

# A/C-APU - Ein wasserstoffbasiertes Klimaaggregat zur Reichweitenerhöhung von Brennstoffzellenfahrzeugen

8. VDI-Fachkonferenz

Thermomanagement in elektromotorisch angetriebenen PKW

R. Hegner<sup>1</sup>, C. Weckerle<sup>2</sup>, H. Dittus<sup>1</sup>, I. Bürger<sup>2</sup>, M. Schier<sup>1</sup>, H.E. Friedrich<sup>1</sup>  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

<sup>1</sup>Institut für Fahrzeugkonzepte

<sup>2</sup>Institut für Technische Thermodynamik



Knowledge for Tomorrow

## Motivation

- Bei Elektrofahrzeugen (EVs) werden für die Kabinenklimatisierung elektrisch betriebene Systeme eingesetzt ( z.B. Klimakompressor und PTC-Heizer)

### → Reichweitenreduktion

- Verbot der Verwendung des Kältemittels R 134a oder anderer Kältemittel mit GWP>150 (Global Warming Potential, GWP) ab 2017.

### Bei Brennstoffzellenfahrzeugen:

- Ungenutzte Kompressionsarbeit (Druckdifferenz) im Wasserstoff-Drucktank

$$\frac{W_{\text{Komp.}}}{W_{\text{Chem.}}} = 15 \%$$

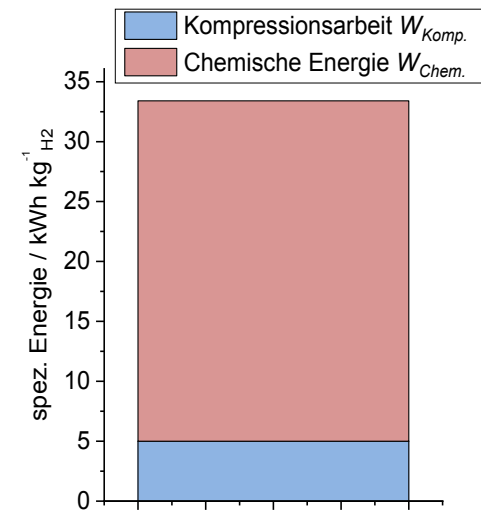


Driving range and time Mitsubishi i-MiEV (ÖAMTC / ADAC)

European Union

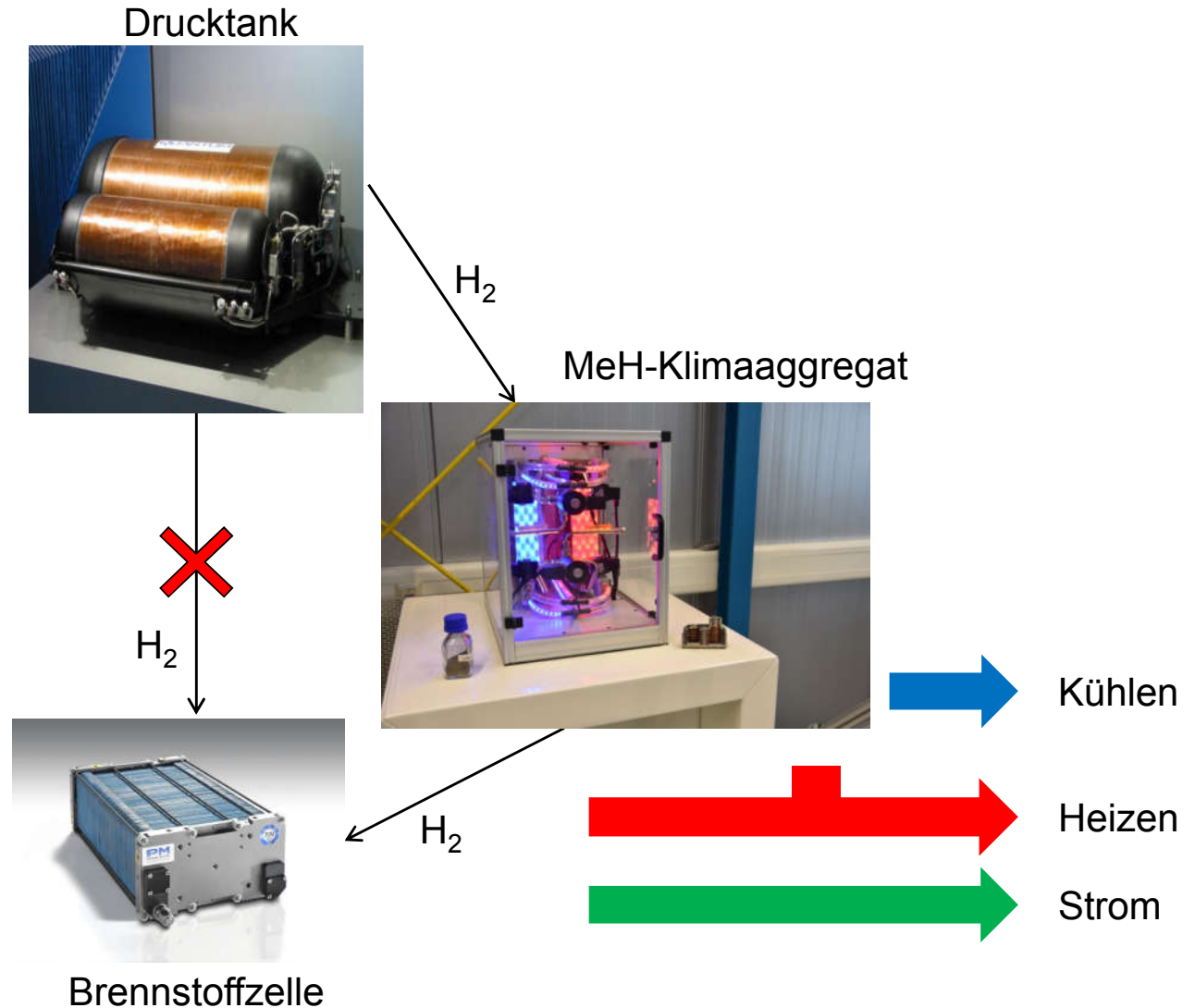


EU F-Gas Regulation



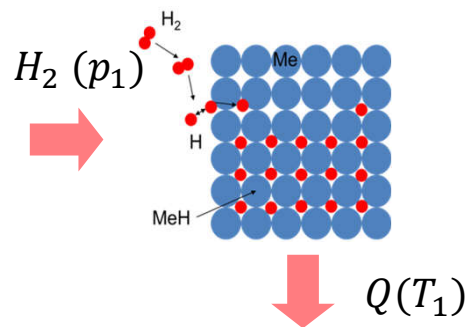
## Ziele

- Entwicklung eines wasserstoffbasierten Energiewandlungssystems mit Metallhydridreaktoren (MeH)
- Bereitstellung von Strom, Wärme und Kälte
- Steigerung des TRL auf 5
- Vorteile eines MeH-Klimaaggregats
  - Flexibles Kühlen und Heizen
  - Nutzung von Druckenergie
  - Wasserstoff nicht klimaschädlich
  - Wasserstoff wird nicht verbraucht

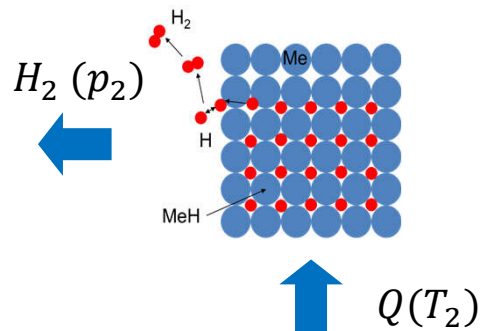


# Metallhydride – physikalisches Prinzip

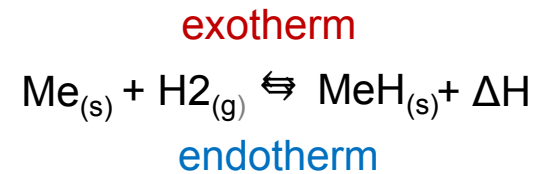
## Absorption:



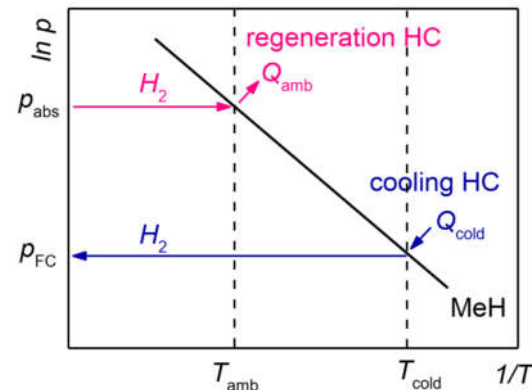
## Desorption:



- Reversible Gas-Feststoff-Reaktion:



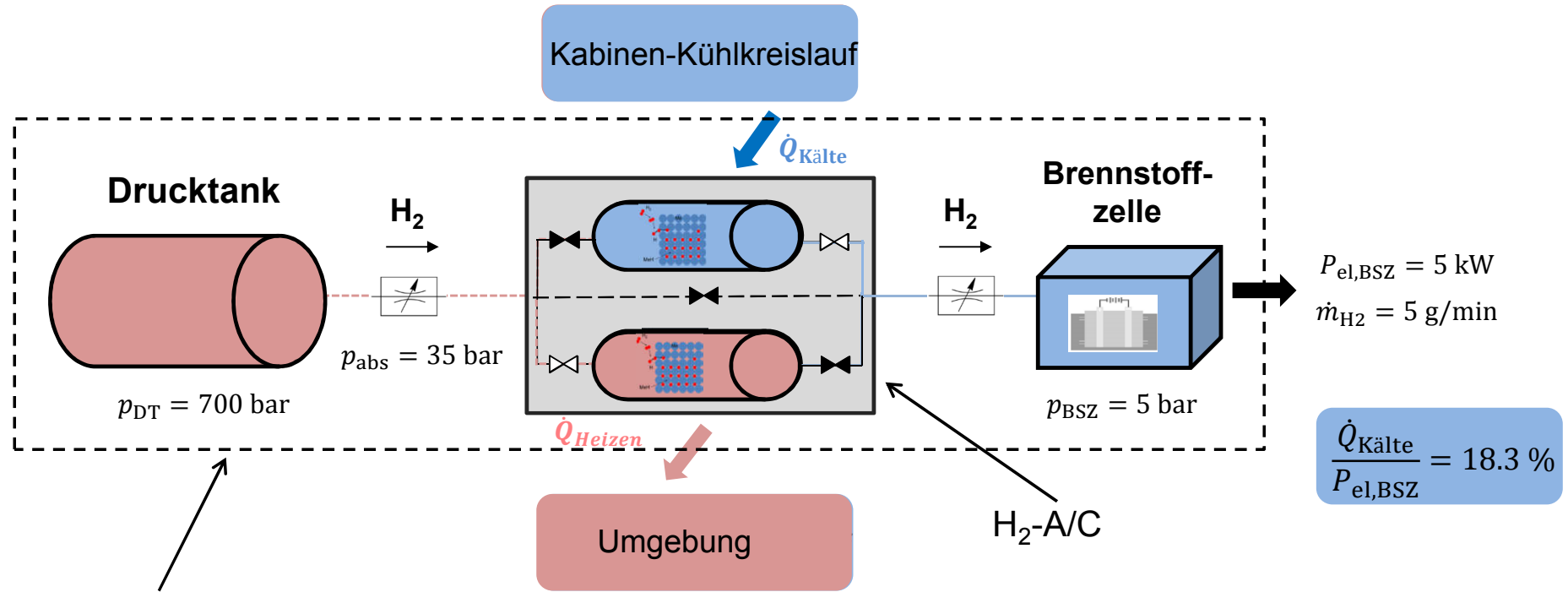
- Reaktionstemperatur abhängig vom Wasserstoffdruck:



- Einsatz als **Kältemaschine** oder **Wärmepumpe**
  - hohe Leistungsdichte durch hohe Reaktionsenthalpie und geringe Zyklenzeiten



# Funktionsprinzip A/C-APU und alternierender Reaktorbetrieb

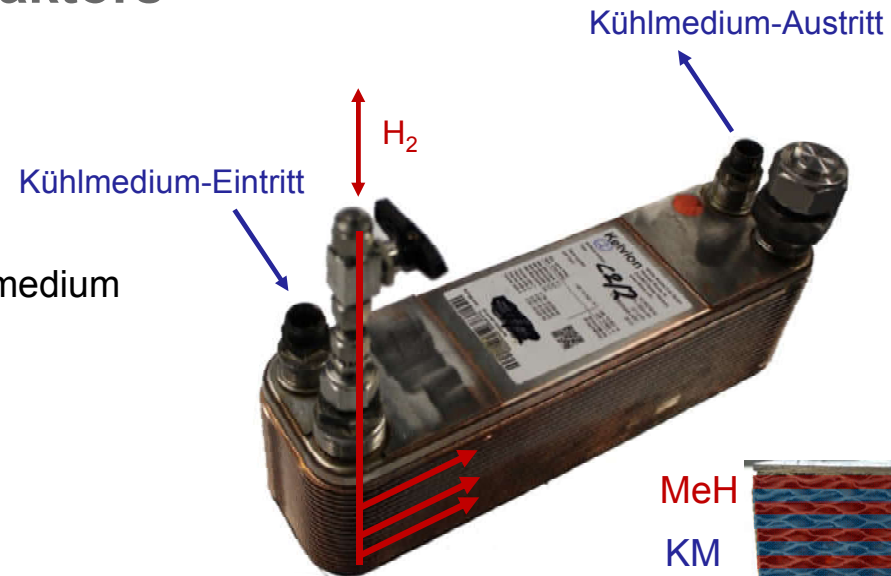


Air-Conditioning-Auxiliary-Power-Unit  
A/C-APU



## Design des realisierten Plattenreaktors

- **Optimierter Wärmetransport**
  - Mittlerer Transportweg 0,9 mm
  - Hoher Wärmeübergangskoeff. an Kühlmedium
- **Homogenisierter Stofftransport**
  - Integrierter Sintermetallfilter
  - Hohe Porösität (67%)
- **Mechanische Stabilität**
  - $p_{\max} = 55$  bar
  - MeH 20 x vorzykliert (Berücksichtigung der Hydridausdehnung).
- **Reaktormasse**
  - $m_{\text{Reaktor}} = 4$  kg,  $m_{\text{MeH}} = 1,45$  kg

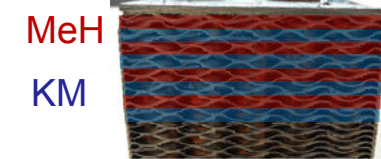


$V_{\text{ges}} = 2,7$  L

ca. 40 mm



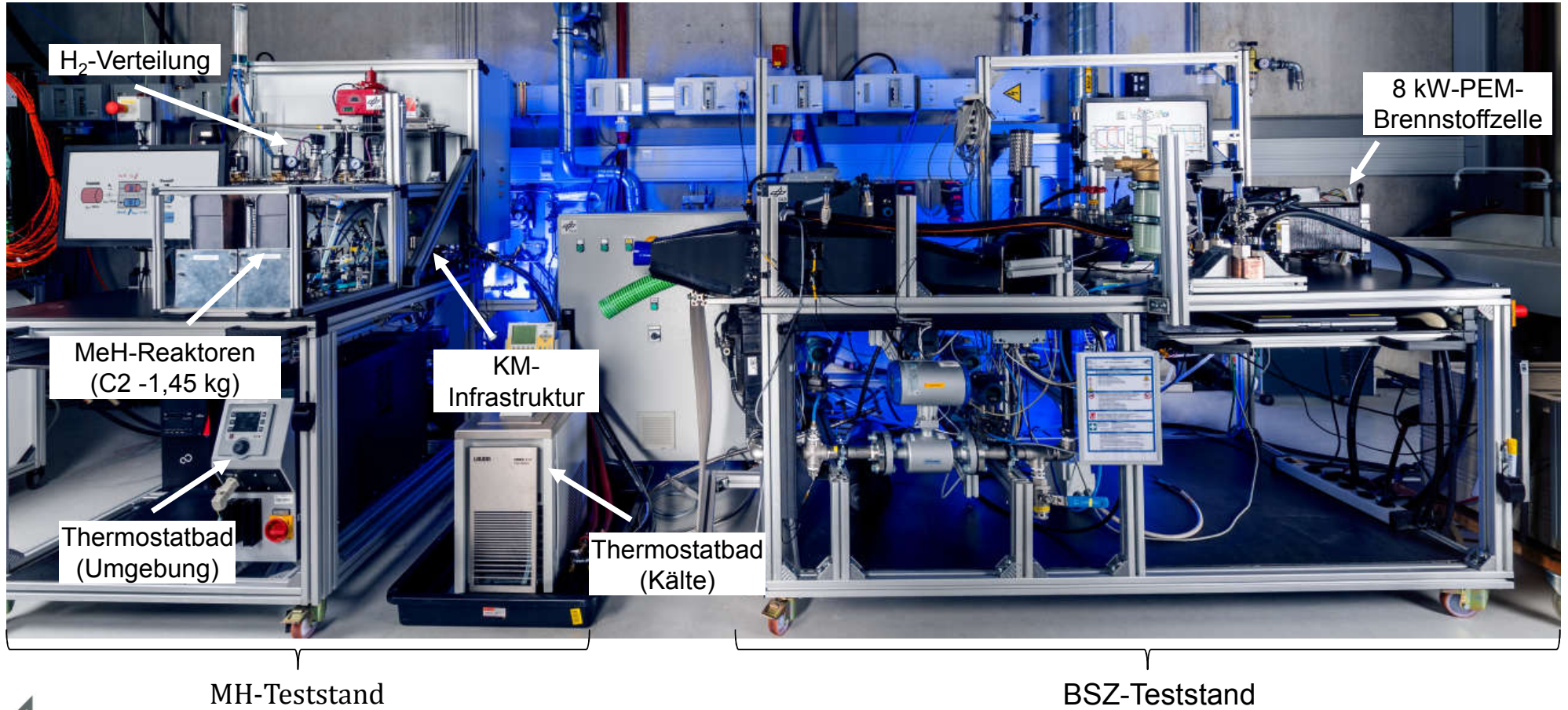
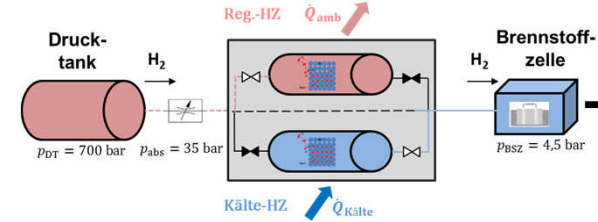
C2 ( $Ti_{0.98}Zr_{0.02}Mn_{1.5}V_{0.43}Fe_{0.09}Cr_{0.05}$ )



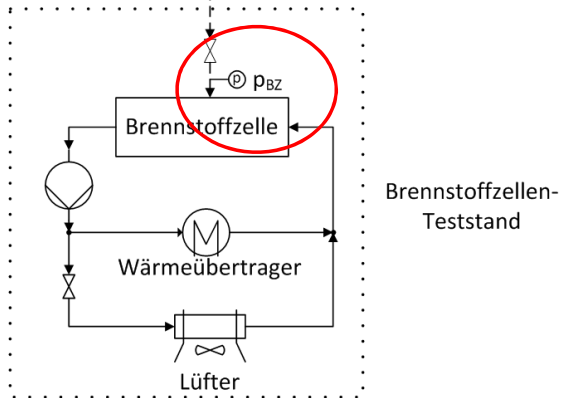
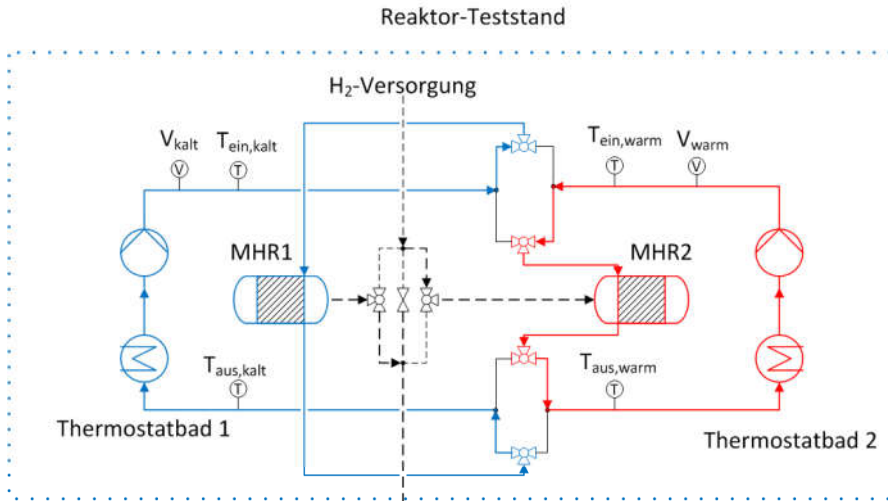
Weckerle et al., Int.J.Hydrogen Energy, 42(2017), 8063-8074  
Patent: DE102016110062B3, Reaktorkonzept



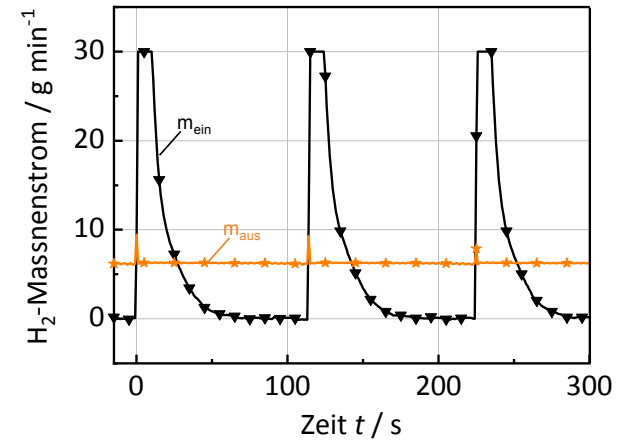
# Experimenteller Aufbau Abbildung des Fahrzeug-Energiesystems



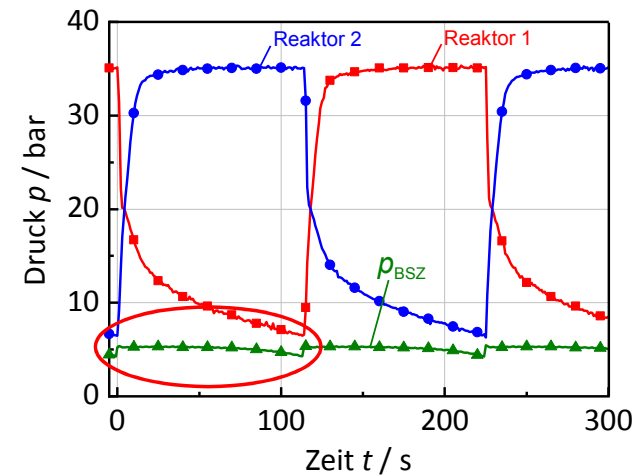
# Ergebnisse Kühlbetrieb - Wasserstoff



## Kontinuierliche Versorgung der BZ gewährleistet? ✓



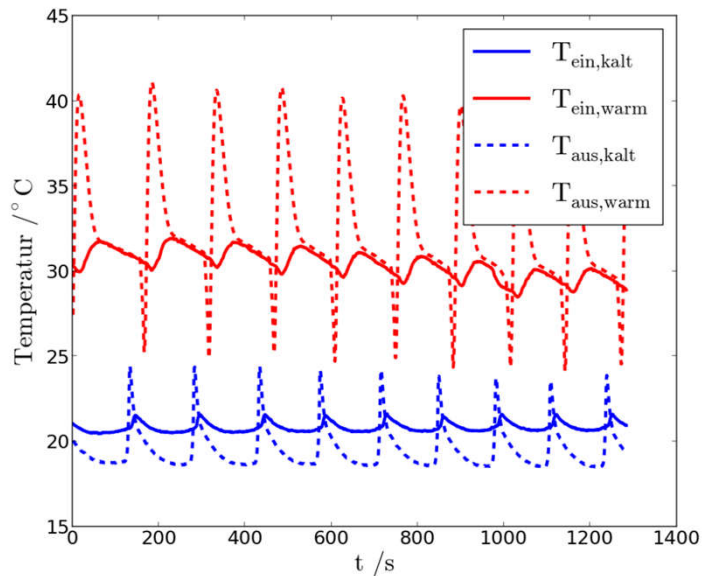
## Automatisierter Umschaltvorgang möglich? ✓



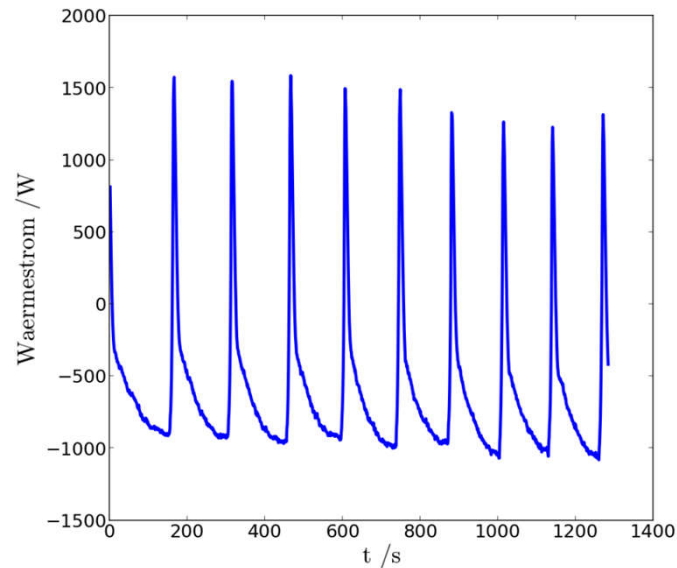


## Ergebnisse Kühlbetrieb - Kühlmedium

Welches Temperaturprofil ergibt sich im Kühlmedium?



Auswirkungen auf die Kühlleistung?



Verlustleistung durch Wechsel der HZ

Kälteleistung

$$\frac{\bar{Q}_{\text{WTF}}}{P_{el}} = 14 \% < 18 \%$$

- Wärmeeintrag im Kühlmedium während des Zykluswechsels
- Optimierungsmöglichkeiten: → **Optimiertes Reaktordesign (geringe therm. Masse)**  
→ **Systemoptimierung (Ventilsteuerung)**



# Systemintegration

## Zusammenhang zwischen el. BZ-Leistung und therm. Leistung

- Randbedingungen Kühlmedium:

$$T_{\text{ein,warm}} = 30^{\circ}\text{C}, T_{\text{ein,kalt}} = 20^{\circ}\text{C}$$

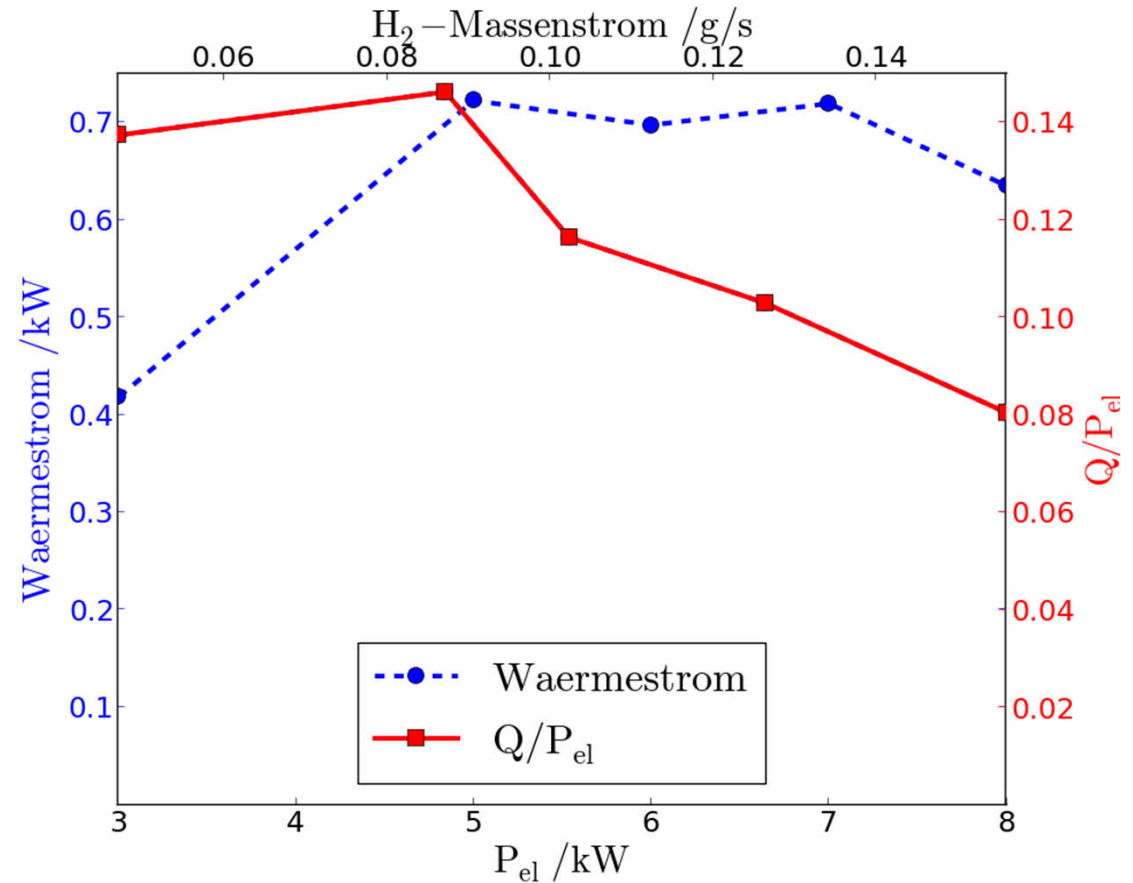
Ergebnisse:

- Maximale Kühlleistung: 0.72 kW bei  $P_{\text{el}} = 5$  kW
- Hohe Kühlleistung zwischen  $P_{\text{el}} 5$  und 7 kW
- Bei  $P_{\text{el}} > 7$  kW: Sinkende Kühlleistung durch häufiges Umtemperieren

Systemdesign A/C-APU erfordert:

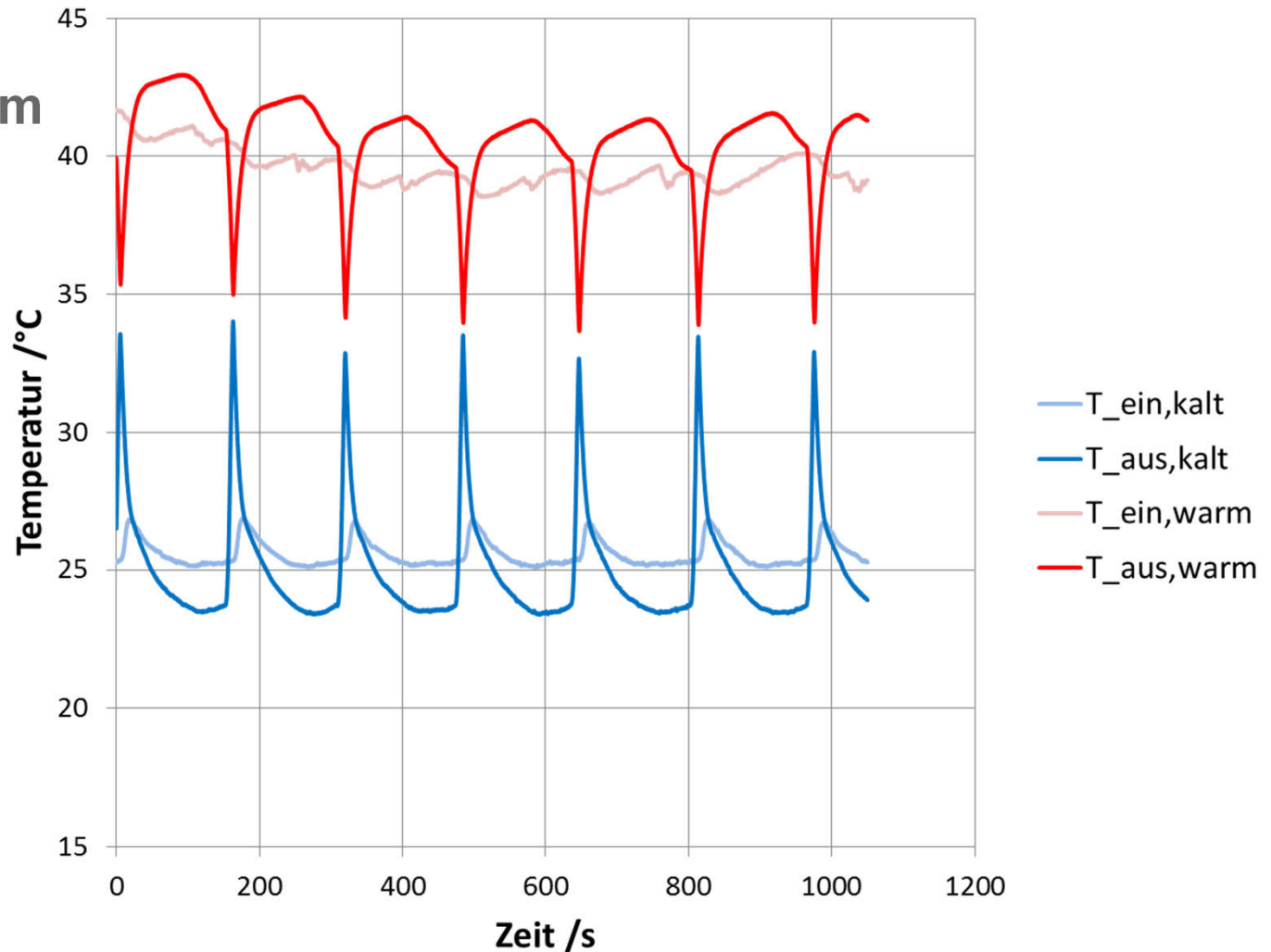
→ Definition Auslegungspunkt  $\text{H}_2$ -Massenstrom

→ Optimierung der Reaktorgrößen für Auslegungspunkt



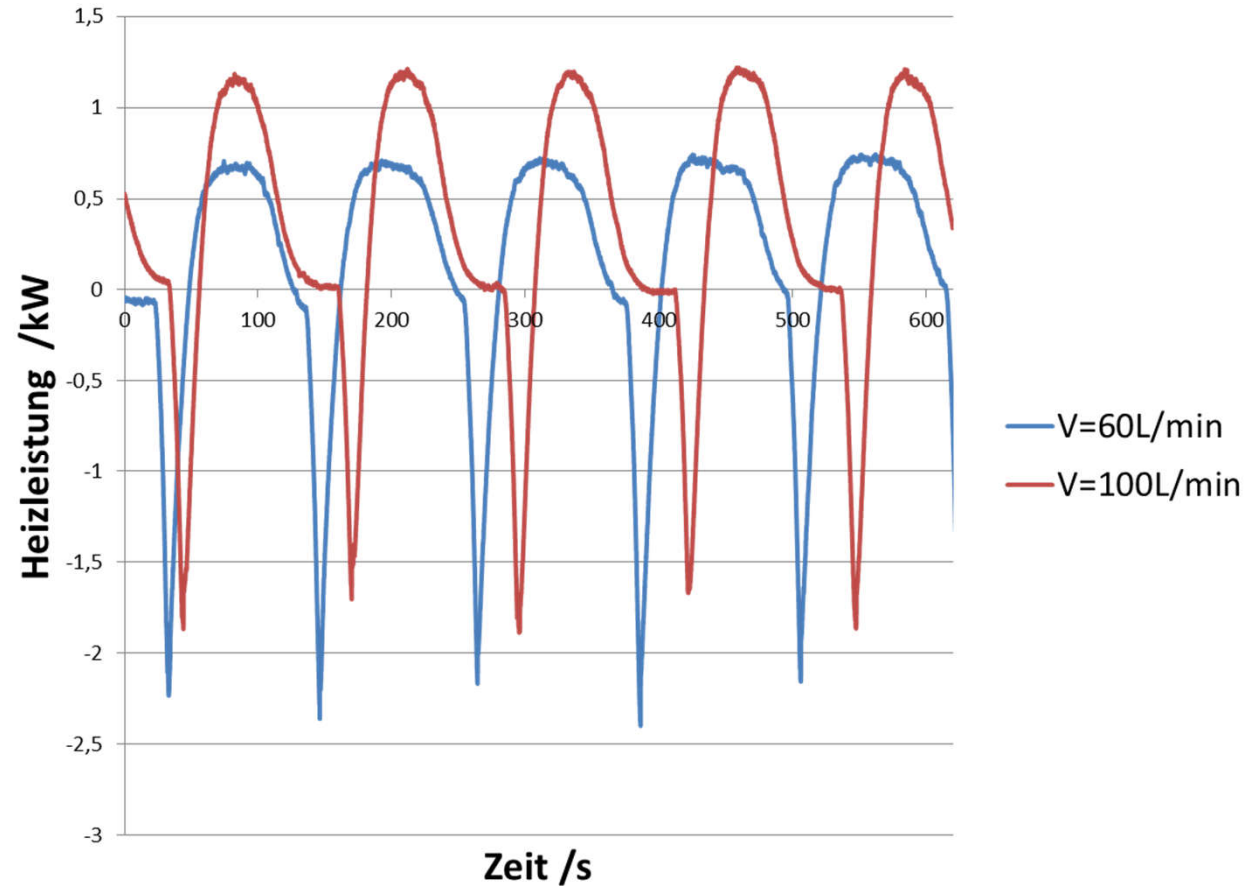
## Ergebnisse Heizbetrieb Temperaturprofil Kühlmedium

- Auslegungspunkt im Heizbetrieb:  
25°C, mögliche Wärmequellen:
  - Kabinenabluft
  - Batterie-Kühlkreislauf
  - Brennstoffzellen-Kühlkreislauf
- Randbedingungen:
  - $P_{el}=5$  kW
  - $V_{H_2}=60$  L<sub>N</sub>/min
  - $T_{warm}=40$ °C
  - $T_{kalt}=25$ °C
- → Gleichmäßiges  
Temperaturprofil im warmen  
Kühlmittelkreislauf durch H<sub>2</sub>-  
Durchflussregler

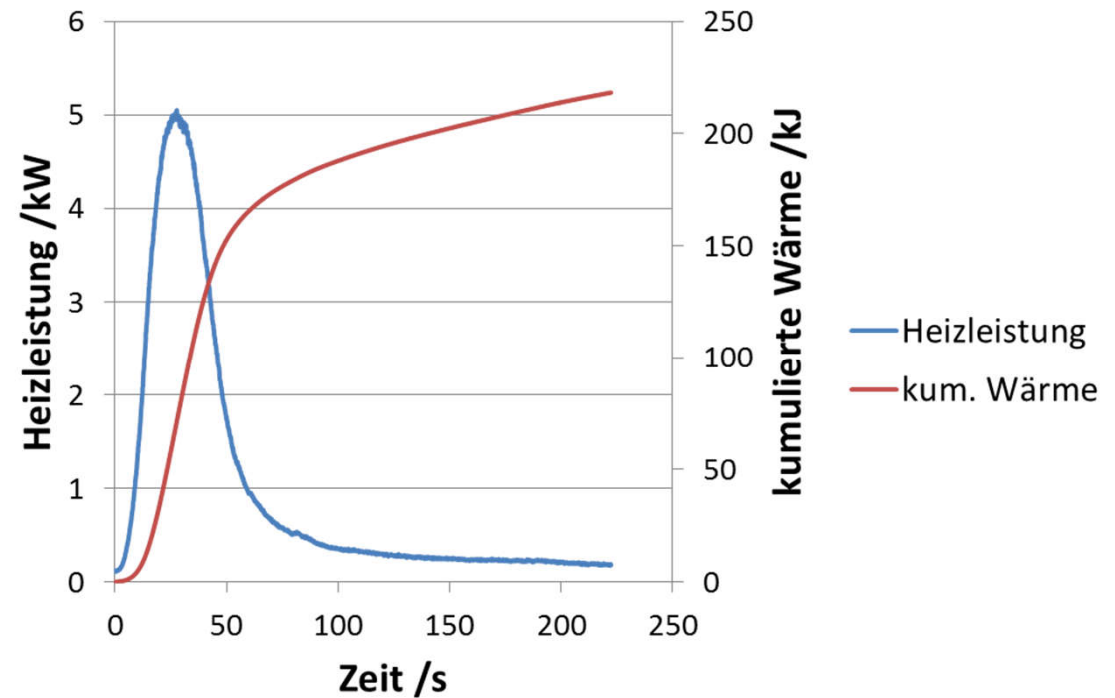
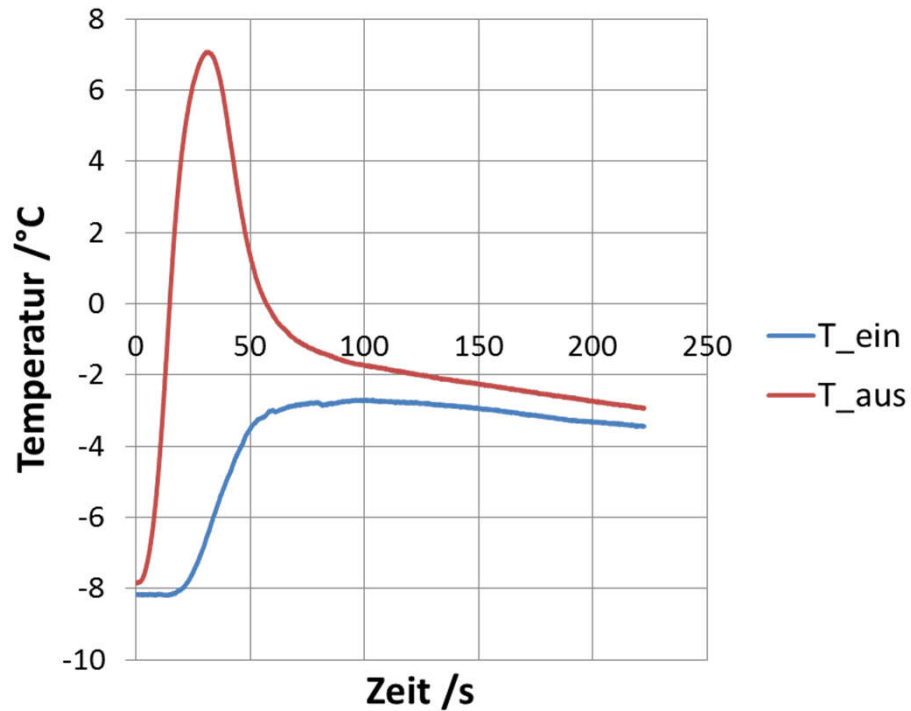


## Ergebnisse Heizbetrieb Wärmestromprofil

- Heizleistung abhängig von  $H_2$ -Massenstrom am MeH-Reaktor
  - Heiseitenreaktor ist entkoppelt von BZ- $H_2$ -Massenstrom
- Zusätzlicher Freiheitsgrad und höhere Flexibilität im Heizbetrieb



## Kaltstartverhalten (Boost-Betrieb): Einzelreaktor bei $T_U = -8^\circ\text{C}$

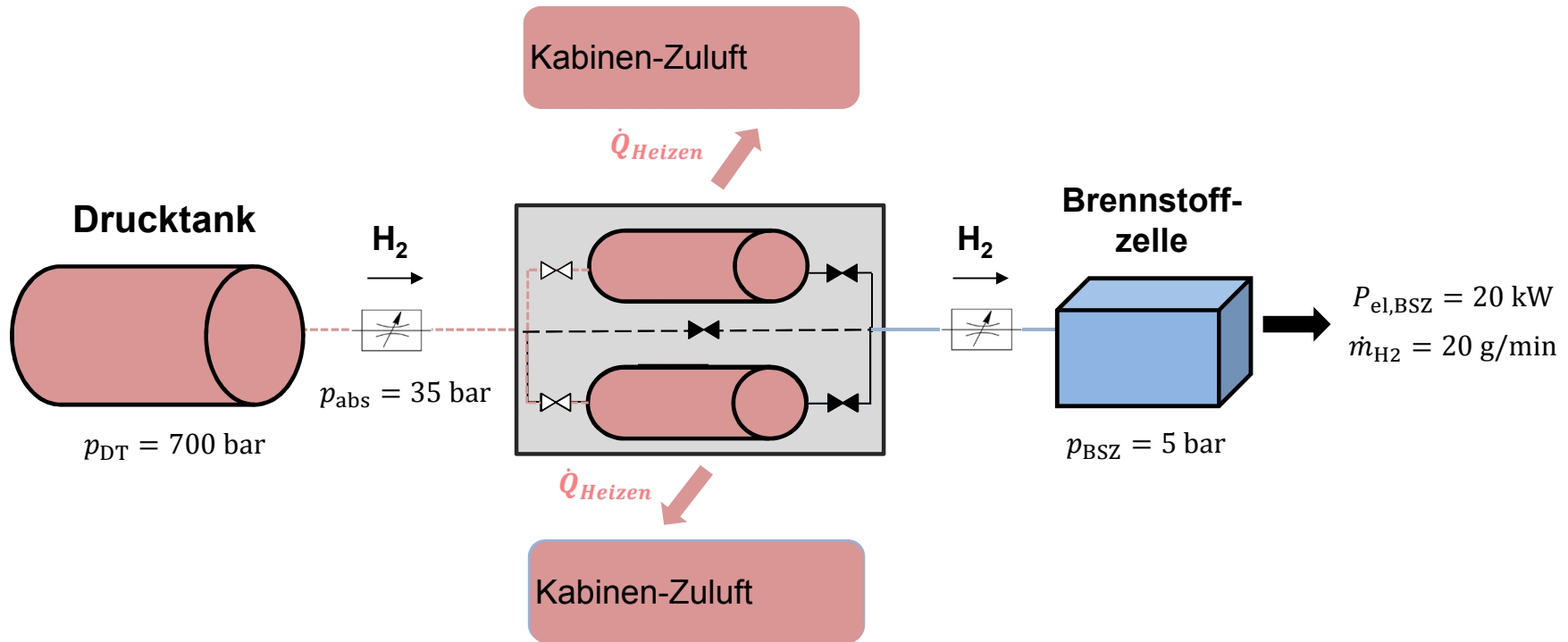


- Temperaturanstieg um 15 K (ein Reaktor)
- Sinkt anschließend aufgrund von Thermostatbad

- Bis zu 5 kW Heizleistung innerhalb von 30 s
- Mittelwert für 60 s: 2,8 kW



## Use-Cases



### Case-Scenarios im Elektrofahrzeug

Kabinen-Heizen

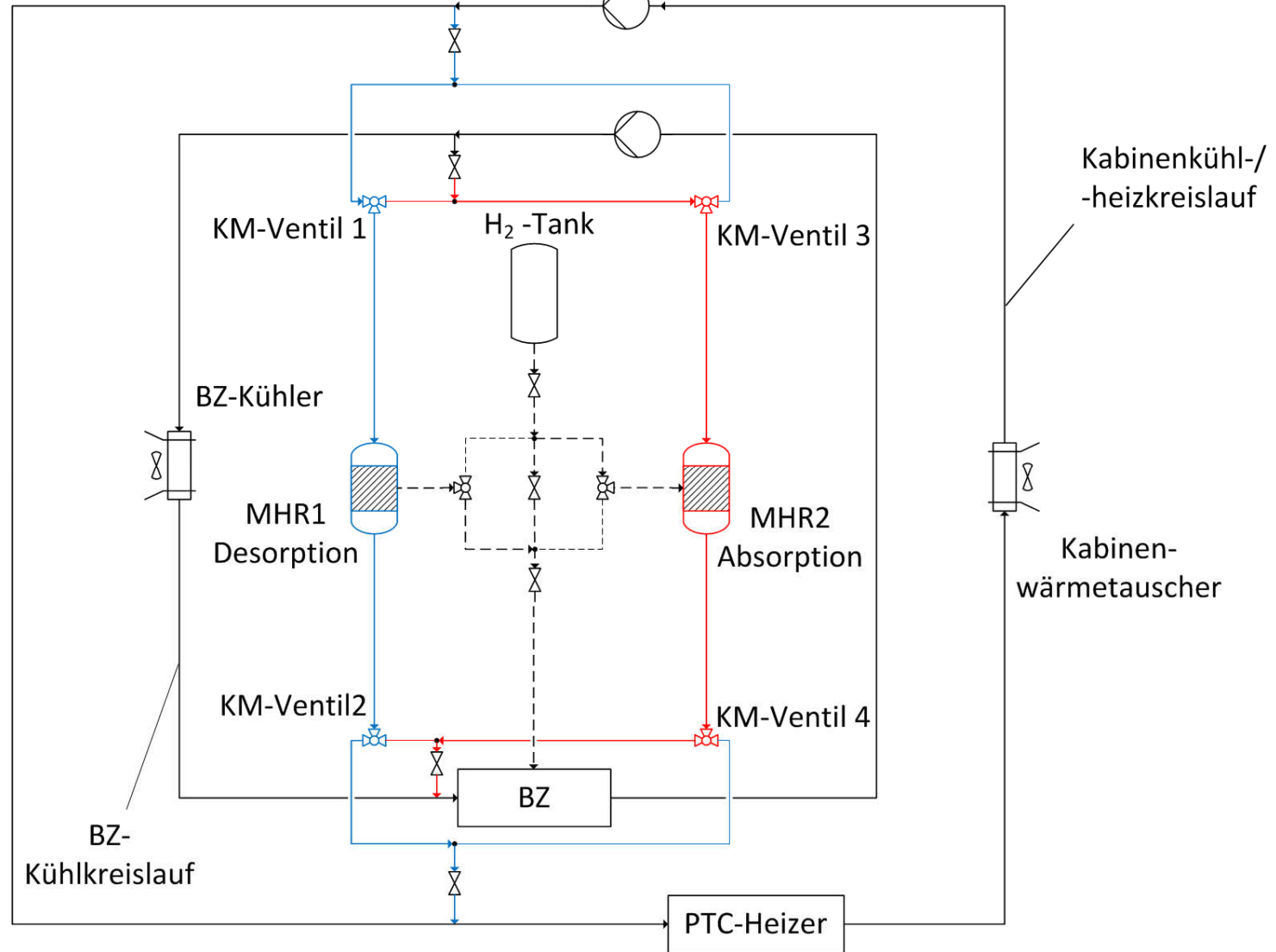
Kabinen-Kühlen

Boost-Heizen/  
(Schnellkühlen)

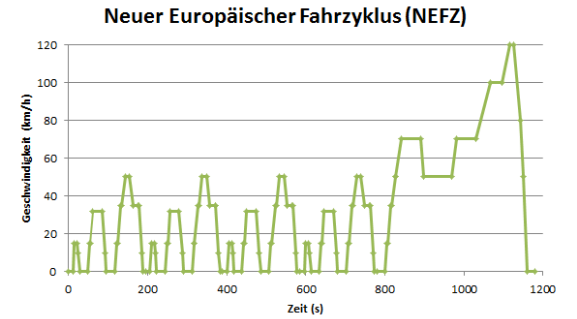


## Integrationskonzept

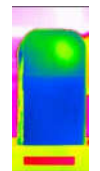
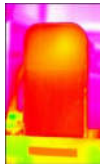
- Kopplung der H<sub>2</sub>-A/C mit dem BZ- und Kabinen-Kühlkreislauf
- Bypass für hohe BZ-Leistungen
- Betrieb für alle Use-Cases möglich



# Betriebsstrategie mit Wärmequellen & -senken

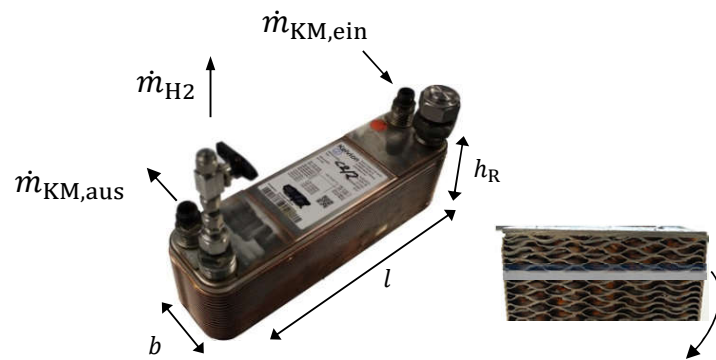


| Energiestrom | Fahrtbeginn (Boost-Betrieb) |           | Kontinuierliches Fahren |        | Standzeiten       |        | Fahrtende    |          |
|--------------|-----------------------------|-----------|-------------------------|--------|-------------------|--------|--------------|----------|
|              | Winter                      | Sommer    | Winter                  | Sommer | Winter            | Sommer | Winter       | Sommer   |
| Wärme        | 2x Kabine/BZ                | -         | Kabine                  | BZ     | Kabine            | BZ     | -            | Umgebung |
| Kälte        | -                           | 2x Kabine | BZ                      | Kabine | BZ                | Kabine | Umgebung     | -        |
| Strom        | Batterie/Motor              |           | Batterie/Motor          |        | Batterie/PTC/HVAC |        | Batterie/PTC |          |



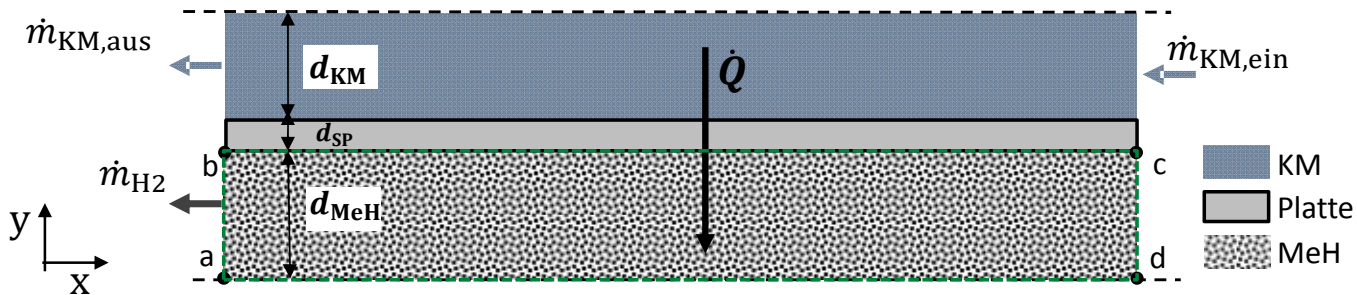


## Reaktordesign - Aufbau des Modells



### Mathematische Beschreibung des Modells (fünf gek. DGL):

- Reaktionskinetik
- Energiebilanz:
  - MeH-Schicht
  - Platte
  - Kühlmedium
- Massenerhaltung Wasserstoff



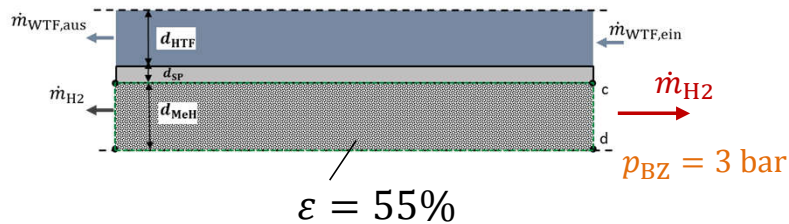
- Ergebnisse des Einzelspalts (Desorption) werden auf Reaktor mit  $N = 18$  MeH-Schichten skaliert.



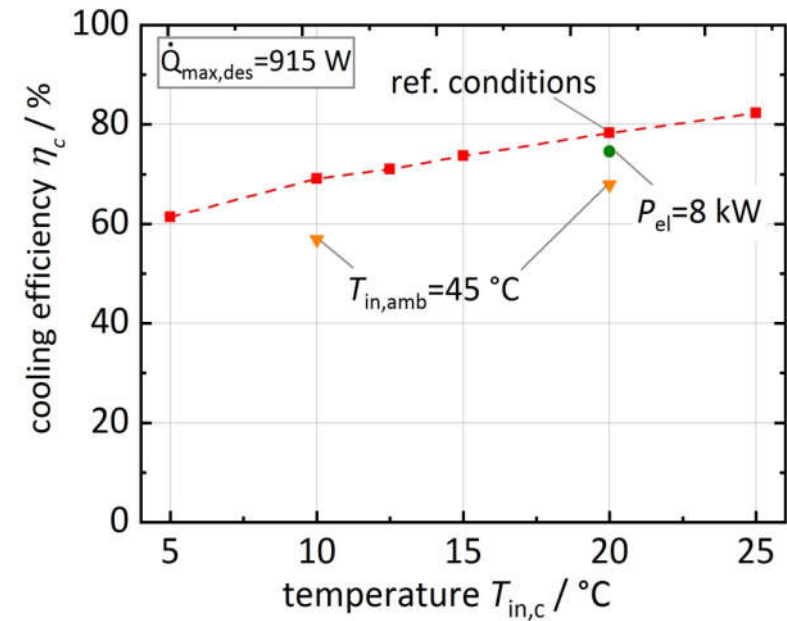
# Reaktordesign

## - Identifizierte Optimierungspotentiale

- Verbesserung des Massenverhältnisses:  $k = m_{MH}/m_R$ 
  - Reduzierung der Porosität von aktuell 67%
  - Optimale MH-Schichtdicke: ca. 4 mm
- Erhöhung der Materialausnutzung:
  - Reduzierung des H<sub>2</sub>-Transportweges
  - Reduzierung des BZ-Eingangsdruks

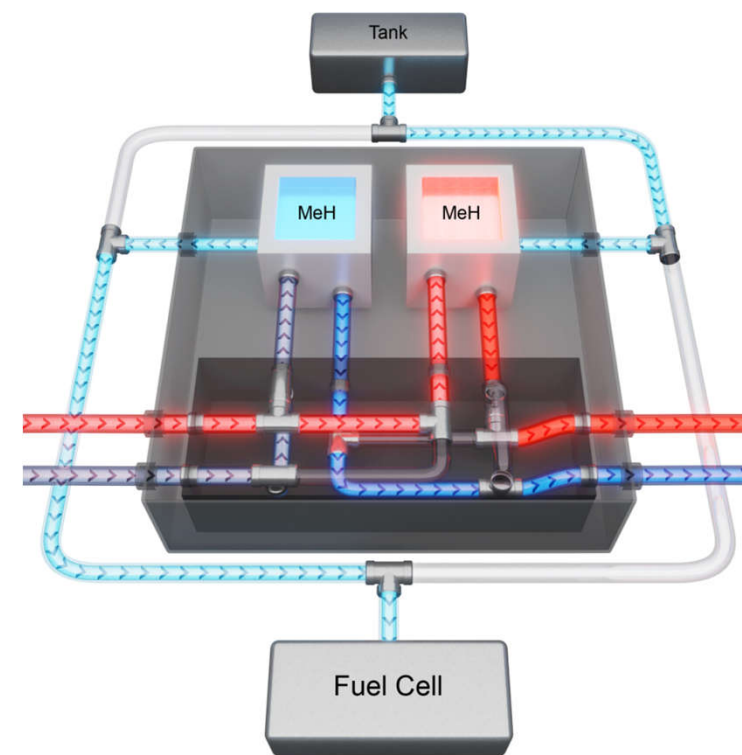


$$\eta_c = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_{\max,des}}$$



## Kenndaten experimenteller Aufbau und Entwicklungspotentiale

| Parameter                         | Prüfstand                    | Potential |
|-----------------------------------|------------------------------|-----------|
| El. BZ-Leistung                   | < 8 kW                       | < 25 kW   |
| Gesamtvolumen H <sub>2</sub> -A/C | 24 l                         | 17 l      |
| Gesamtmasse H <sub>2</sub> -A/C   | 40 kg                        | 27 kg     |
| Reaktorvolumen                    | 2.7 l                        | 4 l       |
| Reaktormasse                      | 8 kg                         | 11 kg     |
| Max. H <sub>2</sub> -Massenstrom  | 0.16 g/s                     | 1.1 g/s   |
| Max. Heiz- & Kühlleistung         | 0.803 kW                     | 5 kW      |
| Max. Q/P <sub>el</sub>            | 0.14 (@ 5 kW <sub>el</sub> ) | 0.18      |



## Zusammenfassung

- **Offene Klimaanlage** vielversprechendes Klimatisierungskonzept für BSZ-Fahrzeuge:
  - System wird von vorliegender Kompressionsarbeit angetrieben.
  - kontinuierliche Kälte/Wärme sowie „Boostfunktion“.
- **Plattenreaktor** (sensible Masse vs. WT-Limitierung) vielversprechendes Reaktorkonzept; **Metallhydrid C2** als geeignetes Material identifiziert und charakterisiert.
- Mögliche Systemintegration:
  - **A/C-APU**: Klimaaggregat und Range-Extender für batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge
  - **H<sub>2</sub>-Klimaanlage**: Direkte Integration in BSZ-Fahrzeug
- **Reaktormodellierung** zeigt weitere Entwicklungspotentiale
- **Weltweit erstes Proof-of-Concept** der MeH-Reaktoren mit einer 8 kW-BZ durchgeführt:
  - Kälteleistung von  $\frac{\dot{Q}_{WTF}}{P_{el}} = 14 \%$
  - Heizleistung von  $\frac{\dot{Q}_{WTF}}{P_{el}} = 10 \%$
  - Boost-Funktion: bis zu 5 kW Wärmestrom für 60 s → Temperaturanstieg um 15 K



**Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!**

Ansprechpartner:

Robert Hegner  
0711 6862 8832  
robert.hegner@dlr.de

A photograph of the Earth's horizon from space, showing the blue atmosphere, white clouds, and green and brown landmasses. The text "Knowledge for Tomorrow" is overlaid on the right side of the image.

Knowledge for Tomorrow