

## Bachelorarbeit

# Regelung eines Prüfstands zur Vermessung von Kühlwasserdüsen

Felix Lindlbauer

Betreuer:

Dipl.-Ing. Thomas Schwarzgruber

Dr. Harald Waschl

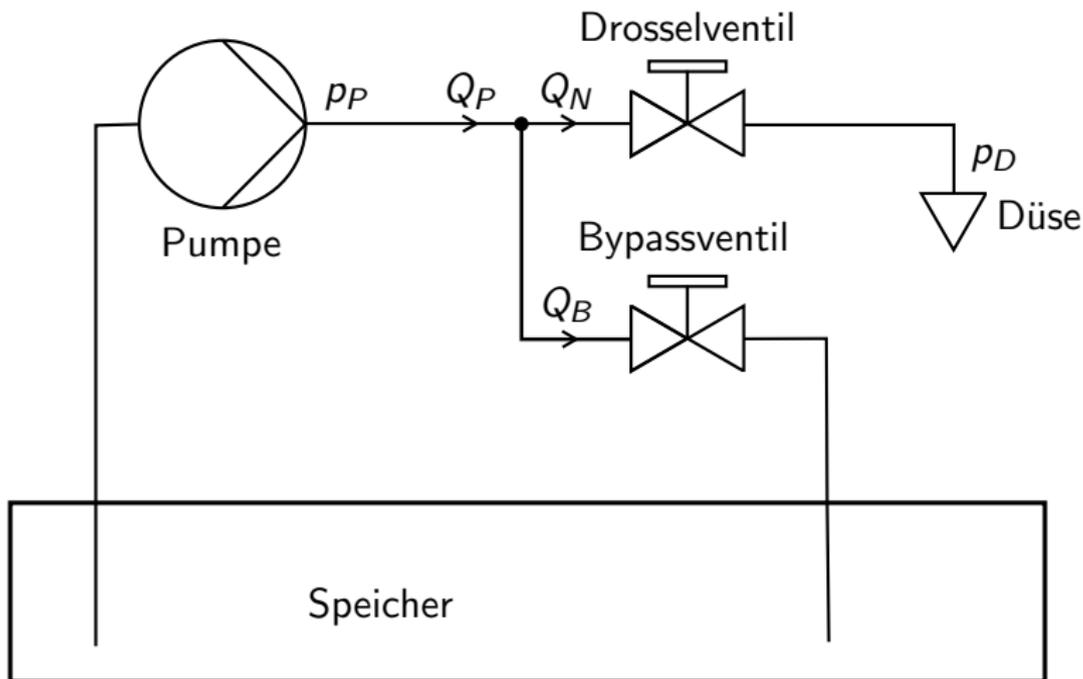
## Einführung

- ▶ Am Prüfstand wird eine Düse mit unbekannter Charakteristik aufgespannt.
- ▶ Bei konstantem Düsendruck wird das Strahlbild der Düse ermittelt. Zusätzlich wird eine Druck- Durchflusskennlinie aufgenommen.
- ▶ Die Messung wird mit verschiedenen Druckwerten wiederholt.

## Aufgabenstellung

- ▶ Verbesserung der bestehenden Druckregelung hinsichtlich kürzerer Anstiegszeiten
- ▶ Problem: Änderung des Systems bei Vermessung verschiedener Düsen

## Analyse des Systems I



## Analyse des Systems II

### Messgrößen

- ▶ Pumpendruck  $p_P$
- ▶ Düsendurchfluss  $Q_N$
- ▶ Düsendruck  $p_D$

### Regelgröße

- ▶ Düsendruck

### Stellgrößen

- ▶ Drosselventilstellung
- ▶ Bypassventilstellung
- ▶ Pumpenfrequenz

## Pumpe

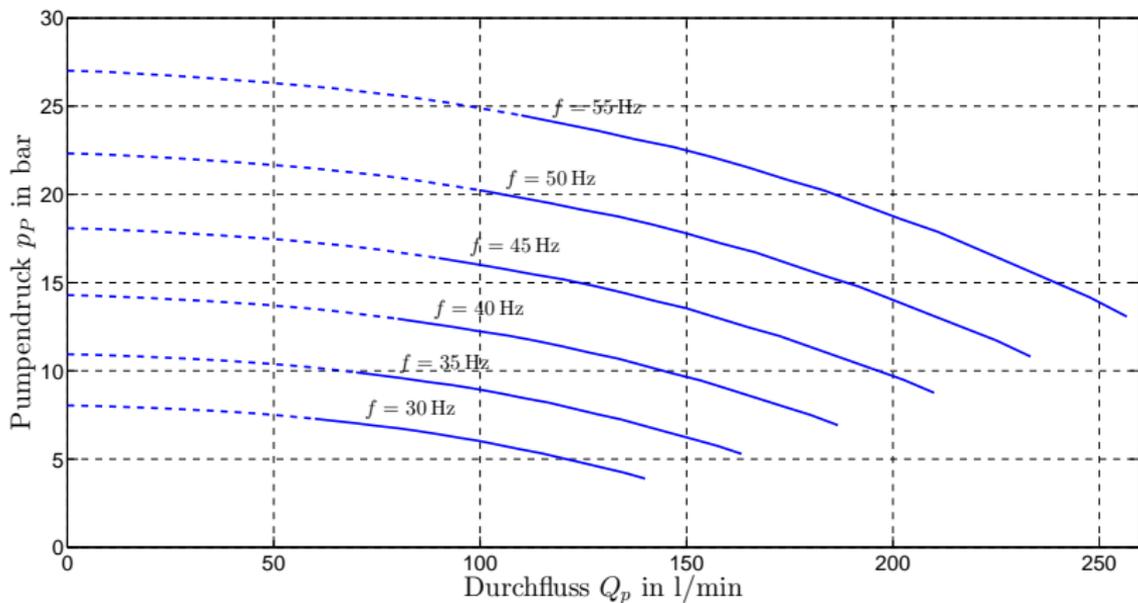
- ▶ Kreiselpumpe mit Frequenzumrichter zur Drehzahlsteuerung
- ▶ Bei Drehzahländerung gelten die Ähnlichkeitsbeziehungen:

$$\frac{Q_{P,1}}{Q_{P,2}} = \frac{n_1}{n_2}$$

$$\frac{p_{P,1}}{p_{P,2}} = \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2$$

$$\frac{P_{P,1}}{P_{P,2}} = \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^3$$

# Pumpenkennlinie



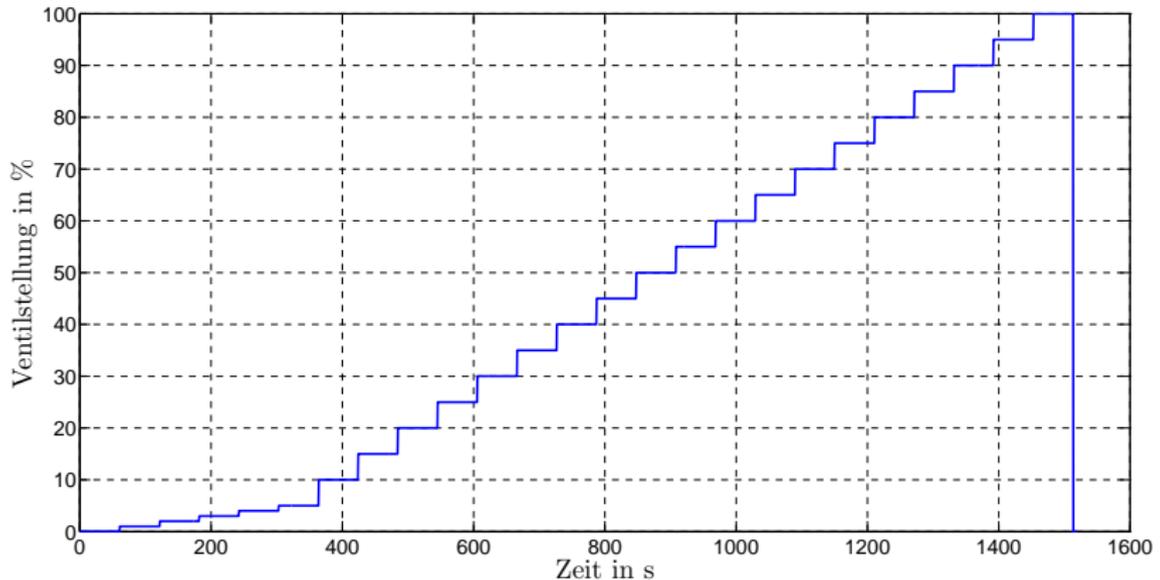
## Drosselventil

- ▶ Durchfluss ist abhängig vom Druckabfall über Ventil und von Ventilstellung
- ▶ Die Blendengleichung beschreibt den Zusammenhang zwischen Druck und Durchfluss an einer Drosselstelle

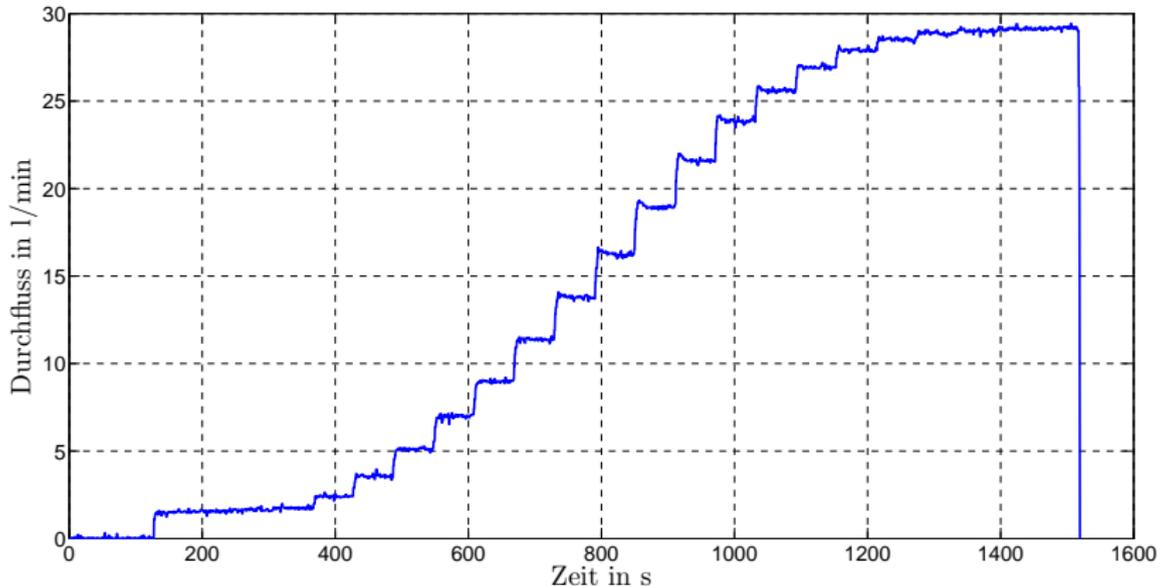
$$Q_N = k_v \sqrt{p_P - p_D}$$

$k_v$ ...Durchflussfaktor

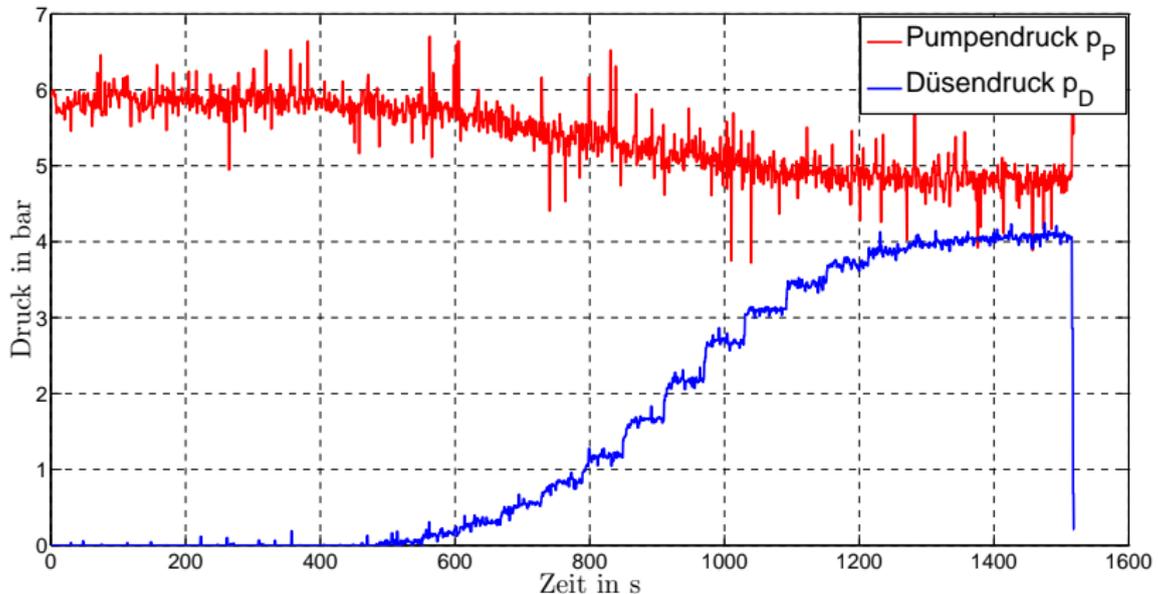
## Drosselventil - Identifikation I



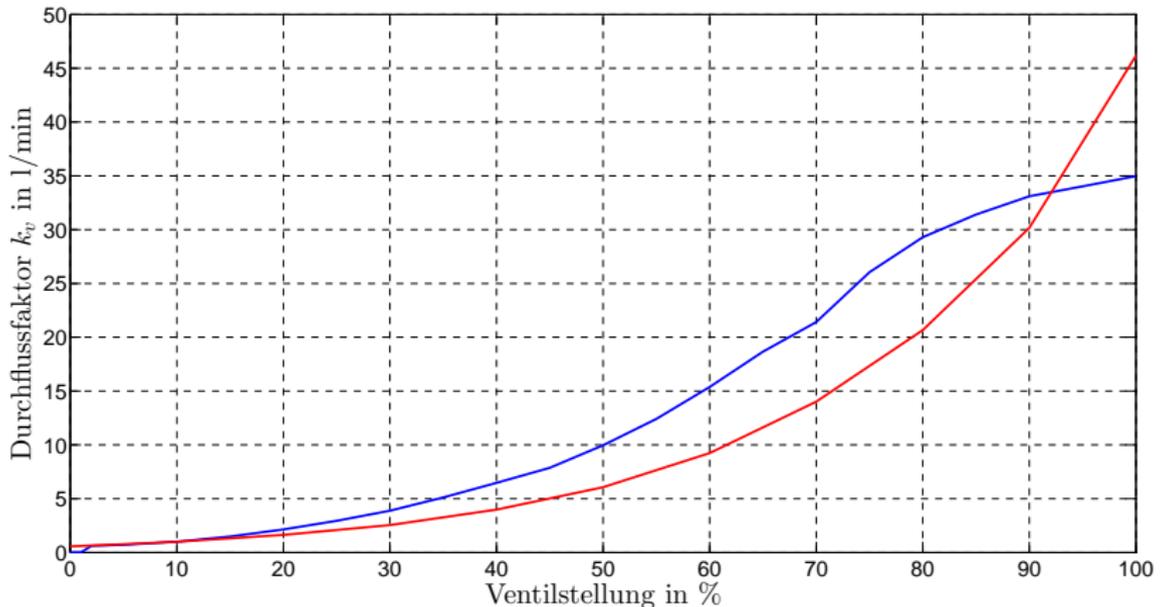
## Drosselventil - Identifikation II



## Drosselventil - Identifikation III

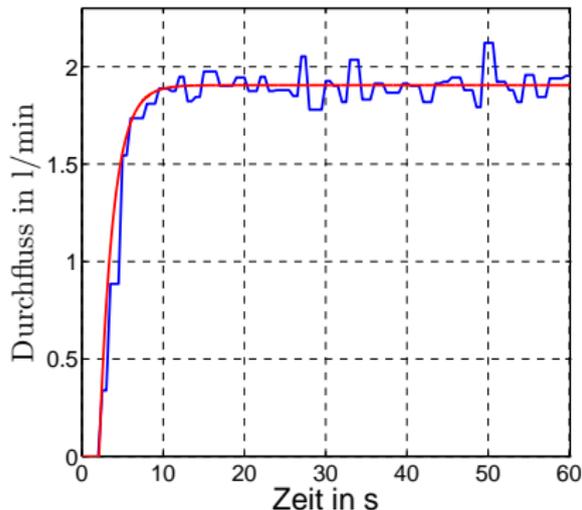


## Drosselventil - Durchflussfaktor



blau: Identifiziert    rot: laut Hersteller

## Drosselventil - Dynamik



$$G(s) = \frac{K}{1 + 1,7s} e^{-2,1s}$$

blau: gemessen    rot: identifiziert

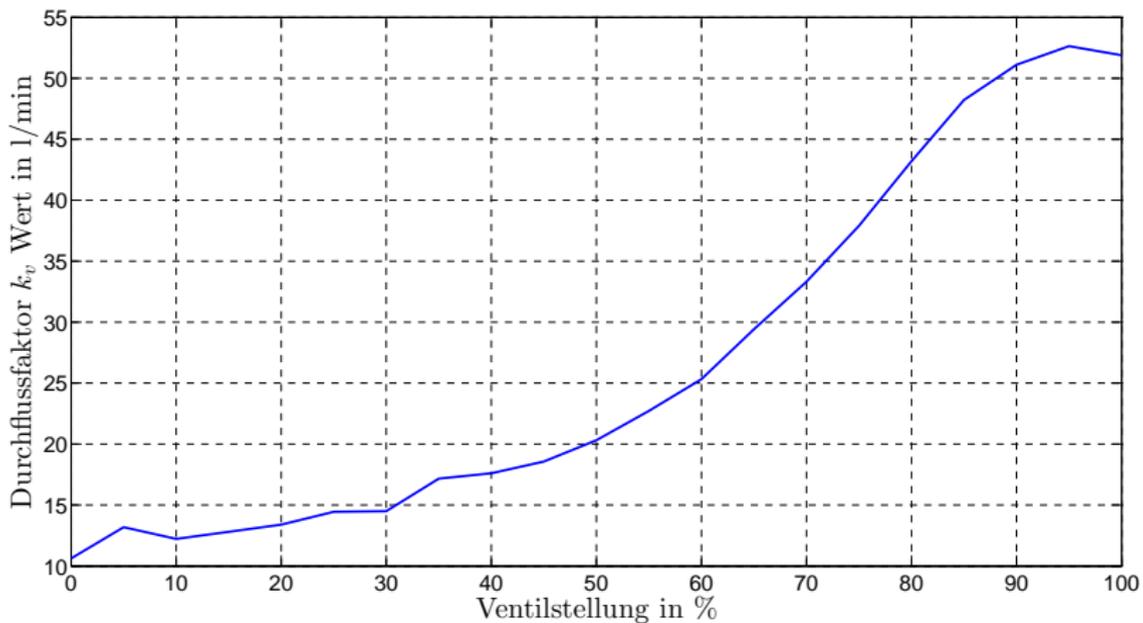
## Bypassventil

- ▶ Für das Bypassventil gilt ebenfalls die Blendengleichung

$$Q_B = k_v \sqrt{p_P}$$

- ▶ Laut Hersteller ist die Durchflusskennlinie identisch zu der des Drosselventils
- ▶ Kennlinie kann nicht direkt gemessen werden, da kein Durchflussmengenmesser zur Verfügung steht
- ▶ Bypassdurchfluss wird zur Identifikation aus der Pumpenkennlinie berechnet

## Bypassventil - Durchflussfaktor



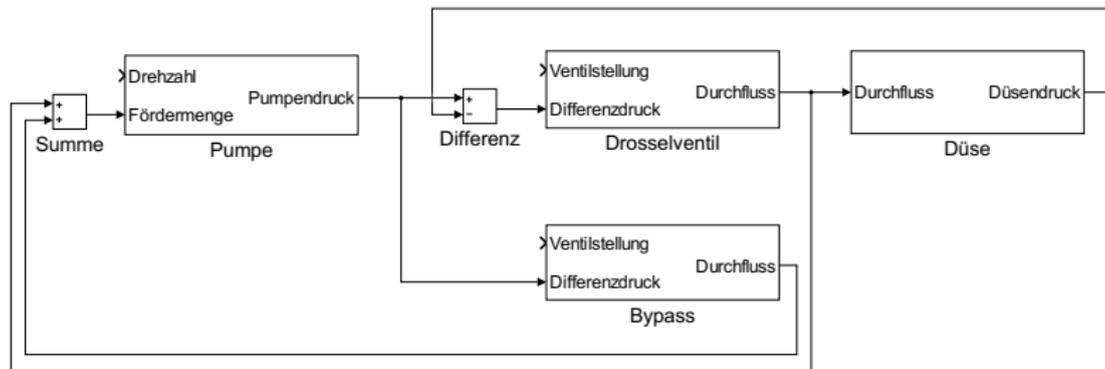
## Düse

- ▶ Jede zu vermessende Düse hat andere Charakteristik
- ▶ Genaue Charakteristik der Düse ist vor der Messung nicht bekannt
- ▶ Eine Düse ist eine Drossel für die ebenfalls die Blendengleichung gilt

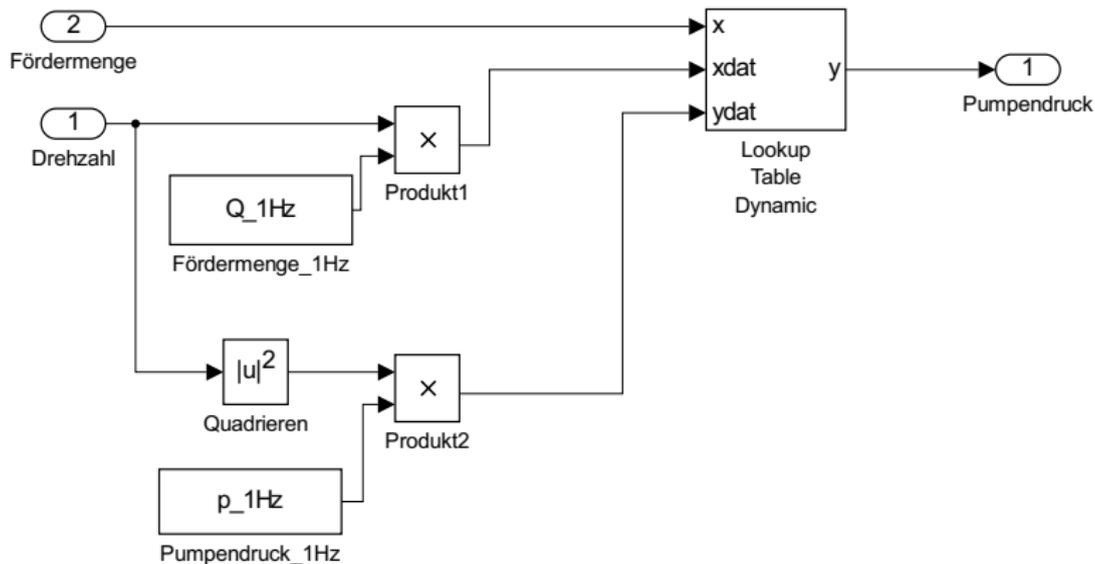
$$Q_N = k_v \sqrt{p_D}$$

- ▶ Durchflussfaktor ist nicht bekannt

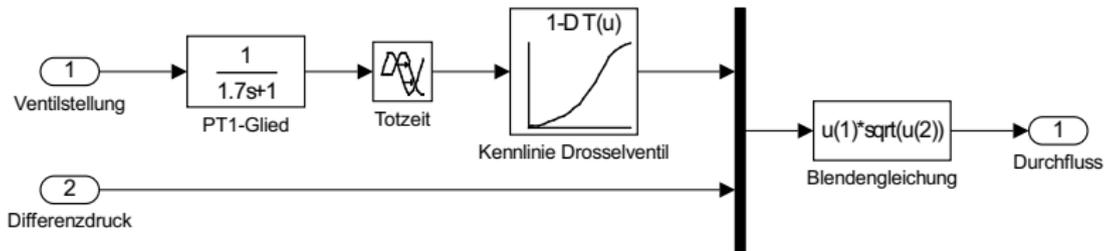
## Modellierung



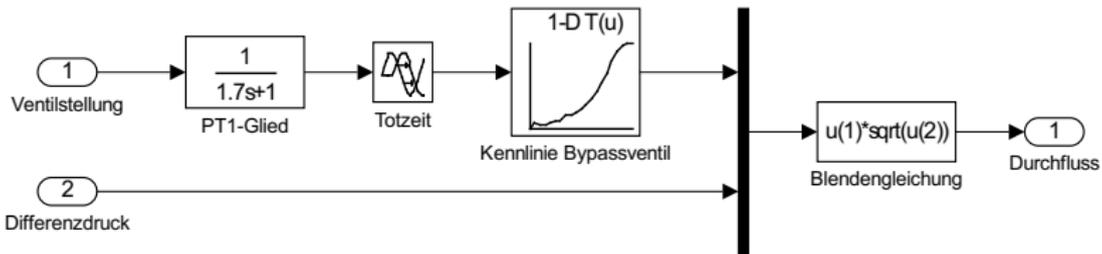
## Modellierung - Pumpe



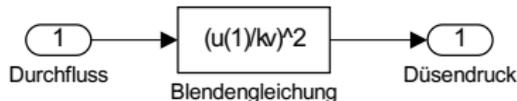
## Modellierung - Drosselventil



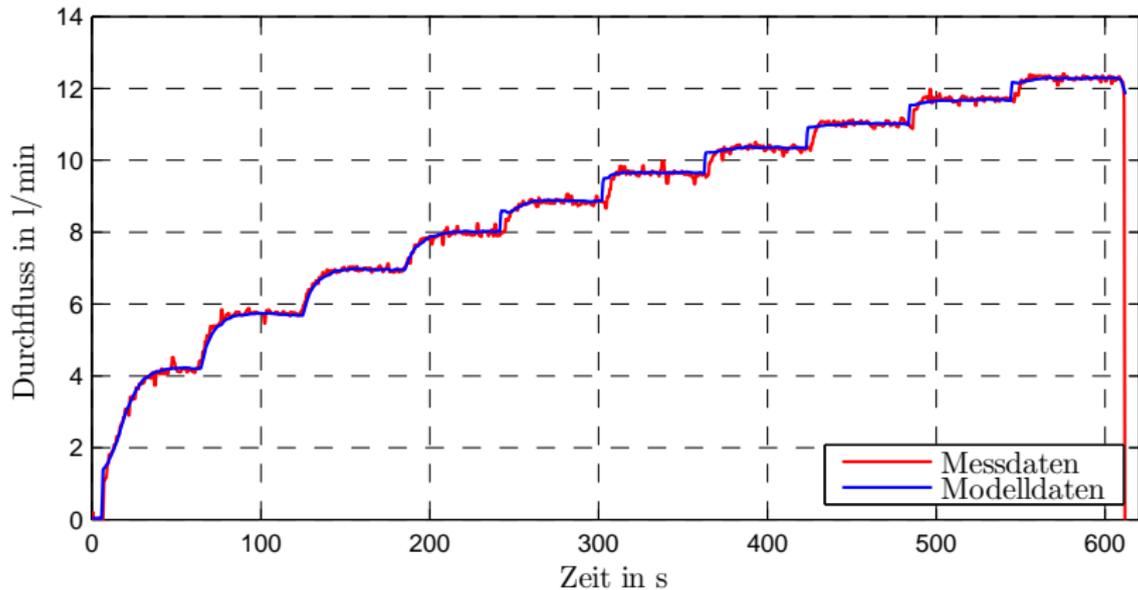
## Modellierung - Bypassventil



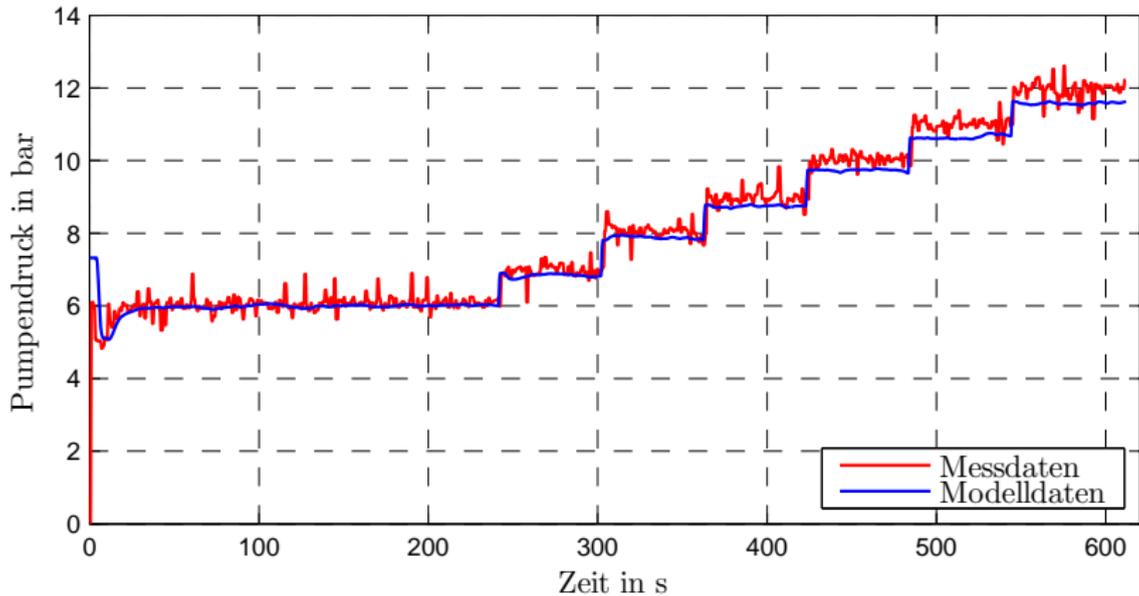
## Düse



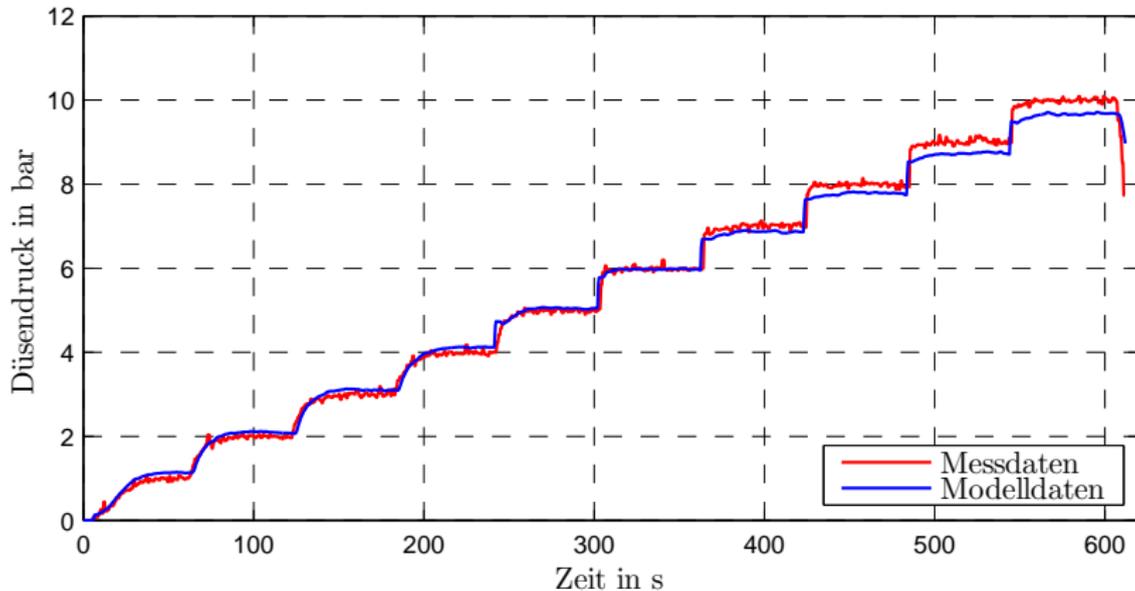
## Modellvalidation - Durchfluss



## Modellvalidation - Pumpendruck

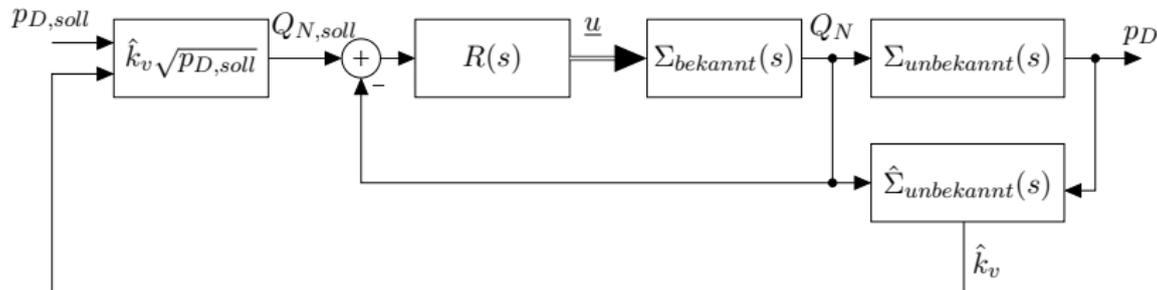


## Modellvalidation - Düsendruck



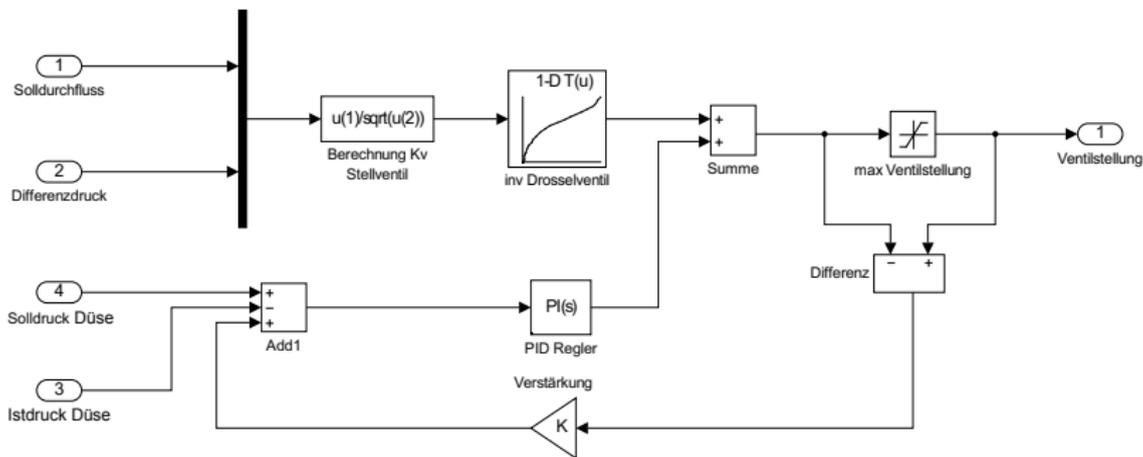
## Regelung

- ▶ Trennung des Gesamtsystems in bekanntes Teilsystem und unbekanntes Teilsystem (Düse)  $\Rightarrow$  Regelung auf Durchfluss  $Q_N$
- ▶ Schätzen des Parameters der Düse mit rekursivem Least-Squares Algorithmus  $\Rightarrow$  Regelung auf Düsendruck  $p_D$



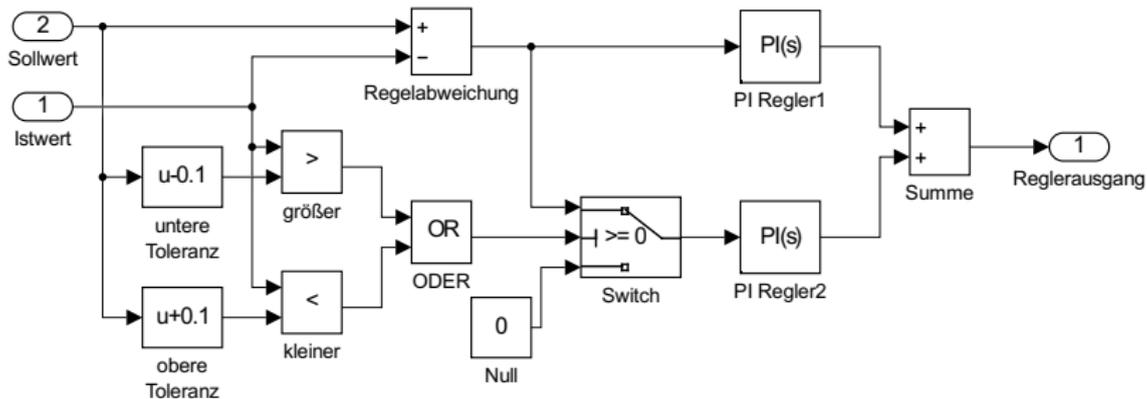
## Regelung - Drosselventilstellung I

- ▶ Inverse Ventilkennlinie und Blendengleichung als Vorsteuerung
- ▶ Parallele Regelschleife zum Ausgleichen von Modellunsicherheiten



## Regelung - Drosselventilstellung II

- ▶ Durch Totzeit und lange Anstiegszeit des Düsendrucks kommt es zu Wind-Up Effekt des PI Reglers
- ▶ Mögliche Abhilfe: PI Regler mit Umschaltstrategie



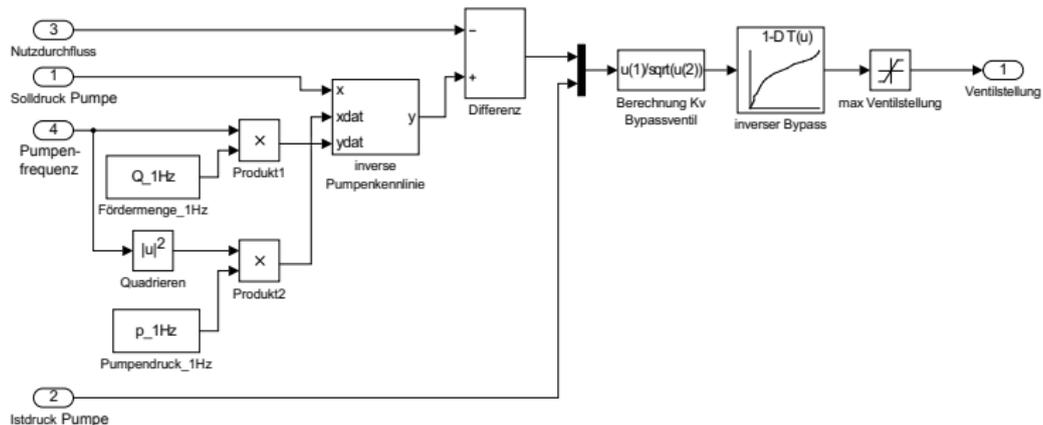
## Regelung - Pumpenfrequenz

- ▶ Forderung eines bestimmten Pumpendruckes  $p_P > p_D$
- ▶ Betrieb der Pumpe im Optimalpunkt (höchste Lebensdauer)
- ▶ Optimalpunkt bekannt für  $f = 50 \text{ Hz}$
- ▶ Berechnung optimalen Pumpenfrequenz aus Ähnlichkeitsgesetz

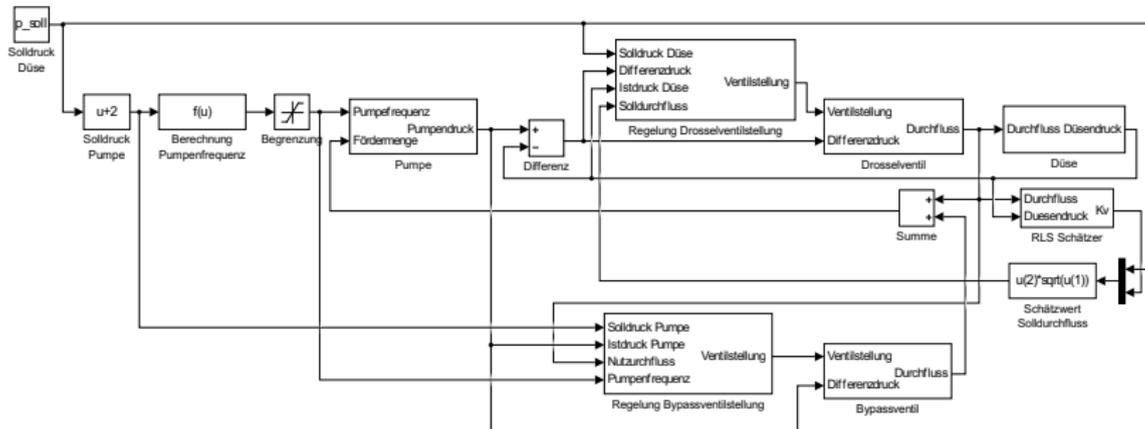
$$f = \sqrt{\frac{p_P}{p_{P,opt}} \cdot (50 \text{ Hz})^2} = \sqrt{\frac{p_P}{16,5 \text{ bar}} \cdot (50 \text{ Hz})^2}.$$

## Regelung - Bypassventilstellung

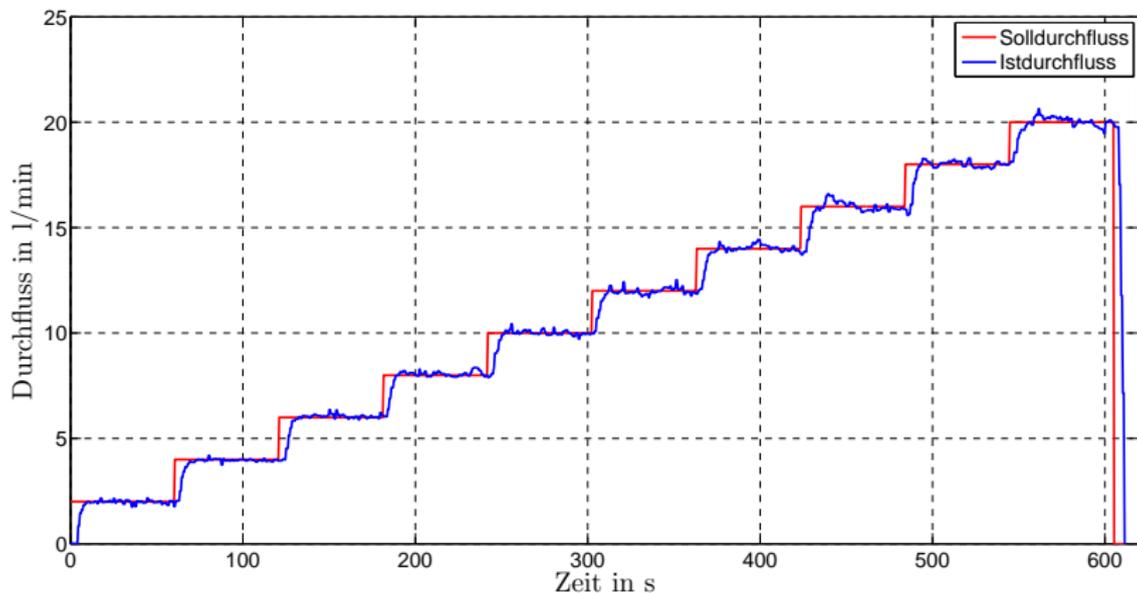
- ▶ Aus Pumpenkennlinie ergibt sich die benötigte Fördermenge  $Q_P$
- ▶ Bypassdurchfluss berechnet sich aus  $Q_B = Q_P - Q_N$
- ▶ Inverse Ventilkennlinie und Blendengleichung als Vorsteuerung für Bypassventilstellung



# Regelung - Zusammenschaltung

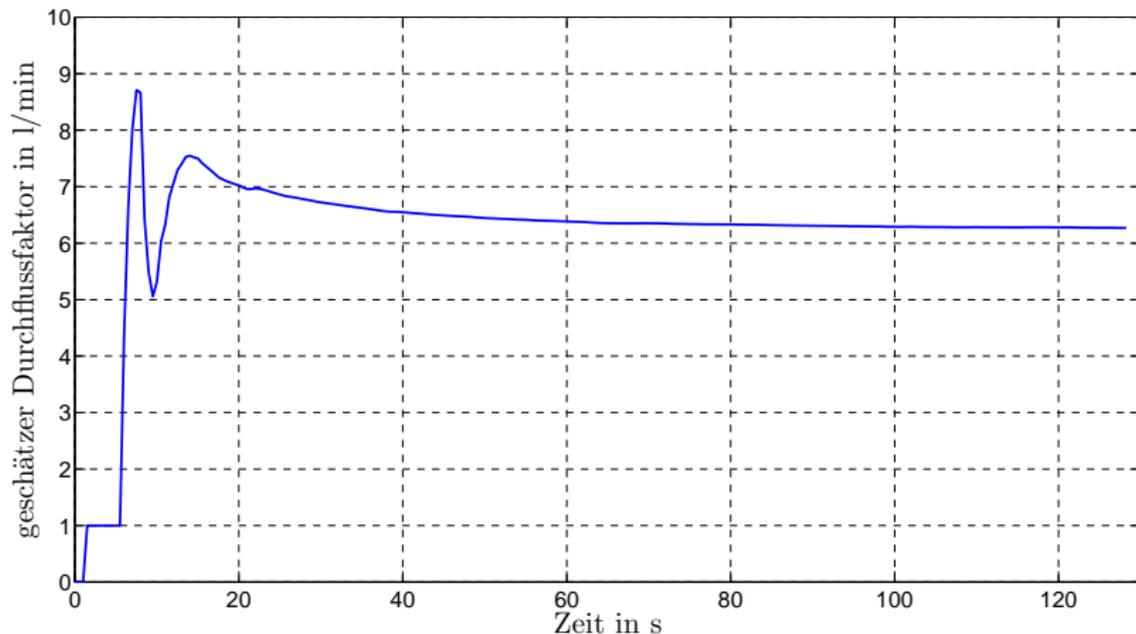


## Implementierung - Durchflussregelung

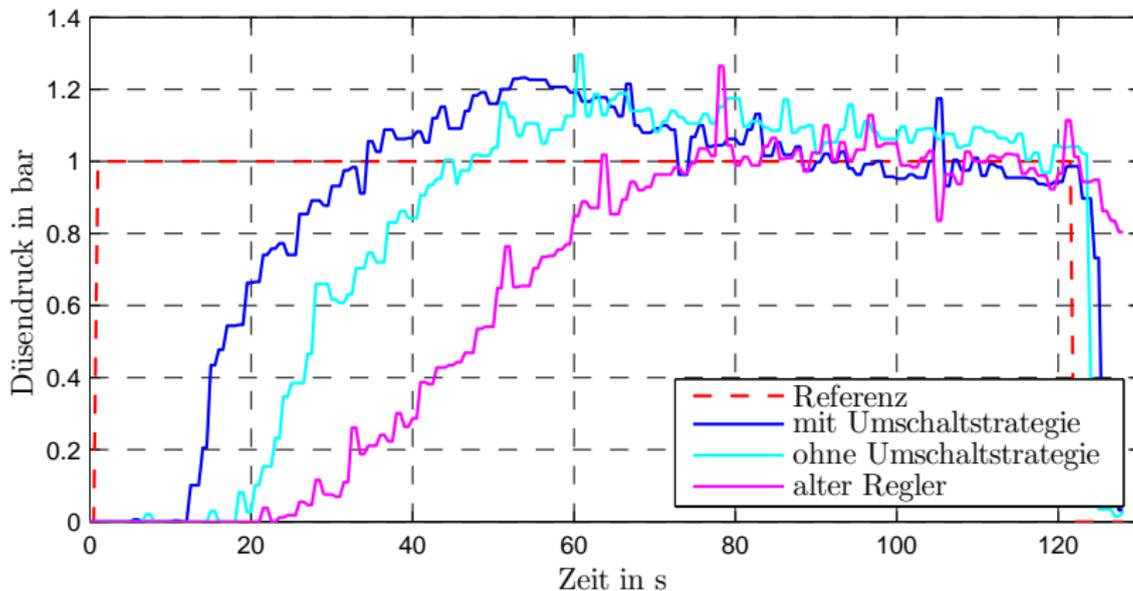


reine Vorsteuerung

## Implementierung - rekursiver Least-Squares Algorithmus

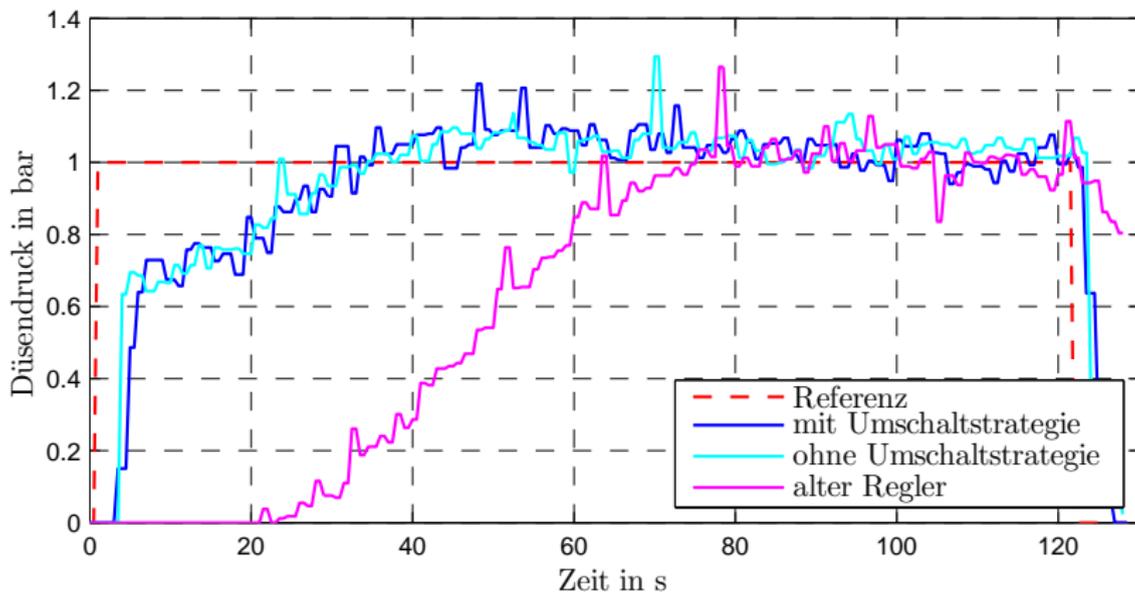


## Implementierung - Druckregelung I



$k_v$ -Wert unbekannt

## Implementierung - Druckregelung II



$k_v$ -Wert bekannt

## Fazit

- ▶ Grundsätzlich kürzere Anstiegszeiten durch neue Regelung, vor allem ab 2. Messung
- ▶ Qualität der Regelung ist stark abhängig vom Durchflussfaktor der Düse
- ▶ Funktion der Regelung kann nicht für alle Düsen garantiert werden  $\Rightarrow$  Grenzen müssen durch Versuchsreihen ausgelotet werden

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!