

Herzlich Willkommen!

RePoSe-Symposium

P2X in der Praxis: E-Fuel-Produktion
unter schwankendem Stromangebot

House of Logistics and Mobility (HOLM) in Frankfurt

4. Juni 2025



Agenda

1 Überblick über den Erneuerbare-Energien-Markt: Stromerzeugung und Wasserstoff-Produktion

Dr. Martin Müller, Forschungszentrum Jülich

2 Strategien der flexiblen Wasserstoffspeicherung

Jonas Höckner, EWE Gasspeicher

3 Voraussetzungen für den flexiblen Betrieb einer PtL-Anlage: Steuerungsalgorithmen & Stromprognosen

Dr. Alexander Zschocke, CENA Hessen

4 Praktische Erfahrungen mit dem flexiblen Betrieb einer PtL-Anlage im Projekt RePoSe

Alexander Irslinger, INERATEC GmbH

5 Materialbeanspruchung bei flexiblem Betrieb

Dr. Thomas Pfeiffer, Fraunhofer LBF

6 Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit: Lebenszyklusanalyse

Prof. Dr. Ralf Ehret, Provadis Hochschule

7 Panel

PtX Lab Lausitz, INERATEC GmbH, ABO Energy, Hochschule RheinMain

8 Wrap Up

Provadis Hochschule

Lunch & Networking Break

Überblick über den Erneuerbare-Energien-Markt: Stromerzeugung und Wasserstoff-Produktion

Dr. Martin Müller, Forschungszentrum Jülich



Vortrag 1 | Forschungszentrum Jülich

Vortrag 2 | EWE Gasspeicher

Vortrag 3 | CENA Hessen

Vortrag 4 | INERATEC GmbH

Vortrag 5 | Fraunhofer LBF

Vortrag 6 | Provadis Hochschule

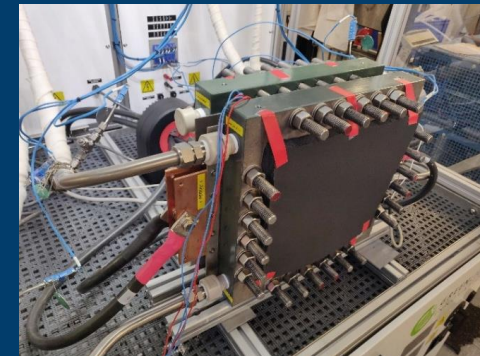
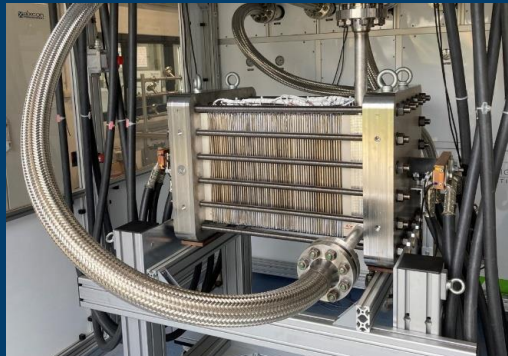
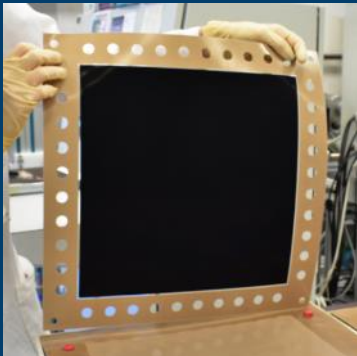
Panel

Wrap Up

ELEKTROLYSE IN VERSORGUNGSSYSTEMEN AUF BASIS ERNEUERBARER ENERGIE

ÜBERSICHT DER ELEKTROLYSETECHNOLOGIEN

04.06.2025 M. MÜLLER, H. JANSSEN, F. LOHMANN-RICHTERS, A. MECHLER, R. PETERS, F. SCHEEPERS, M. STÄHLER, ...



GLIEDERUNG

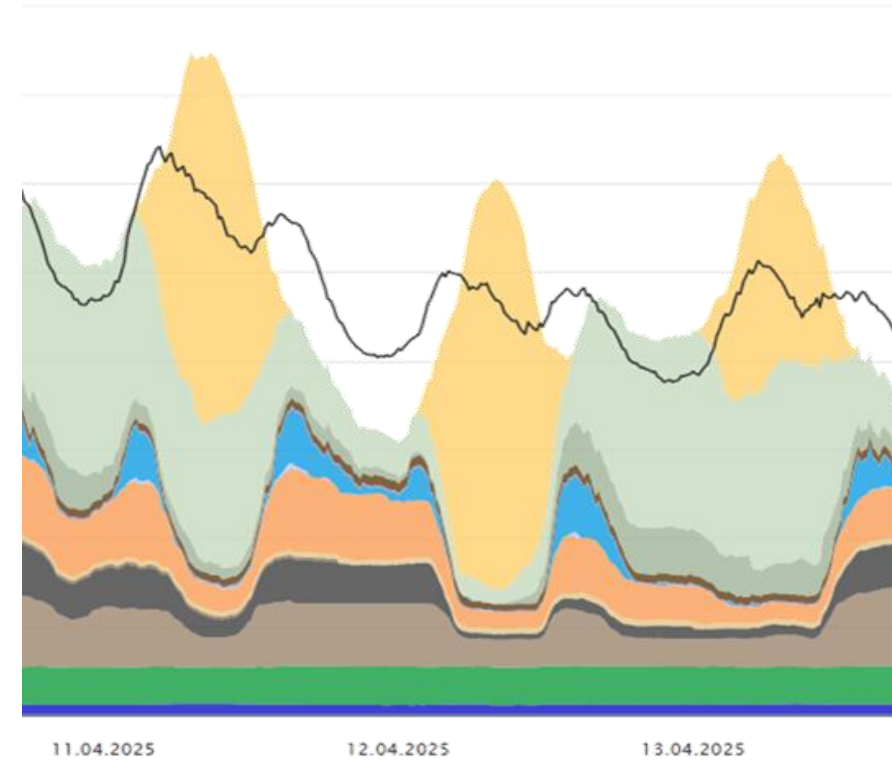
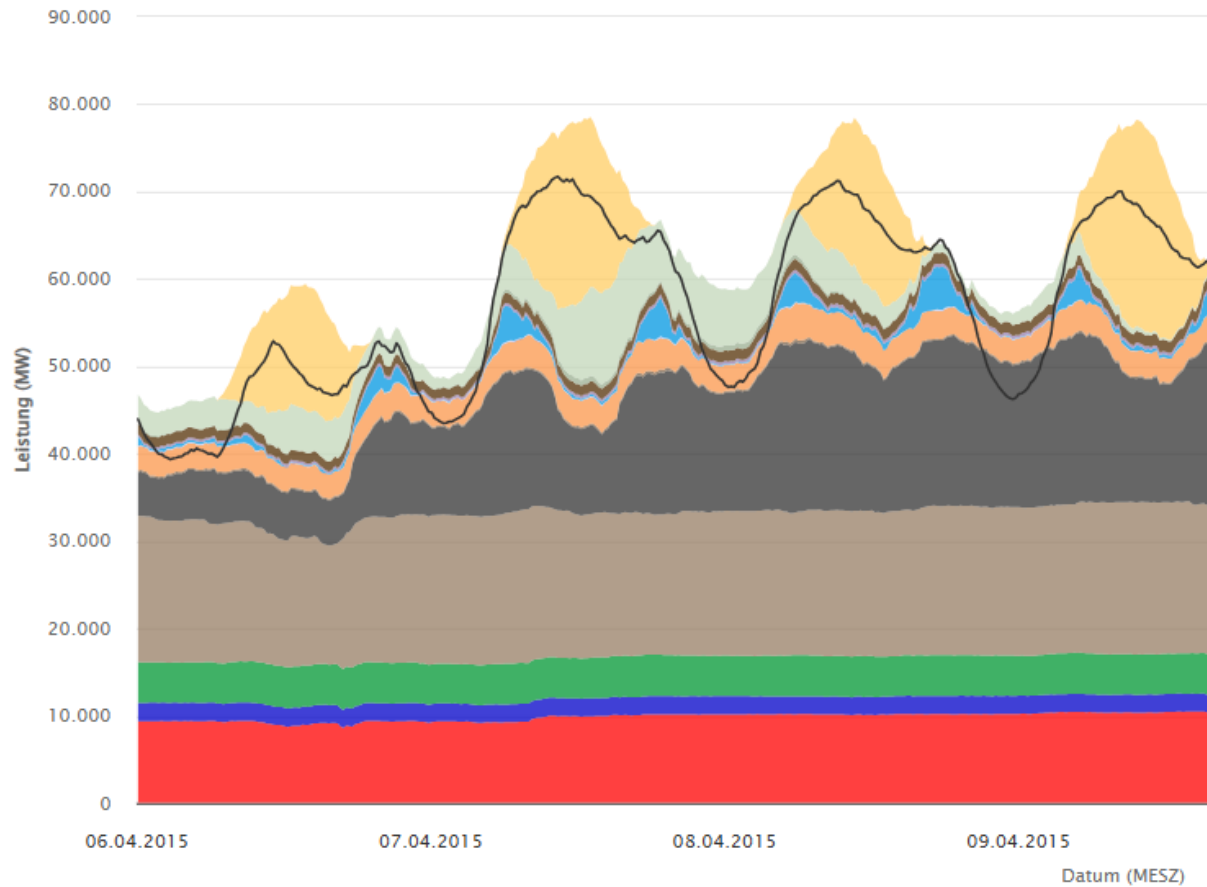
Elektrolyse in Versorgungssystemen auf Basis Erneuerbarer Energien

- Wandel in der Erzeugung elektrischer Energie in Deutschland
- Status der Elektrolysetechnologien
 - Polymer Elektrolyt Elektrolyse - PEMEL
 - Alkalische Elektrolyse - AEL
 - Hochtemperatur Elektrolyse - SOE
- Zukünftige Entwicklungen
 - AEL & AEL at elevated temperatures with advanced diaphragm
 - AEM with advanced membranes and catalysts
 - CO₂-Elektrolyse bei niedrigen Temperaturen
- Zusammenfassung

ENTWICKLUNG DES ELEKTRISCHES ENERGIESYSTEMS

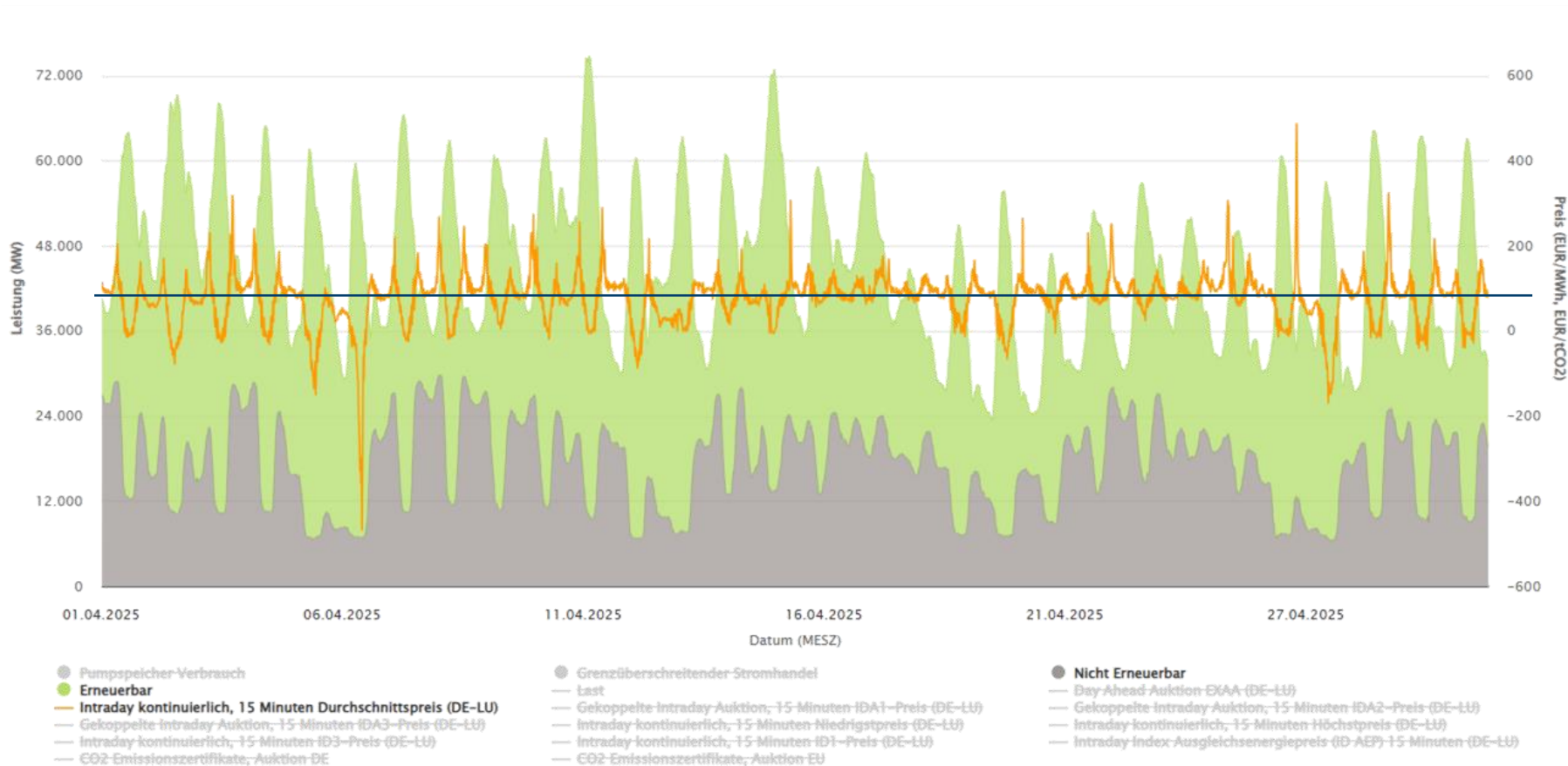
Erzeugungsleistung im April 2010

April 2025



ELEKTRISCHES ENERGIESYSTEM

Strompreis im April 2025



Energy-Charts.info - letztes Update: 15.05.2025, 10:32 MESZ

Der durchschnittliche volumengewichtete Day-Ahead Börsenstrompreis ging 2024 um 15,5 % zurück auf 7,8 Cent/kWh

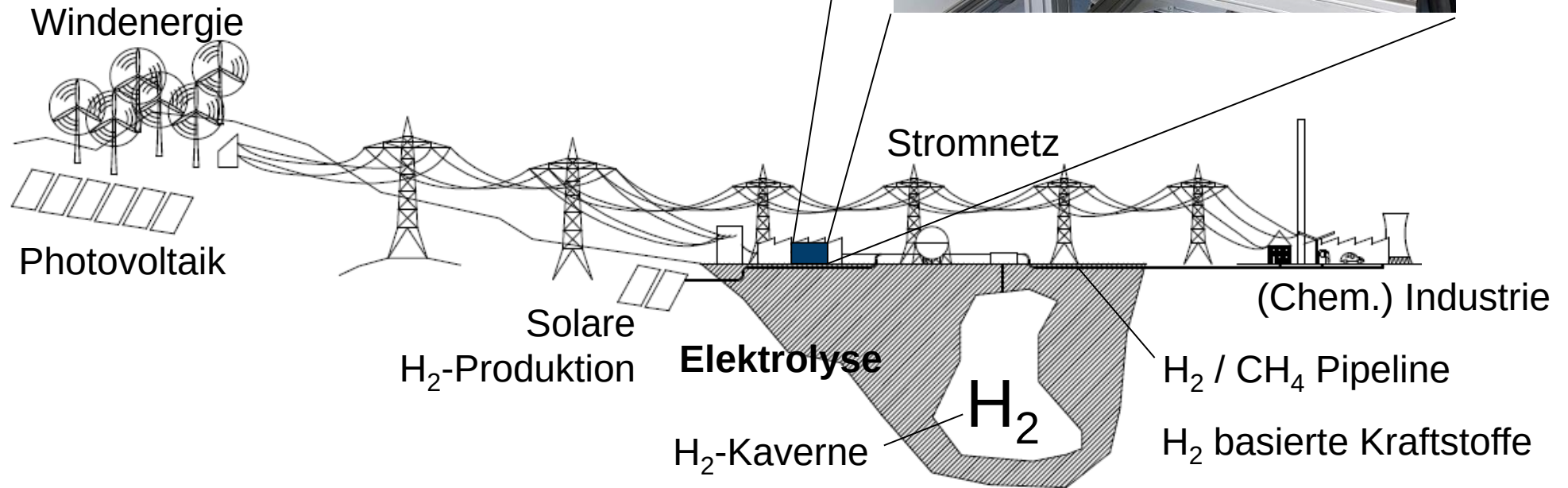
WASSERSTOFF IM ENERGIESYSTEM

Elektrolyse eröffnet neue Nutzungs- und Speicherpfade

Die Elektrolyse ermöglicht, über die Erzeugung von Wasserstoff und Sauerstoff, elektrische Energie in einen chemischen Energieträger zu überführen. Damit kann in der Energieversorgung die Dynamik der Erzeugung zumindest in Teilen kompensiert werden.

Heizwert von gasförmigem Wasserstoff (H_2):

- 3,00 kWh/Nm³
- 33,33 kWh/kg



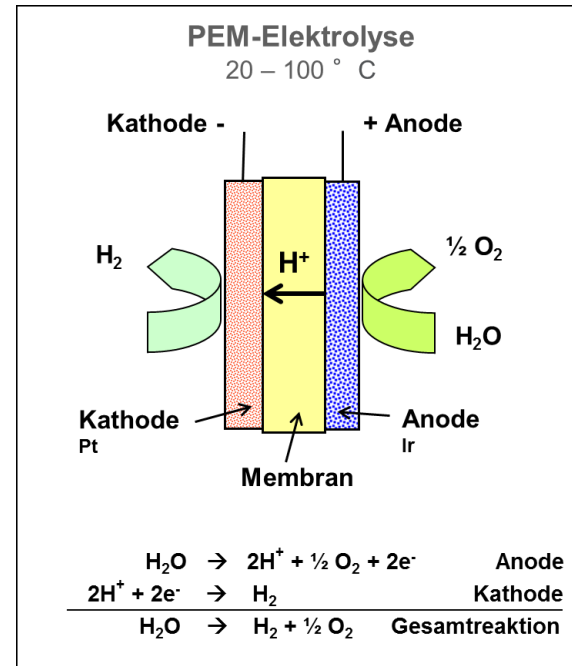
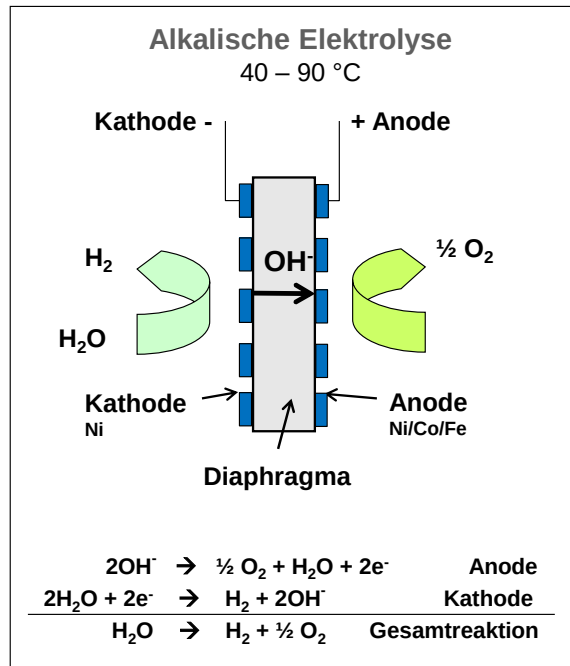
Müller, M.; Friedrich, A.; van der Krol, R.; Hebling, C.; Groß, B.; Schmid, A.; Brinner, A., F&E-Perspektiven der Wasserstoff-Technologien, FVEE Jahrestagung, Berlin, 2016

Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

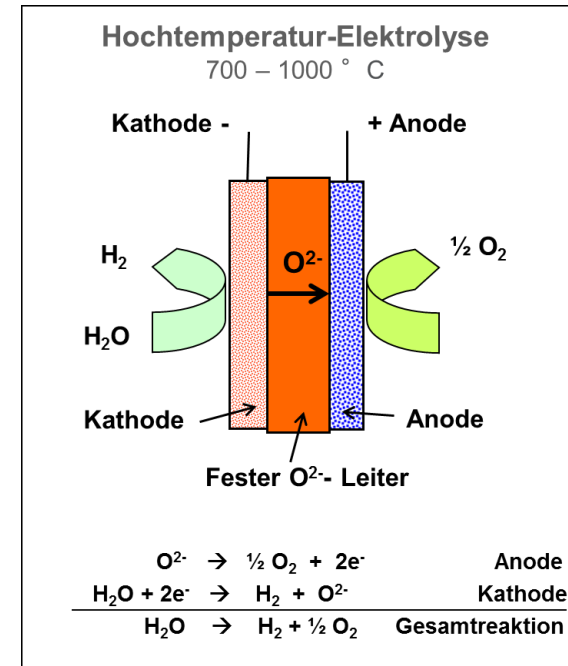
ÜBERSICHT ELEKTROLYSETECHNOLOGIEN

In diesen Technologien hat die Kommerzialisierung bereits gestartet

Module im MW-Maßstab verfügbar



Module im multi kW-Maßstab verfügbar

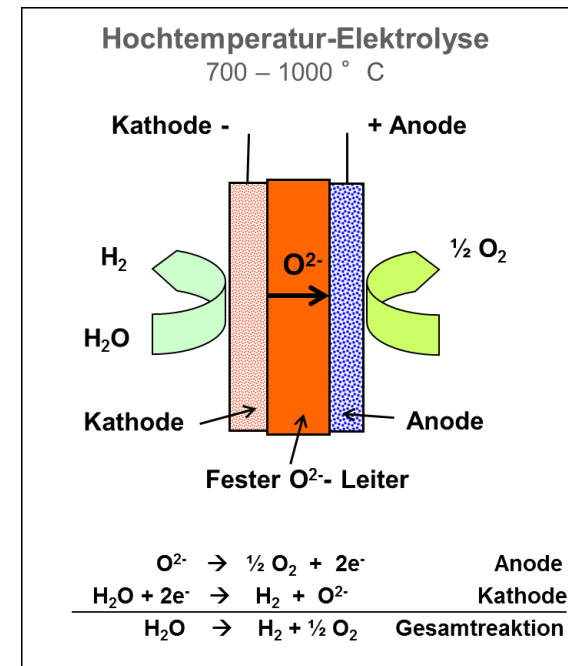
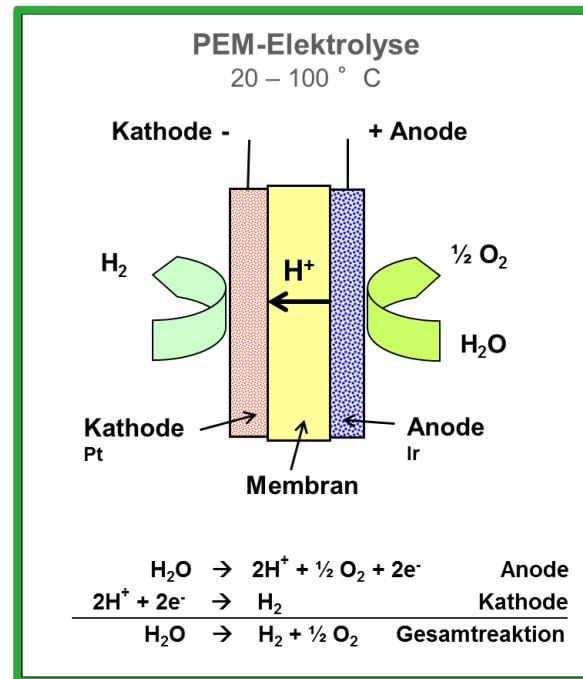
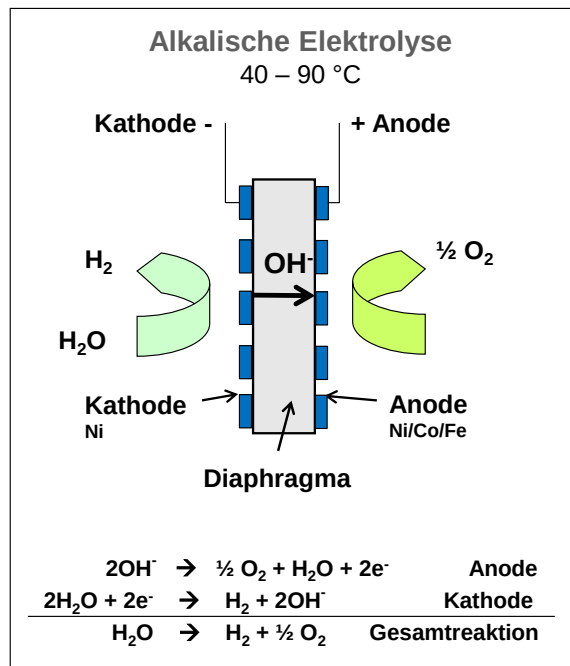


Wasserstoff und Brennstoffzelle - Technologien und Marktperspektiven, Springer (Berlin), 2017

Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

PEM-ELEKTROLYSE

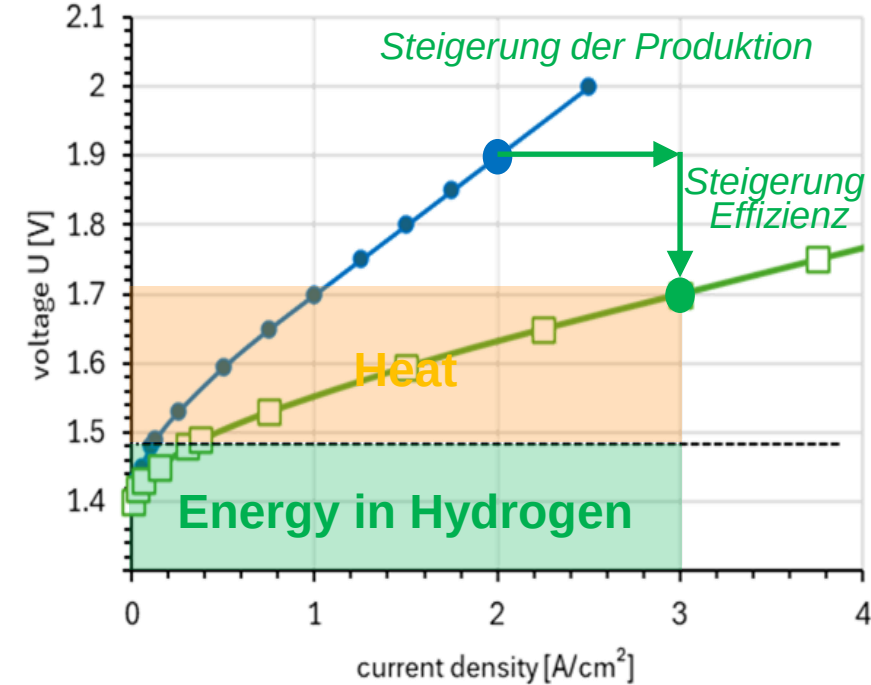
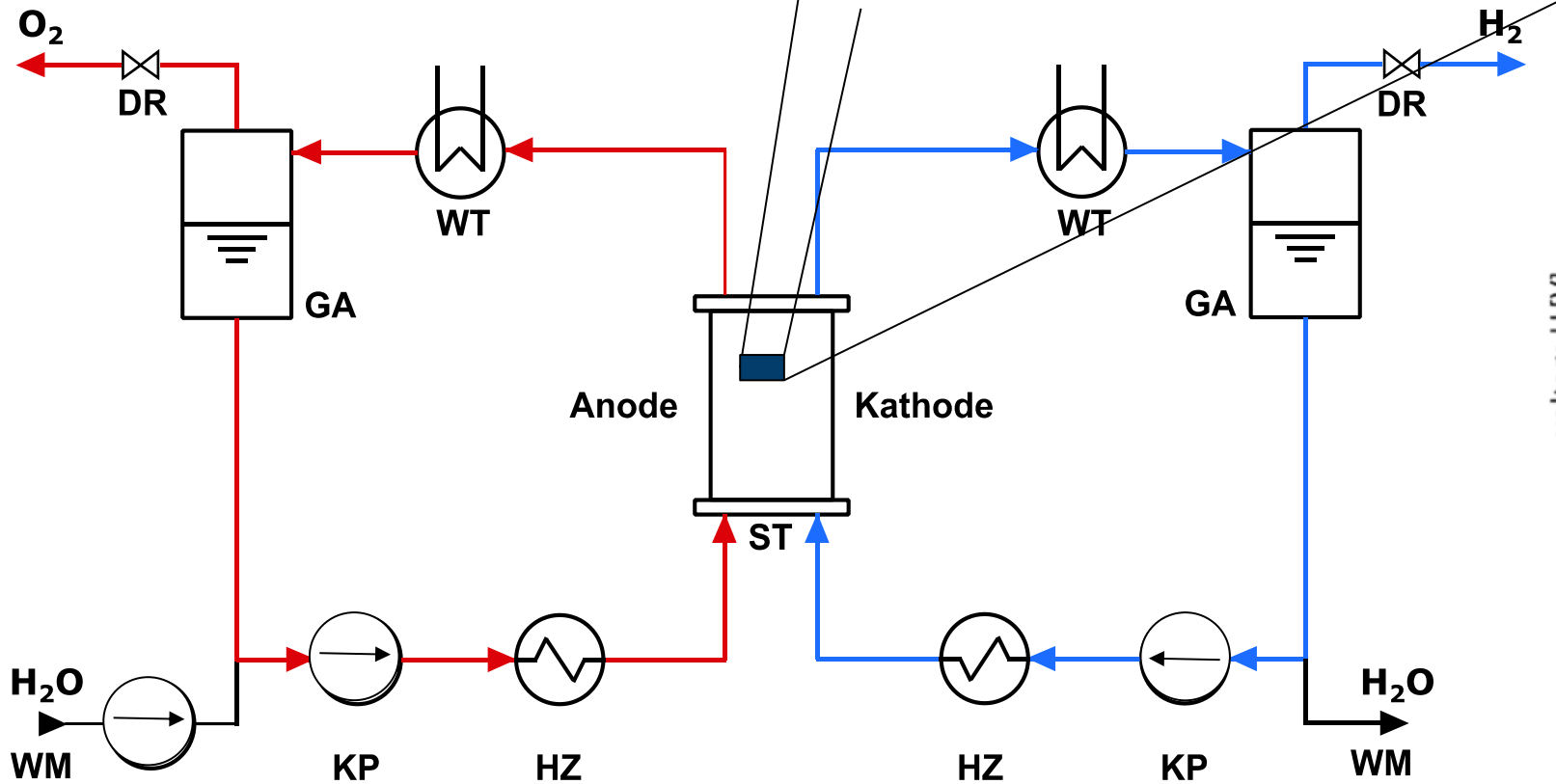
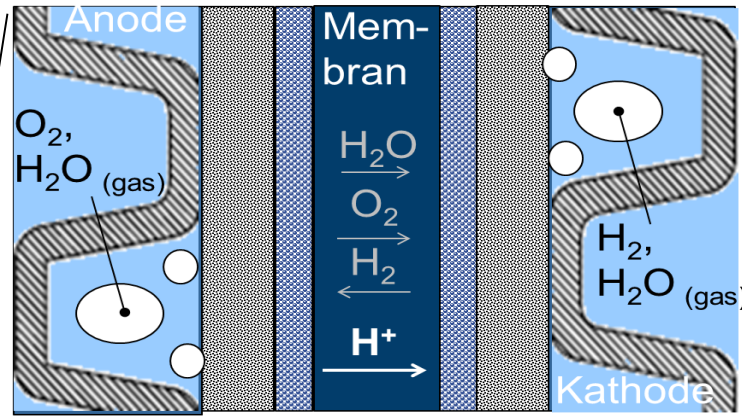
Hohe Leistungsdichte und Betrieb mit reinem Wasser dank protonenleitender Polymermembran. Edelmetallkatalysatoren sind notwendig. Die Membran ist typischerweise aus PFAS haltigen Materialien aufgebaut.



Wasserstoff und Brennstoffzelle - Technologien und Marktperspektiven, Springer (Berlin), 2017

PEM-ELEKTROLYSE

Systemaufbau und -funktion



PEM-ELEKTROLYSE – “ENERGIEPARK MAINZ”

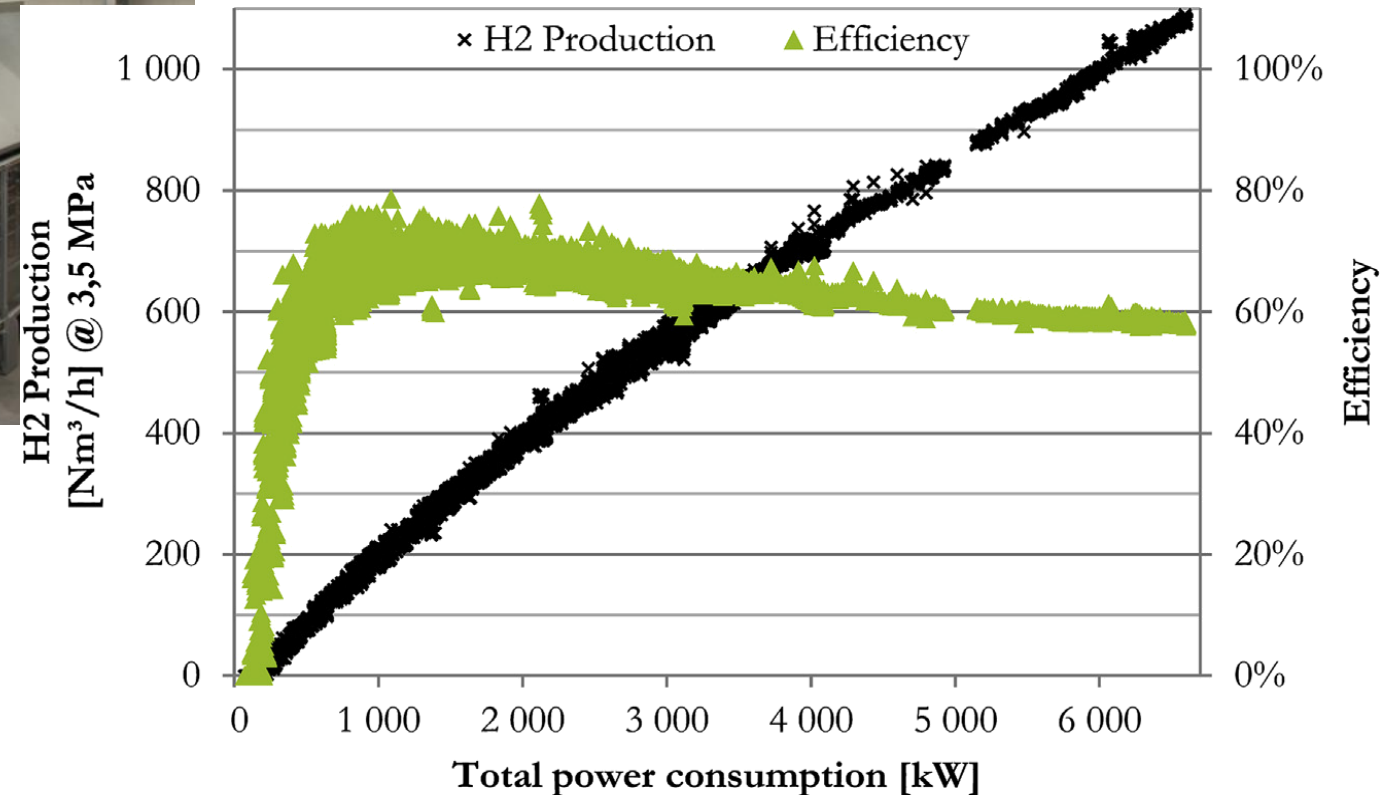


- **3 SILYZER**
200 PEM-Elektrolysestacks
- 1.3 MW Dauerleistung /
2.0 MW zeitlich begrenzte Spitzenleistung
- Hohe Dynamik: Lastwechsel in Sekunden,
in weiten Grenzen teillastfähig
- 35 bar Ausgangsdruck

Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

Projektpartner:

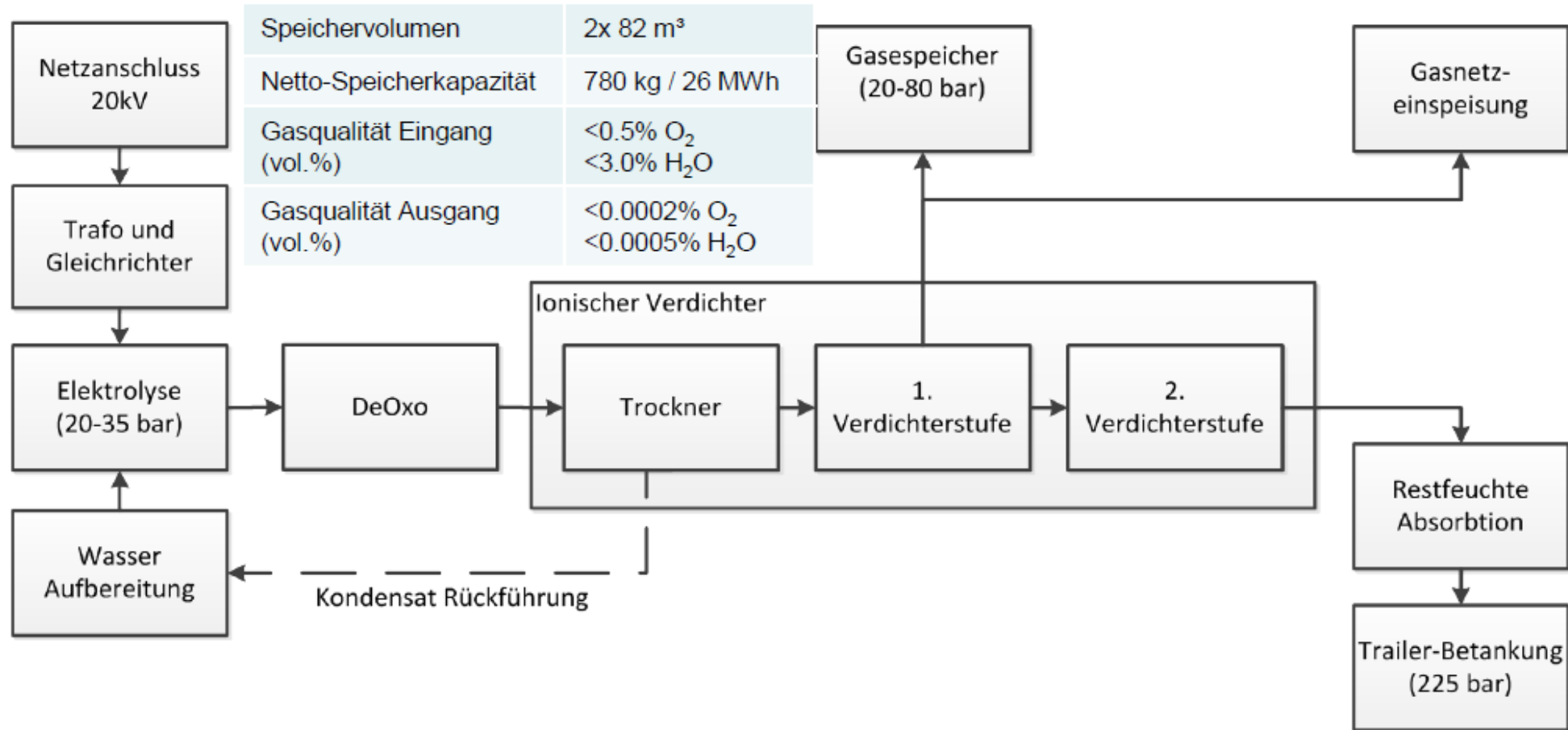
Hochschule RheinMain, Siemens AG, Linde AG,
Mainzer Stadtwerke AG



Quelle: Energiepark Mainz: Technical and economic analysis of the worldwide largest Power-to-Gas plant with PEM electrolysis. M. Kopp, et al. Journal of Hydrogen Energy 2017

ENERGIEPARK MAINZ – PEM-SYSTEM

Gasaufbereitung



PEM-ELEKTROLYSE

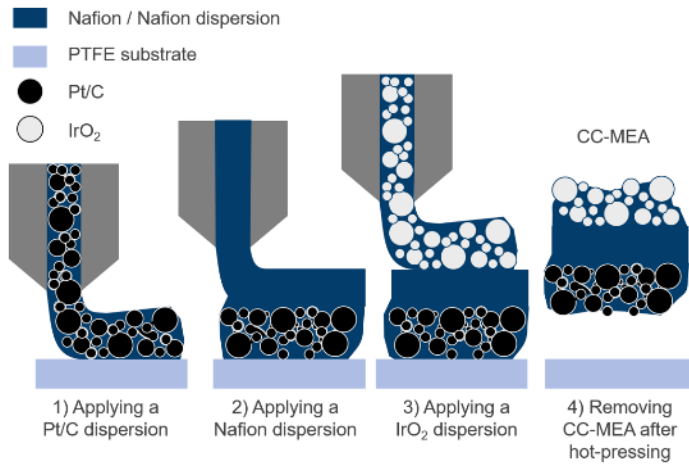
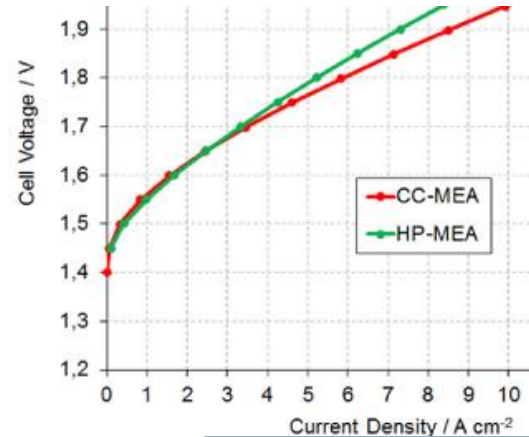
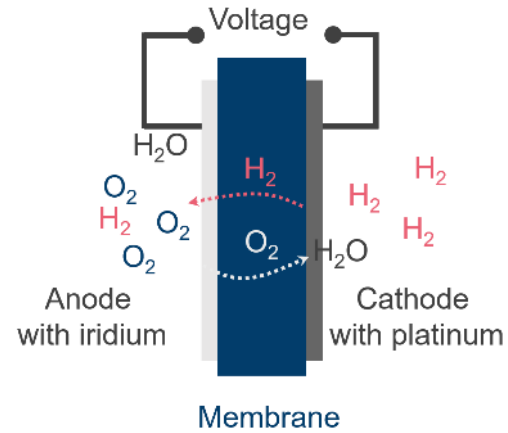
Ausgewählte Hersteller



Hersteller	Typ	Leistung [MW]	Leistungs- spanne [%]	H ₂ Produktion [m ³ /h]	Betriebsdruck [bar]	Energieverbr. [kWh/Nm ³ H ₂]
BOSCH / D	Hybrion Stack	1,25		256	>30 (Differenz)	4,5
Siemens / D	Elyzer P-300	17,5		3726	0,1	~4,7
NEL/ US & N	MC500	2,5	10-100	200	30 (Differenz)	5,1
ITM Power / UK	Neptune V	5	12,5-100	214	30 (Differenz)	5,02
QuestOne / D	ME450	1	20-100	210	15-30 (Differenz)	4,8

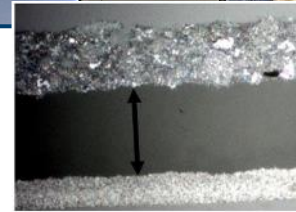
ADVANCED MEA-MANUFACTURING TECHNIQUES PEMEL

PEMEL Smart Manufacturing



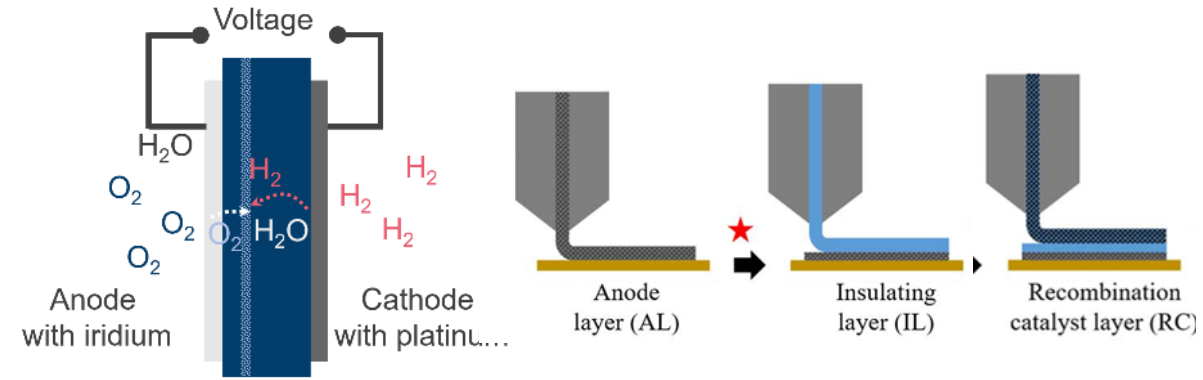
M. Stähler et al 2019 International Journal of Hydrogen Energy 44, 7053-7058

Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

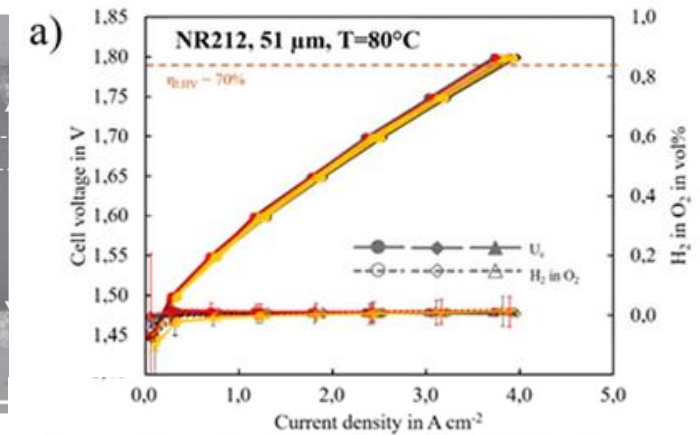
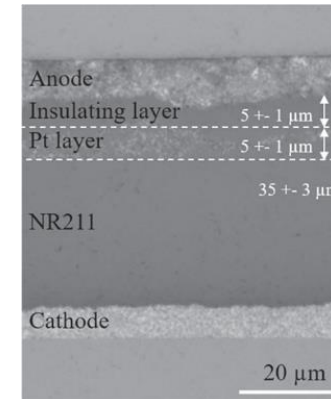


Quelle: Forschungszentrum Jülich

Integration Recombination Catalysts



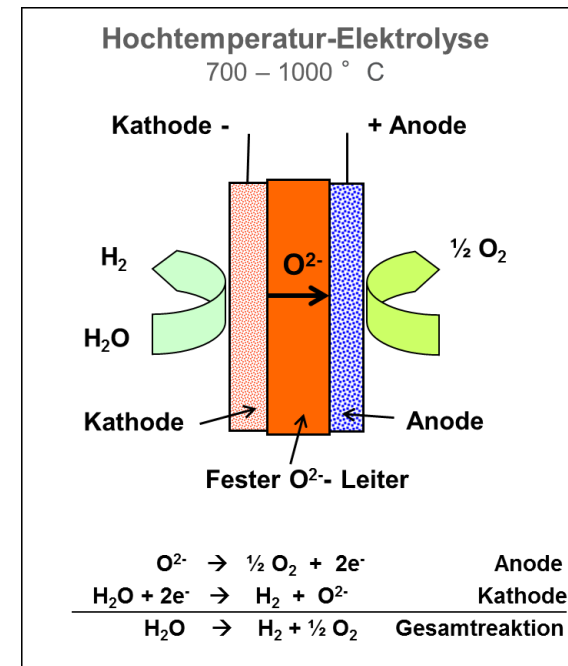
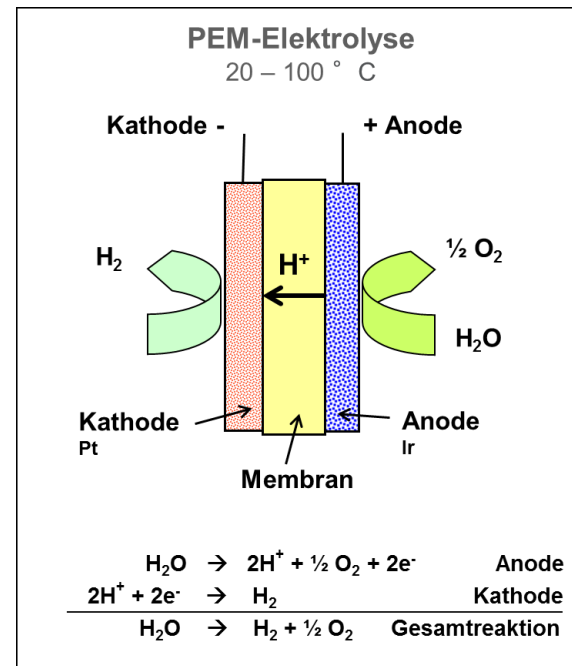
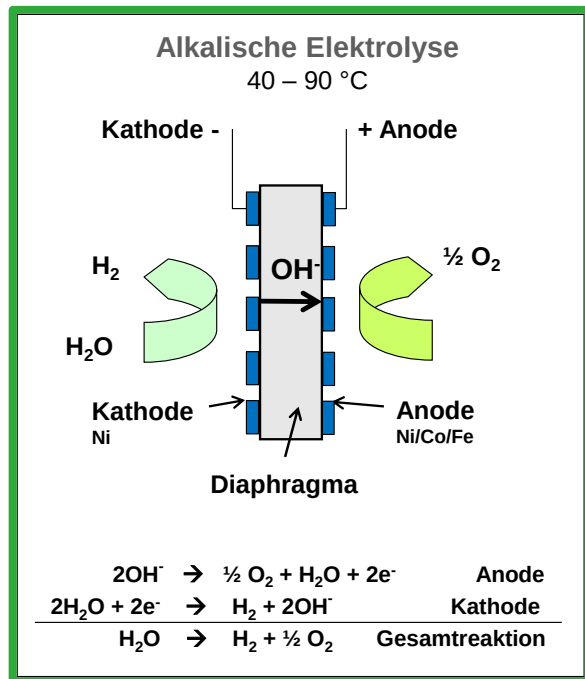
A. Stähler et al 2022 J. Electrochem. Soc. 169 034522



- Less PFAS
- High performance

ALKALISCHE ELEKTROLYSE

In der Chemieindustrie großskalig etablierte Technologie, Betrieb mit (Kali-)Lauge, Edelmetallfreie bzw. -arme Katalysatoren

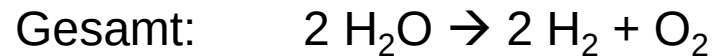
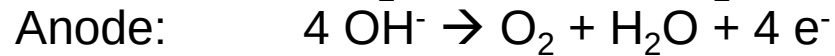
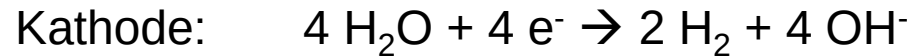
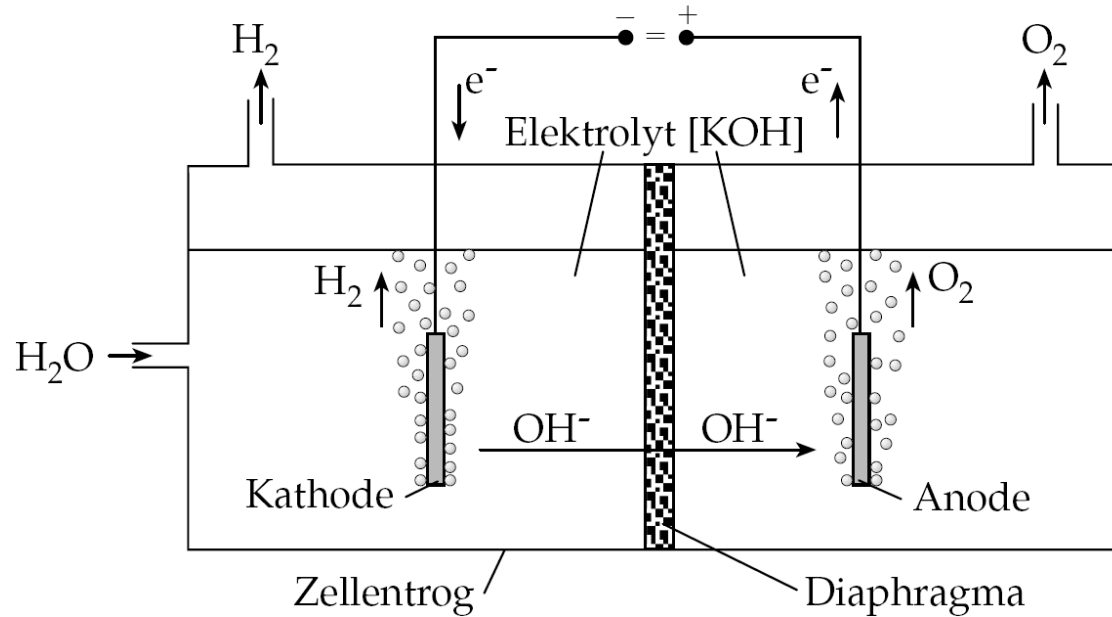


Wasserstoff und Brennstoffzelle - Technologien und Marktperspektiven, Springer (Berlin), 2017

Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

ALKALISCHE ELEKTROLYSE

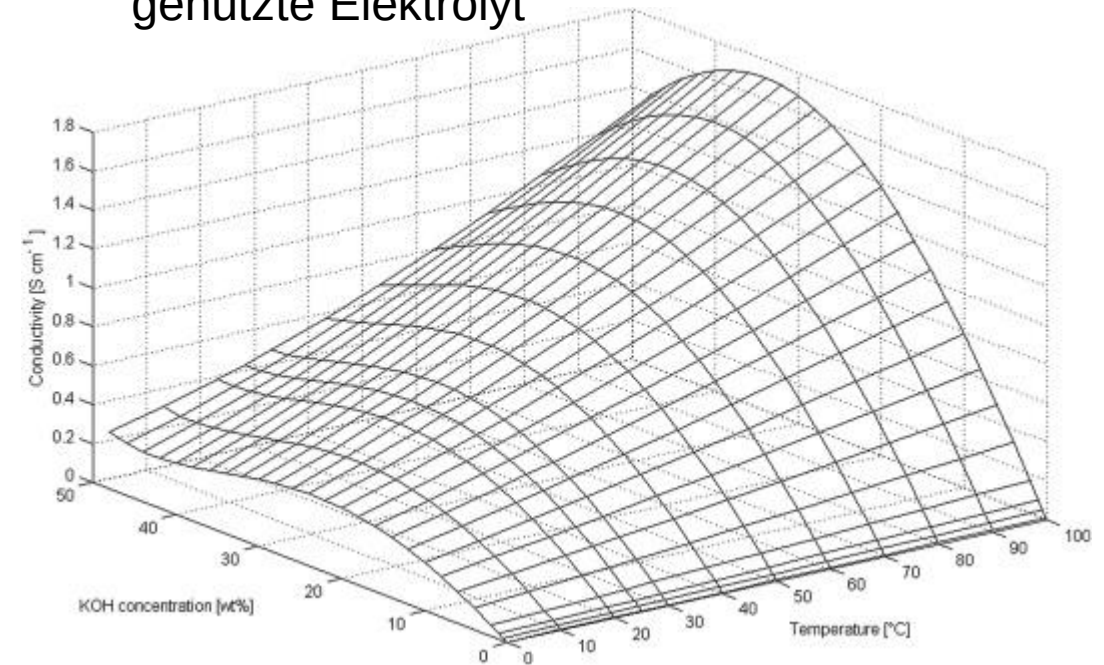
Zellaufbau und Funktionsschema



Kalilauge ist flüssiger
Elektrolyt



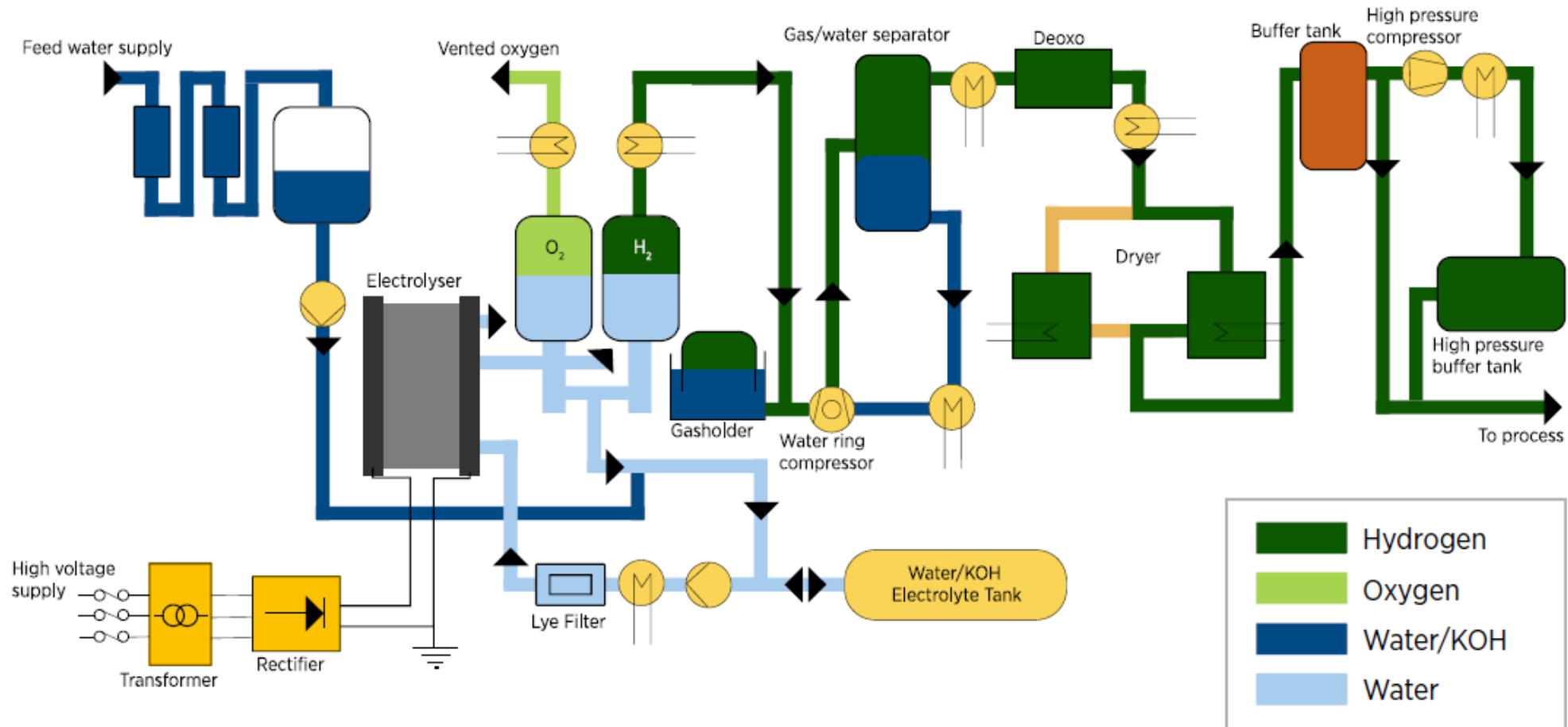
30 Gew.-% KOH ist der meist
genutzte Elektrolyt



F. Allebrod, C. Chatzichristodoulou, P. Møllerup, M. Mogensen, Electrical conductivity measurements of aqueous and immobilized potassium hydroxide, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 37, Issue 21, 2012, Pages 16505-16514, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.02.088>.

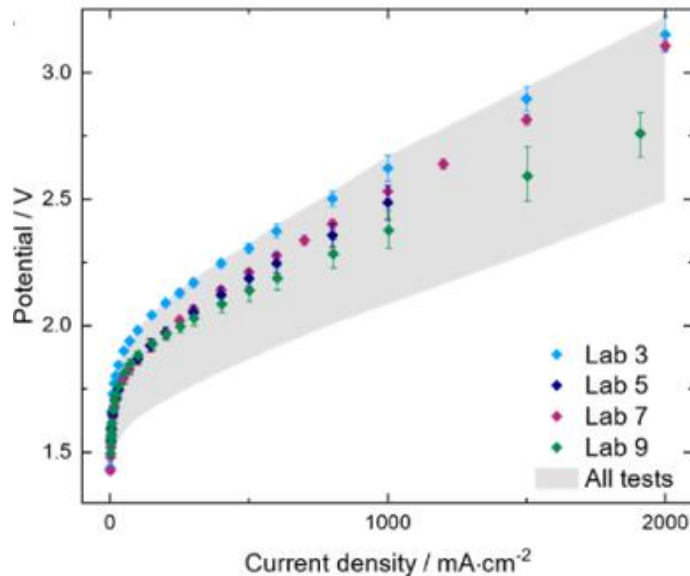
ALKALISCHE ELEKTROLYSE

Fließbild Systemaufbau

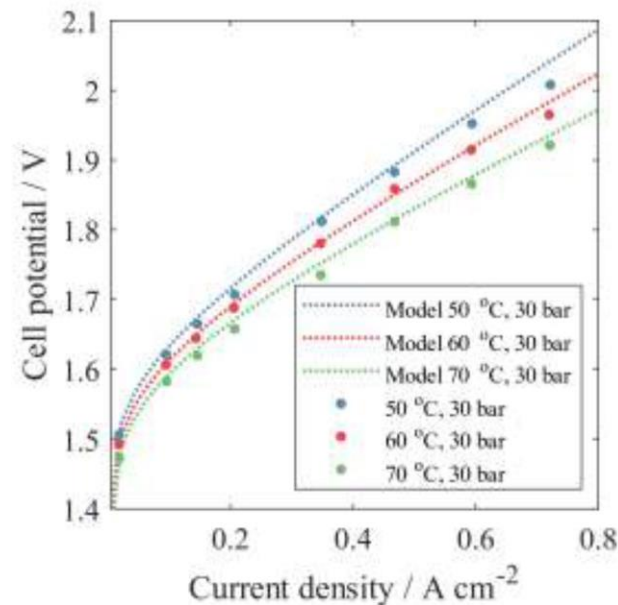


STAND KONVENTIONELLER ELEKTROLYSE-TECHNIK.

- AEL**
- Umgebungsdruck- und Hochdrucksysteme verfügbar, bis zu 30 bar ohne Differenzdruck
 - Leistung $< 2 \text{ W/cm}^2$
 - Große aktive Flächen in Quadratmetergröße
 - Ausgereifte und langlebige Technik
 - Gasdurchtritt Diaphragma
 - Dynamischer Betrieb?



<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.11.288>



<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.075>

<https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.127>



<https://hydrogen.johncockerill.com/en/products/electrolysers/>



https://ucpcdn.thyssenkrupp.com/_binary/UCPthyssenkruppAG/d6e8d15e-dbab-4a1b-9316-fafd10a82d4b/thyssenkrupp-nucera_AWE-Technology.pdf

ALKALISCHE ELEKTROLYSE

Ehemaliges Audi e-gas Projekt in Werlte



<https://www.hy2gen.com/de/plants-atlantis>

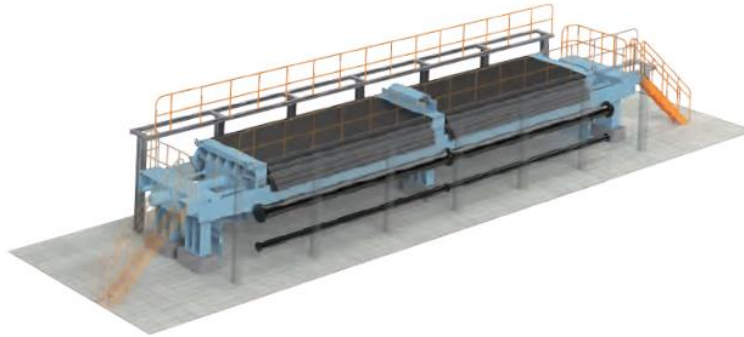
<https://mcphy.com/de/industrieller-wasserstoff/audi/>

Anwendungsfelder: **Bereitstellung von e-gas** für Mobilität unter Verwendung von elektrischer Überschussenergie. Einsatz als **Sekundärregelleistung (SRL)** möglich.

- Eingangsleistung Strom: **6 MW_{el}**
- Wirkungsgrad AC/CH₄: **54% +/- 3%**
- Ansprechzeit bei Bereitstellung der Energie:
30 Sekunden
- H₂-Produktion: 1.300 m³/h
- SNG-Produktion: 300 m³/h
- CO₂-Quelle Biogasanlage EWE AG
- Abwärmenutzung

ALKALISCHE ELEKTROLYSE

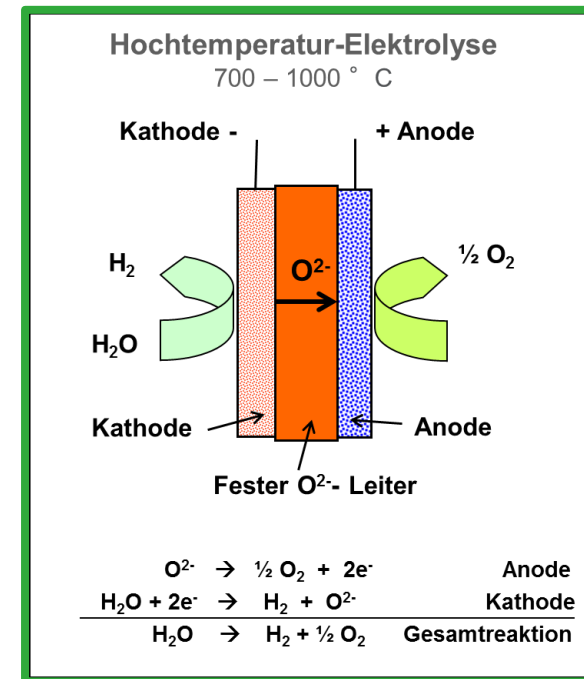
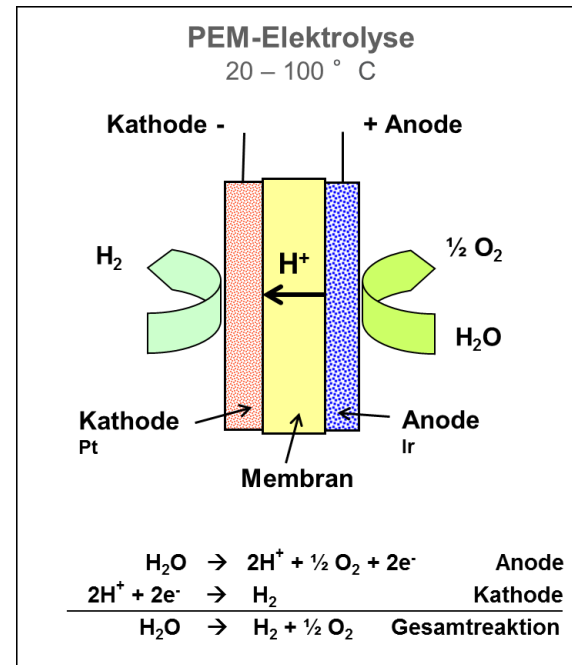
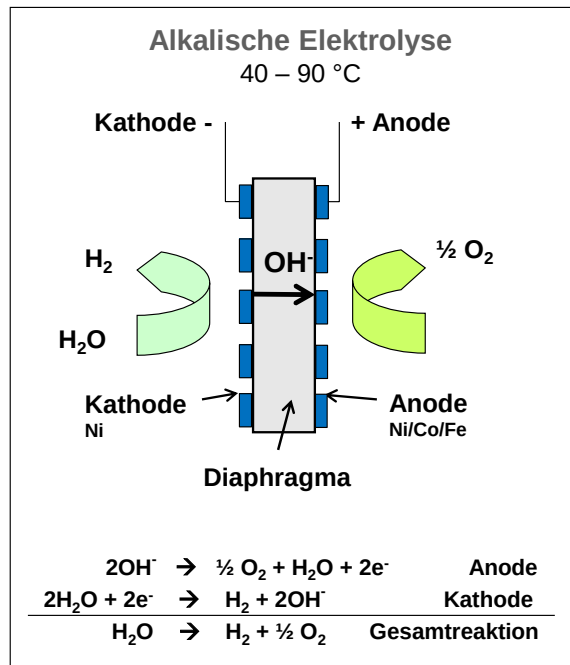
Ausgewählte Hersteller



Hersteller	Typ	Leistung [MW]	Leistungs- spanne [%]	H ₂ Produktion [m ³ /h]	Betriebsdruck [bar]	Energieverbr. [kWh/Nm ³ _{H2}]
John Cockerill / B	System	5		1000	15	
McPhy / F	McLyzer	16	10-100	3200	30	4,65 _{DC} / 5,0 _{AC}
ThyssenKrupp / D	Scalum	20	10-100	4000	0,3	4,5
NEL/ US & N	A485 Series	2,2	15-100	485	2-16	4,5
Asahi Kasei / J	10 MW module	100	15-100	20000	0,5	4,4
Sunfire / D	ME450	10	25-100	2225	30	4,51 DC
Stargatehydrogen	stellar	0,5	~25-100	100	32	4,59 DC
Cummins / US	HySTAT 100-10	0,5		100	10	4,94

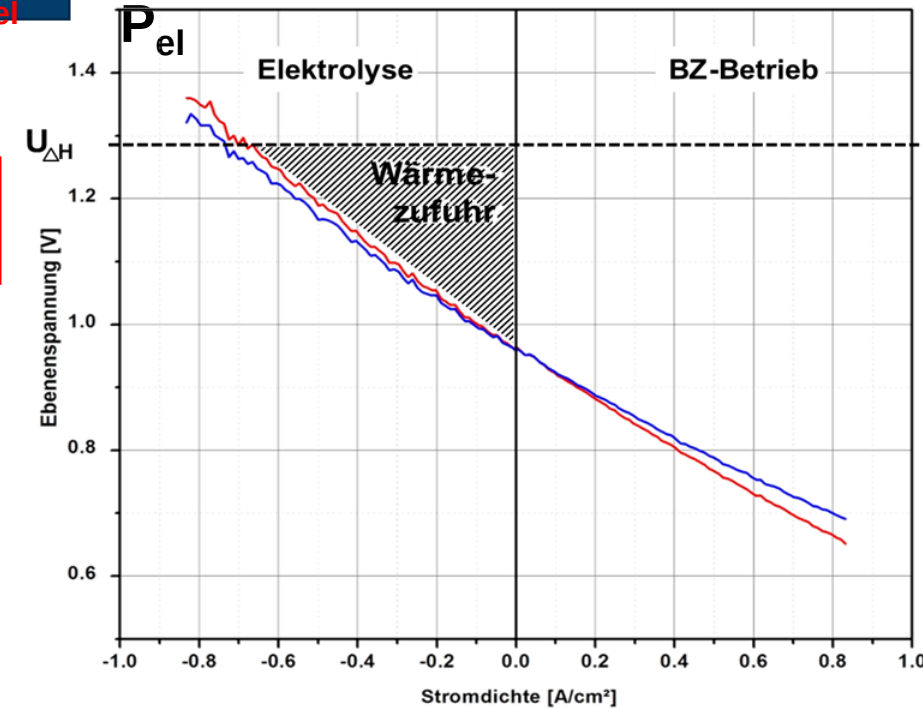
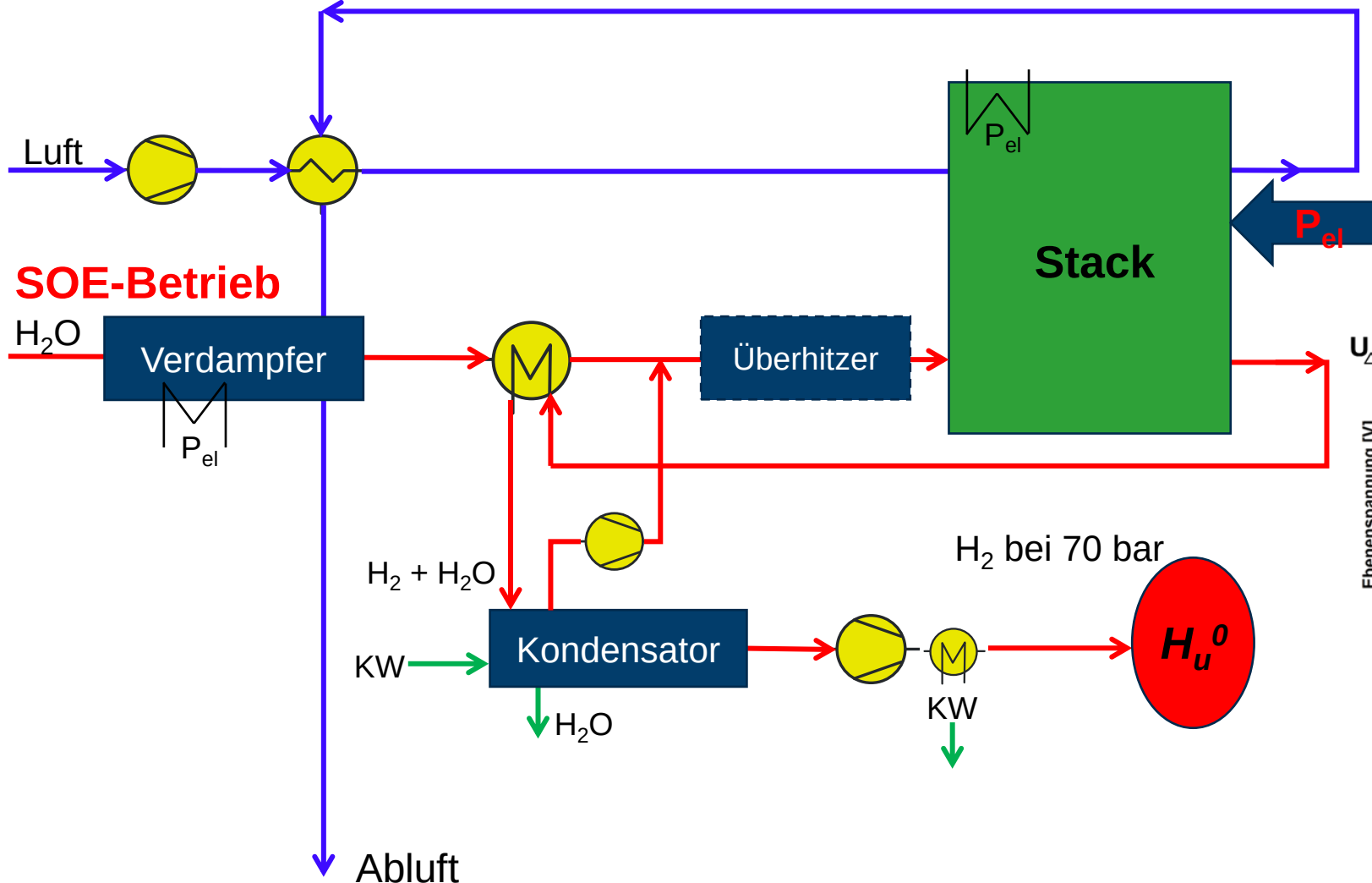
HOCHTEMPERATUR-ELEKTROLYSE

Einsatz keramischer Werkstoffe, die Leistungsskalierung der Zellen ist starker limitiert als bei den anderen Technologien, sehr hohe Effizienzen sind möglich oder die Auskopplung von Hochtemperaturwärme



HOCHTEMPERATUR-ELEKTROLYSE

SOE-Elektrolysesystem mit Kathodenrezyklierung



HOCHTEMPERATUR-ELEKTROLYSE

Pro

- Hohe Reaktionsgeschwindigkeit
→ geringe kinetische Verluste → hoher Zellwirkungsgrad
- Keine Edelmetallkatalysatoren
- Einkopplung „kostenloser“ Abwärme aus anderen Prozessen
→ hoher Systemwirkungsgrad
- Ko-Elektrolyse von H_2O und CO_2
→ Direkte Produktion von Synthesegas
→ kein zusätzlicher Reaktor erforderlich
→ hoher Wirkungsgrad möglich, vor allem wenn Abwärme des chemischen Reaktors zur Dampfproduktion im SOE-System verwendet werden kann
- Reversibler Betrieb (SOFC – SOE)

Contra

- Baugröße wegen keramischem Elektrolyten begrenzt
→ viele Stacks für große Leistung
- Aufheizzeiten im Bereich von Stunden
→ geringere Dynamik (gilt nicht für Lastwechsel)
- Entwicklungsstand liegt hinter dem von PEEL und AEL

HOCHTEMPERATUR-ELEKTROLYSE

rSOC - Systementwicklung → Integriertes Modul → Aufbau

Strom-
anschlüsse

Zugstangen
incl. Teil der
thermischen
Isolation



HOCHTEMPERATUR-ELEKTROLYSE

Skalierung durch Zusammenschaltung von vielen Stacks

Sunfire-HyLink SOEC

Pre-engineered
Pre-assembled
Skid-based



10 MW Module



100+ MW

Schematic graphic of a 500 MW plant



99.9 %

Hydrogen purity
after drying, before
cleaning²⁾

88 %
LHV, AC

Record efficiency
of Sunfire-HyLink
SOEC GEN 3²⁾

Hydrogen Production

Nameplate capacity	264 kg/h · 3,153 Nm ³ /h
Flexibility	50–100 % and 10 %/min
Delivery pressure	0.1 bar(g)
Oxygen	2,251 kg/h · 99.9% purity

Electrical Efficiency

AC-Power	10.7 MW
Specific consumption	3.40 kWh/Nm ³ 37.8 kWh/kg
Hot standby	170 kW

Feed Gas

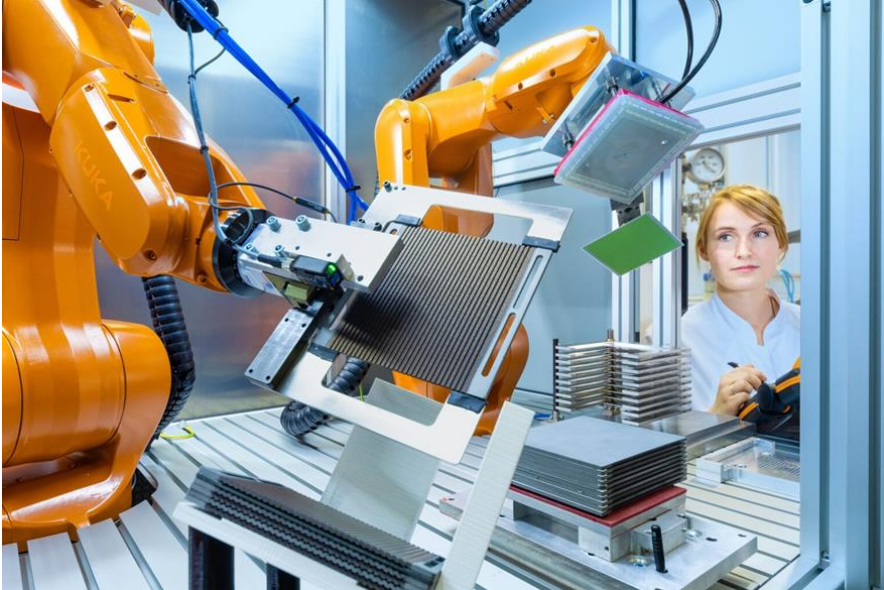
Steam consumption	12 kg/kg H ₂
Condition	> 3 bar(g) · > 150 °C
Composition	95 mol% H ₂ O · 5 mol% H ₂

Hardware

Stack service life	4 years
Footprint ³⁾	24 m ² /MW

HOCHTEMPERATUR-ELEKTROLYSE

Ausgewählte Hersteller



Hersteller	Typ	Leistung [MW]	Leistungs- spanne [%]	H ₂ Produktion [m ³ /h]	Betriebsdruck [bar]	Energieverbr. [kWh/Nm ³ _{H₂]}
Sunfire / D	HyLink SOEC	10,7	50-100	3153	atmosphärisch	3,4
Bloom / US		1,2		357	atmosphärisch	3,4
Nucera / D	In Entwicklung					

INVESTITIONEN FÜR DIE ELEKTROLYSE

Aktueller Stand und erwartete Entwicklung

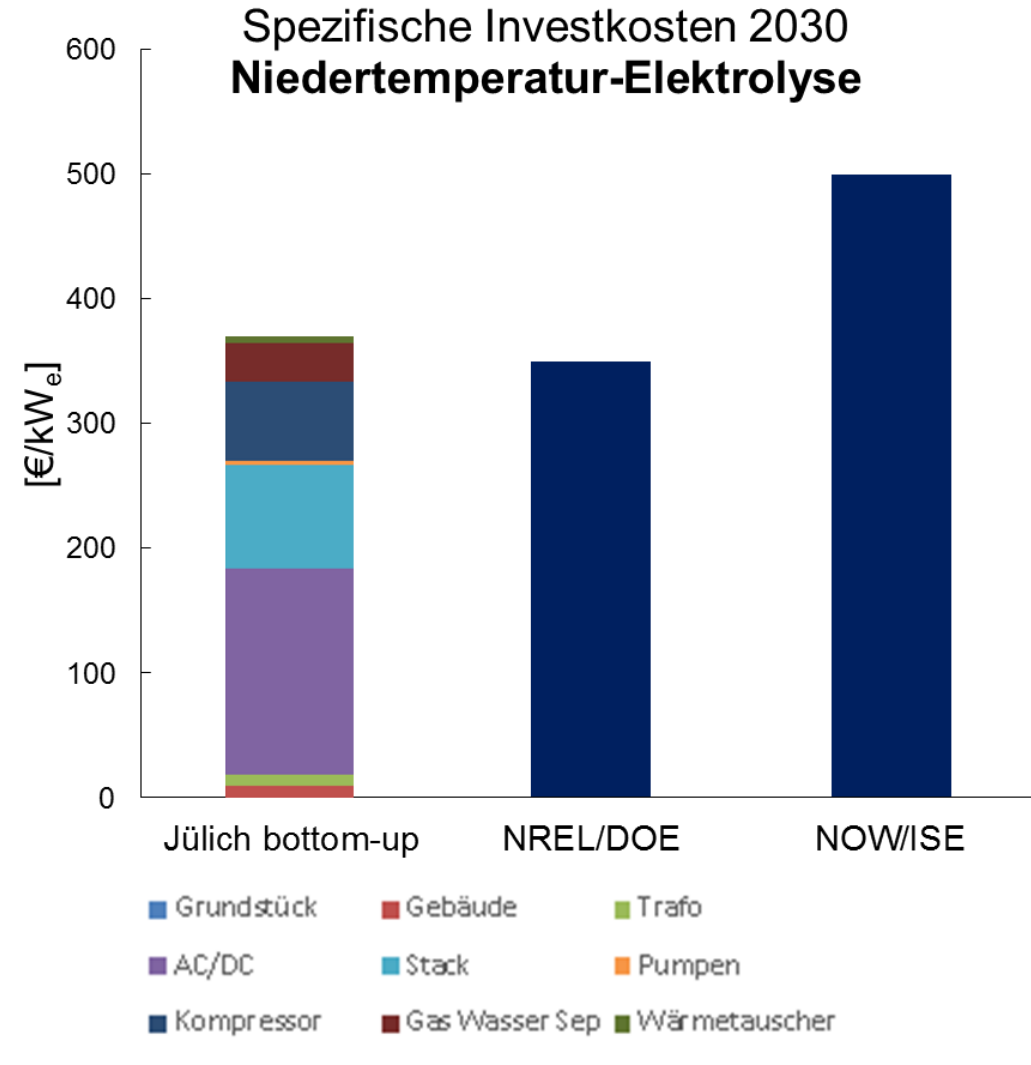
Status:

- spezifische Investitionen liegen zwischen 1000 und 2500 €/kW_{el} (geringe Produktionsmengen)
- Weitere Forschung und Entwicklung sowie Scale-up haben das Potenzial, die Kosten zu senken.

Kommende Jahre (2030):

- Bottom-up-Kostenanalyse: Investitionskosten von 340-410 €/kW_{el} im Jahr 2030 sind möglich.
- Inklusive: Stapel, Systemkomponenten, Gasverdichtung bis 100 bar, Land, Wohnen/Gebäude
- Lebensdauer 10 Jahre (4.600 h/a)
- Bei den Berechnungen werden aktuelle Entwicklungen und Erfolge in der Forschung berücksichtigt.

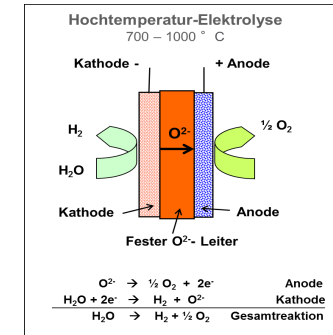
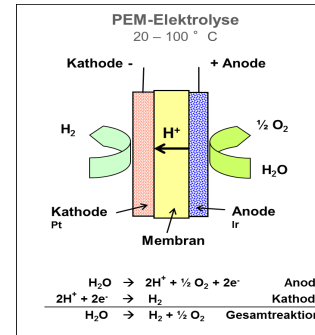
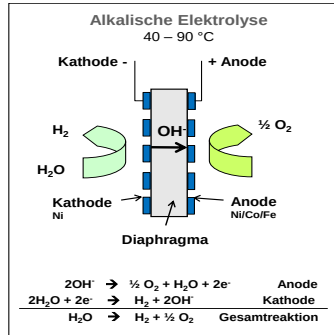
Die Kosten der installierten Wasserstoff-erzeugungsleistung liegen bei ~570 €/kW_{70%-LHV}



WETERENTWICKLUNG ELEKTROLYSETECHNOLOGIEN

Welche Technologieentwicklungen sind in den kommenden Jahren zu erwarten

heute



morgen

Alkalische Elektrolyse
bei erhöhten
Temperaturen
(110-180 °C)

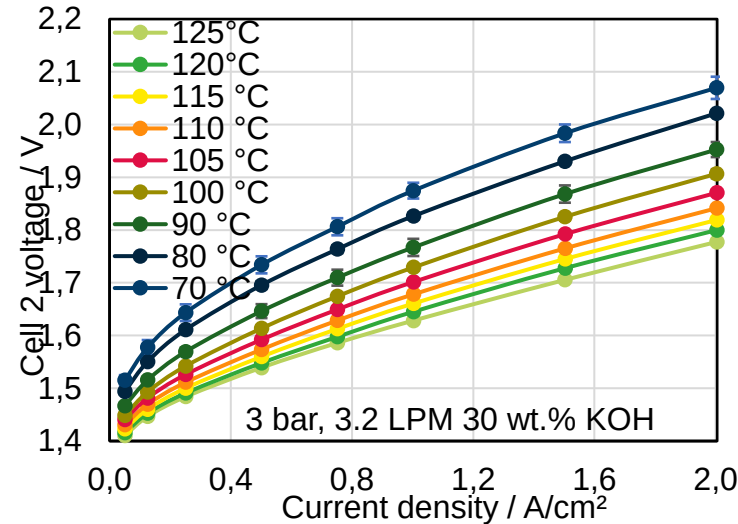
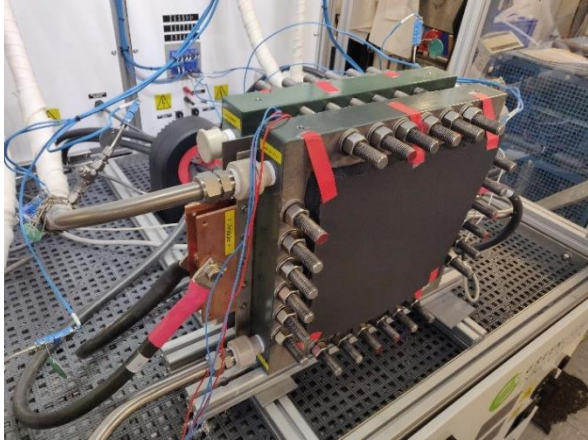
Alkalische Membran
Elektrolyse
(60-80 °C)

Niedertemperatur
 CO_2 - Elektrolyse
(60-80 °C)

Protonenleitende
Hochtemperatur
Elektrolyse
(<600 °C)

MATERIALENTWICKLUNG FÜR AEL BEI ERHÖHTER TEMP.

Neue Abscheider für Zukunftstechnologien



Status:

- 1.63 V @ 1 A cm⁻², 125 °C
- 400 cm² alkalischer Stack, 3 Zellen
- Jülich Stack Design
- Kommerzielle Diaphragmen und Elektroden

PFAS free

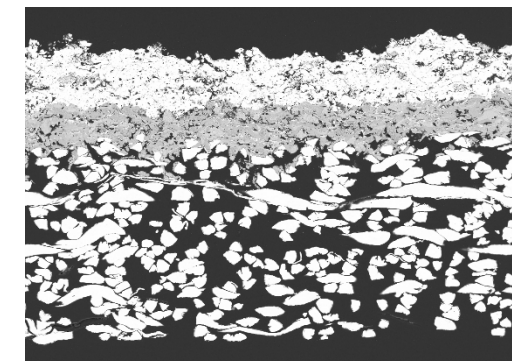
Diaphragmen für hohe Temperaturen “made in Jülich”:



Atmospheric Plasma Spraying (APS) facility

→ Herstellung von Yttrium-stabilisiertem Zirkoniumdioxid-Membranen mit maßgeschneidertem Mikrogefüge

Next steps: Catalyst-coated diaphragm



APS diaphragm
APS Raney-Ni

Ni fabric

PFAS free

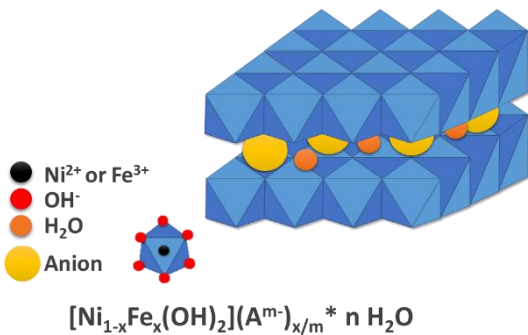
85TP-90sp0001
M-23-85-TP M-23-90-SP

H D5.0 x200 500 um

MATERIALENTWICKLUNG UND SKALIERUNG DER AEM

Neue Elektroden mit fortschrittlichen Membranen für Edelmetallfreie Zukunftstechnologien

Catalyst implementation:
From powder to electrode

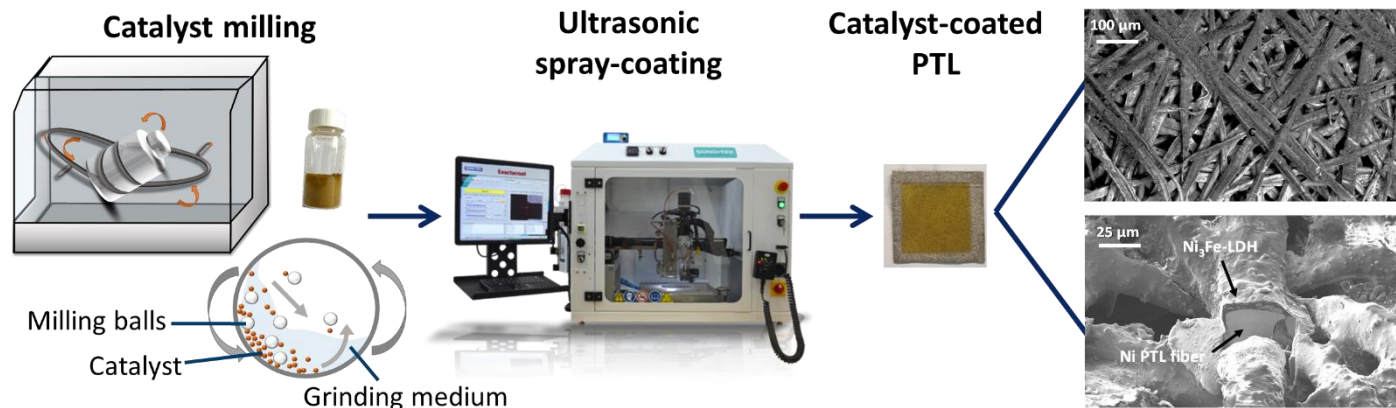


4 cells

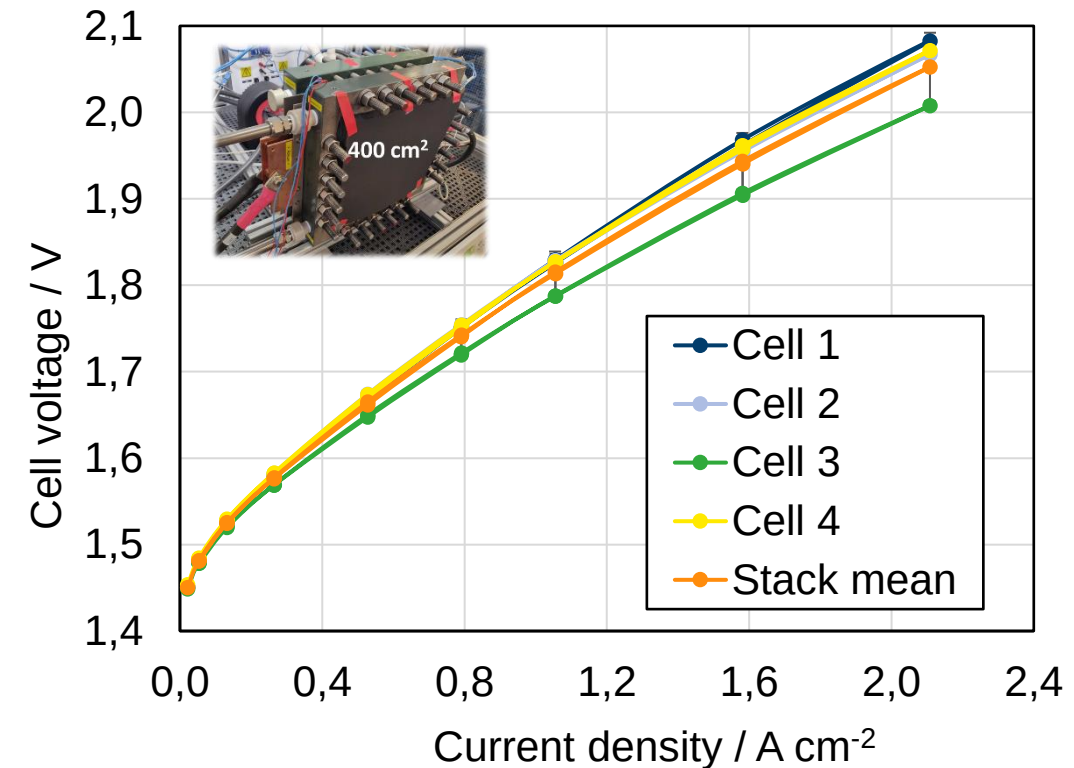
- Anode: Ni-Fe LDH
- Cathode: Pt
- Membrane: Ionomr Aemion

Operating conditions

- Flow rate: 8 l/min KOH
- Electrolyte concentration: 1 Mol/l
- Temperature: 60 °C
- Pressure: 1 bar(g)

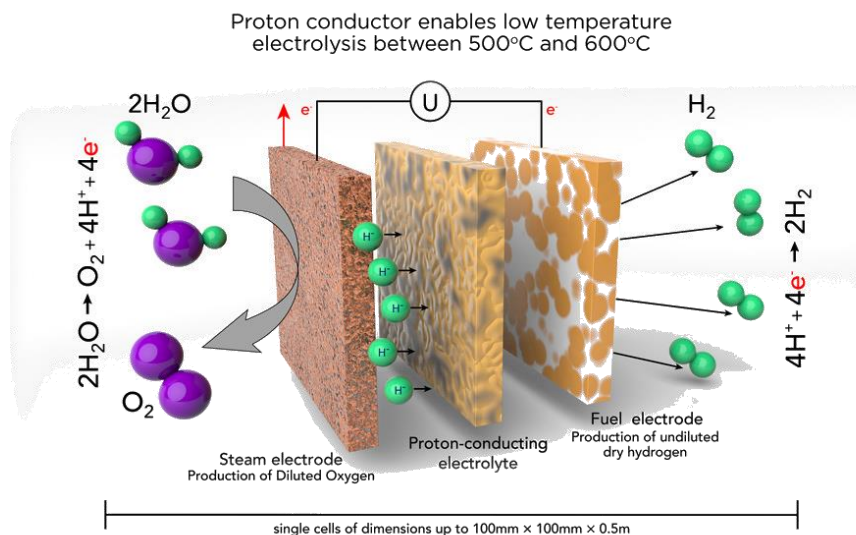


Scaling into technical size:
From electrode to stacks and systems



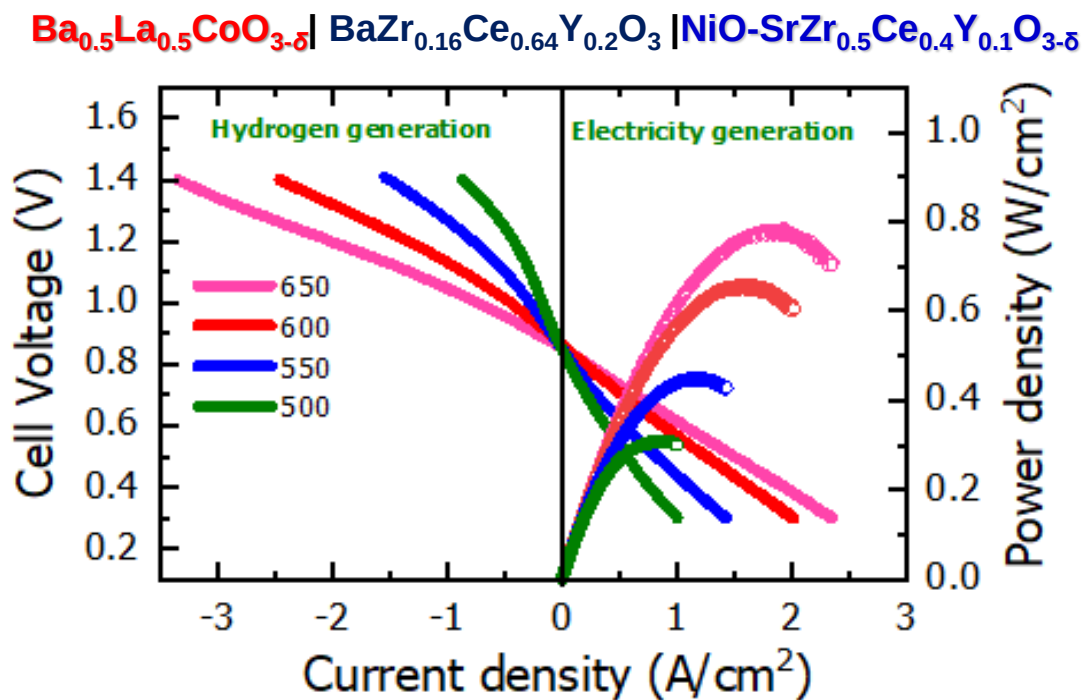
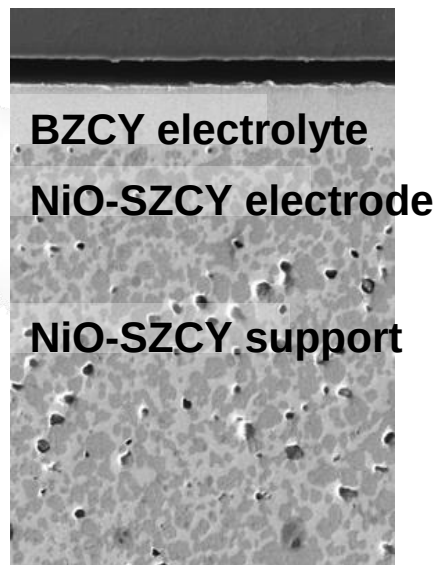
PROTONEN-LEITER

Materialien und Zellentwicklung



Under CC BY-NC-ND 4.0 from <https://researchfeatures.com/new-steam-electrolysis-devices-efficient-hydrogen-production/>

Single cells (5 x 5 cm²)



- Keine Ni-Migration beobachtet (vermutlich aufgrund der niedrigen Temperatur und des trockenen H₂)
- Skalierung der PCCEL-Zelltechnologie auf Stapelgröße (10x10 cm²)
- Enge Zusammenarbeit mit dem I²CNER der Universität Kyushu

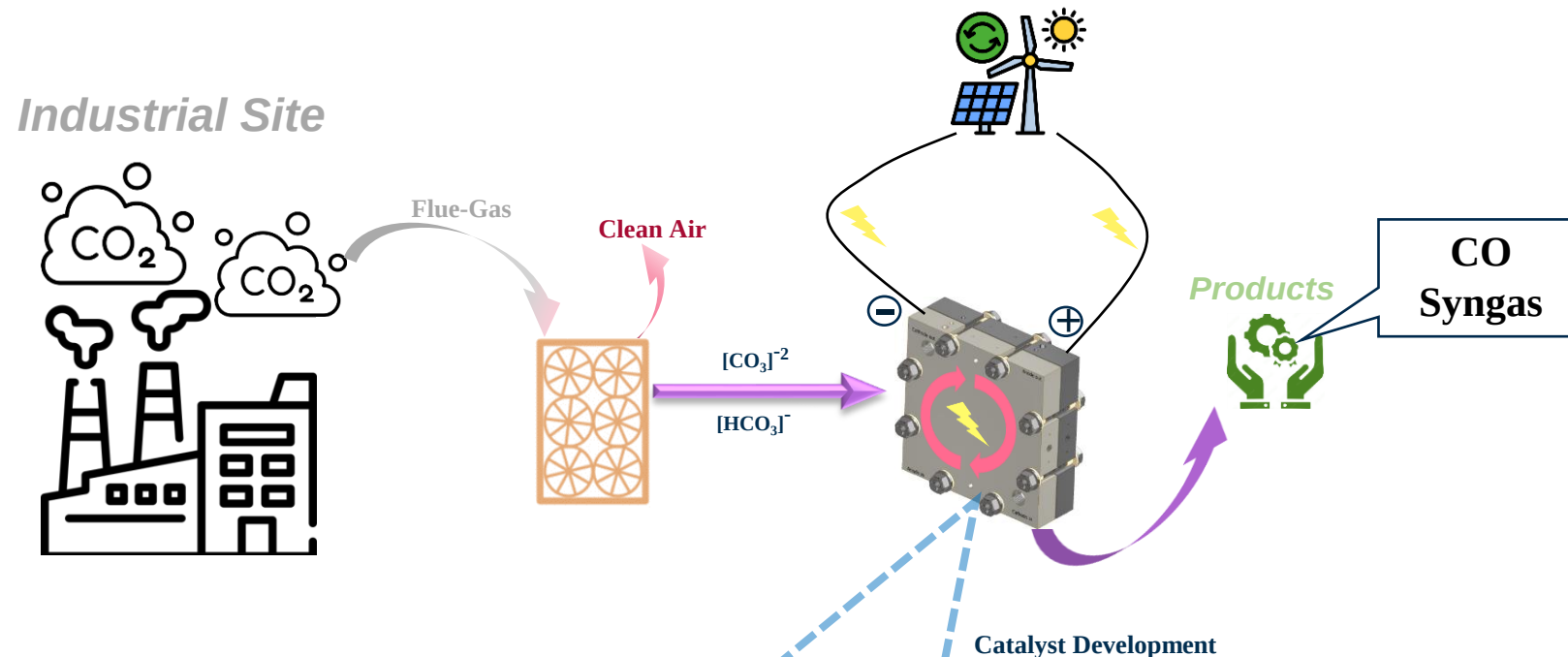
K. Leonard, et int., W.A. Meulenber, H. Matsumoto. ChemElectroChem (2022)

Y. Zang, K. Leonard et int. O. Guillon et al., Phys. Chem. Chem. Phys. (2025)

Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

NIEDERTEMPERATUR CO₂-ELEKTROLYSE

Erzeugung von Synthesegas für die weitere Nutzung als Rohstoff für synthetische Kraftstoffe



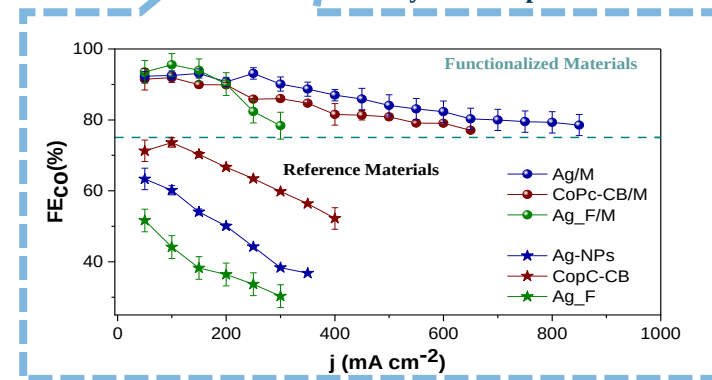
Zn-based catalysts for selective and stable electrochemical CO₂ reduction at high current densities. I. Stamatelos, CT. Dinh, W. Lehnert, M. Shviro, ACS Applied Energy Materials, 2022

Ampere Level Electrolysis

Ternary Zn-Ce-Ag catalysts for selective and stable electrochemical CO₂ reduction at large-scale. I. Stamatelos, F. Scheepers, J. Pasel, CT Dinh, D. Stolten, Applied Catalysis B: Environment and Energy, 2024

Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

Quelle: Forschungszentrum Jülich



Elektrolyzer Components Development Electrode Fabrication

PERSPEKTIVEN UND FORSCHUNGSTRENDS

Erhöhung der Lebensdauer

- Analyse von Alterungsmechanismen bei dynamischer Betriebsweise
- Entwicklung neuer Materialien und neuer Betriebsstrategien

Reduzierung der Investitionskosten

- Steigerung der spezifischen Leistung
- Verminderter Edelmetalleinsatz
 - Alkalische Membranelektrolyse
 - Alkaline electrolysis at elevated temperature (100 °C .. 180 °C)

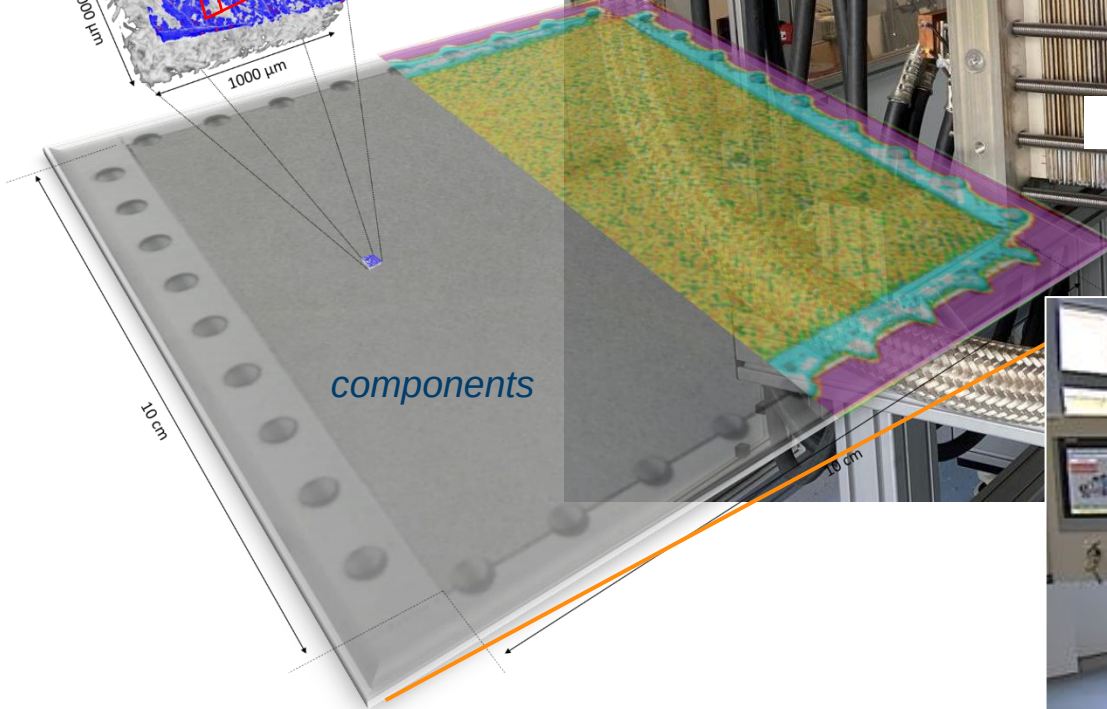
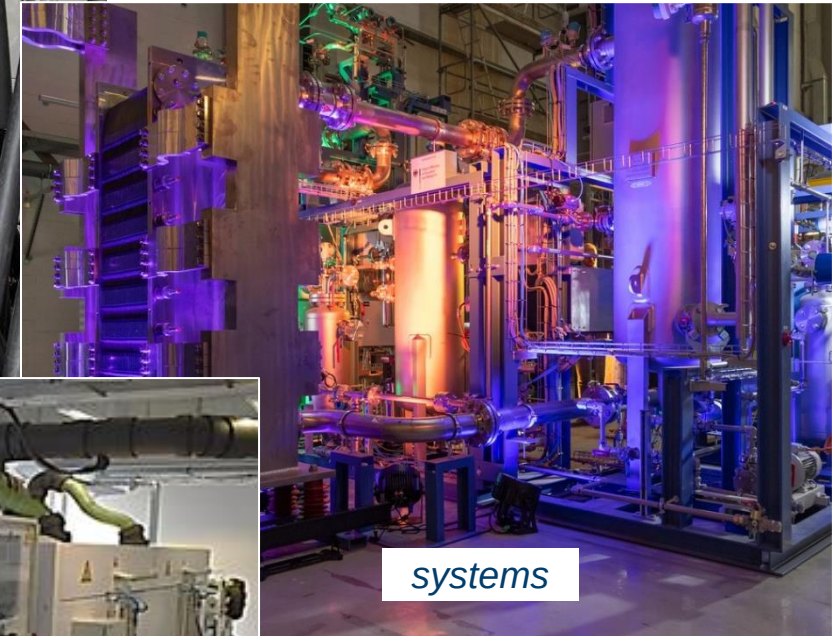
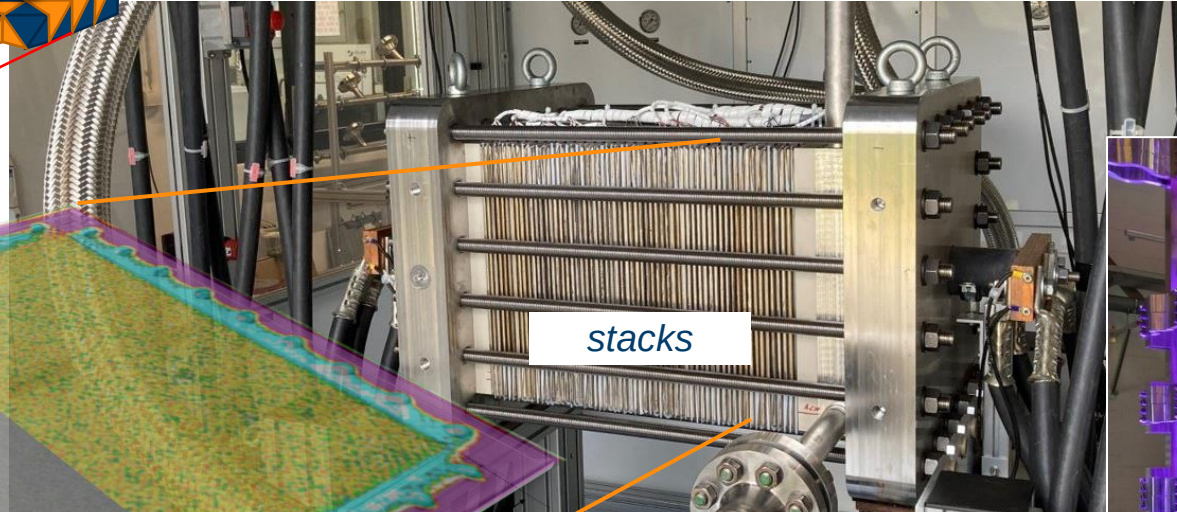
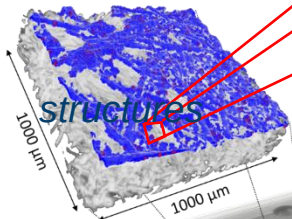
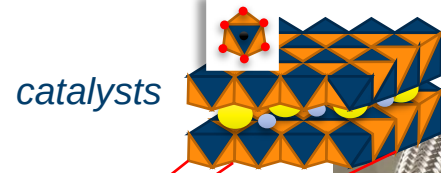
Steigerung der Effizienz

- Verminderung der Zellspannung
 - Verminderung des Elektrodenabstandes
- geringere Verluste auf Grund der Ionenleitung

- Entwicklung von Recyclingkonzepten
- Verzicht auf PFAS haltige Werkstoffe
- Weiterentwicklung der Leistungselektronik

ELEKTROLYSE AM FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH

VON DER HERSTELLUNG BIS ZUM SYSTEMBETRIEB



Strategien der flexiblen Wasserstoffspeicherung

Jonas Höckner, EWE Gasspeicher



Vortrag 1 | Forschungszentrum Jülich

Vortrag 2 | EWE Gasspeicher

Vortrag 3 | CENA Hessen

Vortrag 4 | INERATEC GmbH

Vortrag 5 | Fraunhofer LBF

Vortrag 6 | Provadis Hochschule

Panel

Wrap Up



Strategien der flexiblen Wasserstoffspeicherung

CENA Symposium

Frankfurt, 04. Juni 2025

Jonas Höckner



- 01 Wasserstoff(-speicherung) @ EWE
- 02 Rolle von Kavernenspeichern
- 03 Strategien zur flexiblen Speichernutzung
- 04 Herausforderungen und Ausblick



- 01 Wasserstoff(-speicherung) @ EWE
- 02 Rolle von Kavernenspeichern
- 03 Strategien zur flexiblen Speichernutzung
- 04 Herausforderungen und Ausblick



Unsere aktuellen H₂-Speicherprojekte

HyCAVmobil (Rüdersdorf bei Berlin)

Erste Testkaverne in Deutschland für die Speicherung von reinem Wasserstoff im Rahmen des Förderprojekts HyCAVmobil.

Clean Hydrogen Coastline (Huntorf)

Die Umstellung der ersten Kaverne für die großtechnische und kommerzielle Speicherung von Wasserstoff im Rahmen des IPCEI-Förderprogramms Hy2Infra.



Clean Hydrogen Coastline – Programm



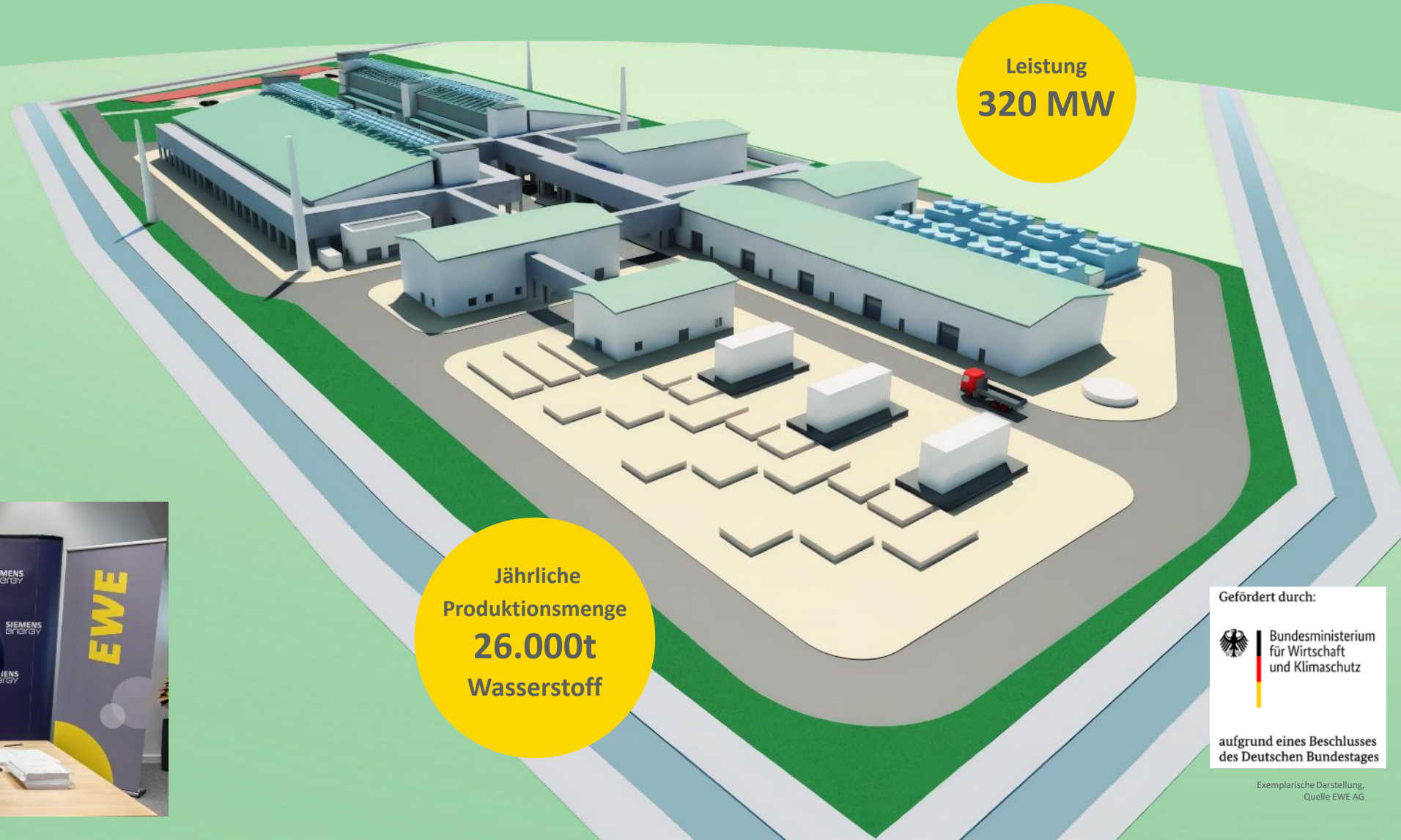
EWE Region als tragende Säule einer Wasserstoffwirtschaft

Die EWE IPCEI - Projekte



CHC Elektrolyse Ostfriesland

Aktueller Stand



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Exemplarische Darstellung,
Quelle EWE AG



CHC Speicher Huntorf

Aktueller Stand

Speicher- kapazität
70 GWh

Erdgasspeicher-
anlage

Baufeld für
H2-Obertageanlage

35.000 Nm³/h
Ein- und
Ausspeicher-
leistung

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

CHC Speicher Huntorf

Aktueller Stand

Speicher- kapazität
70 GWh

Erdgasspeicher-
anlage

Baufeld für
H2-Obertageanlage

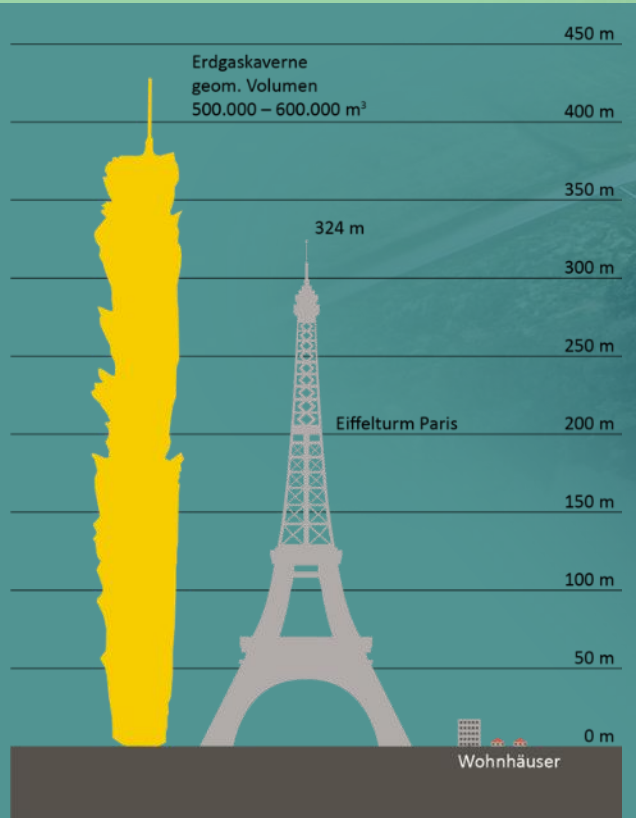
35.000 Nm³/h
Ein- und
Ausspeicher-
leistung

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

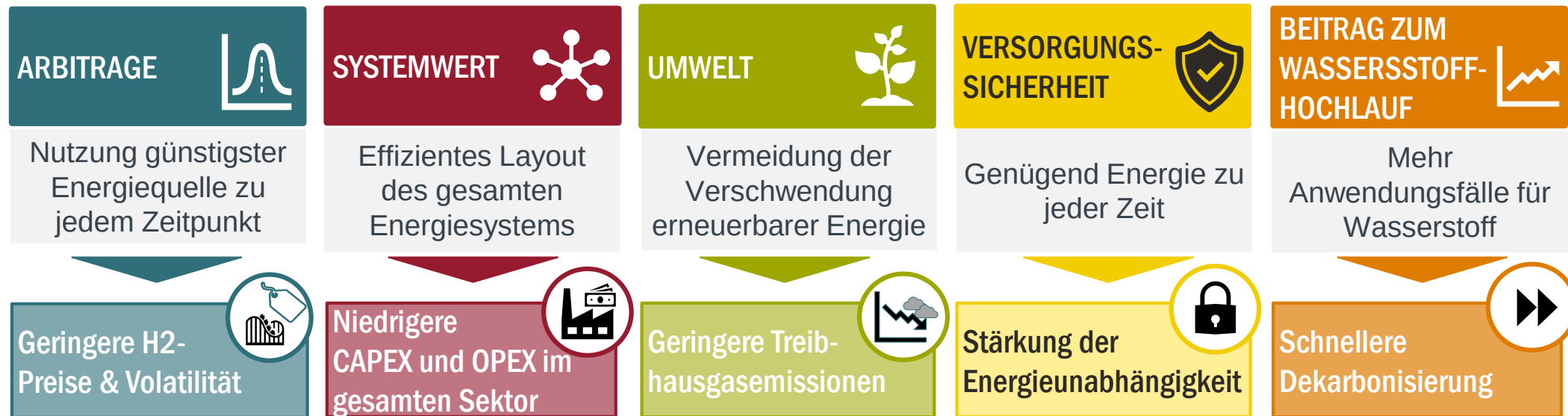
aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



- 01 Wasserstoff(-speicherung) @ EWE
- 02 Rolle von Kavernenspeichern
- 03 Strategien zur flexiblen Speichernutzung
- 04 Herausforderungen und Ausblick



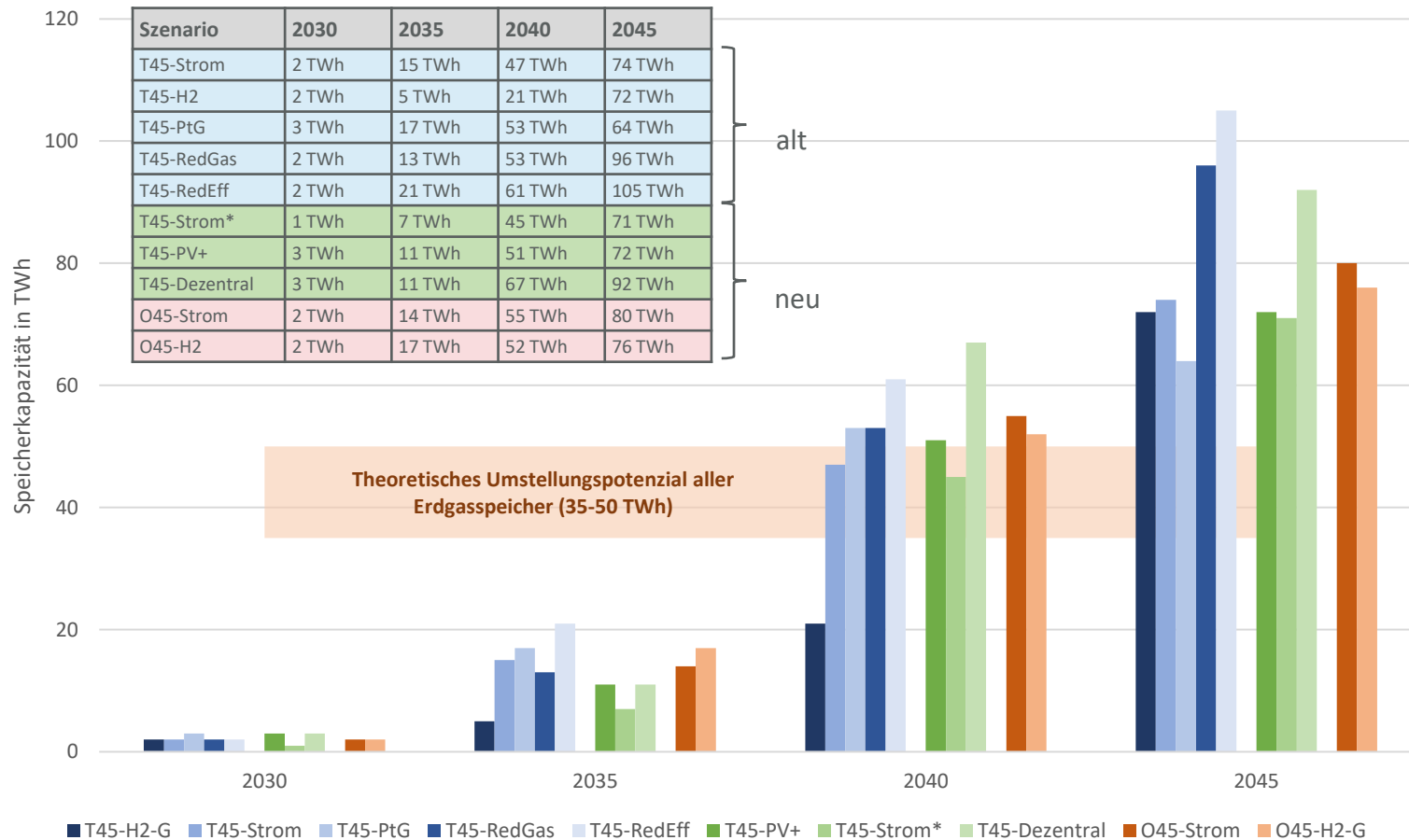
Der Mehrwert von H₂-Speichern ist vielschichtig - Fünf Werte-Dimensionen zeigen die Rolle im zukünftigen Energiesystem



Quelle: Frontier Economics (2024): Finanzierungsmechanismus für den Aufbau von Wasserstoffspeichern

Fraunhofer ISI i.A.d. des BWMK (2022-2024)

Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in DE



- Die prognostizierten Speicherbedarfe zeigen einen starken Anstieg ab 2030
- Das theoretische Umstellungspotenzial wird in der Studie 35-50 TWh geschätzt
- Bei optimaler Ausschöpfung der Umstellungspotenziale und geringstem Speicherbedarf wird trotzdem **Neubau von Speichern notwendig**
- Update der Szenarien des BWMK bestätigen Bedarfe

- 01 Wasserstoff(-speicherung) @ EWE
- 02 Rolle von Kavernenspeichern
- 03 Strategien zur flexiblen Speichernutzung
- 04 Herausforderungen und Ausblick



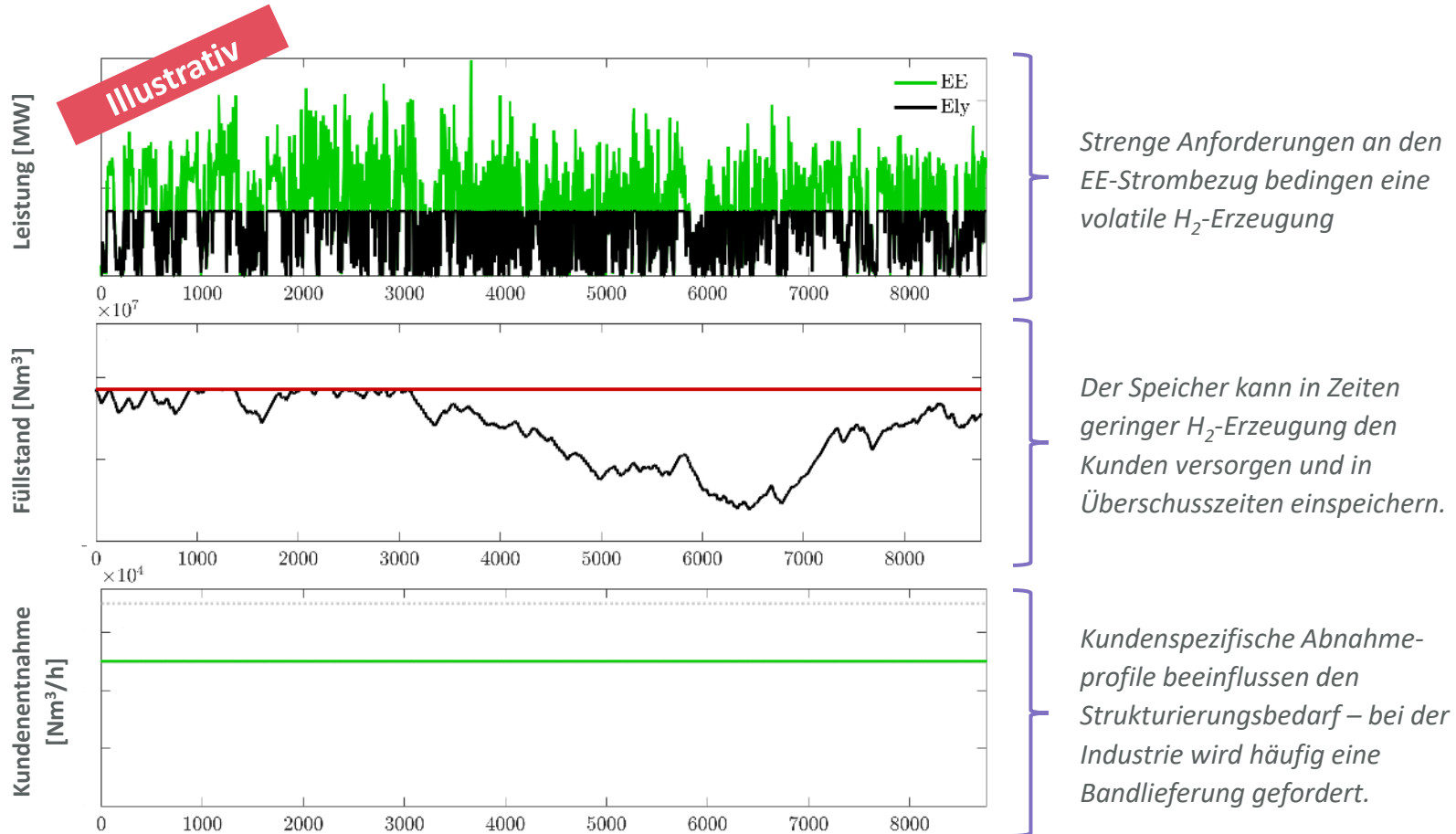
Relevante Bereiche und Arten der Speichernutzung



Relevante Bereiche und Arten der Speichernutzung

Bereich	Speichernutzung
 Speicher zur Industrierversorgung	• Strukturierung, d.h. Synchronisation von Bezugs- und Abnahmeprofilen (Punkt-zu-Punkt oder im Portfolio) • Absicherung von Bezugsquellen (Elektrolyse / Import) • Optimierung der H2-Bereitstellung im Portfolio (durch zus. Freiheitsgrade bei der H2-Erzeugung)

Speicher als strukturierendes Element zur bedarfsgerechten Bereitstellung von Wasserstoff



- Die Speichernachfrage ergibt sich sowohl durch die (volatile) Erzeugung als auch die kundenspezifische Abnahme (Industrie / Band und Kraftwerk / Peak).
- Es werden im Vergleich zum Erdgas schnellere Speicher (hohe Ein- und Ausspeicherleistung) benötigt.
- **Wasserstoffspeicher nehmen eine entscheidende Rolle in der Dekarbonisierung und Versorgungssicherheit ein.**

Relevante Bereiche und Arten der Speichernutzung

Bereich	Speichernutzung
 Speicher zur Industrierversorgung	• Strukturierung, d.h. Synchronisation von Bezugs- und Abnahmeprofilen (Punkt-zu-Punkt oder im Portfolio) • Absicherung von Bezugsquellen (Elektrolyse / Import) • Optimierung der H2-Bereitstellung im Portfolio (durch zus. Freiheitsgrade bei der H2-Erzeugung)

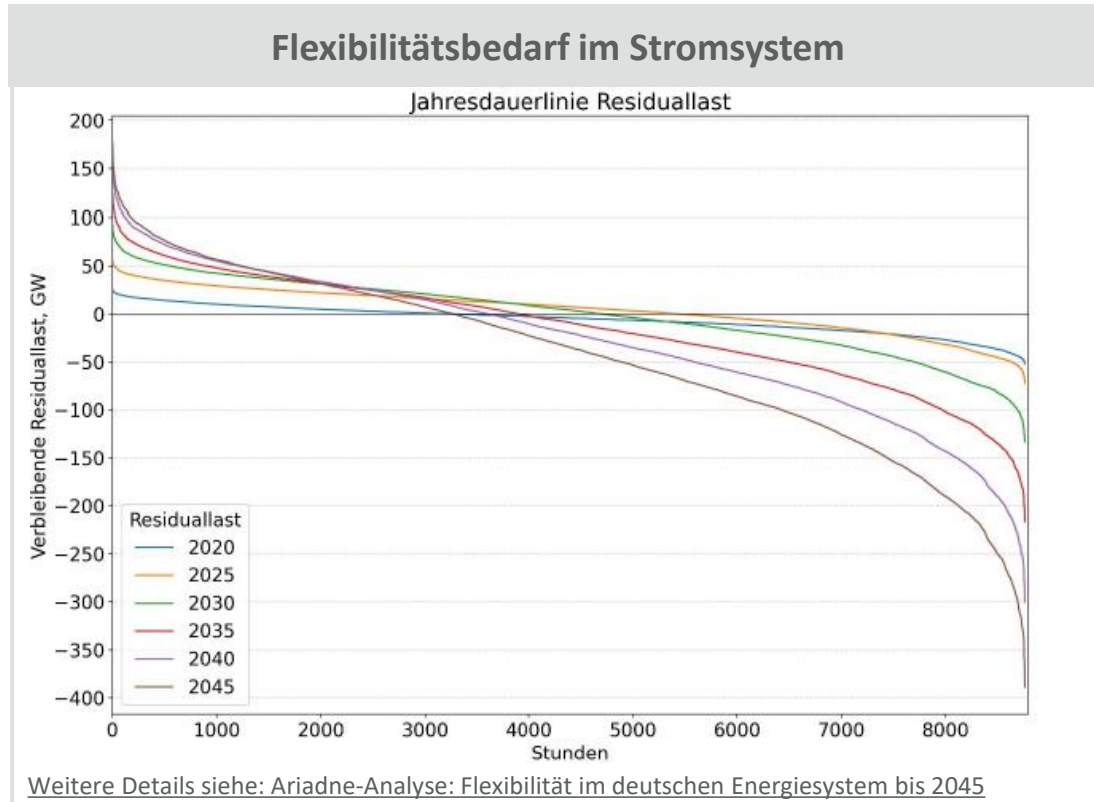
Relevante Bereiche und Arten der Speichernutzung

Bereich	Speichernutzung
 Speicher zur Industrierversorgung	• Strukturierung, d.h. Synchronisation von Bezugs- und Abnahmeprofilen (Punkt-zu-Punkt oder im Portfolio) • Absicherung von Bezugsquellen (Elektrolyse / Import) • Optimierung der H2-Bereitstellung im Portfolio (durch zus. Freiheitsgrade bei der H2-Erzeugung)
 Speicher zur Netzstabilisierung	• Regelenergie: Bereitstellung von Regelenergie für den MGV durch Speicherkunden • Flexibilität für BKV: Nutzung der Flexibilität von Speichern für die Bilanzkreisbewirtschaftung

Relevante Bereiche und Arten der Speichernutzung

Bereich	Speichernutzung
 Speicher zur Industrierversorgung	• Strukturierung, d.h. Synchronisation von Bezugs- und Abnahmeprofilen (Punkt-zu-Punkt oder im Portfolio) • Absicherung von Bezugsquellen (Elektrolyse / Import) • Optimierung der H2-Bereitstellung im Portfolio (durch zus. Freiheitsgrade bei der H2-Erzeugung)
 Speicher zur Netzstabilisierung	• Regelenergie: Bereitstellung von Regelenergie für den MGV durch Speicherkunden • Flexibilität für BKV: Nutzung der Flexibilität von Speichern für die Bilanzkreisbewirtschaftung
 Speicher als Teil der Sektorenkopplung	• Reserve für Wasserstoffkraftwerke, um während Dunkelflauten Versorgung zu gewährleisten • Saisonale Speicherung von erneuerbaren Energien (Power-to-X-to-Power)

Elektrifizierung und EE-Ausbau führen zum starken Anstieg von Zeiten mit Strommangel und -überschuss

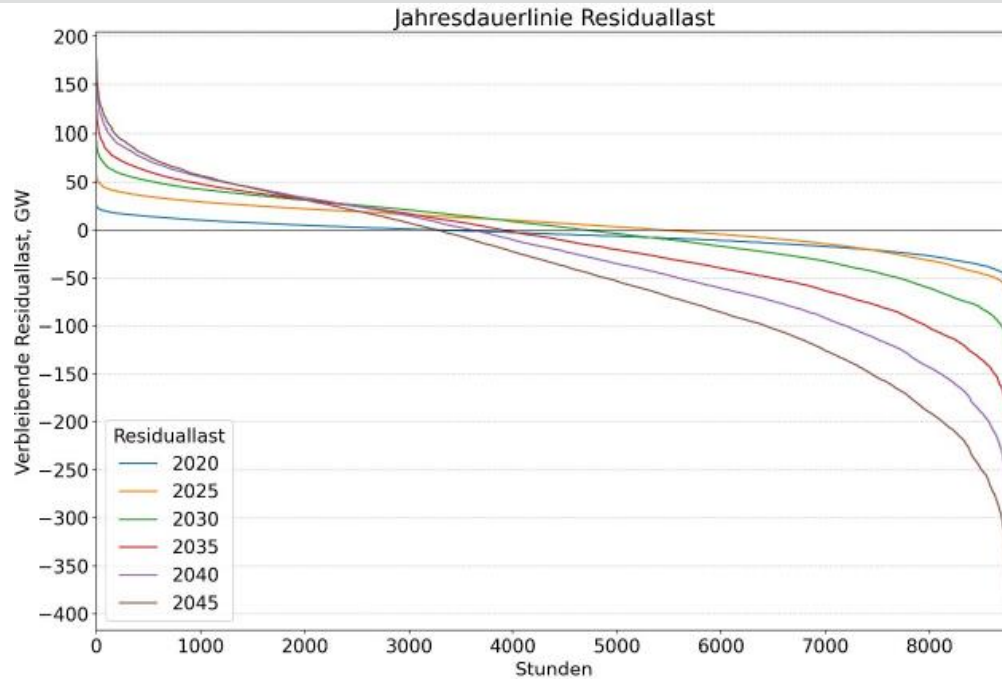


Fazit

- Maximale positive Residuallast (Strommangel):
2030: 80 GW | 2040: 140 GW
- Maximale negative Residuallast (Stromüberschuss):
2030: -130 GW | 2040: -300 GW

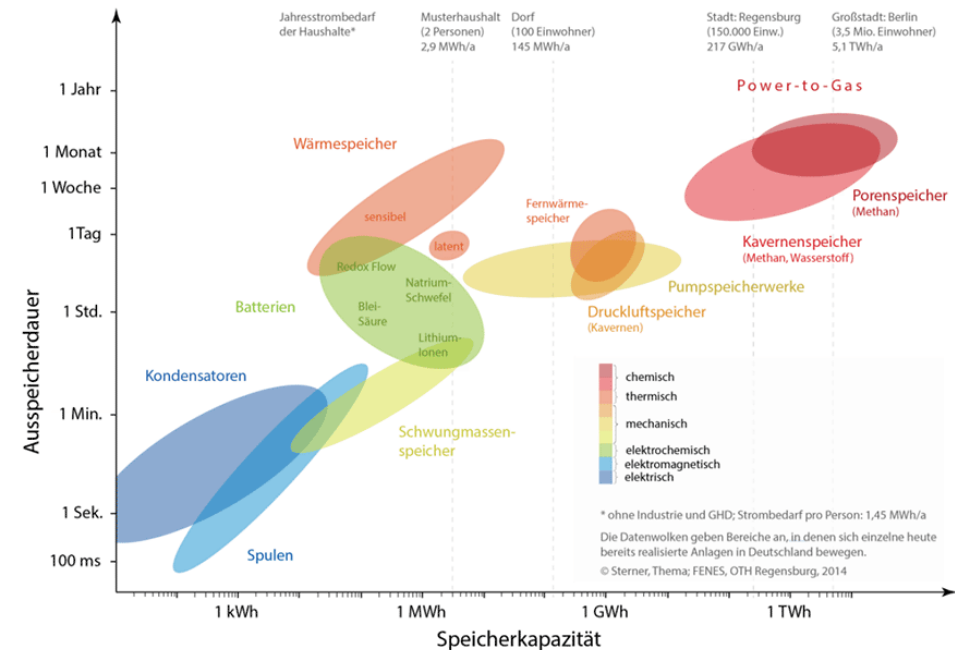
Die sich ergebenden Flexibilitätsbedarfe erfordern unterschiedliche Arten von Speichertechnologien

Flexibilitätsbedarf im Stromsystem



Weitere Details siehe: Ariadne-Analyse: Flexibilität im deutschen Energiesystem bis 2045

Charakterisierung verschiedener Speichertypen



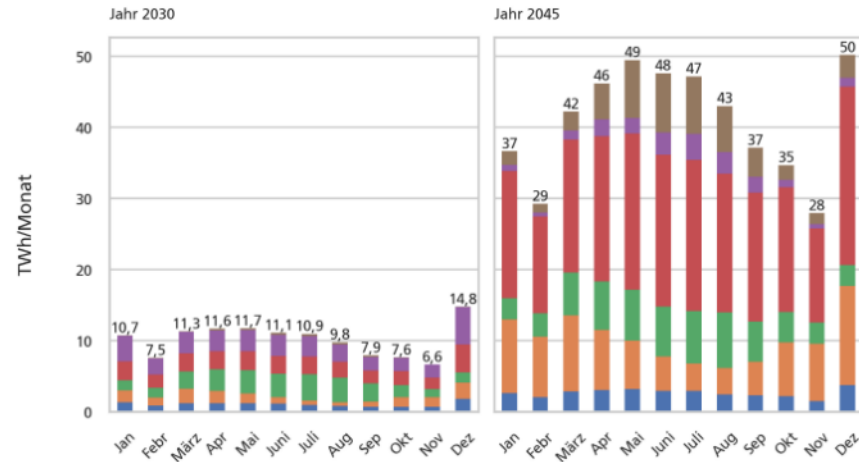
Fazit

- Maximale positive Residuallast (Strommangel):
2030: 80 GW | 2040: 140 GW
- Maximale negative Residuallast (Stromüberschuss):
2030: -130 GW | 2040: -300 GW

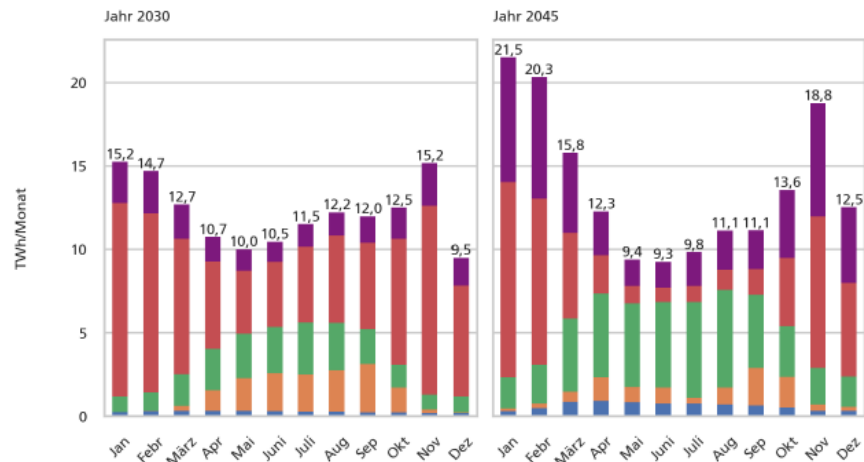
Fazit

- **Batteriespeicher** werden primär für die Speicherung von Strom über **mehrere Stunden** genutzt
- Durch die Kombination von **Elektrolyse mit Kavernenspeichern** lassen sich **mehrere TWh Energie über Tage – Monate** speichern

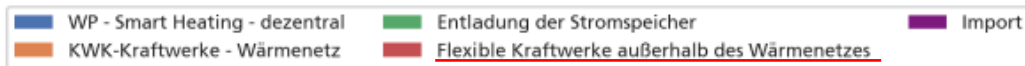
Nur ein Zusammenspiel aller Speichertechnologien kann die zukünftigen Flexibilitätsbedarfe decken



Monatlicher Flexibilitätseinsatz bei **Stromüberschuss** in den Jahren 2030 und 2045



Monatlicher Flexibilitätseinsatz bei **Strommangel** in den Jahren 2030 und 2045



Weitere Details siehe: [Ariadne-Analyse: Flexibilität im deutschen Energiesystem bis 2045](#)

Relevante Bereiche und Arten der Speichernutzung

Bereich	Speichernutzung
 Speicher zur Industrierversorgung	• Strukturierung, d.h. Synchronisation von Bezugs- und Abnahmeprofilen (Punkt-zu-Punkt oder im Portfolio) • Absicherung von Bezugsquellen (Elektrolyse / Import) • Optimierung der H2-Bereitstellung im Portfolio (durch zus. Freiheitsgrade bei der H2-Erzeugung)
 Speicher zur Netzstabilisierung	• Regelenergie: Bereitstellung von Regelenergie für den MGV durch Speicherkunden • Flexibilität für BKV: Nutzung der Flexibilität von Speichern für die Bilanzkreisbewirtschaftung
 Speicher als Teil der Sektorenkopplung	• Reserve für Wasserstoffkraftwerke, um während Dunkelflauten Versorgung zu gewährleisten • Saisonale Speicherung von erneuerbaren Energien (Power-to-X-to-Power)
 Speicher in liquiden Märkten	• Arbitragegeschäfte an Wasserstoffmärkten durch Ausnutzen kurzfristiger und saisonaler Preis-Spreads • Zukünftig starker Einfluss der Strommarktpreise – Kavernen als „Stromspeicher“ in großen Maßstab (mittelfristige und saisonale Strompreis-Spreads)

- 01 Wasserstoff(-speicherung) @ EWE
- 02 Rolle von Kavernenspeichern
- 03 Strategien zur flexiblen Speichernutzung
- 04 Herausforderungen und Ausblick



Politische Weichenstellung für langfristige Transformation notwendig

Herausforderungen

- Ausgestaltung des Marktrahmens gemäß den Vorgaben des EU-Gas- und Wasserstoffpakets noch offen
- Lange Vorlaufzeiten und hoher Kapitalbedarf gepaart mit unsicherer Marktentwicklung birgt hohe Risiken
- Abwägung zwischen Erdgas und Wasserstoff sowohl aus ökonomischer als auch Versorgungssicherheitssicht komplex

Lösungsansätze

- Strukturierter Transformations- und bedarfsgerechter Neubaupfad unter Berücksichtigung der Versorgungssicherheit im Erdgas- und Wasserstoffsystem
- De-Risking-Instrumente als Schlüssel für einen erfolgreichen H₂-Speicherhochlauf - Differenzverträge als mögliche Option



Ein Blick nach vorne

- Entwicklung und Veröffentlichung einer nationalen Speicherstrategie auf Basis des vorhandenen Weißbuchs
- Unterstützung eines Speicherhochlaufs als ein relevanter Baustein des Wasserstoffmarkthochlaufs
- Vorbereitung entsprechender Projekte für die Skalierung der Wasserstoffspeicherkapazitäten



Vielen Dank!

EWE Aktiengesellschaft
Tirpitzstraße 39 - 26122 Oldenburg
info@ewe.de - ewe.de

Voraussetzungen für den flexiblen Betrieb einer PtL-Anlage: Steuerungsalgorithmen & Stromprognosen

Dr. Alexander Zschocke, CENA Hessen



Vortrag 1 | Forschungszentrum Jülich

Vortrag 2 | EWE Gasspeicher

Vortrag 3 | CENA Hessen

Vortrag 4 | INERATEC GmbH

Vortrag 5 | Fraunhofer LBF

Vortrag 6 | Provadis Hochschule

Panel

Wrap Up

Voraussetzungen für den flexiblen Betrieb einer PtL-Anlage

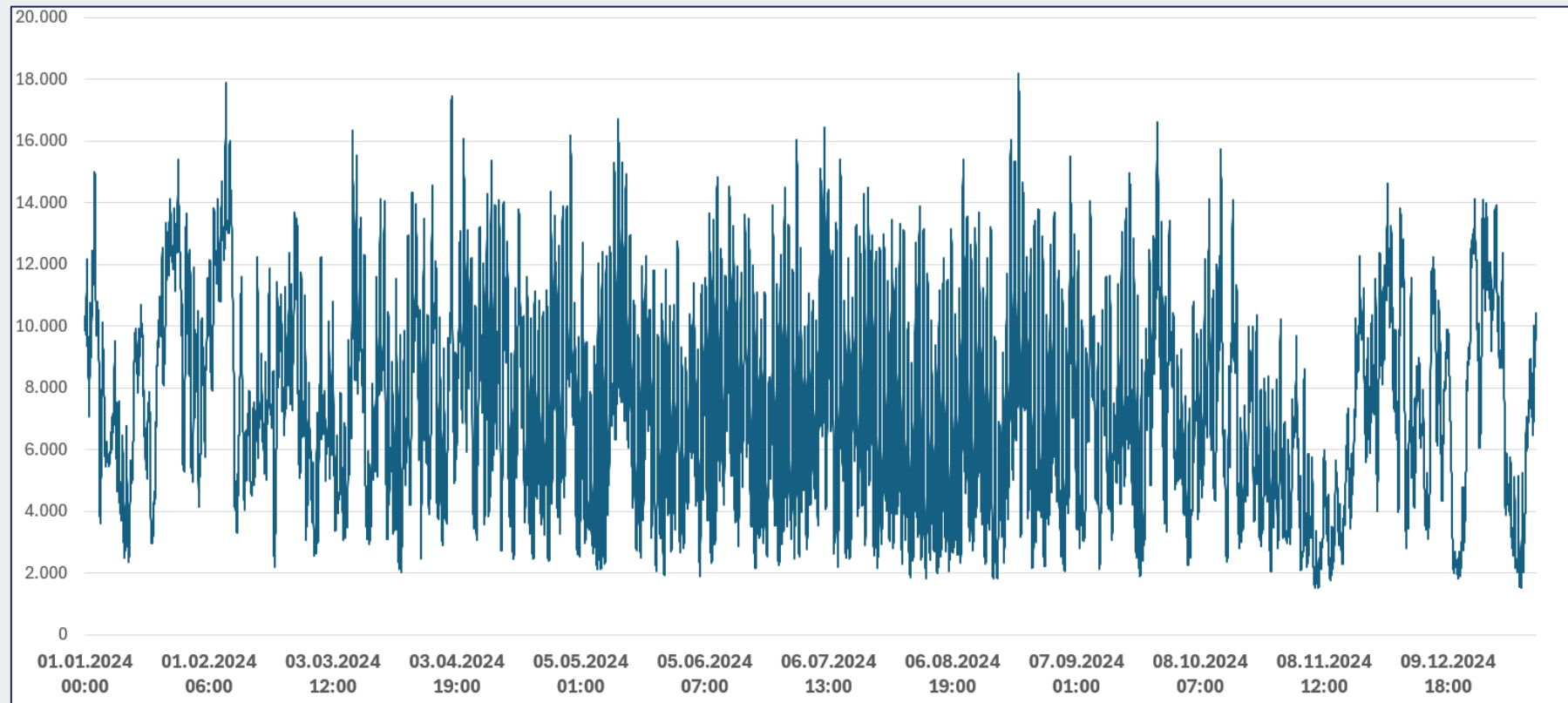
Dr. Alexander Zschocke

Power2X in der Praxis: E-Fuel-Produktion unter schwankendem Stromangebot
Frankfurt, 4. Juni 2025



Ausgangslage: Regenerative Stromerzeugung fluktuiert

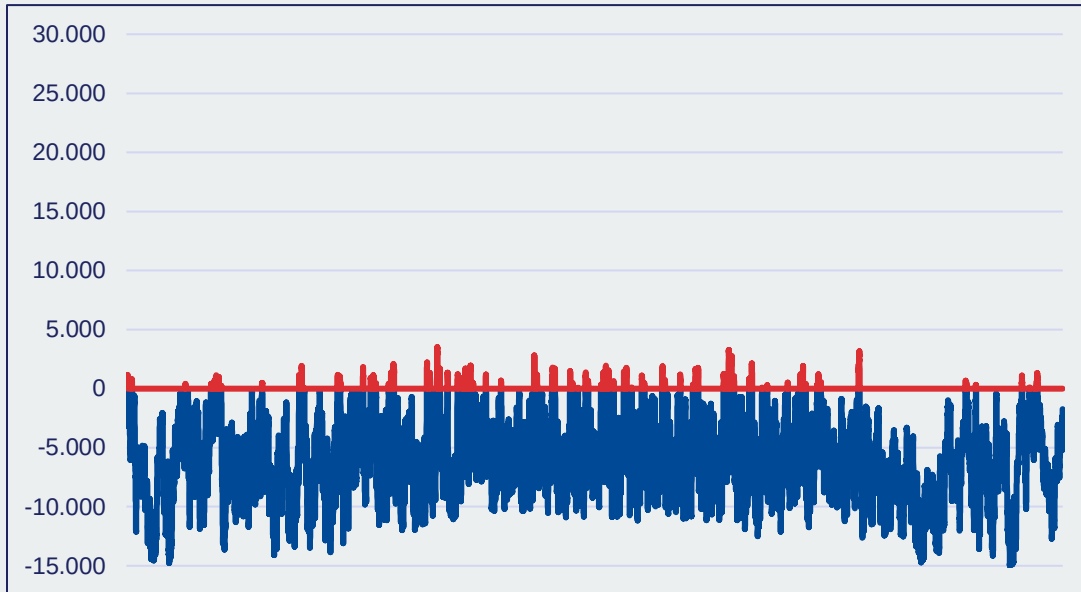
Erneuerbare Stromerzeugung 2024, MWh pro Viertelstunde



Quelle: Bundesnetzagentur

Differenz Stromnachfrage und regenerative Stromerzeugung

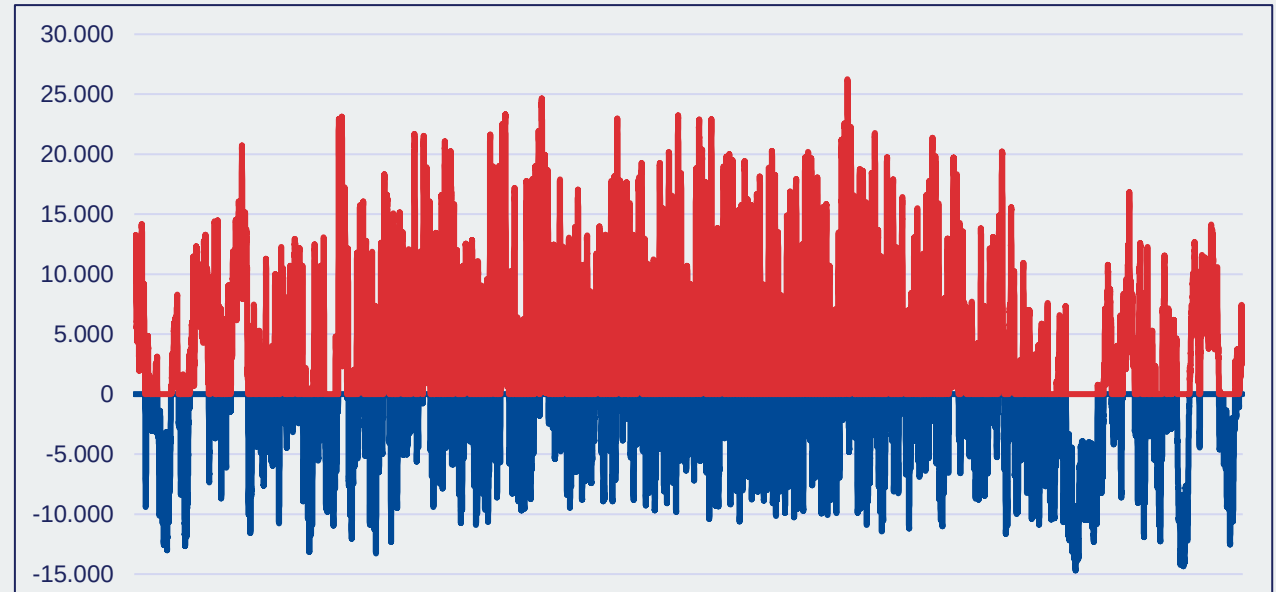
Istwerte 2024, MWh pro Viertelstunde



Quelle: Berechnungen CENA Hessen

Nachfrage:

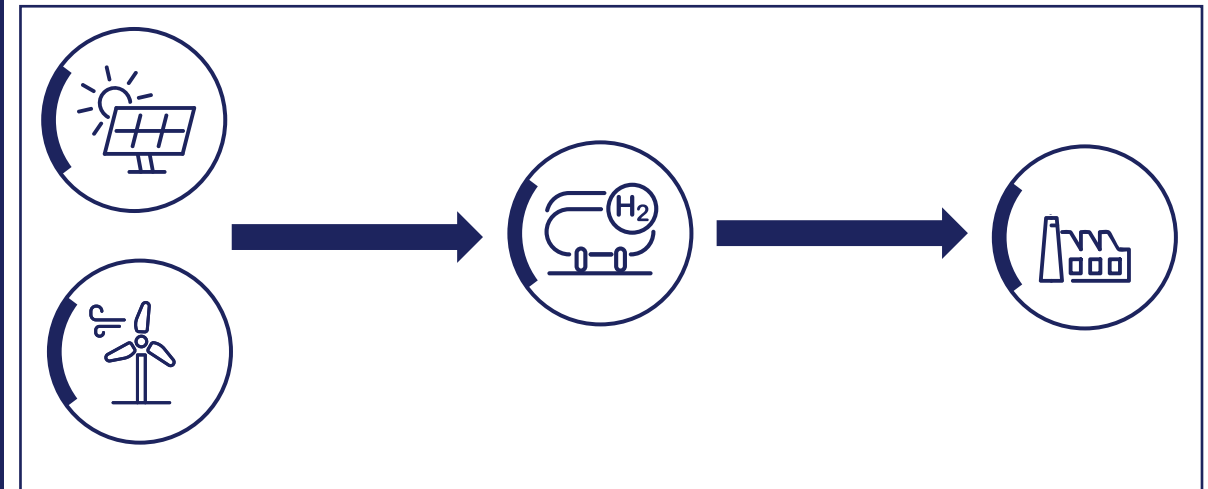
Istwerte 2024, Produktion: Ausbauplanung für 2030 gemäß EEG,
MWh pro Viertelstunde



Quelle: Berechnungen CENA Hessen

Lösungsansatz Sektorenkopplung

- Im deutschen Energiesystem führt ein Mehr an installierter Wind- und Solarleistung zunehmend zu Zeiten von nicht nutzbaren Stromüberschüssen
- Dennoch werden weiterhin Zeiten bleiben, in denen erzeugte Wind- und Solarenergie nicht ausreichen.
- Lösungsansatz Sektorenkopplung
 - Elektrifizierung anderer Sektoren
 - Umwandlung in speicherfähige Energie



Quelle: CENA Hessen

Der Power-to-Kerosene-Pfad



Schritt 1: Erzeugung von Solar- und Windstrom

- Kombination von Solar- und Windstrom zwecks Reduzierung der Variabilität der Stromversorgung
- Negative Korrelation (-0,25)



Schritt 2: Elektrolytische Wasserstoffproduktion; Speicherung des nicht sofort benötigten Wasserstoffs

- Sehr flexible Reaktion des Elektrolyseurs erforderlich
- Ggf. Abpufferung durch Batterien



Schritt 3: Umwandlung des Wasserstoffs zu Fischer-Tropsch-Zwischenprodukt

- Bei ausreichend verfügbarem Strom Versorgung aus laufender Wasserstoffproduktion
- Bei nicht ausreichend verfügbarem Strom Versorgung aus Speicher



Schritt 4: Aufarbeitung des FT-Zwischenprodukts zu spezifikationskonformem Kerosin

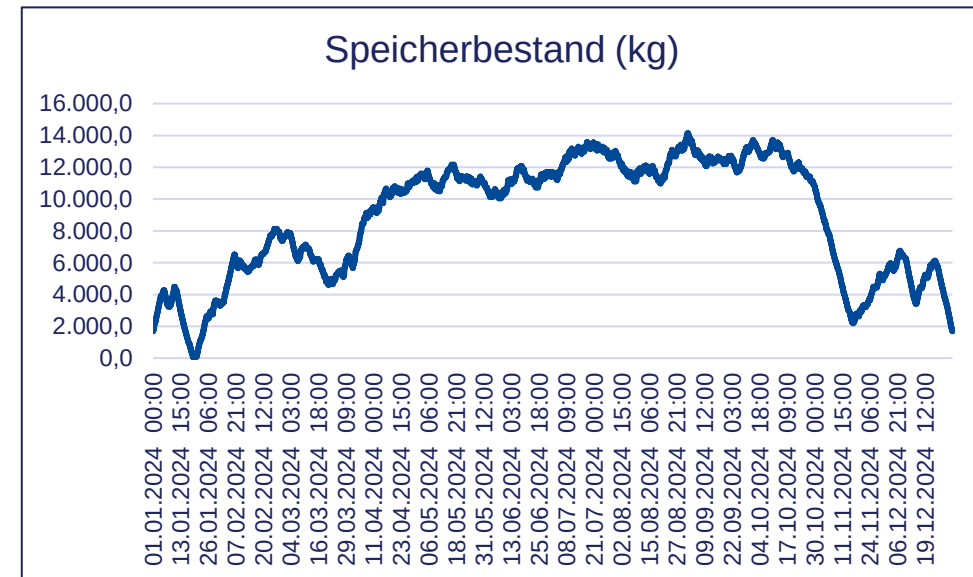
- In RePoSe nicht betrachtet

Variante 1: Ausgleich nur über Speicher

- Szenario-Rechnung auf Basis 2024 Ist-Daten für Einzelanlagen für ein INERATEC-Modul
- **Parameter:**

	Solar	Wind	Summe
Installierte Leistung (MW)	2,85	1,90	4,75
Stromerzeugung (MWh) / Jahr			8.784

- **Speicherbestandsentwicklung:**



Quelle: Berechnungen CENA Hessen

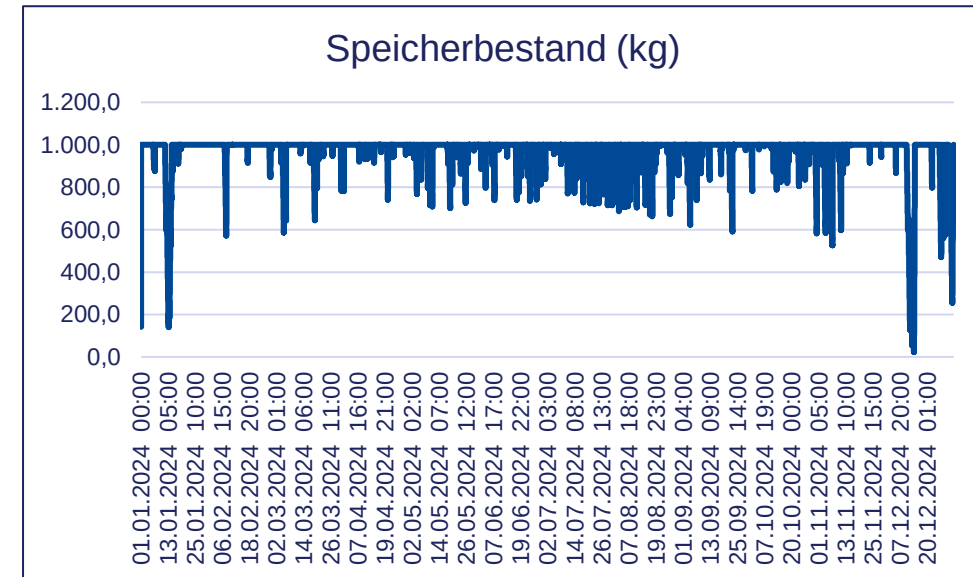
Für den Ausgleich der schwankenden Strom-verfügbarkeit nur durch Speicherung ist für ein INERATEC-Modul (Jahresproduktion 350 Tonnen FT-Zwischenprodukt) ein Wasserstoffspeicher erforderlich, der rund 14 Tonnen Wasserstoff aufnehmen kann.

Variante 2: Kleiner Speicher, Ausgleich durch Überdimensionierung der Stromerzeugung

- Szenario-Rechnung auf Basis 2024 Ist-Daten für Einzelanlagen für ein INERATEC-Modul Jahreswerte
- **Parameter:**

	Solar	Wind	Summe
Installierte Leistung (MW)	29,96	19,27	49,93
Stromerzeugung (MWh) / Jahr			92.232

- **Speicherbestandsentwicklung:**



Quelle: Berechnungen CENA Hessen

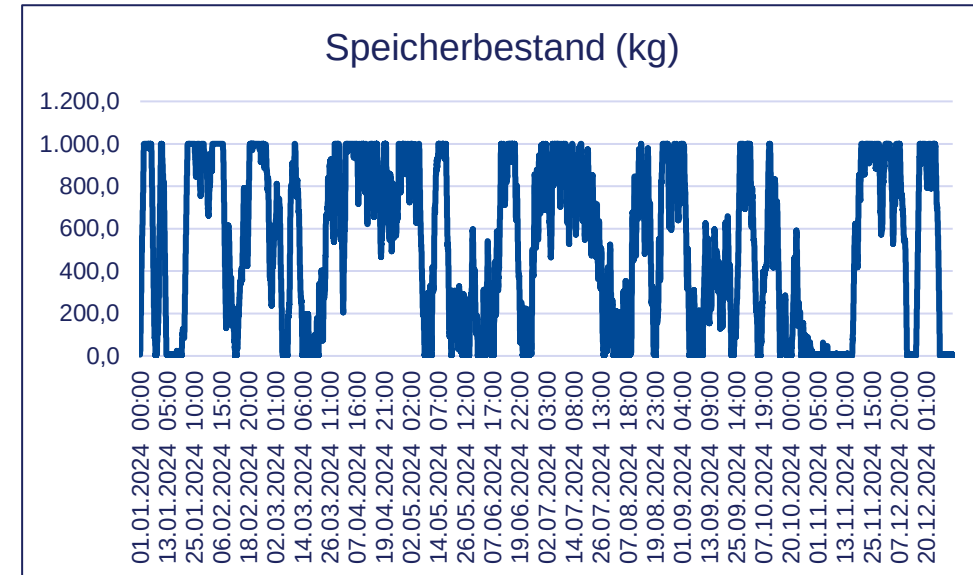
Durch Überdimensionierung der Stromversorgung kann Speichergröße auf 1 Tonnen beschränkt werden, aber um den Preis einer Überdimensionierung um den Faktor 10,5.

Variante 3: Kleiner Speicher, Ausgleich durch variablen Betrieb

- Szenario-Rechnung auf Basis 2024 Ist-Daten für Einzelanlagen für ein INERATEC-Modul Jahreswerte
- **Parameter:**

	Solar	Wind	Summe
Installierte Leistung (MW)	2,85	1,90	4,75
Stromerzeugung (MWh) / Jahr			8.784

- **Speicherbestandsentwicklung:**



Quelle: Berechnungen CENA Hessen

- Vereinfachte Berechnung zur Illustration (0%/100%)
- Kleiner Speicher und keine Überdimensionierung der installierten Leistung, aber 915 Stunden Produktionsausfall.

Projekt RePoSe

- Betrieb eines Produktionsmoduls aus RWGS- und FT-Synthese unter den Bedingungen einer variablen Stromversorgung
- Modul der INERATEC-Anlage durch redundante Auslegung fähig zu Teillastbetrieb
- Q3 2025 Ermittlung der Anlagenparameter bei Teillastbetrieb
 - Zeitbedarf für Herauf- und Herunterfahren (Lastwechsel)
 - Mengenwerte für Wasserstoffverbrauch und Produktion von FT-Crude nach Laststufen
- Anschließend auf dieser Basis Entwicklung von Steuerungsalgorithmen durch CENA
- Danach operative Durchführung des Betriebs unter variablen Bedingungen



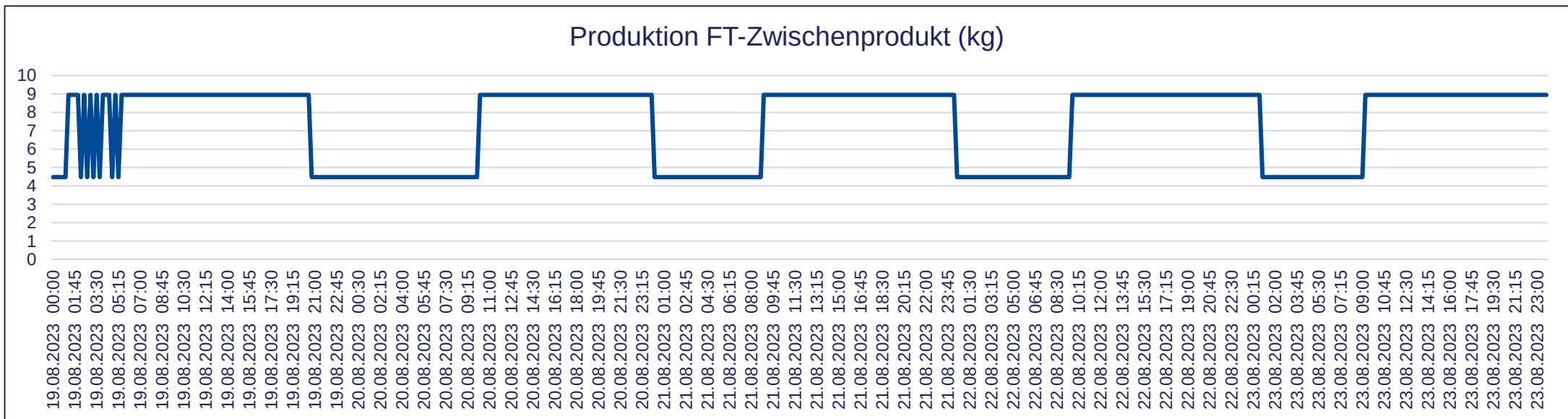
Quelle: INERATEC

Die Kenntnis folgender Anlagenparameter ist für die Entwicklung der Steuerungsalgorithmen erforderlich:

- **Produktion und Wasserstoffverbrauch bei Volllast und den einzelnen Teillasten**
 - Wesentlicher wirtschaftlicher Aspekt
 - Grundsätzlich ist möglichst hohe Produktion wünschenswert
 - Aber: Wenn Teillastbereiche ineffizient sind, kann niedrigerer Teillastbetrieb oder Standby besser sein
- **Produktion und Wasserstoffverbrauch während des Lastwechsels**
 - Standby zu Teillast, Standby zu Volllast, Teillast zu niedrigerer / höherer Teillast etc.
 - In der Zeit des Lastwechsels Ineffizienzen zu vermuten
 - Höhe wichtig für Entscheidungen über Häufigkeit des Lastwechsels
- **Geschwindigkeit des Lastwechsels**
 - Dauer der Ineffizienzen während des Lastwechsels
 - Auch operativer Parameter: Steuerung muss vermeiden, dass Wasserstoffvorrat erschöpft wird, bevor Standby erreicht ist

Praktisches Beispiel: Umgang mit Jo-Jo-Effekten

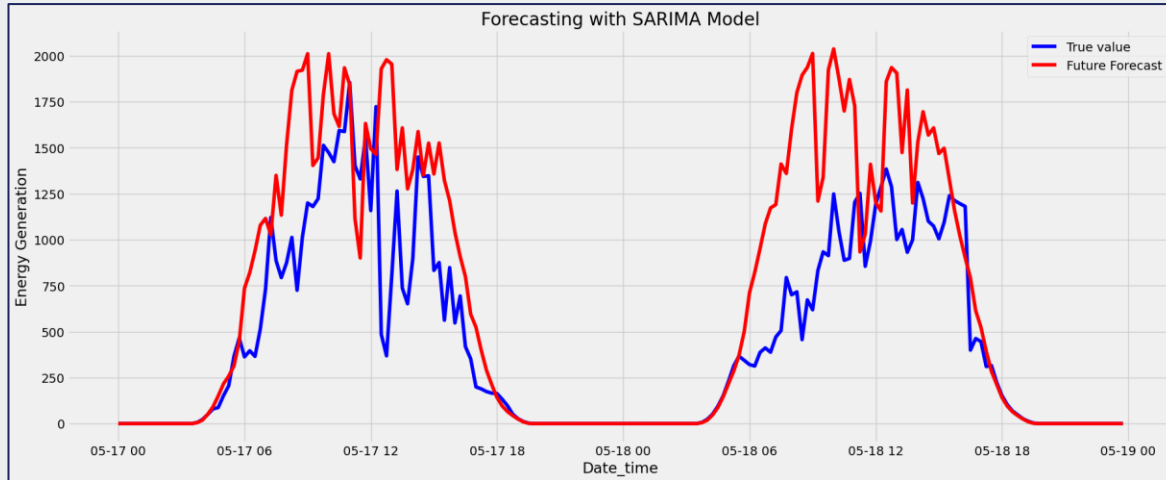
- Variabler Betrieb kann zu häufigem Herauf- und Herunterfahren der Produktion führen
 - Hellflauten: Tagsüber Auffüllung des Wasserstoffspeichers, nachts teilweise Leerung
 - Schwacher Wind im kritischen Grenzbereich
- Grundsätzlich unerwünscht wegen unnötiger Materialbeanspruchung
- Kann durch geeignete Steuerungsalgorithmen vermieden werden, aber setzt Kenntnis der Anlagenparameter voraus
- Einbeziehung von Prognosen möglicherweise sinnvoll



Quelle: Berechnungen CENA Hessen

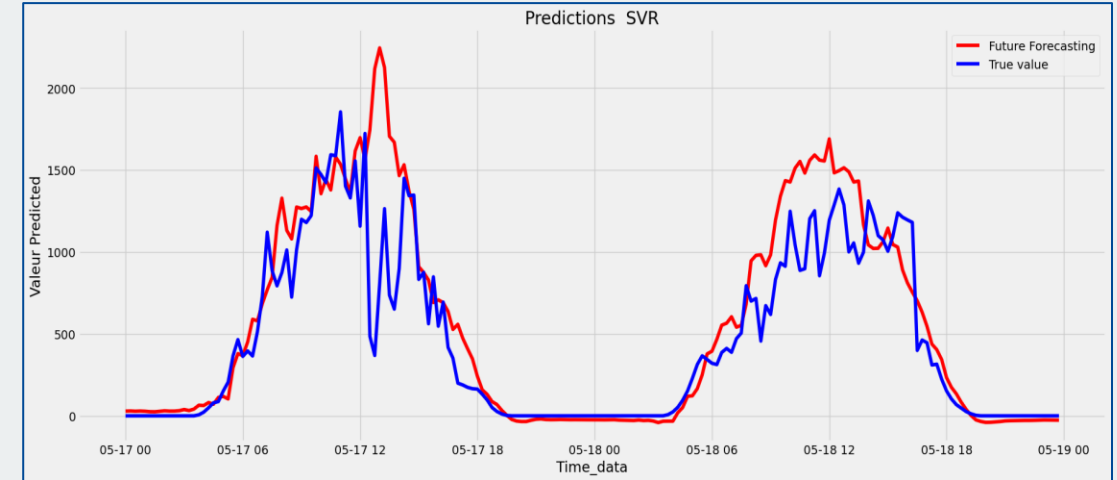
Solarstrom gut prognostizierbar

SARIMA-Ansatz: Klassische Modellierung als Prognosegleichung



Quelle: CENA Hessen

Machine Learning: Support Vector Regression

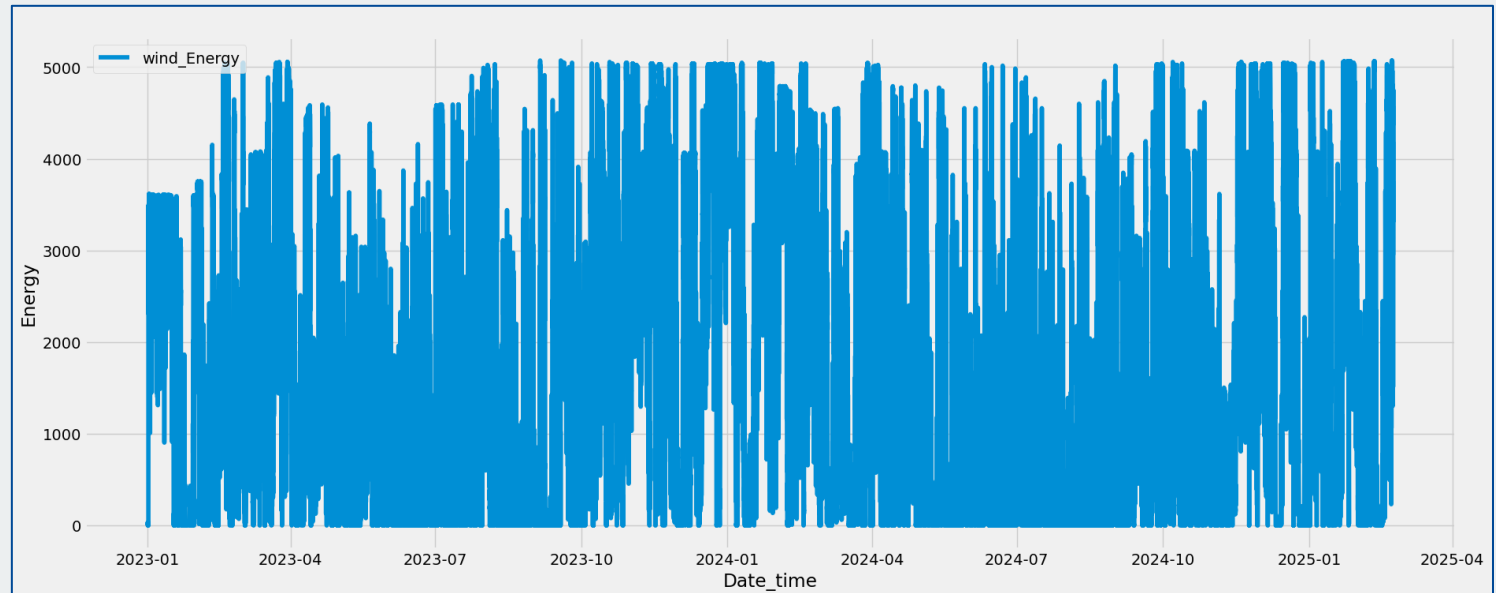


Quelle: CENA Hessen

- Regelmäßiger Verlauf des Sonnengangs macht Solarstrom gut prognostizierbar
- Machine Learning-Modelle noch etwas besser als klassische Modelle
- Sehr kurzfristige Schwankungen durch keines der Modelle prognostizierbar

Prognose von Windstrom schwieriger

- Sehr hohe Volatilität
- Produktion von einem Tag zum anderen sehr unterschiedlich und unvorhersehbar
- Es gibt keinen so offensichtlichen Jahres- oder Tages-Zyklus wie bei der Solarenergie



Quelle: CENA Hessen



www.linkedin.com/company/cena-hessen

www.cena-hessen.de
info@cena-hessen.de

CENA Hessen

Kompetenzzentrum für Klima- und Lärmschutz im Luftverkehr
der Hessen Trade & Invest GmbH



Wirtschaftsförderer für Hessen



Gefördert durch:
Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr
aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Koordiniert durch:
NOW
NOW-GMBH.DE

Projekträger:
VDI | VDE | IT



Dr. Alexander Zschocke

Senior Manager Power-to-Liquid



+49 175 5843268



alexander.zschocke@cena-hessen.de

Praktische Erfahrungen mit dem flexiblen Betrieb einer PtL-Anlage im Projekt RePoSe

Alexander Irslinger, INERATEC GmbH



Vortrag 1 | Forschungszentrum Jülich

Vortrag 2 | EWE Gasspeicher

Vortrag 3 | CENA Hessen

Vortrag 4 | INERATEC GmbH

Vortrag 5 | Fraunhofer LBF

Vortrag 6 | Provadis Hochschule

Panel

Wrap Up



FUELING THE FUTURE

1 VORSTELLUNG INERATEC

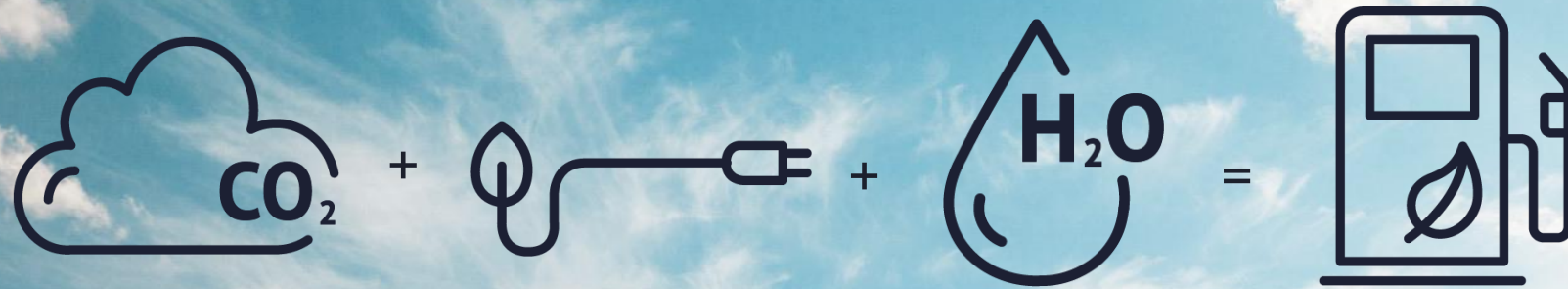
Ein lebenswerter Planet und Zugang zu bezahlbarer, verlässlicher, nachhaltiger und post-fossiler Energie für alle.  +  + 

 +  +  WIR SCHAFFEN EIN MULTI-MEGATONNEN CO₂ RECYCLING POTENZIAL

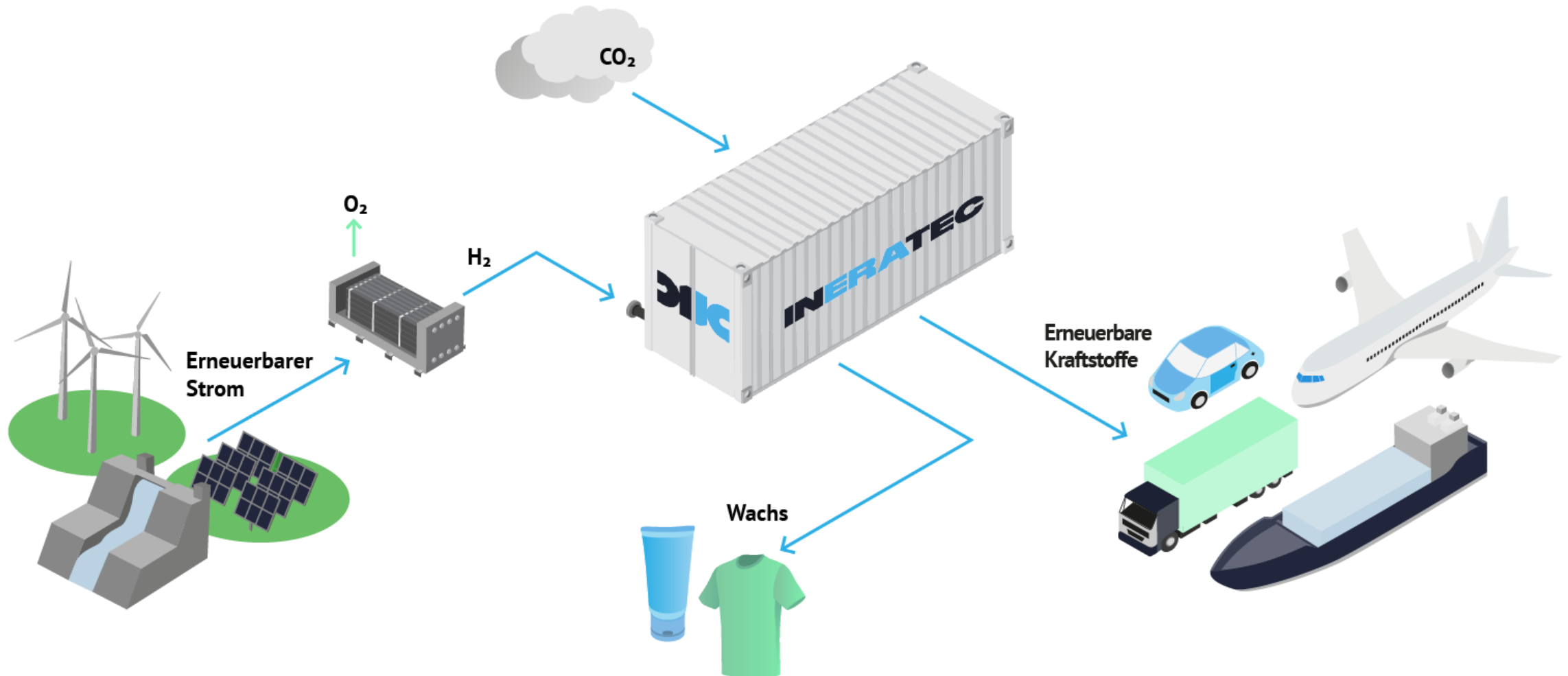
Wir recyceln CO₂ und nutzen grünen Wasserstoff, um nachhaltige, einsatzbereite e-Fuels für die Mobilitätssektor zu liefern und ersetzen fossile Rohstoffe in der chemischen Industrie.

PROBLEM





Das Ölfeld der Zukunft: Power-to-Liquid



Kerntechnologie: Modulare Reaktoren zur Synthesegas- und Kraftstoff-produktion.

MIKROSTRUKTURIERTE REAKTOREN

Fischer-Tropsch, Methanol, RWGS und Methanisierung
80-mal kompakter als herkömmliche Reaktoren

HÖCHSTE EFFIZIENZ

2x effizienter

Hohe Umwandlung, verbesserte Wärmerückgewinnung

LASTFLEXIBEL

Betrieb mit schwankender Versorgung durch
erneuerbare Energien, Kurze Start- und Abschaltzeiten

IP UND KNOW-HOW

Patentgeschützt

>35,000 Stunde Betriebserfahrung

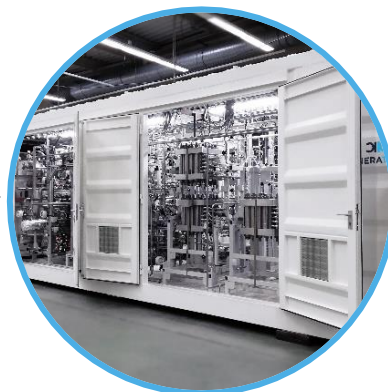


Skalierbarkeit: Modularer Ansatz

FORSCHUNG- UND
DEMONSTRATIONSANLAGEN



INDUSTRIELLE
ANLAGE
1 MW



KOMMERZIELLE
ANLAGE
10 MW



KOMMERZIELLER ROLL-OUT
100 MW



> 0.75 M Liter/a

> 3.8 M Liter/a

> 38 M Liter/a

Die weltgrößte Power-to-X Anlage

Build-Own-Operate:

Frankfurt-Höchst

TASK:

Lieferung von e-Fuels und e-Chemicals

ZIEL:

Produktion von bis zu 3.5m Litern jährlich
Blueprint für den weltweiten Betrieb eigener Anlagen

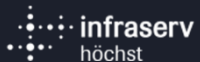
STATUS:

Produktionsstart 2025

STANDORT:

Frankfurt/Main

PARTNER:



Build-Own-Operate:

Frankfurt-Höchst

EINSATZ NACH AUFBEREITUNG:

e-SAF für die Luftfahrt



e-Diesel für die Schifffahrt



e-Diesel / e-Benzin für den Straßenverkehr
und den Transport



Synthetische Grundstoffe für die chemische
Industrie



2 LASTFLEXIBLER BETRIEB EINER PTL- SYNTHESEANLAGE

BETRIEB EINER PTL-SYNTHESEANLAGE

Motivation Lastflexibilität & Technologieansatz

MOTIVATION LASTFLEXIBILITÄT

- > Reaktionsfähigkeit auf schwankende H₂-Versorgung senkt potenzielle H₂-Pufferspeichergröße und damit OPEX
- > Modulation der PtL-Syntheseanlage gem. schwankender Strompreise als wirtschaftlicher Faktor

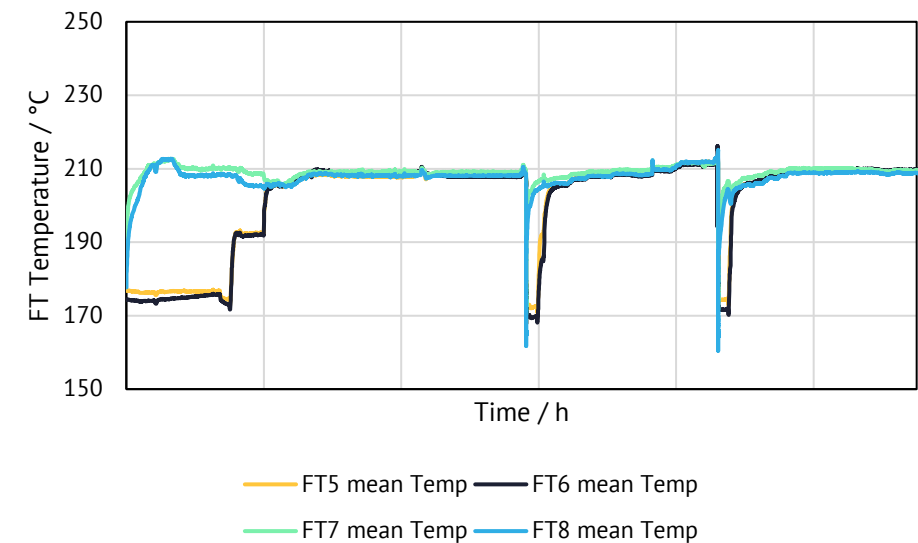
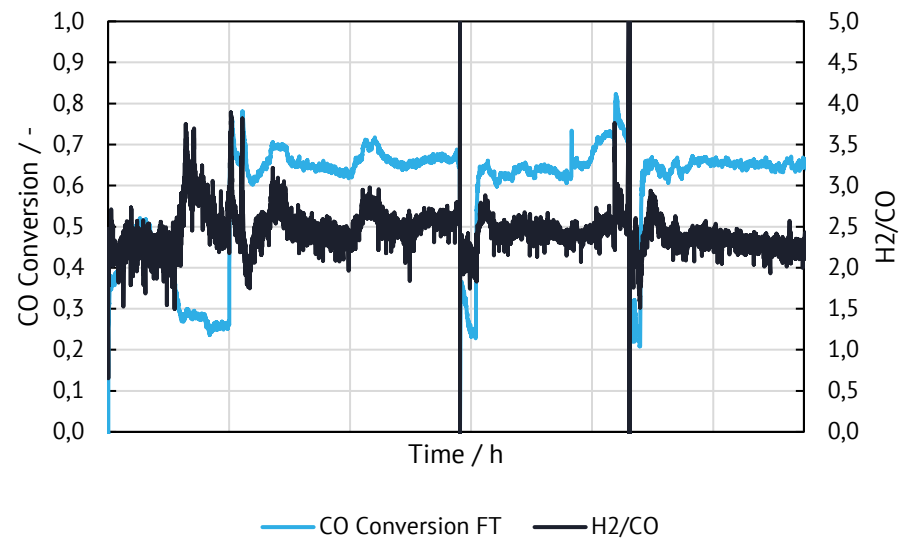
TECHNOLOGIEANSATZ FÜR LASTFLEXIBLE PRODUKTION

- > Modularer Aufbau INERATECs PtL-Syntheseanlagen
 - > Eine INERATEC PtL-Syntheseanlage besteht aus mehreren Synthesemodulen
 - > Jedes PtL-Synthesemodul besteht aus mehreren sog. „Prozesssträngen“
 - > Jeder Prozessstrang bildet die Reverse-Water-Gas-Shift (RWGS) – und Fischer-Tropsch (FT) – Reaktion ab
- > Modularität ermöglicht
 - > Betrieb einzelner Synthesemodule
 - > Betrieb einzelner Prozessstränge
- > Schnelle Rampen (Hoch- und Abfahren) der einzelnen Prozessstränge
- > Hoher Grad an Prozessautomatisierung

→ Große Bandbreite an Betriebspunkten möglich

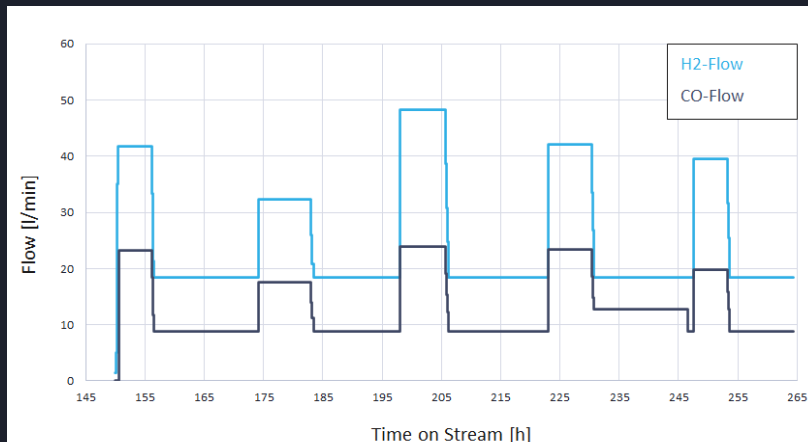
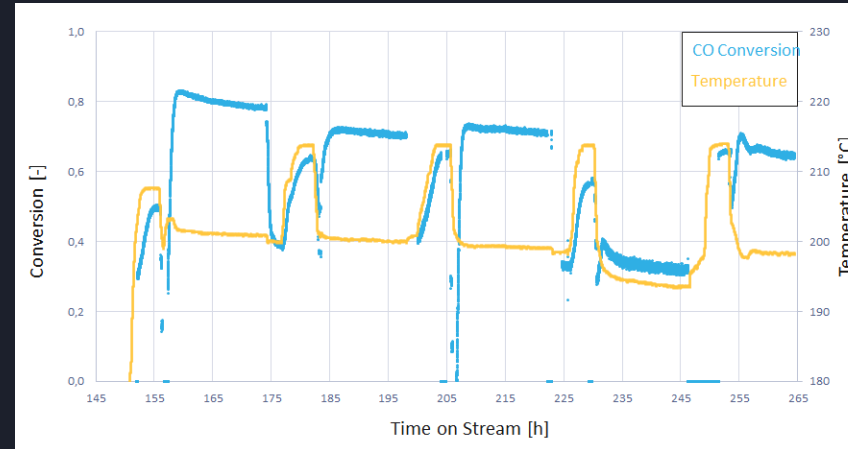
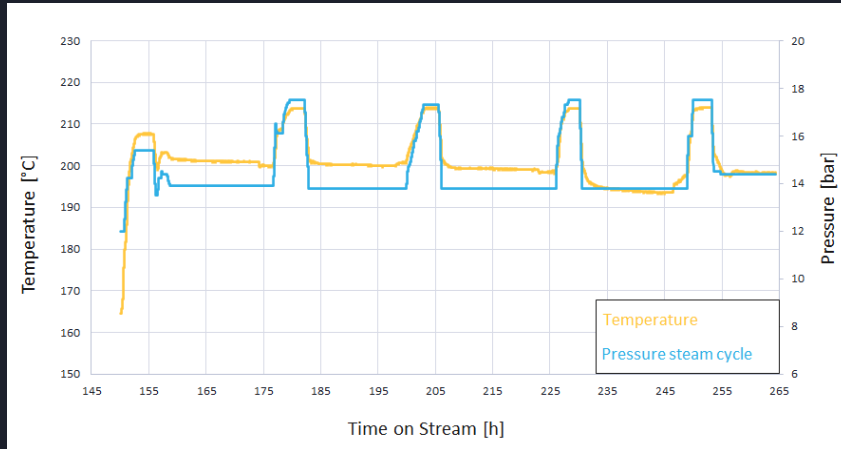
BETRIEB EINER PTL-SYNTHESEANLAGE

Beispiel für 0/2/4 FT-Reaktoren im ON/OFF-Betrieb



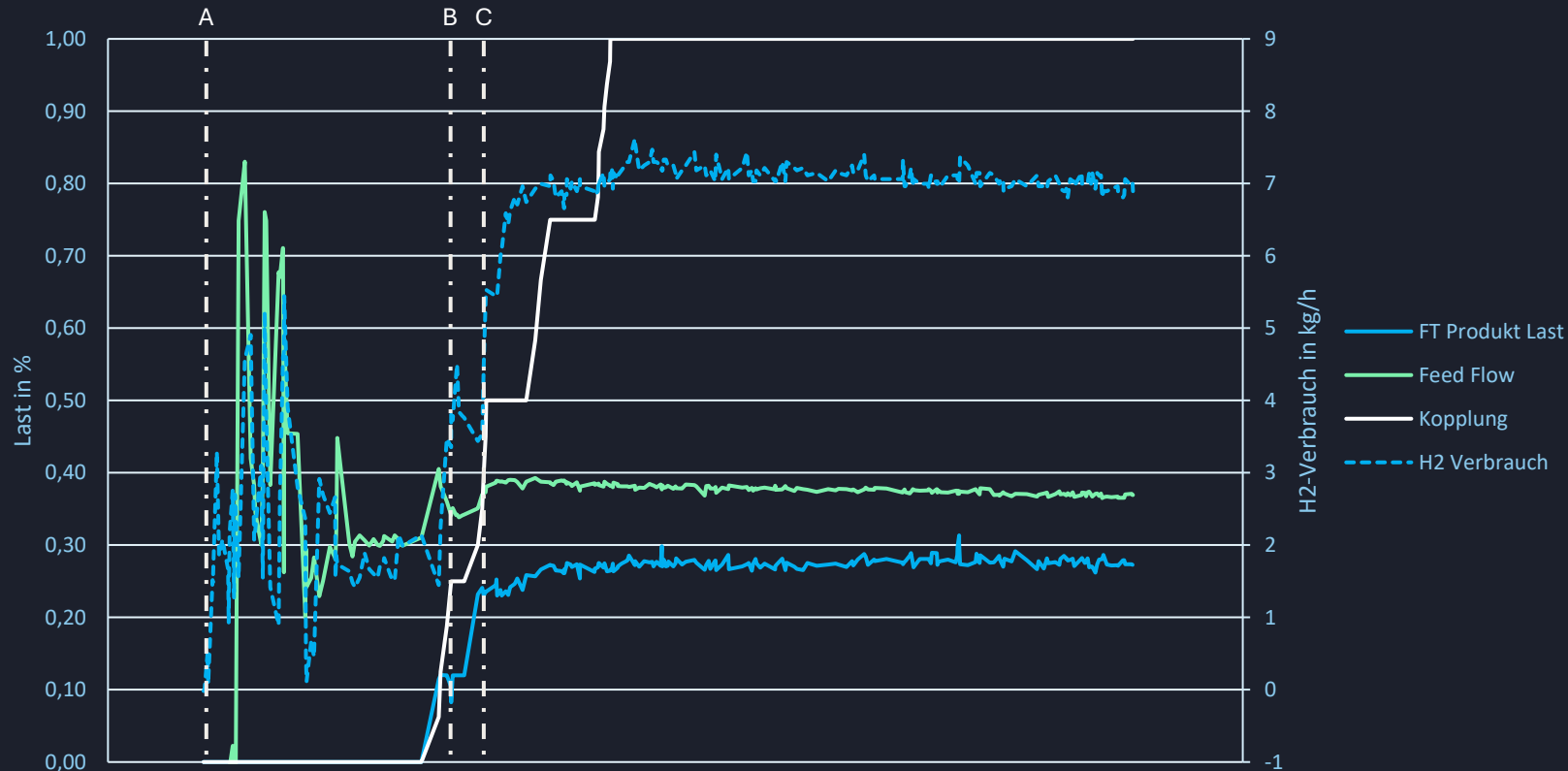
Lastflexibilität in der Umsetzung

Regelung der Prozessparameter und deren Auswirkung auf die Konversion



- > **Dynamischer Betrieb serieller Reaktoren möglich:** IC ermöglicht eine flexible Steuerung von RWGS- und FT-Reaktoren auch unter wechselnden Betriebsbedingungen.
- > **Schnelle Anpassung der Konversion:** Optimierung der Reaktorausnutzung im Minutentakt verhindert übermäßigen H₂-Verbrauch und schützt die Katalysatoren vor Koksbildung.

Lastflexibilitätsanalyse anhand Betriebs einer 1MW PtL-Syntheseanlage



Betriebszustände

A. Start der Schrittketten

B. Erster FT-Strang eingekoppelt (=25% Last)

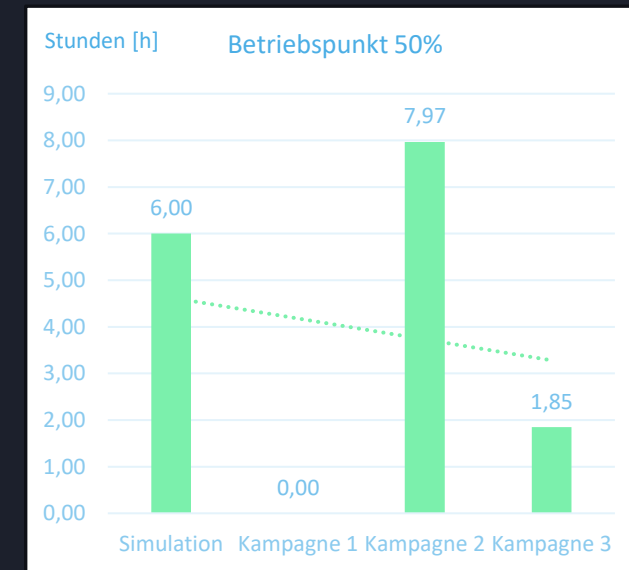
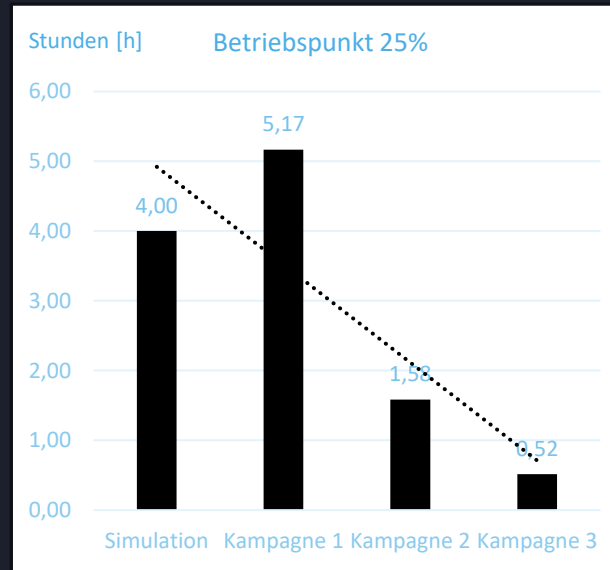
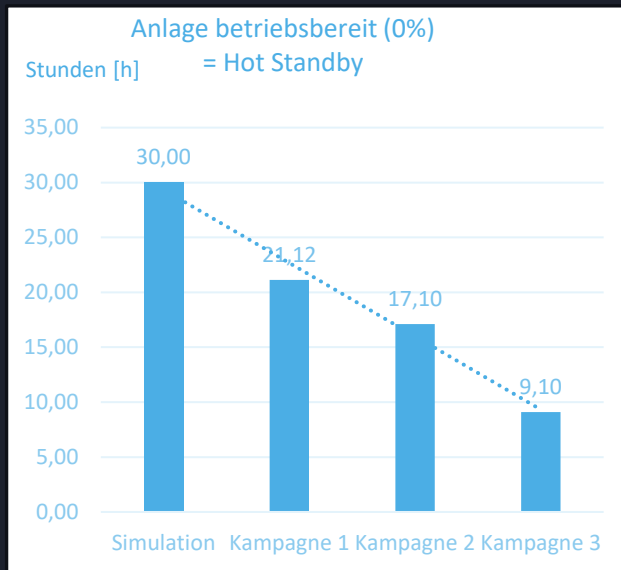
C. Zweiter FT-Strang eingekoppelt (=50% Last)

Dauer zwischen den Betriebszuständen

Betriebszustandswechsel	Zeit in h
A bis B	9:37
B bis C	1:51

Zeitverlauf Betrieb einer 1MW PtL-Syntheseanlage im lastflexiblen Betrieb

OPTIMIERUNG ÜBER DIE ZEIT



Trendanalyse Gegenüberstellung Simulation vs. Betriebskampagnen; Zeitskalen bis Erreichung Zielbetriebspunkt

- > Darstellung der Zeiten bis zur Erreichung des jeweiligen Betriebspunktes
- > Deutliche Zeitreduktion über mehrere Kampagnen durch Optimierung Prozessabläufe und -automatisierung

BETRIEB EINER PTL-SYNTHESEANLAGE

Zusammenfassung & Ausblick

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK ÜBER POTENZIALE ZUR STEIGERUNG DER LASTFLEXIBILITÄT

- > INERATECs modularer Ansatz ermöglicht lastflexiblen Betrieb mit großer Bandbreite an Betriebspunkten
- > Proof of concept: Nachweis, dass der gewählte Ansatz unter realen Bedingungen und im industriellen Maßstab erfolgreich umsetzbar ist.
- > Über Realbetrieb einer industriell skalierten Anlage konnte eine Zeitoptimierung erzielt werden
- > Potenziale zur Steigerung der Produktionsvariabilität liegen in der
 - > Steigerung der Prozessautomatisierung
 - > Erhöhung der Robustheit von PtL-Syntheseanlage und Prozessreaktoren

GET TO KNOW US



Get in touch now.

Alexander Irslinger
Business Development
alexander.irslinger@ineratec.de
T. +49 152 2851 1296

INERATEC GmbH

Siemensallee 84
76187 Karlsruhe
www.ineratec.de

Lunch & Networking Break.

Materialbeanspruchung bei flexiblem Betrieb

Dr. Thomas Pfeiffer, Fraunhofer LBF

Vortrag 1 | Forschungszentrum Jülich

Vortrag 2 | EWE Gasspeicher

Vortrag 3 | CENA Hessen

Vortrag 4 | INERATEC GmbH



Vortrag 5 | Fraunhofer LBF

Vortrag 6 | Provadis Hochschule

Panel

Wrap Up

Materialbeanspruchung bei flexiblem Betrieb – RePoSe Symposium

Power2X in der Praxis: E-Fuel-Produktion unter schwankendem Stromangebot / Pfeiffer, Schönborn, Mathes, Akuffo / 04.06.2025



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Koordiniert durch:



Projektträger:



Förderkennzeichen: 16RK14007D

Die Fraunhofer Gesellschaft

Zahlen und Fakten

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt angewandte Forschung von unmittelbarem Nutzen für private und öffentliche Unternehmen und von großem gesellschaftlichem Nutzen.

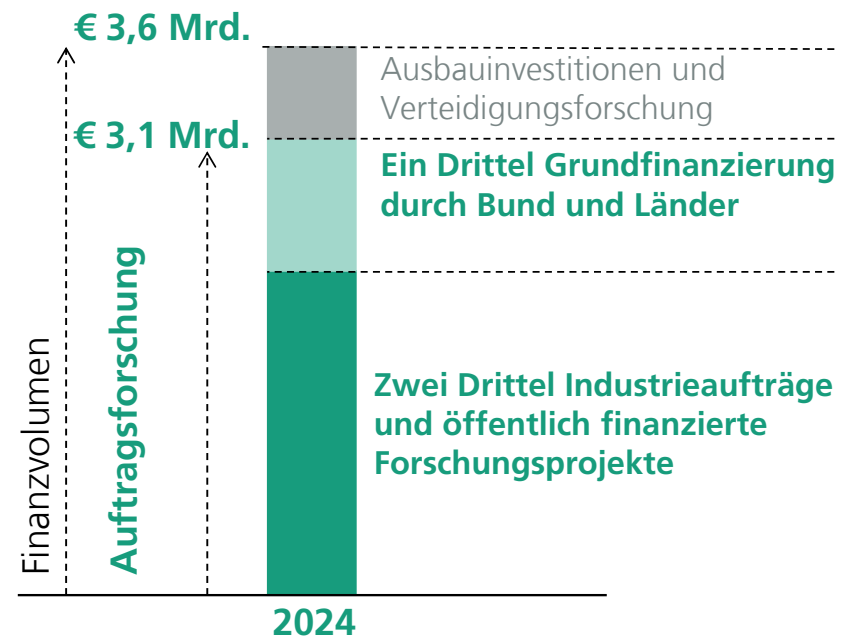


Ca. 32.000

Mitarbeiterinnen und
Mitarbeiter



75 Institute und
Forschungseinrichtungen



Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF

Ihr Partner für angewandte Forschung!



»Unsere Forschung dient dazu immer komplexere Produkte zuverlässig, effizient und nachhaltig zu gestalten. Dafür greifen wir in die Phase der Entwicklung, Realisierung, Nutzung und Wiederverwendung ein. Ziel ist es in Partnerschaft mit unseren Kunden bestmögliche Lösungen für deren Anwendungen zu schaffen.«

(Prof. Tobias Melz – Institutsleiter Fraunhofer LBF)

Fraunhofer LBF

Zahlen und Fakten 2024

70 Mitarbeit in internationalen
Fachausschüssen und Gremien

332 Mitarbeitende

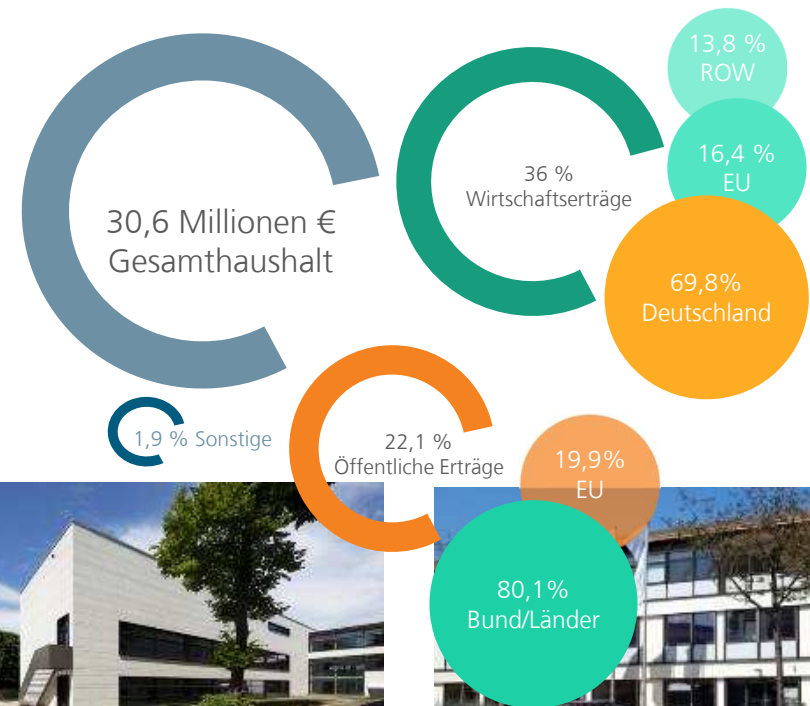
25 Vorlesungen

29 Mitarbeitende an
der TU Darmstadt

86 Wissenschaftliche
Veröffentlichungen

8 Neue Patente

29 Akademische Abschlüsse
(Promotionen, Masterarbeiten)

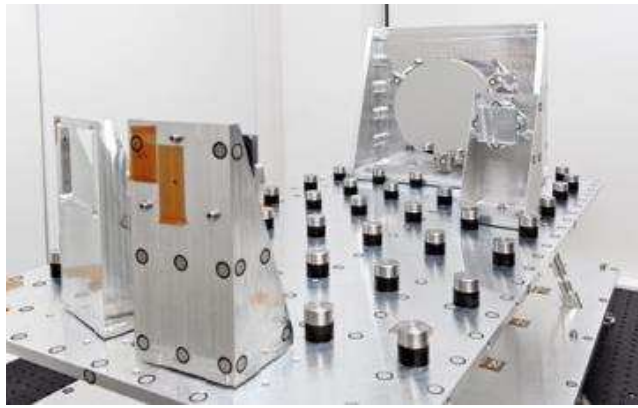


Fraunhofer LBF Forschungsbereiche



Betriebsfestigkeit

Die Betriebsfestigkeit bildet seit der Gründung des Fraunhofer LBF das Fundament unserer Forschungsaktivitäten.



Adaptronik

Seit 2001 gestalten wir innovative Lösungen von der Analyse der Strukturdynamik bis hin zur Optimierung des schwingungstechnischen Verhaltens von Komponenten und Strukturen.



Kunststoffe

Seit 2012 ein fester Bestandteil unserer Kompetenzen ist die Realisierung von Kunststoffanwendungen von der Synthese und Formulierung sowie der Additivierung über die Verarbeitung bis hin zur Analytik und Charakterisierung.

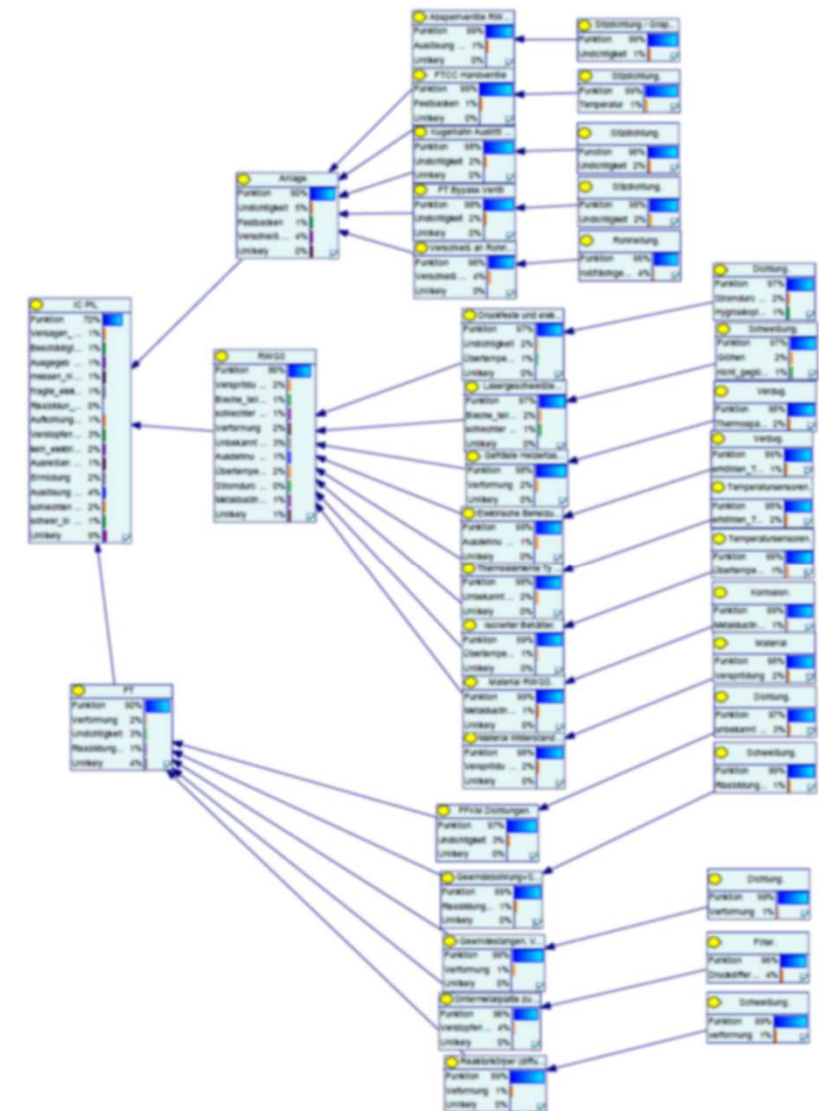
[illegible]

Zuverlässigkeitsanalyse

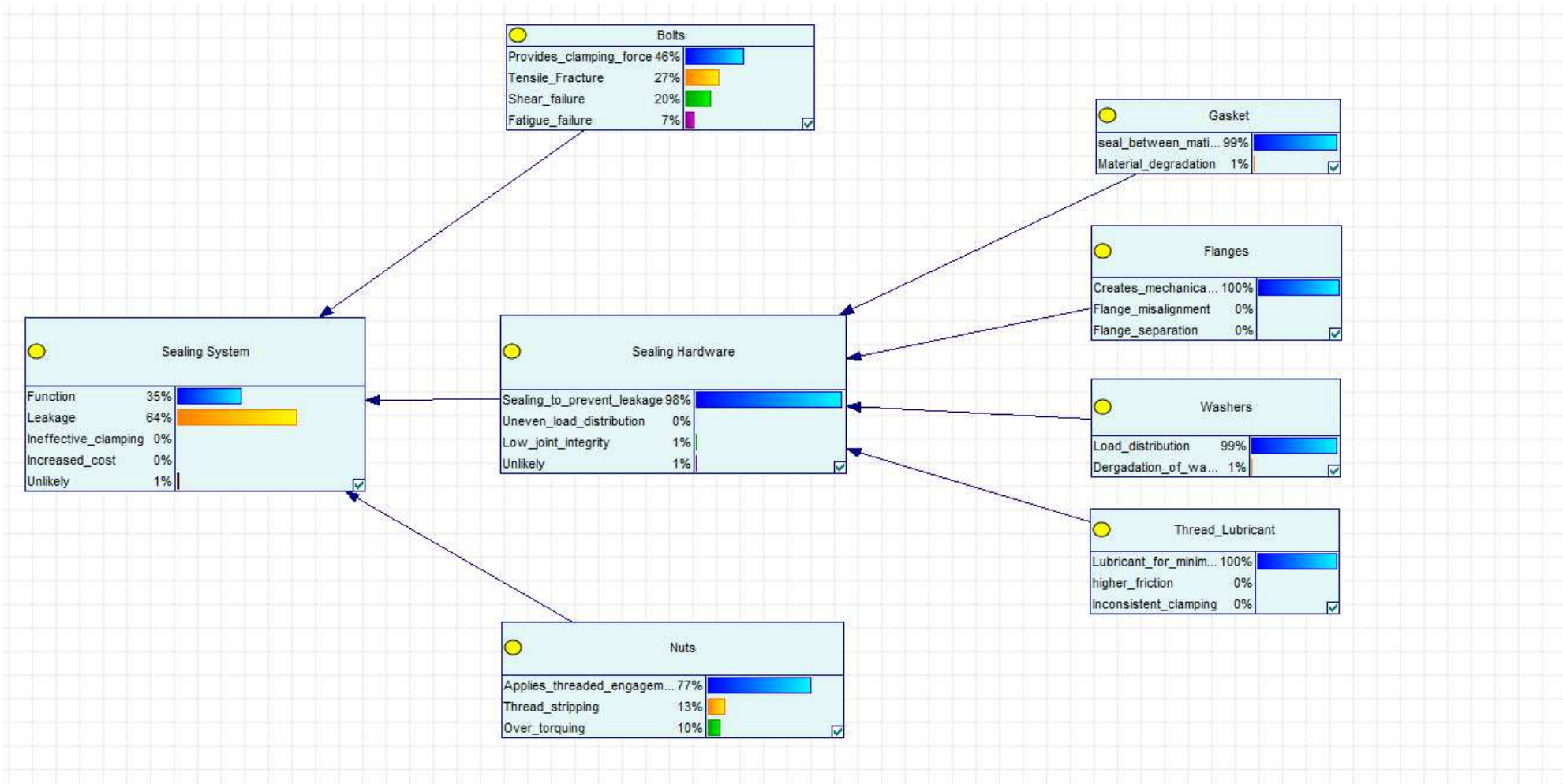
Probabilistische FMEA

Aufbau einer probabilistischen Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse (probFMEA)

Die drei Hauptkomponenten Anlage, Fischer-Tropsch Reaktor (FT) und Reverse Water Gas Shift Reaktor (RWGS) sind Grundlage der probFMEA. Im Weiteren werden die Ergebnisse der Versuche und Messergebnisse eingefügt und weiter ausdetailliert. Die Analyse wird auf Prozesstechnik und deren Fehlermoden erweitert.



Leckage durch Schraubenverbindung

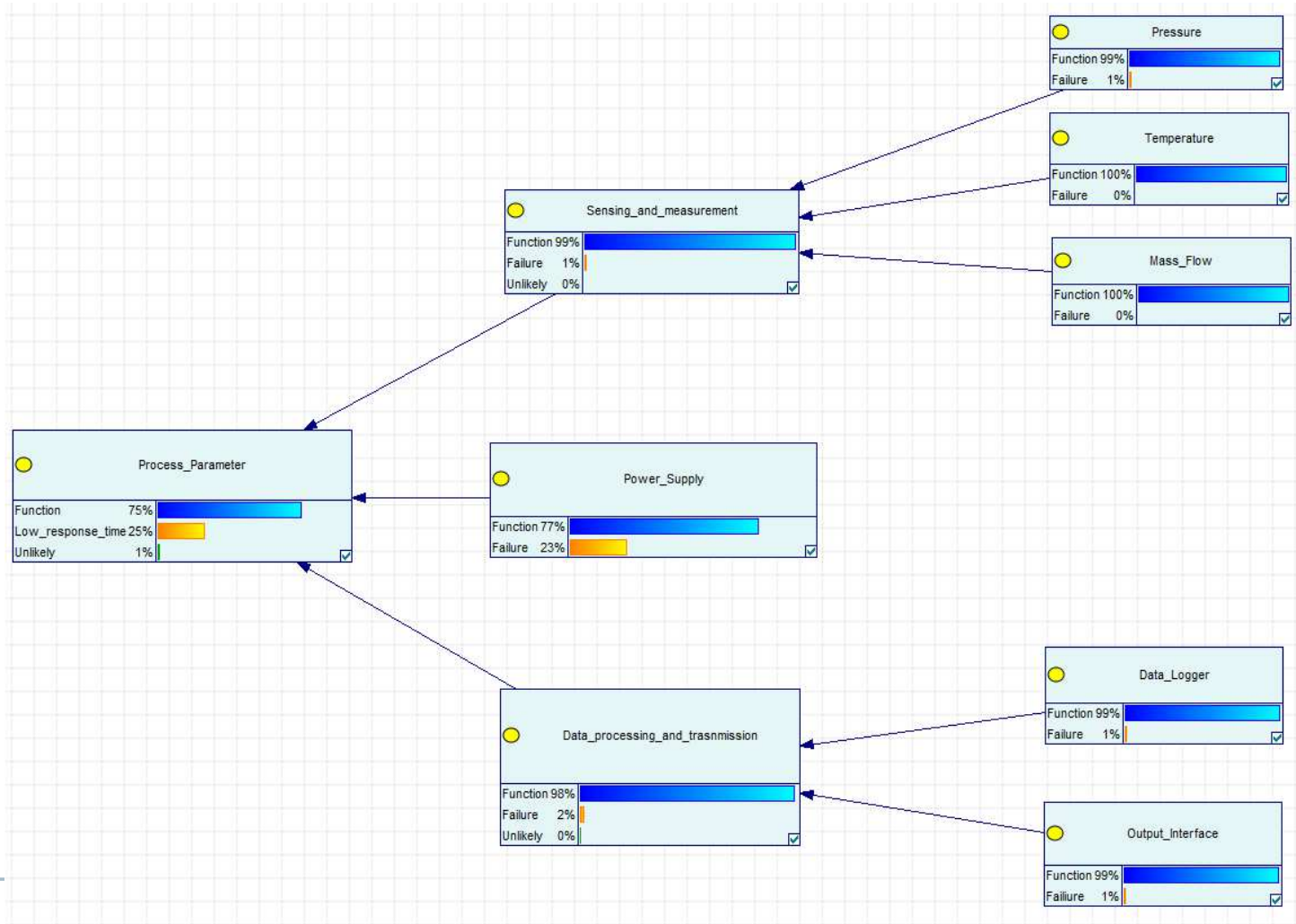


Detektion der zwei-Phasen-Strömung durch Acoustic Emission

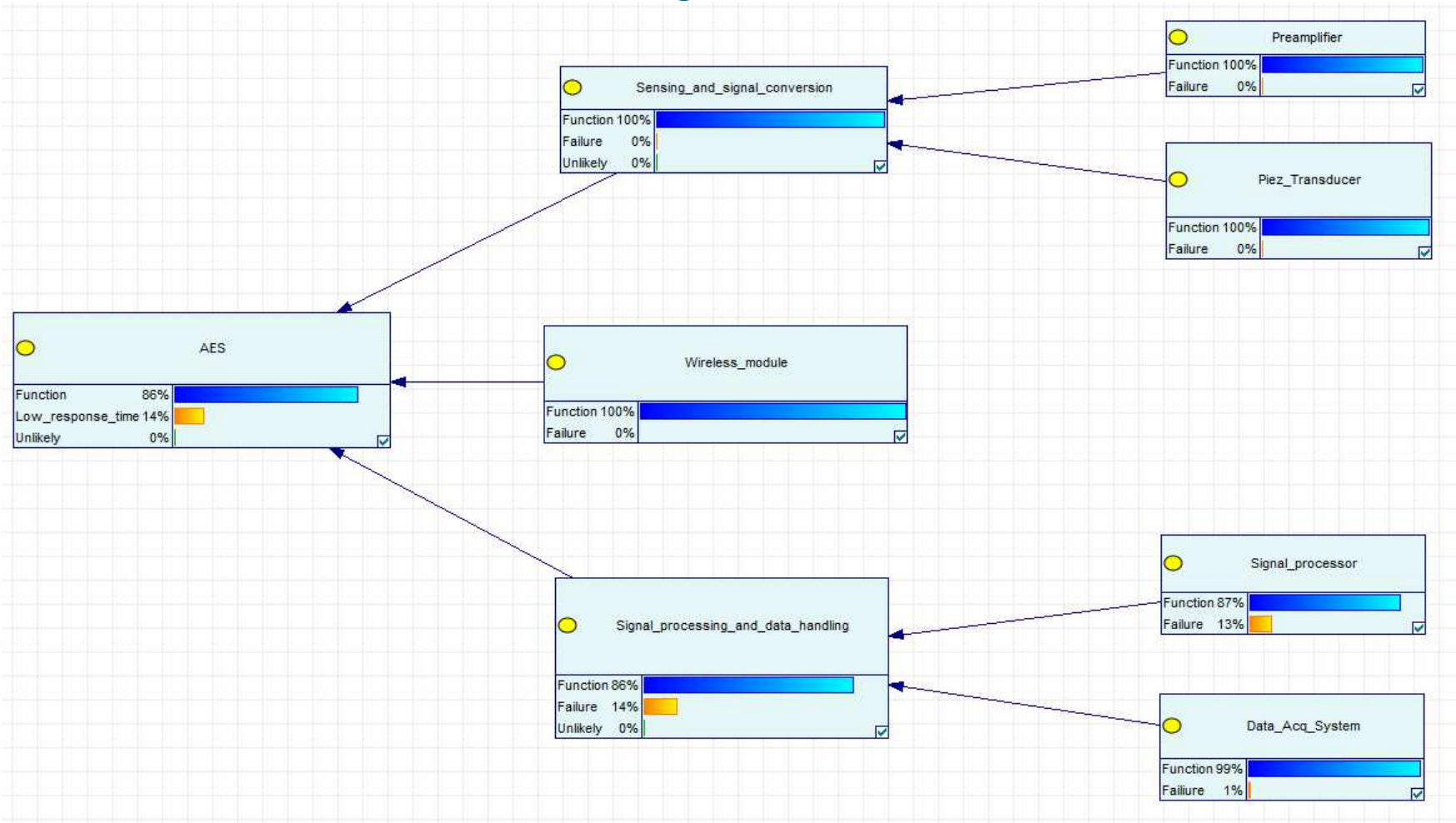
Fragestellung

- Wie verhält sich die AE-Messung bei Gasphasenänderungen im Vergleich zu den herkömmlichen Reaktionszeiten der Prozessparameter, bei der Erkennung früher Phasenübergänge
- Welche spezifischen akustischen Frequenzen und Signalmuster werden bei Phasenänderungen erzeugt, und wie zuverlässig können sie in Echtzeit erkannt werden?
- Wie verbessert die Empfindlichkeit des Schallemissionssensors gegenüber mikrostrukturellen Veränderungen der Gaseigenschaften die Fehlervorhersage und die Reaktionszeit in industriellen Umgebungen?

Detektion der zwei-Phasen-Strömung über Prozessparameter

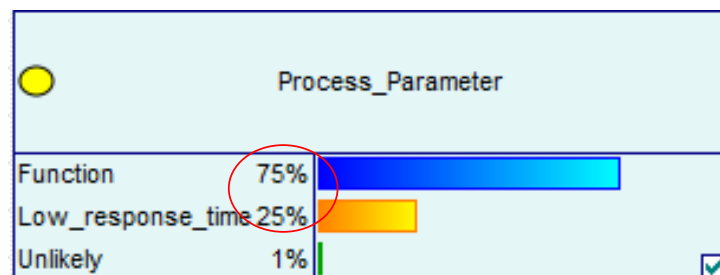
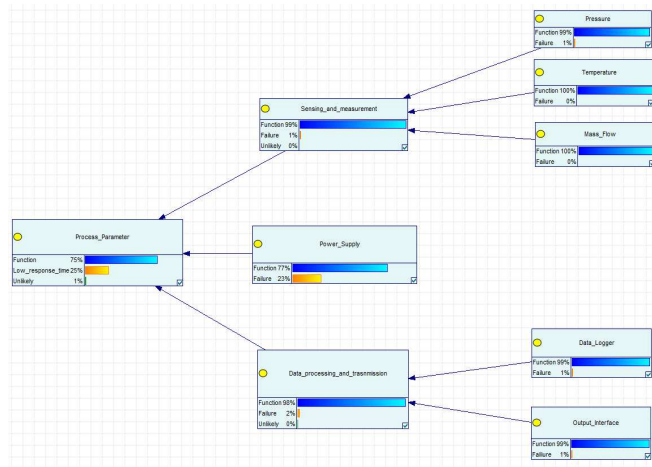


Detektion der zwei-Phasen-Strömung Acoustic Emission

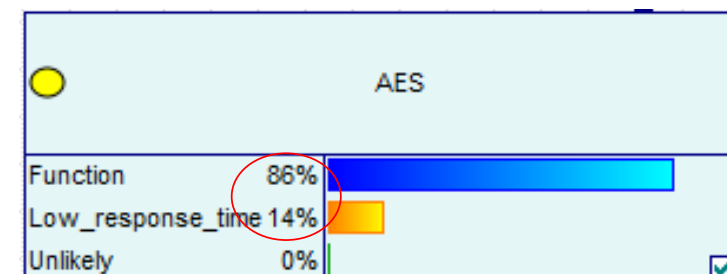
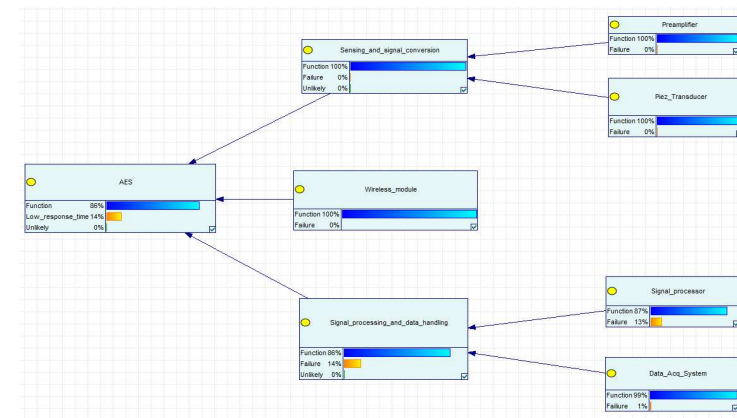


Detektion der zwei-Phasen-Strömung durch Acoustic Emission

Prozess Parameter



Acoustic Emission Sensor (AES)



Untersuchungen unter überlagerter Temperaturbeanspruchung

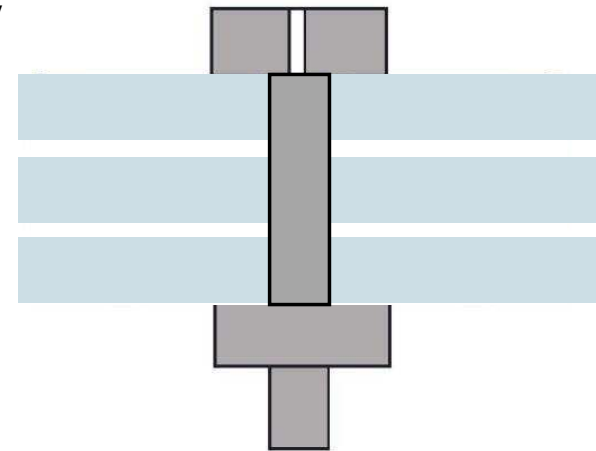
Temperaturwechselversuche an Spannelementen der Reaktoren

Verlust der Vorspannkraft und Lockerung der Schrauben aufgrund zyklischer Temperaturbeanspruchung durch lastvariablen Anlagenbetrieb

→ Untersuchung der Fragestellung, warum sich die Schrauben unter Temperaturbeanspruchung lockern könnten

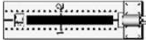
→ Mögliche Ursachen:

- Durch zyklisches Kriechen verändert sich die Ausgangsdicke der verwendeten Dichtungen, dies führt zu einer Nachgiebigkeit im Gesamtsystem und kann damit die Reduktion der Schraubenvorspannkraft begünstigen
- Aufgrund vergleichbarer Materialpaarung kann der Einfluss von stark unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten ausgeschlossen werden



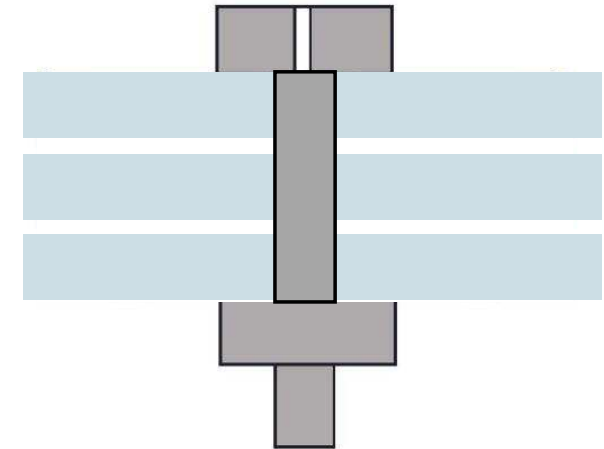
Untersuchungen unter überlagerter Temperaturbeanspruchung

Temperaturwechselversuche an Spannelementen der Reaktoren

- **Start der Untersuchungen unter Berücksichtigung eines vereinfachten Demonstratoraufbaus aus einer Schraube + Blechpaket**
- **Beanspruchung dieser Verbindung durch Temperaturwechsel bis max. 1200°C möglich**
- **Idee: Einsatz einer „Messhülse“ (Länge ca. 40 mm) welche appliziert mit DMS und montiert unter dem Schraubenkopf zur Erfassung der Schraubenvorspannkraft eingesetzt werden soll**
 - Bestückung mit DMS bis 350°C möglich  (KH-5-350-G4-11)
 - Bestückung mit DMS bis 950°C möglich  (KHCX-10-120-G13-11)
 - wiederverwendbar
 - Vermeidung des erhöhten Aufwandes zur mechanischen Bearbeitung der M14 Schraube und Unterbringung der DMS am Schrauben Schaft

→ **Analytische + numerische Auslegung der „Messhülse“**

→ **Applikation der Messhülse mit (Hochtemperatur) DMS**



One bolt with 4 metal rings and 2 sealings

Phase 1

- Understand strain gauge measurement and how it should be performed, and data interpreted.
- Calibrate applied torque in a relation to the axial force in a bolt.
- Check the relation to the temperature increase.
- Develop a model for extrapolation of data up to 850°C

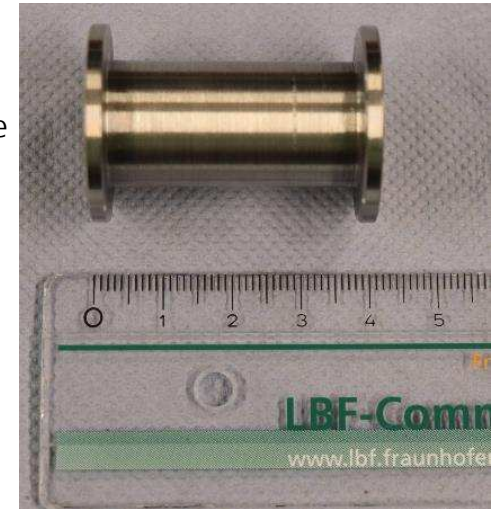
Untersuchungen unter überlagerter Temperaturbeanspruchung

Temperaturwechselversuche an Spannelementen der Reaktoren

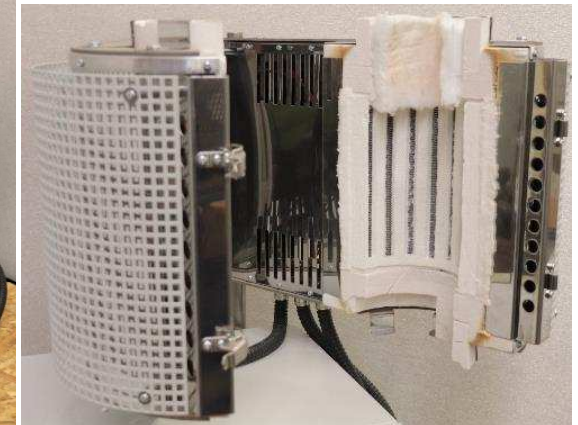
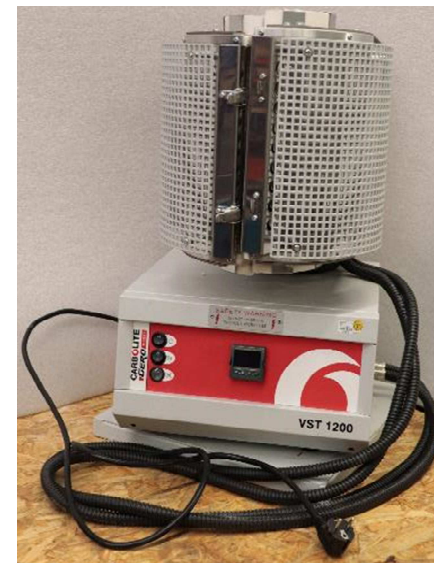
Dimensionierung:

- „Messhülse“: Länge ca. 40 mm zur Aufnahme der DMS
- Durchmesser entspricht Kopfauflage der M14-Schraube
- Wandstärke wurde entsprechend der lokalen Beanspruchung angepasst
- Geplant: Einsatz von Widerstandsofen Typ „Carbolite Gero VST 1200“ (max. Temperatur: 1200°C)
- Maximaler Innendurchmesser: 100 mm zur Aufnahme der Schraube + Blechpaket
- Maximal nutzbare Länge der Heizzone: ca. 150 mm
- Eurotherm Regler ermöglicht die Programmierung von Temperaturrampen, die nach Definition mit Fa. Ineratec dann angefahren werden können

Messhülse



Widerstandsofen



Untersuchungen unter überlagerter Temperaturbeanspruchung

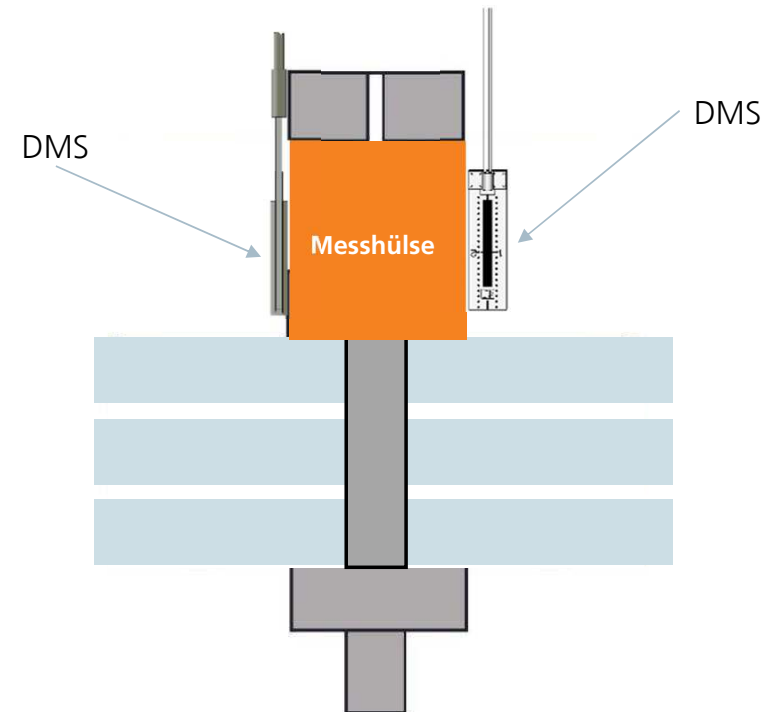
Temperaturwechselversuche an Spannelementen der Reaktoren

Versuchsaufbau mit Messhülse:

Da die Messhülse mit im Lastpfad integriert ist, werden alle Kräfte die in Längsrichtung wirken über die Messhülse Richtung Schraubenkopf übertragen.

Vorteil der Messhülse liegt in ihrer „Wiederverwertbarkeit“ und besseren Applikationsmöglichkeit der DMS gegenüber einer Applikation der Gewindestange.

Zusätzlich zur DMS-Messung soll auch untersucht werden, ob die Bestimmung der Vorspannkraftänderung auch mittels Ultraschall-Laufzeit-Messung erfolgen kann. Dieses Verfahren könnte im Rahmen von Inspektionsintervallen bei der Zustandsüberwachung der PtL-Anlage möglicherweise zum Einsatz kommen.

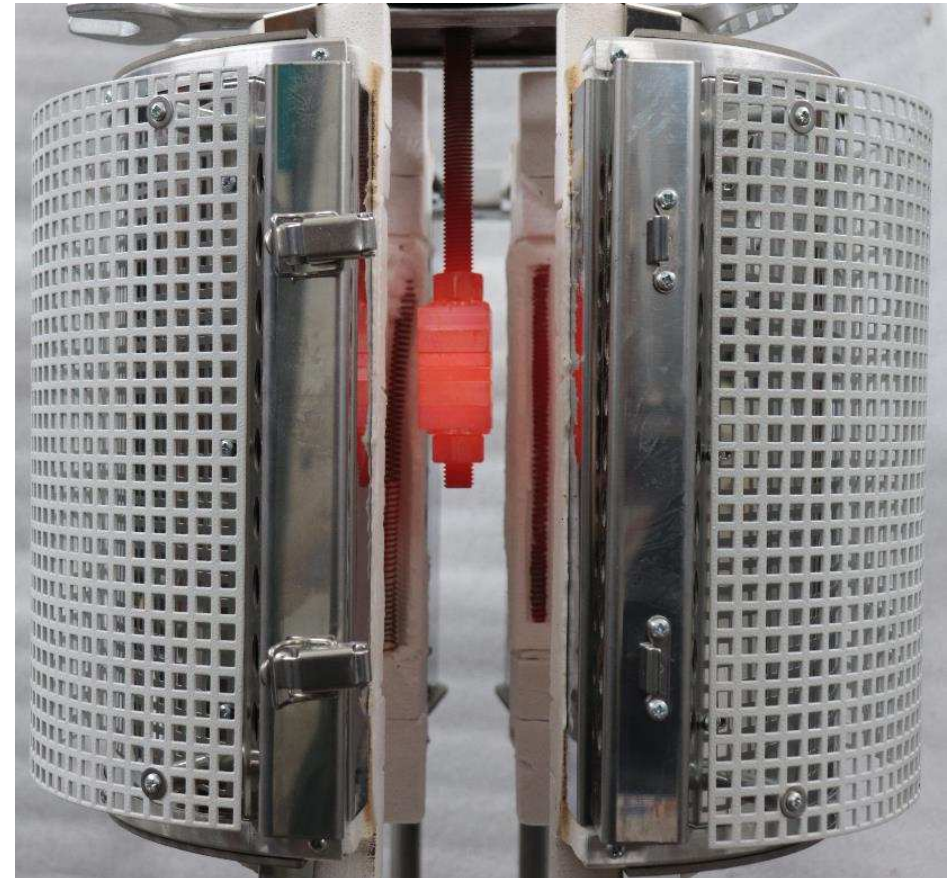


Erste Ergebnisse zur Vorspannkraftüberwachung

Erhöhte Temperatur

Anwendungsrelevantes Temperaturprofil:

1. → A) Aufheizen in 5 Stunden
und dann 30 min stehen lassen
B) auf mittlere Temperatur abkühlen
2. → A) Aufheizen in 5 Stunden
und dann 30 min stehen lassen
B) auf mittlere Temperatur abkühlen
3. → A) A) Aufheizen in 5 Stunden
und dann 30 min stehen lassen
B) Komplet abkühlen



Aktuelle Planung

Vorspannkraftüberwachung – Konzept mit normalen DMS und Rekalisierung

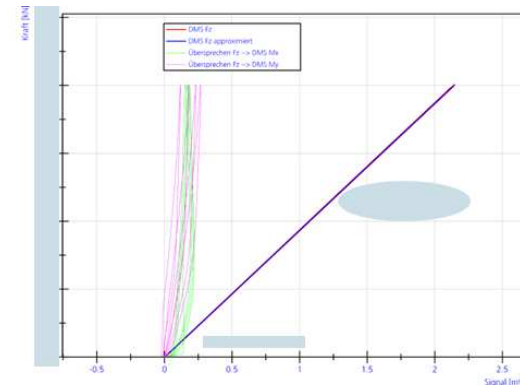
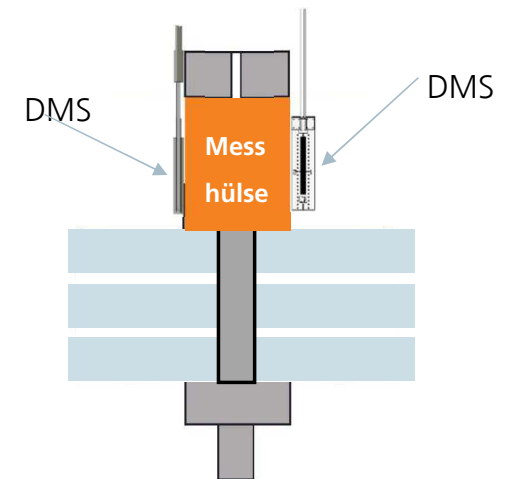
Ziel: Bestimmung des Verlustes an Vorspannkraft der Schrauben aufgrund zyklischer Temperaturbeanspruchung

Bisherige Schwierigkeiten:

- Die Messung des Losbrechmomentes zum Rückschluss auf den Verlust der Vorspannkraft wird durch Festbacken der Komponenten beeinflusst.
- Spezial-DMS bis 950 °C teuer und schwierig anzuschweißen

Lösung: Nutzung von handelsüblichen DMS und Kalibrierung nach folgendem Schema

1. Applizierung von handelsüblichen DMS auf der Messhülse
2. Kalibrierung der DMS auf Vorspannkraft in einer Zug-Druck-Prüfmaschine
3. Anziehen der Schraube und Messen der Vorspannkraft
4. Temperaturzyklus fahren → DMS geht dabei kaputt „Opfer-DMS“
5. Neuen DMS applizieren und anschließend Lösen messen
6. Neuen DMS ebenfalls auf Vorspannkraft kalibrieren

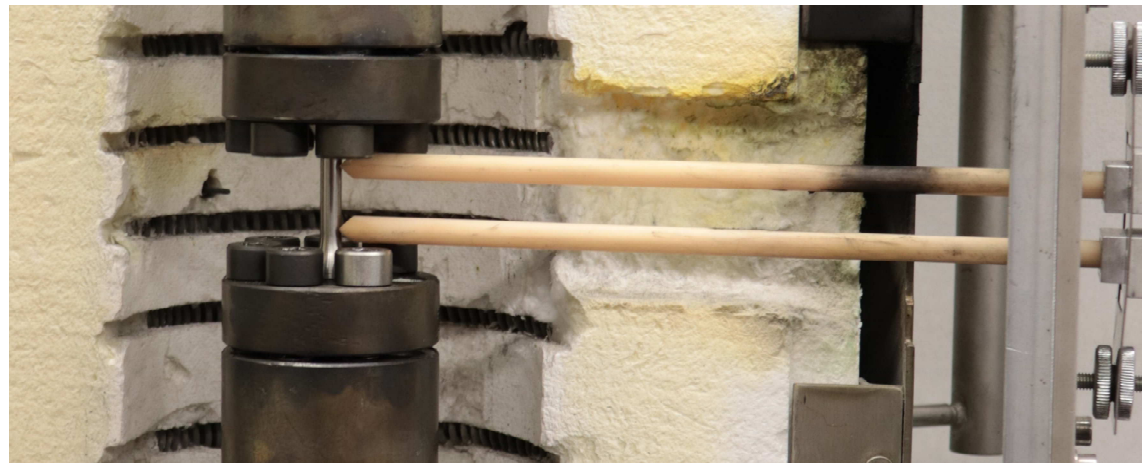


Laststeigerungsversuche an Gewindestangen

Untersuchungen an Proben entnommen aus den Gewindestangen - Versuchsumgebung



- Servohydraulische Prüfmaschine mit Nennlast von 63 kN
- Durchführung von kraftgeregelten Laststeigerungsversuchen mit Erfassung der lokalen Dehnung mittels Hochtemperaturextensometer
- Messbereich: $\pm 10\%$
- Laststeigerungsprozedur mit Haltezeiten unter Last für 300 Sekunden und nachfolgender Entlastung, um eine mögliche bleibende Verformung zu erfassen.
- Temperatur konstant: 650°C

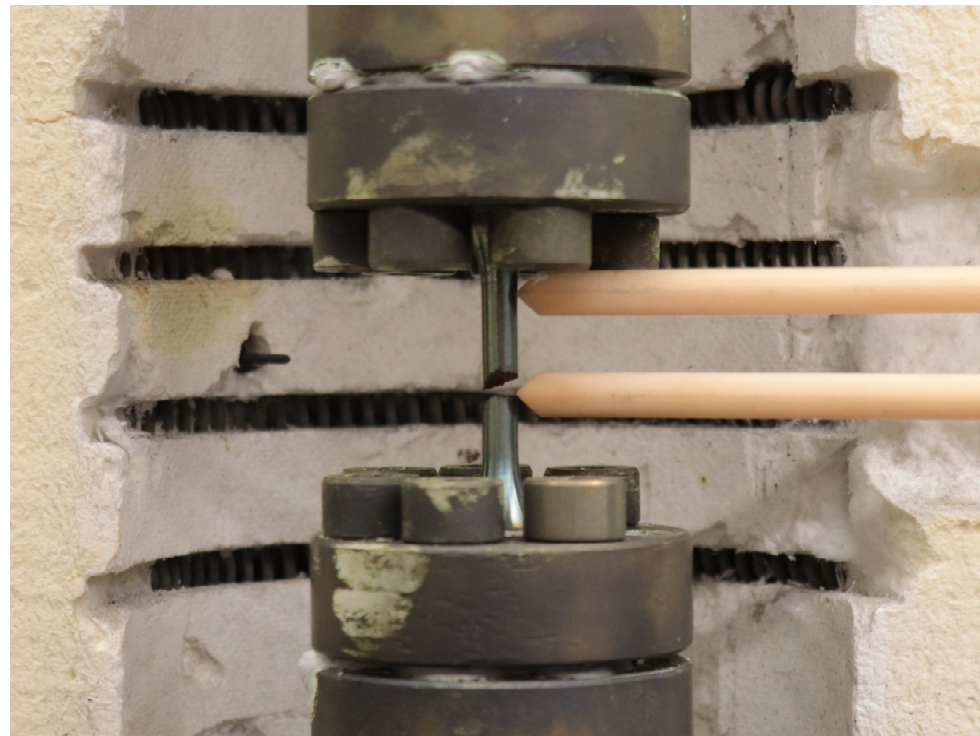


Laststeigerungsversuche an Gewindestangen

Untersuchungen an Proben entnommen aus den Gewindestangen - Ergebnisse



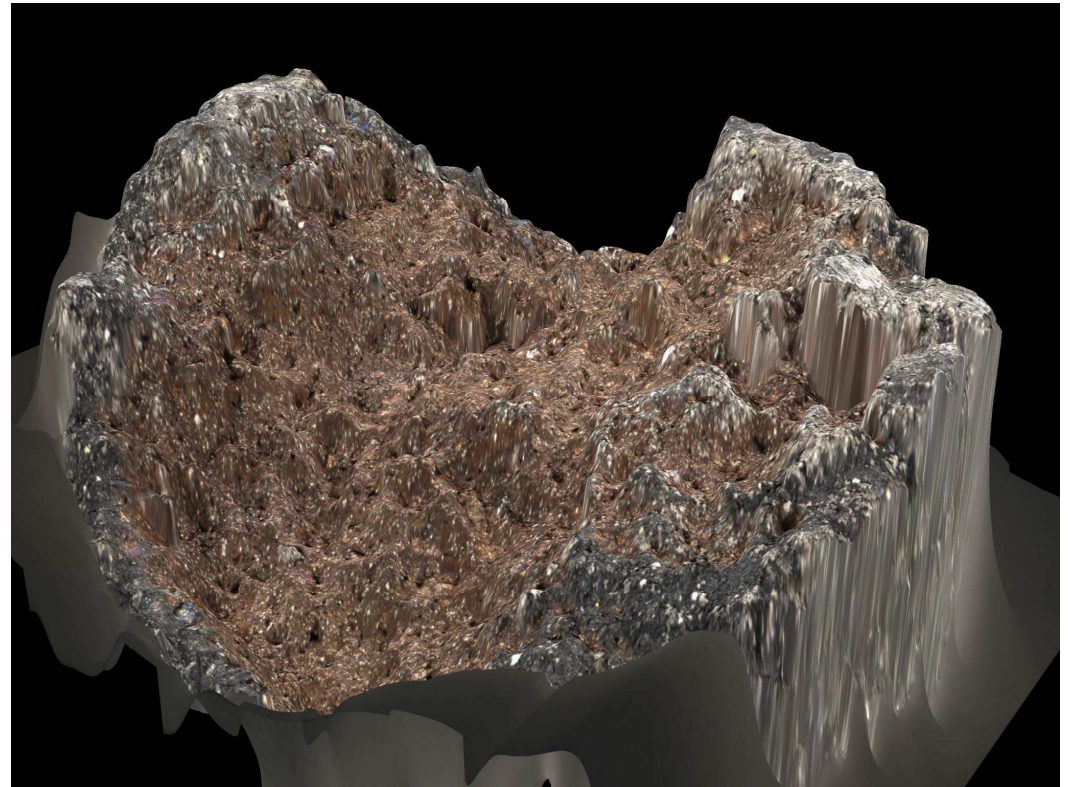
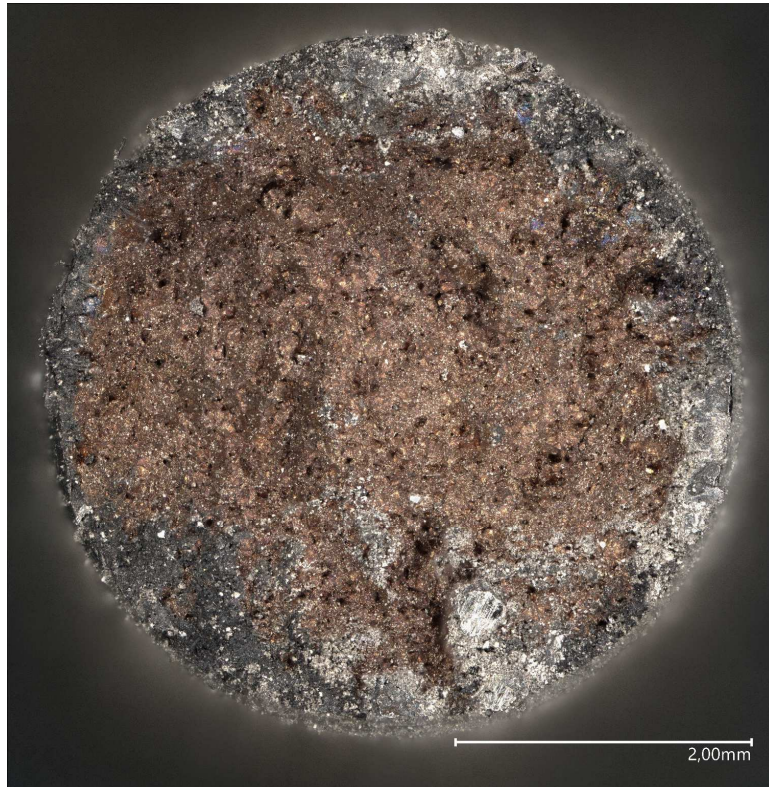
- Gebrochene Probe „B2“ – gebrauchte Gewindestange nach Versuchsende



Ergebnisse zu Laststeigerungsversuchen

Bruchflächendokumentation

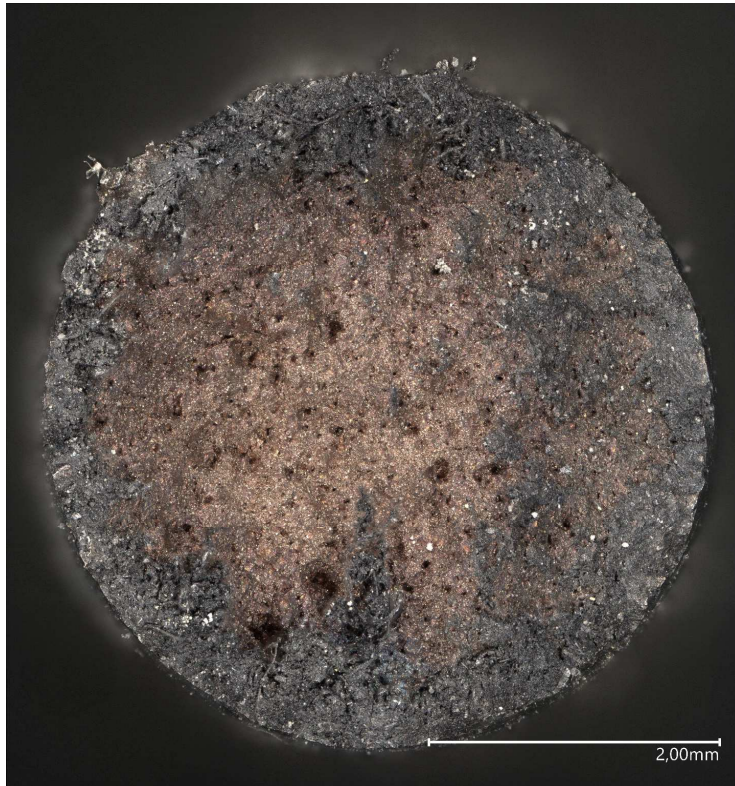
- Gebrochene Probe „B1“ – gebrauchte Gewindestange



Ergebnisse zu Laststeigerungsversuchen

Bruchflächendokumentation

- Gebrochene Probe „B2“ – gebrauchte Gewindestange



Erfassung von Lastdaten und lokalen Beanspruchungen

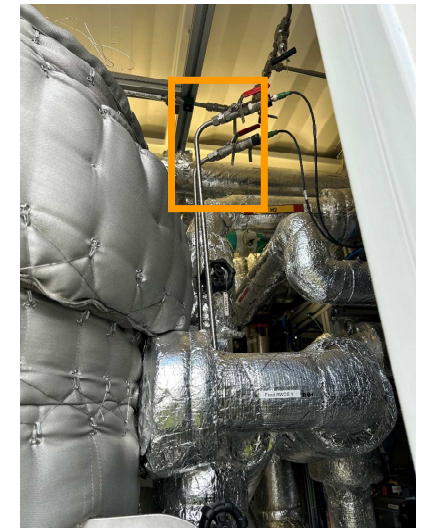
Acoustic Emission (AE) Messungen am FT- und RWGS-Reaktor

AE-Untersuchungen an den Reaktoren zur Untersuchung von:

- Verschleiß und Undichtigkeiten von Ventilen und Dichtungen
 - Schädigungen an den Heizelementen z.B. Rissbildung
 - Vorliegen eines 2-Phasen-Gemisches (Gas mit Wassertropfen)
-
- Temperatur RWGS 200 – 350°C, Temperatur FT max. 260°C
 - Zur Wärmeentkopplung werden die Sensoren an „Wellenleiter“ (z.B. Gewindestangen oder Rohrschellen) angebracht oder an vorhandenen kühleren Rohrleitungen appliziert
-
- Sensorapplikationen erfolgen
 - in Höchst für die RWGS-Reaktoren
 - in Karlsruhe für die FT-Reaktoren



Quelle: Vallen Systeme GmbH



Erfassung von Lastdaten und lokalen Beanspruchungen

Übersicht des zur Verfügung stehenden AE-Systems

Regelmäßige AE-Messungen an den FT und RWGS-Reaktoren mittels Vallen AMSY-6 AE-System

- Hierzu werden an den Ein- und Ausgängen bzw. Zuleitungen AE-Sensoren installiert.
- Zur Temperaturentkopplung (Sensoren einsetzbar bis maximal 100°C und 180 °C) mittels „Wellenleiter“
- Nutzung von kommerziellen AE-Sensoren, sowie Low-Cost Sensoren aus dem Forschungsprojekt HyMon (Förderkennung 03B11021)

- Spannungsversorgung 230 AC,
Leistung inklusive Laptop < 300 W

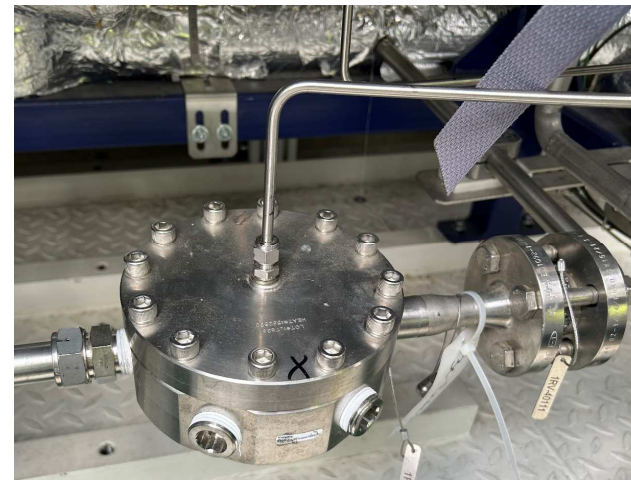


Erfassung von Lastdaten und lokalen Beanspruchungen

Untersuchung der Beschädigung der Membran des Druckausgleichssystems

Detektion von möglichen Druckstößen und Vibrationen im Druckausgleichssystem

- Hierzu wird das Signal des vorhandenen Drucksensor abgegriffen und hochfrequent mit einer Datenerfassung abgetastet.
- Ggf. wird zusätzlich noch ein Beschleunigungssensor appliziert, um Vibrationen zu erfassen.
- Applikation erfolgt vor Ort:
 - durch Einbringung eines Zwischenstückes am Stecker des Druckaufnehmers
 - Ggf. ankleben eines Beschleunigungssensors



Erfassung von Lastdaten und lokalen Beanspruchungen

Übersicht Datenerfassungssysteme Dewe-501

Kontinuierliche/Langzeiterfassung von Messdaten via Dewe-501 Datenerfassungssystem

- Nutzung für
 - die applizierten Dehnungsmessstreifen an den Gewindestangen der FT-Reaktoren → DMS
 - Die Aufzeichnung des Drucksensors des Druckausgleichssystems → Strom-Signal des vorhandenen Drucksensors wird über einen Shunt Widerstand abgegriffen
- Bei Bedarf können weitere Sensoren appliziert und Messgrößen erfasst werden, wie z.B.:
 - Beschleunigungssensoren
 - Temperatursensoren
- Spannungsversorgung 230 AC, Leistung < 300 W



Quelle: Dewetron GmbH

Kontakt

Thomas Pfeiffer
Gruppe Zuverlässigkeit und Sicherheit aktiver Systeme
Tel. +49 6151 705-392

thomas.pfeiffer@lbf.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF
Bartningstr. 47
64289 Darmstadt
www.fraunhofer.de

Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit: Lebenszyklusanalyse

Prof. Dr. Ralf Ehret, Provadis Hochschule

Vortrag 1 | Forschungszentrum Jülich

Vortrag 2 | EWE Gasspeicher

Vortrag 3 | CENA Hessen

Vortrag 4 | INERATEC GmbH

Vortrag 5 | Fraunhofer LBF



Vortrag 6 | Provadis Hochschule

Panel

Wrap Up

Symposium - E-Fuel-Produktion unter schwankendem Stromangebot

Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit: Lebenszyklusanalyse

Gefördert vom



Frankfurt, 04.06.2025

Aufgaben der Provadis Hochschule bei RePoSe

- Erstellung einer Lebenszyklusanalyse gemäß den Vorgaben ISO 14040 und 14044
Quantifizierung der Umweltwirkungen und Vergleich zu konventionellem Verfahren, d.h.
 - Systemgrenzen und Abgrenzung zur Systemumgebung
 - funktionale Einheit
 - vorläufige Definition der Wirkungskategorien
 - Nutzung von Realdaten und Simulationen
 - Softwaremodellierung GaBi ® von Sphera

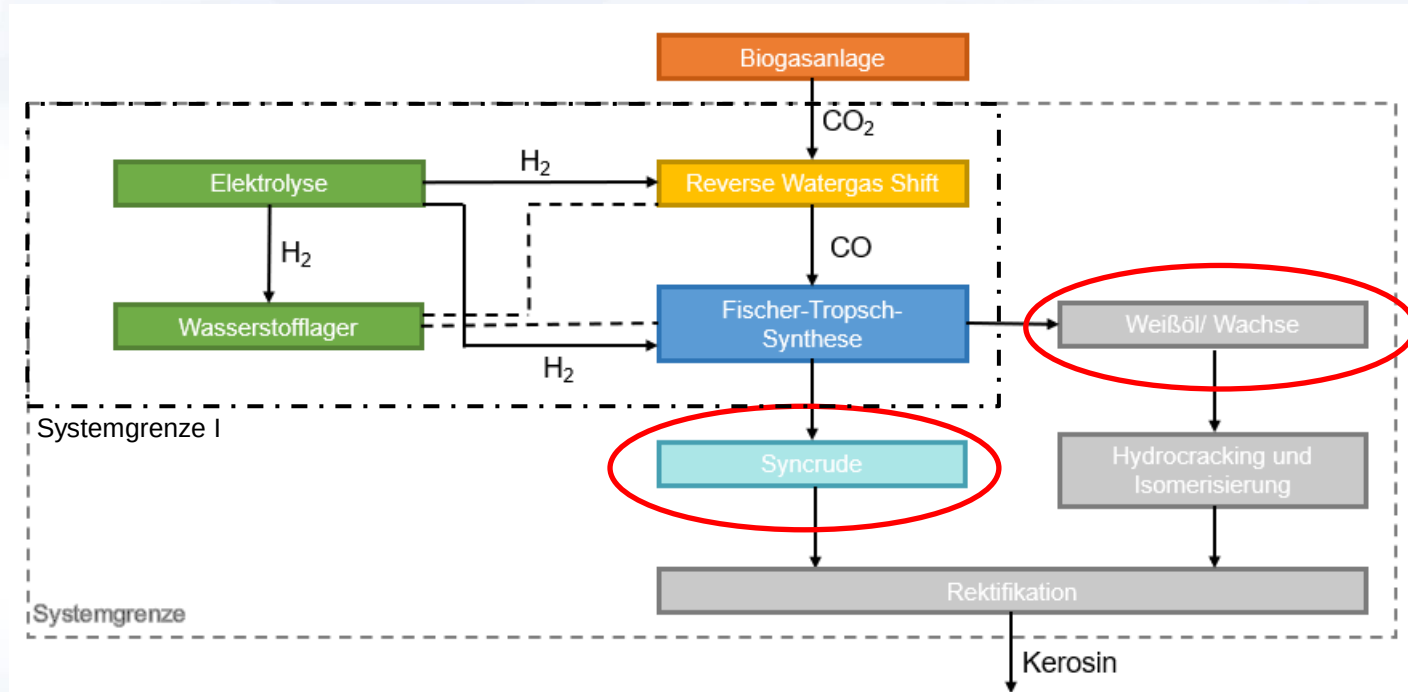
Definition der Arten der Wirkungskategorien

Kategorie	Indikator	Maßeinheit
• Treibhauspotenzial	GWP ₁₀₀	kg CO _{2,eq}
• Ozonab-/aufbau	ODP	kg CFC-11 _{eq}
• Versauerungspotenzial	AP	kg SO _{2,eq}
• Eutrophierung	EP	kg PO _{4,eq}
• Ressourcenverbrauch	RC	kg/a

zunächst Betrachtung aller → Relativierung im Lauf des Projekts

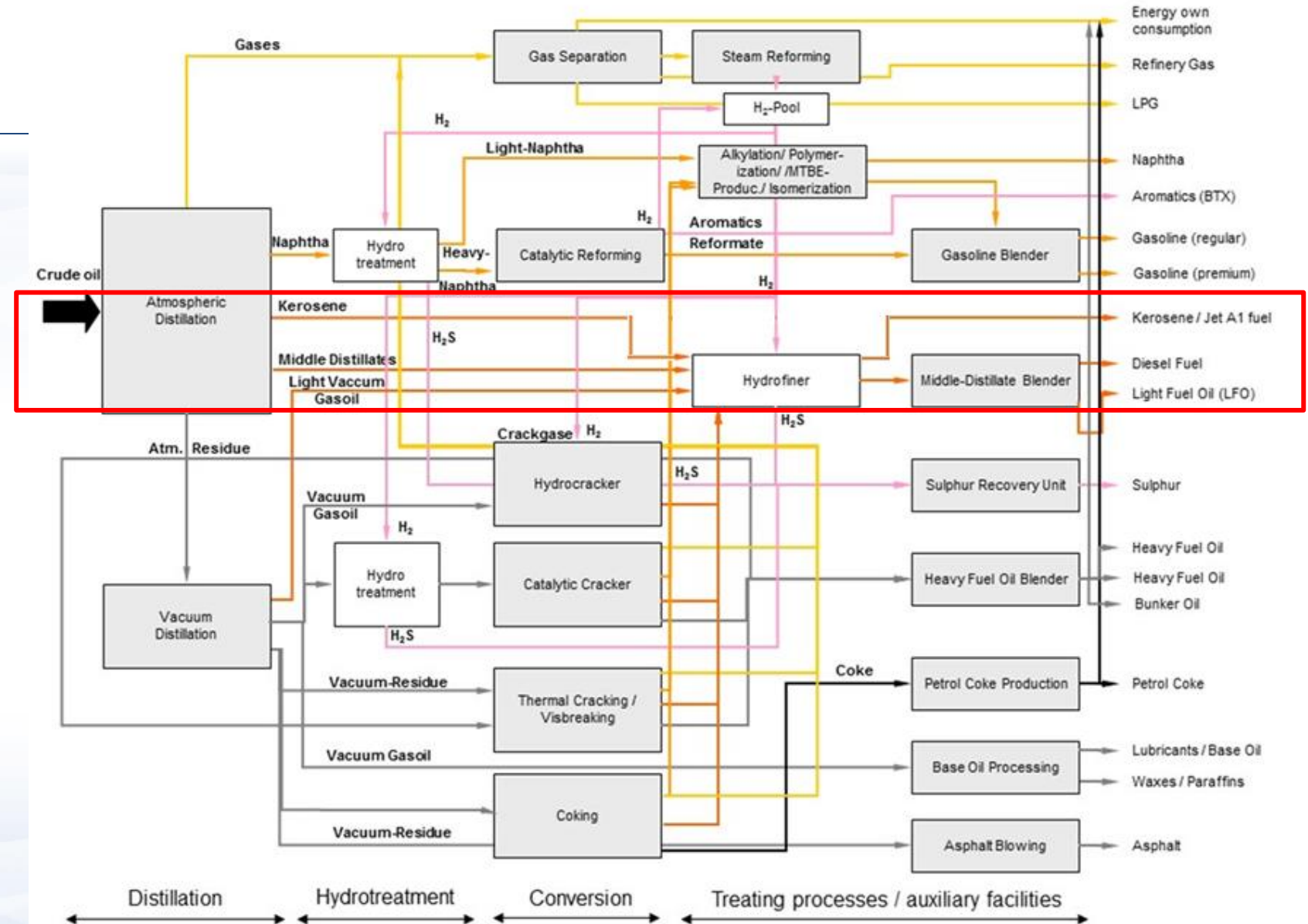
Untersuchungsrahmen

- Ziel ist die Berechnung der Umweltwirkungen anhand einer LCA
- Betrachtung von 9 Szenarien
- ausgewählte Szenarien:
 - grüner Strom vs. dt. Strommix
 - grüner H₂
 - CO₂ mit und ohne Lasten
- Cradle-to-Gate (d.h. ohne Verbrennung!)
- fE: Herstellung von 1t Kerosin
- Allokation anhand Masse zw. Syncrude (37%) und Wachs (63%)



Vergleichssystem

- Kerosin aus Erdöl
596 kg CO₂ eq.
je Tonne Kerosin
- + weitere Umwelt-
wirkungen
- Cradle-to-Gate

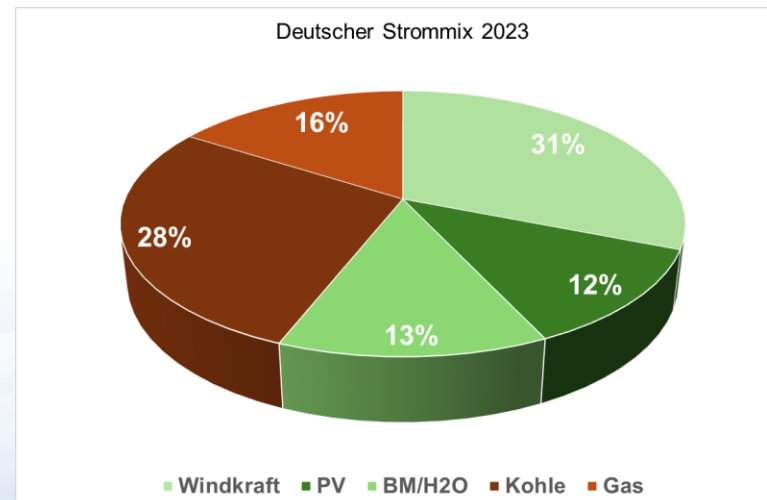


Szenarien im Überblick

- Auswahl 3er Szenarien

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Strom	Windkraft	deutscher Strommix	Windkraft
Wasserstoff	Elektrolyse (Windkraft)	Elektrolyse (Windkraft)	Elektrolyse (Windkraft)
CO ₂	ohne Lastenschrift	ohne Lastenschrift	aus Biogasanlage

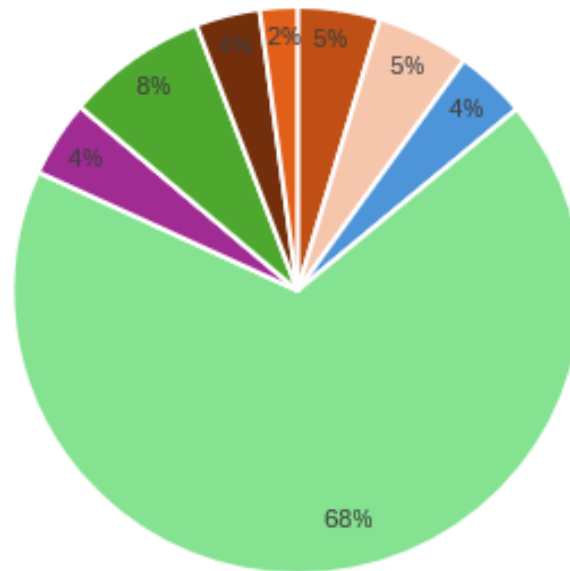
- + 6 weitere



Auswertungen - inkl. Allokation

556 kg CO₂ eq.

Szenario 1 [kg CO₂ eq.]



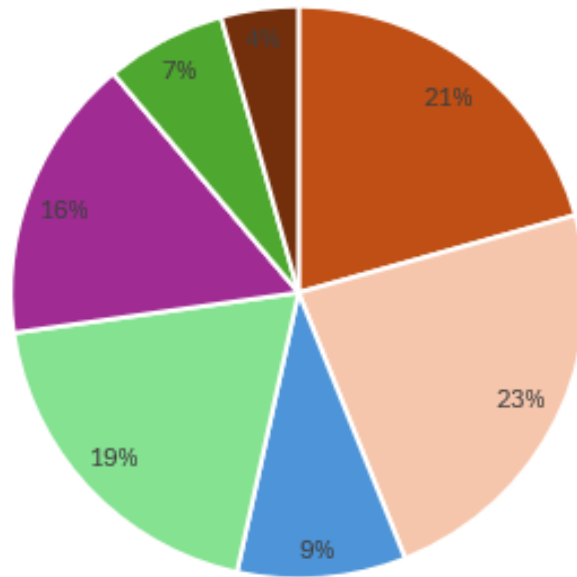
- Distillation
- Electrolysis electricity
- Syngas compression
- Electricity RWGS
- H2 Compression
- Rest
- Electrolysis
- Steam RWGS

	Szenario 1
Strom	Windkraft
Wasserstoff	Elektrolyse (Windkraft)
CO ₂	ohne Lastenschrift

Auswertungen - inkl. Allokation

Szenario 2 [kg CO₂ eq.]

3977 kg CO₂ eq.



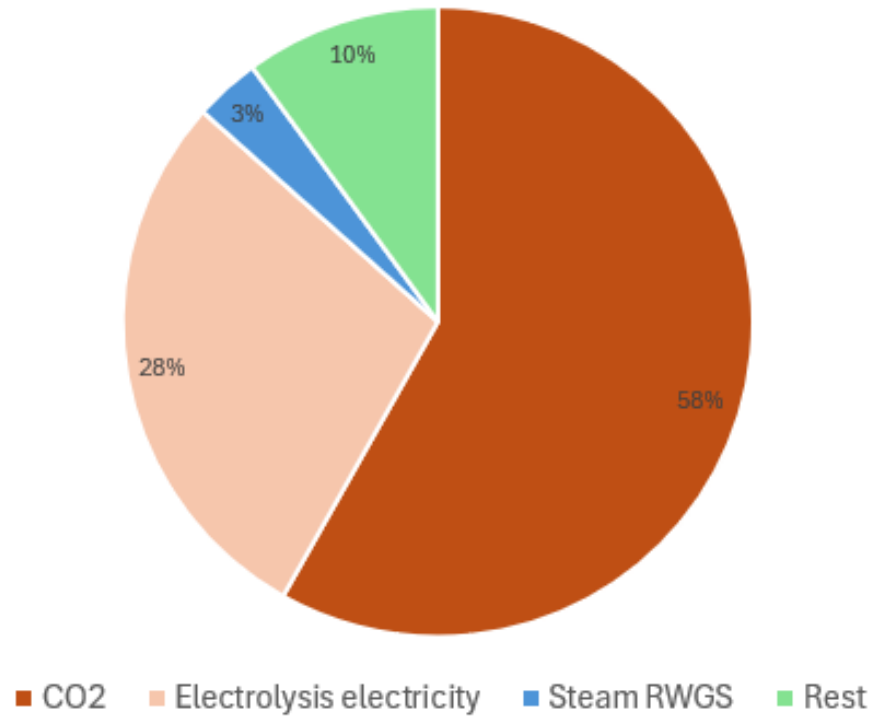
- Distillation
- Electricity RWGS
- Electrolysis electricity
- H2 Compression
- Syngas compression
- Syngas preheating
- Rest

	Szenario 2
Strom	deutscher Strommix
Wasserstoff	Elektrolyse (Windkraft)
CO ₂	ohne Lastenschrift

Auswertungen - inkl. Allokation

Szenario 3 [kg CO₂ eq.]

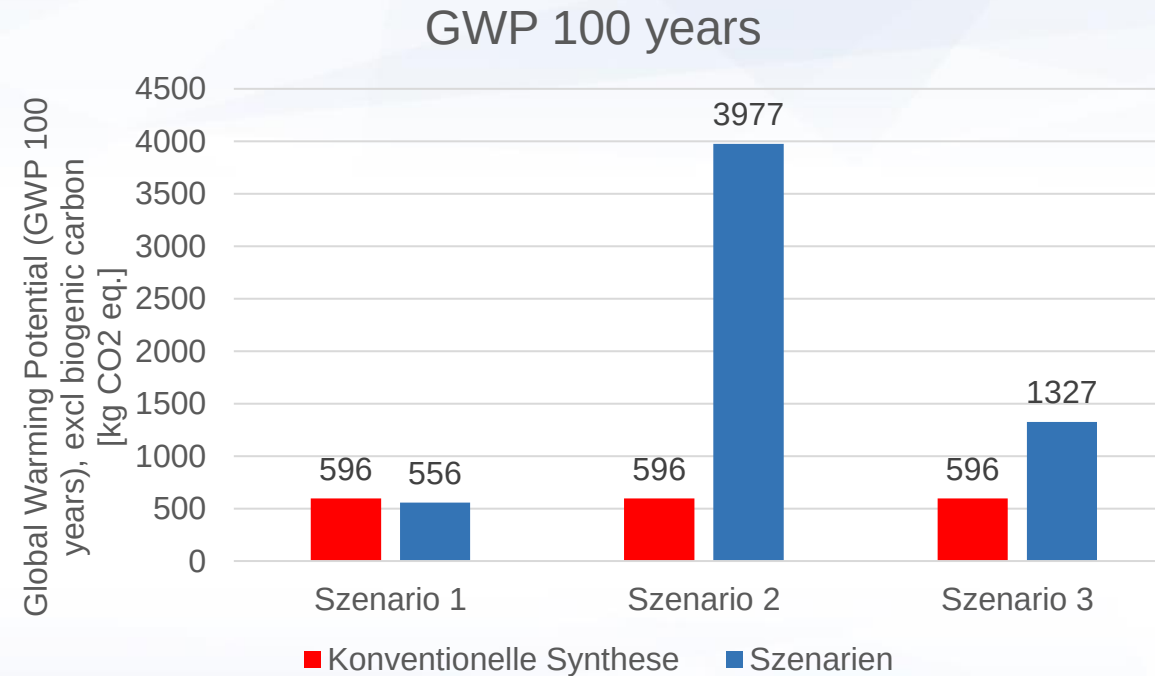
1327 kg CO₂ eq.



	Szenario 3
Strom	Windkraft
Wasserstoff	Elektrolyse (Windkraft)
CO ₂	aus Biogasanlage

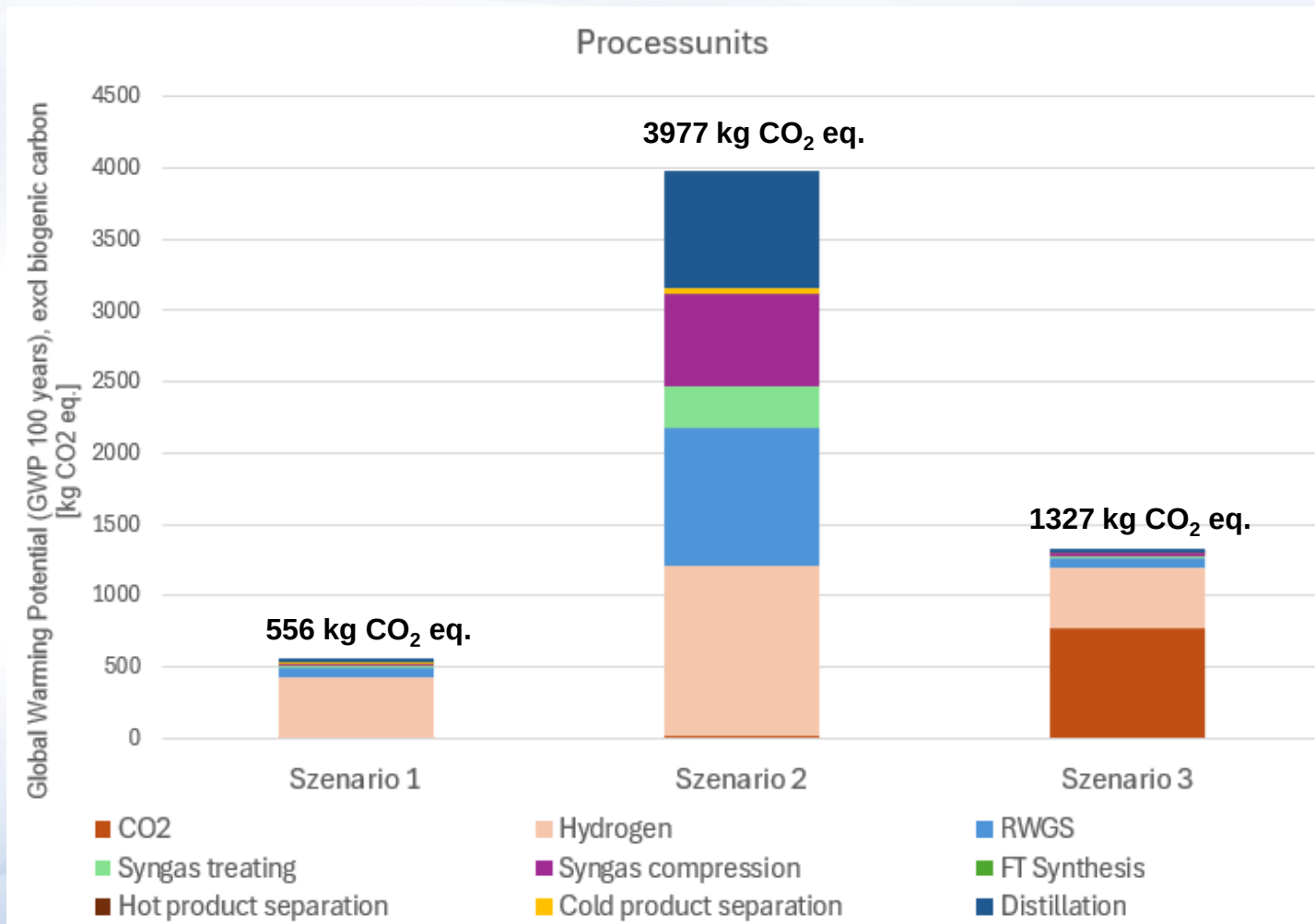
Vergleich GWP

Vergleich zwischen der konventionellen Synthese von Kerosin aus Erdöl und den Szenarien



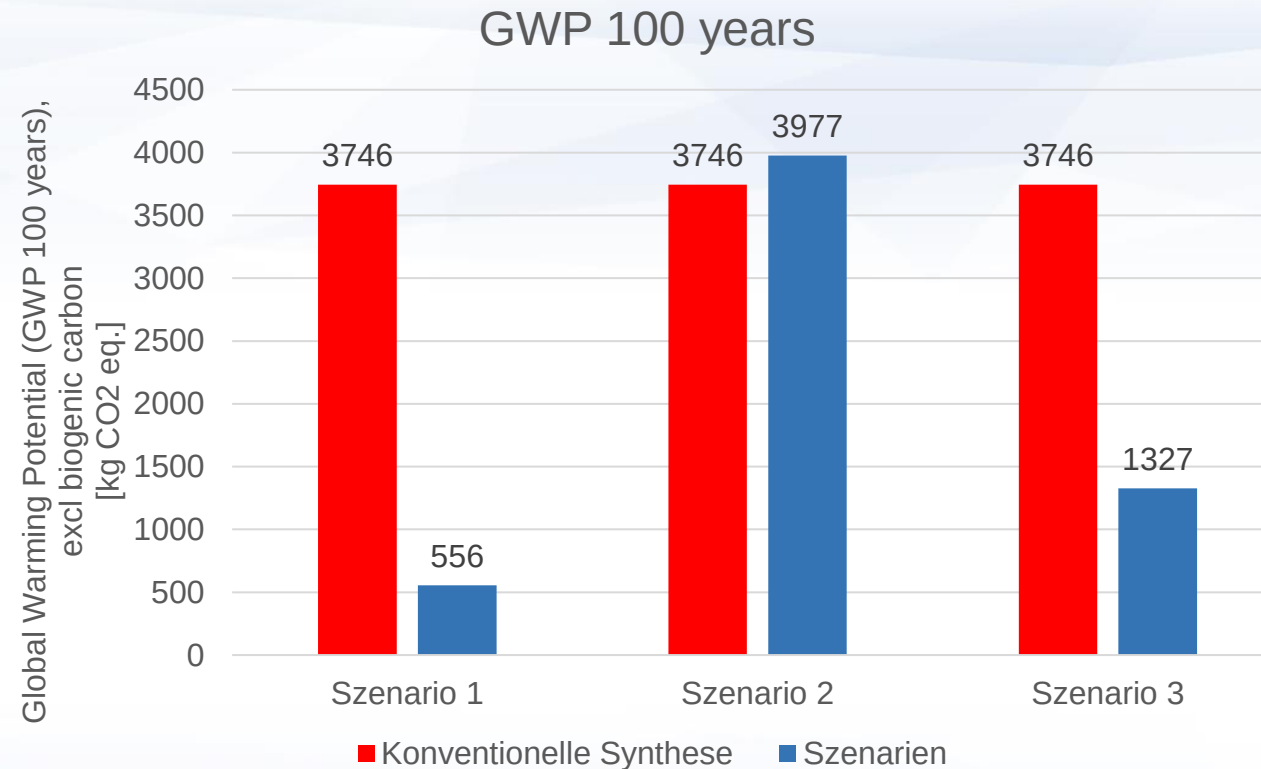
	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Strom	Windkraft	deutscher Strommix	Windkraft
Wasserstoff	Elektrolyse mit Windkraft	Elektrolyse mit Windkraft	Elektrolyse mit Windkraft
CO ₂	ohne Lastenschrift	ohne Lastenschrift	aus Biogasanlage

Hauptverursacher



	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Strom	Windkraft	deutscher Strommix	Windkraft
Wasserstoff	Elektrolyse mit Windkraft	Elektrolyse mit Windkraft	Elektrolyse mit Windkraft
CO ₂	ohne Lastenschrift	ohne Lastenschrift	aus Biogasanlage

GWP 100 years - Verbrauch des Kerosins einbezogen



	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Strom	Windkraft	deutscher Strommix	Windkraft
Wasserstoff	Elektrolyse mit Windkraft	Elektrolyse mit Windkraft	Elektrolyse mit Windkraft
CO ₂	ohne Lastenschrift	ohne Lastenschrift	aus Biogasanlage

Zusammenfassung zum aktuellen Stand

- grüner Wasserstoff ist ein Muss
- grüne Elektrizität ist essenziell
- Biogas-CO₂-Lasten nicht vernachlässigbar
- weitere Wirkungskategorien vgl. klein
- Modellierung der Aufarbeitung der FT-Produkte
- ggf. Änderung durch Realdaten
- World-Scale-Anlage in D? ➔ Energie



Panel

Dr. Sarah Bernhardt, PtX Lab Lausitz

Alexander Irslinger, INERATEC GmbH

Dr. Thomas Nietsch, ABO Energy

Prof. Dr. Thomas Bayer, Infraser v Höchst

Vortrag 1 | Forschungszentrum Jülich

Vortrag 2 | EWE Gasspeicher

Vortrag 3 | CENA Hessen

Vortrag 4 | INERATEC GmbH

Vortrag 5 | Fraunhofer LBF

Vortrag 6 | Provadis Hochschule



Panel

Wrap Up

”

Voraussetzungen, Auswirkungen und Erfordernis des Flexibilitätsanspruchs an Power-to-X

Panel

“

Wrap Up

Prof. Dr. Ralf Ehret, Provadis Hochschule

Vortrag 1 | Forschungszentrum Jülich

Vortrag 2 | EWE Gasspeicher

Vortrag 3 | CENA Hessen

Vortrag 4 | INERATEC GmbH

Vortrag 5 | Fraunhofer LBF

Vortrag 6 | Provadis Hochschule

Panel



Wrap Up

Ausblick

Präsentationen im Anschluss auf:



www.cena-hessen.de





Berliner Abend

CENA SAF-Outlook:

Mengen und Erreichbarkeit der
EU-Quoten für
nachhaltige Flugtreibstoffe



4. September 2025
17:00-21:00 Uhr



Hessische Landesvertretung,
Berlin



Hessisches Ministerium
für Wirtschaft, Energie,
Verkehr, Wohnen
und ländlichen Raum



Jetzt anmelden!

Ausblick

Bleiben Sie auf dem Laufendem zu den Entwicklungen auf dem SAF-Markt.

Hier anmelden für Updates zum CENA SAF-Outlook.



Jetzt anmelden!



www.linkedin.com/company/cena-hessen

www.cena-hessen.de
info@cena-hessen.de

CENA Hessen

Kompetenzzentrum für Klima- und Lärmschutz im Luftverkehr
der Hessen Trade & Invest GmbH



Gefördert durch:
 Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Koordiniert durch:
 **NOW**
NOW-GMBH.DE

Projekträger:
 **VDI | VDE | IT**