

# Entwicklung und Validierung einer digitalen Kraftstoffregelung für einen Allison M250 Bodendemonstrator

Nils Jakobs, Martin Henke, Jan Zanger, Andreas Huber

Institut für Verbrennungstechnik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)



## 1. Hintergrund

- M250 Prüfstand mit Motor-Generator Unit und Lastmaschine am Institut für Verbrennungstechnik des DLR
- Experimentelle Demonstration und Systemanalyse verschiedener Antriebskonzepte möglich
  - Water Enhanced Turbofan (WET) Konzept
  - Hybrid-elektrische Luftfahrtkonzepte mit Gasturbine (HEP)
  - Emulation der Kopplung von Gasturbine mit Brennstoffzelle
- Kreislaufmodifikationen können Instabilitäten bei der integrierten hydromechanischen Regelung der Maschine verursachen
- Entwicklung einer digitalen Kraftstoffregelung für M250 Prüfstand notwendig

## 2. Ziele

- Zumessung des Brennstoffmassenstroms für konstante Arbeitswellendrehzahl  $N_2$  während des above-idle Betriebs bei verschiedenen Laststufen
- Flexibles Umschalten zwischen hydromechanischem und digitalem Regler während des Betriebs möglich
- Parallele Integration der Regelung um Modifikationen an der Mechanik des Triebwerks zu verhindern
- Freie Wahl von Regelalgorithmen und -parametern zur Untersuchung neuartiger Triebwerkskonfigurationen und Regelkonzepten

## 3. Prüfstand

### Gasturbinen-Genset

- M250-C20B Helikoptergasturbine
  - Wellenleistungstriebwerk: 313 kW @ Take-off
  - Gasgenerator:
    - Verdichter: 6x axial/1x radial; Turbine: 2x axial, Lastturbine 2x axial
- Gear box
- Generator-Umrichter-Einheit ( $U_{out} = 400 - 800$  VDC)
- Kompakter Aufbau zur Integration in fliegende Versuchsplattform geeignet (2,5 kW/kg @ 122kg)

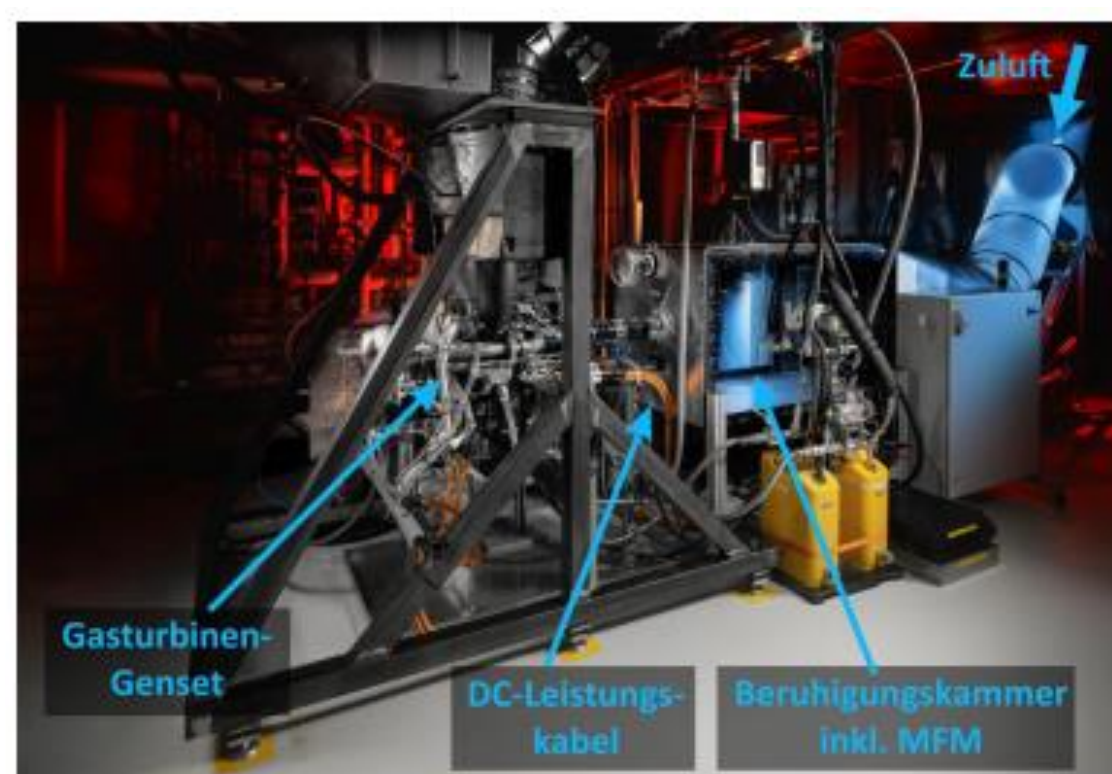


Abb. 1a: Gasturbinen-Genset integriert in Prüfstandsperipherie

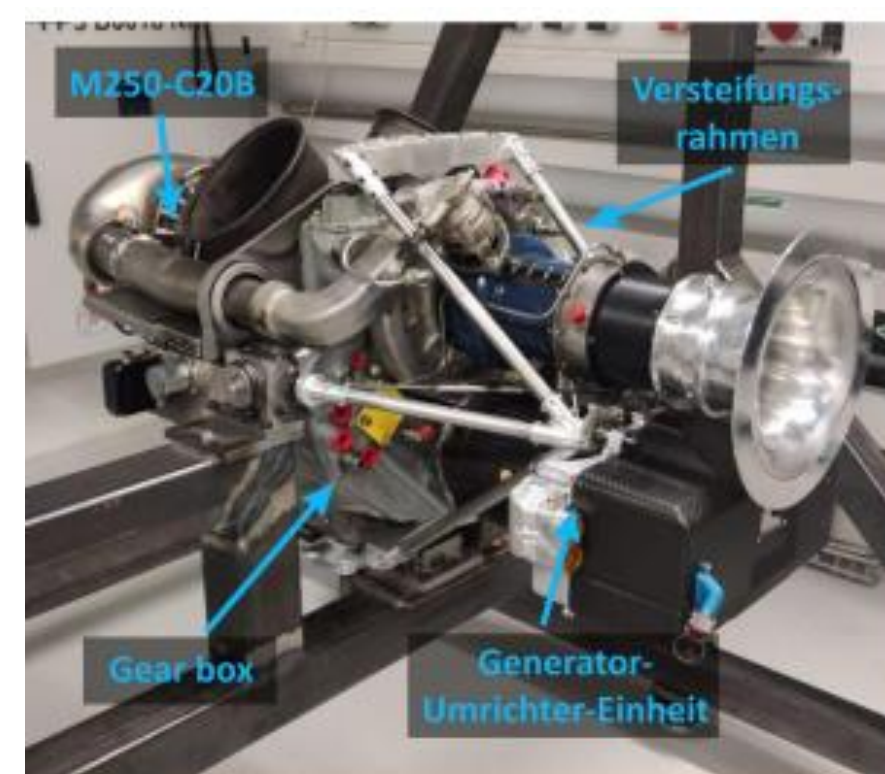


Abb. 1b: Gasturbinen-Genset

## 4. Entwicklung digitale Kraftstoffregelung (FCS)

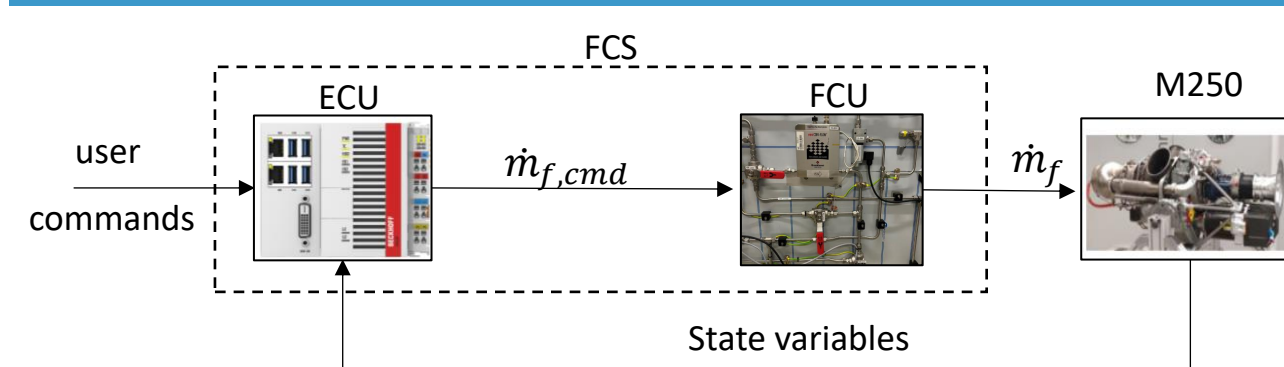


Abb. 2a: Aufbau digitale Kraftstoffregelung (FCS)

FCS besteht aus:

- Electronic Control Unit (ECU): Berechnung des Kraftstoffs
- Fuel Control Unit (FCU): Zumessen des Kraftstoffs zum M250 Triebwerk



Abb. 2b: Vorgehen Entwicklung der digitalen Treibstoffregelung

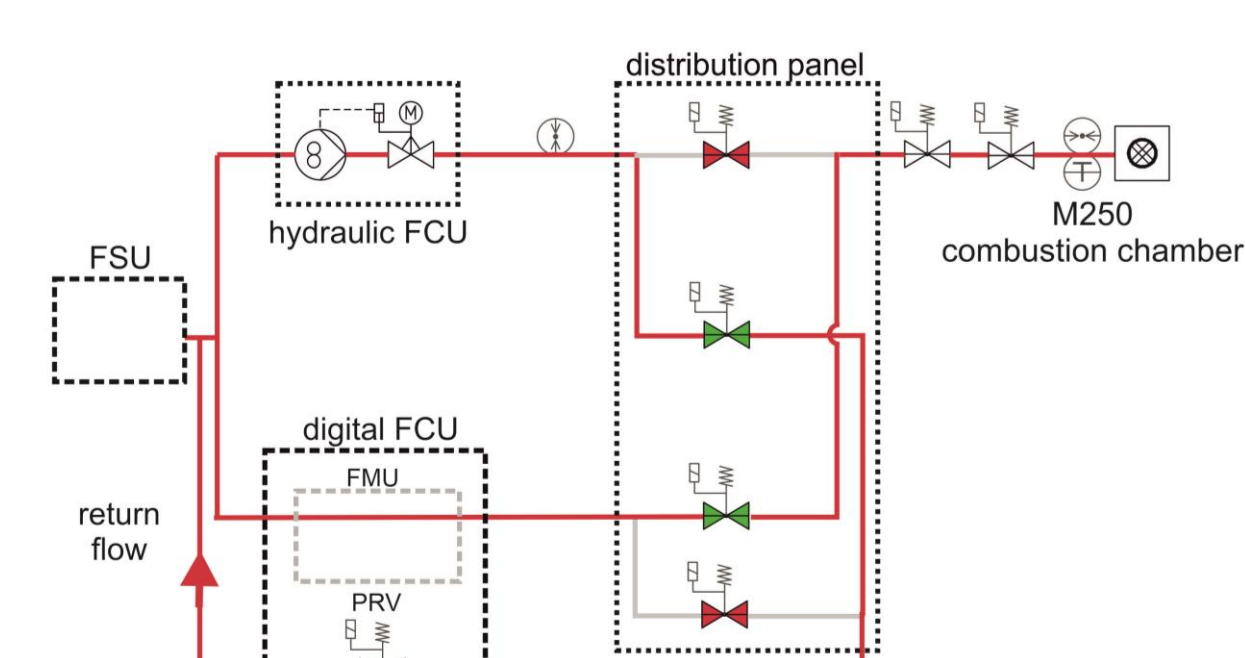


Abb. 3a: Einbindung der digitalen FCU in M250-Treibstoffversorgung

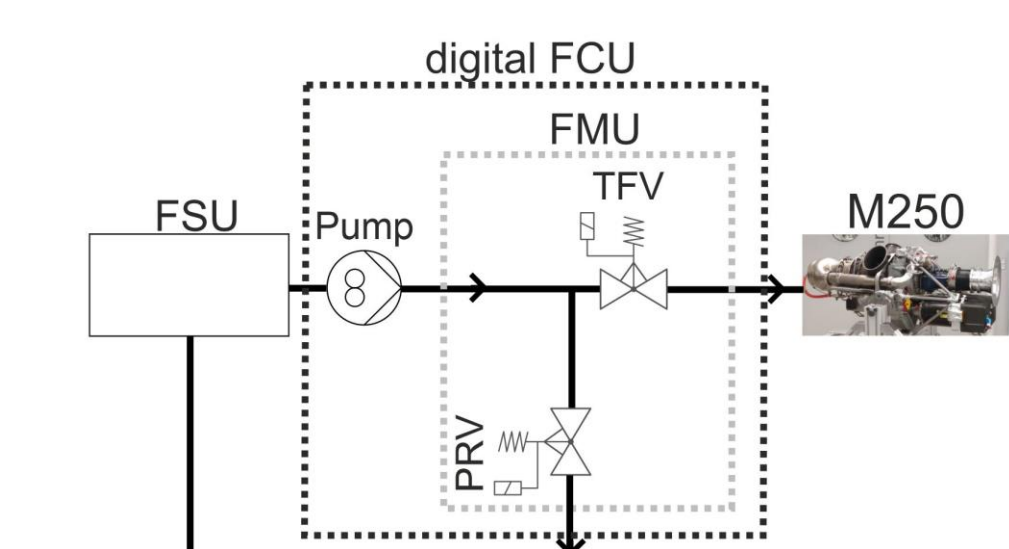


Abb. 3b: Detailsansicht Zumesseinheit (FMU)

- Anbindung an Treibstoffversorgung des Labors (FSU)
- Rezirkulation des nicht benötigten Brennstoffstrangs
- Umschaltung zwischen interner Kraftstoffregelung und digitaler Kraftstoffregelung während des Betriebs durch Distribution Panel und Druckbegrenzungsventil (PRV) in Rücklauf möglich
- Einstellung von Massenstrom und Druck über Drossel (TFV)- und Druckbegrenzungsventil (PRV) in Zumesseinheit (FMU) über Düsencharakteristik

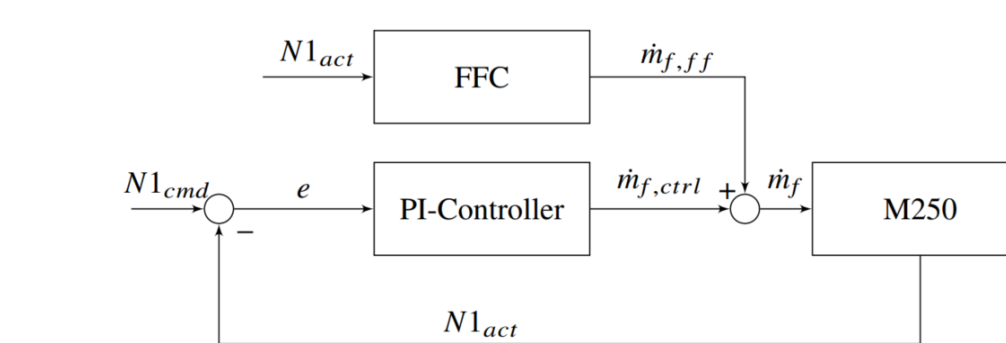


Abb. 4a: Reglerstruktur für sub-idle Betrieb

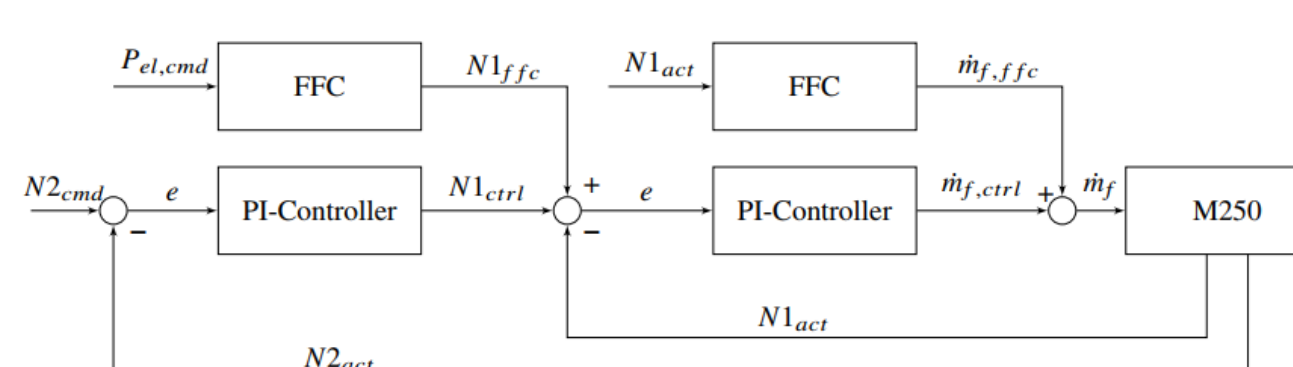


Abb. 4b: Reglerstruktur für above-idle Betrieb

Zweistufige Regelung:

- Arbeitswellendrehzahl  $N_2 < N_{2,thres}$ : PI Regler mit Vorsteuerung für Regelung auf Gasgeneratordrehzahl  $N_1$  zum Beschleunigen des Triebwerks im sub-idle Bereich
- $N_2 > N_{2,thres}$ : Kaskadenregelung mit zwei PI-Reglern mit Vorsteuerung für Regelung auf konstanter  $N_2$ -Drehzahl im above-idle Bereich

## 4. Hardware-in-the-Loop Aufbau

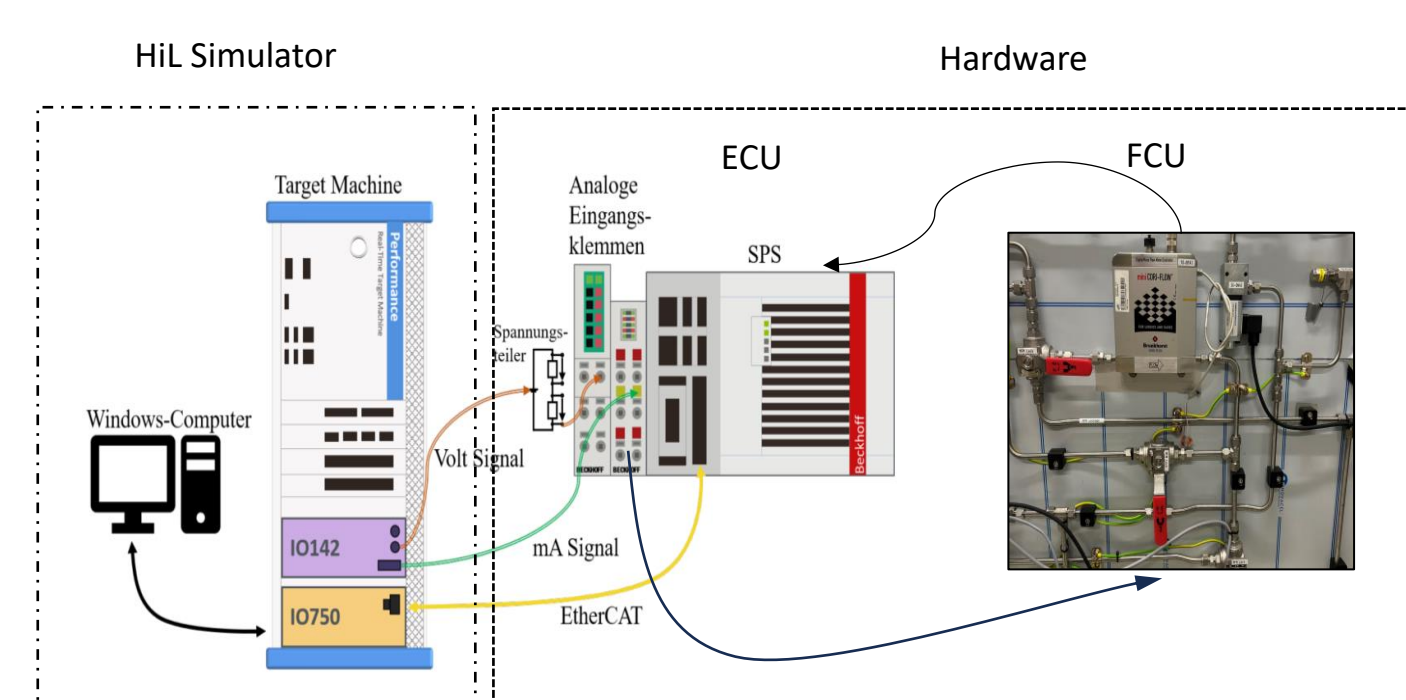


Abb. 5a: Hardware-in-the-Loop (HiL) Aufbau

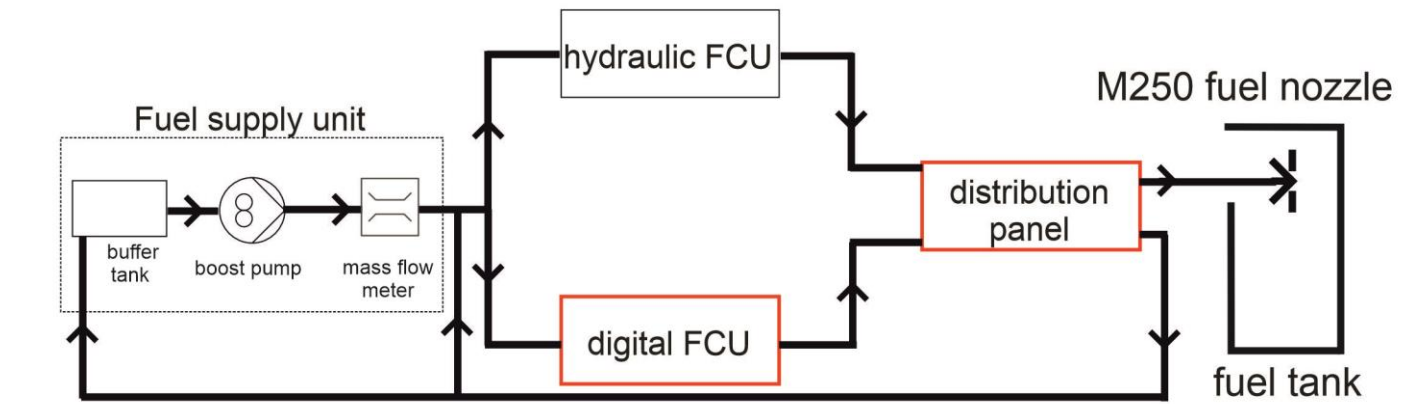


Abb. 5b: vereinfachtes R&I Schema der HiL Versuche

## 5. Hardware-in-the-Loop Simulationen

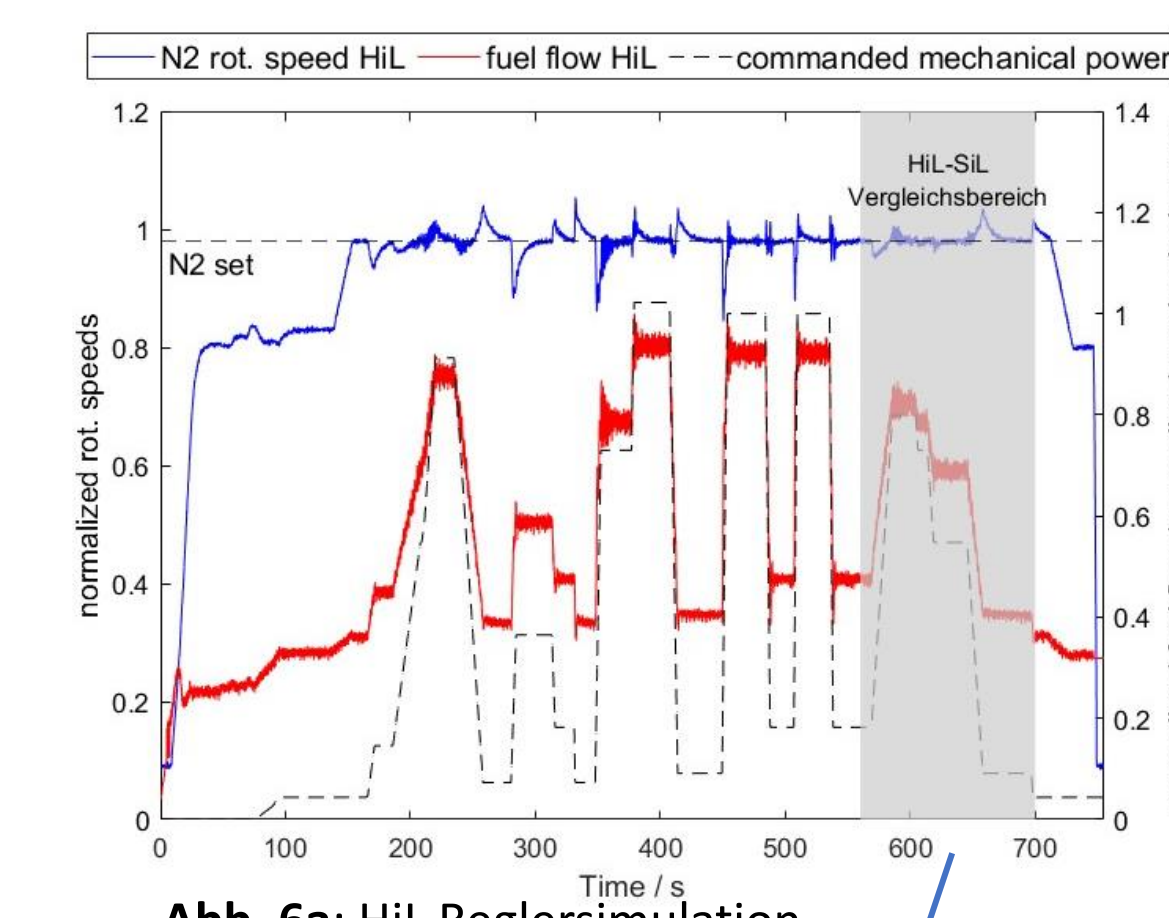


Abb. 6a: HiL Reglersimulation

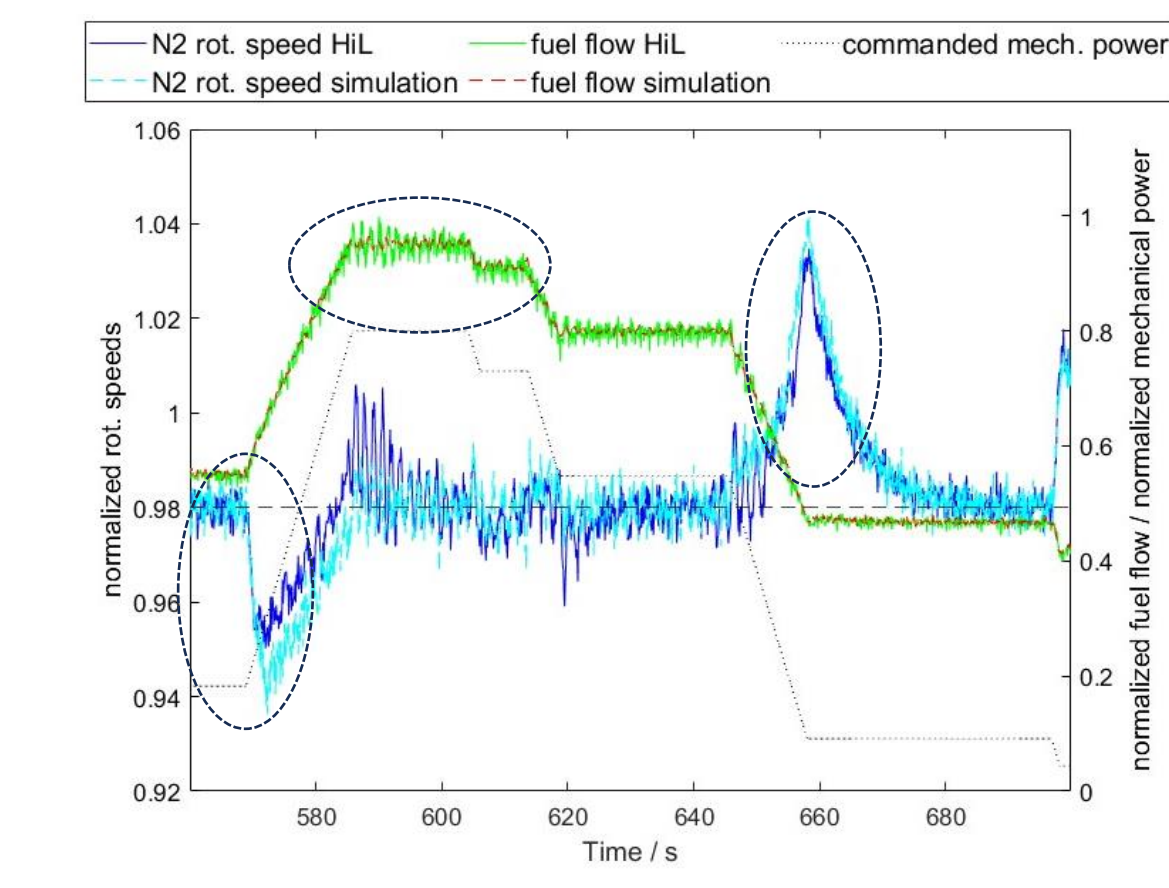


Abb. 6b: Vergleich HiL und SiL Simulationen

- Testen der Regelung mit HiL Simulationen unter Echtzeitbedingungen
  - Stabilität des Regler auch bei Lastgradienten größer als im Prüfstandsbetrieb gegeben
  - Ähnliches dynamisches Verhalten zwischen Software-in-the-Loop (SiL) und HiL
  - Geringfügig höhere Oszillationen im Brennstoffmassenstrom in HiL Tests
- Validierung des Reglers für breites Parameterspektrum durch SiL mittels Domain Randomization

## 6. Domain Randomization

Parameter	Variation	Einheit
$u_{LP,PT}$	0.85; 1.15	-
$u_{HP,PT}$	0.85; 1.15	-
$\frac{dP_{mech,cmd}}{dt}$	3;10;20	$kW s^{-1}$

Tab.1: Parameter für Domain Randomization

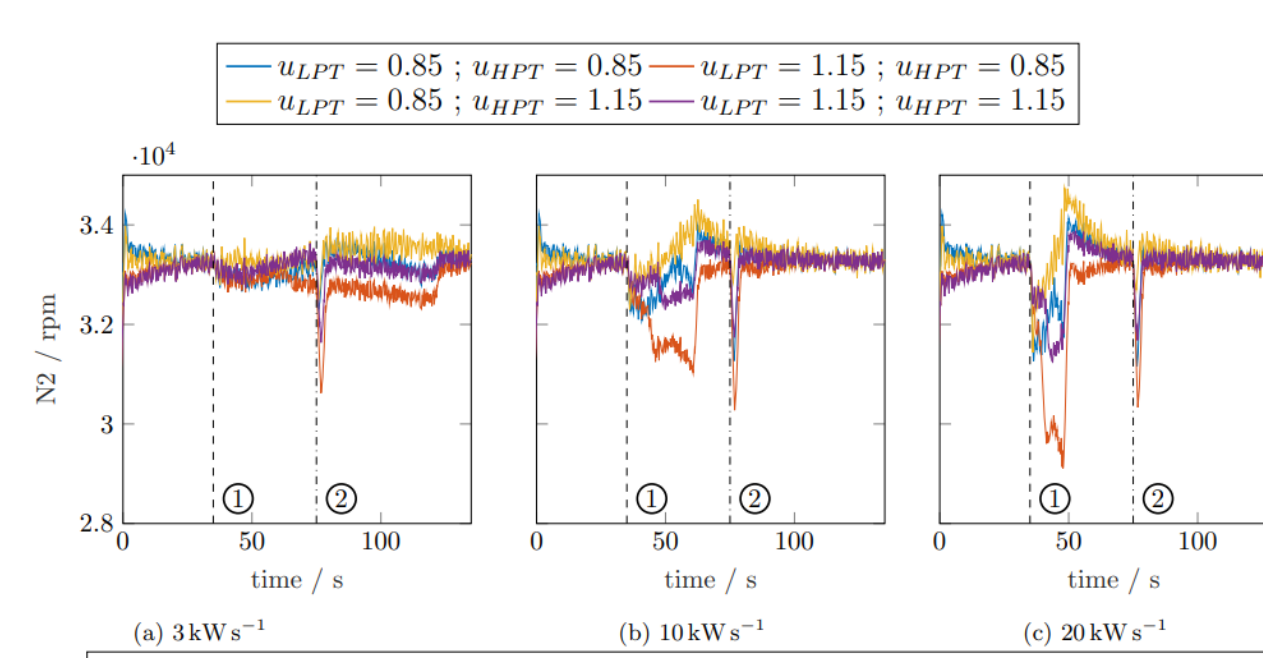


Abb. 7: Domain Randomization Ergebnisse

Berücksichtigung von Modellunsicherheiten mittels Domain Randomization zur Garantie der Reglerstabilität:

- Variation der Lastgradienten
- Berücksichtigung von Unsicherheiten im Wirkungsgrad  $\eta$  von Hoch- und Niederdruckturbine durch Faktor  $u_{fac}$  ( $\eta_{component} = \eta_{map} * u_{fac}$ )

## 7. Ausblick

- Tests der digitalen Kraftstoffregelung auf realer Maschine
- Implementierung von fortgeschrittenen Regelungsstrategien (MPC)
- Integration von Dampf und Wasserstoff in Systemkreislauf

Gefördert durch das BMKW unter der Fördernummer 20M2110B in LuFo VI-2 und zusätzliche Förderung durch das DLR interne Vorhaben Kraftstoffe.

Gefördert durch:  
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz  
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

