



HVG-DGG

Service und Forschung für die Glasherstellung

Defossilization of Industrial Glass Production via Carbon Capture and Utilization of Flue Gas

Techno-Economic and Ecological Evaluation of a Carbon Cycle Process Based on Synthetic Methane

Ferdinand Drünert¹, Yoga Rahmat², Bernhard Fleischmann¹,
and Ralph-Uwe Dietrich²

¹Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie (HVG) e.V., Germany

²German Aerospace Center (DLR), Institute of Engineering Thermodynamics, Stuttgart, Germany

*Correspondence: Ferdinand Drünert, druenert@hvg-dgg.de

Abstract. The glass industry faces significant challenges in achieving carbon neutrality due to its reliance on fossil fuels and process-related CO₂ emissions from raw material decomposition. While most defossilization efforts focus on CO₂-neutral heating, batch-related emissions remain largely unaddressed. This study investigates a closed carbon cycle approach for glass manufacturing by integrating carbon capture and utilization (CCU) with power-to-gas technologies. The proposed process captures both combustion- and batch-related CO₂ emissions and converts them into synthetic natural gas using renewable hydrogen. The techno-economic model, based on a typical oxy-fuel container glass furnace (300 t per day) and current (2022) German market conditions, covers all key process steps: flue gas cleaning, CO₂ separation, hydrogen production via electrolysis, and methanation. Results show that more than 99 % of scope 1 emissions and about 62% of scope 1+2 emissions can be abated. However, the process is associated with high energy demand and costs, with energy supply alone amounting to €559 (2022) per metric ton glass at an electricity price of €60 per MWh. The cost of CO₂ abatement is estimated at €1132 (2022) per metric ton. While all process steps are based on established industrial technologies, the overall economic viability remains highly sensitive to electricity prices and further technological improvements. The approach is especially relevant for high-quality glass production with low cullet content and in regions with abundant renewable electricity.

Keywords: CO₂-Neutral Glass, Carbon Capture and Storage/Utilization, Techno-Economic Assessment

Glas-CO₂ Machbarkeitsstudie einer CCU-Anwendung am Beispiel Glasschmelzwannenofen

Die wichtigsten Ergebnisse

vorgestellt von Dipl.-Ing. Bernhard Fleischmann

Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie (HVG) e.V.,
Offenbach am Main

CO₂ QUELLEN (SCOPE 1 EMISSIONEN)

... bei der Glasherstellung... in D



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt
German Aerospace Center

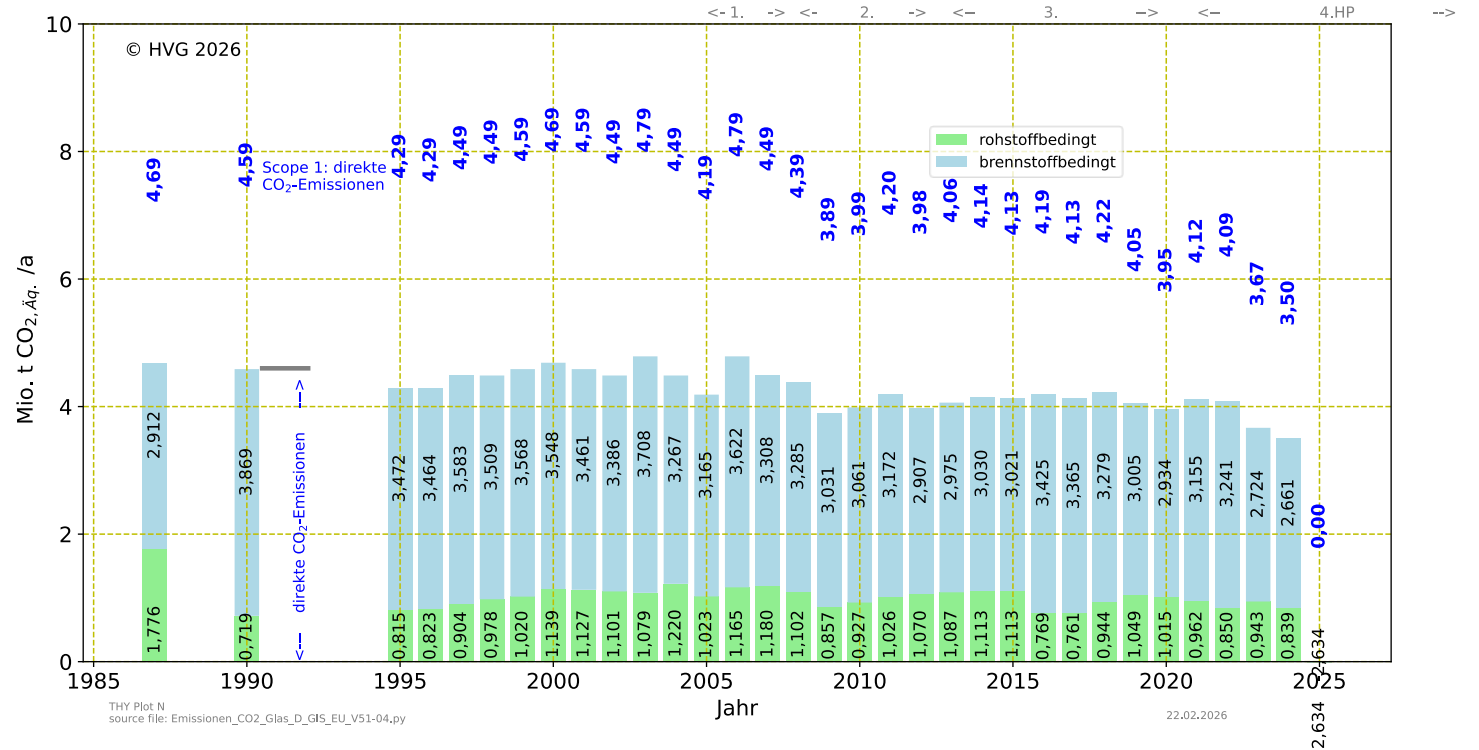
Process heat (CH₄)

75 bis 80 % der
CO₂-Emissionen

20 bis 25 % der
CO₂-Emissionen

Batch decomposition (XCO₃)

Quellen der direkten CO₂,Äq. -Emissionen



HVG-DGG
Service und Forschung für die Glasherstellung

CO₂ QUELLEN (SCOPE 1 EMISSIONEN)

... bei der Glasherstellung... in D



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt
German Aerospace Center

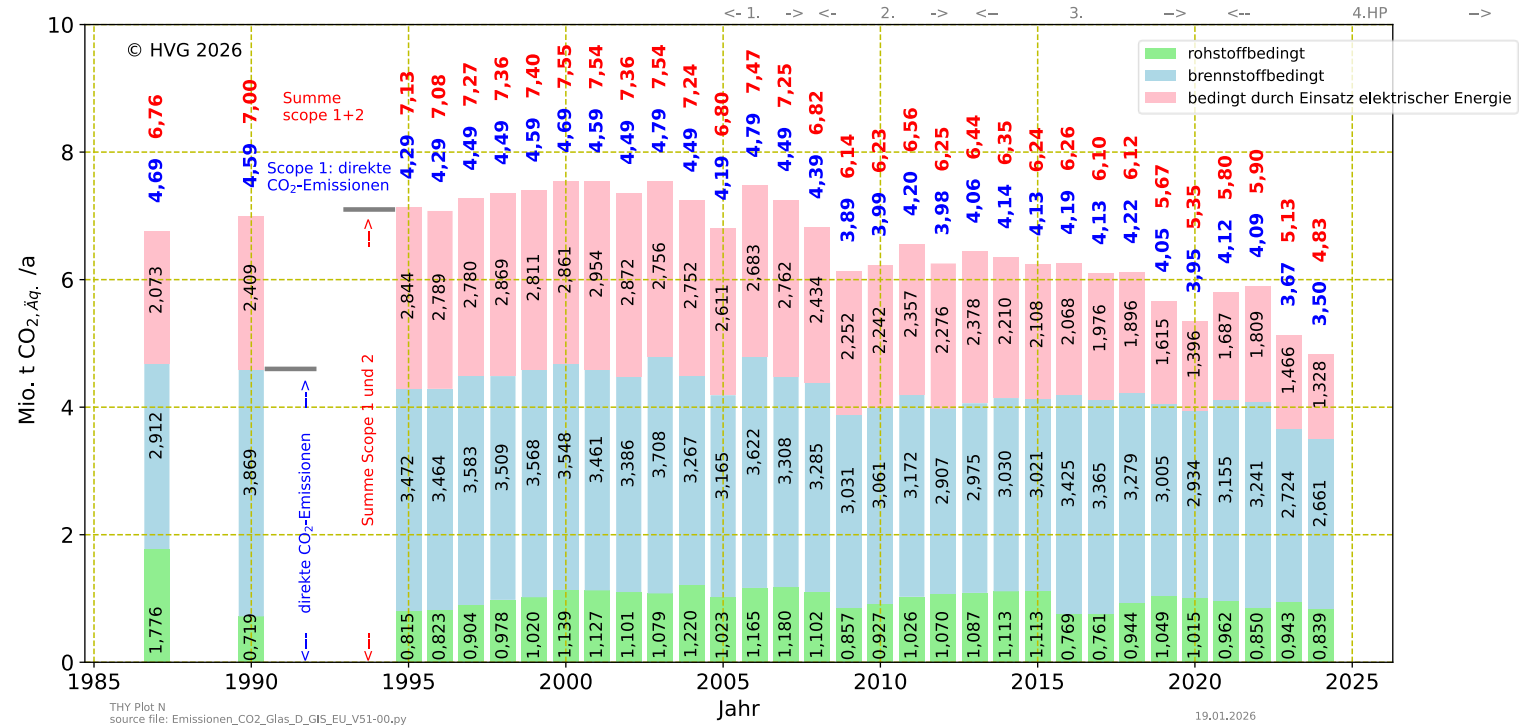
Process heat (CH₄)

75 bis 80 % der
CO₂-Emissionen

20 bis 25 % der
CO₂-Emissionen

Batch decomposition (XCO₃)

Quellen der direkten CO₂,Äq. -Emissionen



HVG-DGG
Service und Forschung für die Glasherstellung

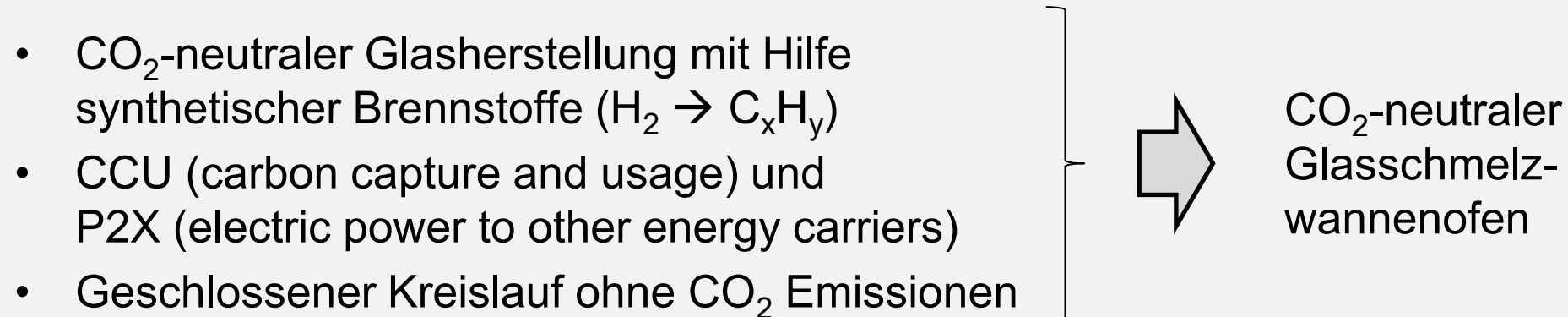
Machbarkeitsstudie:

- Technology Readiness Level der einzelnen Prozessschritte
- Effizienz, Wartung, Betriebsverhalten
- Technologien, geeignet und integrierbar in den Glasherstellungsprozess (Staub, Abgaskomponenten, ...)
- Heutige Kosten – Kostenentwicklung



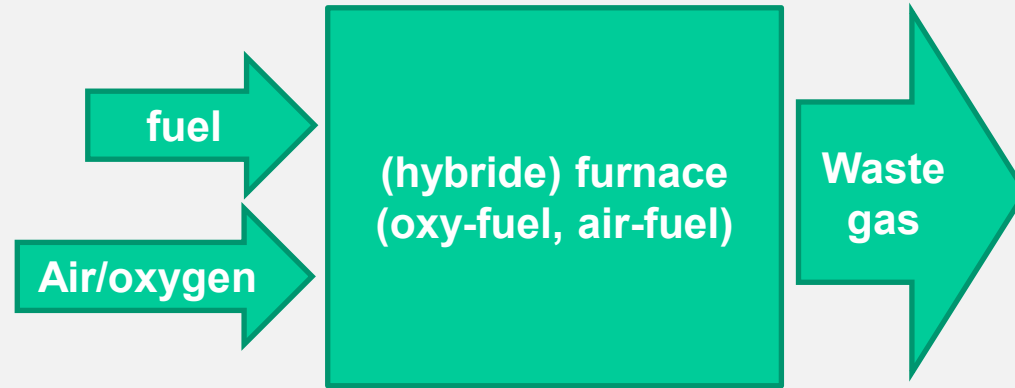
2019: eine scherzhaft gemachte Bemerkung entwickelt Eigenleben und wächst:

Kompensation der nur gering vorhandenen Flexibilität bei der Glasschmelze durch

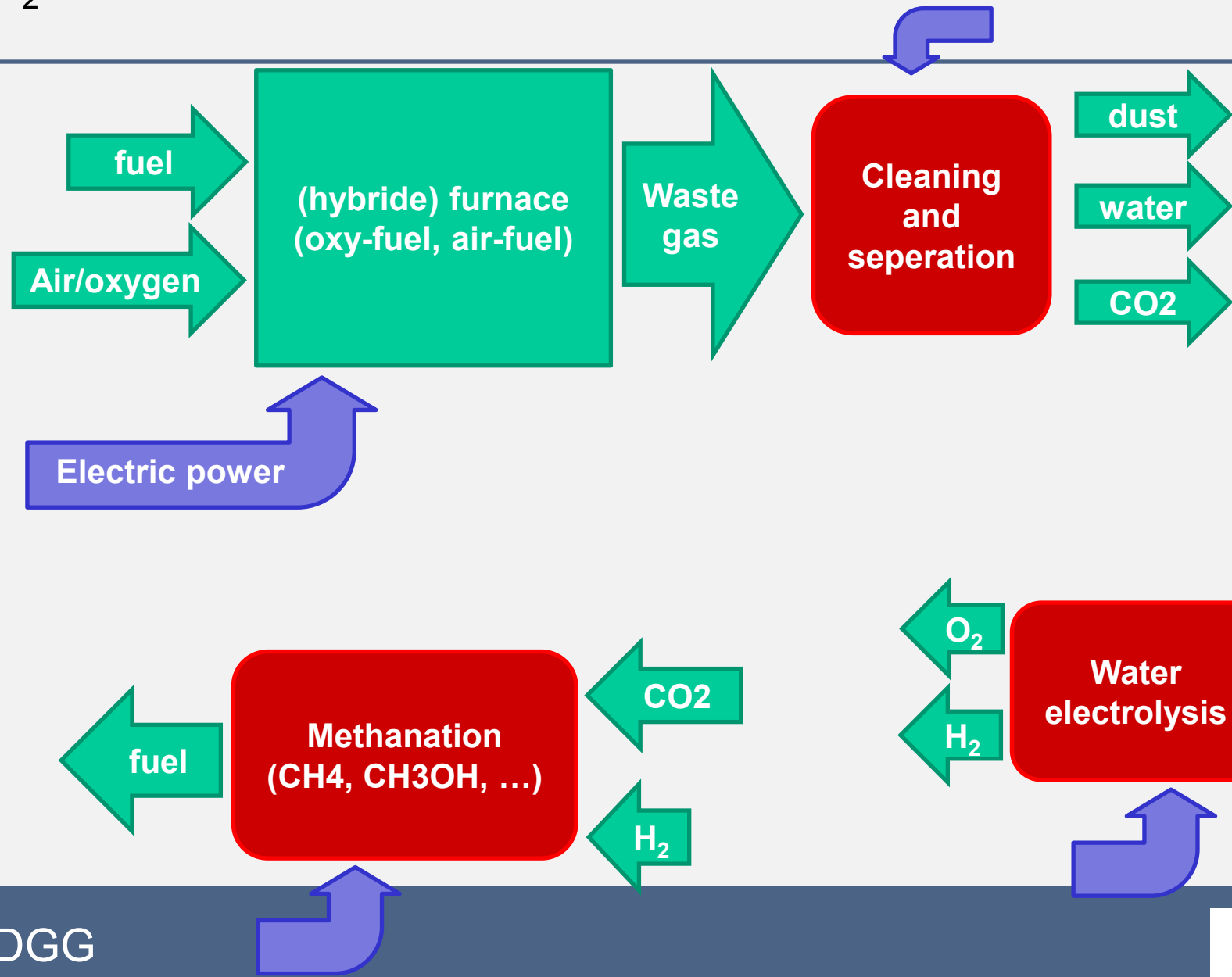
- CO₂-neutraler Glasherstellung mit Hilfe synthetischer Brennstoffe ($H_2 \rightarrow C_xH_y$)
 - CCU (carbon capture and usage) und P2X (electric power to other energy carriers)
 - Geschlossener Kreislauf ohne CO₂ Emissionen
- 
- CO₂-neutraler Glasschmelz-wannenofen
- den **CO₂-Kreislauf** mit Hilfe elektrischer Energie ermöglichen
 - Massespeicher und Energiespeicher planen, auslegen
 - Kosten“günstigste“ Lösung suchen
Stromkosten, Speichergröße, Auslegung der Einzelschritte...



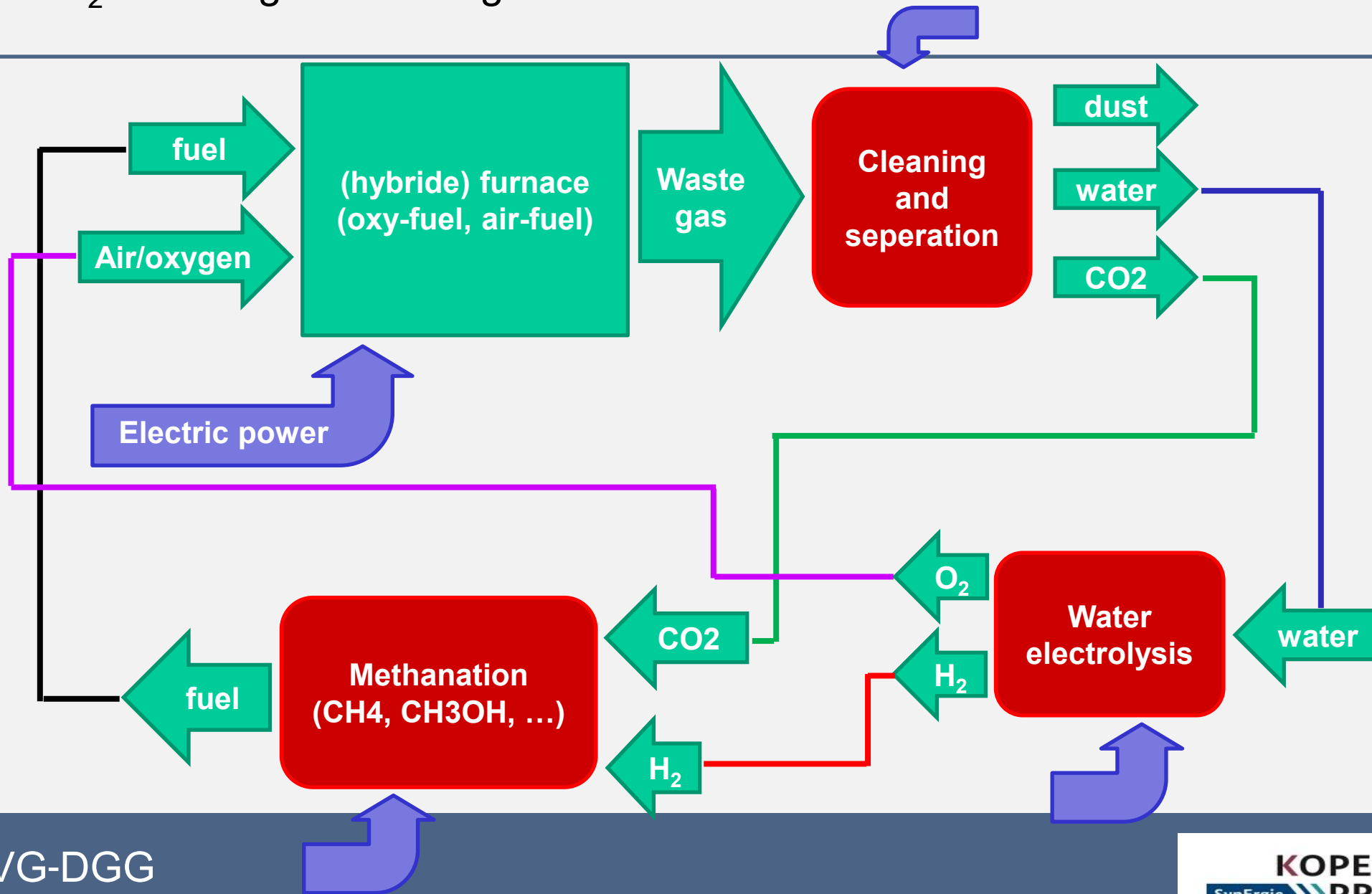
CO₂-neutrale Glasschmelze



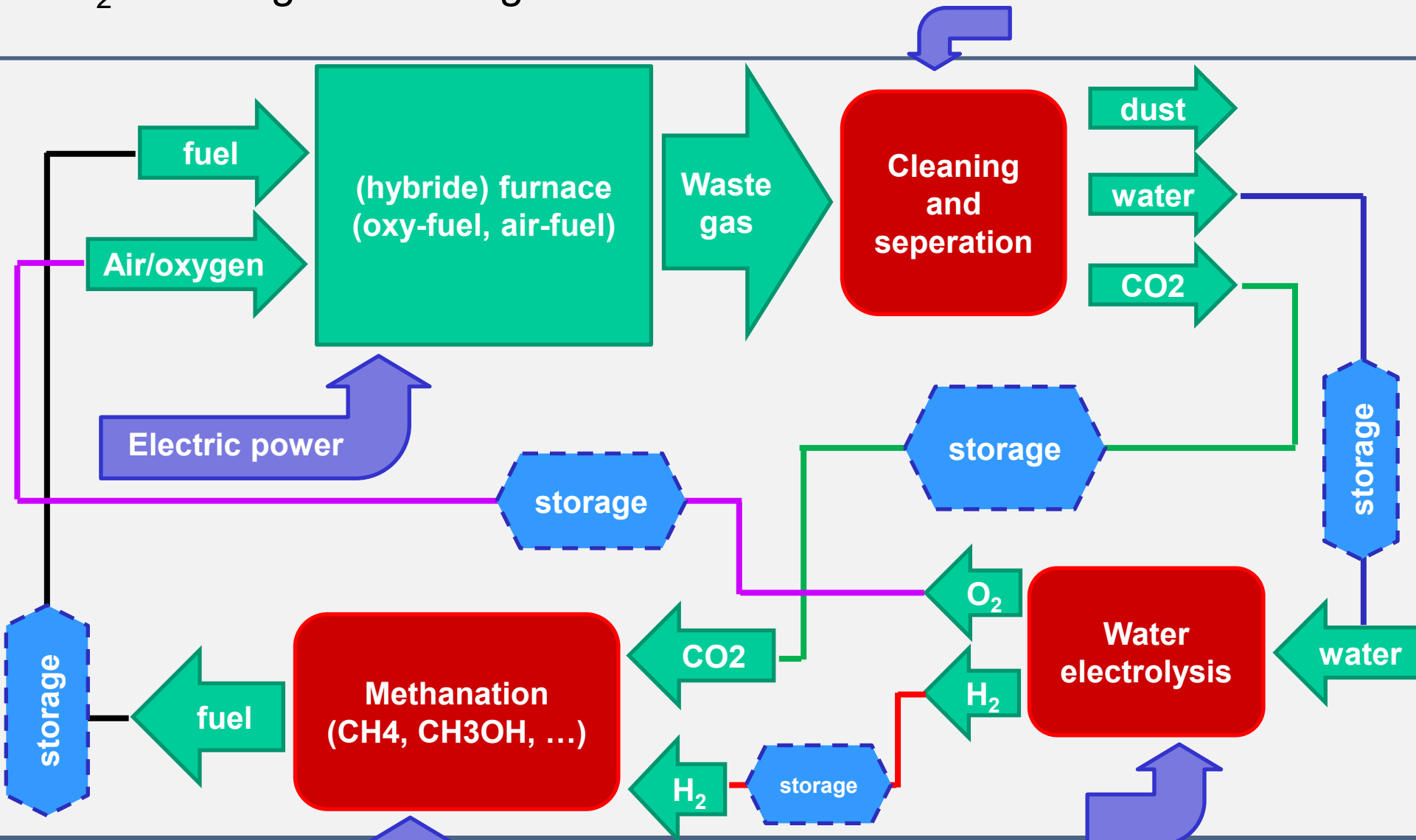
CO₂-neutrale Glasschmelze



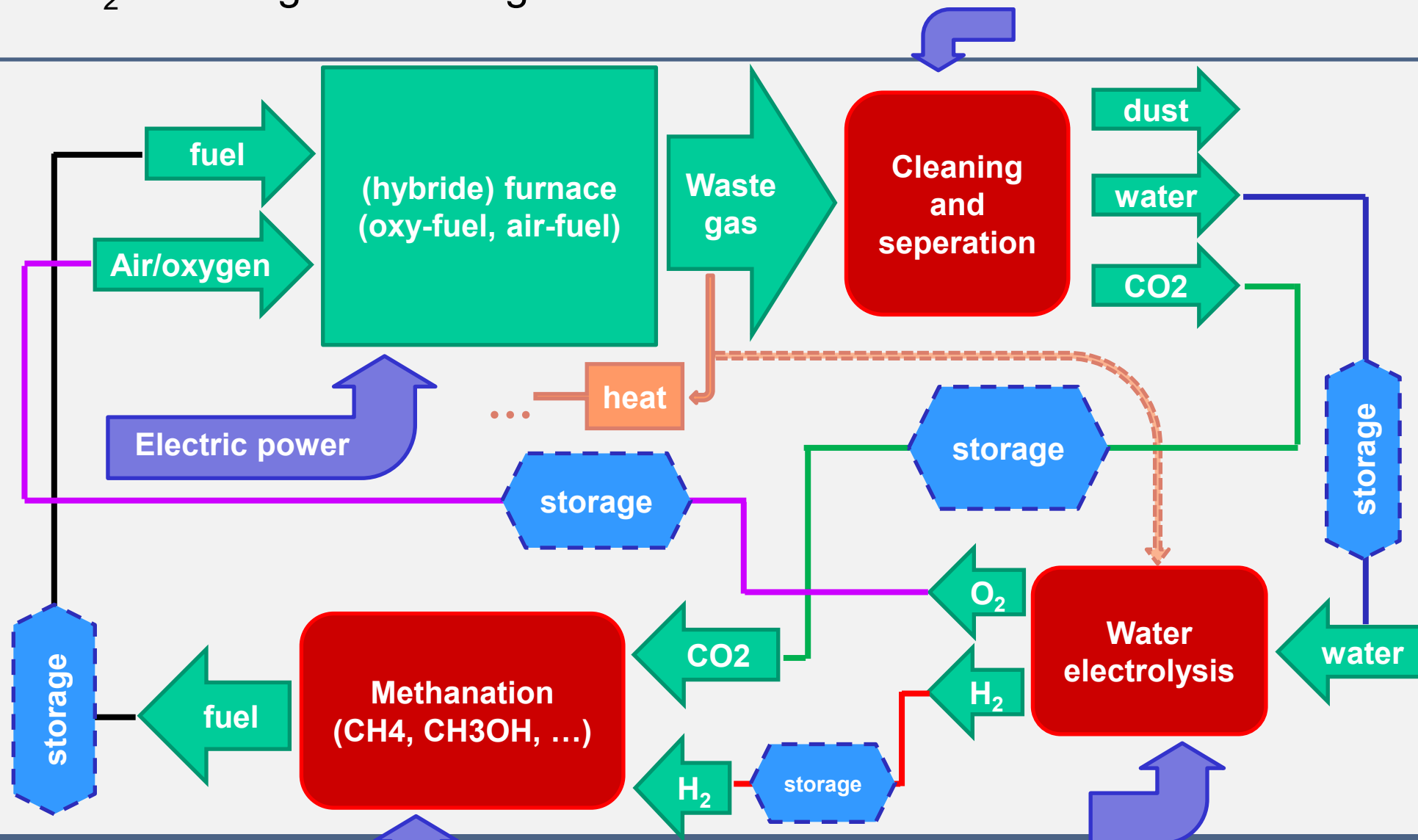
CO₂-neutral glass melting



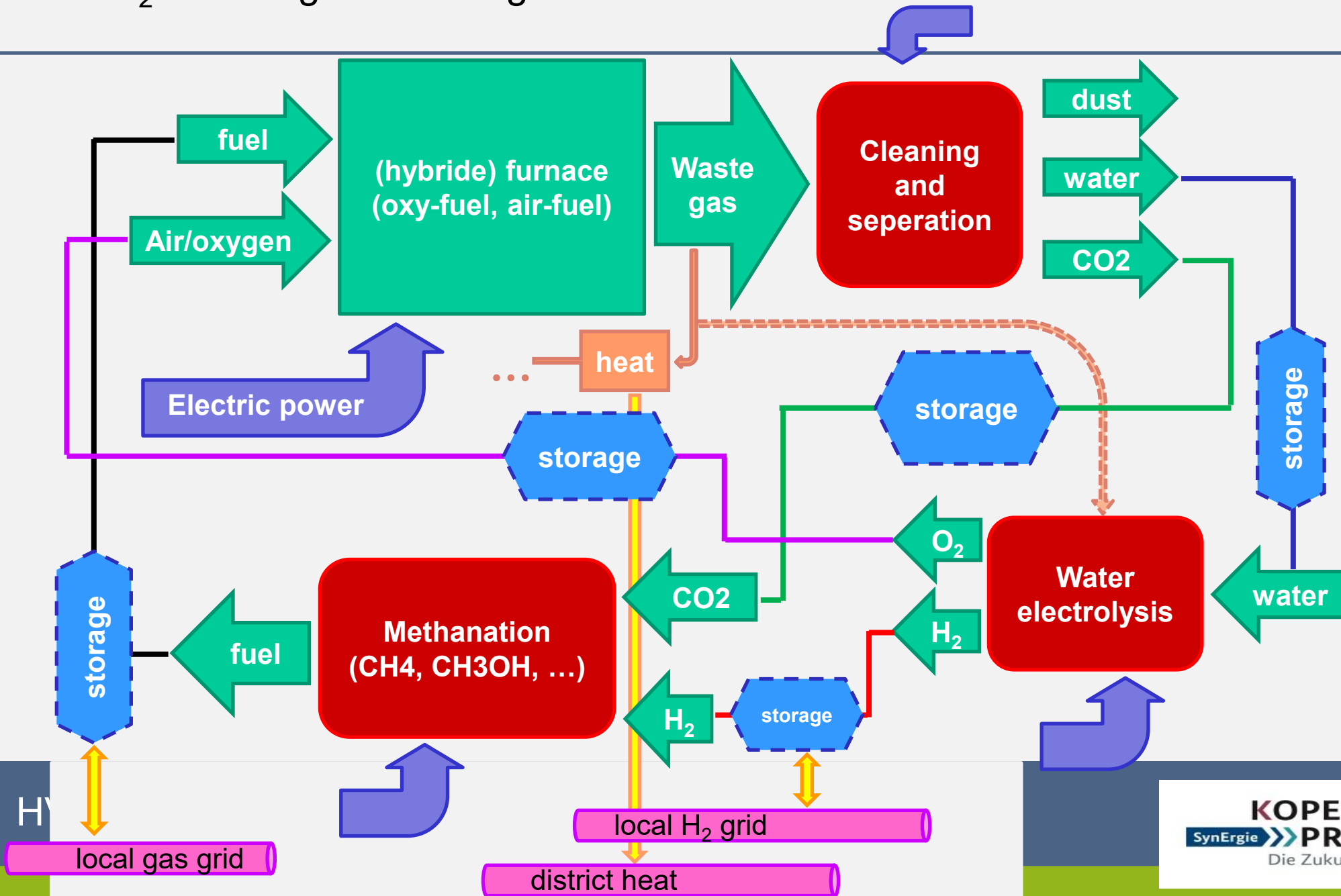
CO₂-neutral glass melting



CO₂-neutral glass melting



CO₂-neutral glass melting



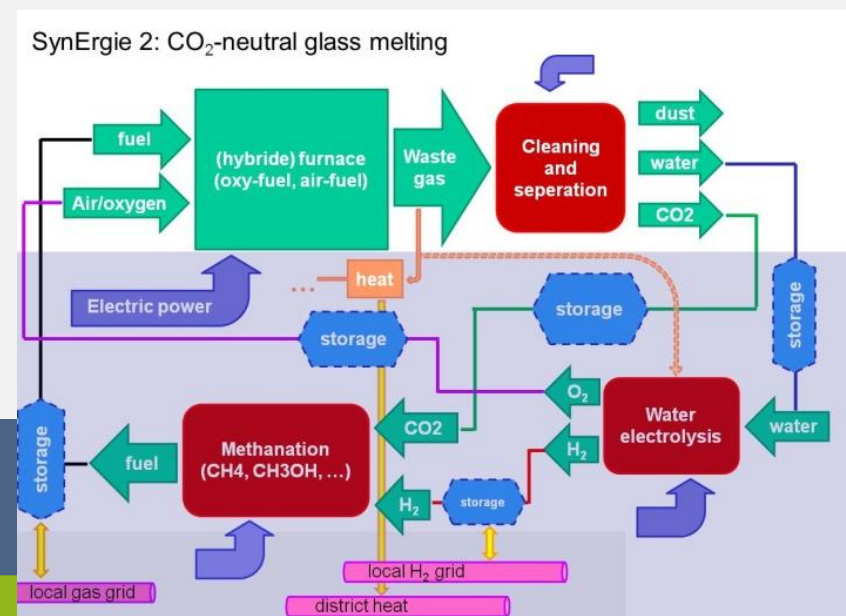
H₂

local gas grid

local H₂ grid

district heat

- **Kommentar aus der Glasindustrie: „Wir wollen Glas schmelzen und keinen Chemiepark betreiben“**
 - **Hochtemperaturofen: bekannte Technologie, ausgereift, energetisch optimiert**
 - Unabhängig von Brennstoffen (erzeugt selbst genug)
 - Kein CO₂ verläßt den Kreislauf; sogar das Prozess-CO₂ aus dem Gemenge wird aufgefangen
 - Kosten sind vorhersehbar und Zeiten von preiswerter elektrischer Energie können genutzt werden
 - Benötigt „nur“ erneuerbare elektrische Energie
 - Sauerstoff aus der Elektrolyse als BeiProdukt
 - Kein Zugang zu öffentlichen (Energieträger-)Netzen ist nötig
 - ... sie stören aber auch nicht
 - Externer Dienstleister kann alle zusätzlichen Anlagen(teile) betreiben

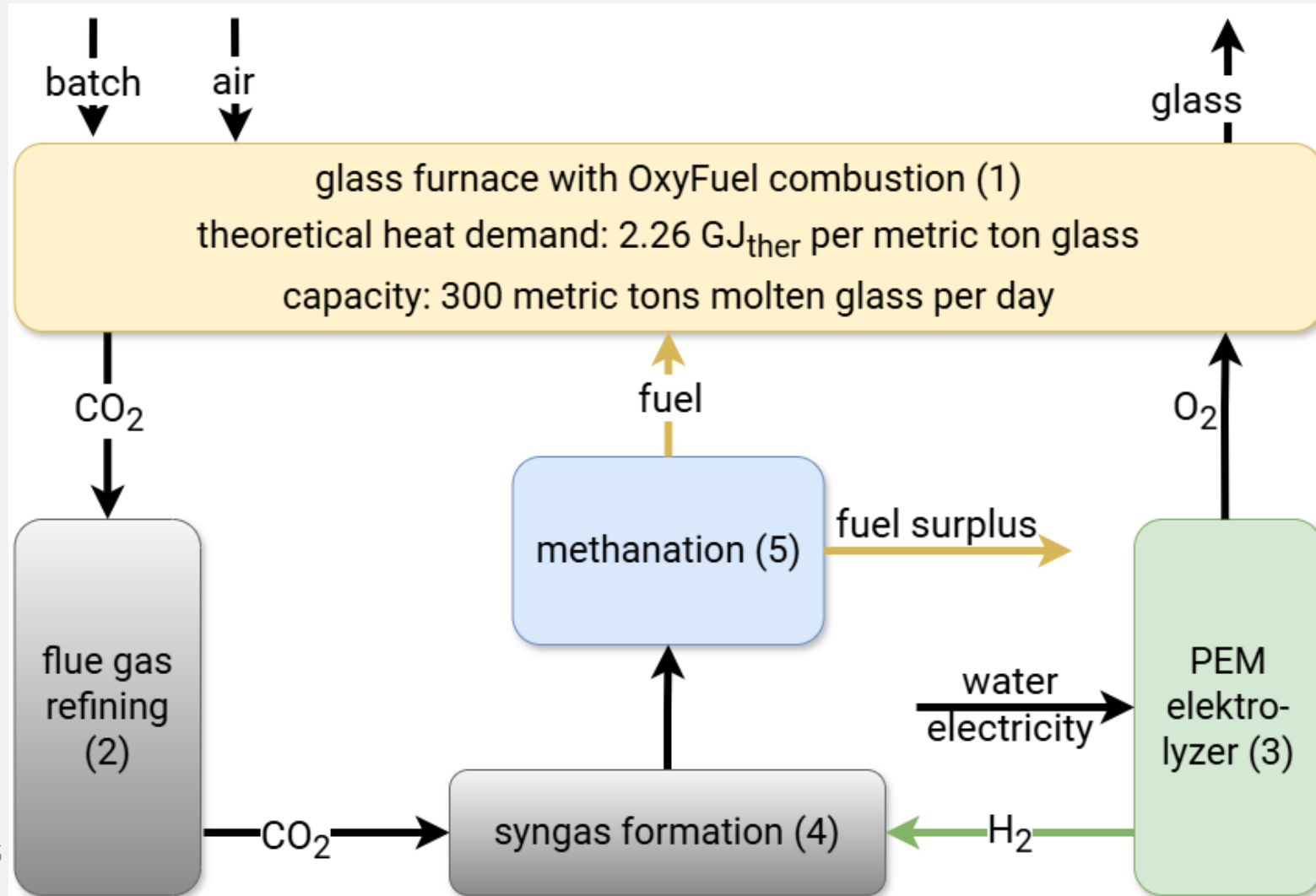


CCUS + P2X

KlimPro Industrie: Glas-CO2



GEFÖRDERT VOM



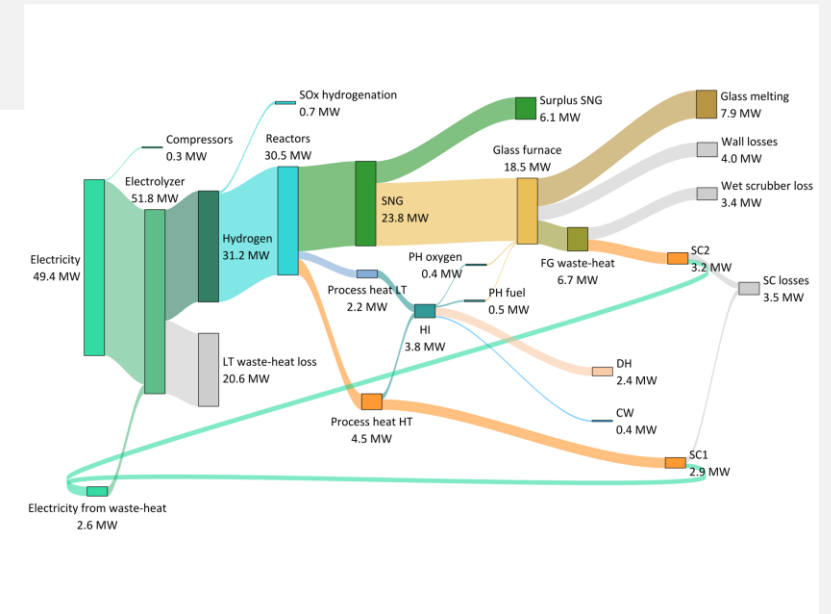
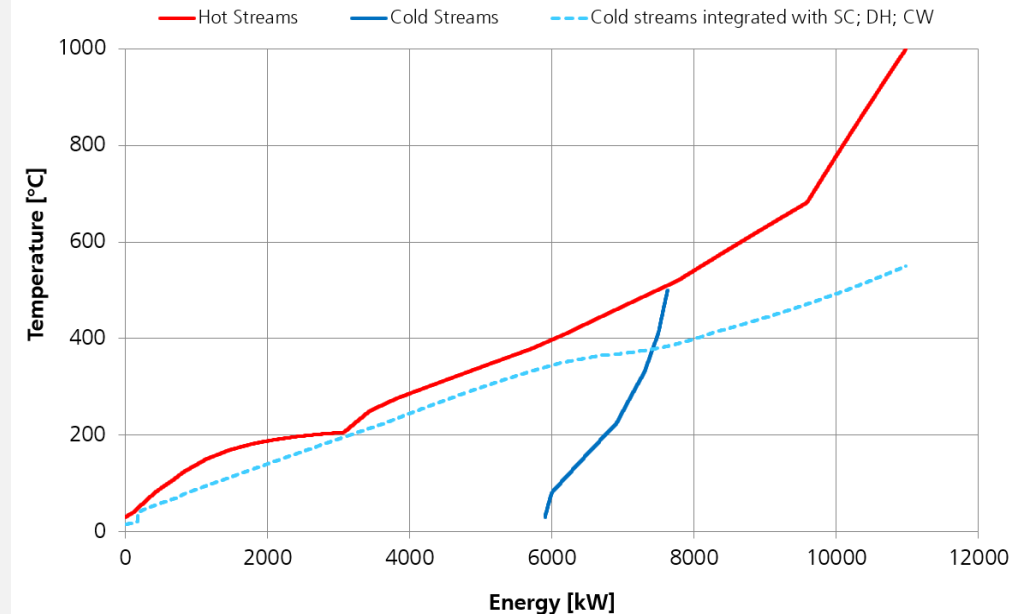
MACHBARKEITSSTUDIE



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt
German Aerospace Center

- HVG, Offenbach am Main
Glaswanne/Glas/Abgas ← Pythonprogrammierung
- DLR (Energiesystemintegration), Stuttgart
techno-ökonomische Betrachtung ← Aspen, TEPET+

- Werkzeuge wie
 - Pinch Analyse
 - Sankey Diagram
 - ...



HVG-DGG
Service und Forschung für die Glasherstellung

KEY PARAMETERS



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt
German Aerospace Center

| | |
|--|---|
| Plant location | Germany |
| Secondary product (surplus) | Methane |
| Reference year | 2022 |
| CEPCI chemical engineering plant cost index (2022) | 816 |
| Currency | € |
| Full load hours (FLh) | 8760 h a-1 |
| Plant lifetime | 15 a |
| Interest rate | 7 % |
| Labor cost | €45.1 h-1 |
| Nominal labor index (2022) | 113 |
| Assumed natural gas price (HHV / LHV; for reference) | 125.72 / €138.29 MWh-1 |
| long-term electricity price | €60 per MWh _{el} (2022) for Germany |
| renewable electricity mix, projected for 2030 | 37.6 % onshore wind, 23.9 % off-shore wind, 32.5 % photovoltaics, 2.4 % hydropower, 3.6 % bioenergy) |
| water disposal costs | €1.31 per cubic meter |



HVG-DGG
Service und Forschung für die Glasherstellung

GLASSCHMELZWANNENOFEN (1)



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt
German Aerospace Center

Furnace capacity

Combustion type

Residual oxygen in flue gas (λ value)

Leak air rate

Glass type

Cullet rate

Efficiency loss per year (ag)

Fuel requirement (HHV) of the

Fuel requirement (LHV) of the

Electric boosting

Fuel / oxidizer heat-up

Wall losses (new / average / af

Efficiency (heat-to-melt, n. / av.

Flue gas heat loss (n. / av. / 15y)

Quenching th. power (water quenching, 1450°C to 1000°C)

Assumed heat exchanger power (1000°C to 200°C)

300 t molten glass per day

Oxy-Fuel combustion

1 % ($\lambda = 1.02$)

1.5 % of the flue gas

Amber container glass

50 %

1%

4.64 / 4.98 / 5.39 GJ t-1glass

4.18 / 4.48 / 4.85 GJ t-1glass

Not considered

5.1 % of total heat input

0.88 / 1.15 / 1.44 GJ t-1glass

46 % / 43 % / 40 %

1.74 / 1.86 / 1.98 GJ t-1glass

1.6 / 1.7 / 1.8 MWth

3.0 / 3.2 / 3.4 MWth

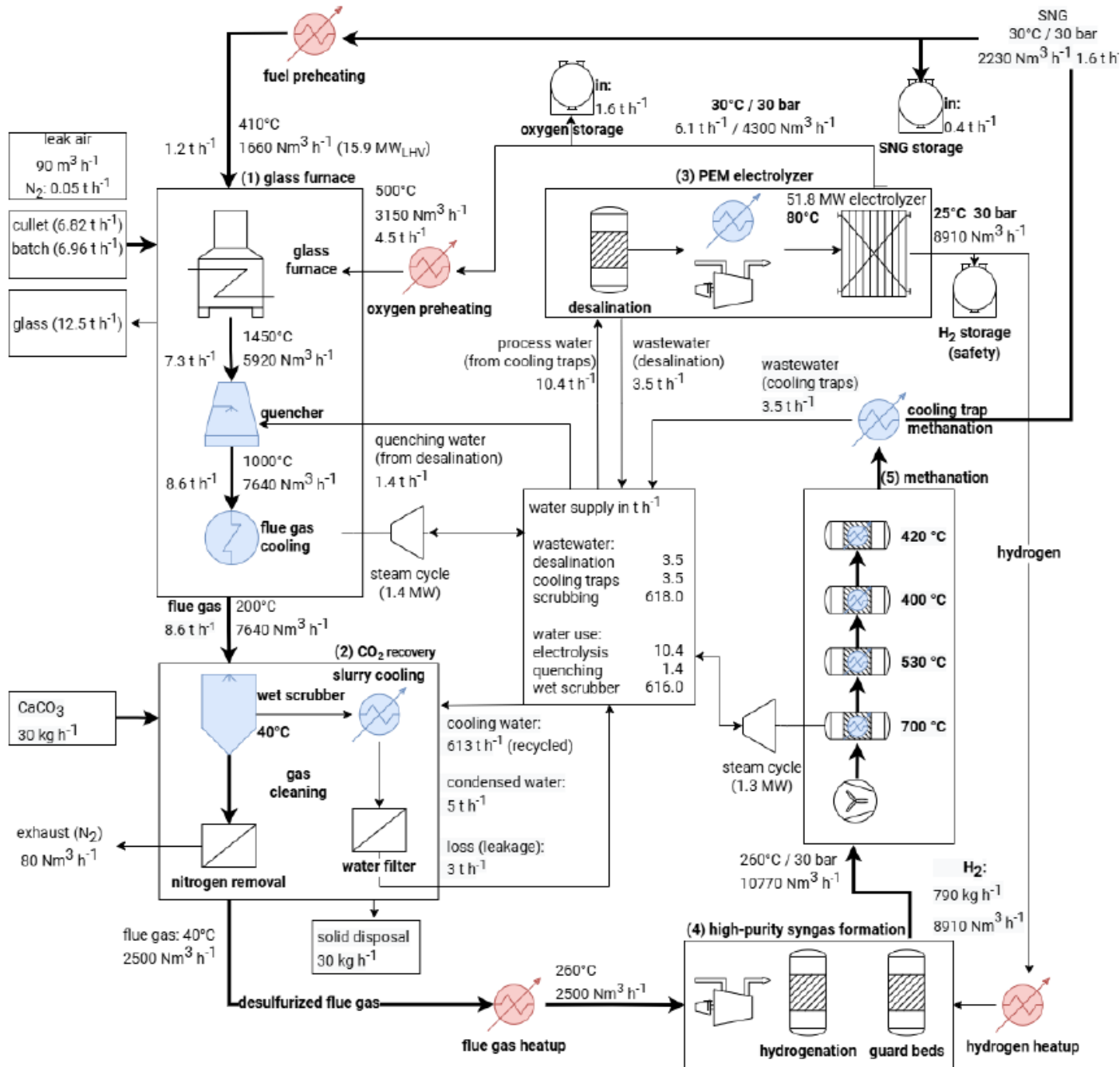
| | Flue gas (1) |
|------------------|--------------------------|
| CO ₂ | 37 %vol |
| H ₂ O | 61 %vol |
| N ₂ | 1.3 %vol |
| O ₂ | 1.0 %vol |
| SO ₂ | 2300 mg Nm ⁻³ |
| NO _x | 660 mg Nm ⁻³ |
| HCl | 150 mg Nm ⁻³ |
| CO | 150 mg Nm ⁻³ |
| HF | 130 mg Nm ⁻³ |
| dust | 550 mg Nm ⁻³ |



HVG-DGG
Service und Forschung für die Glasherstellung



PROZESS- FLUSSDIAGRAMM

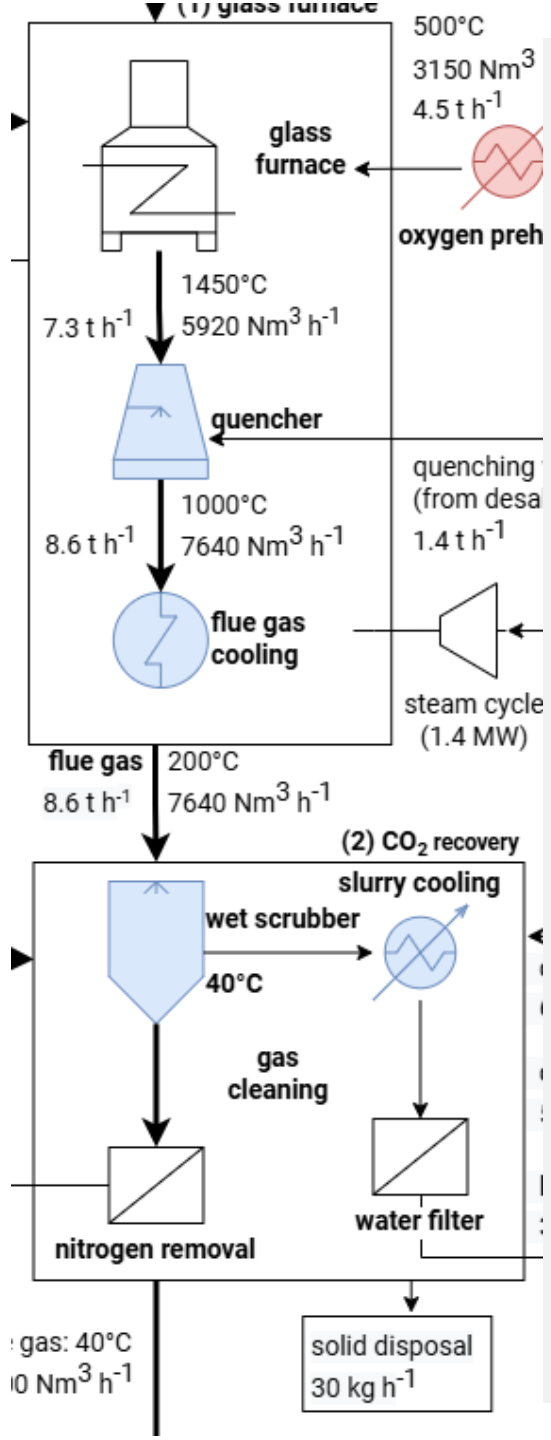


ABGAS-AUFREINIGUNG (2.1)

CO₂ recovery from flue gas

- Brennstoffsynthese benötigt hochreine Ausgangsmaterialien, d.h., eine effective Abgasreinigung/-aufbereitung, ist wichtig für eine Verminderung der Schadstoffe und Verunreinigungen bis in den ppb-Bereich.
- Dies ist Voraussetzung, um den Ni-basierten Katalysator, der bei der Syngas-Herstellung zum Einsatz kommt, zu schützen.
- Dies trifft im besonderen auch für Schwefel, Halogene und Staub zu, die alle potentiell zur Deaktivierung des Katalysator führen können
- Stickstoff und Sauerstoff dagegen sind unproblematisch bezüglich Deaktivierung, vermindern aber die Effizienz der Synthese deutlich.

(Quenchen – Abgas-Kondensation –)
Naßabscheider – Stickstoffabscheidung



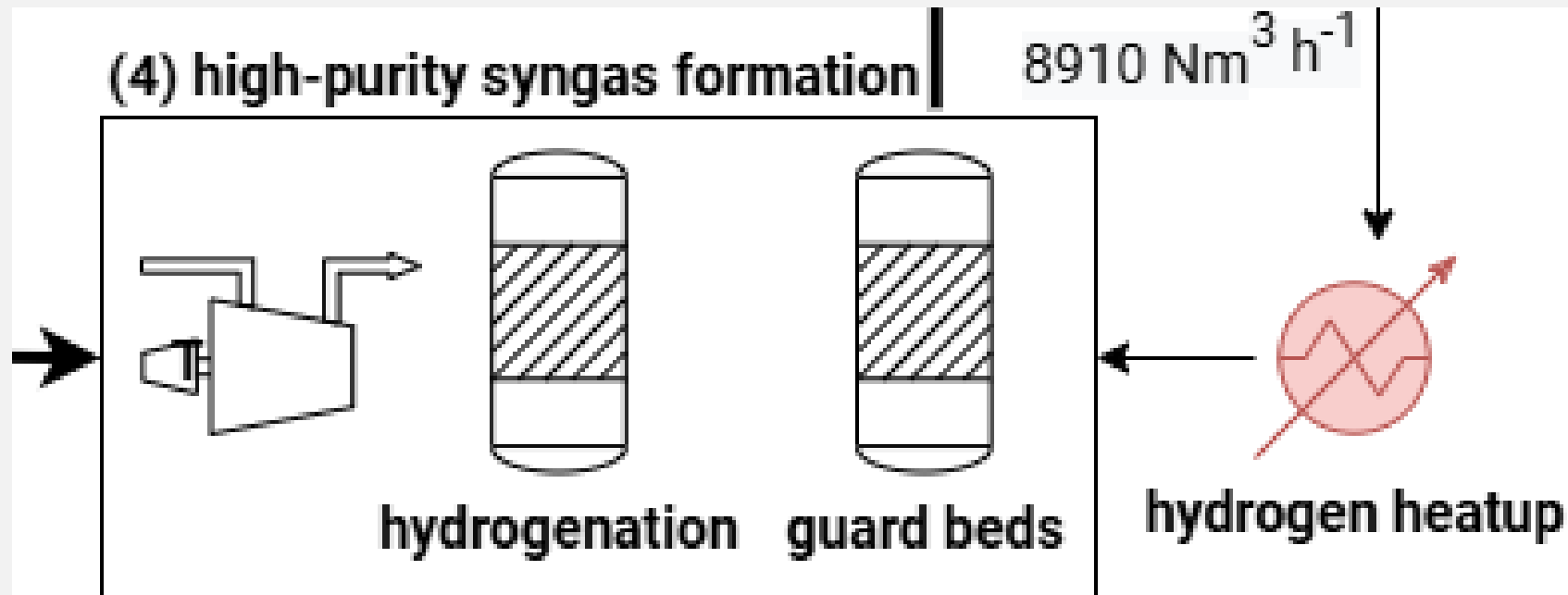
SYNGAS (4=2.2)



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt
German Aerospace Center

Vergiftung des Katalysators als größtes Problem.
Vermeidung: nur Spuren von weniger als 10 ppb_{vol} an
Halogenen, Staub oder Schwefel enthalten

Hydrogenierung -
Schutzbett



HVG-DGG
Service und Forschung für die Glasherstellung

WASSERSTOFFERZEUGUNG (3)

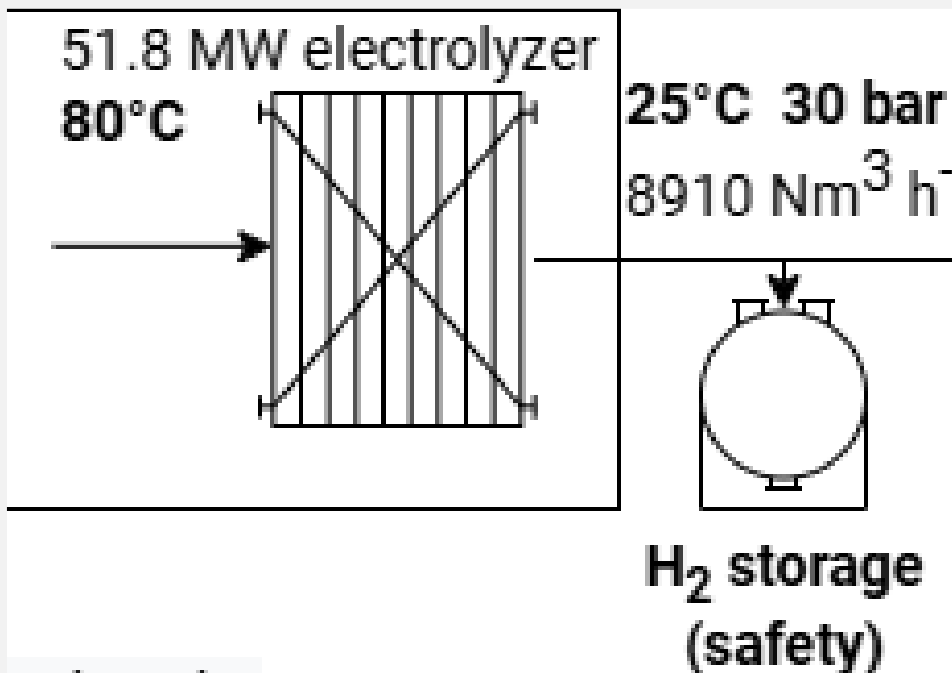
Elektrolyse



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt
German Aerospace Center

Wasserstoff wirkt als Reduktionsmittel bei der Brennstoffsynthese und kann auch direkt als Brennstoff in der Glasschmelzwanne dienen.

Ausgereifte Technologie zur Herstellung von Wasserstoff: Elektrolyse, primäre Einschränkung ist die Verfügbarkeit von grüner Elektrizität und nicht die Reinheit des Wassers.



- Hochtemperatur Elektrolyse (solid oxide electrolysis cell, SOEC),
- Alkali Elektrolyse (AEL) and
- Proton Exchange membrane electrolysis (PEM).

Problem bei SOEC: z.Zt.: begrenzte Stack lifetimes und hohe Produktionskosten.

AEL and PEM sind kommerziell im Industriemaßstab erhältlich.

Kostenentwicklung: wird eher preiswerter

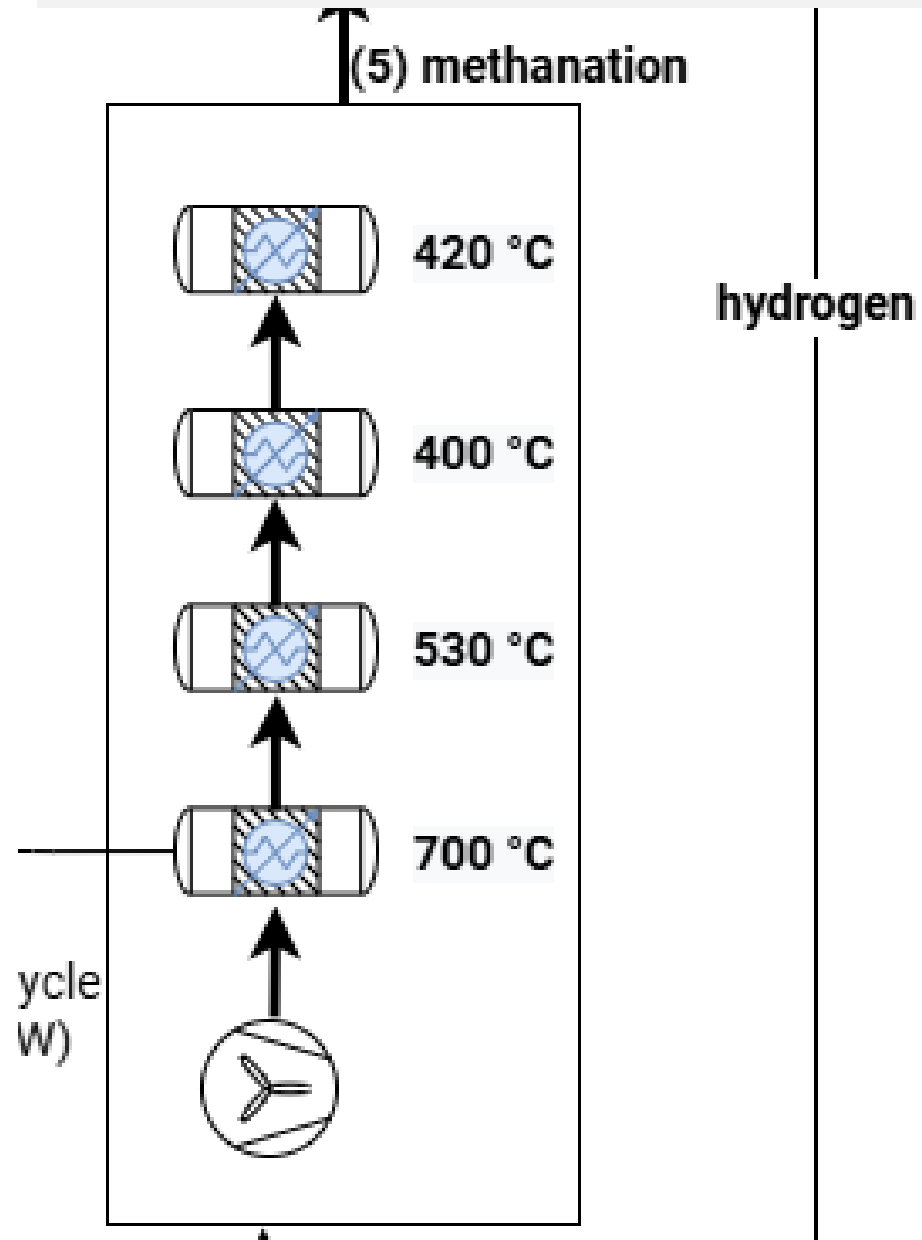


HVG-DGG
Service und Forschung für die Glasherstellung

METHANISIERUNG (5)



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt
German Aerospace Center



Auch hier: weniger als 100 ppb_{vol} an Kohlenen, Schwefel und Staub und weniger als 10 ppm_{vol} Sauerstoff um Vergiftung zu vermeiden.

Die Produktzusammensetzung hängt von den Reaktionsparametern ab. Das Productgas enthält 94.5 % CH₄, 3.5 % H₂, 1.3 % CO₂, und Spuren an CO, N₂ und Wasser. Verwendet wurden vier nickel-catalyzed reactor stages bei 700 °C, 530 °C, 400 °C and 420 °C,. Das endgültige Product verläßt den Prozess mit 250 °C und 3 MPa.



HVG-DGG
Service und Forschung für die Glasherstellung

ERGEBNISSE: TRL GESAMTPROZESS



| TRL | NASA usage ^[4] | European Union ^[5] |
|-----|---|---|
| 1 | Basic principles observed and reported | Basic principles observed |
| 2 | Technology concept and/or application formulated | Technology concept formulated |
| 3 | Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof-of concept | Experimental proof of concept |
| 4 | Component and/or breadboard validation in laboratory environment | Technology validated in lab |
| 5 | Component and/or breadboard validation in relevant environment | Technology validated in relevant environment (industrially relevant environment in the case of key enabling technologies) |
| 6 | System/subsystem model or prototype demonstration in a relevant environment (ground or space) | Technology demonstrated in relevant environment (industrially relevant environment in the case of key enabling technologies) |
| 7 | System prototype demonstration in a space environment | System prototype demonstration in operational environment |
| 8 | Actual system completed and "flight qualified" through test and demonstration (ground or space) | System complete and qualified |
| 9 | Actual system "flight proven" through successful mission operations | Actual system proven in operational environment (competitive manufacturing in the case of key enabling technologies; or in space) |

‘Technisch ausgereift’ ist die grundlegende Anforderung an die Bauteile des Kreislaufs. Alle ausgewählten Technologien sind entweder eingetragener Industriestandard oder sind in vergleichbaren Anwendungen getestet.

Aktuell liegt die Prozesskette bei einem Readiness Level von 3.

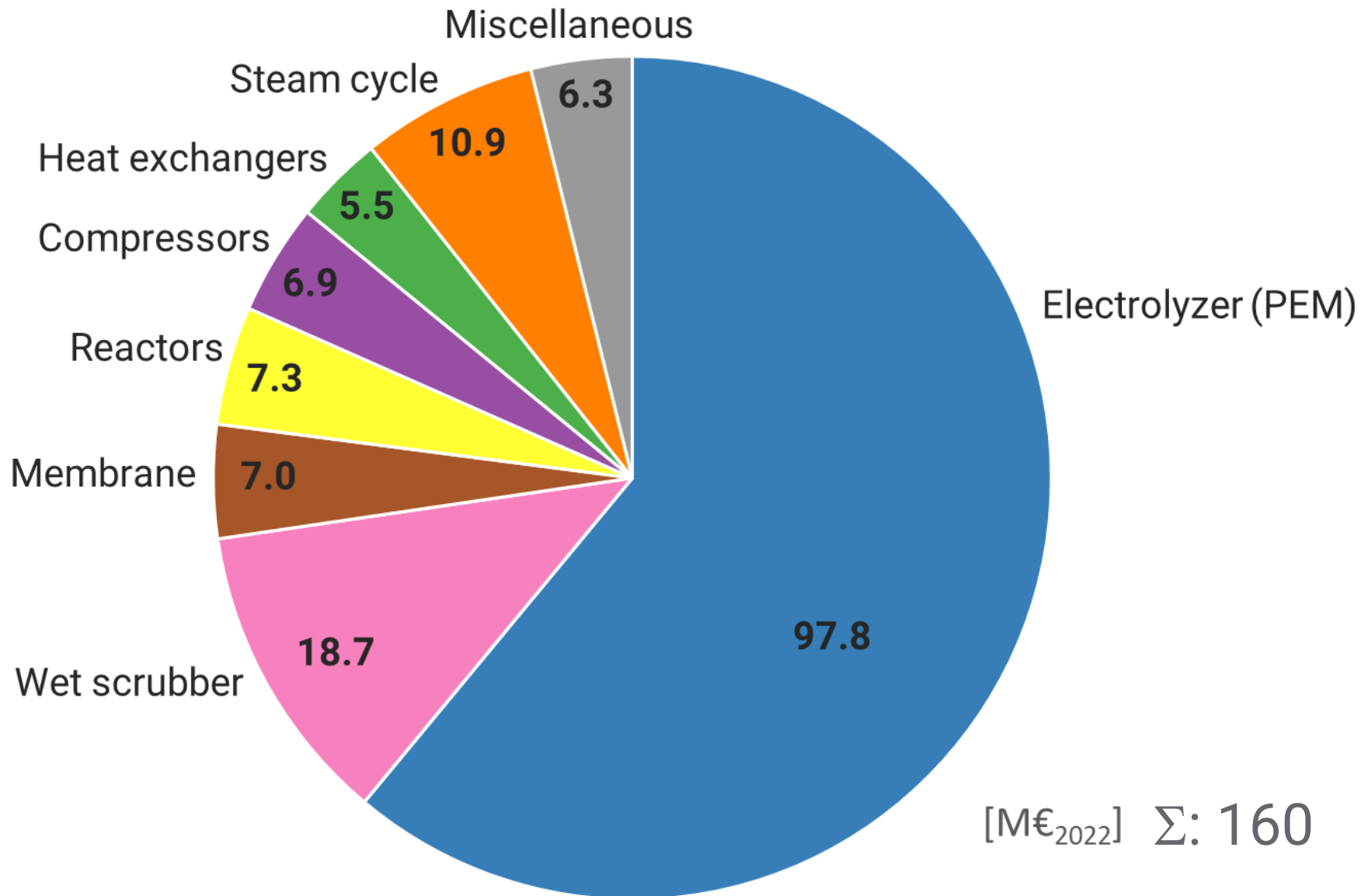
Aber Gesamtprozess ist technisch machbar!



CAPEX

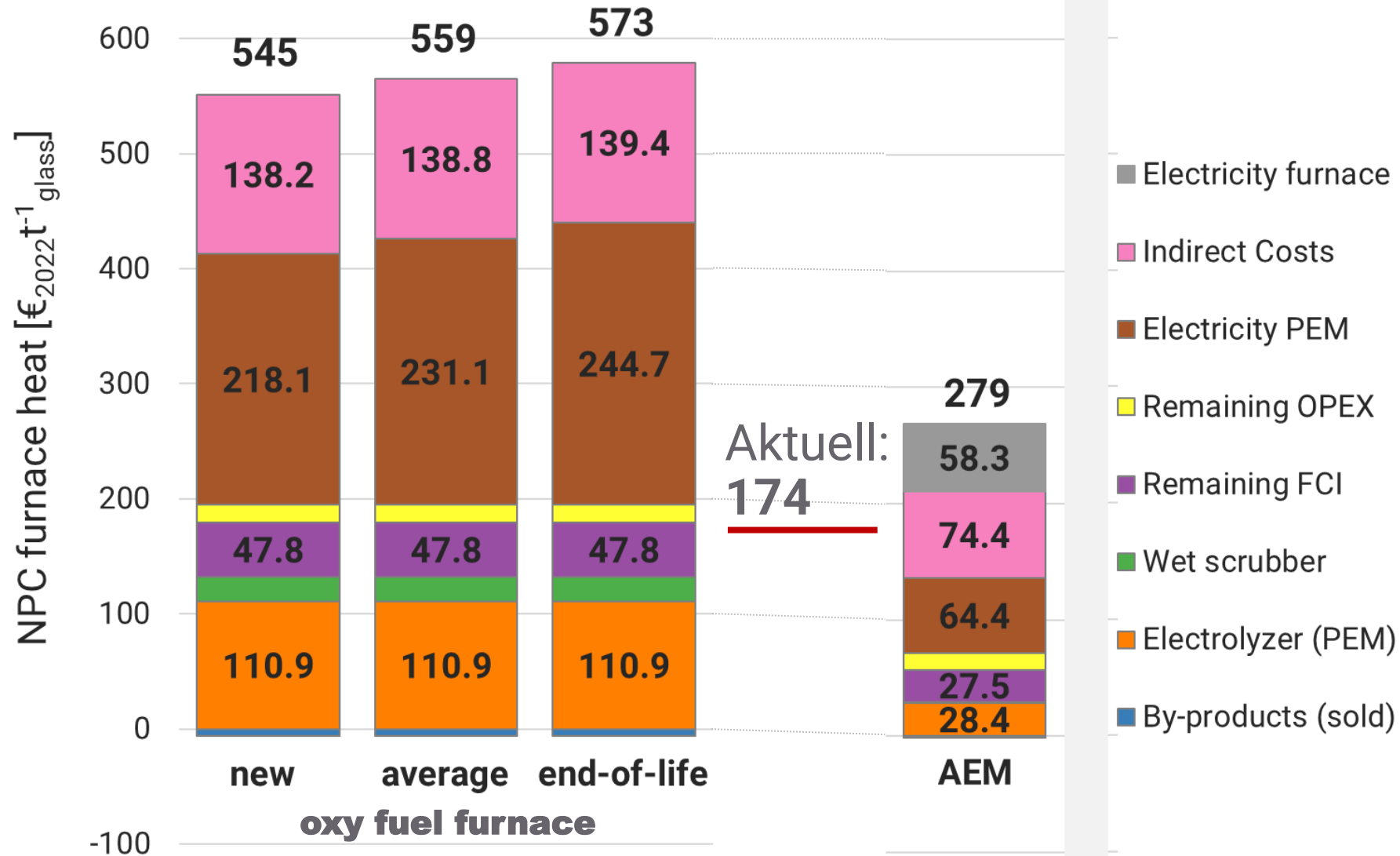


Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt
German Aerospace Center



HVG-DGG
Service und Forschung für die Glasherstellung

NPC



ERGEBNISSE



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt
German Aerospace Center

6.1 Economic and technological feasibility

Technische Machbarkeit ist gegeben.

Bei einer techno-ökonomischen Betrachtung ergibt sich eine deutliche Kostenzunahme im Vergleich zu einer Verwendung von Erdgas, wie aktuell bei der Glasherstellung üblich

6.2 Einschränkungen (Platzbedarf und Kosten)

Die Zunahme des Energieverbrauchs basierend auf der Wannentalterung muss auf Grund der langen Wannelaufzeit entsprechend berücksichtigt werden: Prozesskapazitäten in der nachfolgenden Prozesskette müssen angepasst und bedacht werden, mit der Folge, dass die Kosten (CAPEX-Anteil an den NPC) steigt.

Das kostenintensivste Bauteil ist die (PEM) Elektrolyse, mit einem Platzbedarf von 6,500 m² für eine 50 MW Einheit.

Der Methanisierungs-Reaktors als zweitgrößte Einheit benötigt zwischen 500 und 1,000 m². Weitere Ausrüstung einschließlich wet scrubbers, nitrogen removal unit, hydrogenation units, and guard beds benötigen ca. 200 m².



HVG-DGG
Service und Forschung für die Glasherstellung

ERGEBNISSE



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt
German Aerospace Center

6.3 Industrial synergies and sector coupling

Elektrolyseure mit entsprechend hoher Effizienz oder die Möglichkeit Abwärme zu nutzen, sind essentiell für einen CO₂-neutralen Prozesskreislauf.

6.4 Climate impact

Für Scope 1 und 2 Emissionen werden Werte von 130 kg CO₂ per metric ton molten glass erreicht.

Emissionen bei Erdgasverbrennung liegen bei ca. 339 kg CO₂ per metric ton molten glass bei vergleichbaren Bedingungen.

(300 t/d * 365*209 → 22856 t CO₂ /a gemindert)



HVG-DGG
Service und Forschung für die Glasherstellung

ZUSAMMENFASSUNG / KOMMENTAR



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt
German Aerospace Center

Die Studie zeigt das Problem auf:

- Technisch machbar,
aber zu teuer („Für weniger Geld erreicht man (aktuell) höhere CO₂-Minderung“)
- Aber man kann fast alles CO₂ abfangen
Für die schwer zu vermeidenden Prozess-CO₂-Emissionen geeignet
(„Für eine Umsetzung 15 bis 20 Jahre zu früh“)



HVG-DGG
Service und Forschung für die Glasherstellung

liReInvent

TREIBHAUSGASREDUZIERUNG
IN DER GRUNDSTOFFINDUSTRIE



**Finanziert von der
Europäischen Union**

NextGenerationEU

und dem



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

**VIELEN DANK FÜR IHRE
GESCHÄTZTE AUFMERKSAMKEIT!**