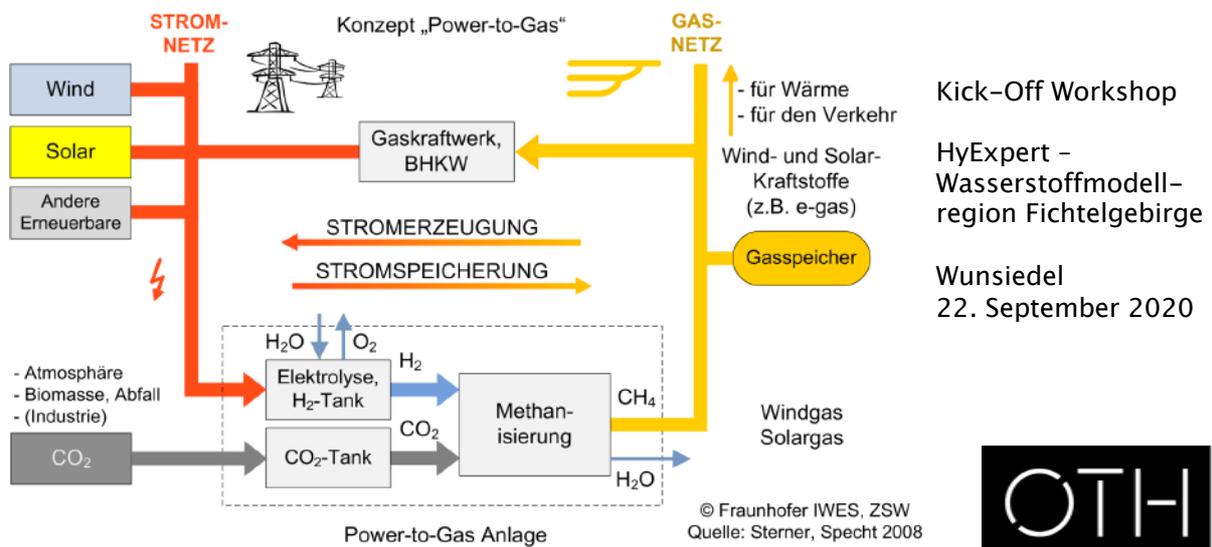


Vom Klimaschutz zum Wasserstoff in Verkehr und Industrie – jetzt regional handeln!

Prof. Dr.-Ing. Michael Sterner et al.

Forschungsstelle Energienetze und Energiespeicher FENES, OTH Regensburg



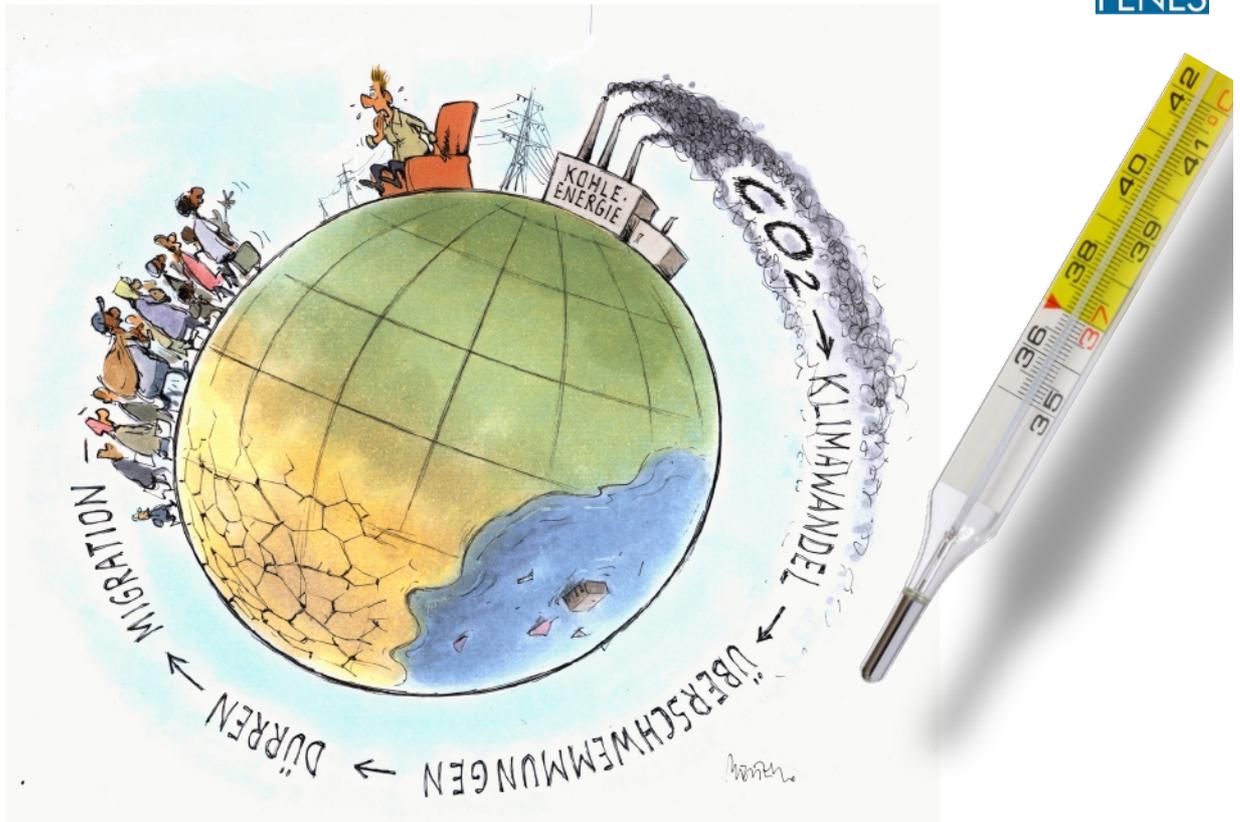
Inhalt



- 1) Klimaschutz = Energiewende
- 2) Überblick: Wasserstoff und Sektorenkopplung
- 3) H₂ & PtX im Verkehr
- 4) H₂ & PtX in der Industrie
- 5) Wirkungsgrade, Kosten, Regulatorik
- 6) Regional gewinnt! Beispiel Sonneberg & Kempten

Zeit zu handeln...

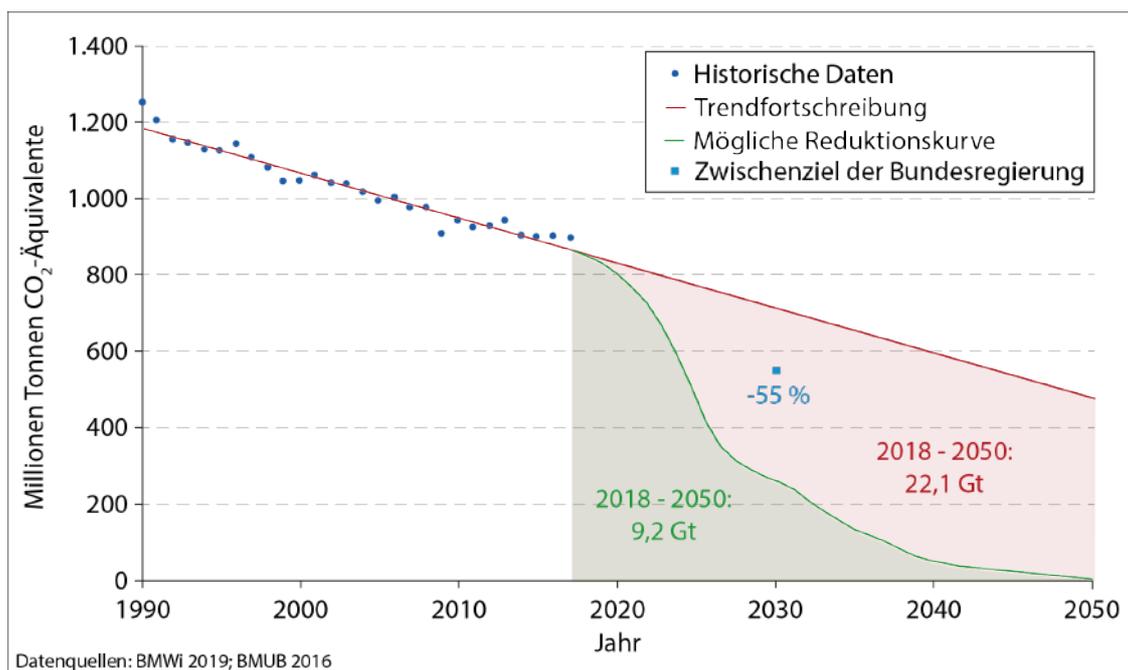
Paris: 1,5 °C



Quelle: Mester, 2015

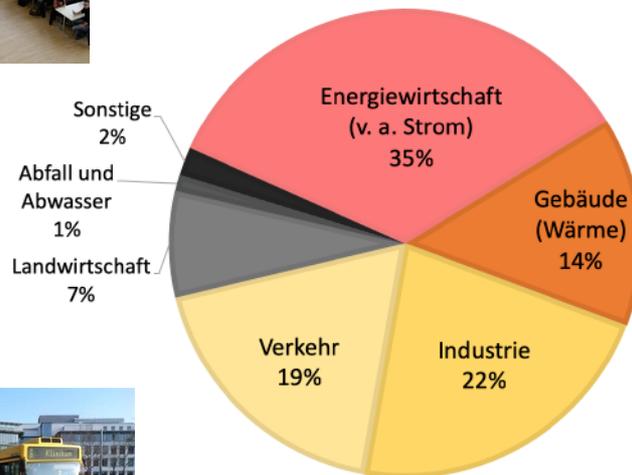
Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 3

Exit-Strategie für Klimakrise - in 30 Jahren auf Null Deutsches Klimaziel für 2030 nicht ausreichend



Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 4

CO₂-äq. Emissionen in Deutschland nach Sektoren



Quelle: UBA, 2019

Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 5

Paris umsetzen = H₂ / Power-to-X wird Weltmarkt BRD ist führend, Entwicklung aber zunehmend international



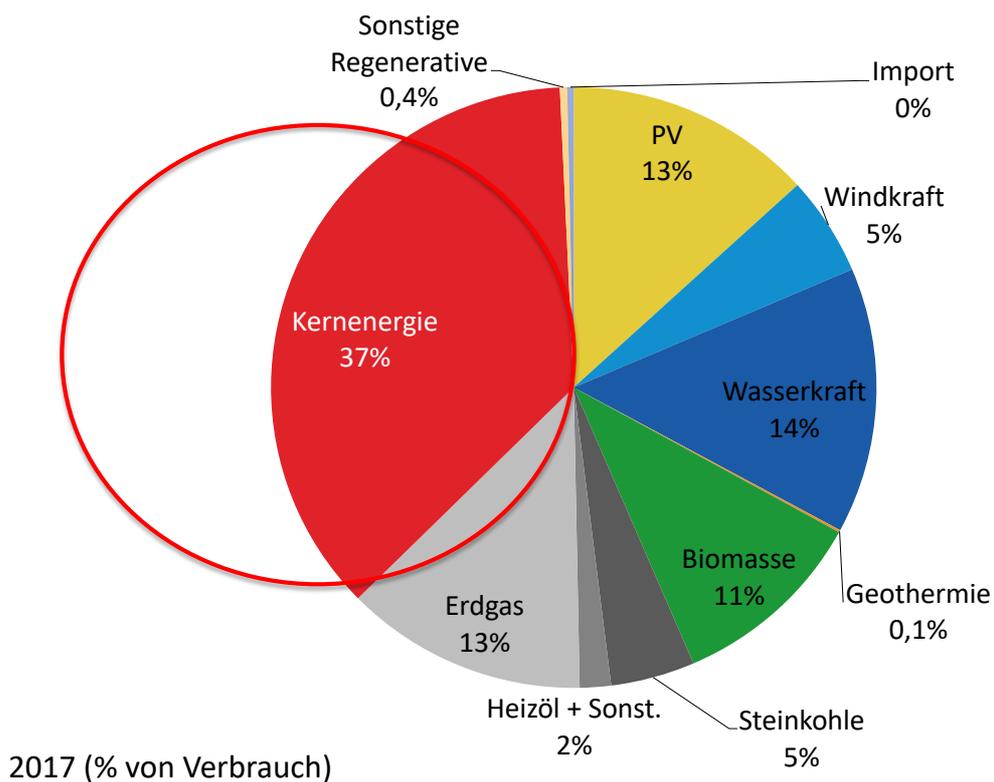
Quelle: M. Thema, F. Bauer, and M. Sterner, "Power-to-Gas: Electrolysis and methanation status review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 112, pp. 775–787, 2019.

Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 6

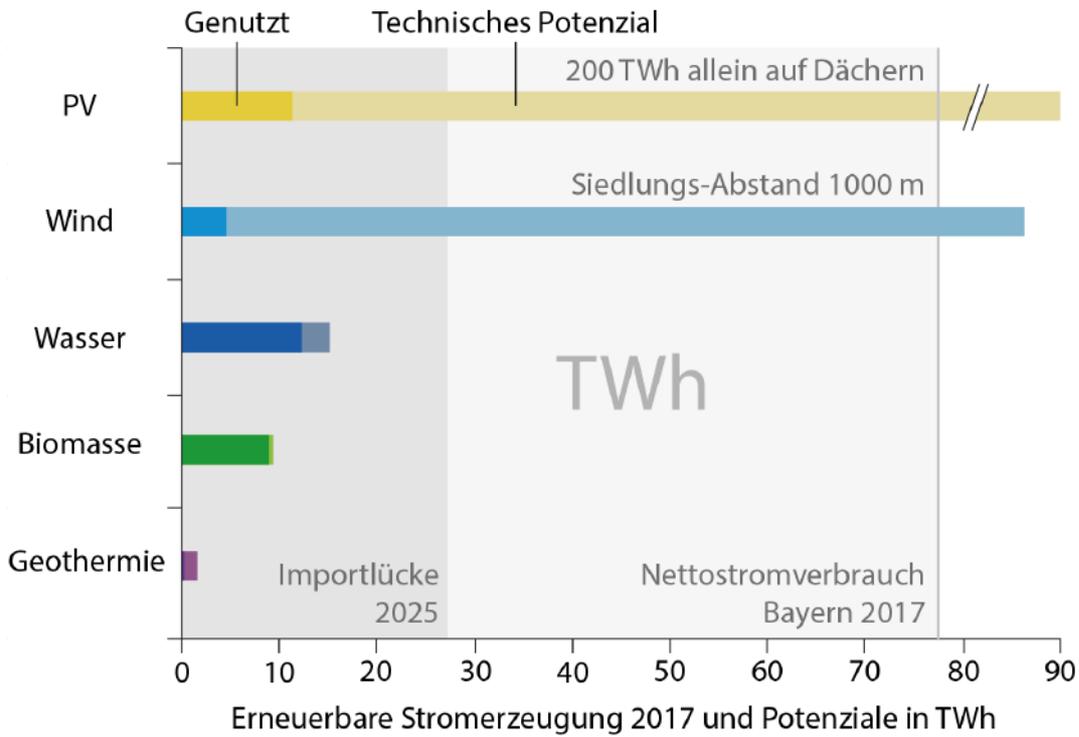
- 1) Klimaschutz = Energiewende
- 2) **Überblick: Wasserstoff und Sektorenkopplung**
- 3) H₂ & PtX im Verkehr
- 4) H₂ & PtX in der Industrie
- 5) Wirkungsgrade, Kosten, Regulatorik
- 6) Regional gewinnt! Beispiel Sonneberg & Kempten

Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 7

Grüner Wasserstoff braucht grünen Strom Stromerzeugung Bayern – Atomausstieg fordert heraus



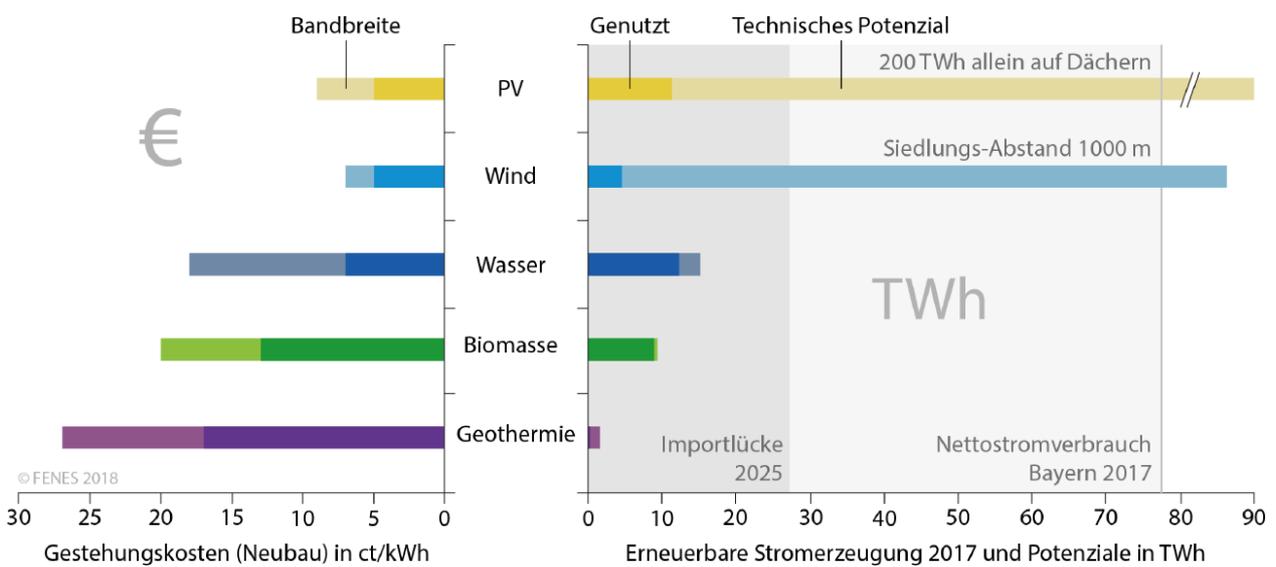
Erneuerbare Energien in Bayern Potenzial



Quelle: Sterner et al. zum Energiegipfel 2018, Fraunhofer, BMWi, etc.

Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 9

Erneuerbare Energien in Bayern Kosten vs. Potenzial

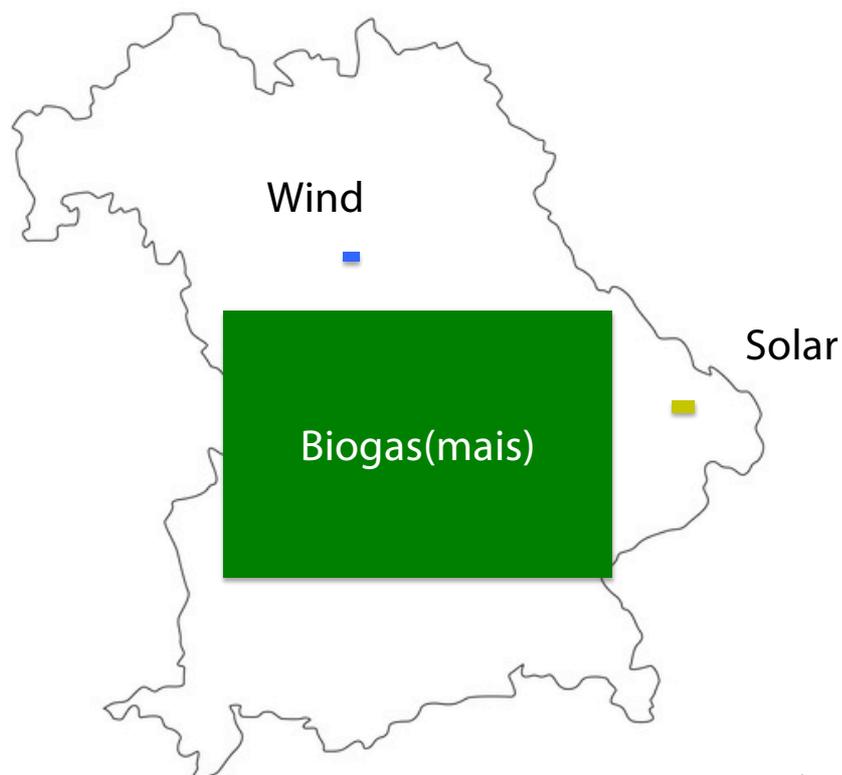


Zum Vergleich: Kosten neuer Atom- / Kohle- / Gaskraft: 10-12 €-ct/kWh
→ doppelt so teuer wie Wind und Solarstrom

Quelle: Sterner et al. zum Energiegipfel 2018, Fraunhofer, BMWi, etc.

Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 10

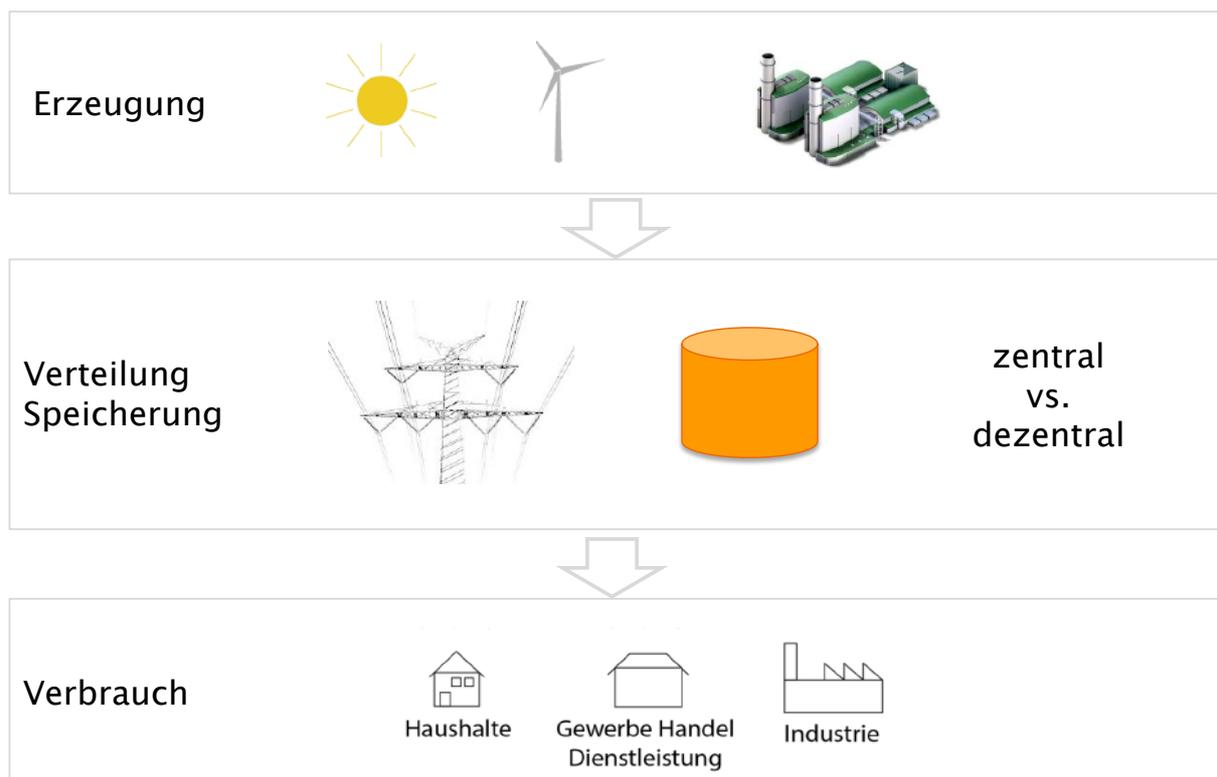
Flächenverbrauch für den Ersatz aller bay. AKW



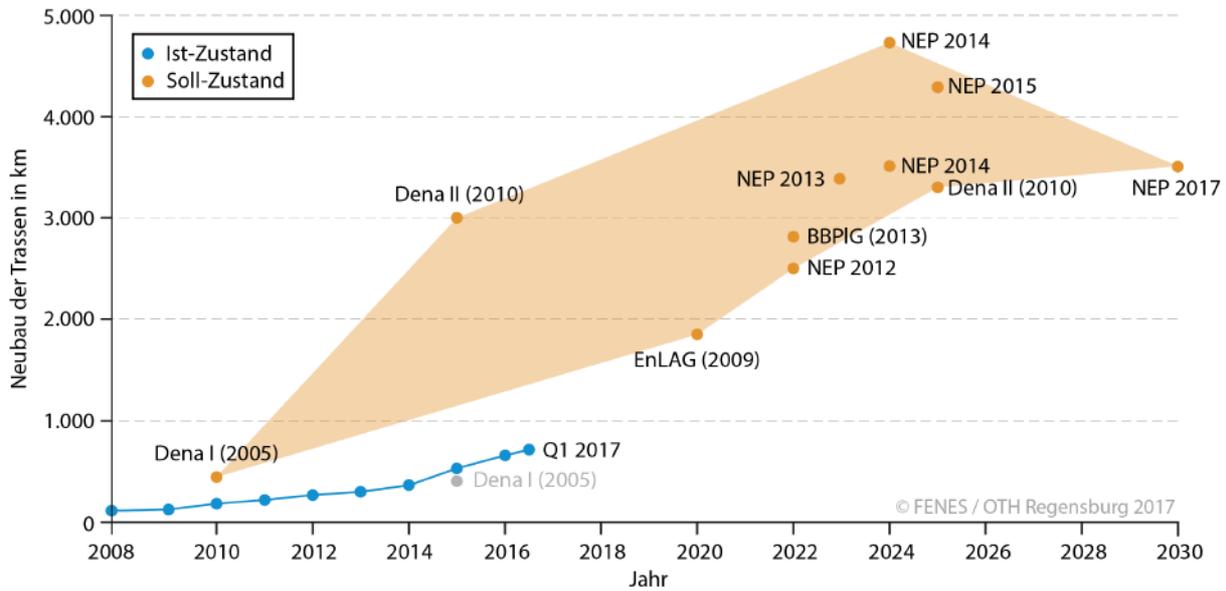
Flächenbedarf exemplarisch, Nicht maßstabsgetreu

Quelle: Sterner, eigene Berechnungen auf Basis der Potenziale, 2014 & DBFZ, 2008, Fraunhofer IWES, 2011 - 14 Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 11

Gesamtbild: Wir brauchen Netze und Speicher



Gegenüberstellung des geplanten Netzausbaus und der bis dato umgesetzten Trassenkilometer

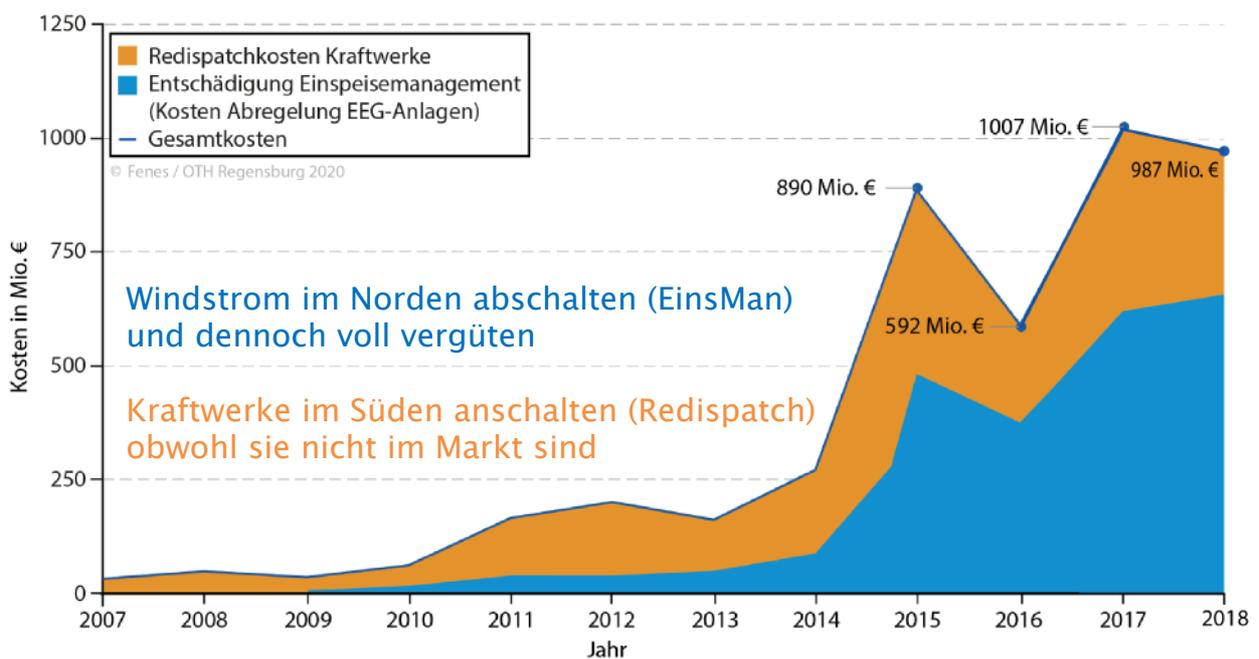


Erdverkabelung + 15 Mrd. EUR

Quelle: Sterner et al – FENES BMBF CCU, 2016; Datenbasis: BNetzA Monitoringberichte

Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 13

Derzeitige Lösung sehr ineffizient (0 % Wirkungsgrad) & sehr teuer (1 Mrd. € / a)

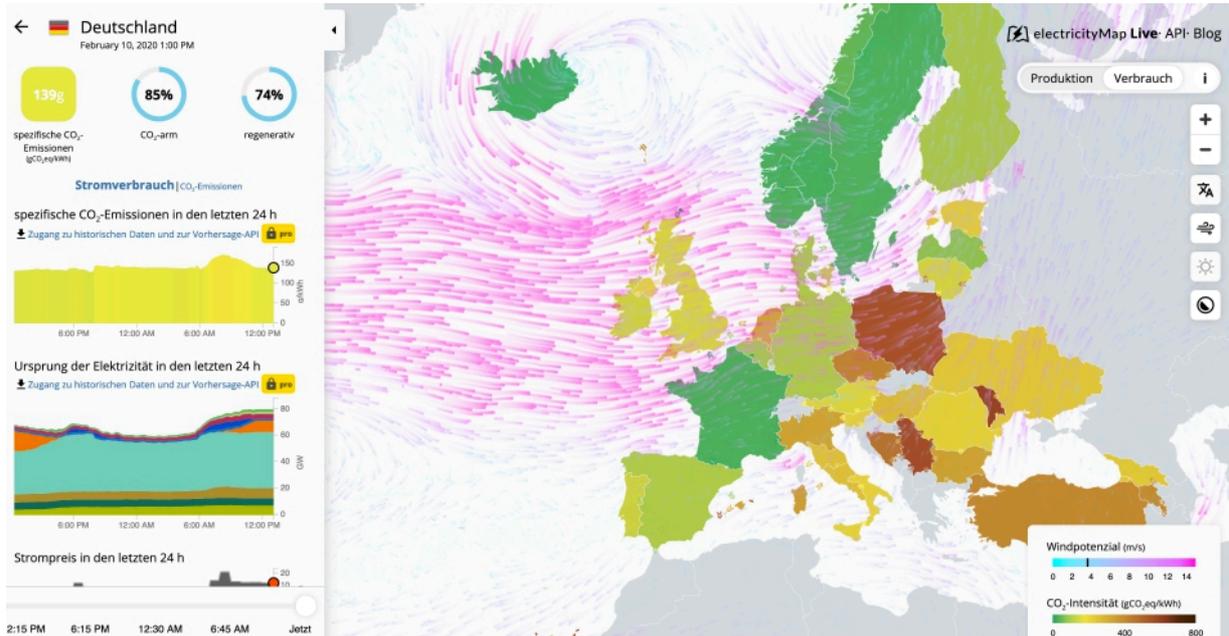


Quelle: BNetzA Monitoringberichte, 2020

Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 14

Vollständiger Netzausbau hilft nur bedingt → Speicher notwendig

10.02.2020: 80 % EE



Source: IWES, 2009 - 2011

Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 15

Was sind Energiespeicher?

Laden → **Speichern** → **Entladen**

Pump-speicher

Kohlehalden

Gasspeicher

Wärme-speicher

THINK OUTSIDE THE BOX

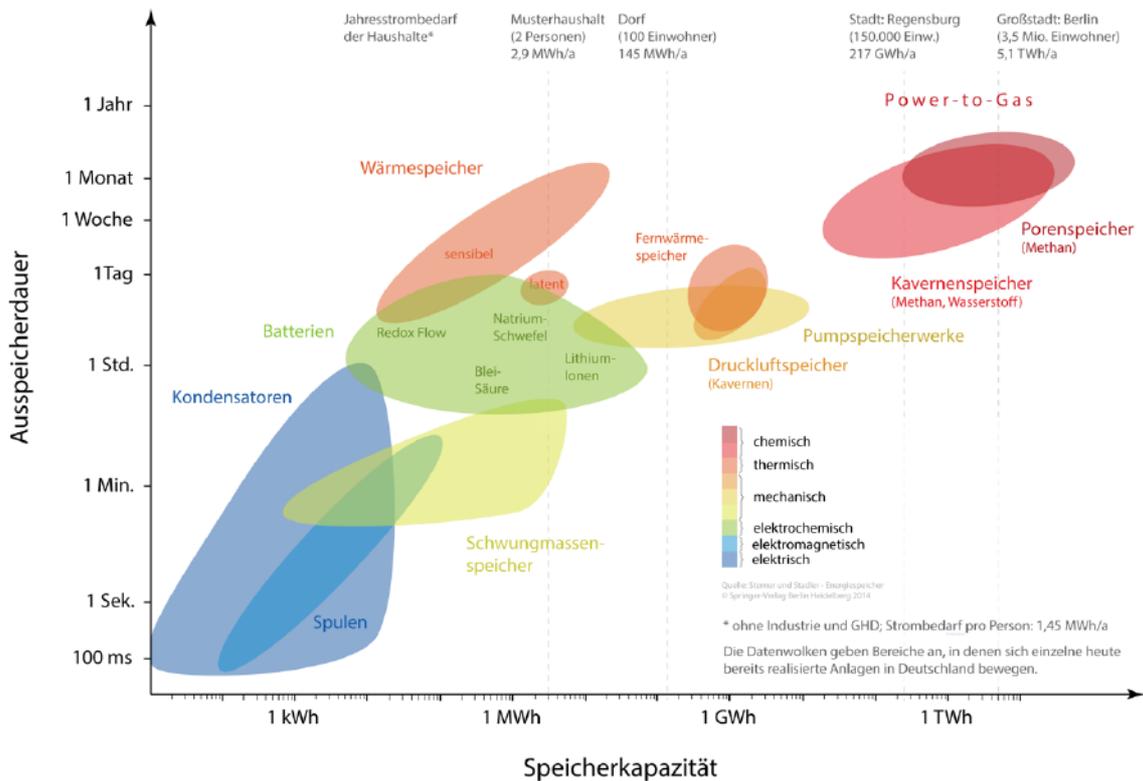
... viel mehr als Batterien!

Kurzzeit: Bat., Pumpspeicher
Langzeit: Power-to-Gas

Quelle: Sterner, Stadler, 2014, zusätzl. Bilder v. Google Pictures

Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 16

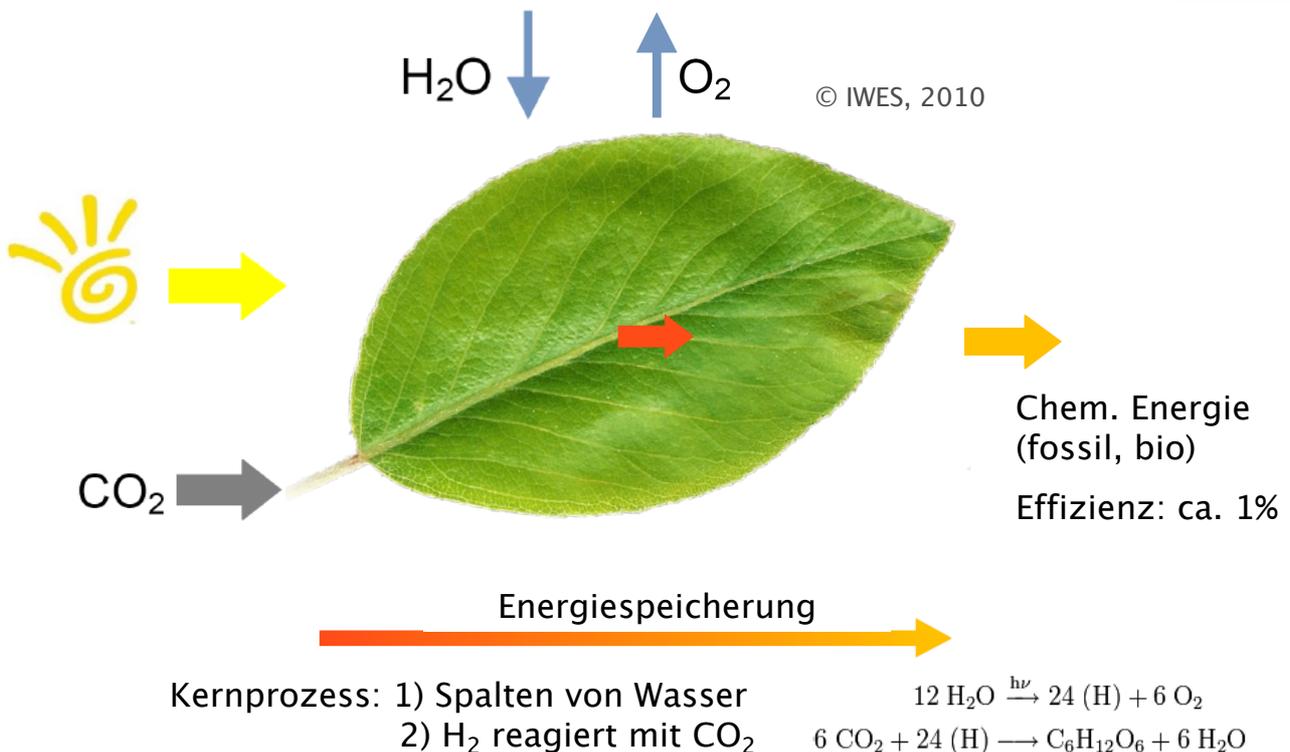
Alle nötigen Speichertechnologien sind in Marktreife vorhanden Wasserstoff über Power-to-Gas größter & günstigster Speicher



Quelle: Sterner, Stadler, 2014

Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 17

Wie speichert die Natur Energie über lange Zeiträume?

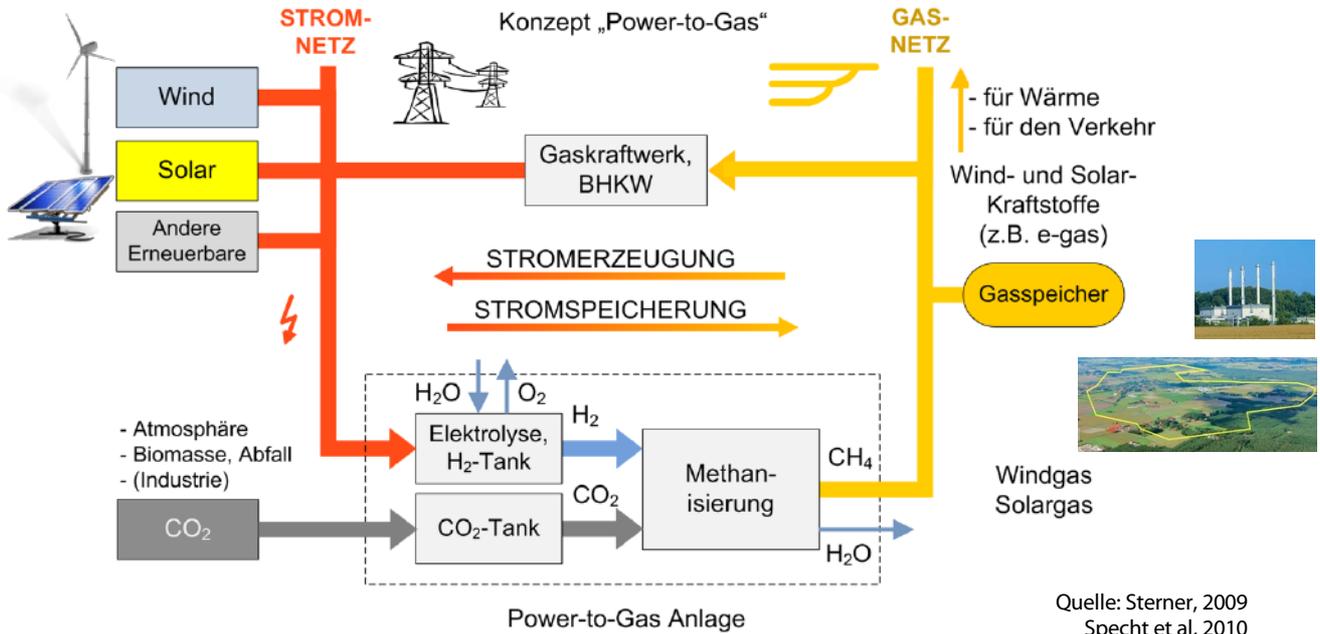


Quelle: Sterner, 2009

Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 18

Power-to-Gas Das Original

Energiespeicherung durch Kopplung von Strom- und Gasnetz
 → Technische Nachbildung der Photosynthese



Sterner, M. (2009): Bioenergy and renewable power methane in integrated 100% renewable energy systems. Limiting global warming by transforming energy systems. Kassel University, Dissertation. <http://www.upress.uni-kassel.de/publi/abstract.php?978-3-89958-798-2>

Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 19

Power-to-Gas Anlagen



Audi Anlage in Niedersachsen



Uniper Anlage in Hamburg



Elektrolyse



Methanisierung (MAN)

Viessmann Anlage in Hessen



Quelle: E-On, Audi, Viessmann, 2012-14

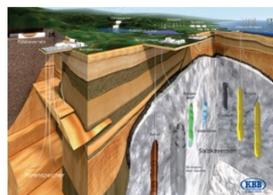
Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 20

Das Speicherproblem ist technisch gelöst – es gibt ausreichend Kapazitäten für den Kohleausstieg

Gasinfrastruktur = Flexibilität



Kohle/Atomausstieg

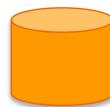
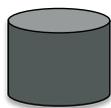


Speichereinstieg

Speicherkapazität:
5000 x soviel wie Strom

Transportkapazität:
ca. 4 x soviel wie Strom

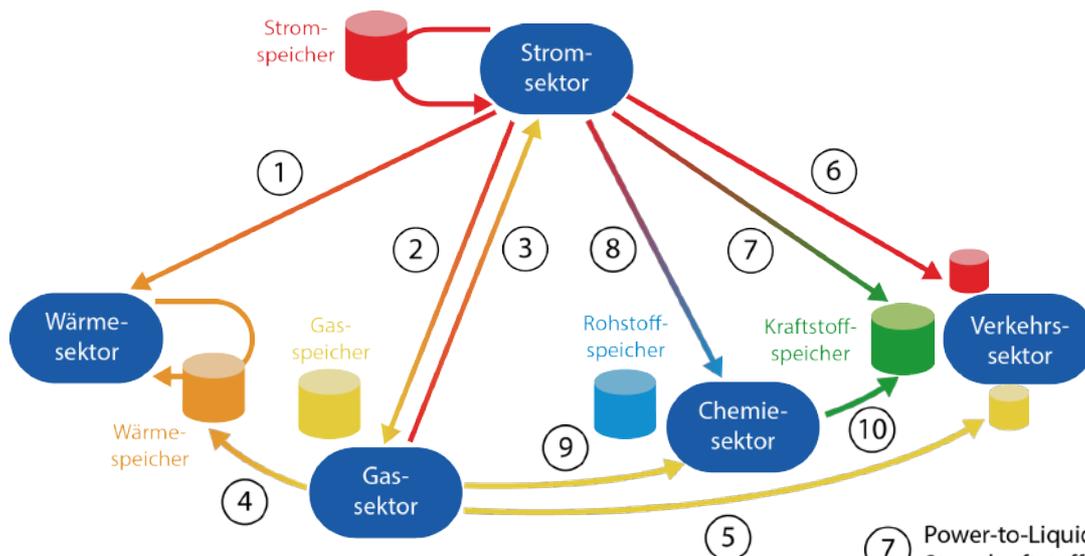
Nord-Süd - Strom:
18 GW, Gas: 75 GW



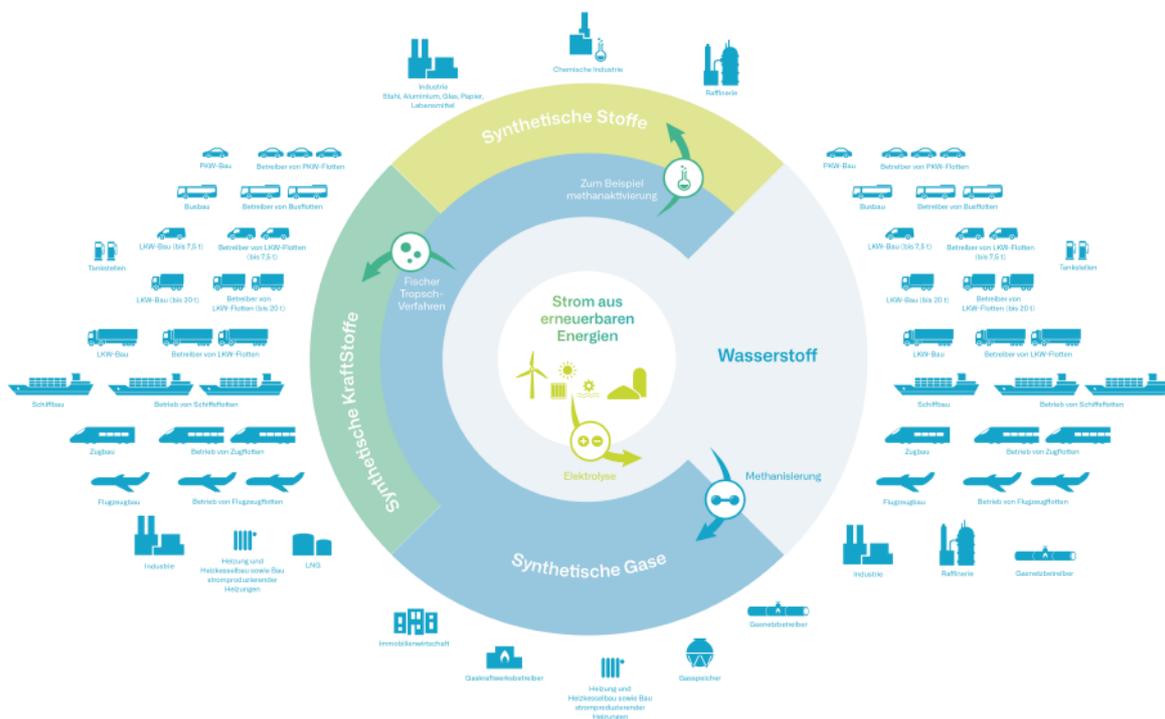
Batterien
42 Mio. Kfz
(Theorie)

| Pumpspeicher

Wind + Solar als günstigste Energiequellen über Sektorenkopplung nutzen → Wasserstoff & Power-to-X



- © Sterner et al, FENES OTH Regensburg 2016
- ① Power-to-Heat, Wärmepumpe Flexible KWK
 - ② Einspeichertechnologie Power-to-Gas
 - ③ Power-to-Gas als Stromspeicher
 - ④ Power-to-Gas als Wärmespeicher
 - ⑤ Power-to-Gas als Stromkraftstoff
 - ⑥ Elektromobilität
 - ⑦ Power-to-Liquid als Stromkraftstoff
 - ⑧ Einspeichertechnologie Power-to-Chemicals
 - ⑨ Power-to-Gas als Rohstoffspeicher
 - ⑩ Power-to-Chemicals als Kraftstoffspeicher



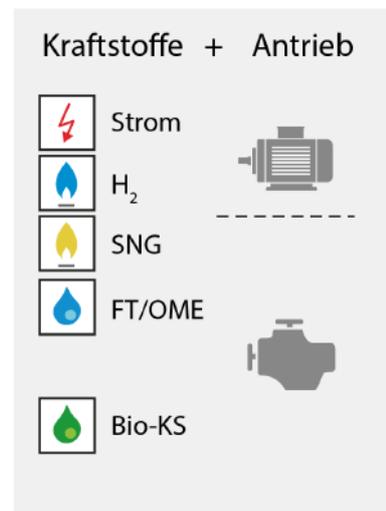
Quelle: PtX-Allianz, 2019

Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 23

Inhalt

- 1) Klimaschutz = Energiewende
- 2) Überblick: Wasserstoff und Sektorenkopplung
- 3) H₂ & PtX im Verkehr
- 4) H₂ & PtX in der Industrie
- 5) Wirkungsgrade, Kosten, Regulatorik
- 6) Regional gewinnt! Beispiel Sonneberg & Kempten

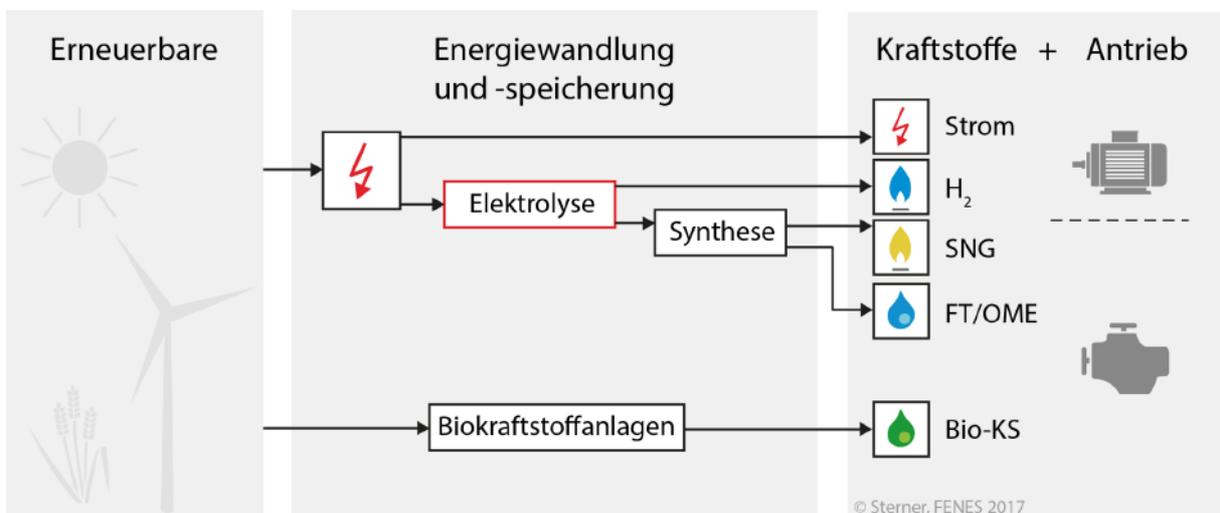
Post-fossile Mobilität?



Quelle: eigene Darstellung

Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 25

Nachhaltige Mobilität: E-Mobilität und synthetische Kraftstoffe



Elektrolyse zentrales Element in allen PtX-Pfaden

Quelle: eigene Darstellung

Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 26

Vieles, aber nicht alles ist direkt elektrifizierbar

Techn. Eignung der Alternativen in versch. Bereichen

Verkehrsträger		Straße					Schiene	Schiff	Flug
		Personenverkehr			Güterverkehr				
		Kurz / Mittel	Lang	Busse	Nah	Fern			
Elektrizität	Batterie	Green	Yellow	Green	Green	Yellow	Red	Red	Red
	Oberleitung	Red	Red	Green	Red	Yellow	Green	Red	Red
Power-to-Gas	E-Wasserstoff	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Red
	E-Methan	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green	Red
Power-to-Liquid	FT / MeOH / OME	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Biokraftstoffe	Biodiesel / BtL	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green

© Sterner, FENES 2017

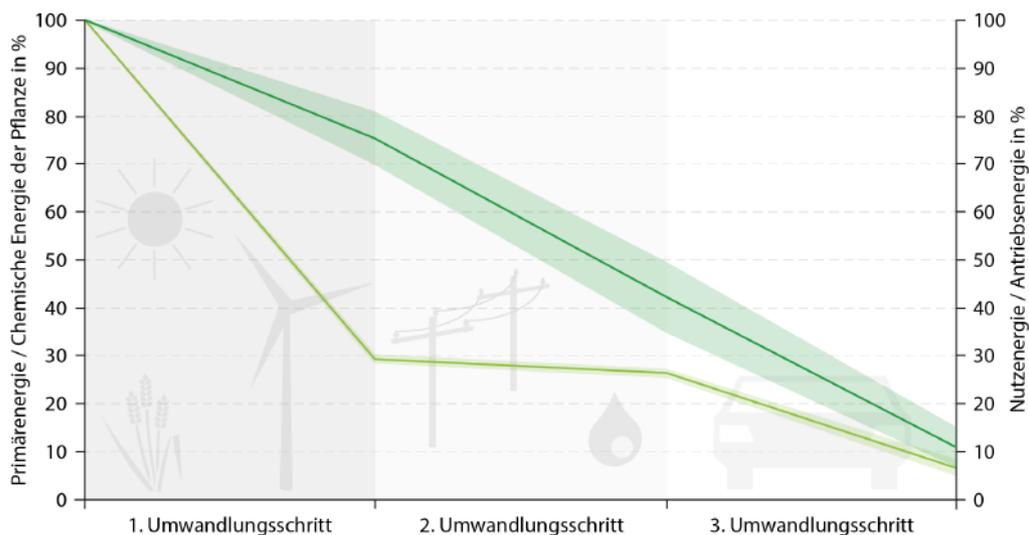
Wasserstoffmobilität
PKW: hohe Fahrzeugkosten, wenig Tankstellen
Schiene: gleichwertige Fahrzeugkosten, 1 Tankstelle reicht

Einschätzung Sterner Lambrecht auf Basis zahlreicher Quellen – u. a. MKS, BMVi, DLR, LBST, DBFZ, Agora

Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 27

Energiewandlung – Beispiel Mobilität: Biokraftstoffe

Energieeffizienz der Kraftstoff-Antriebspfade



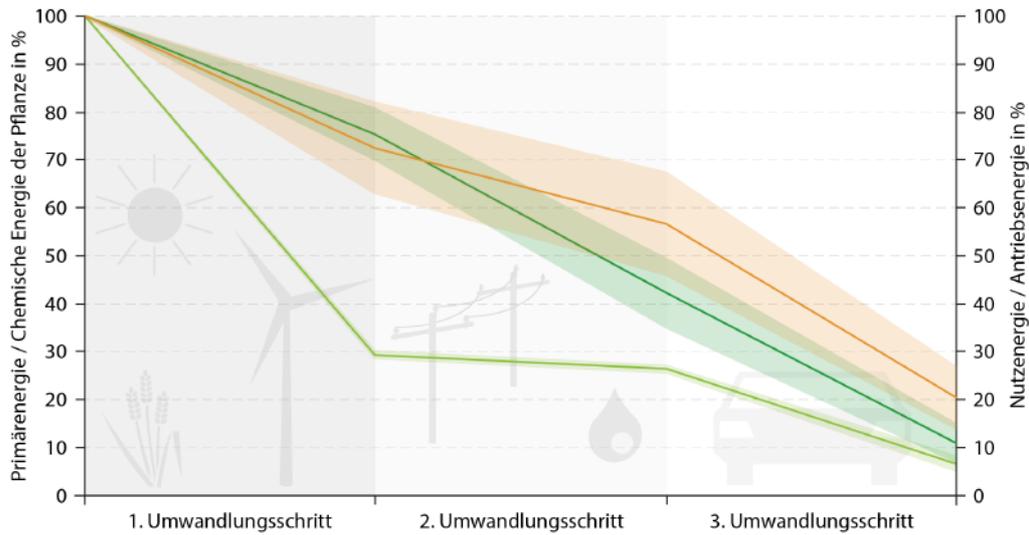
	1. Umwandlungsschritt	2. Umwandlungsschritt	3. Umwandlungsschritt
Elektrofahrzeug	Stromerzeugung	Transport	Elektromotor
Brennstoffzellenfahrzeug	H ₂ -Elektrolyse	Aufbereitung und Transport	Brennstoffzelle
Gasfahrzeug	H ₂ -Elektrolyse	Methanisierung, Aufbereitung und Transport	Gasmotor
Biodieselfahrzeug (1. Gen.)	Rapsölerzeugung	Umesterung	Dieselmotor
Biodieselfahrzeug (2. Gen.)	Biomassevergasung	Fischer-Tropsch	Dieselmotor

Quelle: eigene Darstellung

Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 28

Power-to-Gas - Gasmobilität im Mittelfeld

Energieeffizienz der Kraftstoff-Antriebspfade



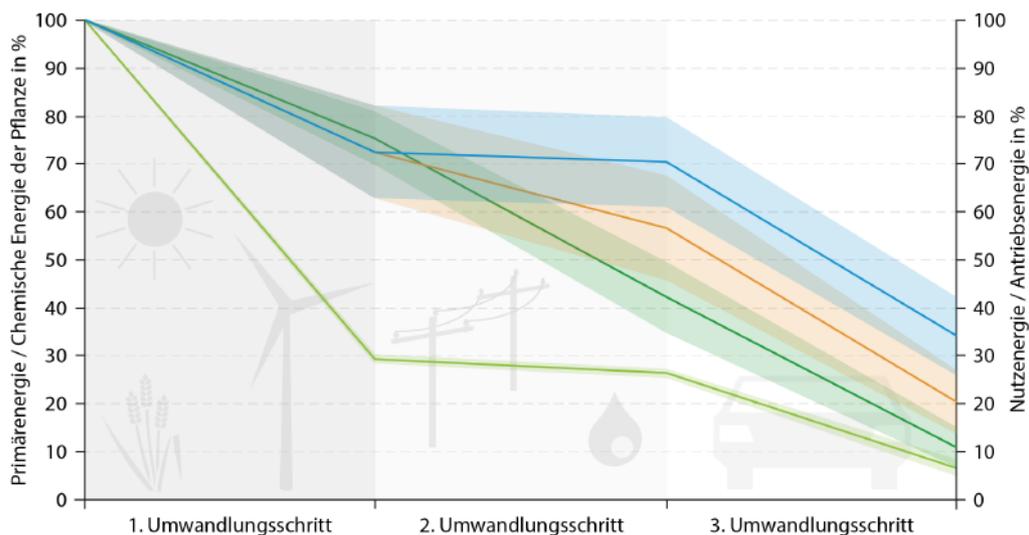
	1. Umwandlungsschritt	2. Umwandlungsschritt	3. Umwandlungsschritt
Elektrofahrzeug	Stromerzeugung	Transport	Elektromotor
Brennstoffzellenfahrzeug	H ₂ -Elektrolyse	Aufbereitung und Transport	Brennstoffzelle
Gasfahrzeug	H ₂ -Elektrolyse	Methanisierung, Aufbereitung und Transport	Gasmotor
Biodieselfahrzeug (1. Gen.)	Rapsölerzeugung	Umesterung	Dieselmotor
Biodieselfahrzeug (2. Gen.)	Biomassevergasung	Fischer-Tropsch	Dieselmotor

Quelle: eigene Darstellung

Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 29

Wasserstoff-Mobilität im Antrieb effizienter

Energieeffizienz der Kraftstoff-Antriebspfade



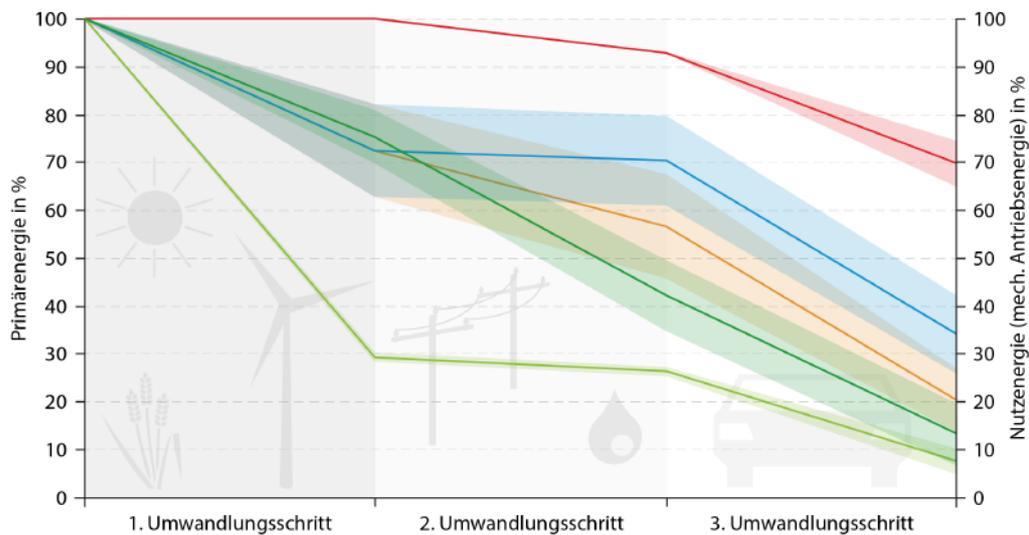
	1. Umwandlungsschritt	2. Umwandlungsschritt	3. Umwandlungsschritt
Elektrofahrzeug	Stromerzeugung	Transport	Elektromotor
Brennstoffzellenfahrzeug	H ₂ -Elektrolyse	Aufbereitung und Transport	Brennstoffzelle
Gasfahrzeug	H ₂ -Elektrolyse	Methanisierung, Aufbereitung und Transport	Gasmotor
Biodieselfahrzeug (1. Gen.)	Rapsölerzeugung	Umesterung	Dieselmotor
Biodieselfahrzeug (2. Gen.)	Biomassevergasung	Fischer-Tropsch	Dieselmotor

Quelle: eigene Darstellung

Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 30

E-Mobilität ist mit Abstand am Effizientesten

Energieeffizienz der Kraftstoff-Antriebspfade



© Sterner, FENES 2017

	1. Umwandlungsschritt	2. Umwandlungsschritt	3. Umwandlungsschritt
Elektrofahrzeug	Stromerzeugung	Transport	Elektromotor
Brennstoffzellenfahrzeug	H ₂ -Elektrolyse	Aufbereitung und Transport	Brennstoffzelle
Gasfahrzeug	H ₂ -Elektrolyse	Methanisierung, Aufbereitung und Transport	Gasmotor
Biodieselfahrzeug (1. Gen.)	Rapsölerzeugung	Umesterung	Dieselmotor
Biodieselfahrzeug (2. Gen.)	Biomassevergasung	Fischer-Tropsch	Dieselmotor

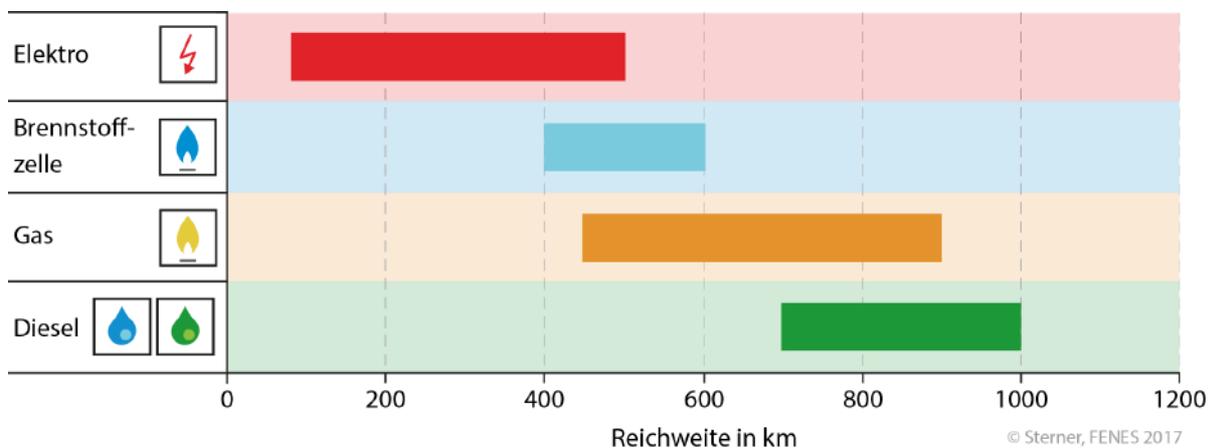
„Efficiency 1st“

Quelle: eigene Darstellung

Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 31

Genau umgekehrt zu Effizienz: Reichweite

Tank-Reichweite der Kraftstoff-Antriebspfade - PKW



© Sterner, FENES 2017

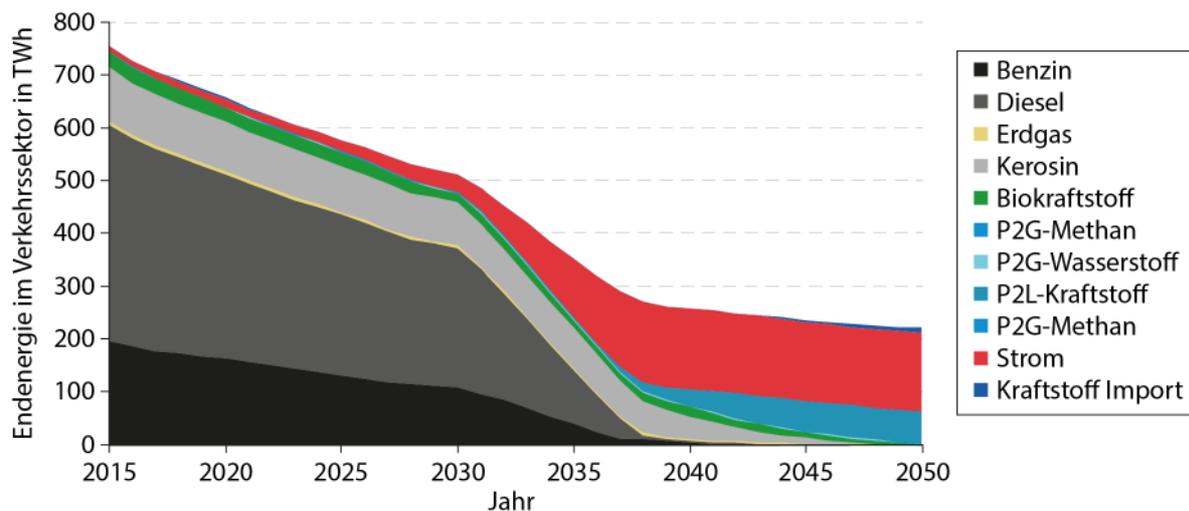
Energiedichte der Energiespeicher entscheidend

Quelle: eigene Darstellung

Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 32

Klarer Wandel zur E-Mobilität + synth. Kraftstoffen

Endenergie Verkehr – SPIKE Ergebnisse



- Geringerer Energiebedarf durch
 - Verschiebung von Straße auf Schiene und ÖPNV
 - Elektromobilität
- Power-to-Liquid (synth. Kraftstoffe) für Flugzeuge & Schiffe
- Strom v. a. für PKW, Oberleitungs-Lkw und Bahn

Mobilität braucht Power-to-Gas und PtX

E-Mobilität (Batterie, Oberleitung): Efficiency 1st, aber:

- Nicht in allen Bereichen nutzbar (Flug, Schiff, Schwerlast)
- Herausforderungen: Rohstoffe und Recycling, Ladeinfrastruktur, Emissionen Herstellung
- Strombezug für Klimawirkung entscheidend → Erneuerbare

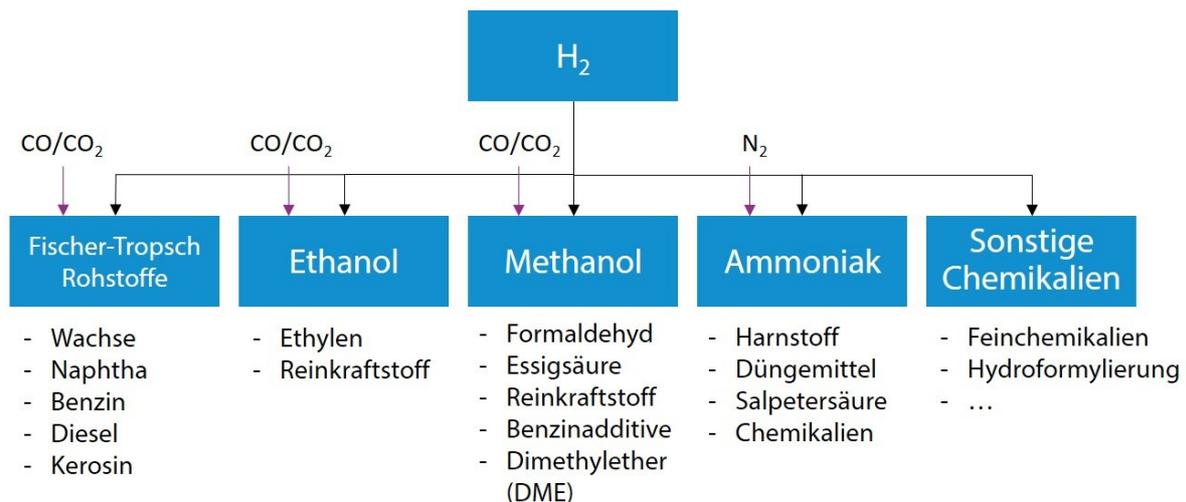
Biokraftstoffe in nachhaltigem Potential und Akzeptanz begrenzt

→ **Notwendigkeit für synth. Kraftstoffe wie H₂ gegeben**

- 1) Klimaschutz = Energiewende
- 2) Überblick: Wasserstoff und Sektorenkopplung
- 3) H₂ & PtX im Verkehr
- 4) **H₂ & PtX in der Industrie**
- 5) Wirkungsgrade, Kosten, Regulatorik
- 6) Regional gewinnt! Beispiel Sonneberg & Kempten

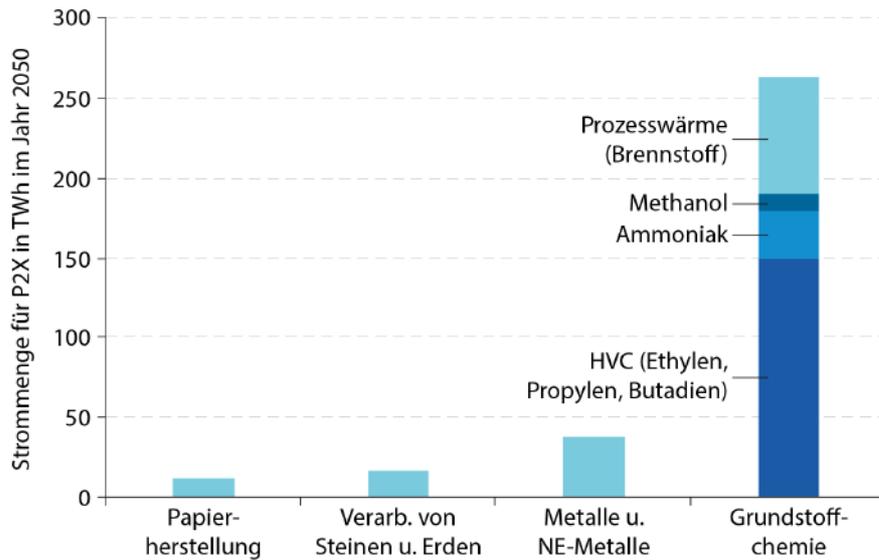
Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 35

Power-to-X zentral für Klimaschutz in Chemie & Stahl



PtX in der energieintensiven Industrie

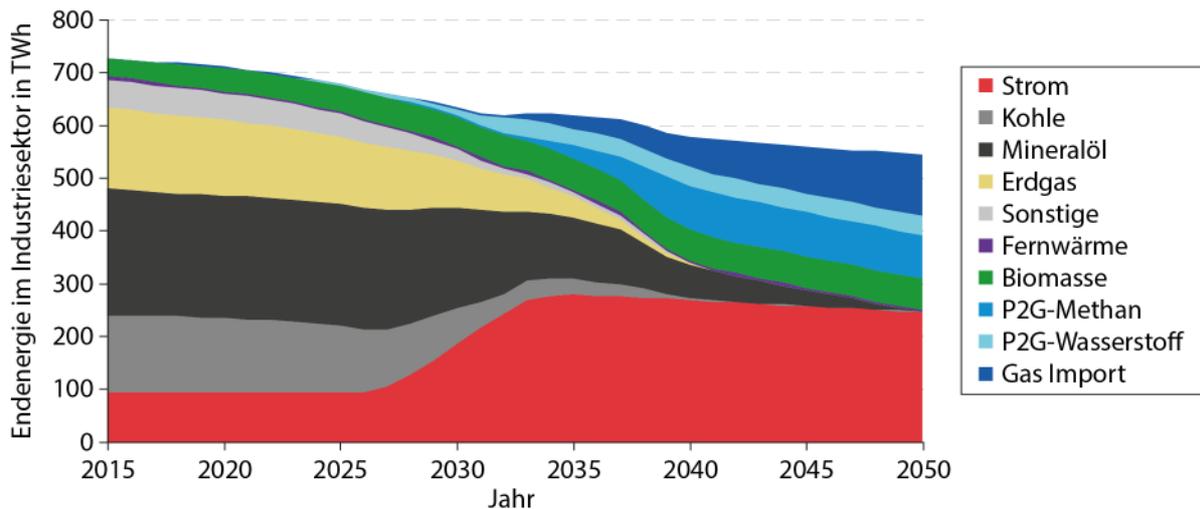
SPIKE Ergebnisse



- Hier alleine ca. 50 % des heutigen Strombedarfs
- Import vs. Erneuerbare in Deutschland

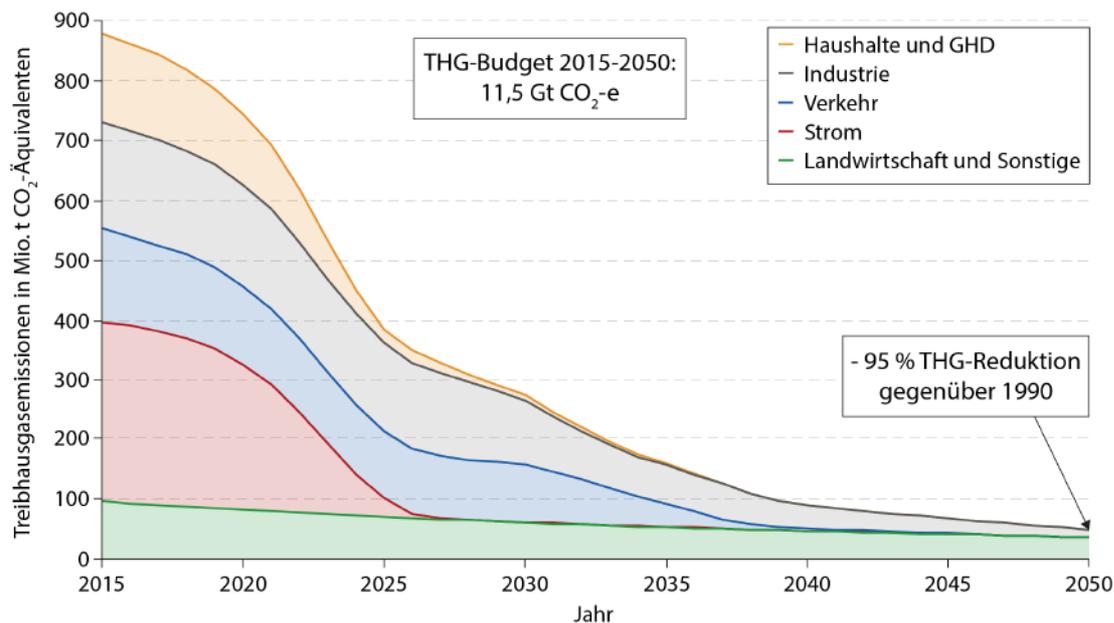
Zukunftsfähige Industrie nur mit Erneuerbaren + PtX

Endenergie Industrie – SPIKE Ergebnisse



- Erdöl bleibt am Längsten → chemische Industrie
- Biomasse-Abfall für Papier und Zement
- Hoher Strombedarf für Stahl und Glas
- Power-to-Gas überall benötigt – v. a. in Bereichen mit hoher Energiedichte & Hochtemperatur

Paris ist zu schaffen – Massiver Umbau aller Bereiche nötig Treibhausgas-Emissionen 2015–2050

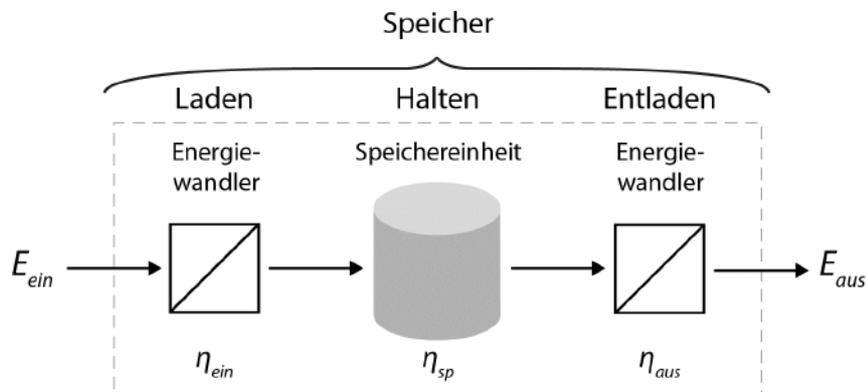


Inhalt

- 1) Klimaschutz = Energiewende
- 2) Überblick: Wasserstoff und Sektorenkopplung
- 3) H₂ & PtX im Verkehr
- 4) H₂ & PtX in der Industrie
- 5) Wirkungsgrade, Kosten, Regulatorik
- 6) Regional gewinnt! Beispiel Sonneberg & Kempten

Wirkungsgrad Energiespeicher

„Halten“ genauso entscheidend wie Laden und Entladen



Speicherdauer: 1 h

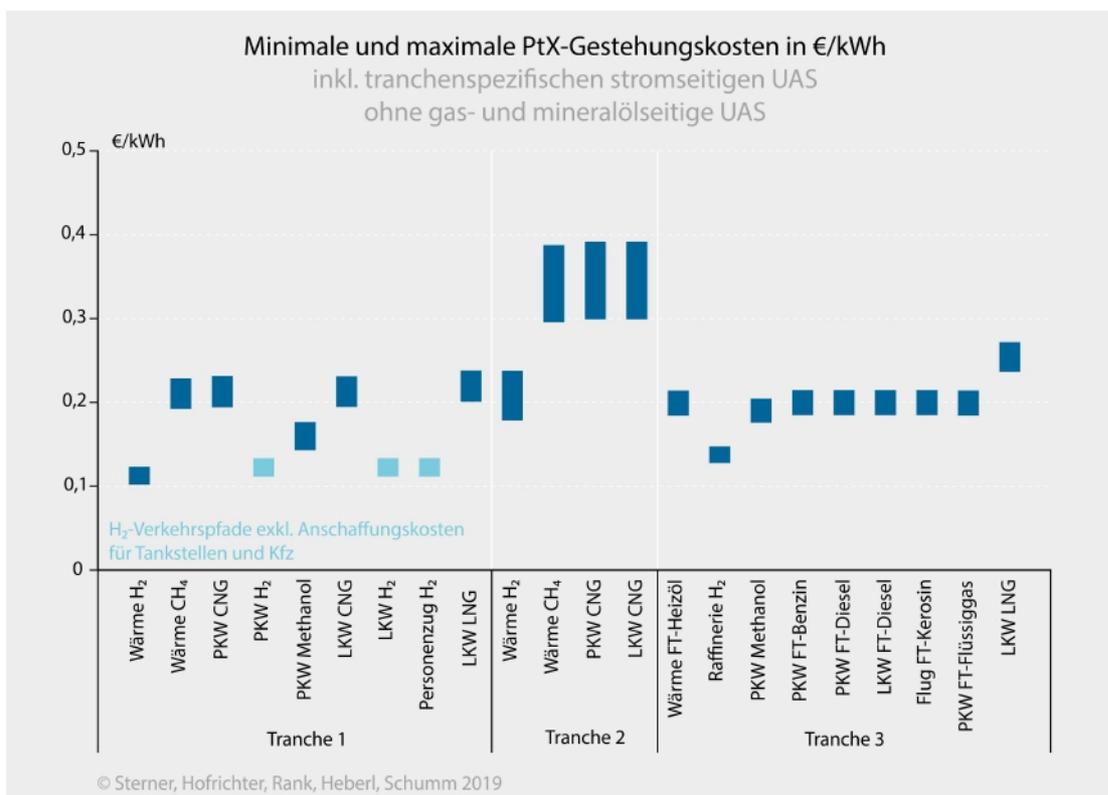
Wirkungsgrad Stromspeicher KZS Batterie: ca. 80 %
 Wirkungsgrad Stromspeicher LZS PtG & Gas: ca. 40 %

Speicherdauer: 6 Monate

Wirkungsgrad Stromspeicher KZS Batterie: 0 - 50 %
 Wirkungsgrad Stromspeicher LZS PtG & Gas: ca. 40 %

Kosten von PtX-Produkten: Kraft- und Brennstoffe

Markteinführungsprogramm in Deutschland (PtX-Allianz)



Die Wirtschaftlichkeit von Wasserstoff scheitert derzeit an den regulatorischen Rahmenbedingungen = Politik



Ideale Annahmen:

- Invest: 0 €
- Wirkungsgrad: 100 %

Wirtschaftlichkeit **dennoch nicht** gegeben,
aufgrund Belastung durch Abgaben und Steuern
da Einstufung als Letztverbraucher

§ = ?

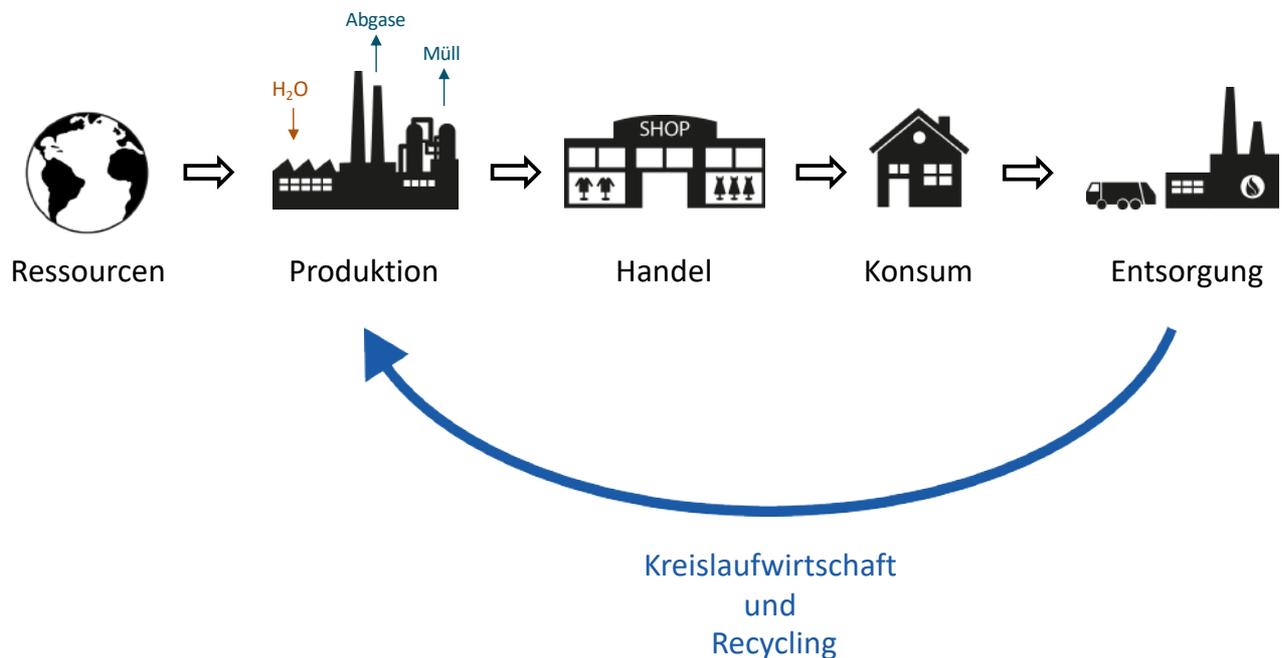
Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 43

Inhalt



- 1) Klimaschutz = Energiewende
- 2) Überblick: Wasserstoff und Sektorenkopplung
- 3) H₂ & PtX im Verkehr
- 4) H₂ & PtX in der Industrie
- 5) Wirkungsgrade, Kosten, Regulatorik
- 6) **Regional gewinnt! Beispiel Sonneberg & Kempten**

Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 44



Quelle: Story of Stuff, 2007

Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 45

Lösungsansatz:

ERZEUGER und VERBRAUCHER wieder in BEZIEHUNG setzen

Klima- und Umweltschäden minimieren:
→ Konsum möglichst **lokal** und **saisonal**

Erzeugung und Verbrauch vor Ort
→ weniger Transport (Straßen, Netze)

Mehr Beziehung zwischen Produzenten und Konsumenten
→ → **Eigenerzeugung = Eigenverbrauch**

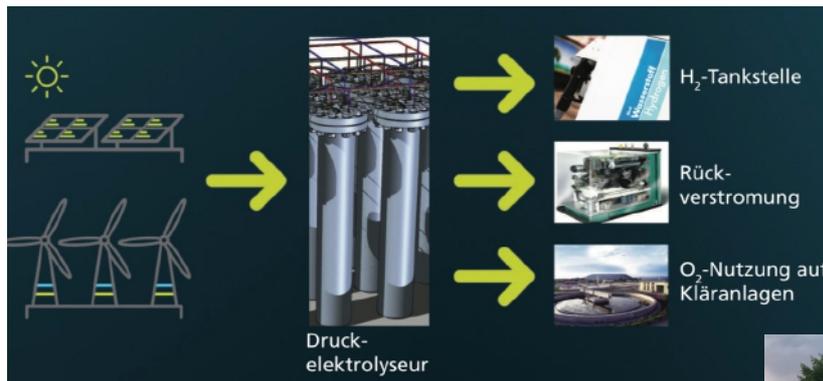


waldwasser
Wasserversorgung Bayerischer Wald



Sonneberg (TH) – Alle spielen zusammen:

Bürgermeister+Verwaltung, Stadtwerke, Industrie, Hochschule **FENES**



KUMATEC



Spielzeugstadt Sonneberg

Mittelständler Kumatec entwickelt neuen Elektrolyseur

→ Kommunale Nutzung für Mobilität (H₂), Kläranlagen, Krankenhaus (O₂)

→ Start durch Förderung 2014
Heute große erfolgreiche Folgeprojekte

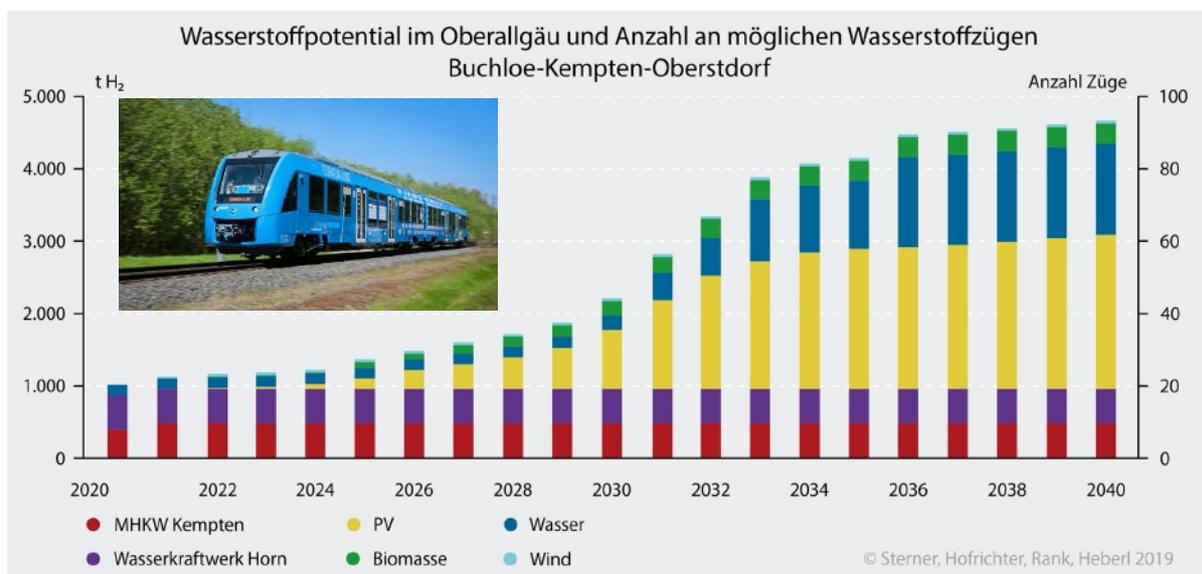


Quelle: Hypos, Kumatec, 2018

Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 47

H₂-Potenzialanalyse im Oberallgäu

FENES



- Ausreichend für 42.000 PKW oder 92 Züge Buchloe–Oberstdorf
- Wasserverbrauch pro Zug = Jahresverbrauch von 11 Personen
- Mehrpotenzial für Busse, LKW – Züge: sehr gute Planbarkeit

Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 48

Wasserstoff im Oberallgäu

Vorteile des Standorts MHKW Kempten

Technik und Wirtschaftlichkeit

- Strom ist Nebenprodukt mit hoher Konstanz
- Netzinfrastruktur für Strom und Schiene ist vorhanden
- Nähe Autobahn für mehr H₂
- Platz für Tankstelle
- MHKW in kommunaler Hand
- Sauerstoff nutzbar



Ökologie & Gesellschaft

- Regionaler Beitrag Klimaschutz
- Verbesserte Luftqualität
- Weniger Feinstaub
- Weniger Lärm - leise Loks
- Weniger Straßenbelastung: keine Diesellaster mehr @ Hbf



Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 49

Fazit

- 1) **Klimaschutzziele im Verkehr + Industrie nicht ohne Wasserstoff und massivem Ausbau von Wind & Solar erreichbar**
- 2) **Es braucht Netze und Speicher, genauso Elektromobilität und Wasserstoff - alle Speicher sind verfügbar!**
- 3) **Regionale Wertschöpfung mit Strom und H₂ schafft Arbeitsplätze vor Ort & wirkt dem demographischen Wandel entgegen**
- 4) **Regionalität schafft Akzeptanz: Kreislaufwirtschaft bringt engere Beziehung zwischen Verbraucher und Produzent**
- 5) **Regional ist Trumpf: Wenn alle Akteure an einem Strang ziehen, stemmt man auch Größeres**
- 6) **Übergeordnete Politik mit klarem Willen zum Klimaschutz notwendig, um Wasserstoff nachhaltig zu etablieren**

Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 50



Kein Klimaschutz führt zur **Zerstörung** unserer **Lebensgrundlagen** und wesentlich mehr Opfern als Covid-19

→ das ist **wesentlich teurer als jede Energiewende**



Quelle: eigenes Foto, 2019

Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 51

Kontakt

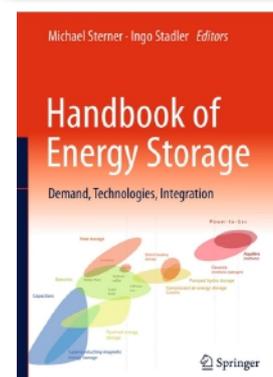


FORSCHUNGSSTELLE
ENERGIENETZE UND
ENERGIESPEICHER

Prof. Dr.-Ing. Michael Sterner
+ 49 - (0) 941 - 943 9888
michael.sterner@oth-regensburg.de
Twitter: @prof_sterner

www.fenes.net

Vielen
Dank



1st ed. 2019, XIX, 853 p. 549 illus. With online files/update.

Prof. Dr. Sterner, OTHR, S. 52