

Modellierung und Regelung eines Temperierwasserverteilers

Durchflussregelung

**Dominik Kaserer und
Dominik Simon Pieringer**

Dipl.-Ing. Thomas Passenbrunner (Betreuung)
Dipl.-Ing. Hannes Bernhard (Betreuung)

11.07.2013

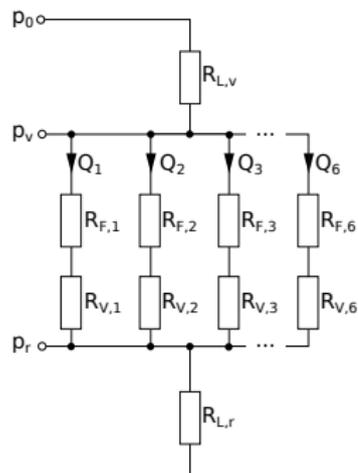
Aufgabenstellung

- Analyse und mathematische Modellierung des Temperierwasserverteilers
- Erstellung eines Simulationsmodelles in *MATLAB/Simulink* und anschließende Validation durch Messungen
- Implementierung einer Durchfluss-Regelung in der Simulation
- Entwurf einer dynamischen Regelung für unterschiedliche Arbeitspunkte und unterschiedliche Formwiderstände
- Implementierung und Test der Regelung am realen System

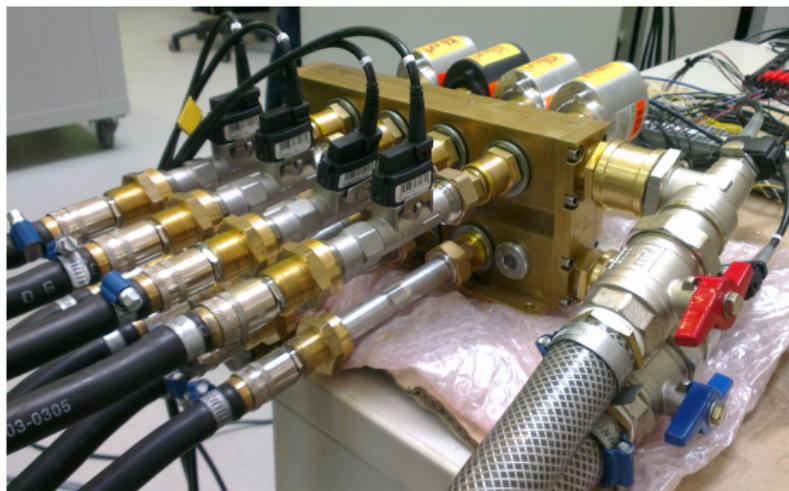
Anforderungen an das Modell

- Modularer Aufbau des Simulationsmodelles in *MATLAB/Simulink*
- Beachtung der firmeninternen Simulationsrichtlinien
- Auswahl, welcher Temperierwasserverteiler verwendet wird (4-, 6- oder 8-fache Ausführung), soll in Maske möglich sein

Analogie zum elektrischen Netzwerk



(a) Modellannahme



(b) Reales Modell

Abbildung: Darstellung des hydraulischen Netzwerkes mittels der Analogie zu einem elektrischen Netzwerk

Analogie zum elektrischen Netzwerk

Hydraulisches System	Elektrisches Netzwerk
Druck p bar	Spannung U V
Leitungswiderstand R $\frac{\text{bar min}}{\text{l}}$	Ohmscher Widerstand R Ω
Durchfluss Q $\frac{\text{l}}{\text{min}}$	Elektrischer Strom I $A = \frac{C}{s}$
- $p = R \cdot Q$	Ohmsches Gesetz $U = R \cdot I$

Tabelle: Beziehungen zwischen einem hydraulischen und einem elektrischen Netzwerk zur Verdeutlichung der Analogie

Ventilkennlinie

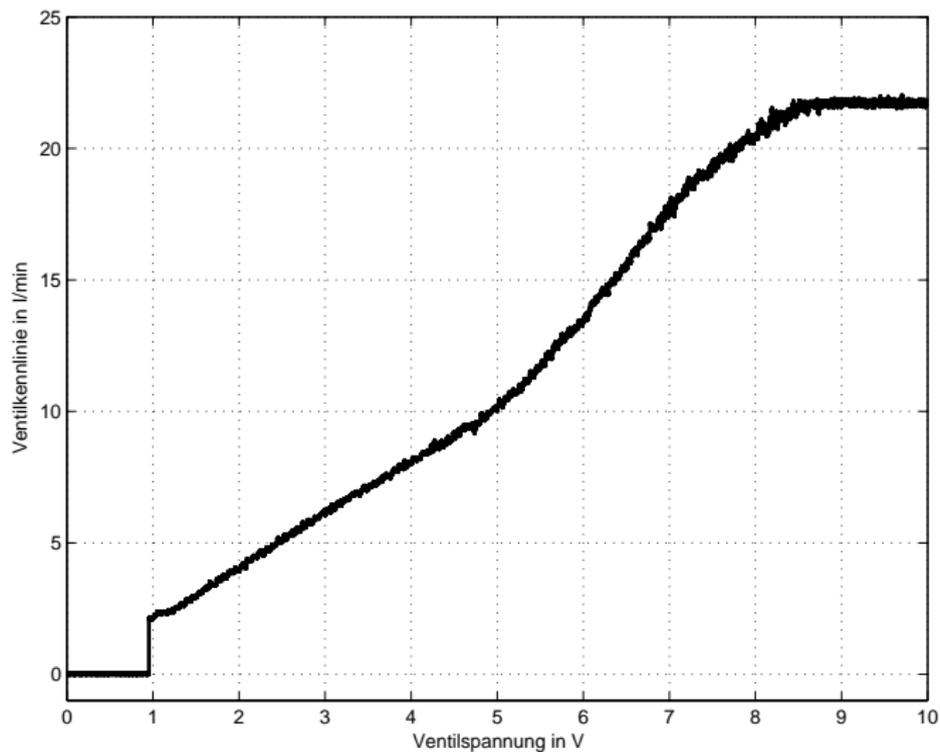
- k_V -Wert aufgetragen über der Ventilspannung ergibt Q_{LUT}
- Normierung des k_V -Wertes auf 1 bar

$$Q_{LUT} = k_V(u) = Q_{Messung}(u) \sqrt{\frac{1 \text{ bar}}{\Delta p_{Ventil, Messung}(u)}} \quad (1)$$

- Berechnung des aktuellen Durchflusses durch ein Ventil

$$Q = Q_{LUT} \sqrt{\frac{\Delta p_{Ventil}}{1 \text{ bar}}} = k_V(u) \sqrt{\frac{\Delta p_{Ventil}}{1 \text{ bar}}} \quad (2)$$

Ventilkennlinie



Implementierung der hydraulischen Widerstände

- **Abbildung von laminarer und turbulenter Strömung**
- **Einfaches Modell basierend auf Annahmen bezüglich Strömungstyp**
- **a : Konstanter Druckabfall**
- **c : Durchflussabhängiger Druckabfall**
- **R : Hydraulischer Widerstand**
- **Q : Den Widerstand durchsetzender Durchfluss**

$$R = \frac{a}{Q} + c \quad (3)$$

Modellgleichung

- Betrachtung eines Kanals
- Grundgleichung:

$$Q_1 = Q_{LUT} \sqrt{\underbrace{p_{source} - \left(\frac{a_{pipe}}{Q_{1-8}} + c_{pipe}\right) Q_{1-8} - \left(\frac{a_{mold}}{Q_1} + c_{mold}\right) Q_1}_{\sqrt{\frac{\Delta p}{1 \text{ bar}}}}}, \quad (4)$$

- Auflösung nach Durchfluss Q_1 :

$$Q_1 = \frac{-Q_{LUT}^2 c_{mold} + \sqrt{\left(Q_{LUT}^2 c_{mold}\right)^2 + 4 Q_{LUT}^2 \left(p_{source} - a_{mold} - a_{pipe} - c_{pipe} Q_{1-8}\right)}}{2} \quad (5)$$

Implementierung in *MATLAB/Simulink*

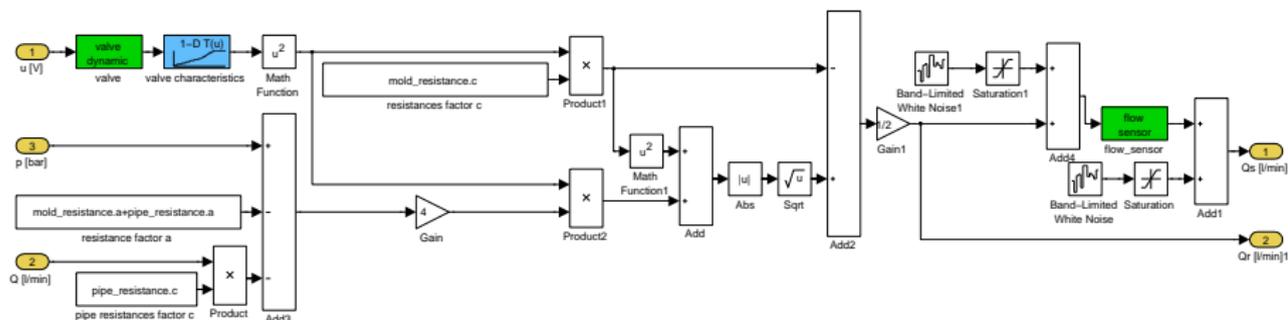
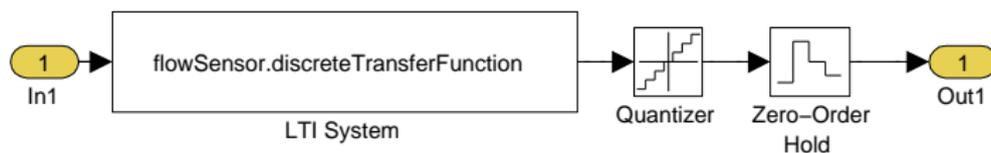


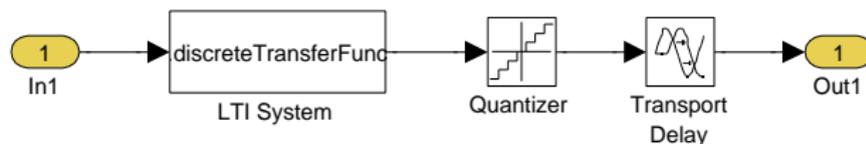
Abbildung: Implementierung der Modellgleichung in *MATLAB/Simulink*

Implementierung der Aktor- und Sensordynamik in *MATLAB/Simulink*

- Übertragungsfunktion 1. Ordnung
- Quantisierung
- Zeitverzögerung



(a) Dynamik des Durchflusssensors



(b) Dynamik des Feinreguliventils

Validation des Einkanalmodelles

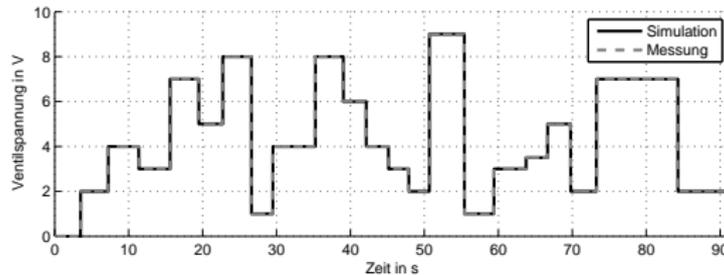
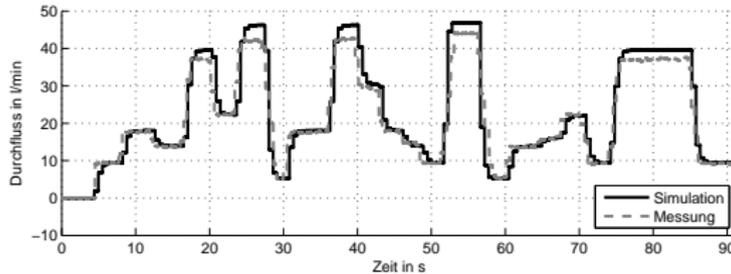


Abbildung: Simulation des Einkanalmodelles bei Anregung durch eine Referenztrajektorie

Aufbau des *flomo*-Gesamtmodelles

- Modularer Aufbau durch Zusammenschalten der Einzelkanäle
- Bildung des Gesamtdurchflusses
- Auskopplung von Kreisen mittels *Gain*
- Auswahl des Temperierwasserverteilers (4, 6 oder 8 Kreisläufe) in der Maske

Aufbau des *flomo*-Gesamtmodelles

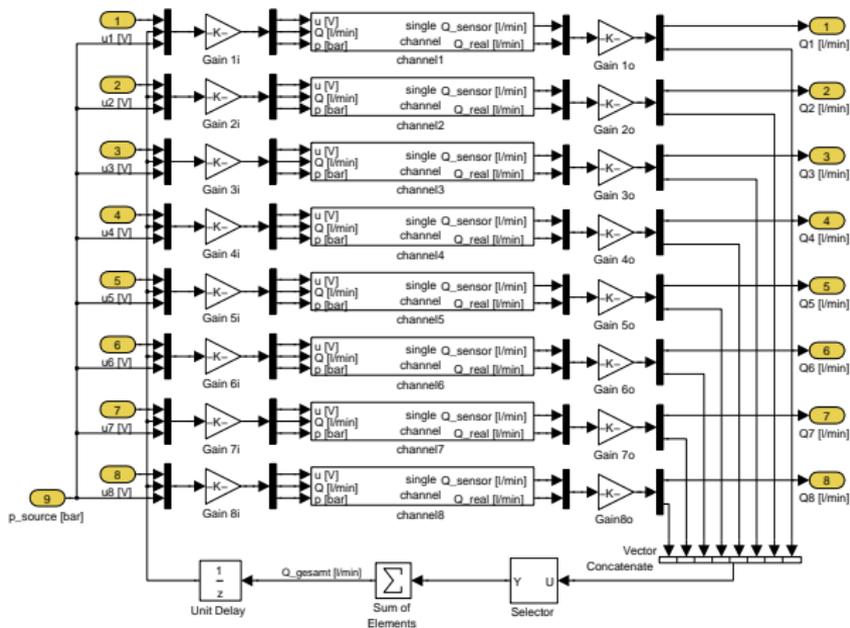


Abbildung: Implementierung des *flomo*-Systems in MATLAB/Simulink



Validation des *flomo*-Gesamtmodelles

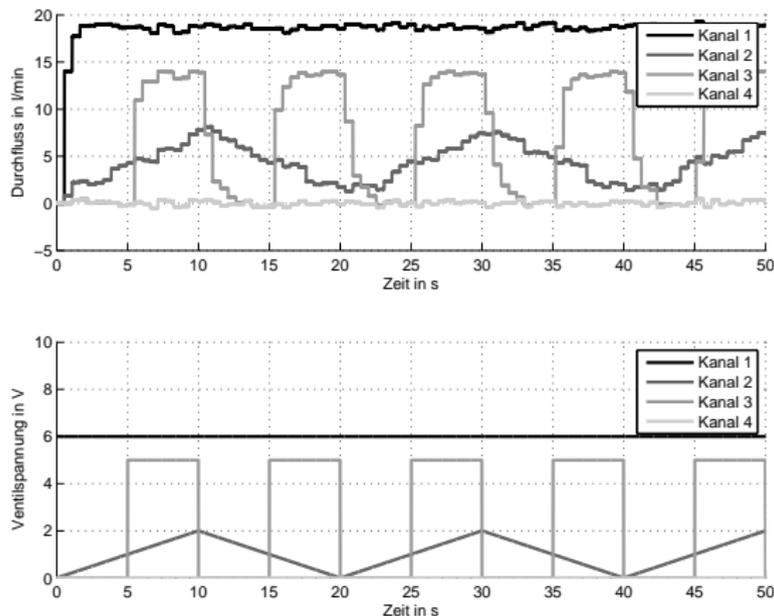


Abbildung: Simulation eines 4-fach Temperierwasserverteilers mit Formwiderständen

Validation des *flomo*-Gesamtmodelles

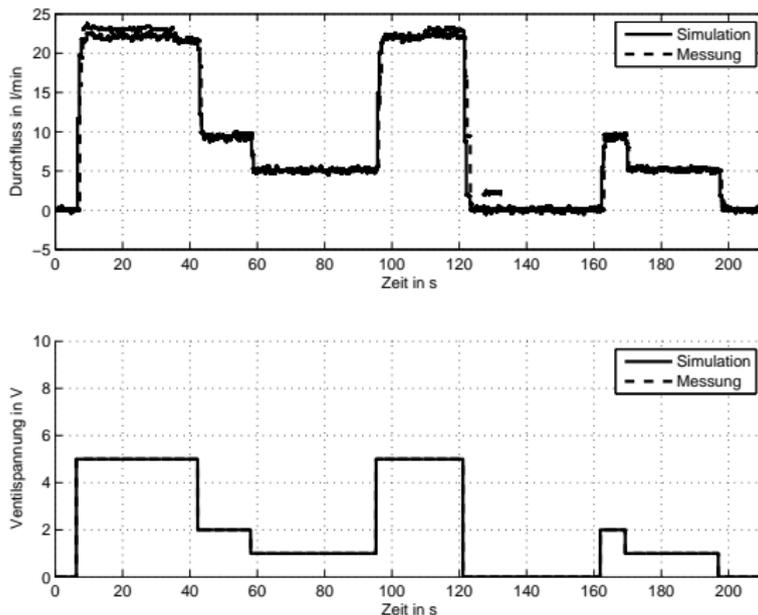


Abbildung: Vergleich der Messergebnisse mit den Ergebnissen aus der Simulation im Kanal 1

Validation des *flomo*-Gesamtmodelles

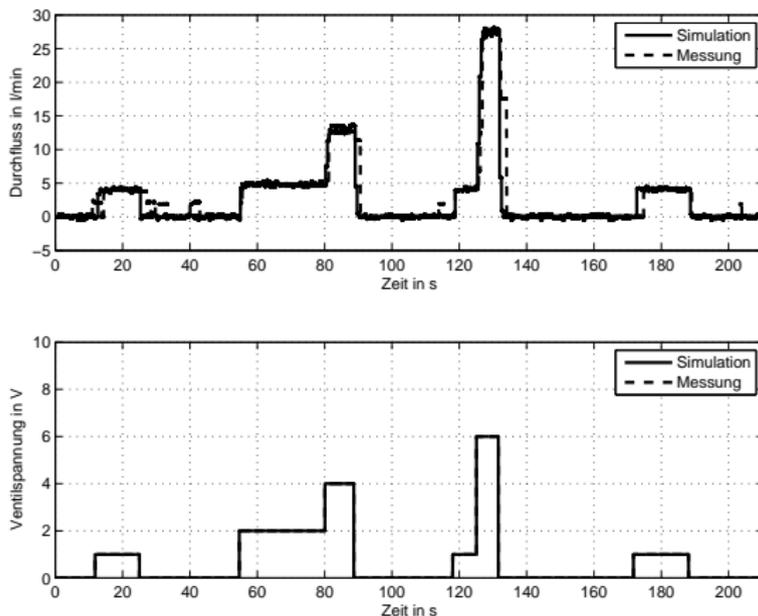


Abbildung: Vergleich der Messergebnisse mit den Ergebnissen aus der Simulation im Kanal 2

Validation des *flomo*-Gesamtmodelles

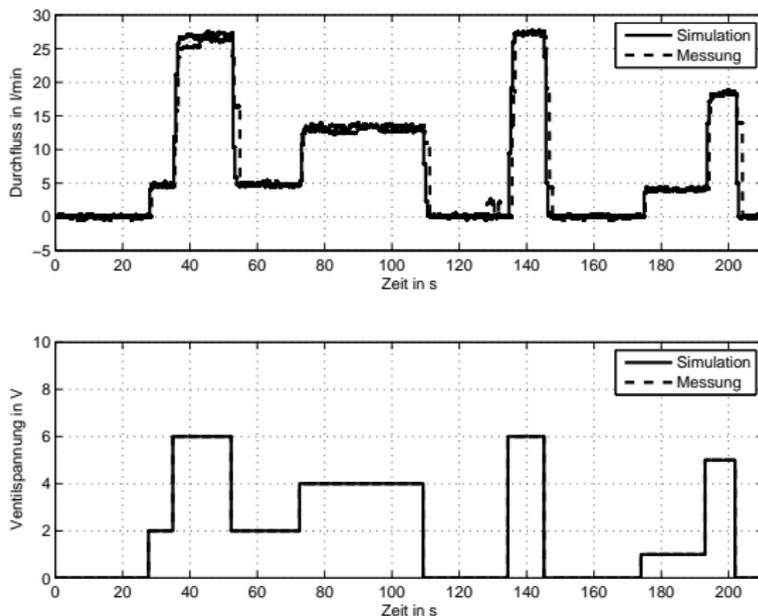


Abbildung: Vergleich der Messergebnisse mit den Ergebnissen aus der Simulation im Kanal 3

Validation des *flomo*-Gesamtmodelles

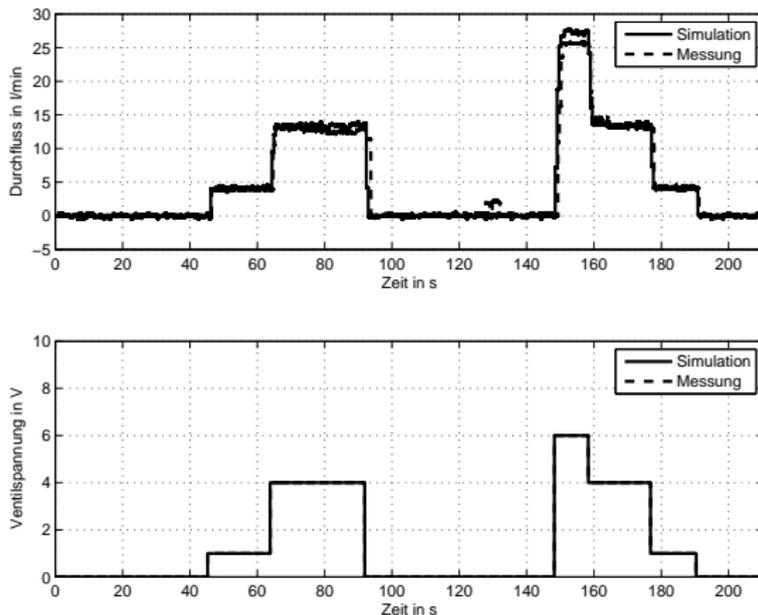


Abbildung: Vergleich der Messergebnisse mit den Ergebnissen aus der Simulation im Kanal 4

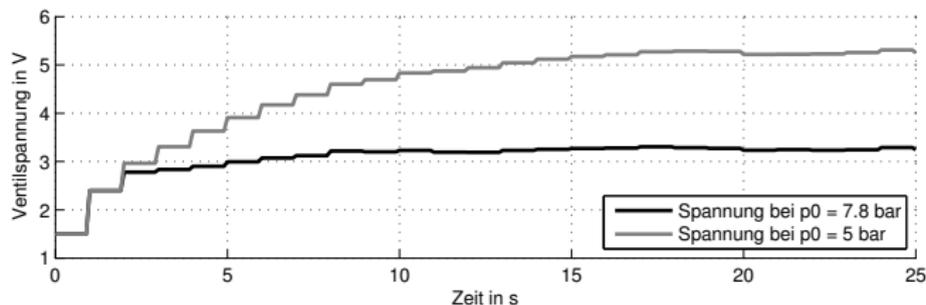
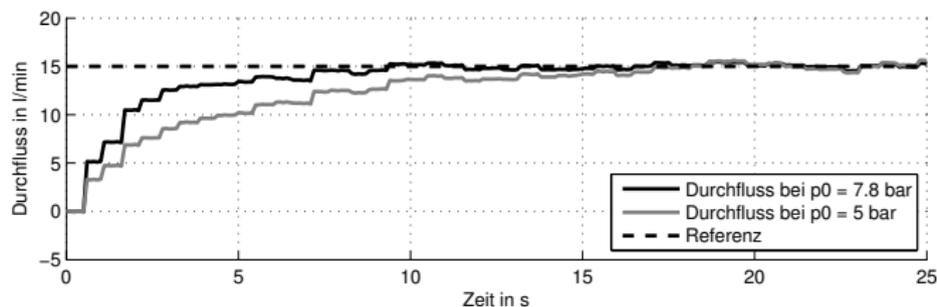
Anforderungen an die Regelung

- Die Regelung soll so einfach wie möglich ausgeführt werden
- Stationäre Genauigkeit
- Einschwingdauer $< 15\text{ s}$ bei einem Sollwertsprung im Durchfluss von 0% auf 50%
- Einschwingdauer $< 15\text{ s}$ bei Schwankungen des Versorgungsdruckes
- Robustheit der Regelung gegen eine Totzeit in der Rückkopplung von $1 \dots 2\text{ s}$

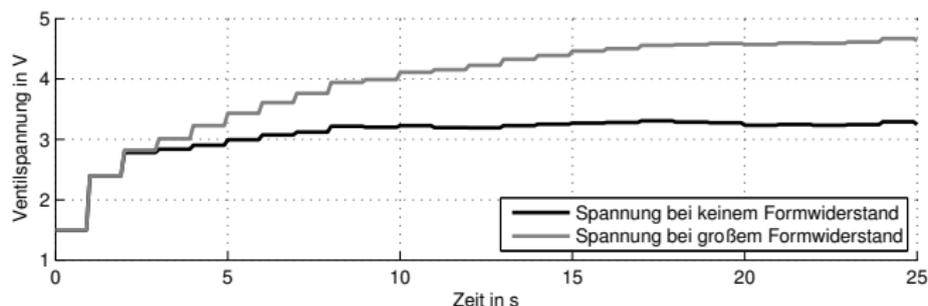
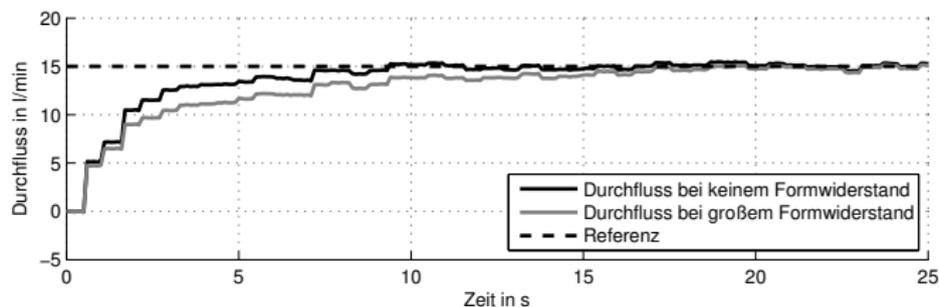
Einflussgrößen auf die Regelung

- Nichtlineare Ventilkennlinie
- Unterschiedliche Arbeitspunkte auf der Ventilkennlinie
- Versorgungsdruck
- (in der Praxis unbekannt) Lastwiderstände
- (in der Praxis unbekannt) Leitungswiderstände
- Quervereinflussung
- Totzeit

Abhängigkeit des geregelten Systems von Leerlaufdruck



Abhängigkeit des geregelten Systems vom Formwiderstand

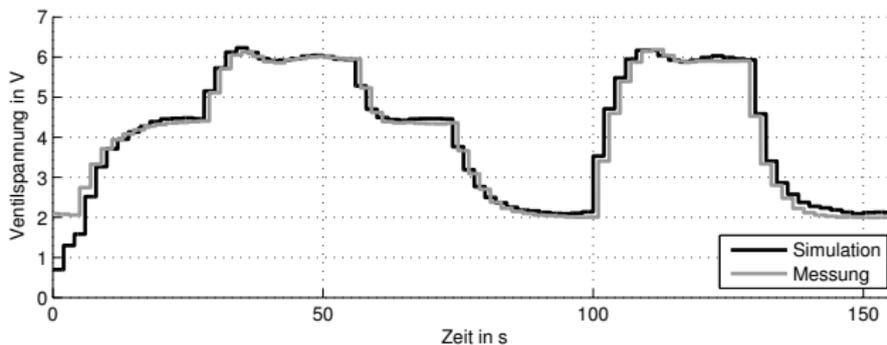
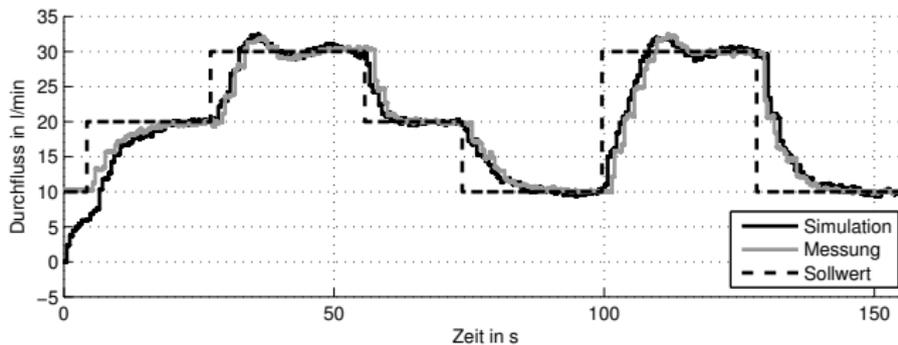


Ansatz: PI-Regelung

- **Auslegung von PI-Reglern für die Vorlaufdrücke 7.8 bar, 7 bar, 6 bar, 5 bar und 4 bar**
- **Auslegung der obigen PI-Regler für 1 s und für 2 s Totzeit**
- **Abhängigkeit der Reglerparameter vom Leerlaufdruck**
- **Simulation: Leerlaufdruck vorhanden**
- **Praxis: Bestimmung des Leerlaufdruckes über**
 $p_0 = p_v + R_{L,v} Q_{ges}$ (eventuell Abschätzung des nicht bekannten Leerlaufdruckes mit dem gemessenen Vorlaufdruck)
- **Regelgesetz:**

$$u_k = P e_k + I \left(\sum_{i=0}^k e_i \right) \quad (6)$$

Validierung des PI-Regler



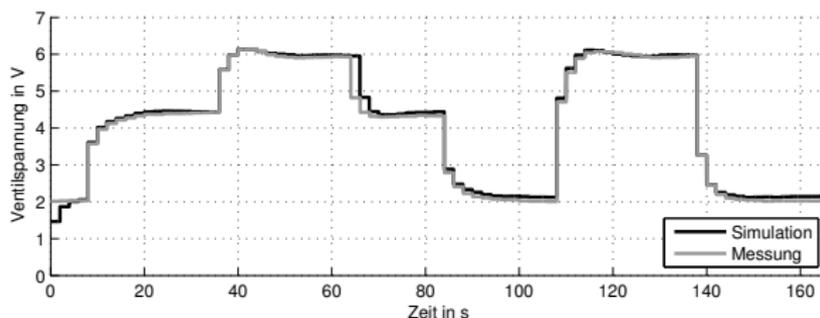
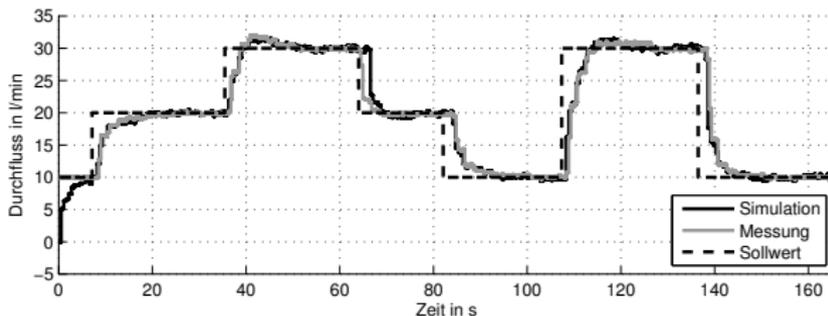
Erweiterung durch Arbeitspunktaufschaltung

- **Modellgleichung:** $Q(u) = Q_{LUT} \sqrt{\frac{\Delta p}{1 \text{ bar}}} = f(u) \sqrt{\frac{\Delta p}{1 \text{ bar}}}$
- **Arbeitspunktaufschaltung:** $u = f^{-1} \left(\frac{Q_{ref}}{\sqrt{\frac{\Delta p}{1 \text{ bar}}}} \right)$
- **Regelgesetz**

$$u_k = P e_k + I \left(\sum_{i=0}^k e_i \right) + \frac{1}{2} f^{-1} \left(\frac{Q_{ref,k}}{\sqrt{\frac{p_{v,k} - p_{r,k}}{1 \text{ bar}}}} \right) \quad (7)$$

- **Funktioniert sehr gut, wenn die Druckdifferenz über dem Ventil bekannt ist**
- **Praxis: Nur Summe der Druckdifferenzen über Formwiderstand und Ventil bekannt**
- **Bevorzugter Regler, wenn die Druckdifferenz über dem Ventil geschätzt werden kann**

Validierung des PI-Regler mit Arbeitspunktaufschaltung



zusätzliche Berücksichtigung der Formwiderstände

- Idee: Schätzung der Druckdifferenz aus:

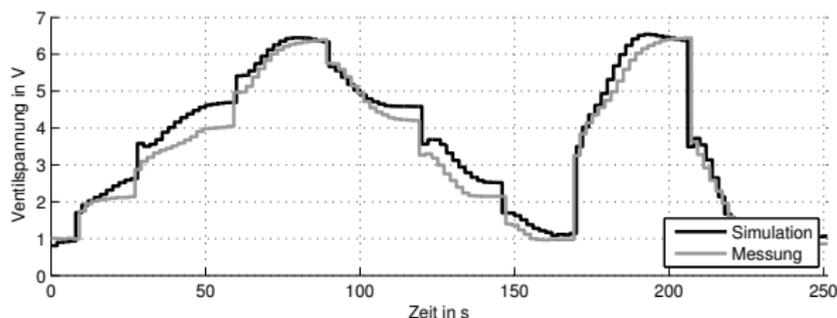
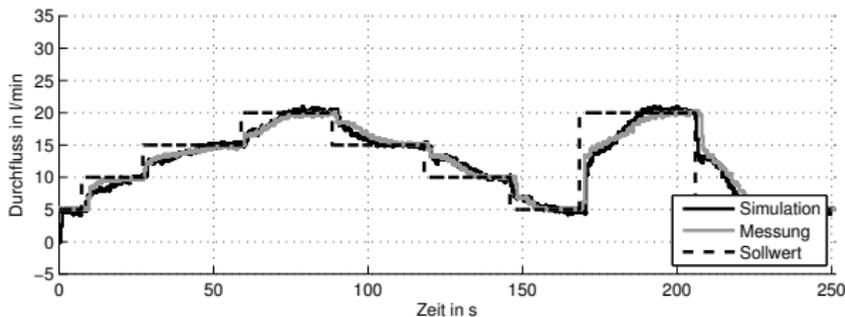
$$\Delta p = \left(\frac{Q_{ref}}{f(u)} \right)^2 1 \text{ bar} = \left(\frac{Q_{ref}}{Q_{LUT}} \right)^2 1 \text{ bar}$$

- Regelgesetz:

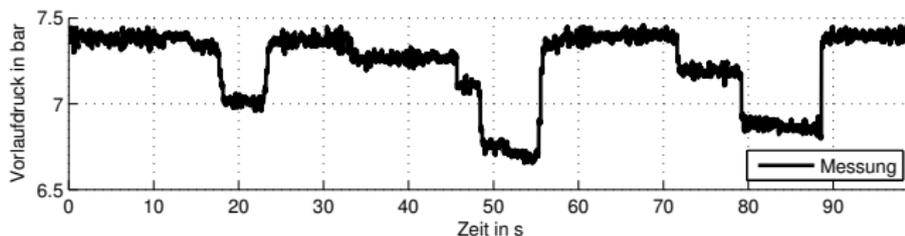
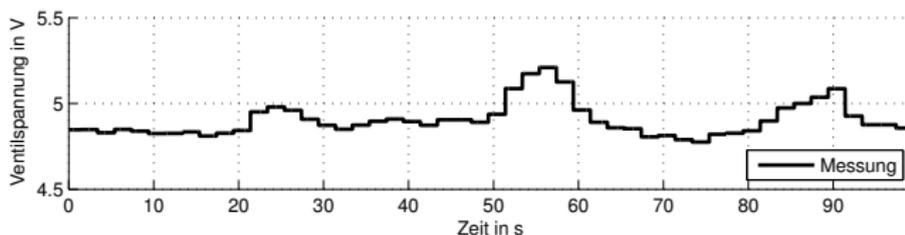
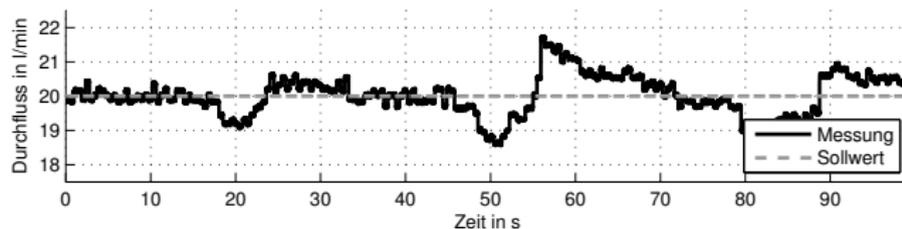
$$u_k = P e_k + I \left(\sum_{i=0}^k e_i \right) + \frac{1}{2} u_{k-1} \quad (8)$$

- Wenn die Druckdifferenz über dem Ventil aus einer anderen Beziehung ermittelt werden kann, ist der Regler (7) zu bevorzugen.
- Regler (8) wurde für die weiteren Simulationen gewählt, da das Zeitverhalten beim Vorhandensein von Formwiderständen am günstigsten ist.

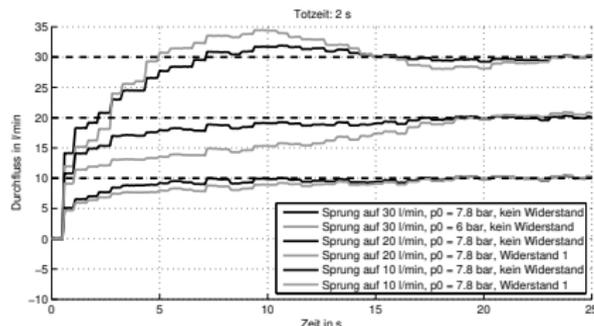
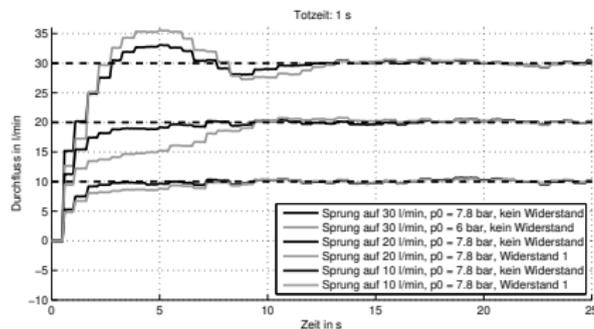
Validierung unter zusätzlicher Berücksichtigung der Formwiderstände



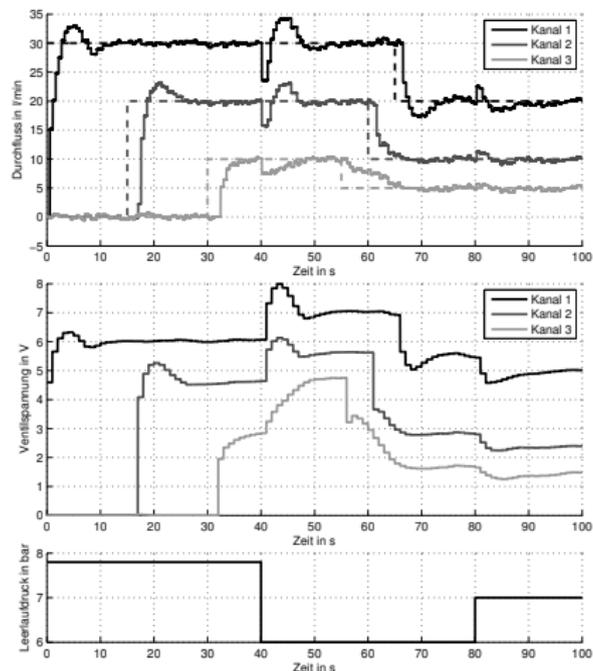
Reaktion auf Druckschwankungen



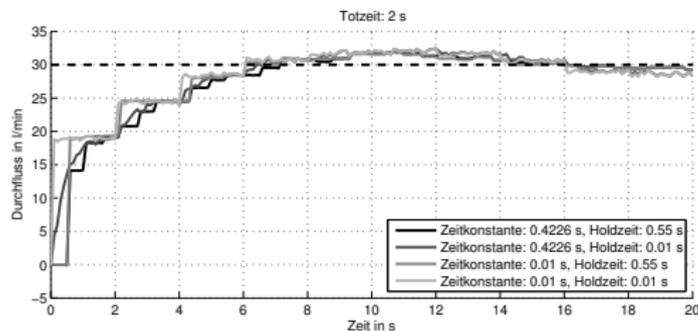
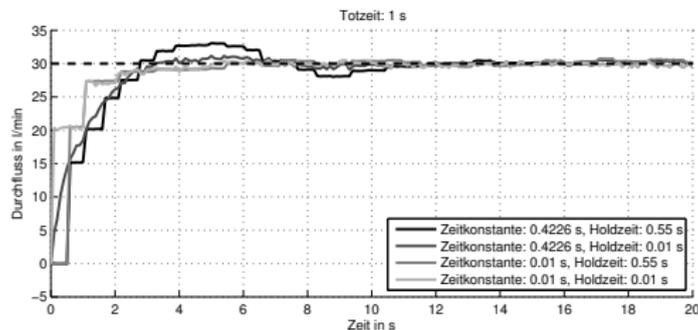
Simulationsergebnis: Einschwingdauer



Simulationsergebnis: Querbeeinflussung



Parametervariation



Zusammenfassung

- Verhalten des *MATLAB/Simulink* Modells stimmt mit Verhalten des realen Systems gut überein
- Messwerte konnten mit *MATLAB/Simulink* Modell reproduziert werden
- Regelung am realen System und Regelung des *MATLAB/Simulink* Modells stimmen gut überein
- Regelung wird langsamer, wenn größere Formwiderstände vorhanden sind

Ausblick

- **Onlineidentifikation von Leitungs- und Formwiderständen**
- **Berücksichtigung der identifizierten Formwiderstände in der Regelung**
- **Verwendung der Temperaturmessungen und der Durchflussregelung zur Realisierung einer Wärmemengenregelung**

Danke für die Aufmerksamkeit!