Auf dem Weg zur klimaneutralen Industrie Herausforderungen und Strategien

Dr. Anna Leipprand, Dr. Sascha Samadi, Dr. Georg Holtz, Clemens Schneider • Wuppertal Institut

Dr. Volker Lenz • DBFZ

Matthias Jordan • UFZ

Dr. Tom Lorenz, Prof. Dr. Robert Pitz-Paal • DLR

Dr. Manuel Dahmen, Dr. Martin Robinius, Dr. Thiemo Pesch, Fritz Röben, Dr. Peter Markewitz • FZ Jülich

Dr. Peter Nitz • Fraunhofer ISE

Dr. Raphael Niepelt • ISFH

Prof. Dr. Roland Dittmeyer, Prof. Dr. Dieter Stapf • KIT

3. November 2020

Zentrale Fragestellungen

- **Welche technologischen Strategien für die Transformation der Industrie werden derzeit diskutiert? An welchen Strategien und Verfahren wird im FVEE geforscht?**

- **Welche Auswirkungen wird die Anwendung dieser Technologien auf das Energiesystem haben, z.B. zusätzliche Bedarfe an erneuerbarem Strom und synthetischen Energieträgern, Infrastrukturbedarf? Welche Herausforderungen ergeben sich für die Politik?**

Die Transformation der Industrie hin zur Klimaneutralität ist eine große Herausforderung – aber sie ist möglich

Bis zur Klimaneutralität in der Industrie ist es noch ein weiter Weg

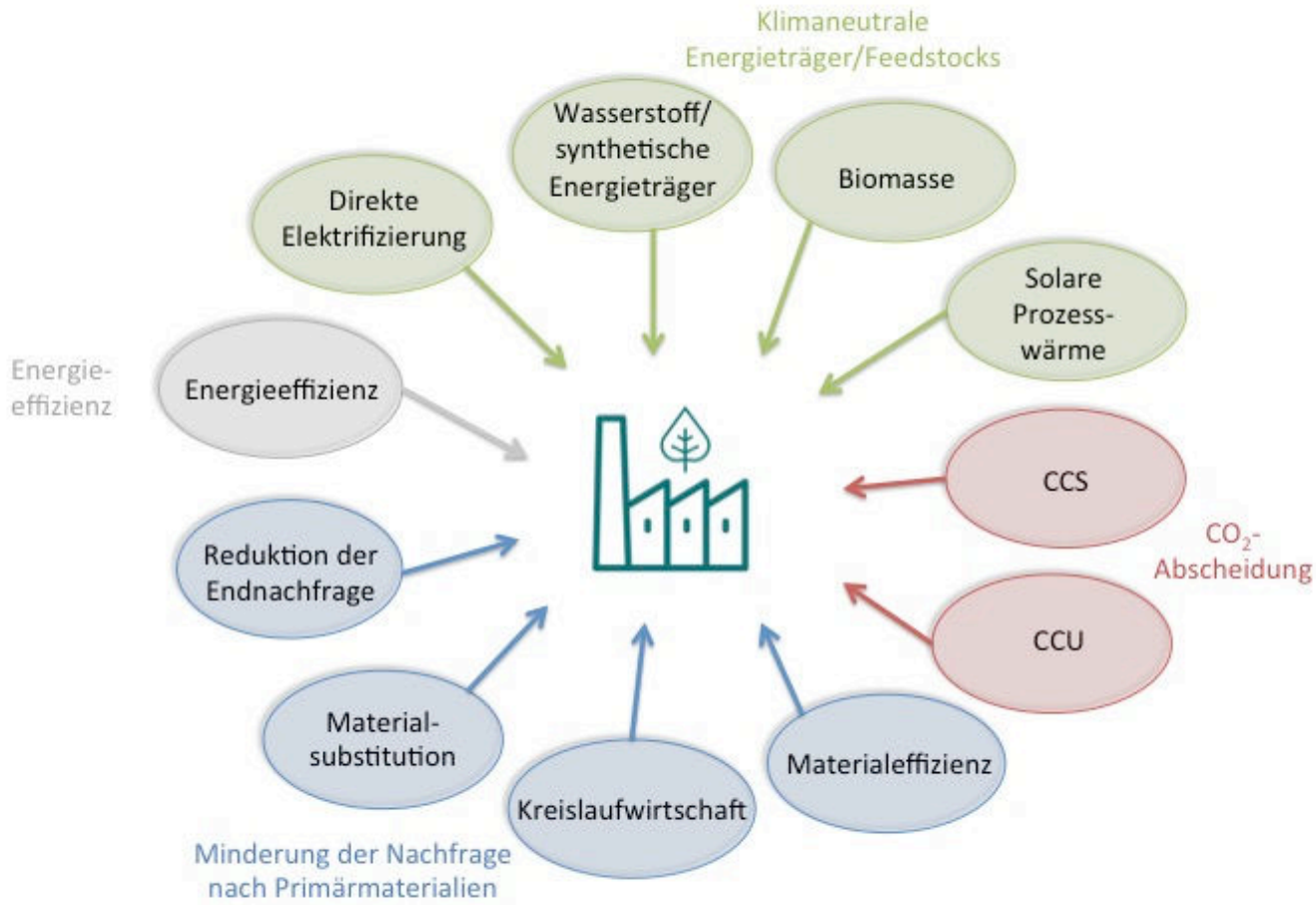
- Die Industrie stößt ein knappes Viertel der gesamten Treibhausgasemissionen in Deutschland aus
- Die Emissionen der Industrie stagnieren seit 2010 trotz Effizienzverbesserungen auf einem hohen Niveau
- Die energieintensive Grundstoffindustrie (Eisen und Stahl, Chemie und Zement) ist für mehr als die Hälfte der industriellen Emissionen verantwortlich
- Durch eine Defossilisierung im Bereich chemische Industrie und Raffinerien können zusätzlich diejenigen Emissionen adressiert werden, die in den Produkten dieser Industrien (Kraftstoffe, Kunststoffe) stecken.

Low Carbon Breakthrough Technologien für die Grundstoffindustrie als zentraler Hebel

Stahl	Mögliche technische Verfügbarkeit
Direktreduktion mit Wasserstoff und Einschmelzen im Elektrolichtbogenofen	2025-2030 (evtl. Einstieg mit Erdgas)
Chemie	**Mögliche technische Verfügbarkeit**
Wärme- und Dampferzeugung aus Power-to-Heat (Wärmepumpen und Heizkessel)	Ab 2020
Grüner Wasserstoff aus Elektrolyse (Ersatz Dampfreformierung)	2025-2035
Methanol-to-Olefin/-Aromaten-Route	2025-2030
Chemisches Recycling	2020-2030
Zement	**Mögliche technische Verfügbarkeit**
CO_2-Abscheidung mit Oxyfuel-Verfahren (CCS)	2025-2030
CO_2-Abscheidung und Elektrifizierung der Hochtemperaturwärme am Kalzinator	2030-2035
Alternative Bindemittel	2020-2030 (je nach Produkt)

Agora Energiewende & Wuppertal Institut 2019, S. 22; Auswahl von Schlüsseltechnologien.

Für Klimaneutralität in allen Branchen kann eine große Bandbreite an technologischen Strategien genutzt werden



Grafik: Wuppertal Institut

Defossilisierung von Produktionsprozessen – aber auch von Produkten!

Umsetzung der Strategien erfordert große Mengen an

- Erneuerbare Energien
- Nachhaltig produziertem Wasserstoff
- CO_2-neutralem Kohlenstoff

begrenztes heimisches EE-Potenzial ➔ Importe von grünem H2 und synthetischen Energieträgern notwendig

Technologische Strategien für die Industrietransformation werden (weiter-)entwickelt

Kreislaufwirtschaft und Recycling

Kreislaufwirtschaft: Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen

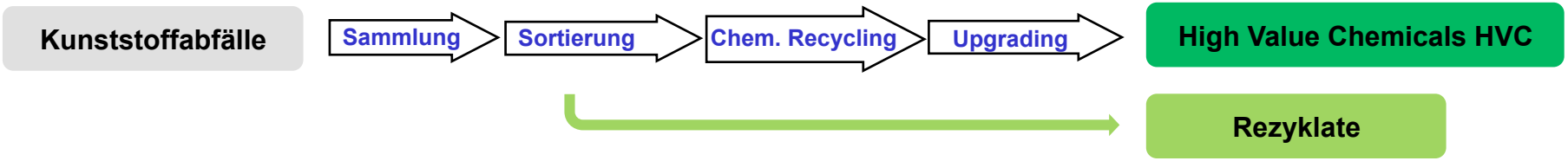
[Mt / Jahr]	EU 28+2*	Deutschland**
Kunststoffproduktion	61,8	19,9
Kunststoffverbrauch	51,2	12,6
Kunststoffabfall	29,1	6,2
- Deponie	7,2	< 0,1
- Energet. Verwertung	12,4	3,2
- Recycling	9,4 (Export 1,8)	2,9 (Export: 0,6)

Quelle: *Conversio 2018, **Conversio 2019

Rohstoffliche Verwertung von mechanisch nicht rezyklierbaren Kunststoffen

Zusätzlicher Recyclingbedarf EU bis 2030: + 11 Mt / Jahr

Beispiel: Ersatz von fossilem Steamcrackerrohstoff durch Pyrolyseöl



Bedeutung für die chemische Industrie:

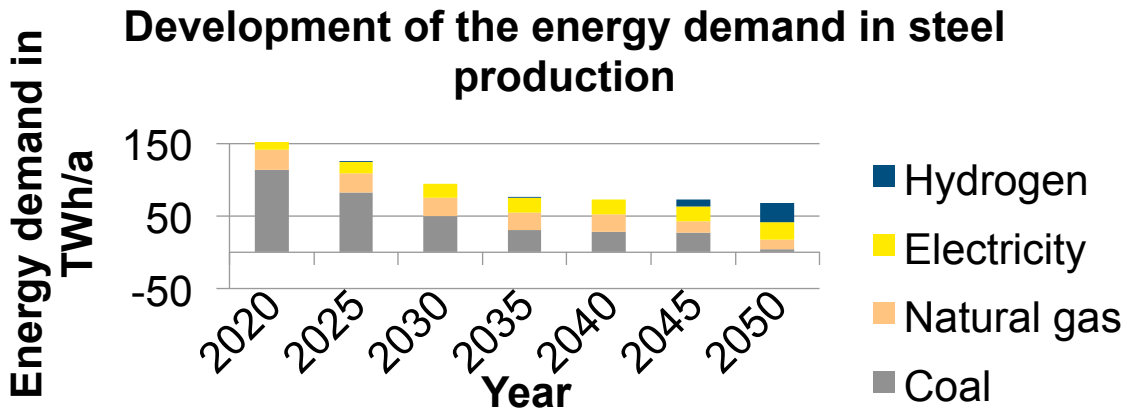
Signifikanter, kurz- bis mittelfristiger Beitrag zur klimaneutralen Produktion, sehr geringe Implementierungskosten im Vergleich zu anderen Technologien

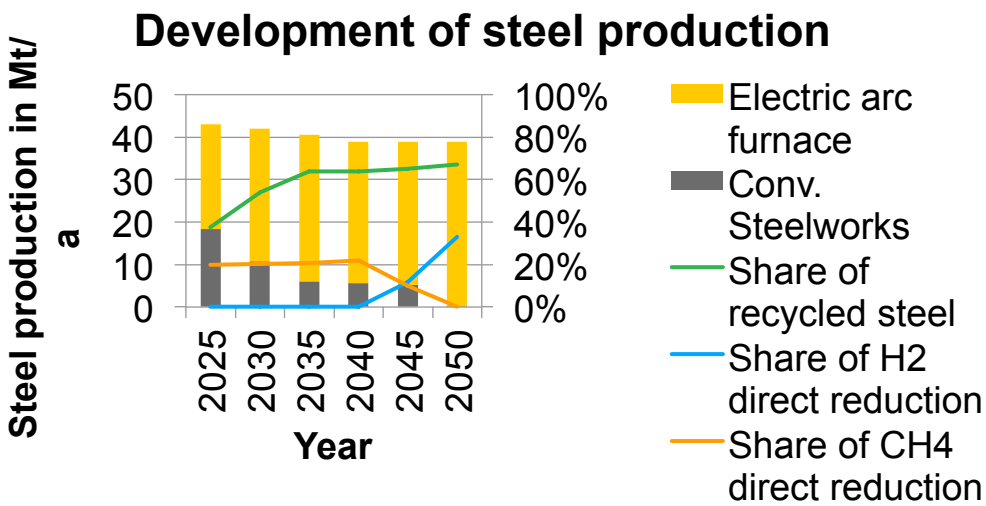
Quelle: Agora, Wuppertal Institut 2019

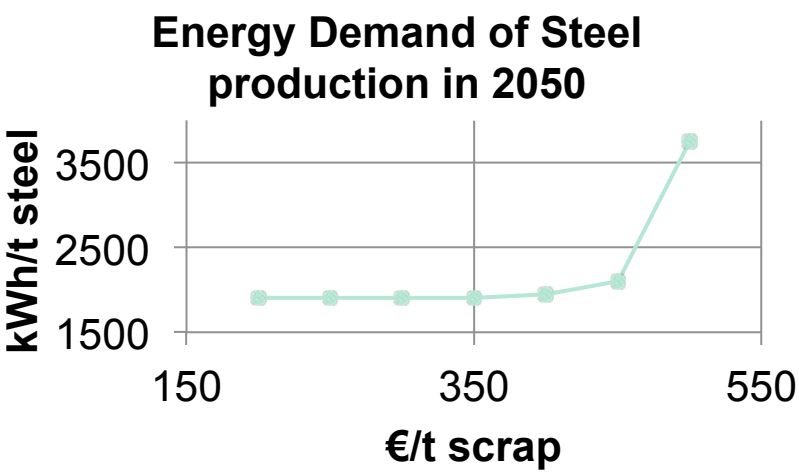
Technologieentwicklungsbedarf (Schwierige Rohstoffe, Scale-up)

Auswirkungen von Kreislaufwirtschaft am Beispiel der Stahlerzeugung

- H_2–import and steel scrap costs are decisive for steel production development





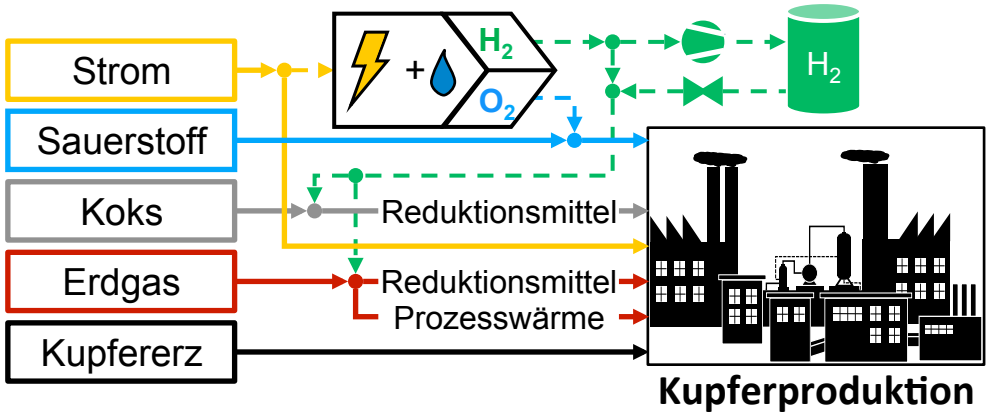


Kullmann, F., Markewitz, P., Robinius, M., Stolten, D. (2020) Modellgestützte Analysen von Maßnahmen der Kreislaufwirtschaft im deutschen Energiesystem, 16. Symposium Energieinnovation 2020, Graz, 13.2.2020

Wasserstoff und nachhaltige synthetische Energieträger

Dekarbonisierung einer Kupferproduktion

Integriertes System: Kupfer – Energie – H_2



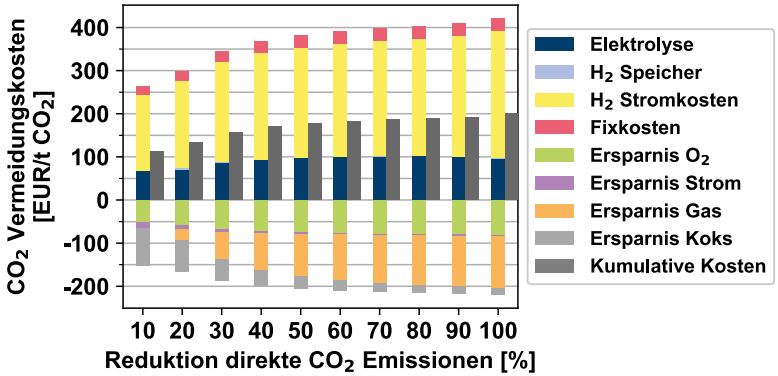
Wesentliche Annahmen

Elektrolyse
- CAPEX: 1000 EUR/kW_{el}
- Wirkungsgrad: 60 % (Heizwert)

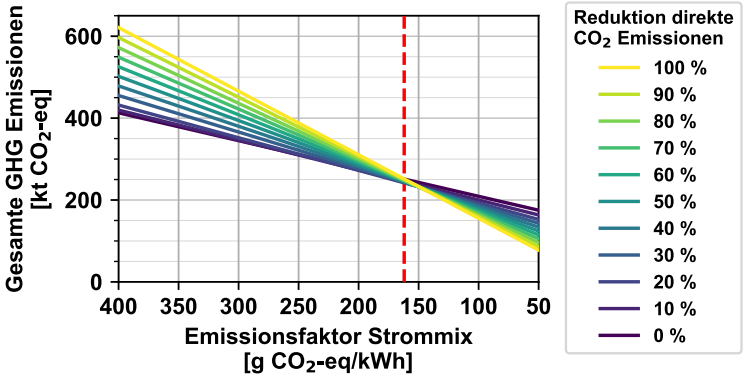
Strompreis
- Day-ahead 2019 in Deutschland

Sauerstoff
- Nutzung von O_2 im Kupferprozess

CO_2 Vermeidungskosten des Systems



Gesamte GHG Emissionen

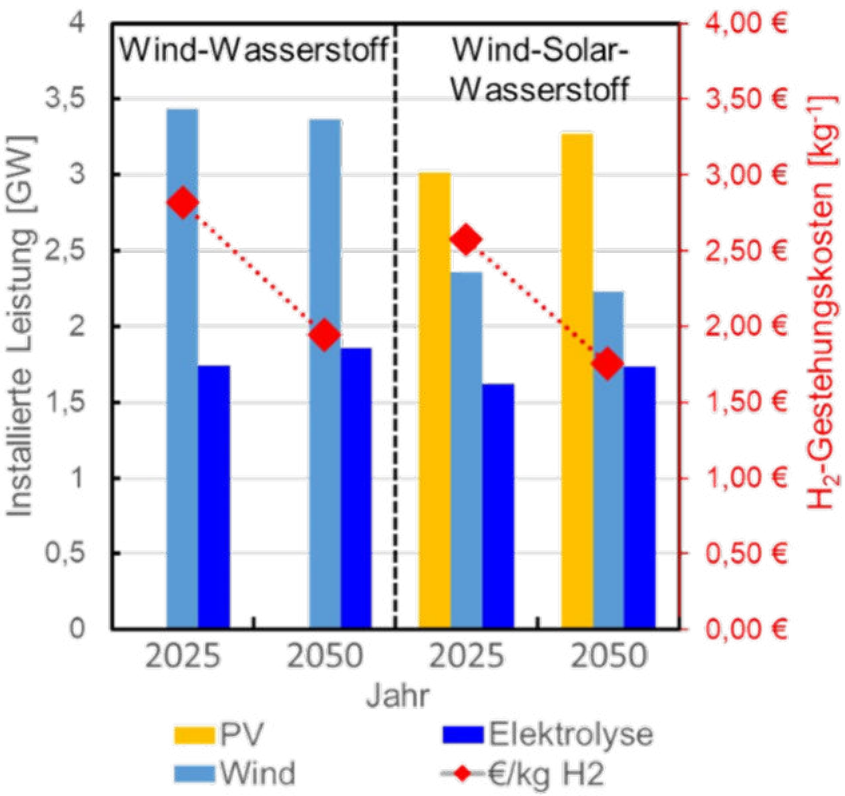


➢ **CO_2 Vermeidungskosten: 200 EUR/t**

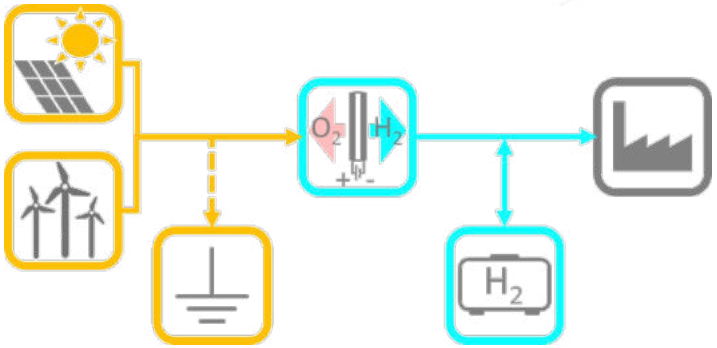
➢ **Grenzwert Strom < 160 g-CO_2/kWh_{el}**

Röben, F.T.C., Schöne, N., Bau, U., Reuter, M. A., Dahmen, M., & Bardow, A. (2020). *The Cost of Defossilization in Energy-Intensive Industries: Techno-Economic Analysis of Power-to-H_2 in Copper Production.* 10.ProcessNet Jahrestagung. 21-24.09.2020

Wind-Solar-Wasserstoff als Inselsystem: Kostengünstige Option für grünen Wasserstoff



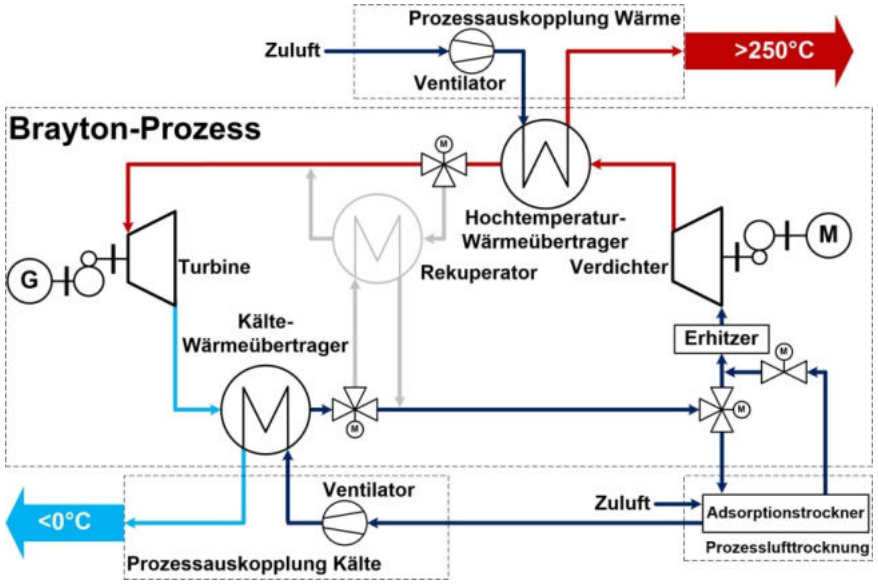
Simulation in stündlicher Auflösung
Standort: Salzgitter-Watenstedt
Wasserstoffbedarf: 200 kt/a
Betriebsstunden Elektrolyse: 4000 – 5500 h/a
Abregelung: <10%



- Günstigere Erneuerbare Energie führt zu geringeren Unterschieden bei H_2-Gestehungskosten in In- und Ausland
- Moderne WEA und günstige Elektrolyseure machen auch Inselsysteme im Inland zunehmend attraktiv
- Am untersuchten Standort ist Wind-Solar-Wasserstoff die günstigste Option für grünen Wasserstoff

Erneuerbare Prozesswärme

(Hochtemperatur-)Prozesswärme



Status quo[1]:

68% der industriellen THG-Emissionen sind energiebedingt; (2017 in D: 136 Mio. t CO_2-Äqu.)

Dekarbonisierungsansatz:

Elektrifizierung der Prozesswärmeerzeugung

Einsatz von Biomasse und Synfuels

Bsp.: Hochtemperaturwärmepumpen

Ziel: **CO_2-neutrale** Prozesswärme von 250 bis 550 °C

Planung und Bau des ersten Prototyps am DLR in Cottbus[2]

- **Nutzung von Prozessabwärme**
- **Bereitstellung von Wärme und Kälte (<0°C) möglich**
- **Hohe Energieeffizienz**

[1] Quelle: Agora Energiewende & Wuppertal Institut (2019 a)
[2] Institut für CO_2-arme Industrieprozesse

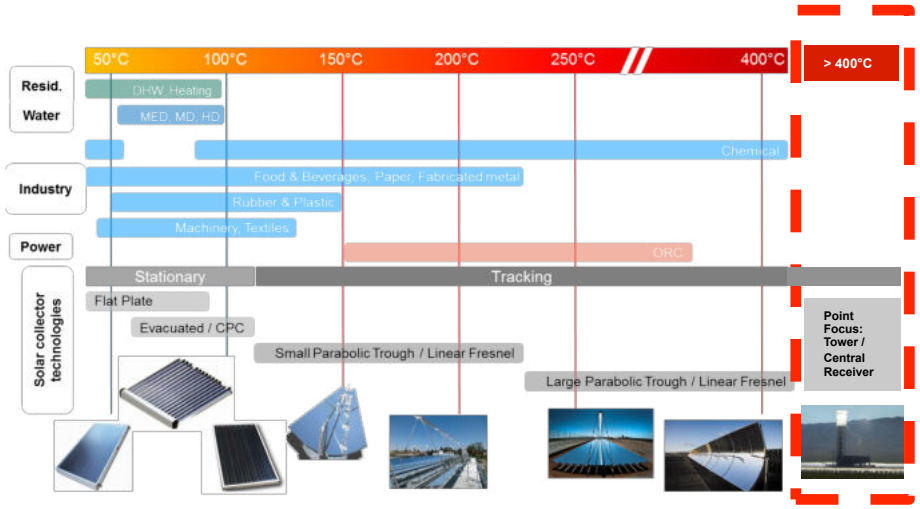
Solar erzeugte Prozesswärme

Fraunhofer ISE

DLR

Temperaturniveau vs. Kollektortechnologie:

- Niedertemperatur bis ca. 100°C
- Mitteltemperatur bis ca. 400°C
  ➔ Etablierte Technologien, FuE zum Abbau von Markthemmnissen und Kostensenkungen
- Hochtemperatur bis ca. 1000°C
  ➔ Bis 500°C Salzschmelzen, darüber innovative Ansätze und Demos, siehe nachfolgende Slide



F&E im Europäischen Kontext (Bsp.):

EU (H2020) ECRIA* Projekt INSHIP –
Integrating National Research Agendas on Solar Heat for Industrial Processes

- Technologieforschung Nieder-, Mittel- und Hochtemperaturbereich
- Vernetzung Europäischer Forschungs-einrichtungen
- Abstimmung gemeinsamer FuE-Strategie

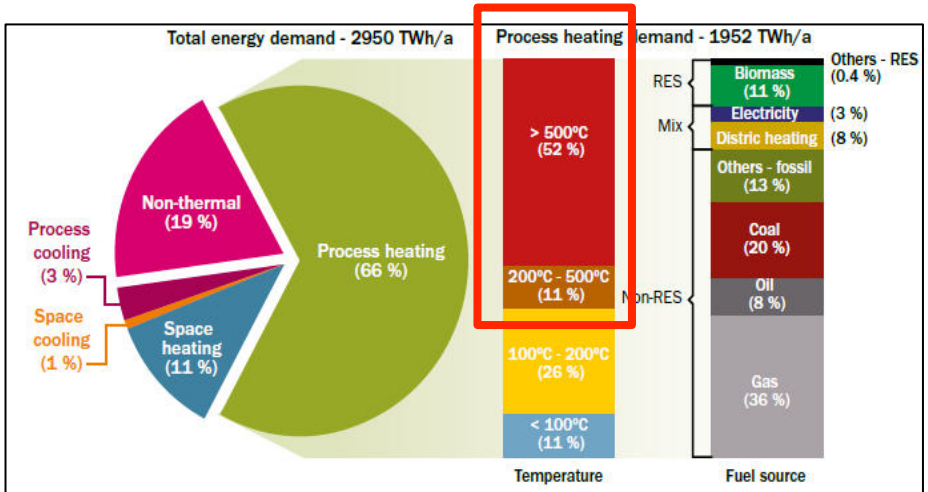
inship

European Commission

http://inship.eu

* ECRIA = European Common Research and Innovation Agenda

Solar erzeugte Hochtemperaturwärme



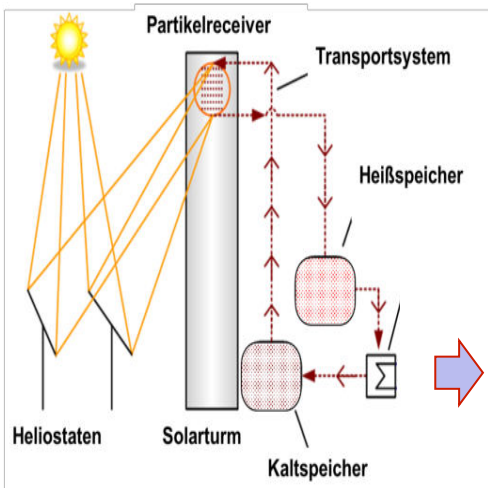
Endenergiebedarf in der Europäischen Industrie (Nutzung/Temperatur/Erzeugung)
Quelle: R. de Boer et al. Strengthening Industrial Heat Pump Innovation / Decarbonizing Industrial Heat. Whitepaper,TNO,2020.
Daten: Eurostat. Energy Balances. 2019, and: T. Fleiter et al. Heat Roadmap Europe. Deliverable 3.1: Profile of heating and cooling demand in 2015. 2017.

Technische Potenziale:

- 52% des industriellen Wärmebedarfs (EU) erfordert Temperaturen über 500 °C.
- Konzentrierende solarthermische Systeme können Temperaturen bis 1000°C oder höher bereitstellen.
- Über Wärmespeicherung lassen sich hohe solare Deckungsgrade erreichen.

Ansätze:

- Flüssigsalzsysteme bis ca. 500°C
- Partikelsysteme bis 1000°C und höher



Bauxit-Partikel, d~1 mm

Anbindung an Industrieprozess T=200 °C … 1000 °C

→ Demo-Anlage 2.5 MW_{th} bei Barilla in Italien im Bau

- Herausforderungen:
  - Kleinanlagen im Leistungsbereich bis 10 MW
  - Räumliche Integration Solarfeld in Industriegebiete
  - Demonstration Wärmekosten < 20€/MWh

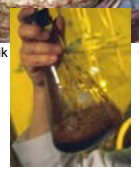
Bioenergie

Rolle der Bioenergie für die Industrietransformation

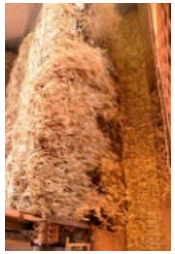
Stand der Bioenergie in der Industrie (Dtl.)

© Craig Wyzik

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Prunus_serotina_bark.jpg

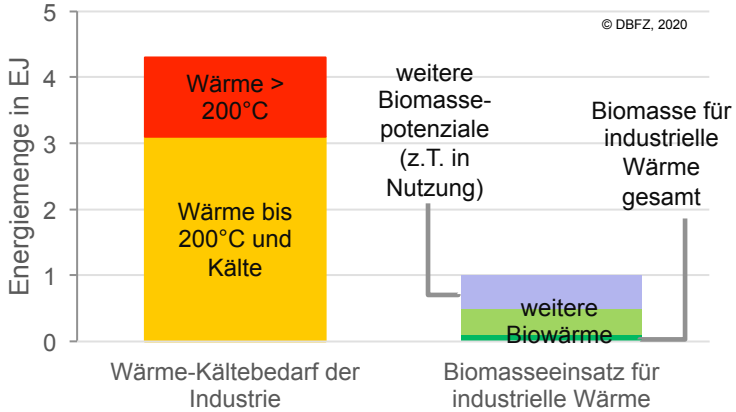

© Keith Weller

© Martin Dotzauer (DBFZ)


© Sven Schaller (DBFZ)

© Martin Dotzauer (DBFZ)

+ Gebäudeheizung

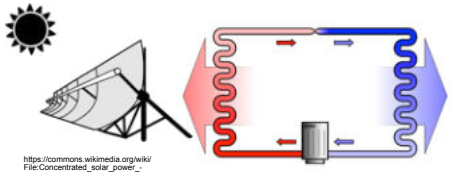


***Zwischenfazit*: Biomasse ist speicherbar, flexibel einsetzbar und vorhanden!**

Mengen sind aber begrenzt und mit Kosten verbunden!

***Konsequenz*: Einsatz nur für ausgewählte Anwendungen mit Zusatznutzen**

Wärme <200°C


https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Concentrated_solar_power_-_concentrated_solar_thermal_icon.png
© Ilmari Karonen

© DBFZ

Prozesseffekte

©Mohanrajnp
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tapping_of_liquid_steel_from_BOF.jpg

Biokoks für Stahl inkl. H_2

© DBFZ

Asche für Zement

CCS + BeCCS

$CaCO_3$ + Bio-wärme

@ José David Mendoza Terrazas

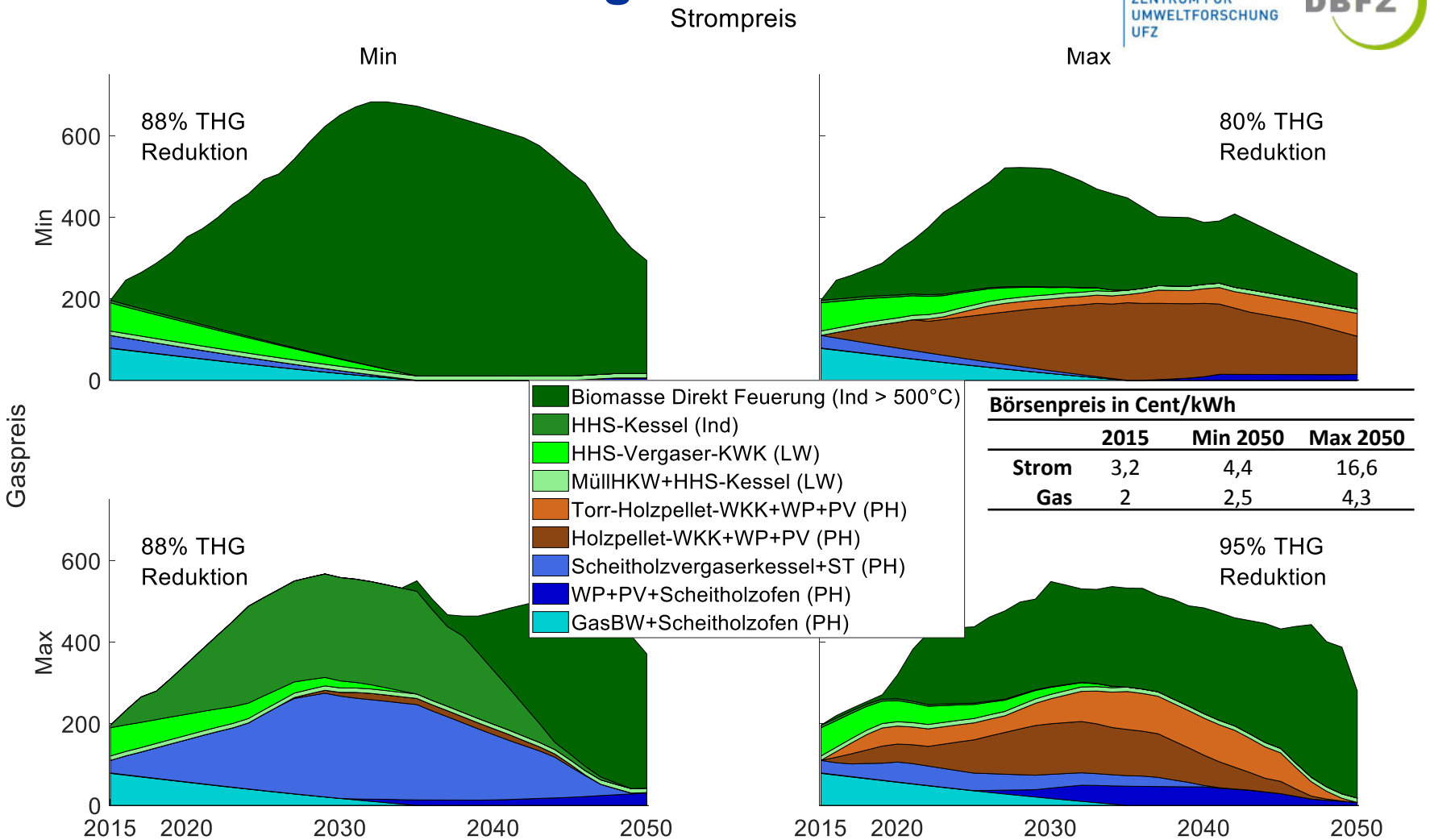
CO_2

Bioökonomie

HELMHOLTZ ZENTRUM FÜR UMWELTFORSCHUNG UFZ

DBFZ

Lösungsraum für Bioenergietechnologien unter unsicheren Entwicklungen



Börsenpreis in Cent/kWh

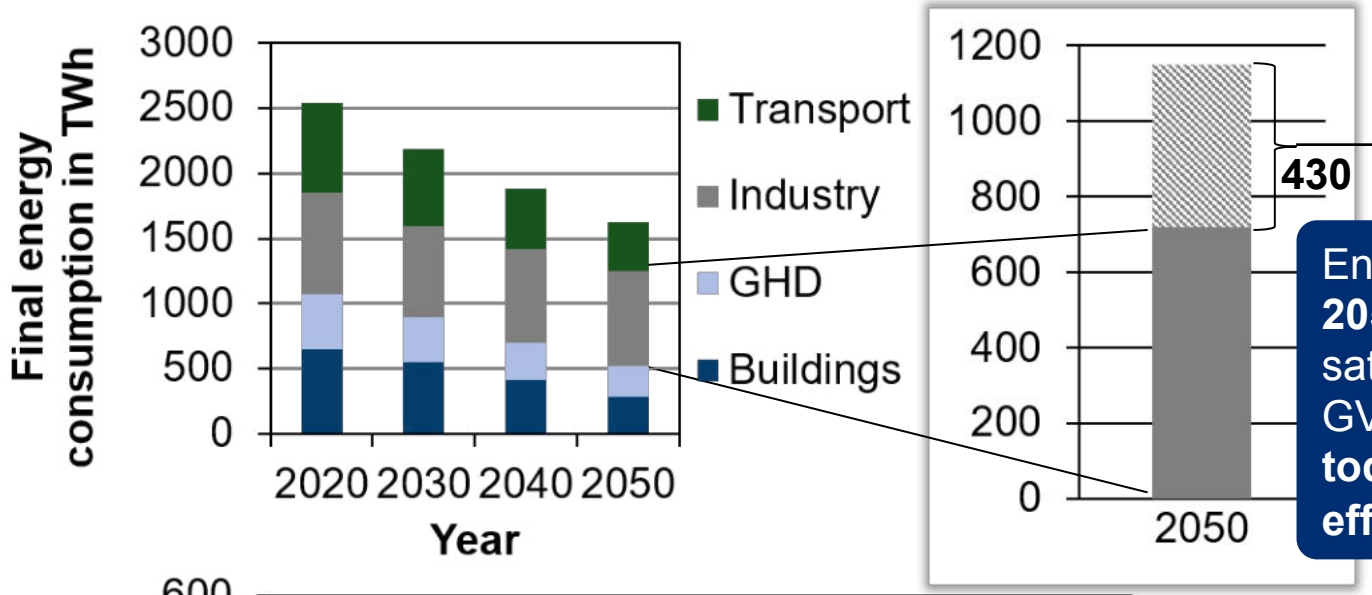
	2015	Min 2050	Max 2050
Strom	3,2	4,4	16,6
Gas	2	2,5	4,3

Marktanteile Endenergie in PJ. Bei Hybridsystemen sind nur die Biomasseanteile dargestellt.

Quelle: Lenz et al. 2020, Jordan et al. 2020.

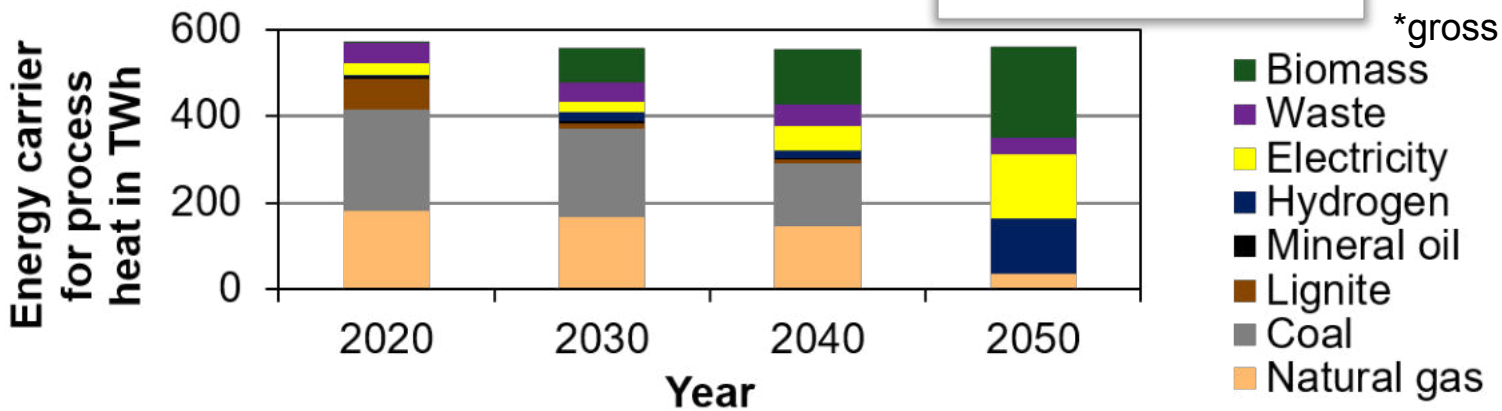
Die Umsetzung der Strategien bedeutet strukturelle Änderungen im Energiesystem und eine große Herausforderung für die Politik

Energiebedarf für Industrietransformation (bis) 2050 [1]



Energy **savings in 2050** compared to satisfying a **1.2 %/a** GVA* increase with **today's process efficiencies**.

*gross value added



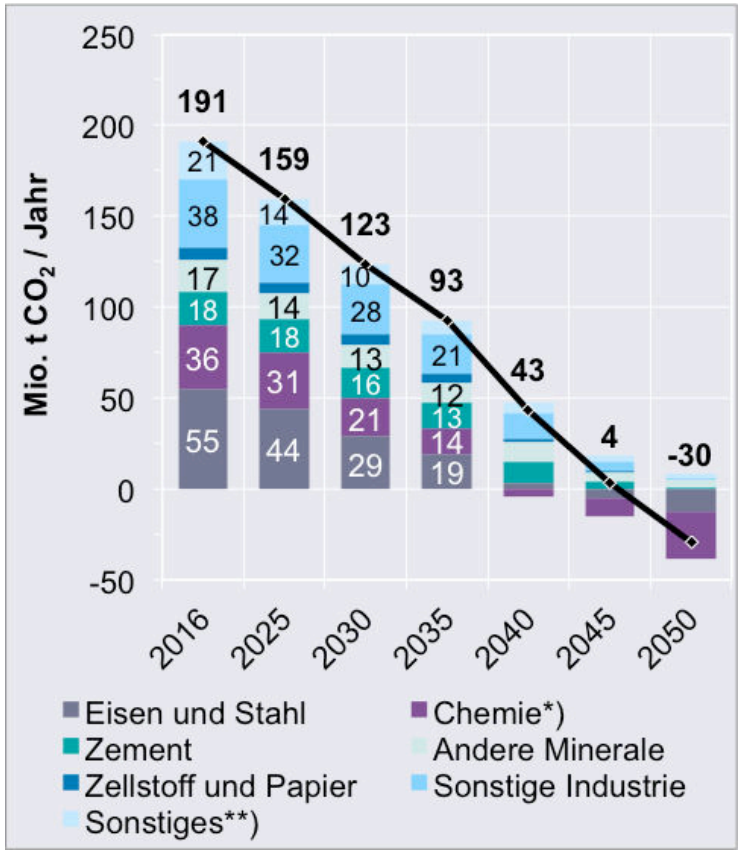
Biomass and hydrogen energy carriers, and energy efficiency measures are of significant importance for the industrial transformation.

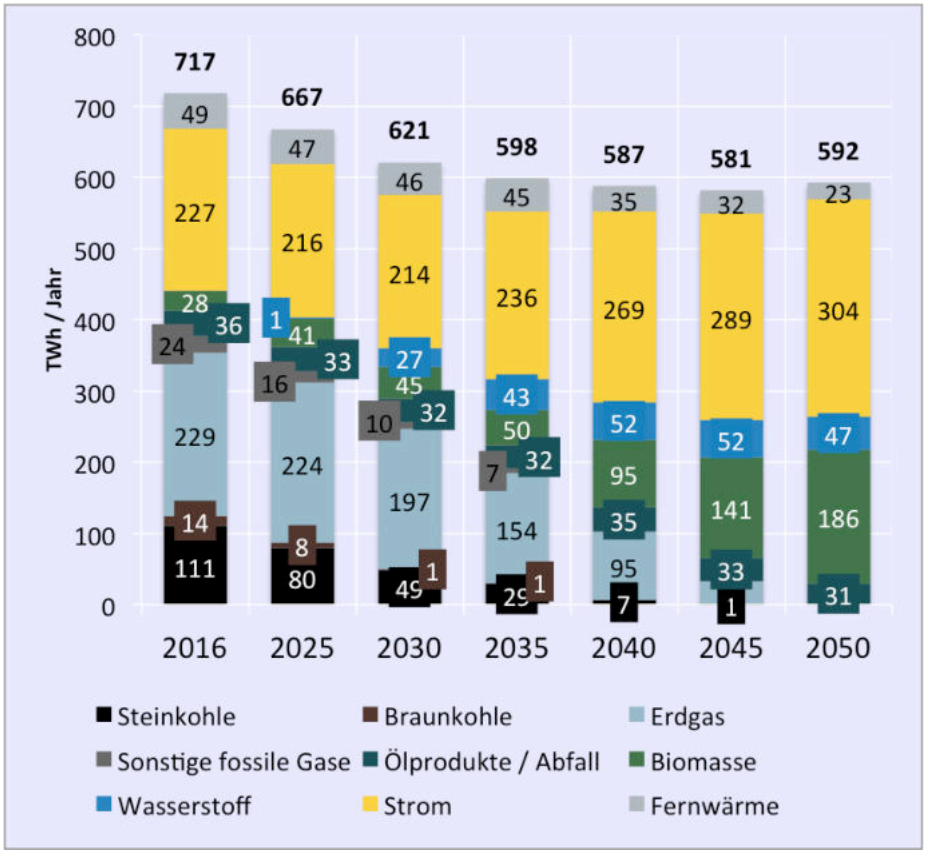
[1] M. Robinius, P. Markewitz, P. Lopion et al.: Wege für die Energiewende, Energie & Umwelt, 499. 2020.

Energiebedarf für Industrietransformation bis 2050

Wuppertal Institut

Szenario Klimaneutrales Deutschland
Entwicklung der THG-Emissionen (links) und des Endenergiebedarfs der Industrie



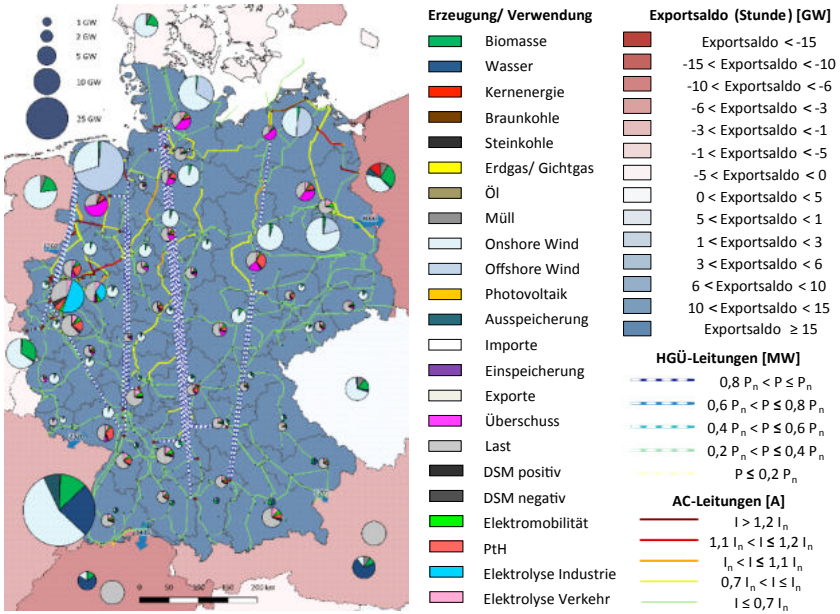


Agora Energiewende und Wuppertal Institut 2020: Klimaneutrales Deutschland

Großer Bedarf an grünem Wasserstoff in der Industrie erfordert abgestimmte Strom- und Gasnetzplanung

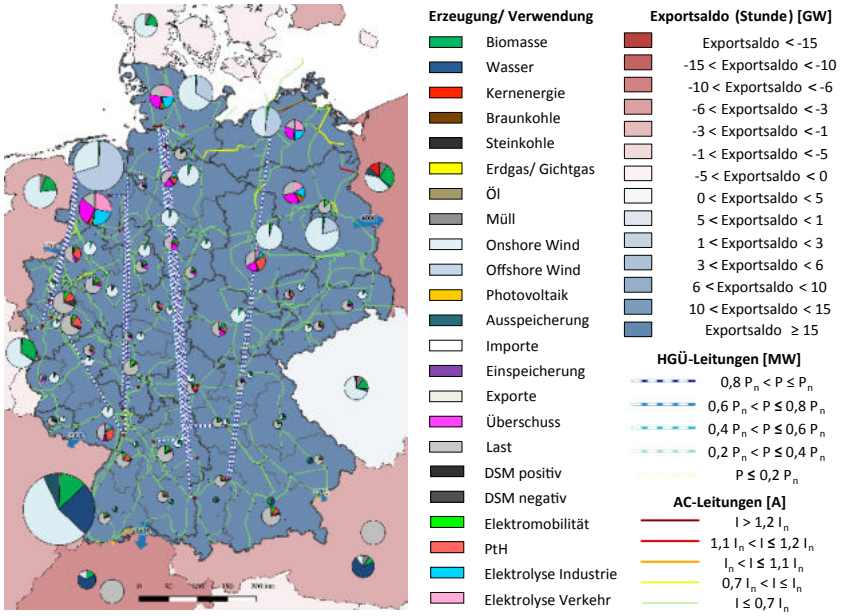
JÜLICH FORSCHUNGSZENTRUM

Lastflüsse im Zielnetz 2035 (NEP) für die Stunde mit der höchsten Last in 2050 (konventionell und PtX; Stunde 91)



Die zusätzliche Stromnachfrage für die Elektrolyse (inst. Leistung 10,25 GW) in der Stahlindustrie in NRW (v.a. Duisburg) führt zu Netzengpässen innerhalb NRWs sowie auf Zubringerkorridoren.

DC-Lastflussrechnung nach Umplatzierung der Elektrolyseure für Industrie und Verkehr



Durch die Umplatzierung der Elektrolyseure in Regionen hoher on- und offshore Windeinspeisung kann eine nahezu vollständige Auflösung der Netzengpässe in Deutschland erreicht werden.

Großer Bedarf an grünem Wasserstoff in der Industrie erfordert abgestimmte Strom- und Gasnetzplanung

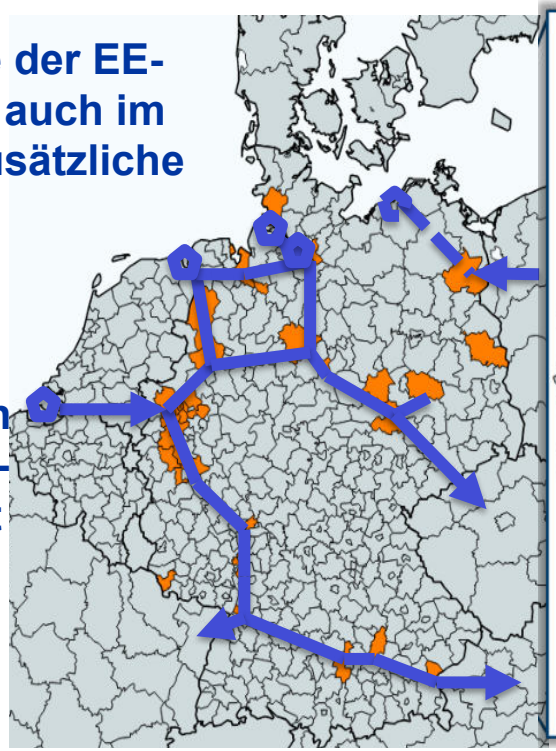
Wuppertal Institut

JÜLICH FORSCHUNGSZENTRUM

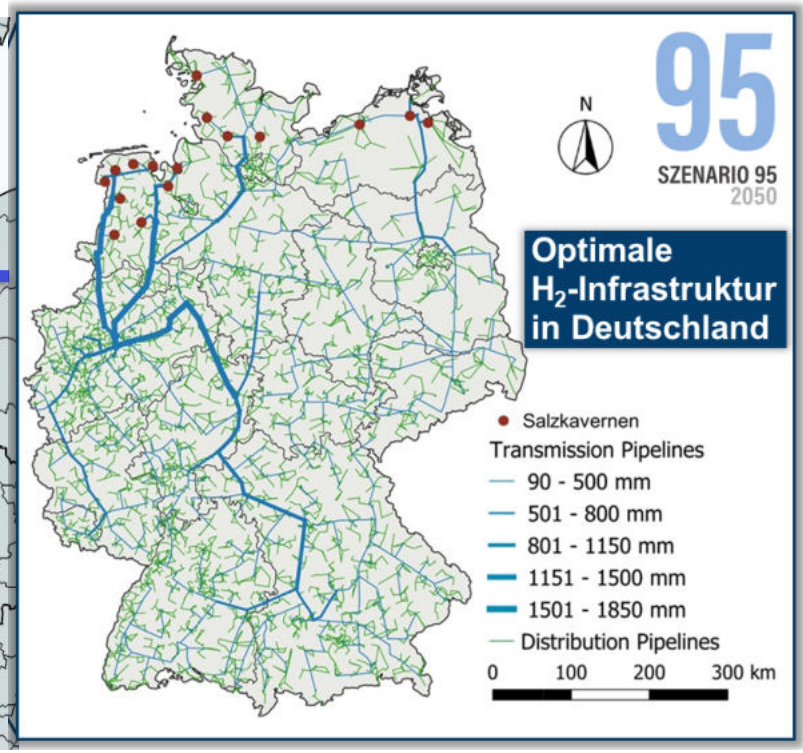
Elektrolyse in der Nähe der EE-Stromerzeugung – ggf. auch im Ausland – vermeidet zusätzliche Belastungen für das Stromsystem.

Für den Transport zu den großen Abnehmern wird eine H2-Transport-infrastruktur gebraucht

➔ Integrierte Strom- und Gasnetzplanung notwendig



Wuppertal Institut, Modellierungsergebnisse, Wasserstoff-Netz: Eigene Annahme



M. Robinius, P. Markewitz, P. Lopion et al.: Wege für die Energiewende, Energie & Umwelt, 499. 2020.

Nebenwirkungen beim Einsatz von Low Carbon Breakthrough Technologien in den Prozessen

Verlust der Kohlenstoffquelle	Ausgewählte betroffene Prozesse
Mit dem Ersatz von Erdgas (oder Erdöl) durch H_2 fehlt vielen Industrieprozessen die Kohlenstoffquelle.	**Harnstoffsynthese** für z.B. Düngemittelproduktion • ⅔ des CO_2 aus der vorgeschalteten Ammoniaksynthese wird zu Harnstoff umgesetzt **Erdölraffinerien** • Kann der immens hohe Kohlenstoffbedarf durch Biomasse und CCU gedeckt werden?
Verlust von Zwischenprodukten	**Ausgewählte betroffene Prozesse**
Mit der Umstellung auf Schlüsseltechnologien verschwinden auch Zwischenprodukte, die Ausgangsstoffe für andere Prozesse sind.	**Zementwerke** • Wird in den Stahlwerken auf Direktreduktion mit H_2/ Erdgas umgestellt, fehlen die Hüttensande für die Zementwerke **Landwirtschaft/Papierindustrie** • Der zunehmende Einsatz von Biomasse konkurriert u.A. mit der Papier- (Cellulose aus z.B. Holz & Pflanzenresten) und Futtermittelherstellung (Stroh etc.)
Fehlende Sekundärrohstoffe (Recycling)	**Ausgewählte betroffene Prozesse**
Ohne effektivere Sammel- und Sortiersysteme können neue Abfallströme nicht genutzt werden. Der Transport der dezentral anfallenden Abfälle ist oft unwirtschaftlich.	**Stahlerzeugung (Hochofenroute)** • CO_2-Reduktion durch Erhöhung des Schrottanteils **Metallproduktion** • CO_2-Reduktion durch Nutzung von Elektronikschrott, Magnetrecycling aus E-Motoren (Seltene Erden) etc. **Kunststoffindustrie** • Mehr recycelbare Kunststoffe & sortenreine Sammlung

Herausforderungen für die Politik

EUROPÄISCHE KOMMISSION

Brüssel, den 11.12.2019
COM(2019) 640 final

MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN EUROPÄISCHEN RAT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN

Der europäische Grüne Deal

DE DE

- Kreislaufwirtschaft priorisieren
- Technologien und Energieträger (auf der Zeitschiene) effizient einsetzen (Biomasse, H2)
- F&E zu neue Technologien mit hohem Klimaschutzpotenzial fördern
- Versorgung mit grünen Energieträgern zu wettbewerbsfähigen Preisen ermöglichen
- Frühzeitige Investitionen in LCBT ermöglichen, auch bei nicht ausreichend hohem CO_2-Preis (z.B. Carbon Contracts for Difference)
- Infrastrukturaufbau unter Unsicherheit ermöglichen
- Importoptionen für grüne synthetische Energieträger entwickeln
- Märkte und Preissignale umgestalten, international faire Wettbewerbsbedingungen schaffen

IN4 CLIMATE .NRW

➔Strategien im Dialog zwischen Wissenschaft, Politik und Industrie entwickeln

Vielen Dank!

Ansprechpartner
Dr. Anna Leipprand, Dr. Sascha Samadi, Dr. Georg Holtz, Clemens Schneider • Wuppertal Institut
Dr. Volker Lenz • DBFZ
Matthias Jordan • UFZ
Dr. Tom Lorenz, Prof. Dr. Robert Pitz-Paal • DLR
Dr. Manuel Dahmen, Dr. Martin Robinius, Dr. Thiemo Pesch, Fritz Röben, Dr. Peter Markewitz • FZ Jülich
Dr. Peter Nitz • Fraunhofer ISE
Dr. Raphael Niepelt • ISFH
Prof. Dr. Roland Dittmeyer, Prof. Dr. Dieter Stapf • KIT