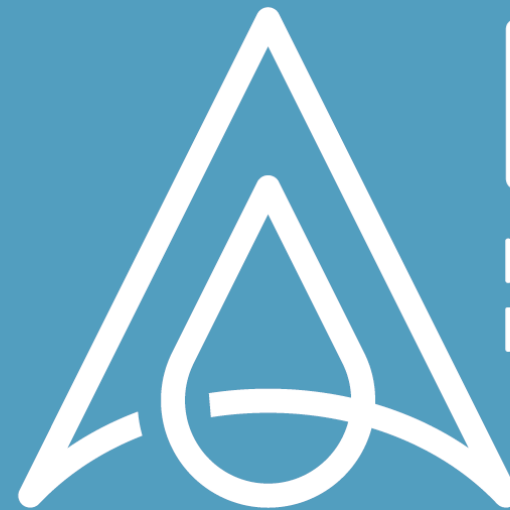


# CC4E Ringvorlesung

Wirtschaftlicher Einsatz von Wasserstoff in der Kupferherstellung

10.12.2024 online

Sebastian Timmerberg, Carsten Schütte



**NRL**

Norddeutsches  
RealLabor

# Ringvorlesung des Competence Centers für Erneuerbare Energien und EnergieEffizienz (CC4E)

## 4. Themenblock: Sektorkopplung und Wasserstoff

Potenzialstudie: Grüner Wasserstoff im Energiesystem von morgen. Di, 26.11.2024, 16-18 Uhr . . . . . (+)

Das Potenzial von Biomasse für erneuerbare Kraftstoffe oder Grundstoffchemikalien. Di, 03.12.2024, 16-18 Uhr . . . . . (+)

Wirtschaftlicher Einsatz von Wasserstoff in der Kupferherstellung. Di, 10.12.2024, 16-18 Uhr . . . . . (-)

Der wirtschaftliche Einsatz von Wasserstoff zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist, abgesehen von einigen Nischenanwendungen, derzeit auf Kostenbasis nicht konkurrenzfähig mit fossilen Brennstoffen. Heute besteht jedoch ein Konsens darüber, dass Wasserstoff eine entscheidende Rolle bei der Minimierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen spielt und als einer der Schlüssel für die Abkehr von fossilen Brennstoffen gilt.

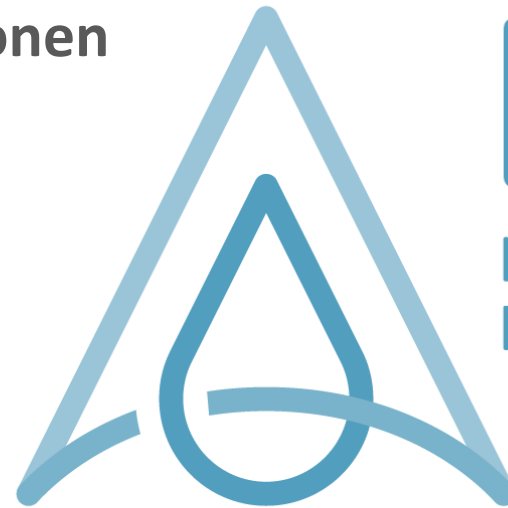
Die Metallindustrie ist energie- und damit CO<sub>2</sub>-intensiv, was im Hinblick auf die dringend notwendige Reduzierung der Treibhausgasemissionen eine Herausforderung darstellt.

In dieser Vorlesung wird der mögliche Nutzen von Wasserstoff zur Vermeidung von Emissionen im Prozess der Kupferherstellung näher beleuchtet. Anhand eines konkreten Beispiels zeigen wir die Herausforderung auf vor denen ein Unternehmen steht und skizzieren mögliche Lösungswege, die einen wirtschaftlichen Einsatz von Wasserstoff ermöglichen.

- Wer: **Carsten Schütte, Prof. Dr.-Ing. Sebastian Timmerberg (Referenten)**
- Wann: **Dienstag, 10. Dezember 2024, 16-18 Uhr**
- Wo: **Online** (Link zur Teilnahme wird nach der Anmeldung separat zugeschickt)

Wasserstoffmobilität. Di, 17.12.2024, 16-18 Uhr . . . . . (+)

- **Aurubis und der Prozess der Kupferherstellung**
- **Wasserstoffbereitstellung unter Nutzung von Strom aus Windkraft**
- **Optimierte Wasserstoffbereitstellung unter Nutzung von Strom aus dem Netz**
- **Wasserstoffbereitstellung und CO<sub>2</sub>-Emissionen**



**NRL**

Norddeutsches  
RealLabor

---

- Natürliches Kupfer kommt vielerorts als Primärmineral in basaltischer Lava vor und kann auch aus Kupferverbindungen reduziert werden.
- Kupfer ist in vielen Mineralien gebunden, z. B. in Chalkosin, Chalkopyrit, Bornit, Cuprit, Malachit und Azurit.
- Kupfer kommt in der Natur meist in Verbindung mit Schwefel vor.
- Hohe elektrische Leitfähigkeit. Hohe Duktilität. Gute Wärmeleitfähigkeit. Korrosionsbeständigkeit. Gute Bearbeitbarkeit. Antimikrobielle Eigenschaften/Biofouling-Beständigkeit. Nicht-magnetisch.



<https://en.wikipedia.org/wiki/Copper>

# Kupfer ist Baustein der Energiewende



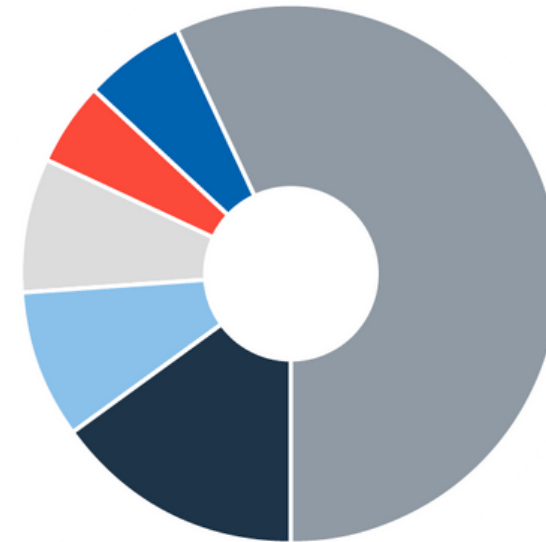
Sonstige  
(Schlösser, Beschläge, Musikinstrumente,  
Münzen, Glocken) **6%**

Handel **5%**

Maschinen-  
und Anlagenbau  
(Sanitär-, Heizungs-,  
Industriearmaturen,  
Kessel) **8%**

Automobil/  
Zulieferer  
(Bremsbeläge) **9%**

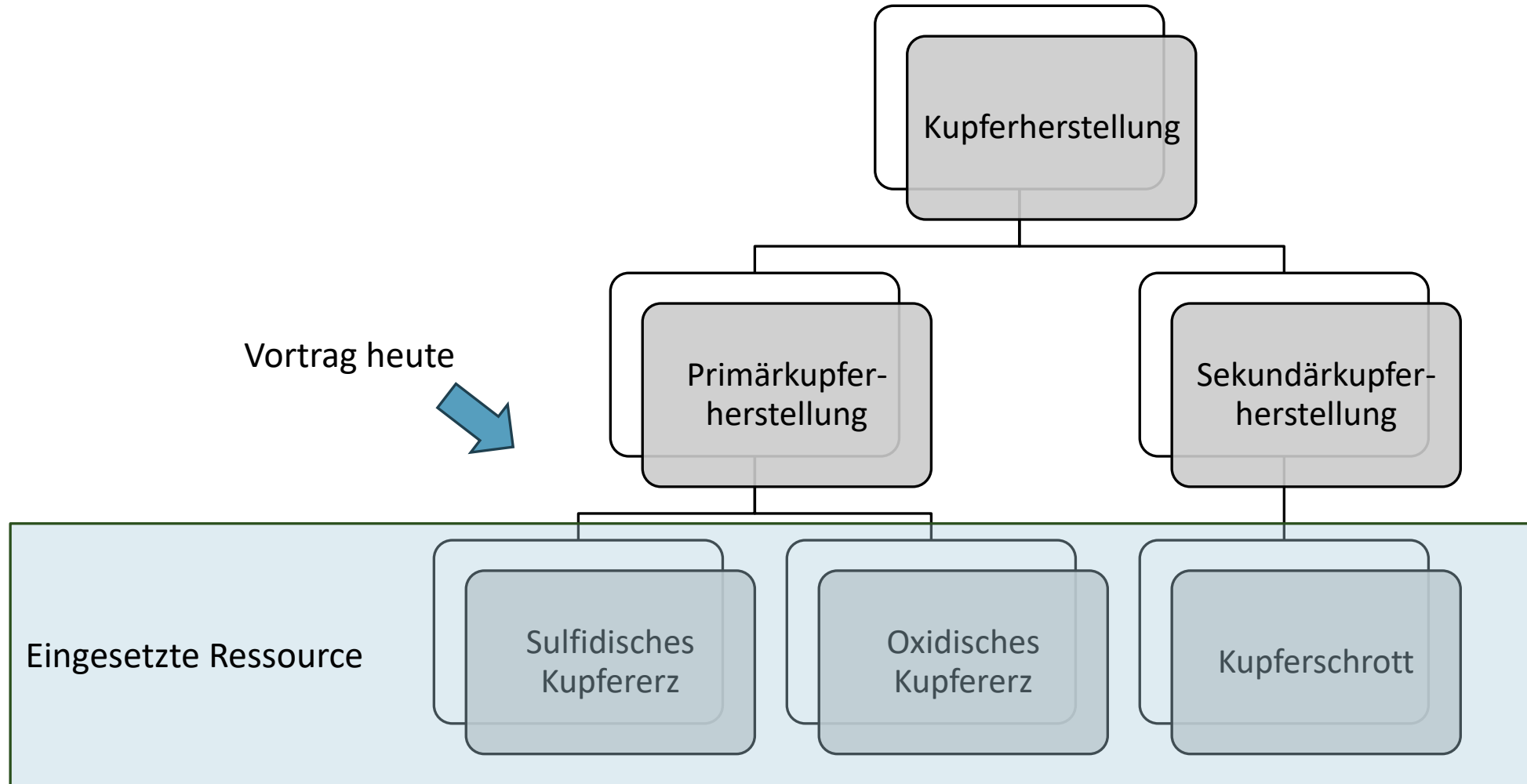
Bau  
(Dach, -entwässerung, Fassade,  
Installationsrohre) **15%**



Elektro  
(Kabel, Leitungen,  
Draht, Steck-  
verbinder, Trans-  
formatoren, Leiter-  
platten, Batterien)  
**57%**

Quelle: Kupferverband e.V.

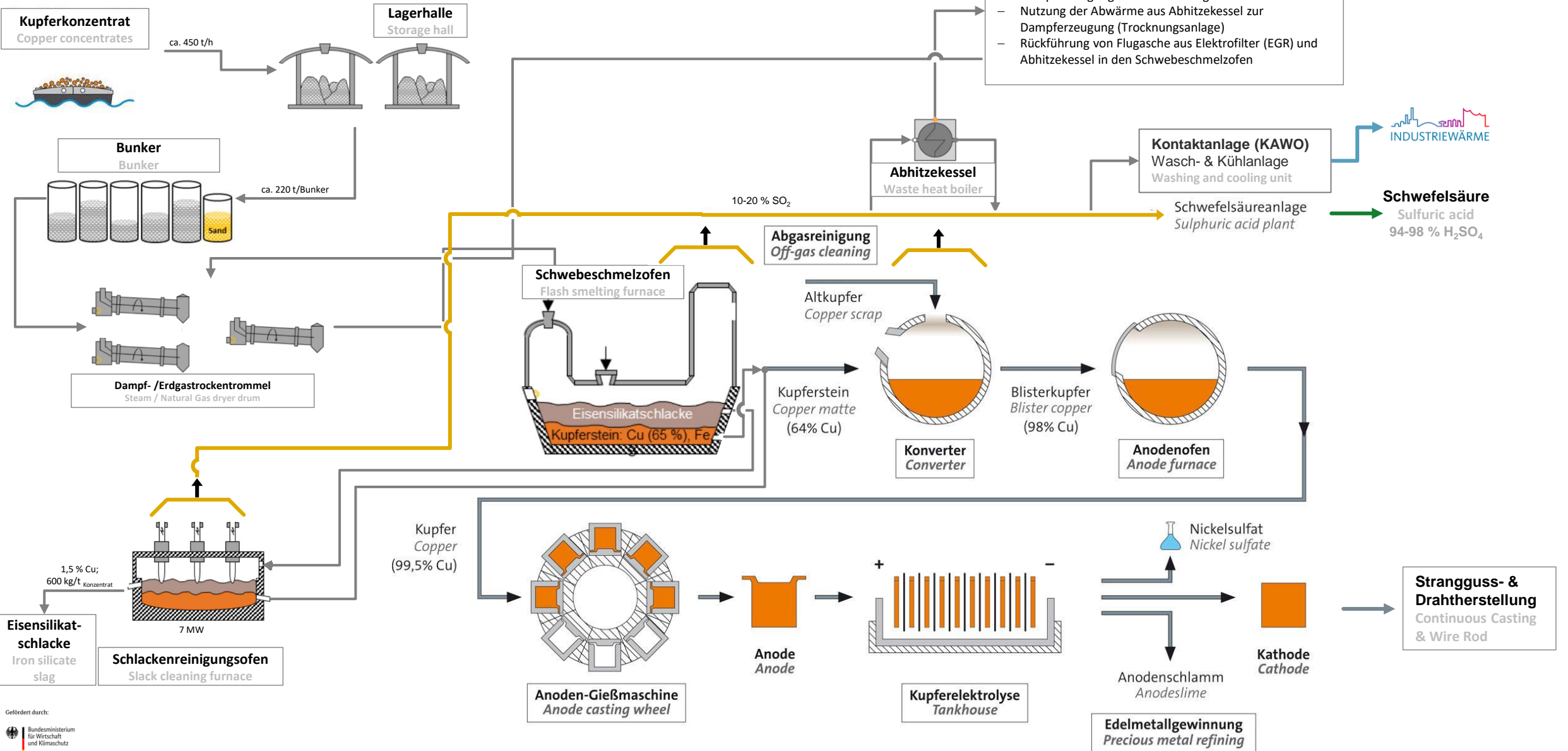
**Aurubis Hamburg**  
Größtes Werk  
Hauptsitz seit 1908  
Fläche 1 km<sup>2</sup>  
~ 2.600 Mitarbeiter  
~ 45 Nationen vertreten  
Seit 2000 mehr als 270 Mio. € in  
Umweltschutz investiert



# Prozessdiagramm der Kupferherstellung

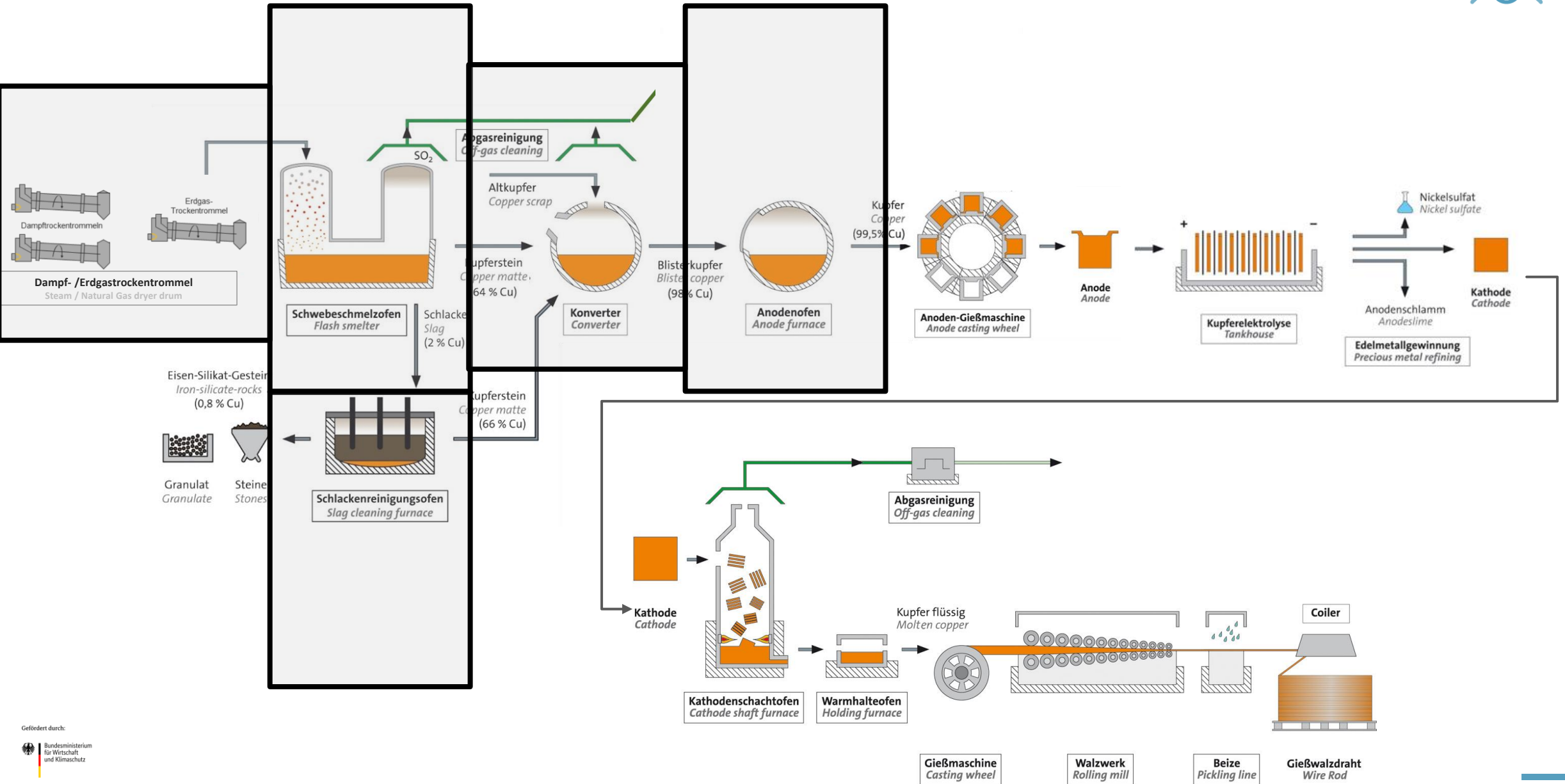
**Beispielhaftes "Internes Energie- / Stoffstrommanagement":**

- Nutzung der Energie aus der Abgaskühlung zur Dampferzeugung und Überhitzung.
- Nutzung der Abwärme aus Abhitzeessel zur Dampferzeugung (Trocknungsanlage)
- Rückführung von Flugasche aus Elektrofilter (EGR) und Abhitzeessel in den Schwebeschmelzofen





# Prozessschritte der Kupferherstellung



# In-/Direkt beheizte Trockentrommel (Erdgas und Dampf)

## Prozess

- Steigerung der Energiedichte des Konzentrats
- Um unerwünschte Reaktionen durch den Wassergehalt im Schwebeschmelzofen zu vermeiden

## Gegenwärtig

### Direkt mit Erdgas beheizt:

- 43,000 MWh/a Erdgasverbrauch
  - 7,800 t<sub>CO2</sub>/a energiebezogene Emissionen [1]

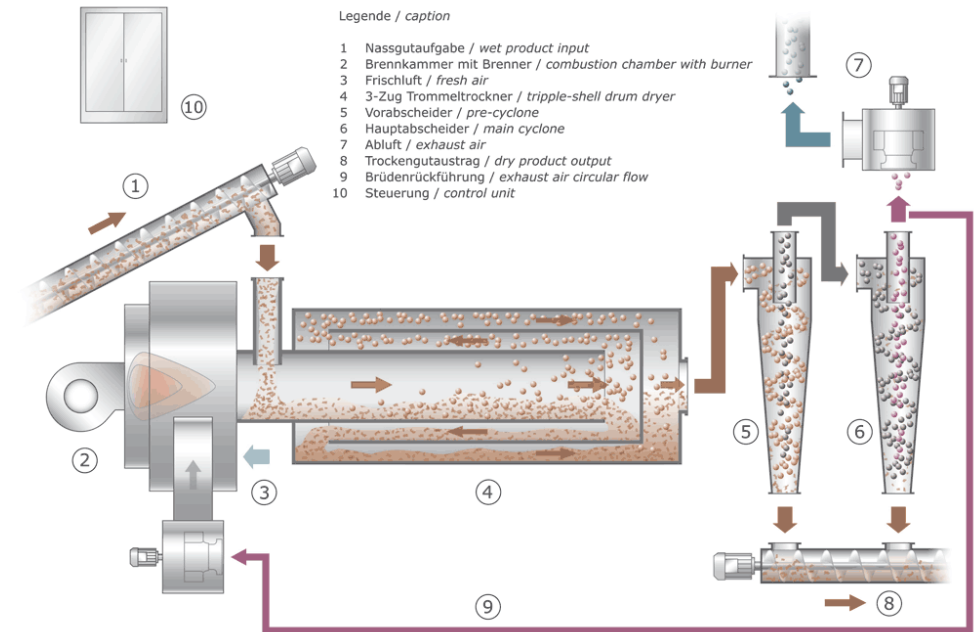
### Indirekt mit Dampf beheizt:\*

- 80,000 MWh/a
  - 14,500 t<sub>CO2</sub>/a energiebezogene Emissionen

## Ergebnis

- Konzentrat mit einem Feuchtigkeitsgehalt von weniger als 1 %

\* Die Energie zur Dampferzeugung aus den hier gezeigten Kesseln wird nicht nur zur Trocknung des Konzentrats verwendet, sondern auch in das Werksnetz eingespeist. Der Dampf wird auch an anderen Stellen des Kupferprozesses genutzt.



Quelle: <https://www.allgaier-process-technology.com>



Quelle: <https://www.ammann.com>



Quelle: <https://www.wirtgen-group.com>

## Prozess

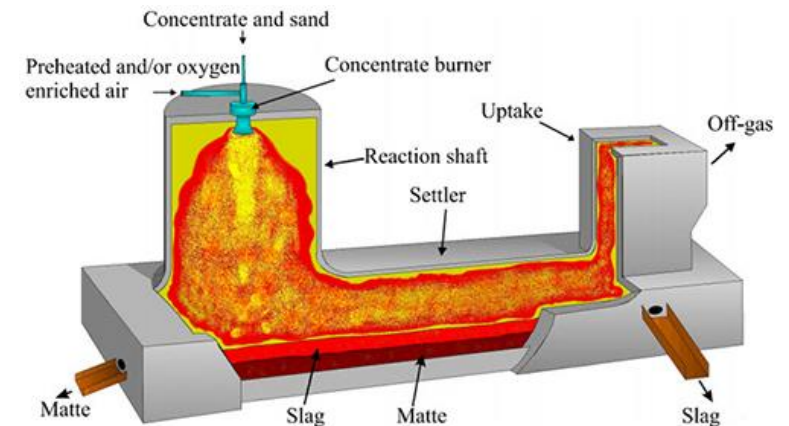
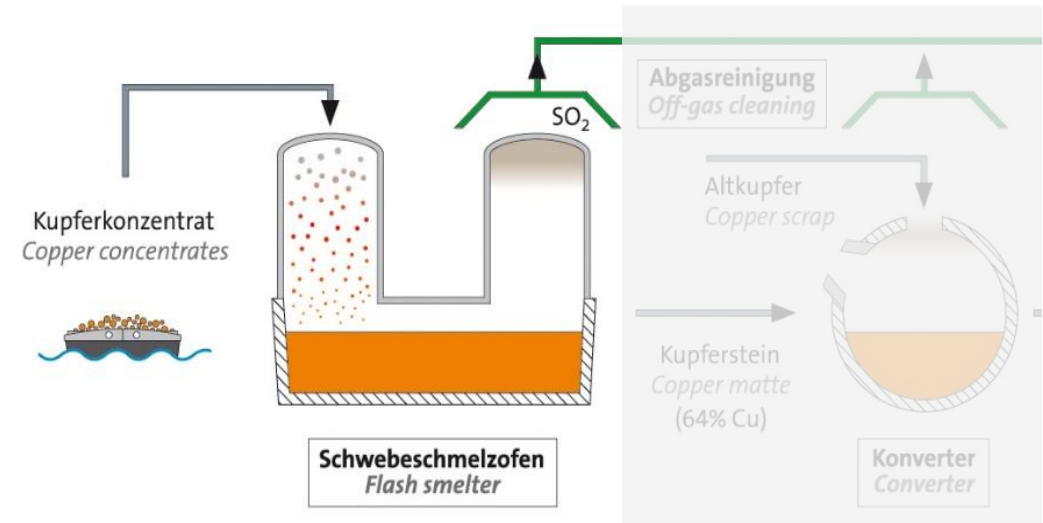
- Der Schwebeschmelzofen erhält das getrocknete Kupferkonzentrat.
- Mit Hilfe von sauerstoffangereicherter Luft wird die im Konzentrat (Schwefel) enthaltene Energie genutzt, um den größten Teil des Energiebedarfs der Öfen zu decken (autotherme Reaktion!).
- Die Temperatur beträgt etwa 1.250 °C. Koks Kohle wird als Reduktionsmittel und zur Aufrechterhaltung der Temperatur bei einem kontinuierlichen Durchsatz von Kupfer verwendet.

## Gegenwärtig

- 17,000 MWh/a Erdgas
  - ~3,000 t<sub>CO2</sub>/a energiebezogene Emissionen
- 5,000 MWh/a Koks
  - ~ 2,000 t<sub>CO2</sub>/a energiebezogene Emissionen [2]

## Ergebnis

- Die reagierten Partikel fallen in ein Bad am Boden des Ofens, wo die Eisenoxide mit Flussmitteln wie Siliziumdioxid und Kalkstein reagieren und eine Schlacke bilden.
- Bei den Reaktionen im Schwebeschmelzofen entstehen Kupferstein (Cu 64 %), Schwefeldioxid und Schlacke.



Quelle: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=394>

## Prozess

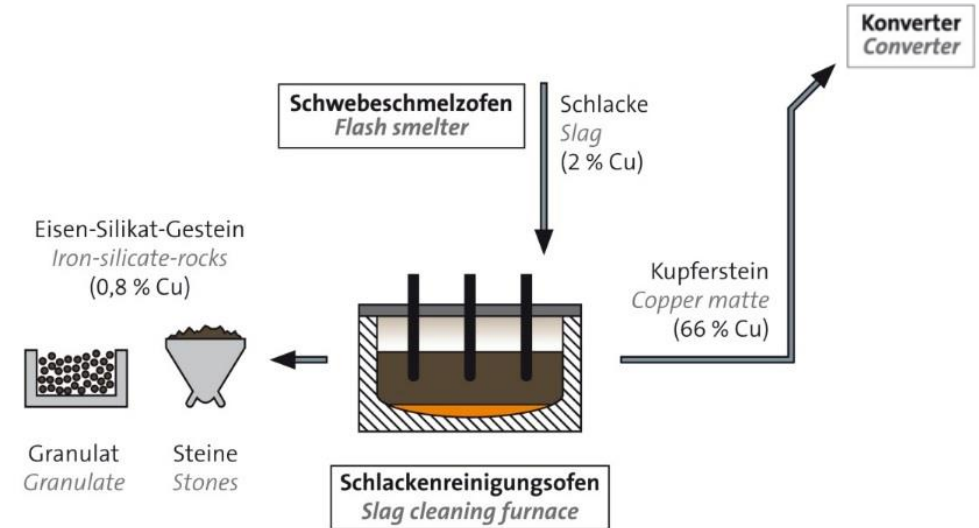
- Die aus dem Schwebeschmelzofen abgestochene Schlacke fließt über Rutschen in den Schlackenreinigungsofen.
- Im Schlackenreinigungsofen trennen sich Kupferstein und Eisensilikatschlacke. Die Eisensilikatschlacke wird z. B. granuliert.

## Gegenwärtig

- 2,500 MWh/a Erdgas
  - ~ 500 t<sub>CO2</sub>/a energiebezogene Emissionen
- 12,500 MWh/a Koks
  - ~ 5,000 t<sub>CO2</sub>/a energiebezogene Emissionen

## Ergebnis

- Granulat für den Erd-, Straßen-, Wege-, Wasser- und Gleisbau



Quelle: wikipedia.com

## Prozess

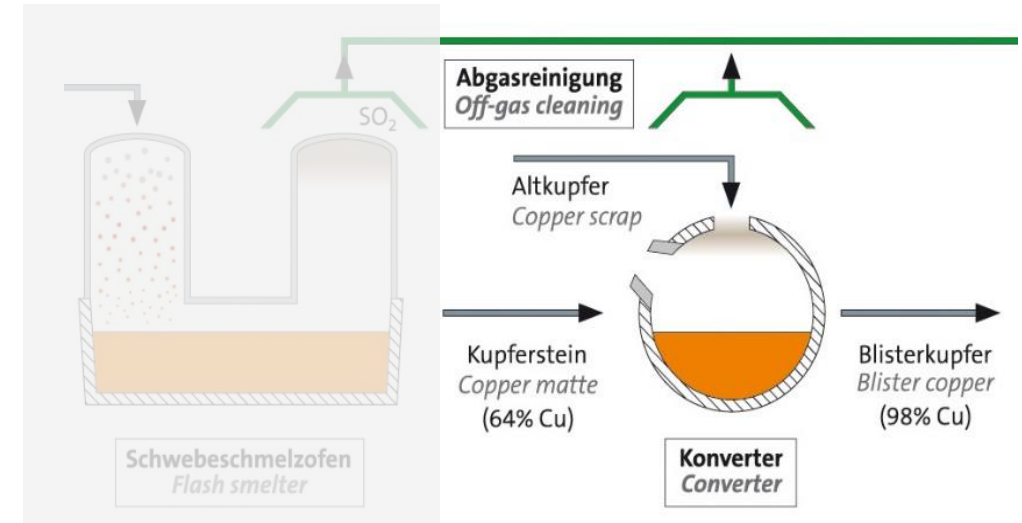
- Der geschmolzene Kupferstein aus dem Schwebeschmelzofen und dem Schlackenreinigungs-ofen wird mit sauerstoffangereicherter Luft zu Blisterkupfer verarbeitet.
- Kupfersulfid und Kupferoxid werden unter Ausschluss von Schwefeldioxid in Kupfer umgewandelt, und Eisen als Hauptbegleitstoff wird verschlackt.

## Gegenwärtig

- Erdgas wird für den Aufheiz- und Warmhaltebetrieb verwendet
- 13,000 MWh/a Erdgas
  - ~ 2,400 t<sub>CO2</sub>/a energiebezogene Emissionen

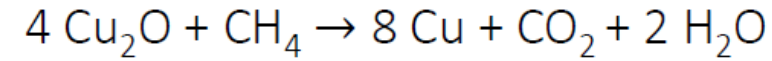
## Ergebnis

- Blisterkupfer (~98 % Cu)



Quelle: <https://www.ennomotive.com/pierce-smith-converter/>

# Anodenofen (Trommelofen) - Beseitigung von Verunreinigungen



## Prozess

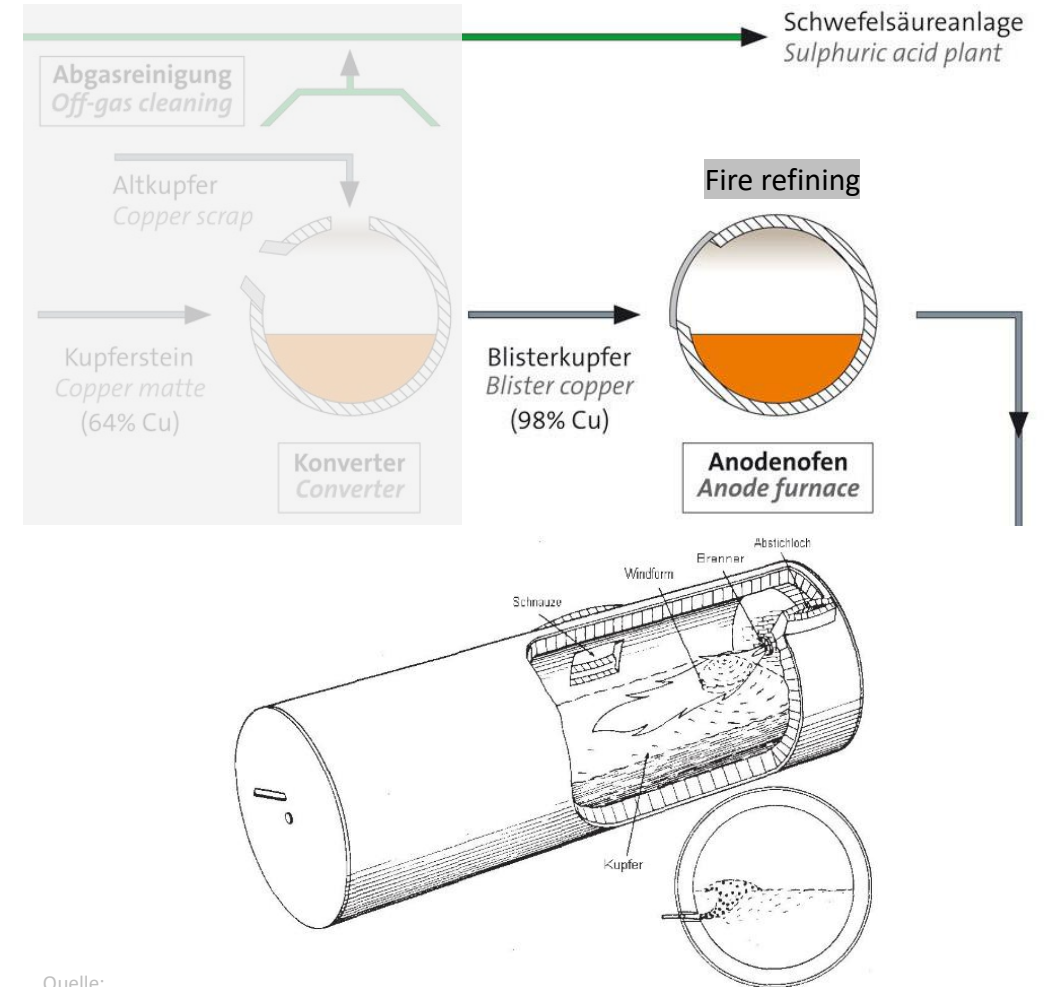
- Verwendung von Erdgas als Reduktionsmittel zur Erhöhung der Reinheit des Kupfers (Sauerstoffgehalt ca. 1 %).
- Das Erdgas reduziert das Kupferoxid und es entsteht CO<sub>2</sub>.

## Gegenwärtig

- Zweistufige Feuerraffination
  - Selektive Oxidation durch Einblasen von Druckluft zur Entfernung von Restschwefel
  - Reduktion des Kupferoxids mit Erdgas
- 30,000 MWh/a Erdgas
  - ~ 5,400 t<sub>CO2</sub>/a prozessbedingte Emissionen
- 23,000 MWh/a Erdgas
  - ~ 4,200 t<sub>CO2</sub>/a energiebezogene Emissionen

## Ergebnis

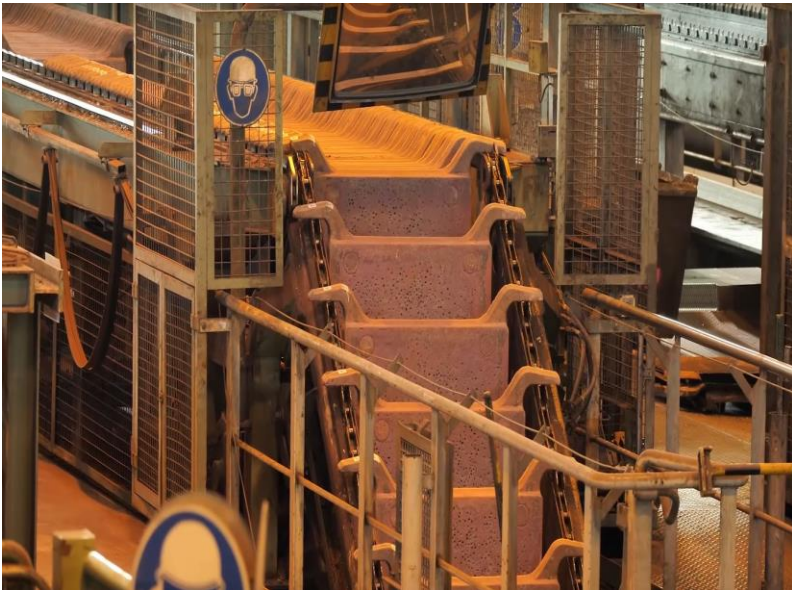
- Elementares Kupfer mit ~ 99.5 %
- Das geschmolzene Kupfer wird in einer Anoden-Gießmaschine zu Kupferanoden gegossen.



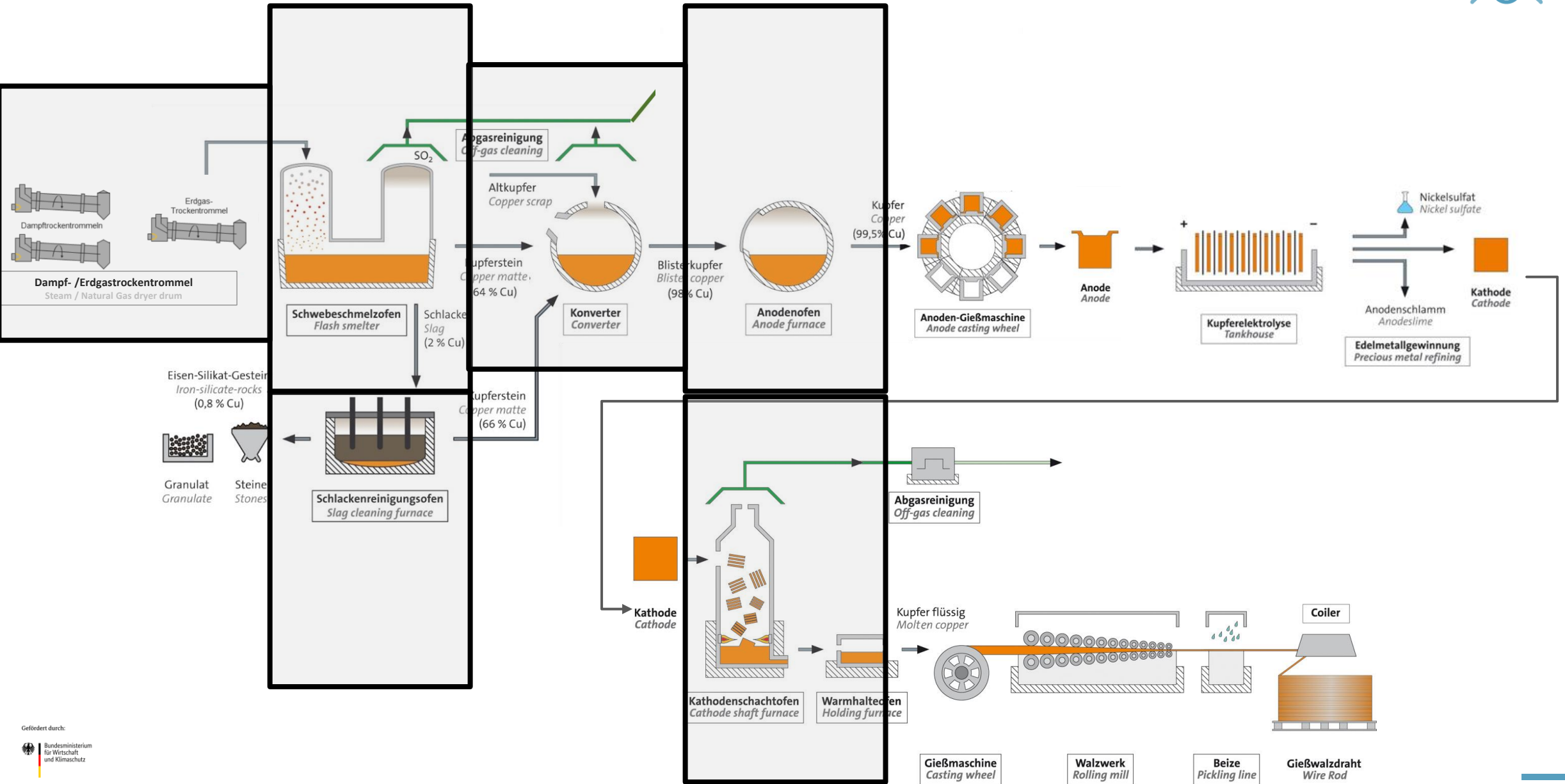
Quelle:

- Goyal P., N.J. Themelis and W.A. Zanchuk: Gaseous refining of anode copper, Journal of Metals 34 (1982), 12, 22 - 28.
- Goyal P., S.V. Joshi and J. Wang: Porous plug gas injection in anode refining furnaces, Journal of Metals 35 (1983), 12, 52 - 58.





# Prozessschritte der Kupferherstellung





# Kathodenschachtofen

## Prozess

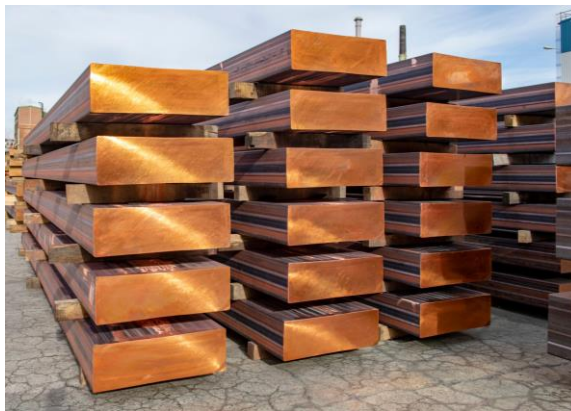
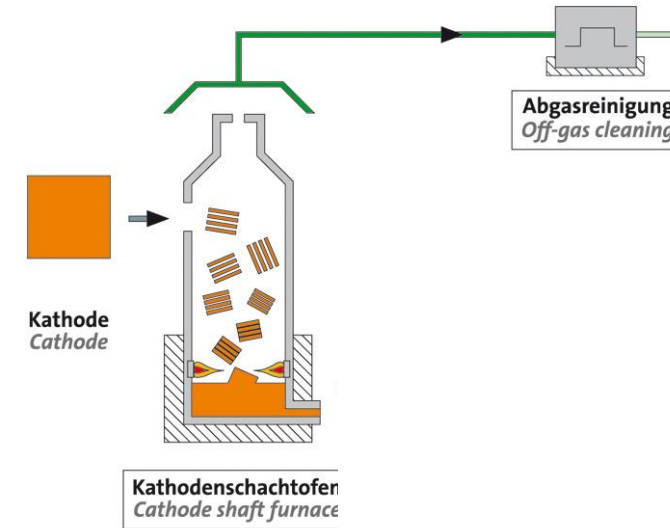
- Weiterverarbeitung von Kupferkathoden und Altkupfer.
- Das Kupfer wird in den Schachtofen geschmolzen, die direkt mit Erdgas befeuert werden.

## Gegenwärtig

- 100,000 MWh/a Erdgas
  - ~ 18,000 t<sub>CO2</sub>/a energiebezogene Emissionen

## Ergebnis

- Strangguss und Gießwalzdraht (99.99 % Cu)

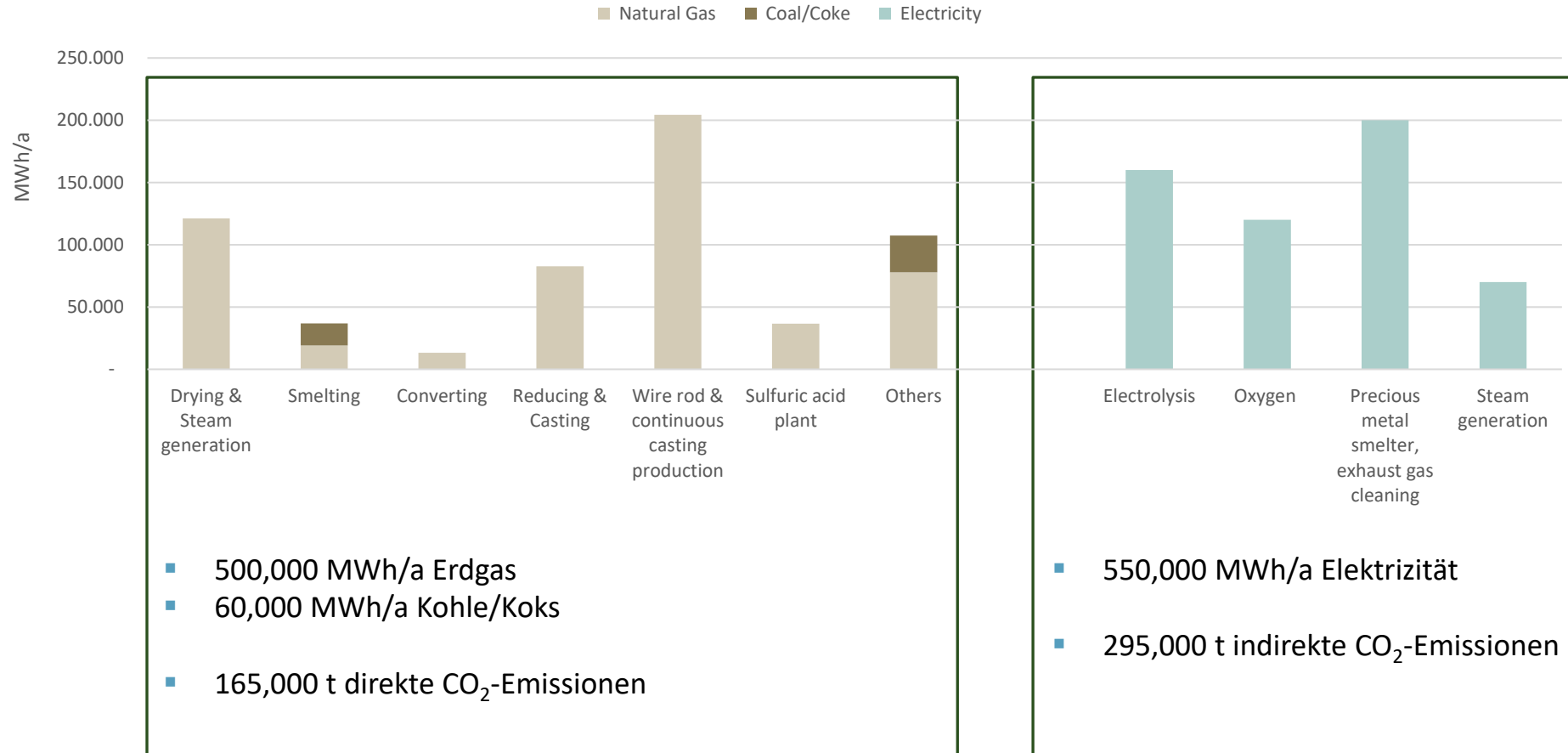


Quelle : <https://www.aurubis.com/en/products/copper-products/rod-and-specialty>



Quelle: <https://www.suedkupfer.de/leistungen/logistik/>

## Energieverbrauch Aurubis



Eigene Darstellung

## ■ Energetischer Einsatz

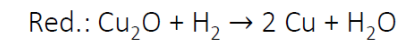
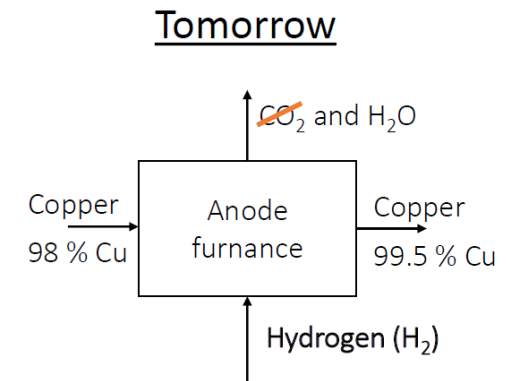
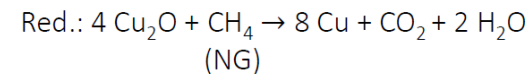
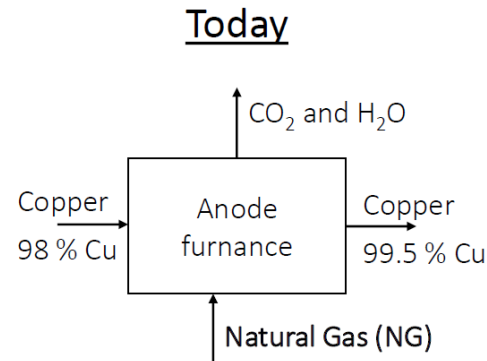
- Wasserstoff wird verbrannt, um Wärme bereitzustellen
- Wasserstoffeinsatz steht in Konkurrenz zum direkten Einsatz von Strom (Elektrifizierung)

## ■ Stofflicher Einsatz

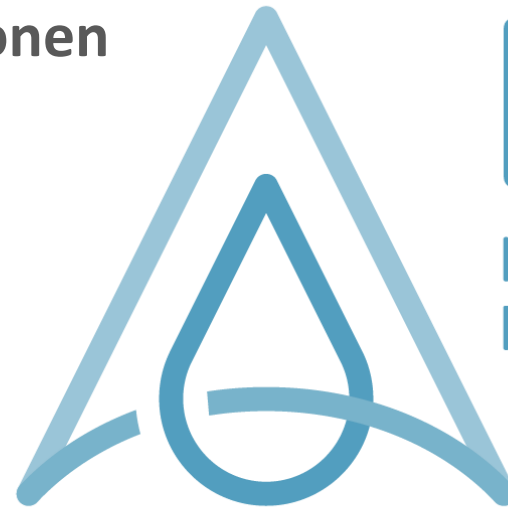
- z. B. Wasserstoff als Reduktionsmittel
- Wasserstoffeinsatz steht in Konkurrenz zur CO<sub>2</sub> Abscheidung



Wasserstoff für den Anodenofen



- **Aurubis und der Prozess der Kupferherstellung**
- **Wasserstoffbereitstellung unter Nutzung von Strom aus Windkraft**
- **Optimierte Wasserstoffbereitstellung unter Nutzung von Strom aus dem Netz**
- **Wasserstoffbereitstellung und CO<sub>2</sub>-Emissionen**

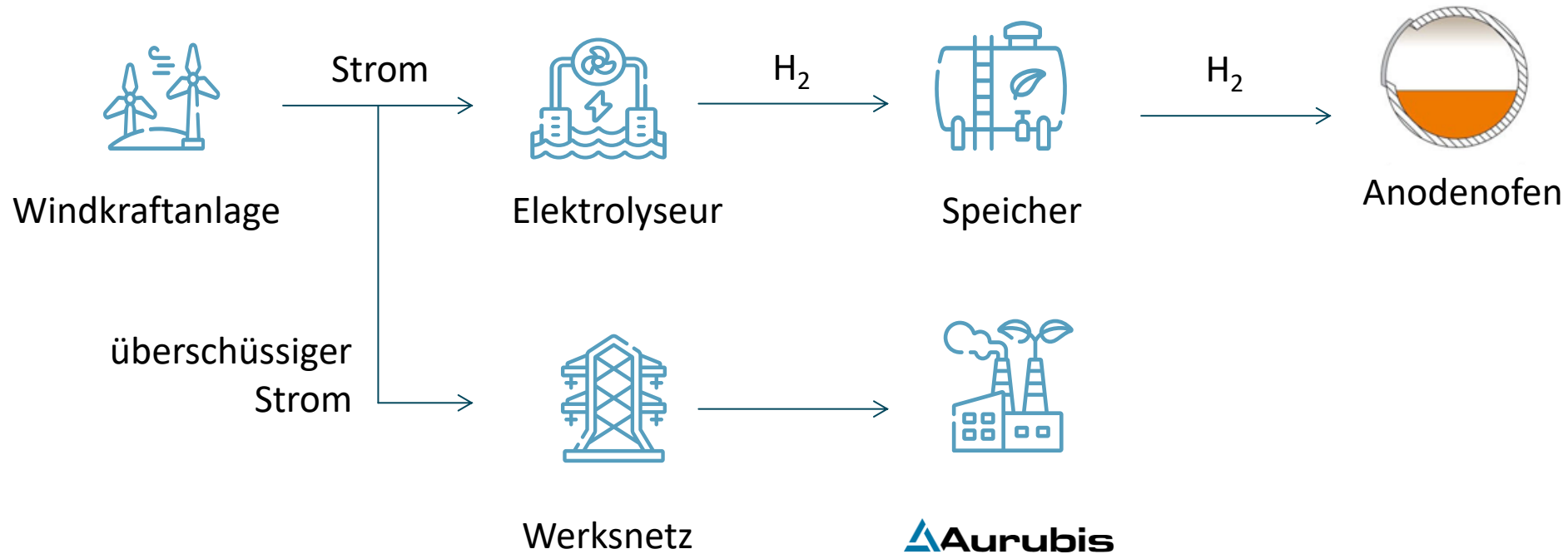


**NRL**

Norddeutsches  
RealLabor

---

# Prozessschema Wasserstoffherzeugung



- Bereitstellung von Wasserstoff für Reduktion von 1 Batch Kupfer im Anodenofen pro Tag
  - ~1,5 kg H<sub>2</sub> werden benötigt, um 1 Tonne Kupfer zu reduzieren.
  - ~420 kg H<sub>2</sub> (= 14 MWh H<sub>2</sub>) werden für die Produktion von 1 Batch Anodenkupfer benötigt.
- Wirkungsgrad des Elektrolyseurs: 70 %.
- Nach dem Elektrolyseur wird ohne zusätzlichen Kompressor bei 40 bar zwischengespeichert.
- Der Speicher ist für 1 Batch ausgelegt. Ist der Speicher mit H<sub>2</sub> gefüllt, wird er sofort geleert.
- Die Berechnung ist Stunden-genau. Ergebnisse zeigen jedoch durchschnittliche Tageswerte.
- Bewertung des Windenergiepotentials mit standortbezogenen Winddaten (HH-Wilhelmsburg) und einer 7 MW-Windkraftanlage

# Stromproduktion einer 7 MW-Windkraftanlage

- **Konservative Betrachtung:** Alle folgenden Berechnungen basieren auf der geringsten Windstromproduktion im Jahr 2021.
- Höhe der Turbine 135 m

Tägliche, durchschnittliche Stromerzeugung einer 7 MW-Windkraftanlage in MWh

Jahr	Windkraftanlage 1 (IEC class I <sub>a</sub> )
2018	36.083
2019	38.487
2020	38.634
2021	34.483
2022	38.022



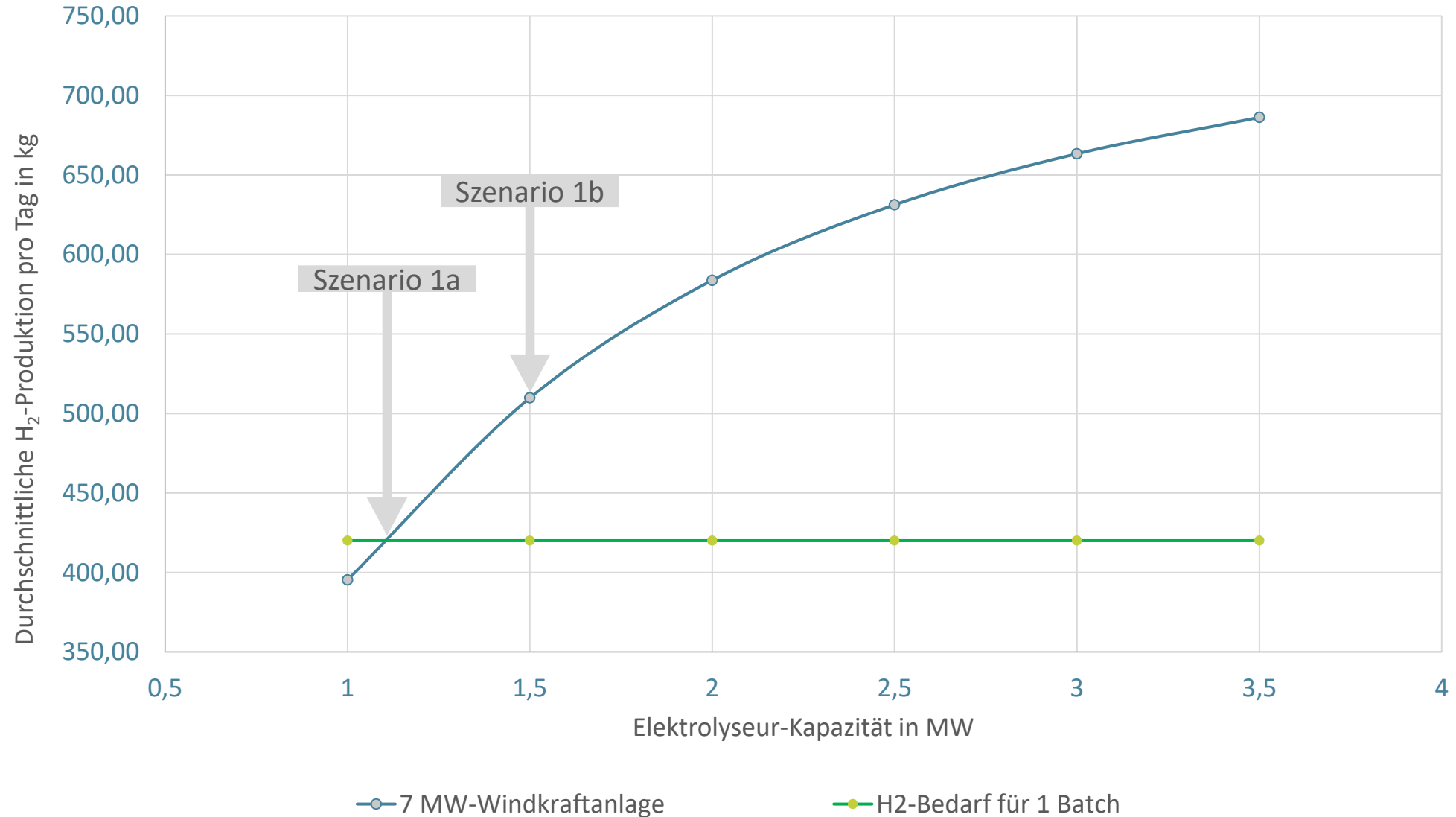
## ■ 100 % Grünstrom-Versorgung

- Windenergie > Elektrolyseur-Kapazität: Der Elektrolyseur läuft in Nennlast. Überschüssiger Windstrom wird in das Werk-eigene Stromnetz geleitet.
- Windenergie < Elektrolyseur-Kapazität: Der Elektrolyseur produziert Wasserstoff in Teillast.
- Betrachtung von zwei Varianten:
  - 1,1 MW-Elektrolyseur (Szenario 1a)
  - 1,5 MW-Elektrolyseur (Szenario 1b)

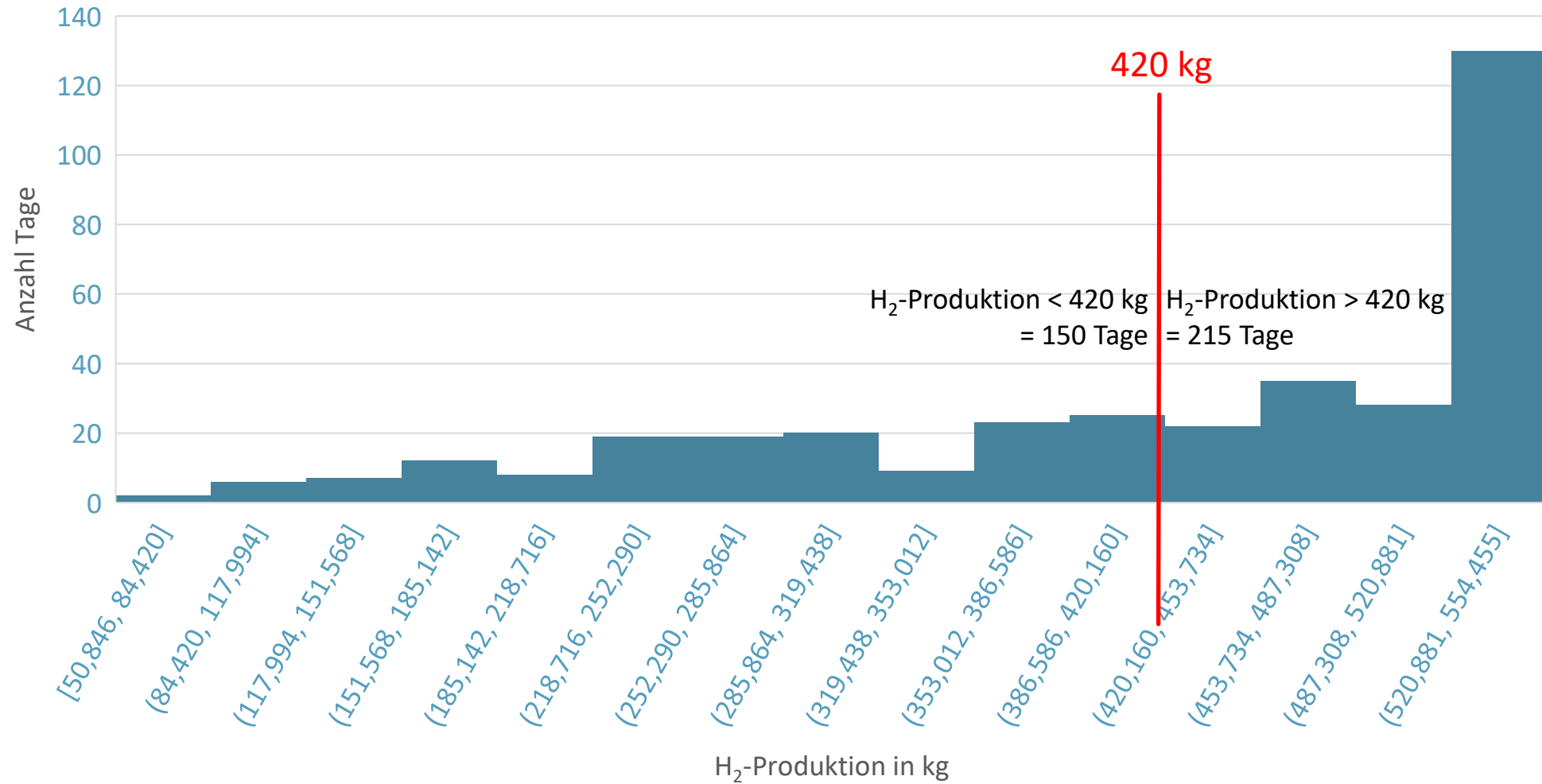
**Ziel:** Wasserstoffproduktion nur, wenn Windenergie zur Verfügung steht. Verwendung von ausschließlich Windenergie und dadurch maximaler Klimaschutz.



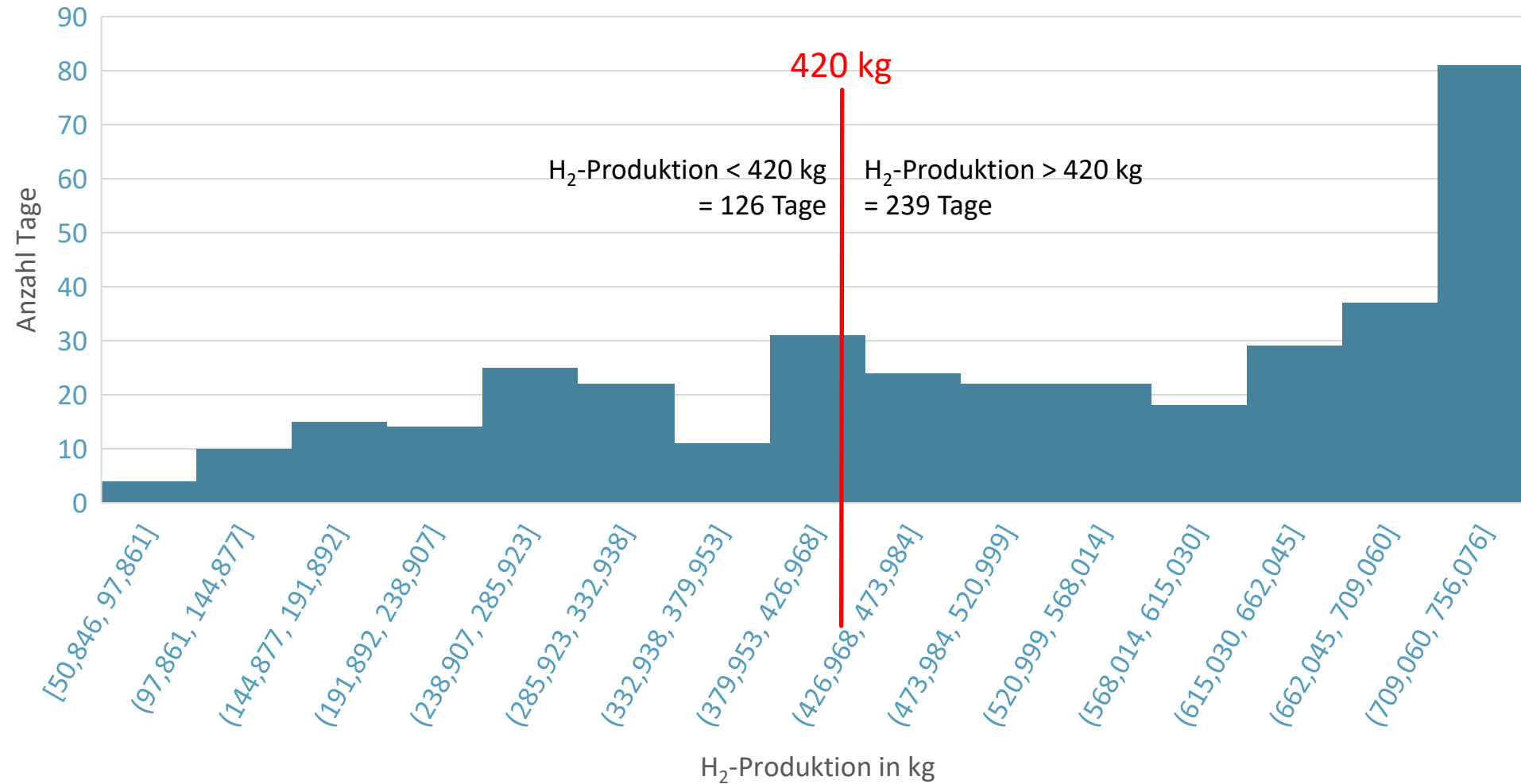
# Durchschnittliche H<sub>2</sub>-Produktion aus Windkraft in Abhängigkeit der installierten Elektrolyseurleistung



- H<sub>2</sub>-Produktion pro Tag für eine 7 MW-Windkraftanlage bei Anschluss an einen 1,1 MW-Elektrolyseur



- H<sub>2</sub>-Produktion pro Tag für eine 7 MW-Windkraftanlage bei Anschluss an einen 1,5 MW-Elektrolyseur



# H<sub>2</sub>-Gestehungskosten (LCoH<sub>2</sub>) | Szenario 1a

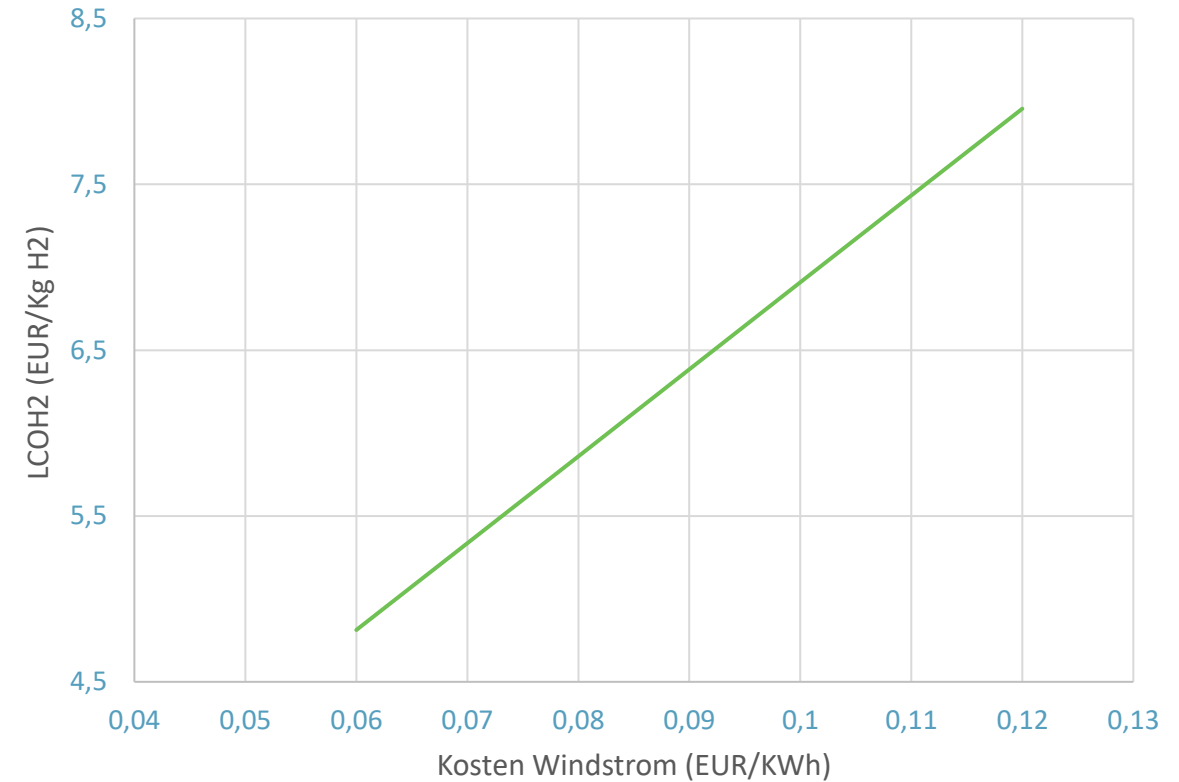
Elektrolyseur (1,1 MW)		1.430.000 €
Anschlüsse, Verrohrung, etc.		20.000 €
Speicher		300.000 €
<b>Total Capex</b>		<b>1.750.000 €</b>

Windstrom (€/kWh)	0,08	586.994 €
Berücksichtigung zusätzlicher Strombedarf Degradation (durchschnittlich, über Laufzeit)	10 %	58.699 €
Elektrolyseur	3 %	42.900 €
Speicher	3 %	9.000 €
<b>Total Opex</b>		<b>697.594 €</b>

- WACC = 10 %
- Laufzeit = 20 Jahre
- ANF = 0.1174

LCOH<sub>2</sub> bei Windkosten 8 ct/kWh = 0,1758 €/KWh<sub>H<sub>2</sub></sub> = 5,85 €/Kg<sub>H<sub>2</sub></sub>

Levelized cost of Hydrogen



Energiebezug Elektrolyseur	7.337.430 kWh
Produzierter Wasserstoff	5.136 MWh <sub>H<sub>2</sub></sub>
Deckungsrate H <sub>2</sub> -Produktion (durchschnittlich, im Jahr)	100,52 %

# H<sub>2</sub>-Gestehungskosten (LCoH<sub>2</sub>) | Szenario 1b

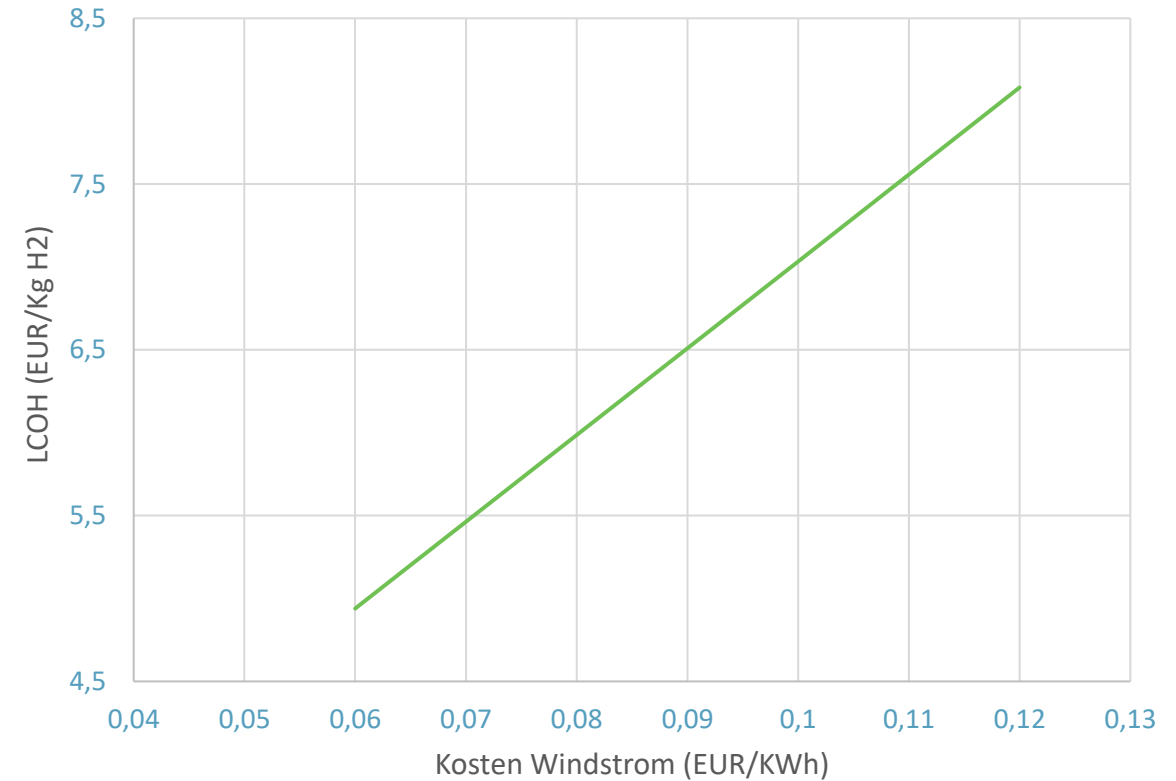
Elektrolyseur (1,5 MW)		1.950.000 €
Anschlüsse, Verrohrung, etc.		20.000 €
Speicher		300.000 €
<b>Total Capex</b>		<b>2.270.000 €</b>

Windstrom (€/KWh)	0,08	708.751 €
Berücksichtigung zusätzlicher Strombedarf Degradation (durchschnittlich, über Laufzeit)	10 %	70.875 €
Elektrolyseur	3 %	58.500 €
Speicher	3 %	9.000 €
<b>Total Opex</b>		<b>847.126 €</b>

- WACC = 10 %
- Laufzeit = 20 Jahre
- ANF = 0.1174

LCOH<sub>2</sub> bei Windkosten 8 ct/kWh = 0,1796 €/KWh<sub>H<sub>2</sub></sub> = 5,99 €/Kg<sub>H<sub>2</sub></sub>

Levelized cost of Hydrogen



Energiebezug Elektrolyseur	8.859.382 kWh
Produzierter Wasserstoff	6.202 MWh <sub>H<sub>2</sub></sub>
Deckungsrate H <sub>2</sub> -Produktion (durchschnittlich, im Jahr)	121,37 %

- **Szenario 2: Energiemix (Windenergie + Netzbezug) mit Elektrolyseurleistung, die H<sub>2</sub> Bedarf deckt**
  - Der Elektrolyseur bezieht zusätzlich zur verfügbaren Windenergie auch Strom aus dem öffentlichen Netz.
  - Betrachtung von einer Variante:
    - 0,85 MW-Elektrolyseur

**Ziel:** Durchgängige Wasserstoffproduktion mit voller Auslastung eines möglichst kleinen Elektrolyseurs; dadurch möglichst günstige Produktionskosten.

Zusätzlich zur verfügbaren Windenergie wird zur Deckung der notwendigen H<sub>2</sub>-Produktionsrate Strom aus dem öffentlichen Netz (Energiemix) bezogen; dadurch entstehen Treibhausgasemissionen.

Kapazität des Elektrolyseurs in MW	0,85
Elektrolyseur Effizienz in %	70
H <sub>2</sub> -Produktion pro Stunde in MWh bzw. [kg]	0,595 [=17,9]
H <sub>2</sub> -Produktion pro Tag in MWh bzw. [kg]	14,3 = [428,4]

- Der Elektrolyseur wird ohne Unterbrechung oder Schwankungen mit Strom versorgt, bis die Menge Wasserstoff zur Reduktion von 1 Batch produziert ist.
- Auf diese Weise wird Wasserstoff mit einer konstanten Rate von durchschnittlich rund 18 kg/h erzeugt.
- Eine optimale Betriebsweise sowie optimale Speicherzeiten ist nicht berücksichtigt.

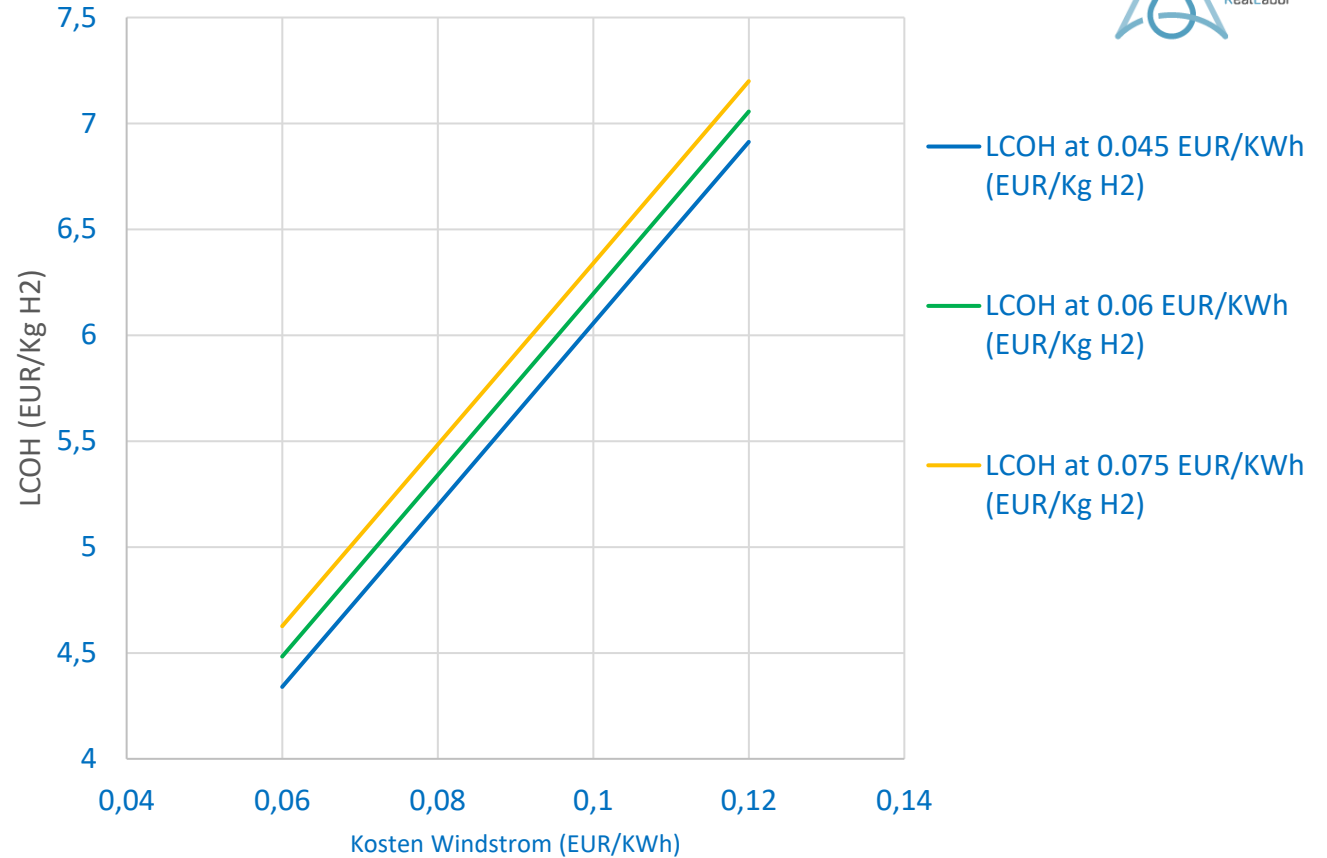
# H<sub>2</sub>-Gestehungskosten (LCoH<sub>2</sub>) | Szenario 2

Levelized cost of hydrogen



Elektrolyseur (0,85 MW)		1.105.000 €
Anschlüsse, Verrohrung, etc.		20.000 €
Speicher		300.000 €
<b>Total Capex</b>		<b>1.425.000 €</b>

Windstrom (€/kWh)	0,08	487.713 €
Netzstrom (€/kWh)	0,06	80.975 €
Total strom (€/kWh)		568.688 €
Zusätzlicher Strombedarf Degradation (∅, über Laufzeit)	10 %	56.869 €
Elektrolyseur	3 %	33.150 €
Speicher	3 %	9.000 €
<b>Total Opex</b>		<b>667.707 €</b>



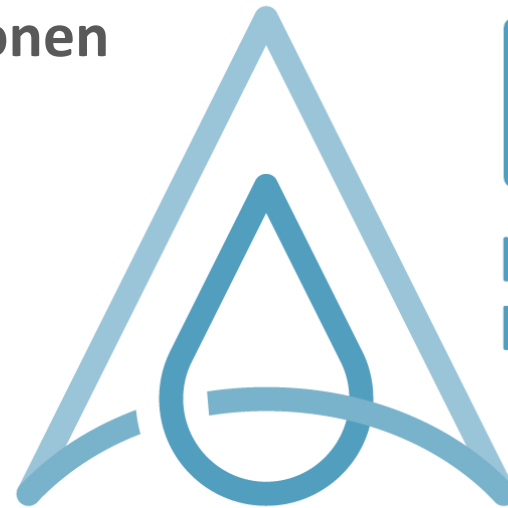
- WACC = 10 %, Laufzeit = 20 Jahre; ANF = 0.1174
- Anteil der erneuerbaren Energien am Mix = 81,87 %.
- LCOH<sub>2</sub> mit Windkosten 0,08 €/kWh und 0,06 €/kWh Netzstrom = 0,1602 €/KWh<sub>H2</sub> oder 5,34 €/kg<sub>H2</sub>

Energiebezug Elektrolyseur	6.096.411 kWh
Energiebezug öffentliches Netz	1.349.589 kWh
Produzierter Wasserstoff	5212 MWh <sub>H2</sub>
Deckungsrate H <sub>2</sub> -Produktion	100 %



- Wasserstoff bei Aurubis in Hamburg kann über Windstrom in einer Wasserelektrolyse erzeugt werden.
  - Windstrom aus einer Windkraftanlage ermöglicht, Wasserstoff für den Anodenofen für ca. 1 Batch Kupfer pro Tag bereitzustellen.
  - Seitenbemerkung: Der Aufbau von Windkraftanlagen am Standort Hamburg ist aufgrund der städtischen Lage herausfordernd
- 
- Der Einsatz von Strom aus dem Netz kann Wasserstoffgestehungskosten verringern.

- **Aurubis und der Prozess der Kupferherstellung**
- **Wasserstoffbereitstellung unter Nutzung von Strom aus Windkraft**
- **Optimierte Wasserstoffbereitstellung unter Nutzung von Strom aus dem Netz**
- **Wasserstoffbereitstellung und CO<sub>2</sub>-Emissionen**



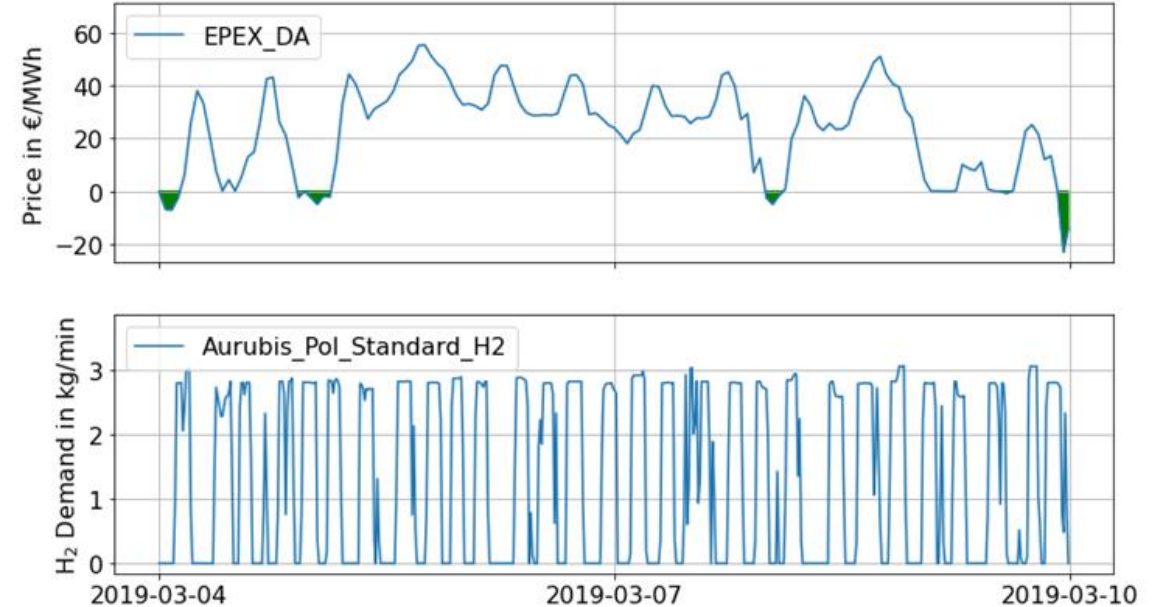
**NRL**

Norddeutsches  
RealLabor

---

# Zielsetzung: Optimierte Auslegung Wasserstofferzeugung

- Wie groß muss der Elektrolyseur gewählt werden, um den Wasserstoffbedarf kostenminimal unter Nutzung von Strom aus dem Netz erzeugen zu können?
- On-Site Wasserstoffproduktion mit H<sub>2</sub>-Speicher
- Ausgleich von günstigem Stromangebot und H<sub>2</sub>-Nachfrage durch Speicher
- Dimensionierung der Komponenten
- Der prozessbedingte Wasserstoffbedarf für den Anodenofen ist vorgegeben

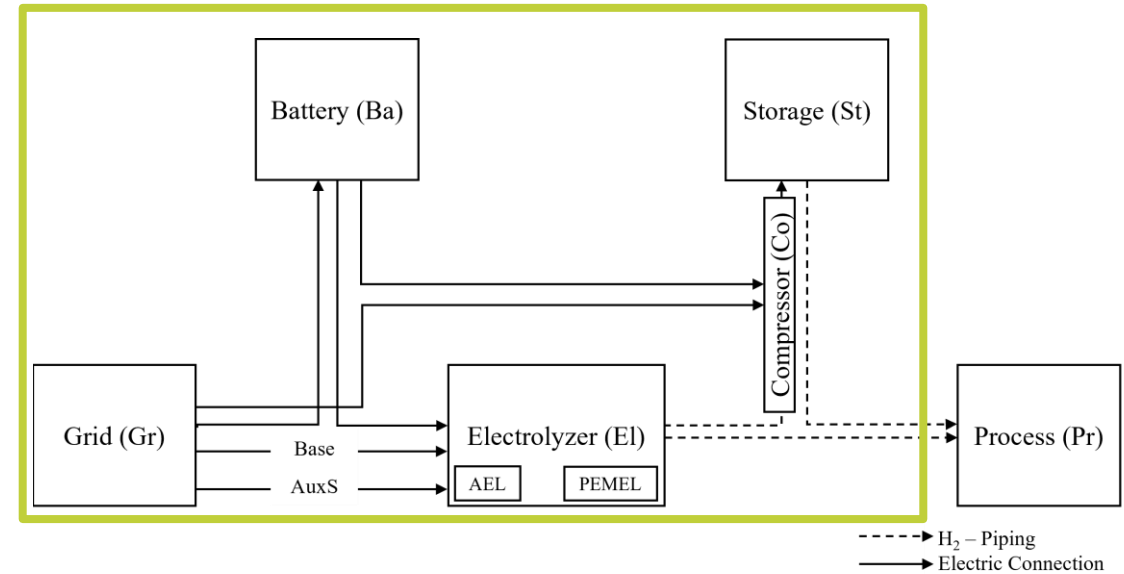


## Systemgrenze

- Stromnetz
- Dimensionierung der Komponenten
  - Batterie (optional; für Regelleistung)
  - Elektrolyseur
  - Wasserstoffdruckspeicher (mit Kompressor)
- Prozess („Anodenofen“)

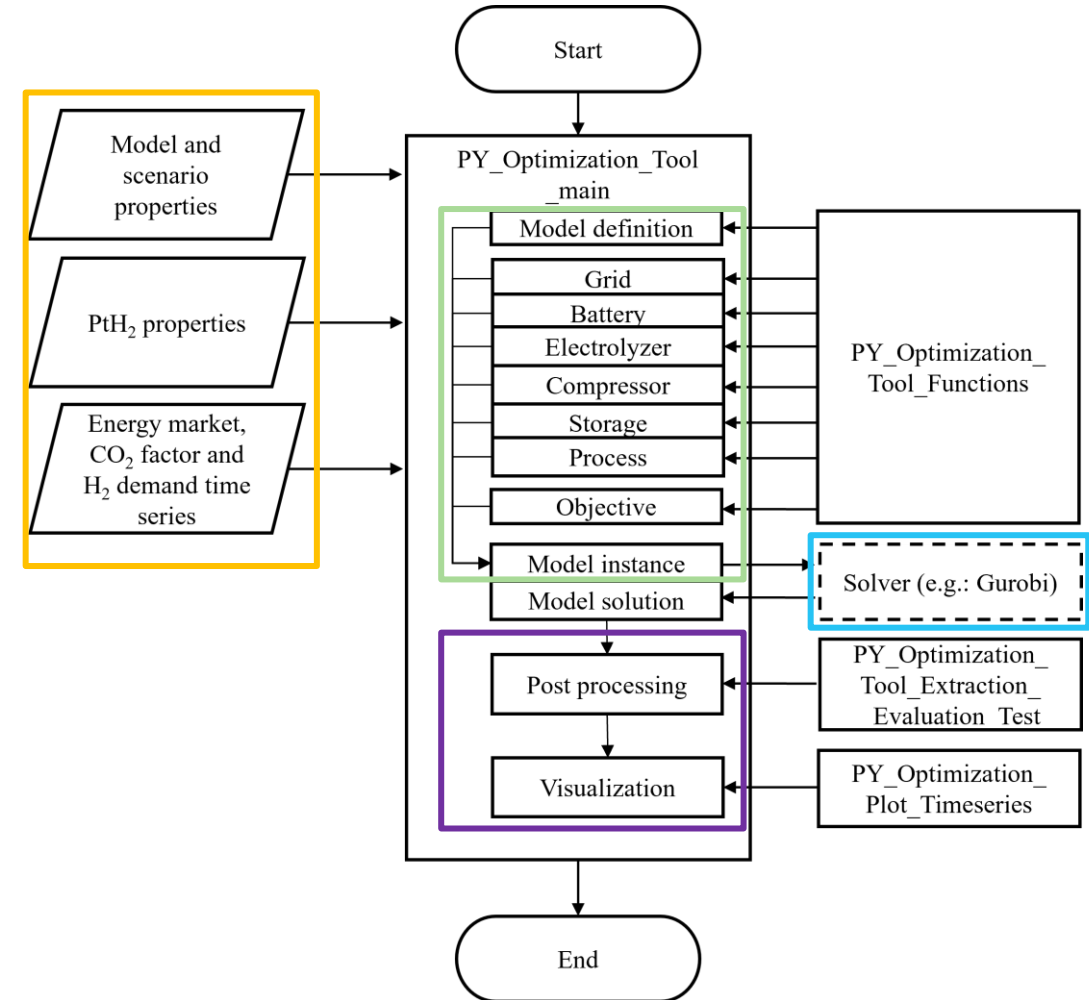
Zielfunktion: Minimierung der Kosten

$$\min(LCoH_2) = \min(CapEx_a + OpEx_a)$$



## Schematische Darstellung des Optimierers

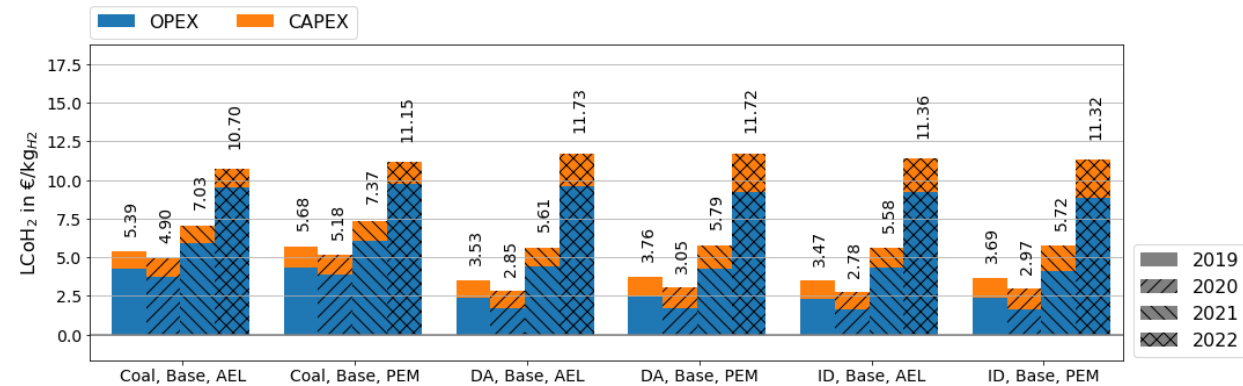
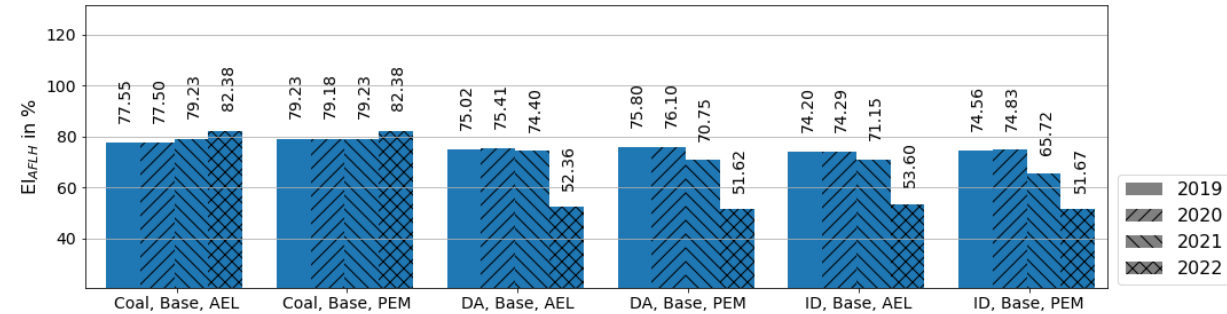
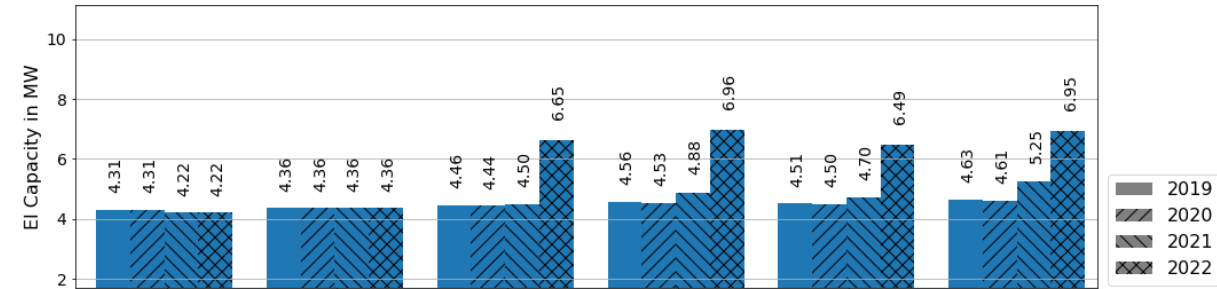
- Datenimport
- Aufbau des Optimierungsmodells
- Lösen des Optimierungsmodells
- Nachbearbeitung
- Visualisierung



# (Ein paar) Ergebnisse der Optimierung

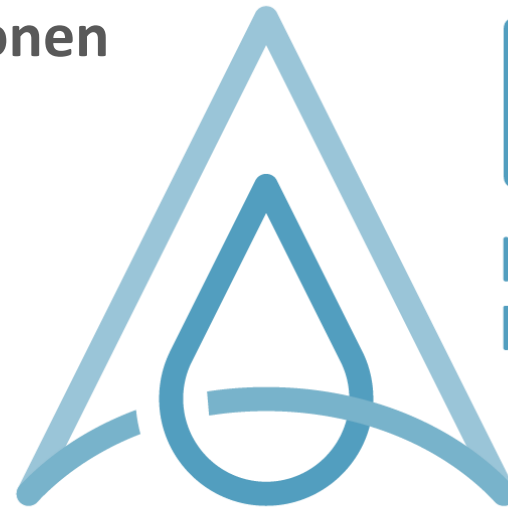
Coal: Stromtarif von Aurubis  
 DA: Börsenstrom (Day-Ahead)  
 ID: Börsenstrom (Intra-Day)

- Zielfunktion: Minimierung der Kosten
- Unterschiedliche Betrachtungsjahre (insbesondere Corona-Jahre) führen zu heterogenem Ergebnisbild
- Je größer die notwendige Kapazität des Elektrolyseurs
  - desto geringer die Volllaststunden (annual full load hours; „AFLH“)
  - desto höher die Wasserstoffgestehungskosten
- Wirtschaftlicher Einsatz, anstatt Erdgas einzusetzen, ab 2 €/kg Wasserstoff.



- Optimierung berechnet, welche Kapazität des Elektrolyseurs, Kompressors etc. den Wasserstoffbedarf am kostengünstigsten deckt
- Wasserstofferzeugung ist auch nach Optimierung nicht wirtschaftlich konkurrenzfähig zum Erdgaseinsatz
- Wasserstofferzeugung nutzt Netzstrom
  - Netzstrom wird nur zu ca. 50 % aus erneuerbaren Energien bereitgestellt, d. h. 50 % des Stroms wird auf Basis fossiler Energien erzeugt
  - Nutzt das eigentlich dem Klima?

- **Aurubis und der Prozess der Kupfererzeugung**
- **Wasserstoffbereitstellung unter Nutzung von Strom aus Windkraft**
- **Wasserstoffbereitstellung unter Nutzung von Strom aus dem Netz**
- **Wasserstoffbereitstellung und CO<sub>2</sub>-Emissionen**



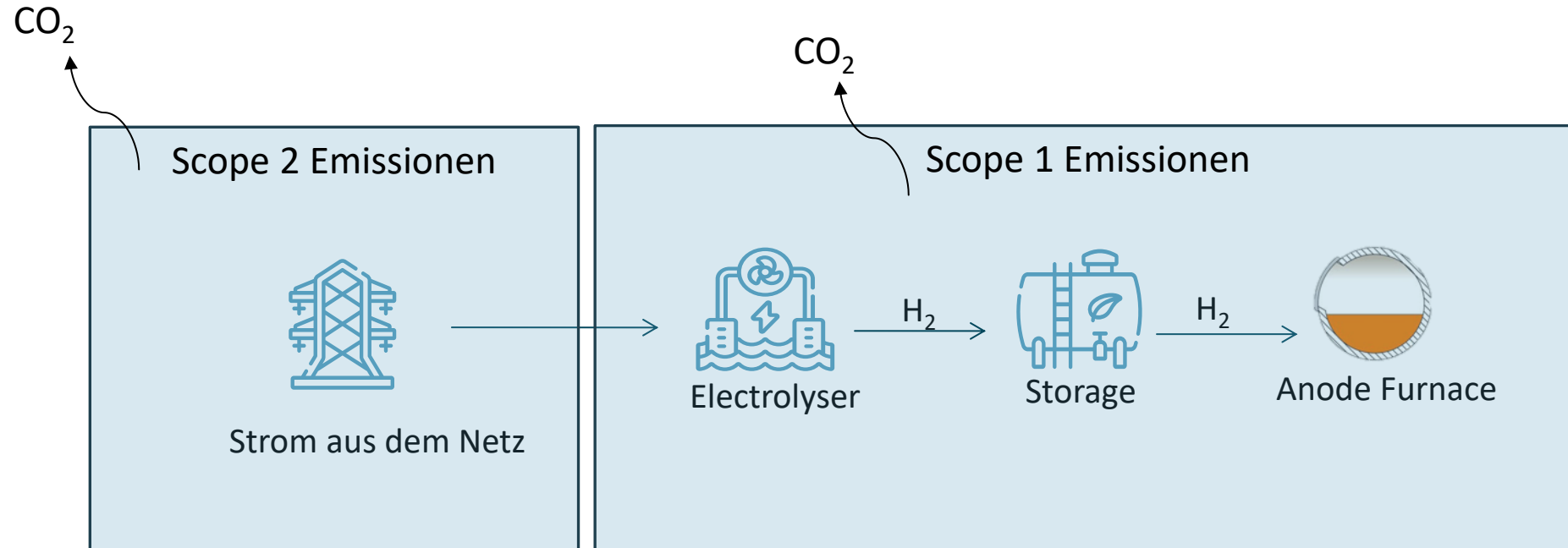
**NRL**

Norddeutsches  
RealLabor

---



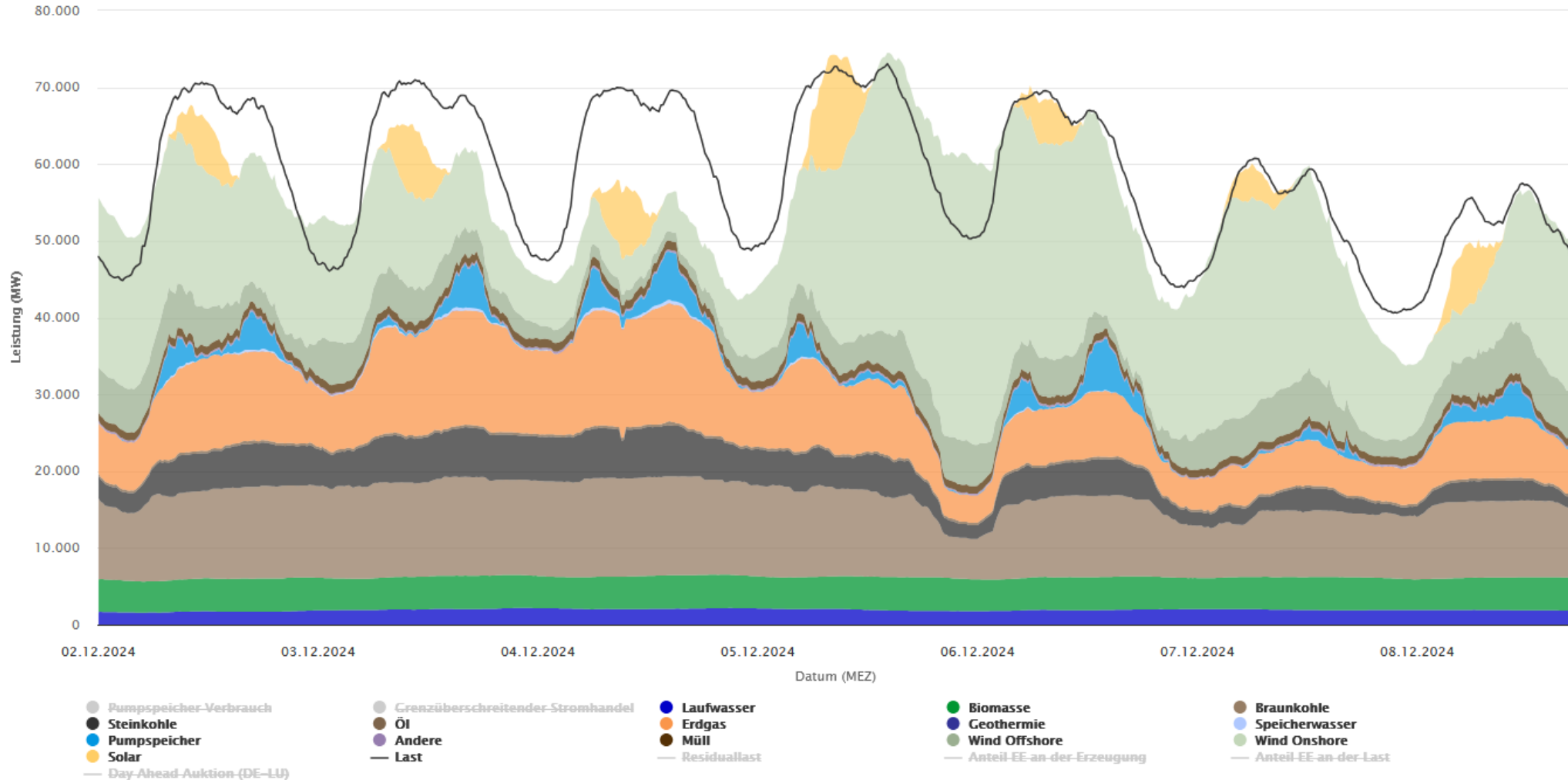
# CO<sub>2</sub>-Emissionen der Wasserstoffherzeugung



# Strom im Netz wird von diversen Kraftwerken bereitgestellt

## Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland in Woche 49 2024

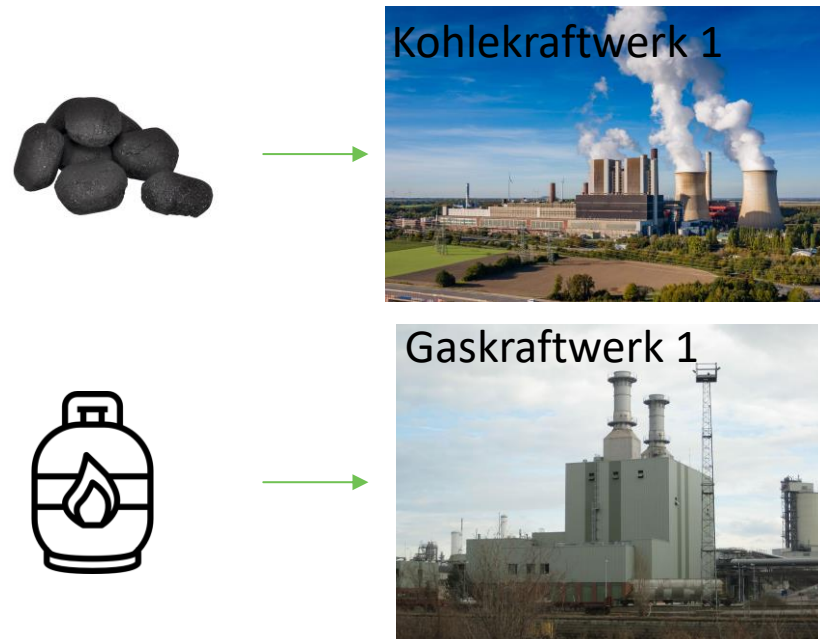
Energetisch korrigierte Werte



- Welche Daten brauchen wir zur Ermittlung von stündlichen Emissionsfaktoren?

- Stündliche Zusammensetzung des deutschen Strommix (Nettostromerzeugung und Daten zu Stromimporten und -exporten)
- Emissionsfaktoren für die verschiedenen Erzeugungsarten

} Stündliche Emissionsfaktoren  
[g CO<sub>2</sub>-Eq/kWh]



Ca. 1000 g CO<sub>2</sub>-Äq./kWh

Ca. 400 g CO<sub>2</sub>-Äq./kWh

Durchschnittliche  
CO<sub>2</sub>-Äq.  
Emissionen je kWh

Windkraftanlagen, Gaskraftwerk 2, Kohlekraftwerk i ...

# Stündliche CO<sub>2</sub>-Bilanzierung des Stromverbrauchs – Beispiel

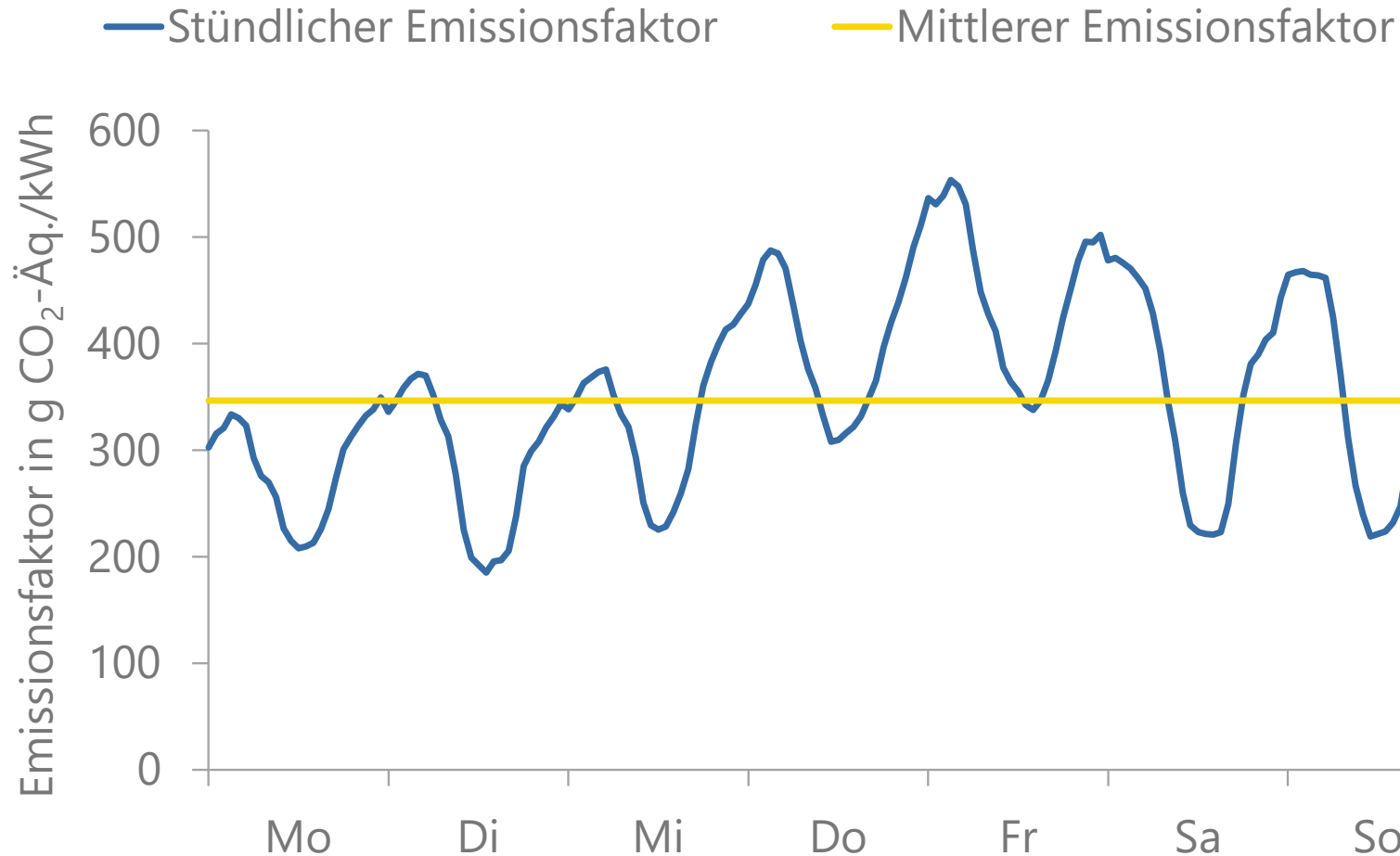
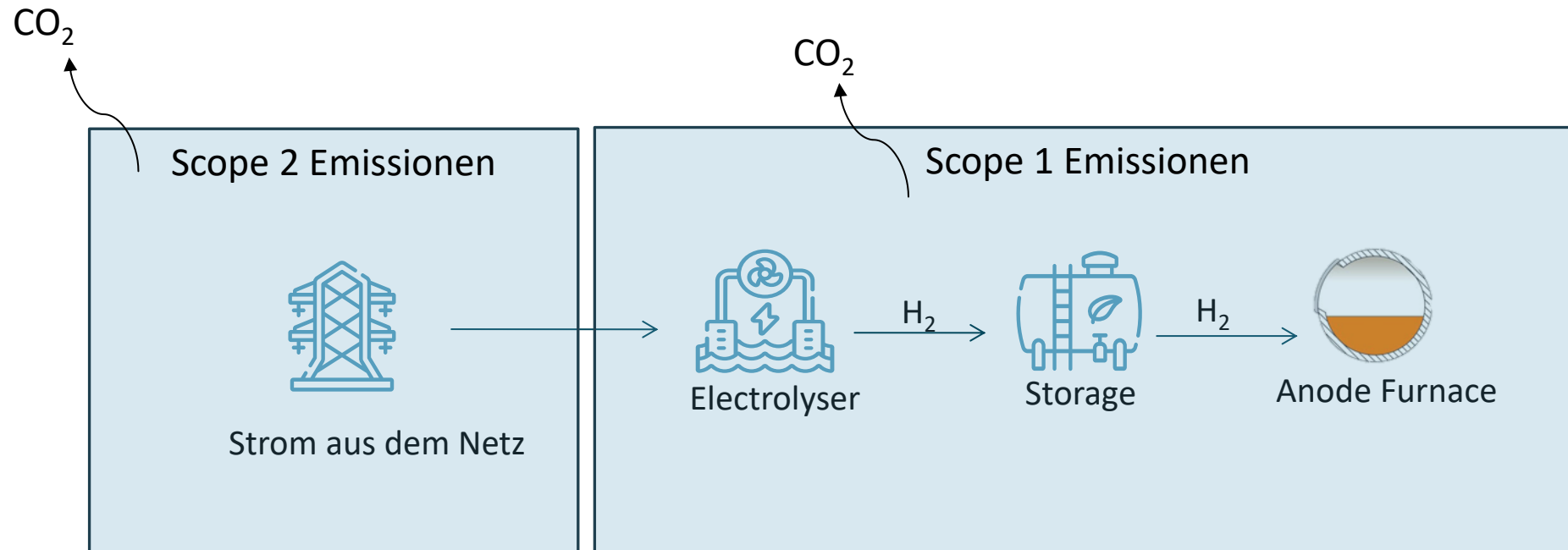


Abbildung: Unterschied zwischen stündlichen und mittleren Emissionsfaktoren am Beispiel einer Sommerwoche

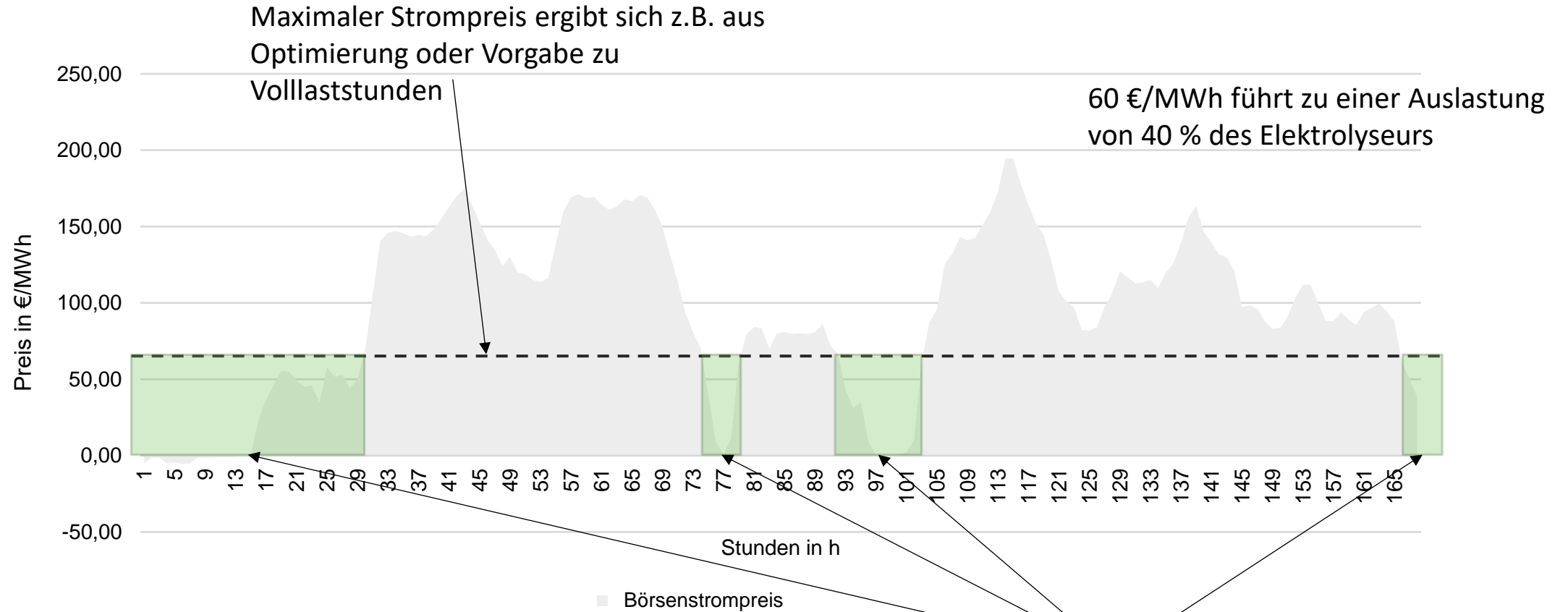
Quelle: CO<sub>2</sub>-Monitor (FfE und TenneT) „Anwendungen“, <https://co2-monitor.org/anwendungen>

# Berechnung CO<sub>2</sub>-Emissionen der Wasserstoffherzeugung

- Betrieb des Elektrolyseurs nur zu Zeiten sehr günstiger Strompreise
- Kein Betrieb des Elektrolyseurs zu Zeiten sehr hoher Strompreise
- Wirkungsgrad Elektrolyseur: 65 %

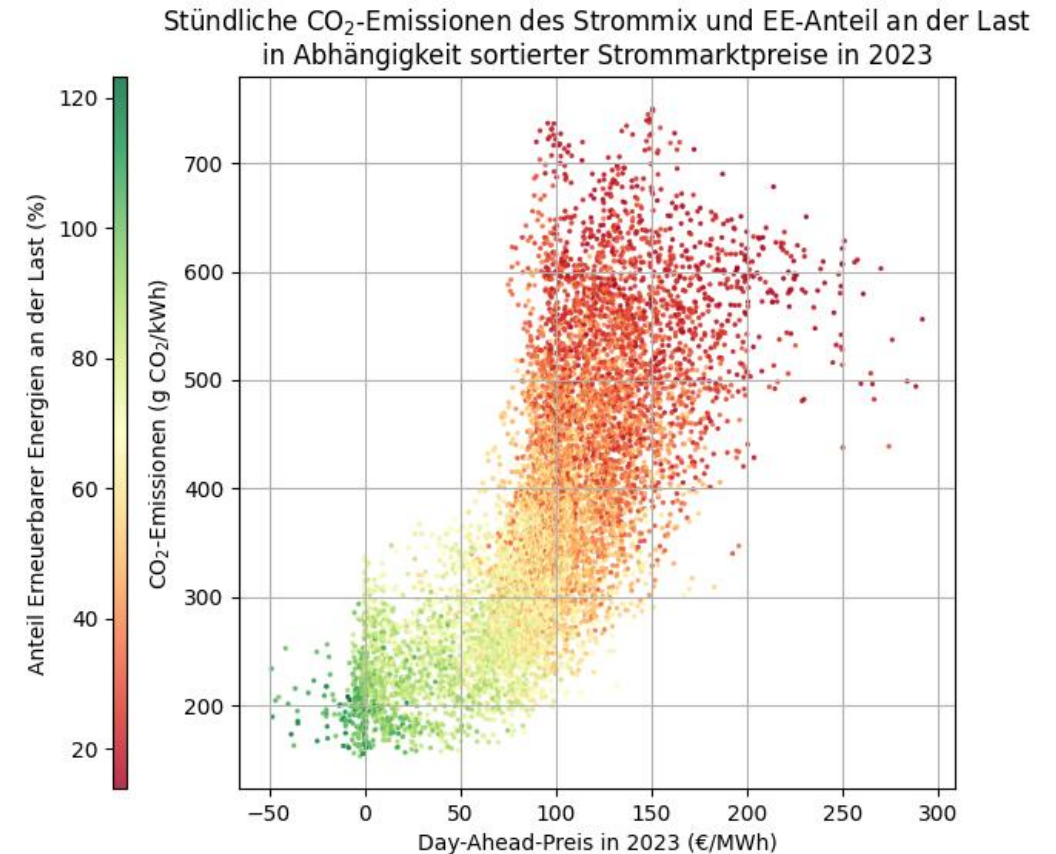


# Annahmen zur Berechnung CO<sub>2</sub>-Emissionen

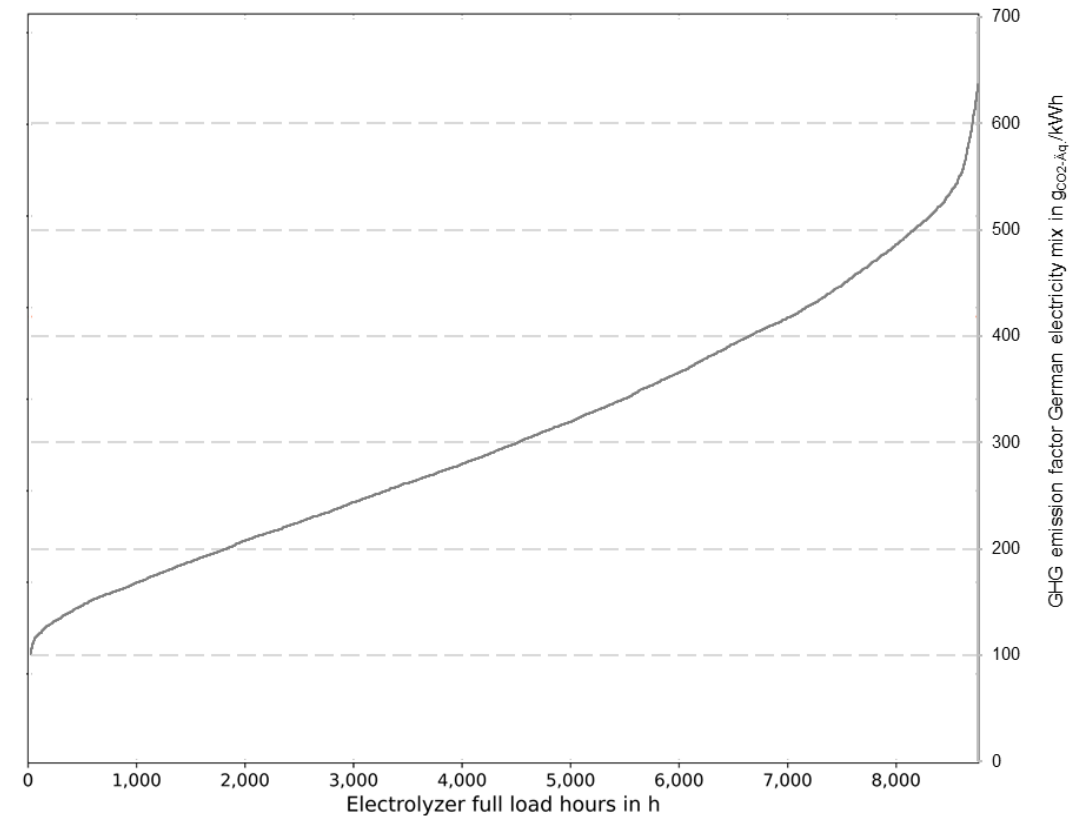


Elektrolyseur wird zu den grün markierten Zeiten betrieben

- CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren des deutschen Strommix in Abhängigkeit der Börsenstrompreise
- Niedrige CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren in Zeiten günstiger Strompreise (hoher Anteil Erneuerbarer Energien)
- Hohe CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren in Zeiten hoher Strompreise (niedriger Anteil Erneuerbarer Energien)
  
- Wirtschaftliches Handeln und Klimaschutz gehen Hand in Hand!

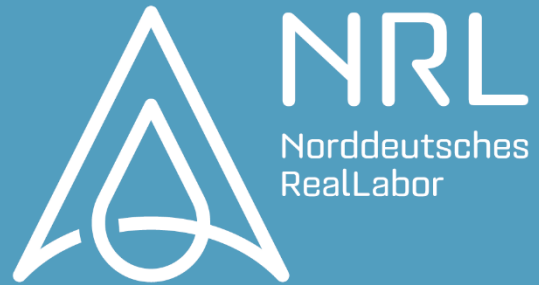


- CO<sub>2</sub>-Emissionen über Volllaststunden H<sub>2</sub>-Erzeugung
  - Vergleichsweise geringe CO<sub>2</sub>-Emissionen bei niedrigen Volllaststunden
- Vorgaben der EU (Delegated Act (DA) 2023/1185 ) für “grünen Wasserstoff”
  - THG-Minderung >70% im Vergleich zu fossilen Brennstoffen (94 g CO<sub>2</sub>-Äq./MJ) → max. 3,39 kg CO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub> für grünen Wasserstoff
- Erdgas verursacht Emissionen von 202 g CO<sub>2</sub>/kWh (=558 g CO<sub>2</sub>/MJ)





- Kupferherstellung ist angewiesen auf ein Reduktionsmittel.
  - Beim Einsatz von Erdgas als Reduktionsmittel entsteht dadurch CO<sub>2</sub>, das zur Senkung der CO<sub>2</sub> Emissionen abgeschieden werden muss.
  - Wasserstoff kann als Reduktionsmittel eingesetzt werden (stofflicher Einsatz!).
- Lokale Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien ist nicht ausreichend, um den gesamten Wasserstoffbedarf des Anodenofens bereitzustellen.
- Eine Wasserstoffherzeugung mittel Strom aus dem Netz verringert die Gestehungskosten, jedoch bleibt der Einsatz von Erdgas günstiger.
- Der Einsatz von Netzstrom führt weiterhin zu deutlichen CO<sub>2</sub> Emissionen der Wasserstoffproduktion.
- Ein Betrieb des Elektrolyseurs in Stunden niedriger Strompreise führt zu niedrigen CO<sub>2</sub> Emissionen (super!).
- Die CO<sub>2</sub> Emissionen der Stromerzeugung werden mit dem Ausbau erneuerbarer Energien weiter sinken.



**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**