

IGF-Vorhaben 19742 N

Ermittlung der technischen und wirtschaftlichen Voraussetzungen für den Betrieb von chemischen Speichertechnologien in einem Unternehmensverbund

M. Vogt, S. Meschede, S. Kuhn, N. Seitz und M. Lutz

4. PA-Sitzung am 03. Juli 2019

Kalkwerke Oetelshofen GmbH

4. PA Sitzung zum IGF-Vorhaben 19742 N: dezentrale Power-to-X Anlagen

Beginn 11:00	Einführung	<ul style="list-style-type: none">• Begrüßung und Vorstellung durch die TUM und IUTA• Kurzvorstellung der Teilnehmer
11:15	Gastgeber	<ul style="list-style-type: none">• Präsentation Kalkwerk Oetelshofen GmbH
11:45	Projekthalt	<ul style="list-style-type: none">• Vorstellung Zwischenergebnisse IUTA + TUM
12:30	Mittagspause	
13:00	Projekthalt	<ul style="list-style-type: none">• Vorstellung Zwischenergebnisse IUTA + TUM
14:00	Projekthalt	<ul style="list-style-type: none">• Diskussion über geeignete Anreizsysteme• Anregungen und Wünsche• Ausblick auf weitere Projektarbeit
14:30	Besichtigung	<ul style="list-style-type: none">• Führung durch das Kalkwerk Oetelshofen

1	Begrüßung durch die TUM und die IUTA / Vorstellung der Teilnehmer
2	Präsentation Kalkwerk Oetelshofen
3	Vorstellung Zwischenergebnisse IUTA
4	Vorstellung Zwischenergebnisse TUM
5	Feedback und nächste Schritte
6	Besichtigung Kalkwerk
7	Verabschiedung

1	Begrüßung durch die TUM und die IUTA / Vorstellung der Teilnehmer
2	Präsentation Kalkwerk Oetelshofen
3	Vorstellung Zwischenergebnisse IUTA
4	Vorstellung Zwischenergebnisse TUM
5	Feedback und nächste Schritte
6	Besichtigung Kalkwerk
7	Verabschiedung



Technische Universität München

Sabine Kuhn

M. Sc.
Wissenschaftliche
Assistentin

Forschungsinstitut
Unternehmensführung, Logistik
und Produktion
Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Horst
Wildemann

Leopoldstraße 145
80804 München
Phone +49-89-289-240-03
Fax +49-89-289 240 11
Mobil +49-176-10 10 10 75
Nicolas.seitz@wi.tum.de
www.bwl.wi.tum.de



Technische Universität München

Nicolas Seitz

M. Sc.
Wissenschaftlicher
Assistent

Forschungsinstitut
Unternehmensführung, Logistik
und Produktion
Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Horst
Wildemann

Leopoldstraße 145
80804 München
Phone +49-89-289-240-06
Fax +49-89-289 240 11
Mobil +49-176-10 10 10 66
Nicolas.seitz@wi.tum.de
www.bwl.wi.tum.de



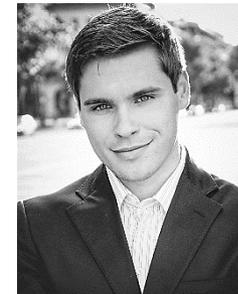
Technische Universität München

Manuel Lutz

MBA
Wissenschaftlicher
Assistent

Forschungsinstitut
Unternehmensführung, Logistik
und Produktion
Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Horst
Wildemann

Leopoldstraße 145
80804 München
Phone +49-89-289-240-55
Fax +49-89-289 240 11
Mobil +49-176-10 10 10 46
manuel.lutz@wi.tum.de
www.bwl.wi.tum.de





IUTA
Dipl.-Ing. Monika Vogt
Tel: 02065 / 418- 175
vogt@iuta.de



IUTA
M. Sc. Sven Meschede
Tel: 02065 / 418- 214
meschede@iuta.de

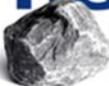
HYCON
Hydrogen · Energy · Systems

 **Electrochaea**


Kalkwerke Breckweg

 **bdguss**

 **SL NATURENERGIE**

Kalk
 vielseitig
faszinierend
wertvoll

BV GLAS


Wiegand-Glas

LANXESS
Energizing Chemistry

 **schwaben
regenerativ**

DK
Recycling
und
Roheisen

VIK
Energie für die Industrie

 **ETW ENERGIETECHNIK GMBH**

GKS

 **OETELSHOFEN KALK**
Seit 1900: Unabhängigkeit verpflichtet.

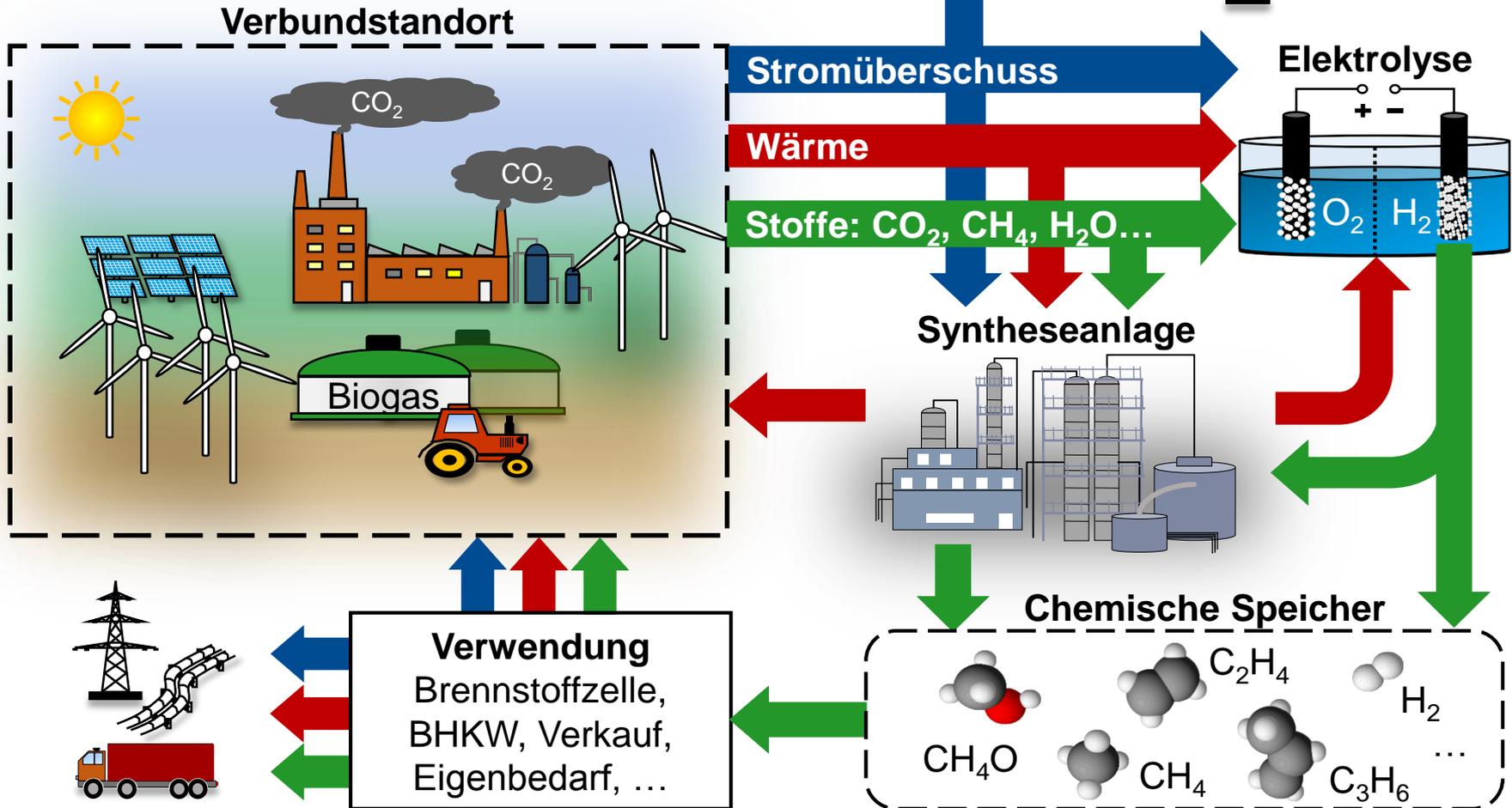
 **TFE
Consulting**

Projektlaufzeit: 01.10.2017 bis 30.03.2020

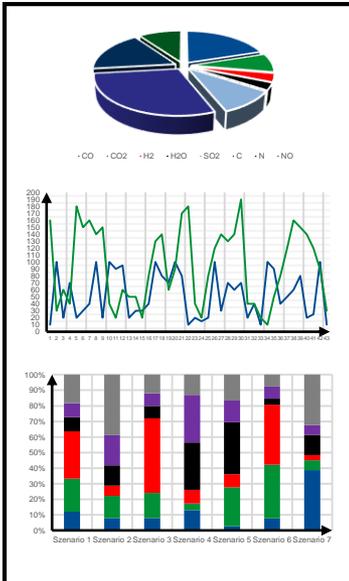
Arbeitspaket	Quartal / Projektjahr										Berichtsphase		
	1/I	2/I	3/I	4/I	1/II	2/II	3/II	4/II	1/III	2/III			
AP1: Datenerhebung für kmU-Netzwerk	■	■	■	■	■								
AP2: Speicherbedarf im Netzwerk				■	■	■							
AP3: Anfordern an das Ausspeichern						■	■						
AP4: Verfahrensketten chemischer Speicher			■	■	■	■	■	■					
AP5: energetische und ökologische Kennzahlen				■	■								
AP6: Investitionsausgaben und laufende Kosten					■	■	■	■					
AP7: funktionsbezogene Prozessanalyse							■	■	■				
AP8: Wirtschaftlichkeit und Zielkostenerreichung								■	■	■			
Schlussbericht											■	■	

Stand: November 2018

„Im Verbund werden Produktionsanlagen, Energiefluss, Logistik und Infrastruktur intelligent miteinander vernetzt“ - BASF

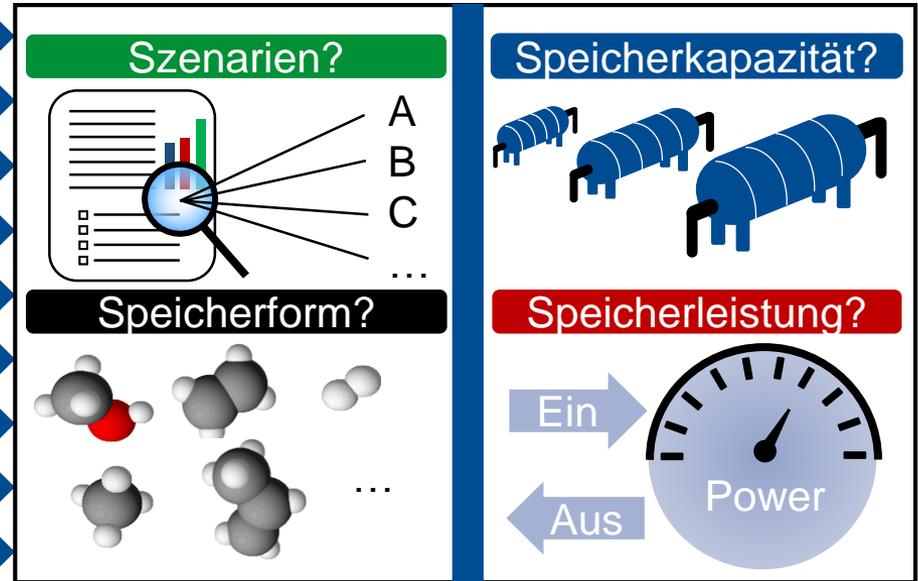


Datenerhebung



- ✓ Stromlastprofile
- ✓ Wärmebilanz
- ✓ Brennstoffmix
- ✓ Abgasemissionen
- ✓ Erlöse / Kosten
- ...

Anforderungsprofile chemischer Speicher



Techno-ökonomische Bewertung

-  Technische Durchführbarkeit
-  Wirtschaftliches Potenzial
-  Ökologischer Einfluss
-  Empfehlungen

← Fließbilder

← Kennzahlen



- Prozessanalyse
- Optimierung
- Wärmeintegration

1	Begrüßung durch die TUM und die IUTA / Vorstellung der Teilnehmer
2	Präsentation Kalkwerk Oetelshofen
3	Vorstellung Zwischenergebnisse IUTA
4	Vorstellung Zwischenergebnisse TUM
5	Feedback und nächste Schritte
6	Besichtigung Kalkwerk
7	Verabschiedung

1	Begrüßung durch die TUM und die IUTA / Vorstellung der Teilnehmer
2	Präsentation Kalkwerk Oetelshofen
3	Vorstellung Zwischenergebnisse IUTA
4	Vorstellung Zwischenergebnisse TUM
5	Feedback und nächste Schritte
6	Besichtigung Kalkwerk
7	Verabschiedung

AP1: Datenerhebung für Unternehmensverbund

- ✓ Auswahl Unternehmen Produktion
- ✓ Jahrgang Strom, Wärme, CO₂ ...
- Substitutionspotenzial
- ✓ Auswahl EE-Unternehmen
- Branchenzahlen: Trends 2025

Energiedaten des Verbundes:
Energie- und Stoffstrom

AP2: Dimensionierung chemischer Speicher

- Definition von Szenarien für pos./neg. Residuallast im Verbund
- Residuallastgang im Verbund
- Auswahl verschiedener Speicher

Notwendige Speicherkapazität des Verbundes

AP3: Anforderungen beim Ausspeichern

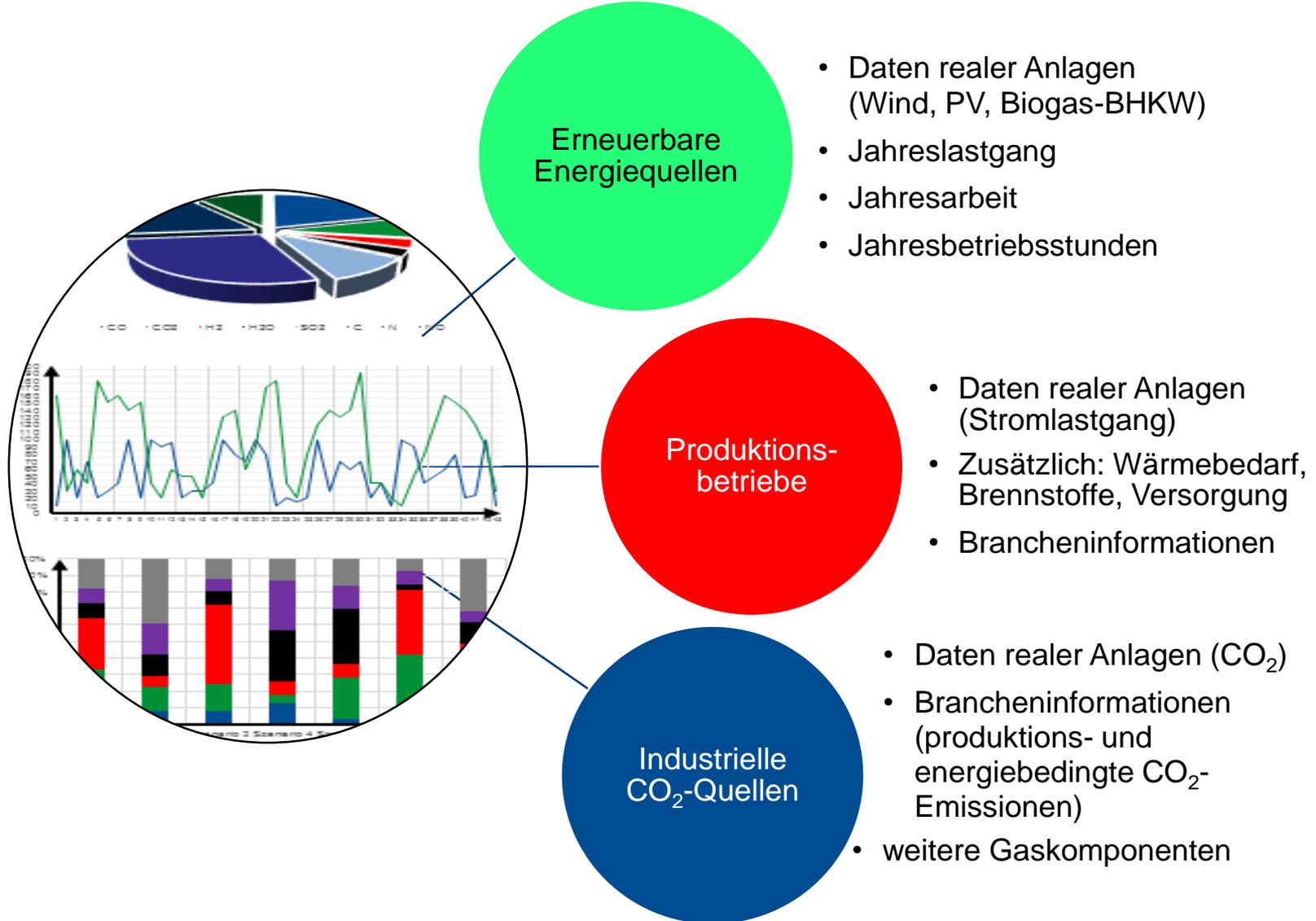
- Technische und wirtschaftliche Anforderungen Eigennutzung bzw. Vermarktung Speichermaterialien
- Abschätzung Preisentwicklung

Speichermaterial:
akzeptable Kosten (Eigennutzung) bzw. erzielbare Erlöse

AP4: modulare Verfahrensketten für chemische Speicher

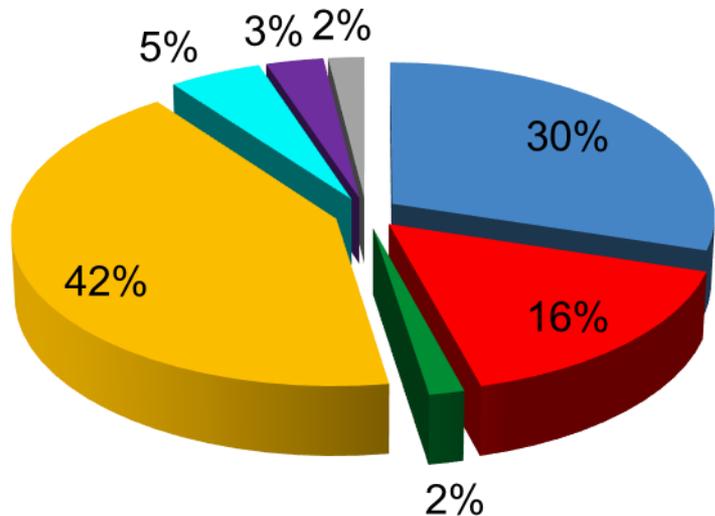
- Auswahl innovativer Verfahren
- Daten für Prozesssimulation
- modulare Verfahrensketten
- Prozesssimulation

Dimensionierung unter optimierten Betriebsbedingungen

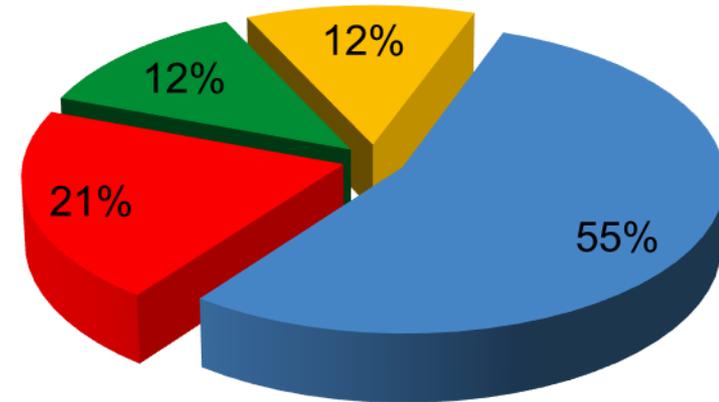


Strombedarf: 89,4 GWh/Jahr

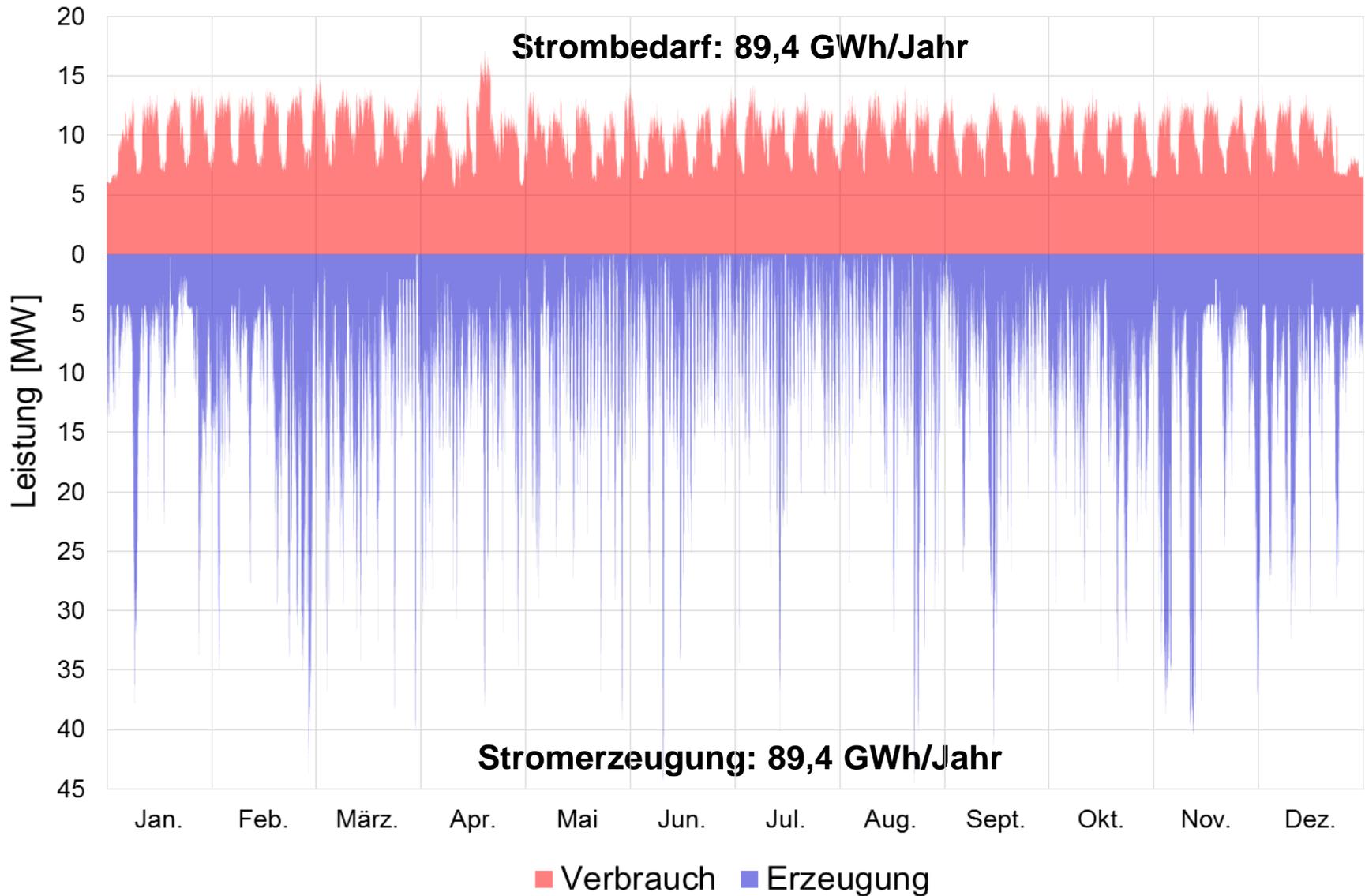
Stromerzeugung: 89,4 GWh/Jahr

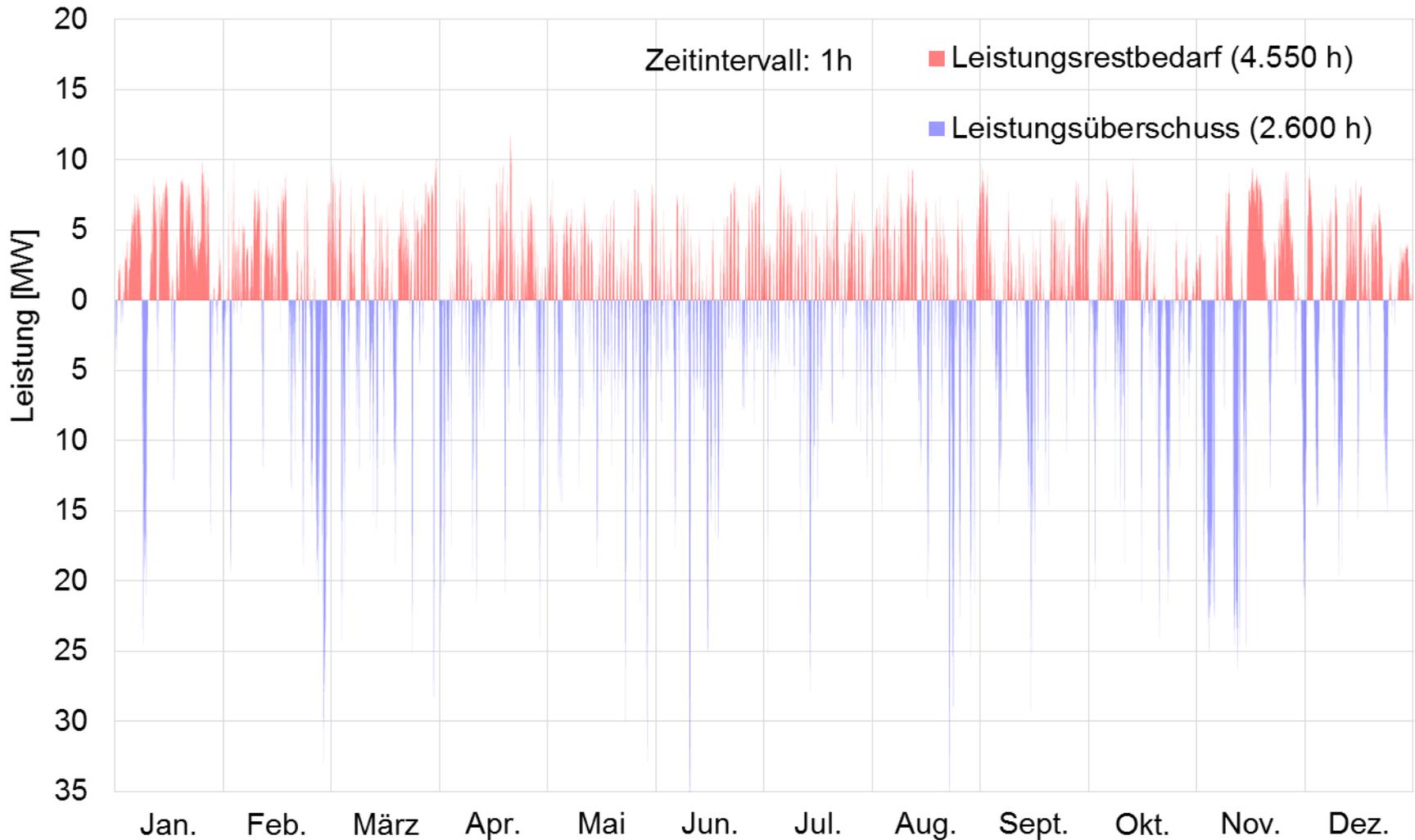


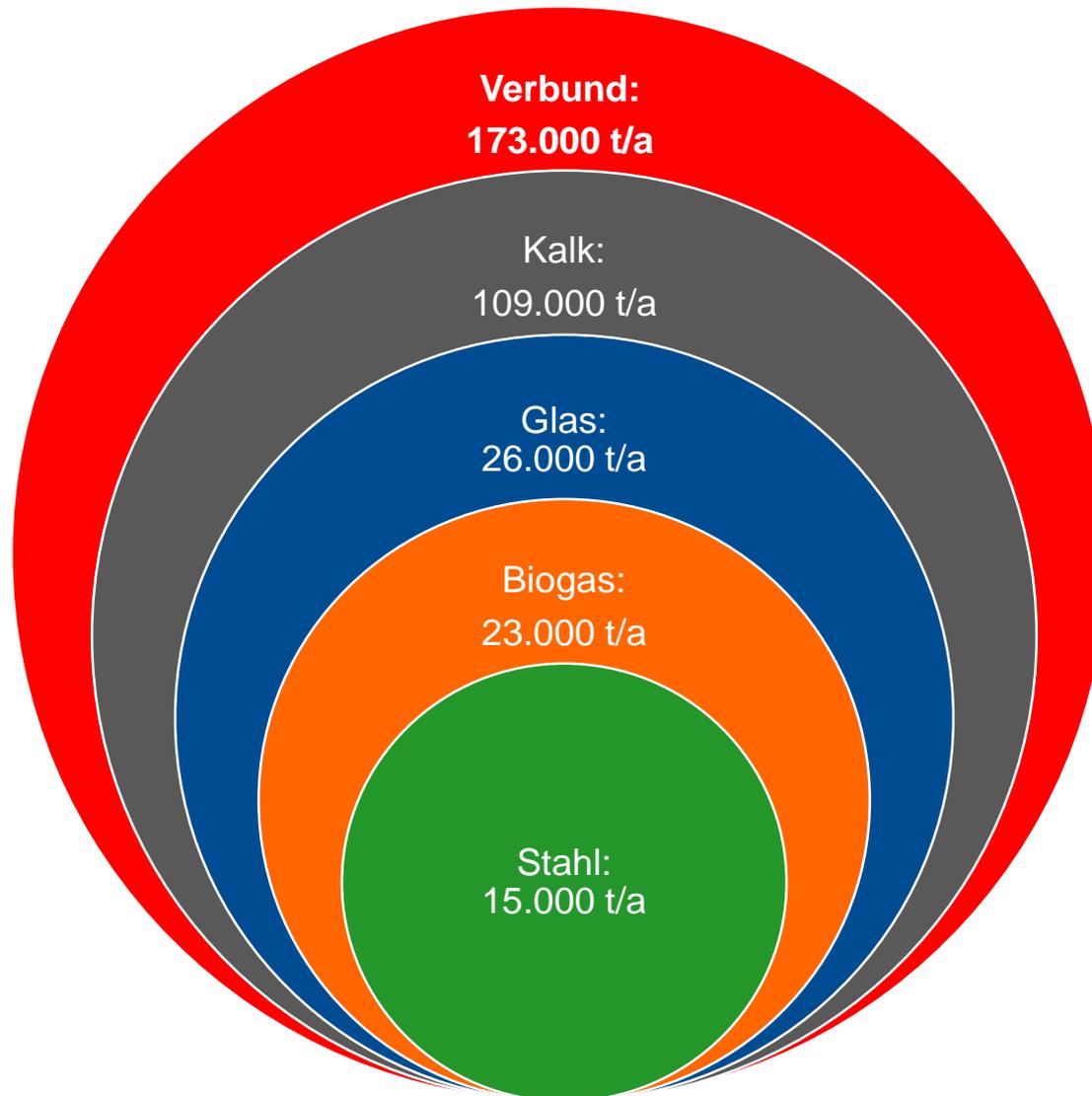
- Metallverarbeitung: Röhrenwerk
- Metallverarbeitung: Walzstraße
- Metallverarbeitung: Umformtechnik
- Glas
- Kalk
- Chemie
- Papier



- Windkraft
- Photovoltaik
- BHKW (Biomethan)
- BHKW (Biogas)







AP1: Datenerhebung für Unternehmensverbund

- Auswahl Unternehmen Produktion
- Jahrgang Strom, Wärme, CO₂ ...
- Substitutionspotenzial
- Auswahl EE-Unternehmen
- Branchenzahlen: Trends 2025

Energiedaten des Verbundes:
Energie- und Stoffstrom

AP2: Dimensionierung chemischer Speicher

- ✓ Definition von Szenarien für pos./neg. Residuallast im Verbund
- Residuallastgang im Verbund
- Auswahl verschiedener Speicher

Notwendige Speicherkapazität des Verbundes

AP3: Anforderungen beim Ausspeichern

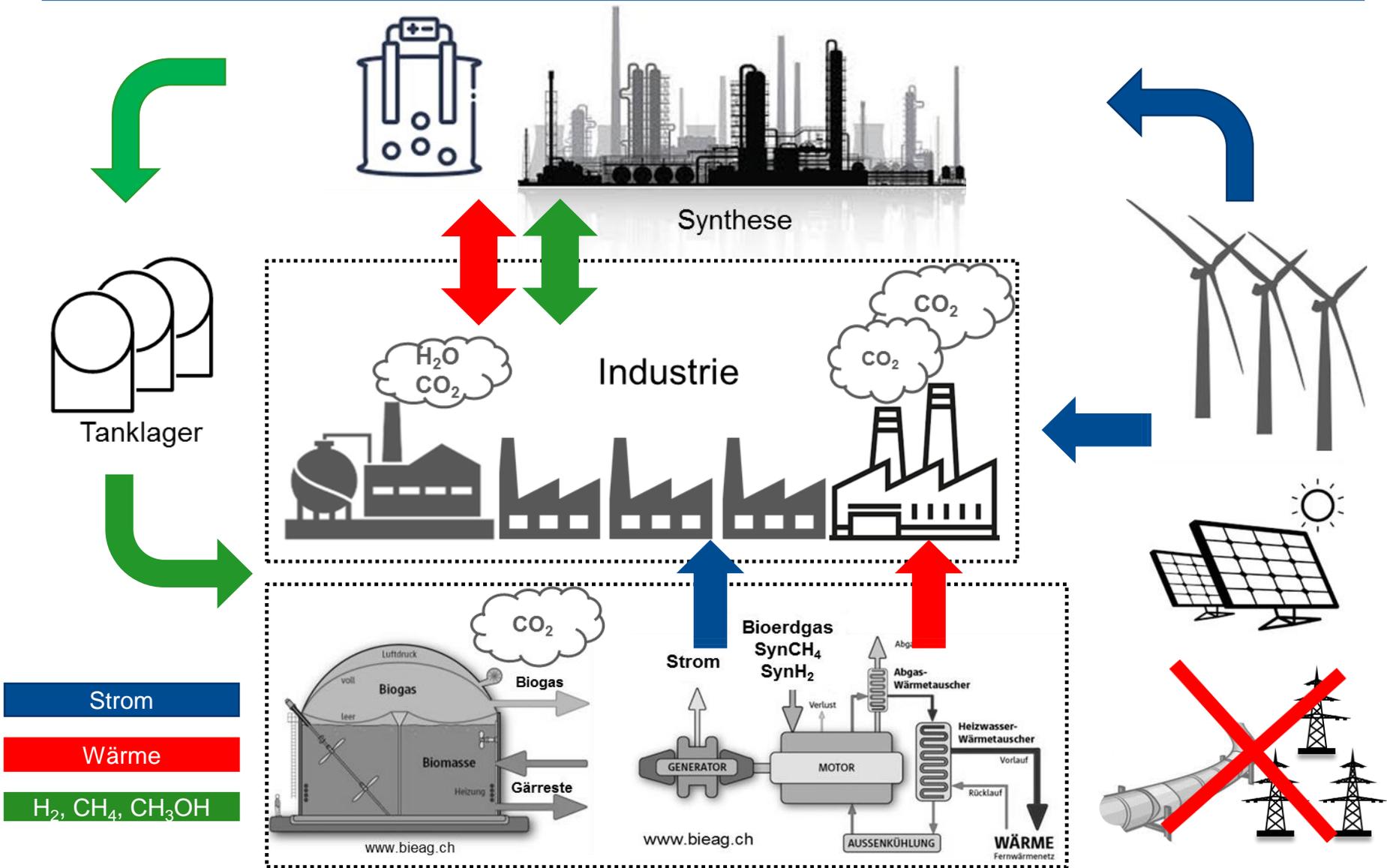
- Technische und wirtschaftliche Anforderungen Eigennutzung bzw. Vermarktung Speichermaterialien
- Abschätzung Preisentwicklung

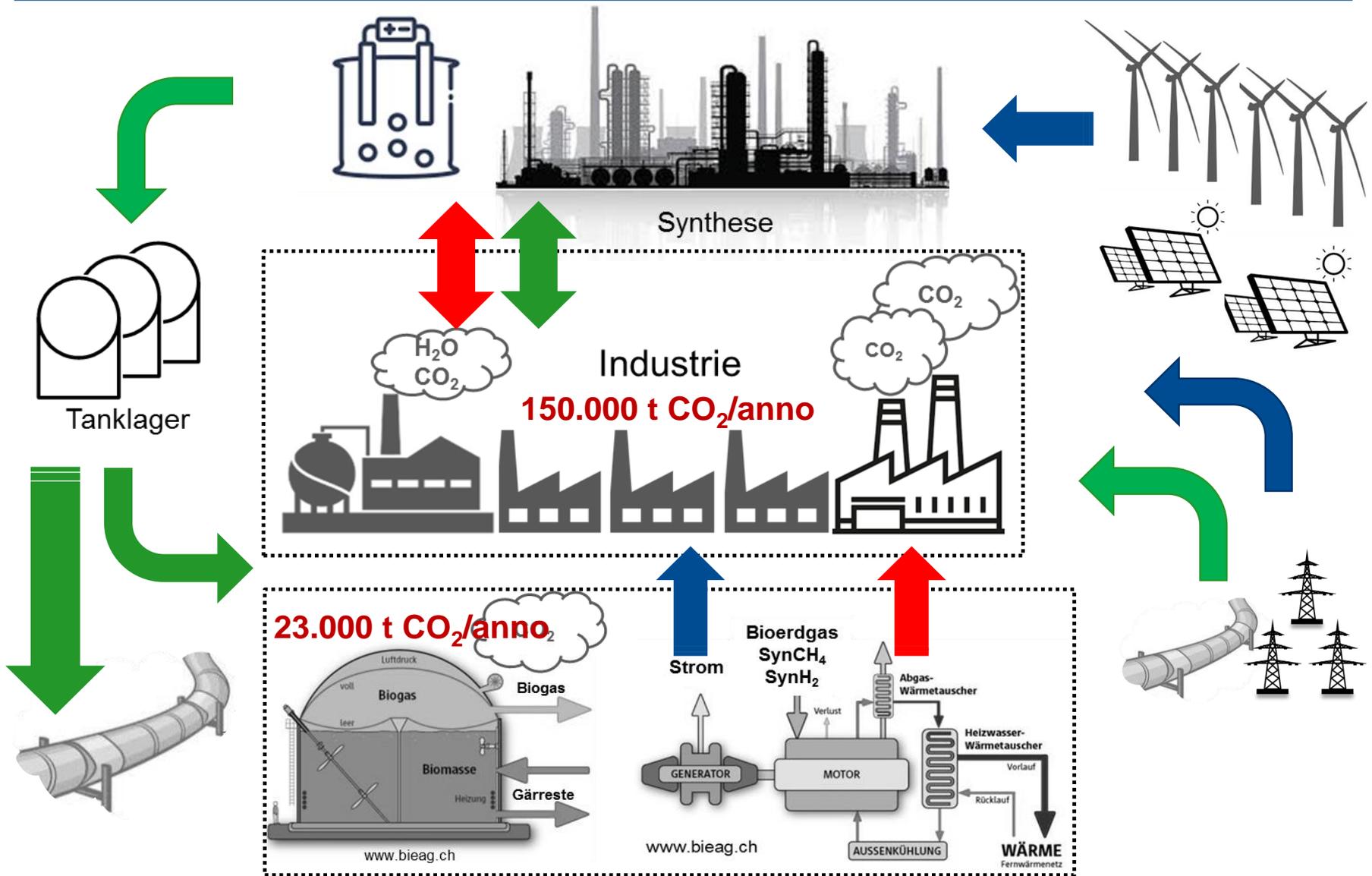
Speichermaterial:
akzeptable Kosten (Eigennutzung) bzw. erzielbare Erlöse

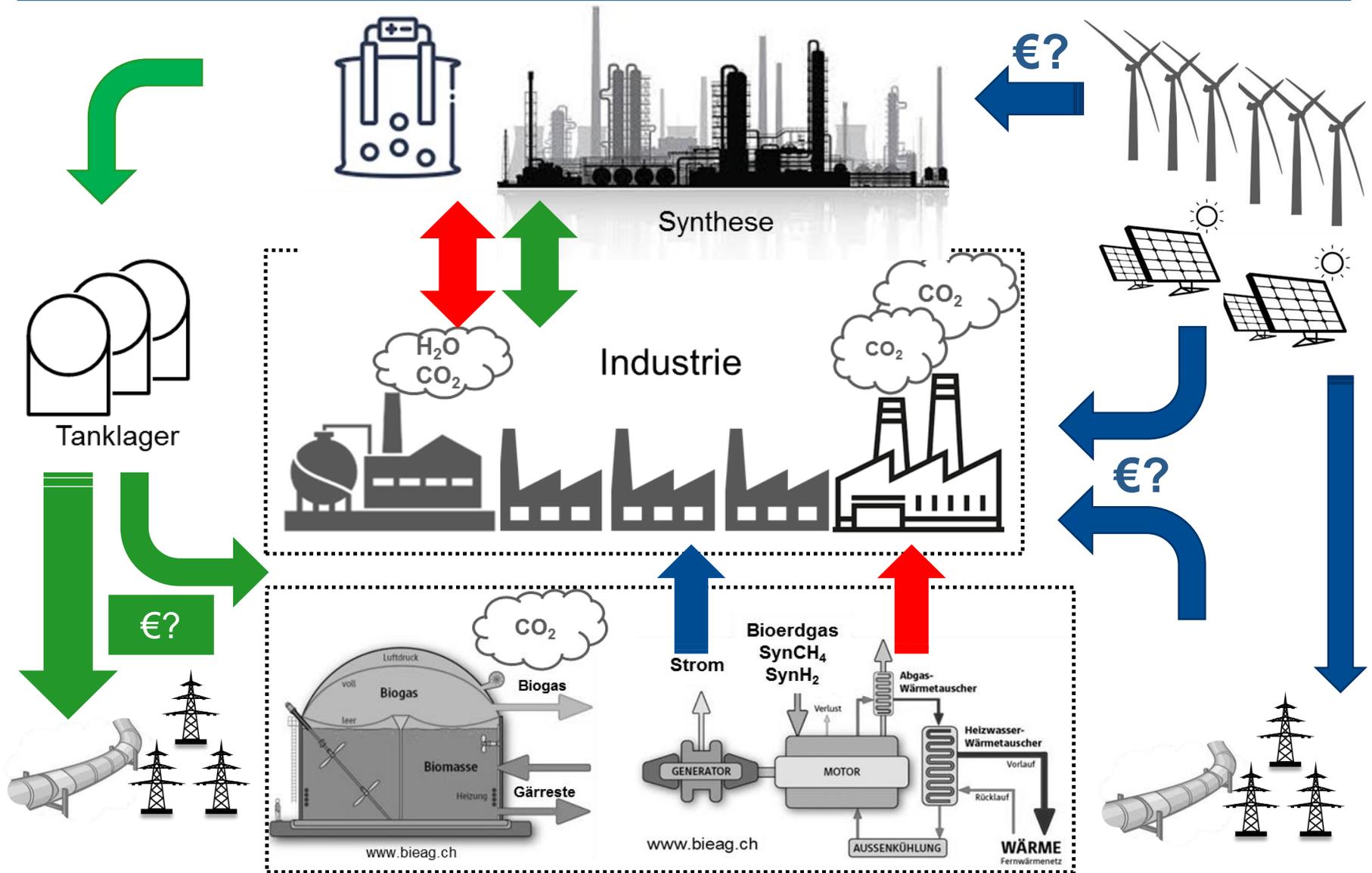
AP4: modulare Verfahrensketten für chemische Speicher

- Auswahl innovativer Verfahren
- Daten für Prozesssimulation
- modulare Verfahrensketten
- Prozesssimulation

Dimensionierung unter optimierten Betriebsbedingungen







AP1: Datenerhebung für Unternehmensverbund

- Auswahl Unternehmen Produktion
- Jahrgang Strom, Wärme, CO₂ ...
- Substitutionspotenzial
- Auswahl EE-Unternehmen
- Branchenzahlen: Trends 2025

Energiedaten des Verbundes:
Energie- und Stoffstrom

AP2: Dimensionierung chemischer Speicher

- Definition von Szenarien für pos./neg. Residuallast im Verbund
- Residuallastgang im Verbund
- Auswahl verschiedener Speicher

Notwendige Speicherkapazität des Verbundes

AP3: Anforderungen beim Ausspeichern

- ✓ Technische und wirtschaftliche Anforderungen Eigennutzung bzw. Vermarktung Speichermaterialien
- Abschätzung Preisentwicklung

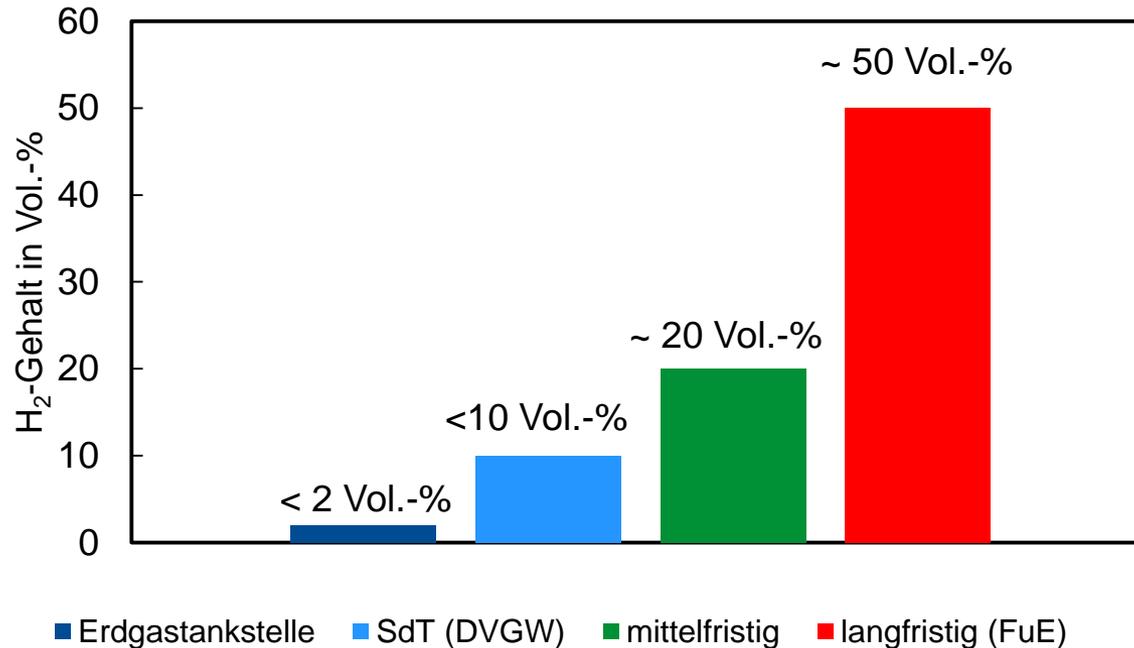
Speichermaterial:
akzeptable Kosten (Eigennutzung) bzw. erzielbare Erlöse

AP4: modulare Verfahrensketten für chemische Speicher

- Auswahl innovativer Verfahren
- Daten für Prozesssimulation
- modulare Verfahrensketten
- Prozesssimulation

Dimensionierung unter optimierten Betriebsbedingungen

H₂-Gehalt im Erdgasnetz



Quelle: WD 8-3000-066/19

H₂ im Erdgasnetz:

- fluktuierende Wasserstoffgehalte (problematisch in Thermoprozessen)
- Umwidmung (100 % H₂) oder
- Partitionierung (dezentral unterschiedliche, konstante H₂-Konzentrationen)

Branche	Prozess	Effizienz	Sicherheit (Emissionen + thermische Überlast)	Produktqualität
Bei Umstellung von niederen auf höheren Wobbe-Index (gesamte mögliche Schwankungsbreite DVGW G 260)				
Wärme	Heiz- und Dampfkessel	Yellow	Red	Green
	Hellstrahler	Yellow	Red	Green
	direkte und indirekte Trocknung	Yellow	Yellow	Yellow
Metallurgie	Vorwärmung (Metalle)	Yellow	Red	Yellow
	Thermochem. Wärmebehandlung	Yellow	Yellow	Green
	Verzinkungsprozesse	Yellow	Green	Red
	Schmelzprozesse (NE-Metalle)	Red	Red	Red
Keramik	Kalköfen, Kalzinierung von Tonerden	Yellow	Yellow	Yellow
	Ziegelfertigung	Yellow	Red	Red
	Porzellanbrennen	Yellow	Red	Red
Glas	Glasschmelzen (Flachglas)	Red	Red	Red
	Glasschmelzen (Behälterglas), Feeder	Red	Red	Red
	Glasnachbehandlung	Red	Red	Red
Chemie	Chemie-, Kunststoffindustrie	Red	Red	Red

 kein Handlungsbedarf
 z. T. Handlungsbedarf
 Handlungsbedarf

Quelle: Projektsteckbrief GasQualitaetGlas GWI

Marktpreise (27.06.2019)

- H₂ (www.clever-tanken.de) 9,5 € / kg *
- Erdgas (PEGAS) 15,59 € / MWh
- Methanol (Methanex) 360 € / t CH₃OH
- CO₂-Zertifikate (EEX) 27,1 € / t CO₂ Börse EEX
- Strom (EPEX Spot) 30,76 € / MWh (base)
32,53 € / MWh (peak)
- Strom (Phelix-DE Futures für KW 27/19)
33,60 €/MWh (base)
39,00 €/MWh (peak)
- Strom (Phelix-DE Futures für Quartal 4/19)
47,42 €/MWh (base)
57,93 €/MWh (peak)

* mit Abgaben

AP1: Datenerhebung für Unternehmensverbund

- Auswahl Unternehmen Produktion
- Jahrgang Strom, Wärme, CO₂ ...
- Substitutionspotenzial
- Auswahl EE-Unternehmen
- Branchenzahlen: Trends 2025

Energiedaten des Verbundes:
Energie- und Stoffstrom

AP2: Dimensionierung chemischer Speicher

- Definition von Szenarien für pos./neg. Residuallast im Verbund
- Residuallastgang im Verbund
- Auswahl verschiedener Speicher

Notwendige Speicherkapazität des Verbundes

AP3: Anforderungen beim Ausspeichern

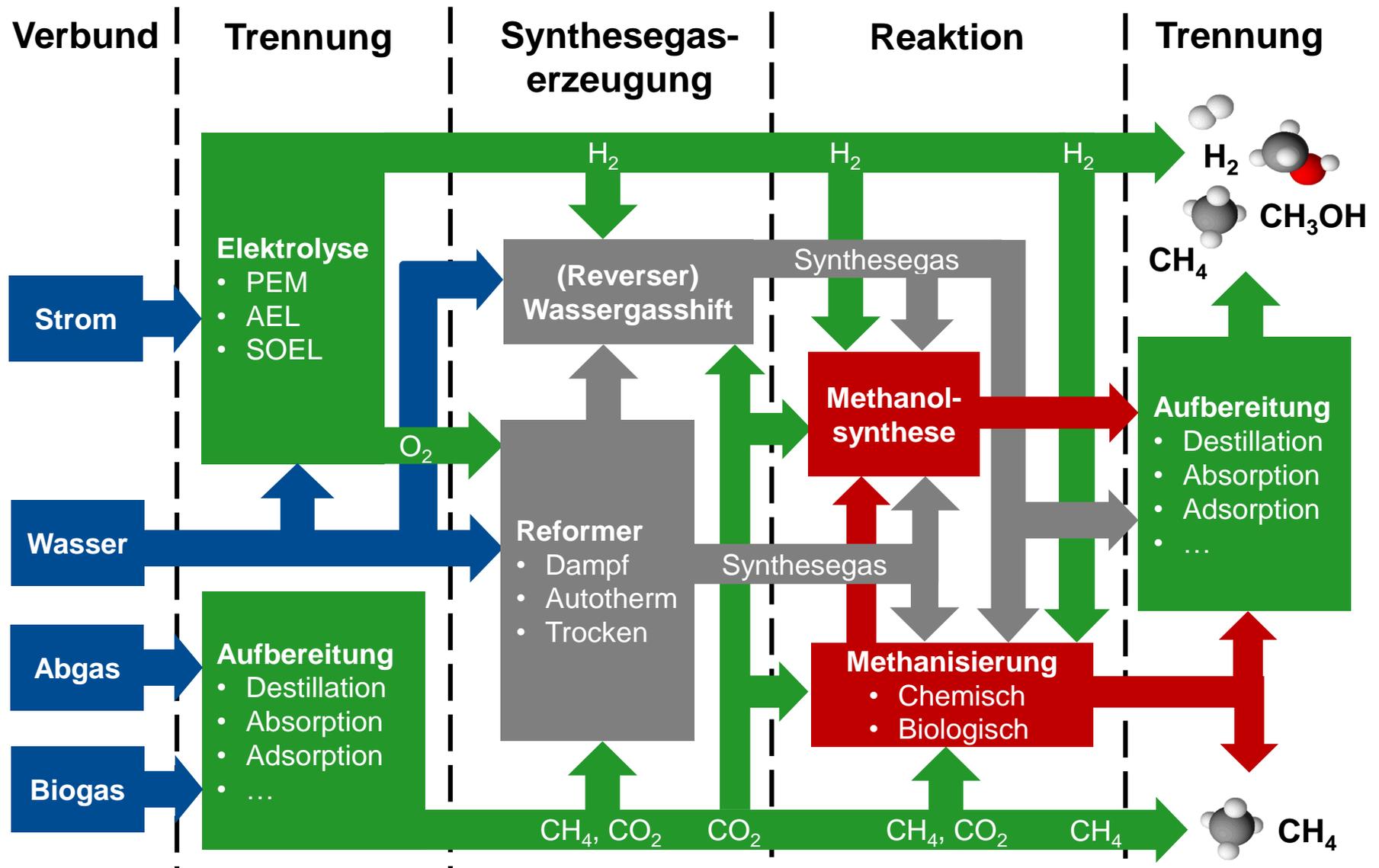
- Technische und wirtschaftliche Anforderungen Eigennutzung bzw. Vermarktung Speichermaterialien
- Abschätzung Preisentwicklung

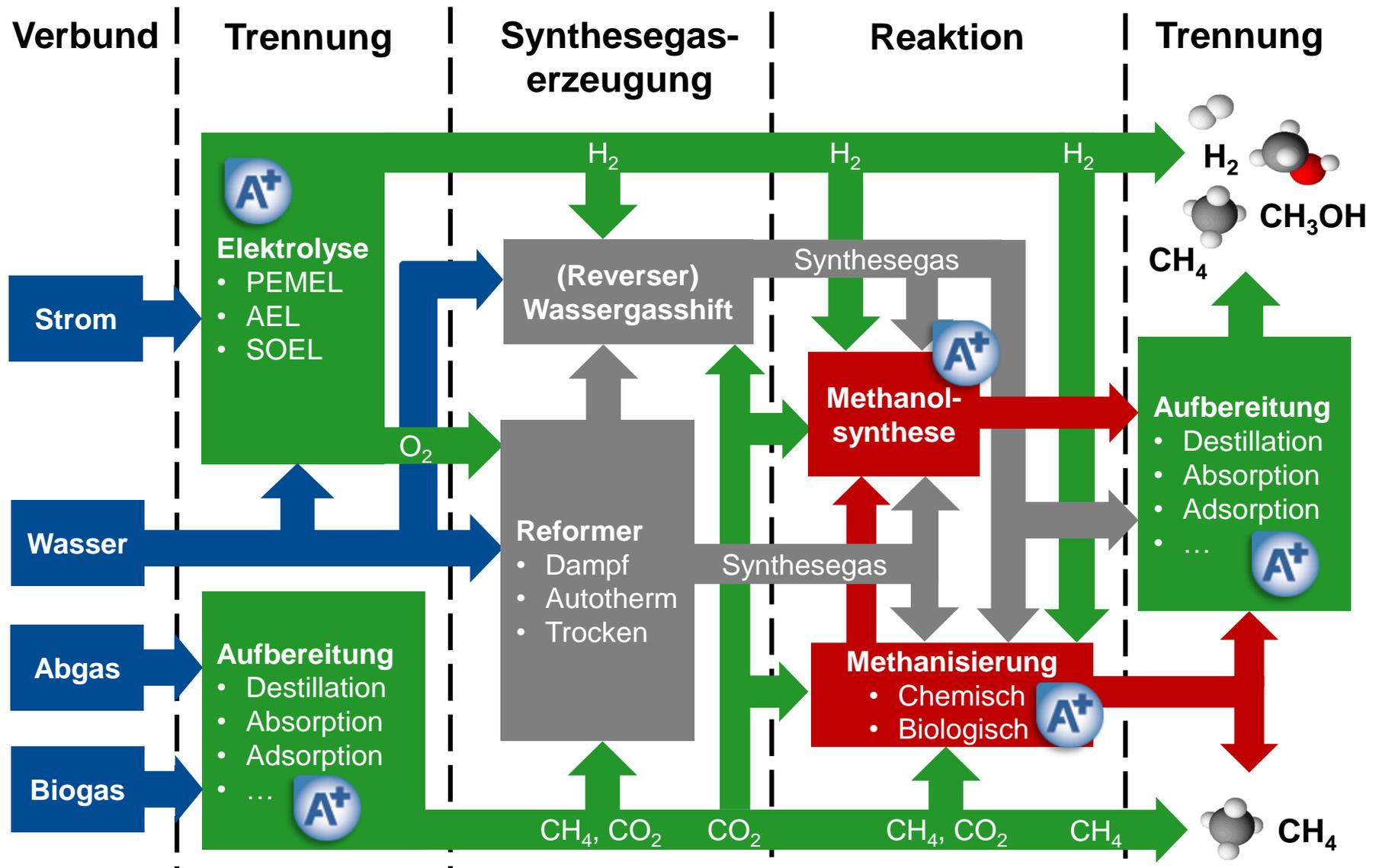
Speichermaterial:
akzeptable Kosten (Eigennutzung) bzw. erzielbare Erlöse

AP4: modulare Verfahrensketten für chemische Speicher

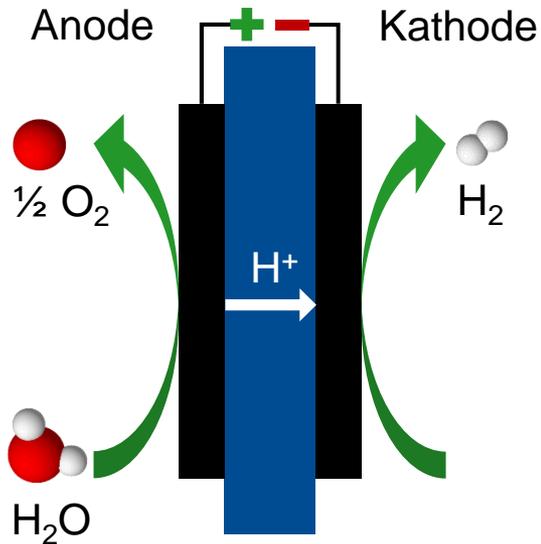
- ✓ Auswahl innovativer Verfahren
- ✓ Daten für Prozesssimulation
- modulare Verfahrensketten
- ✓ Prozesssimulation

Dimensionierung unter optimierten Betriebsbedingungen



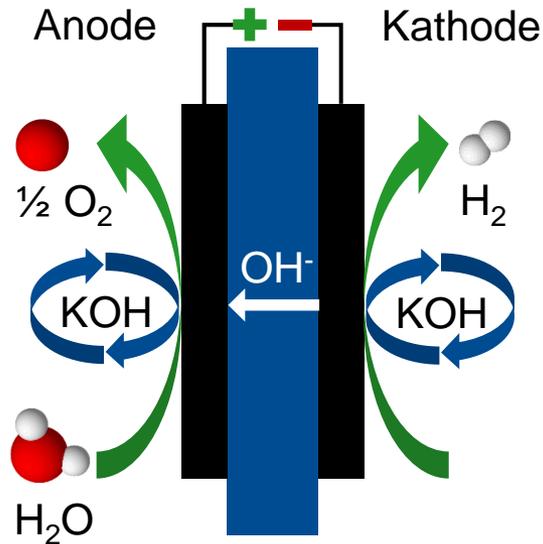


Membranelektrolyse



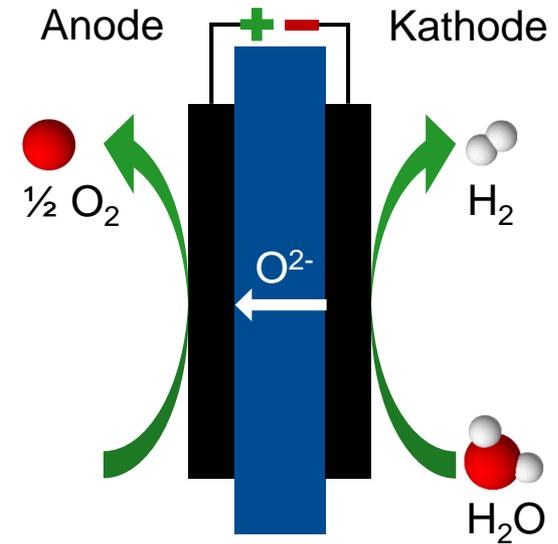
- Anode:
 $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^-$
- Kathode:
 $2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$
- 20 - 100 °C

Alkalische Elektrolyse



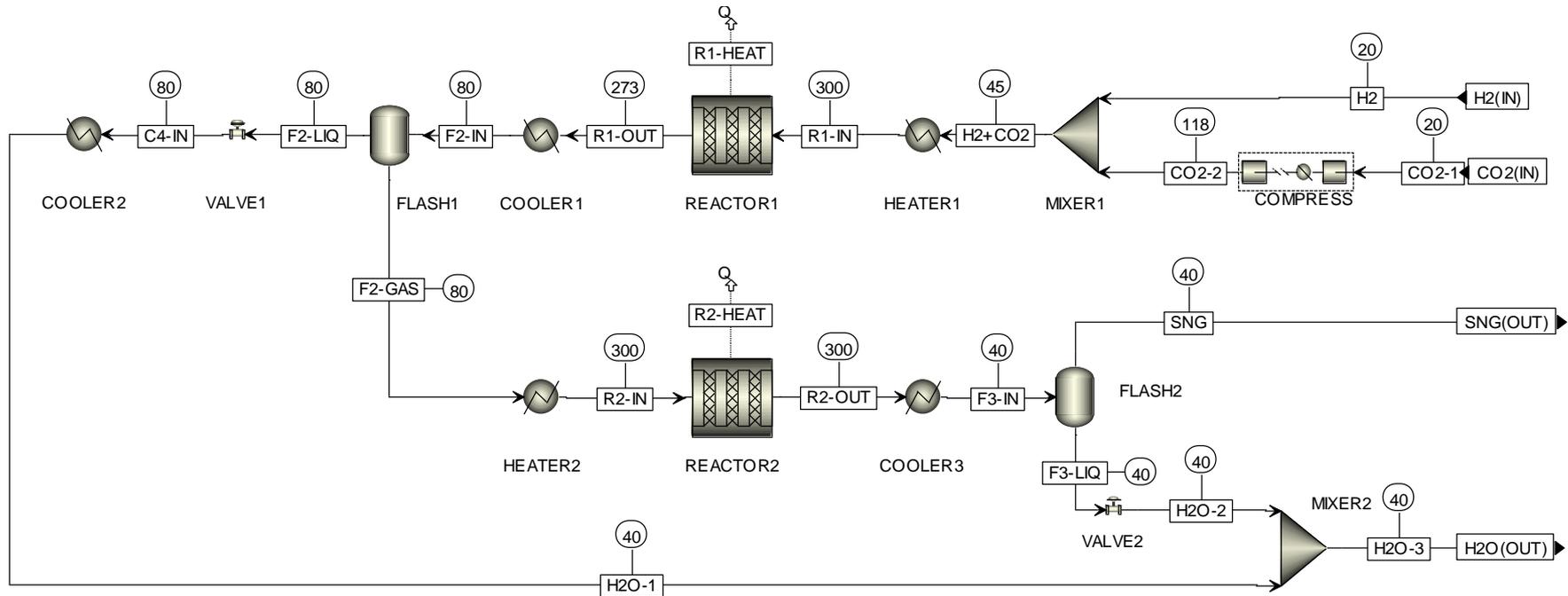
- Anode:
 $2 \text{OH}^- \rightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^-$
- Kathode:
 $2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2 \text{OH}^-$
- 40 - 90 °C

Hochtemperaturelektrolyse



- Anode:
 $\text{O}^{2-} \rightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2 \text{e}^-$
- Kathode:
 $\text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}^{2-}$
- 700 - 1000 °C

Eigenschaft	AEL	PEM	SOFC
Druck / bar	1	1	1
Temperatur / °C	60	60	800
Stromdichte / A cm ⁻²	0,37	1,37	0,56
Spannung / V	2	2	1,29
Stromverbrauch / kWh kg _{Produkt} ⁻¹	61,88	59,08	38,03
Wärmebedarf / kWh kg _{Produkt} ⁻¹	1,02	0,25	7,18
Kühlbedarf / kWh kg _{Produkt} ⁻¹	19,14	14,37	1,03
TRL	9	7-8	4-6
Vorteile	Etabliert, Langzeitstabilität	Hohe Stromdichten, hoher Teillastbereich, sehr dynamisch	Hoher Wirkungsgrad
Nachteile	Korrosion, geringe Stromdichten	Korrosion, hohe kosten	Starke Degradation, Labormaßstab



SNG

x_{CH_4} : 96,3%
 x_{CO_2} : 1,87%
 x_{H_2} : 1,02%
 $x_{\text{H}_2\text{O}}$: 0,80%

Wärmeerzeugung

10 MJ/kg_{SNG}

Verdichter

0,13 kWh/kg_{SNG}

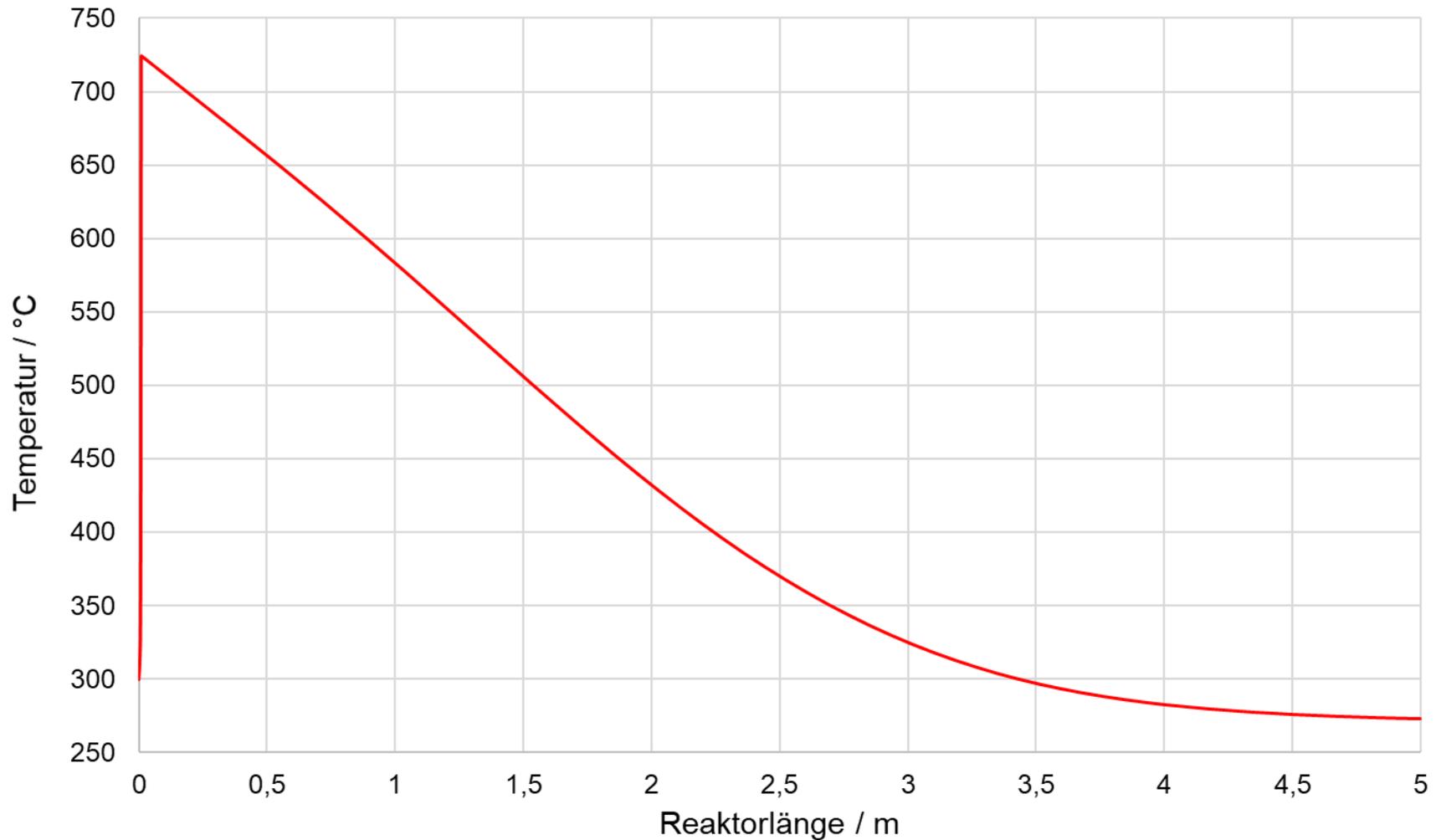
GHSV

4500 h⁻¹ (Reaktor 1)
 1700 h⁻¹ (Reaktor 2)

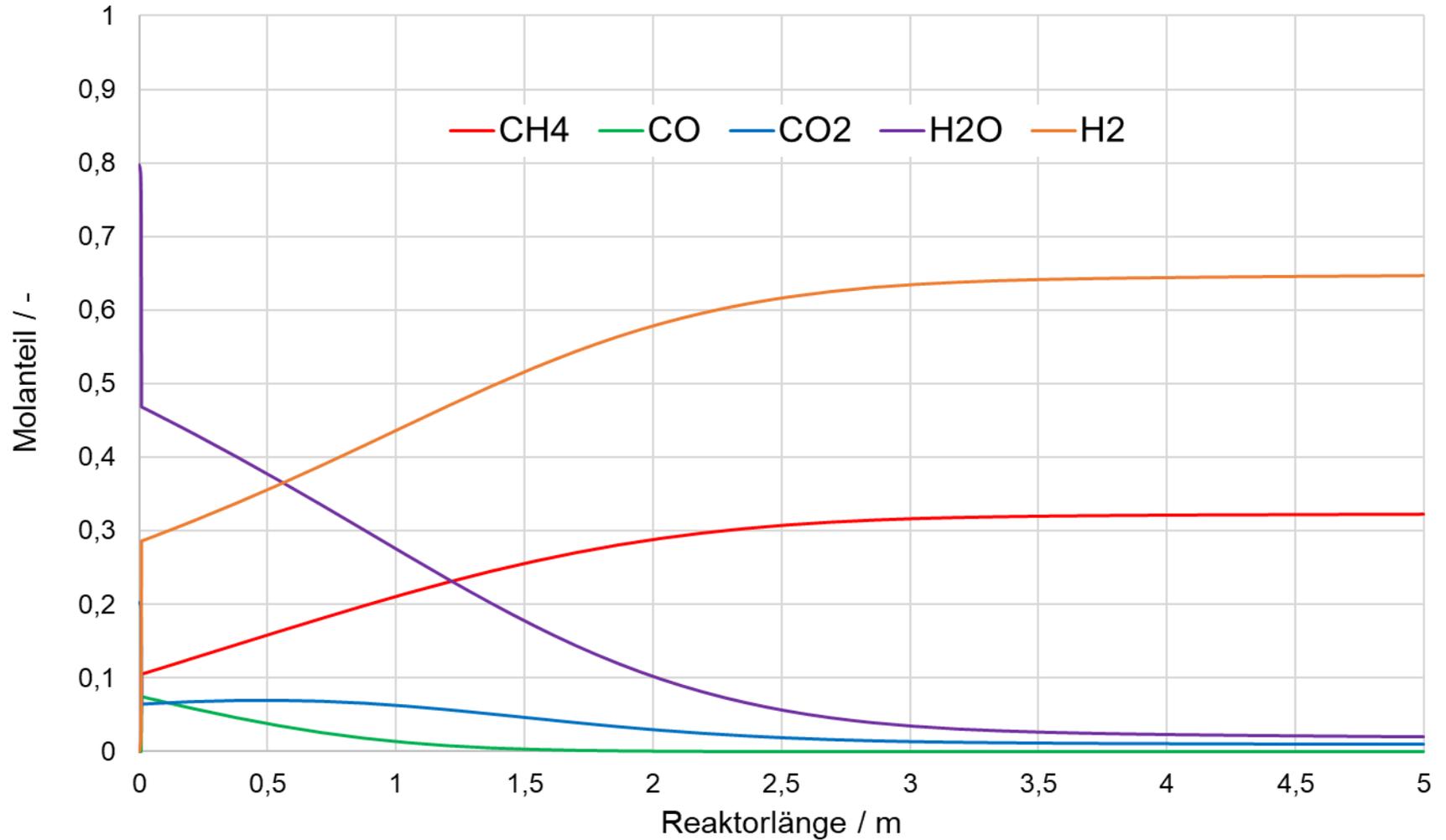
Solar Fuel GmbH (2011): Hocheffizientes Verfahren zur katalytischen Methanisierung von Kohlendioxid und Wasserstoff enthaltenden Gasgemischen. Veröffentlichungsnr: DE102009059310A1.

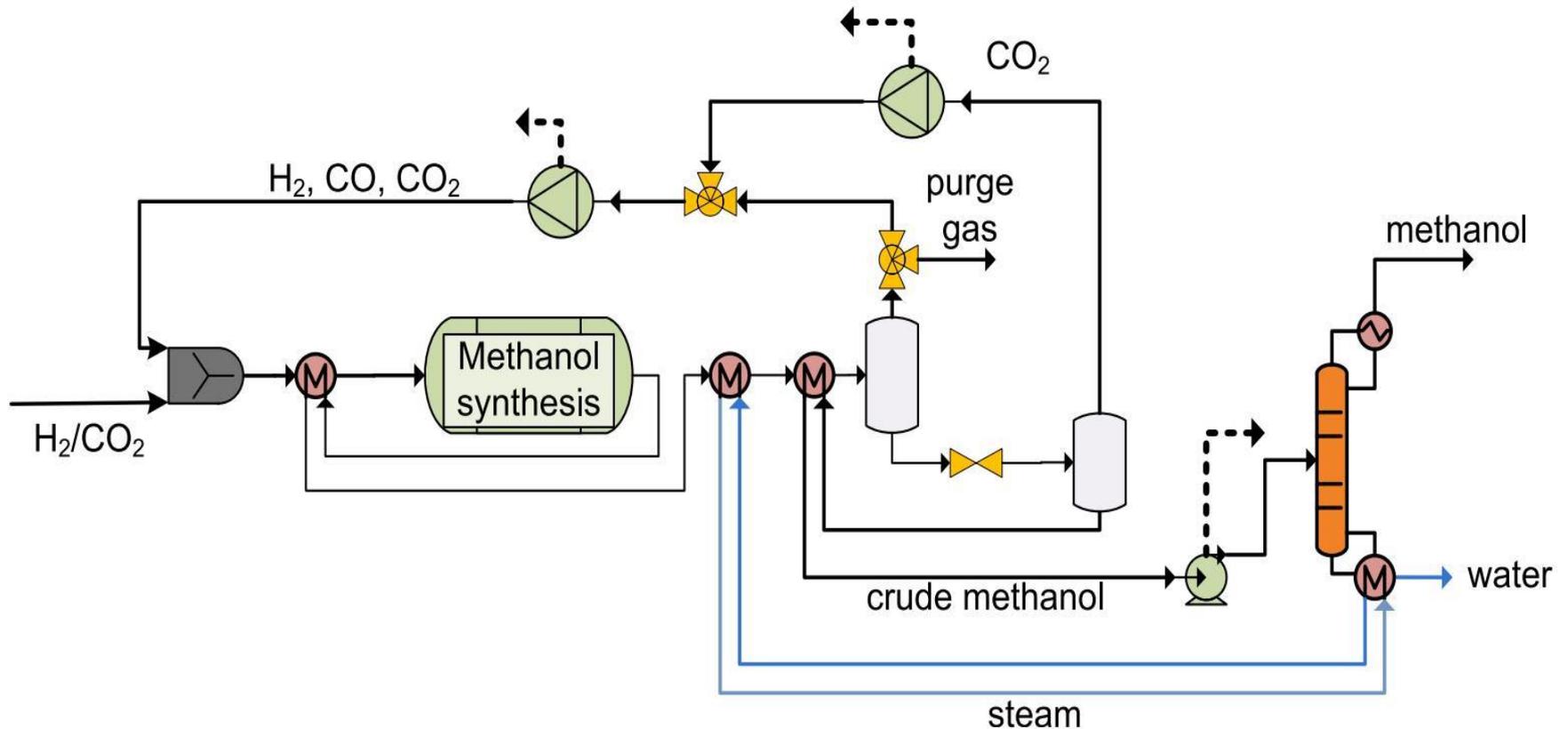
Neubert, Michael; Widzowski, Jonas; Rönsch, Stefan; Treiber, Peter; Dillig, Marius; Karl, Jörgen (2017): Simulation-Based Evaluation of a Two-Stage Small-Scale Methanation Unit for Decentralized Applications. In: Energy & Fuels 31 (2), S. 2076ö2086. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.6b02793

Temperaturverlauf im Reaktor

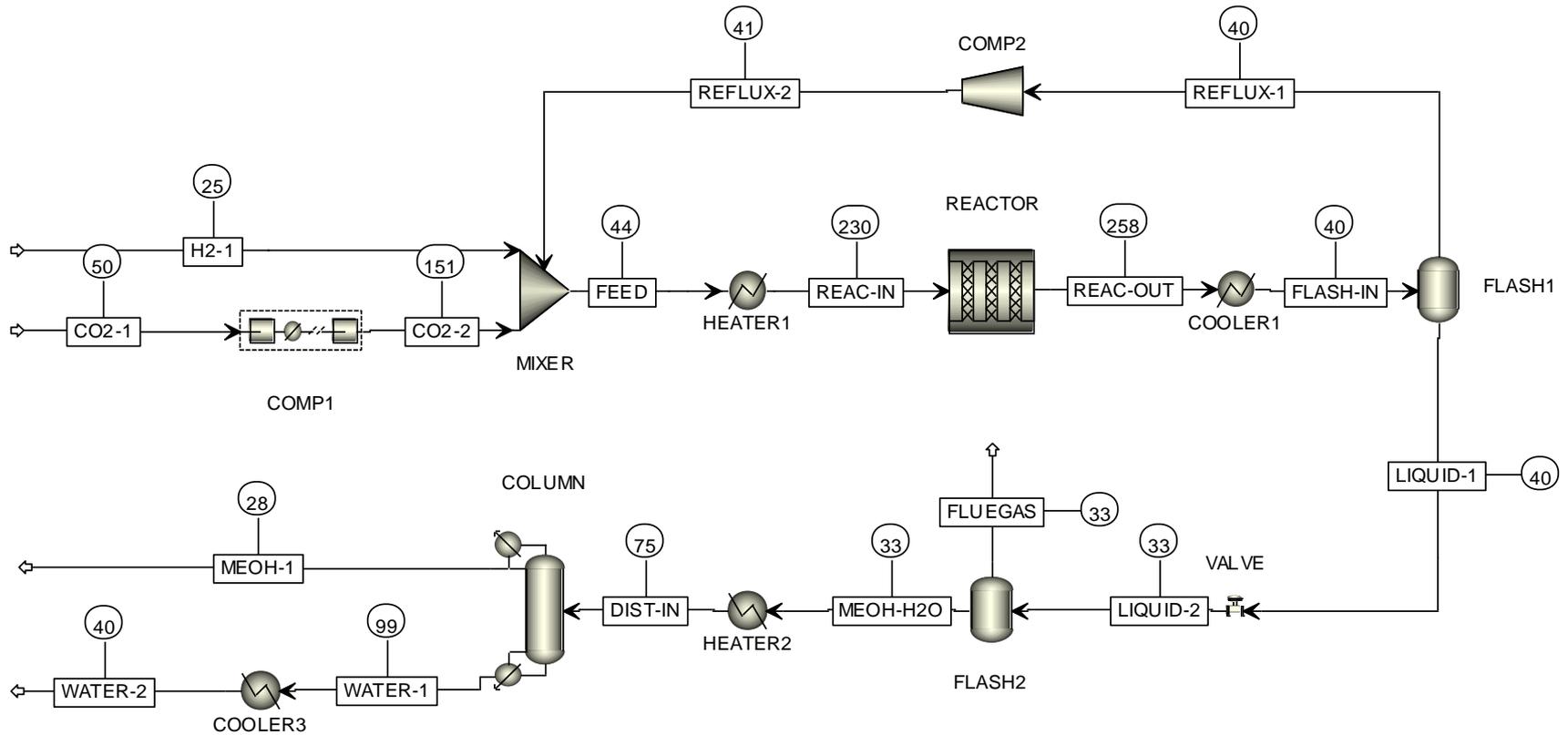


Molanteil im Reaktor





Atsonios, Konstantinos; Panopoulos, Kyriakos D.; Kakaras, Emmanuel (2016): Investigation of technical and economic aspects for methanol production through CO_2 hydrogenation. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 41 (4), S. 2202–2214. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.12.074.

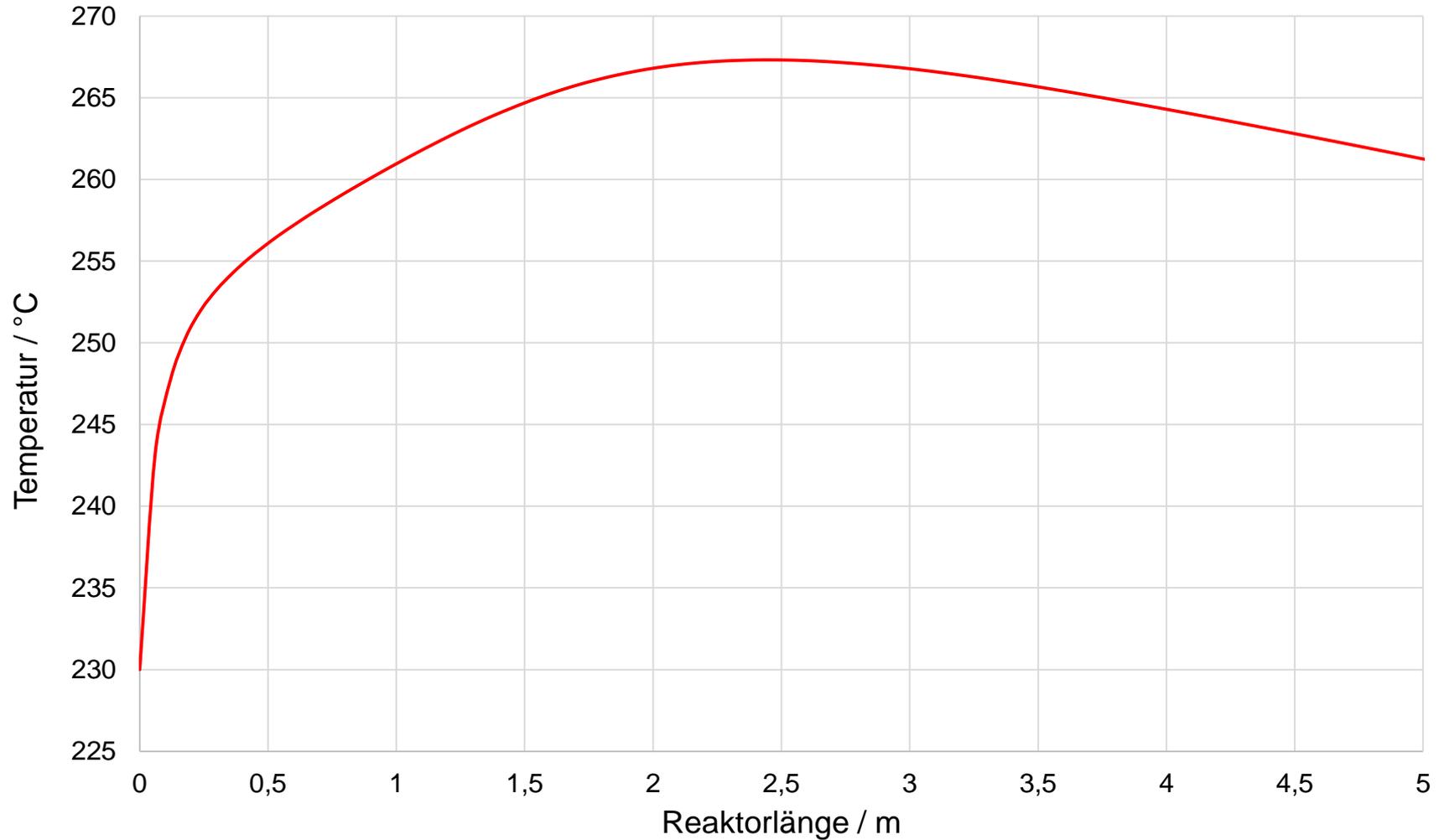


Rücklauf zu Feed: 80%
 Katalysator: Cu/ZnO/Al₂O₃
 Wärmeerzeugung: 1,3 MJ/kg_{SNG}
 Stromverbrauch: 0,145 kWh/kg_{SNG}

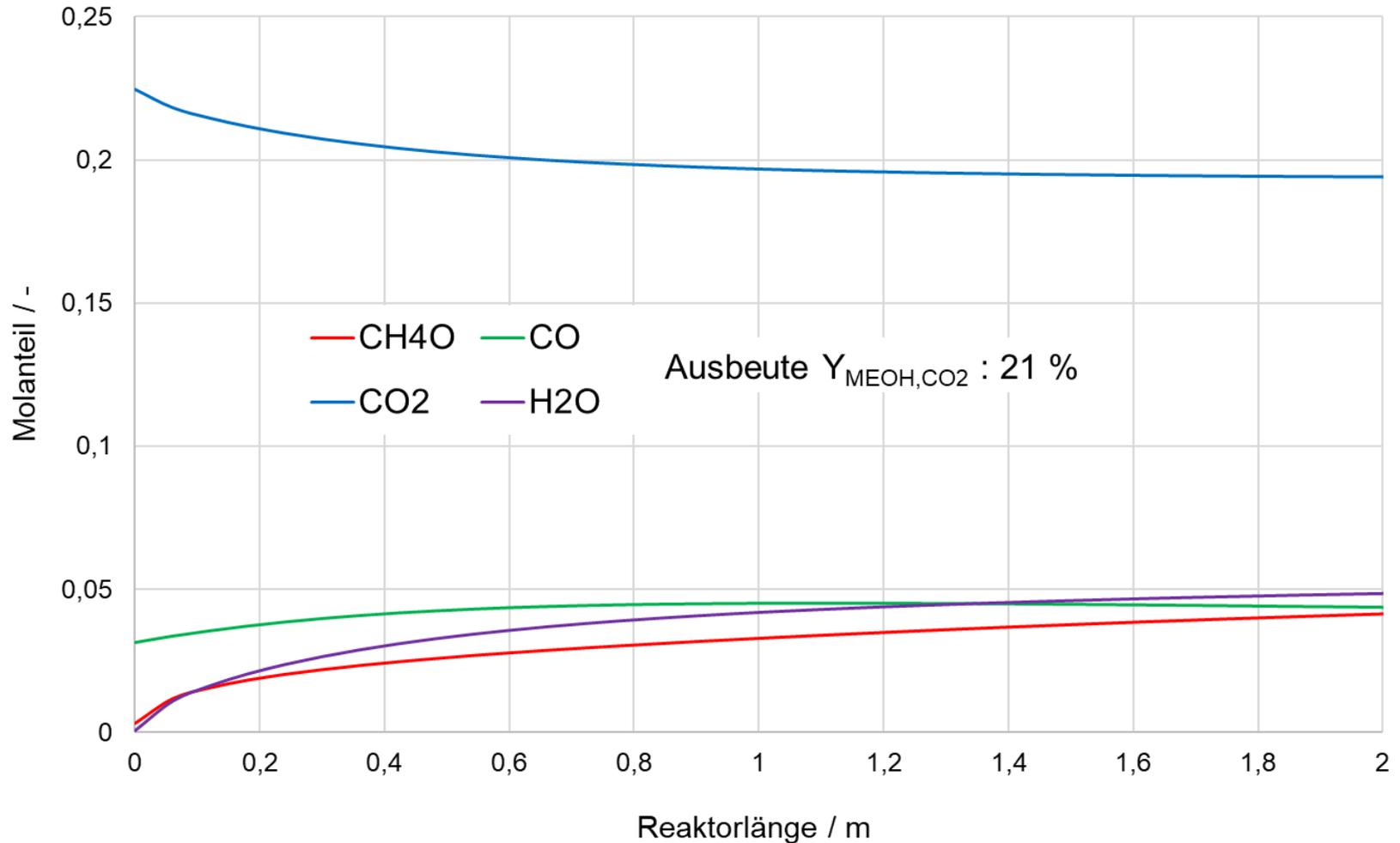
T: 230 – 270 °C
 p: 70 bar
 GHSV: 18000 h⁻¹

Van-Dal, Éverton Simões;
 Bouallou, Chakib (2013):
 Design and simulation of a
 methanol production plant
 from CO₂ hydrogenation. In:
Journal of Cleaner Production
 57, S. 38–45. DOI:
 10.1016/j.jclepro.2013.06.008.

Temperaturverlauf im Reaktor

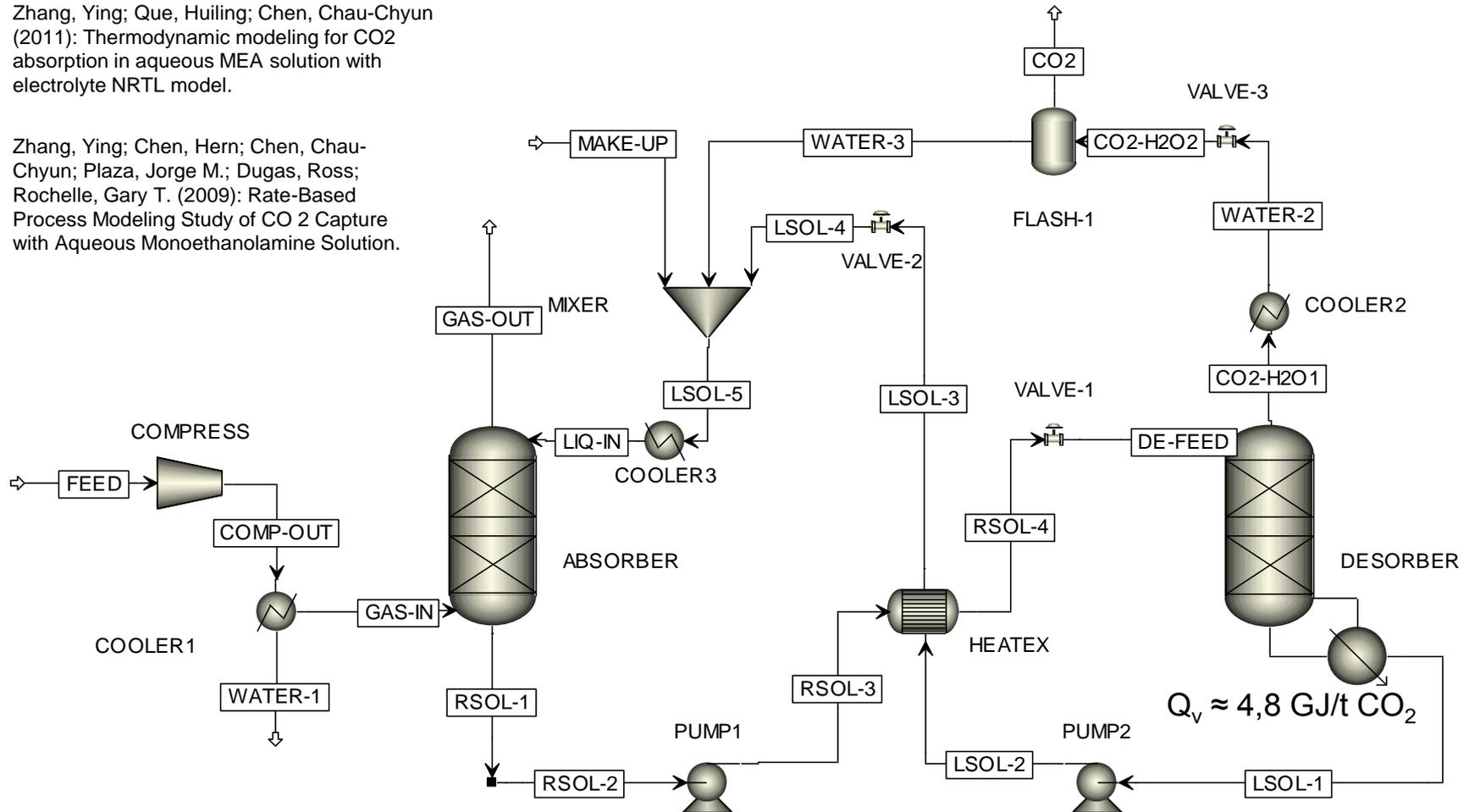


Molanteile im Reaktor



Zhang, Ying; Que, Huiling; Chen, Chau-Chyun (2011): Thermodynamic modeling for CO₂ absorption in aqueous MEA solution with electrolyte NRTL model.

Zhang, Ying; Chen, Hern; Chen, Chau-Chyun; Plaza, Jorge M.; Dugas, Ross; Rochelle, Gary T. (2009): Rate-Based Process Modeling Study of CO₂ Capture with Aqueous Monoethanolamine Solution.

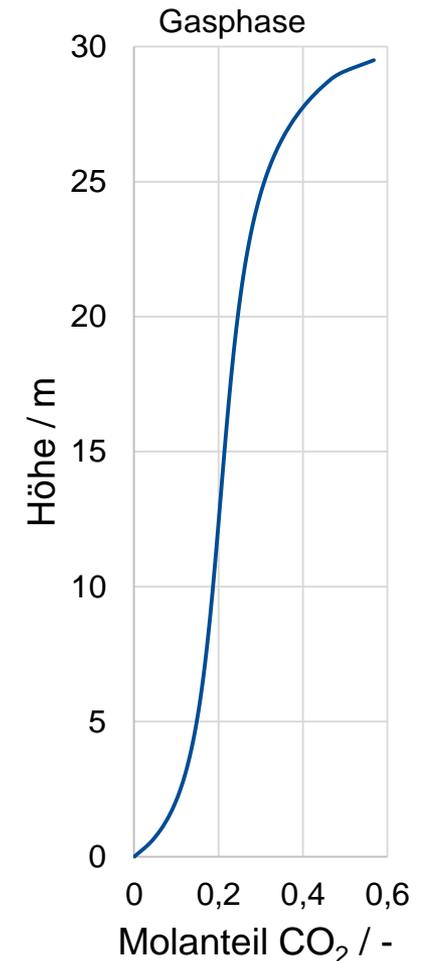
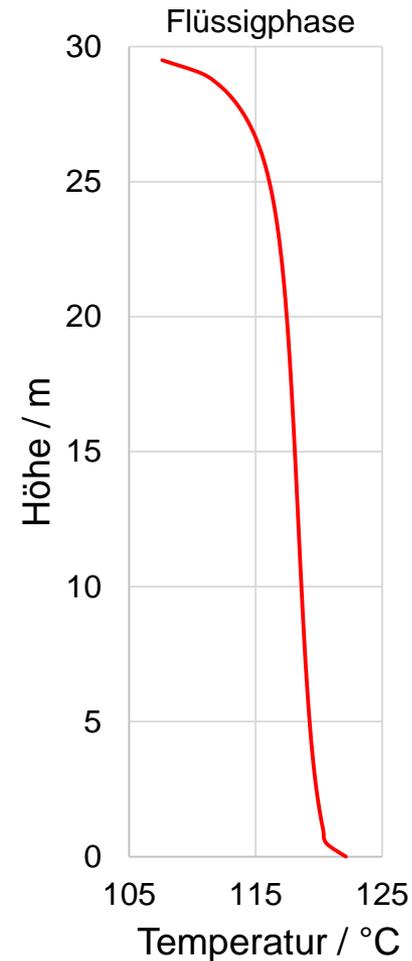
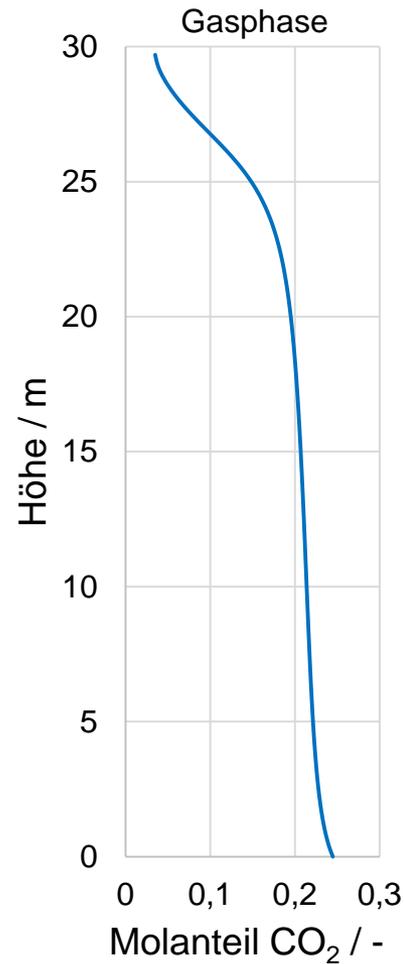
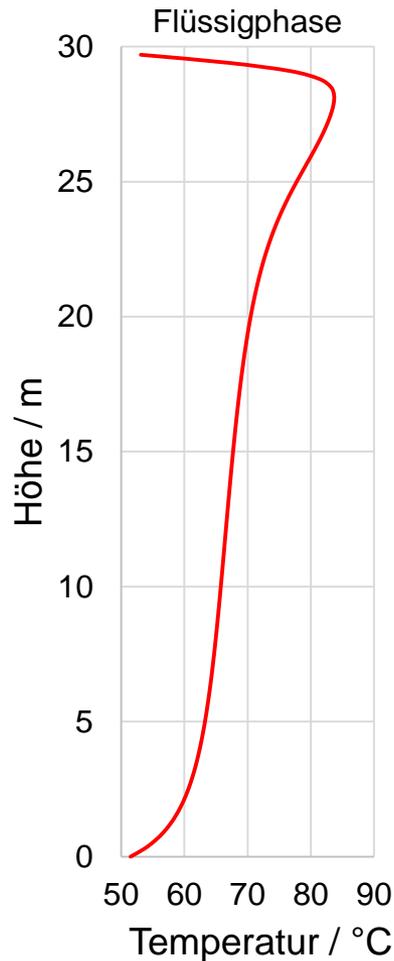


Waschmittel: 30% MEA-Lösung

Eingangsbelastung: 0,3 mol CO₂ / mol MEA

Absorber

Desorber



Eigenschaft	Methanisierung	Methanolsynthese	CO ₂ -Absorption
Druck / bar	10	70	1 – 1,8
Temperatur / °C	300 – 725 °C	230 – 270 °C	30 – 120 ° C
Stromverbrauch / kWh kg _{Produkt} ⁻¹	0,13	0,15	0,02
Wärmebedarf / kWh kg _{Produkt} ⁻¹	0,04	0,50	0,0013 (≈ 4,8 MJ/kg)
Kühlmittelbedarf / kWh kg _{Produkt} ⁻¹	4,15	0,94	-
H ₂ -Bedarf / kg kg _{Produkt} ⁻¹	0,47	0,19	-
CO ₂ -Bedarf / kg kg _{Produkt} ⁻¹	2,63	1,46	-
TRL	8-9	6-7	6-8

1	Begrüßung durch die TUM und die IUTA / Vorstellung der Teilnehmer
2	Präsentation Kalkwerk Oetelshofen
3	Vorstellung Zwischenergebnisse IUTA
4	Vorstellung Zwischenergebnisse TUM
5	Feedback und nächste Schritte
6	Besichtigung Kalkwerk
7	Verabschiedung

Von den Kennzahlen zur Wirtschaftlichkeit

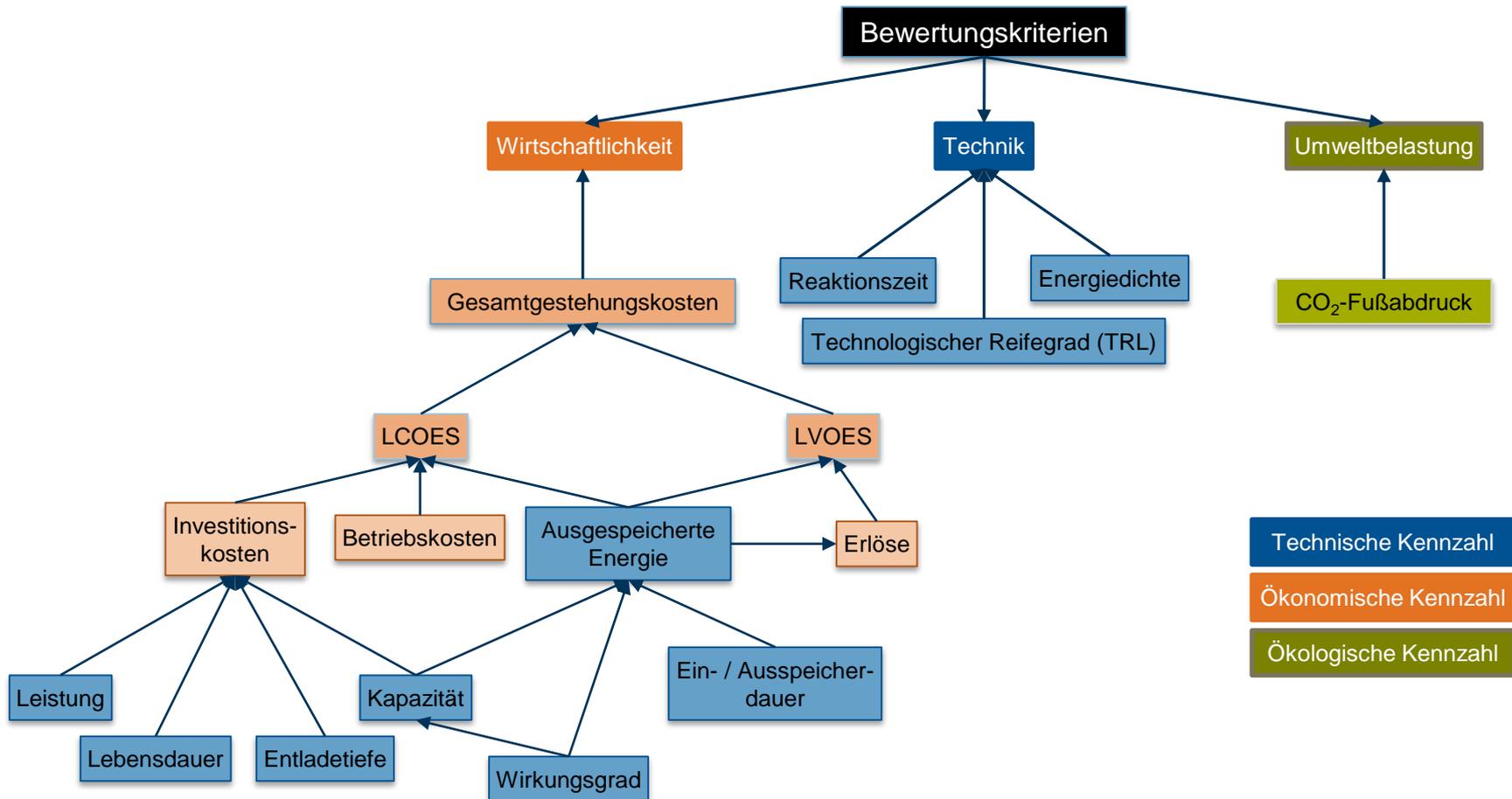
Arbeitspaket	Quartal / Projektjahr										Berichtsphase		
	1/I	2/I	3/I	4/I	1/II	2/II	3/II	4/II	1/III	2/III			
AP1: Datenerhebung für kmU-Netzwerk	■	■	■	■	■	■	■						
AP2: Speicherbedarf im Netzwerk				■	■	■	■						
AP3: Anfordern an das Ausspeichern						■	■	■	■				
AP4: Verfahrensketten chemischer Speicher			■	■	■	■	■	■	■				
AP5 energetische und ökologische Kennzahlen				■	■	■	■						
AP6: Investitionsausgaben und laufende Kosten					■	■	■	■	■				
AP7: funktionsbezogene Prozessanalyse							■	■	■	■			
AP8: Wirtschaftlichkeit und Zielkostenerreichung								■	■	■	■		
Schlussbericht												■	■

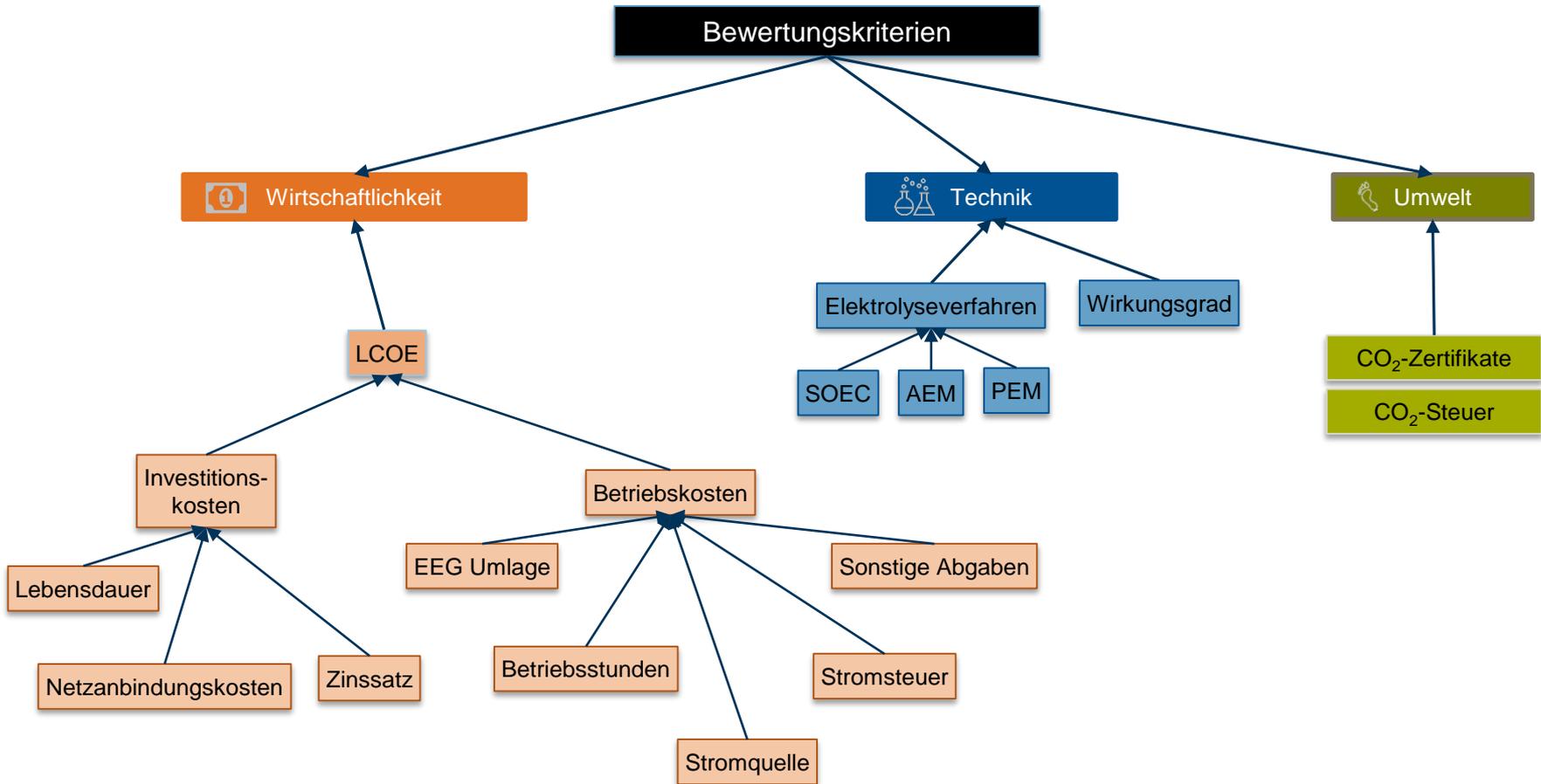
3. PA Sitzung

4. PA Sitzung

5. PA Sitzung









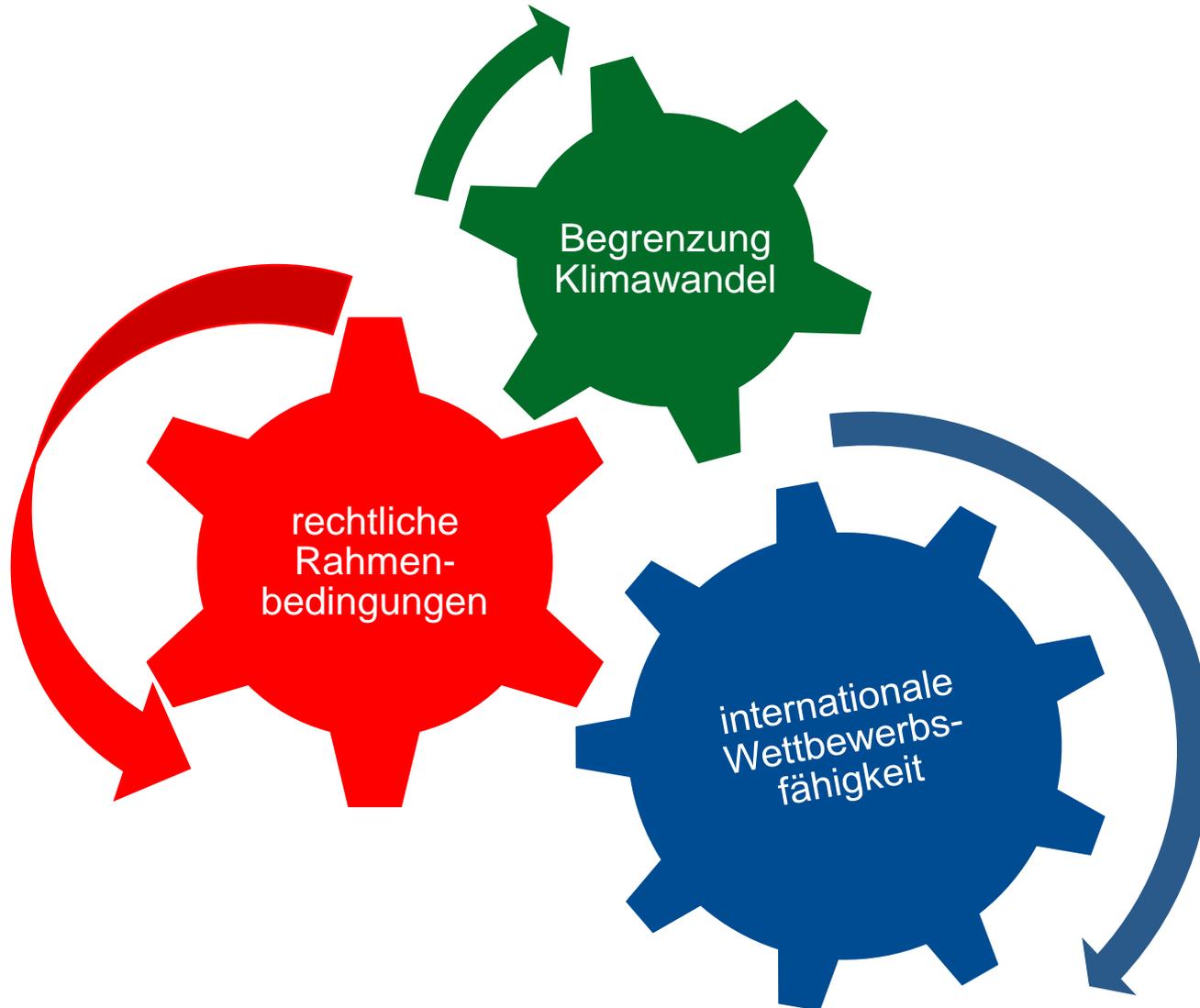
Präsentation der Bachelorarbeit: Rentabilität von Power-to-X Anlagen

Justus Schömann

Wuppertal, 3. Juli 2019



1	Begrüßung durch die TUM und die IUTA / Vorstellung der Teilnehmer
2	Präsentation Kalkwerk Oetelshofen
3	Vorstellung Zwischenergebnisse IUTA
4	Vorstellung Zwischenergebnisse TUM
5	Feedback und nächste Schritte
6	Besichtigung Kalkwerk
7	Verabschiedung



Ziel: realistische Bepreisung der Auswirkungen des Klimawandels und Anreiz zur CO₂-Minderung



Mögliche Instrumente:

- Anpassung des Emissionshandels (CO₂-Zertifikate)
- CO₂-Steuer
- Klimapfand auf Produkte
- ...



Steigerung der Wirtschaftlichkeit von PtX:

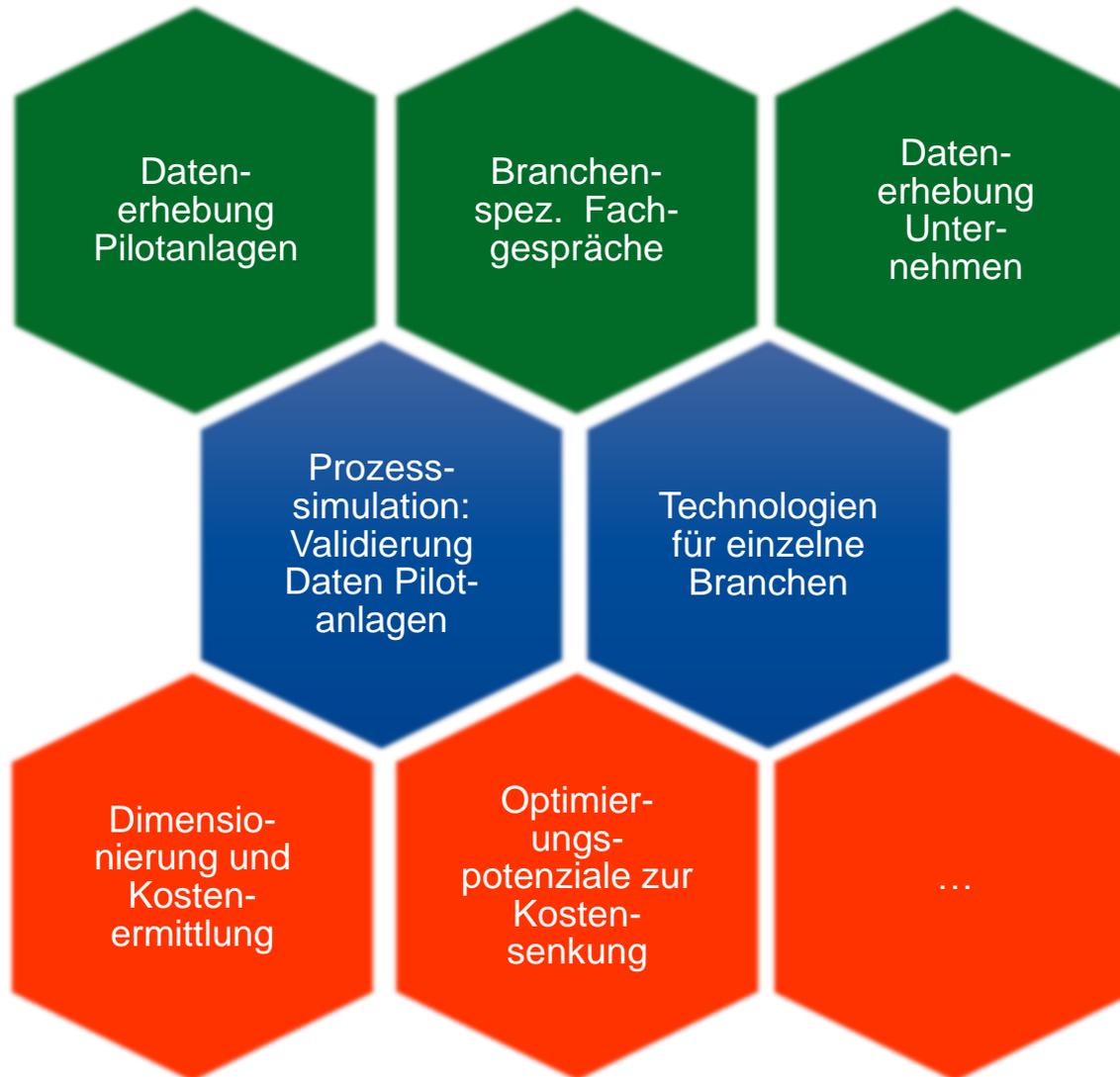
- Hemmnisabbau beim Energiebezug: Steuern und Abgaben
- Vergütungssystem für synth. H₂, CH₄, CH₃OH
- Investitionszuschuss/Betriebskostenzuschuss
- steigende Nachfrage mit Umbau der Industrie (neue Produktionsverfahren, keine fossilen Quellen)
- ...



Projektlaufzeit: 01.10.2017 bis 30.03.2020

Arbeitspaket	Quartal / Projektjahr										Berichtsphase		
	1/I	2/I	3/I	4/I	1/II	2/II	3/II	4/II	1/III	2/III			
AP1: Datenerhebung für kmU-Netzwerk	■	■	■	■	■	■	■						
AP2: Speicherbedarf im Netzwerk				■	■	■	■						
AP3: Anfordern an das Ausspeichern						■	■	■					
AP4: Verfahrensketten chemischer Speicher			■	■	■	■	■	■					
AP5: energetische und ökologische Kennzahlen				■	■	■	■	■					
AP6: Investitionsausgaben und laufende Kosten					■	■	■	■	■				
AP7: funktionsbezogene Prozessanalyse							■	■	■	■			
AP8: Wirtschaftlichkeit und Zielkostenerreichung								■	■	■	■		
Schlussbericht												■	■

Stand: November 2018



1	Begrüßung durch die TUM und die IUTA / Vorstellung der Teilnehmer
2	Präsentation Kalkwerk Oetelshofen
3	Vorstellung Zwischenergebnisse IUTA
4	Vorstellung Zwischenergebnisse TUM
5	Feedback und nächste Schritte
6	Besichtigung Kalkwerk
7	Verabschiedung



**Vielen Dank für
ihre Teilnahme !**



**Wir würden uns freuen, Sie auch auf der
nächsten PA Sitzung begrüßen zu dürfen.**