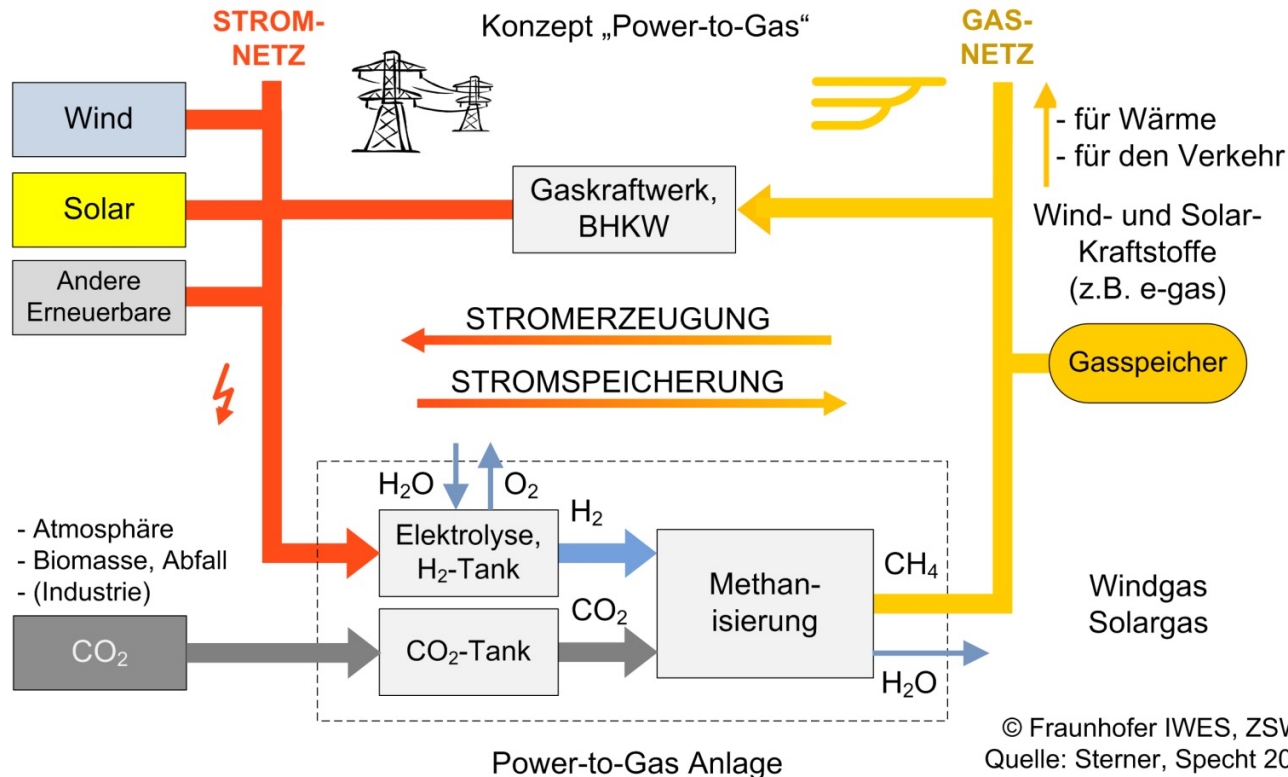


Wasserstoff und Power-to-Gas: Wie wir Deutschland klimaneutral machen! + Rolle von Bayern und uns

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

Forschungsstelle Energienetze und Energiespeicher FENES, OTH Regensburg



Aktive Bürger für
Neutraubling

14. Mai 2021,
Online



OTH Regensburg – seit 175 Jahren Lehrbetrieb



Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg



Über 11.000 Studierende

Ca. 1.000 Professoren, Mitarbeiter, Lehrbeauftragte

6 Technische Fakultäten, BWL, Sozialwesen



OSTBAYERISCHE
TECHNISCHE HOCHSCHULE
REGENSBURG

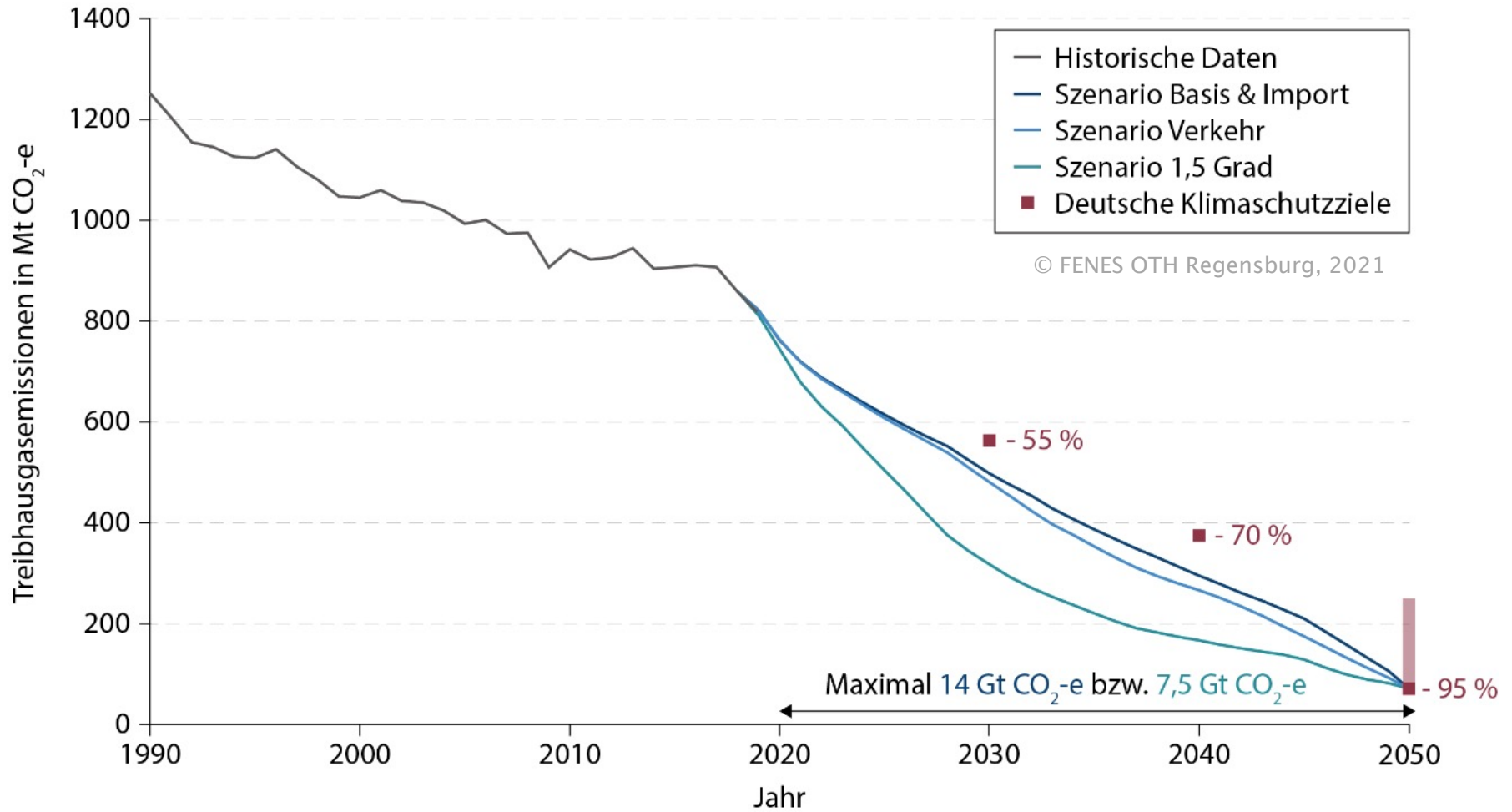
FORSCHUNGSSTELLE
ENERGIENETZE UND
ENERGIESPEICHER



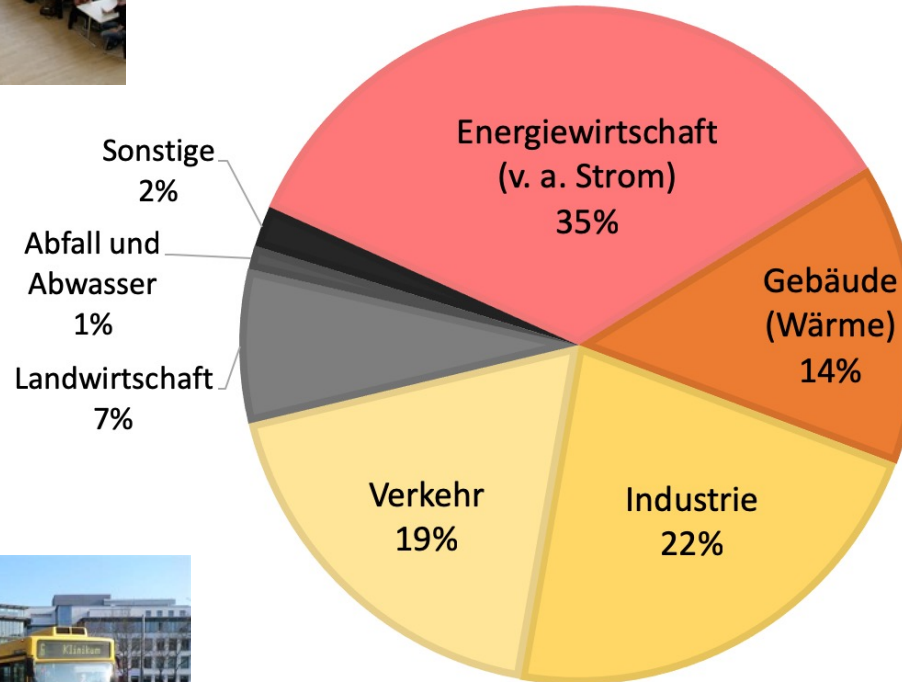
- 1) **Energiewende = Klimaschutz**
- 2) **PtG & Stromwende**
- 3) **PtG & Wärmewende**
- 4) **PtX & Verkehrswende**
- 5) **PtX & Industriewende**
- 6) **Was zu tun ist**

Wie kann Deutschland klimaneutral werden?

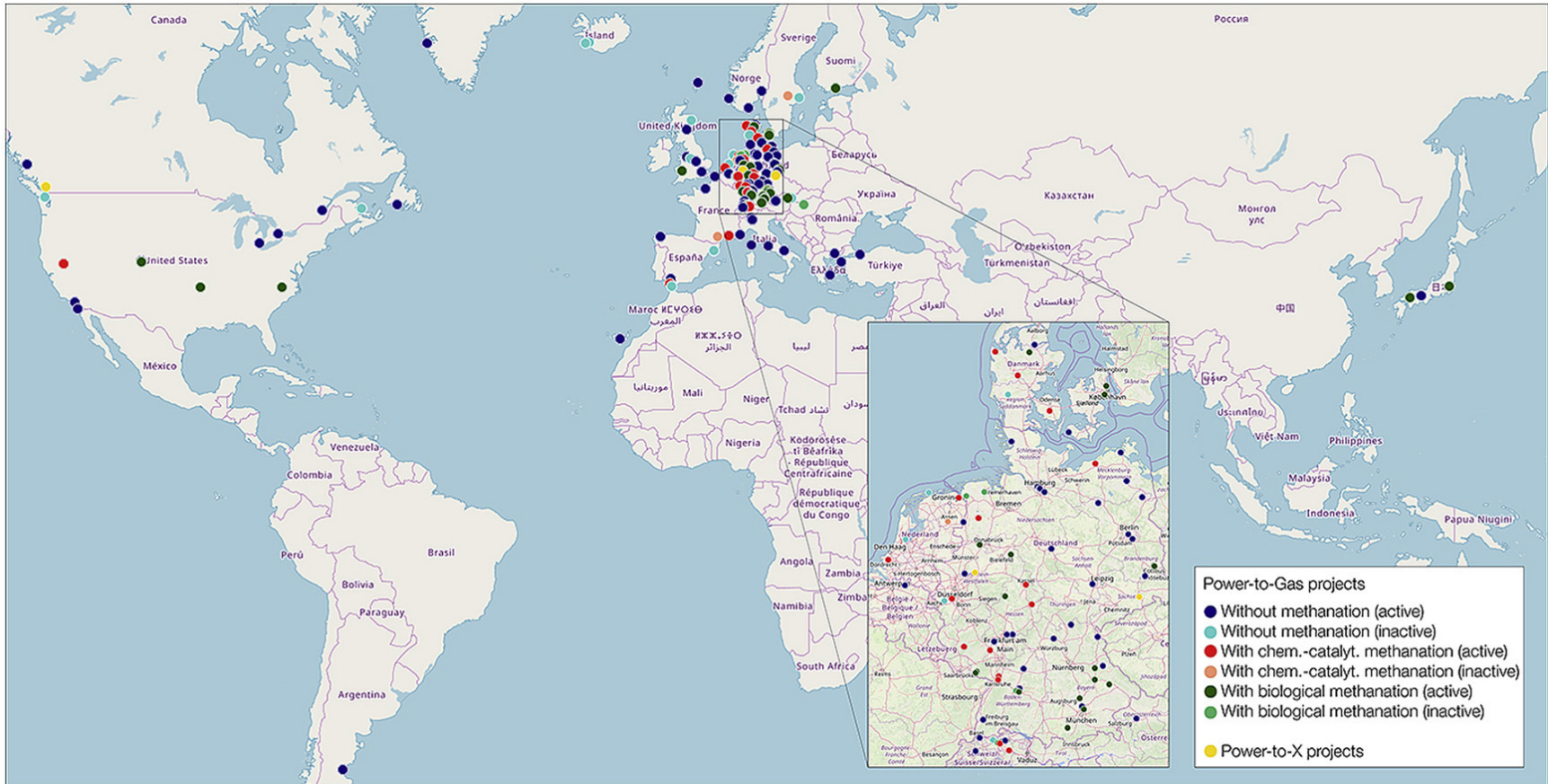
Deutsches Klimaziel für 2030 nicht ausreichend für 1,5 °C
 Neue Ziele: 65 % bis 2030, 88 % 2040, klimaneutral 2050



CO₂-äq. Emissionen in Deutschland nach Sektoren: 90 % aus Kohle, Öl und Gas!



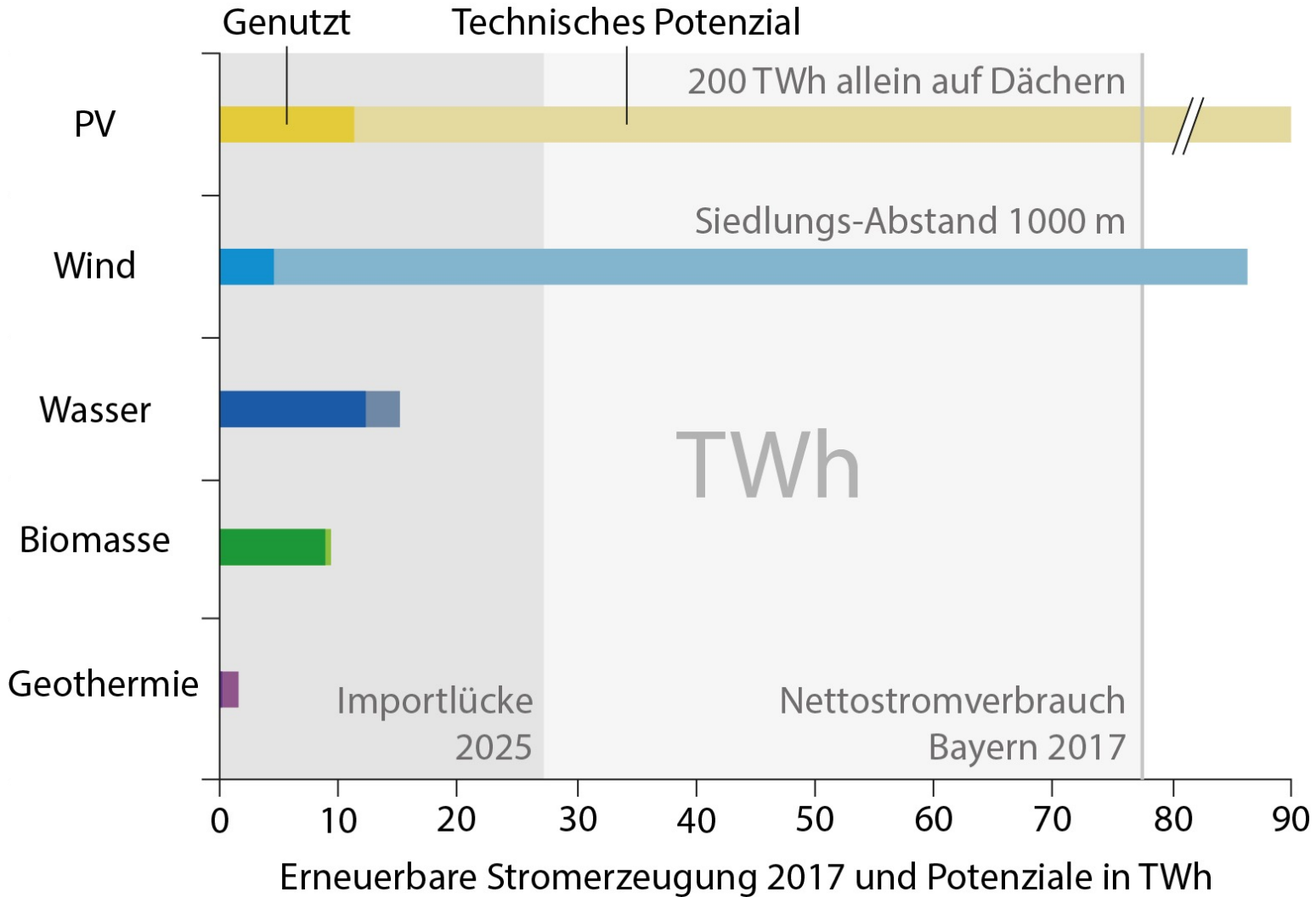
Paris umsetzen = Power-to-X wird Weltmarkt BRD ist führend, Entwicklung aber zunehmend international



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.

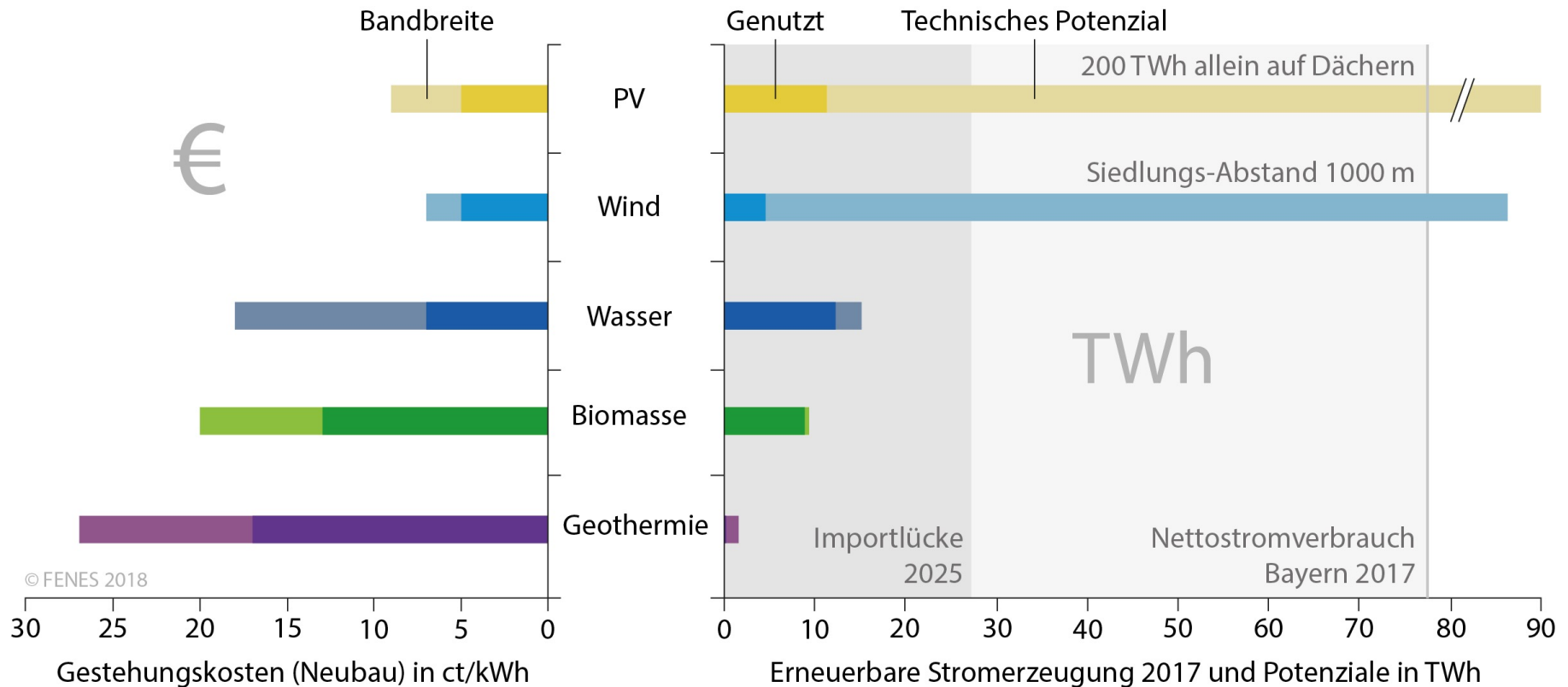
- 1) Energiewende = Klimaschutz
- 2) **PtG & Stromwende**
- 3) PtG & Wärmewende
- 4) PtX & Verkehrswende
- 5) PtX & Industriewende
- 6) Was zu tun ist

Erneuerbare Energien in Bayern Potenzial



Erneuerbare Energien in Bayern

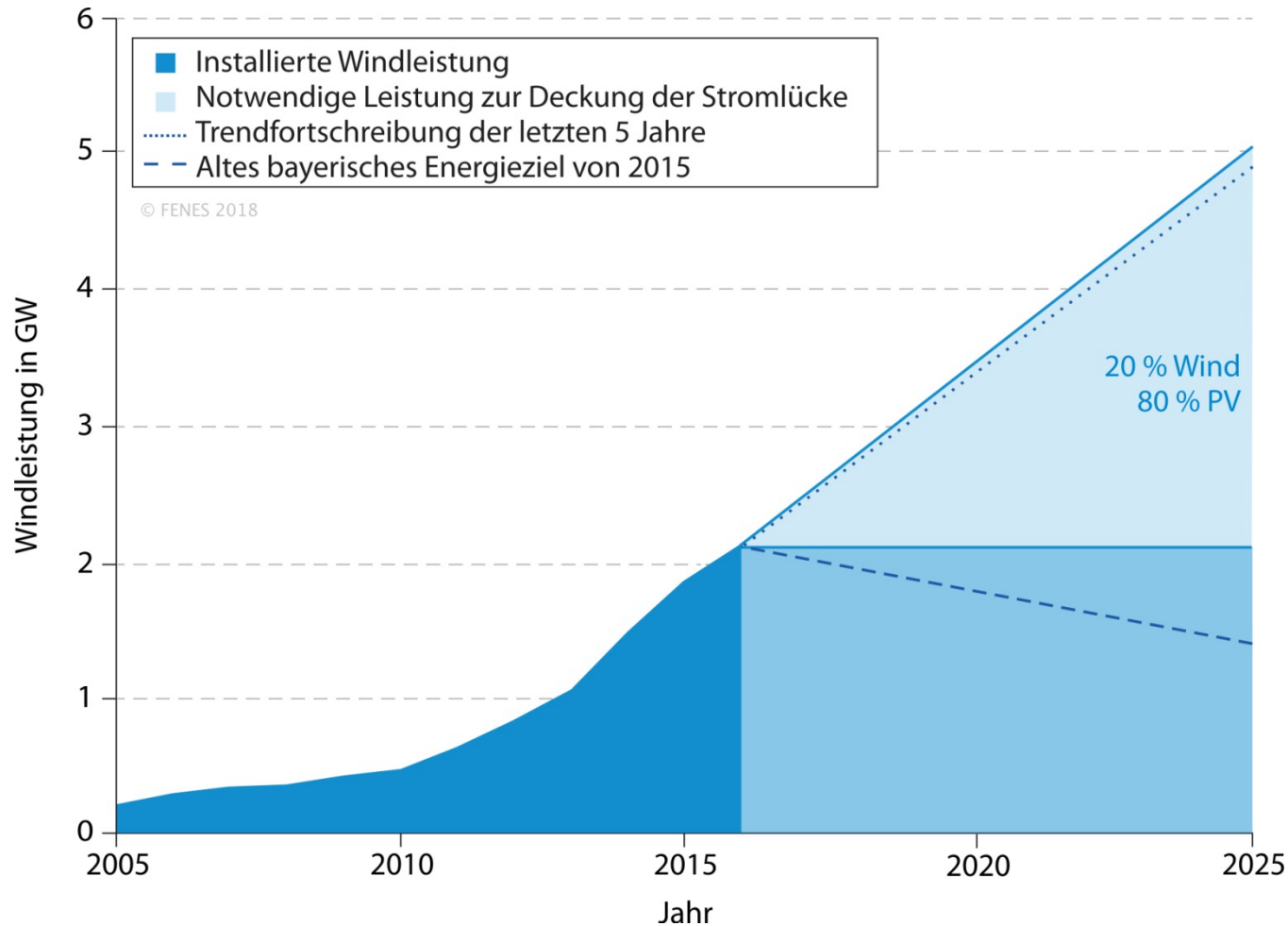
Kosten vs. Potenzial



Zum Vergleich: Kosten neuer Atom- / Kohle- / Gaskraft: 10-12 €-ct/kWh

→ **doppelt so teuer** wie Wind und Solarstrom

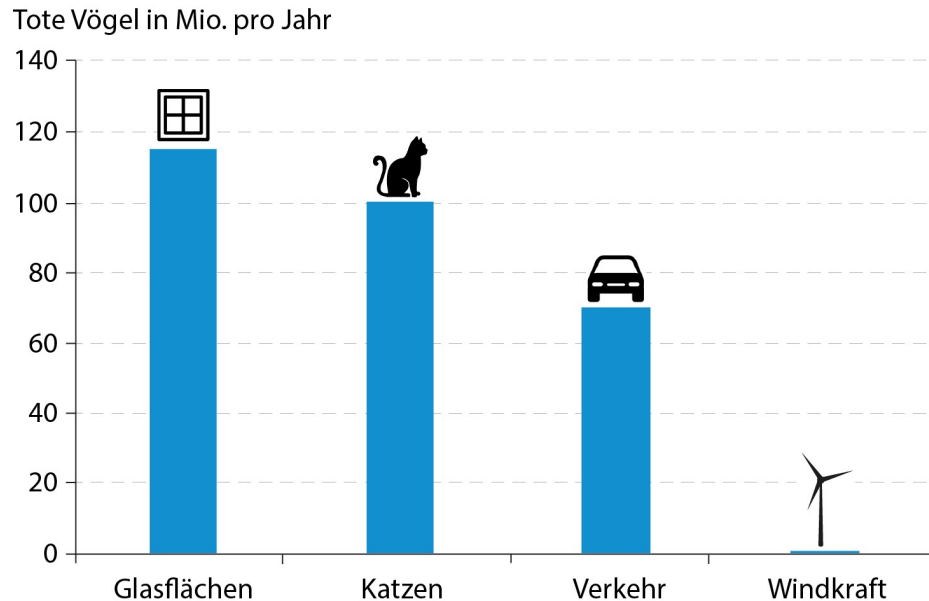
Stromlücke aus Atom- und Kohleausstieg ohne Importe schließen über Solar- und Windstrom mit 80 % zu 20 %



Installierte Leistung der Windkraft für einen begrenzten Windausbau (2 Windkraftanlagen p. a. pro Landkreis) und der Bedingung, die Stromlücke von ca. 27 TWh aus Atom- und Kohleausstieg zzgl. keiner neuen Trassen zu schließen

Vogelsterben durch menschengemachte Faktoren

- Vögel können mit WKA kollidieren und dabei sterben
- Bei Errichtung einer WKA gelten strenge Vorgaben des Bundesnaturschutzgesetzes → Artenschutz wird gewährleistet
- Durch WKA kommen ca. 10–100 T Vögel zu Fall, was ca. 1–4 Vögeln pro WKA entspricht bei über 30 T WKA in Deutschland derzeit
- Dazu verglichen sind anderen Einflüsse des Menschen wesentlich fataler:

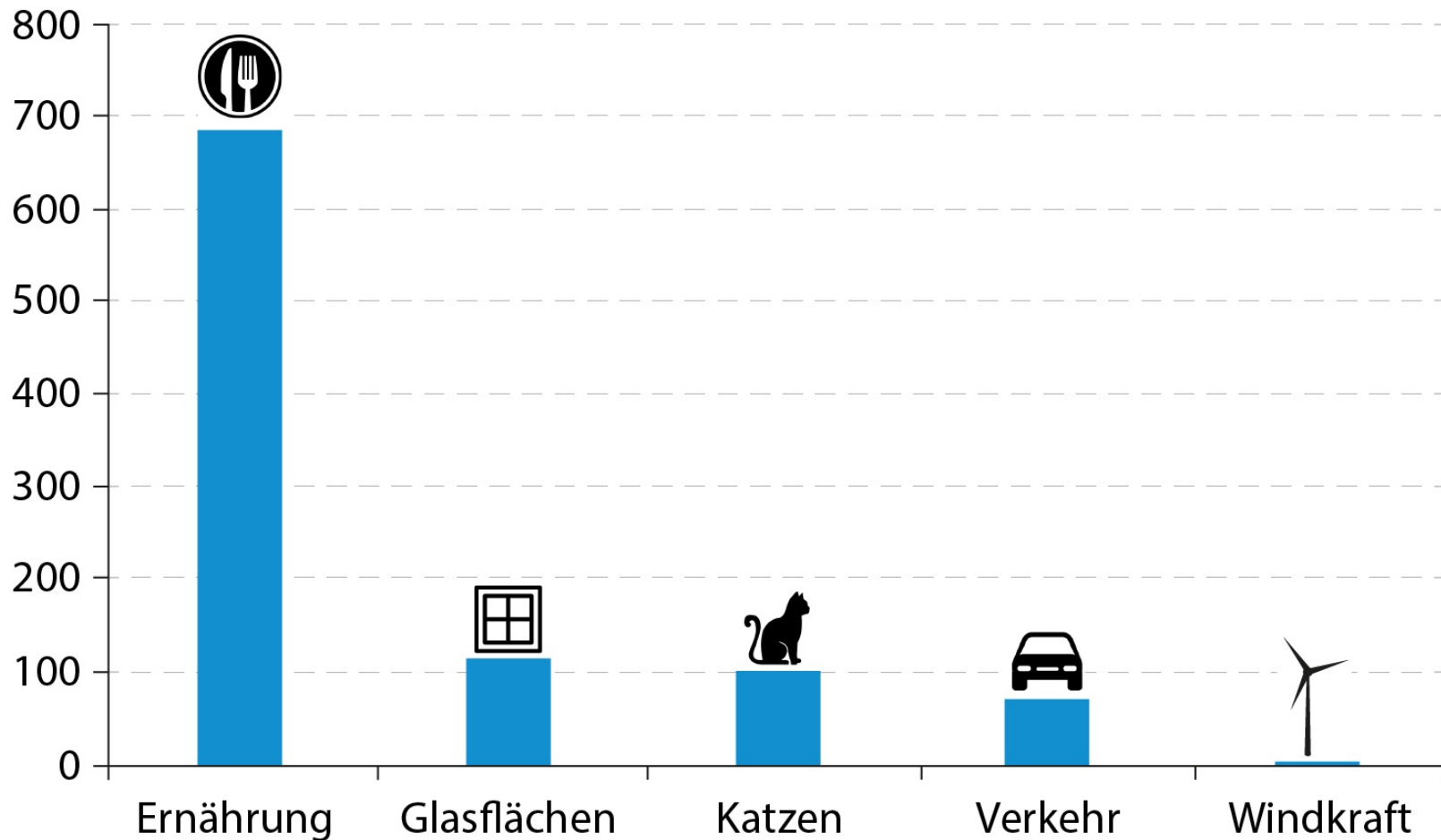


Faktencheck Windkraft

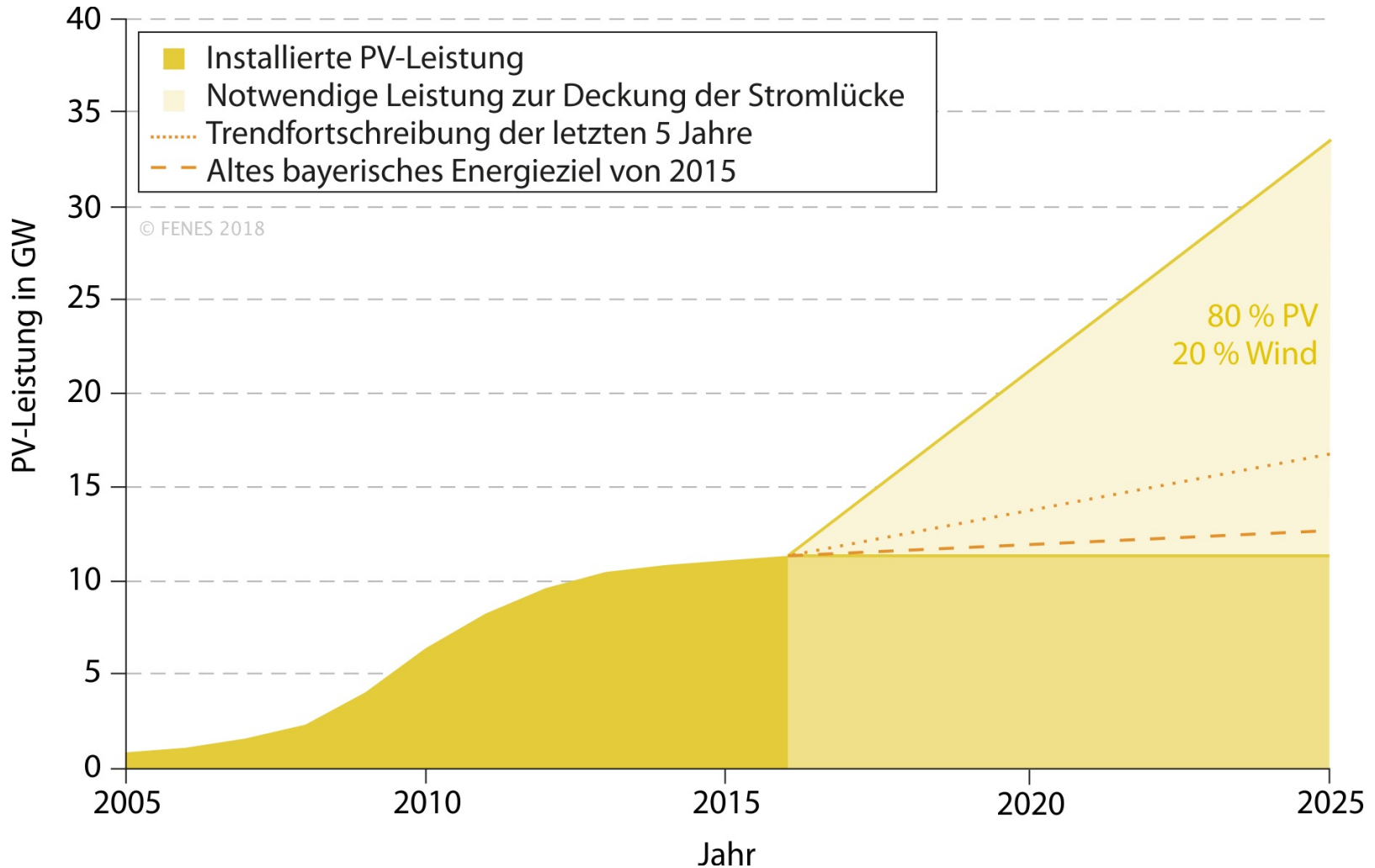
<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/FAQ/Windenergie/faq-windenergie.html>

Vogelsterben durch menschengemachte Faktoren in BRD

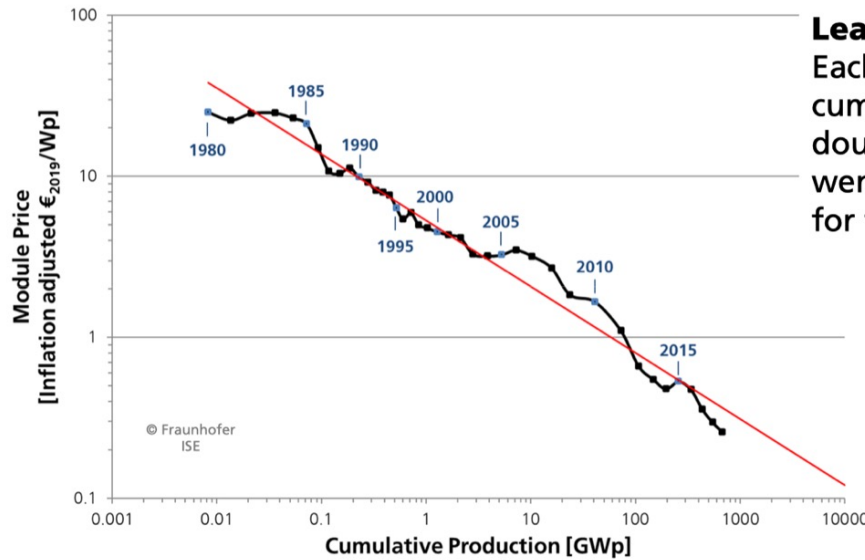
Tote Vögel in Mio. pro Jahr



Stromlücke aus Atom- und Kohleausstieg ohne Importe schließen über Solar- und Windstrom mit 80 % zu 20 %



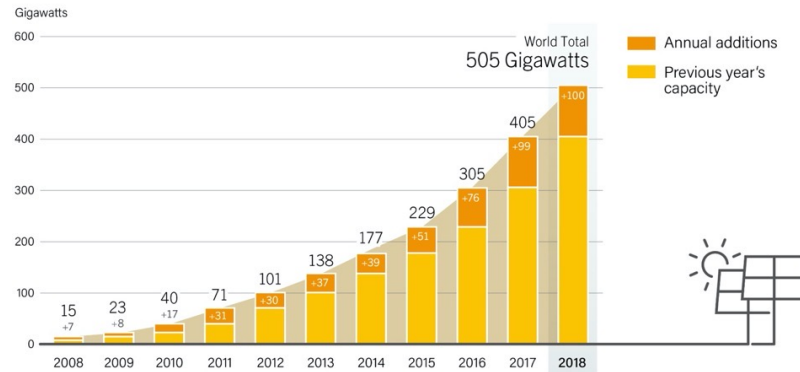
PV: Kostensenkungen – heute: 200 €/kW Modulpreise



Learning Rate:
Each time the cumulative production doubled; the price went down by 24 % for the last 39 years.

mation from different sources: Strategies Unlimited, Navigant Consulting, EUPD, pvXchange; from 2011: IHS Markit; for 2019 estimation from different sources. Graph: PSE GmbH 2020

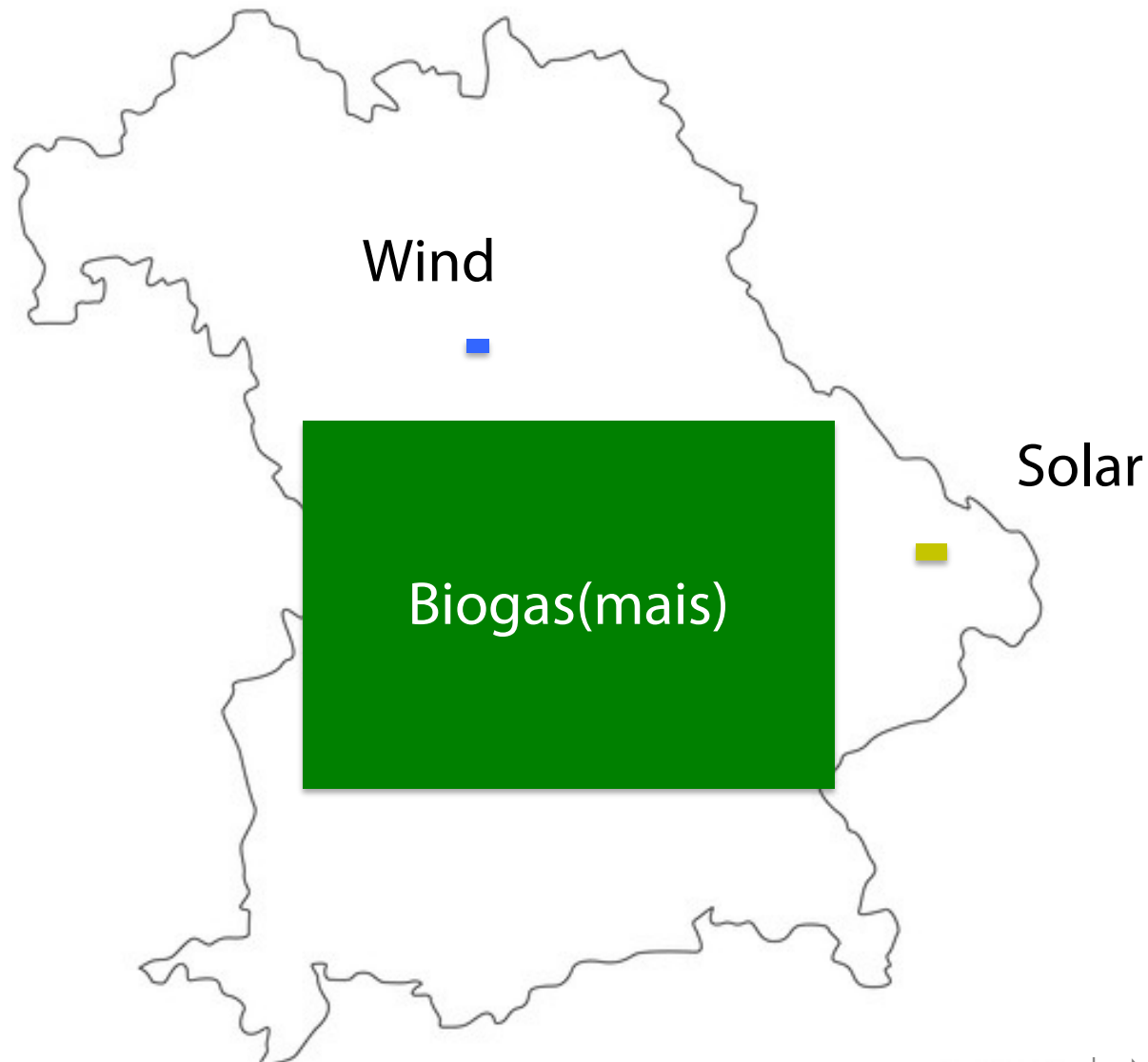
Solar PV Global Capacity and Annual Additions, 2008-2018



Note: Data are provided in direct current (DC). Totals may not add up due to rounding.

Source: Becquerel Institute and IEA PVPS.

Flächenverbrauch für den Ersatz aller bay. AKW



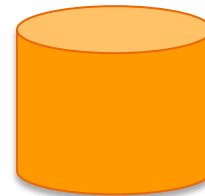
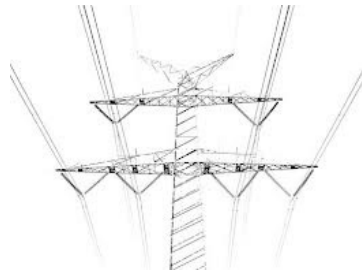
Flächenbedarf exemplarisch, Nicht maßstabsgetreu

Gesamtbild: Wir brauchen Netze und Speicher

Erzeugung



Verteilung
Speicherung



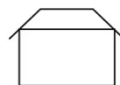
zentral
vs.
dezentral



Verbrauch



Haushalte



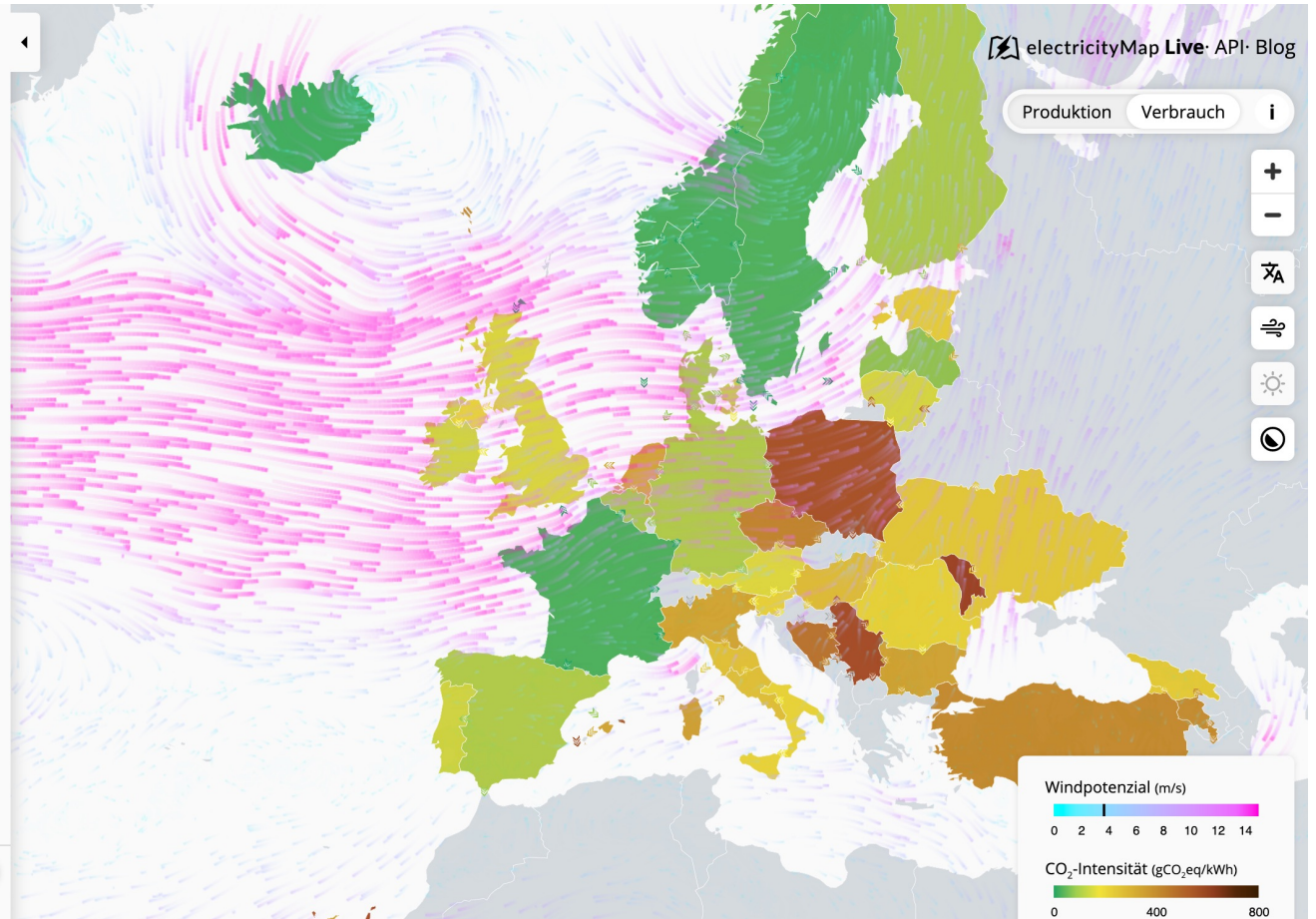
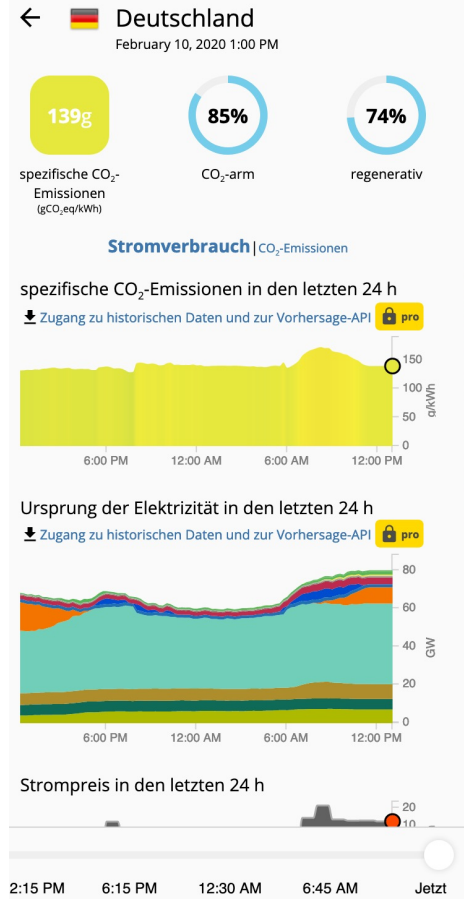
Gewerbe Handel
Dienstleistung



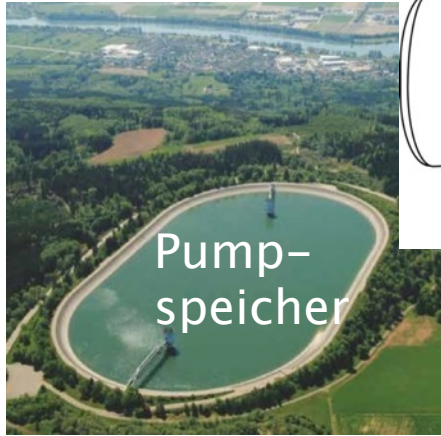
Industrie

Vollständiger Netzausbau nötig, hilft aber nur bedingt → Speicher nötig

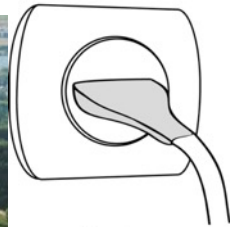
10.02.2020: 80 % EE



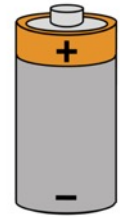
Was sind Energiespeicher?



Pump-
speicher



Laden



Speichern



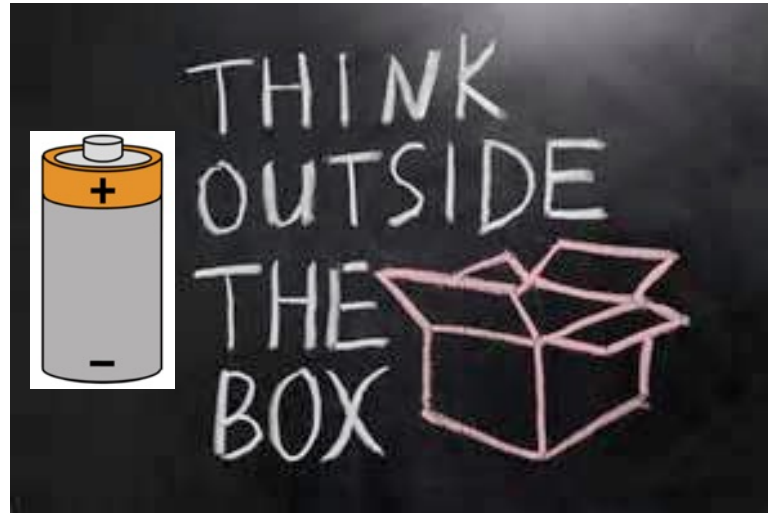
Entladen



Kohlehalden

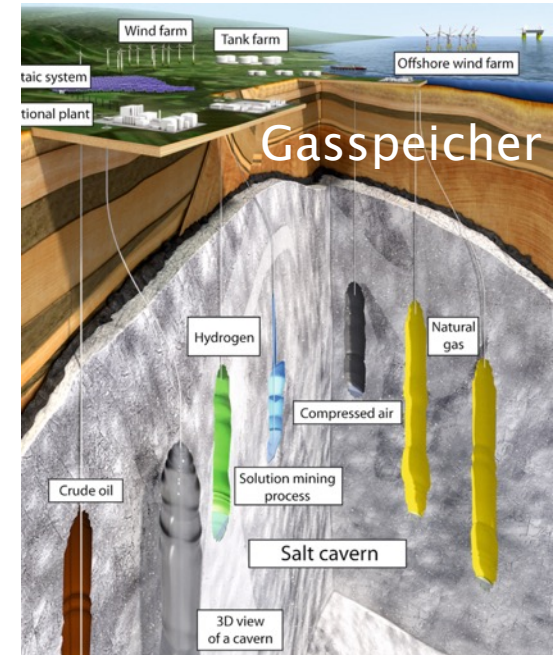


Wärme-
speicher

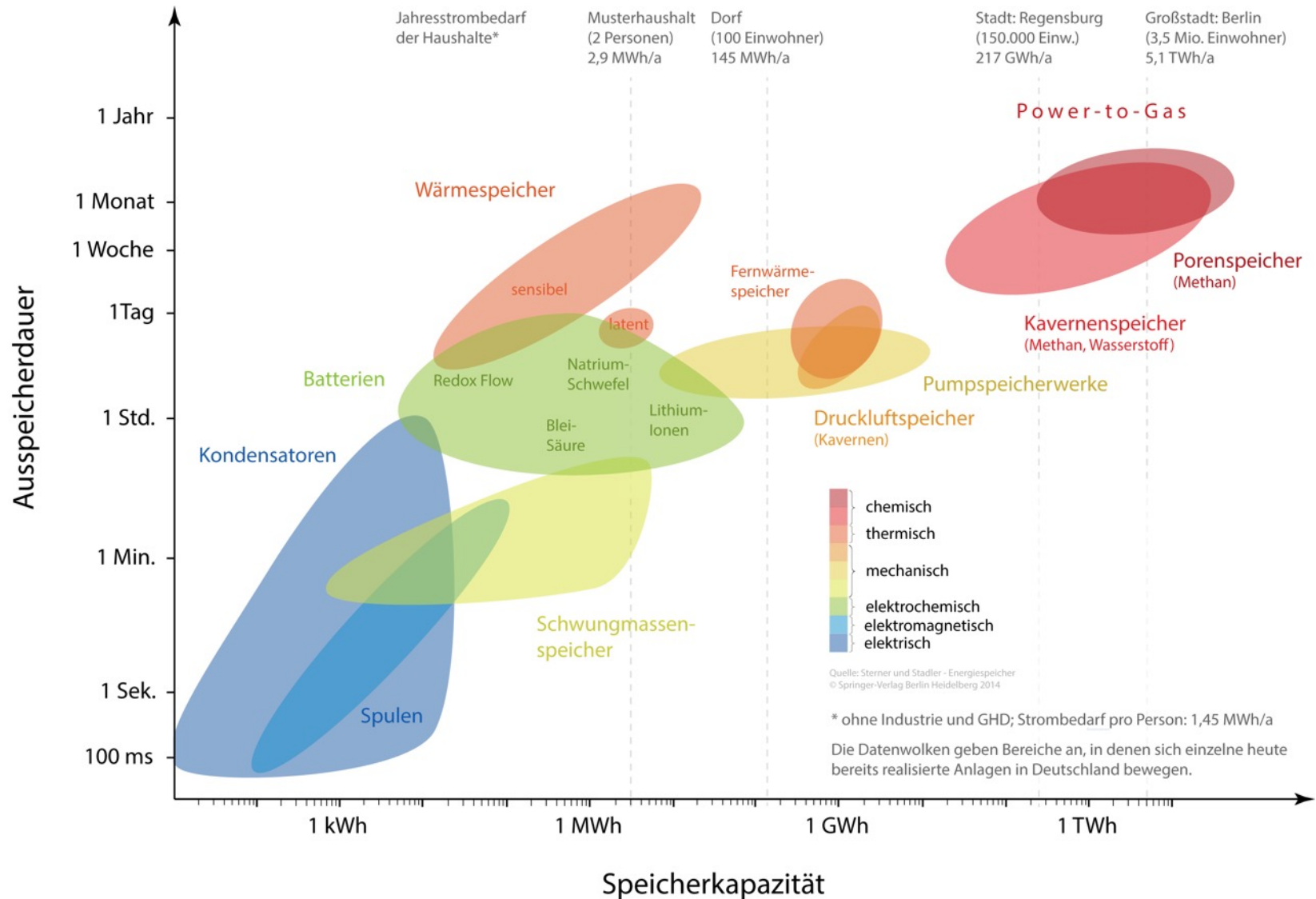


... viel mehr als Batterien!

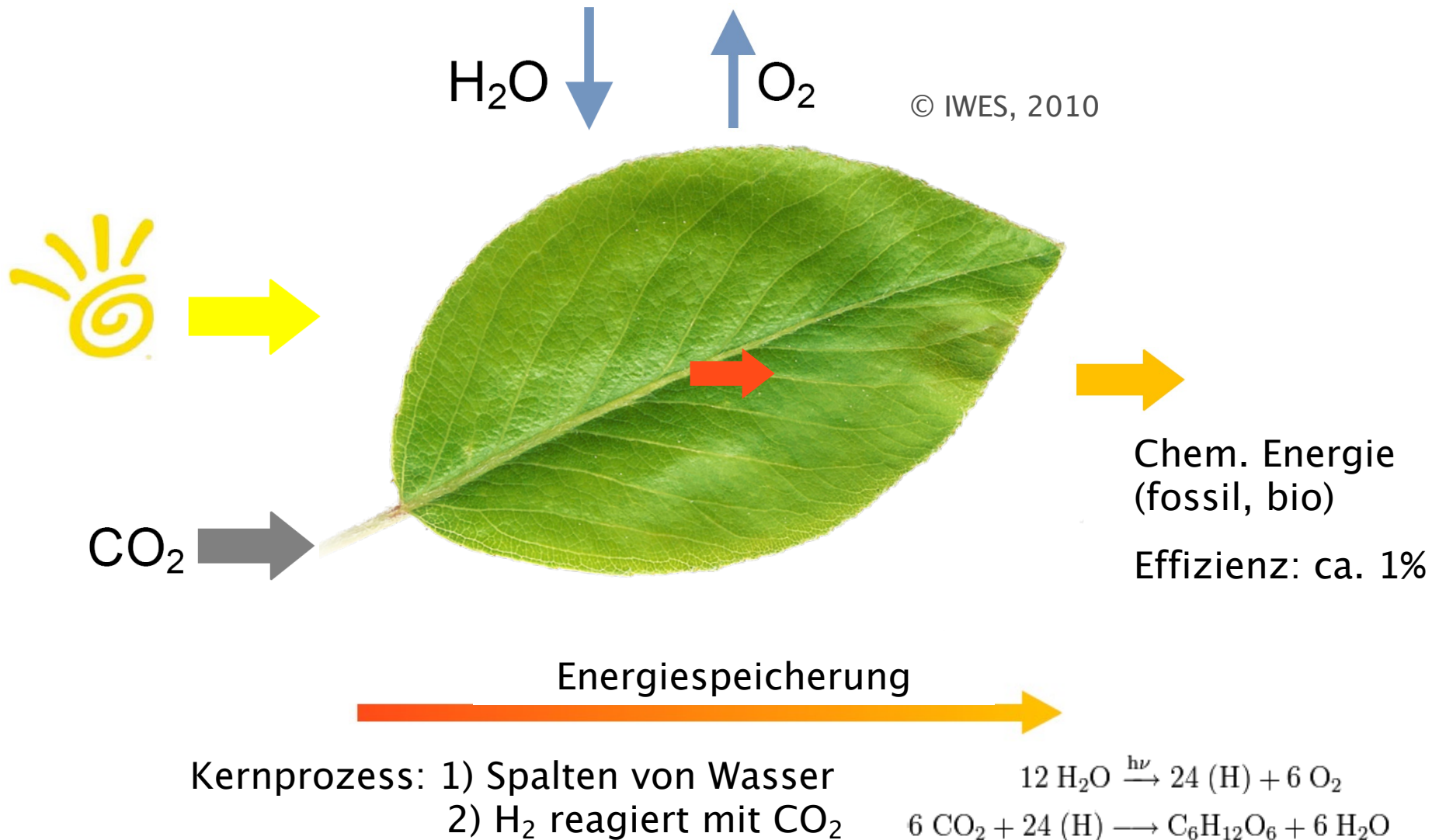
Kurzzeit: Bat., Pumpspeicher
Langzeit: Power-to-Gas



Für die Energiewende sind alle nötigen Speichertechnologien in Marktreife vorhanden

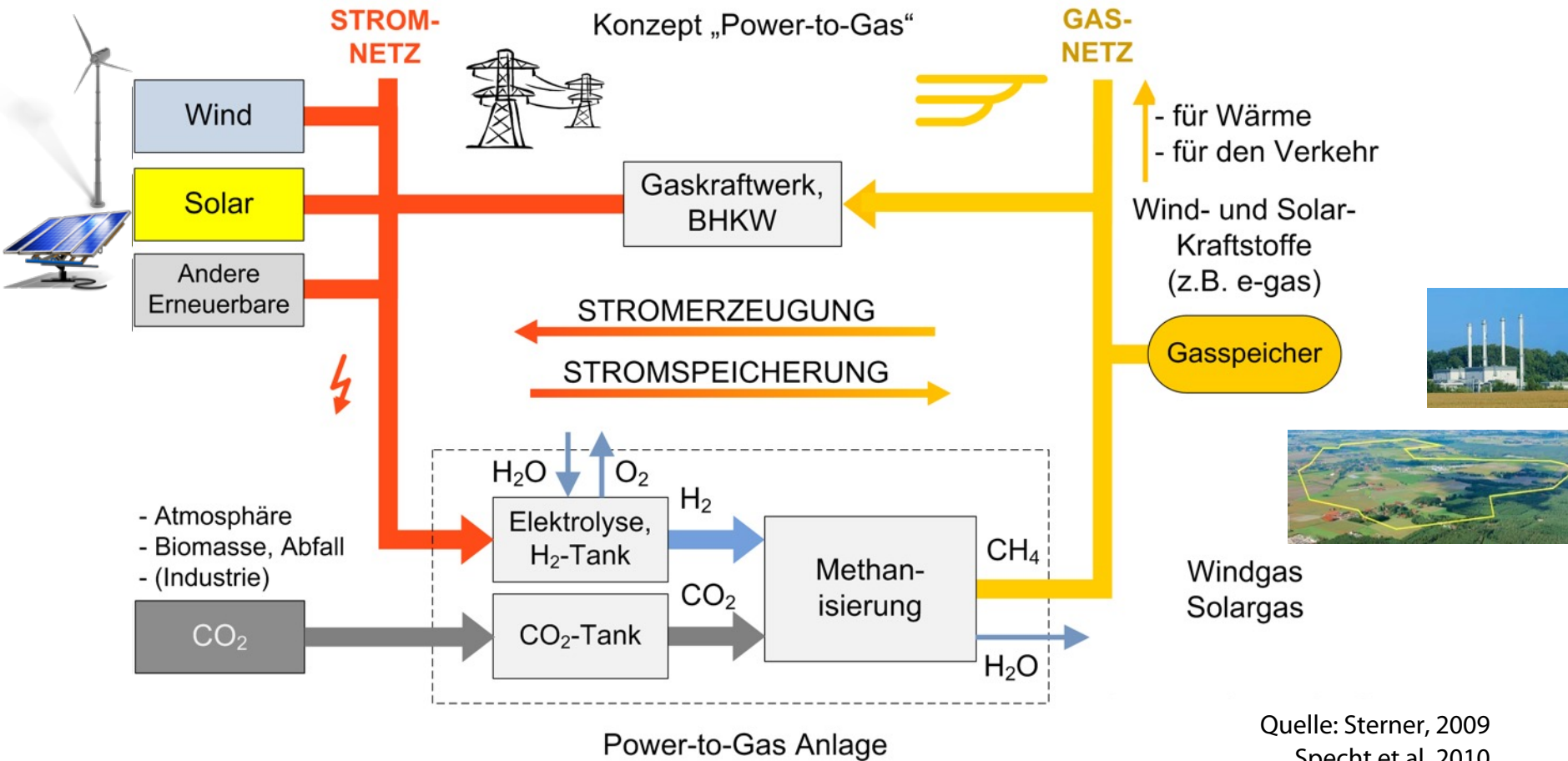


Wie speichert die Natur Energie über lange Zeiträume?



Power-to-Gas Das Original

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



Quelle: Sterner, 2009
 Specht et al, 2010

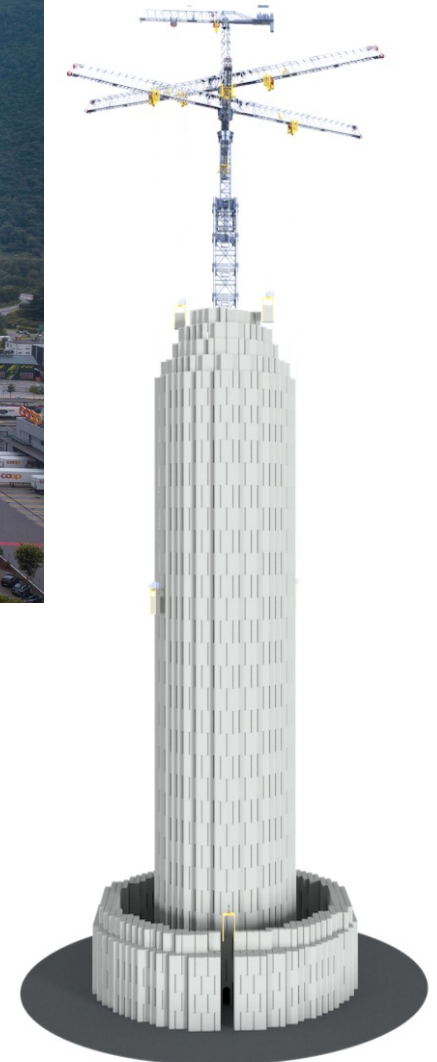
Sterner, M. (2009): Bioenergy and renewable power methane in integrated 100% renewable energy systems. Limiting global warming by transforming energy systems. Kassel University, Dissertation.
<http://www.upress.uni-kassel.de/publi/abstract.php?978-3-89958-798-2>

ORBIT: Startschuss zur Einspeisung von SNG in Ibbenbüren 23.10.2020

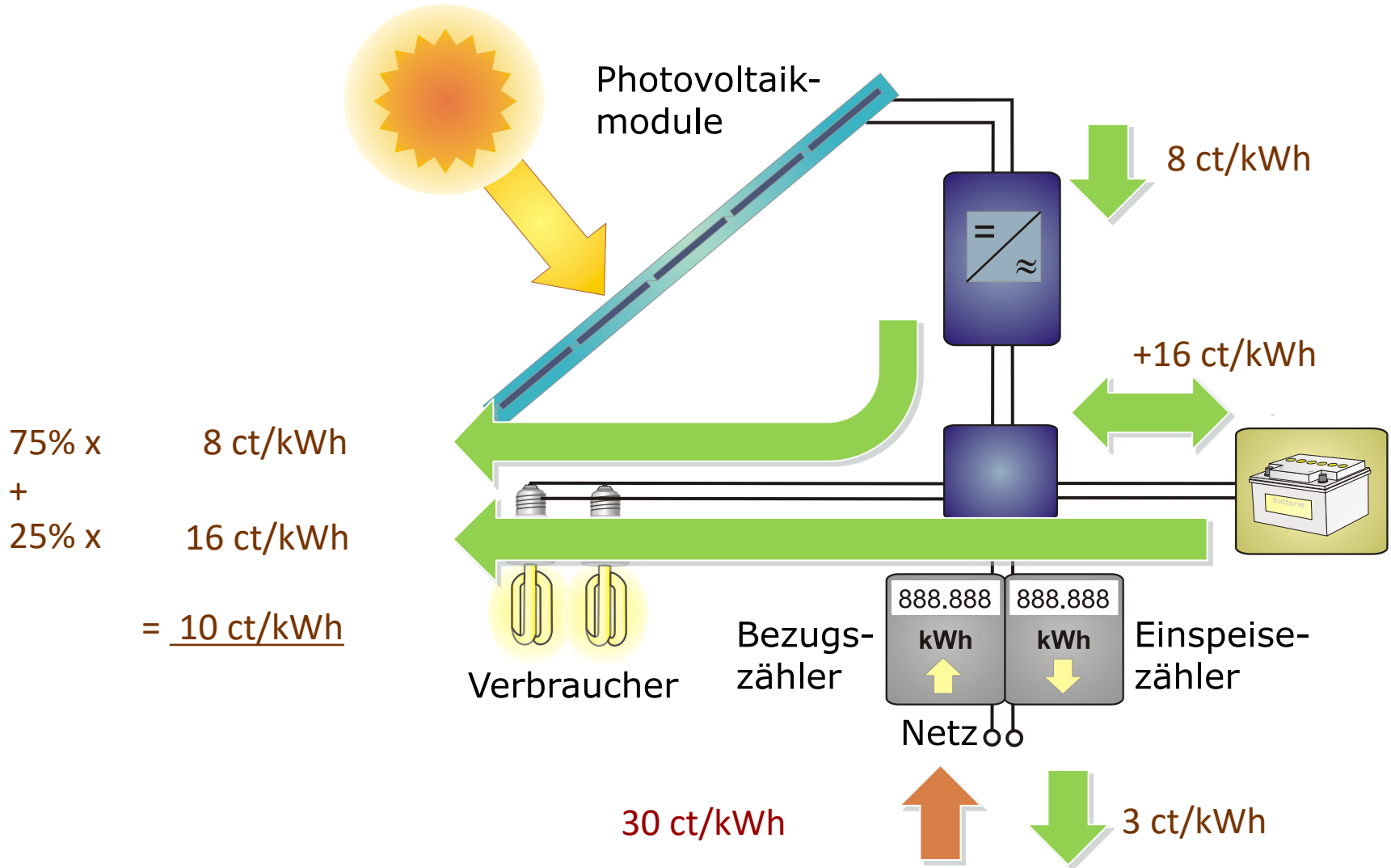


ORBIT Forschungsvorhaben „ORBIT“ zur biologischen Methanisierung

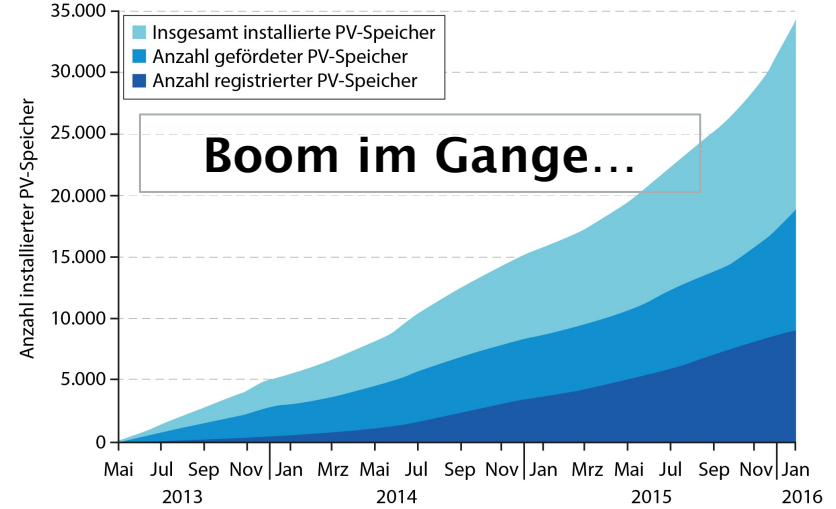
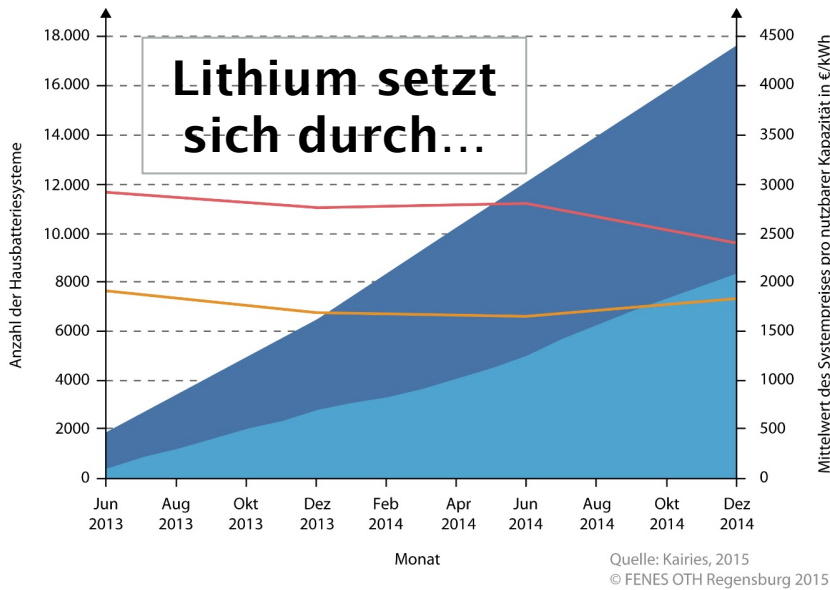
Neue Innovation: Kranspeicher aus der Schweiz – vielversprechend! Kombination von vorhandener Technik (20–80 MWh)



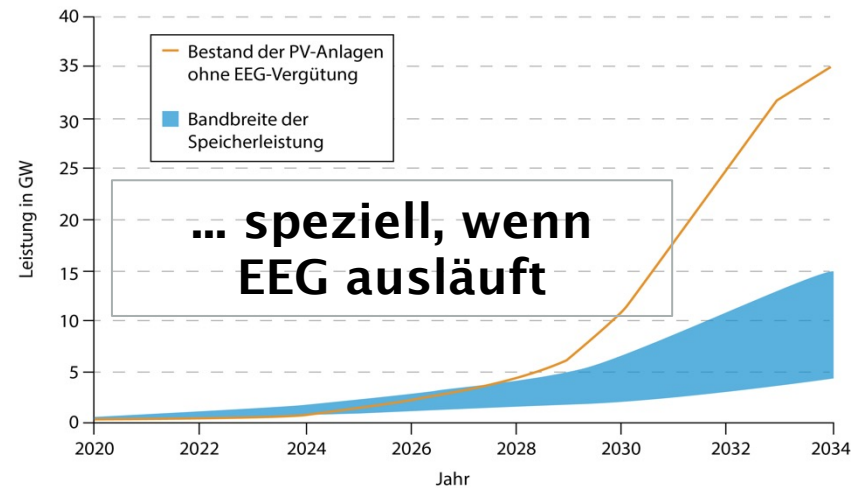
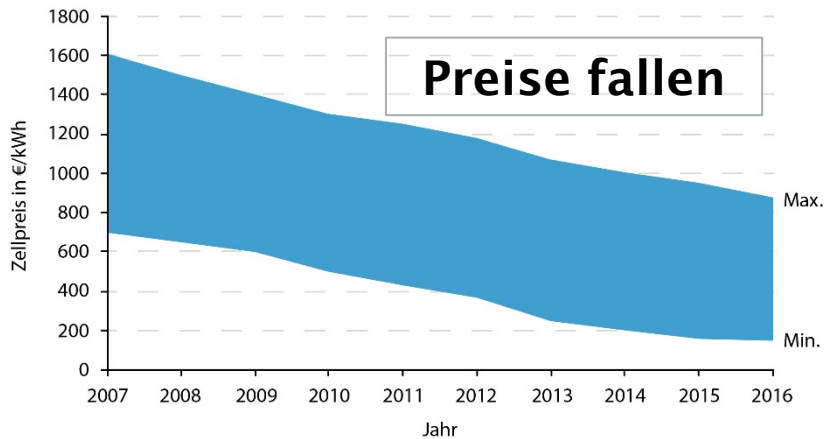
Hausbatteriespeicher bei günstigen Batteriekosten und hohem PV-Eigenverbrauch (ohne Steuern und Abgaben) wirtschaftlich



Entwicklung der Hausbatteriespeicher seit 2007

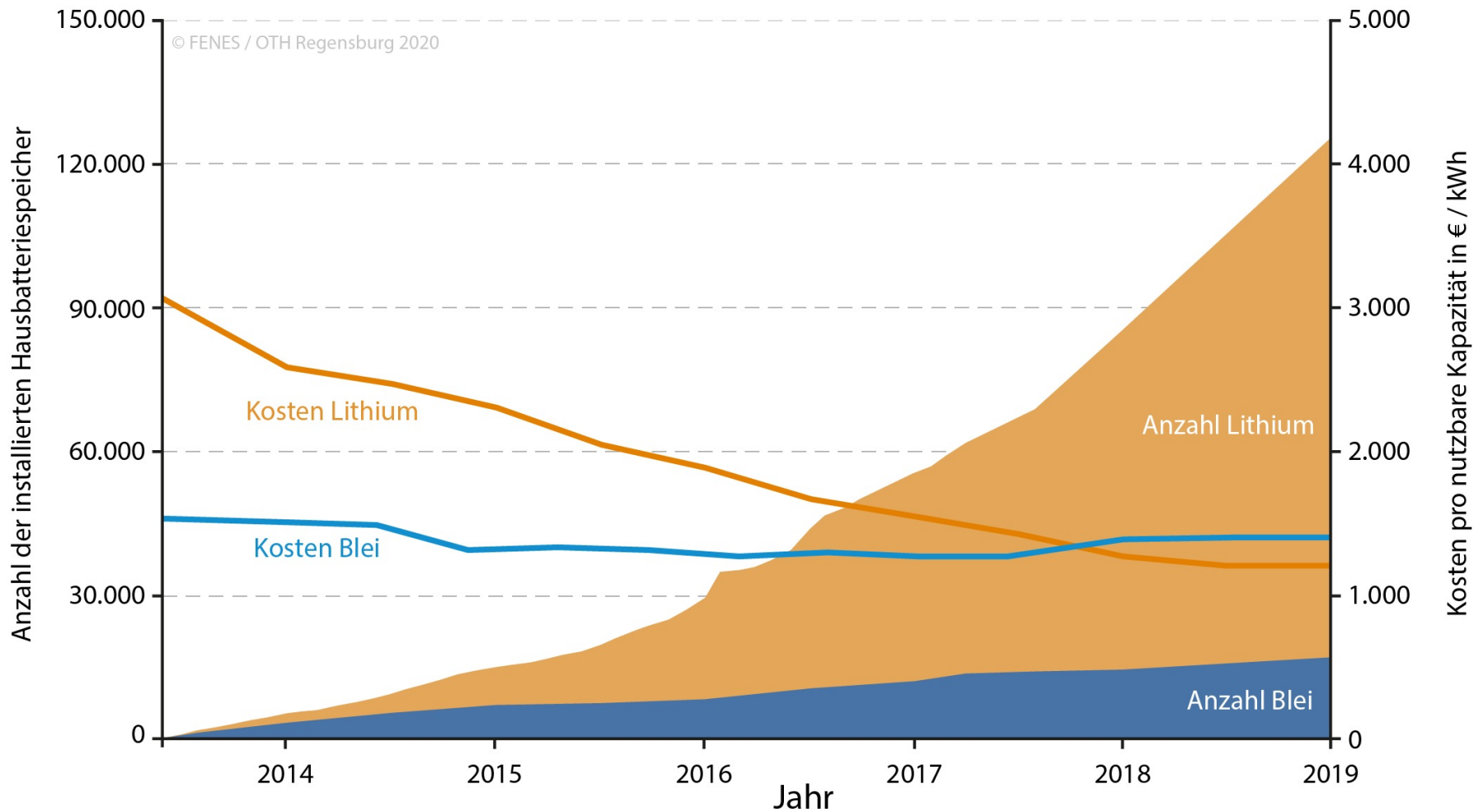


- Anzahl Batteriespeicher ohne KfW-Förderung
- Anzahl Batteriespeicher KfW-gefördert
- Systempreis Blei-Batteriespeicher
- Systempreis Lithium-Batteriespeicher



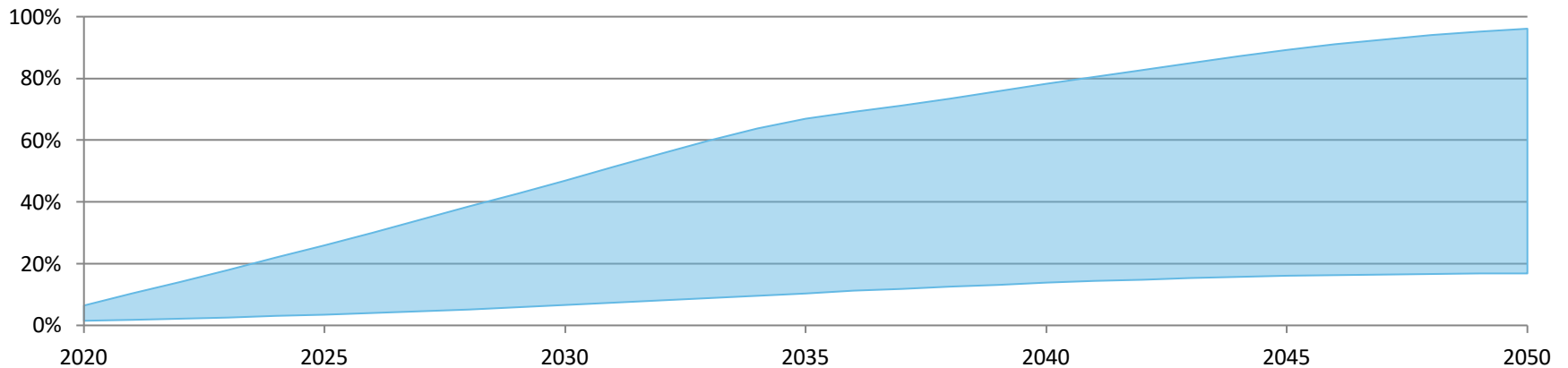
Hausbatterien in D: Anzahl steigt, Preise fallen

Entwicklung bis 2019, Preissenker Elektromobilität

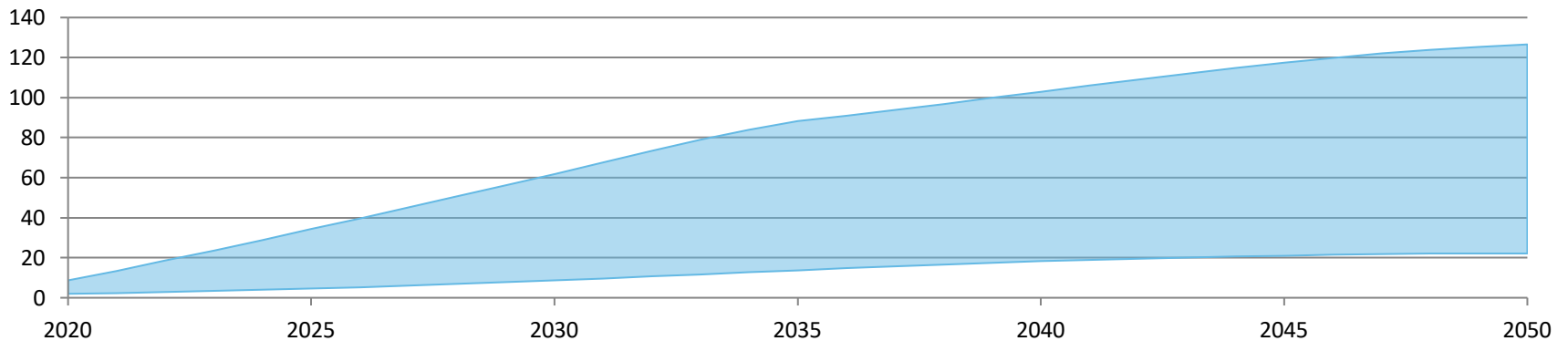


Elektrofahrzeuge – Boom in vollem Gange

Bandbreite mögliche Entwicklung E-Mobilität aus Studien (summierter Anteil Elektrofahrzeuge am PKW Bestand)



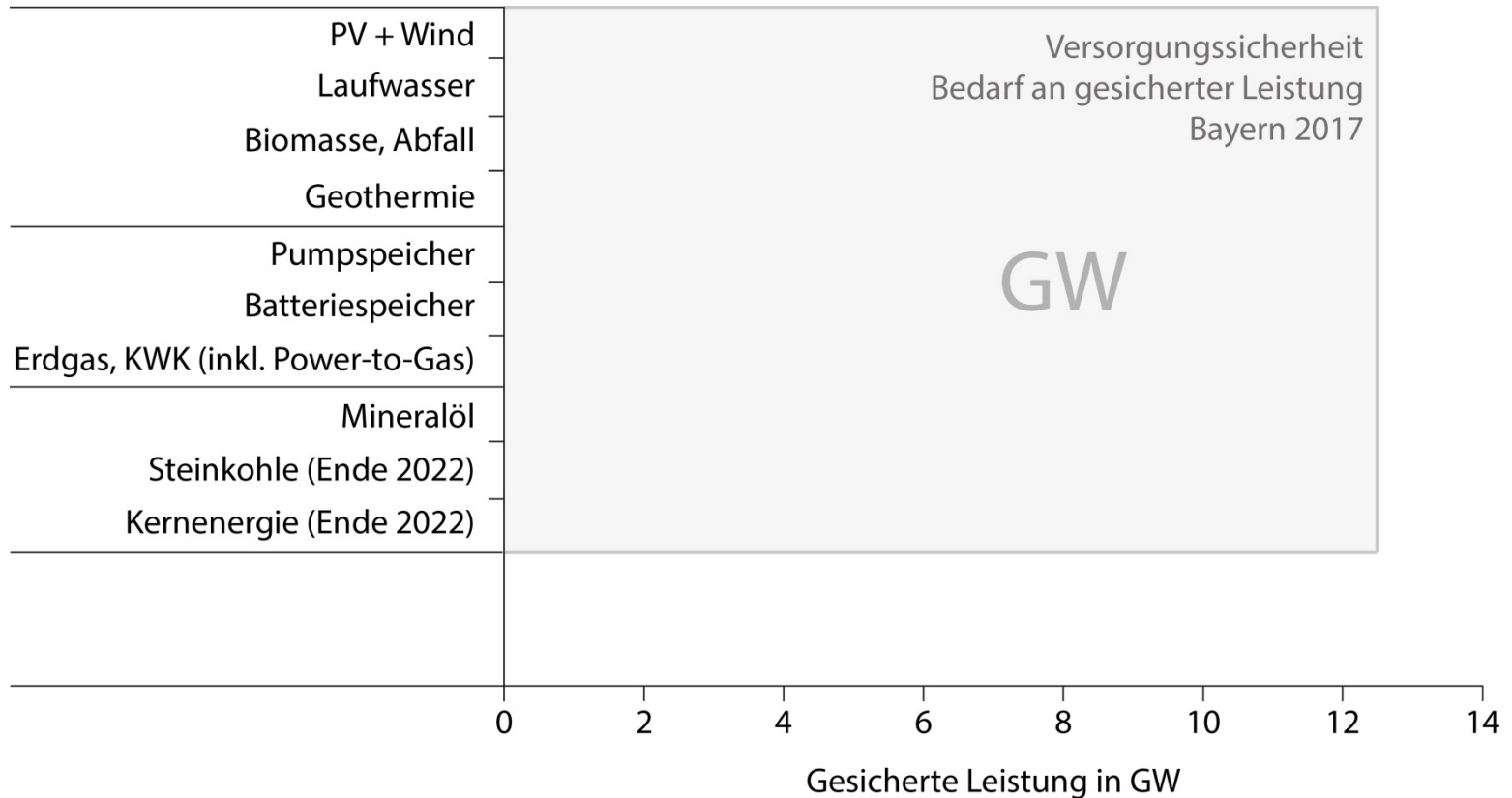
kumulierte Leistung der E-Autos am Netz (GW) (Annahme: konstanter Bestand von 43,9 Mio. PKW in D)



Versorgungssicherheit

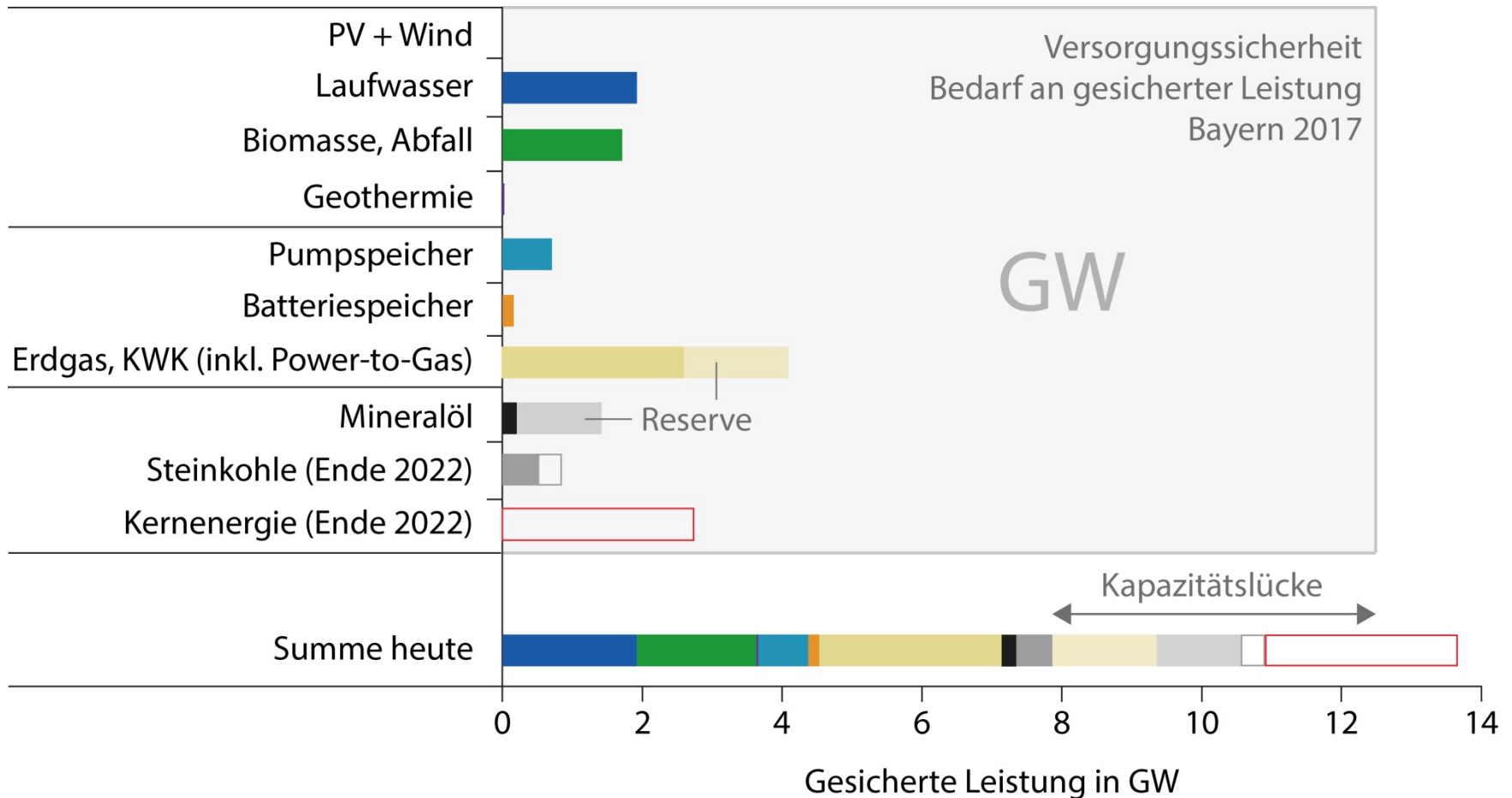
Bedarf

Stromleitungen bringen keine Versorgungssicherheit
→ nur wenn Kraftwerke und Speicher dahinter sind
(Kohleausstieg, Nachbarländer?)

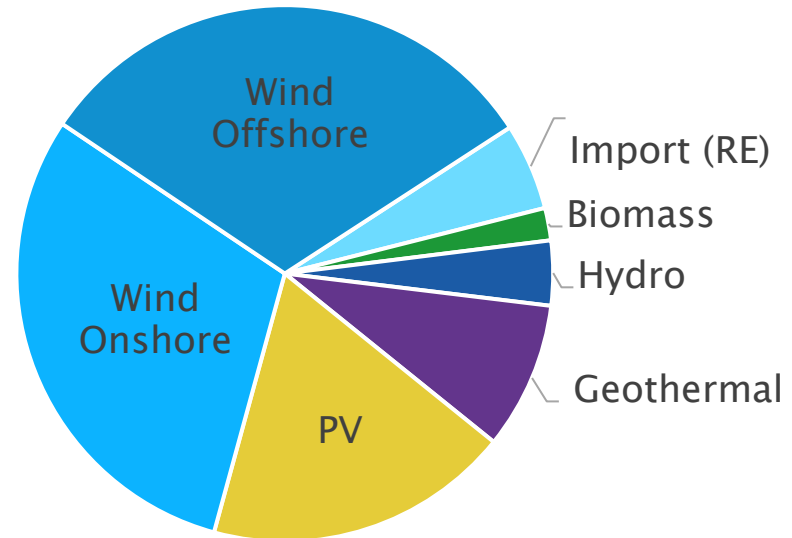


Versorgungssicherheit

Kapazitätslücke schließen durch Speicher und Gaskraft/KWK



Gesicherte Leistung kommt am Ende des Tages überwiegend aus (grüner) Gaskraft / KWK



Gesicherte Leistung	GW
Gaskraft / KWK + Gasspeicher (Power-to-Gas & Biogas)	72
Pumpspeicher	8
Geothermie	6
Laufwasser	2
Wind, PV	0

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



Kohle/Atom**aus**stieg



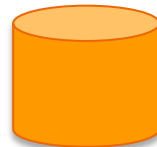
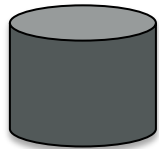
Speicher**ein**stieg

Gasinfrastruktur = Flexibilität

Speicherkapazität:
5000 x soviel wie Strom

Transportkapazität:
ca. 4 x soviel wie Strom

Nord-Süd - Strom:
18 GW, Gas: 75 GW



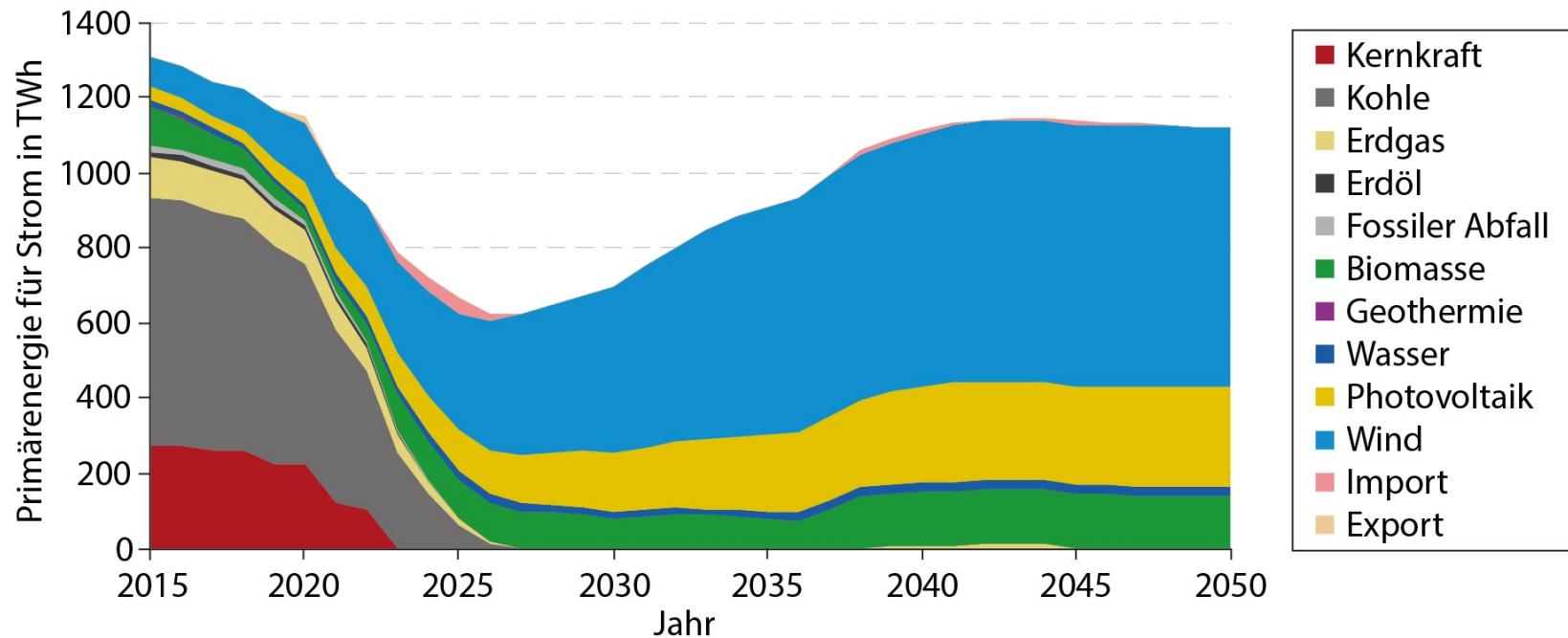
Batterien
42 Mio. Kfz
(Theorie)

! Pumpspeicher

Kohleausstieg bis 2026

Verdoppelung Strombedarf

Ergebnis einer VWL-optimierten Modellierung



- Kohleausstieg bis 2028
- Im Jahr 2050 keine Verbrennung von fossilen Brennstoffen
- Ausbau der erneuerbaren Energien bis an die Potenzialgrenzen
- Etwa 25 % des Stroms im Jahr 2050 für Power-to-X (synth. Kraftstoffe etc)
- Etwa 50 % „“ für Power-to-Heat und E-Mob. → **75 % für Sektorenkopplung!**

GEFÖRDERT VOM

Fazit PtG als Stromspeicher

Dunkelflaute?

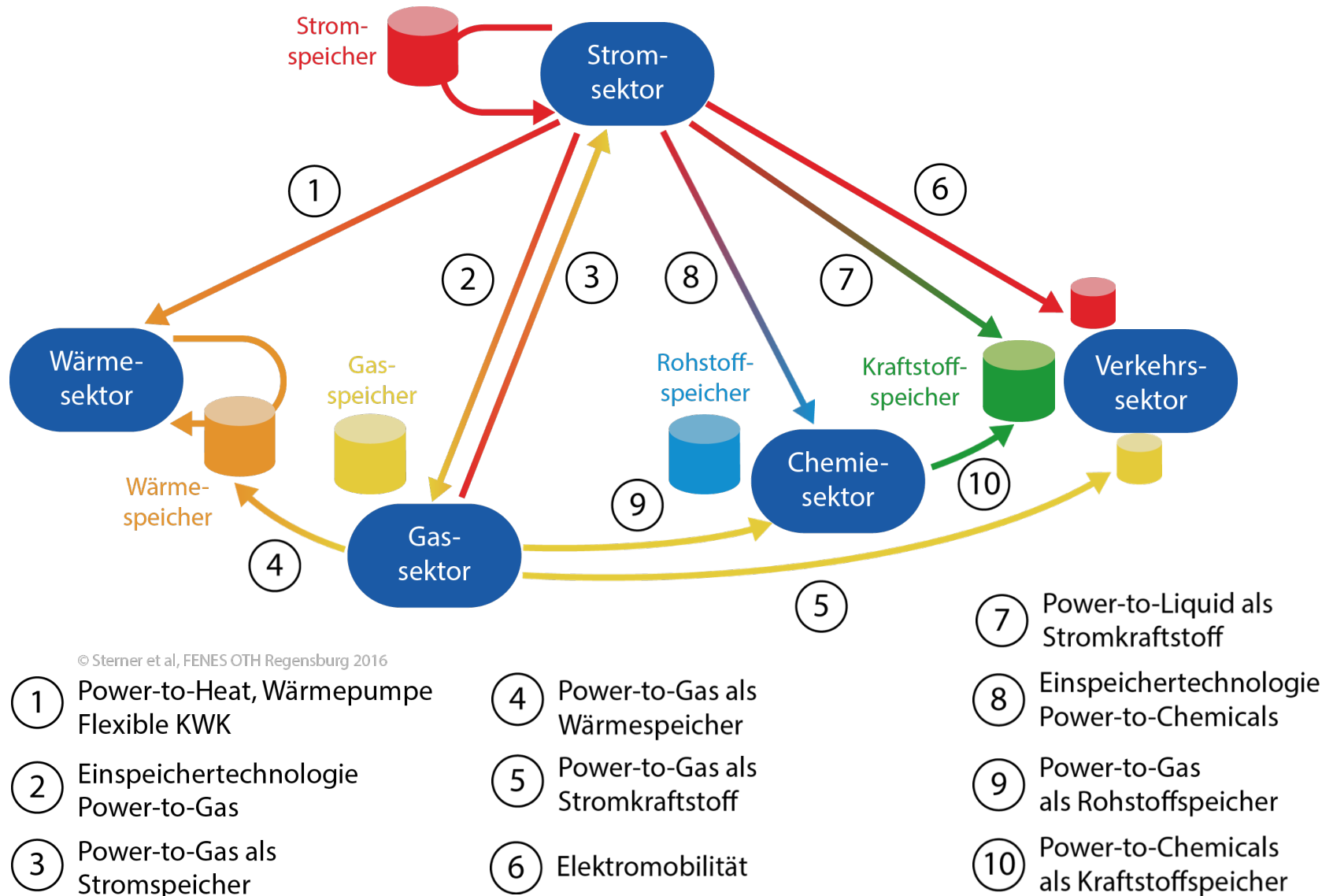
Saisonale Energiespeicherung?

→ **Ausreichend Speicherkapazitäten im Gassektor vorhanden**

→ **Power-to-Gas** durch Gasinfrastruktur
und geringer Selbstentladung die
effizienteste und kostengünstigste Lösung

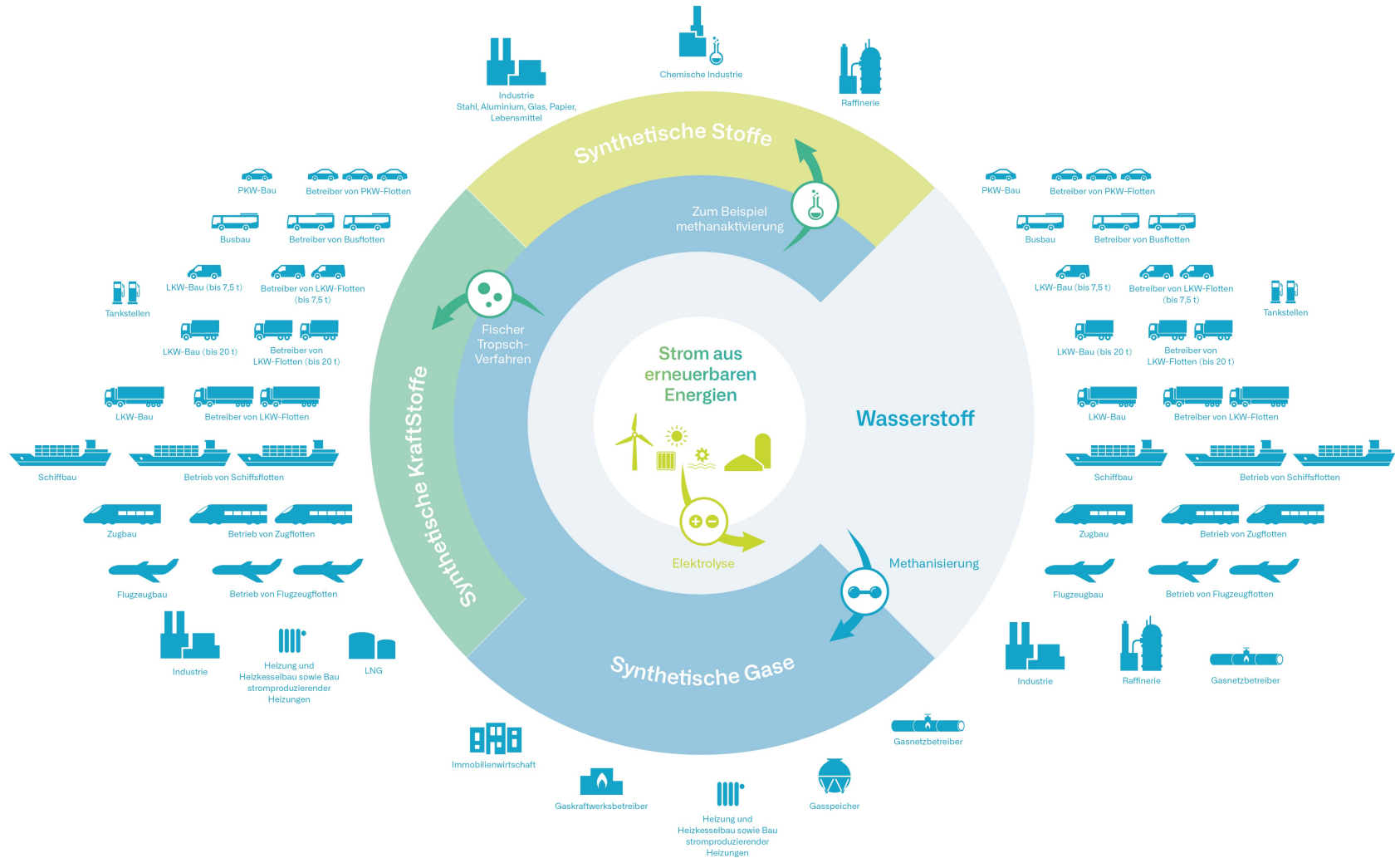
- 1) Energiewende = Klimaschutz
- 2) PtG & Stromwende
- 3) **PtG & Wärmewende**
- 4) PtX & Verkehrswende
- 5) PtX & Industriewende
- 6) Was zu tun ist

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



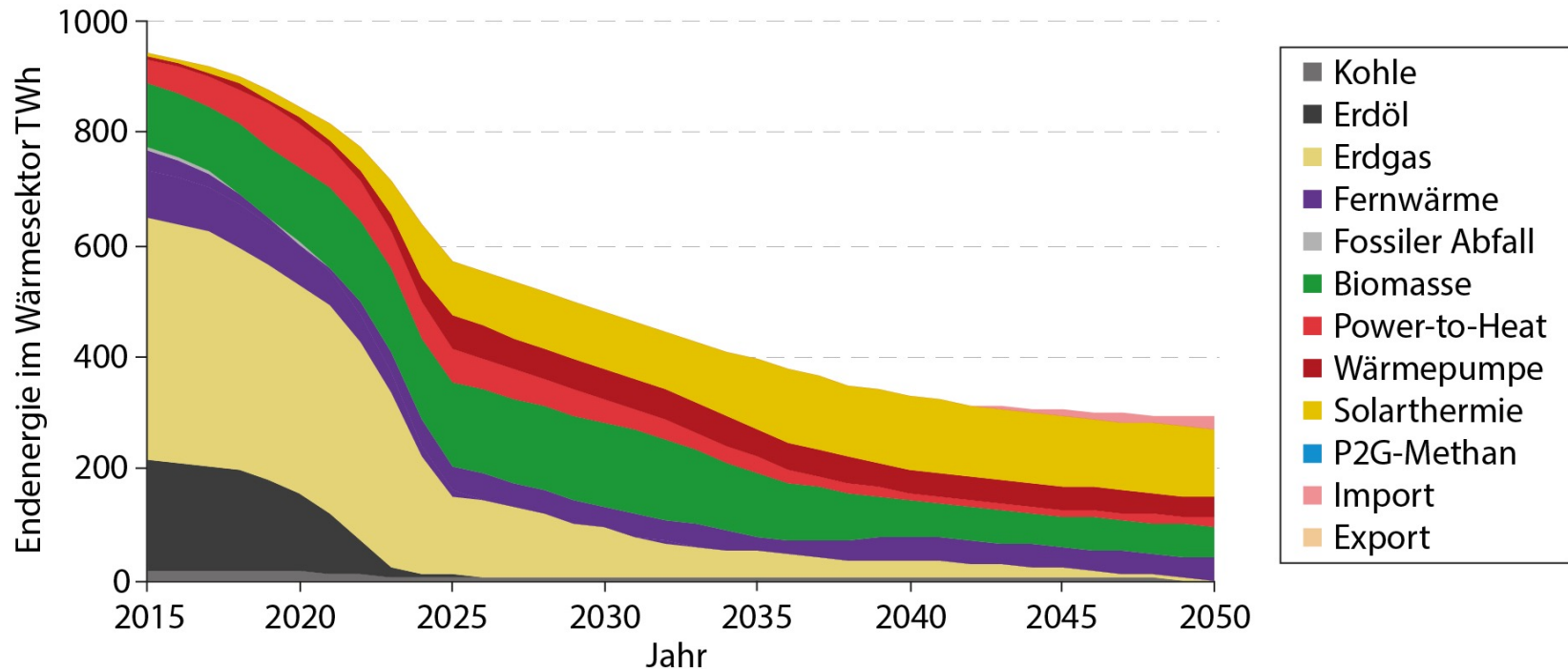
© Sterner et al, FENES OTH Regensburg 2016

Nutzungsmöglichkeiten von Wasserstoff



Ölheizung-Ausstieg bis 2026 - Erdgas bis 2050

Endenergie Wärme – Ergebnis einer VWL-optimierten Modell.

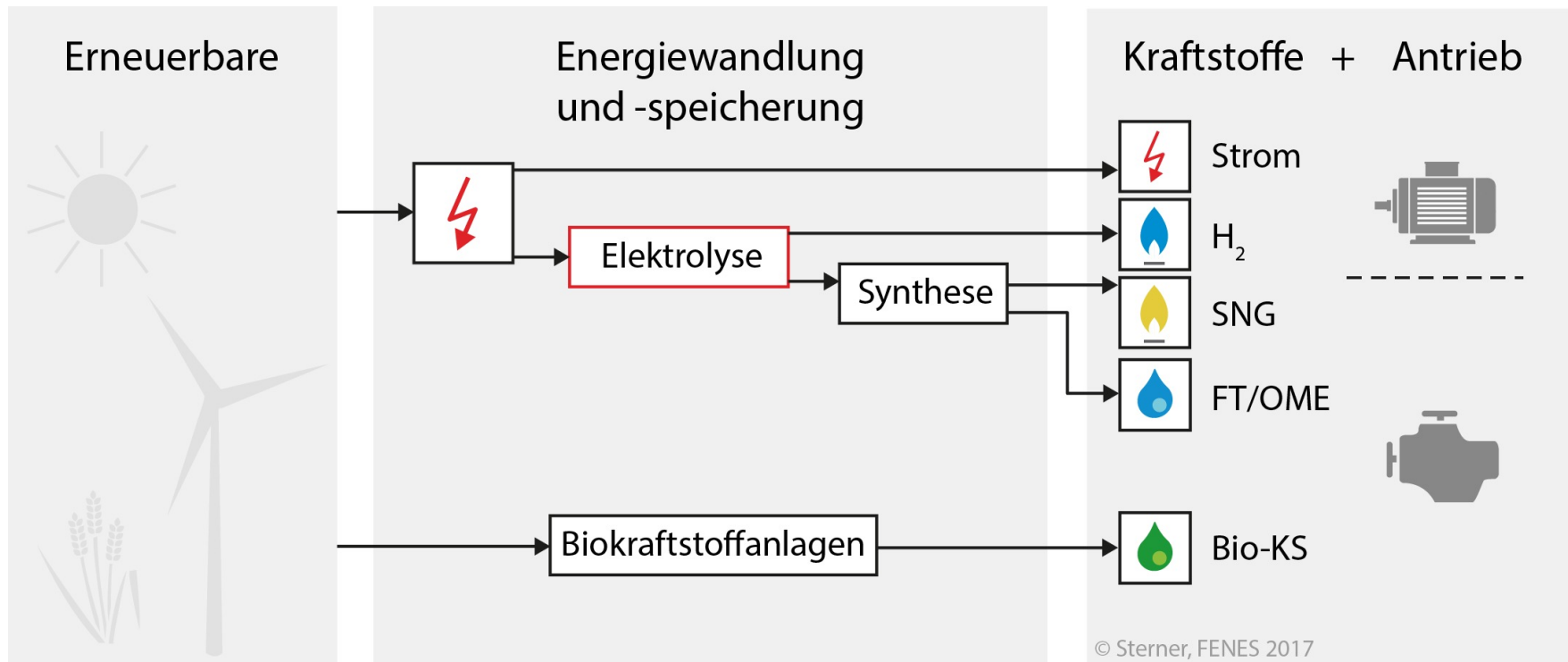


- Schneller Ausstieg aus Kohle und Erdöl
- Erdgas aufgrund niedrigem Emissionsfaktor am längstem im Wärmemarkt
- Im Jahr 2050 hauptsächlich Solarthermie, Wärmepumpen und Power-to-Heat
- Power-to-Gas für KWK und Prozesswärme notwendig

- 1) Energiewende = Klimaschutz
- 2) PtG & Stromwende
- 3) PtG & Wärmewende
- 4) **PtX & Verkehrswende**
- 5) PtX & Industriewende
- 6) Was zu tun ist

Pfad synth. Kraftstoffe

Power-to-Gas / Power-to-Liquid



Elektrolyse zentrales Element in allen PtX-Pfaden

Vieles, aber nicht alles ist direkt elektrifizierbar

Wind- und Solarkraftstoffe (Power Fuels) für nicht-elektrifizierbare Mobilität: Flug, Schiff, Schwerlast

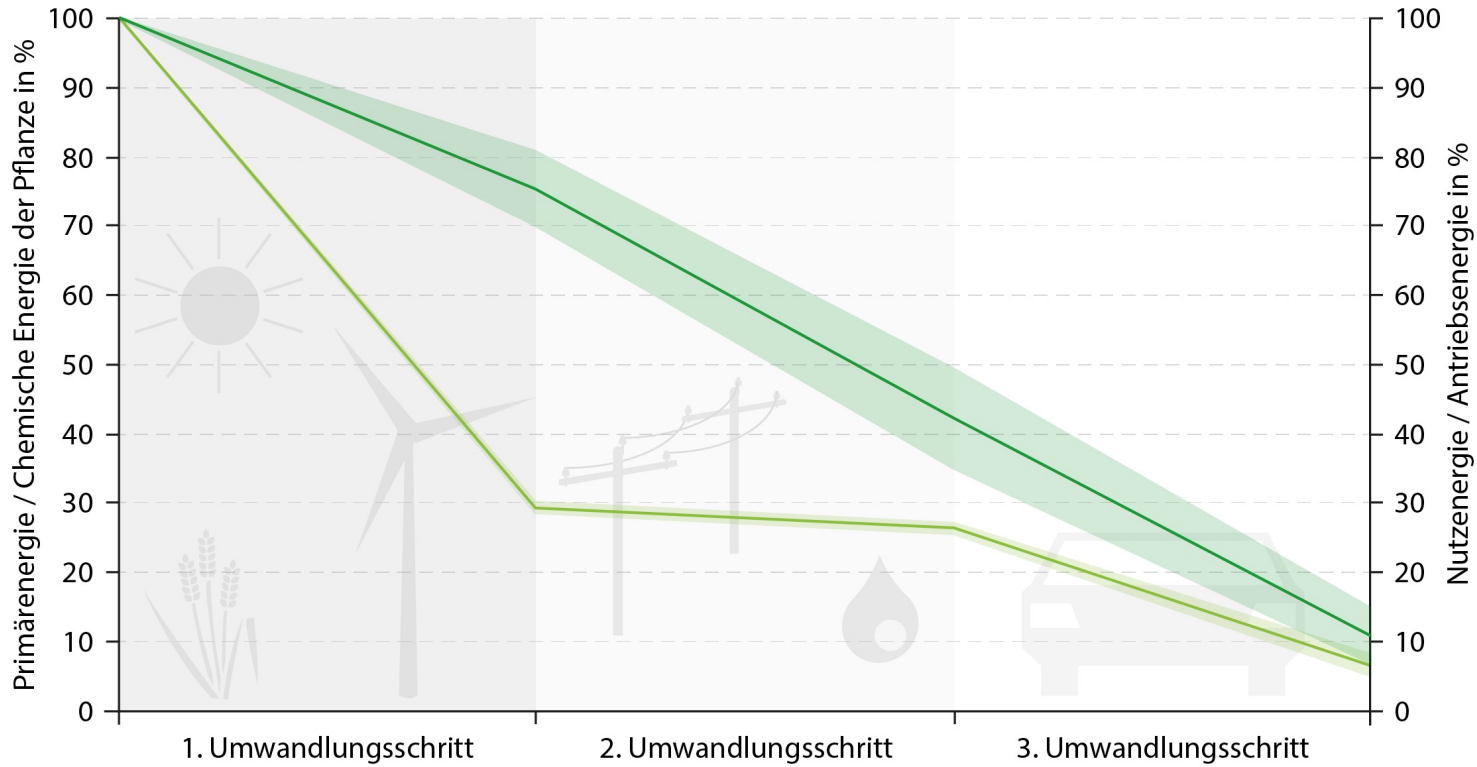
Verfahren / Energieträger		Verkehrsträger		Straße				Schiene	Schiff	Flug
				Personenverkehr		Güterverkehr				
		Kurz / Mittel	Lang	Busse	Nah	Fern				
Elektrizität	Batterie	Green	Yellow	Green	Green	Yellow	Red	Red	Red	
	Oberleitung	Red	Red	Green	Red	Yellow	Green	Red	Red	
Power-to-Gas	E-Wasserstoff	Green	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

Flüssige & gasförmige synth. KS passen perfekt in vorhandene Infrastruktur, Wasserstoff und Oberleitungen nicht

Energiewandlung – Beispiel Mobilität: Biokraftstoffe

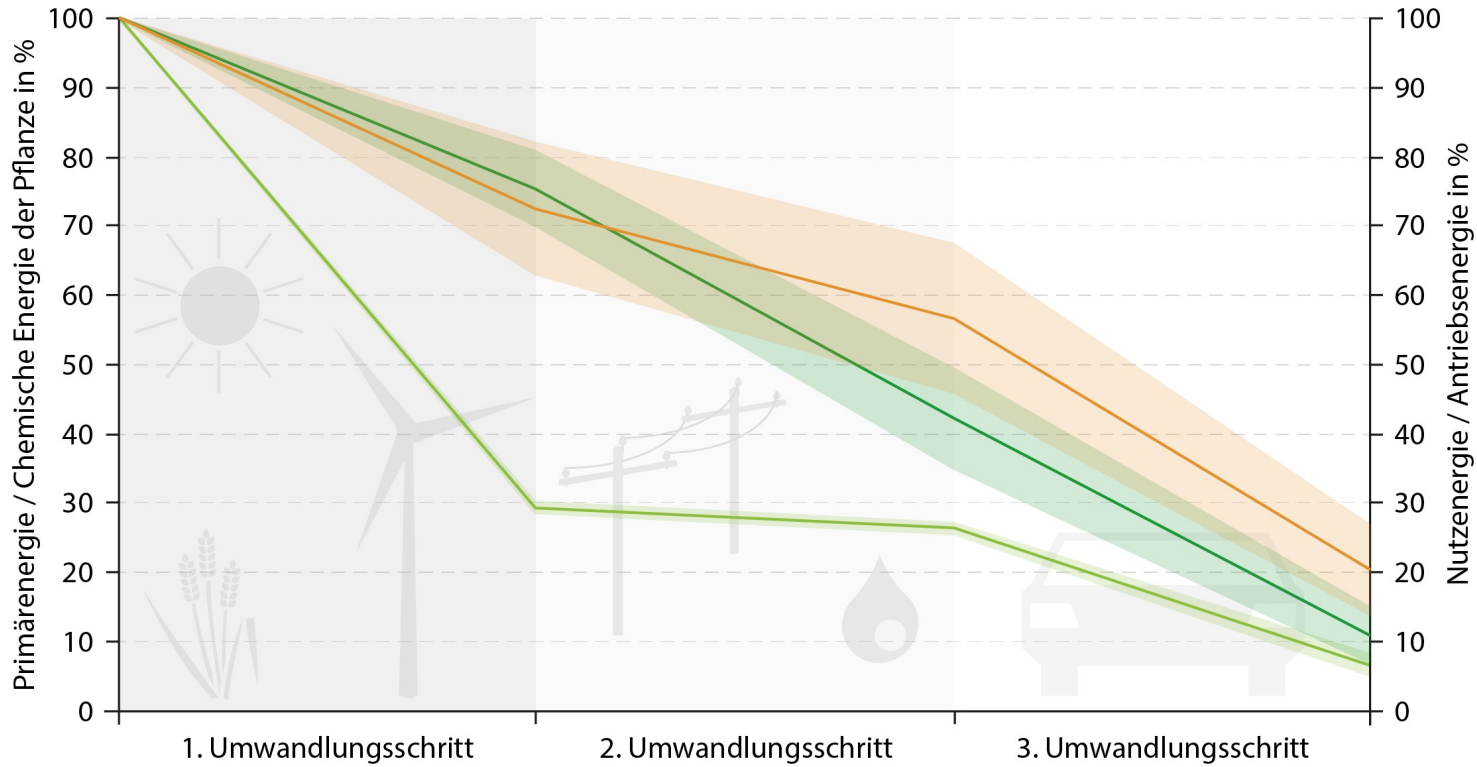
Energieeffizienz der Kraftstoff-Antriebspfade



	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

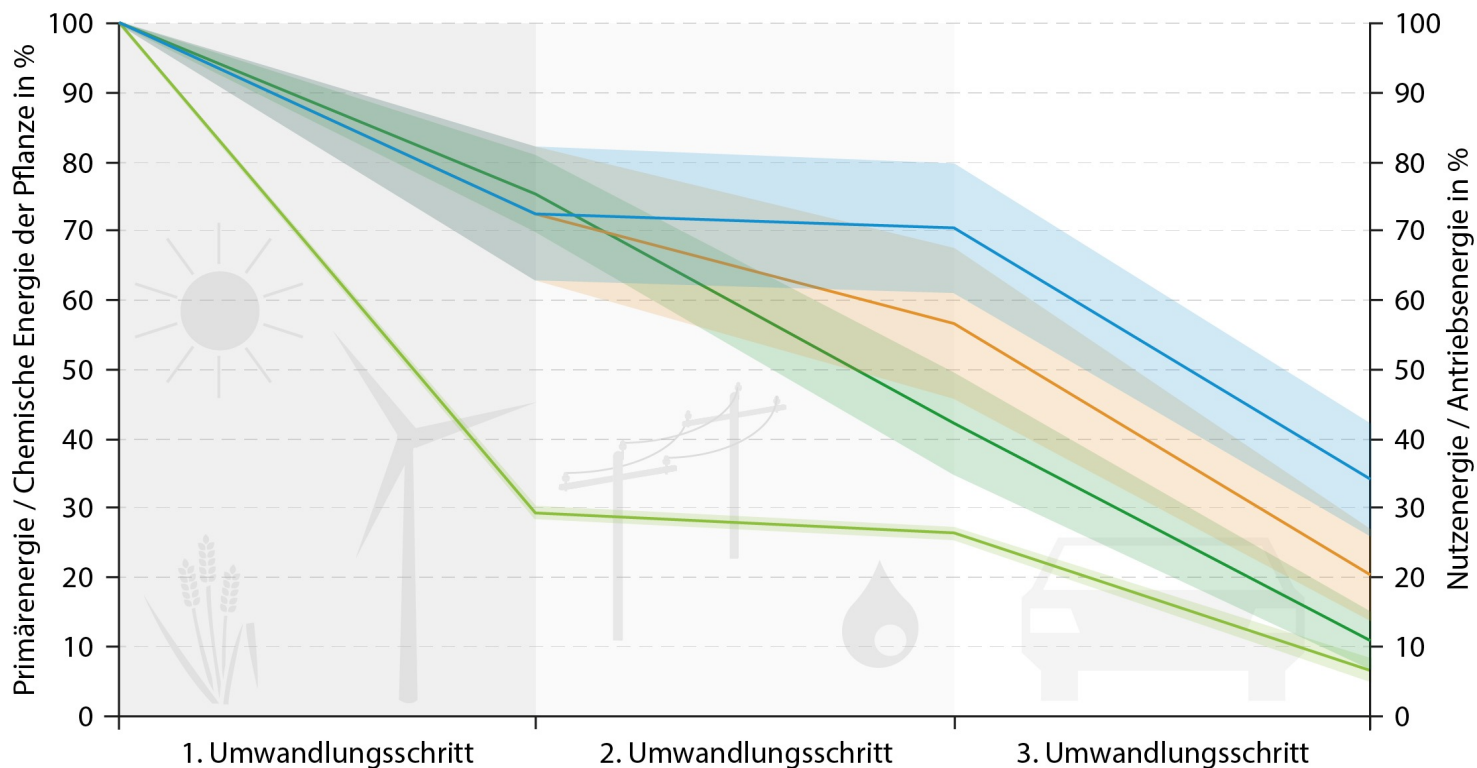
Power-to-Gas - Gasmobilität im Mittelfeld

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

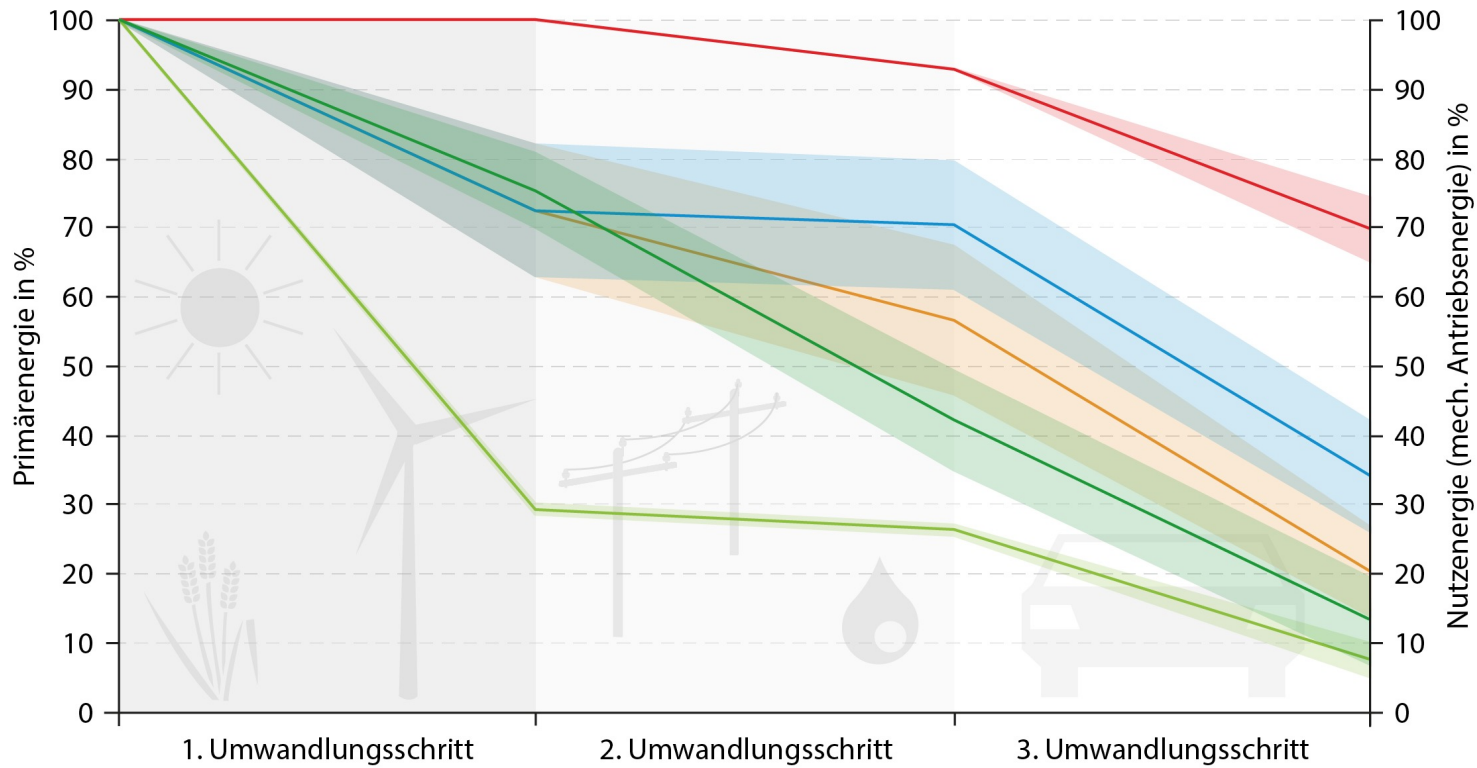
Wasserstoff-Mobilität im Antrieb effizienter Energieeffizienz der Kraftstoff-Antriebspfade



	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

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“

Selbst einfache, idealisierte Rechnung zeigt
 → wir brauchen Stromkraftstoffe

Klimaziel Verkehr: 150 Mio. t CO₂ heute auf 95 Mio. t 2030: **-55**

PKW verursacht derzeit **ca. 65 %** der Emissionen

→ **Verbrenneraus jetzt, nur noch E-Autos mit Ökostrom**

→ **alle 3 Mio. Neuzulassungen bis 2030: $8 \cdot 3 = 24$ Mio. E-PKW**

24 von 48 Mio. Pkw = 50 % ersetzt * 15 kWh/100 km * 20.000 km Jahreslaufleistung = 72 TWh Strombedarf

→ **1,5 x Solarstrom** heute oder **0,7 x Windstrom** heute

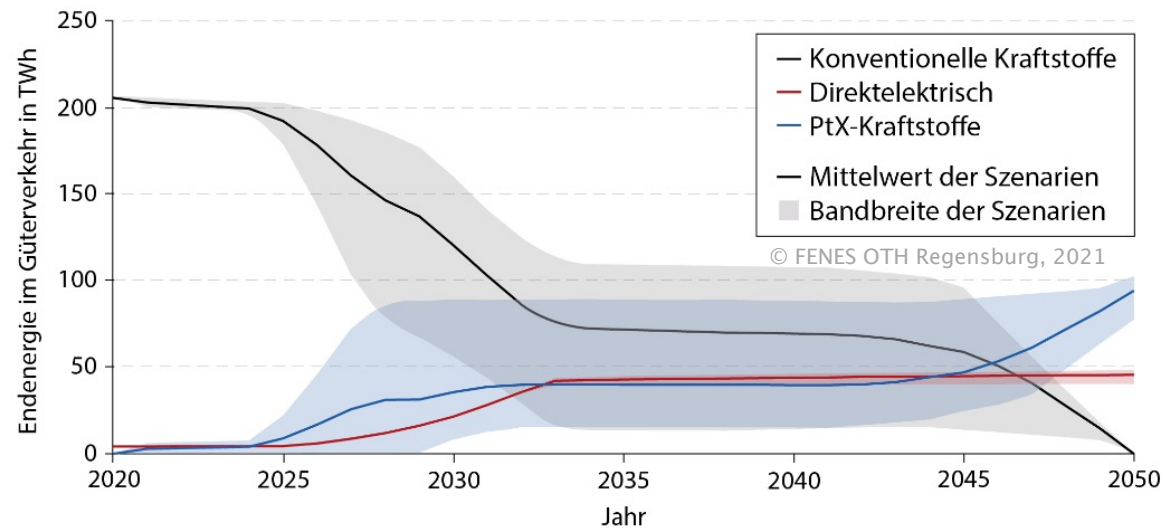
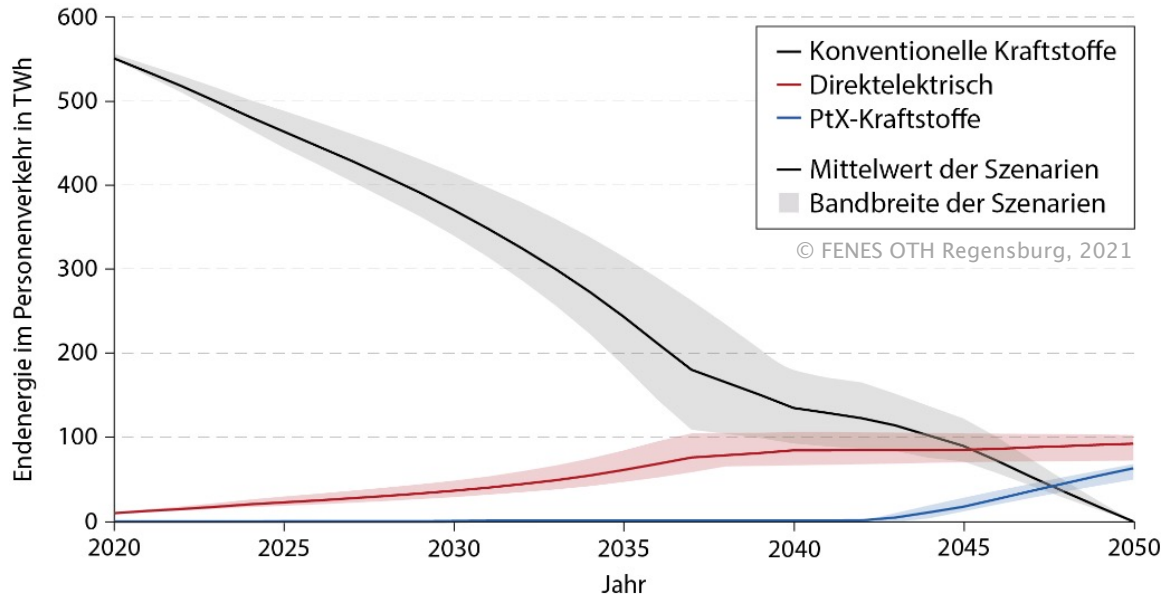
→ Nicht berücksichtigt: Winterladen, Lastspitzen etc.

CO₂-Minderung: 150 Mio. t * 65 % * 50 % = **49 Mio t statt 55**

→ bei Vernachlässigung der Mehremissionen in der Herstellung

→ selbst unter idealen Annahmen: wir brauchen Stromkraftstoffe

Endenergiebedarf im Verkehr 2020–2050



Klimaziele im Verkehr sind nur zu erreichen mit E-Mobilität und Stromkraftstoffen

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

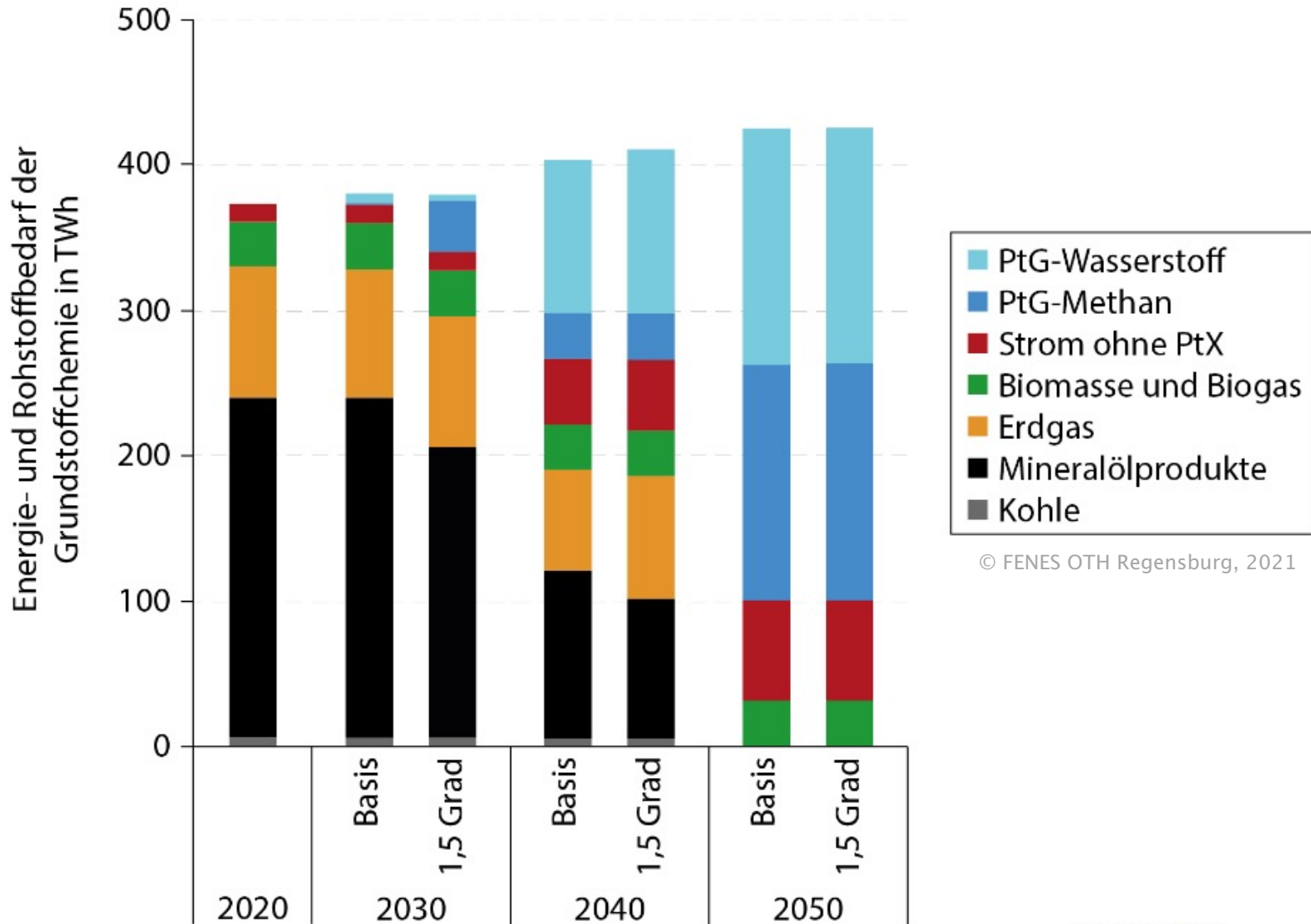
Biokraftstoffe in nachhaltigem Potential und Akzeptanz begrenzt

→ **Notwendigkeit für Stromkraftstoffe gegeben**

Herausforderungen: Entwicklungsstand und Kosten

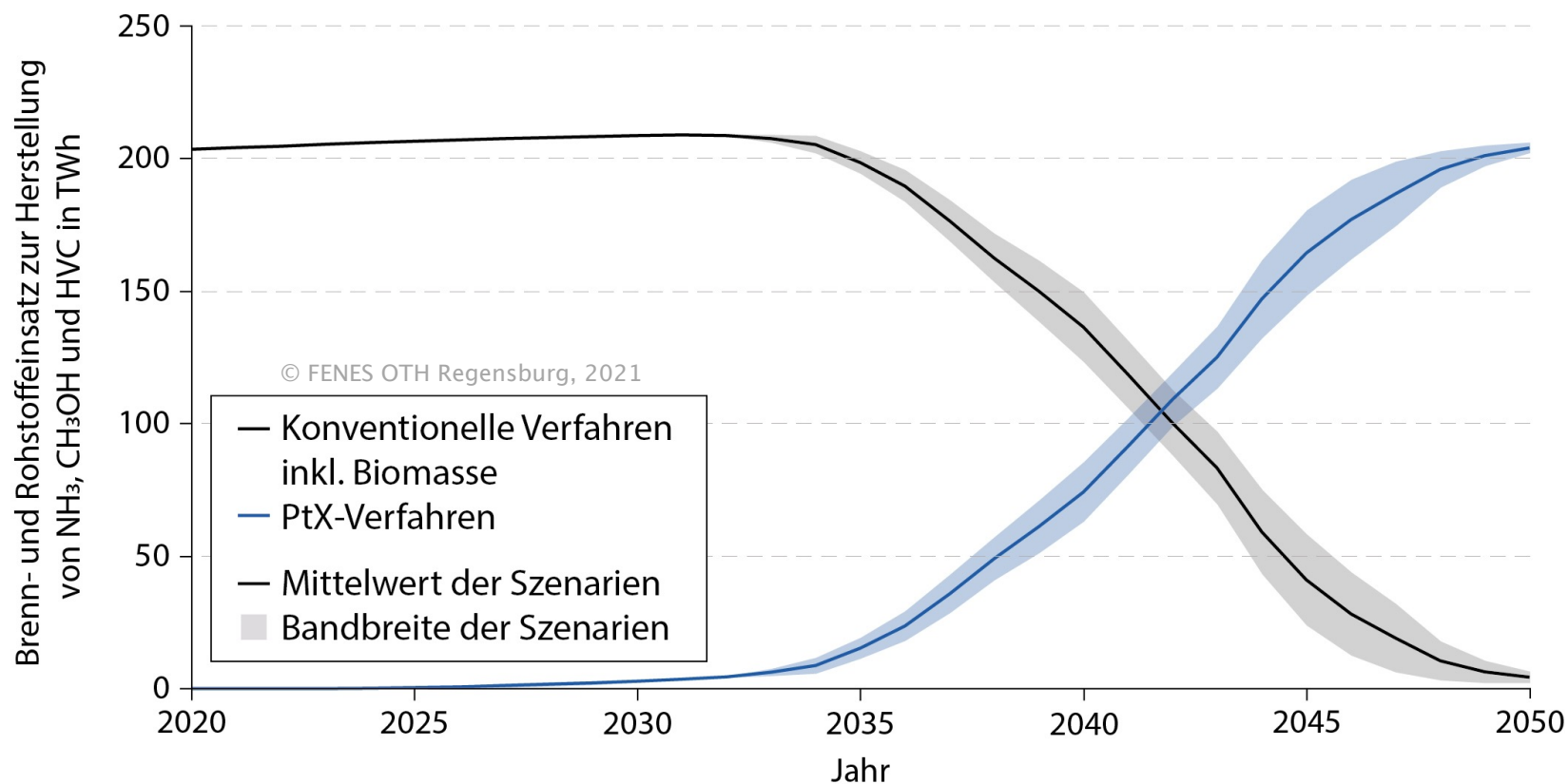
- 1) Energiewende = Klimaschutz
- 2) PtG & Stromwende
- 3) PtG & Wärmewende
- 4) PtX & Verkehrswende
- 5) **PtX & Industriewende**
- 6) Was zu tun ist

Energie- und Rohstoffbedarf der Grundstoffchemie

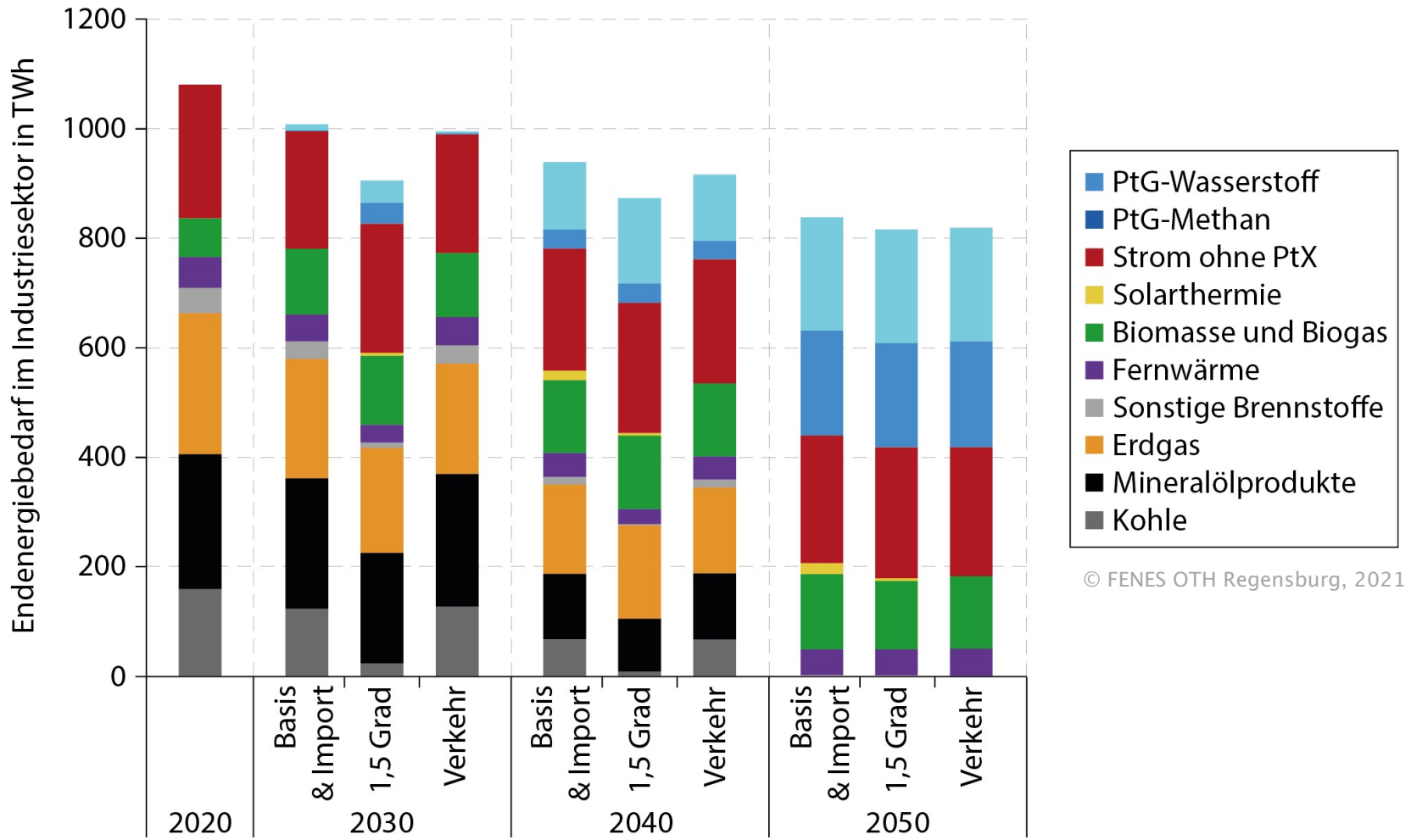


© FENES OTH Regensburg, 2021

Eingesetzte Brenn- und Rohstoffe für High Value Chemicals (HVC), Methanol und Ammoniak

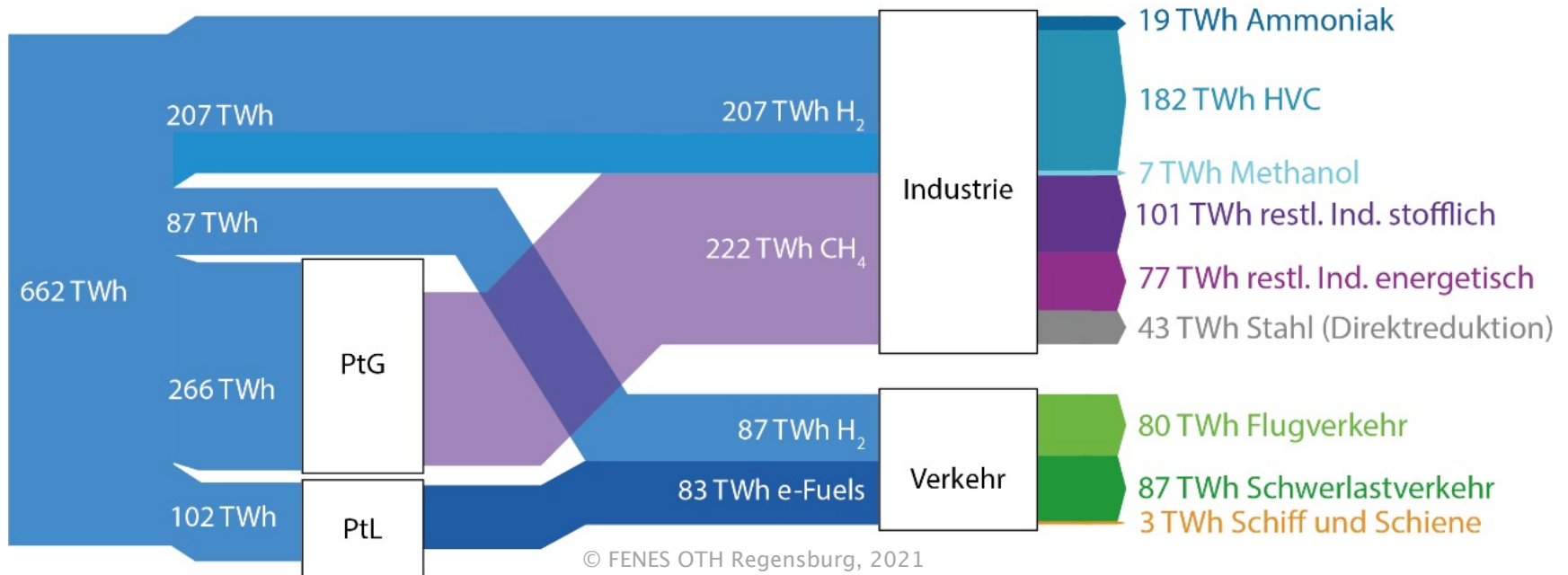


Gas spielt v. a. in der Industrie auch langfristig eine Rolle



© FENES OTH Regensburg, 2021

Nutzungspfade für Wasserstoff 2050 / Basisszenario



- 1) Energiewende = Klimaschutz
- 2) PtG & Stromwende
- 3) PtG & Wärmewende
- 4) PtX & Verkehrswende
- 5) PtX & Industriewende
- 6) **Was zu tun ist**

Was ist zu tun?

1) Erneuerbare ausbauen: ~~10 H~~, Solarpflicht

Bis 2030: Wind an Land x 2, auf See x 3, Solar x 2

Bis 2050: Wind an Land x 4, auf See x 10, Solar x 9

2) Netze und Speicher ausbauen: Elektrolyse 1–2 GW/a

3) Gebäude dämmen, Heizung erneuern: ~~Ölheizung~~ 2030

Sanierungsrate: 2 %/a, Wärmenetze & -pumpe statt Gas

4) E-Mobilität und Wasserstoff ausbauen: Fahrzeuge + Infrass. ~~Verbrenner~~ 2030 → 20 Mio. E-Pkw, H₂-LKW, PtL-Schiff/Flug

5) Industrie klimaneutral machen → Komplettumbau

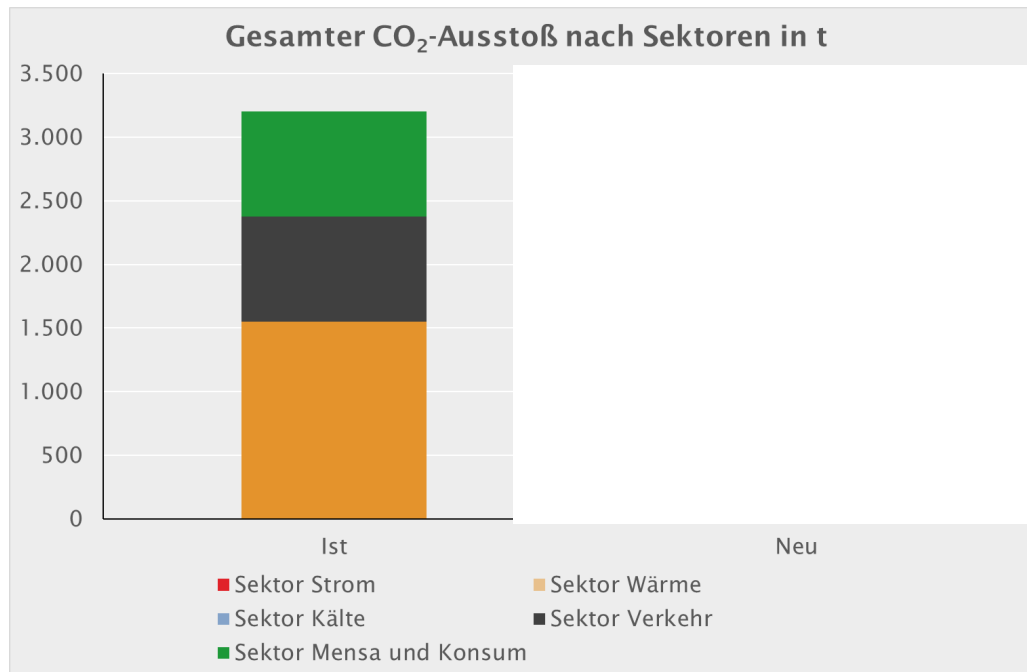
Grüner Stahl / Chemie etc. mit Strom + H₂

6) Pol. Rahmen setzen: CO₂-Preis sozial gestalten, Artenschutz & Denkmalschutz dem Klimaschutz unterordnen

- 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**

CO₂-Tool für Hochschulen und Unternehmen

Ergebnisse für die OTH



Vorgenommene Veränderungen:

- Hackschnitzelheizung
- 1370 t $\hat{=}$ - 43 %
- Mensaangebot nur vegetarisch und vegan
- 160 t $\hat{=}$ - 5 %
- Flugreisen um 75 % reduziert
- 470 t $\hat{=}$ - 15 %

→ Senkung der Emissionen um ca. 2000 t $\hat{=}$ 62 %



OSTBAYERN

ÜBERNIMMT EINE VORREITERROLLE BEI KLIMASCHUTZ UND ENERGIEEFFIZIENZ

- nachhaltiges Wirtschaften einer ganzen Region
- sich den Herausforderungen des Klimawandels konkret, konsequent und kollaborativ aktiv stellen

www.oha-initiative.com





NETZWERK

AUS GEMEINSAM
HANDELNDEN



- das im vertrauensvollen Austausch motiviert und optimiert.
- das nachvollziehbare betriebliche Energieeffizienz bei Produkten, Dienstleistungen und Produktionsprozessen fördert.
- das messbare Ergebnisse liefert als Ansporn und Best-Practice-Modelle für andere Unternehmen.

[www.oha-
initiative.com](http://www.oha-initiative.com)





AKTEURE

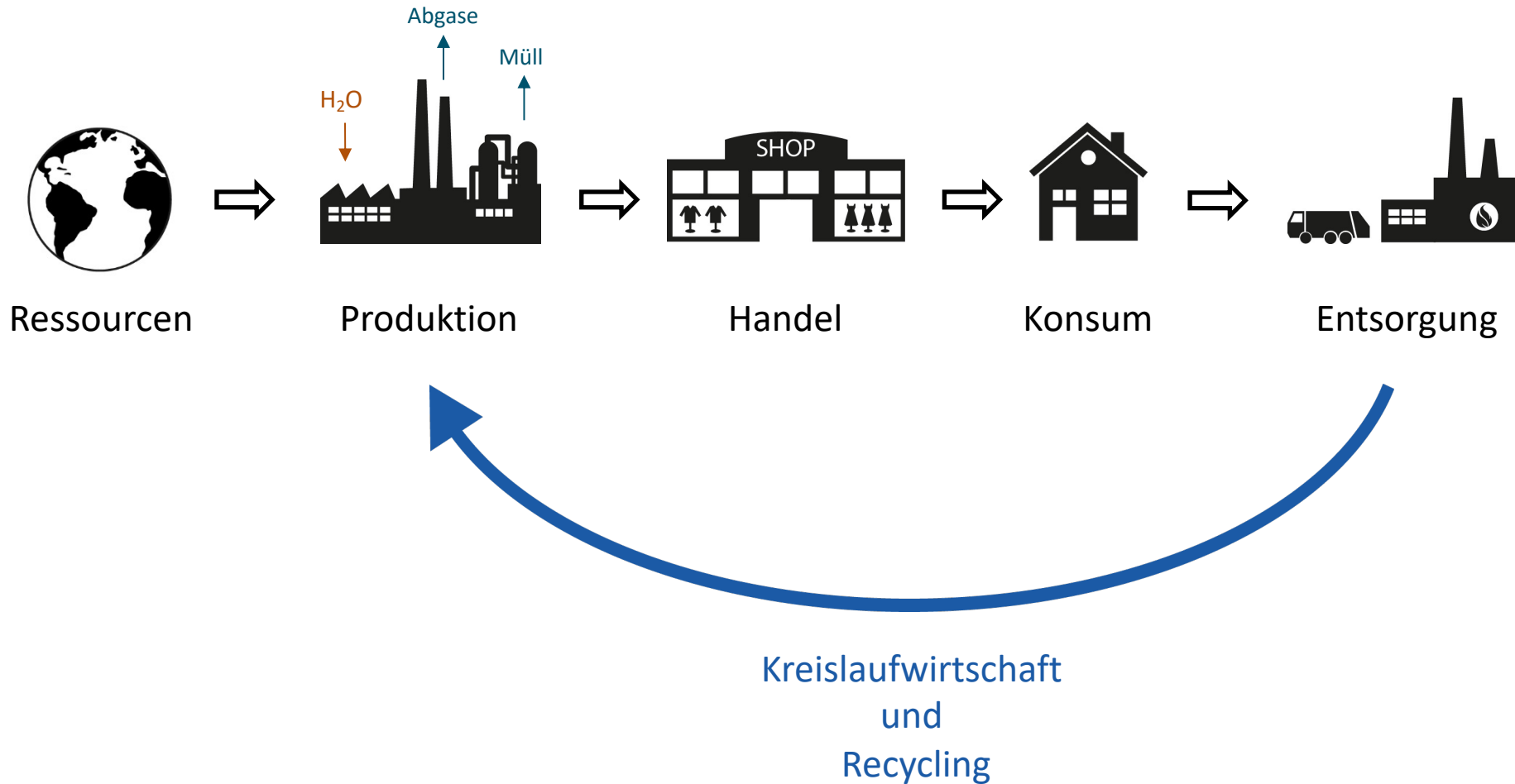
- Unternehmen aller Größen und Branchen, Handwerker, Behörden,
- Organisationen verbunden im Engagement für Klimaschutz und Energieeffizienz.
- Auch engagierte Privat- und Einzelpersonen sind herzlich eingeladen, sich einzubringen



www.oha-initiative.com



Lösungsansatz Kreislaufwirtschaft & Regionalwirtschaft



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



Was kann ich persönlich tun?

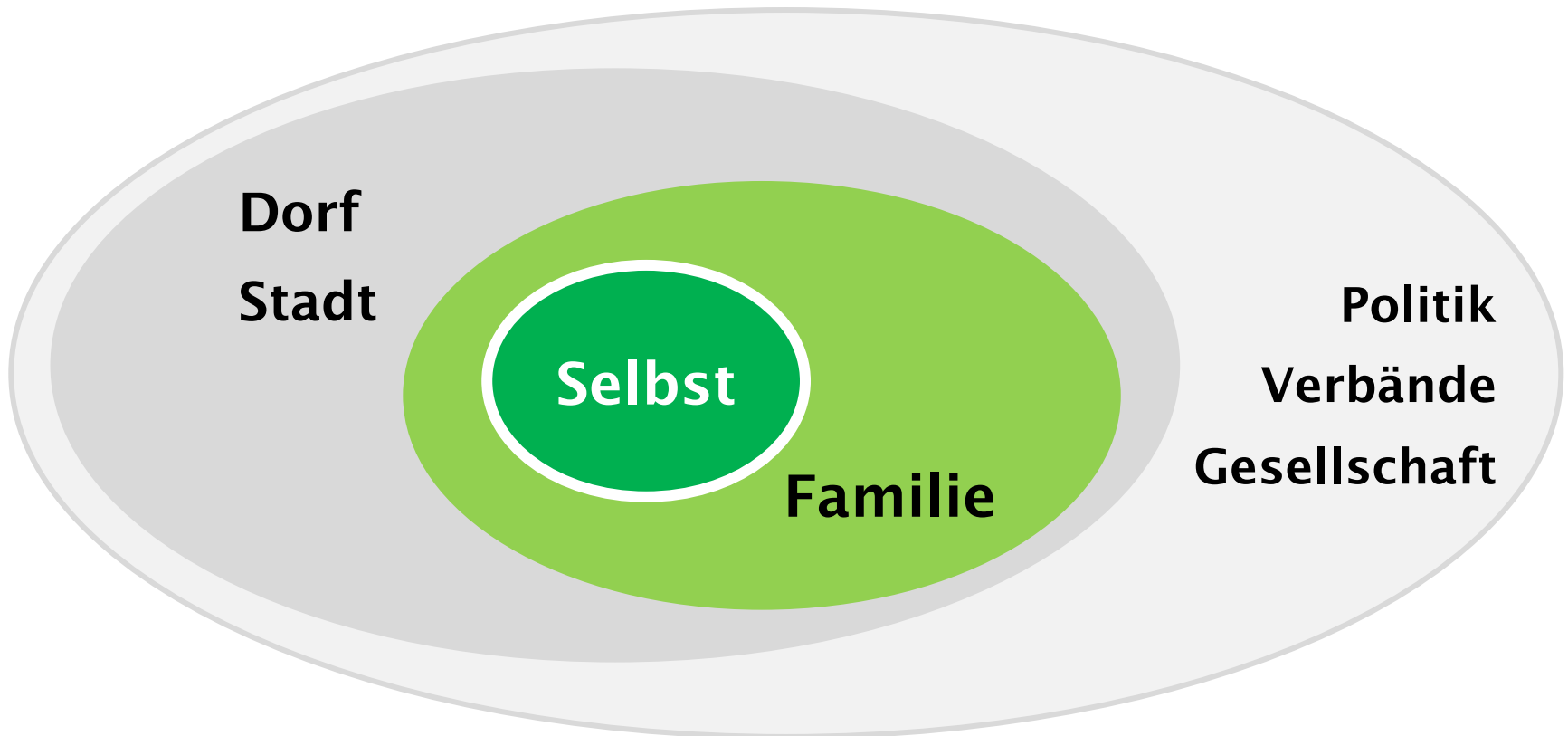
- Energiewende Strom
 - Effiziente Geräte installieren
 - Ökostrom einkaufen, nicht Atom- oder Kohlestrom
 - Ökostrom produzieren

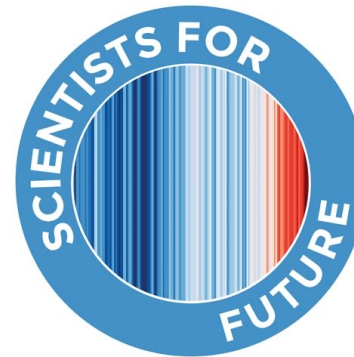
- Energiewende Wärme
 - Dämmen, Heizungspumpe tauschen, hydraulischer Abgleich
 - Ökoheizung installieren

- Energiewende Verkehr
 - Weniger unterwegs sein, Fahrgemeinschaft, ÖPNV, etc.
 - Nachhaltig fortbewegen

- Landwirtschaft: CO₂-ärmer ernähren (Fleisch, Milch reduzieren)

Setzen Sie sich für eine nachhaltige Lebens- und Wirtschaftsweise ein, leben Sie diese beispielhaft vor (so gut es geht)





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

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



Kontakt



FORSCHUNGSSTELLE
ENERGIENETZE UND
ENERGIESPEICHER

Prof. Dr.-Ing. Michael Sterner

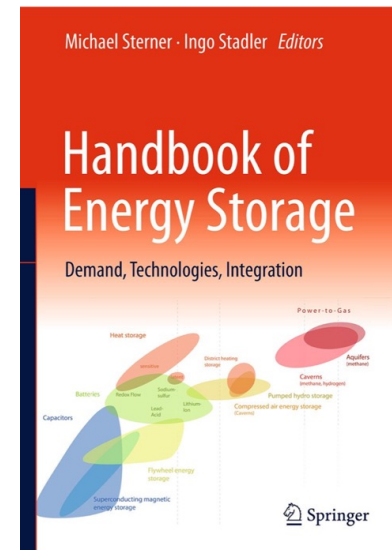
+ 49 - (0) 941 - 943 9888

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.