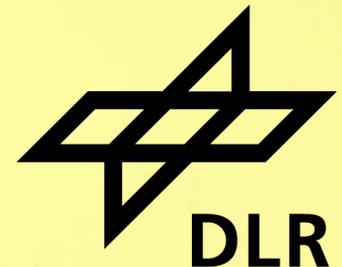


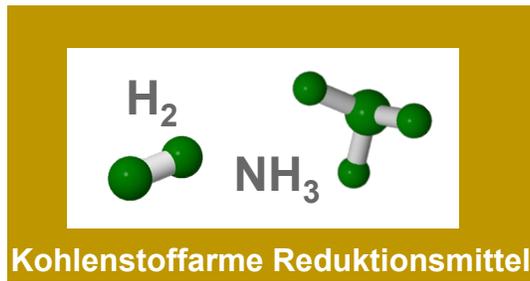
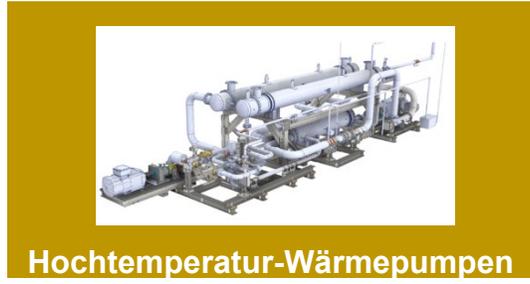
REGENERATIVE HOCHTEMPERATUR-WÄRME

*SCHLÜSSELTECHNOLOGIE FÜR DIE CO₂-MINDERUNG
IM INDUSTRIESEKTOR*

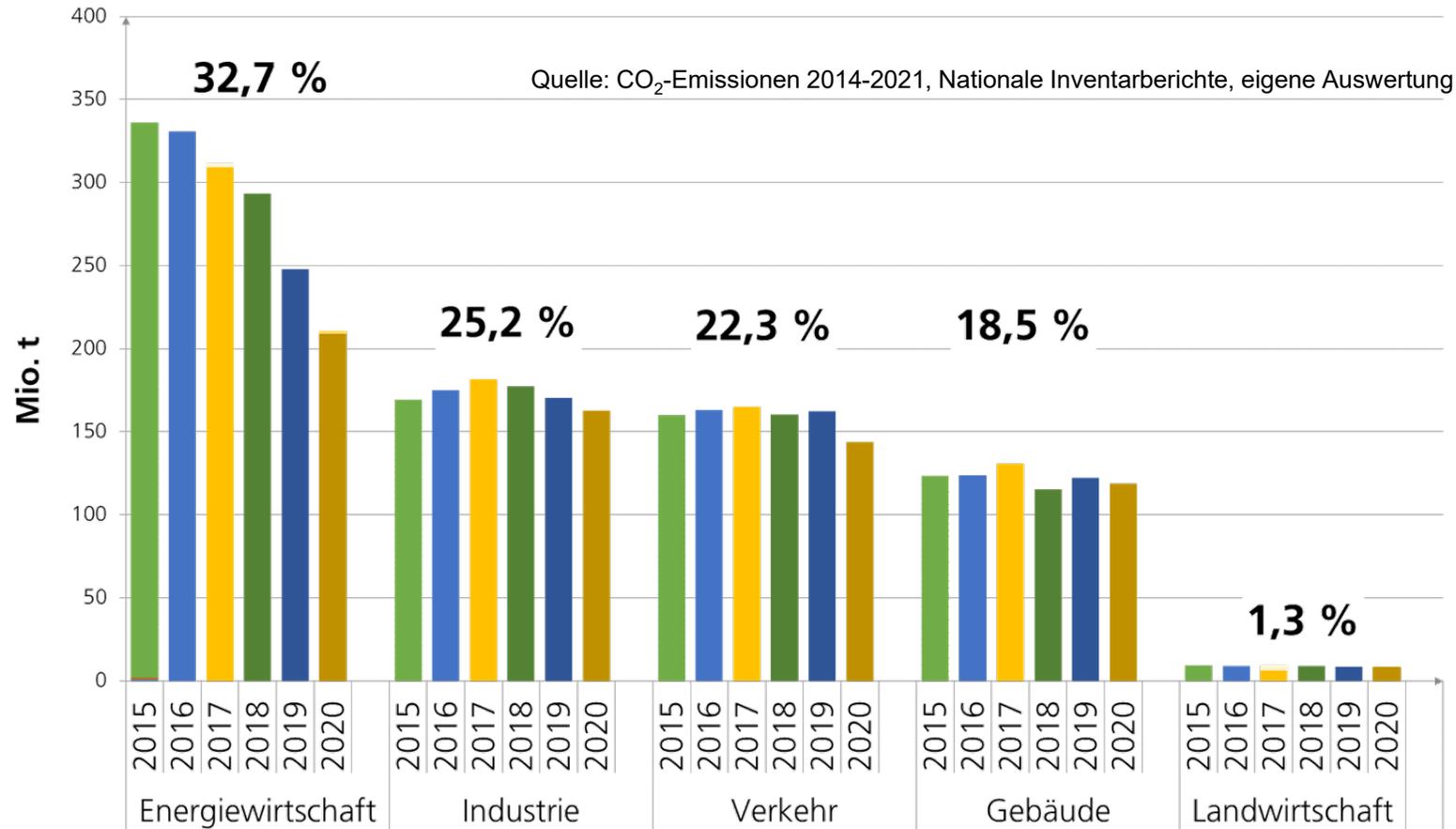
Panos Stathopoulos, DLR-Institut für CO₂-arme Industrieprozesse



DLR-Institut für CO₂-arme Industrieprozesse

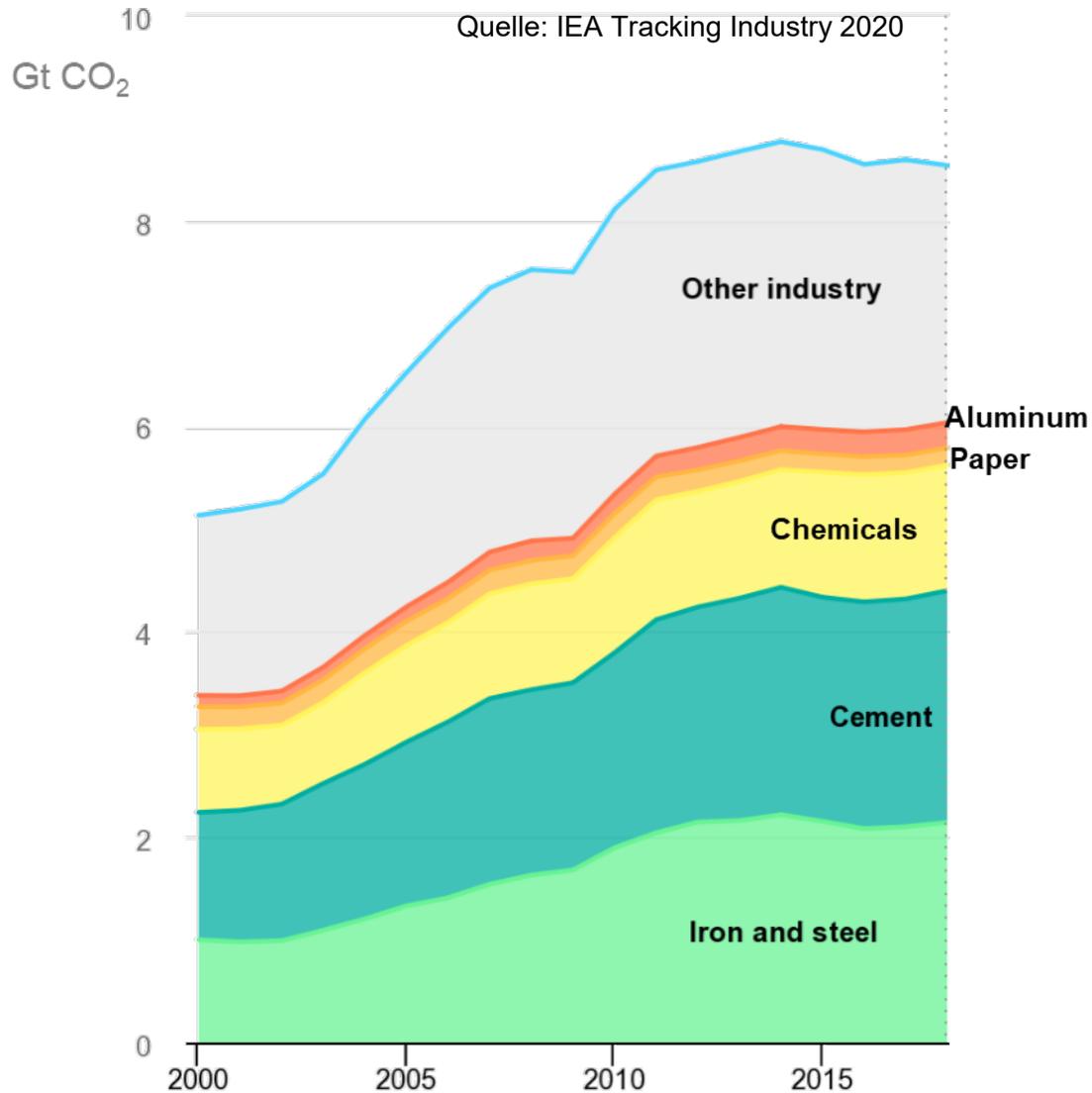


Industrielle Emissionen in DE – Emissionen 2 EU Länder



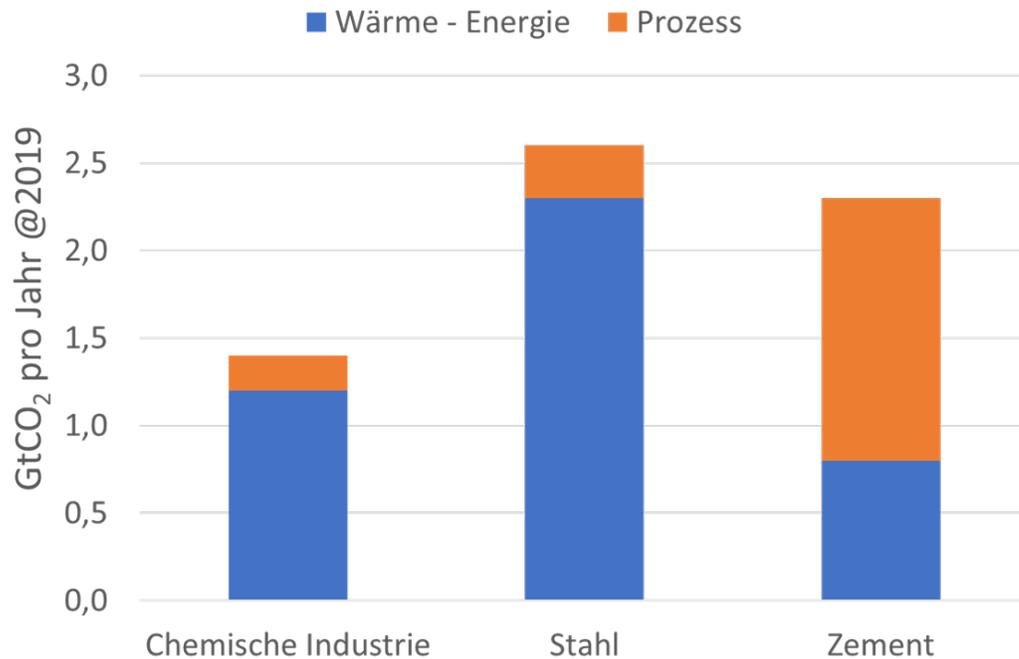
Die Industrie erzeugt so viele Treibhausgasemissionen wie Österreich und die Schweiz zusammen

Was steckt hinter dem Begriff „Industrie“



- Die **Stahl und Zementindustrie** verursachen ca. **50%** der gesamten industriebedingten Emissionen
- Die **chemischen Industrie** erzeugt weitere **20%** der gesamten Emissionen
- Die verbleibenden 30% der Emissionen kommen aus verschiedenen Branchen, bspw. Lebensmittel, Glas, Aluminium, Papier, Maschinenbau, usw.

Industrielle Emissionen



- **Prozessbedingte CO₂-Emissionen**

- Aus nichtenergetischer Verwendung von kohlenstoffhaltigen Energieträgern und sonstigen Rohstoffen oder aus prozessbedingter Freisetzung

- **Energiebedingte CO₂-Emissionen**

- Aus Erzeugung des verwendeten Stroms
- Verwendung von Brennstoffen zur Bereitstellung von Energie

Ca. 75% der industriellen Emissionen sind energiebedingt!



PROZESSBEDINGTE EMISSIONEN

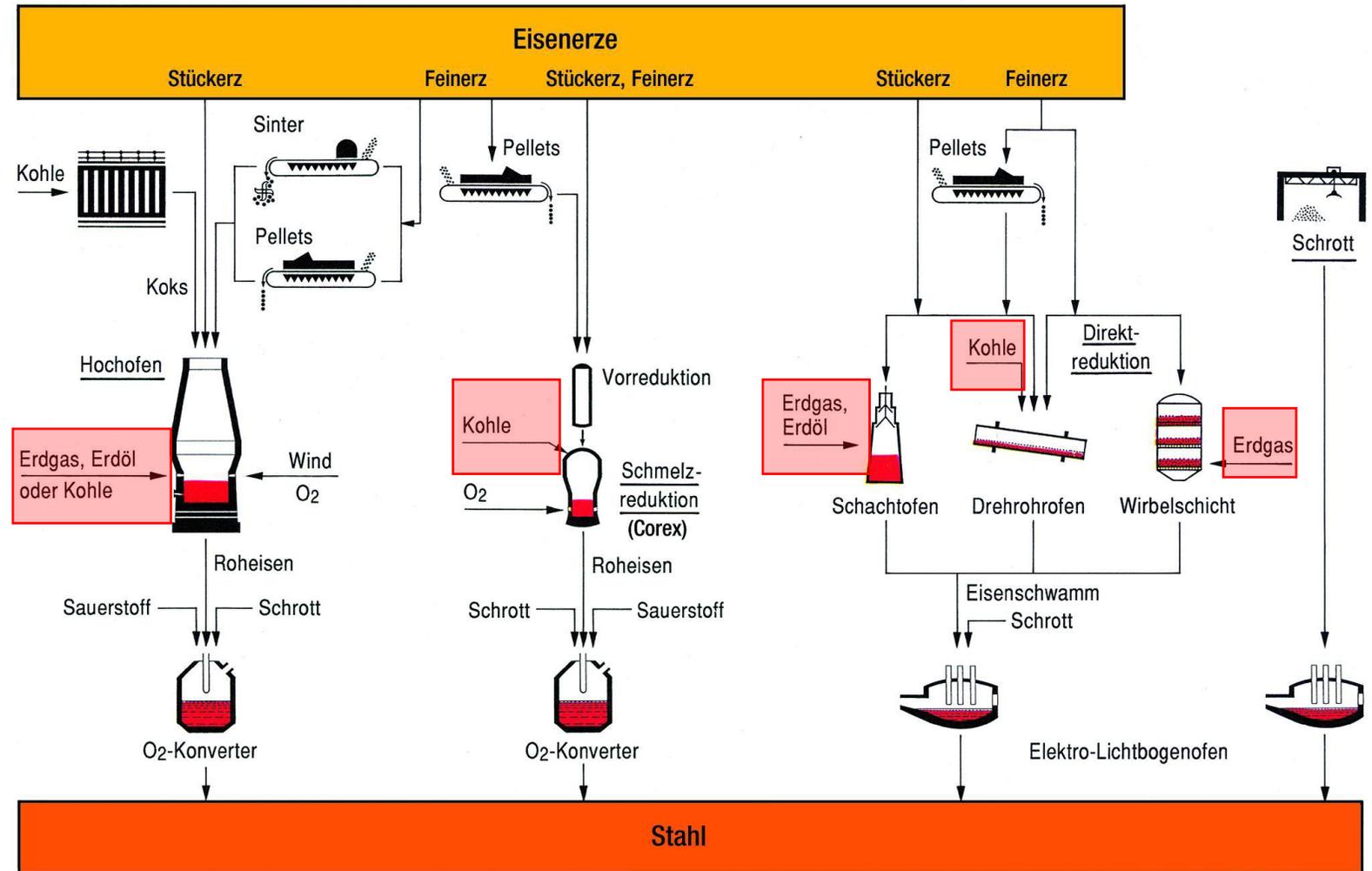
Wie wird Eisen und Stahl produziert?

Vom Eisenerz zum Stahl

- Meistens im Hochofen – ca. 70% des Stahls weltweit
- Alternativ, aber selten in Schmelzreduktionsanlagen und Direktreduktionsverfahren

Vom Schrott zum Stahl

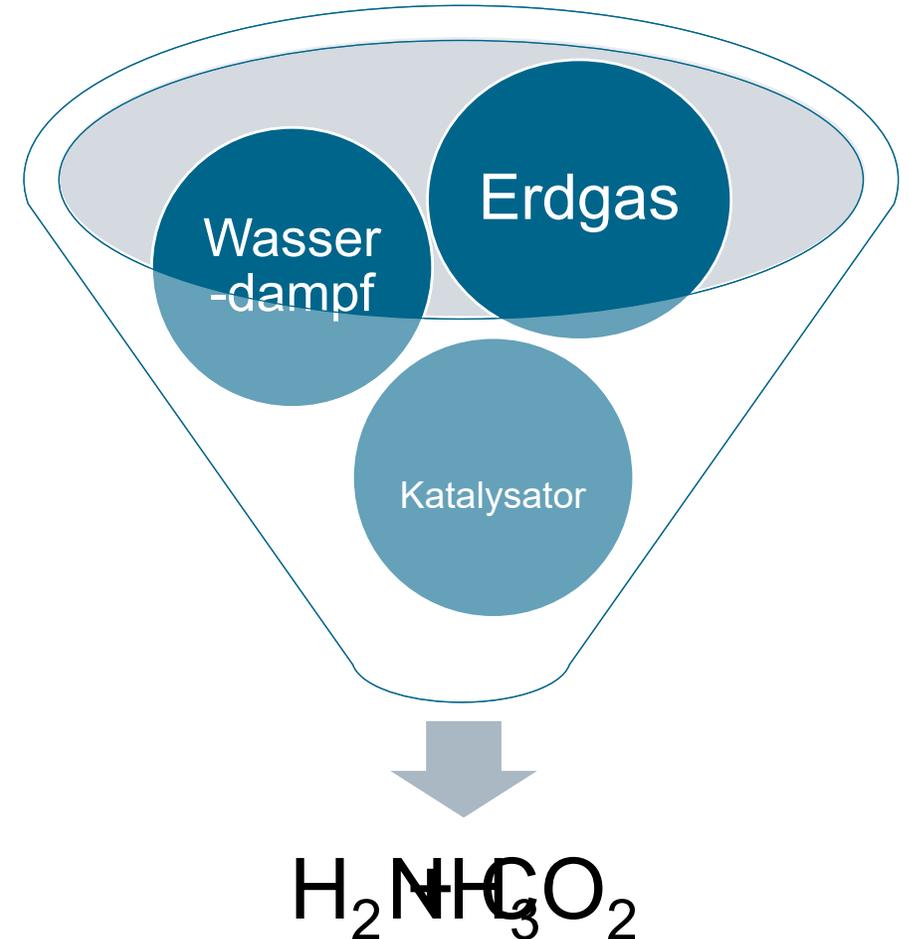
- Recyceln von Stahlschrott im Elektrolichtbogenofen zum Rohstahl – ca. 30% des Stahls weltweit



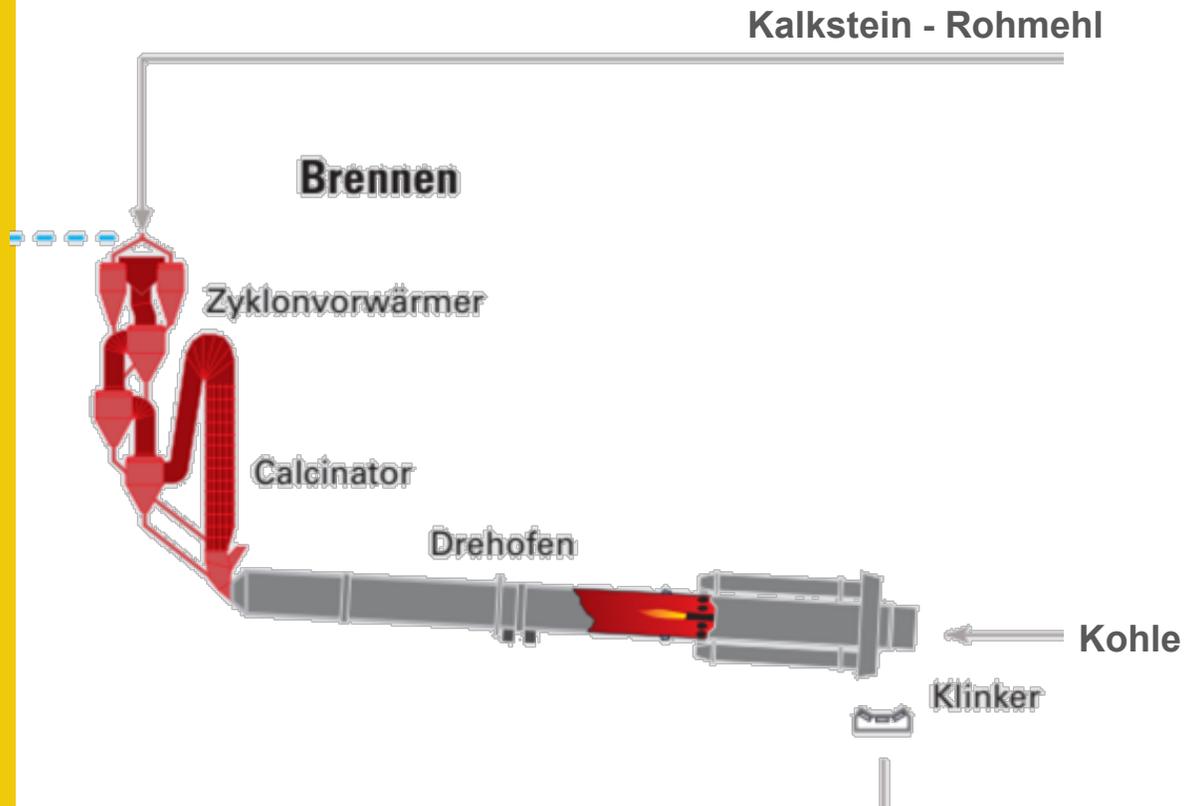
Quelle: www.vdeh.de

Ammoniak – Wofür und wie wird es produziert

- 235 Millionen Tonnen von Ammoniak (2019)
- Nach Schwefelsäure die **weltweit zweitmeistproduzierte** Chemikalie
- **Etwa 40-60% der weltweiten Lebensmittelproduktion** lässt sich auf die Verwendung von **Düngemitteln** zurückzuführen, deren Herstellung wiederum zum großen Teil auf **Ammoniak** basiert
- Ammoniak wird zudem verwendet:
 - Als Energieträger,
 - Als Rohstoff für die Herstellung anderer Chemikalien, z.B. Harnstoff (Ad Blue)



Wie wird Zement produziert und woher die Emissionen



- **Sinterungsreaktion** von **Kalkstein** und **Ton**
- Beim Klinkerbrennen soll ein bestimmtes Verhältnis von Mineralphasen erzeugt werden, was durch das Mischungsverhältnis und Temperaturen von über **1.250 °C** erreicht wird.

	Rohmehl	Zementklinker
	Gew-%	Gew-%]
CaO	40 - 45	63,76 – 70,14
„CO₂“in Carbonate	31 - 35	0,03 – 0,83
SiO ₂	12 - 16	19,71 – 24,25
Al ₂ O ₃ + TiO ₂	2 - 5	3,97 – 7,30
Fe ₂ O ₃ + Mn ₂ O ₃	2	1,32 – 5,32
MgO	0,3 - 3	0 – 4,51
K ₂ O	0,2 - 1,4	0,31 – 1,76

Quelle: <https://www.heidelbergcement.de/de/bestellung-publikationen>

ENERGIEBEDINGTE EMISSIONEN

Wärme hat viele Gesichter

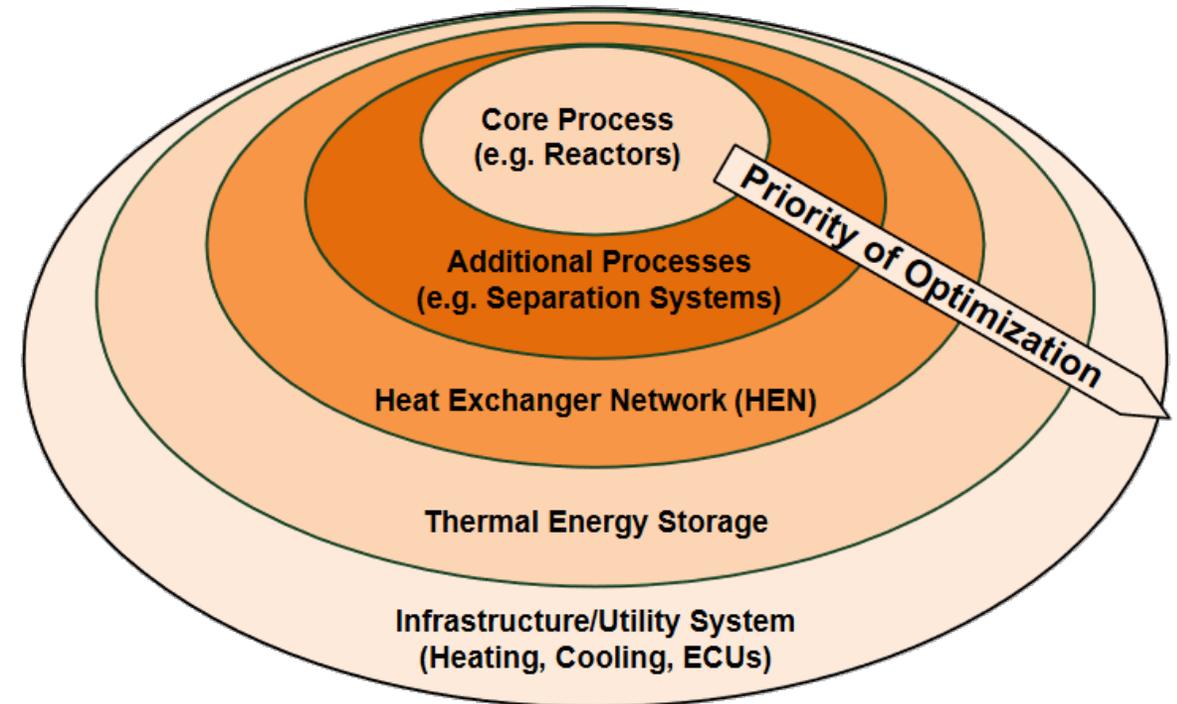


- Liefertemperatur und Lieferform von Wärme sind sehr unterschiedlich
- Häufig im Hochtemperaturbereich kombiniert mit stofflicher Nutzung
- Abwärme ist sehr wichtig und nicht wirklich dokumentiert

Sparen soll zuerst kommen

Optimierte Wärmenutzung durch:

- **Wärmerückgewinnung**
- Abwärmenutzung mittels **Wärmepumpen**
- **Wärmespeicherung**



Quelle: I. C. Kemp: *Pinch Analysis and Process Integration* 2nd Ed. (Linnhof, 1979)

Sparen soll zuerst kommen (ein Blick auf die Schweiz)...

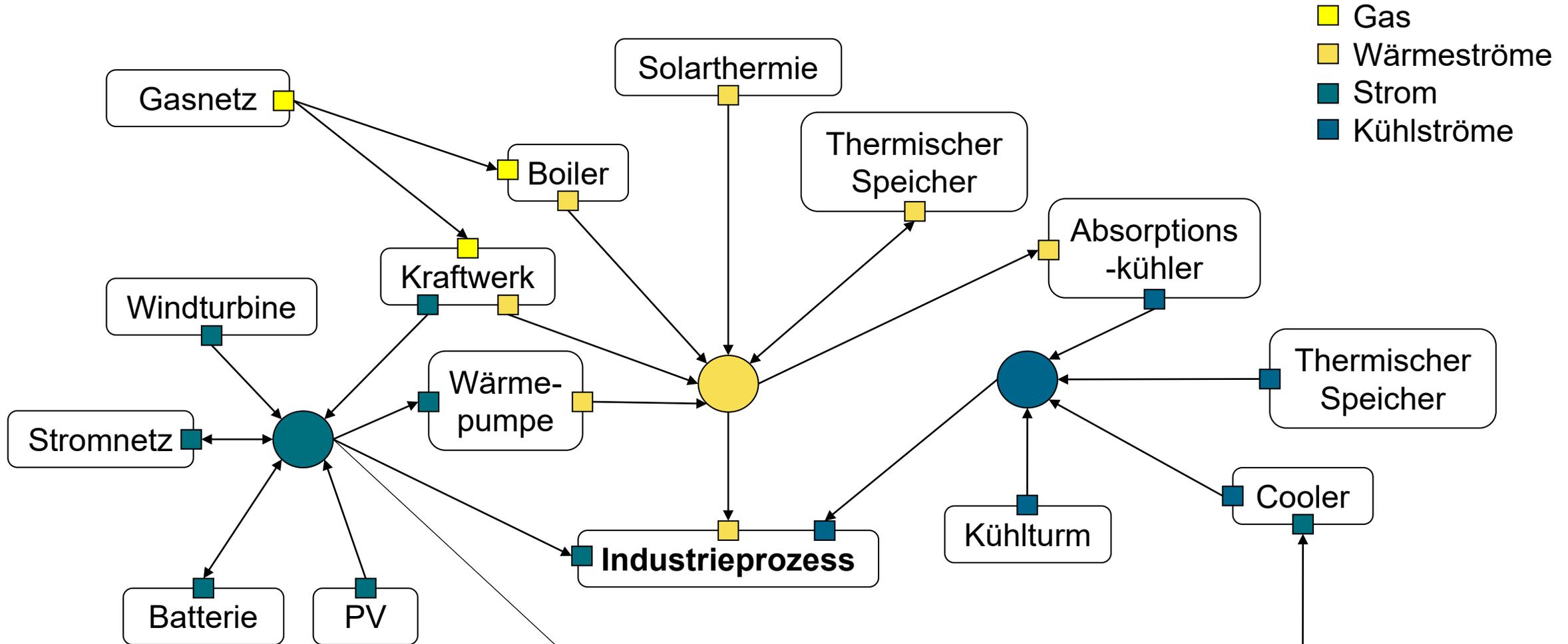


Research	Economically feasible EE potential (of 43 TWh/a)	Potential energy savings (GWh/a)	Potential CO ₂ savings (MtCO ₂ -eq)
EE Improvements ⁽¹⁾	6 – 7 %	2'520 – 2'915	0.45 – 0.52 ⁽²⁾
Process integration and heat recovery ⁽³⁾	9 % (16 % of thermal energy demand)	3'930	0.71
Multiple Benefits ⁽⁴⁾	Increases above values 10 – 20 %	645 – 1'370	0.12 – 0.25
Total	approx. 16.5-19 %	7'095 – 8'215	1.27 – 1.47

^(a) M.J.S. Zuberi: Improving Energy Efficiency in Swiss Industrial Sectors, PhD Thesis, UNIGE, 2019

^(b) SCCER EIP Requirement Report, CER, 2019

... Dekarbonisieren ist noch besser



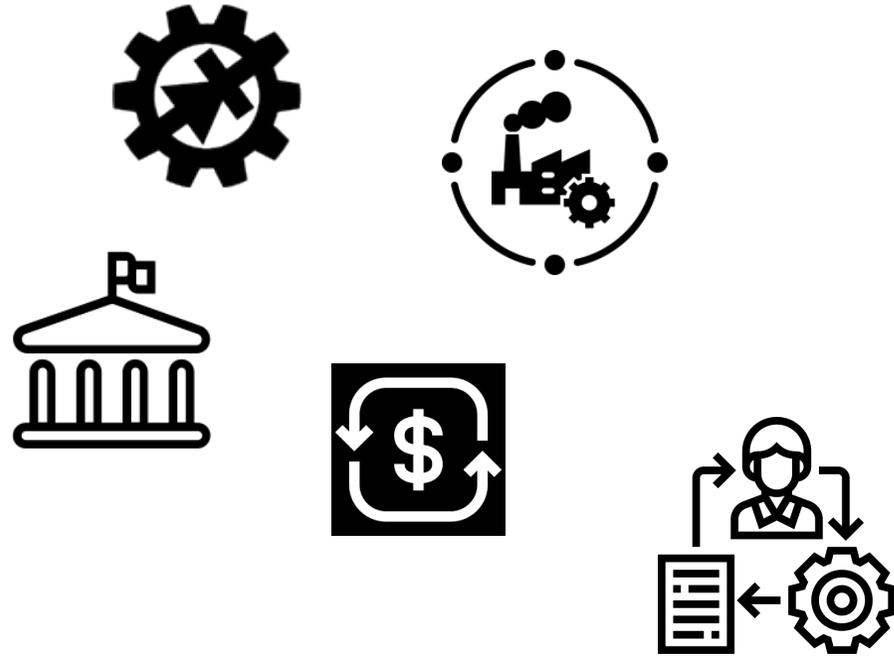
Eine erste Einordnung von Technologien



- Industrielle Wärmepumpen werden bis 300°C dringend benötigt
- Technologien zur direkten Heizung (induktiv usw.) werden gebraucht für $T > 300^{\circ}\text{C}$
- Ein Teil des Hochtemperaturwärmebedarfs muss mit H₂ abgedeckt werden

...und wie sehen die nächsten (sinnvolle) Schritte aus?

- Technologische Randbedingungen
- Prozessbedingungen
- Politische Grundbedingungen
- Wirtschaftlichkeitsbedingungen
- Konzerninterne Prozesse



- Die Lage ist sehr dynamisch
- Es ist sehr kritisch, dass aktuelle Entscheidungen nicht zu „stranded Assets“ führen!

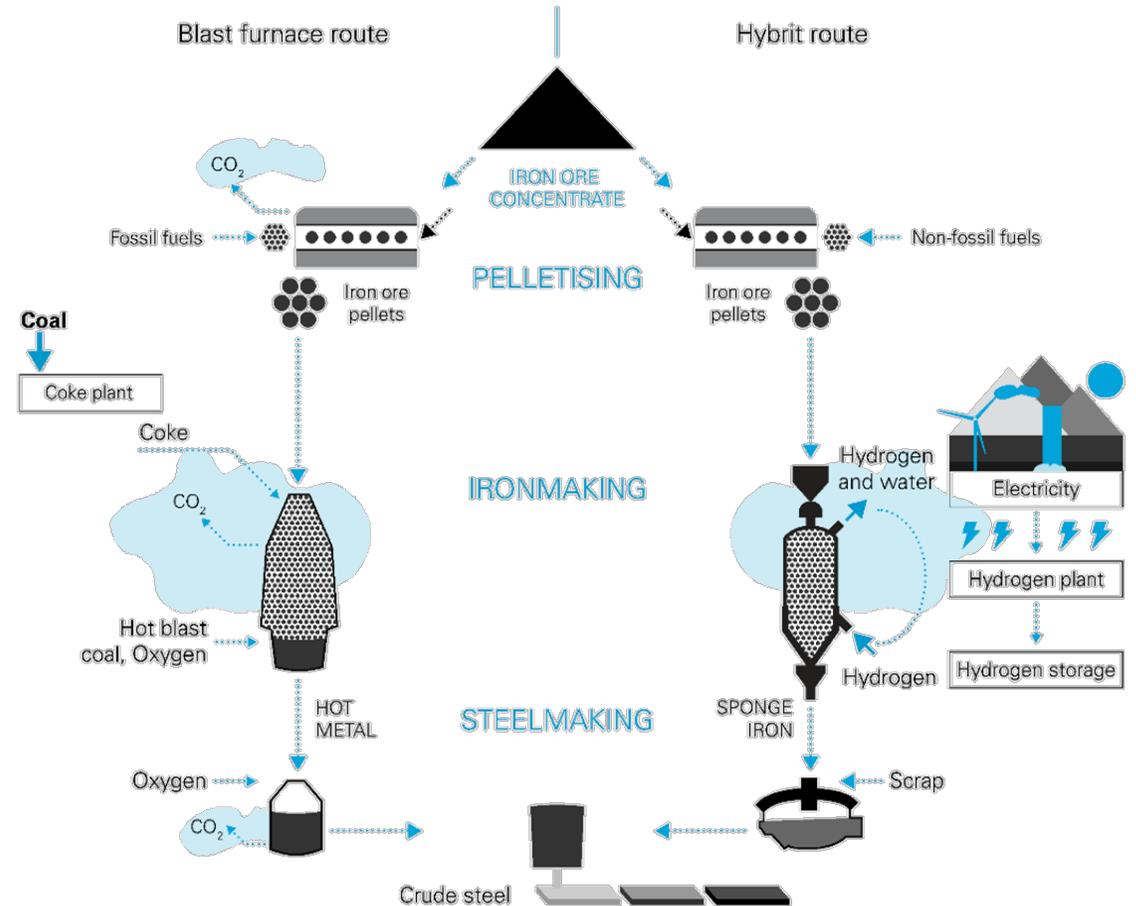


EINBLICK IN DIE GRÖSSENORDNUNGEN

Grüner Wasserstoff für Stahl

	Weltweit	DE
Stahlproduktion (tonnen)	1.864 Milliarden	36 Millionen
Benötigter H ₂ (tonnen)	93,2 Millionen	1,8 Millionen
Benötigter Strom (TWh)	4.660	90
Anzahl Windturbinen (offshore 14 MW)	51.350	992

Quellen: <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/offshore-wind/haliade-x-offshore-turbine>
<https://www.statista.com/topics/1149/steel-industry/#dossierKeyfigures>
[https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI\(2020\)641552](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2020)641552)

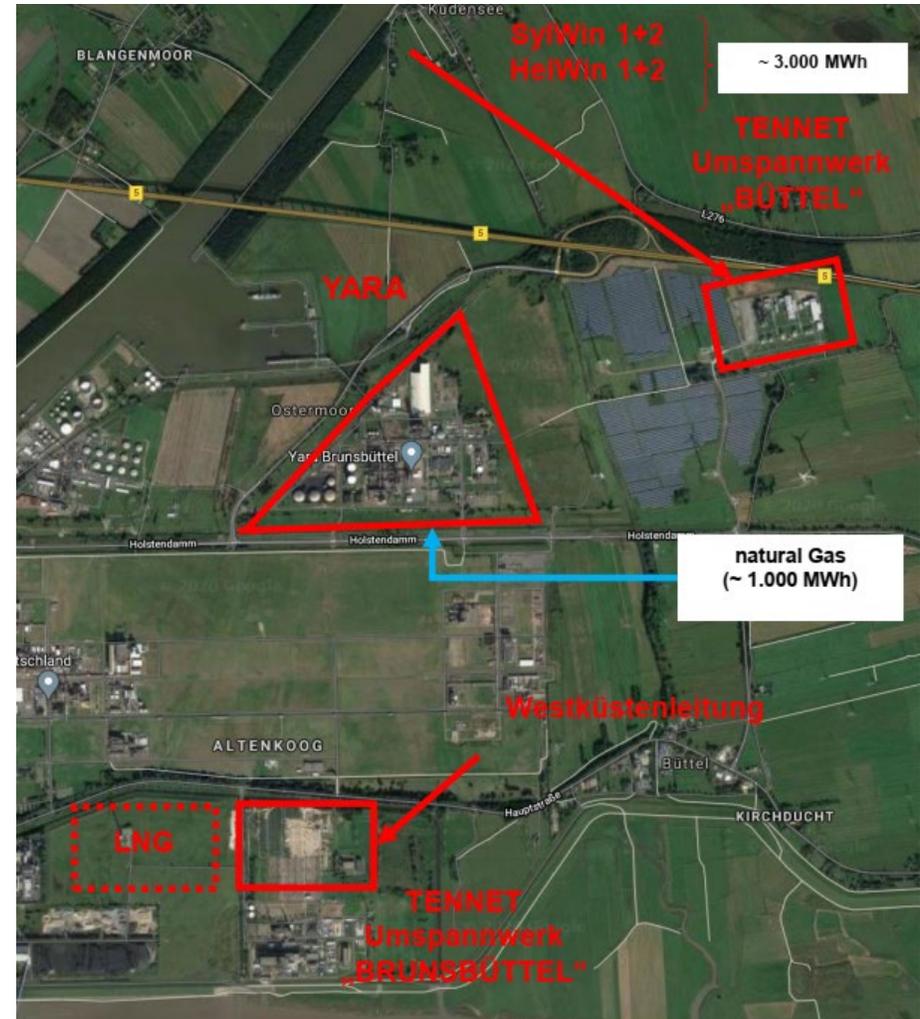


Quelle: <https://www.whitecase.com/publications/insight/green-edge-steel-cutting-through-carbon>

Grüner Wasserstoff für Ammoniak

	Weltweit	DE
Ammoniak (tonnen)	235 Millionen	3,2 Millionen
Benötigter H ₂ (tonnen)	41,5 Millionen	0,57 Millionen
Benötigter Strom (TWh)	2.074	28
Anzahl Windturbinen (offshore 14 MW)	22.848	311

Quellen: <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/offshore-wind/haliade-x-offshore-turbine>
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2021.580808/full#B80>
<https://www.umweltbundesamt.de/bild/industrielle-produktion-von-ammoniak#png>

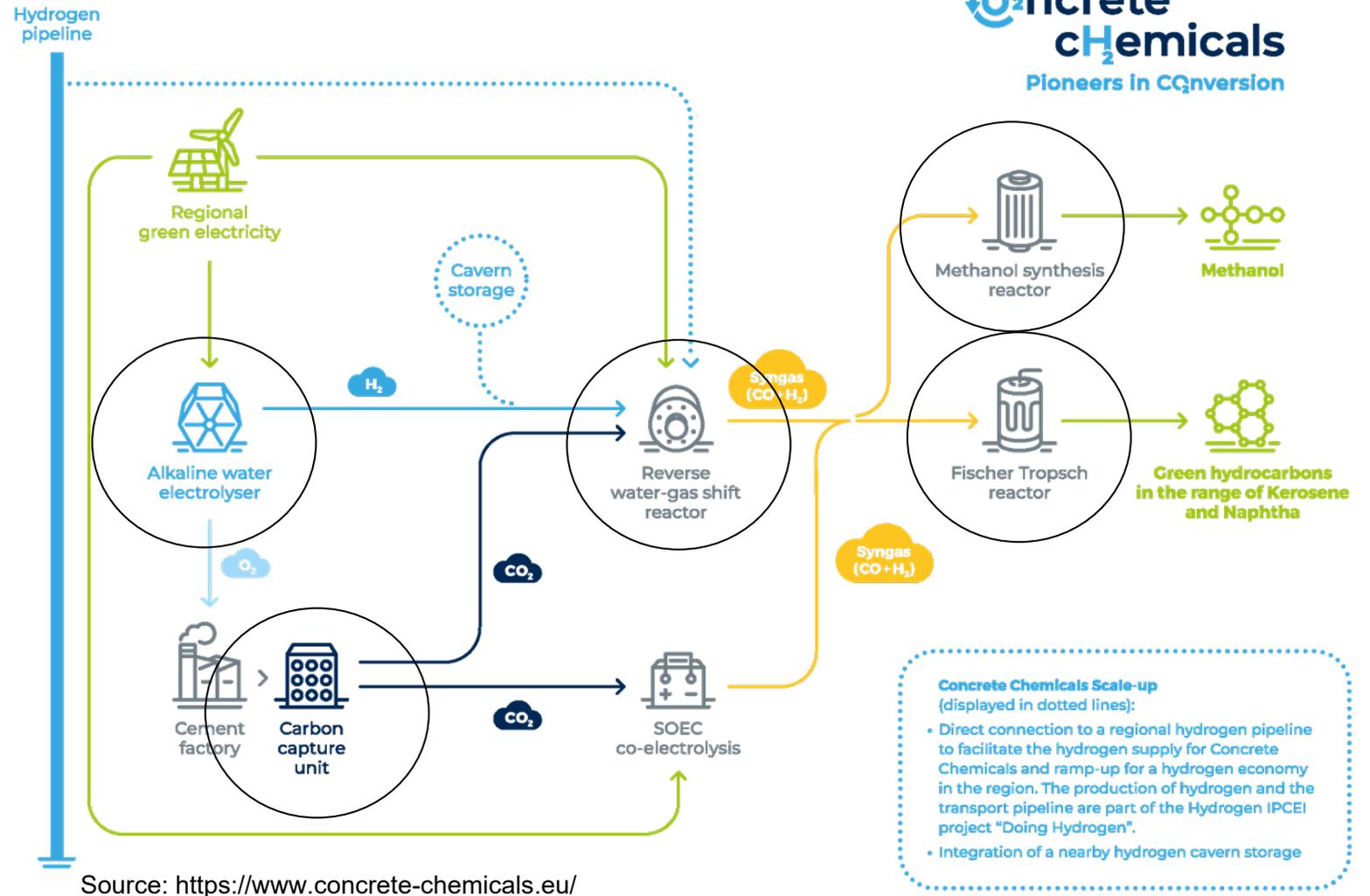


Quelle: „The color of Ammonia“ – Sven Kohnke, YARA Brunsbüttel

Und was passiert mit Zement?

Es ist schwierig die Zementproduktion zu dekarbonisieren!

- Alle bekannten Lösungen gehen **den CCU/CCS Weg**:
 - Carbon Capture
 - Kombination von CO₂ mit grünem H₂
 - Erzeugung von Brennstoffen
 - Erzeugung von Rohstoffe für die chemische Industrie (Methanol)
- **Problem**: das CO₂ gelangt trotzdem in die Atmosphäre (Müllverbrennung, Treibstoffe)



Concrete Chemicals Scale-up
(displayed in dotted lines):

- Direct connection to a regional hydrogen pipeline to facilitate the hydrogen supply for Concrete Chemicals and ramp-up for a hydrogen economy in the region. The production of hydrogen and the transport pipeline are part of the Hydrogen IPCEI project "Doing Hydrogen".
- Integration of a nearby hydrogen cavern storage

Und die Dekarbonisierung der Wärme?



	<100 °C	100-500°C	500 - 1000°C	>1000°C
Prozesswärme EU, TWh	285	496	466	796
Benötigter grüner Strom, TWh	82	198	592	1224
Prozesswärme DE, TWh	60	100	115	184
Benötigter grüner Strom, TWh	17	40	145	283

Annahmen

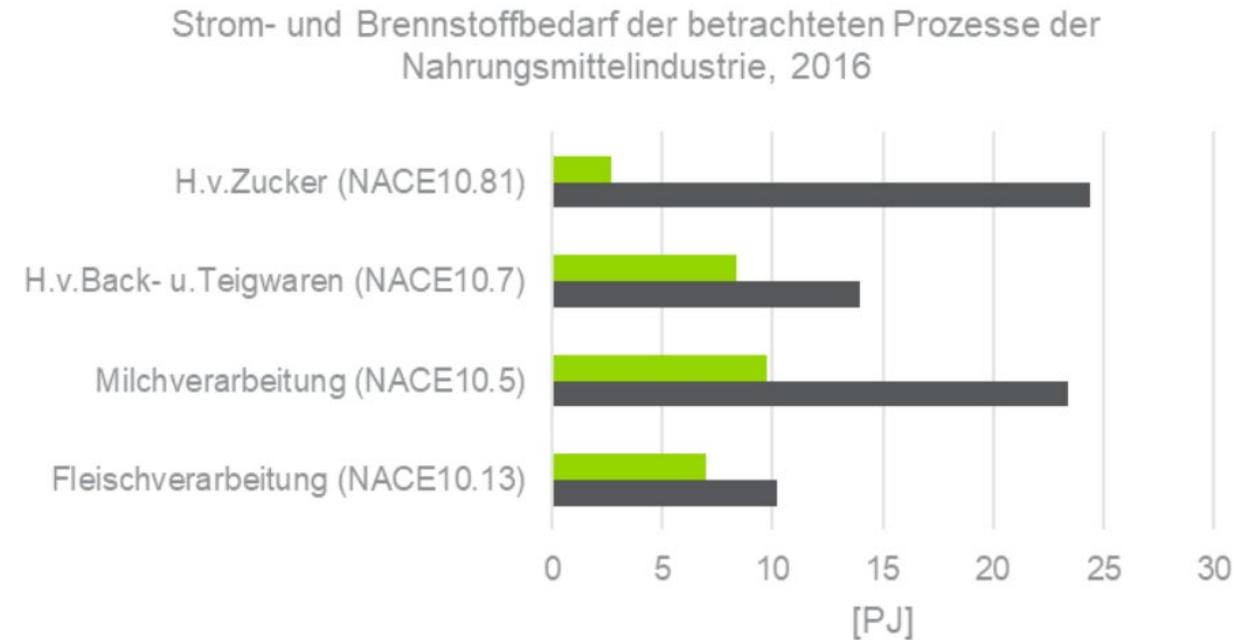
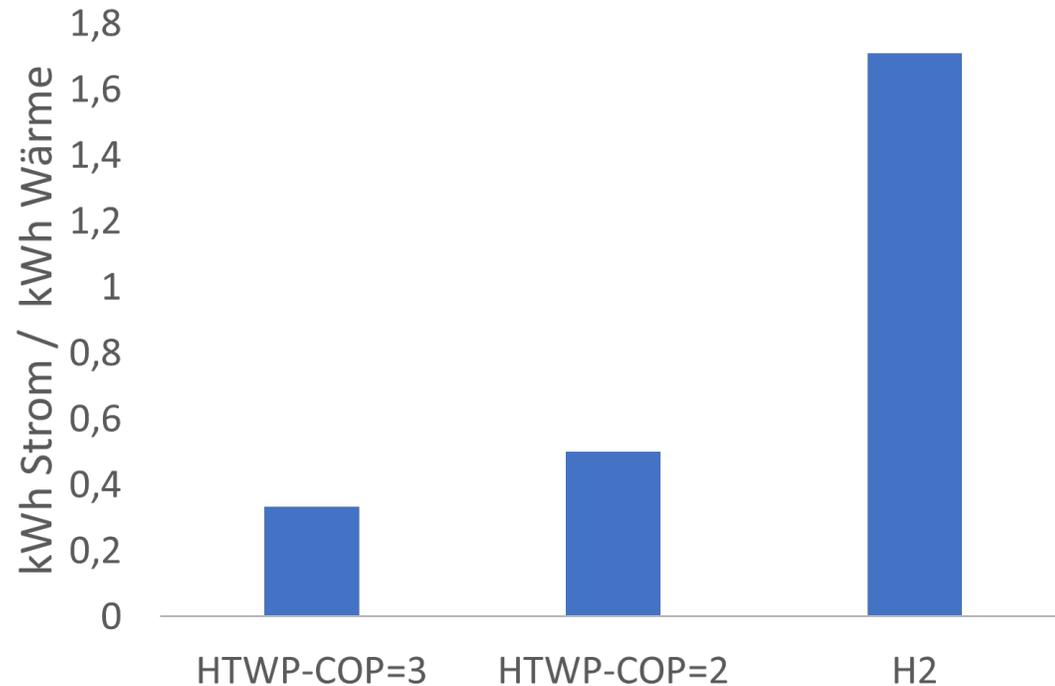
- <100°C - mit Wärmepumpen (COP ~3,5)
- 100-500°C - mit Wärmepumpen (COP ~2)
- 500-1000°C - 50% mit grünem H₂ und 50% elektrischen Heizstäben
- >1000°C – mit grünem H₂

→ Die **EU und DE** werden auch im besten Szenario **abhängig von Energieimporte** bleiben (in welcher Form auch immer!)

A realistic-looking stuffed cobra snake with brown and tan scales and a yellow underbelly with red stripes. It is coiled around a metal part of a machine in a workshop setting.

VIELEN DANK!

...Warum brauchen wir eine Einordnung – Sicht einer Volkswirtschaft

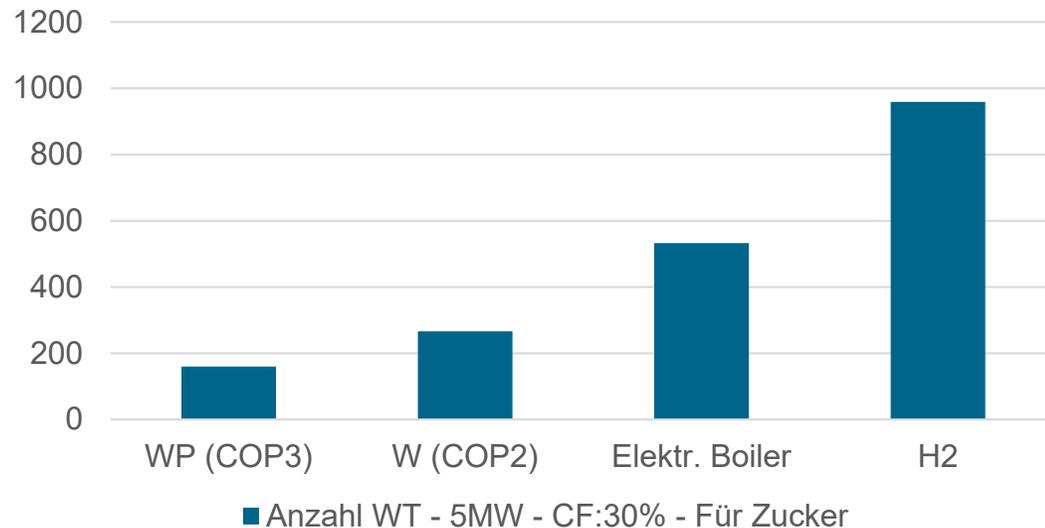


Quelle: BMWK

- Maximale Einsparung von Primärenergie
- Dekarbonisierung der Industrie schon gesetzt
- Wettbewerbsfähigkeit der Industrie nicht gefährden

...Warum brauchen wir eine Einordnung – Sicht einer Volkswirtschaft

Anzahl WT - 5MW - CF:30% - Für Zucker



Strom- und Brennstoffbedarf der betrachteten Prozesse der Nahrungsmittelindustrie, 2016



Quelle: BMWK

- Maximale Einsparung von Primärenergie
- Dekarbonisierung der Industrie schon gesetzt
- Wettbewerbsfähigkeit der Industrie nicht gefährden