

Matlab Expo 2016 Deutschland

Modellierung und Automation von multifunktionalen Brennstoffzellensystemen

Robert Doering, M.Sc.
10.5.2016, München





Wirtschaftliche- & Umweltaspekte

- Flight Path 2050
 - 75% CO₂ Reduktion
 - 90% NO_x Reduktion
 - 65% Noise Reduktion
 - Emissionsfreies Taxiing
- Emissionshandel
- Flughafenengebühren



Brennstoffzelle

- Emissionsfrei
- Hoher Wirkungsgrad
- Geringes Leistungsgewicht

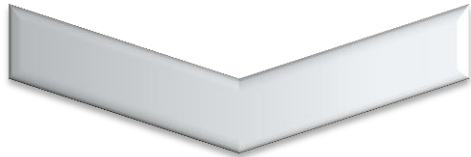
Integrationskonzepte

- Fuel Cell in Cabine
- Green Taxiing
- Multifunktionale Integration



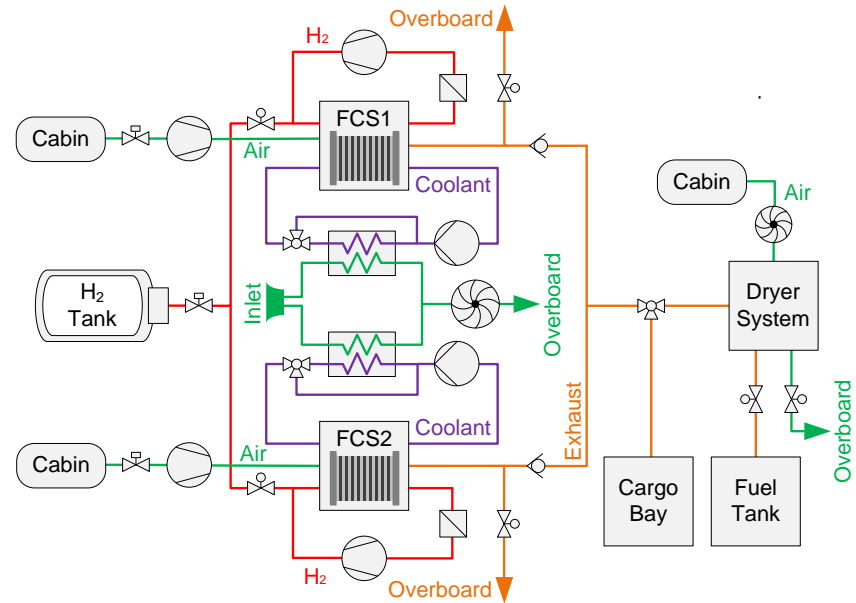
Multifunktionale Integration

- Erzeugung elektrischer Leistung
- Tankinertisierung
- Feuerunterdrückung
- Brauchwassergewinnung



Herausforderungen

- Komplexe Systemarchitekturen
- Betriebsumfeld / Umweltbedingungen
- Betriebszustände
 - Großer Temperaturbereich (~ -50 – 100°C)
 - Variable Fluidzusammensetzung (z.B. x_{iO_2})
 - Phasenwechsel
- Systemautomation & Regelung



Modell

- Bewe
- Frühz
- Betrie
- Evalu
- Auton



ng zur...

pten
ritischer
und

MFFCS Komponentenbibliothek

- Drei Detaillierungsgrade
- Implementiert in Matlab Simscape
 - Physikalische Modellierungssprache
 - „balanced-domain-approach“
 - Flexible, intuitive, textuelle Beschreibung von Komponentenverhalten



Domänen

- Kühlmittel-Domäne

Sicherstellung eines numerisch robusten Gesamtsystemverhalten ist nicht trivial

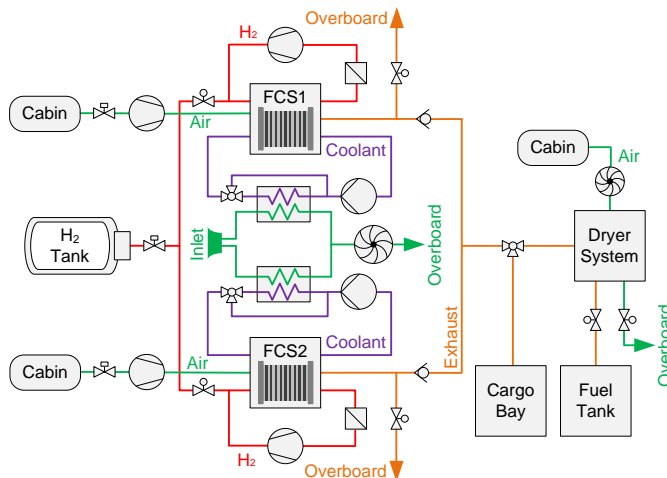
- 6 physikalische Domänen

- Gesamtmassenstrom, Einzelmassenströme, Enthalpiestrom
- Druck, Massenanteile, Temperatur
- Stoffwerte = $f(T)$
- Phasenwechsel Wasser

▪ ...

Ursachen numerische Komplexität

- Großes Gleichungssystem
- Umfangreiche Wechselwirkungen
- Steifes Gleichungssystem
- Implizite Zusammenhänge
 - Architektur bedingt
 - Physikalisch bedingt
- Unstetiges Verhalten (z.B. Strömungssituation)
- DAE-System mit $\text{Index} > 1$

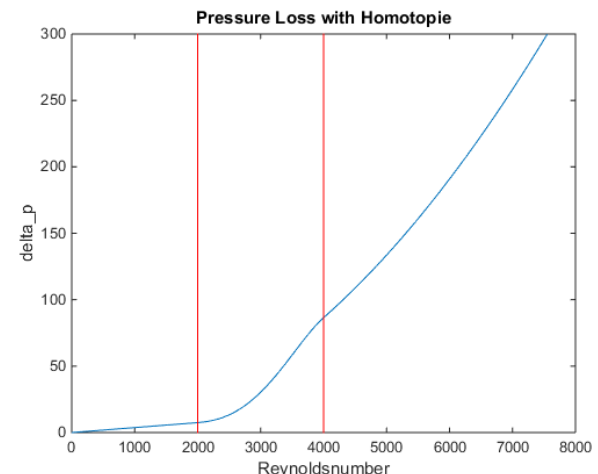


Modellinitialisierung

- Potentialdifferenzfreie Initialisierung
 - Keine initialen Flüsse
- Externe Berechnung aller Initialwerte

Unstetigkeiten

- Homotopie-Verfahren
- C²-Funktionen für algebraische Randbedingungen



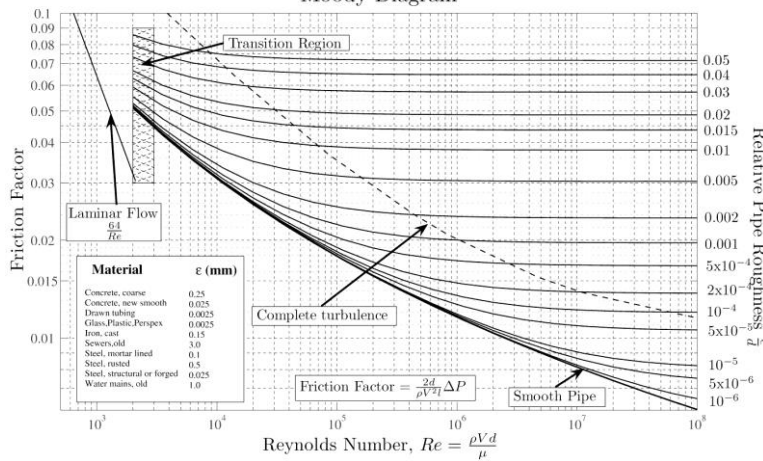
Druckverlust in Rohrströmungen

- Laminare vs. Turbulente Strömungen:

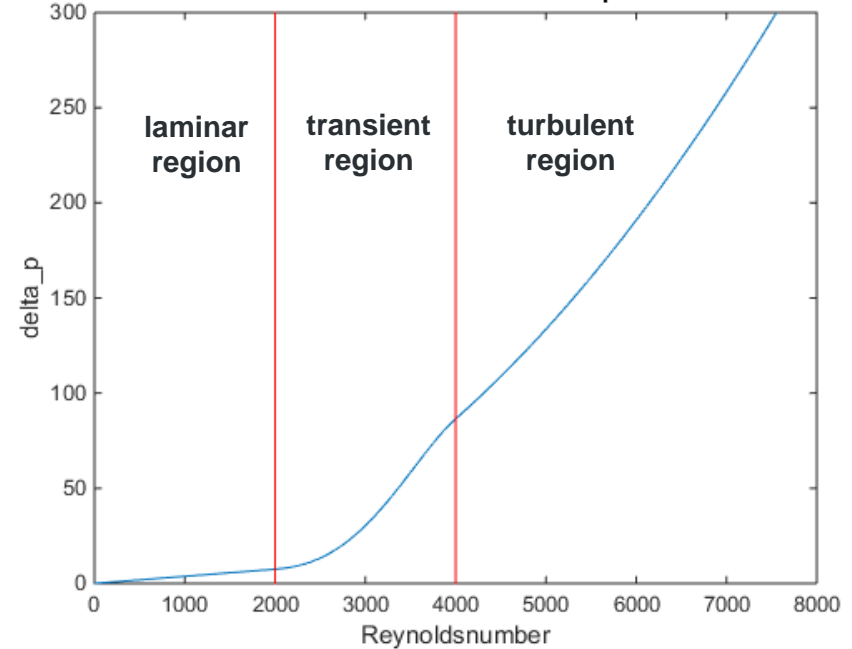
$$\Delta p_{lam} = \dot{m}_{gas} \cdot \xi_{lam} \cdot k_1$$

$$\Delta p_{turb} = \dot{m}_{gas}^2 \cdot \xi_{turb} \cdot k_2$$

Moody Diagram



Pressure Loss with Homotopie



$$h'(Re) = \frac{Re - Re_{lam,trans}}{Re_{turb,trans} - Re_{lam,trans}}$$

$$h(Re) = 3 \cdot h'(Re)^2 - 2 \cdot h'(Re)^3$$

Homotopie-Verfahren

- Stetige Deformation zwischen zwei Abbildungen:

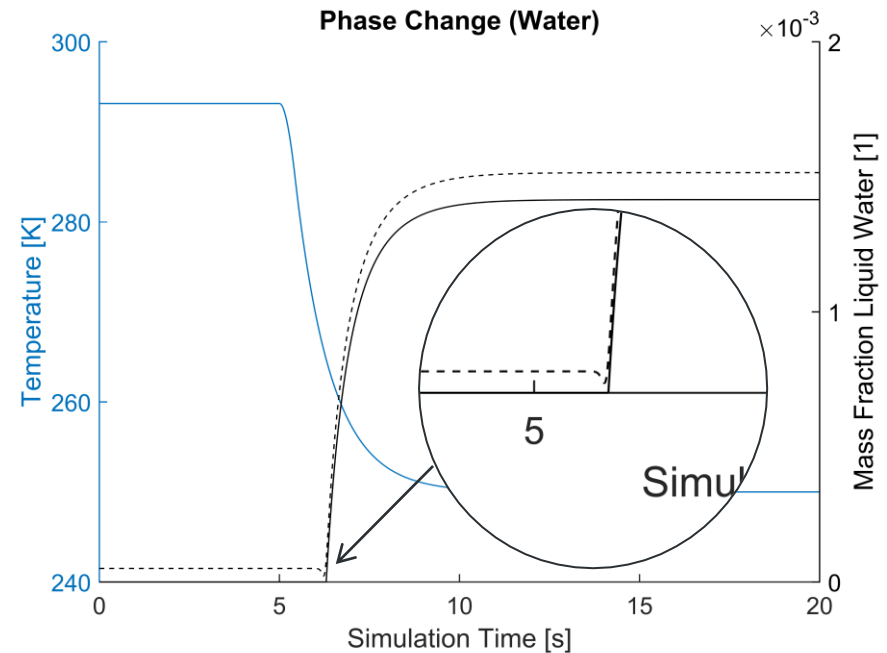
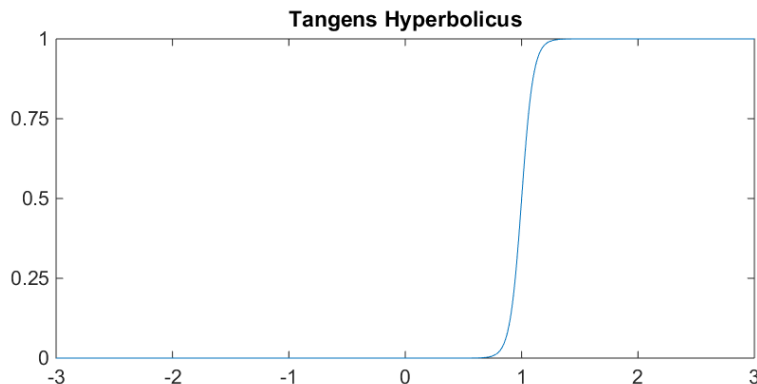
$$\Delta p = (1 - h(Re)) \cdot \Delta p_{lam} + h(Re) \cdot \Delta p_{turb}$$
- Hier: Stetig differenzierbare Deformation
 ➤ C²-differenzierbarer Transitionsbereich

Phasenwechsel

- Sättigungspartialdruck über Wagner-Ambrose-Gleichung ($x_{iH_2O,sat} = f(T,p,x_i)$)
- Zunächst: $x_{iH_2O} > x_{iH_2O,sat}$
 $x_{iH_2O,liq} = 0 \vee x_{iH_2O,liq} = x_{iH_2O} - x_{iH_2O,sat}$
- kein stetig differenzierbarer Übergang
- klassisches Homotopieverfahren ineffektiv



Existiert eine Funktion, welche stetig differenzierbar von 0 auf 1 wächst?

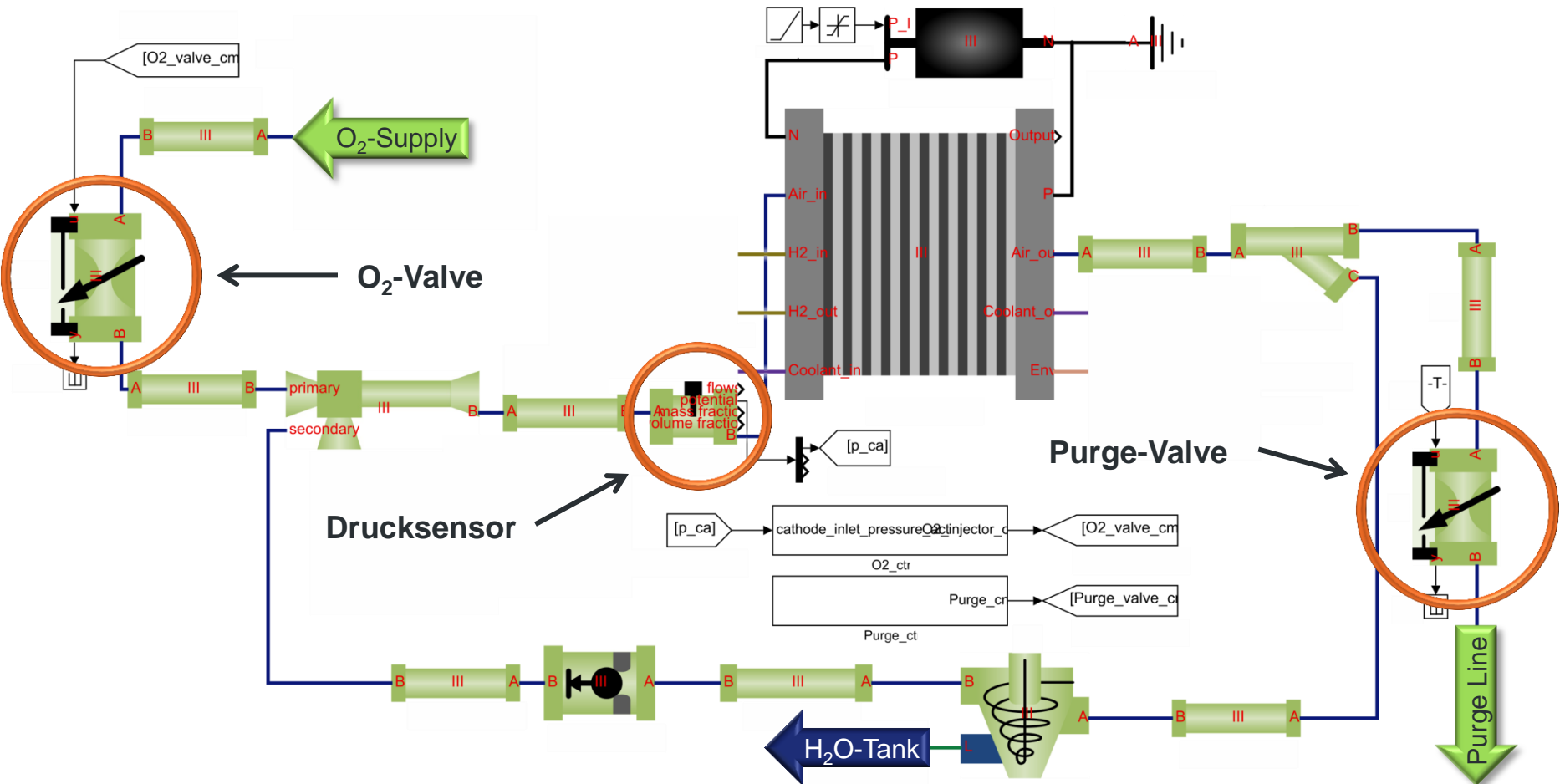


Fallunterscheidungsfreie Homotopie

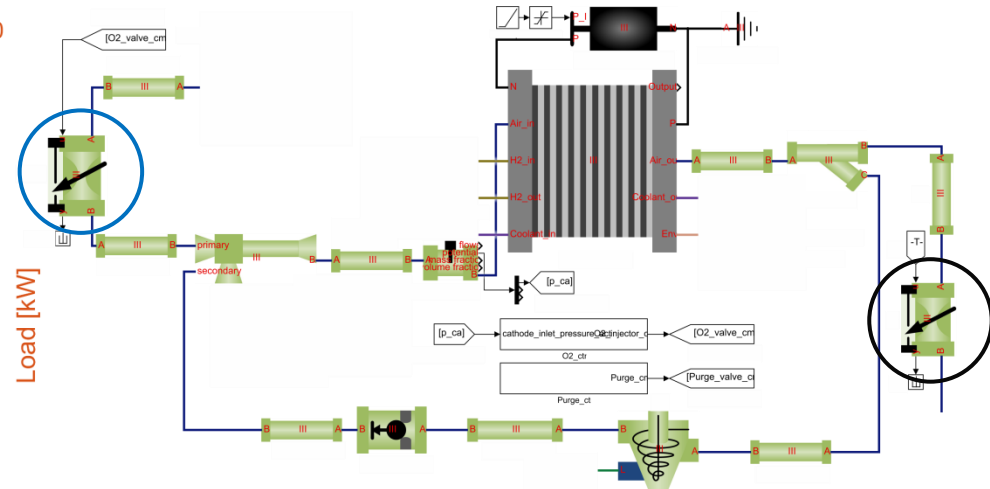
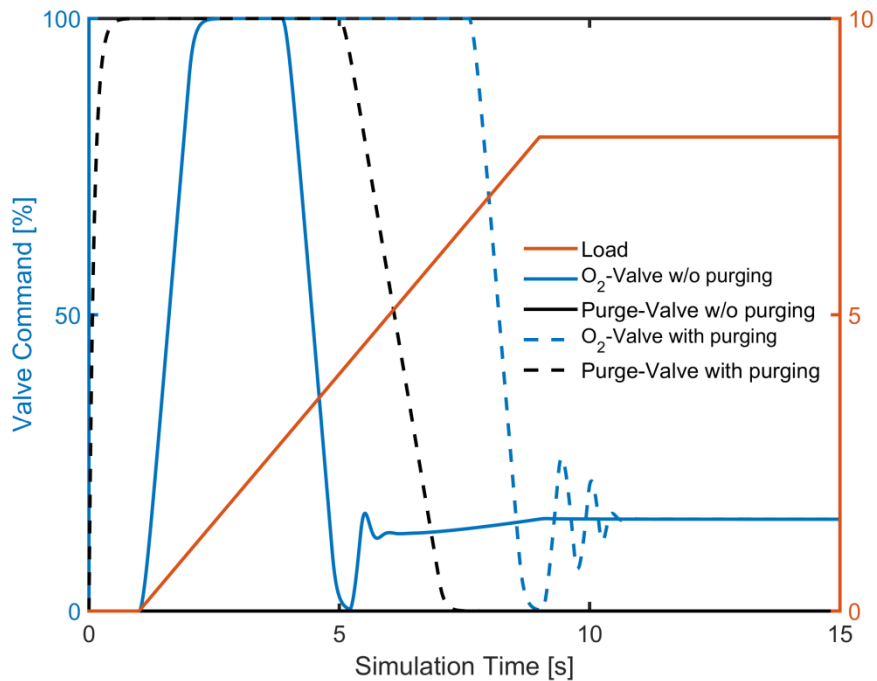
- Tangens Hyperbolicus als Homotopieoperator
- $x_{iH_2O,liq} = (x_{iH_2O} - x_{iH_2O,sat}) \cdot h(x_{iH_2O}, x_{iH_2O,sat})$
- „Unterschwinger“ erfordert initialen Offset

O₂-Betrieb Brennstoffzelle

- Keine (Bleed)Luft verfügbar
- Höherer Wirkungsgrad
- Leichtere Systemlösung

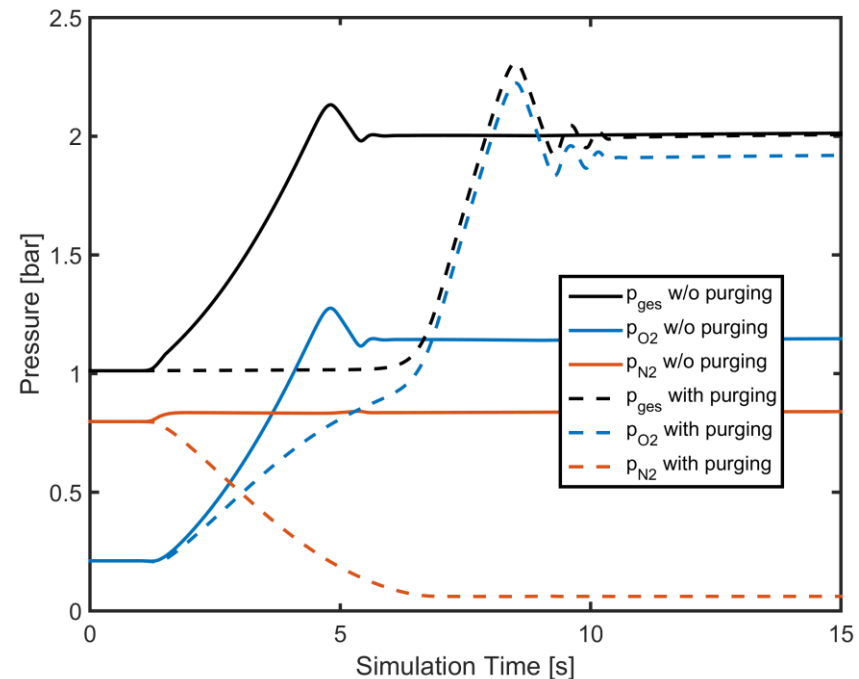


Fallbeispiel – O₂-Rezirkulation II



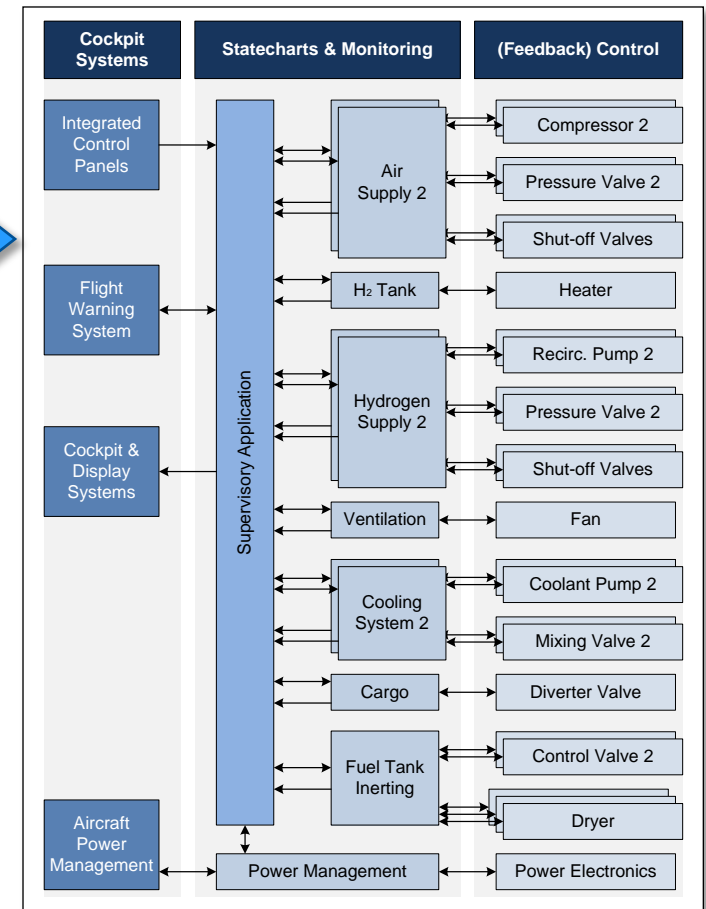
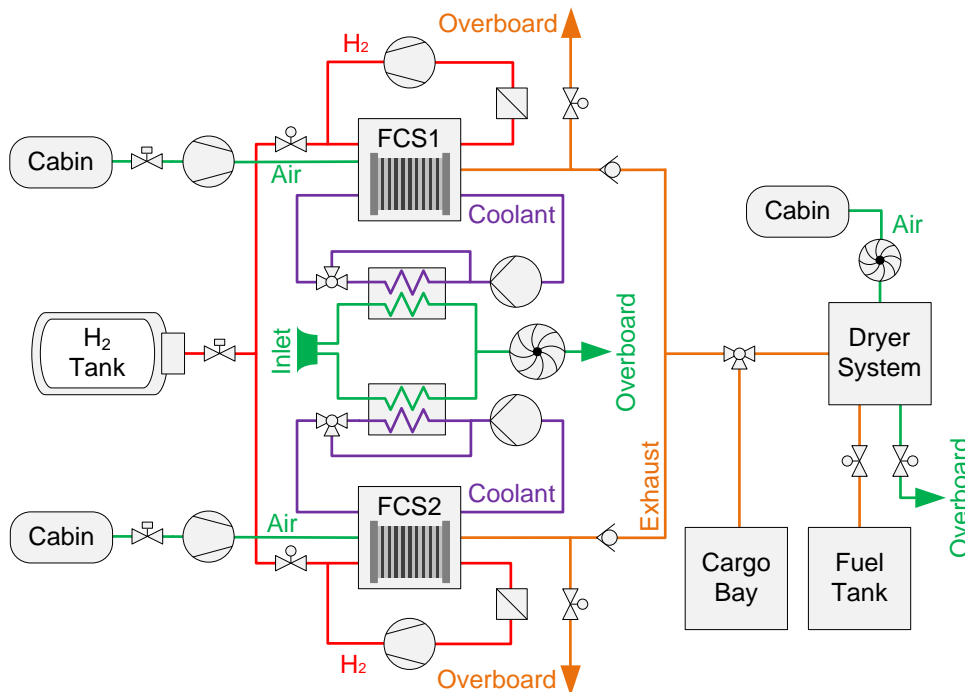
Anlaufverhalten im O₂-Betrieb

- Initiale Menge N₂ im ReCirc-Pfad vorhanden
- Erreichbarer O₂-Partialdruck bleibt limitiert
- Betriebsstrategie zum „Spülen“ erforderlich
- Durch „Purgen“ kann N₂-Partialdruck signifikant gesenkt werden



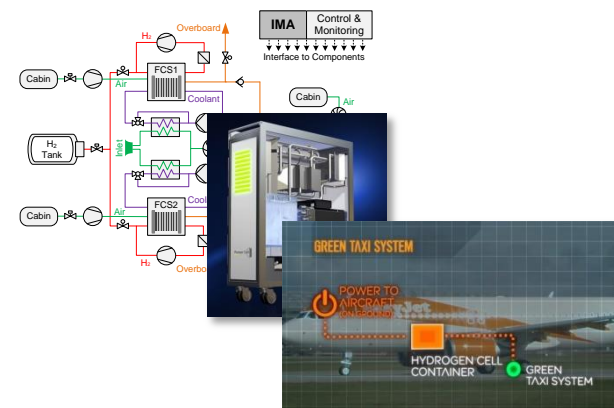
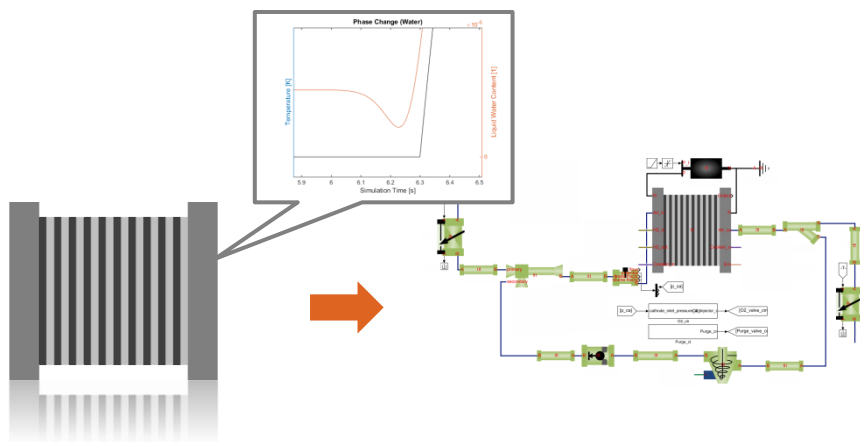
Hierarchisches Konzept

- Reglerauslegung mit Simulink®
- Automation mittels Stateflow®
- Interface zu Cockpit-Systemen



Brennstoffzelle in der Luftfahrt

- Ökologisches & ökonomisches Potential
- Verschiedene Integrationskonzepte
- Modellbasierte Entwicklung



Modellbildung

- Komponentenbibliothek
- Modellierungsstrategie

Automation & Regelung

- Erzeugung elektrischer Leistung
- Tankinertisierung
- Feuerunterdrückung
- Brauchwassergewinnung

