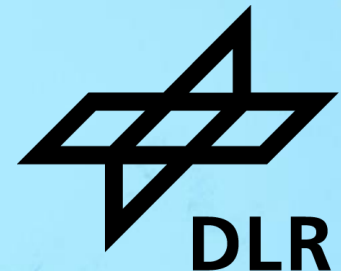


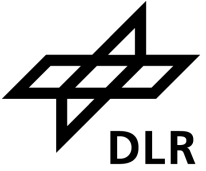
DLRK 2022

Empfehlungen für das Feuchtemanagement eines PEM-Brennstoffzellensystems
unter luftfahrttechnischen Betriebsbedingungen

F.Becker, L.Engel, C.Gentner



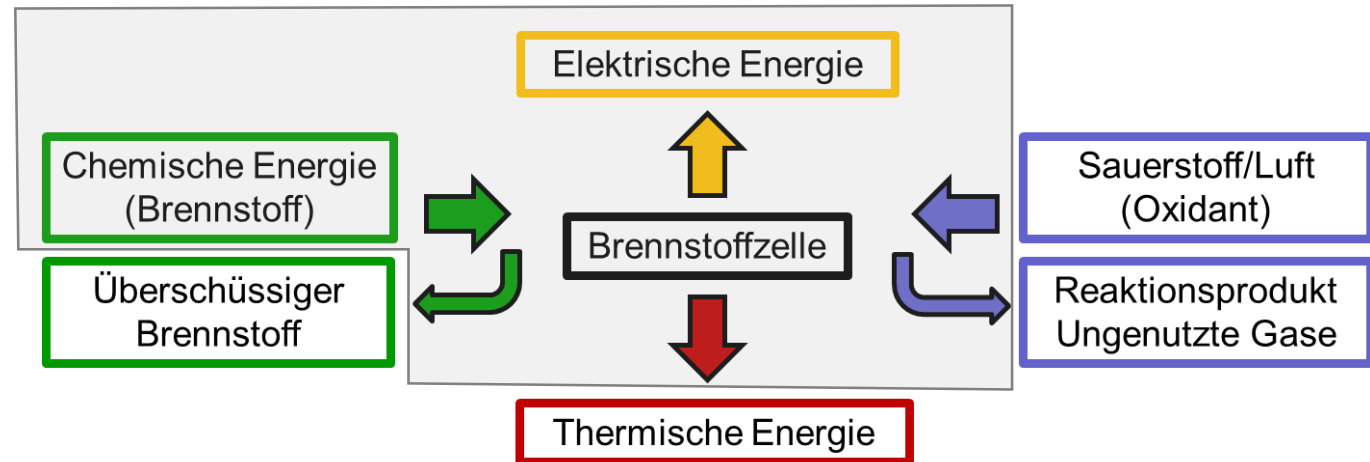
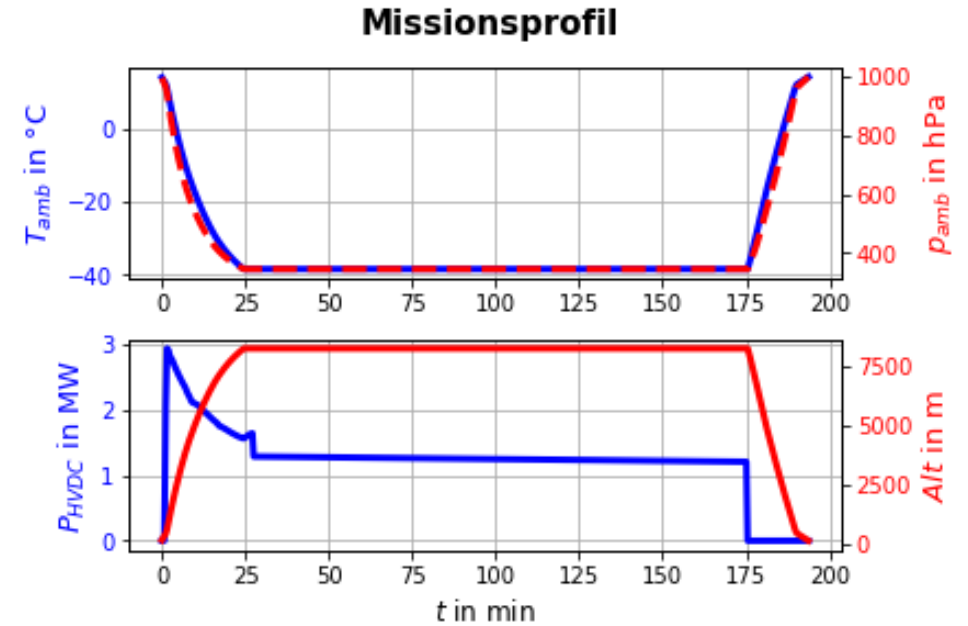
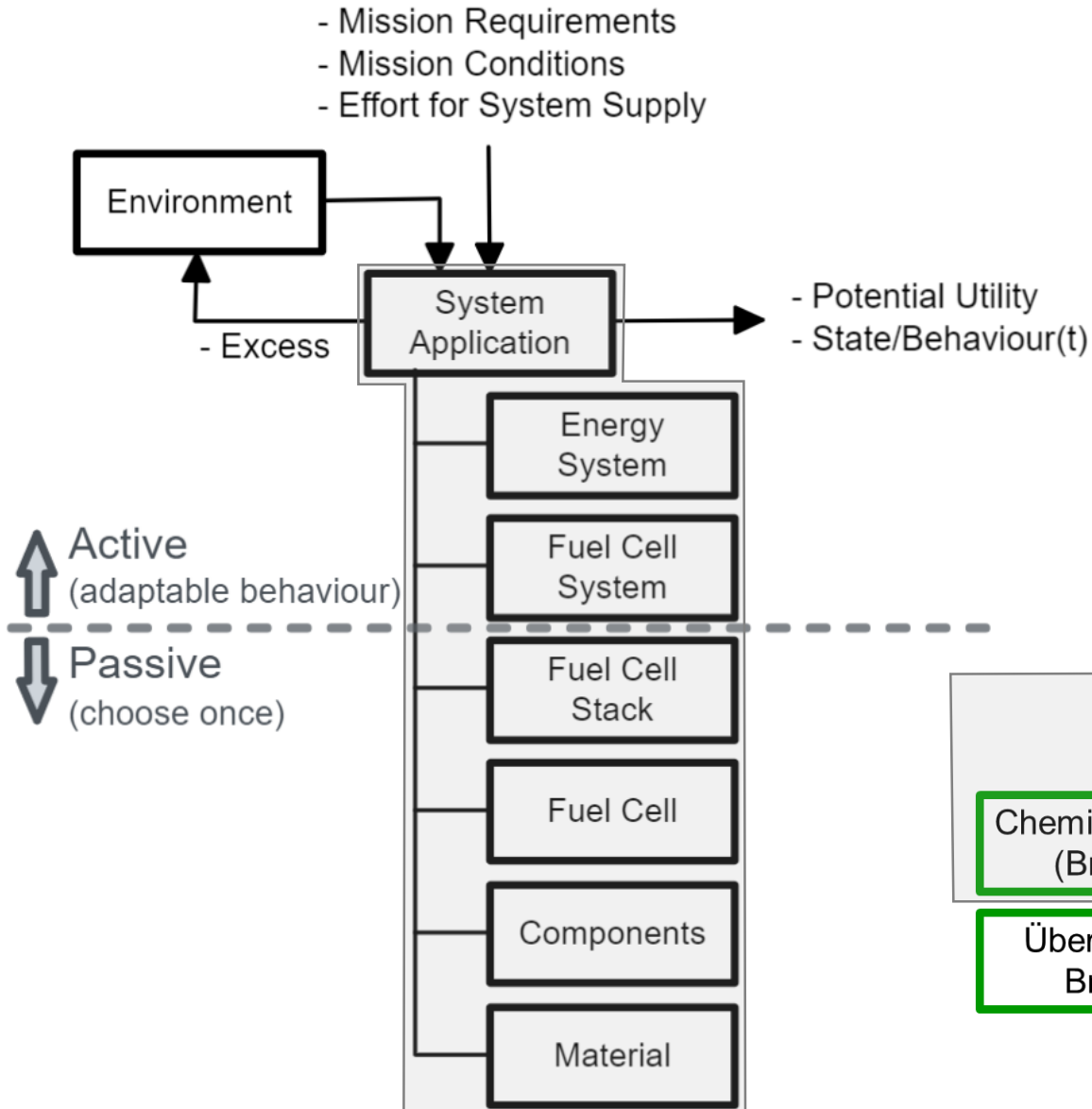
Inhalt



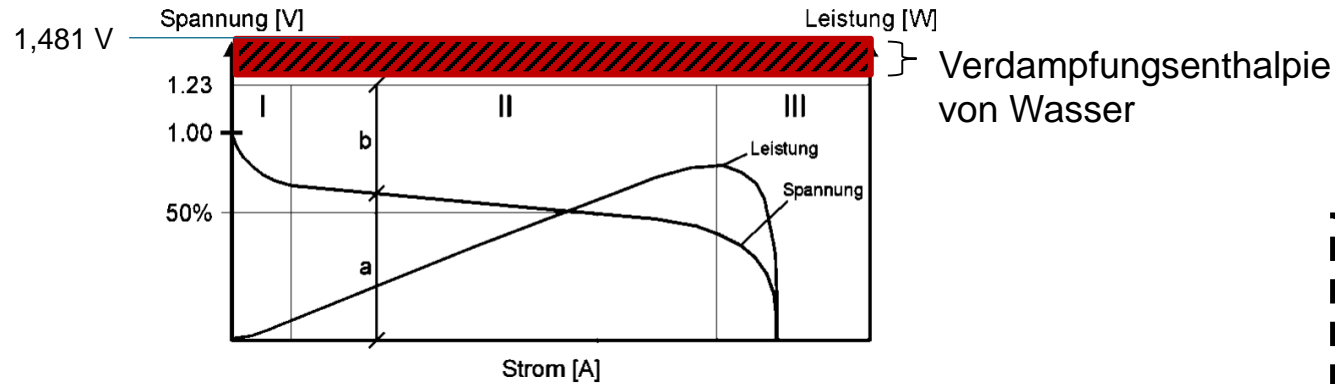
- 1) Luftfahrttechnischer Bezug
- 2) BZ-Grundlagen (Energieströme, Zustandsgrößen, Wassertransport)
- 3) Funktion und Technische Anforderungen
- 4) Parameterische Zusammenhänge
- 5) Topologievergleich für die Feuchteregulierung
- 6) Experimentelle Ergebnisse
- 7) Zusammenfassung



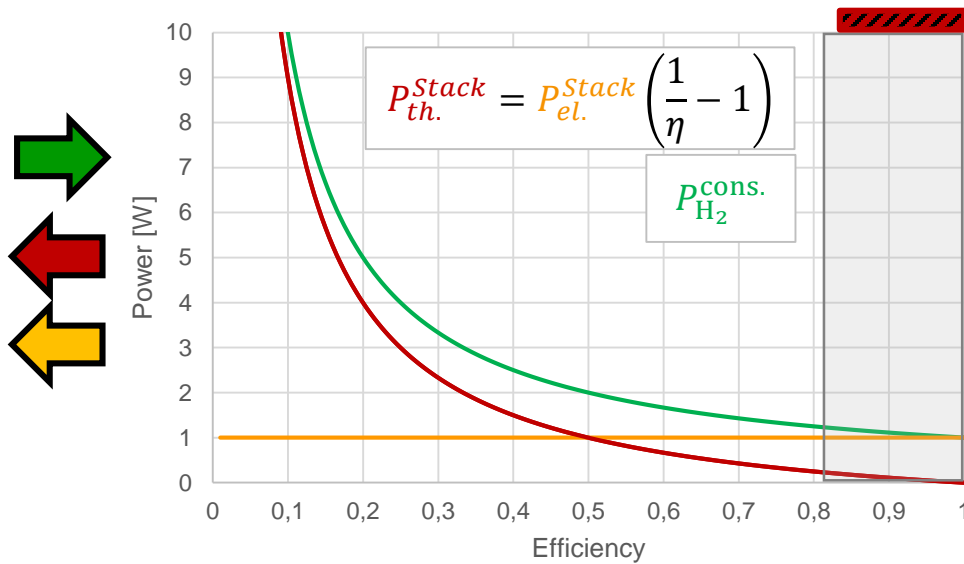
Luftfahrttechnischer Bezug



Energieströme eines PEM-BZ-Systems

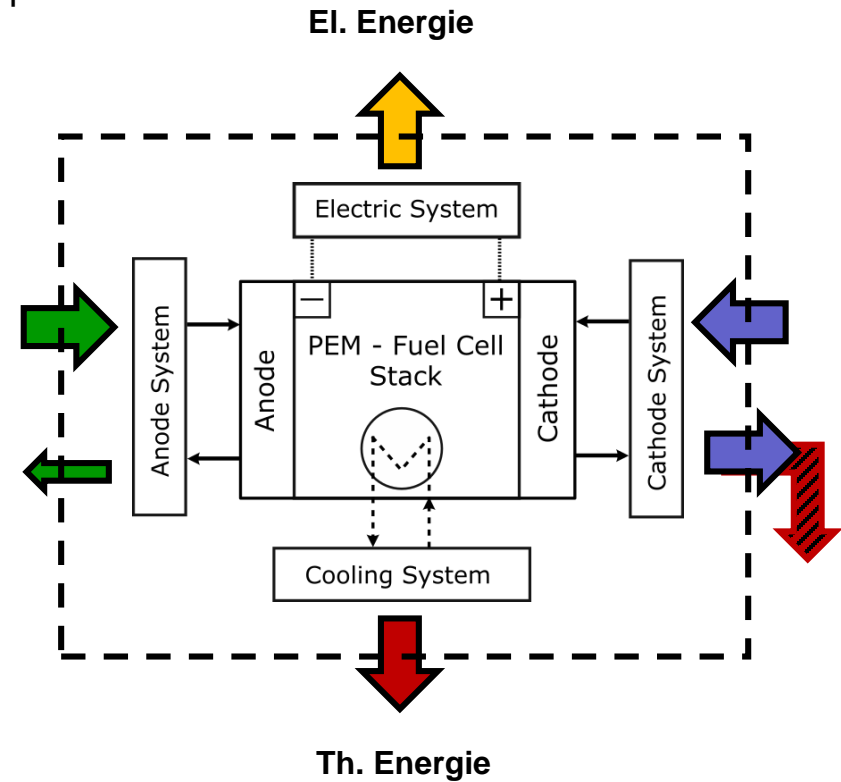


$$\eta_U = U / U_0 = a / (a+b)$$



Luftfahrtanwendung

Chem. Energie
(Brennwert H₂)



Wird der Wirkungsgrad auf 1,23 V bezogen, ist das Produktwasser gasförmig

Übersicht der Relevanten Zustandsgrößen

Limitierende Faktoren:

- Mögliche Wärmeabfuhr
- Geringer Umgebungsdruck

Systemische Zustandsgrößen

1. El. Strom / Stromdichte
2. El. Spannung / Zellspannung

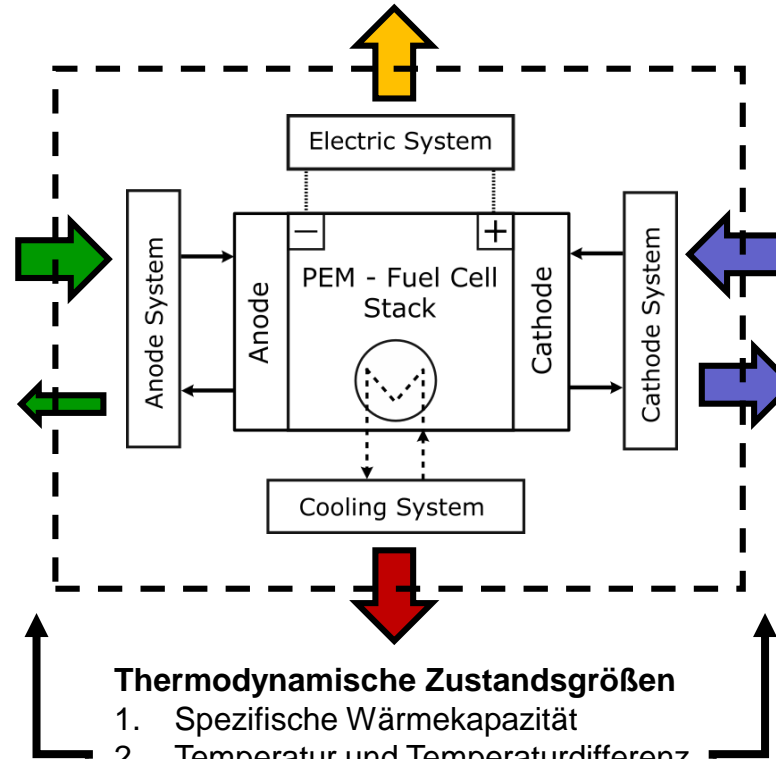
Systemantwort

Thermodynamische Zustandsgrößen

1. Gaszusammensetzung (H₂, H₂O, N₂,...)
2. Temperatur
3. Druck
4. Massenstrom (Überschuss)

$$rH = \frac{p_{H_2O(G)}}{p_{sat}}$$

$p_{H_2O(G)}$: Wasserdampfpartialdruck [Pa]
 p_{sat} : Sättigungsdampfdruck [Pa]



Thermodynamische Zustandsgrößen

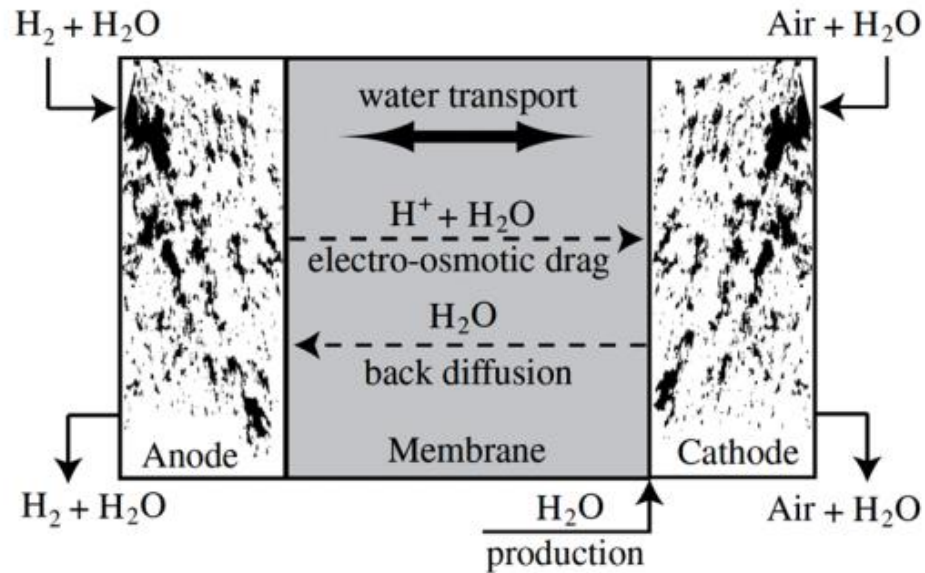
1. Gaszusammensetzung (N₂, O₂, H₂O, ...)
2. Temperatur
3. Druck
4. Massenstrom (Überschuss)

$$rH = \frac{p_{H_2O(G)}}{p_{sat}}$$

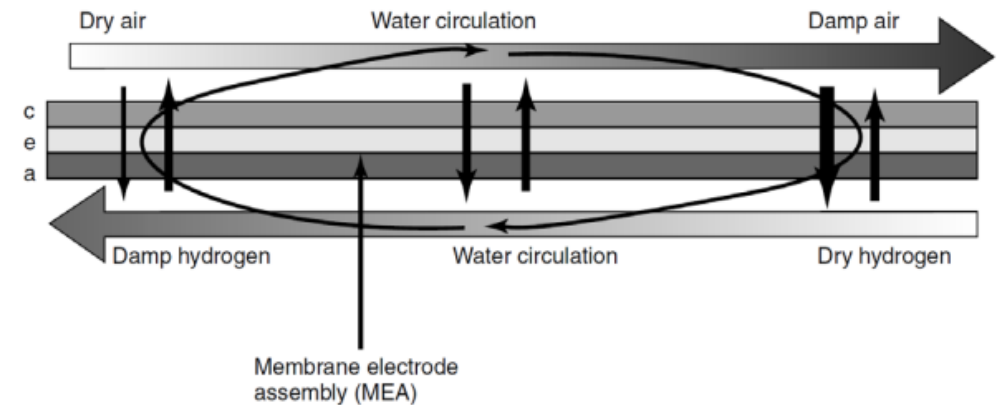
Thermodynamische Zustandsgrößen

1. Spezifische Wärmekapazität
2. Temperatur und Temperaturdifferenz
3. Druck und Druckverlust
4. Massenstrom

Wassertransportprozesse in einer PEM-Brennstoffzelle



→ Die Gasauslässe müssen unten sein, um Produktwasser abzuführen

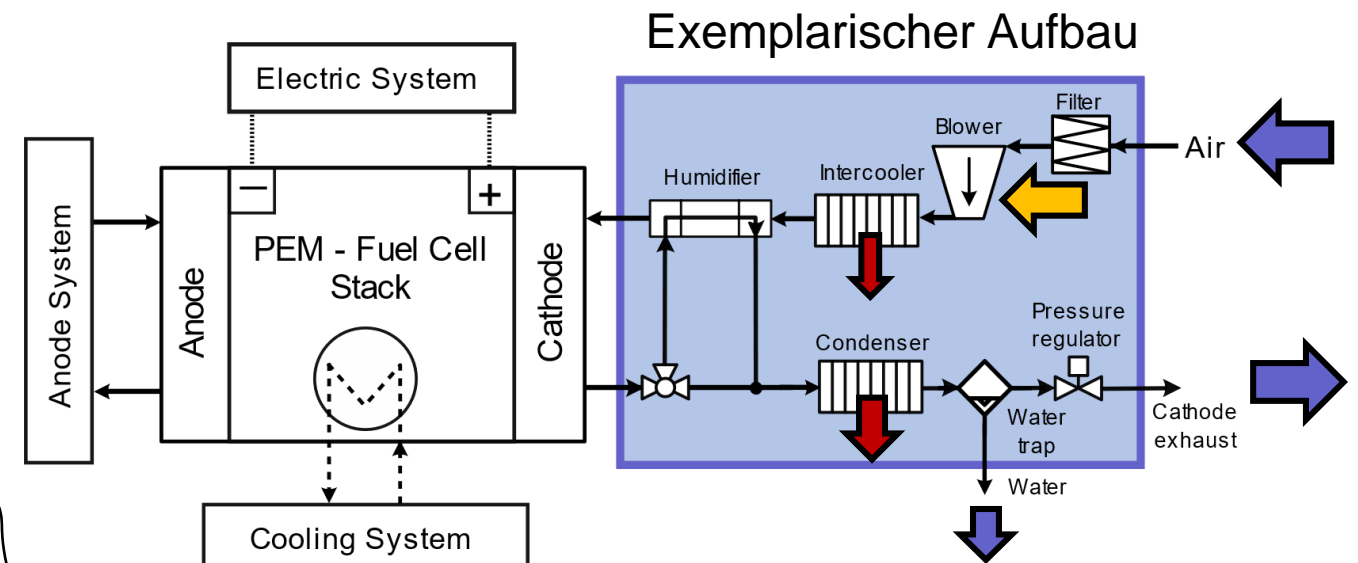


→ Die Eduktgase sollten für eine homogene Feuchteverteilung im Gegenstrom geführt werden

Funktionen und Technische Anforderungen des Feuchtemanagements eines Brennstoffzellensystems

- **Effizienzsteigerung durch Regulieren von:**
 - Druck (Druckverluste vor dem Stack minimieren!)
 - Temperatur
 - Wasserdampfanteil
 - Massenstrom (Überschuss der Eduktgase)
- **Maximieren der Betriebstemperatur**
 - Befeuchtung des Eingangsgases
 - Druckaufladung
- **Maximieren der Lebensdauer**
 - „Dry out“ der Zellmembranen verhindern
 - „Flooding“ / Kondensation im Stack vermeiden
- **Kosten und Komplexität reduzieren**
- **Leistungs- /Energiedichte steigern**
- ...

Erreichen einer mögl. homogenen Feuchteverteilung im Stack



→ **Das zugeführte, feuchte Kathodengas sollte nie wärmer sein als die Betriebstemperatur des Stacks**

Parametrische Zusammenhänge der rel. Feuchte

Kathodeneingang

$$\dot{n}_{\text{H}_2\text{O}(\text{v})}^{\text{cath.in}} = \frac{\frac{I \cdot Z \cdot \lambda_{\text{O}_2}}{x_{\text{O}_2}^{\text{cath.in(dry)}} \cdot 4 \cdot F}}{\frac{p_{\text{total}}^{\text{cath.in}}}{rH^{\text{cath.in}} \cdot p_{\text{sat}}^{\text{cath.in}}(T^{\text{cath.in}})} - 1}$$

Kathodenausgang

$$rH^{\text{cath.out}} = \frac{p_{\text{total}}^{\text{cath.out}} \cdot \left(\frac{2 + \frac{\lambda_{\text{O}_2}}{x_{\text{O}_2}^{\text{cath.in(dry)}}} \cdot \psi}{1 + \frac{\lambda_{\text{O}_2}}{x_{\text{O}_2}^{\text{cath.in(dry)}}} \cdot (\psi + 1)} \right)}{p_{\text{sat}}^{\text{cath.out}}(T^{\text{cath.out}})}$$

Annahme:

Keine Diffusionsprozesse durch die Membran

F	: Faraday-Konstante = 96485,34 [C · mol ⁻¹]
I	: Elektrischer Strom [A]
\dot{n}_i	: Stoffmengenstrom [mol · s ⁻¹]
p	: Druck [Pa]
p_{sat}	: Sättigungsdampfdruck [Pa]
rH	: Relative Feuchtigkeit
T	: Temperatur
x_i	: Stoffmengenanteil
Z	: Zellanzahl des Stacks
λ_i	: Überschussverhältnis

T_{BZ}	↑	→	$rF^{\text{Kath. aus}}$	↓
$p^{\text{Kath. aus}}$	↑	→	$rF^{\text{Kath. aus}}$	↑
$x_{\text{O}_2}^{\text{Kath.ein}}$	↑	→	$rF^{\text{Kath. aus}}$	↑
$\lambda_{\text{O}_2}^{\text{Kath.ein}}$	↑	→	$rF^{\text{Kath. aus}}$	↓

$$\text{Mit: } \psi = \frac{p_{\text{sat}}^{\text{cath.in}}(T^{\text{cath.in}}) \cdot rH^{\text{cath.in}}}{(p_{\text{all}}^{\text{cath.in}} - p_{\text{sat}}^{\text{cath.in}}(T^{\text{cath.in}})) \cdot rH^{\text{cath.in}}}$$

Topologievergleich für die Feuchteregulierung

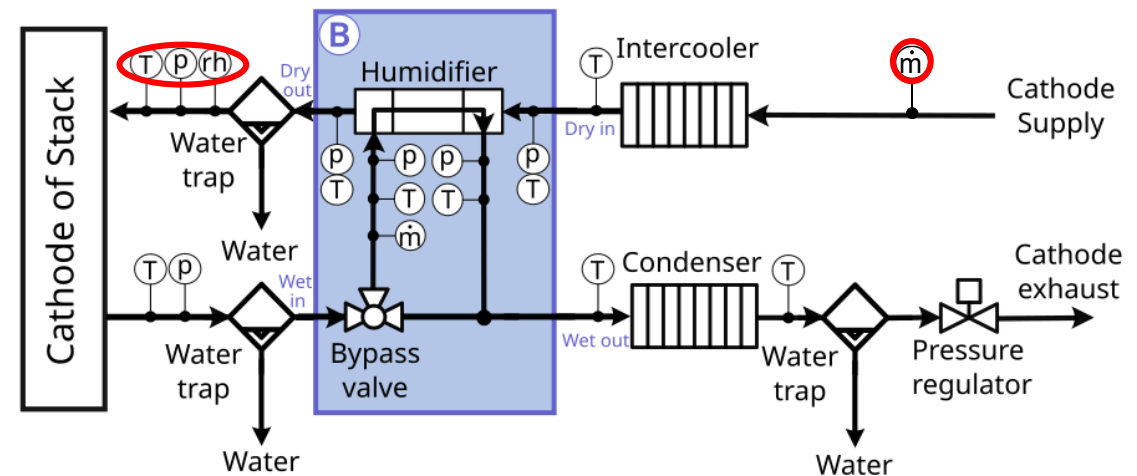
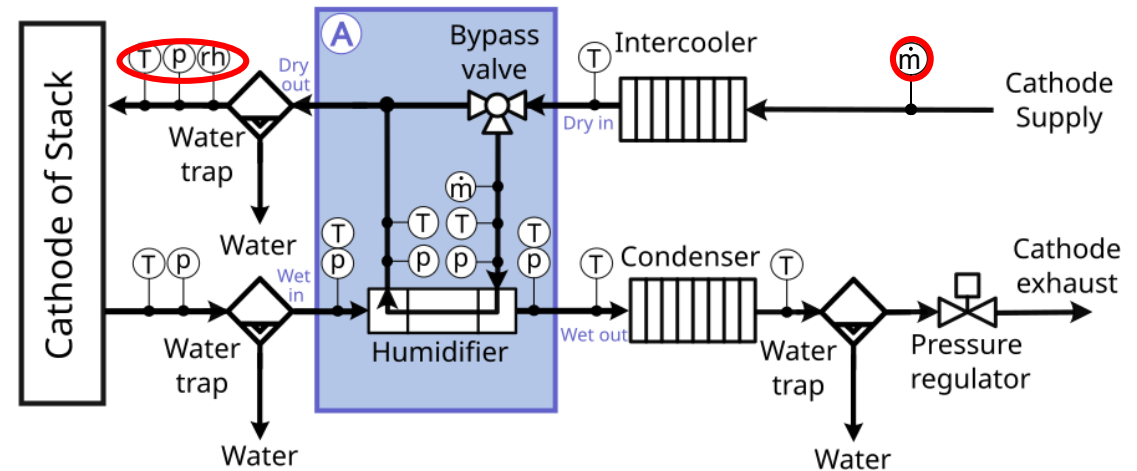
- **4 Stellglieder für 4 Regelgrößen**
 Pressure Regulator → Druck
 Intercooler → Temperatur
 Bypass Ventil → Relative Feuchtigkeit
 Mass Flow Ctrlr. → Massenstrom

▪ Topologie A

Dynamischere Regelung der Feuchte
 Trockenes Gas am Kathodeneingang mögl.
 Kaltstart-Konditionierung
 Reduzierter Druckverlust vor dem Stack
 Trockenes Gas für Bypass
 Messgenauigkeit
 Korrosion
 Taupunktüberschreitung mögl.

▪ Topologie B

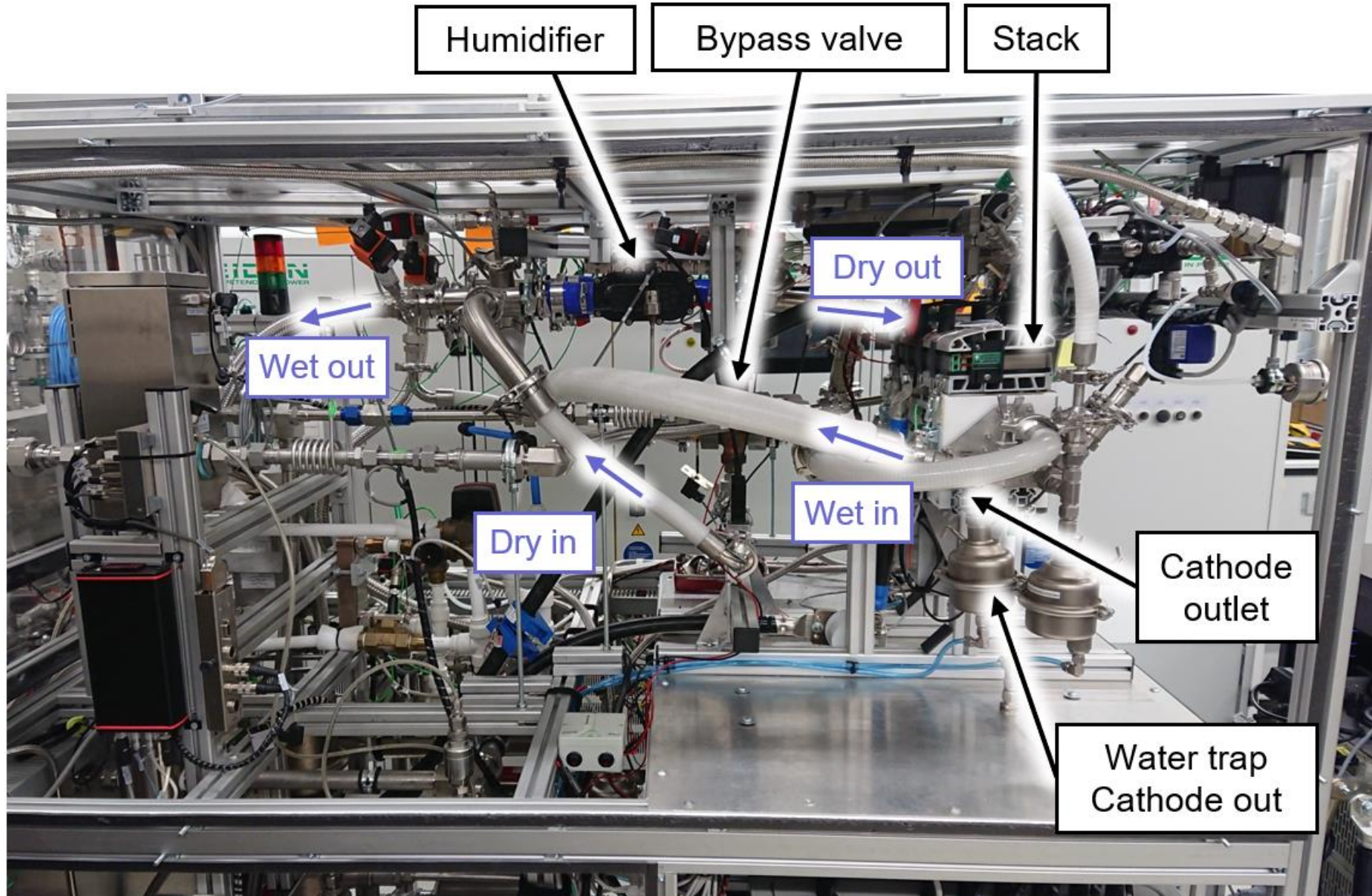
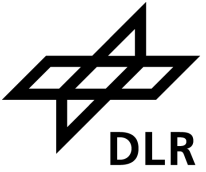
Stabilere Regelung der Feuchte



Sensor legend

(P) Pressure	(RPM) Rotation per minute
(m-dot) Mass flow	(T) Temperature
(P) El. Power	
(rh) Relative humidity	

System Setup



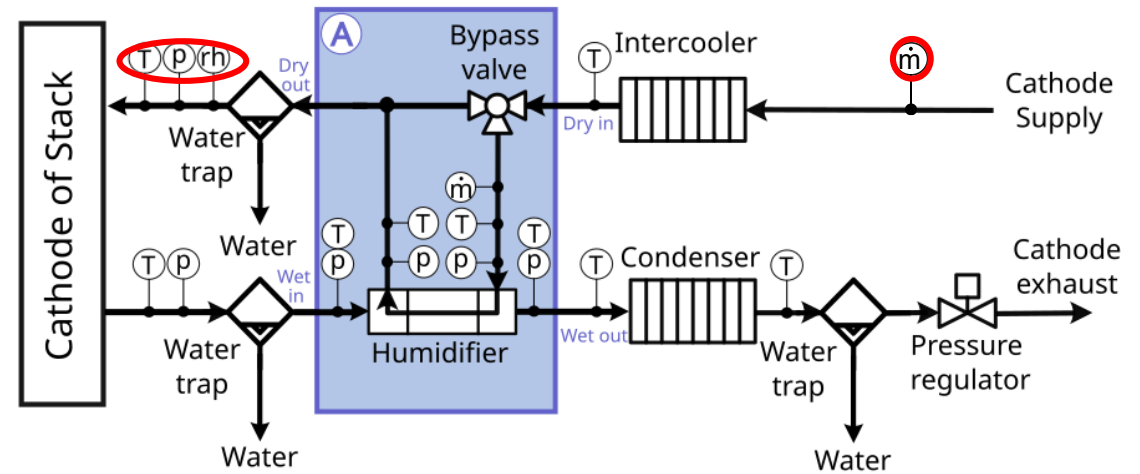
Befeuchter (*Fumatech-H10N*)



Versuchsplanung



- Konstante Stromdichte von 1 A/cm^2
- Betriebsgrößen nach Stack-Datenblatt (PowerCell S3 Short-Stack, 6 kW)
- Separate Variation der 4 Stellgrößen



act_rh

act_T

act_p

act_Vdot

act_Uavg

set_Bypass

set_Intercooler

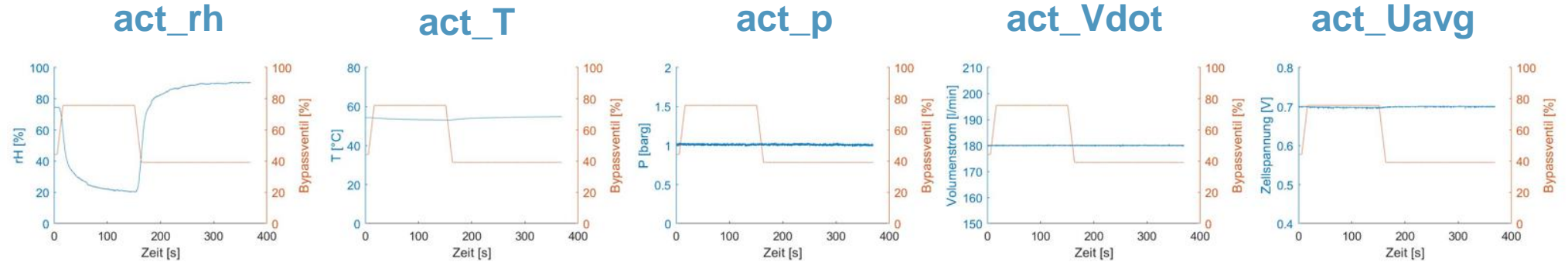
set_PRV

set_MFC

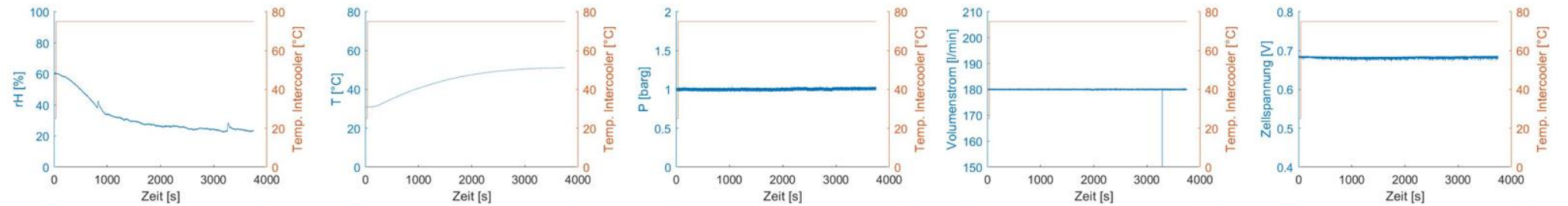
Exemplarische Messergebnisse (Kathodeneingang)



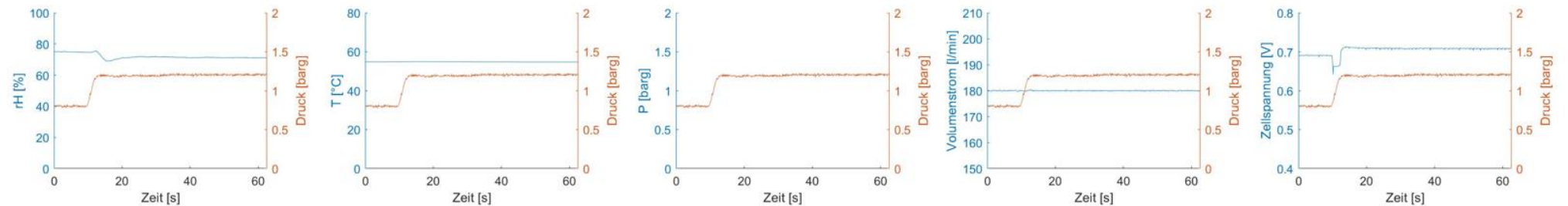
set_Bypass



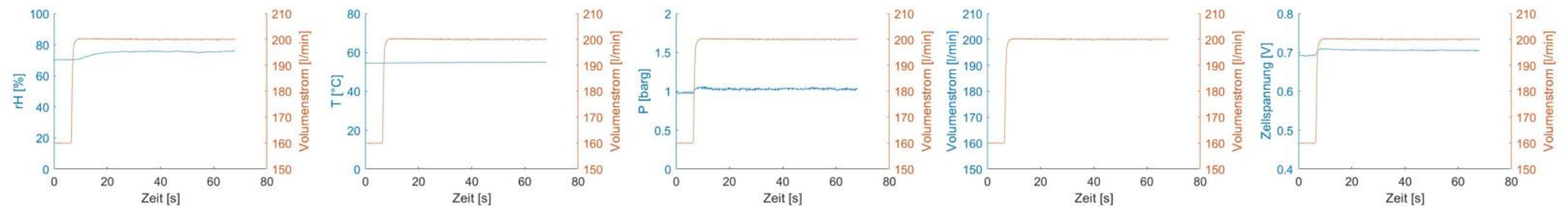
set_Intercooler



set_PRV



set_Vdot



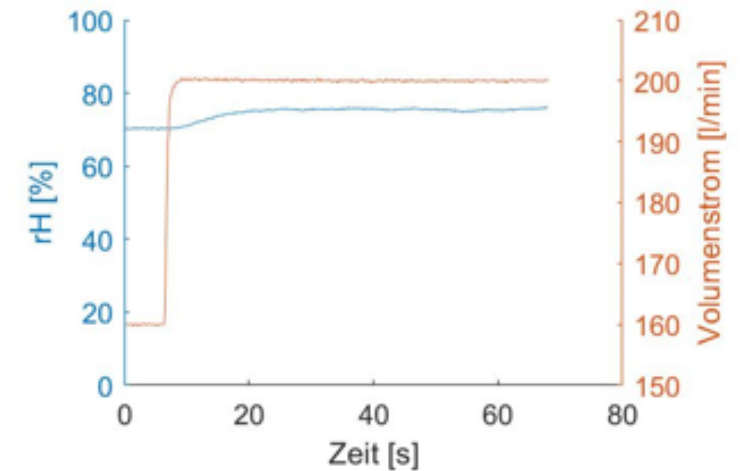
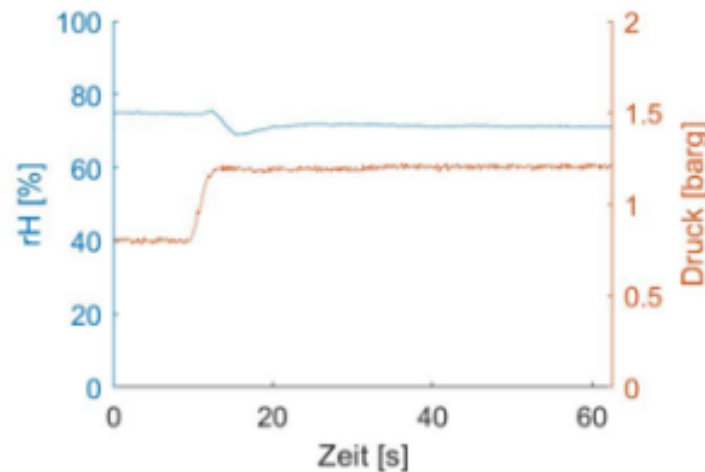
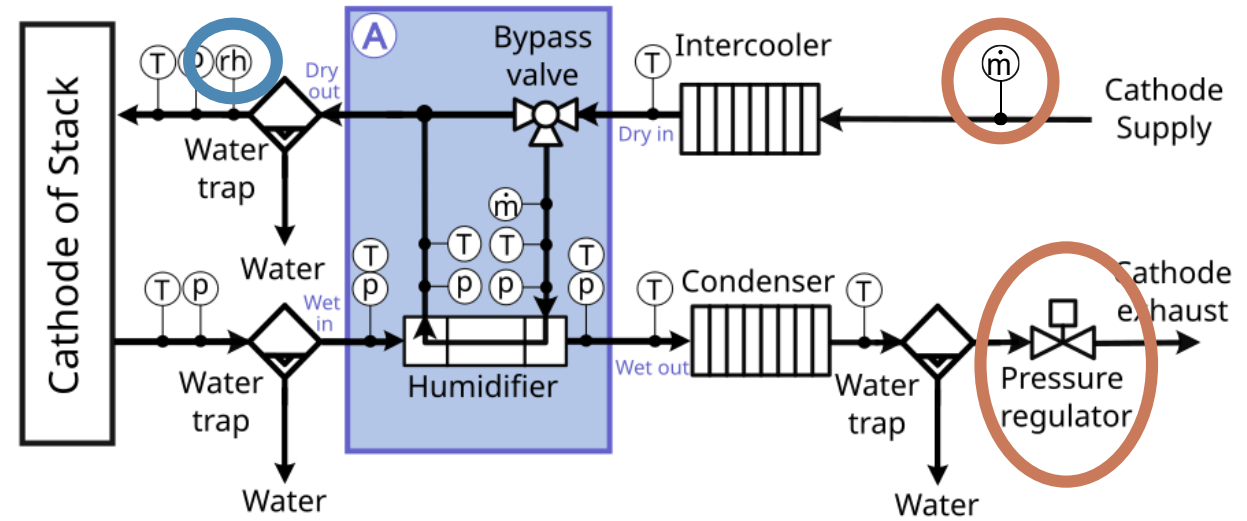
Erkenntnisse und Hypothesen zum Systemverhalten

Bei einer Steigerung des Druckes sinkt die Feuchte am Eingang, da

- mehr flüssiges Kondensat vor dem Befeuchter abgeschieden wird
- die Wasseraufnahmefähigkeit der Zuluft reduziert wird
- sich das Volumenstromverhältnis zum Bypass verändert

Bei einer Steigerung des Vol.stroms steigt die Feuchte am Eingang, da

- mehr gasförmiges Produktwasser des Stacks in den Befeuchter gelangt



Zusammenfassung

- Gasauslässe müssen unten sein → sonst wird der Stack geflutet
- Gaszufuhr im Gegenstrom → fördert eine homogene Feuchteverteilung im Stack
- Dry out und Flooding müssen verhindert werden
 - entsprechende Regulierung der Feuchte ist notwendig
 - Feuchtes Eingangsgas sollte nicht wärmer sein als der Stack

Um die Betriebstemperatur eines Stacks zu maximieren, muss der Stack befeuchtet werden

Druckverluste vor dem Kathodeneingang müssen minimiert werden

Die Feuchte des Systems hängt von 4 Zustandsgrößen ab und kann entsprechend reguliert werden. (Kompensationen sind möglich)

$T^{\text{Kath. ein}}$	↑	→	$rF^{\text{Kath. ein}}$	↓
$p^{\text{Kath. ein}}$	↑	→	$rF^{\text{Kath. ein}}$	↓
$x_{\text{O}_2}^{\text{Kath. ein}}$	↑	→	$rF^{\text{Kath. ein}}$	↓
$\lambda_{\text{O}_2}^{\text{Kath. ein}}$	↑	→	$rF^{\text{Kath. ein}}$	↑

T_{BZ}	↑	→	$rF^{\text{Kath. aus}}$	↓
$p^{\text{Kath. aus}}$	↑	→	$rF^{\text{Kath. aus}}$	↑
$x_{\text{O}_2}^{\text{Kath. ein}}$	↑	→	$rF^{\text{Kath. aus}}$	↑
$\lambda_{\text{O}_2}^{\text{Kath. ein}}$	↑	→	$rF^{\text{Kath. aus}}$	↓

Aussagen müssen weiter validiert werden

Fragen?

Projekt BETA, Funding Code: 03B10704



Nationales Innovationsprogramm
Wasserstoff- und
Brennstoffzellentechnologie

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

Koordiniert durch:



Nationale Organisation Wasserstoff-
und Brennstoffzellentechnologie



Projekträger Jülich
Forschungszentrum Jülich

Contact:

Florian Becker (PL / DLR- TT)

Florian.Becker@dlr.de

Christoph Gentner

Christoph.Gentner@dlr.de

