mengengerüste der Leitstudie 2011
- 4) Szenario-Validierung
  - a) Versorgungssicherheit Strom
  - b) Validierung PKW-Szenario
- 5) ökonomische Aspekte
- 6) wesentliche Schlussfolgerungen der Leitstudie 2011



# Leitstudie 2011: normative Szenarien („Zielszenarien“) im Rahmen des Energiekonzepts

- Entwicklung realistischer Transformationspfade zum Umbau des Energiesystems
- Leitstudie 2011: Umsetzung der wesentlichen Ziele für 2050 des Energiekonzepts
  - THG-Emissionen: minus 80-95%
  - Stromverbrauch: minus 25%
  - Reduktion Endenergieverbrauch Verkehr: minus 40%
  - EE-Anteil am Brutto-Endenergieverbrauch: 60%
  - EE-Anteil am Brutto-Stromverbrauch: 80%
  - Durchbruch Elektromobilität
  - Atomausstieg
  - ...



# Teilaspekte der „Leitstudie“

- Mengengerüste, z. B.
  - Nutzenergiebedarf
  - Primär- und Endenergieverbrauch
  - installierte Leistungen Strom- und Wärmeerzeugung
  - energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen
  - Import/Export
- Validierung der Mengengerüste (Versorgungssicherheit)
  - dynamische Simulation der Stromversorgung
  - Bestimmung Ausnutzungsdauer Energieerzeuger u. Speicher
- ökonomische Bewertung
  - Gestehungskosten Strom, Wärme
  - systemanalytische Differenzkosten
  - Investitionen in EE-Strom- und –Wärme-Anlagen



# Szenarienvarianten Leitstudie 2011

- **erfüllen alle wesentliche Ziele des Energiekonzepts:**
- **Szenario 2011 A:**
  - Anteil E-Mobilität an PKW-Verkehrsleistung 2050: 50%
  - Durchbruch von H<sub>2</sub>-Fahrzeugen (Brennstoffzelle)
- **Szenario 2011 B:** wie Szenario A, aber
  - kein H<sub>2</sub> im Verkehr, stattdessen Verbrennungsmotoren auf EE-Methan-Basis
- **Szenario 2011 C:** wie Szenario A, aber
  - kein H<sub>2</sub> im Verkehr, PKW-Verkehrs vollständig elektrisch (BEV und Plug-in-Hybride)
- **Szenario 2011 THG95:**
  - Reduktion CO<sub>2</sub>-Emissionen um 95% bis 2060
  - Zusätzlicher Stromeinsatz insbesondere für Wärme
  - H<sub>2</sub> als chem. Speicher: Rückverstromung, HT-Prozesswärme, Verkehr



# Überblick

- 1) Leitstudie im Rahmen des Energiekonzepts
- 2) Energiesystem-Modell MESAP**
- 3) Mengengerüste der Leitstudie 2011
- 4) Szenario-Validierung
  - a) Versorgungssicherheit Strom
  - b) PKW-Szenario
- 5) ökonomische Aspekte der Transformation des Energiesystems
- 6) wesentliche Schlussfolgerungen

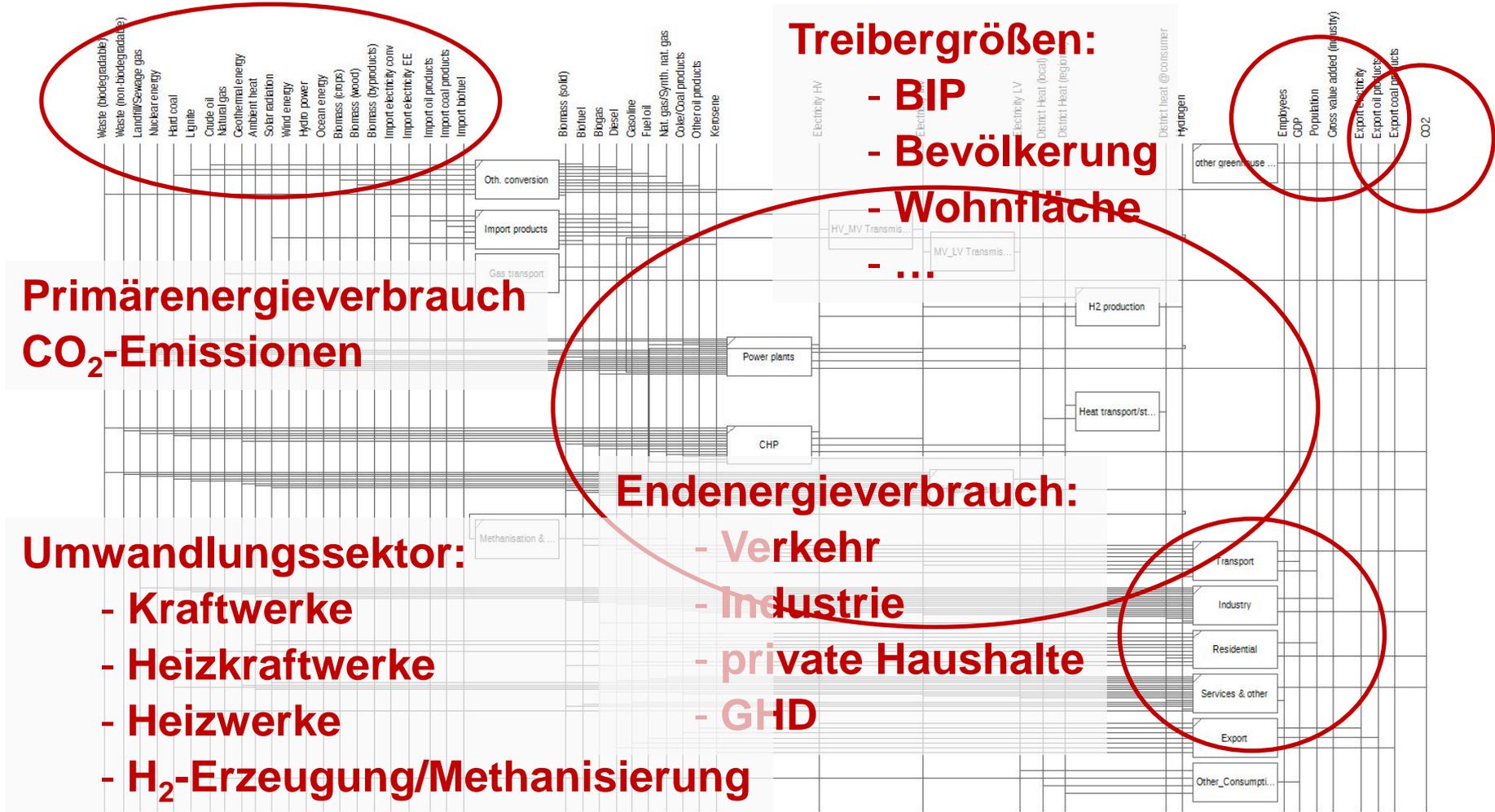


# Energiesystemmodellierung: Modell MESAP

- konsistente Bilanzierung von Stoff- und Energieflüssen
- Berechnung installierter Leistungen Stromerzeugung und Stromgestehungskosten
- „Kalibrierung“ des Modells mit statistischen Daten: Treibergrößen, Primär- und Endenergieverbrauch, Anwendungsbilanzen...
- Berücksichtigung
  - relevanter Primär- und End-Energieträger
  - relevanter Umwandlungstechnologien
  - relevanter Energieverbraucher und Verbrauchstechnologien
  - sozio-ökonomischen Treibergrößen
  - technologisch-ökonomische Entwicklungspfade der relevanten Technologien (Effizienzen, Investitionskosten...)



# Energiesystemmodell MESAP: prinzipielle Struktur



**Primärenergieverbrauch  
CO<sub>2</sub>-Emissionen**

**Umwandlungssektor:**

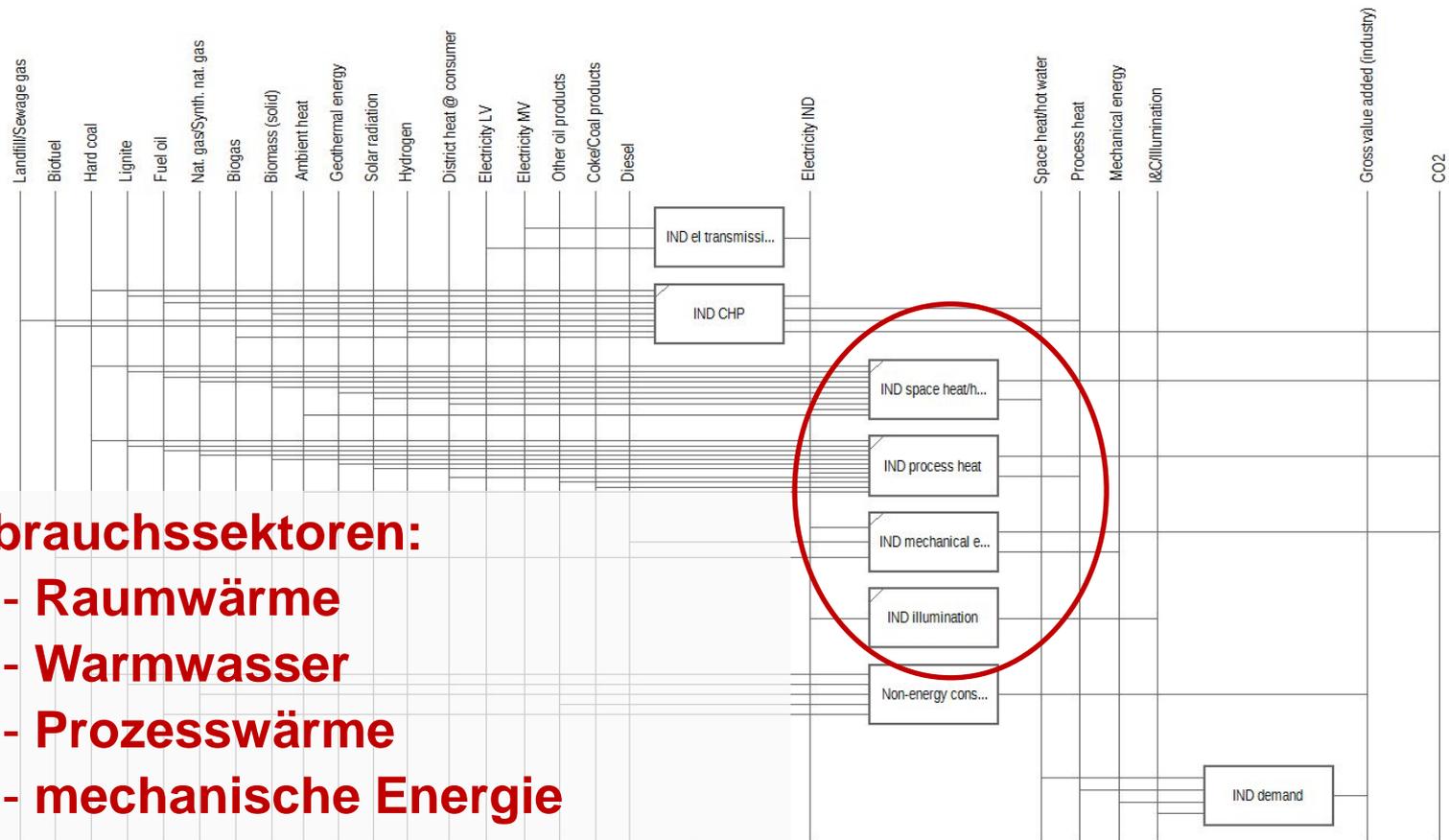
- Kraftwerke
- Heizkraftwerke
- Heizwerke
- H<sub>2</sub>-Erzeugung/Methanisierung

**Endenergieverbrauch:**

- Verkehr
- Industrie
- private Haushalte
- GHD



# Substruktur: Beispiel Industriesektor



## Verbrauchssektoren:

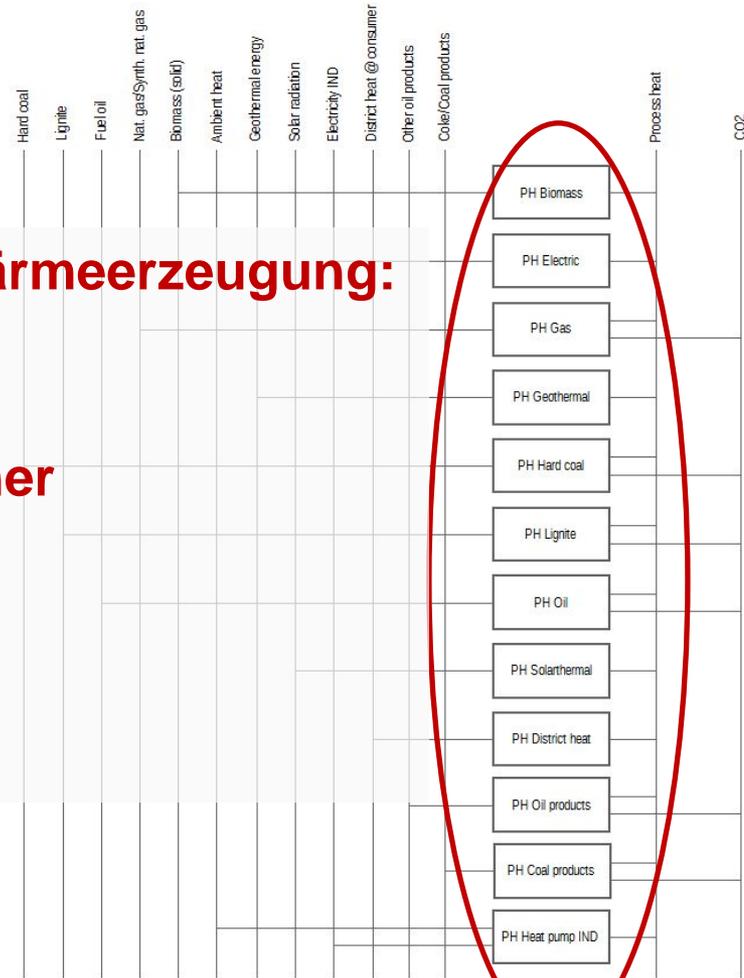
- Raumwärme
- Warmwasser
- Prozesswärme
- mechanische Energie
- Beleuchtung, Kommunikation



# Substruktur: Beispiel Prozesswärme Industrie

## Technologien zur Wärmeerzeugung:

- Gasbrenner
- Ölbrenner
- Biomassebrenner
- Wärmepumpen
- Solarthermie
- Fernwärme
- ...



# Technologiebeschreibungen: Datenblätter

<b>Pellet-Ofen Haushalte (&lt;25kW)</b>								
	Einheit	2009	2010	2015	2020	2030	2040	2050
<b>Technik</b>								
Wirkungsgrad thermisch	$\eta_{th}$	0,80	0,80	0,80	0,81	0,81	0,82	0,82
Volllaststunden	h/a	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
Anteil ETS	%	0	0	0	0	0	0	0
<b>Kosten</b>								
Abschreibungsdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
Zinssatz	%	6	6	6	6	6	6	6
spezifische Investitionen	€/kW <sub>N</sub>	1585	1580	1554	1529	1461	1376	1325
Brennstoffkosten (Kleinabnehmer)	€/kWh <sub>end</sub>	0,043	0,043	0,043	0,054	0,054	0,054	0,054
(spezifische) Betriebskosten	€/kW <sub>N</sub> · a	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
	% Invest/a	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4
	€/kWh <sub>th</sub>	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
spezifische Verbrauchskosten	€/kW <sub>N</sub> · a	80,61	80,61	80,36	100,13	99,52	98,90	98,30
	€/kWh <sub>th</sub>	0,054	0,054	0,054	0,067	0,066	0,066	0,066
Kosten für CO <sub>2</sub> -Zertifikate	€/kWh <sub>th</sub>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>Jahreskosten</b>	€/kW <sub>N</sub> · a	223,66	223,21	220,74	238,30	231,75	223,74	218,69
<b>Wärmegestehungskosten</b>	€/kWh <sub>th</sub>	0,149	0,149	0,147	0,159	0,155	0,149	0,146



# Überblick

- 1) Leitstudie im Rahmen des Energiekonzepts
- 2) Energiesystem-Modell MESAP
- 3) Mengengerüste der Leitstudie 2011**
- 4) Szenario-Validierung
  - a) Versorgungssicherheit Strom
  - b) Validierung PKW-Szenario
- 5) ökonomische Aspekte
- 6) wesentliche Schlussfolgerungen der Leitstudie 2011

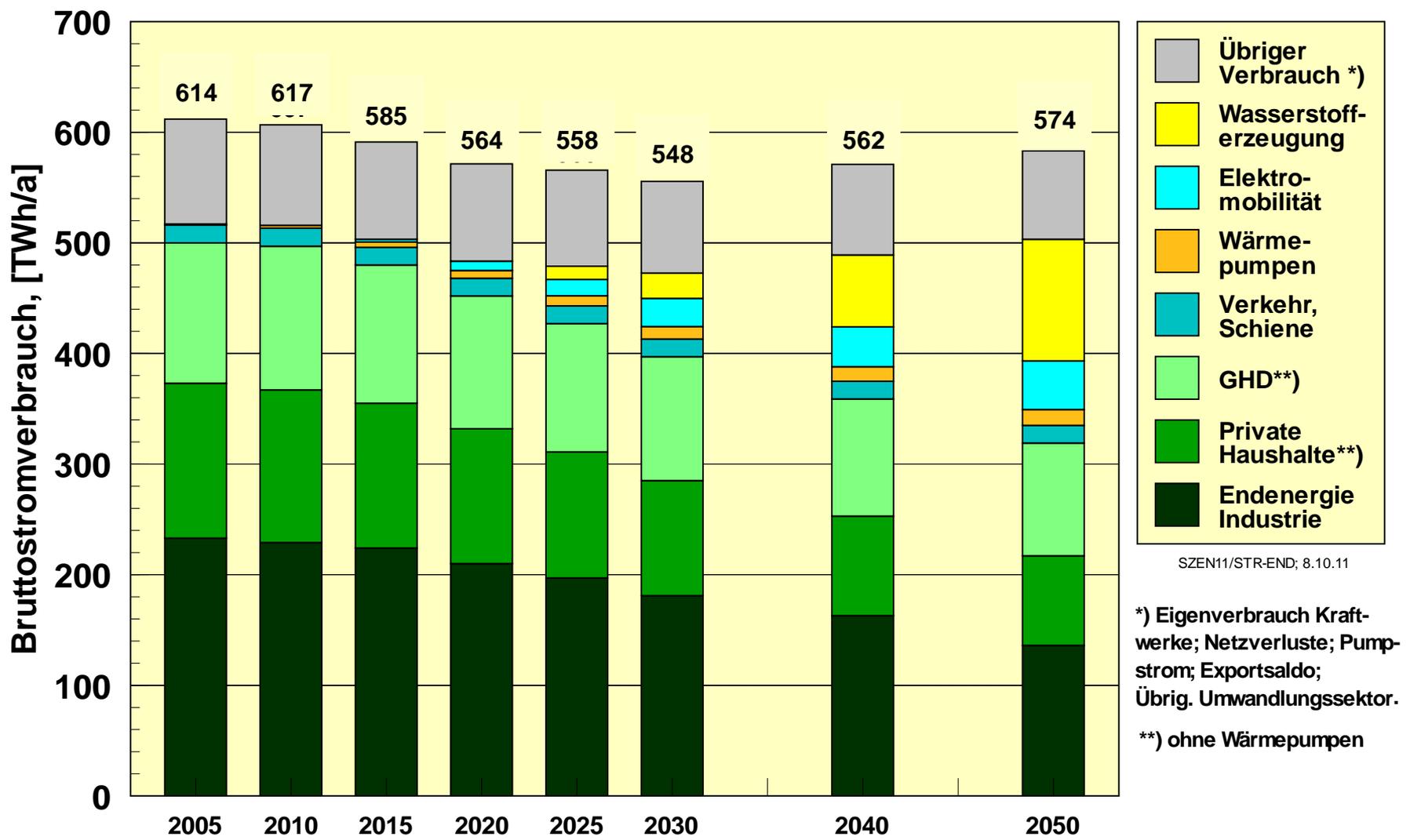


# Prämissen/Grundannahmen im Stromsektor

- **Reduktion Endenergieverbrauch Strom** um 25% bis 2050
- **EE-Anteil am Bruttostromverbrauch >80%** → Prämisse stabiler Inlandsmärkte
- **konventioneller Kraftwerkspark:** Rückbau von Grundlastkraftwerken, höherer KWK-Anteil, flexible Gaskraftwerke
- **Atomausstieg**
- starke Rolle der **Windkraft**, begrenzter Ausbau **PV** aufgrund starker Fluktuation/Leistungsspitzen
- **begrenzte Biomassenutzung** wg. limitierter nachhaltiger Potenziale, Einsatz vor allem in KWK-Anlagen
- **EE-Stromimport** (einschl. CSP) zur Versorgung und für Lastausgleich
- Netzausbau im nationalen und europäischen **Übertragungsnetz** → nationaler und europäischer Last- und Erzeugungsausgleich
- Netzausbau im **Verteilnetz** und **variable Tarife** ermöglichen Erzeugungs- und Lastmanagement



# Komponenten des Bruttostromverbrauchs Szenario A



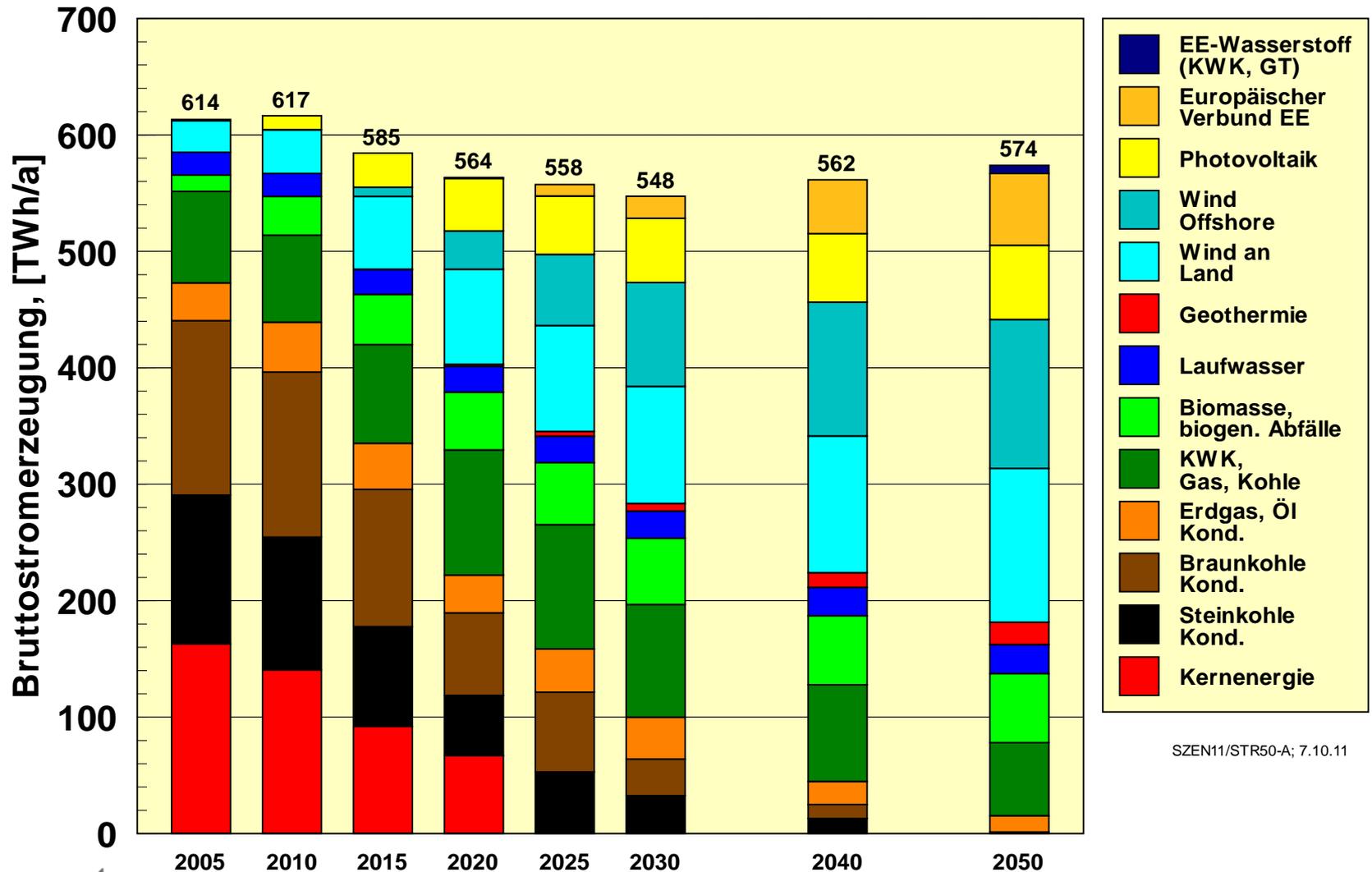
SZEN11/STR-END; 8.10.11

\*) Eigenverbrauch Kraftwerke; Netzverluste; Pumpstrom; Exportsaldo; Übrig. Umwandlungssektor.

\*\* ) ohne Wärmepumpen



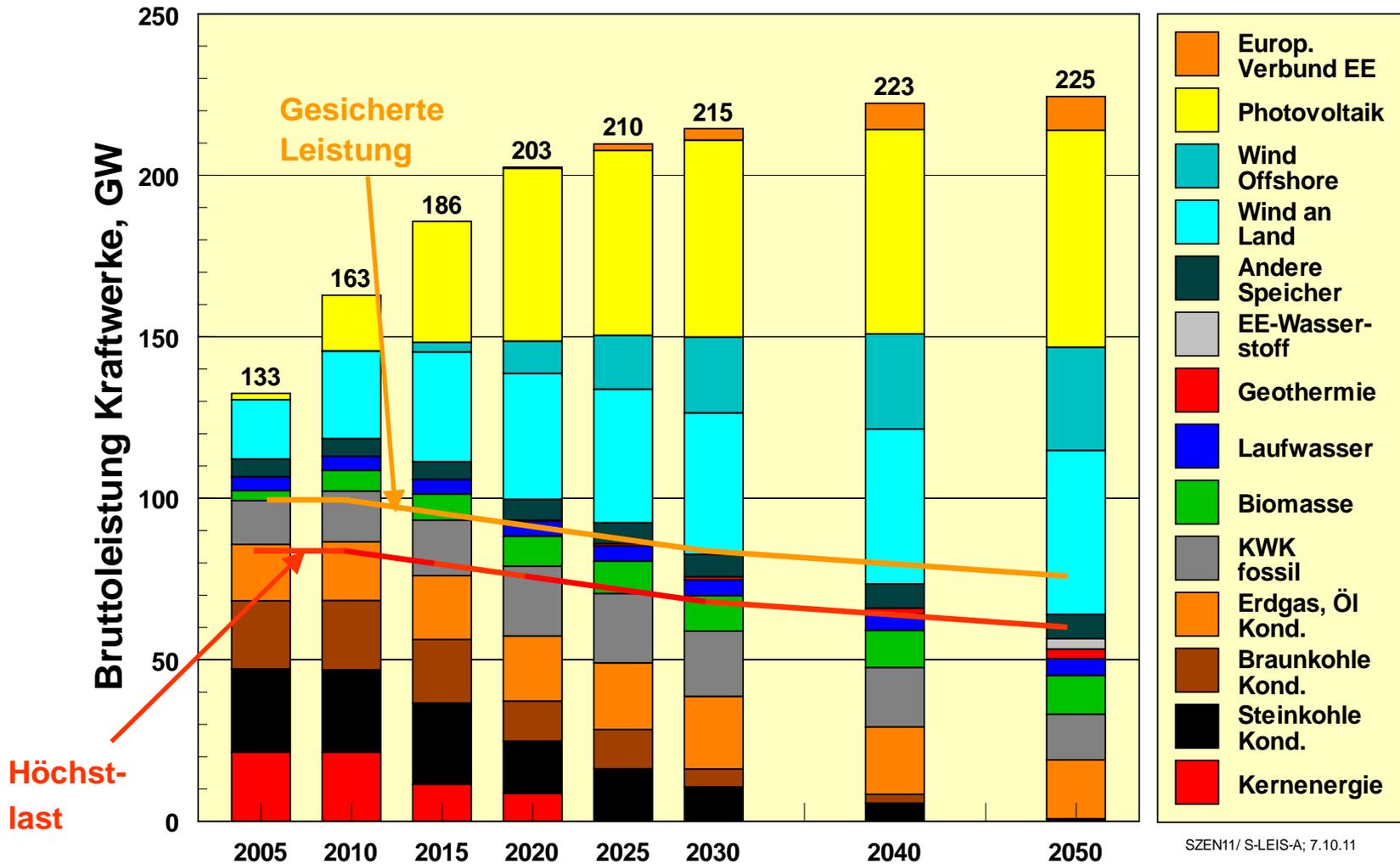
# Struktur der Bruttostromerzeugung Szenario A



SZEN11/STR50-A; 7.10.11



# Struktur der Stromerzeugungskapazitäten Szenario A

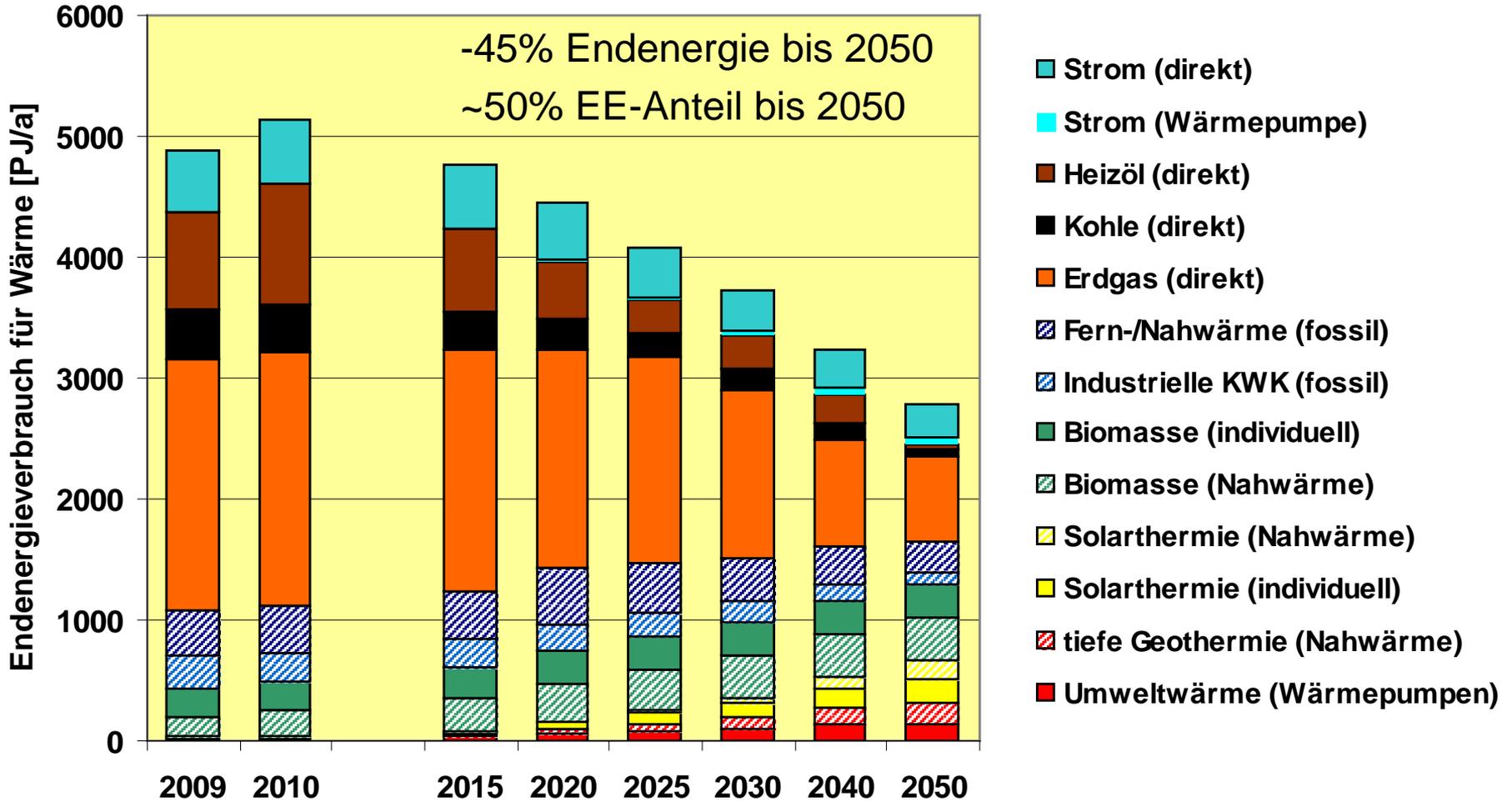


# Prämissen/Grundannahmen im Wärmesektor

- große **Effizienzpotentiale Raumwärme**: spez. Endenergieverbrauch für Raumwärme: -50%, fossiler Primärenergieverbrauch -80% bis 2050
- langfristig bedeutende Rolle der **Kraft-Wärmekopplung und netzgebundener Wärme** (Solar- und Geothermie, Langzeitspeicherung)
- deutliche Steigerung **EE-Wärme**, insbesondere im Raumwärmesektor und bei netzgebundener Wärme
- Einsatz von **EE-Strom im Wärmebereich** (Substitution fossiler Brennstoffe, insb. Wärmepumpen für Raumwärme, Elektroheizer für Prozesswärme)
- **Flexibilisierung der KWK**: mit Wärmespeichern und in Bezug auf Wärmehöchstlast größer dimensionierte Anlagenleistung
- begrenzte Rolle von **Biogas und Biomasse** aufgrund limitierter nachhaltiger Biomassepotentiale



# Endenergieverbrauch für Wärme



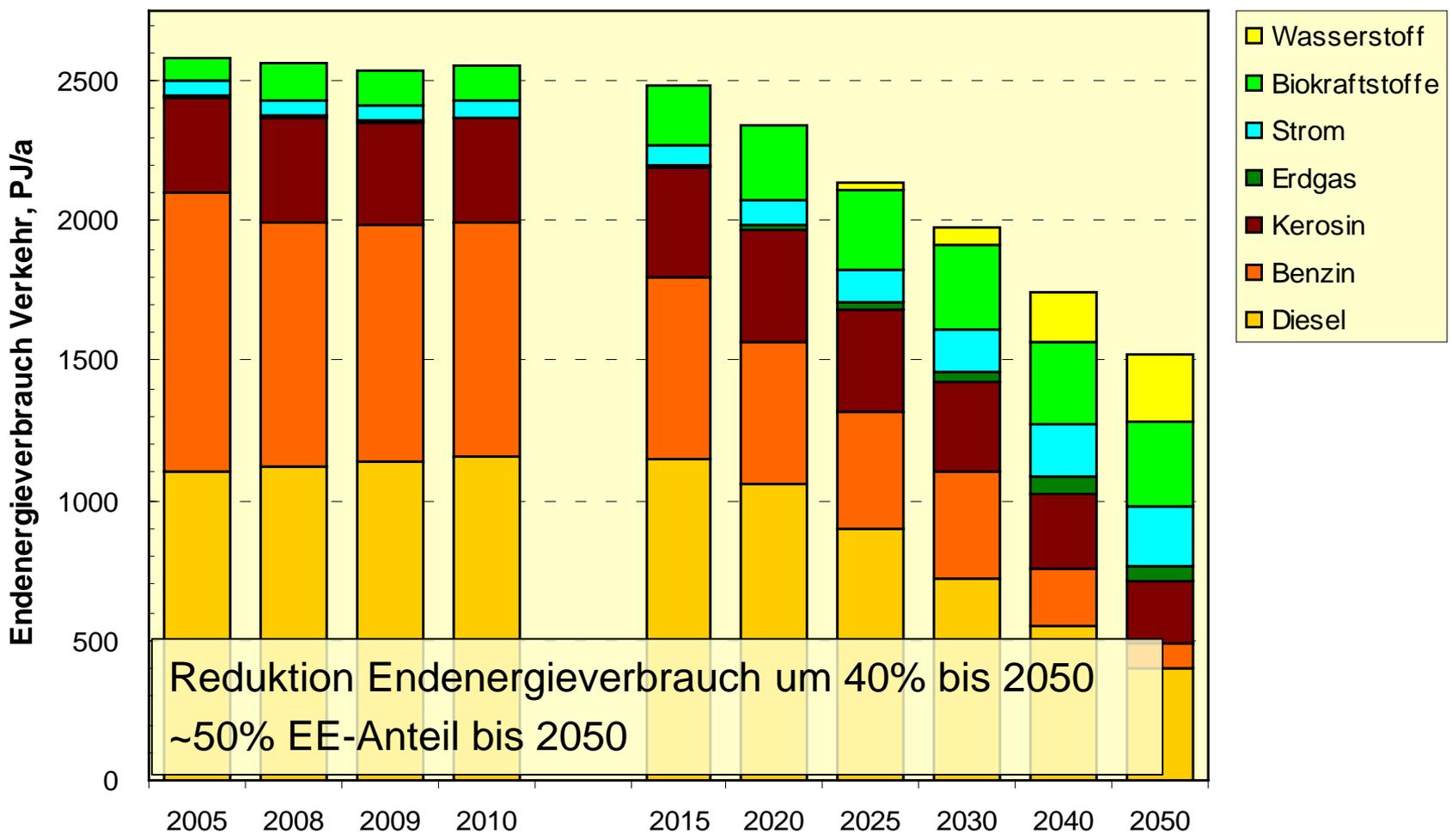
# Prämissen/Grundannahmen im Verkehrssektor

- leichter Rückgang **Personenverkehrsleistung**
- deutlicher Anstieg der **Güterverkehrsleistungen**, insbesondere auch der Bahn und des Schiffsverkehrs
- Realisierung von **Effizienzpotentialen** im gesamten Verkehrsbereich, insbesondere bei konventionellen Antrieben (PKW: 50-60%, LKW: 30%)
- konsequente **Verschärfung der CO<sub>2</sub>-Grenzwerte** für Neufahrzeugflotten
- begrenzte nachhaltige Biokraftstoffpotenziale → **fundamentaler Strukturwandel** mit neuen Antriebstechnologien und einer veränderten Versorgungsinfrastruktur
- **Durchbruch der Elektromobilität** vor allem bei den PKW
- langfristig **dritter erneuerbarer Kraftstoff** im Verkehr (H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, synthetische Kohlenwasserstoffe, jeweils aus EE-Strom)
- detaillierte Untersuchung von drei **Unterszenarien** im **Verkehr** mit unterschiedlichem Beitrag E-KFZ (BEV, EREC), EE-H<sub>2</sub> (BZ, VB), EE-CH<sub>4</sub>

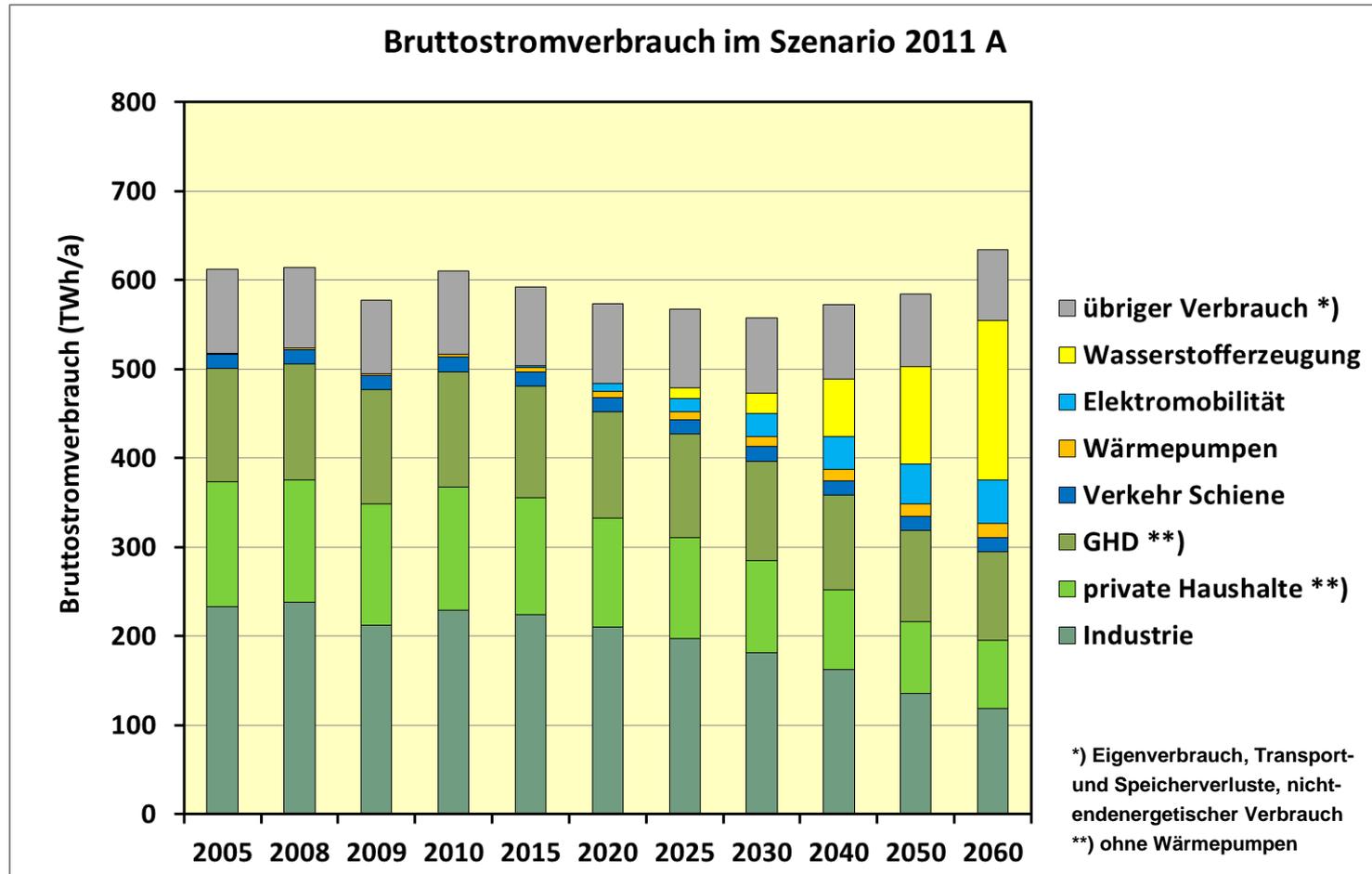


# Entwicklung des Endenergieverbrauchs Verkehr

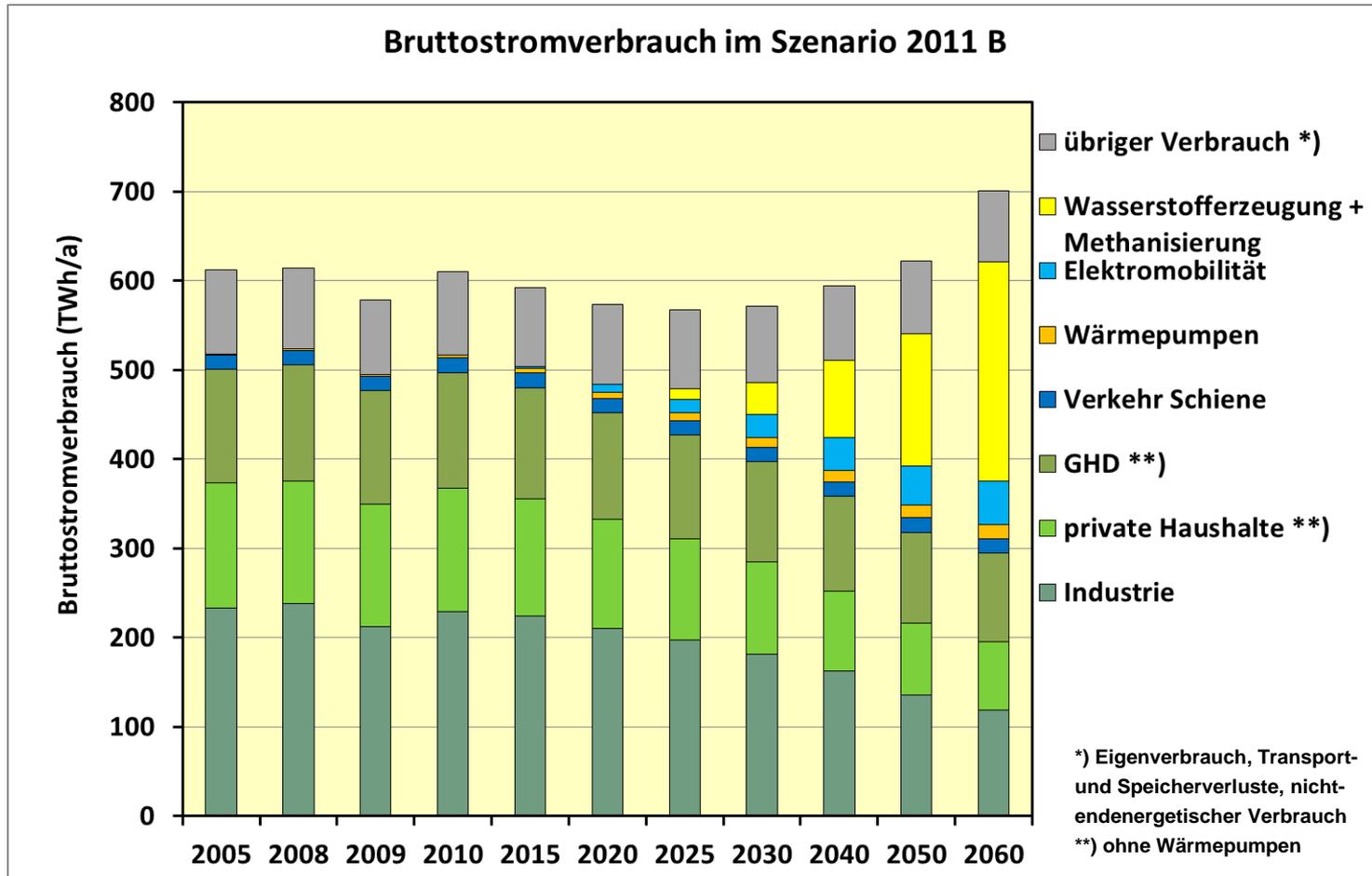
Szenario A, nach Energieträgern



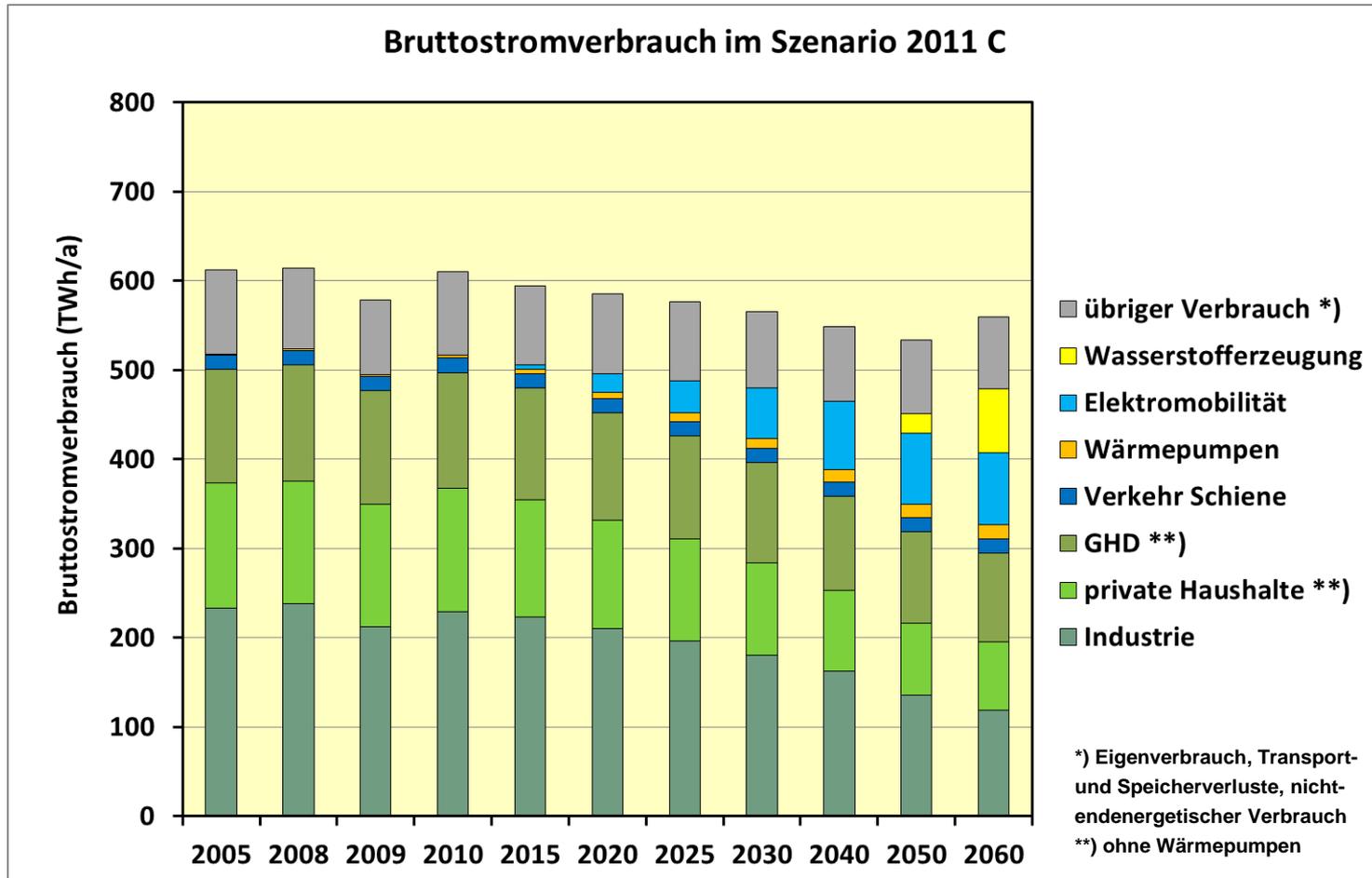
# Auswirkungen Verkehr auf Gesamtsystem: Bruttostromverbrauch A (50% E-Mob, EE-H<sub>2</sub>)



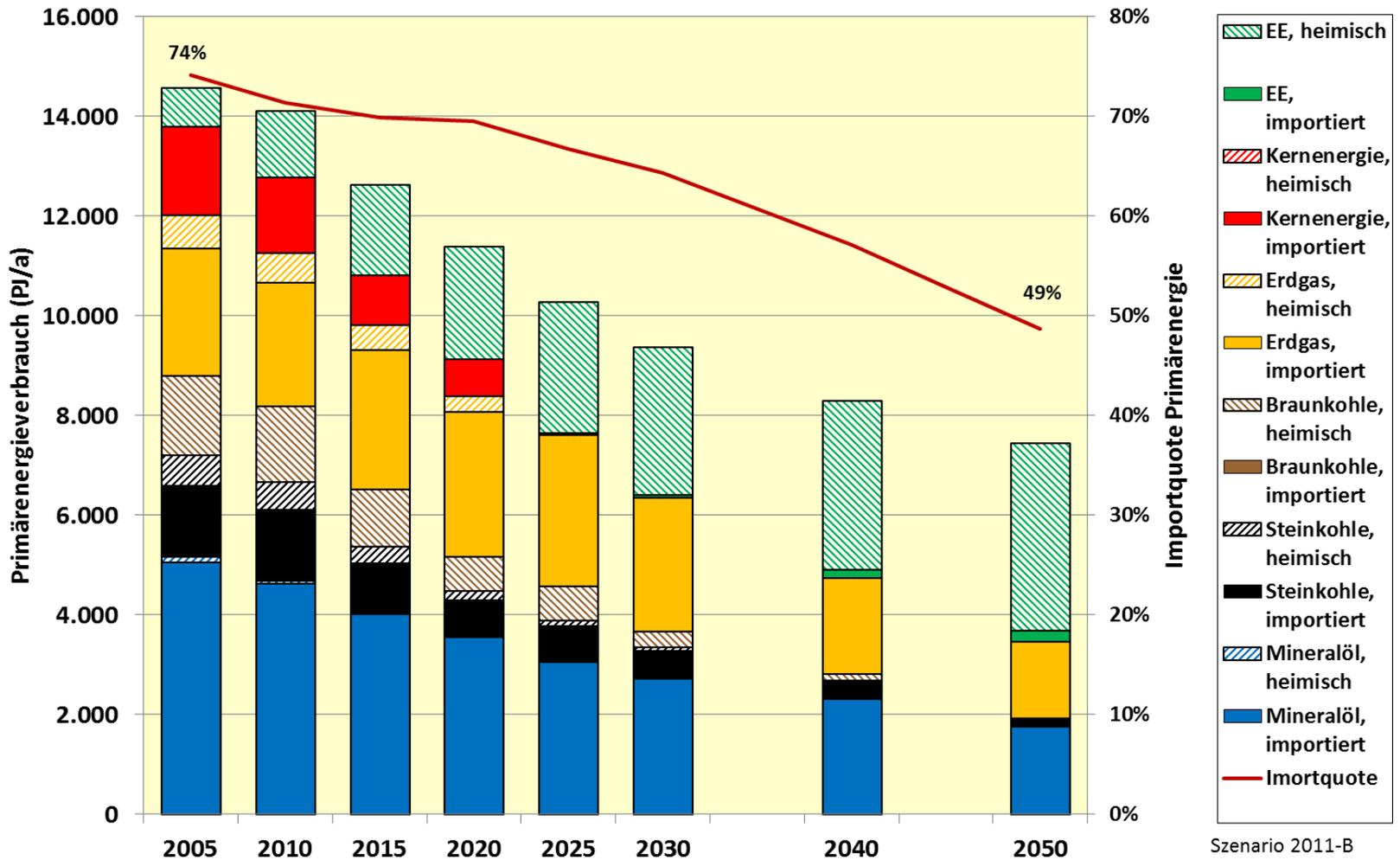
# Auswirkungen Verkehr auf Gesamtsystem: Bruttostromverbrauch B (50% E-Mob, EE-CH<sub>4</sub>)



# Auswirkungen Verkehr auf Gesamtsystem: Bruttostromverbrauchs C (100% E-Mob)



# Importabhängigkeit Energieversorgung

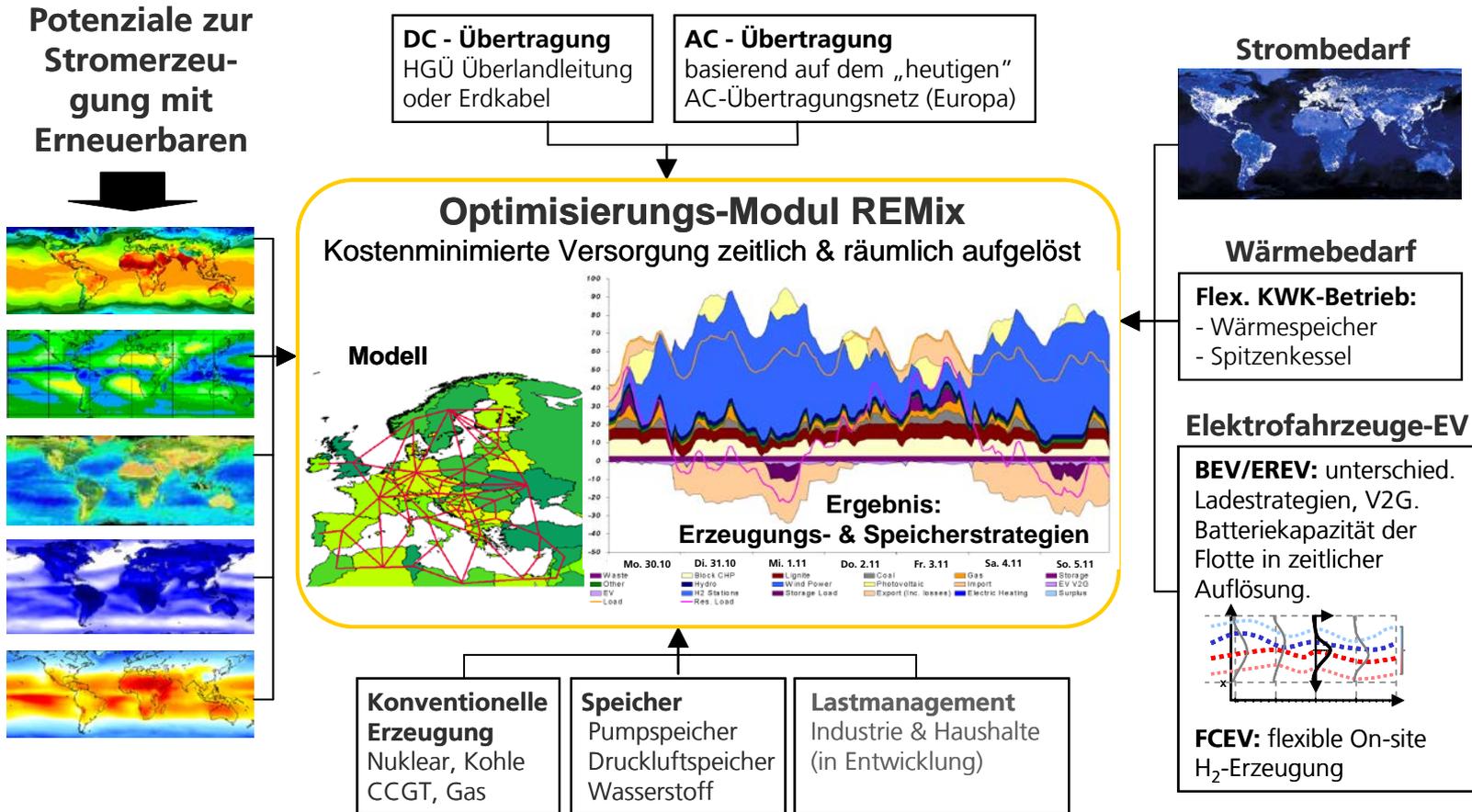


# Überblick

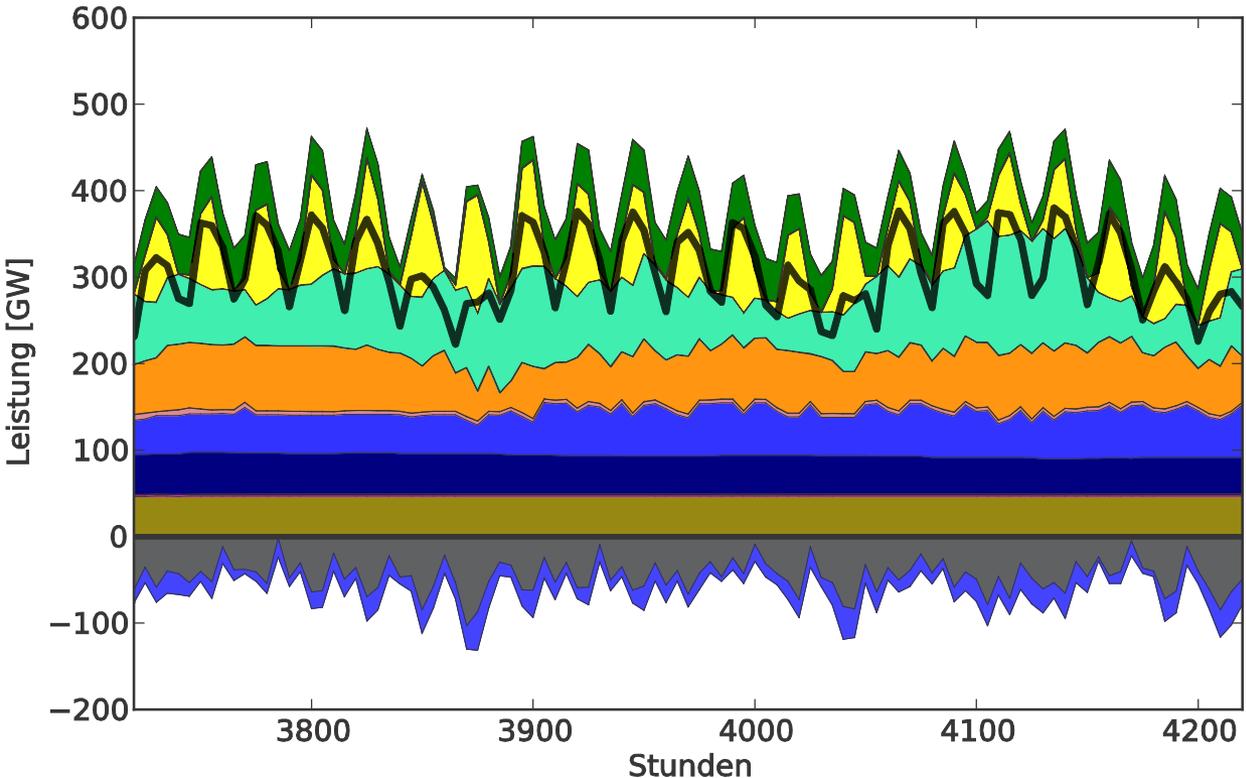
- 1) Leitstudie im Rahmen des Energiekonzepts
- 2) Energiesystem-Modell MESAP
- 3) Mengengerüste der Leitstudie 2011
- 4) **Szenario-Validierung**
  - a) **Versorgungssicherheit Strom**
  - b) Validierung PKW-Szenario
- 5) ökonomische Aspekte
- 6) wesentliche Schlussfolgerungen der Leitstudie 2011



# dynamische Simulation Stromerzeugung & Validierung der Mengengerüste: Modell Remix



# Lastdeckung im Jahr 2050: Ergebnisse von Remix



Nuclear	Hydro Ror	Concentrated Solar	H2
Other	Hydro Res	Wind	Storage Feed/Load
Waste	Block CHP	Photovoltaic	EMob Feed/Load
Lignite	Coal	Gas	Load

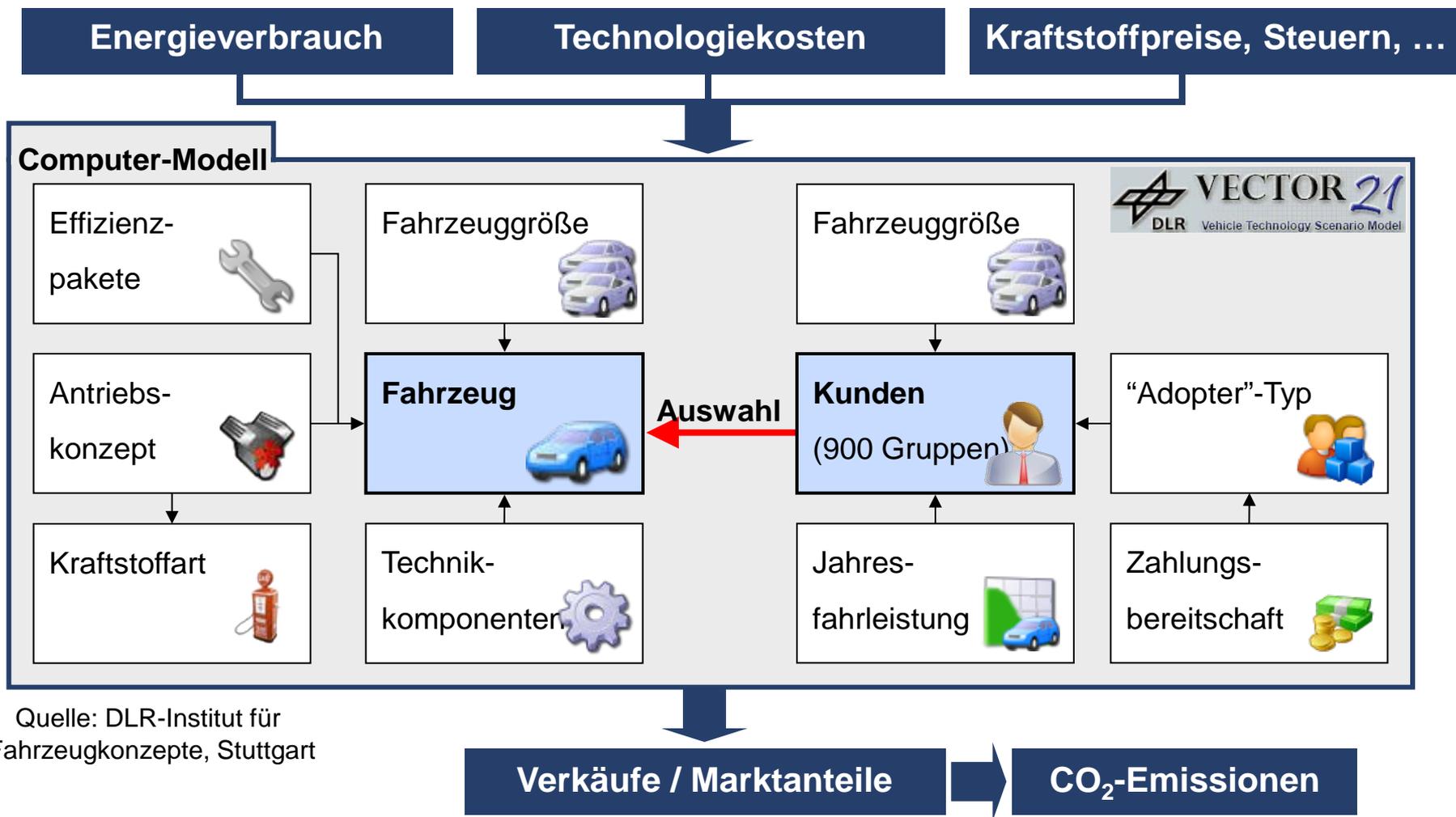


# Überblick

- 1) Leitstudie im Rahmen des Energiekonzepts
- 2) Energiesystem-Modell MESAP
- 3) Mengengerüste der Leitstudie 2011
- 4) Szenario-Validierung**
  - a) Versorgungssicherheit Strom
  - b) Validierung PKW-Szenario
- 5) ökonomische Aspekte
- 6) wesentliche Schlussfolgerungen der Leitstudie 2011



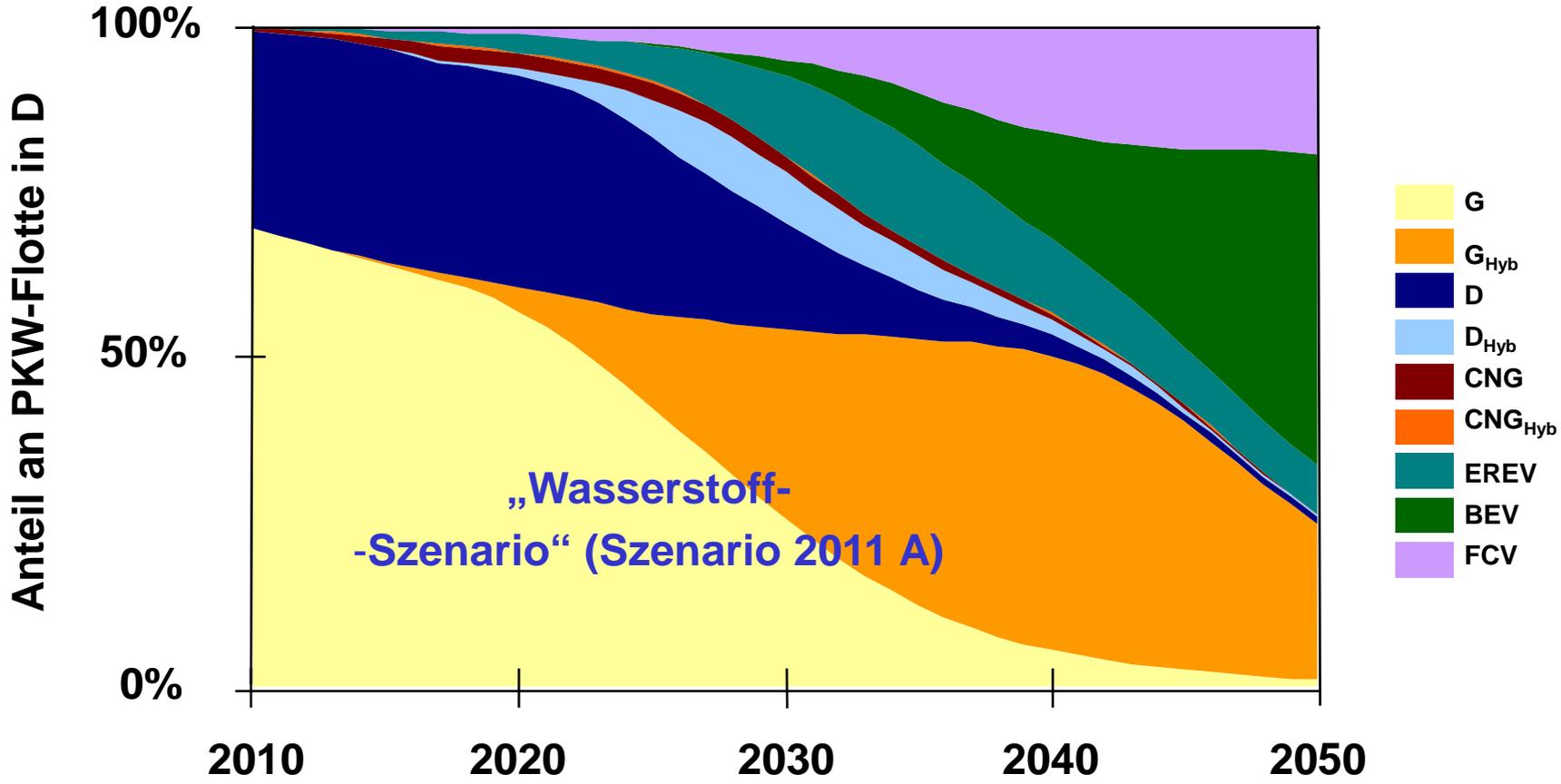
# Verkehr: Flottensimulationsmodell Vector 21 (DLR-FK)



Quelle: DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart



# Verkehrssektor: Entwicklung PKW-Fahrzeugflotte

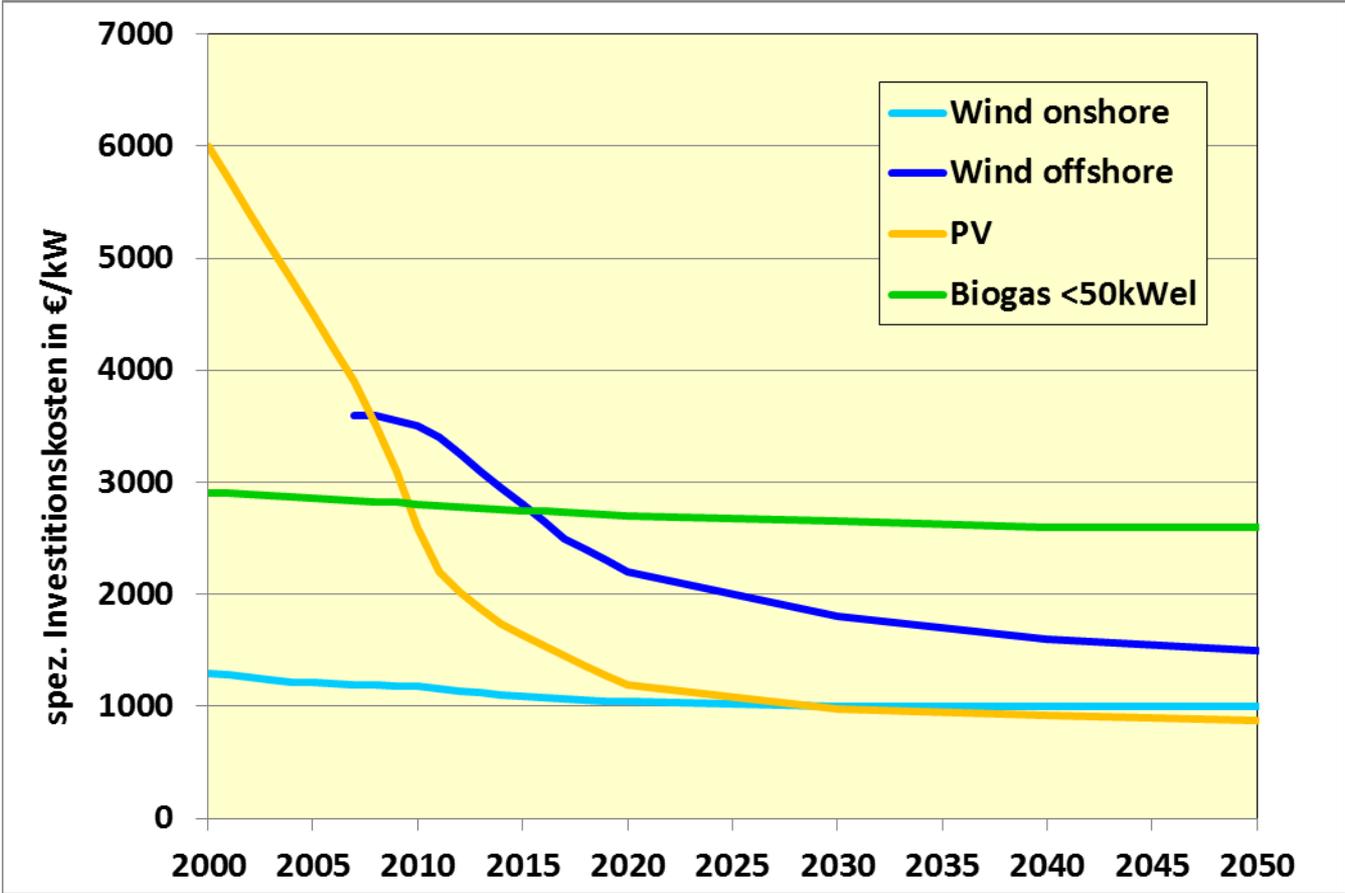


# Überblick

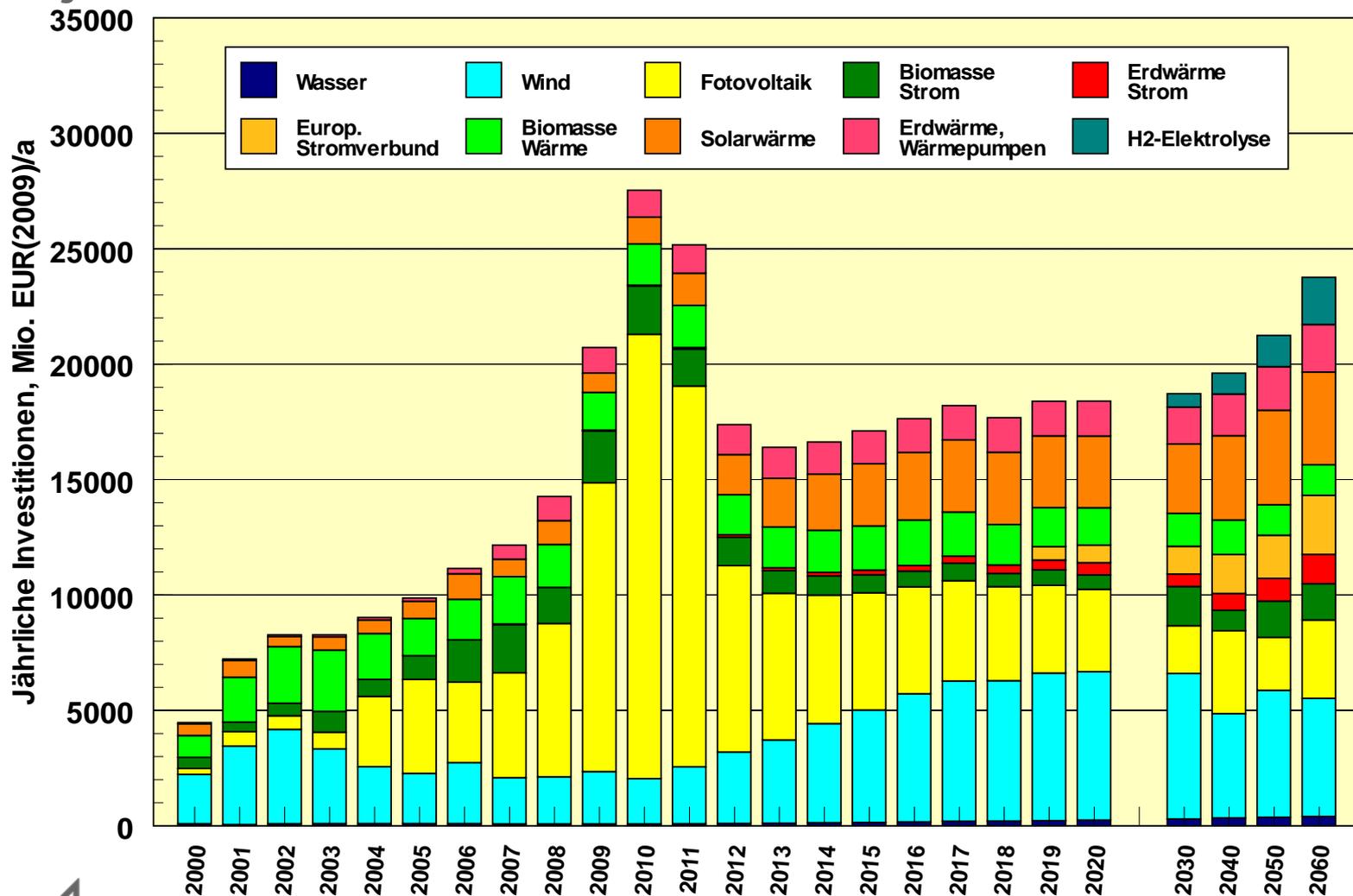
- 1) Leitstudie im Rahmen des Energiekonzepts
- 2) Energiesystem-Modell MESAP
- 3) Mengengerüste der Leitstudie 2011
- 4) Szenario-Validierung
  - a) Versorgungssicherheit Strom
  - b) Validierung PKW-Szenario
- 5) ökonomische Aspekte**
- 6) wesentliche Schlussfolgerungen der Leitstudie 2011



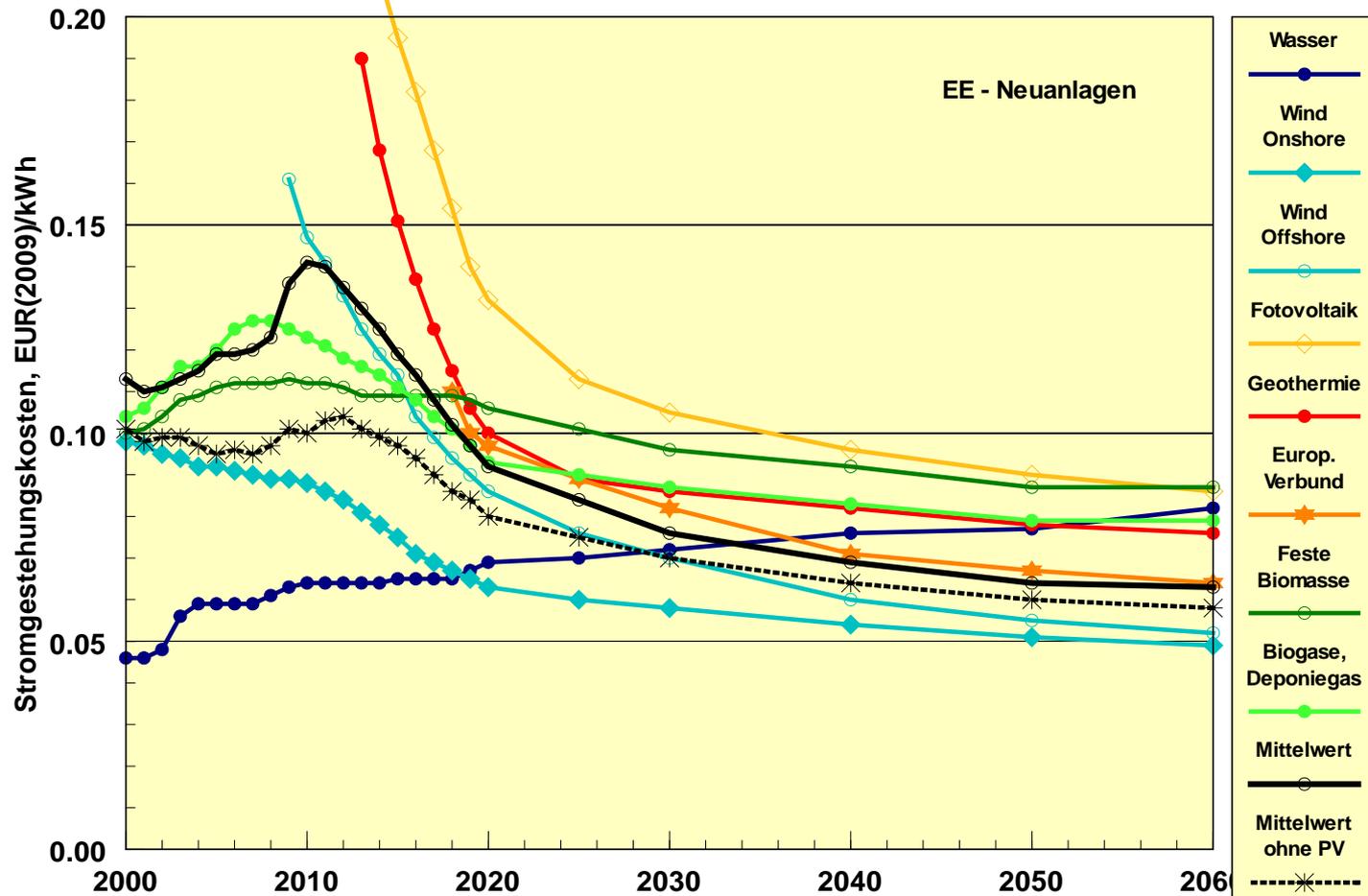
# Entwicklung spezifische Investitionskosten für EE-Technologien



# jährliche Investitionen in EE-Strom und -Wärme



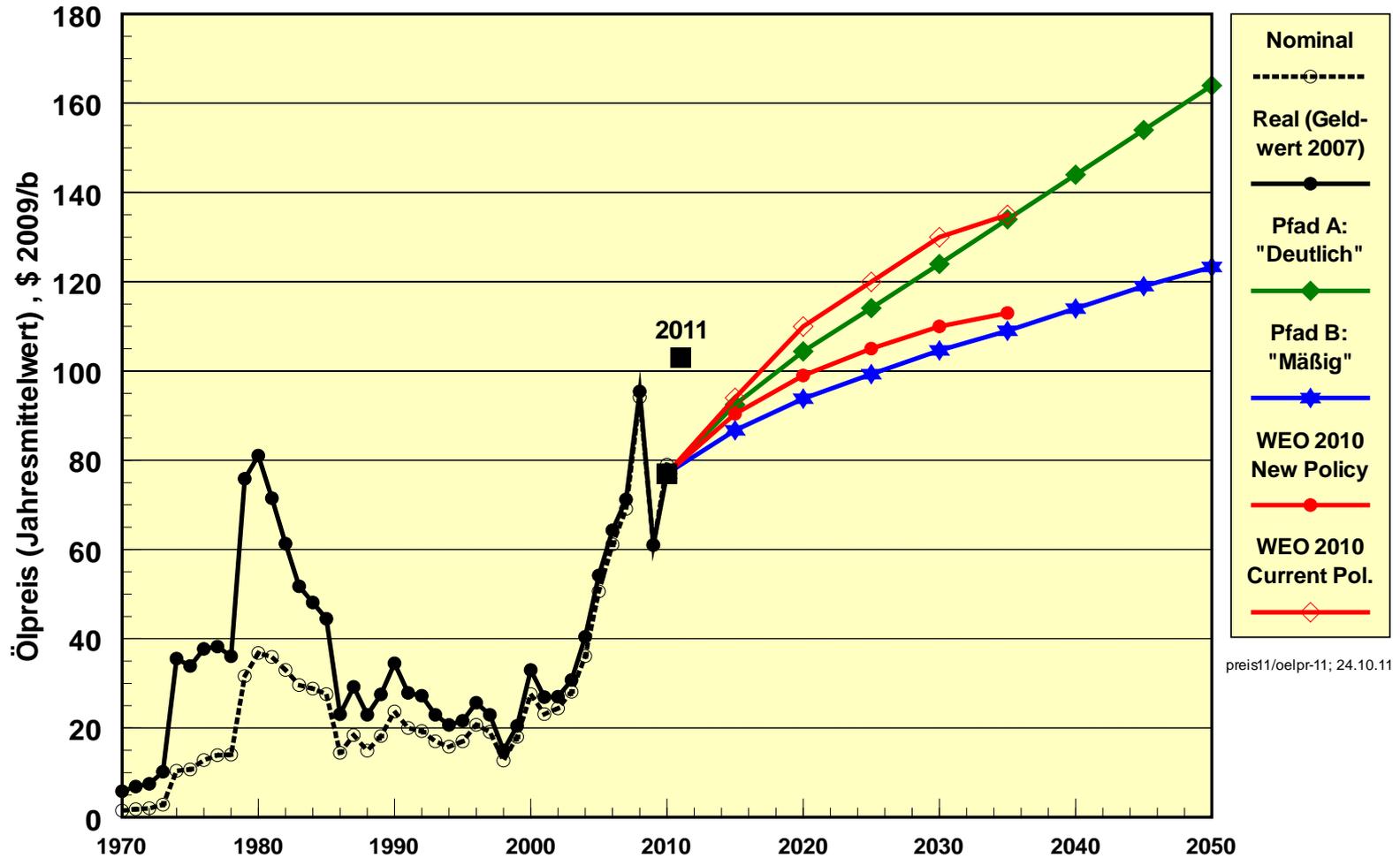
# Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien



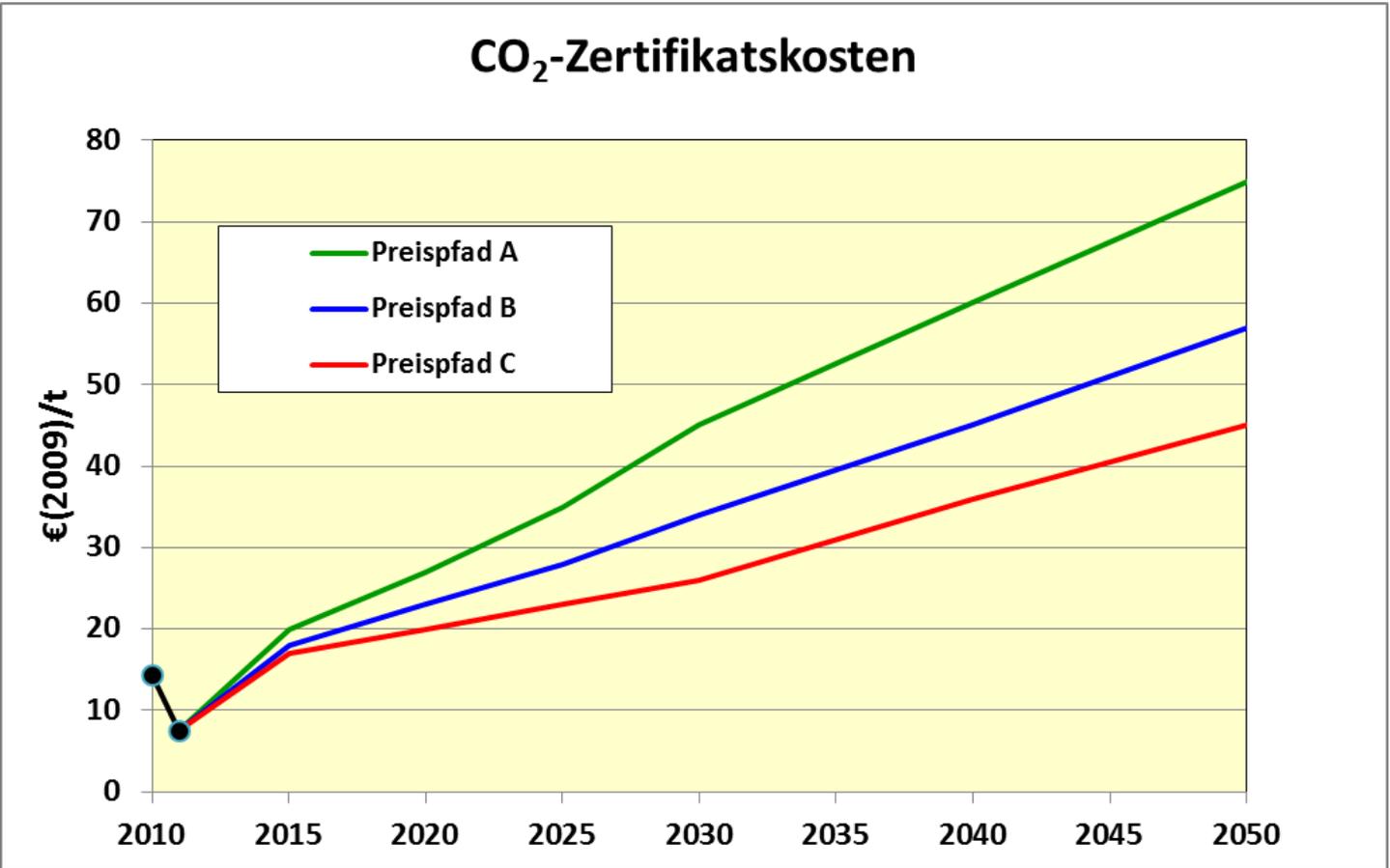
Szen11/STR-KOS1; 15.11.11



# Entwicklung Kosten fossile Brennstoffe

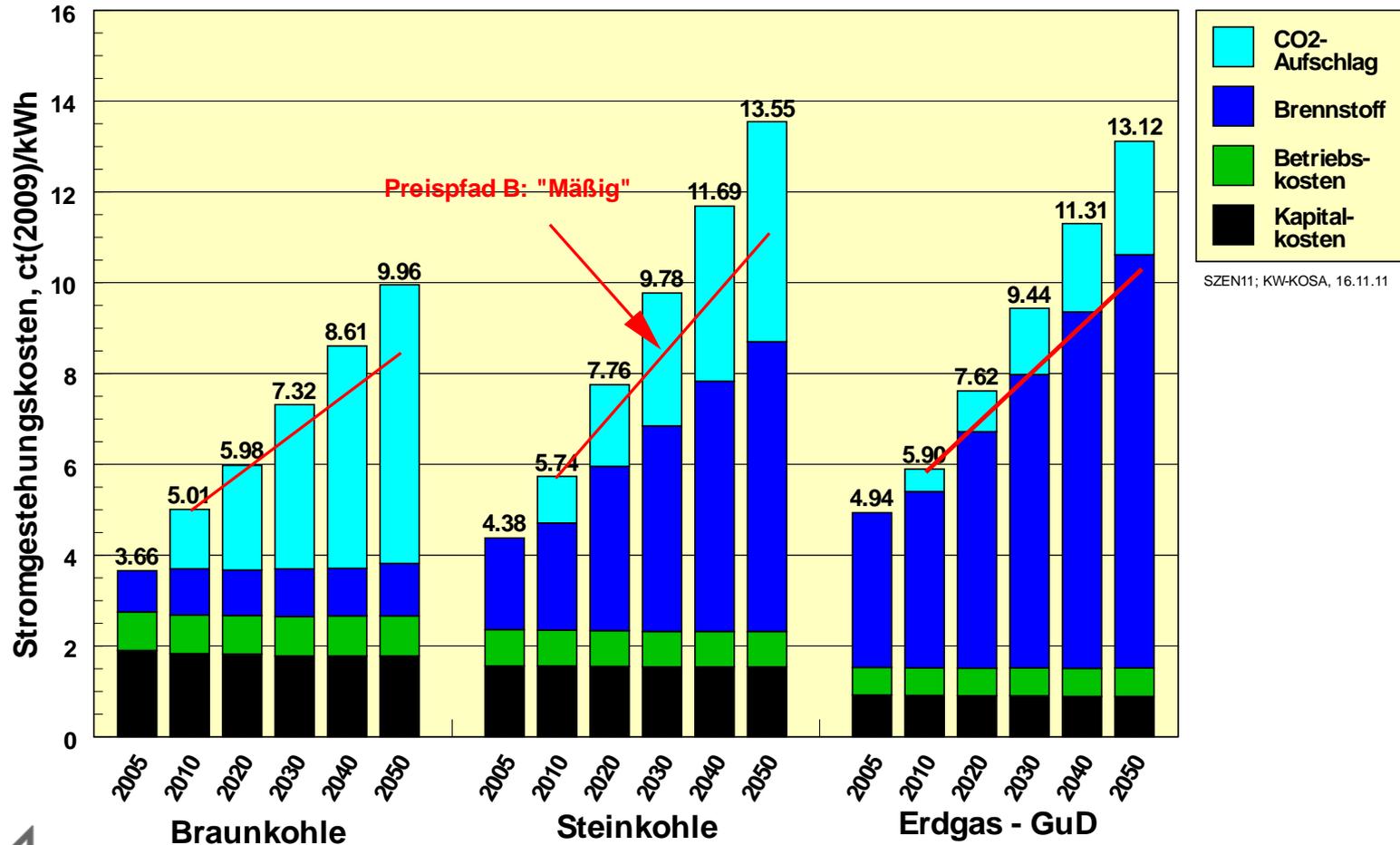


# Entwicklung CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreise

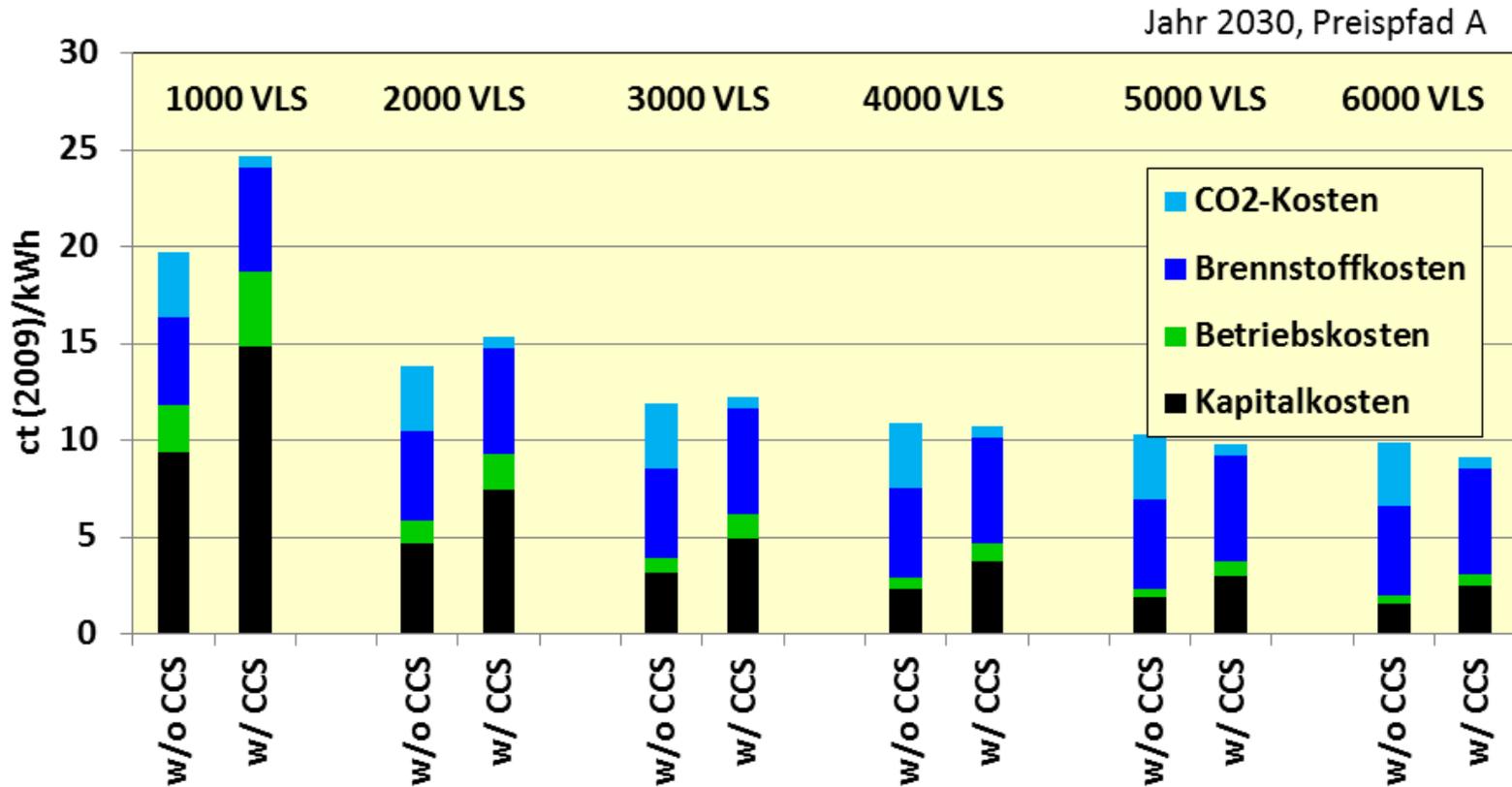


# Stromgestehungskosten konventioneller Kraftwerke

- Preisfad A: "Deutlich" (Zins 6%/a, Abschr. 25 a, 6000 h/a) -

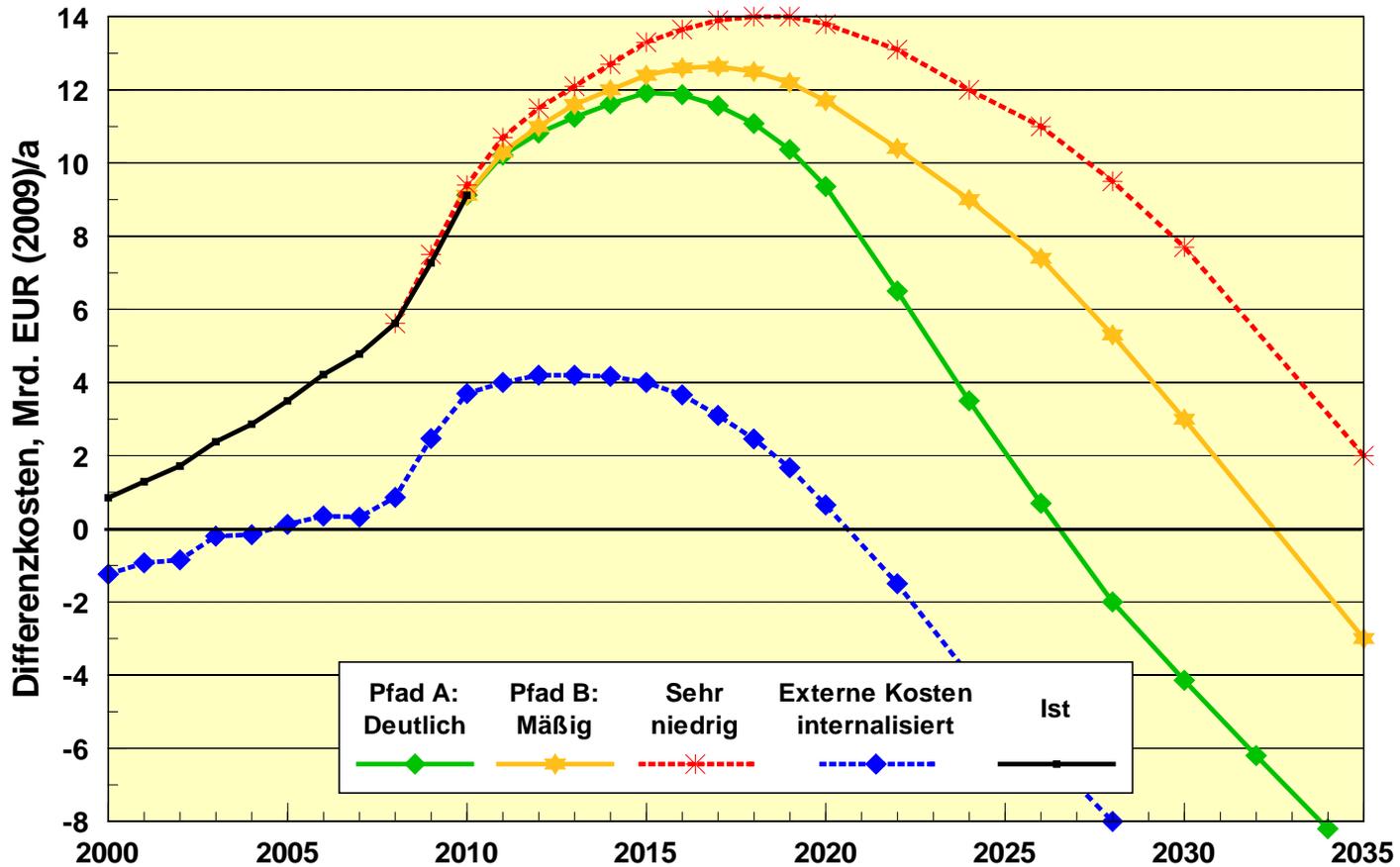


# Steinkohle-KW: Abhängigkeit der Stromgestehungskosten von Volllaststunden



# Beispiel systemanalytische Differenzkosten Stromerzeugung

- Szenario 2011 A, gesamte EE-Stromerzeugung -

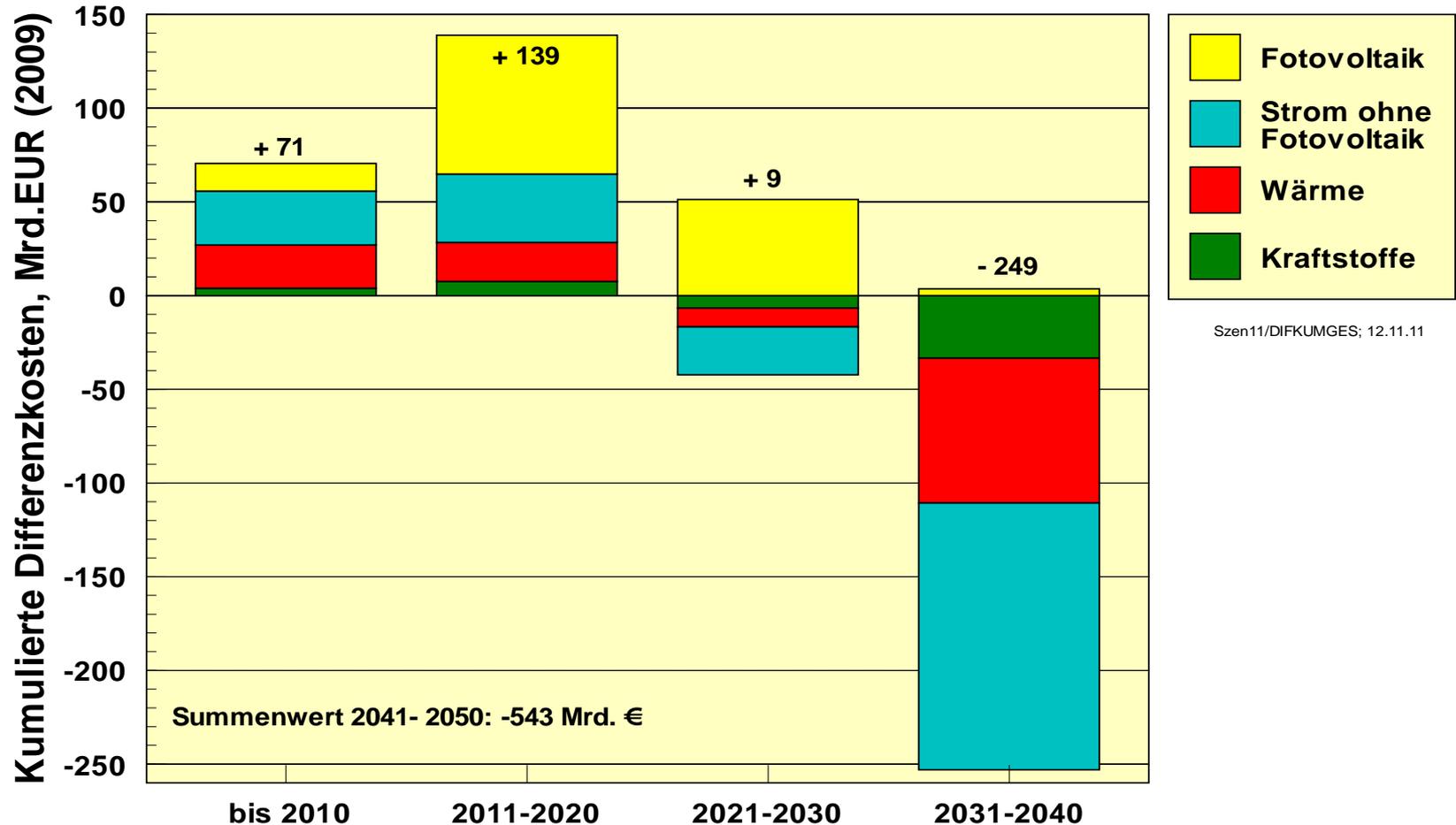


SZEN11/DIFVAR1; 12.11.11



# Kumulierte Differenzkosten der gesamten Energiebereitstellung aus EE im Szenario 2011 A für 10-Jahres-Abschnitte und Preispfad A

- Szenario 2011 A; alle EE; Preispfad A -



# Überblick

- 1) Leitstudie im Rahmen des Energiekonzepts
- 2) Energiesystem-Modell MESAP
- 3) Mengengerüste der Leitstudie 2011
- 4) Szenario-Validierung
  - a) Versorgungssicherheit Strom
  - b) Validierung PKW-Szenario
- 5) ökonomische Aspekte
- 6) **wesentliche Schlussfolgerungen der Leitstudie 2011**



# wesentliche Schlussfolgerungen I

- **Ziele** des Energiekonzepts strukturell-technologisch **prinzipiell erreichbar**
- **Herausforderungen** beim Transformation des Energiesystems insbesondere in den Bereichen

## Wärme

- **Effizienzsteigerung** im (Raum-) **Wärmesektor**: große Potentiale insbesondere bei Sanierung Gebäudebestand, aber schwer zu heben
- Ausbau **EE-Wärme**: ungenügende Förderinstrumente, strukturelle Hemmnisse (**Wärmenetze**, **Wärmespeicher** zur effizienten Nutzung von KWK, Solar- und Geothermie), flächendeckende Wärmepläne

## Verkehr

- deutliche **Effizienzsteigerung** konventioneller Antriebe nötig
- Verlagerung Güterverkehr auf Bahn
- Durchbruch **E-Mobilität**, (H<sub>2</sub>-)Brennstoffzellenfahrzeuge nötig
- limitierte EE-Optionen für Flugverkehr und schweren Güterverkehr



# wesentliche Schlussfolgerungen II

## Strom

- **Effizienzsteigerung** im **Strom**sektor: teilweise Umkehrung aktueller Trends nötig (z. B. Pro-Kopf-Verbrauch in privaten Haushalten)
- **Flexibilisierung** des Kraftwerkparks
- **Systemverantwortung** erneuerbarer Stromproduktion
- **Stromnetze:**
  - Ausbau der europäischen und nationalen Übertragungsnetze (incl. HGÜ), nationale Verteilnetze
  - „**Smart Grids**“ zum Last- und Erzeugungsmanagement
- **Stromspeicher**, insbes. (chem.) **Langfristspeicher** für EE-Überschüsse



**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**

