

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 CO₂-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 H₂-Fahrzeugen (Brennstoffzelle)
- **Szenario 2011 B:** wie Szenario A, aber
 - kein H₂ im Verkehr, stattdessen Verbrennungsmotoren auf EE-Methan-Basis
- **Szenario 2011 C:** wie Szenario A, aber
 - kein H₂ im Verkehr, PKW-Verkehrs vollständig elektrisch (BEV und Plug-in-Hybride)
- **Szenario 2011 THG95:**
 - Reduktion CO₂-Emissionen um 95% bis 2060
 - Zusätzlicher Stromeinsatz insbesondere für Wärme
 - H₂ 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

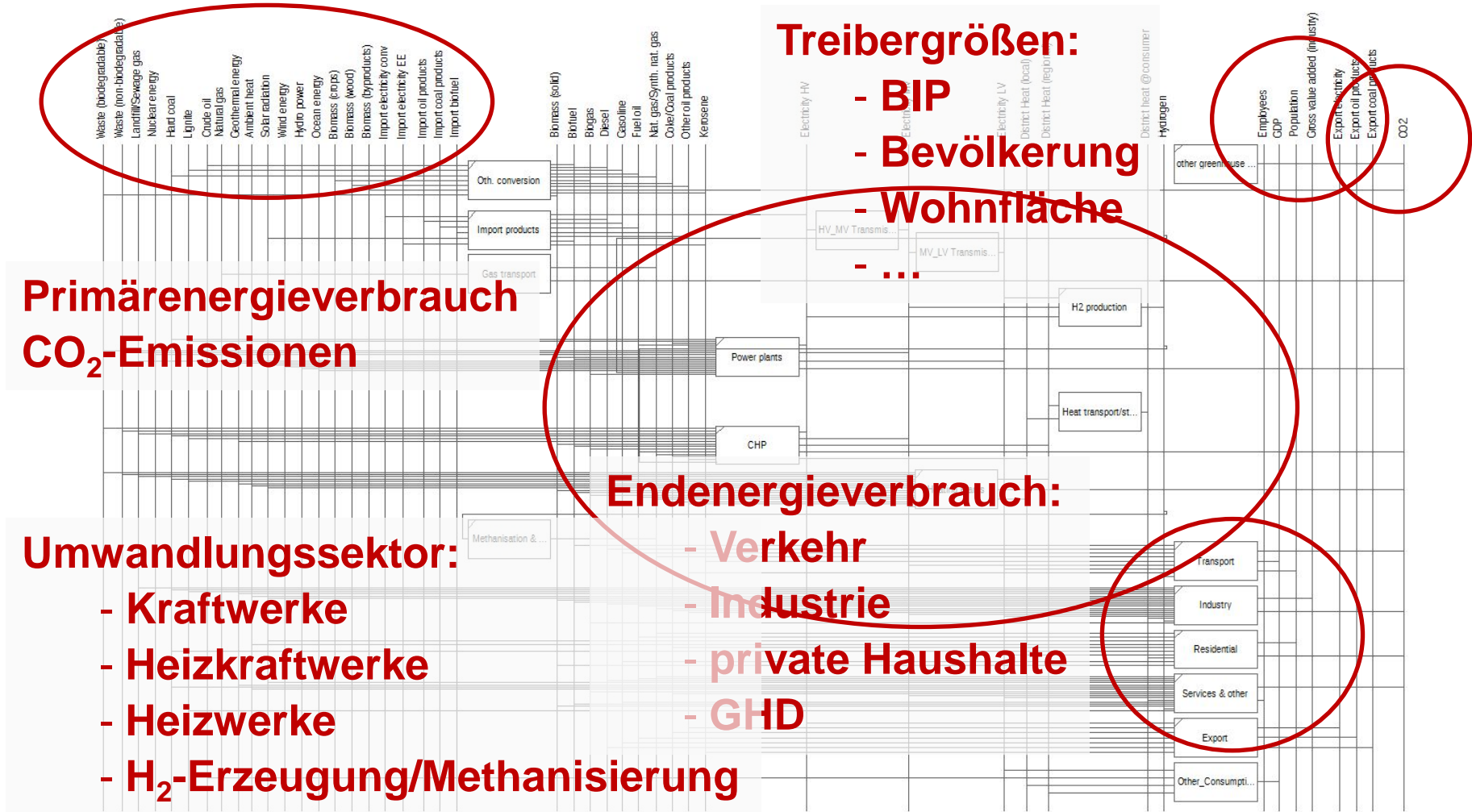


Energiesystemmodellierung: Modell MESAP

- 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



Treibergrößen:

- BIP
- Bevölkerung
- Wohnfläche
- ...

Primärenergieverbrauch
CO₂-Emissionen

Umwandlungssektor:

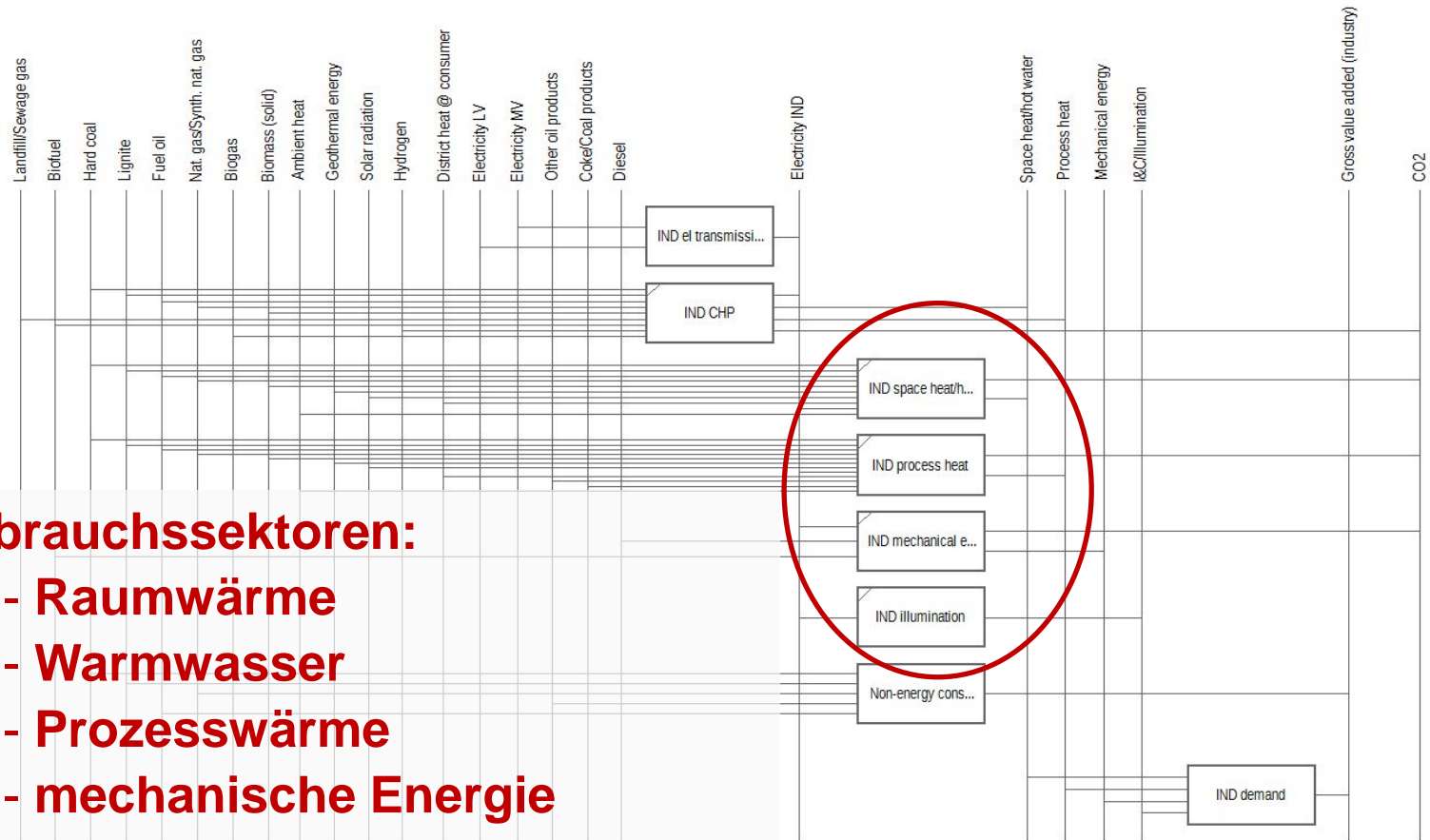
- Kraftwerke
- Heizkraftwerke
- Heizwerke
- H₂-Erzeugung/Methanisierung

Endenergieverbrauch:

- Verkehr
- Industrie
- private Haushalte
- GHD



Substruktur: Beispiel Industriesektor



Verbrauchssektoren:

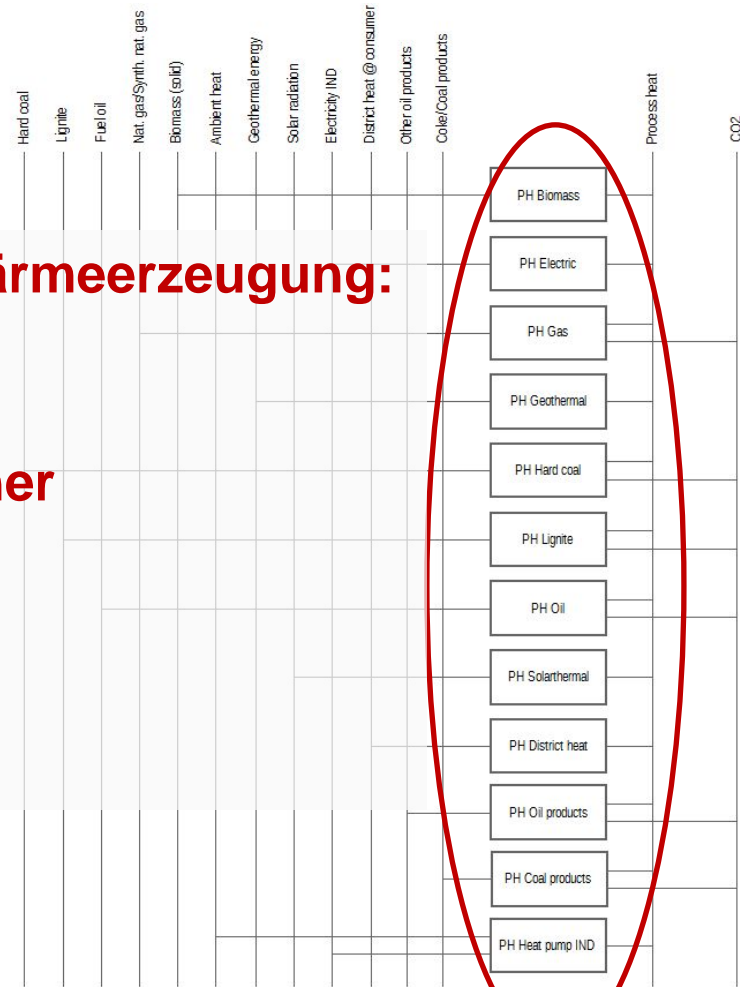
- Raumwärme
- Warmwasser
- Prozesswärme
- mechanische Energie
- Beleuchtung, Kommunikation



Substruktur: Beispiel Prozesswärme Industrie

Technologien zur Wärmeerzeugung:

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



Technologiebeschreibungen: Datenblätter

Pellet-Ofen Haushalte (<25kW)								
	Einheit	2009	2010	2015	2020	2030	2040	2050
Technik								
Wirkungsgrad thermisch	η_{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
Kosten								
Abschreibungsdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
Zinssatz	%	6	6	6	6	6	6	6
spezifische Investitionen	€/kW _N	1585	1580	1554	1529	1461	1376	1325
Brennstoffkosten (Kleinabnehmer)	€/kWh _{end}	0,043	0,043	0,043	0,054	0,054	0,054	0,054
(spezifische) Betriebskosten	€/kW _N · 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 _{th}	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
spezifische Verbrauchskosten	€/kW _N · a	80,61	80,61	80,36	100,13	99,52	98,90	98,30
	€/kWh _{th}	0,054	0,054	0,054	0,067	0,066	0,066	0,066
Kosten für CO ₂ -Zertifikate	€/kWh _{th}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Jahreskosten	€/kW _N · a	223,66	223,21	220,74	238,30	231,75	223,74	218,69
Wärmegestehungskosten	€/kWh _{th}	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

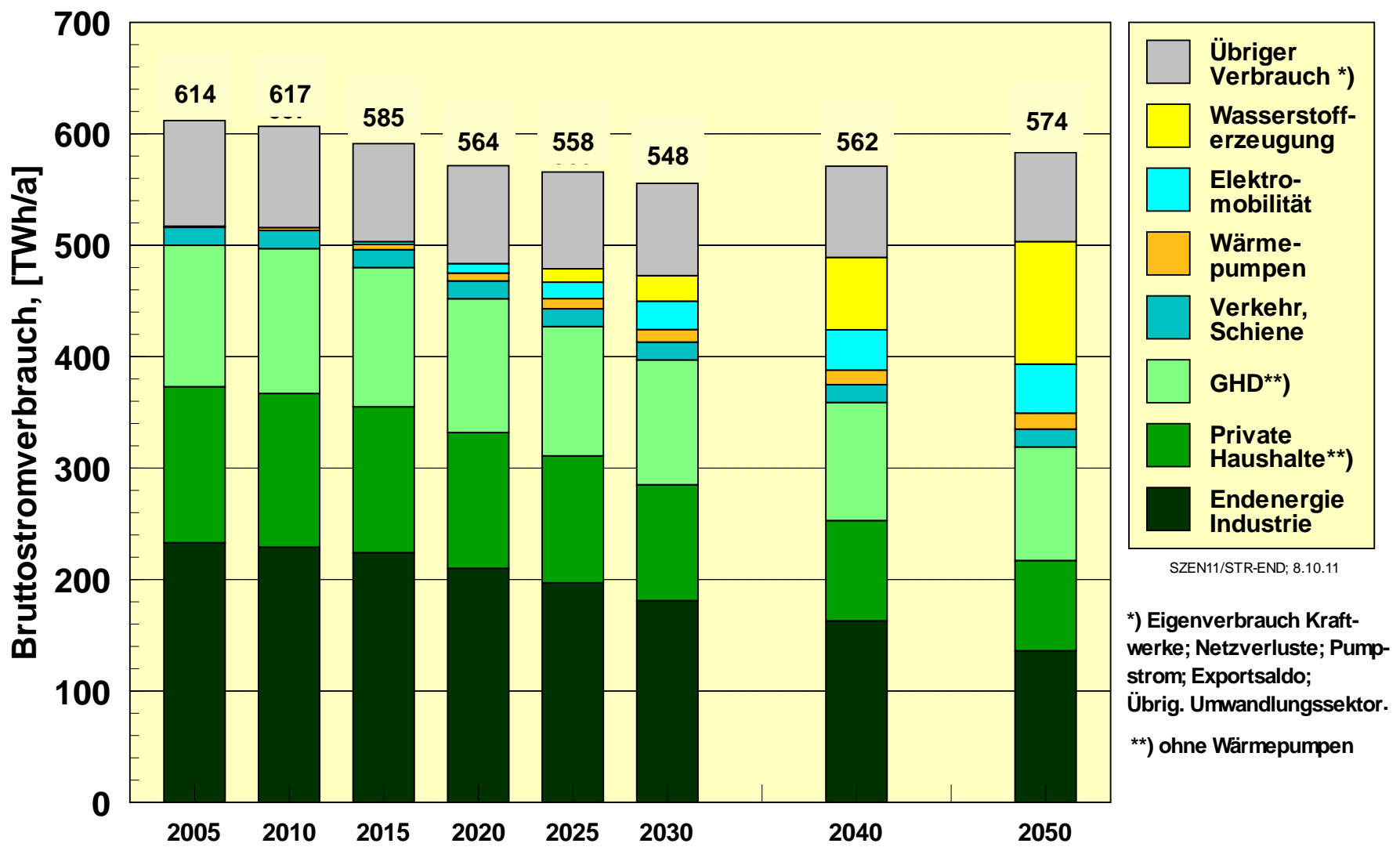


Prämissen/Grundannahmen im Stromsektor

- **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



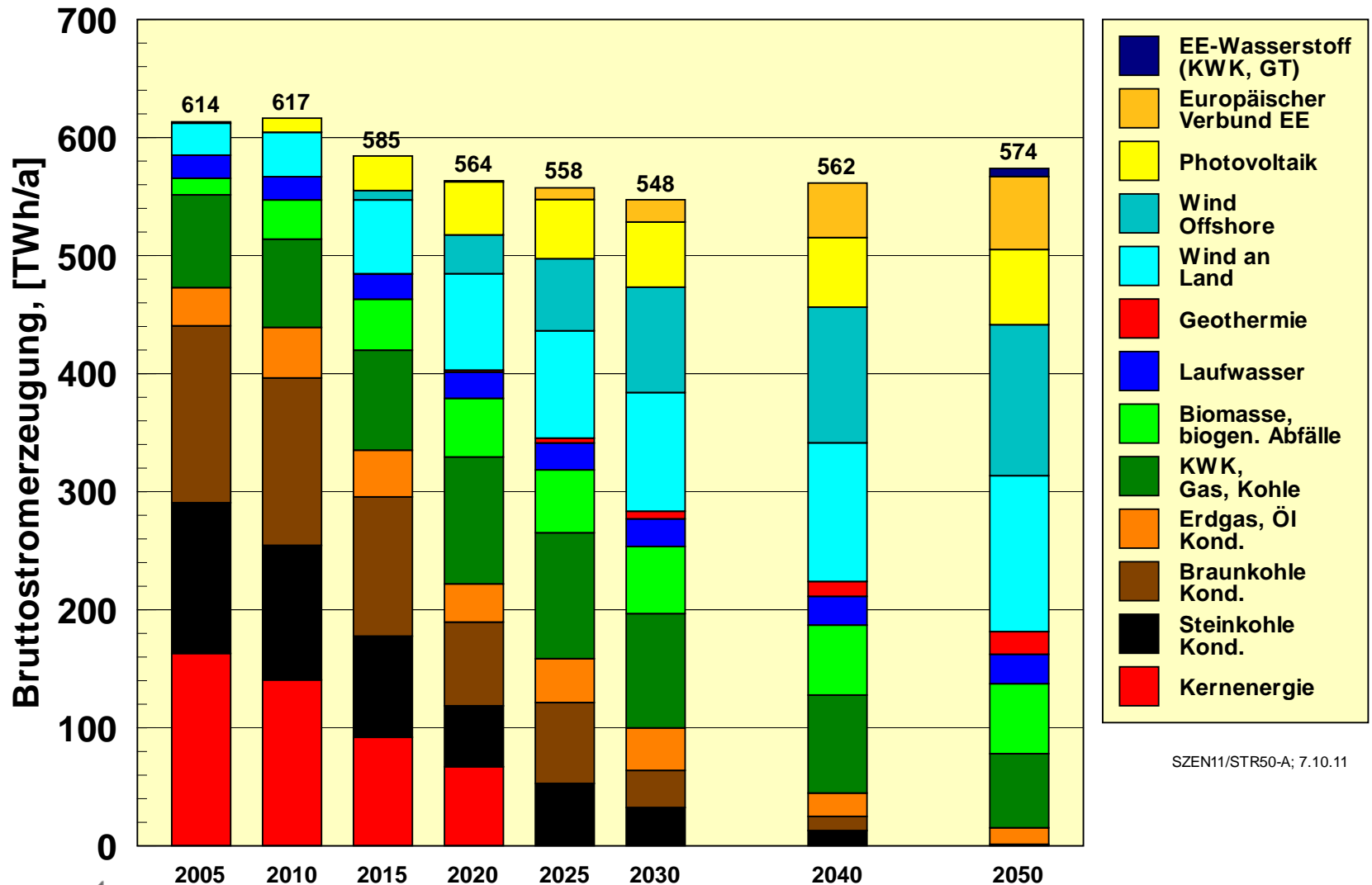
SZEN11/STR-END; 8.10.11

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

**) ohne Wärmepumpen



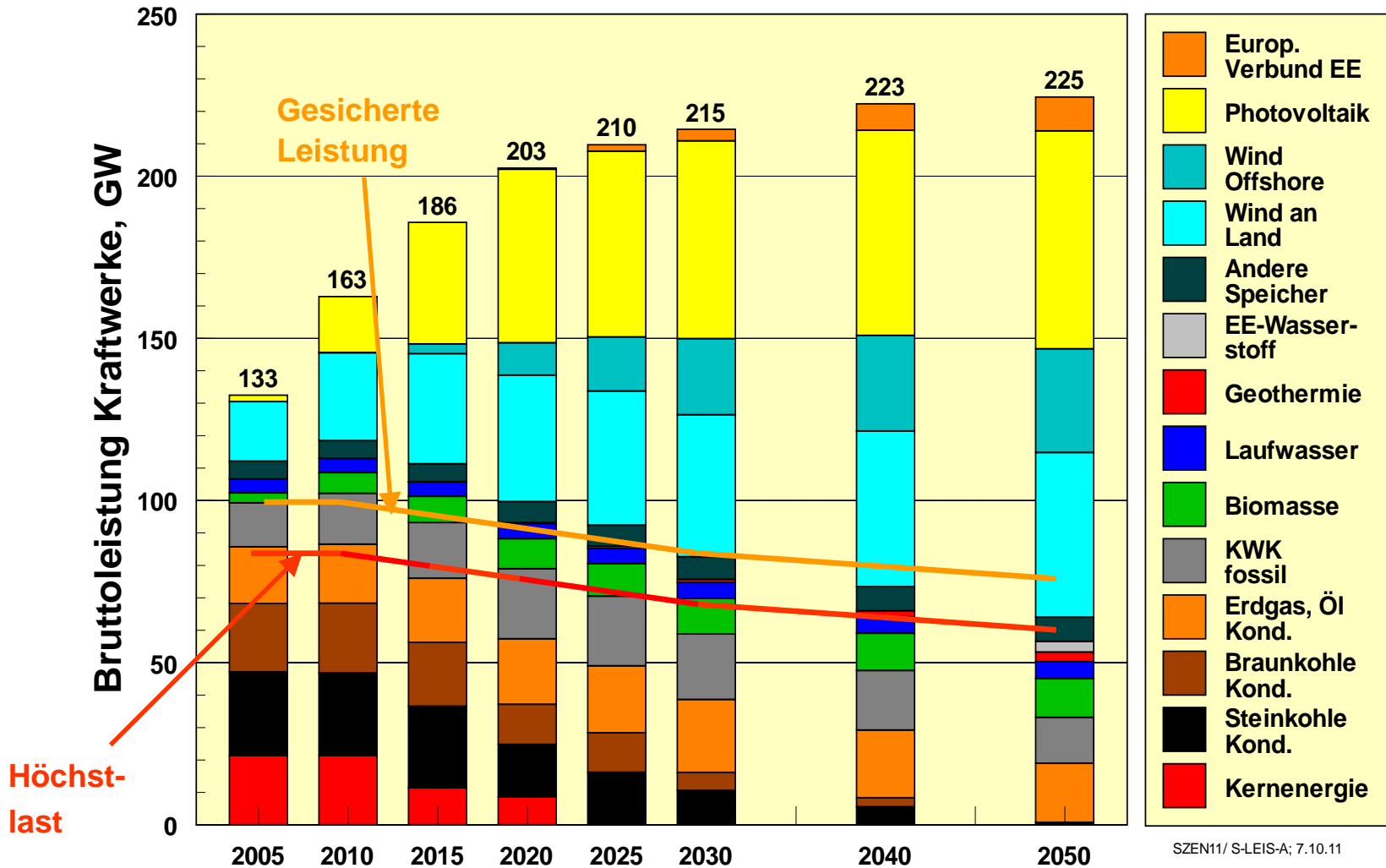
Struktur der Bruttostromerzeugung Szenario A



SZEN11/STR50-A; 7.10.11



Struktur der Stromerzeugungskapazitäten Szenario A

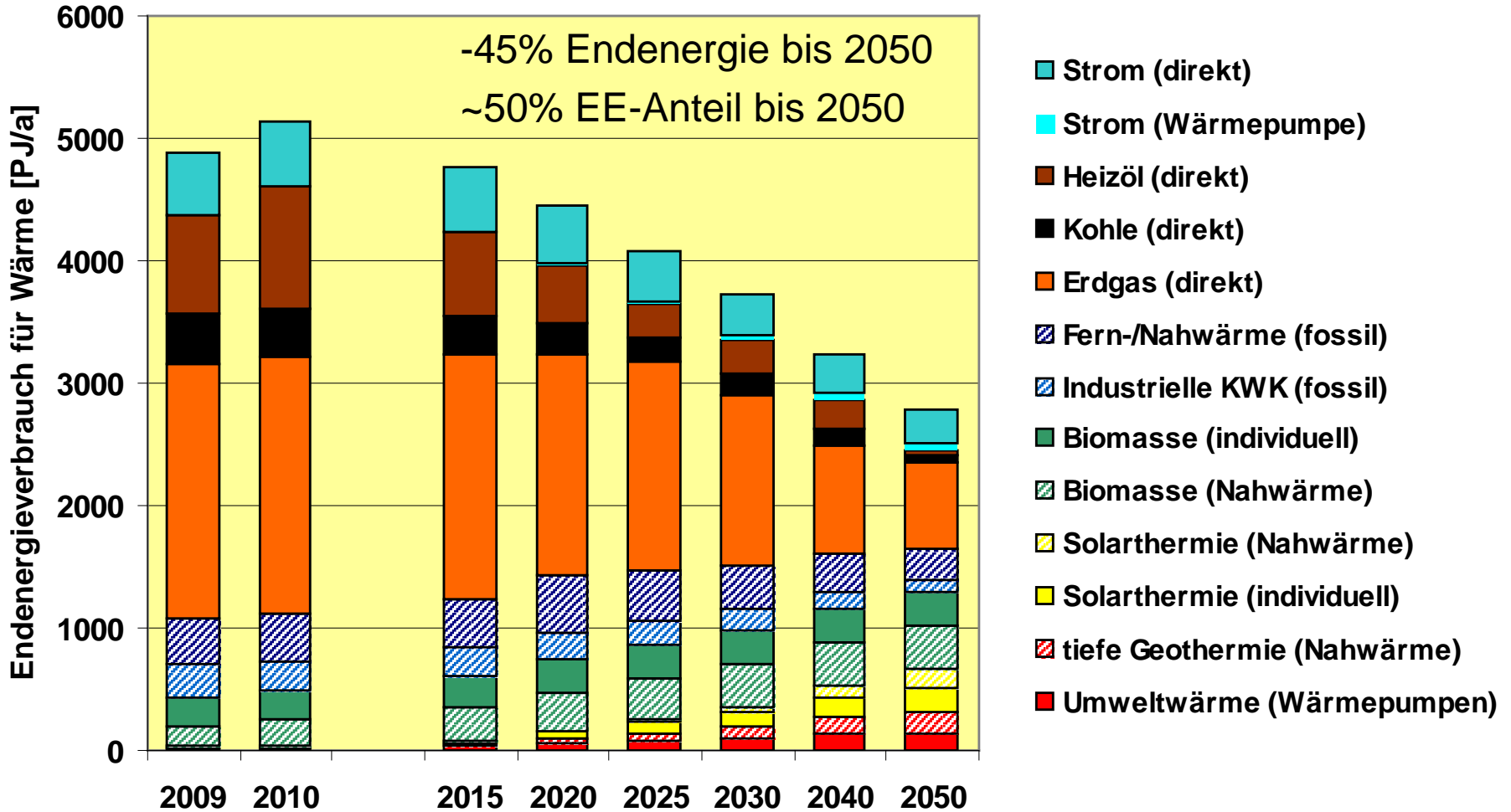


Prämissen/Grundannahmen im Wärmesektor

- 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



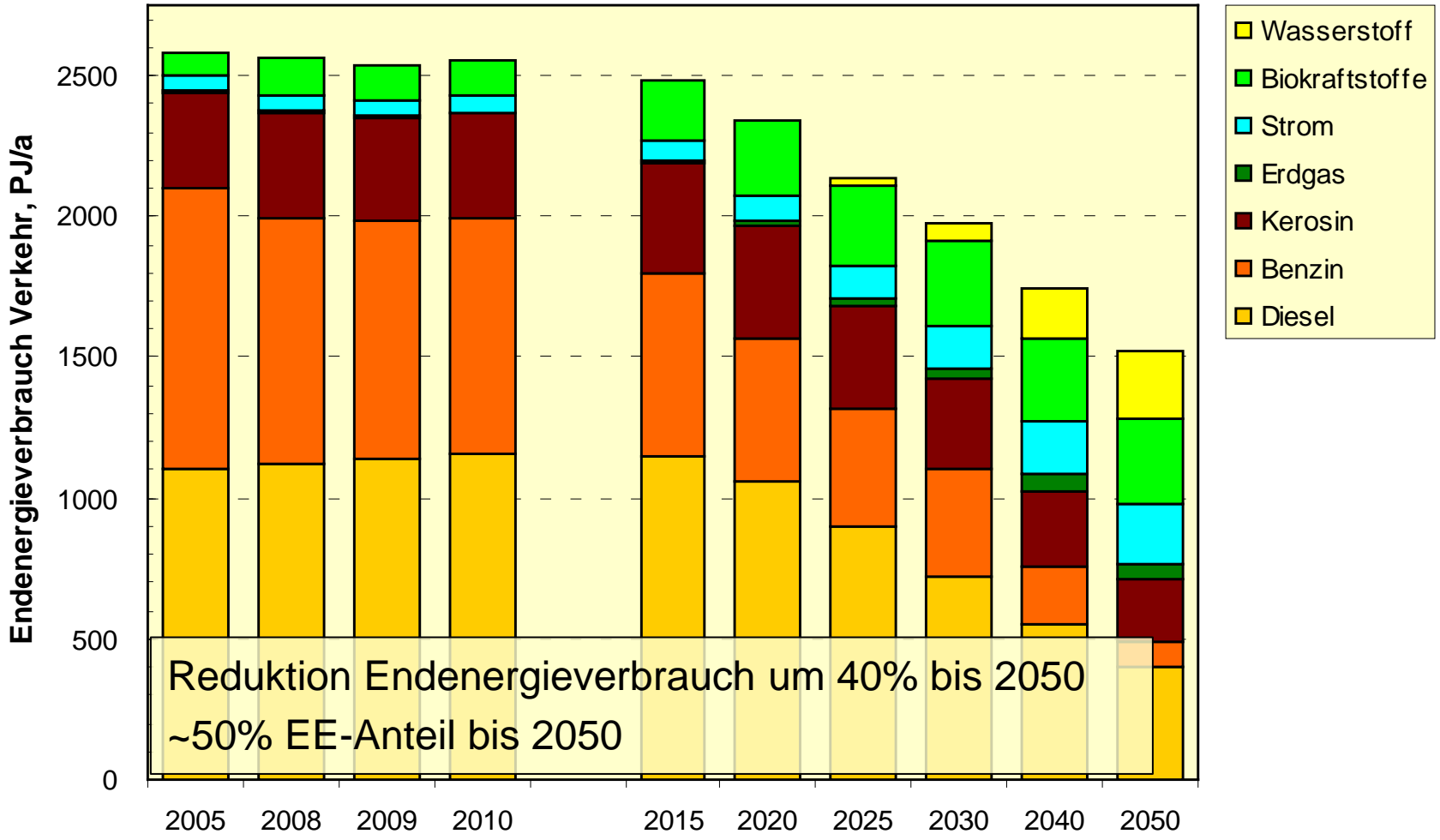
Prämissen/Grundannahmen im Verkehrssektor

- 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 CO₂-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 (H₂, CH₄, synthetische Kohlenwasserstoffe, jeweils aus EE-Strom)
- detaillierte Untersuchung von drei **Unterszenarien** im **Verkehr** mit unterschiedlichem Beitrag E-KFZ (BEV, EREC), EE-H₂ (BZ, VB), EE-CH₄

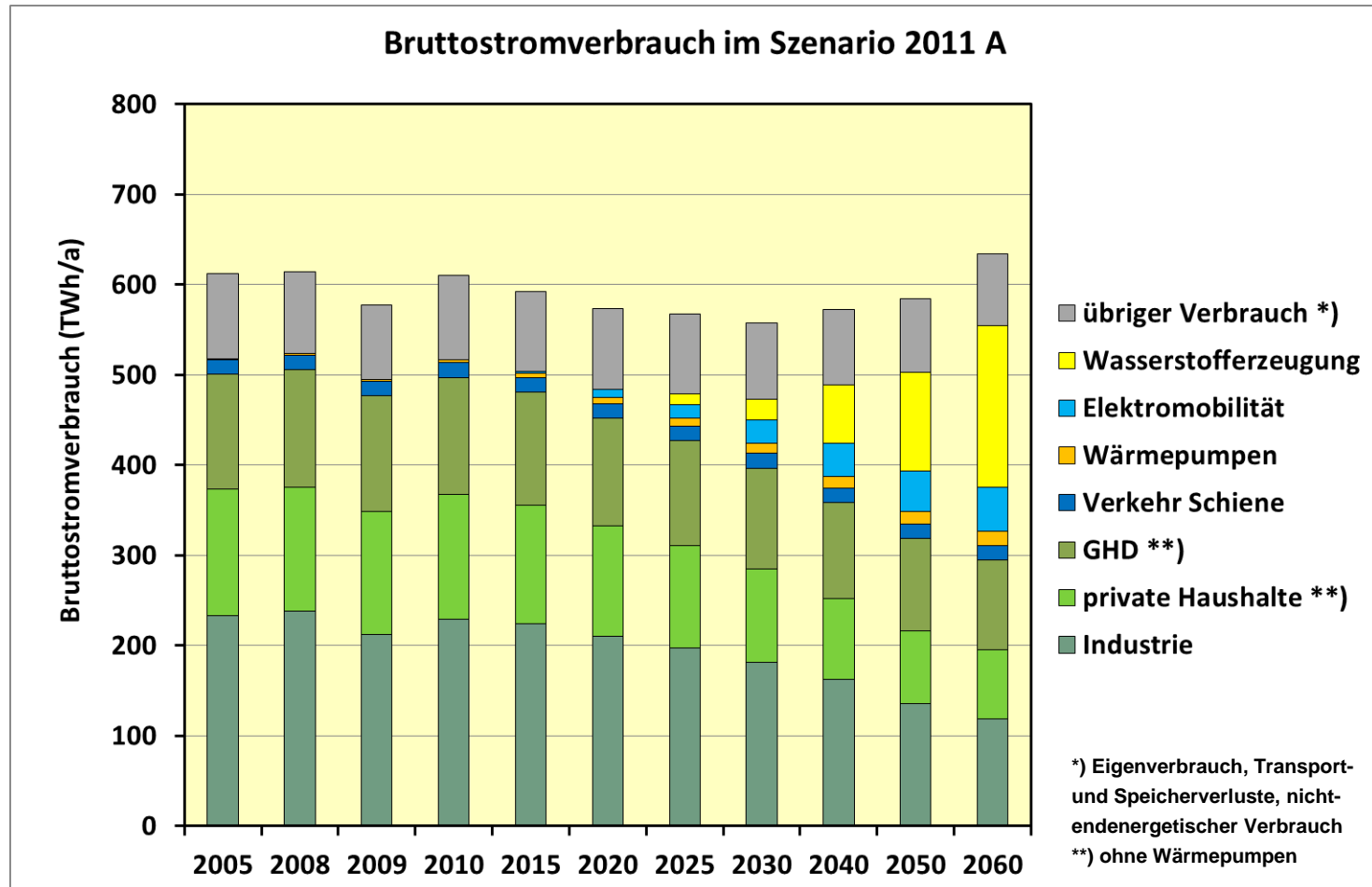


Entwicklung des Endenergieverbrauchs Verkehr

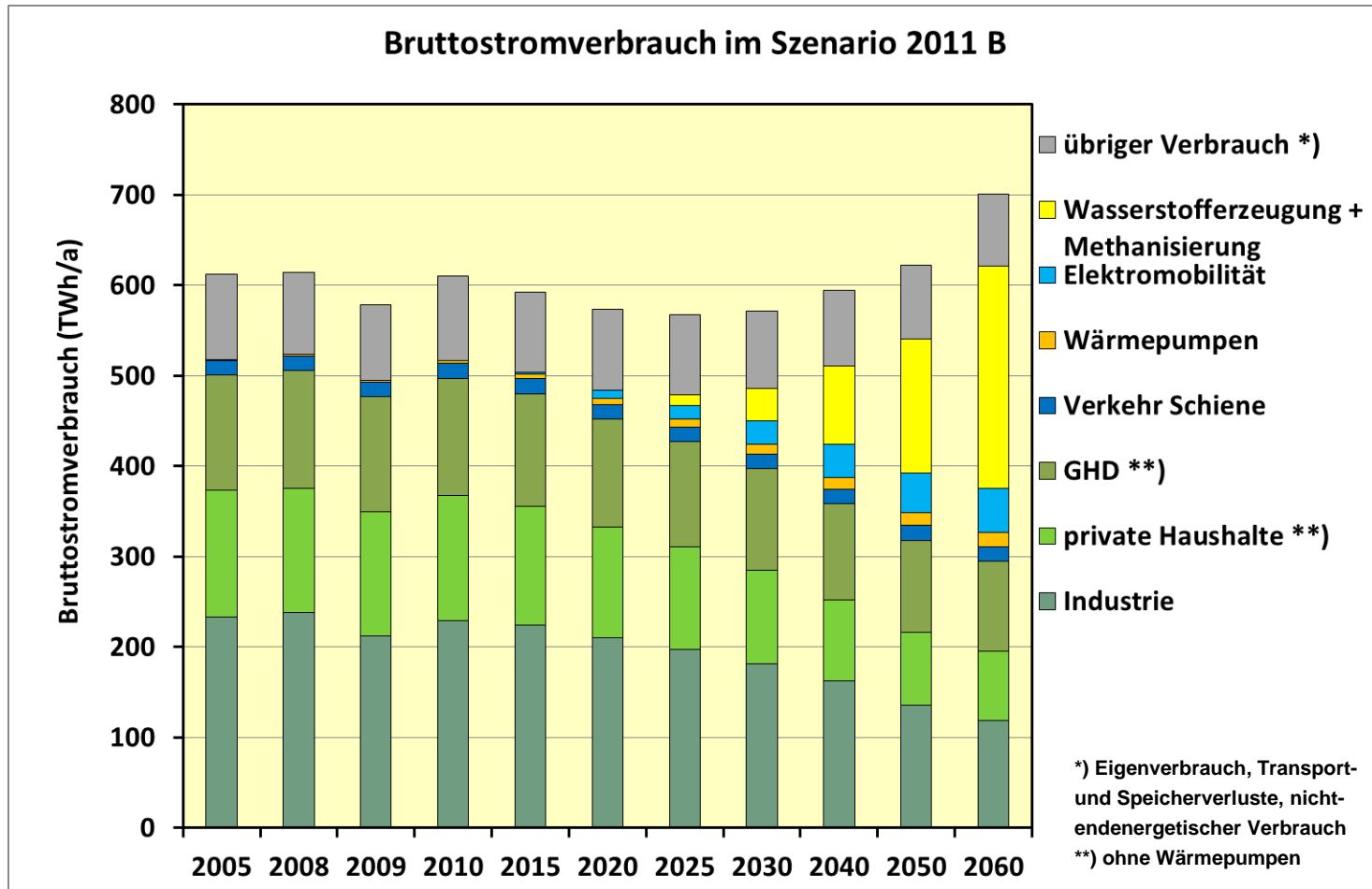
Szenario A, nach Energieträgern



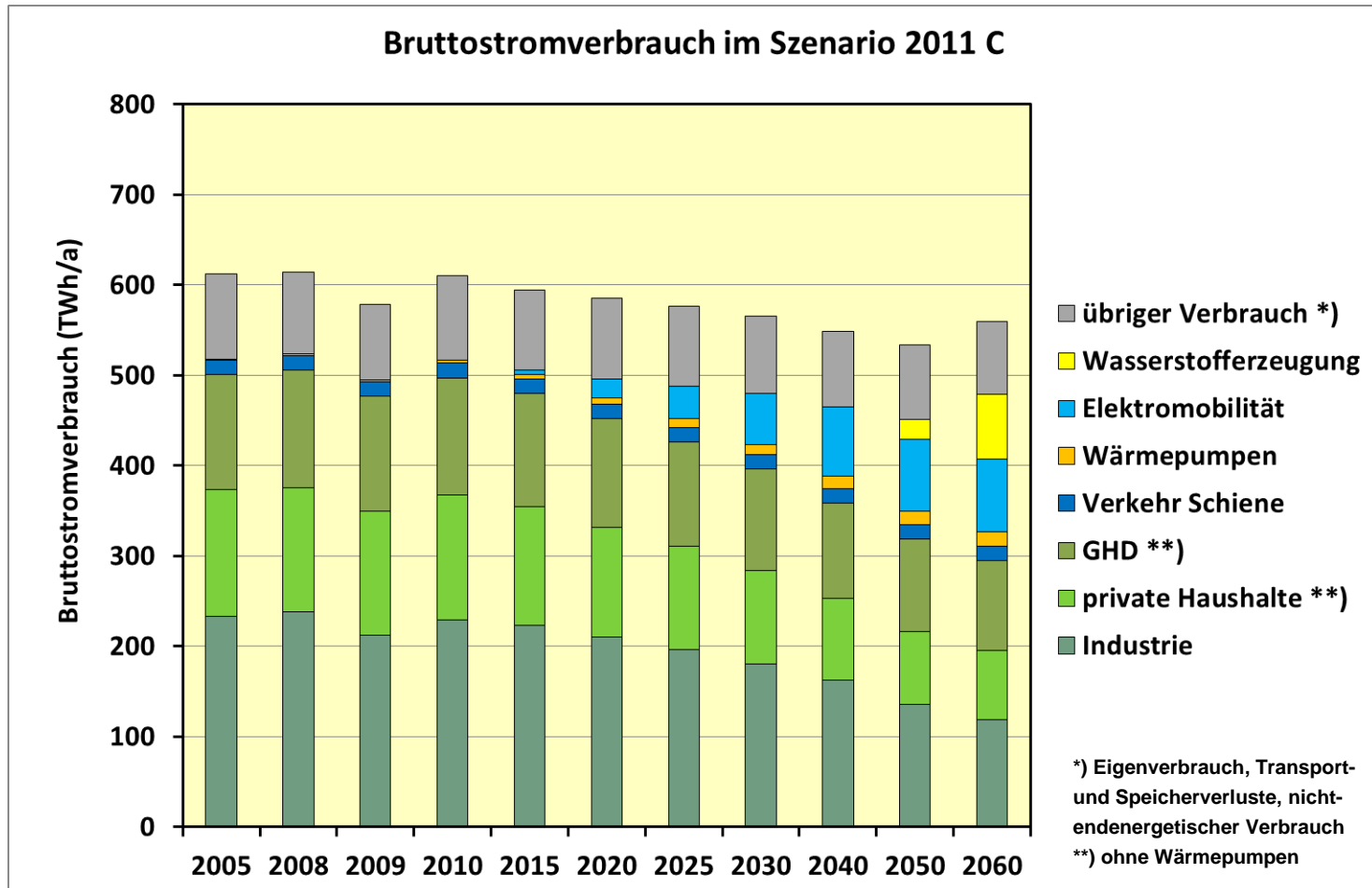
Auswirkungen Verkehr auf Gesamtsystem: Bruttostromverbrauch A (50% E-Mob, EE-H₂)



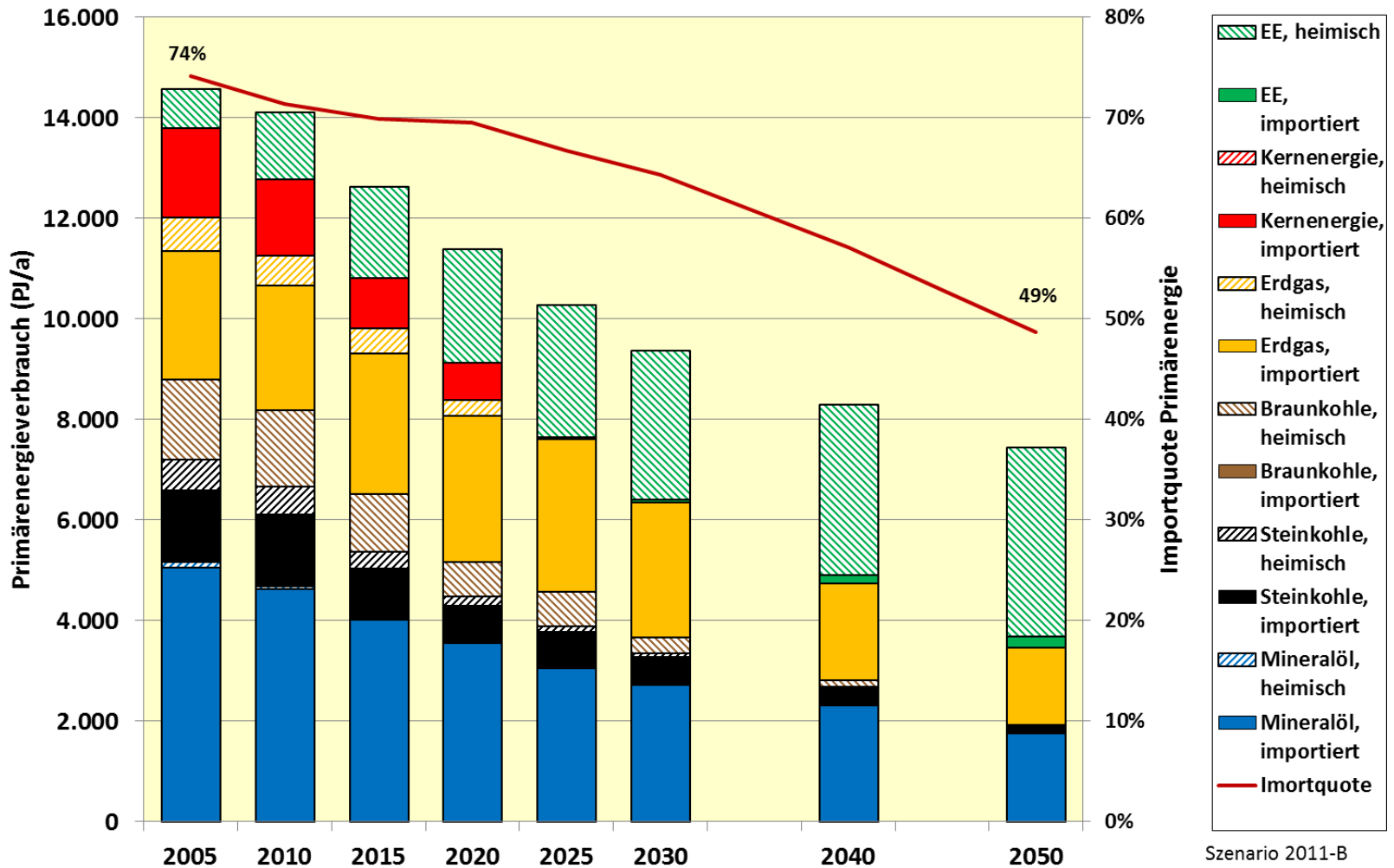
Auswirkungen Verkehr auf Gesamtsystem: Bruttostromverbrauch B (50% E-Mob, EE-CH₄)



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



Importabhängigkeit Energieversorgung

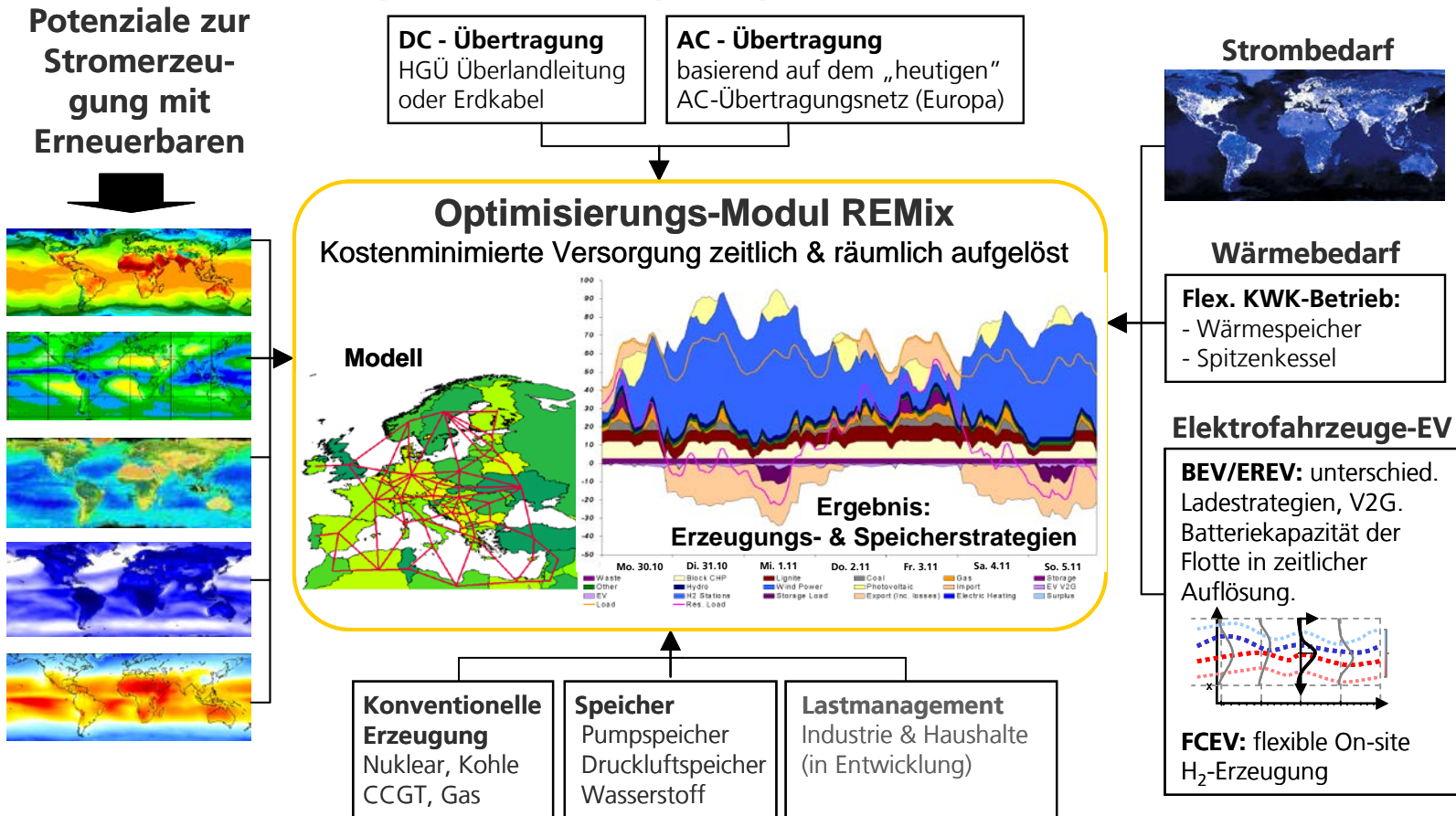


Überblick

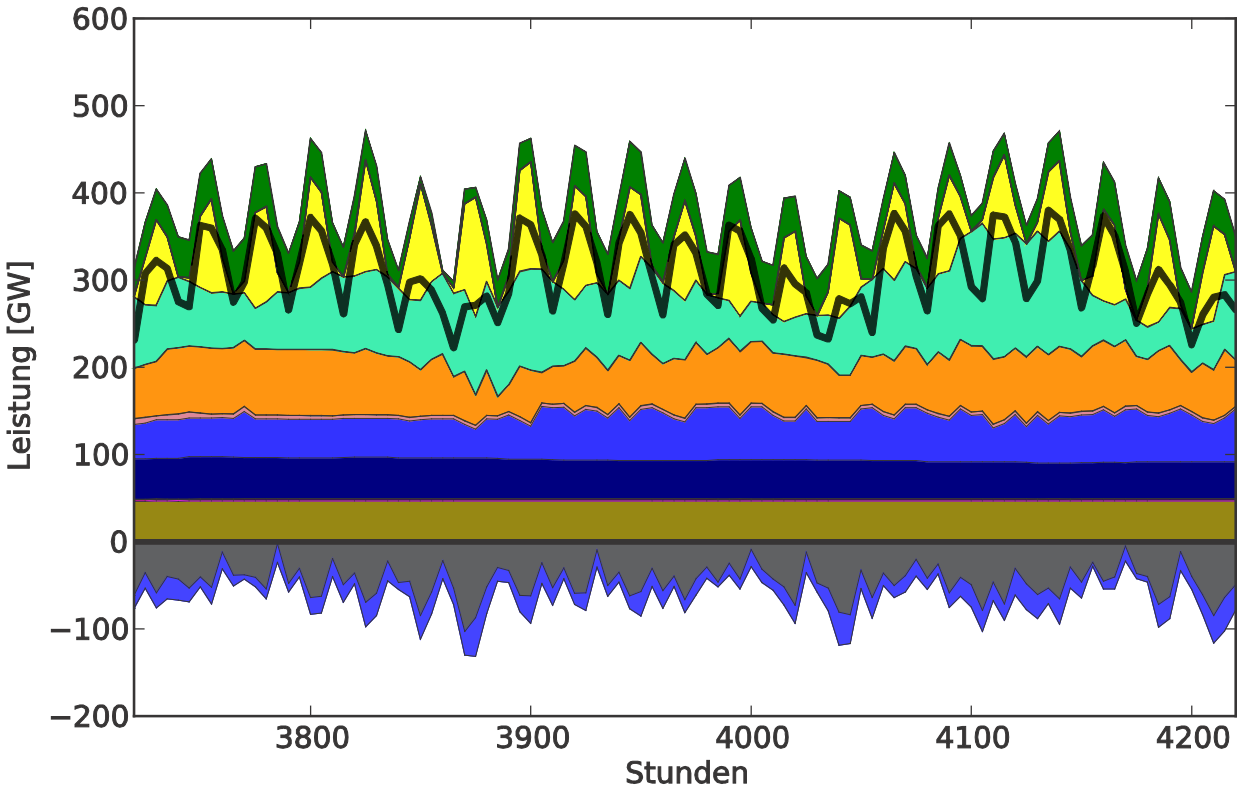
- 1) Leitstudie im Rahmen des Energiekonzepts
- 2) Energiesystem-Modell MESAP
- 3) Mengengerüste der Leitstudie 2011
- 4) **Szenario-Validierung**
 - a) **Versorgungssicherheit Strom**
 - b) Validierung PKW-Szenario
- 5) ökonomische Aspekte
- 6) wesentliche Schlussfolgerungen der Leitstudie 2011



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

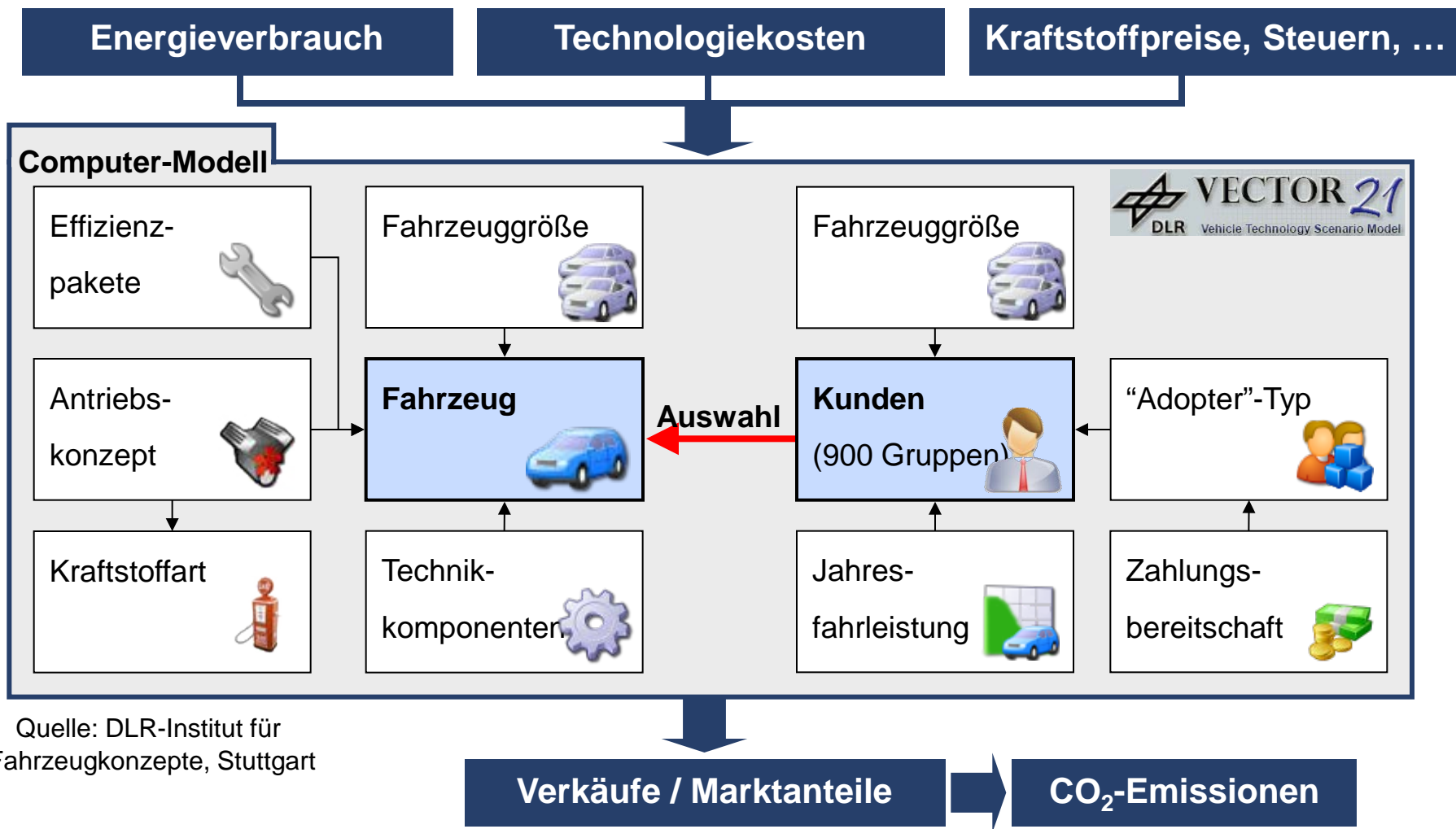


Überblick

- 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



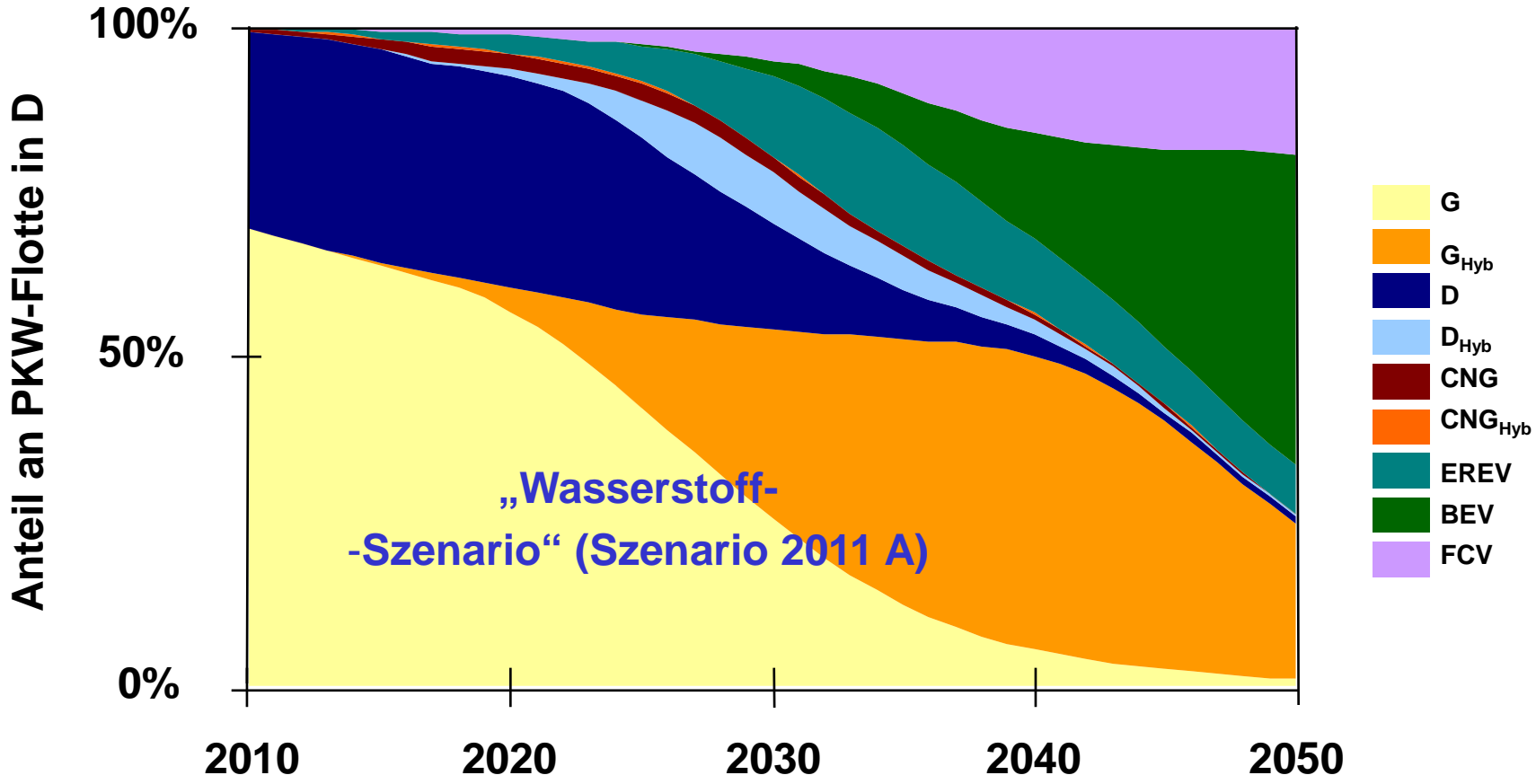
Verkehr: Flottensimulationsmodell Vector 21 (DLR-FK)



Quelle: DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart



Verkehrssektor: Entwicklung PKW-Fahrzeugflotte

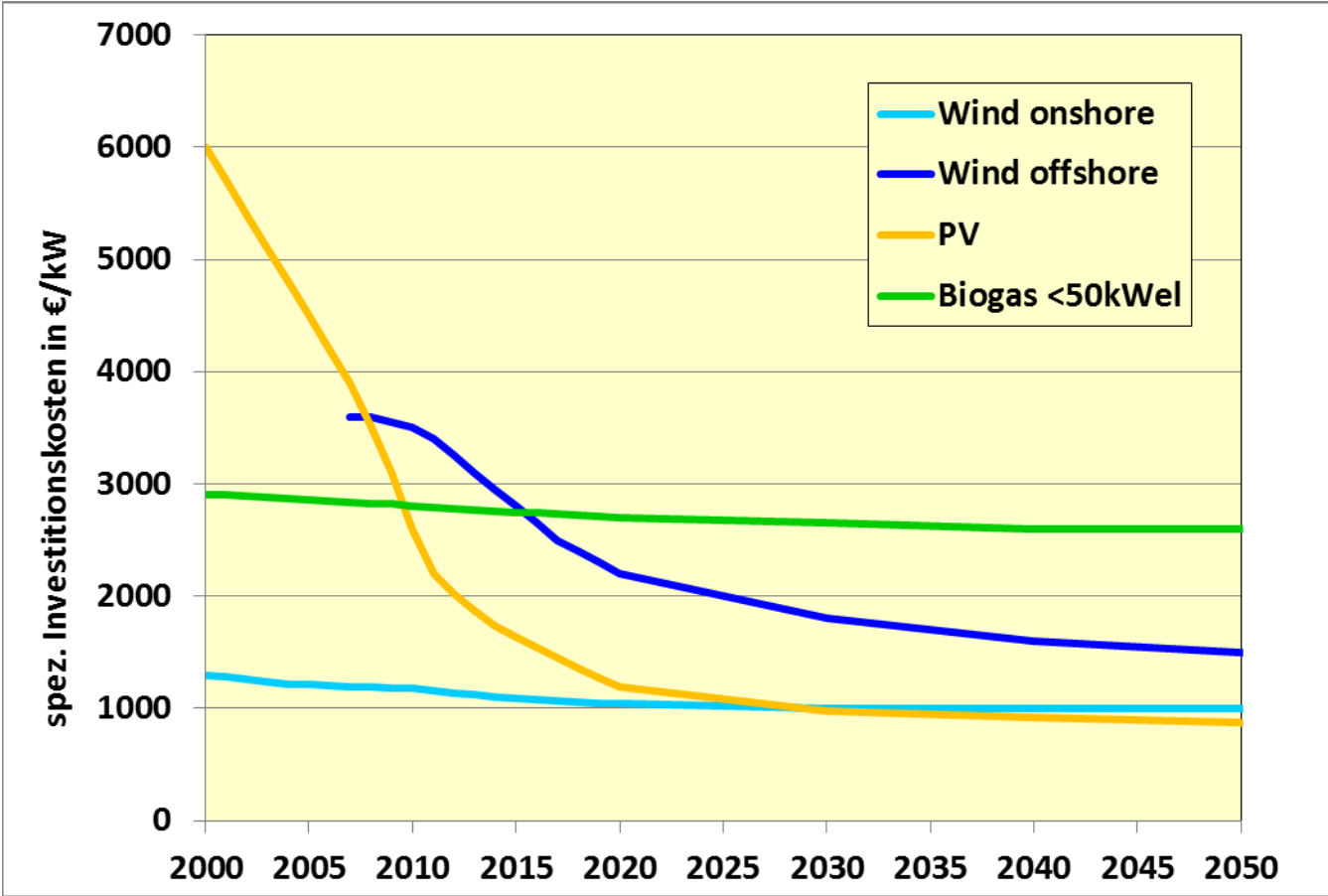


Überblick

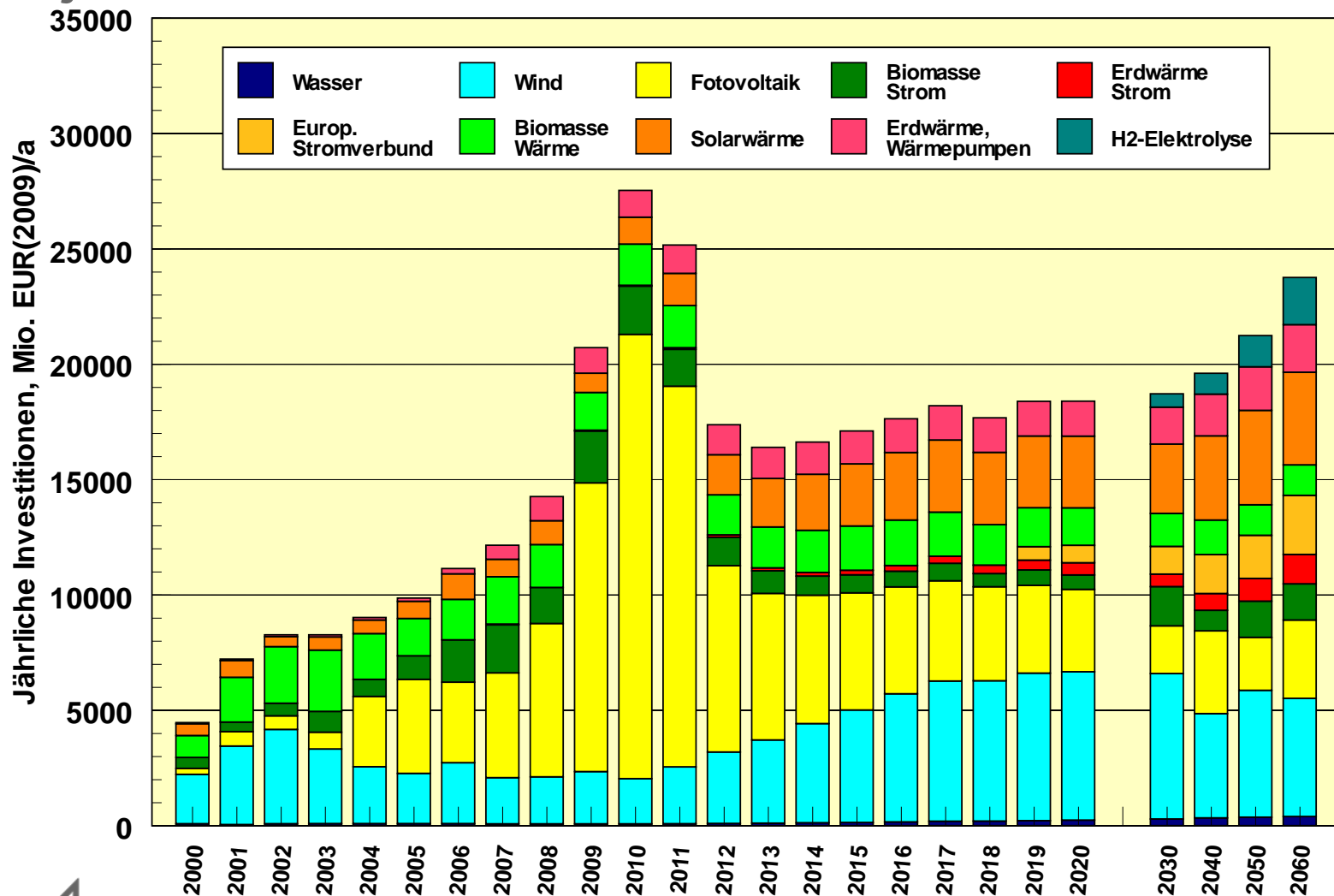
- 1) Leitstudie im Rahmen des Energiekonzepts
- 2) Energiesystem-Modell MESAP
- 3) Mengengerüste der Leitstudie 2011
- 4) Szenario-Validierung
 - a) Versorgungssicherheit Strom
 - b) Validierung PKW-Szenario
- 5) ökonomische Aspekte**
- 6) wesentliche Schlussfolgerungen der Leitstudie 2011



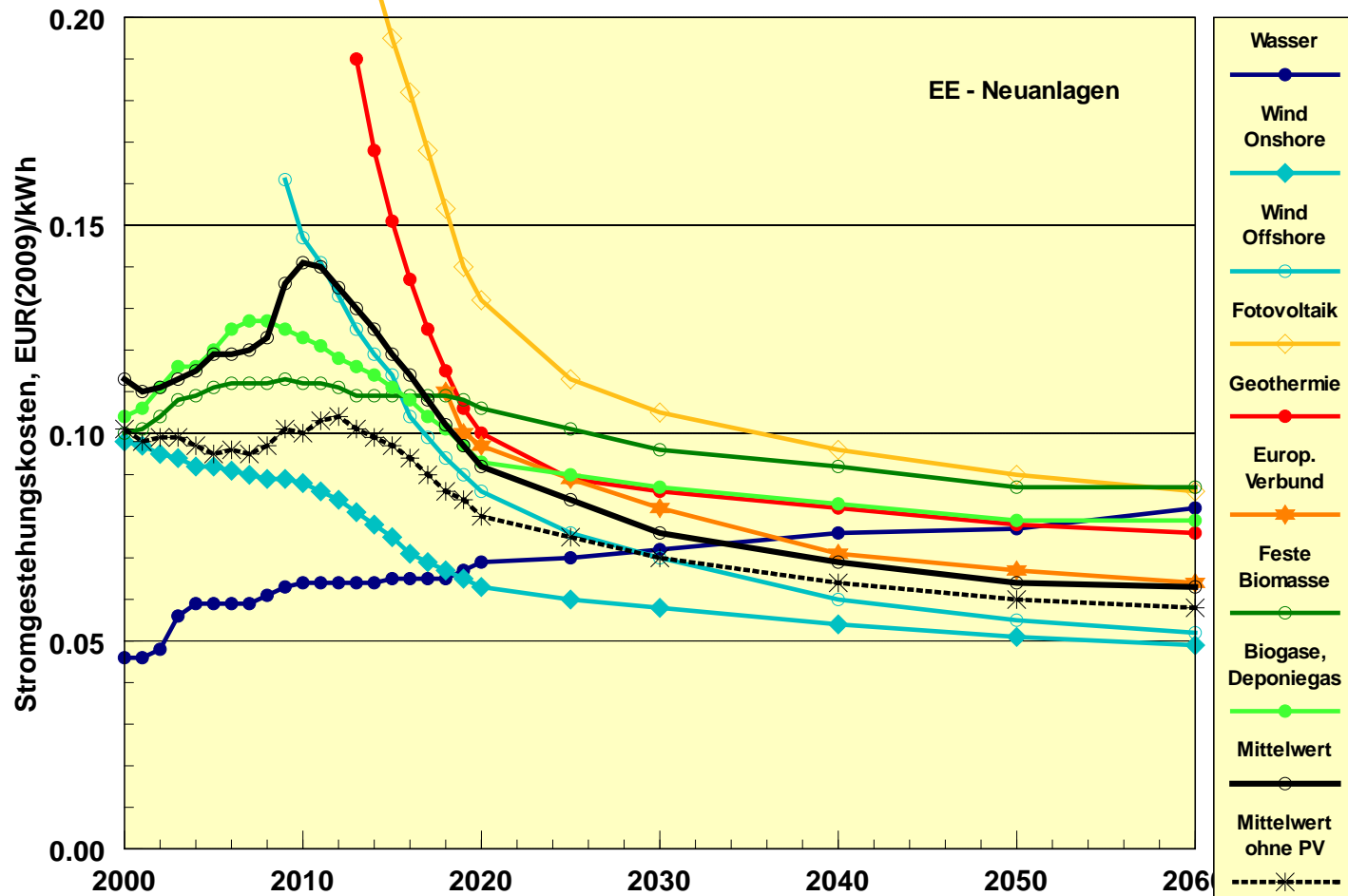
Entwicklung spezifische Investitionskosten für EE-Technologien



jährliche Investitionen in EE-Strom und -Wärme



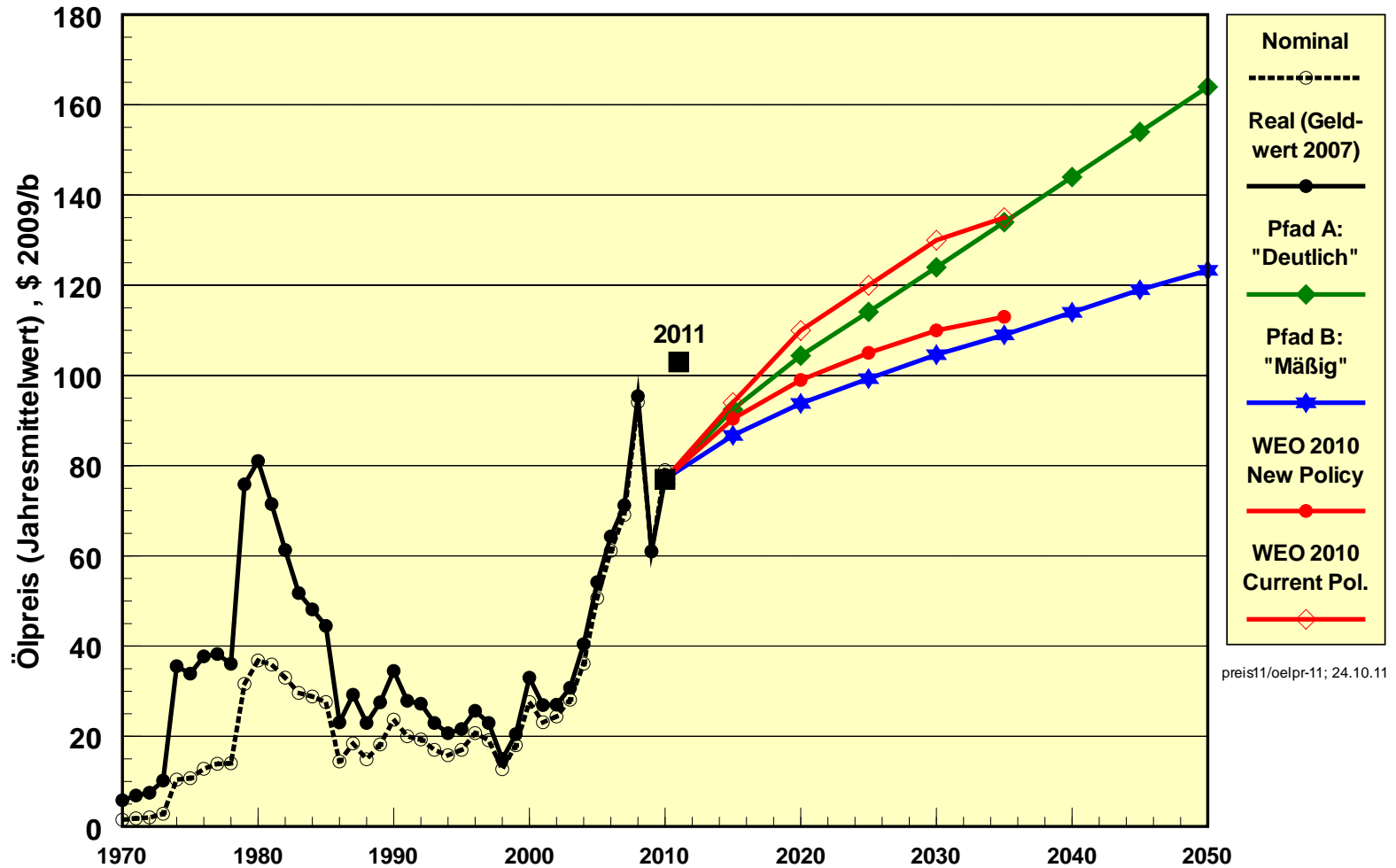
Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien



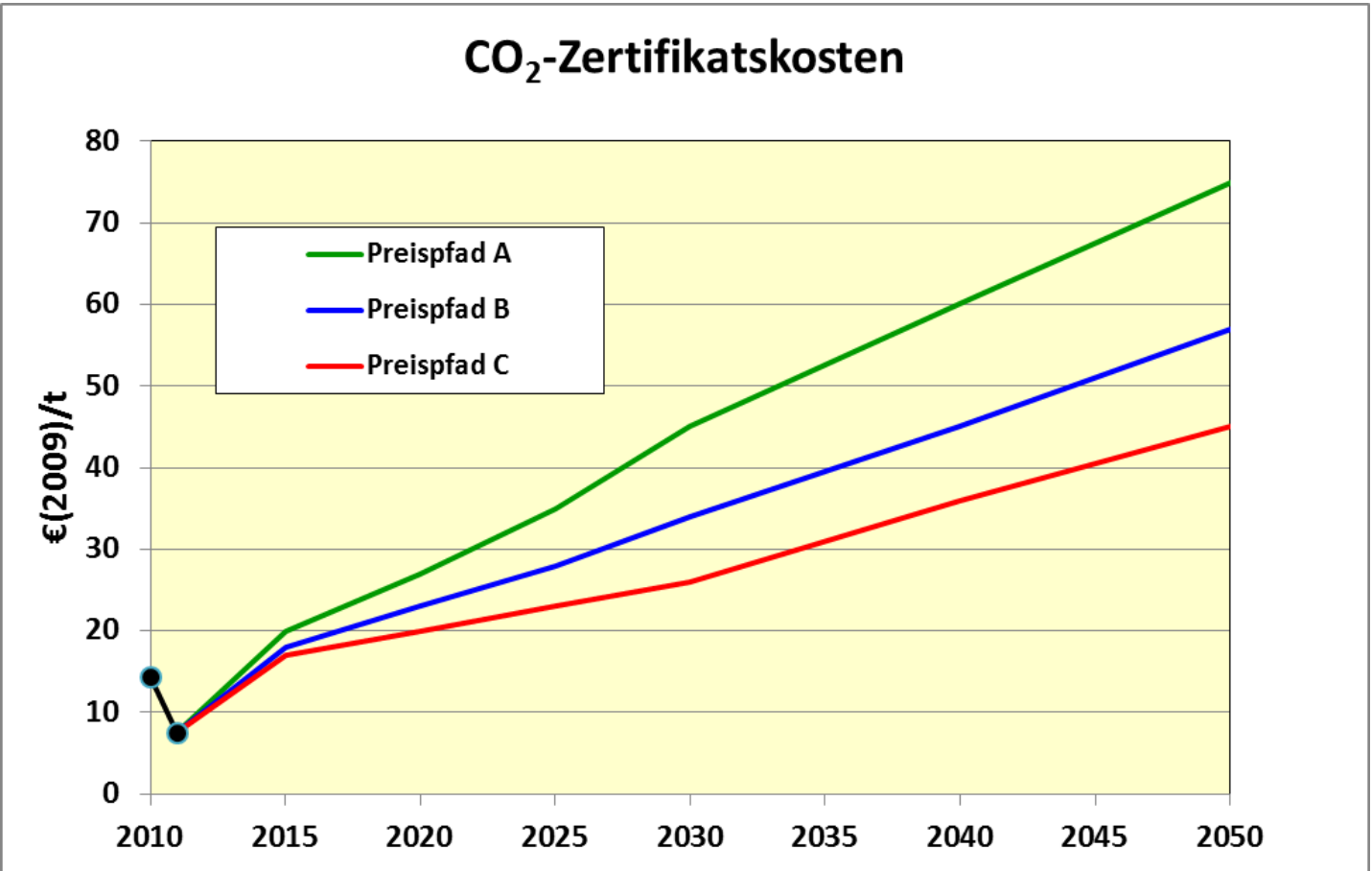
Szen11/STR-KOS1; 15.11.11



Entwicklung Kosten fossile Brennstoffe

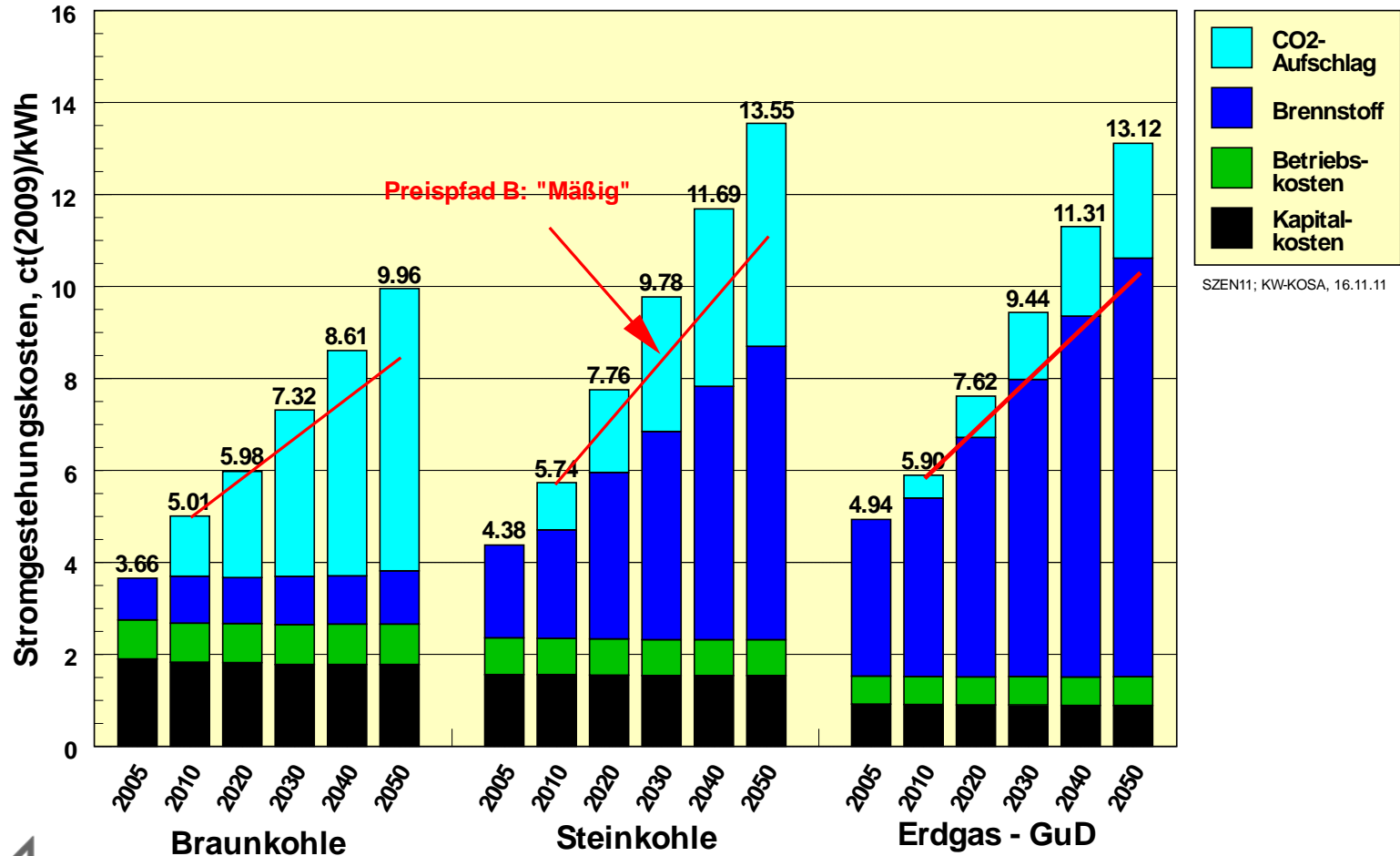


Entwicklung CO₂-Zertifikatspreise

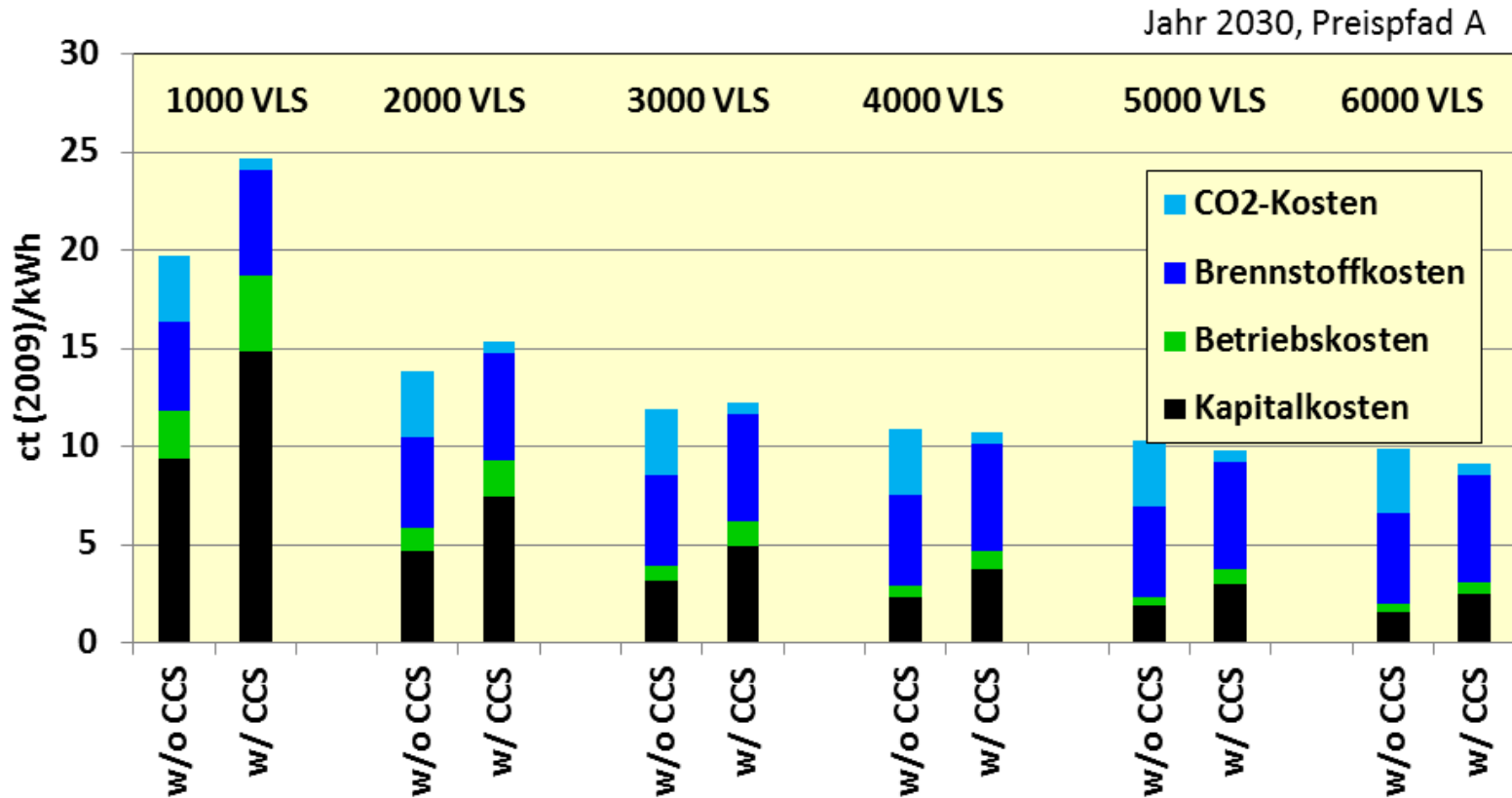


Stromgestehungskosten konventioneller Kraftwerke

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

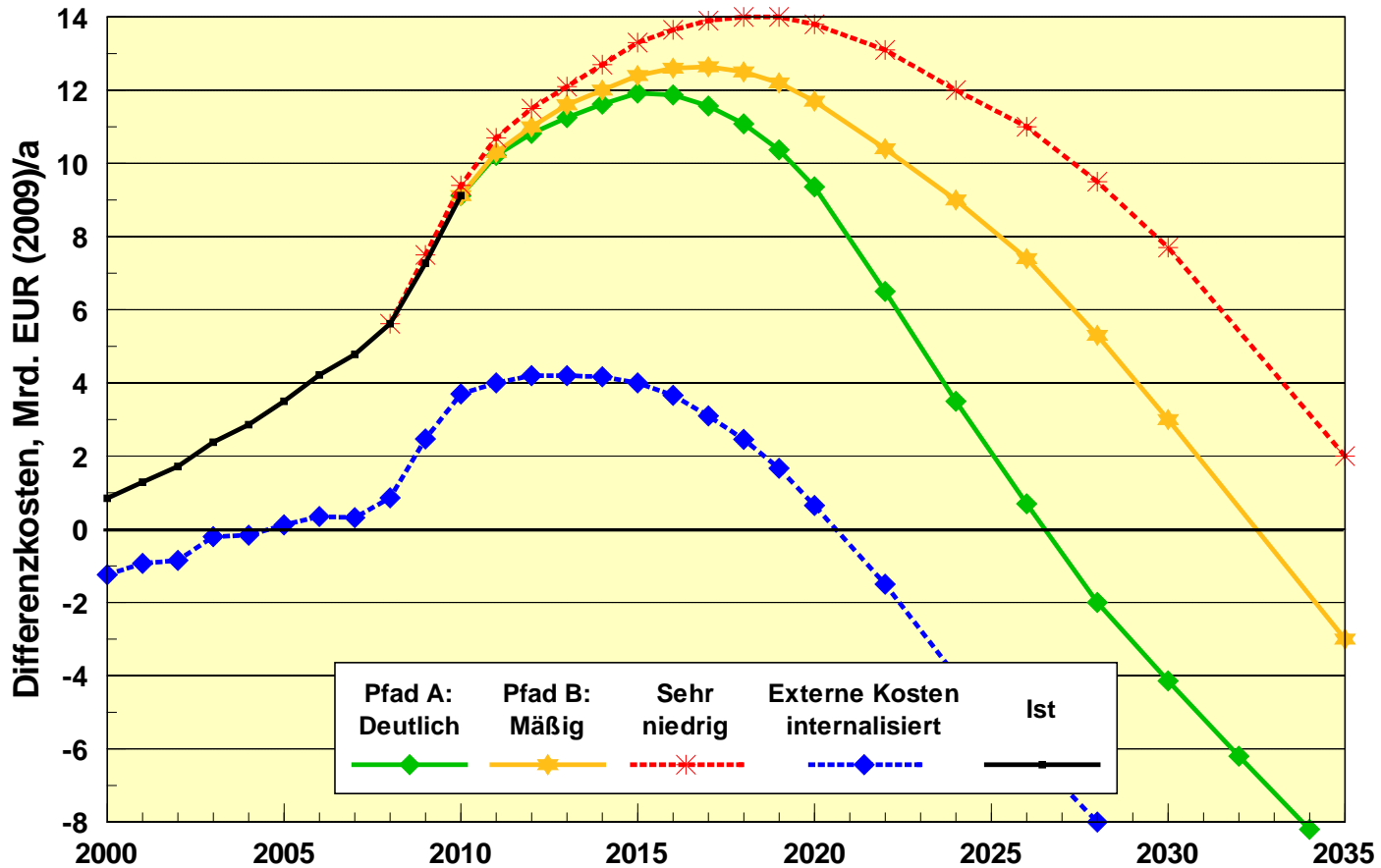


Steinkohle-KW: Abhängigkeit der Stromgestehungskosten von Volllaststunden



Beispiel systemanalytische Differenzkosten Stromerzeugung

- Szenario 2011 A, gesamte EE-Stromerzeugung -

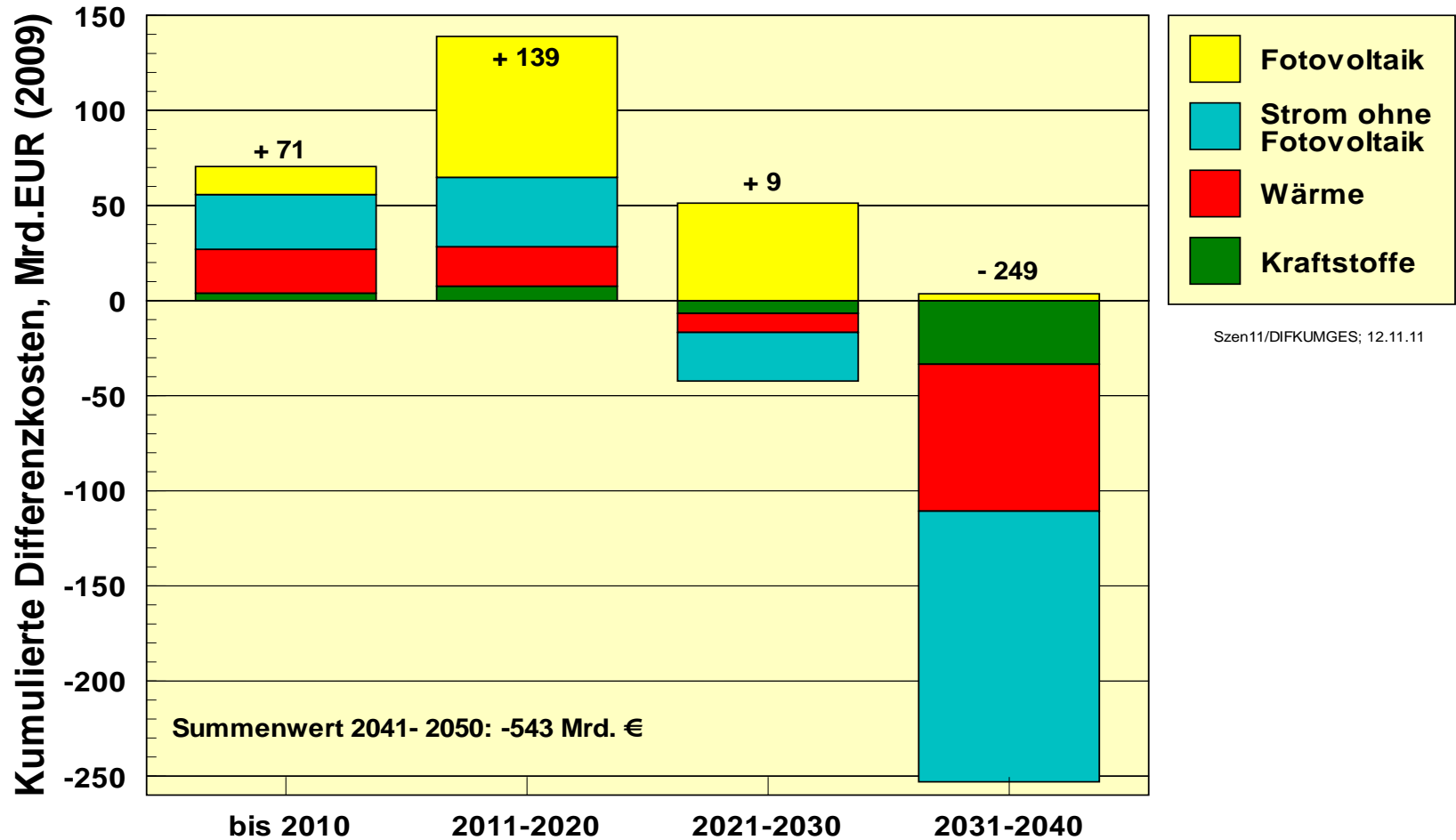


SZEN11/DIFVAR1; 12.11.11



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**, (H₂-)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!

