

Sektorkopplung im Kontext eines stark dekarbonisierten Energiesystems – Studie „Klimapfade für Deutschland“ (im Auftrag des BDI und BCG)

Almut Kirchner

TU Berlin, Konferenz „Ökonomische Grundsatzfragen der Sektorkopplung“

22. März 2018



- 01 Vorbemerkungen, Hintergrund, Methodik
- 02 Zusammenfassung Szenarienergebnisse in a nutshell
- 03 Aspekte der Sektorkopplung im „Gebäudesektor“
- 04 Aspekte der Sektorkopplung im Verkehrssektor
- 05 Aspekte der Sektorkopplung im Umwandlungssektor
- 06 Statt eines Abschlusses: Offene Fragen und aktuelle Dilemmata

Kernteam

Dr. Almut Kirchner

Dr. Andreas Kemmler

Jens Hobohm

Dr. Alexander Piégsa

Sylvie Koziel

Alex Auf der Maur

Samuel Strassburg

Marco Wünsch

Inka Ziegenhagen

Sven Kreidelmeyer

Jan Limbers

+ Gesamtteam

Dr. Michael Schlesinger

Dr. Jochen Hoffmeister

Stephan Kritzing

Friedrich Seefeldt

Nils Thamling

Marcus Koepp

Hanno Falkenberg

Hans Dambeck

Florian Ess

Johann Weiss

Nadja Schütz

Andreas Sachs

Bernard René

Dr. Michael Böhmer

- 01 Vorbemerkungen, Hintergrund, Methodik
- 02 Zusammenfassung Szenarienergebnisse in a nutshell
- 03 Aspekte der Sektorkopplung im „Gebäudesektor“
- 04 Aspekte der Sektorkopplung im Verkehrssektor
- 05 Aspekte der Sektorkopplung im Umwandlungssektor
- 06 Statt eines Abschlusses: Offene Fragen und aktuelle Dilemmata

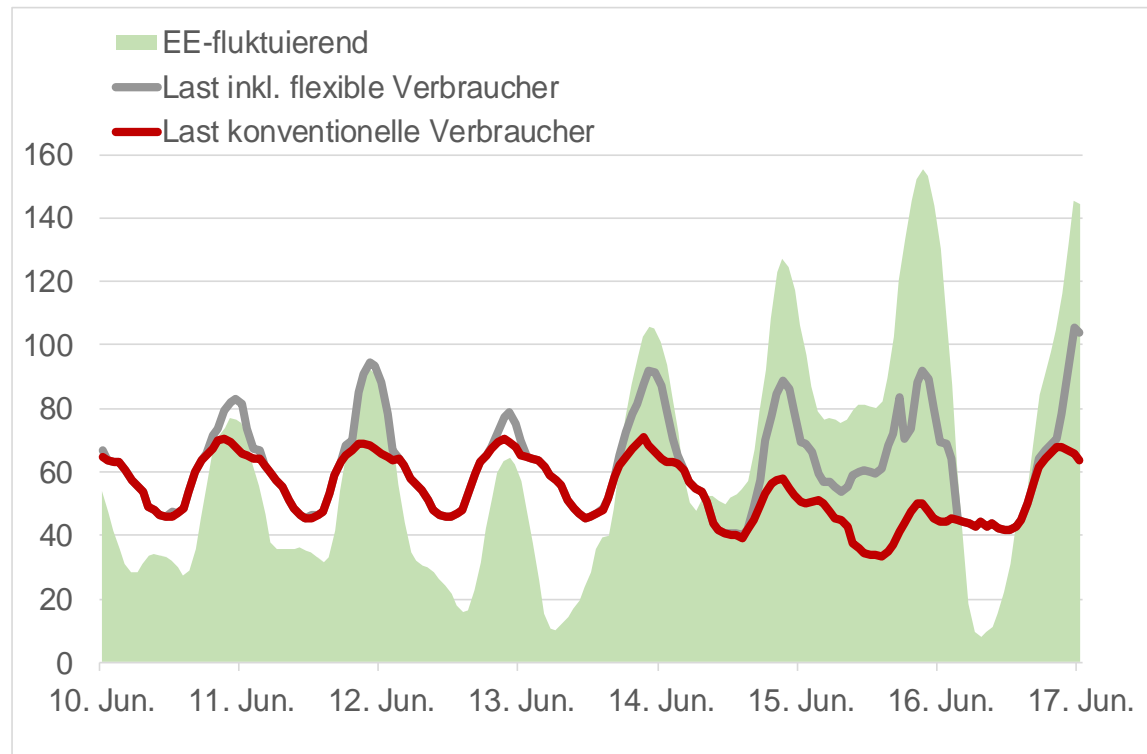
Sektorkopplung: Neuer Begriff für bekannte Fragen ?

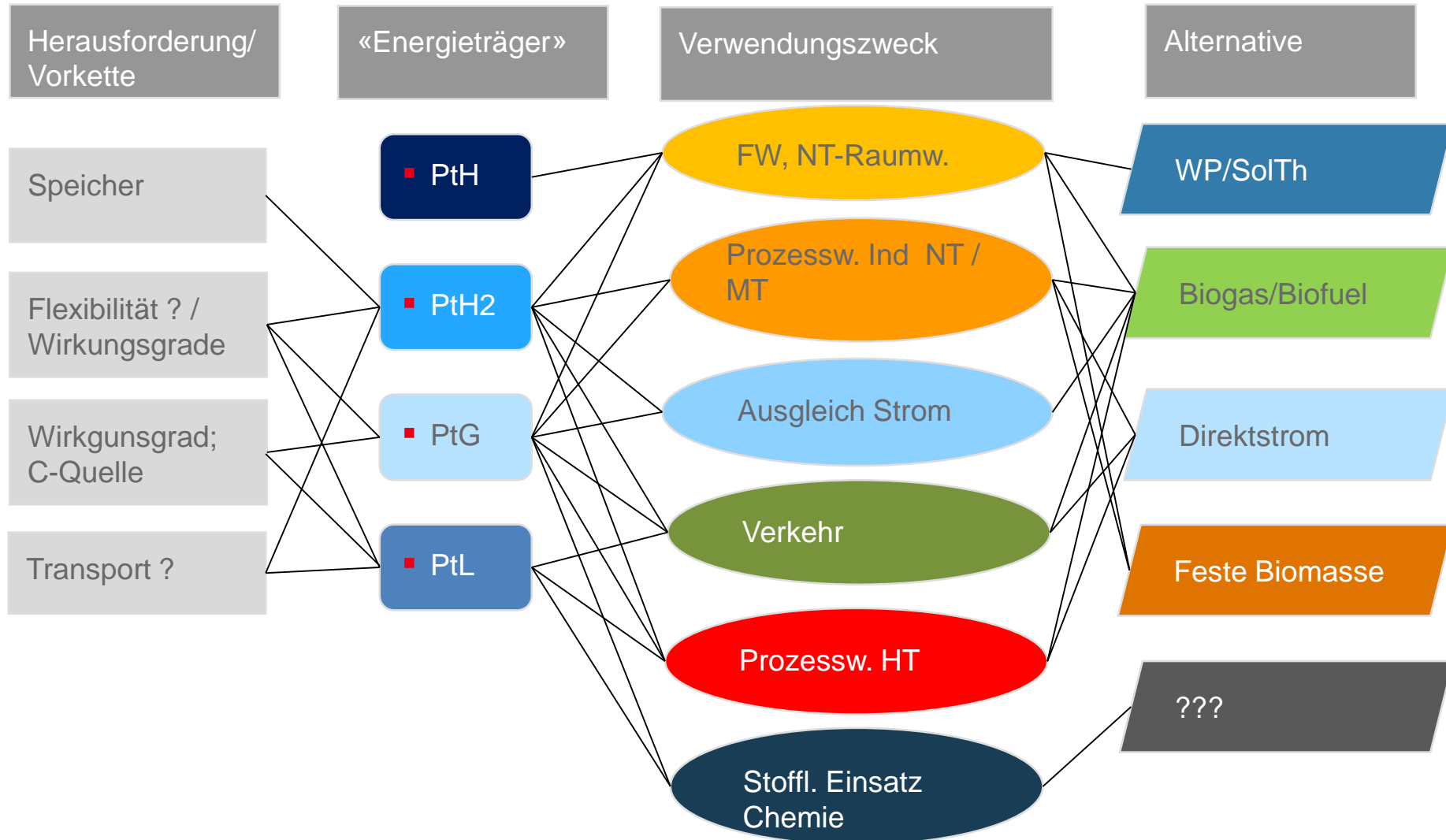
- Begriff ist nicht gut abgegrenzt
- «Sektorkopplung“ gab es schon immer
 - KWK
 - Elektrifizierter Schienenverkehr
 - Direktelektrische Heizungen und «Nachtspeicherheizungen»
 - Stromherde
 - Elektrostahl ...

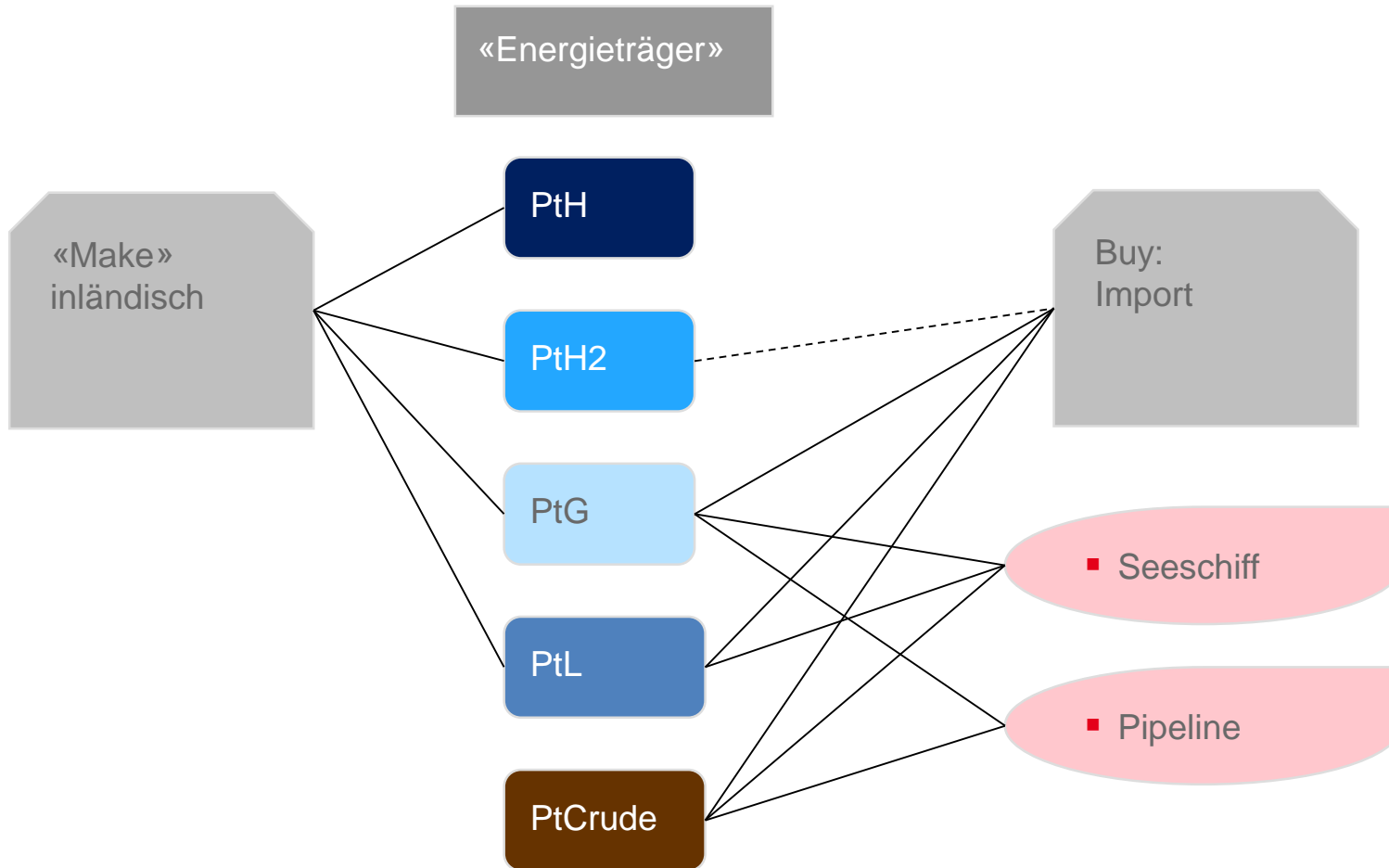
- Was ist neu?
 - Schiere Grösse des Einsatzes
 - Direkt- und Indirektstromeinsatz im Wärmebereich (incl. PtH) und im Verkehr als Strategie
 - Indirekter Einsatz durch „neue Energieträger“ – Wasserstoff, Synthesegas, Synthesefuels
 - Hoffnung auf bessere Nutzung von EE-Spitzen („Überschussstrom“)
 - energetische „Preise“ durch Umwandlungsketten und Wirkungsgradverluste

- Restriktionen
 - Potenziale EE
 - WP und Emob: technologischer Systemwechsel, WP: Umweltwärmequellen
 - Erneuerbare C-Quellen für Synthesegase und –fuels ?

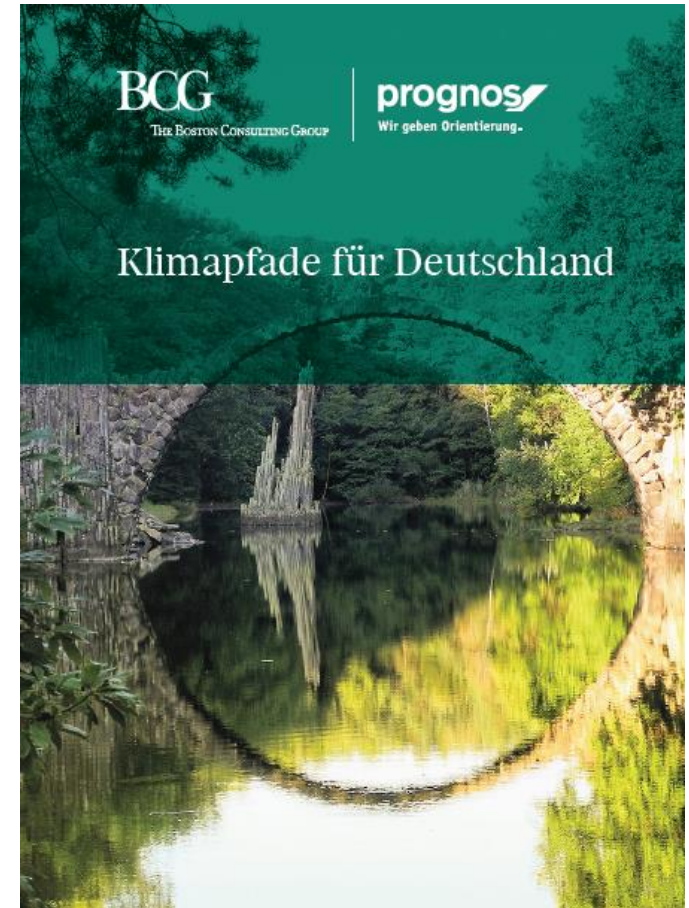
- Zunächst wurde Produktion synthetischer Treibstoffe diskutiert:
 - (Biofuels 2. / 3. Gen,
 - Nutzung von Abfallstoffen und Lignozellulosen
 - zur Entlastung der Flächen, Entschärfung Konkurrenz zur Nahrungskette)
- Seit einigen Jahren verstärkt PtX-Diskussion im Kontext «Überschuß-Strom»
- PtH, PtH₂, PtG, PtL ...
- Später: Importe als neuer «Joker»
 - Entlastung Biomassepotenziale
 - Entlastung nationaler EEel-Potenziale



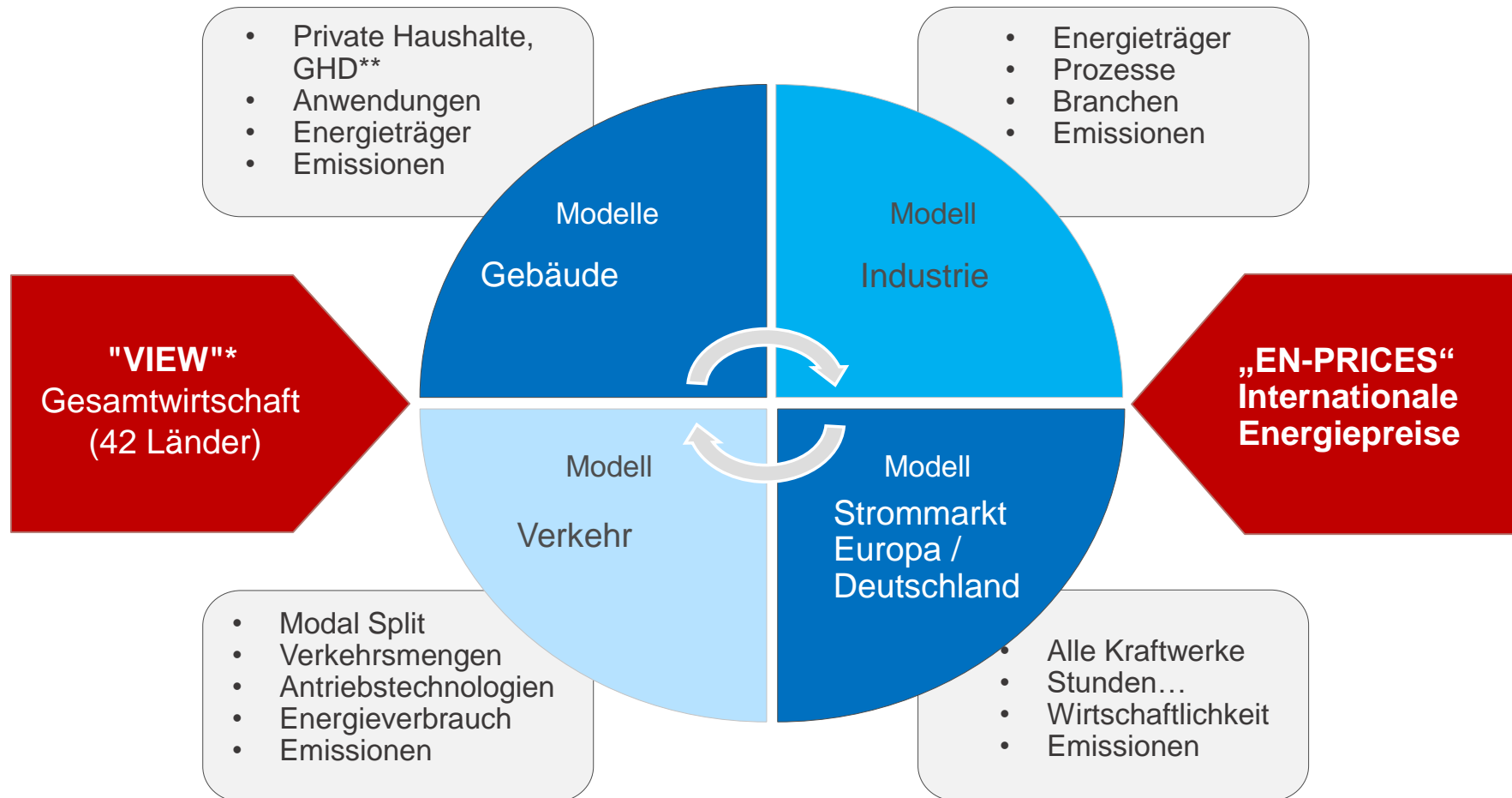




- Auftraggeber: BDI
- Bearbeitung: BCG und Prognos
- Bearbeitungsdauer: 10 Monate
- 68 beteiligte Verbände und Unternehmen
- 40 Workshops
- 3 Klimapfade (Referenz, 80%, 95%)



- Referenzszenario: Fortführung heutiger Maßnahmen, keine Klimaziele
- 80% Szenario – „Alleingang“ im Klimaschutz
- 80% Szenario – weltweit ambitionierter Klimaschutz
- 95% Szenario – „Alleingang“ im Klimaschutz
- 95% Szenario – weltweit ambitionierter Klimaschutz



* VIEW: Versatile Integrated Economic World – makroökonomisches Modell

** GHD: Gewerbe, Handel, Dienstleistungen

Prognos Energiemodelle

Ökonomische Analysen (VIEW)

Bruttowertschöpfung,
Wechselkurse,
Inflationsraten,
Bevölkerungsentwicklungen,
regionale Wertschöpfung
EU-27, CH, NO

Primärenergiepreise

Internationale Preise, Grenz-
übergangspreise und Preise
frei Kraftwerke für Brennstoffe

Energie- & Stromnachfrage

Regionaler und europäischer
Energiebedarf nach Sektoren -
insbesondere Strombedarf
(PHH, Industrie, GHD, Verkehr)

Erneuerbare Energien

Ausbauszenarien für erneuerbare
Energien, synthetische Modellierung
von Wind- und PV-Einspeiseprofilen
anhand spezifischer
Leistungskennlinien



Prognos Kraftwerksparkmodell

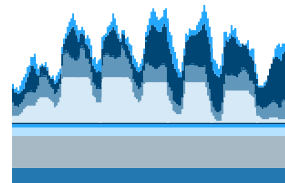
Eingangsparameter

- 5.000 Kraftwerksblöcke der allg. Versorgung
Industrie >50 MW
- Netztransferkapazitäten
der Grenzkuppelstellen
- Stündliche Lastkurven
- KWK-Profile
- Investitionskosten, O&M-Kosten
- Anfahrkosten
- Vermiedene Netznutzungsentgelte
- Flexibilitätsoptionen (Speicher, DSM etc.)
- Politische Analysen (Kernkraft, MSR etc.)



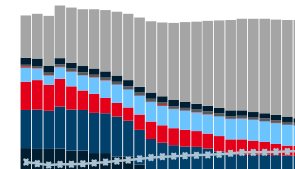
Modellierung

- Wohlfahrtsmaximierung
- Kostenminimale
Kraftwerkseinsatzplanung
- Stündliche Optimierung
- Iterative Investitions-, Rückbau-
und Retrofitentscheidungen
- Zeithorizont: 2050
- Backtesting der Ergebnisse
mit historischen Zeitreihen



Ergebnisse

- Stündlich, saisonal
- Regional, Marktgebiete
- Großhandels- & Endkundenpreise
- Stromerzeugung, Brennstoffeinsatz
- Installierte Leistung
- Blockspezifische Einsatzplanung
- Blockspezifische Deckungsbeiträge
(DB1, DB2, DB3)
- Stromaustausch zwischen Marktregionen
- CO₂-Emissionen

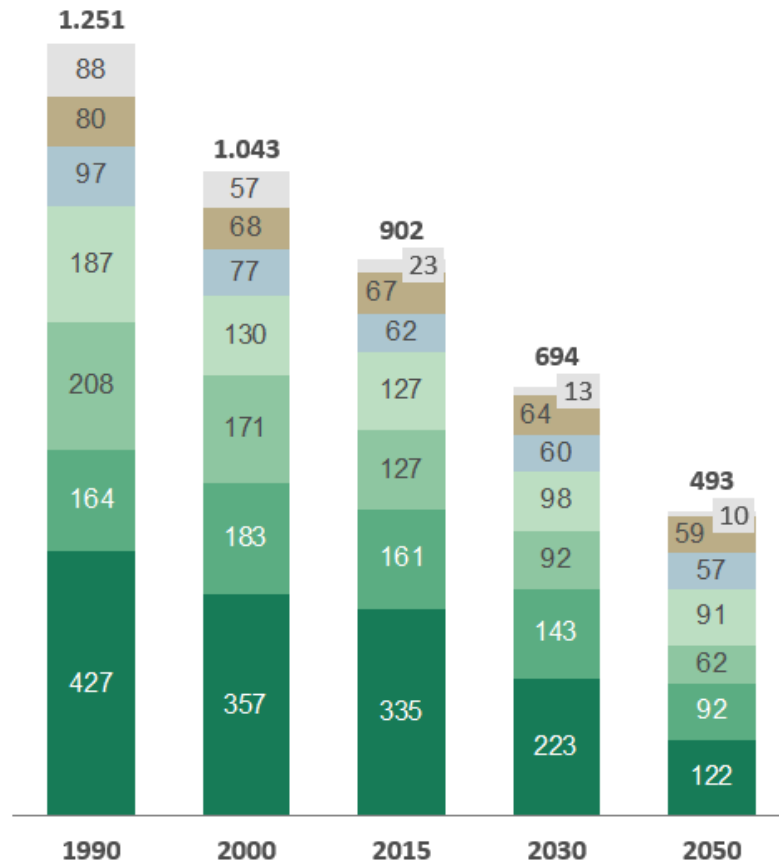


- EE-Potenziale (incl. Biomassen) sind territorial beschränkt
- «Elektrifizierungstrend» → nicht überdehnen
- → «Efficiency first» (im Rahmen der Ergebnisse der Stakeholderabstimmungen)
- Effizienter und effektiver Biomasseeinsatz
- Nächste Prio: Direktelektrifizierung (WP, Emob, Fernwärme und PtH)
- Flexibilität und Nutzung von Speichern, wo vernünftig
- Erst dann Produktion und / oder Import von synthetischen Gasen und Fuels

- Durchdringungszeiten, Technologieentwicklung und Umsetzungshemmnisse beachten
- → «harte» Diskussionen im Stakeholderkreis

- 01 Vorbemerkungen, Hintergrund, Methodik
- 02 Zusammenfassung Szenarienergebnisse in a nutshell
- 03 Aspekte der Sektorkopplung im „Gebäudesektor“
- 04 Aspekte der Sektorkopplung im Verkehrssektor
- 05 Aspekte der Sektorkopplung im Umwandlungssektor
- 06 Statt eines Abschlusses: Offene Fragen und aktuelle Dilemmata

THG-Emissionen Deutschland 1990 – 2050 (Mt CO₂ä)



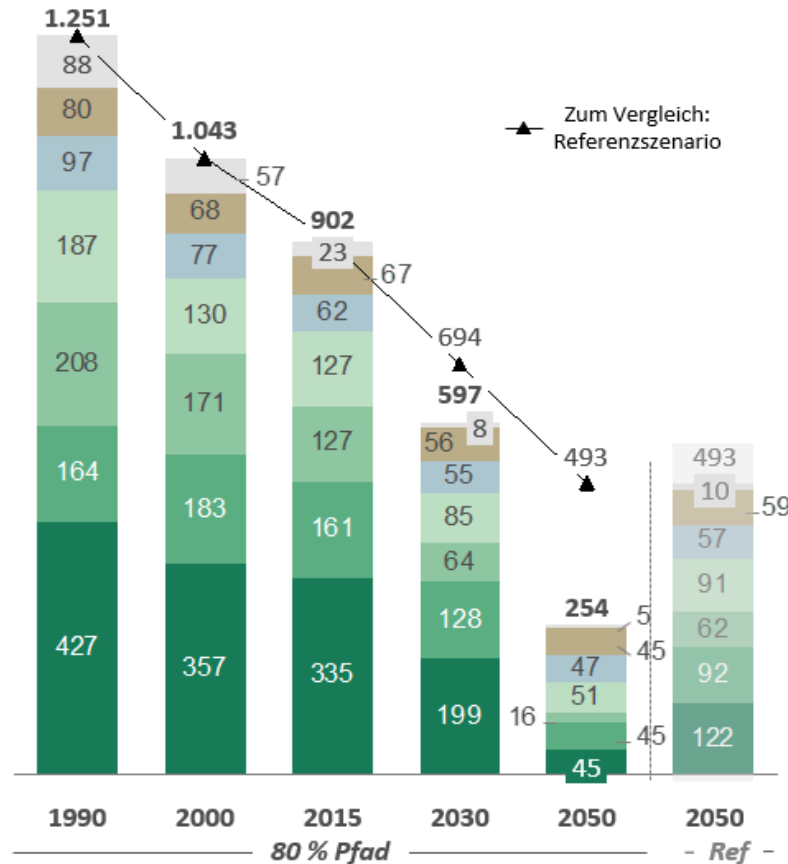
1. Enthält Abfallwirtschaft, flüchtige Emissionen und Militär

Sektor-spezifische Einsparungen

	1990 – 2015	1990 – 2030	1990 – 2050
Andere ¹	-74%	-85%	-88%
Landwirtschaft	-16%	-20%	-25%
Prozessemissionen	-36%	-38%	-41%
Industrielle Energieemissionen	-32%	-48%	-52%
GHD/Haushalte	-39%	-56%	-70%
Verkehr	-2%	-13%	-44%
Energie/ Umwandlung	-22%	-48%	-71%
Alle Sektoren	-28%	-45%	-61%

THG-Emissionen Deutschland 1990 – 2050

(Mt CO₂ä)



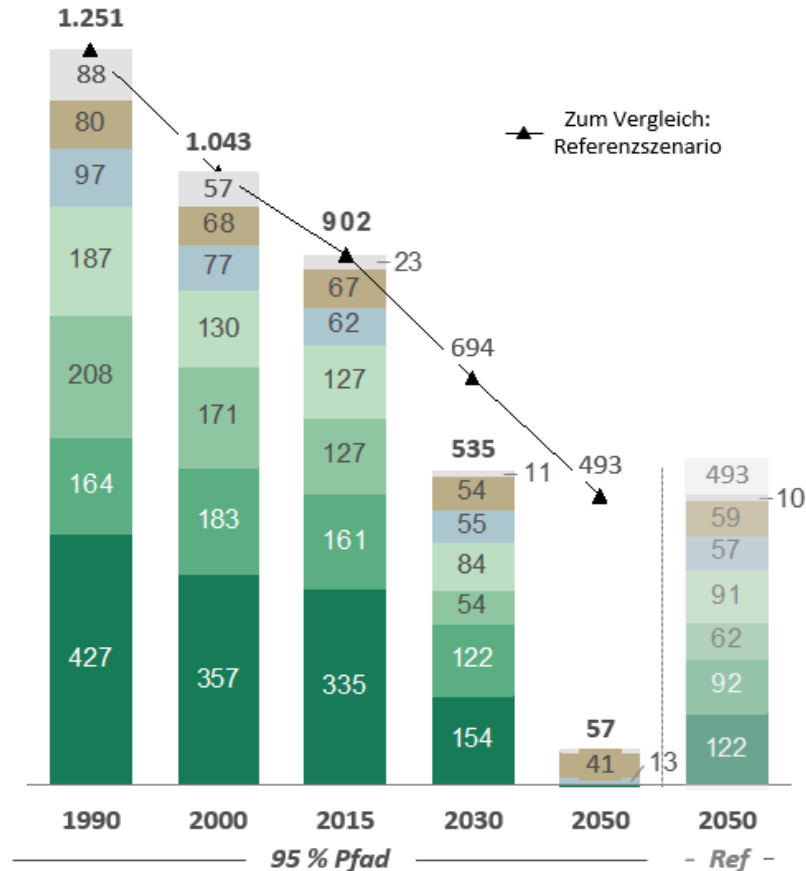
1. Enthält Abfallwirtschaft, flüchtige Emissionen und Militär

Sektor-spezifische Einsparungen

	1990 – 2015	1990 – 2030	1990 – 2050
Andere ¹	-74%	-91%	-95%
Landwirtschaft	-16%	-30%	-43%
Prozessemissionen	-36%	-43%	-51%
Industrielle Energieemissionen	-32%	-54%	-72%
GHD/Haushalte	-39%	-69%	-92%
Verkehr	-2%	-22%	-73%
Energie/ Umwandlung	-22%	-53%	-89%
Alle Sektoren	-28%	-52%	-80%

THG-Emissionen Deutschland 1990 – 2050

(Mt CO₂ä)



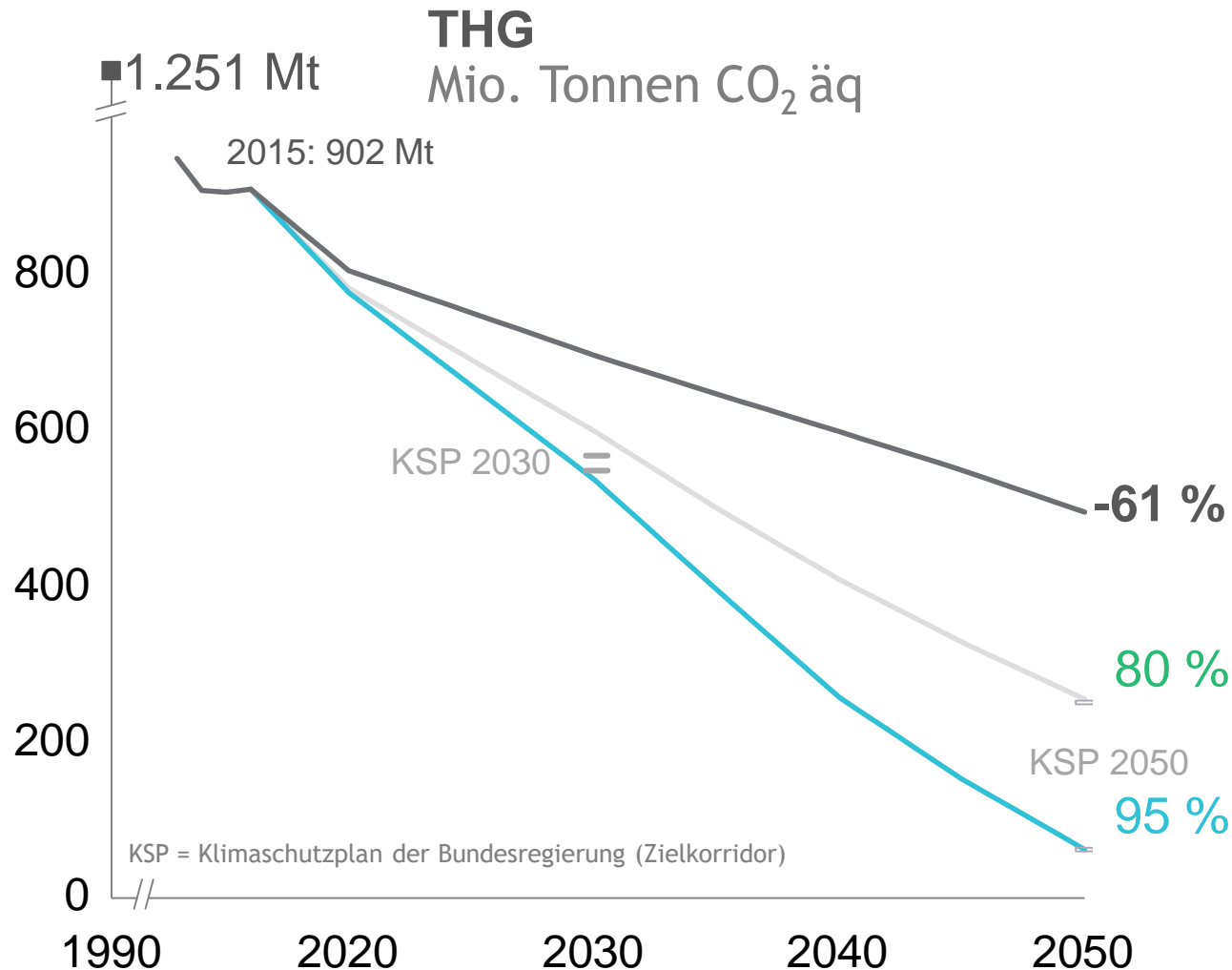
1. Enthält Abfallwirtschaft, flüchtige Emissionen und Militär

Sektor-spezifische Einsparungen

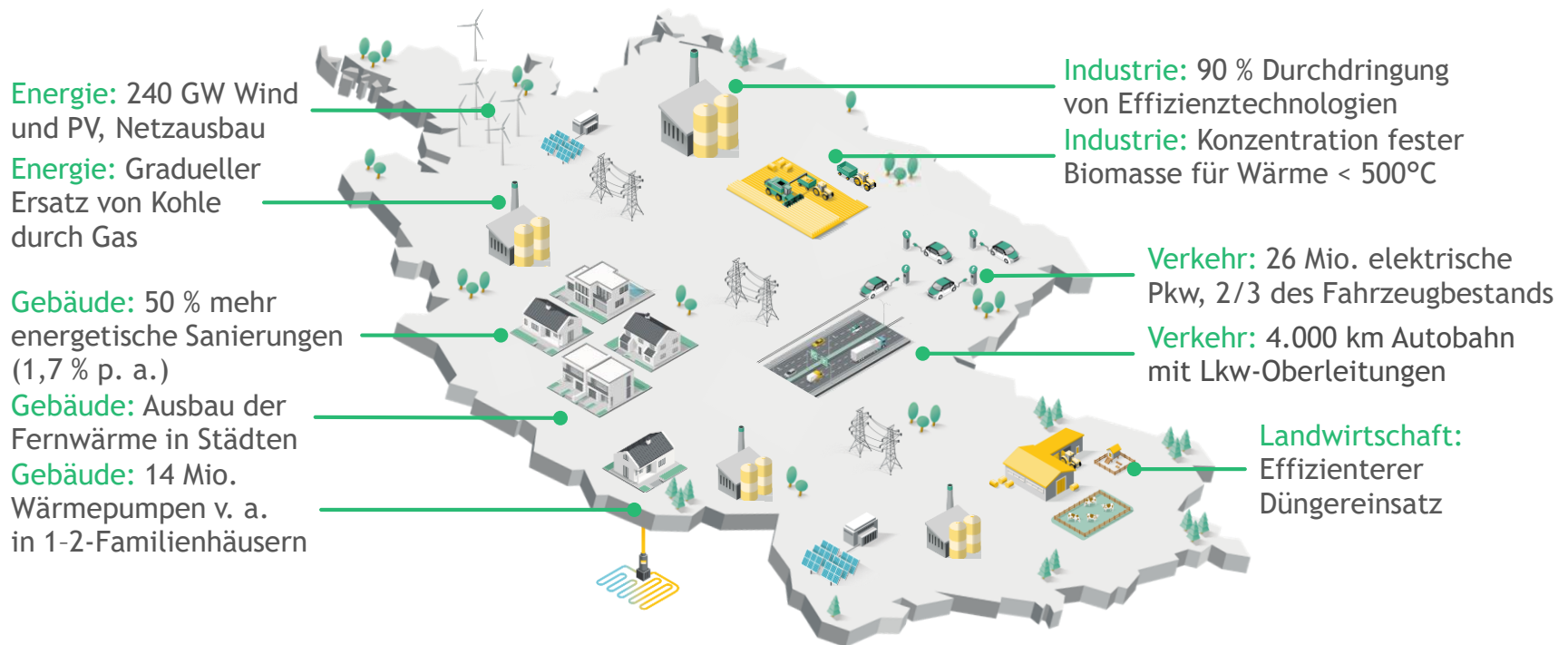
	1990 – 2015	1990 – 2030	1990 – 2050
Andere ¹	-74%	-87%	-96%
Landwirtschaft	-16%	-32%	-49%
Prozessemissionen	-36%	-43%	-87%
Industrielle Energieemissionen	-32%	-55%	-99%
GHD/Haushalte	-39%	-74%	-100%
Verkehr	-2%	-26%	-100%
Energie/ Umwandlung	-22%	-64%	-100%
Alle Sektoren	-28%	-57%	-95%

	Referenz	80% Szenario	95% Szenario
Stromerzeugung			
EE-Anteil 2050	76%	88%	100%
Wind Onshore	90 GW	97 GW	102 GW
Wind Offshore	35 GW	47 GW	60 GW
PV	95 GW	105 GW	130 GW
Elektromobilität im Jahr 2050	14 Mio. PKW	27 Mio. PKW	33 Mio. PKW
Wärmepumpen im Jahr 2050	4 Millionen	14 Millionen	16 Millionen
Energetische Gebäudesanierung	1,1%/a	1,7%/a	1,9%/a
CCS in der Industrie	-	-	93 Mio. t CO ₂
Importe von CO ₂ -freien synthetischen Brennstoffen	-	-	340 TWh

- Erreichung des Zwischenziels 2030 war in den Szenarien keine Vorgabe
- 80% Pfad liegt in 2030 40 Mio. Tonnen über dem KSP, 95% Pfad liegt darunter



80% Pfad: Ausstieg aus der Kohleverstromung, starke Elektrifizierung Verkehr und Wärmemarkt, Energieeffizienz



PV = Photovoltaik
Alle Zahlen beziehen sich auf 2050

95% Pfad: Mehr EE und Elektrifizierung, Importe von syn. Brennstoffen und Einsatz von CCS

340 TWh Importe erneuerbarer Brennstoffe (PtL, PtG)

Energie: 292 GW Wind und PV, Netzausbau

Energie: 100 % erneuerbar durch PtG, Gasnetz als saisonaler Speicher

Gebäude: 70 % mehr energetische Sanierungen (1,9 % p.a.)

Gebäude: vollständig emissionsfreie Wärme (v. a. durch 16 Mio. Wärmepumpen und Fernwärme)

Industrie: 100 % erneuerbare Wärme durch Biogas/PtG ...

Industrie: ... produziert mit recyceltem Kohlenstoff aus Biomasseverbrennung

Verkehr: 33 Mio. elektrische Pkw, 4/5 des Fahrzeugbestands

Verkehr: 8.000 km Autobahn mit Lkw-Oberleitungen

Landwirtschaft: „Methanpille“ für Rinderbestand

Carbon Capture and Storage für Stahl, Zement, Ammoniak, Raffinerien, Müllverbrennung

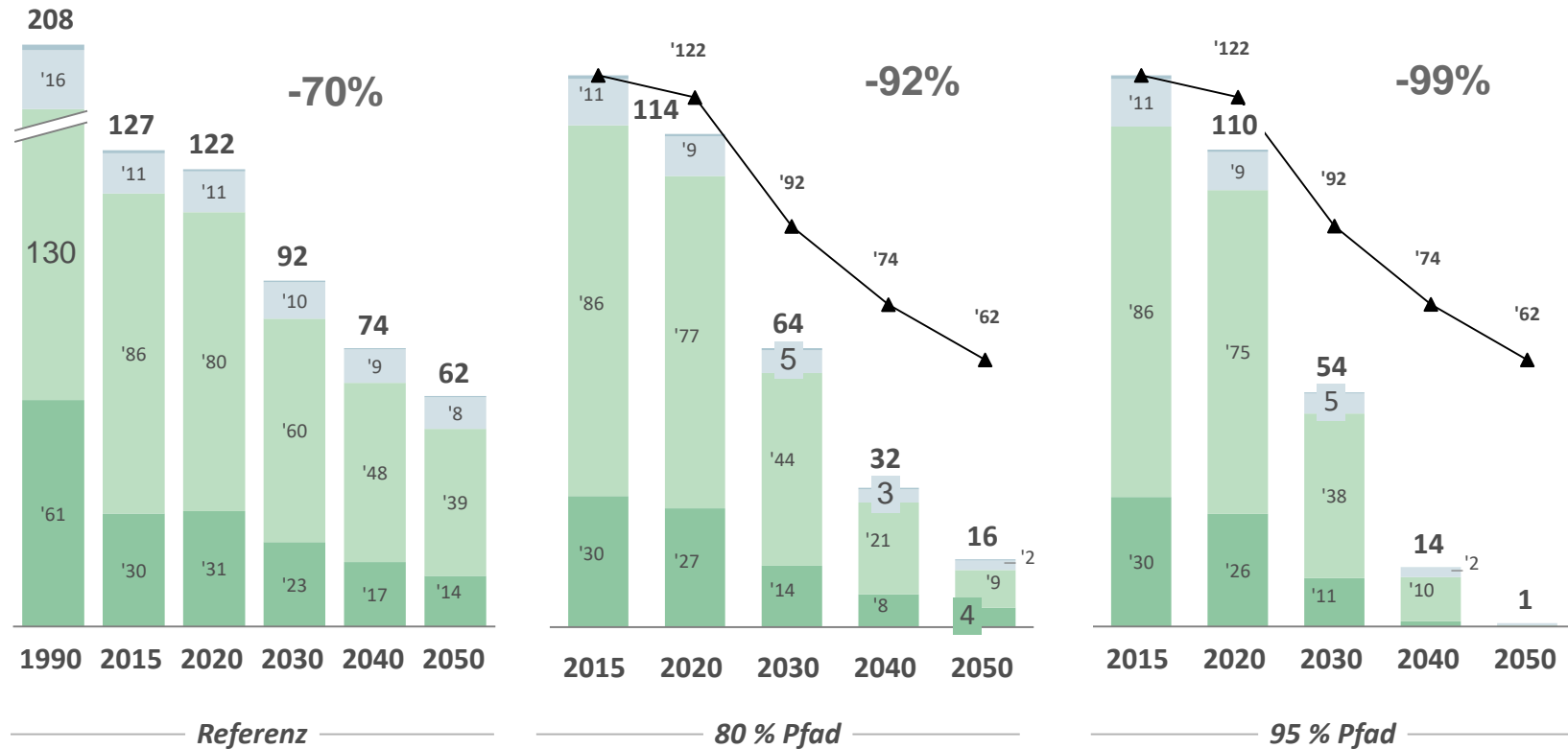
PtL = Power-to-Liquid, PtG = Power-to-Gas, PV = Photovoltaik
Alle Zahlen beziehen sich auf 2050

- 01 Vorbemerkungen, Hintergrund, Methodik
- 02 Zusammenfassung Szenarienergebnisse in a nutshell
- 03 Aspekte der Sektorkopplung im „Gebäudesektor“**
- 04 Aspekte der Sektorkopplung im Verkehrssektor
- 05 Aspekte der Sektorkopplung im Umwandlungssektor
- 06 Statt eines Abschlusses: Offene Fragen und aktuelle Dilemmata

Sektoren Private Haushalte und GHD («Gebäude»)

- Fokus auf THG (Quellenbilanz)
→ Schwerpunkt bei Betrachtung des Einsatzes fossiler Brennstoffe in Gebäuden, Stromanwendungen wenig strittig
- Effizienzstrategie Gebäude (ESG) weiten Kreisen bekannt (und akzeptiert), Zielszenarien orientieren sich an diesen Pfaden
- zusätzlich zur Effizienzsteigerung starke Elektrifizierung (14-16 Mio. WP), Stromverbrauch steigt in den Zielszenarien nicht an (N80 und G95)
- Fernwärmeausbau, dort Gross-WP, PtH als Speicher (tlw.saisonal)
- keine bis wenig synthetische Energieträger (kleine Mengen in G95)
- Im G95% verschwindet Gasverteilnetz weitgehend.

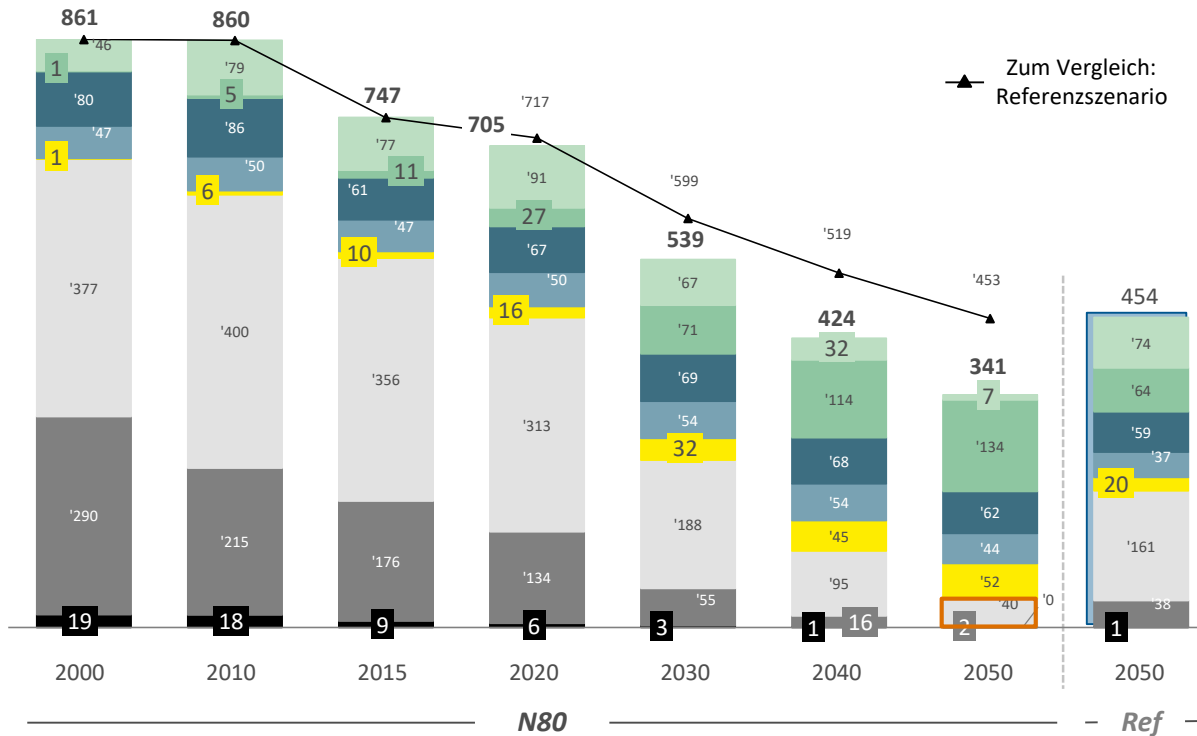
THG-Emissionen Haushalte/GHD (Mt CO₂e Quellenemissionen)



- Haushalte: Kochen
- Raumwärme & Warmwasser PHH
- Geräte und Prozesse GHD
- Raumwärme & Warmwasser GHD

▲ Zum Vergleich: Referenz

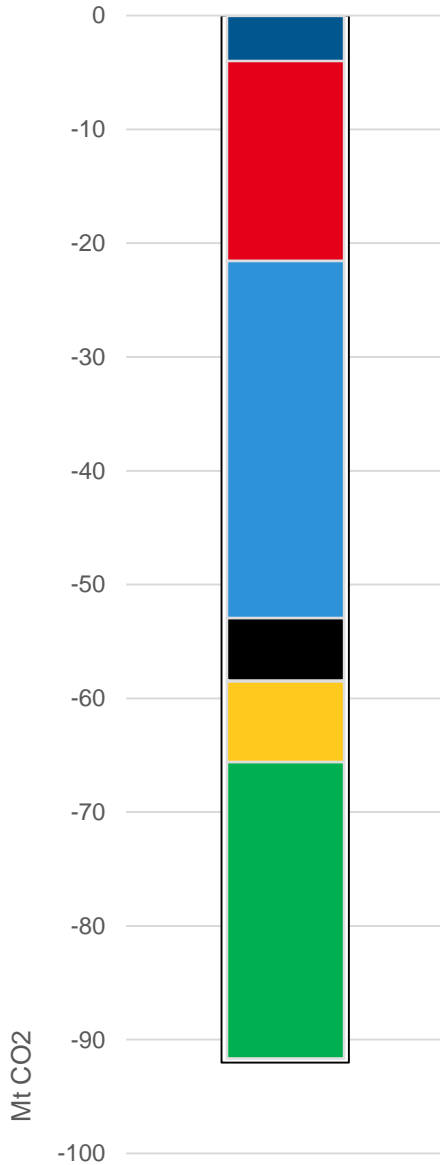
Endenergieverbrauch für Raumwärme und WW nach Energieträgern (TWh)



Jährliche Entwicklung 2015-50

Biomasse / Gas	-5,1% p.a.
Wärmepumpen	14,1% p.a.
Fernwärme	-0,7% p.a.
Strom direkt	-0,2% p.a.
Solar	11,8% p.a.
Gas	-6,2% p.a.
Heizöl	-13,5% p.a.
Kohle	-12,3% p.a.

- 01 Vorbemerkungen, Hintergrund, Methodik
- 02 Zusammenfassung Szenarienergebnisse in a nutshell
- 03 Aspekte der Sektorkopplung im „Gebäudesektor“
- 04 Aspekte der Sektorkopplung im Verkehrssektor**
- 05 Aspekte der Sektorkopplung im Umwandlungssektor
- 06 Statt eines Abschlusses: Offene Fragen und aktuelle Dilemmata



- Verkehrsverlagerung



- Effizienz



- Elektrifizierung



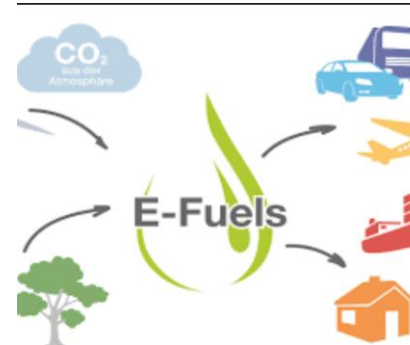
- Erdgas



- Oberleitungs-Lkw

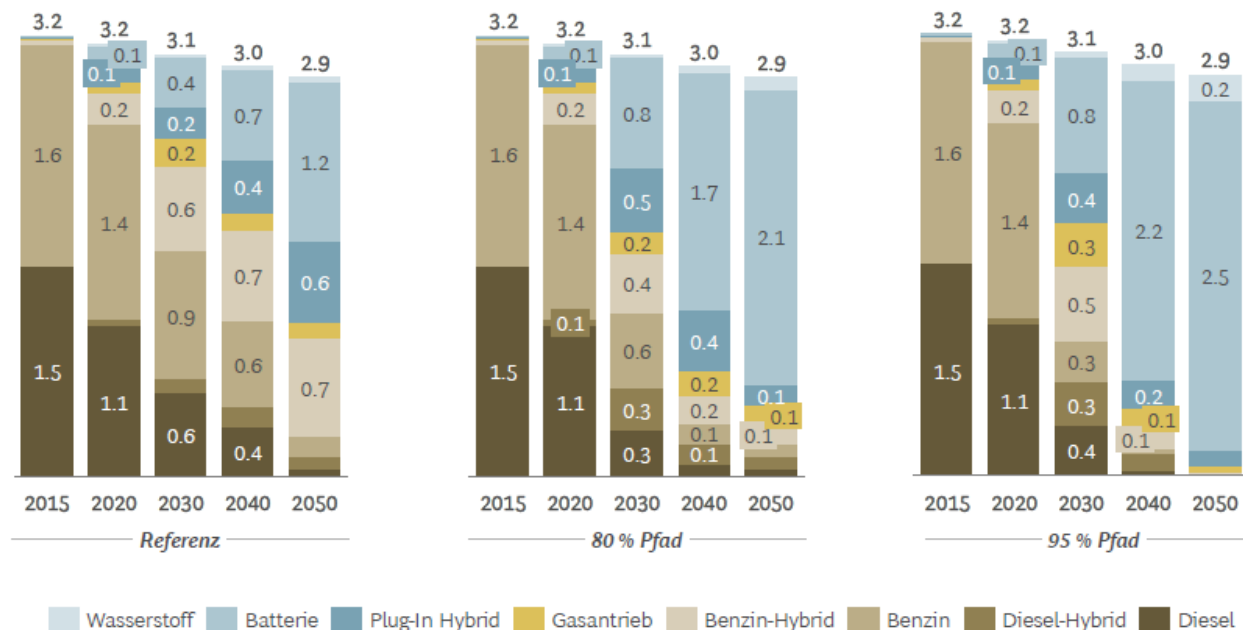


- Synthetische Energieträger

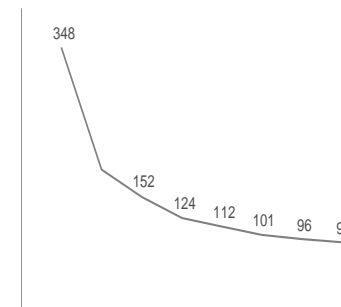


Mehr Elektromobilität in beiden Klimapfaden, mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten
Abbildung 43 | Entwicklung Neuzulassungsstrukturen Pkw nach Klimapfaden

Pkw-Neuzulassungen
(Mio. in Deutschland zugelassene Fahrzeuge)

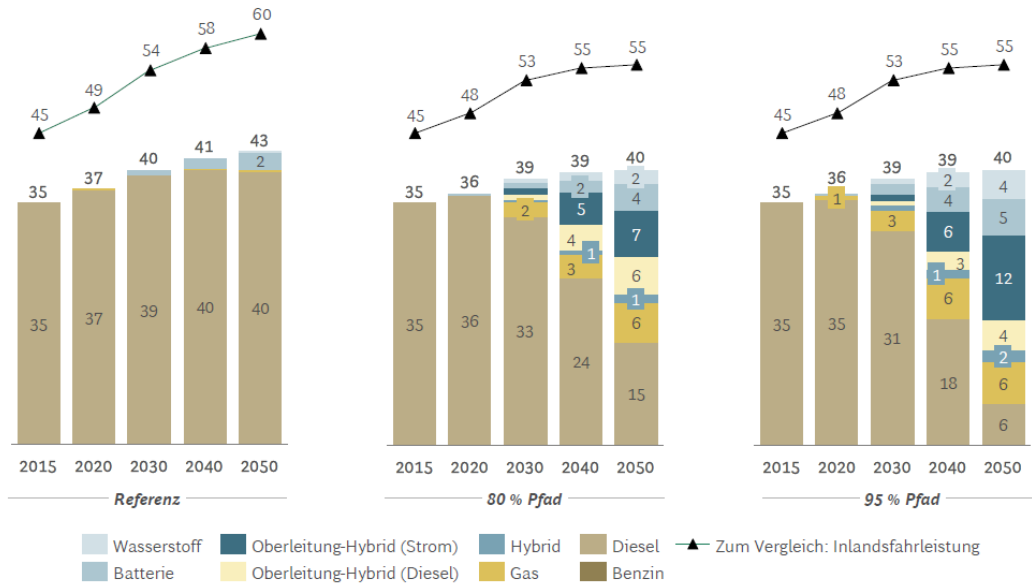


Batteriekosten (Packs) in €/kWh



Quelle: Prognos, BCG

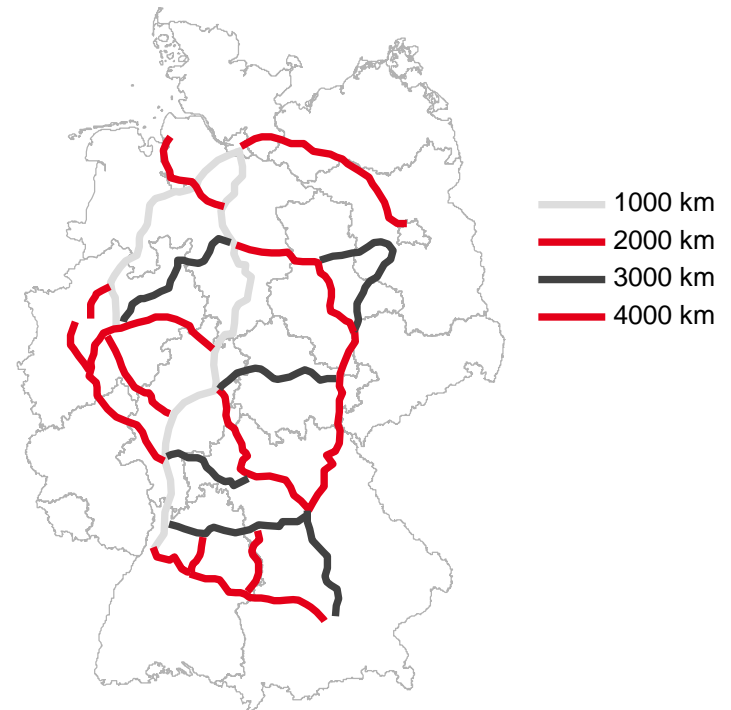
Fahrleistungen Schwerer Nutzfahrzeuge (>3,5t)
(Mrd. Fahrzeugkilometer – Inländerfahrleistung)



Anmerkung: Inländerfahrleistung = Fahrleistung, welche die in Deutschland zugelassenen Kraftfahrzeuge im In- und Ausland erbringen; Inlandsfahrleistung = Fahrleistung deutscher und ausländischer Fahrzeuge im Inland
Quelle: Prognos, BCG

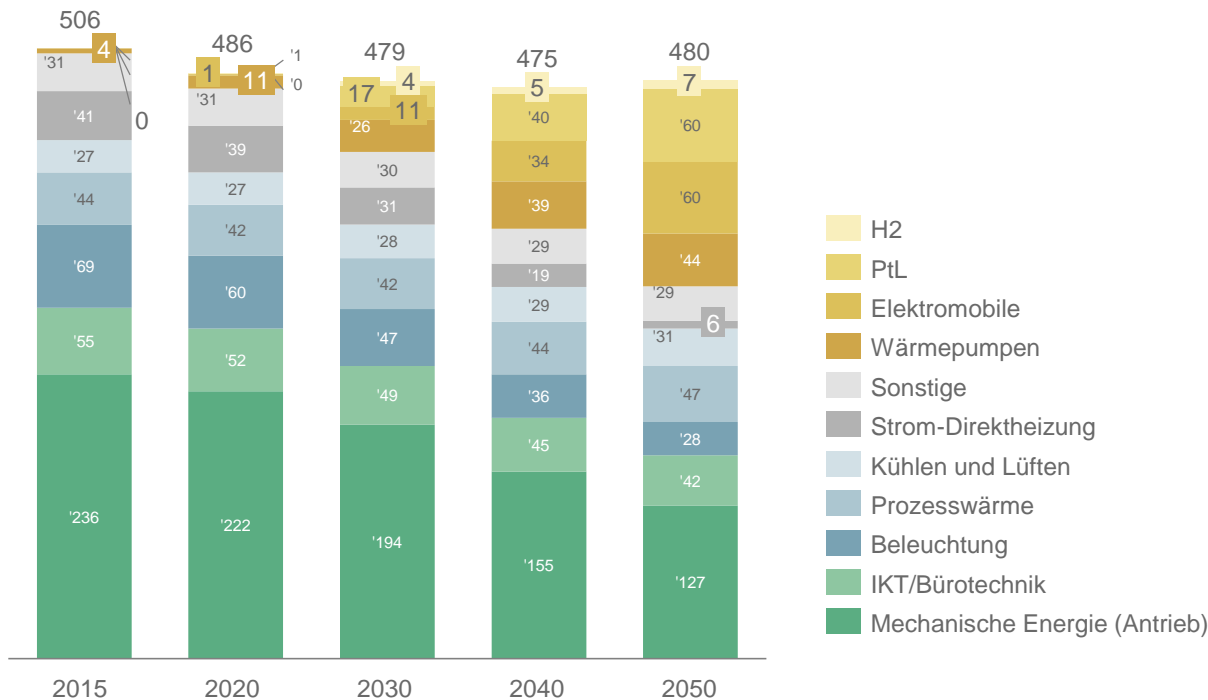
THE BOSTON CONSULTING GROUP

Oberleitungen Autobahnen



- 01 Vorbemerkungen, Hintergrund, Methodik
- 02 Zusammenfassung Szenarienergebnisse in a nutshell
- 03 Aspekte der Sektorkopplung im „Gebäudesektor“
- 04 Aspekte der Sektorkopplung im Verkehrssektor
- 05 Aspekte der Sektorkopplung im Umwandlungssektor**
- 06 Statt eines Abschlusses: Offene Fragen und aktuelle Dilemmata

Nettostromverbrauch nach Anwendungen (TWh)

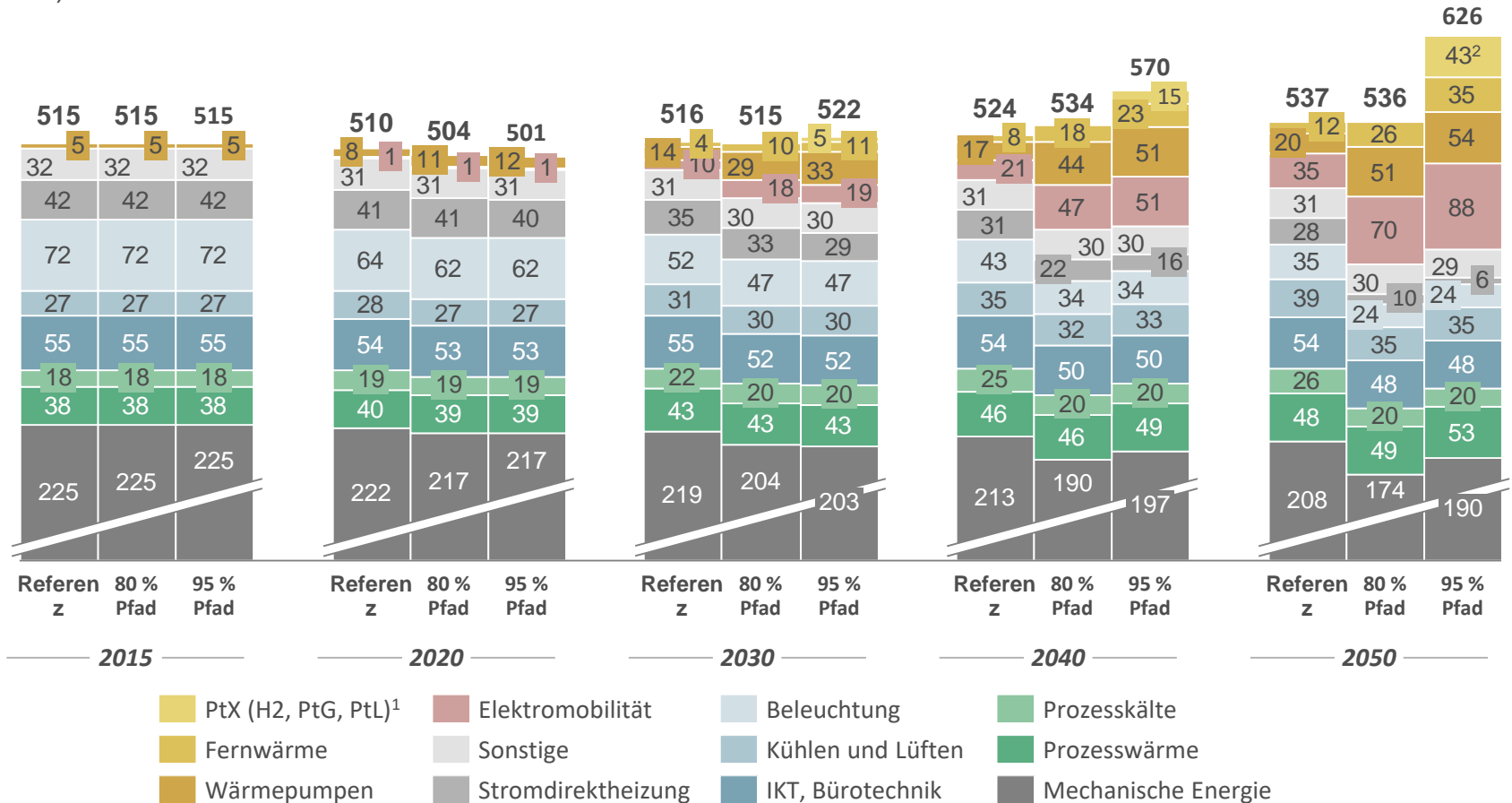


Entwicklungen N80 ggü. Ref.szenario

- Bis 2050 um 20 TWh geringerer Stromverbrauch im Vergleich zum Referenzszenario
- Rückgang des Stromverbrauchs für Beleuchtung, Prozesswärme, mechanische Energie, IKT und Klimatisierung
- Deutlicher Anstieg bei den neuen Stromverbrauchern Wärmepumpen, Elektrofahrzeuge, PtG und PtL

Quelle. BCG, prognos 2018

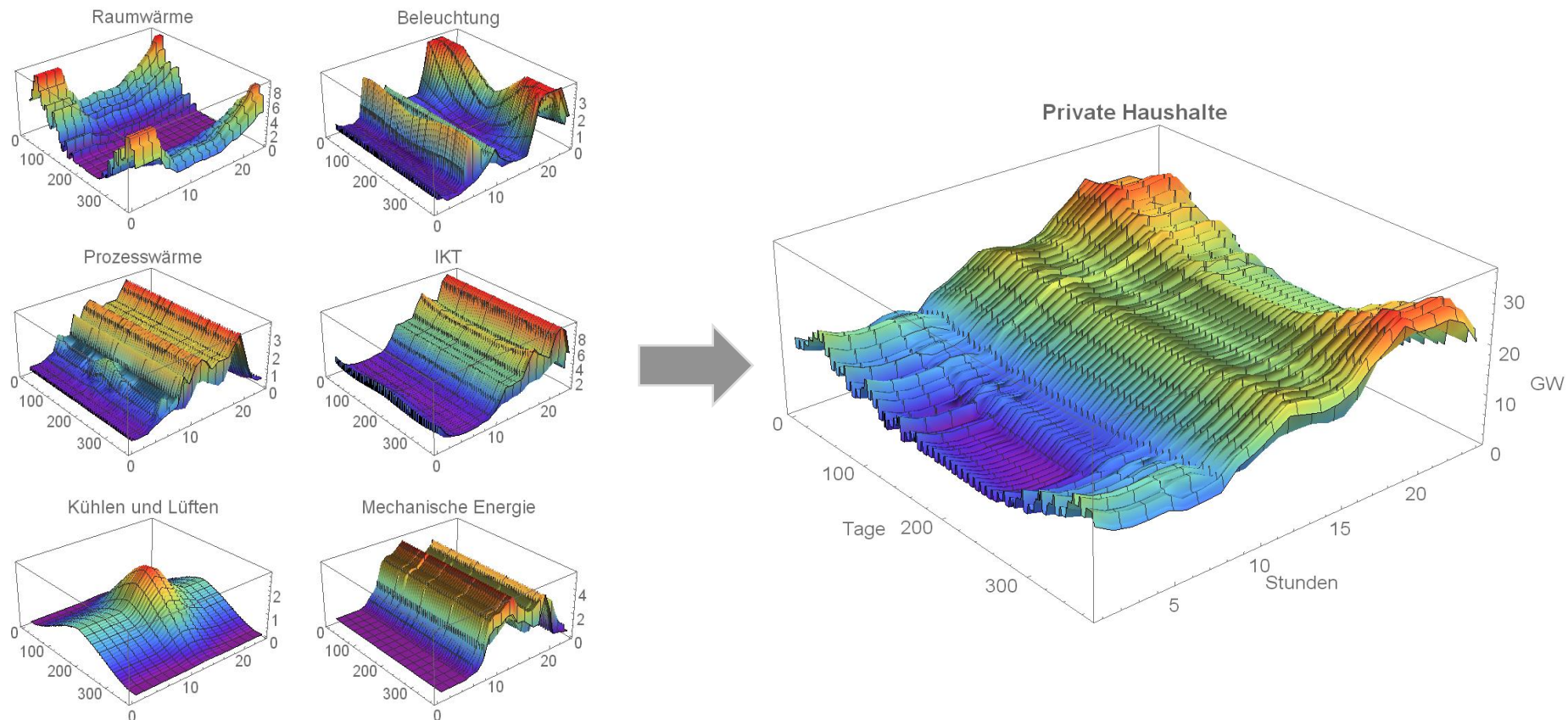
Nettostromverbrauch¹ nach Anwendungen (EEV) (TWh)



1. Nettostromverbrauch = Nettostromerzeugung – Abgeregelte Strommengen - Exportsaldo – Speicherbedarf – Netzverluste – PtG-Inlandserzeugung für Stromerzeugung
 2. Ohne den Stromverbrauch für die inländische Power-to-Gas Erzeugung für die Stromerzeugung (22 TWh für 13 TWh PTG), der nicht Teil des Nettostromverbrauchs ist.
 Quelle: Prognos, BCG

Stromnachfrage - spezifische Lastkurven (Bsp. Sektor PHH)

- Disaggregierte Profile pro Verwendungszweck → Gesamtprofil

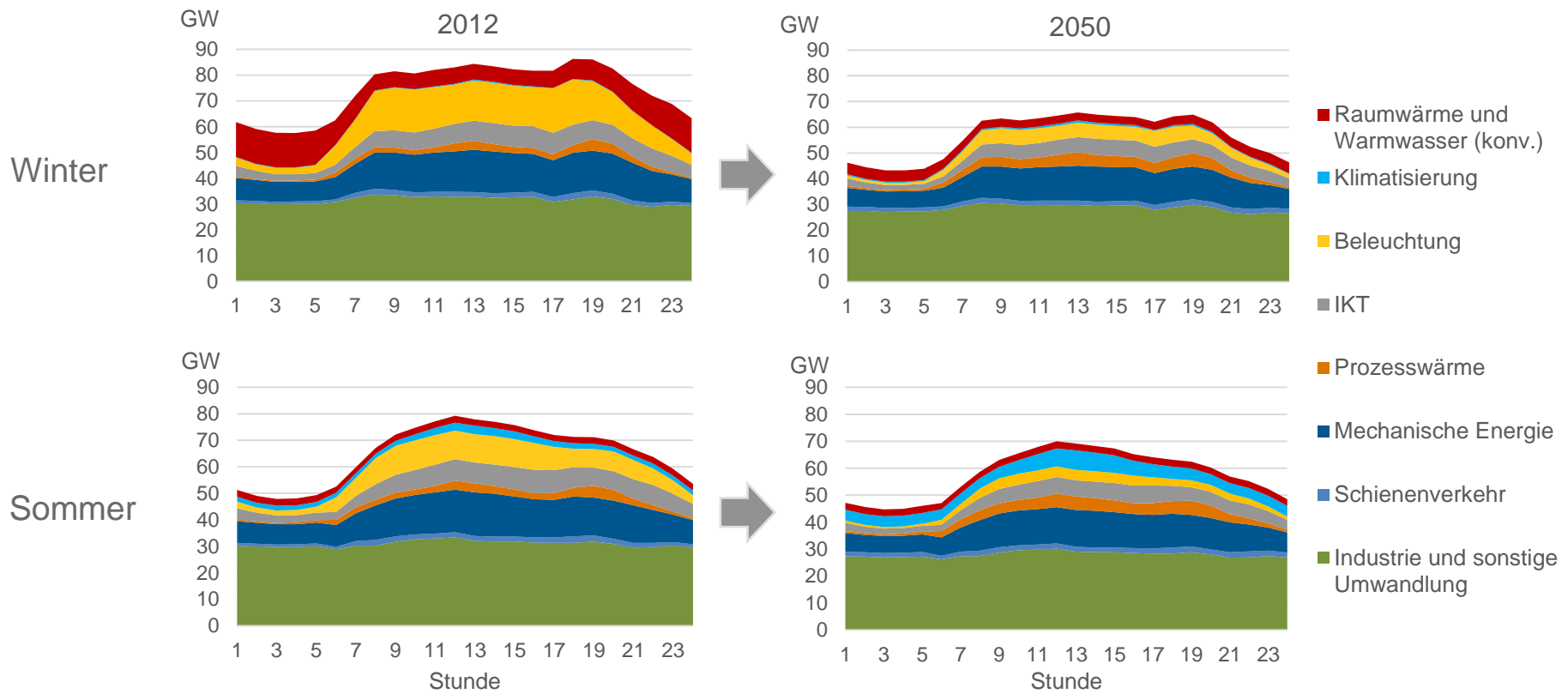


Quelle: Prognos

Stromnachfrage - Lastkurven

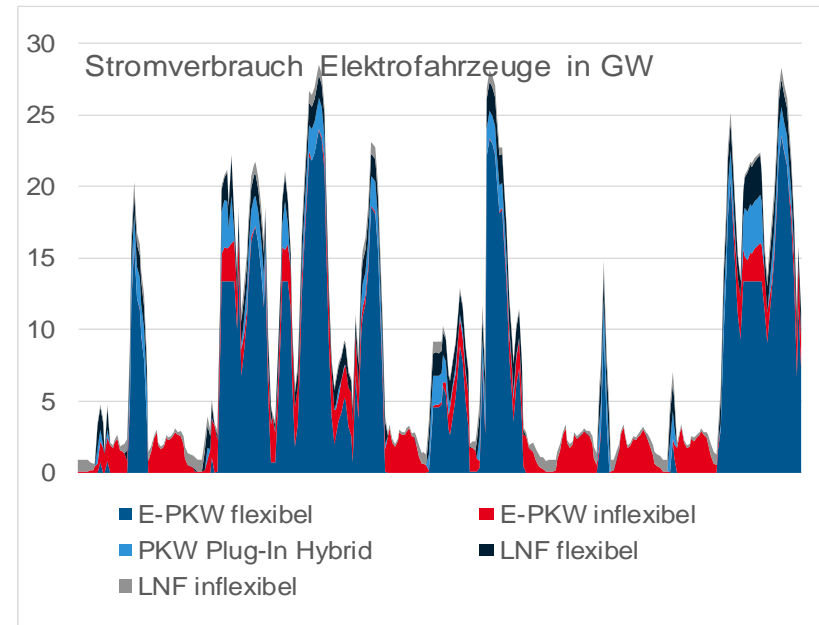
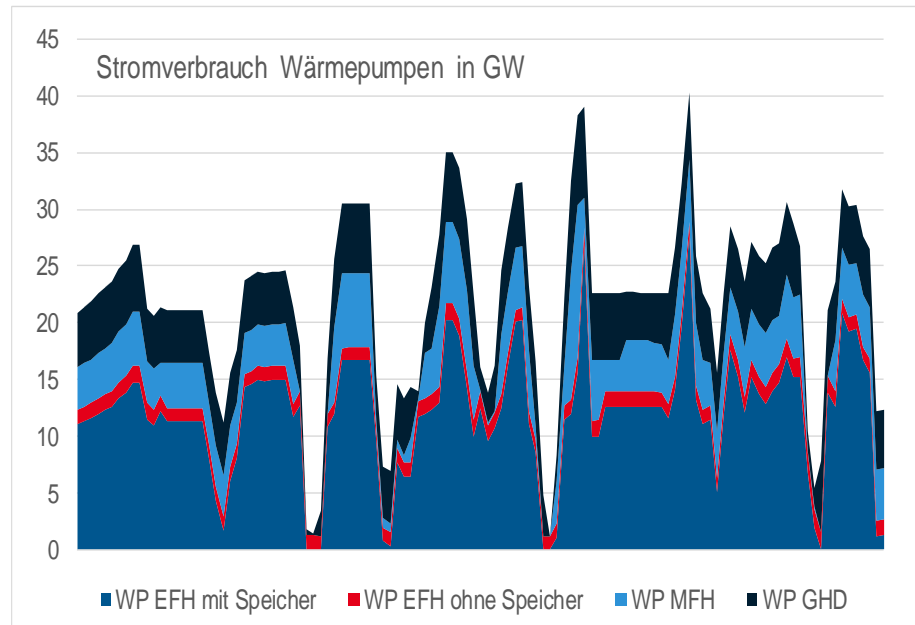
Vorläufiges 80% Szenario, wird nach AG Feedback aktualisiert

- Exemplarische Tagesstruktur: Vergleich 2012 und 2050 (inflexibler Stromverbrauch)



- Mit steigender Elektrifizierung im Verkehr und Wärmemarkt müssen diese «neuen» Stromverbraucher intelligent ins System integriert werden
- Einsatz erfolgt größtenteils systemoptimiert unter Berücksichtigungen von Restriktionen
 - Alle elektrischen Heizungen reagieren langfristig auf Strommarktsignale
 - 80% der E-PkV reagieren langfristig auf Strommarktsignale
 - Berücksichtigung unflexibler Anteil (lange Fahrten, kein Netzanschluss am Ziel usw.)

1. Februarwoche 2050 im G95 Szenario



Wärmepumpen (im Gebäudebereich)

- 100% der Wärmepumpen reagieren langfristig auf Strommarktsignale
- Input: stündlicher Wärme- und Warmwasserbedarf der Gebäude (Wetterjahr 2012)
- Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der Arbeitszahl der Wärmepumpen
- Leichter Anstieg der Größe der Warmwasserspeicher (EFH ~ 250 L)

Elektrofahrzeuge

- 100% der Elektrofahrzeuge reagieren langfristig auf Strommarktsignale
- Input: Fahrprofile nach Uhrzeit und Tagen
- Berücksichtigung Mehrverbrauch der Fahrzeuge bei kalten Temperaturen (50% Mehrverbrauch in sehr kalten Tagen ggü. Jahresmittel)
- Annahmen zu Netzanschluss: im Mittel sind etwa 20% der Fahrzeuge mit dem Stromnetz verbunden
- Annahme zum Mindestfüllstand: 50% (bei niedrigerem Füllstand wird auf jeden Fall geladen)

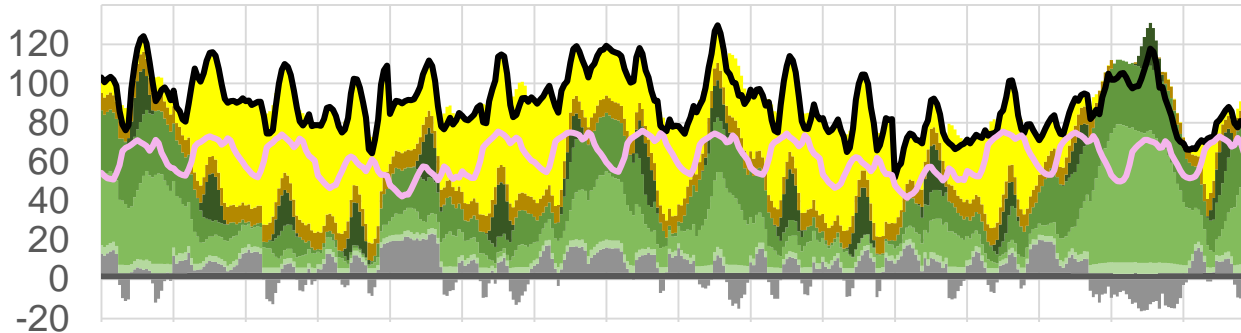
P2H Fernwärme

- 8 GW Installierte Leistung in 2050

Industrielles Lastmanagement:

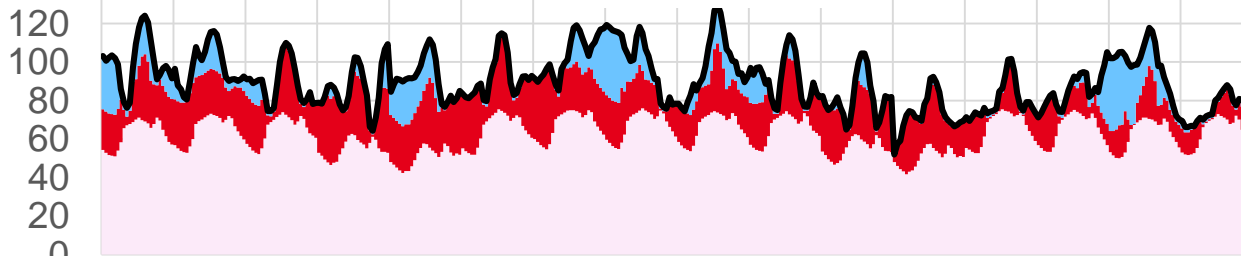
- 8 GW abschaltbare Last

Gesamtsystem



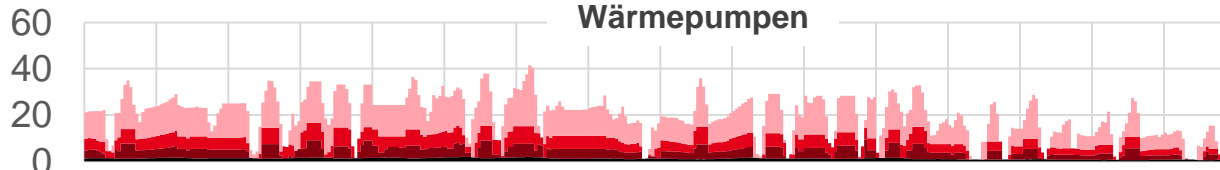
- Erdgas
- Biomasse
- PV
- Offshore
- Onshore
- Sonstige EE
- Export (neg), Import (pos)
- Sonstige Fossile
- Gesamte Stromnachfrage
- Stromnachfrage "konventionell"

Stromnachfrage



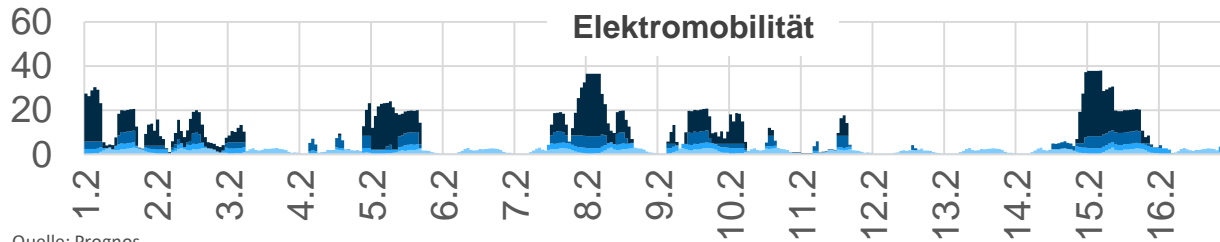
- Elektromobilität
- Wärmepumpen
- Stromnachfrage "konventionell"
- Gesamte Stromnachfrage

Wärmepumpen



- WP EFH Speicher
- WP DL-Gebäude
- WP MFH
- WP EFH

Elektromobilität

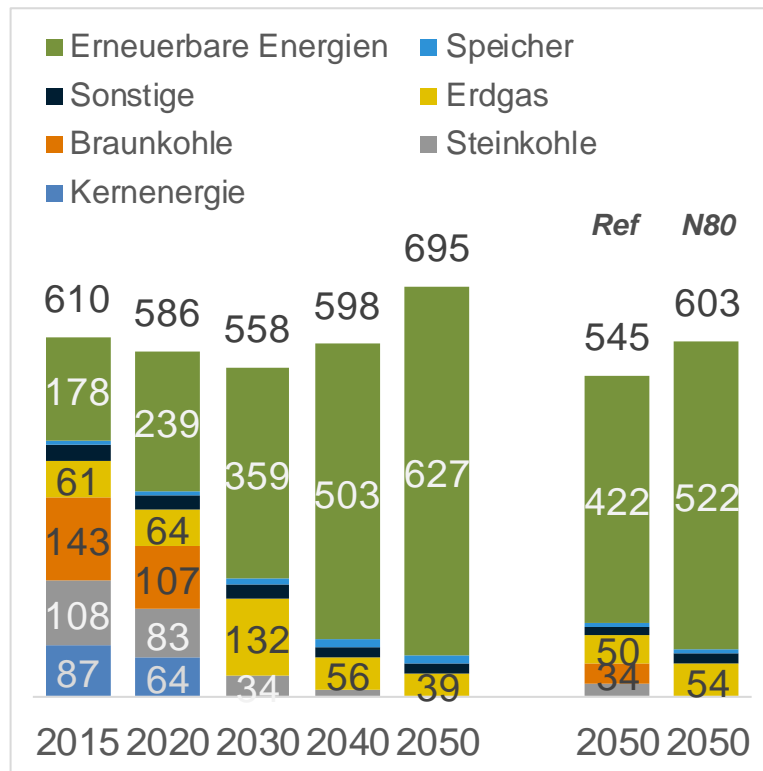


- Pkw BEV flexibel
- Pkw PHEV
- LNF flexibel
- Pkw BEV inflexibel
- LNF inflexibel

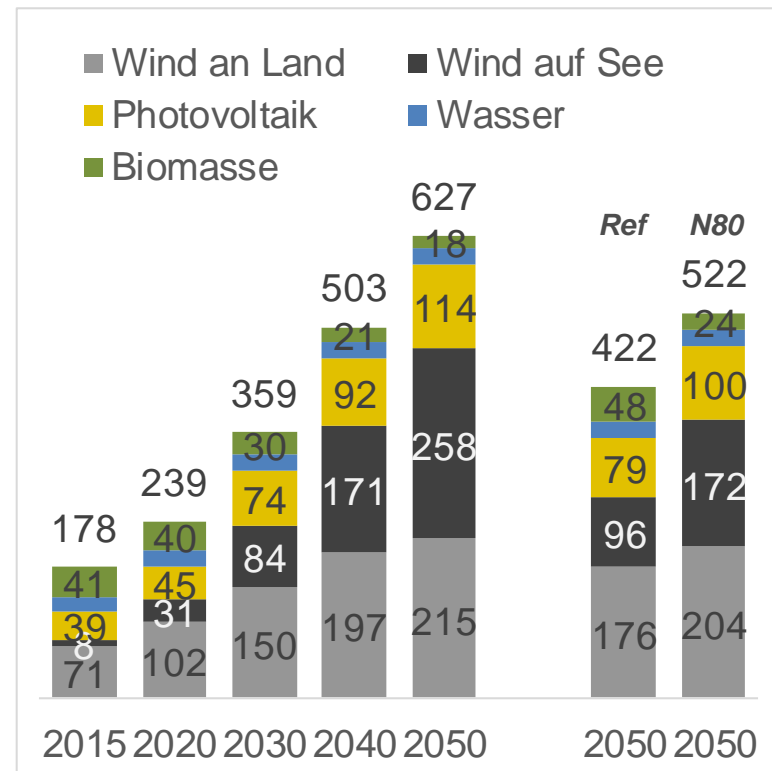
Quelle: Prognos

- Rückgang der Kohlestromerzeugung, vollständiger Ausstieg in 80% und 95% Szenarien
- Deutlicher Anstieg der Stromerzeugung bei starker Dekarbonisierung auf etwa 700 TWh (84% davon aus fluktuierenden erneuerbaren Energien: Wind und PV)

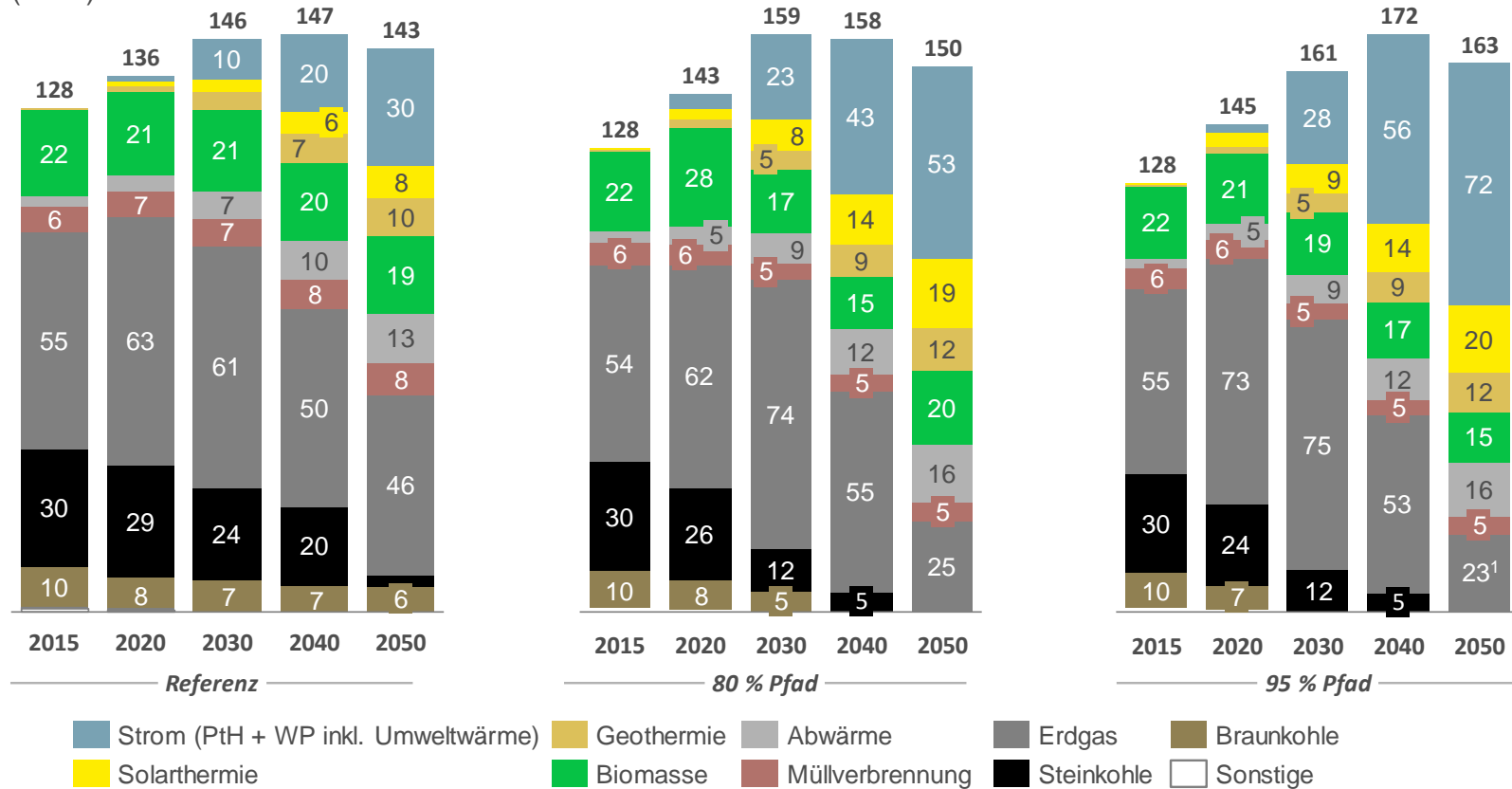
Gesamt



Erneuerbare Energien

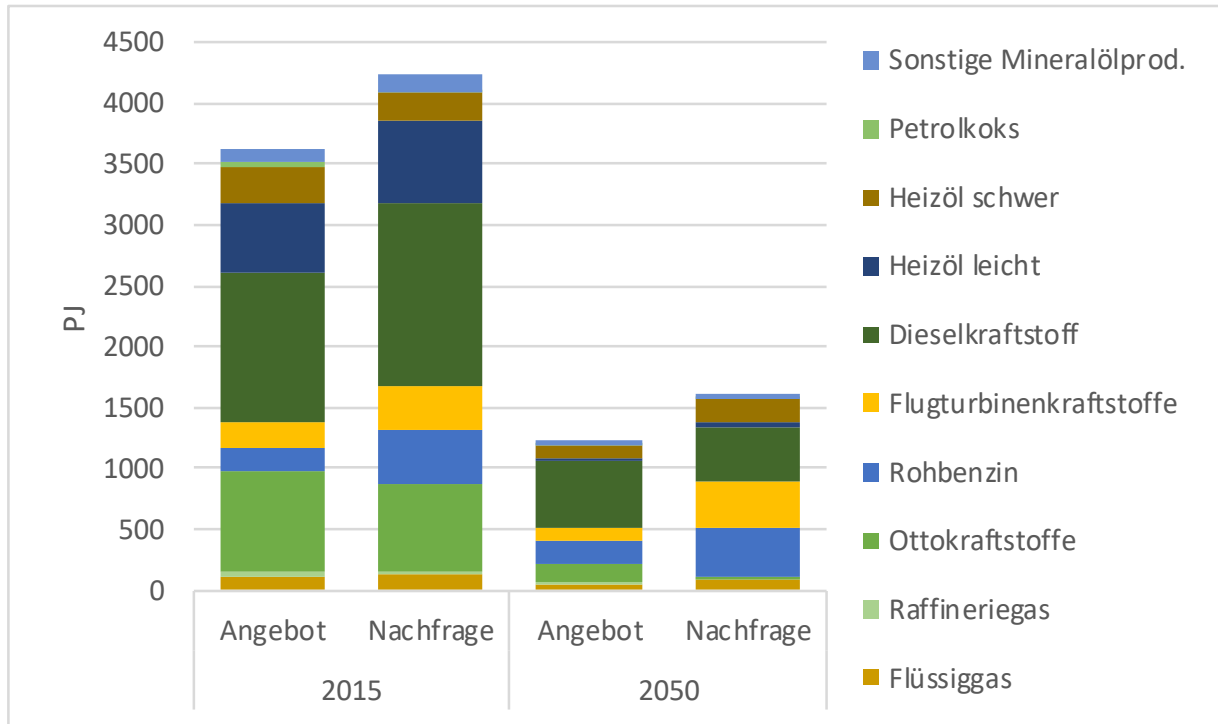


Fernwärmeerzeugung nach Energieträgern (TWh)



1. Zu 100% aus PtG
PtH = Power-to-Heat, WP = Wärmepumpen

Angebot versus Nachfrage nach Mineralölprodukten



*Angebot:

-Umwandlungsausstoß Raffinerien & Sonst. Erzeuger

-Umwandlungseinsatz Raffinerien & Sonst. Erzeuger

-Eigenverbrauch Raffinerien & Sonst. Erzeuger

Quelle: Prognos

- 01 Vorbemerkungen, Hintergrund, Methodik
- 02 Zusammenfassung Szenarienergebnisse in a nutshell
- 03 Aspekte der Sektorkopplung im „Gebäudesektor“
- 04 Aspekte der Sektorkopplung im Verkehrssektor
- 05 Aspekte der Sektorkopplung im Umwandlungssektor
- 06 **Statt eines Abschlusses: Offene Fragen und aktuelle Dilemmata**

Technologieentwicklung SKT-Tech:

- Rennen der Technologieentwicklung scheint noch offen zu sein – kaum Prognosen möglich über künftigen Technologiemix.
- Starke Einflussfaktoren auf der Nachfrageseite:
 - Fahrzeugindustrie
 - Fahrzeugtechnologie
 - Heizanlagenanbieter und Gebäudebetreiber sowie
 - Energieträgeranbieter
- → Diffusionstempo nicht nur von Technologielernkurven abhängig

Instrumentarien

- Interaktion sehr verschiedener «Märkte» mit unterschiedlichen Treibern, Rationalitäten, Zeitstrukturen und Energiekostensensitivitäten → systemdienliche Anreizsysteme sind sehr komplex zu designen
- Grenzkostenkurven sind keine hinreichende Entscheidungsgrundlage !!!
- Bisherige Instrumentarien optimieren auf unterschiedliche Bilanzgrenzen (Beispiel Gebäude: «Technologieoffenheit» kann zu Fehlallokationen führen, da EE-Potenzialgrenzen nicht berücksichtigt werden)
→ hier müssen Vereinheitlichungen im Sinne von «Efficiency first», kein Verzicht auf Effizienz zugunsten von EE erreicht werden.
- Einzelsystemoptimierung und Gesamtsystemoptimierung können auseinander fallen
- Sektoren «ticken» unterschiedlich – kaum einheitliche Instrumente denkbar
- Besonders schwierige Frage: Biomasseallokation

Technologieoffenheit ist cool, aber...

- ...Infrastrukturentscheidungen sind langfristig orientiert und müssen z.T. jetzt getroffen werden
- ...Viele notwendige Veränderungen betreffen langfristige Investitionsgüter, bei denen verpasste Zeitfenster teuer werden
- ...verschiedene notwendige «Umsteuerungen» sind zeitkritisch, um ambitionierte Ziele (für 2050, ganz zu schweigen von 2030) zu erreichen.



Dr. Almut Kirchner

Vize-Direktor

Leitung Bereich Energie- und Klimaschutzpolitik

Leitung Kompetenzcenter Modelle

prognos | St. Alban-Vorstadt 24 | CH-4052 Basel

Tel: +41 61 3273-3 31

Fax: +41 &1 3273-300

E-Mail: almut.kirchner@prognos.com