





## Technologien für klimaneutrale Energieversorgung: eine Systembetrachtung

Eberhard Umbach ESYS – Energiesysteme der Zukunft

Arbeitskreis Energie der DPG, Bad Honnef 2. Oktober 2020

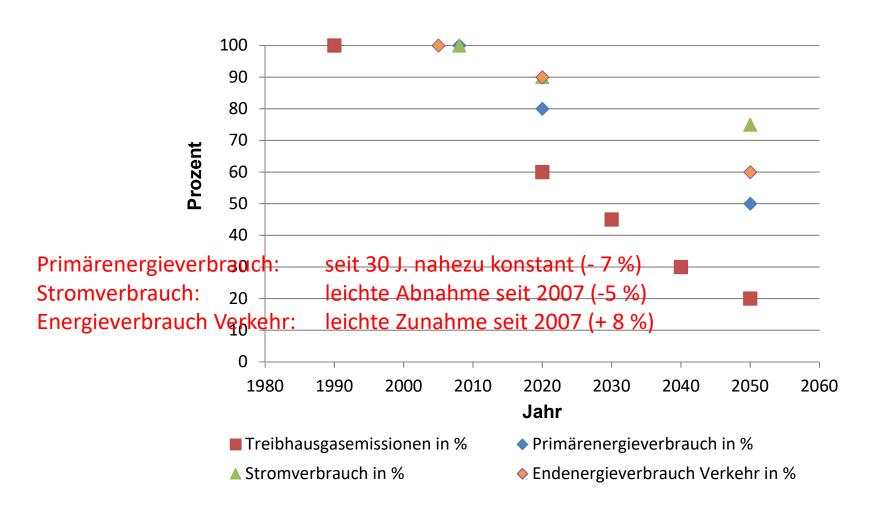
Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften Union der deutschen Akademien der Wissenschaften







## Energiekonzept der Bundesregierung (Sept. 2010)

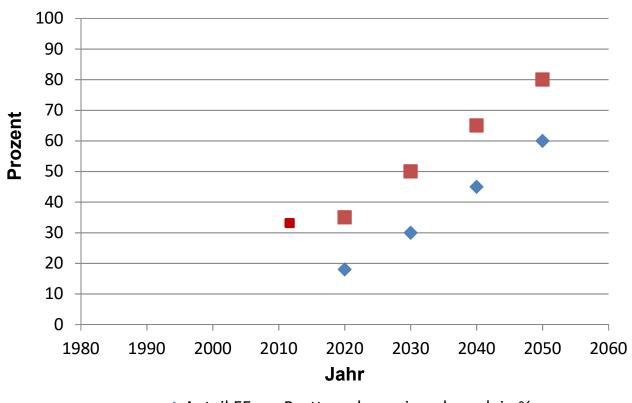








## Energiekonzept der Bundesregierung (Sept. 2010)



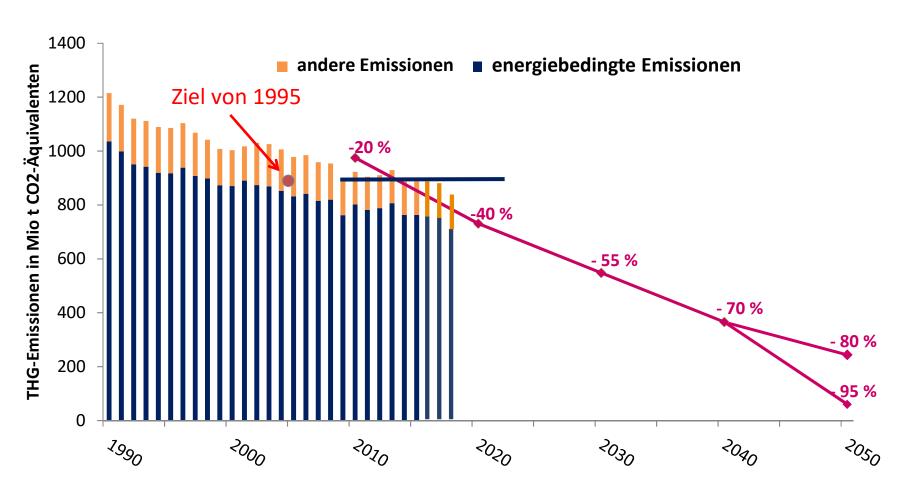
- ◆ Anteil EE am Bruttoendenergieverbrauch in %
- Anteil EE am Bruttostromverbrauch in %







## Ausgangslage: Klimaziele bis 2050



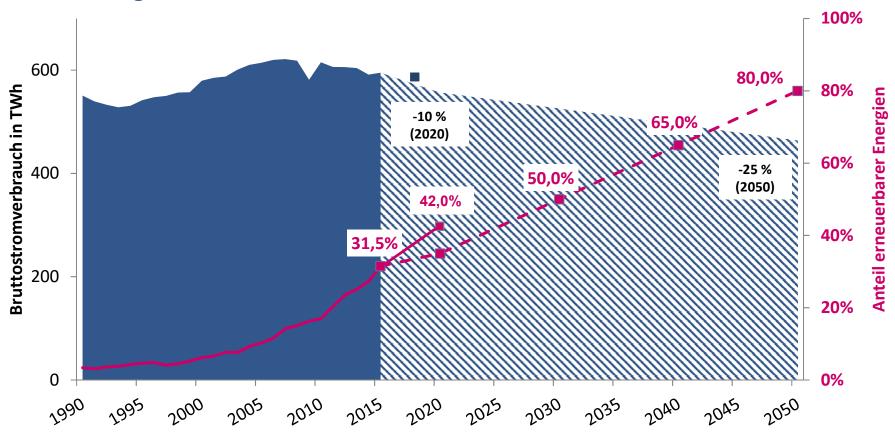






## Stromsektor – Verbrauch und Anteil erneuerbarer Energien

Entwicklung und Ziele

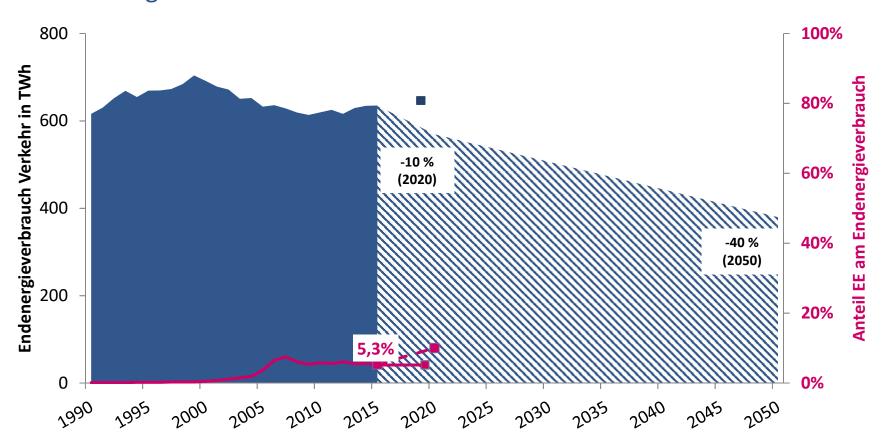








# Verkehrssektor – Verbrauch und Anteil erneuerbarer Energien Entwicklung und Ziele









## Ausgangsbeobachtungen und -fragen

- Bei einem "Weiter So" werden die Klimaschutzziele dramatisch verfehlt
- Stromerzeugung: Anteil erneuerbarer Energien signifikant zugenommen, aber im Bereich Wärme (Gebäude, Industrieprozesse) und Verkehr keine oder viel zu kleine Fortschritte
- Wie kann eine Trendwende bei der **Wärmeversorgung des Gebäudebereich**s gelingen, wo heute immer noch überwiegend fossile Energieträger Erdgas und Heizöl eingesetzt werden?
- Und wie beim Mobilitätssektor, der dominant auf fossilen Kraftstoffen basiert?
- Welche Möglichkeiten bieten sich in der Industrie, wo ebenfalls heute die meisten Prozesse fossile Energieträger nutzen?
- Gibt es für all dies übergreifend wirkende Entwicklungen und Rahmenbedingungen?
- Was müssen wir zur Erreichung der Klimaziele tun?
- Was wird das alles kosten?







## **Gliederung**

- Energiewende wo stehen wir heute, wie entwickelt sie sich?
- Akademienprojekt ESYS AG Sektorkopplung
- Konzept Sektorkopplung = ganzheitliche Betrachtung des Energiesystems
- Sektoren im Überblick Wärme Verkehr Strom
- Dimension einer erfolgreichen Energiewende?
- Fazit







## **Gliederung**

- Energiewende wo stehen wir heute, wie entwickelt sie sich?
- Akademienprojekt ESYS AG Sektorkopplung
- Konzept Sektorkopplung = ganzheitliche Betrachtung des Energiesystems
- Sektoren im Überblick Wärme Verkehr Strom
- Dimension einer erfolgreichen Energiewende?
- Fazit







## **Energiesysteme der Zukunft**

## **Ziele und Aufgaben**

- Das Projekt ESYS bündelt Expertise aus der Energieforschung in Deutschland unter dem Dach der nationalen Wissenschaftsakademien.
- In interdisziplinären Arbeitsgruppen erarbeiten rund 120 Expertinnen und Experten Handlungsoptionen für den Weg zu einer umweltverträglichen, sicheren und bezahlbaren Energieversorgung.
- In verschiedenen Dialogformaten werden die Positionen von Akteuren aus Politik,
   Wissenschaft, Wirtschaft und Zivilgesellschaft erhoben und ausgewertet.
- Ergebnisse der Arbeitsgruppen werden veröffentlicht: bisher 11 Stellungnahmen,
   12 Analysen, 12 weitere Publikationsformate, Öffentlichkeits- und Politikberatung
- Projektlaufzeit:
- Phase I 2013-2016 (Förderer: BMBF, Robert Bosch Stiftung)
- Phase II 2016-2019 (Förderer: BMBF)
- Seither: Projektverlängerungen mit dem Ziel einer Institutionalisierung







## Die Arbeitsgruppe "Sektorkopplung" in ESYS (2015 – 2018)

- Hans-Martin Henning (FhG ISE), Sprecher
- Eberhard Umbach (acatech), Sprecher
- Frank-Detlef Drake (RWE)
- Manfred Fischedick (Wuppertal Institut)
- Justus Haucap (U Düsseldorf)
- Gundula Hübner (U Halle-Wittenberg)
- Wolfram Münch (EnBW)
- Karin Pittel (ifo Institut)
- Christian Rehtanz (TU Dortmund)
- Jörg Sauer (KIT)
- Ferdi Schüth (MPI für Kohlenforschung)
- Kurt Wagemann (DECHEMA)
- Hermann-Josef Wagner (U Bochum)
- Ulrich Wagner (TU München)

- Florian Ausfelder (DECHEMA), Referent
- Berit Erlach (acatech), Referentin
- Thilo Grau (acatech), Referent
- Christoph Kost (ISE), Referent
- Katharina Schätzler (KIT), Referentin
- Cyril Stephanos (acatech), Referent
- Stephan Stollenwerk (innogy)
- Michael Themann (RWI), Referent

8 weitere Autoren für Einzelthemen







## Arbeitsweise der AG Sektorkopplung

- Interdisziplinärer Ansatz: Wissenschaftler/innen aus Naturwissenschaft, Ingenieurwissenschaft, Ökonomie und Sozialwissenschaft aus Forschung und Industrie
- Etwa 25 AG-interne Sitzungen, grob 100 Telefonkonferenzen, dazu zwei Fachgespräche sowie ein Trialog (in Zusammenarbeit mit der HUMBOLD-VIADRINA Governance Plattform) mit Experten aus Wissenschaft, Wirtschaft, Politik, Zivilgesellschaft



- Arbeit basiert auf drei Ansätzen:
  - 1) Expertendiskussion (u.a. Bottom-Up Betrachtungen der Einzelsektoren)
  - 2) Vergleich relevanter Energieszenarien
  - 3) Eigene Modellrechnungen (Modell REMod-D)
- Ergebnisse wurden veröffentlicht als:
  - Analyse: wissenschaftliche Grundlagen
  - Stellungnahme: Handlungsoptionen für die Politik







## Publikationen und Links der AG Sektorkopplung

- Analyse: Sektorkopplung Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems
- Ausfelder et al.; Nov. 2017; 166 Seiten;
- https://energiesysteme-zukunft.de/publikationen/analyse/sektorkopplung/
- Stellungnahme: Sektorkopplung Optionen für die nächste Phase der Energiewende
- Hsg.: acatech/Leopoldina/Akademienunion; Nov. 2017; 100 Seiten
- https://energiesysteme-zukunft.de/publikationen/stellungnahme-sektorkopplung/
- Dazu Kurfassung und engl. Übersetzung
- Materialien: Optimierungsmodell REMod-D
- Erlach et al.; April 2018; 55 Seiten
- https://energiesysteme-zukunft.de/publikationen/materialien/optimierungsmodellremod-d/







## **Gliederung**

- Energiewende wo stehen wir heute, wie entwickelt sie sich?
- Akademienprojekt ESYS AG Sektorkopplung
- Konzept Sektorkopplung = ganzheitliche Betrachtung des Energiesystems
- Sektoren im Überblick Wärme Verkehr Strom
- Dimension einer erfolgreichen Energiewende?
- Fazit







## **Struktur des Energiesystems**

#### Unterscheidung von vier Nutzungsbereichen

#### 1) Niedertemperaturwärme

Wärme für die Beheizung von Gebäuden und Warmwasser

#### 2) Prozesswärme

Wärme für Prozesse in Gewerbe und Industrie

#### 3) Originäre Stromanwendungen

Bspw. mechanische Antriebe in Industrie, Gewerbe und Haushalten; Beleuchtung; Anlagen der Informations- und Kommunikationstechnik; Druckluft, Klimaanlagen und Kühlhäuser

#### 4) Verkehr

Fortbewegung in all ihren Formen, also privat und gewerblich sowie auf Straße, Schiene, Wasser und in der Luft

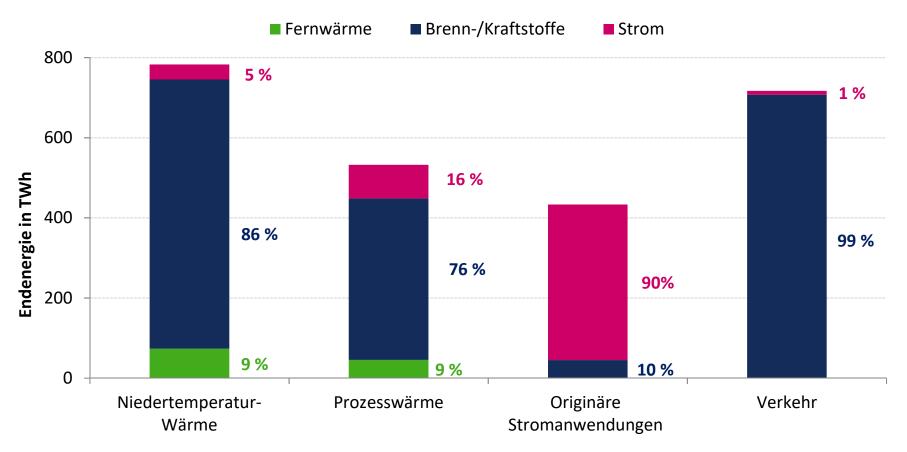






## Merke: Strom ~ 20 %, Verkehr ~30 %, Wärme ~ 50 %!

## Verteilung der Energieträger in den vier Nutzungsbereichen (2016)









## Wege zu einer klimaneutralen Energieversorgung

<u>Bisher</u>: Energiewende vor allem auf Stromerzeugung fokussiert

zukünftig: Um die Klimaziele zu erreichen, ist die Betrachtung einzelner Bereiche

nicht zielführend, sondern eine systemische Herangehensweise und die

**Optimierung des Gesamtsystems** notwendig

#### Zwei zentrale Hebel:

- 1) Einsparungen und Steigerung der Effizienz
- 2) Nutzung von erneuerbaren Energien in allen Anwendungsbereichen

Ansatz: Sektorkopplung / Sektorenkopplung

viel stärkere Vernetzung der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr

Vorteile: Synergieeffekte (bspw. Einsatz EE-Strom in verschiedenen Sektoren), Effizienzpotenziale, neue Flexibilitäten, Gesamtoptimierung







## Herausforderungen der Sektorkopplung

#### **Technologisch**

- CO<sub>2</sub>-Emissionen können durch Elektrifizierung nur bei entsprechenden Strommix gesenkt werden (fossiler Anteil im Stromsektor derzeit noch bei > 50 %)
- Einige Technologien bereits verfügbar und effizient (Wärmepumpe, Tauchsieder), andere in der Entwicklung fortgeschritten (E-Mobilität), viele aber noch teuer, nicht effizient, oder die Rahmenbedingungen stimmen nicht, oder es besteht noch erheblicher Forschungsbedarf (Power-to-Gas, Power-to-Product)





Bildquelle: ingenieur.de







## Herausforderungen der Sektorkopplung

#### Rahmenbedingungen

- Neue Technologien und Anwendungen benötigen neue oder angepasste Infrastrukturen (z.B. Ladesäulen, H<sub>2</sub>-Infrastruktur, Oberleitungen, etc.). Die Politik muss hierfür die Rahmenbedingungen schaffen.
- Derzeit: unterschiedliche Märkte und Infrastrukturen für unterschiedliche Energieträger. Anpassungen in Abgabe- und Umlagesystemen sind notwendig, um Sektorkopplung zu ermöglichen.
  - → Ziel: Schaffung eines "Level-Playing-Field"
- "Business-Cases" für Lösungen wie Power-to-Heat müssen entwickelt werden
- Umstellungen auch bei Verbrauchern: Akzeptanz und Nutzung neuer Technologien und Infrastrukturen











## Beispiele für Technologien der Sektorkopplung

	Niedertem- TempWärme	Prozesswärme	Origin. Stromanw.	Verkehr
Direkte Elektrifizierung	Power-to-Heat (Wärmepumpen, Tauchsieder)	Power-to-Heat, (Elektroden- kessel, Power-to- Product)		E-Mobilität, Schienenverkehr, Oberleitungs- LKWs,
Power-to-X	Power-to-Fuels, Power-to-Gas (lokal /KWK)	Power-to-Fuels, Power-to-Gas	Verbrennung, Speicher	Power-to-Fuels, Power-to-Gas
Wasserstoff	Verbrennung (lokal /KWK)	Verbrennung	Brennstoffzellen, Verbrennung	Brennstoffzellen- Fahrzeuge
Sonstige	Biomasse/Biogas, Geothermie, Solarthermie	Biomasse	Biomasse-, Biogaskraftwerke	<b>Biomasse f. Flug-</b> <b>&amp; Schiffsverkehr,</b> Biodiesel,







## **Gliederung**

- Energiewende wo stehen wir heute, wie entwickelt sie sich?
- Akademienprojekt ESYS AG Sektorkopplung
- Konzept Sektorkopplung = ganzheitliche Betrachtung des Energiesystems
- Sektoren im Überblick Wärme Verkehr Strom
- Dimension einer erfolgreichen Energiewende?
- Fazit







#### Die Sektoren im Überblick

#### Niedertemperaturwärme

- Zwei wichtige Hebel:
- 1) Weniger Energieverbrauch → Gebäudedämmung
- 2) Heizungstechnologien mit niedrigen spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen
  - → Reduktion auf mindestens 1/3 der heutigen Emizsionen notwendig (wenn Ziele ehrgeiziger: mehr Reduktion)
- Technische Optionen Elektrische Wärmepumpen, Gas-WP und Hybrid-WP, Biomasse, Solarthermie, KWK-Anlagen
- Auch Wärmenetze werden in Zukunft eine wichtige Rolle spielen

#### Industrielle Prozesswärme

- Technische Optionen: Einsatz von Biogas, Wasserstoff und Elektrifizierung
- aber: keine einheitlichen Lösungen möglich
- Wichtiges Effizienzpotenzial: Nutzung industrieller Abwärme

## Schlüsselfunktion

aber Rahmenbedingungen!







#### Die Sektoren im Überblick

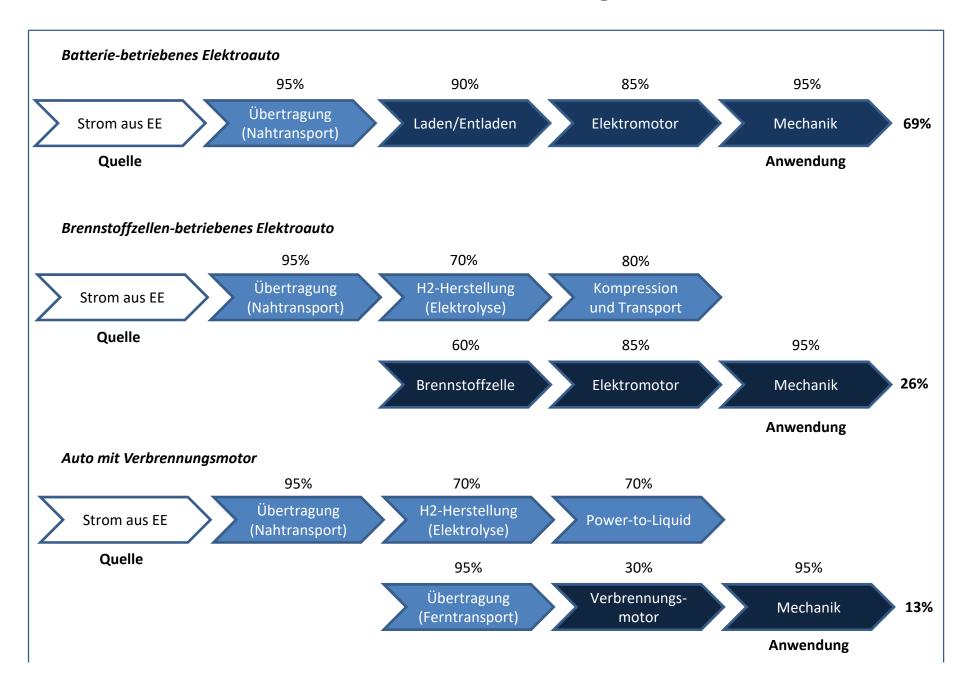
#### Verkehr

- Wichtige Ansatzpunkte:
  - Effiziente Antriebe und Einsatz erneuerbarer Energien
- Elektrofahrzeuge werden Schlüsselfunktion einnehmen, da sie Strom aus Erneuerbaren effizient nutzen
- Für Fern- und Schwerlastverkehr zeichnen sich noch keine eindeutigen Lösungen ab. In Frage kommen Wasserstofffahrzeuge, elektrische Lösungen (z.B. Oberleitungen, Batterien eher nicht), synthetische Kraftstoffe
- Für Flug- und Schiffsverkehr sind keine rein elektrischen Lösungen absehbar
  - > synthetische Kraftstoffe basierend auf EE-Strom und Biomasse notwendig

#### Kritik an gegenwärtiger Diskussion:

- Stromverbrauch von BEVs: eher 25 kWh / 100 km als 15 kWh / 100 km
- Für jeden neuen BEV: CO<sub>2</sub> Emission aus Strommix ist falsch! CO<sub>2</sub> Emission ist fossil!
- Akzeptanz für BEV außerhalb von Ballungszentren ist nicht gesichert!

## Effizienzbetrachtungen









## **Sektorkopplung und Strombedarf**

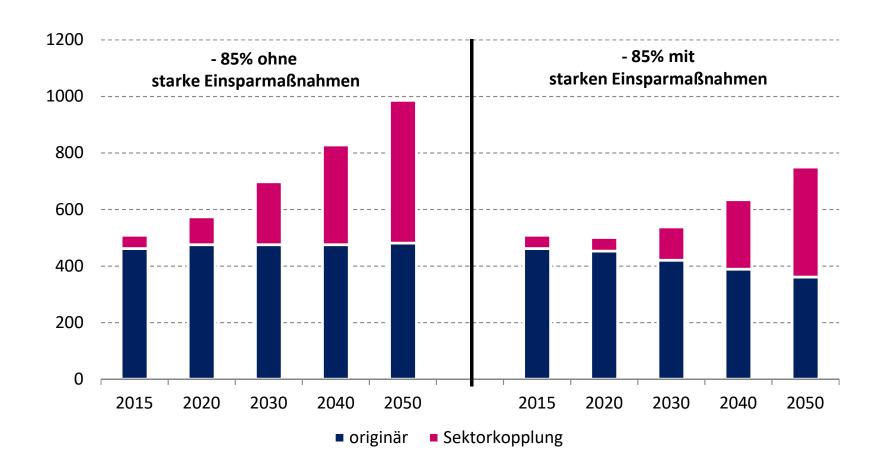
- Eine viel stärkere **Kopplung der Sektoren (integriertes Energiesystem)** ist ein zentraler Baustein, um die Klimaziele zu erreichen.
- Durch neue Anwendungen vor allem in den Wärme- und Verkehrssektoren wird der **Strombedarf** zukünftig voraussichtlich stark ansteigen (bis zu 1.000 TWh).
- Wind- und Photovoltaikanlagen müssen stark ausgebaut werden, um diesen Bedarf klimaneutral zu decken. Eine fünf- bis siebenfach höhere Kapazität an Erneuerbaren als heute könnte dafür notwendig sein (500 600 GW).
- Natürlich könnten solche Anlagen auch im Ausland stehen: PV im Sonnengürtel,
   Windkraft an Küsten, Wasserstofferzeugung im Nahen Osten.
- Vor allem bei Power-to-X können "ausländische Lösungen" ökonomisch sein.
- Die EU könnte eine sehr viel größere arbeitsteilige Rolle spielen.







## **Entwicklung Strombedarf (Modellrechnungen)**

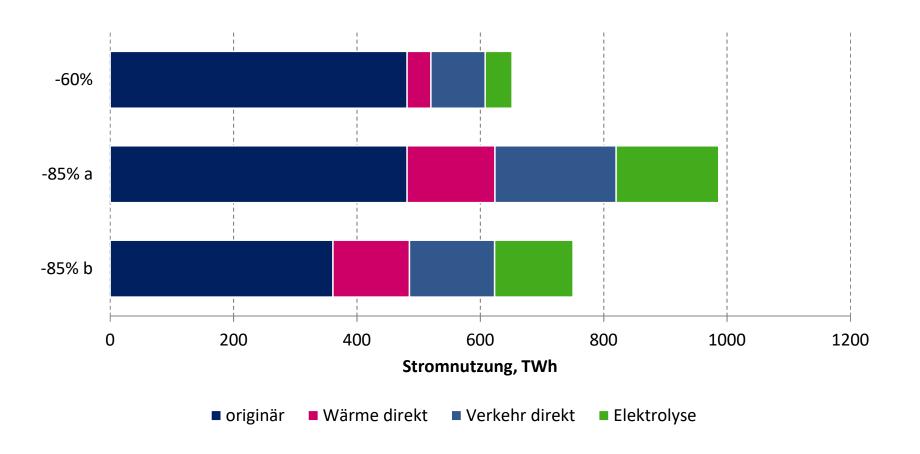








## Stromnutzung im Jahr 2050 (Modellrechnungen)









## **Gliederung**

- Energiewende wo stehen wir heute, wie entwickelt sie sich?
- Akademienprojekt ESYS AG Sektorkopplung
- Konzept Sektorkopplung = ganzheitliche Betrachtung des Energiesystems
- Sektoren im Überblick Wärme Verkehr Strom
- Dimension einer erfolgreichen Energiewende?
- Fazit

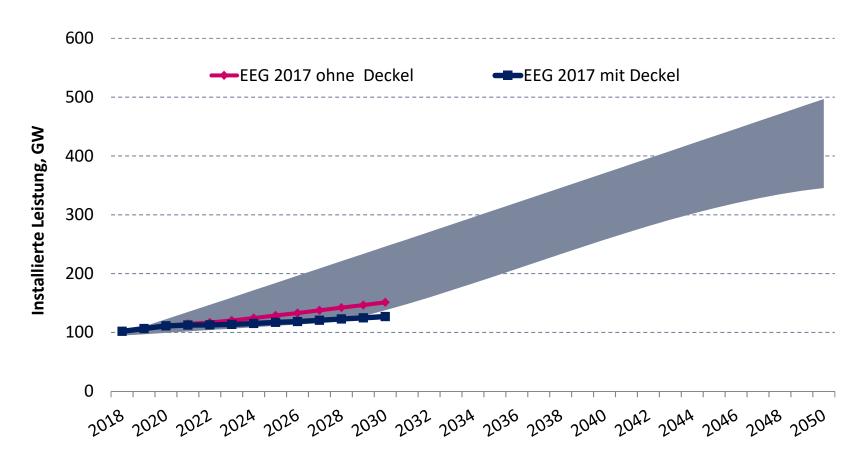






## Korridor des notwendigen Ausbaus für Wind und PV

(ohne Einbeziehung von Erzeugung im Ausland)









## Strom aus EE erfordert weitere System-Maßnahmen

**Strom** aus erneuerbaren Quellen wird zum dominanten Energieträger der Zukunft. **Fünf- bis** siebenfach höhere Kapazität könnte 2050 notwendig sein, d.h. 500 – 600 GW).

- → Erhebliche Systemkosten und –aufwand entstehen durch den Einsatz der fluktuierenden Erzeuger
- Kurz- und Langzeitspeicher notwendig
- Maßnahmen zur flexiblen Nutzung notwendig (SMART use).
- Maßnahmen zur **effizienten Nutzung von Energie** spielen eine entscheidende Rolle, u.a. auch um diesen Ausbau zu begrenzen.
- Geothermie, Solarthermie, Biomasse-Nutzung ausbauen!
- Zugleich trotz Kurzzeitspeichern und Maßnahmen der flexiblen Stromnutzung –
   Reserveleistung in ähnlicher Größe bereit stellen, d.h. 100 GW, wie heutiger
   Kraftwerkspark ("gegen kalte Dunkelflauten"): Gas- und GuD-KW.







## Ein Mix aus Energieträgern - verschiedene Systemoptionen:

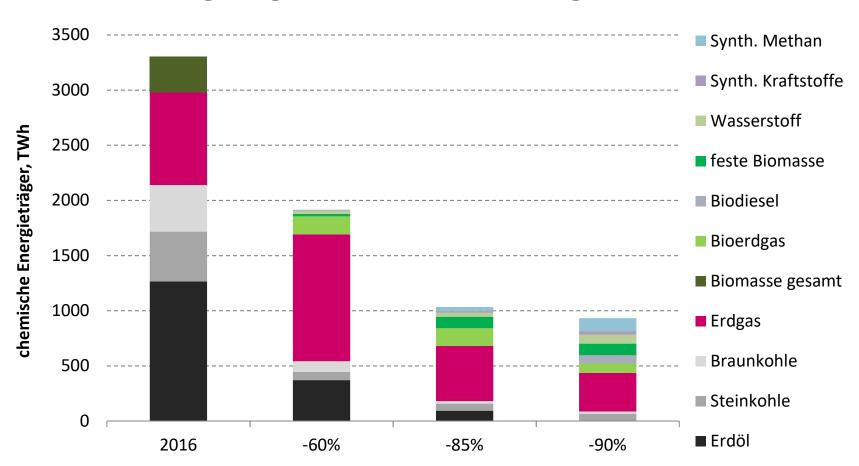
- Der gezielte Einsatz von Biomasse in den Wärme- und Verkehrssektoren sowie ein Ausbau der Geo- und Solarthermie können beitragen, den Ausbau an Wind und PV zu begrenzen und die gesellschaftliche Akzeptanz der Energiewende zu sichern.
- Gas wird noch lange eine wichtige Rolle spielen (fossiles Erdgas; zunehmend Anteile von Bioerdgas und u.U. synthetischen Gasen aus EE-Strom). Das wird aber die Reduktionsziele beeinflussen.
- **Wasserstoff** (Power-to-X) kommt aufgrund seiner vielfältigen Einsatzmöglichkeiten (Nutzungsoptionen in Verkehr, Wärmeversorgung, Stromerzeugung, Nutzung in Industrie, Weiterkonversion zu Kohlenwasserstoffen) eine zentrale Rolle zu.
- Synthetische Brenn- und Kraftstoffe (Synthetic Fuels) werden voraussichtlich unverzichtbar sein (Langzeitspeicher und Versorgungssicherheit bei Dunkelflauten, Einsatz im Schiff- und Flugverkehr und in speziellen Industrieprozessen).







## Chemische Energieträger in den Modellrechnungen









### Speicher und Reservekapazitäten

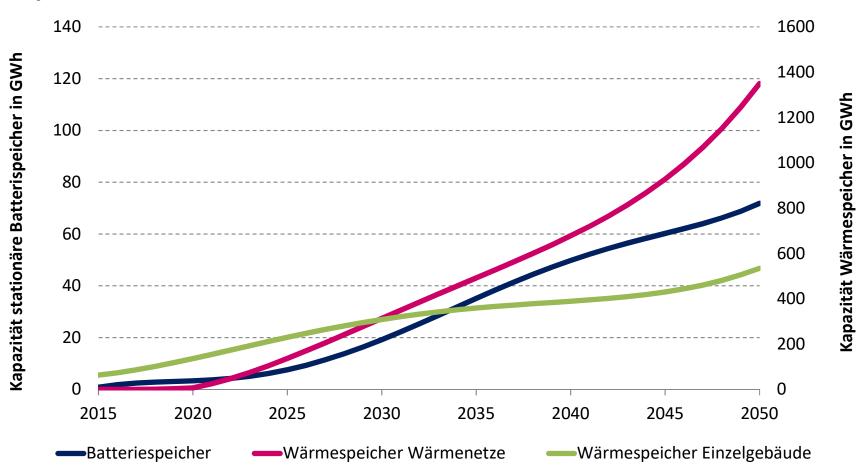
- Im künftigen Energiesystem werden flexible Reservekapazitäten benötigt, etwa in der Größenordnung des heutigen konventionellen Kraftwerkspark (je nach Randbedingungen in den Modellrechnungen bis 100 GW
- Kraftwerke werden zukünftig mit teils sehr geringen Volllaststunden betrieben
  - → Energiemarkt der Zukunft muss betriebs- und volkswirtschaftliche Lösungen bieten
- In Frage kommen bspw. Gaskraftwerke und Gasturbinen (niedrige Investitionskosten, flexibler Einsatz), hochflexible gasbetriebene KWK-Anlagen, evtl. Brennstoffzellen
- Zusätzlich werden neben flexiblen Energienutzungsmodellen Lang- und Kurzzeitspeicher benötigt, um Erzeugungsspitzen zu kompensieren
  - → Batterien, Wärmespeicher, Elektrolyseanlagen







## **Speicher**

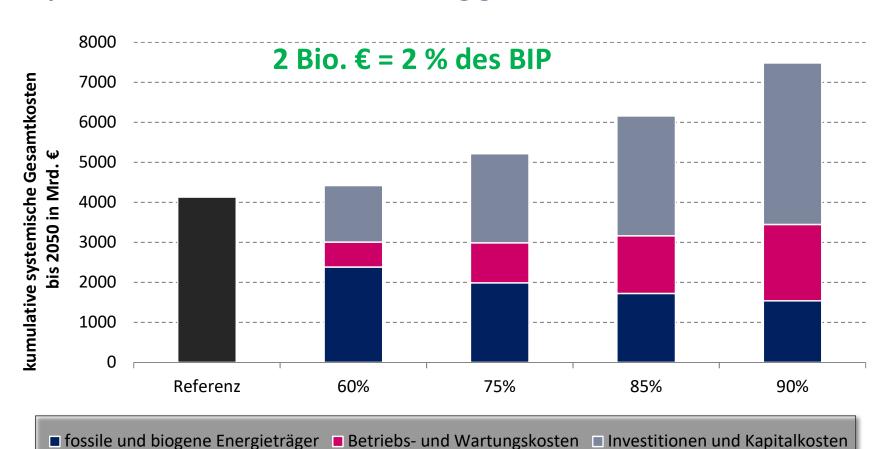








## Systemische Gesamtkosten in Abhängigkeit der Reduktionsziele









## Zentrale Ergebnisse – Systemische Mehrkosten der Energiewende

- Durch den Umbau der Energieversorgung entstehen systemische Mehrkosten
- Die jährlichen Mehrkosten liegen bei grob zwei Prozent des heutigen
   Bruttoinlandproduktes (bei allen Unsicherheiten derartiger Projektionen).
- Dabei berücksichtigt: Investitionen für Auf- und Umbau sämtlicher Infrastrukturen (bspw. Kraftwerke, Netzen, Fahrzeugflotten, Speicher), Finanzierungskosten für Investitionen, Kosten für Energieträger, Betriebs- und Wartungskosten. Einbezogen sind auch Kosten für wichtige Effizienzmaßnahmen, insbesondere für die energetische Sanierung von Gebäuden.
- In den Kosten **nicht berücksichtigt**: volkswirtschaftliche Aspekte wie lokale Wertschöpfung, Beschäftigungseffekte, Exportchancen.







## **Zentrale Ergebnisse – Handlungsbedarfe**

- Intensivierung der Konzepte zur direkten Stromnutzung (z.B. E-Mobilität, Wärmepumpen)
- Kontinuierlicher Ausbau der Erneuerbaren und der Netze
- Erforschung, Weiterentwicklung und Erprobung von Schlüsseltechnologien der indirekten Stromnutzung (Wasserstoff, Power-to-X, X = Kohlenwasserstoffe, Kohlenstoffkreisläufe)
- Kritisch: aufgrund der Lebensdauer von Technologien und Infrastrukturen (Kraftwerke, Fahrzeuge, Heizkessel) sowie Planungs- und Investitionszeiten drohen langfristige "Lock-In-Effekte"







#### **Zentrale Ergebnisse – politische Steuerungsinstrumente**

- Zentrales Steuerungsinstrument:
  - ein **einheitlicher, wirksamer, sektorübergreifender CO<sub>2</sub>-Preis**. Zugleich sollte das bestehende System an Steuern, Abgaben und Umlagen reformiert und verschlankt werden: Abbau von preislichen Verzerrungen zwischen den Sektoren, Ziel: *Level Playing Field*
- Diskutierte Optionen
  - 1) Ausweitung des EU ETS auf alle Sektoren und Einführung eines Preiskorridors
  - 2) Einführung einer europaweiten oder nationalen CO<sub>2</sub>-Steuer
  - **3) Reform des bestehenden Umlagen- und Abgabensystems** inkl. EEG; Schaffung eines Level Playing Fields zwischen Energieträgern;
- Jüngste Entwicklungen positiv:
  - Reform des ETS Systems inkl. Verknappung der Zertifikate hat gewirkt: derzeit 25
     30 € pro Tonne CO<sub>2</sub>
  - Nationale CO<sub>2</sub> Abgabe wirkt: 25 € ab 2021 bis 55 € ab 2025 pro t CO<sub>2</sub>







#### **Zentrale Ergebnisse – politische Steuerungsinstrumente**

- Gleichzeitig ergänzende Maßnahmen erforderlich, z.B. bei wirtschaftlichen oder sozialen Schieflagen oder bei Marktversagen.
  - Mögliche Gründe: Informationsdefizite, fehlende Anreize für privatwirtschaftliche Investitionen in öffentliche Güter, Differenzen zwischen langfristigem Nutzen und kurzfristiger Rentabilität.
  - Dazu ergänzende Maßnahmen (bei ständiger Evaluierung): finanzielle Anreize (Investitionszuschüsse, Steuererleichterungen, Marktanreizprogramme), staatliche Kofinanzierung von Infrastrukturen, ordnungsrechtliche Vorgaben (z.B. Emissionsgrenzwerte im Verkehr, bei Wärmeerzeugung), Forschungs- und Entwicklungsförderung, Informations- und Beratungsangebote
- Für langfristige Investitionen in klimafreundliche Technologien ist eine hohe
   Planungssicherheit entscheidend → Verbindlichkeit der Klimaschutzziele wichtig!







#### **Fazit**

- Energiewende ist generationen-übergreifendes gesellschaftliches Großprojekt
- Veränderungen erfordern eine systemische Betrachtung und ganzheitliche Optimierung des Energiesystems
- Gesellschaftliche Übereinkunft zur **Priorisierung des Ziels einer drastischen Reduktion der Treibhausgas-Emissionen** → glaubwürdige Haltung der Politik,
  Planungssicherheit, Ehrlichkeit bei den Zusammenhängen und Grenzen
- Ehrlichkeit zu den Kosten: im Mittel bis 2050 rund 2 % des heutigen BIP pro Jahr
- Chancen für Hochtechnologie- und Exportland, Entwicklung von klima- und umweltfreundlichen Technologien
- Sektoren übergreifendes Preissignal für Treibhausgas-Emissionen ist notwendig für technologieoffene und marktwirtschaftliche Steuerung
- Dazu: EU-weite, viel engere Absprache, viel mehr gemeinsames Vorgehen und gemeinsame Projekte: Die "deutsche Energiewende" muss internationaler werden!
- Konzepte für negative Emissionen entwickeln und implementieren (CO<sub>2</sub> Speicherung, CCS, CCR, BECCS,...)







# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

#### Publikationen:

- "Sektorkopplung Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems"
- "Sektorkopplung Optionen für die nächste Phase der Energiewende"

Download und weiterführende Informationen: https://energiesysteme-zukunft.de/themen/sektorkopplung/

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften Union der deutschen Akademien der Wissenschaften