

Herausforderungen der Produktion grünen Wasserstoffs mit fluktuierendem erneuerbarem Strom

Dr. Marc P. Heddrich, Dr. Sanaz Razmjooie, Dr. S. Asif Ansar

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)
Institut für Technische Thermodynamik
Abteilung Energiesystemintegration
Arbeitsgruppe Elektrochemische Hochtemperatur-Verfahren (EHT)

marc.heddrich@dlr.de
+49 711 6862-8184



LUFTFAHRT



RAUMFAHRT



ENERGIE



VERKEHR



SICHERHEIT

zivile & wehrtechnische Sicherheitsforschung

DIGITALISIERUNG, QUANTENTECHNOLOGIEN UND SYSTEMMODELLIERUNG

- Größtes Forschungszentrum Europas für Luftfahrt und Raumfahrt
- Enge Zusammenarbeit mit Wissenschaft, Forschung, Wirtschaft und Industrie
- Beteiligungsführendes Ministerium BMWK, institutionelle Förderung durch BMVg, Projektförderung durch BMI, BMDV, BMUV, BMZ u.a.m.



This work was financially supported by the Federal Ministry of Education and Research under grant number 03HY302F. The responsibility for the contents lies with the authors

Fluktuierender Windstrom für direkte Offshore-Elektrolyse Wasserstoff Leitprojekt H2Mare: PtX-Wind



Bild: AquaVentus Förderverein e.V.

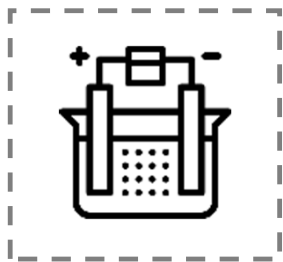


Übersicht Elektrollysetechnologien

Größe und Kosten

AEL

- Seit Jahrzehnten verfügbar
- Einzelreaktorgrößen bis 5 MW¹
- Anlagengrößen 50-150 MW^{2,3}



PEMEL

- Etabliert sich am Markt
- Anlagengrößen bis 40 MW⁴

SOEL

- Erste Anlagen im Bereich 2-4 MW werden aufgestellt^{5,6}
- Produktionskapazitäten für den GW-Bereich werden aufgebaut⁷

AEL: Alkaline Electrolysis
PEMEL: Proton Exchange Membrane Electrolysis
SOEL: Solid Oxide Electrolysis
CAPEX: Capital Expenditure, "Investitionskosten"
LCOH: Levelized Cost of Hydrogen

1: hydrogen.johncockerill.com/en/products/electrolysers
2: www.longi.com/en/cases/668/
3: hydrogen.johncockerill.com/en/markets/power-to-gas/
4: <https://www.ir.plugpower.com/press-releases/news-details/2024/Plug-Delivers-and-Commissions-over-95-MW-of-Electrolyzer-Capacity-Globally/default.aspx>
5: www.bloomenergy.com/bloomelectrolyzer/
6: www.sunfire.de/de/news/detail/gruenes-wasserstoffprojekt-multiplhy-weltweit-groesster-hochtemperatur-elektrolyseur-von-sunfire-erfolgreich-installiert
7: www.topsoe.com/herning
8: www.energypolicy.columbia.edu/demystifying-electrolyzer-production-costs/
9: www.sunfire.de/files/sunfire/images/content/Produkte_Technologie/factsheets/Sunfire-Factsheet-HyLink-SOEC_2023Nov.pdf
10: observatory.clean-hydrogen.europa.eu/index.php/hydrogen-landscape/production-trade-and-cost/cost-hydrogen-production

Übersicht Elektrollysetechnologien

Größe und Kosten

AEL

- Seit Jahrzehnten verfügbar
- Einzelreaktorgrößen bis 5 MW¹
- Anlagengrößen 50-150 MW^{2,3}



PEMEL

- Etabliert sich am Markt
- Anlagengrößen bis 40 MW⁴

SOEL

- Erste Anlagen im Bereich 2-4 MW werden aufgestellt^{5,6}
- Produktionskapazitäten für den GW-Bereich werden aufgebaut⁷

	Betriebs- temperatur °C	Elektrischer Wirkungsgrad ^{5,8,9} kWh / kg H ₂	CAPEX ⁸ \$/ kW	Kosten LCOH ¹⁰ €/ kg H ₂
AEL	70-120	50-78	500-1400	4,2-9,6
PEMEL	70-120	50-83	667-1800	
SOEL	600-850	38-55	1410-6667	
Jahre 2019-2022				

AEL: Alkaline Electrolysis
 PEMEL: Proton Exchange Membrane Electrolysis
 SOEL: Solid Oxide Electrolysis
 CAPEX: Capital Expenditure, "Investitionskosten"
 LCOH: Levelized Cost of Hydrogen

1: hydrogen.johncockerill.com/en/products/electrolysers
 2: www.longi.com/en/cases/668/
 3: hydrogen.johncockerill.com/en/markets/power-to-gas/
 4: <https://www.ir.plugpower.com/press-releases/news-details/2024/Plug-Delivers-and-Commissions-over-95-MW-of-Electrolyzer-Capacity-Globally/default.aspx>
 5: www.bloomenergy.com/blomelectrolyzer/
 6: www.sunfire.de/de/news/detail/gruenes-wasserstoffprojekt-multiplhy-weltweit-groesster-hochtemperatur-elektrolyseur-von-sunfire-erfolgreich-installiert
 7: www.topsoe.com/herning
 8: www.energypolicy.columbia.edu/demystifying-electrolyzer-production-costs/
 9: www.sunfire.de/files/sunfire/images/content/Produkte_Technologie/factsheets/Sunfire-Factsheet-HyLink-SOEC_2023Nov.pdf
 10: observatory.clean-hydrogen.europa.eu/index.php/hydrogen-landscape/production-trade-and-cost/cost-hydrogen-production

Übersicht Elektrollysetechnologien

Größe und Kosten

AEL

- Seit Jahrzehnten verfügbar
- Einzelreaktorgrößen bis 5 MW¹
- Anlagengrößen 50-150 MW^{2,3}



PEMEL

- Etabliert sich am Markt
- Anlagengrößen bis 40 MW⁴

SOEL

- Erste Anlagen im Bereich 2-4 MW werden aufgestellt^{5,6}
- Produktionskapazitäten für den GW-Bereich werden aufgebaut⁷

	Betriebs- temperatur °C	Elektrischer Wirkungsgrad ^{5,8,9} kWh / kg H ₂	CAPEX ⁸ \$/ kW	Kosten LCOH ¹⁰ €/ kg H ₂
AEL	70-120	50-78	500-1400	4,2-9,6
PEMEL	70-120	50-83	667-1800	
SOEL	600-850	38-55	1410-6667	
Jahre 2019-2022				

Wasserstoffkosten hauptsächlich abhängig vom

- Strompreis
- und dieser wiederum von
- Art des Anschlusses (Netz/Insel, On-/Offshore etc.)
- Aufstellregion

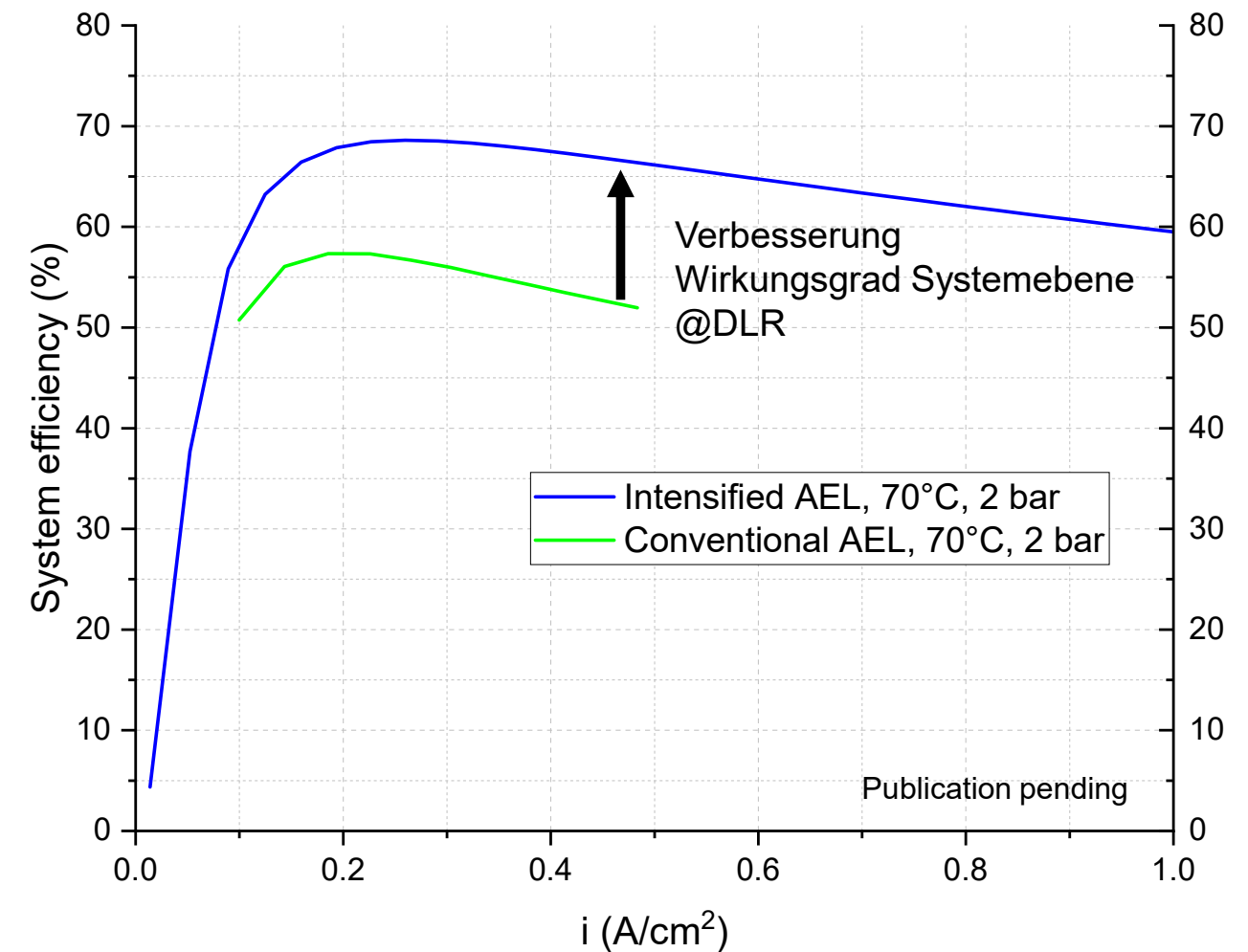
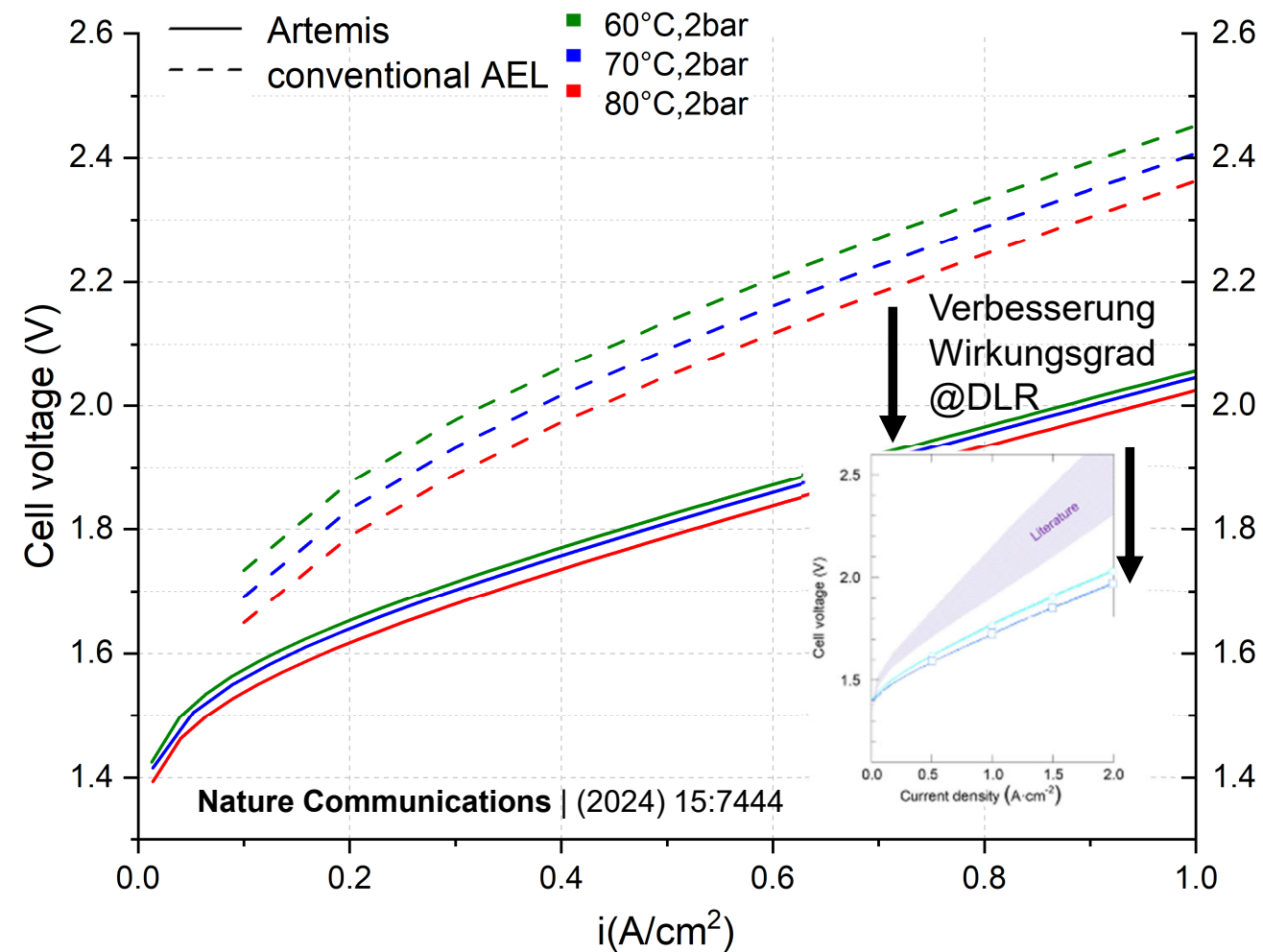
AEL: Alkaline Electrolysis
 PEMEL: Proton Exchange Membrane Electrolysis
 SOEL: Solid Oxide Electrolysis
 CAPEX: Capital Expenditure, "Investitionskosten"
 LCOH: Levelized Cost of Hydrogen

1: hydrogen.johncockerill.com/en/products/electrolysers
 2: www.longi.com/en/cases/668/
 3: hydrogen.johncockerill.com/en/markets/power-to-gas/
 4: <https://www.ir.plugpower.com/press-releases/news-details/2024/Plug-Delivers-and-Commissions-over-95-MW-of-Electrolyzer-Capacity-Globally/default.aspx>
 5: www.bloomenergy.com/bloomelectrolyzer/
 6: www.sunfire.de/de/news/detail/gruenes-wasserstoffprojekt-multiplhy-weltweit-groesster-hochtemperatur-elektrolyseur-von-sunfire-erfolgreich-installiert
 7: www.topsoe.com/herning
 8: www.energypolicy.columbia.edu/demystifying-electrolyzer-production-costs/
 9: www.sunfire.de/files/sunfire/images/content/Produkte_Technologie/factsheets/Sunfire-Factsheet-HyLink-SOEC_2023Nov.pdf
 10: observatory.clean-hydrogen.europa.eu/index.php/hydrogen-landscape/production-trade-and-cost/cost-hydrogen-production

Alkalische Elektrolyse

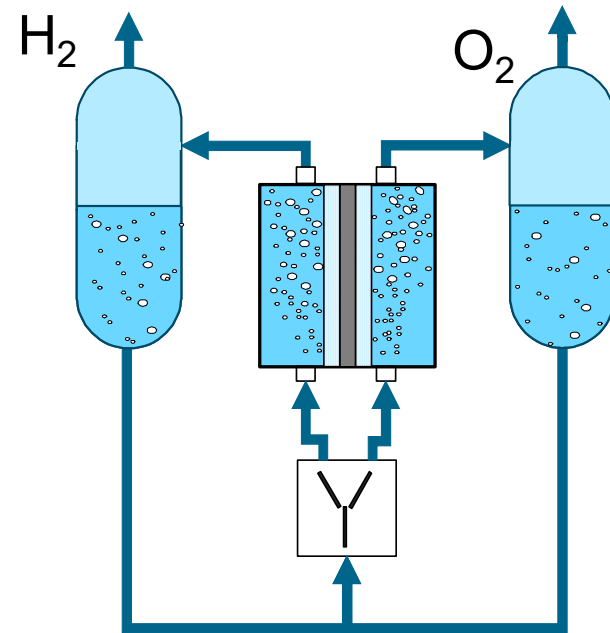
Herausforderungen

- Dynamischer und Teillast-Betrieb
- Leistungsdichte
- Wirkungsgrad

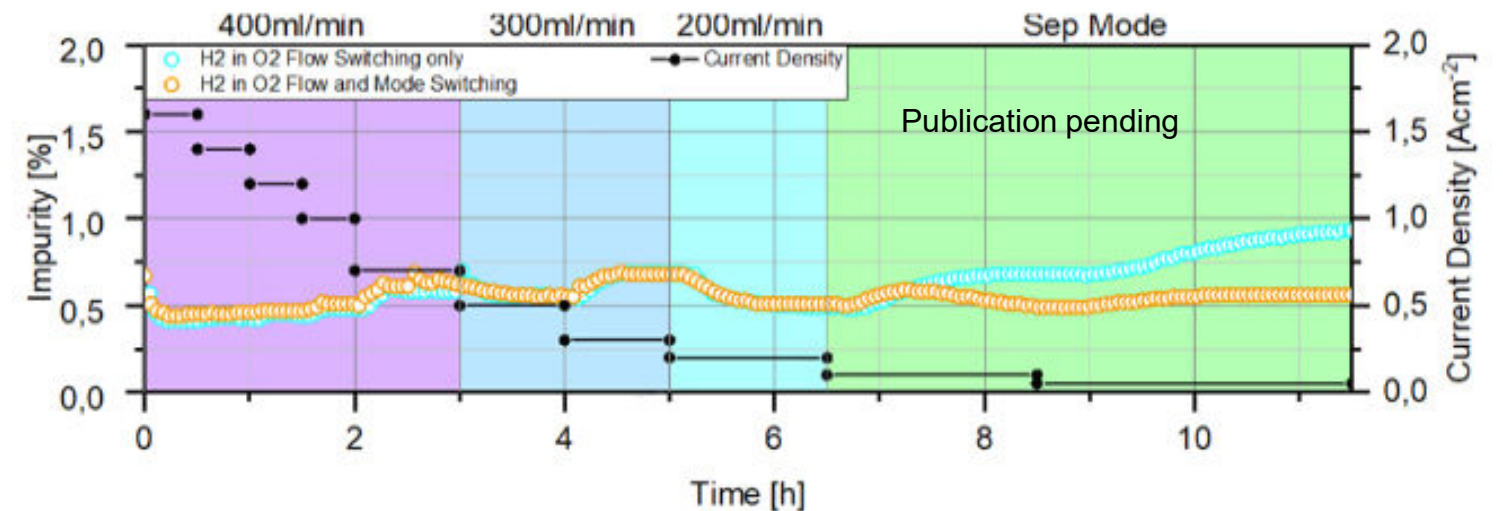
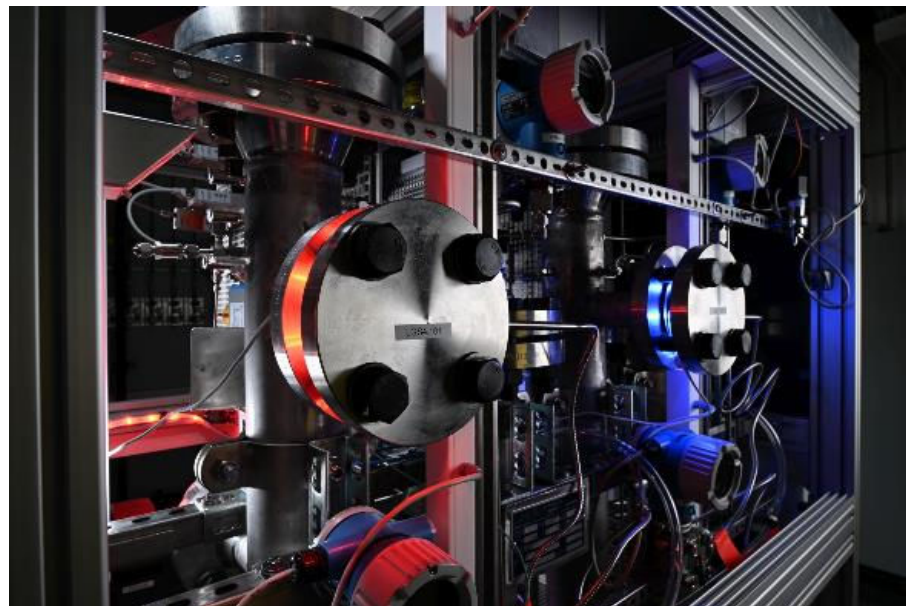


Alkalische Elektrolyse

Herausforderung Dynamischer Betrieb



- Elektrolyt 20-30 prozentige Kalilauge (KOH) enthält jeweils H_2 und O_2
- Elektrolyt muss gemischt werden, sonst Anreicherung von KOH in H_2 -Halbzelle
- Beim Mischen entstehen Gasunreinheiten H_2 in O_2 ; O_2 in H_2
- Insbesondere bei Teillastbetrieb herausfordernd da im Verhältnis zur Gasentstehung hohe Verunreinigung



Verbesserung von Gasreinheit bei niedrigen Stromdichten mit optimierten Betriebsstrategien @DLR

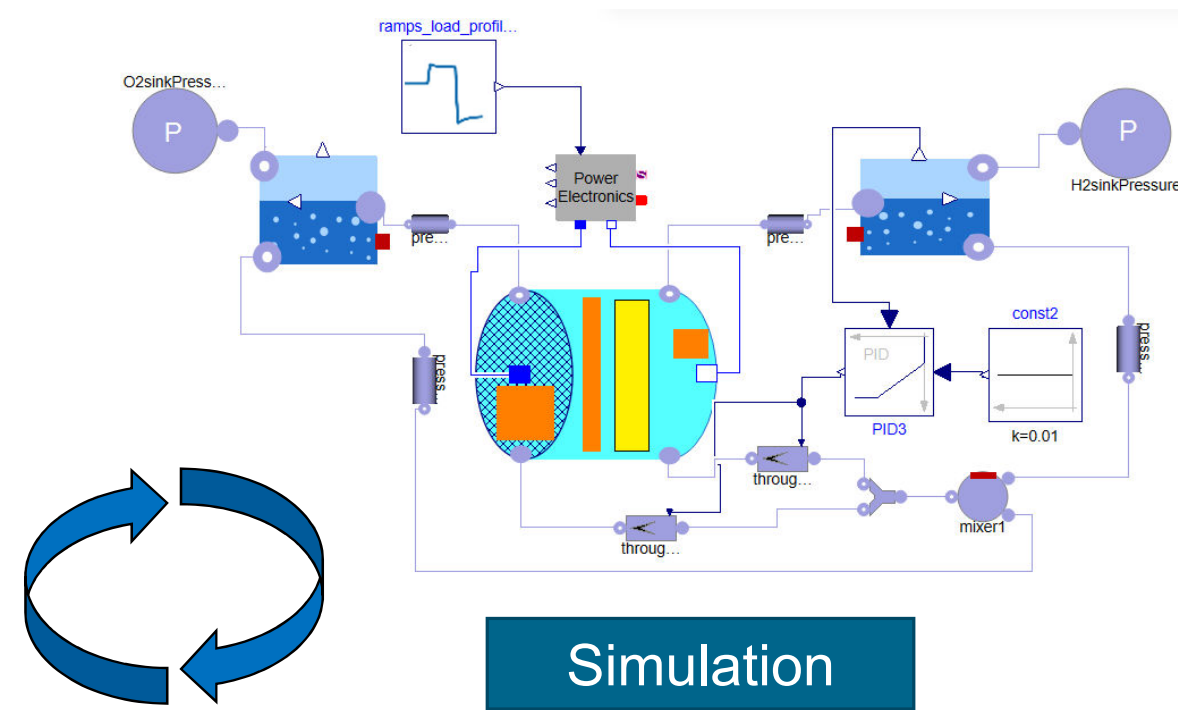
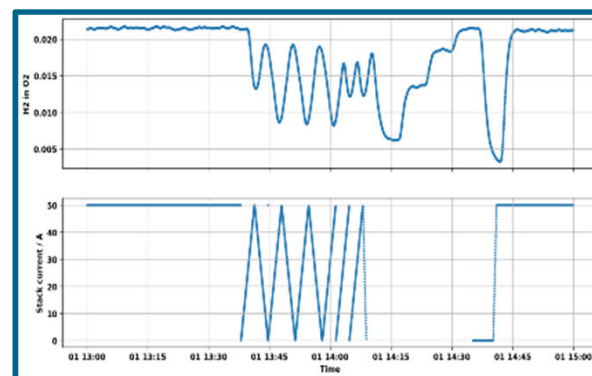
Alkalische Elektrolyse

Lösungsansätze Dynamischer Betrieb: Betriebsstrategien

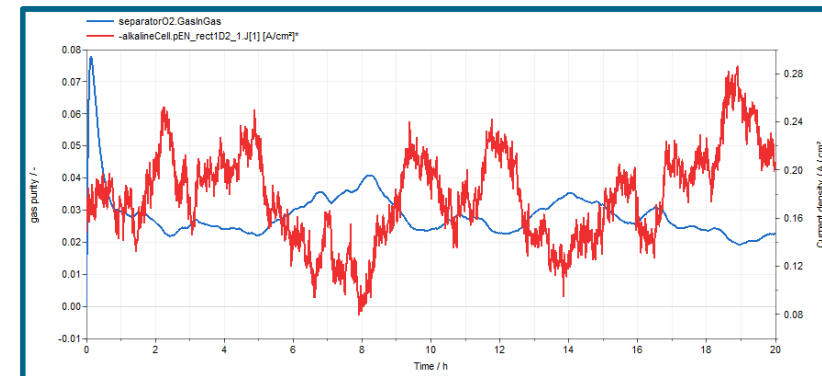
- Zeitweise keine Mischung der Kalilauge
- Variabler Laugenstrom
- Hand-in-Hand von Simulation und Experiment für die Entwicklung von Betriebs- und Regelstrategien



Experimente



Simulation

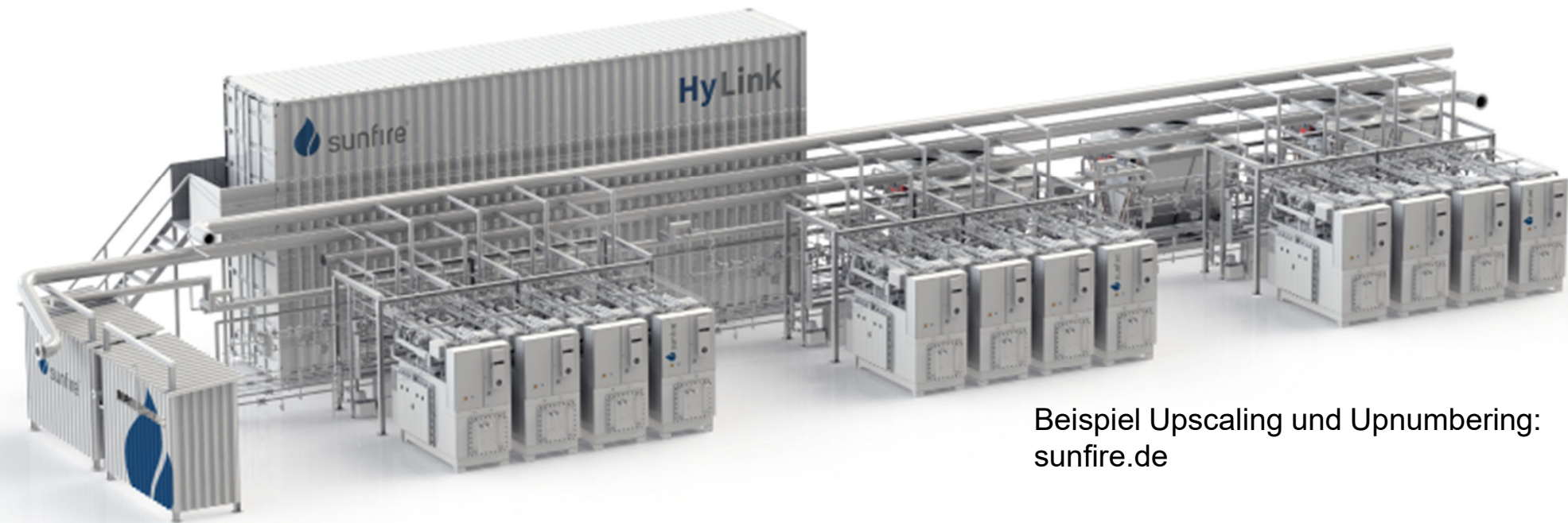


Bei Detailfragen gerne ansprechen:
Dr. Sanaz Razmjooie

Festoxid-Elektrolyse

Herausforderungen

- Verfügbare Größenordnung (Upscaling und Upnumbering)
- Dynamischer Betrieb
- Degradation/Lebensdauer
- Kosten

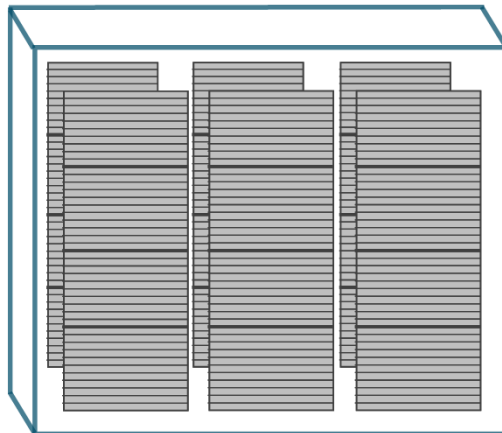


Beispiel Upscaling und Upnumbering:
[sunfire.de](https://www.sunfire.de)

Festoxid-Elektrolyse

Hintergrund: Systemaufbau

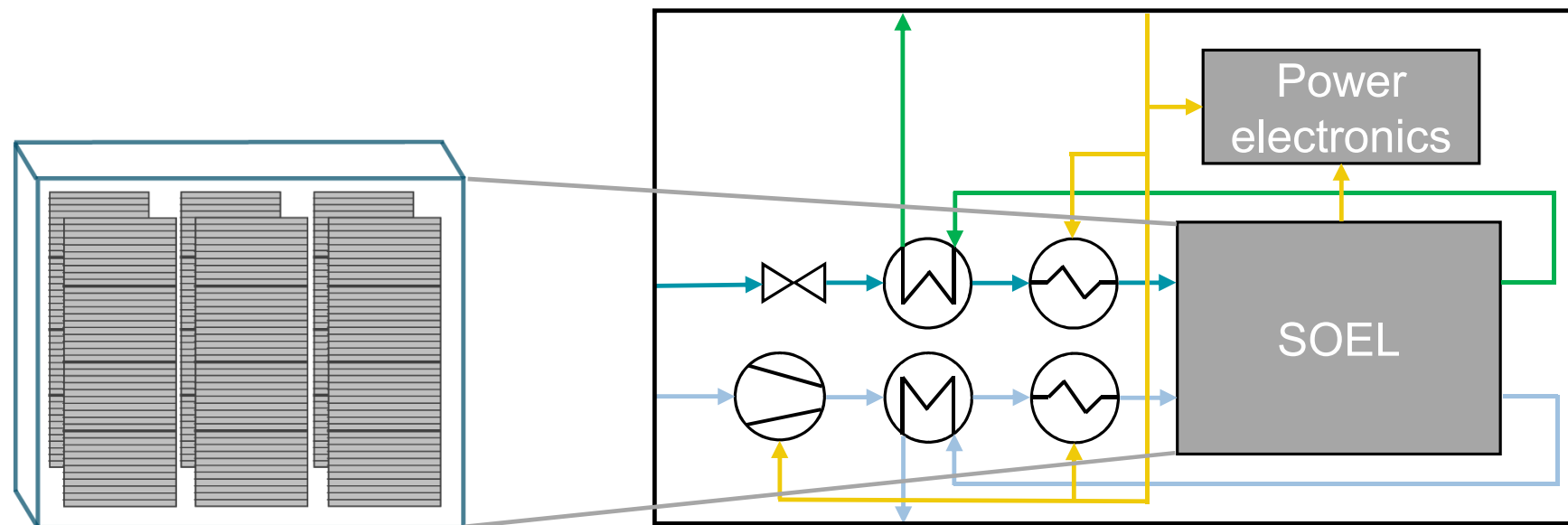
- Stack (Stapel) → Reaktormodul → Systemmodul



Festoxid-Elektrolyse

Hintergrund: Systemaufbau

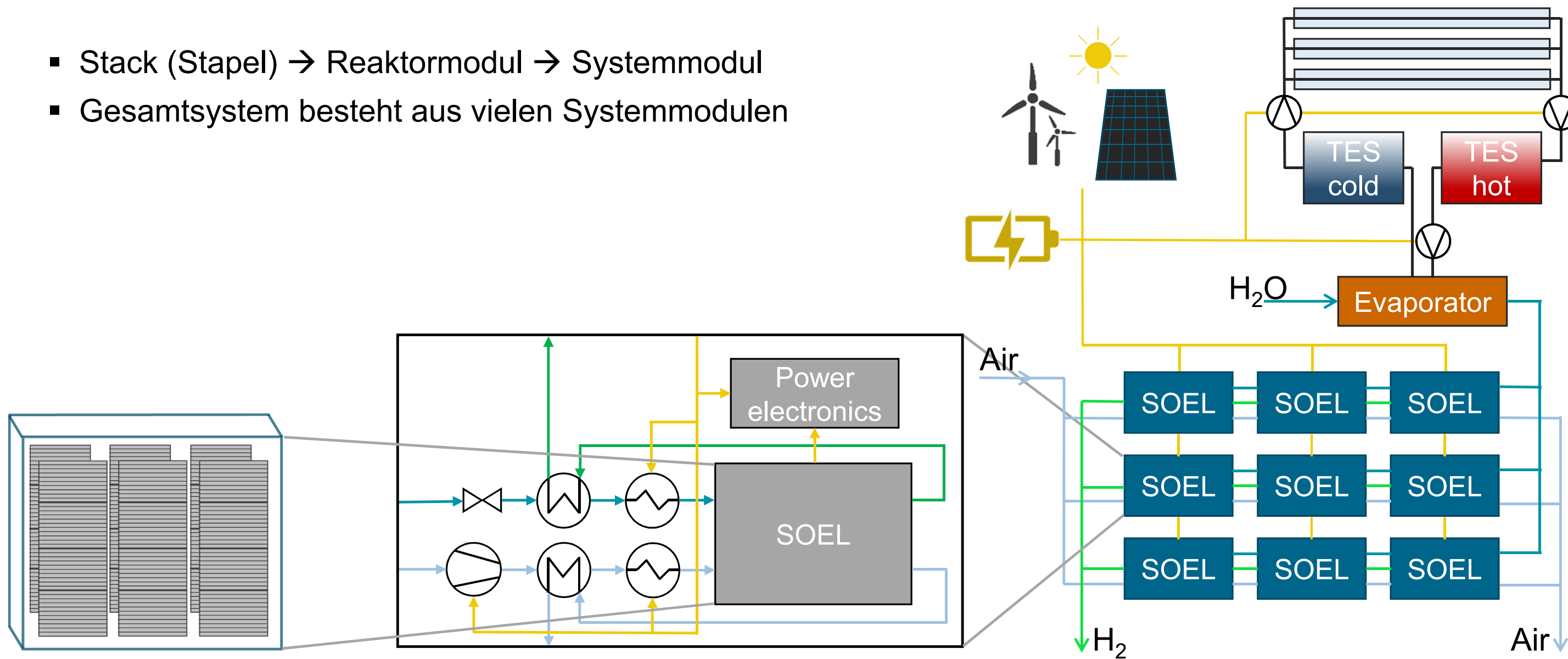
- Stack (Stapel) → Reaktormodul → Systemmodul



Festoxid-Elektrolyse

Hintergrund: Systemaufbau

- Stack (Stapel) → Reaktormodul → Systemmodul
- Gesamtsystem besteht aus vielen Systemmodulen

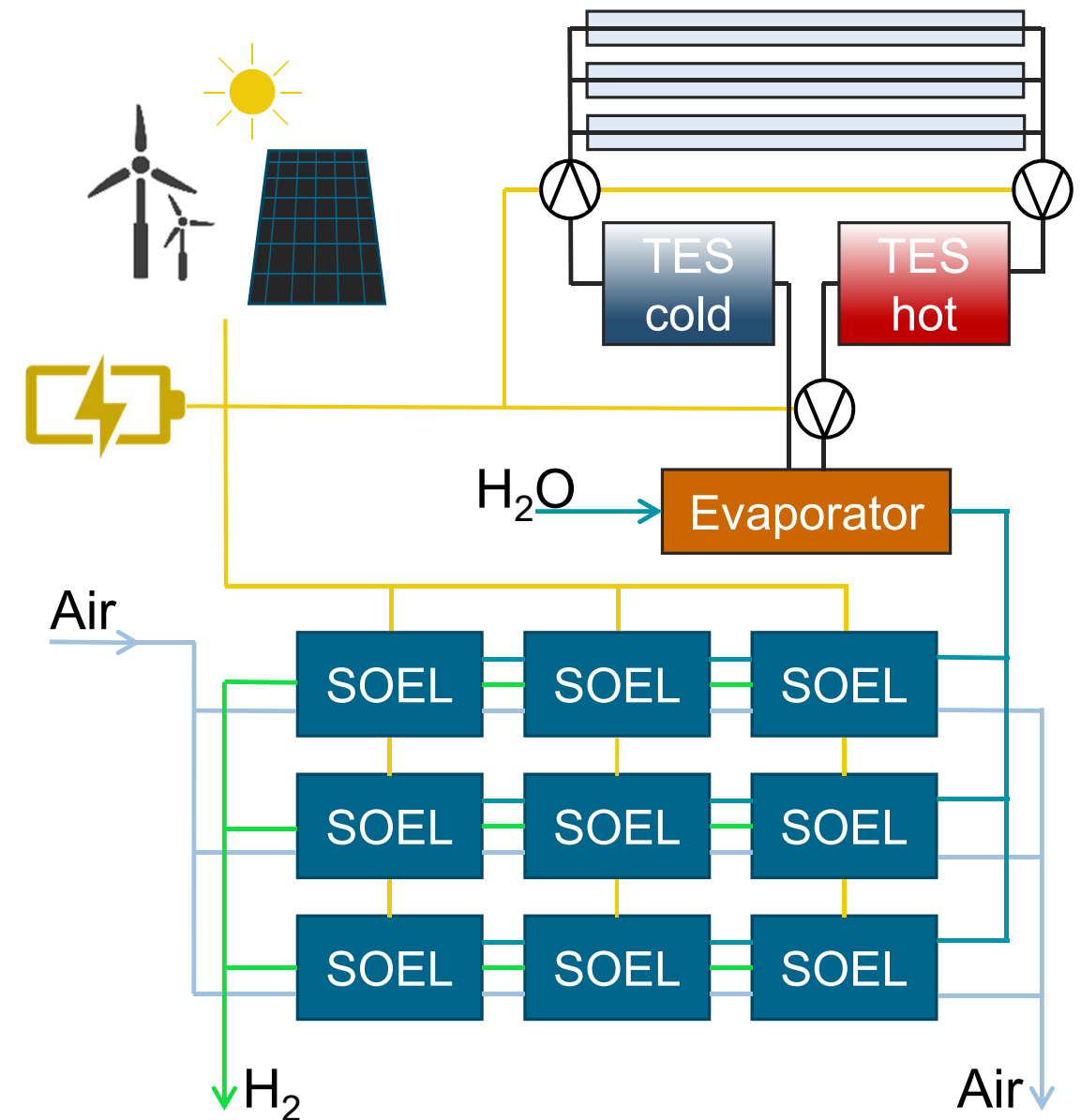
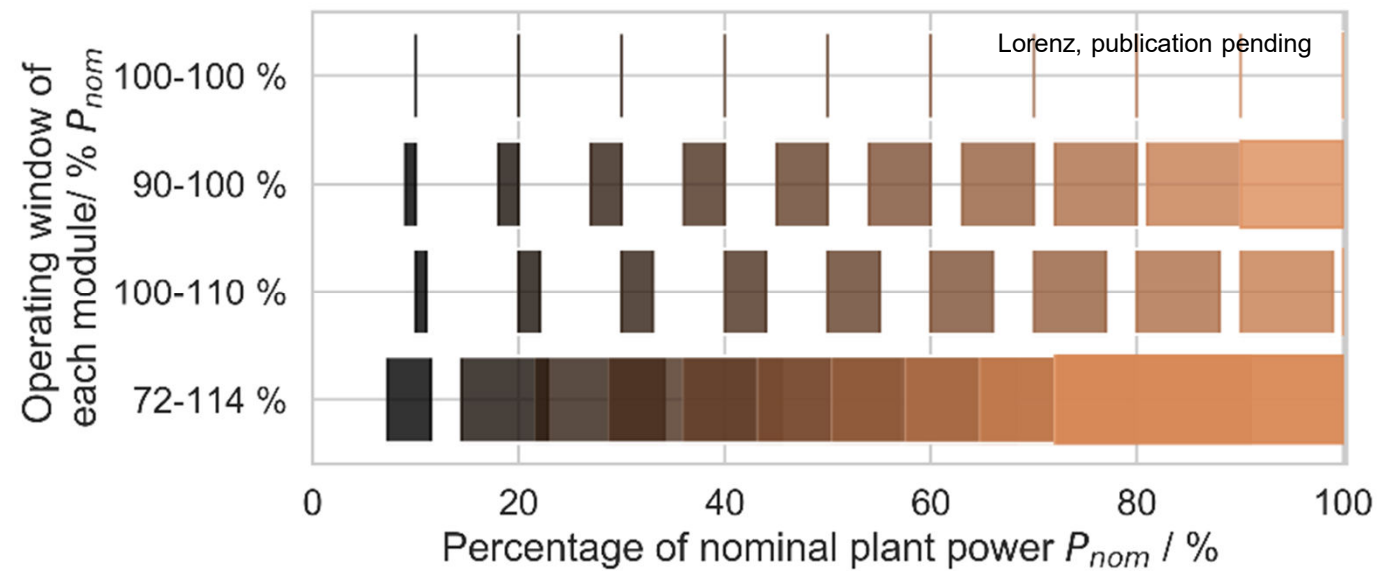


TES: Thermal Energy Storage
 SOEL: Solid Oxide Electrolysis

Festoxid-Elektrolyse

Lösungsansätze Dynamischer Betrieb: Betriebsstrategien

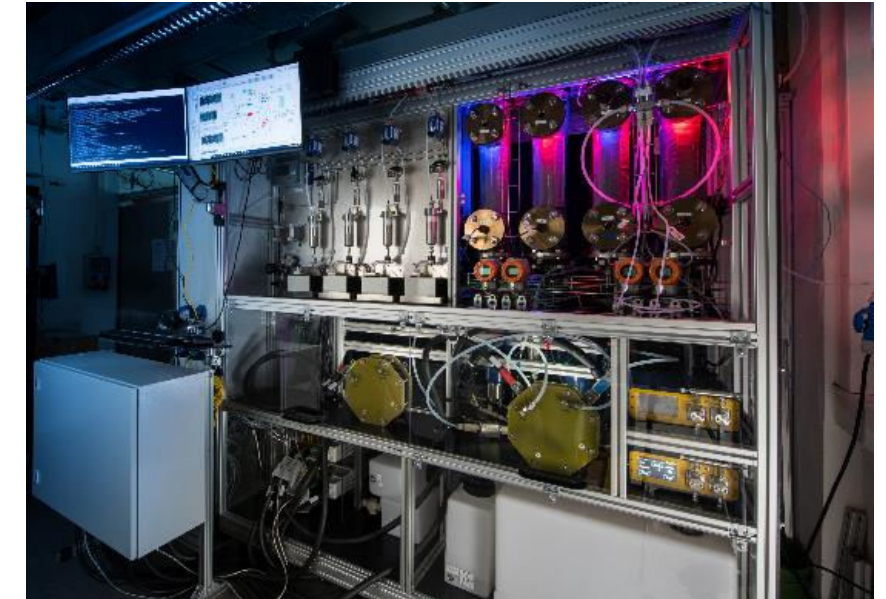
- Module zu- oder abschalten
- Betriebsfenster einzelner Module nutzen
- Hand-in-Hand von Simulation und Experiment für die Entwicklung von Betriebs- und Regelstrategien

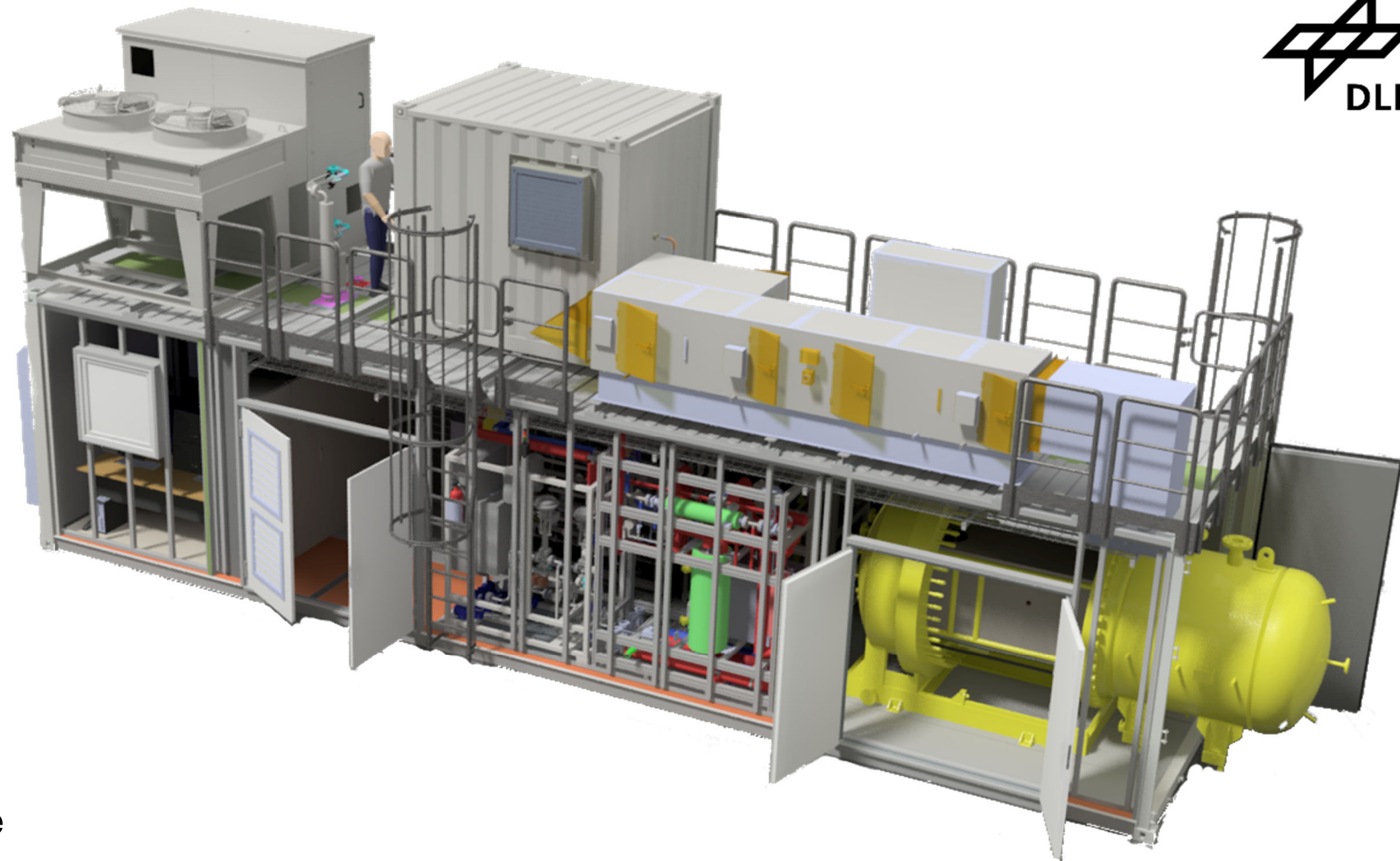


TES: Thermal Energy Storage
SOEL: Solid Oxide Electrolysis

Zusammenfassung

- Elektrolyseanlagen müssen mit fluktuierendem Stromangebot betrieben werden können
- Alkalische Elektrolyse:
 - etabliert und günstig
 - sehr große Einzelreaktoren bis 5 MW
- Festoxid-Elektrolyse
 - höchster Wirkungsgrad
 - H_2O zu H_2 und CO_2 zu CO
- Dynamik kann erreicht werden durch
 - Nutzen der modularen Bauweise
 - geeignete Betriebsstrategien bei guter Kenntnis der Elektrolyseure und Systeme
- Am DLR-Institut für Technische Thermodynamik
 - Umfassende simulative und experimentelle Infrastruktur und Expertise für die Verbesserung des Betriebs von Elektrolyseuren





Kontakt

Abteilungsleitung

DLR-TT-ESI

Dr. S. Asif Ansar

syed-asif.ansar@dlr.de

Gruppe AEL

Dr. Sanaz Razmjooie

fatemeh.razmjooei@dlr.de

Gruppe SOEL/SOFC

Dr. Marc P. Heddrich

marc.heddrich@dlr.de

Beispiel Systemexperiment im Aufbau
Druckaufgeladene Ko-Elektrolyse H_2O , $\text{CO}_2 \rightarrow \text{H}_2$, CO
für die Fischer-Tropsch-Synthese