

... more than just fuel cells



Proton Power Systems plc Group

Modellierung & Simulation im Umfeld von PEM-Brennstoffzellen

am Beispiel der Reglersynthese der Kühlung

VDI Arbeitskreis Mechatronik

07.12.2011

Dr.-Ing. Markus Grötsch
Model-Based Design & Control

Proton Motor Fuel Cell GmbH
Benzstraße 7, D-82178 Puchheim

Tel: +49 (0)89 - 127 62 65 39
Fax: +49 (0)89 - 127 62 65 99
Email: m.groetsch@proton-motor.de

- Kurze Vorstellung
- Vorstellung von Proton Motor
- Mechatronik bei Proton Motor
- Reglersynthese Kühlkreis PEMFC-System
 - Modellierung Kühlkreis
 - Parameteridentifikation Modell
 - Reglerentwurf
 - Simulative Tests
- Übersicht möglicher Studien- & Masterarbeiten

Kurze Vorstellung



Proton Power Systems plc Group

1997-2002 Studium
Feinwerk- & Mikrotechnik /
Feingerätetechnik



2002-2005 Masterstudium
Mechatronik / Systemtheorie
& Regelungstechnik



2005-2009 Promotion
Modellbasierte Analyse und
Regelung von PEMFCs



2009-2010 Funktionsentwickler Ottomotoren



Seit 2010 Berechnungsingenieur & Funktionsentwickler



Proton Power Systems plc Group



- Kurze Vorstellung
- **Vorstellung von Proton Motor**
- Mechatronik bei Proton Motor
- Reglersynthese Kühlkreis PEMFC-System
 - Modellierung Kühlkreis
 - Parameteridentifikation Modell
 - Reglerentwurf
 - Simulative Tests
- Übersicht möglicher Studien- & Masterarbeiten



Proton Power Systems plc Group



Proton Power Systems plc Group

Gründung 1998
Brennstoffzellenentwicklung seit 1994
ca. 50 Mitarbeiter, Firmensitz Puchheim/München



Proton Power Systems PLC

Holding, gegründet 2006
An der Börse in London seit Okt. 2006
100% Gesellschafter von Proton Motor

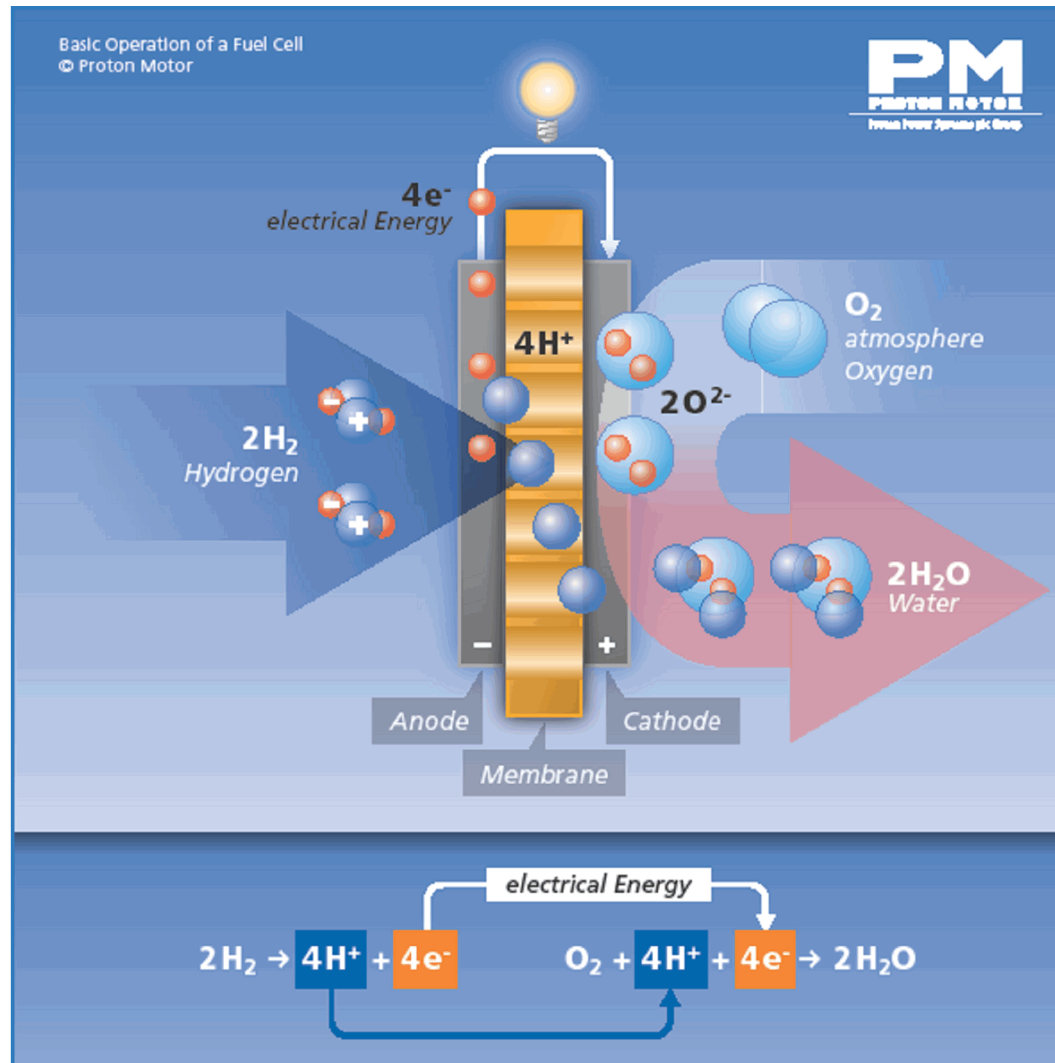


Wir bieten:
Brennstoffzellen-Hybridlösungen
für stationäre Stromerzeugung, maritime
und mobile Anwendungen

PEM-Brennstoffzelle: Funktionsprinzip



Proton Power Systems plc Group



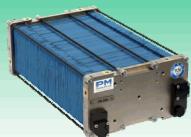
Vorteile:

- Direkte Umwandlung von chemischer in elektrische Energie
- Kein mechanischer Zwischenschritt
- Hoher Wirkungsgrad
- Leise & Wartungsarm
- Einzige Emission: H_2O
- Keine Emission von CO_2 , NO_x , CO , ...

Nachteile (noch):

- Kosten
- Froststartfähigkeit

Stacks



PM 200

Multifunktionales Stack Design
 ⇒ Ein Stack für stationäre,
 maritime und mobile
 Anwendungen

Vorbereitet zur OEM Integration



Stationär



PM Core 50

Modular skalierbar
 für hohen
 Leistungsbedarf
 (> 50 kW)

Vorbereitet zur OEM Integration



PM Module S5

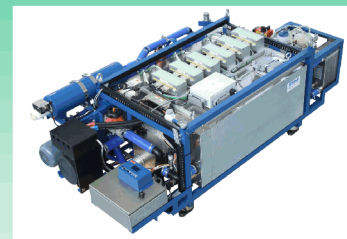
Modular skalierbar
 für Anwendungen
 < 50 kW



PM Cube

Schranklösung im
 Kit Design für
 Telekom, IT and
 industrielle
 Anwendungen

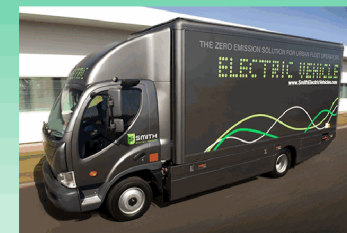
Maritim



PM Basic 50

GL-zertifiziertes,
 modular skalierbares
 System für hohe
 Leistungsanforderungen
 > 50 kW

Mobil



Range Extender

7 kW Brennstoffzellen-
 system (inklusive
 H₂-Speicherung) für
 mobile Anwendungen

Beispielanwendung: Maritim – ZEMSHIPS*



Proton Power Systems plc Group



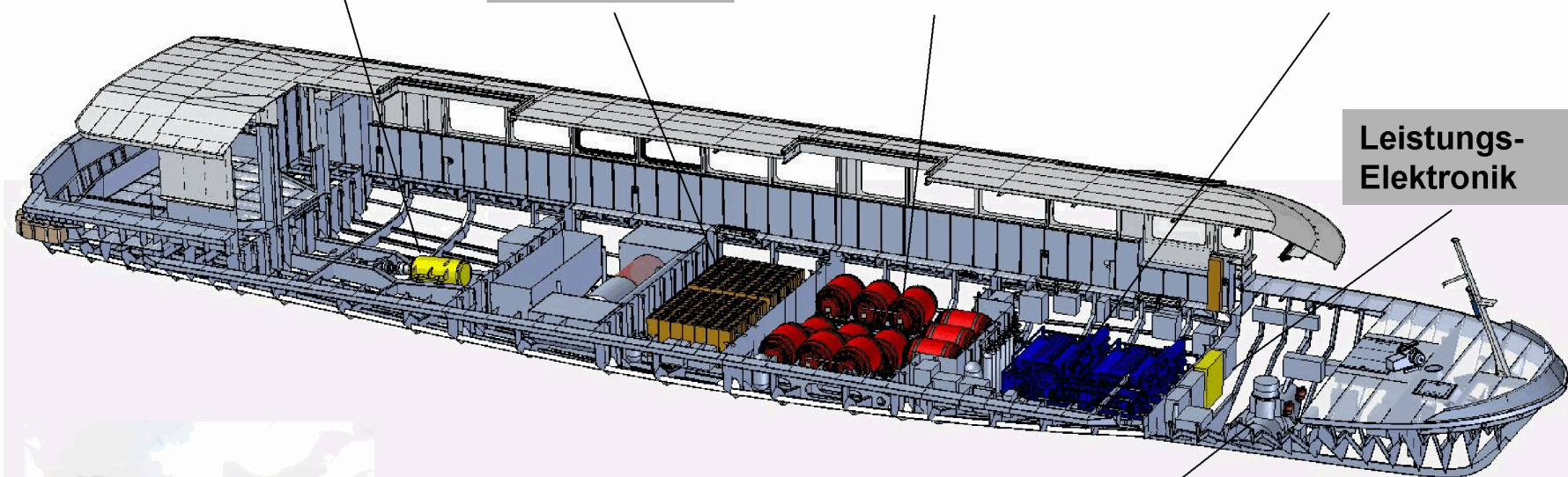
*Zero emission fuel cell ships

Antriebsmotor
100 kW

Pufferbatterie
Blei-Gel,
560 V, 360 Ah

12 Wasserstofftanks
350 bar,
Insgesamt 50 kg H₂

Brennstoffzellensystem
PM Basic A 50 maritime
48kW Spitzenleistung



- Ca. 100 Passagiere
- Einsatz auf der Binnenalster, Hamburg
- 2. Betriebsphase seit Mai 2010

Bugstrahlruder
20 kW

Beispielanwendung: Mobil - TriHyBus

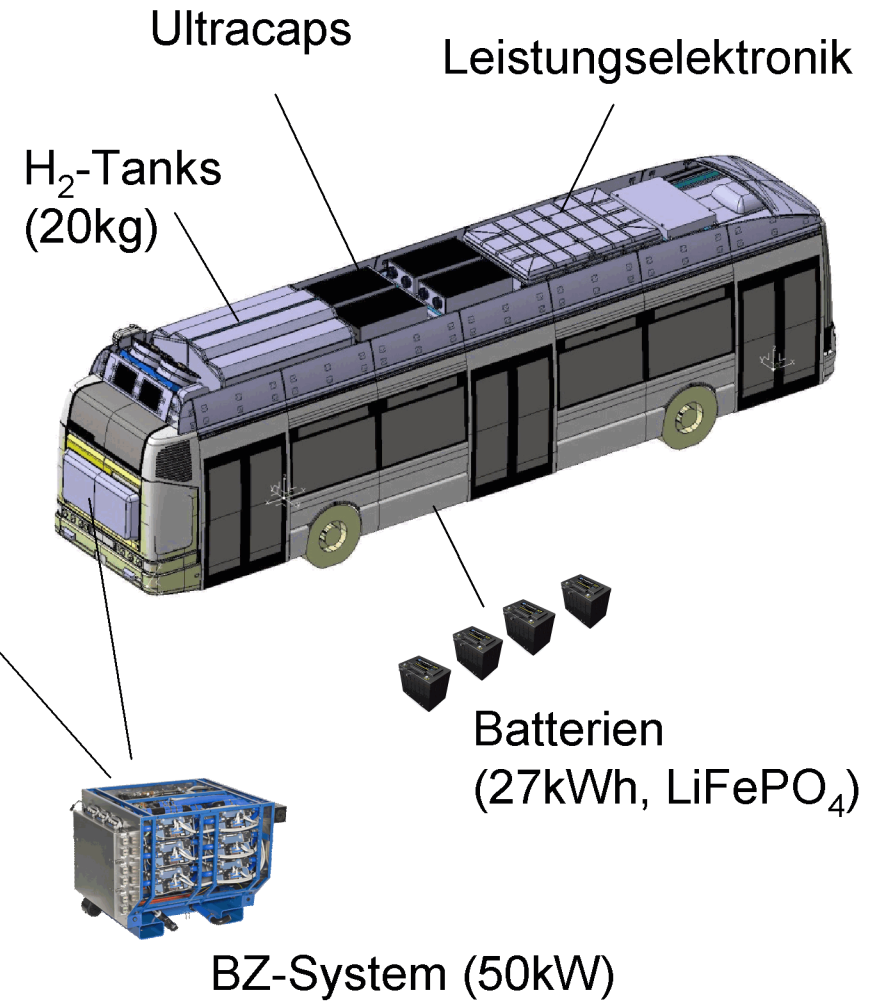


Proton Power Systems plc Group



Installiertes Brennstoffzellensystem
im Heck des TriHy Busses

- 12m / 18t Stadtbus,
- 45 Passagiere
- Reichweite > 250km
- Testbetrieb in Vorort von Prag



- Kurze Vorstellung
- Vorstellung von Proton Motor
- **Mechatronik bei Proton Motor**
- Reglersynthese Kühlkreis PEMFC-System
 - Modellierung Kühlkreis
 - Parameteridentifikation Modell
 - Reglerentwurf
 - Simulativer Test
- Übersicht möglicher Studien- & Masterarbeiten

➤ Entwicklung von BZ-Systemen

- Auslegungsrechnung Peripherie
 - Kühlung, H₂-Versorgung & Luftversorgung
 - Topologieentwurf & Komponentenspezifikation
- Funktionsentwicklung Peripherie
 - Reglersynthese Kühlkreis
 - Reglersynthese Gebläse, Kompressor / Drossel, Ladeluftkühler, ...
- Experimentelle Qualifizierung von Komponenten & Funktionen an Komponententestständen

➤ Entwicklung von Hybridsystemen

- Auslegung von Seriellen Hybridsystemen
 - PEMFC-System, DC/DC, Peak Power Sources, Inverter / E-Mot., ...
- Funktionsentwicklung Hybridsystem → Powermanagement

➤ Entwicklung von BZ-Systemen

- Auslegungsrechnung Peripherie
 - Kühlung, H₂-Versorgung & Luftversorgung
 - Topologieentwurf & Komponentenspezifikation
- Funktionsentwicklung Peripherie
 - Reglersynthese Kühlkreis
 - Reglersynthese Gebläse, Kompressor / Drossel, LLK, ...
- Experimentelle Qualifizierung von Komponenten & Funktionen an Komponententestständen

➤ Entwicklung von Hybridsystemen

- Auslegung von Seriellen Hybridsystemen
 - PEMFC-System, DC/DC, Peak Power Sources, Inverter / E-Mot., ...
- Funktionsentwicklung Hybridsystem → Powermanagement

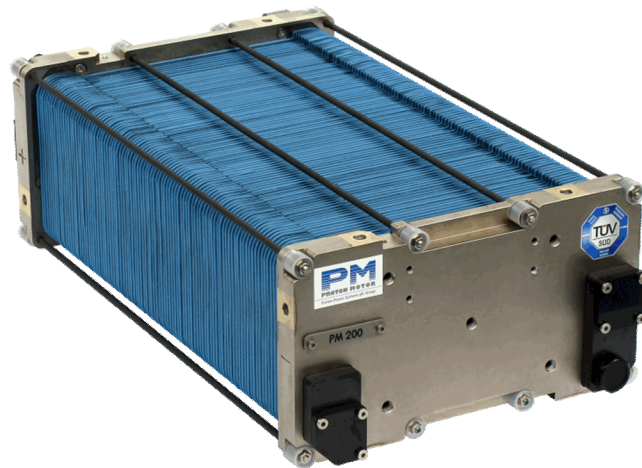
- Kurze Vorstellung
- Vorstellung von Proton Motor
- Mechatronik bei Proton Motor
- **Reglersynthese Kühlkreis PEMFC-System**
 - Modellierung Kühlkreis
 - Parameteridentifikation Modell
 - Reglerentwurf
 - Simulative Tests
- Übersicht möglicher Studien- & Masterarbeiten

Reglersynthese Kühlung: Motivation

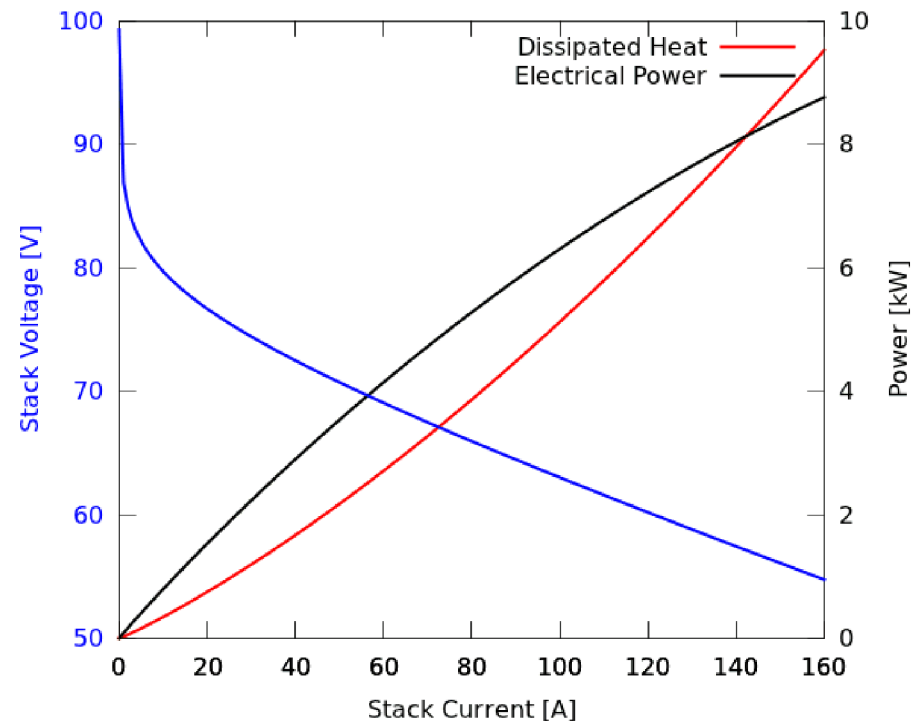


Proton Power Systems plc Group

- Primäraufgabe: Erzeugung elektrischer Energie
- Wärmeentstehung durch Reaktion & Ohmsche Verluste
- Neben H₂- & Luft-Versorgung daher notwendig: Kühlung
- Stacktechnologie PM200:



TÜV-zertifiziert nach EEC 62282 -2
→ industrielle Standardkomponente
für Brennstoffzellensysteme

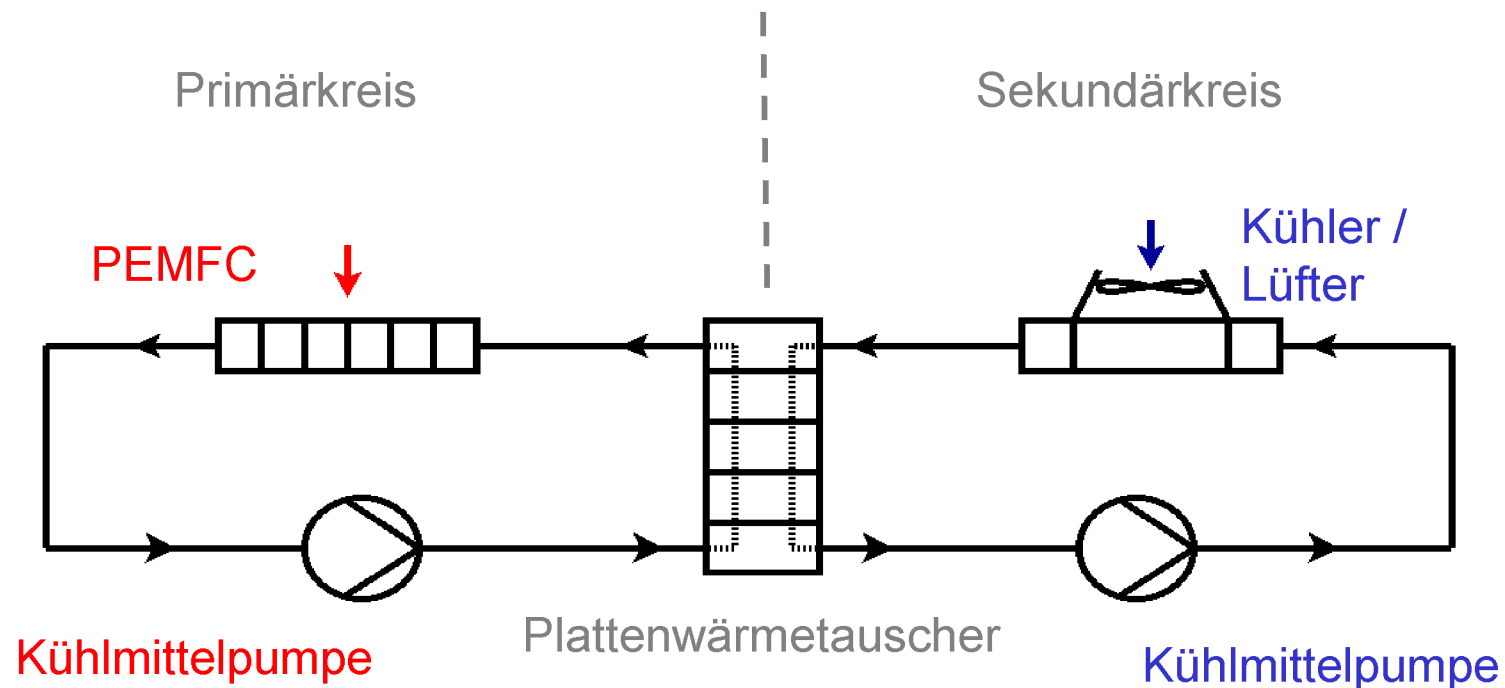


→ Kühlleistung bis zu ca. 9kW nötig

Reglersynthese Kühlung: Aufbau

- Aufgrund Modularitätsanforderung: Geteilt in Primär- & Sekundärkreis
- Kühlmedium: jeweils 50% - Wasser / Glykol – Gemisch

- Schema:



Reglersynthese Kühlung: Modellierung

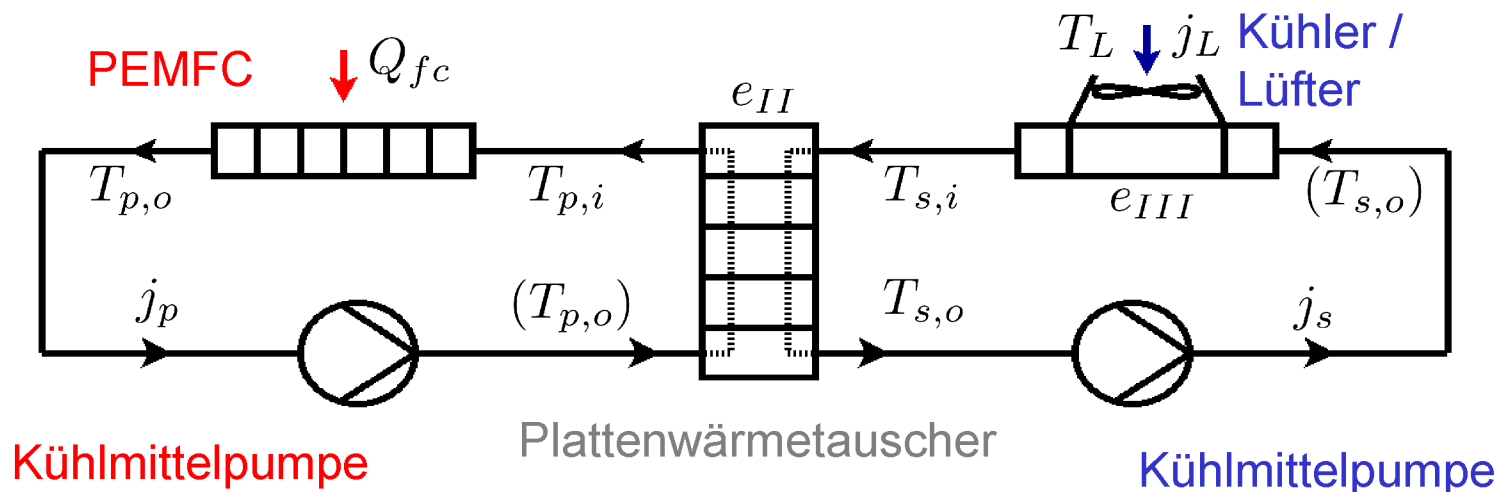
Modell

$$C_I \frac{dT_{p,o}}{dt} = -j_p c_p (T_{p,o} - T_{p,i}) + Q_{fc}$$

$$C_{II} \frac{dT_{p,i}}{dt} = j_p c_p (T_{p,o} - T_{p,i}) - e_{II} \min(j_p c_p, j_s c_s) (T_{p,o} - T_{s,i})$$

$$C_{II} \frac{dT_{s,o}}{dt} = -j_s c_s (T_{s,o} - T_{s,i}) + e_{II} \min(j_p c_p, j_s c_s) (T_{p,o} - T_{s,i})$$

$$C_{III} \frac{dT_{s,i}}{dt} = j_s c_s (T_{s,o} - T_{s,i}) - e_{III} j_L c_L (T_{s,o} - T_L)$$



Reglersynthese Kühlung: Modellierung

$$C_I \frac{dT_{p,o}}{dt} = -j_p c_p (T_{p,o} - T_{p,i}) + Q_{fc}$$

$$C_{II} \frac{dT_{p,i}}{dt} = j_p c_p (T_{p,o} - T_{p,i}) - e_{II}$$

$$C_{II} \frac{dT_{s,o}}{dt} = -j_s c_s (T_{s,o} - T_{s,i}) - e_{III}$$

$$C_{III} \frac{dT_{s,i}}{dt} = j_s c_s (T_{s,o} - T_{s,i}) - e_{III}$$

$T_{p,i}$: Zulauftemperatur PEMFC [K]

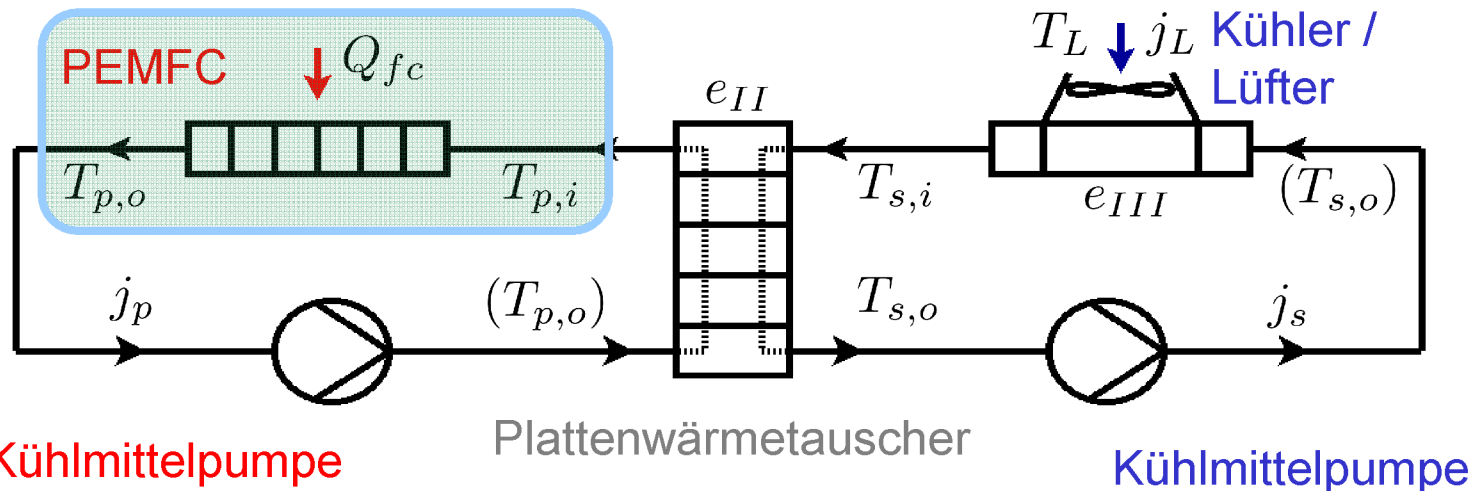
$T_{p,o}$: Ablauftemperatur PEMFC [K]

Q_{fc} : Wärmeleistung PEMFC [W]

j_p : Massenstrom Primärfluid [kg/s]

c_p : Wärmekap. Primärfluid [J/(kg K)]

C_I : Wärmekap. PEMFC [J/K]



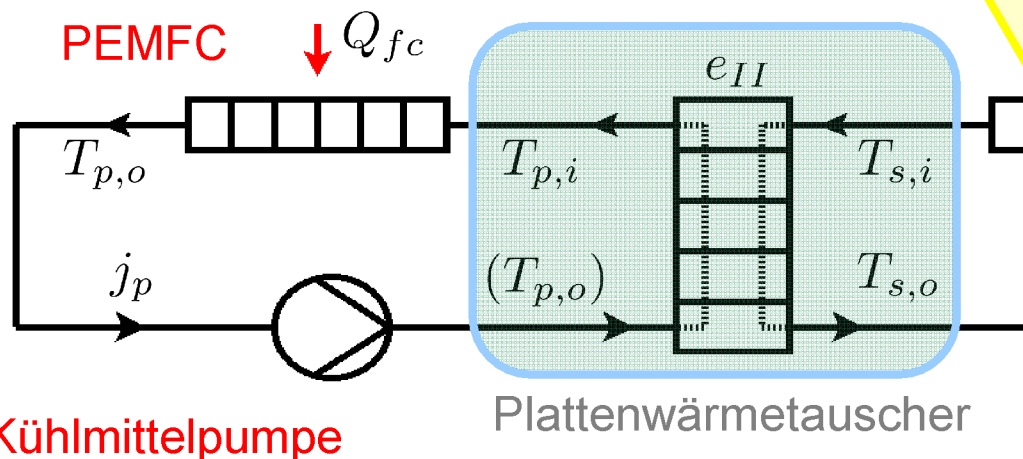
Reglersynthese Kühlung: Modellierung

$$C_I \frac{dT_{p,o}}{dt} = -j_p c_p (T_{p,o} - T_{p,i}) + Q_{fc}$$

$$C_{II} \frac{dT_{p,i}}{dt} = j_p c_p (T_{p,o} - T_{p,i}) - e_{II} \min(j_p c_p, j_s c_s) (T_{p,o} - T_{s,i})$$

$$C_{II} \frac{dT_{s,o}}{dt} = -j_s c_s (T_{s,o} - T_{s,i}) + e_{II} \min(j_p c_p, j_s c_s) (T_{p,o} - T_{s,i})$$

$$C_{III} \frac{dT_{s,i}}{dt} = j_s c_s (T_{s,o} - T_{s,i}) - e_{III} j_L c_L (T_{s,o} - T_{p,i})$$



$T_{p,i}$: Zulauftemp. PEMFC [K]

$T_{p,o}$: Ablauftemp. PEMFC [K]

$T_{s,i}$: Zulauftemp. PWT, sek. [K]

$T_{s,o}$: Ablauftemp. PWT, sek. [K]

j_p : Massenstr. Fluid, pri. [kg/s]

j_s : Massenstr. Fluid, sek. [kg/s]

c_p : Wärmekap. Fluid, pri. $\left[\frac{J}{kg K}\right]$

c_s : Wärmekap. Fluid, sek $\left[\frac{J}{kg K}\right]$

C_{II} : Wärmekap. PWT [J/K]

e_{II} : Austauschgrad PWT [-]

Reglersynthese Kühlung: Modellierung

$$C_I \frac{dT_{p,o}}{dt} = -j_p c_p (T_{p,o} - T_{p,i}) + Q_{fc}$$

$$C_{II} \frac{dT_{p,i}}{dt} = j_p c_p (T_{p,o} - T_{p,i}) - e_{II} \min(j_p c_p, j_s c_s) (T_{p,o} - T_{s,i})$$

$$C_{II} \frac{dT_{s,o}}{dt} = -j_s c_s (T_{s,o} - T_{s,i}) + e_{II} \min(j_p c_p, j_s c_s) (T_{p,o} - T_{s,i})$$

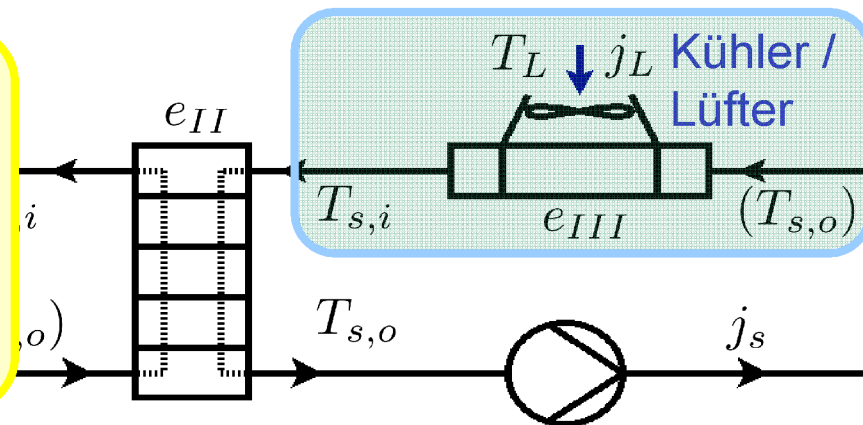
$$C_{III} \frac{dT_{s,i}}{dt} = j_s c_s (T_{s,o} - T_{s,i}) - e_{III} j_L c_L (T_{s,o} - T_L)$$

$T_{s,i}$: Zulauftemperatur PWT, sek. [K]
 $T_{s,o}$: Ablauftemperatur PWT, sek. [K]
 C_{III} : Wärmekap. Kühler / Lüfter [J/K]
 e_{III} : Austauschgrad Kühler / Lüfter [-]
 j_L : Massenstrom Luft [kg/s]
 c_L : Wärmekap. Luft, isob. spez. [$\frac{J}{kgK}$]

Kühlmittelpumpe

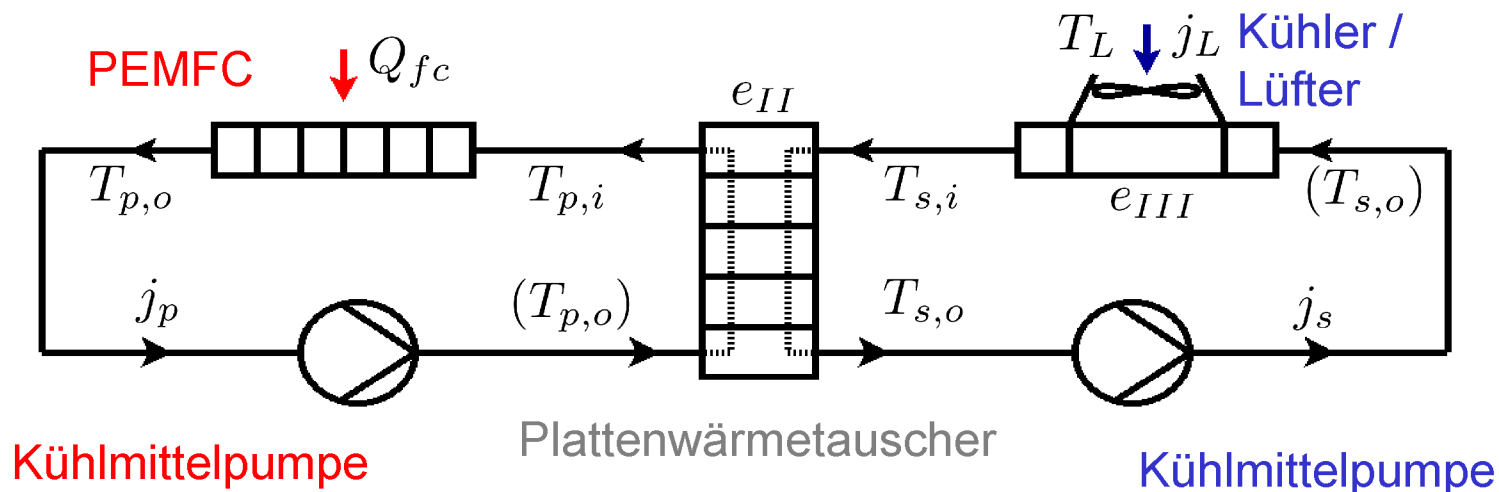
Plattenwärmetauscher

Kühlmittelpumpe



Wichtige Modellannahmen:

- Konzentrierter Ansatz mittels Energiebilanzen und Wärmeaustauschgraden
- Vernachlässigung von Wärmeübergang durch freie Konvektion & Strahlung
- Vernachlässigung der Kompressibilität von Primär- & Sekundärfluid
- Homogenes Primär- & Sekundärfluid (keine Lufteinschlüsse, Verunreinigungen)
- Modellierung der Pumpen als ideale Stromquellen



- Kurze Vorstellung
- Vorstellung von Proton Motor
- Mechatronik bei Proton Motor
- **Reglersynthese Kühlkreis PEMFC-System**
 - Modellierung Kühlkreis
 - **Parameteridentifikation Modell**
 - Reglerentwurf
 - Simulative Tests
- Übersicht möglicher Studien- & Masterarbeiten

Reglersynthese Kühlung: Parameteridentifikation Modell

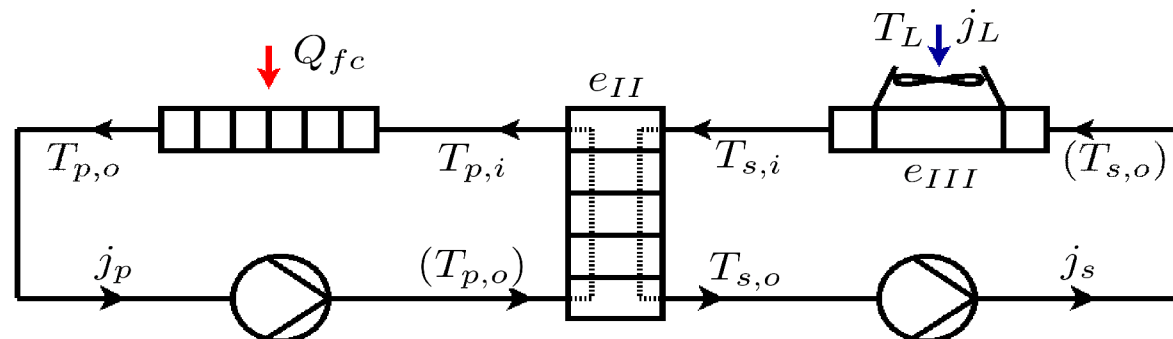
$$C_I \frac{dT_{p,o}}{dt} = -j_p c_p (T_{p,o} - T_{p,i}) + Q_{fc}$$

$$C_{II} \frac{dT_{p,i}}{dt} = j_p c_p (T_{p,o} - T_{p,i}) - e_{II} \min(j_p c_p, j_s c_s) (T_{p,o} - T_{s,i})$$

$$C_{II} \frac{dT_{s,o}}{dt} = -j_s c_s (T_{s,o} - T_{s,i}) + e_{II} \min(j_p c_p, j_s c_s) (T_{p,o} - T_{s,i})$$

$$C_{III} \frac{dT_{s,i}}{dt} = j_s c_s (T_{s,o} - T_{s,i}) - e_{III} j_L c_L (T_{s,o} - T_L)$$

= Zu identifizieren
 = Gemessen
 = Berechnung
 = Tabellarisch

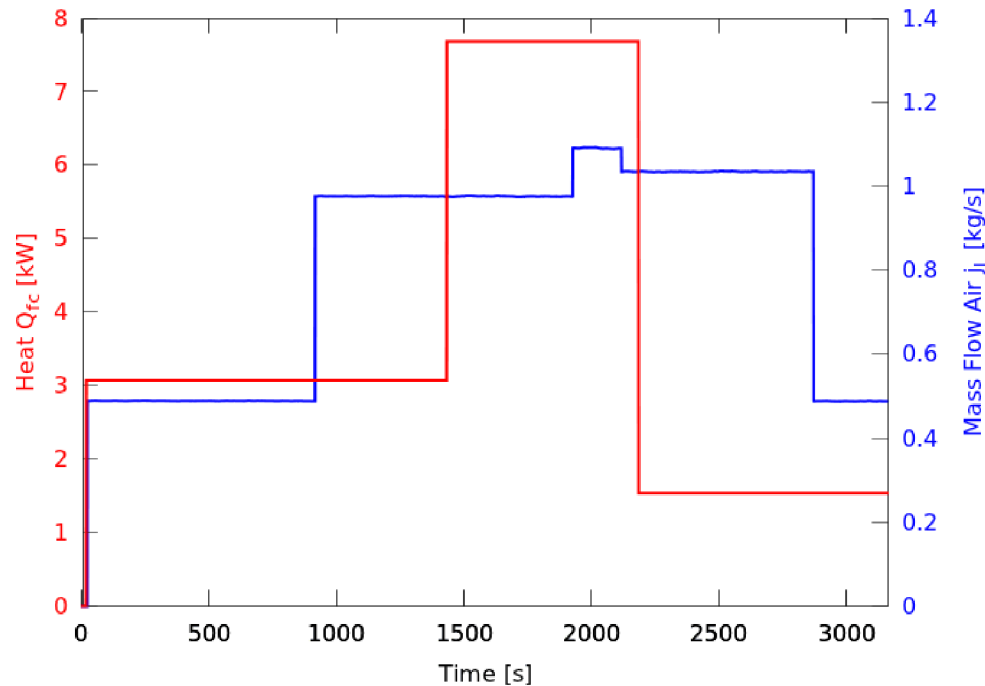


Reglersynthese Kühlung: Parameteridentifikation Modell

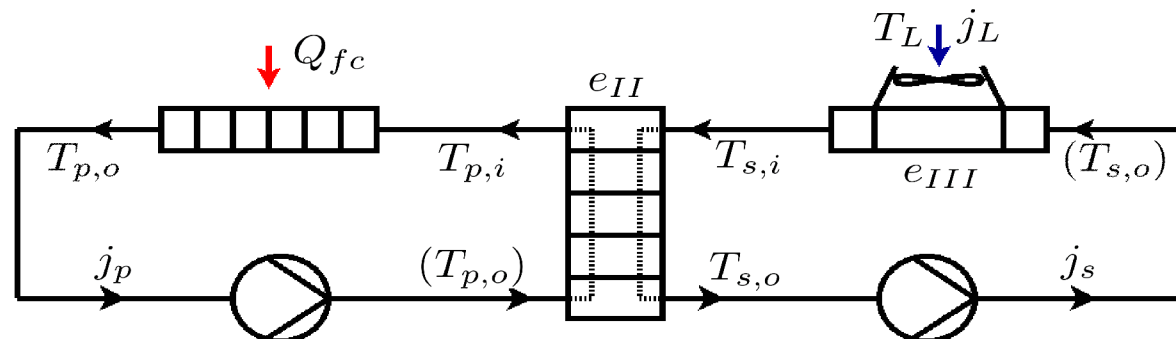
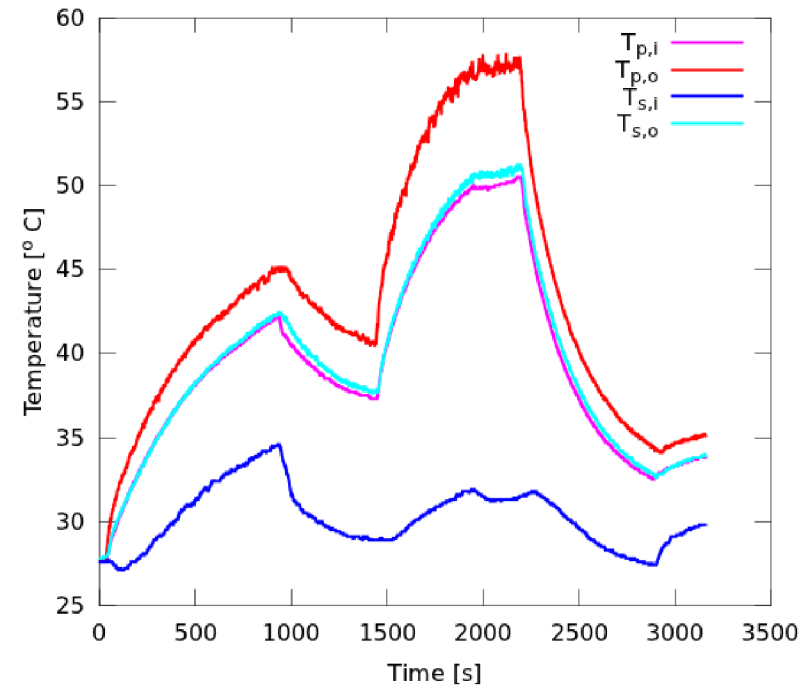


Proton Power Systems plc Group

Experiment: Heat / Cooling vs. Time



Experiment: Temperatures vs. Time



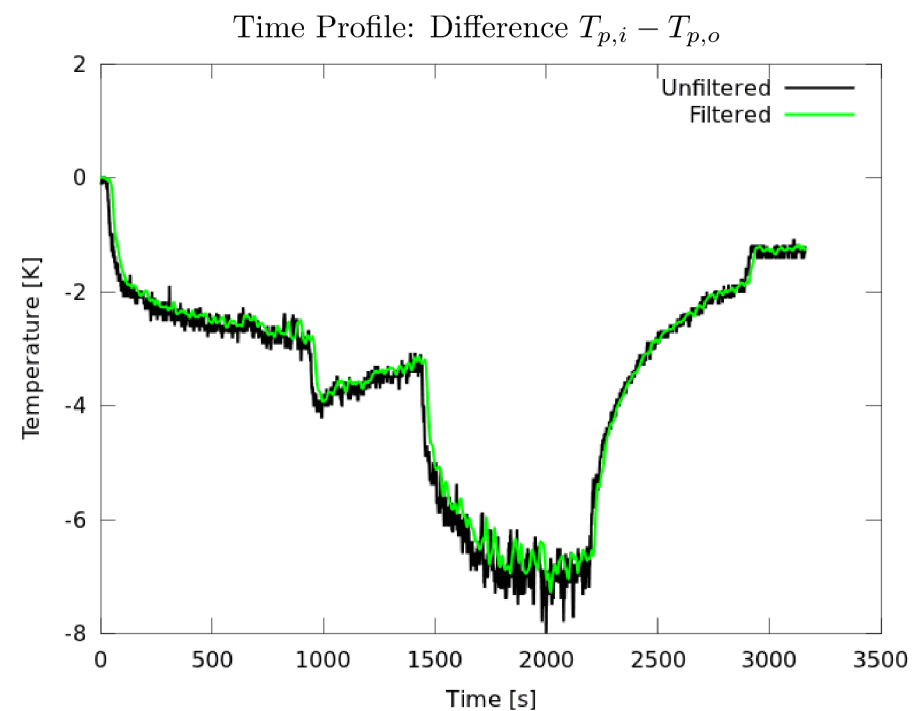
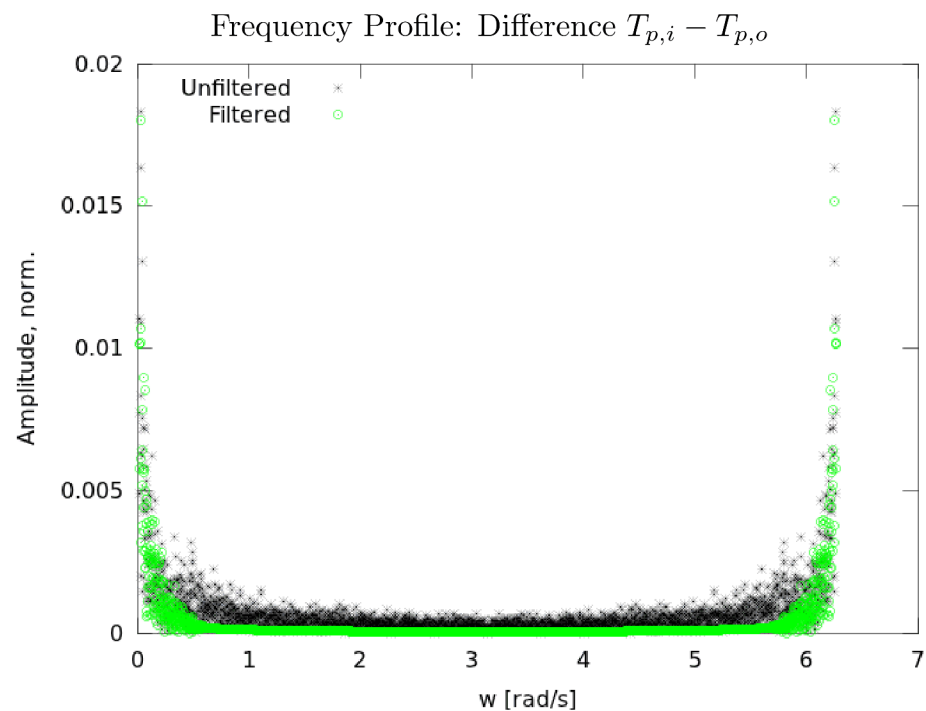
Reglersynthese Kühlung: Parameteridentifikation Modell



Proton Power Systems plc Group

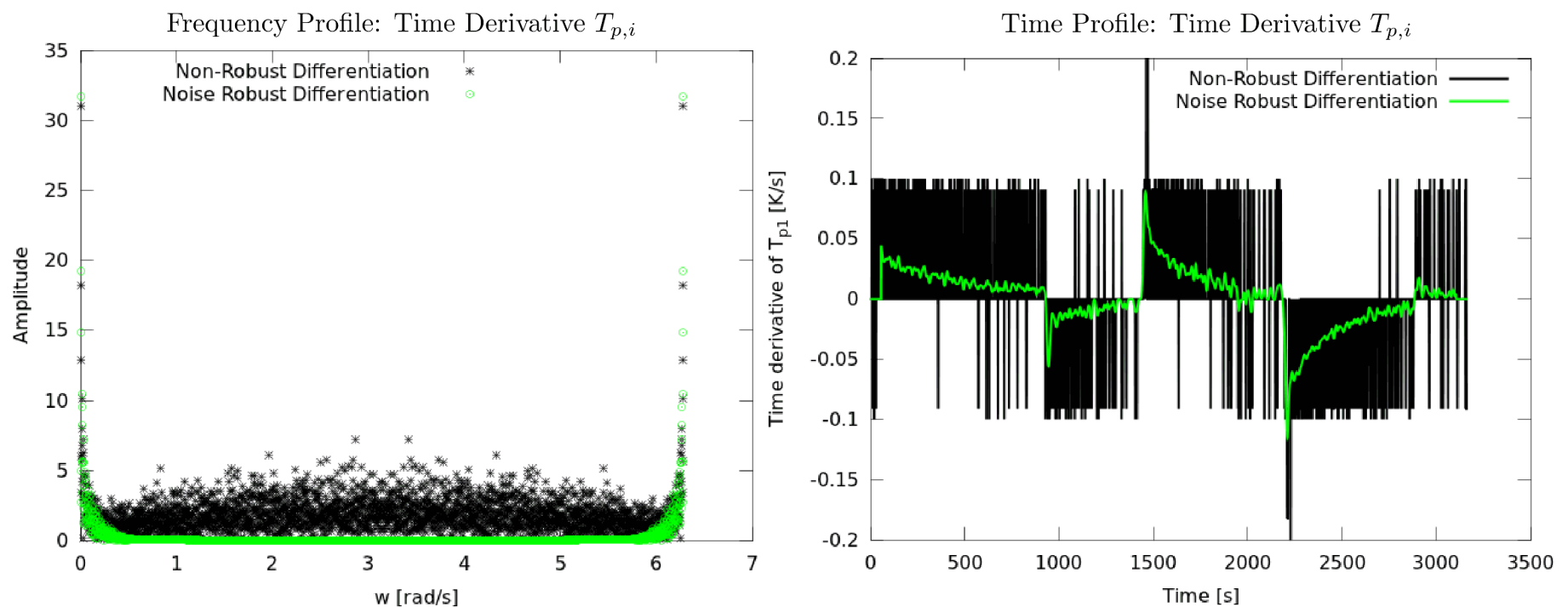
Vor Parameteridentifikation → Filterung der benötigten Messgrößen

Beispiel: FIR-Tiefpaßfilterung in Frequenz- & Zeitbereich:



Vor Parameteridentifikation → Differentiation der benötigten Größen

Beispiel: Noise Robust Differentiation* in Frequenz- & Zeitbereich:



* Holoborodko P., Smooth Noise Robust Differentiators, 2008, published online:

<http://www.holoborodko.com/pavel/numerical-methods/numerical-derivative/smooth-low-noise-differentiators/>

Reglersynthese Kühlung: Parameteridentifikation Modell



Proton Power Systems plc Group

Least Square Parameteroptimierungsproblem:

$$\Delta = \mathbf{y} - \Psi\theta$$

mit

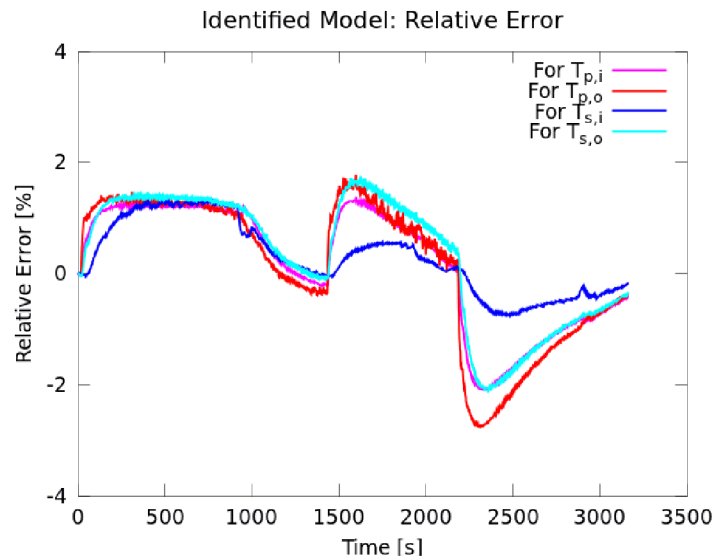
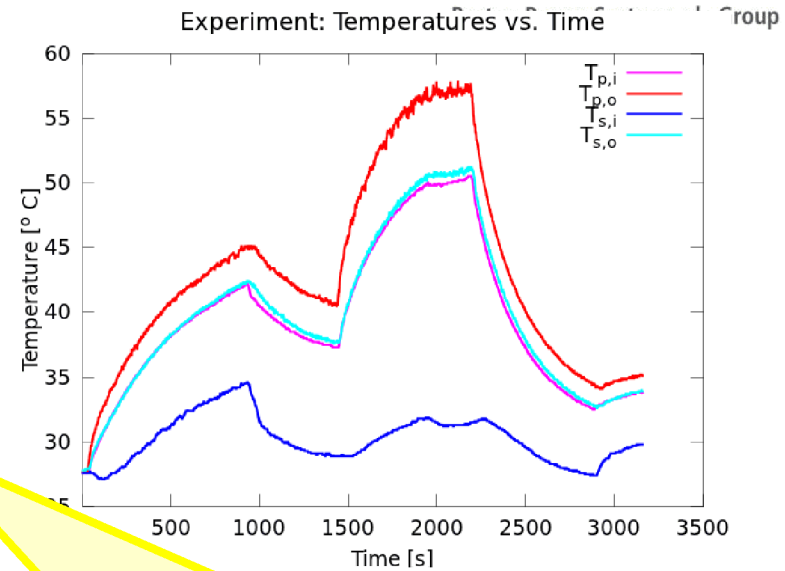
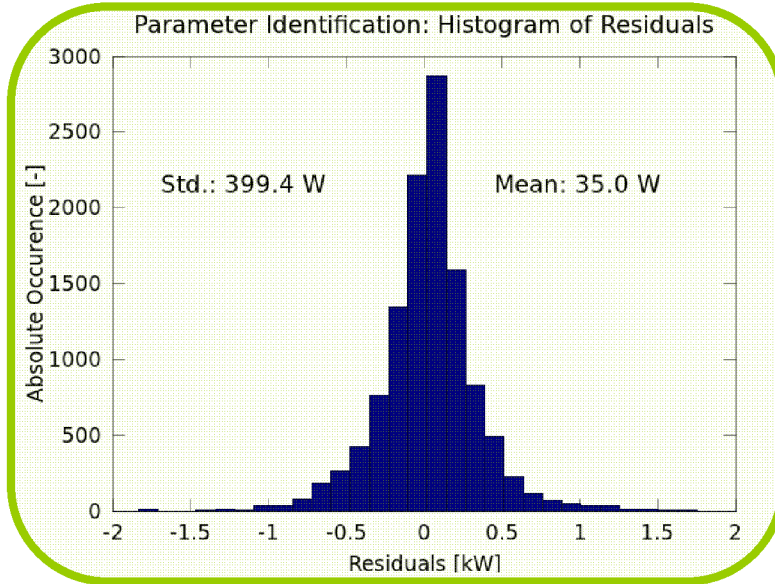
$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} -j_p c_p (T_{p,o} - T_{p,i}) + Q_{fc} \\ j_p c_p (T_{p,o} - T_{p,i}) \\ -j_s c_s (T_{s,o} - T_{s,i}) \\ j_s c_s (T_{s,o} - T_{s,i}) \end{bmatrix}$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} \frac{dT_{p,o}}{dt} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{dT_{p,i}}{dt} & \min(j_p c_p, j_s c_s) (T_{p,o} - T_{s,i}) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{dT_{s,o}}{dt} & -\min(j_p c_p, j_s c_s) (T_{p,o} - T_{s,i}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{dT_{s,i}}{dt} & j_L c_L (T_{s,o} - T_L) \end{bmatrix}$$

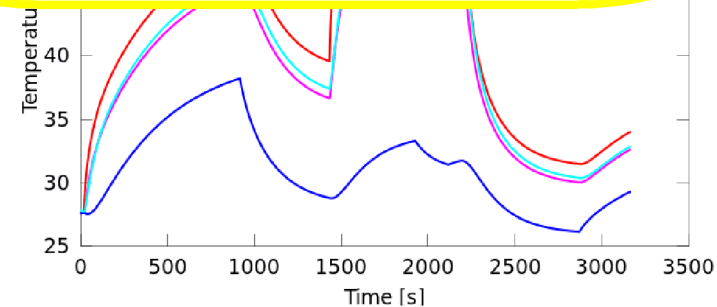
$$\theta = \begin{bmatrix} C_I \\ C_{II} \\ e_{II} \\ C_{III} \\ e_{III} \end{bmatrix}$$

Ziel: Minimierung der Kostenfunktion $V = \Delta^T \Delta$

Reglersynthese Kühlung: Parameteridentifikation Modell



**Akzeptabler Fehler
bezogen auf den Absolutbereich
von 0 ... 8800 W**



Reglersynthese Kühlung: Parameteridentifikation Modell

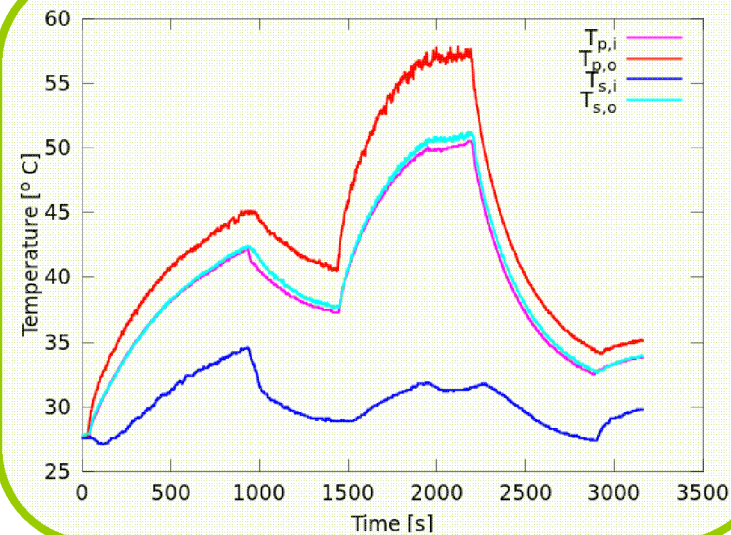


Vergleich Experiment & Simulation
mit identifizierten Parametern:

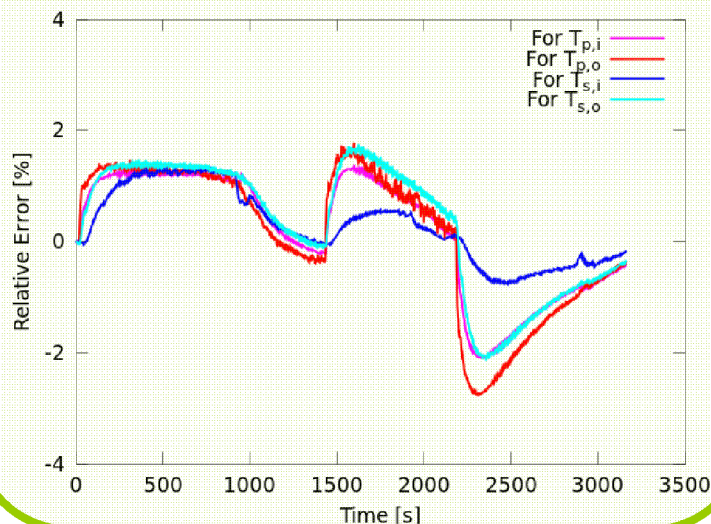
- Gute Qualitative & Quantitative Übereinstimmung
- Absoluter Fehler +/- 1-2 °C
- Relativer Fehler +/- 3%

→ Für Reglerauslegung geeignet

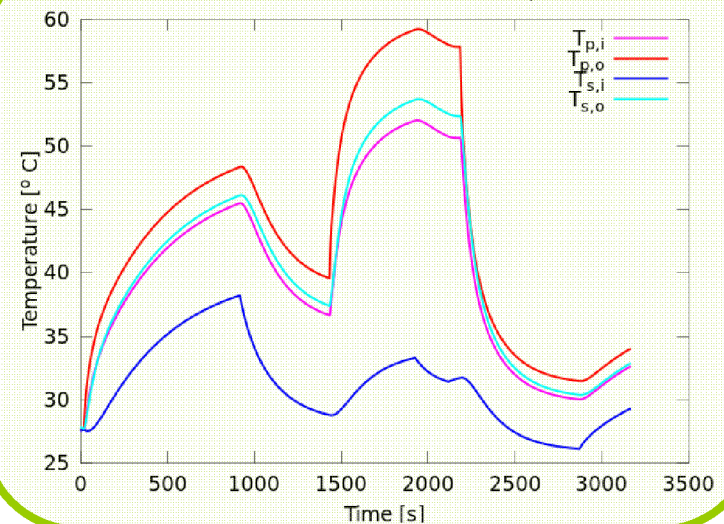
Experiment: Temperatures vs. Time



Identified Model: Relative Error



Identified Model: Transient Response



- Kurze Vorstellung
- Vorstellung von Proton Motor
- Mechatronik bei Proton Motor
- **Reglersynthese Kühlkreis PEMFC-System**
 - Modellierung Kühlkreis
 - Parameteridentifikation Kühlkreis-Modell
 - Reglerentwurf
 - Simulativer Test
- Übersicht möglicher Studien- & Masterarbeiten

Reglersynthese Kühlung: Aufgabenbeschreibung

$$C_I \frac{dT_{p,o}}{dt} = -j_p c_p (T_{p,o} - T_{p,i}) + Q_{fc}$$

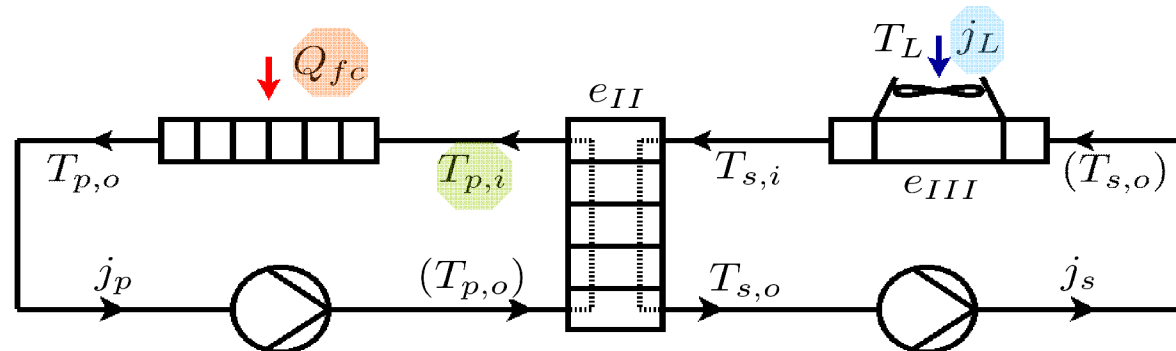
$$C_{II} \frac{dT_{p,i}}{dt} = j_p c_p (T_{p,o} - T_{p,i}) - e_{II} \min(j_p c_p, j_s c_s) (T_{p,o} - T_{s,i})$$

$$C_{II} \frac{dT_{s,o}}{dt} = -j_s c_s (T_{s,o} - T_{s,i}) + e_{II} \min(j_p c_p, j_s c_s) (T_{p,o} - T_{s,i})$$

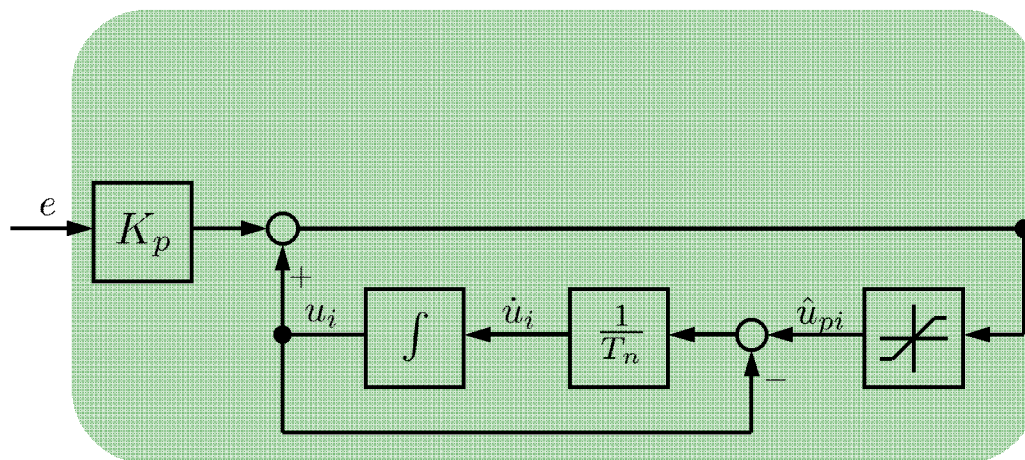
$$C_{III} \frac{dT_{s,i}}{dt} = j_s c_s (T_{s,o} - T_{s,i}) - e_{III} j_L c_L (T_{s,o} - T_L)$$

● = Regelgröße (50°C)
 ● = Störgröße (0 ... 8.8kW)
 ● = Stellgröße (0 ... 1.1kg/s)

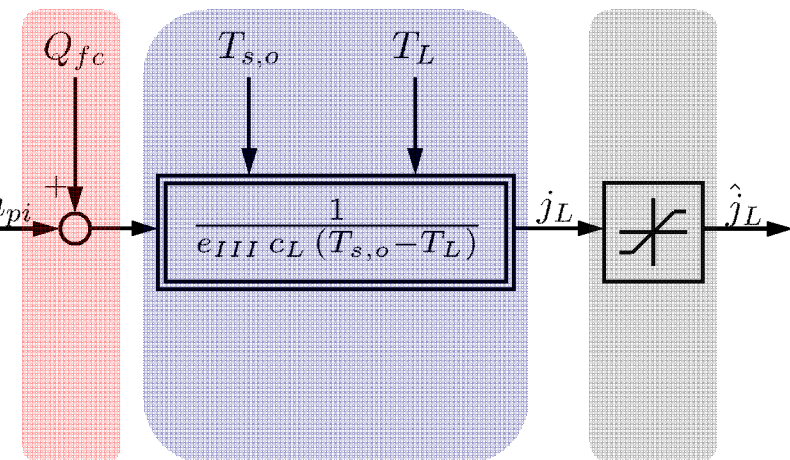
Regelungstyp: Festwertregelung mit Ziel Störunterdrückung



PI-Regler mit Integrator Anti-Windup*



NL-Kompensation



Aufwand Messtechnik zur Realisierung:

Vorsteuerung /
Störgrößenaufschaltung

Stellgrößen-
begrenzung

- Messen der Regelgröße $T_{p,i}$ für $e = T_{p,i} - T_{p,i}^*$
- Bestimmung von Q_{fc} mittels PEMFC-Strom i : $Q_{fc} = N_c \left(\frac{1}{b} \ln \left(\frac{i}{i_o} \right) + R i \right) i$
- Messen von T_L
- Messen von $T_{s,o}$ (Alternativ: Modellbasiertes Messverfahren / Beobachter)

* Visioli A., Practical PID Control, Springer, 2006

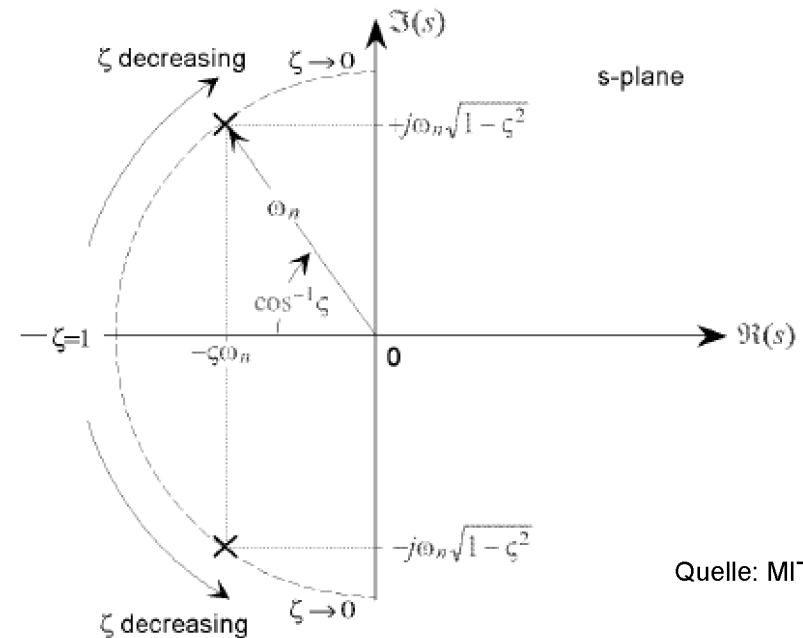
Reglersynthese Kühlung: Parametrierung des Reglers

Ziel:

- Bestimmung von K_p & T_n

Ansatz:

- Wurzelortskurve Closed-Loop
- Parametersweep K_p & T_n
unter Berücksichtigung
 - Asymptotische Stabilität
 - Stationäres Verhalten
 - Transientes Verhalten
 - Dämpfung
 - Dominierendes konjugiert-komplexes Polpaar / PT2-Verhalten
 - Stellgrößenbeschränkung
 - Bandbreitenbegrenzung
 - Robustheit
- i. Allg. mehrere Iterationen / Simulationsstudien notwendig



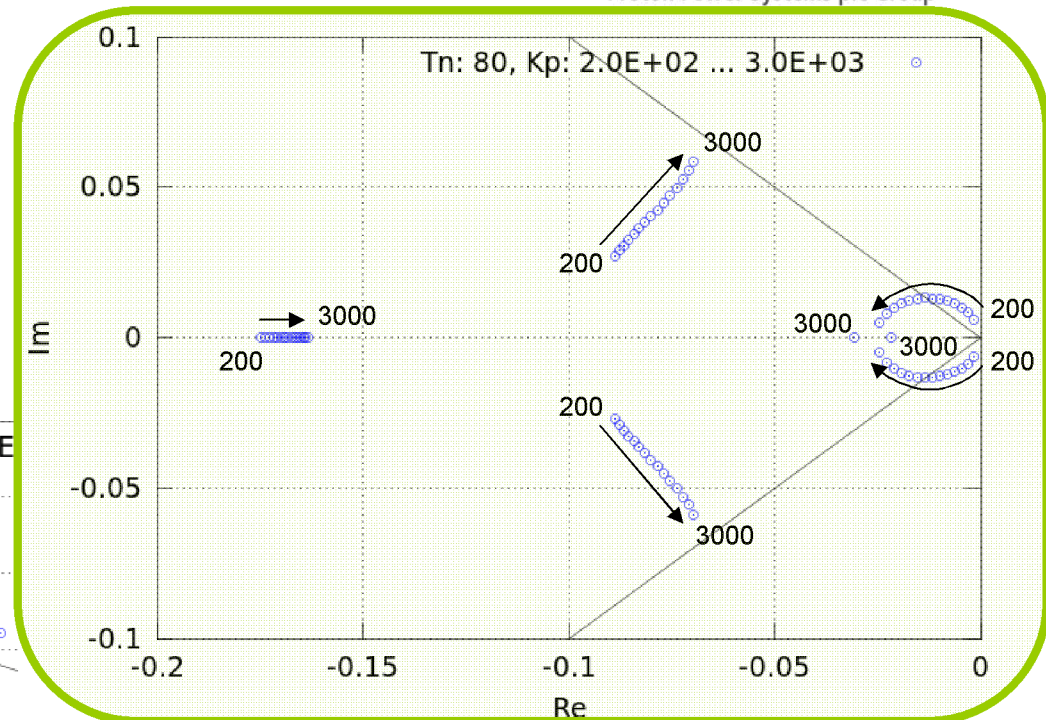
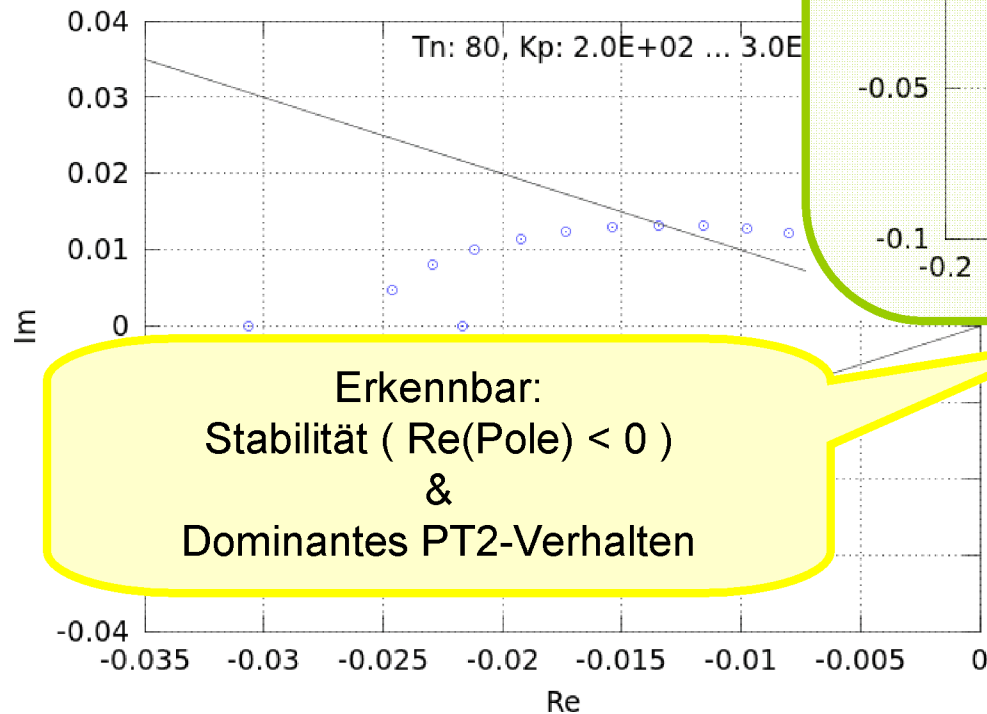
$$\frac{1}{w_n^2} \ddot{y} + 2 \frac{\zeta}{w_n} \dot{y} + y = K u$$

Reglersynthese Kühlung: Parametrierung des Reglers



Proton Power Systems plc Group

Pole des geschlossenen
Regelkreises in Abh.
von K_p & T_n

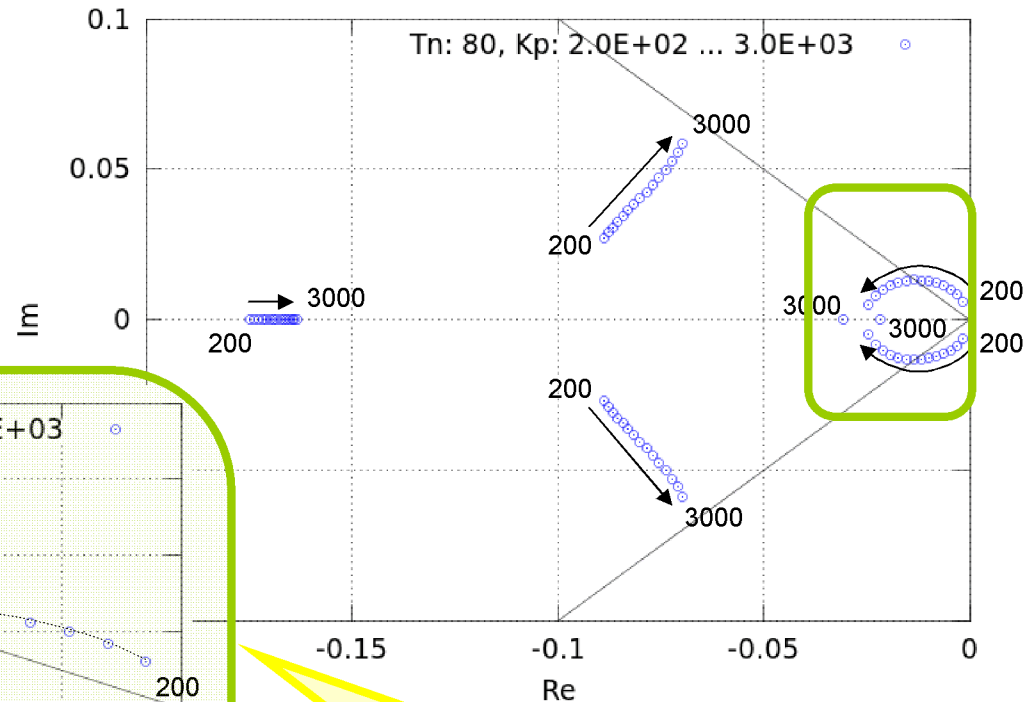
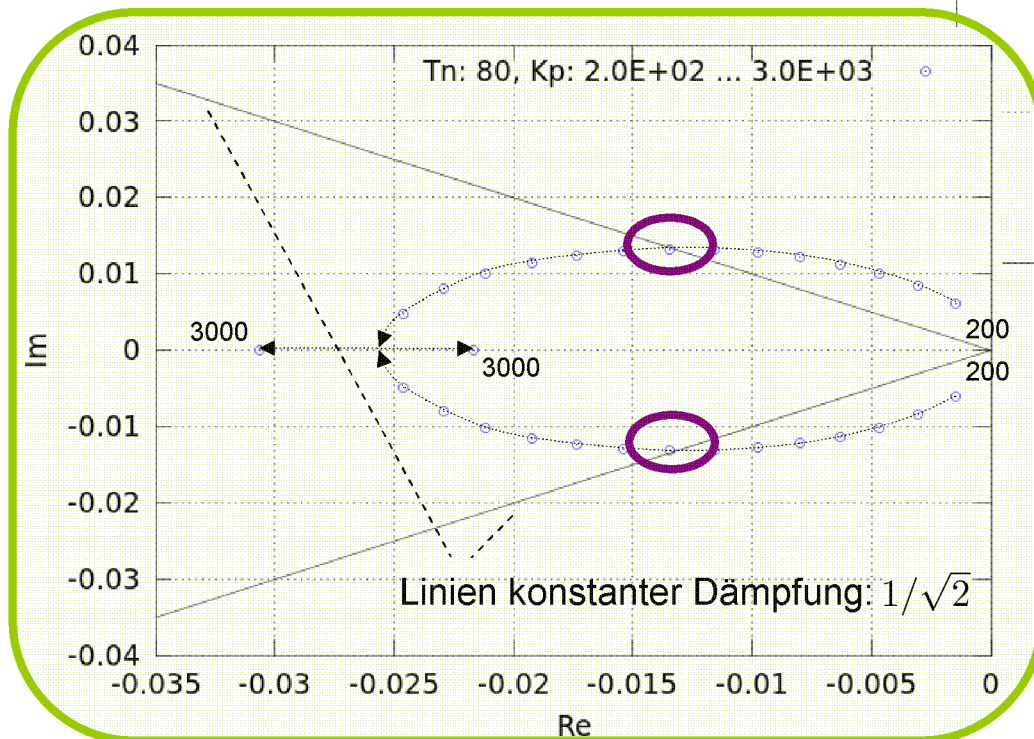


Reglersynthese Kühlung: Parametrierung des Reglers



Proton Power Systems plc Group

Dominantes PT2 - Verhalten



Mit Dämpfungsvorgabe
→ Festlegung von K_p
→ $K_p = 1600 \text{ W/K}$
bzw. ablesen von $T_n = 80 \text{ s}$

- Kurze Vorstellung
- Vorstellung von Proton Motor
- Mechatronik bei Proton Motor
- **Reglersynthese Kühlkreis PEMFC-System**
 - Modellierung Kühlkreis
 - Parameteridentifikation Kühlkreis-Modell
 - Reglerentwurf
 - **Simulative Tests**
- Übersicht möglicher Studien- & Masterarbeiten

Reglersynthese Kühlung: Simulativer Test auf Störunterdrückung



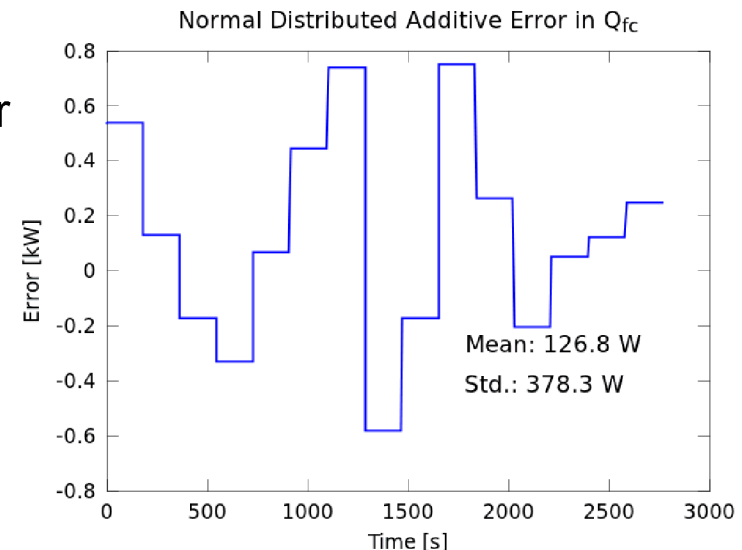
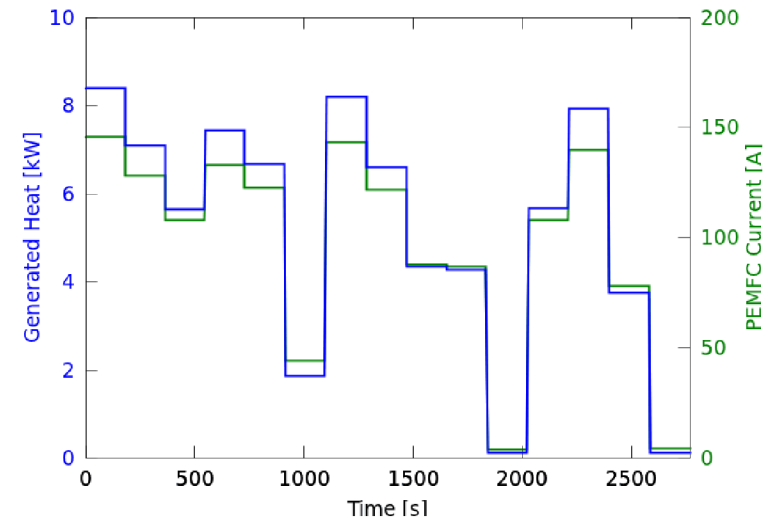
Proton Power Systems plc Group

Störung:

Zufällig generiert & gleichverteilt
innerhalb des Störbereichs (0 ... 8.8kW)

Zusätzlich zu berücksichtigen:

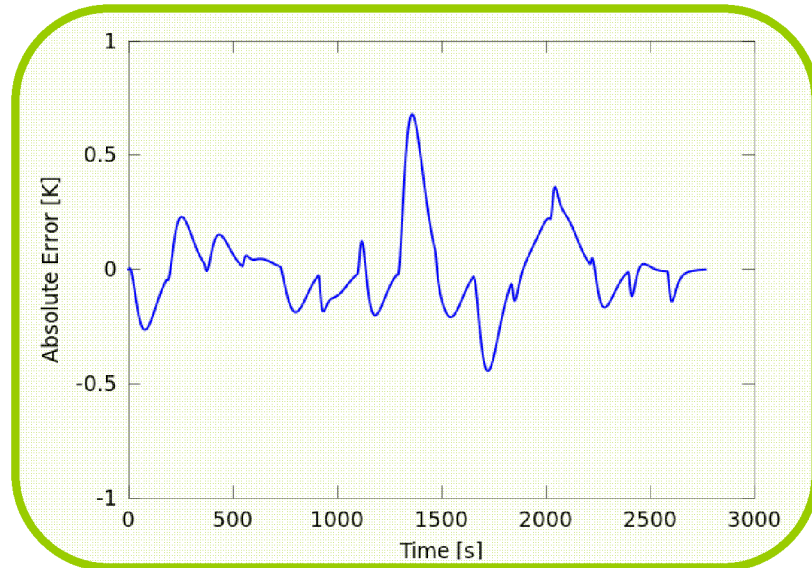
- Normalverteilter additiver Fehler
in Vorsteuerung entsprechend dem Fehler
der Parameteridentifikation
- Zeitverzögerung Messsignale
z.B. Filterung (PT1, T = 1s)
- Zeitliche Verzögerung Stellglied
z.B. Trägheit Motor (PT1, T = 2s)



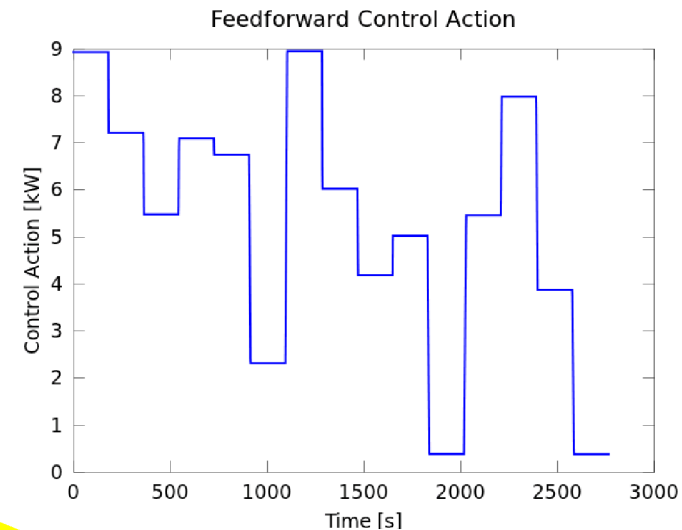
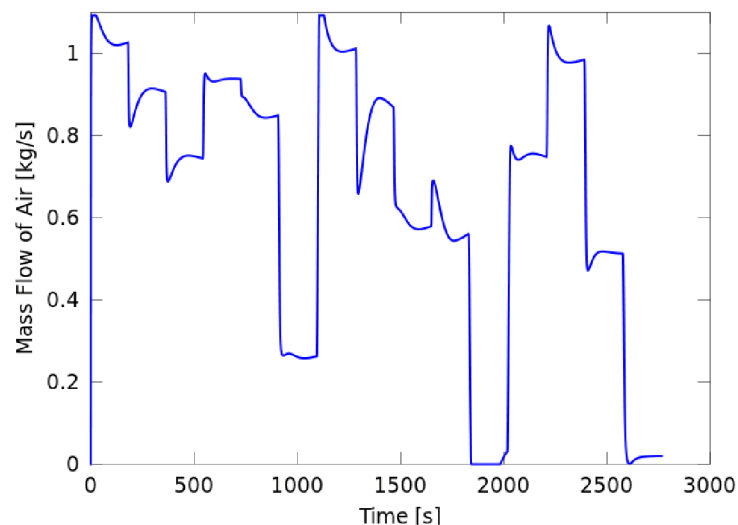
Reglersynthese Kühlung: Simulativer Test auf Störunterdrückung



Proton Power Systems plc Group

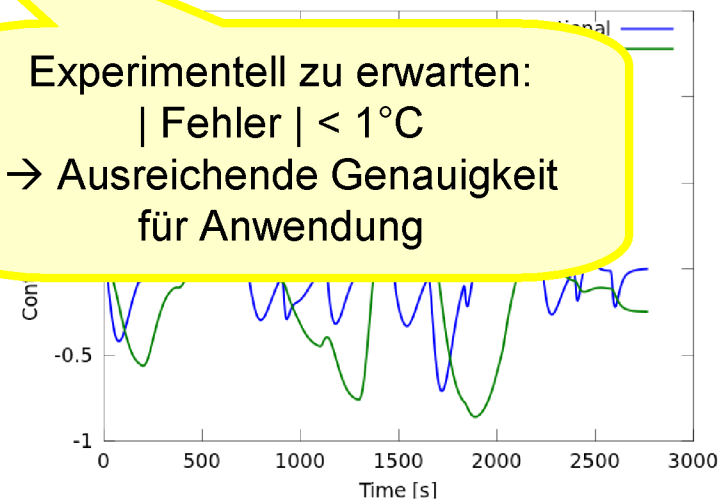


Overall Control Action --> Cooling Fan



Proportional Integral Control Action

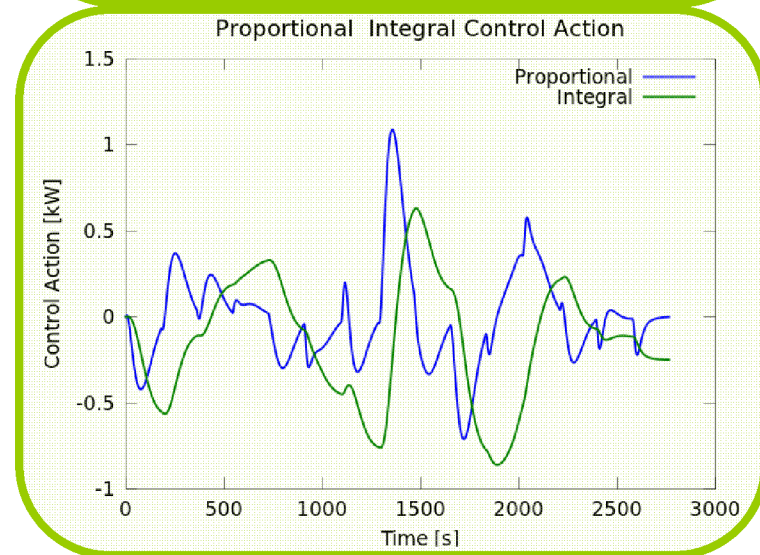
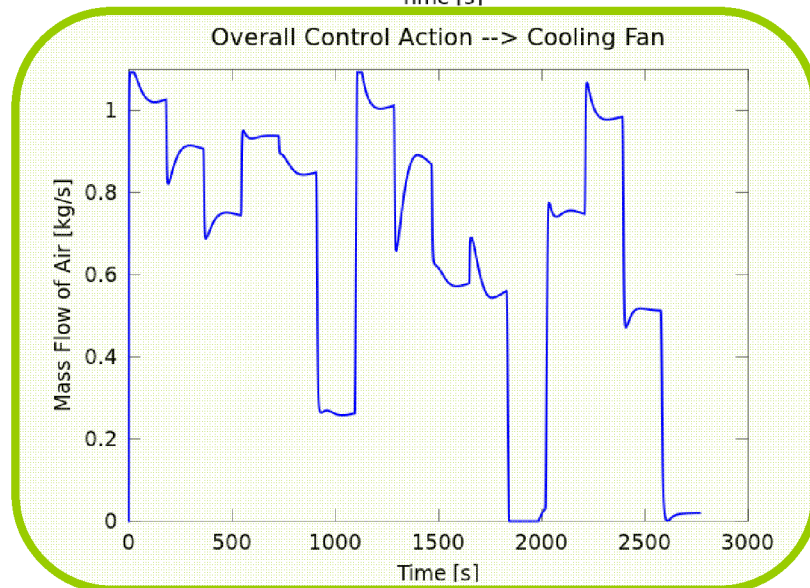
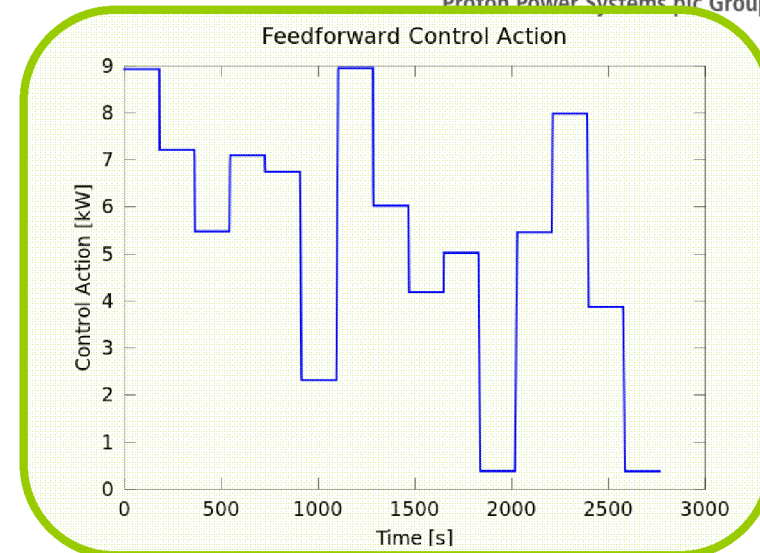
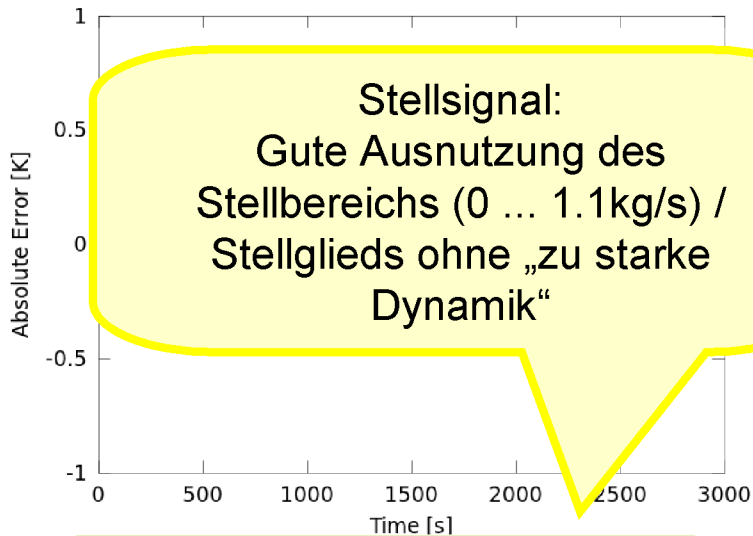
Experimentell zu erwarten:
| Fehler | < 1°C
→ Ausreichende Genauigkeit
für Anwendung



Reglersynthese Kühlung: Simulativer Test auf Störunterdrückung



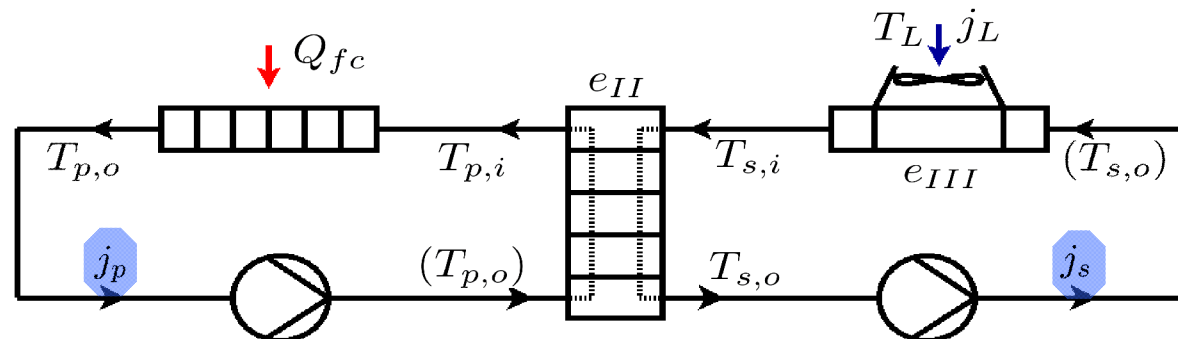
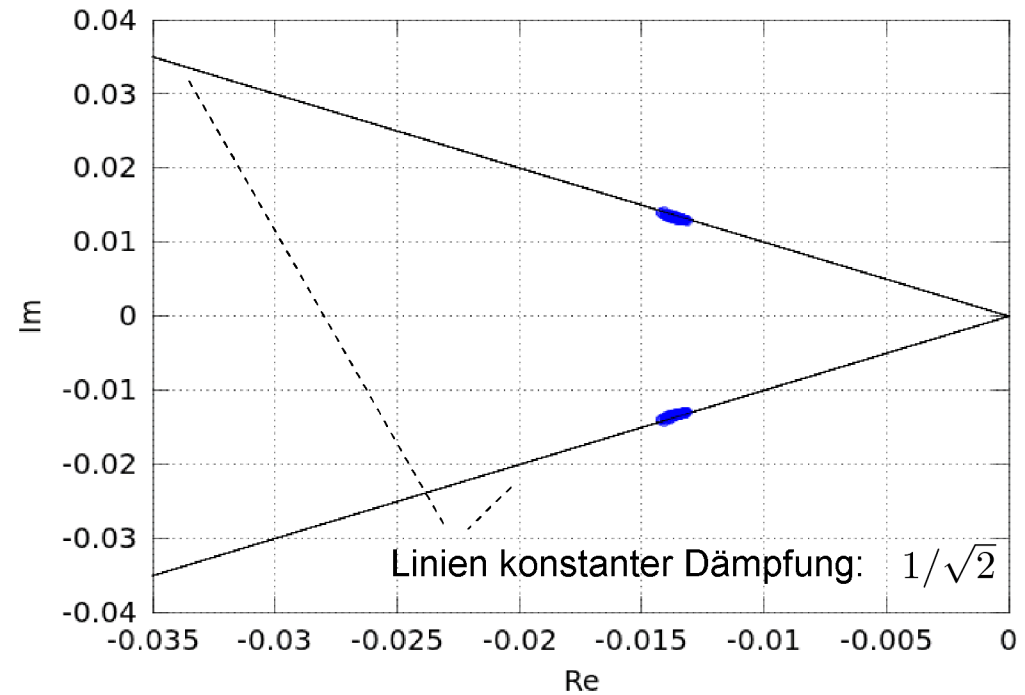
Proton Power Systems plc Group



Reglersynthese Kühlung: Robustheitsanalyse

Verhalten des geschlossen Regelkreises in Abh. der Massenströme j_p & j_s

Parametervariation:
 j_p : +/- 25%
 j_s : +/- 25%

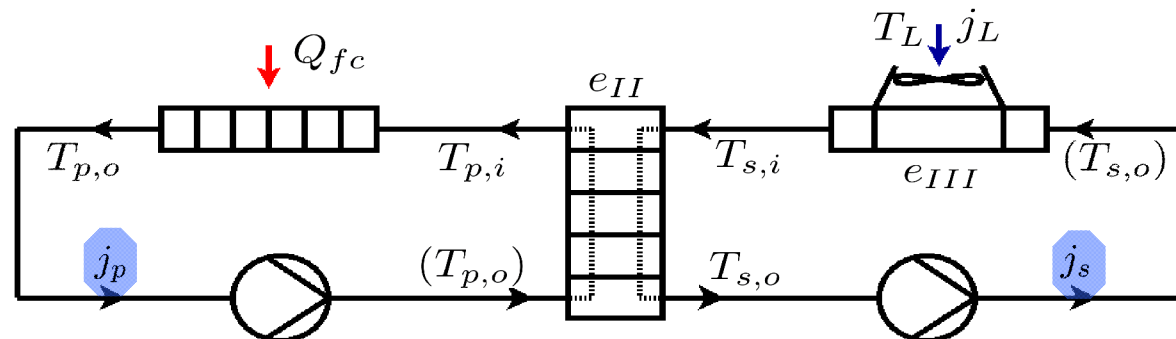
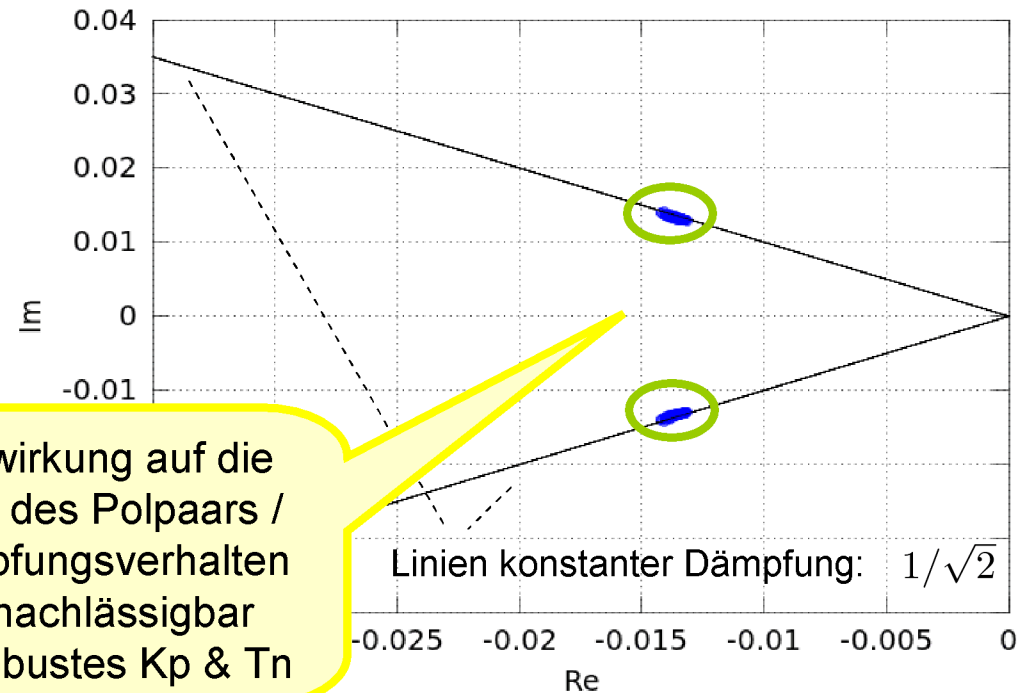


Reglersynthese Kühlung: Robustheitsanalyse

Verhalten des geschlossen Regelkreises in Abh. der Massenströme j_p & j_s

Parametervariation:
 j_p : +/- 25%
 j_s : +/- 25%

Auswirkung auf die Lage des Polpaars / Dämpfungsverhalten vernachlässigbar → Robustes K_p & T_n



- Kurze Vorstellung
- Vorstellung von Proton Motor
- Mechatronik bei Proton Motor
- Reglersynthese Kühlkreis PEMFC-System
 - Modellierung Kühlkreis
 - Parameteridentifikation Kühlkreis-Modell
 - Reglerentwurf
 - Simulative Tests
- **Übersicht möglicher Studien- & Masterarbeiten**

1. Modellbasierte Entwicklung und Vergleich von Powermanagementstrategien für ein serielles Hybridsystem

Details:

- Hybridsystem: PEMFC-System, m./o. DC/DC, Li-Ion-Batterie, Schütze, Last, ...
- Angedachter Ablauf:
 - Literaturrecherche State-of-the-art Komponentenmodellierung & Führungsstrategien
 - Modellierung, Identifikation mit Messdaten & Implementierung
 - Führungsansätze entwickeln (Lineare, Sliding Mode, Dynamic Programming, Model Predictive Control, Fuzzy Control, Heuristische Methoden, ...) & Ergebnisse vergleichen
- Möglicher Beginn: ab Februar 2012
- Dauer: 6 Monate (empfehlenswert: vorherige Werkstudententätigkeit)

2. Modellbasierte Optimierung des Powermanagements eines Triple Hybrid Systems

Details:

- Triple Hybrid System: PEMFC-System, Li-Ion-Batterie, Supercaps, ...
- Angedachter Ablauf:
 - Literaturrecherche: State-of-the-art Ansätze zur Modellierung & Führungsstrategien
 - Modellierung, Identifikation mit Messdaten & Implementierung
 - Führungsansätze entwickeln (Lineare, Sliding Mode, Dynamic Programming, Model Predictive Control, Fuzzy Control, Heuristische Methoden, ...) & Ergebnisse vergleichen
- Möglicher Beginn: Nach Masterarbeit 1
- Dauer: 6 Monate (empfehlenswert: vorherige Werkstudententätigkeit)

3. Aufbau einer Modellbibliothek zur PEMFC-Systemsimulation: Modellierung der PEM-Brennstoffzelle

Details:

- Angedachter Ablauf:
 - Literaturrecherche: State-of-the-art Ansätze zur Modellierung von PEM-Brennstoffzellen
 - Modellierung, Identifikation mit Messdaten, Implementierung & Simulationsstudien
- Möglicher Beginn: Nach Masterarbeit 2
- Dauer: 6 Monate (empfehlenswert: vorherige Werkstudententätigkeit)

- Funktionsentwicklung Kühlkreis REx-PEMFC-System
→ Modellierung, Identifikation, Regelungsentwürfe / Simulationsstudien & Ergebnisvergleich
- Funktionsentwicklung Ladeluftkühler REx-PEMFC-System
→ Modellierung, Identifikation, Regelungsentwürfe / Simulationsstudien & Ergebnisvergleich
- Funktionsentwicklung Kompressor / Drossel
→ Modellierung, Identifikation, Regelungsentwürfe / Simulationsstudien & Ergebnisvergleich
→ Implementierung am Teststand → Experimentelle Erprobung
- Modeling of hybrid drive train components at a power-energy-efficiency-detail-level
→ Zur Hybridsystemauslegung → Modellierung, Implementierung in Modelica & Simulative Tests
- Auslegung eines Strahlpumpen-basierten H₂-Rezirkulationssystems für ein PEMFC-System
→ Modellierung der Strahlpumpe & Rezikreises → Auslegung & Spezifikation
- Aufbau Modellbibliothek Systemsimulation (Modellierung, Ident., Komp. In Octave, Implem. In Modelica (JModelica/Openmodelica),) → Ziel: Subsystem- / Komponentenauslegung

Tools: Open Source, Plattform → Linux

Paramident. & Reglerauslegung → Matlab/Octave, ACADO, ...

Systemsimulation → Modelica bzw. JModelica & Openmodelica / ProMoT & Diana, ...

CFD → OpenFoam, ...