Simulationsgestützte Entwicklung eines Algorithmus zur Optimierung von Durchflussregelungen in Wasserkreisläufen

zur Veröffentlichung bei der DKV-Kälte und Klimatagung

Babak Mohajer[1*]

[1] Belimo Automation AG, Forschung Applikationen, Brunnenbachstrasse 1, 8340 Hinwil, Schweiz
babak.mohajer@belimo.ch

* Korrespondenzautor

Kurzfassung

In dieser Arbeit wurde simulationsgestützt die Performance eines Algorithmus für Ventile mit Regelkugelhahn in deren Öffnungsphase untersucht. Ziel dieser Arbeit war zu zeigen, ob eine modellbasierte Entwicklung eines Regelungs-Algorithmus für Anlagen mit unterschiedlichen Komplexitätsgraden möglich und verifizierbar ist.

Der Einsatz vom Regelkugelhahn zur dynamischen Regelung von Durchflüssen ist in der HLK Branche zentral. Die charakteristische Durchflusskennlinie des Kugelventils sorgt für hohe Regelstabilität. Im Gegensatz zu Hubventilen, welche im Öffnungspunkt einen sprunghaften Anstieg des Durchflusses aufweisen, können mit dem Regelkugelhahn auch kleine Durchflüsse präzise geregelt werden.

Die Herausforderung bei der Regelung ist, sowohl Stabilität als auch Schnelligkeit über den gesamten Regelbereich zu gewährleisten. Zu diesem Zweck wurde ein Algorithmus für Regelkugelhahnen entwickelt, der sich aufgrund der individuellen Ventilcharakteristik auf den spezifischen Anwendungsfall adaptiert.

Mit Hilfe von mathematischer sowie multiphysikalischer Modellierung und Simulation konnte nachgewiesen werden, dass der Algorithmus in verschiedenen Umgebungen und Betriebspunkten funktionsfähig ist. Die Einregelzeit des Ventils verkürzt sich mithilfe dieses Ansatzes in der Öffnungsphase um bis zu 50 %.

Stichwörter:
Modellierung, Simulation, Regelung, Optimierung, Regelkugelhahn

1 Einleitung

Bei einer hydraulisch nicht abgeglichenen Anlage im Heizbetrieb erhalten Verbraucher (z.B. Heizkörper), die einen geringeren hydraulischen Widerstand zum Wärmeerzeuger aufweisen eine überhöhte Wassermenge während Verbraucherkreise mit größerem Widerstand (z.B. durch längere Leitungen) unterversorgt werden. Zudem ist mit einer Überversorgung eine erhöhte Rücklauftemperatur des Heizwassers verbunden, die ihrerseits eine Verschlechterung des Wirkungsgrads der Wärmeübertragung und allenfalls auch der Wärmeerzeugung zufolge hat.

Eine Möglichkeit sicherzustellen, dass jeder Verbraucher den für ihn vorgesehenen Volumenstrom erhält, ist der Einsatz von elektronisch druckunabhängigen Regelventilen. Die Firma Belimo Automation AG bietet Produkte in einer Basisversion (EPIV) sowie in einer fortgeschrittenen Version (Energy Valve) an. In beiden Produkten werden Antrieb, Regelkugelhahn, Durchfluss- und Temperatursensor sowie Regellogik zusammengebaut. Bei der fortgeschrittenen Variante kommt ein zusätzlicher Temperatursensor zum Einsatz, mit dessen Hilfe weitere Funktionalitäten wie z.B. Leistungsregelung oder Temperaturdifferenzlimitierung am Wärmetauscher ermöglicht werden.

Mit Hilfe einer elektronisch druckunabhängigen Durchflussregelung wird durch die Limitierung des maximalen Volumenstroms, sowie durch den Ausgleich von Druckschwankungen dafür gesorgt, dass immer die korrekte Wassermenge zum Verbraucher gelangt.

Ein typisches Einsatzgenbiet von Durchflussregelungen ist bei der Zulufttemperatur-Regelung einer Lüftungsanlage, s. Bild 1.

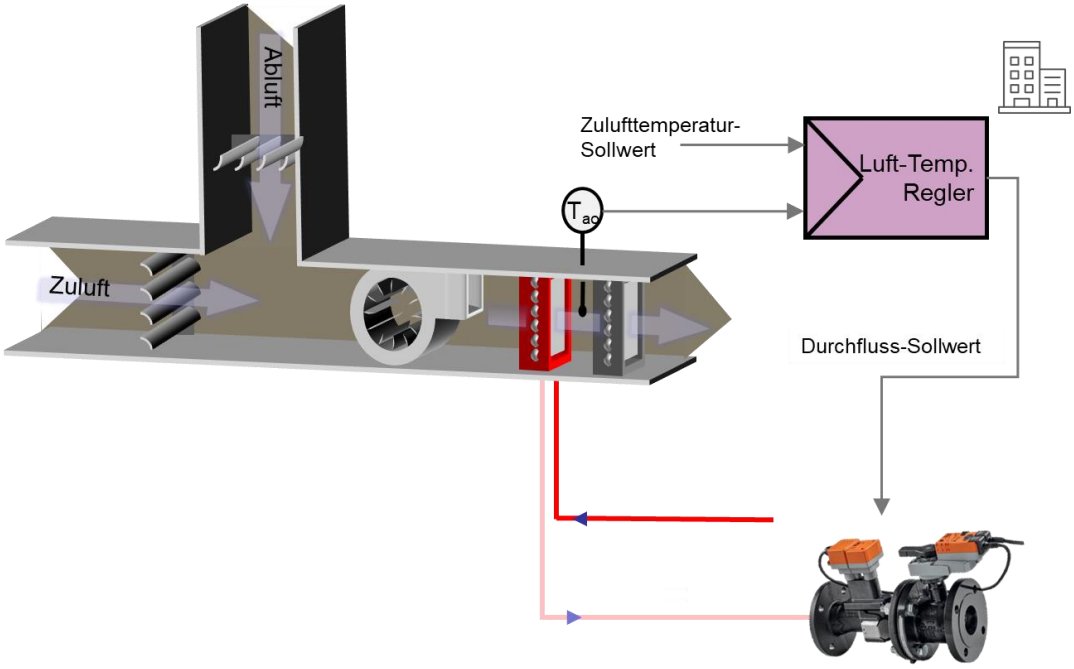

Bild 1: Ausschnitt einer Lüftungsanlage zur Regelung der Zulufttemperatur mit Hilfe von Durchflussregelung

Je nach Einstellung des übergeordneten Zulufttemperatur-Reglers ist es möglich, dass sich das Regelverhalten des Systems im Niedriglastbereich verschlechtert, s. Bild 2. Die Ursache besteht in der nichtlinearen Charakteristik des Wärmeübertragers in Kombination mit einem linearen PI-Regler, der auf den Volllastfall eingestellt ist. Diese Verschlechterung ist besonders in der Öffnungsphase des Ventils zu beobachten.

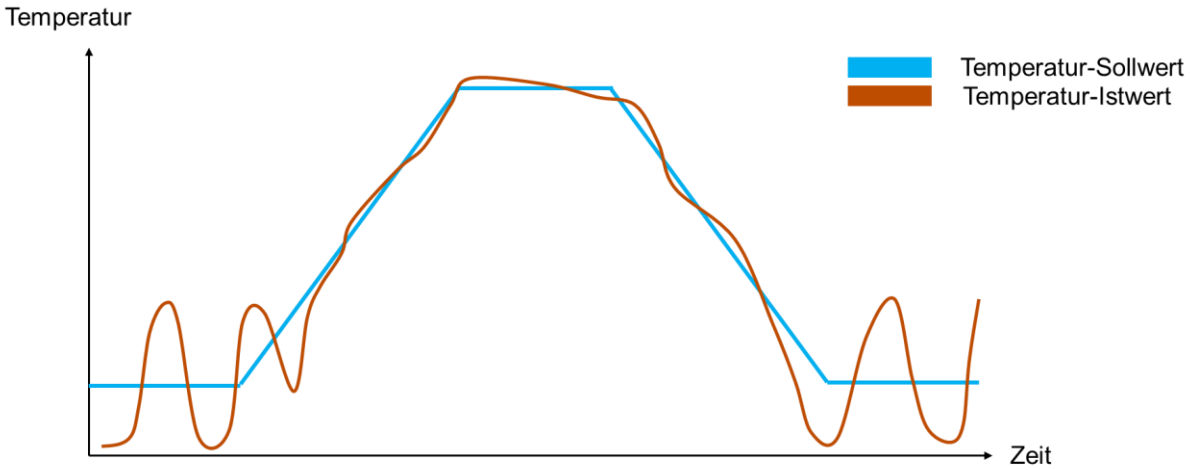

Bild 2: Qualitativer Tagesverlauf der Zuluft-Temperaturverlauf bei Durchflussregelung

Im Folgenden werden die Gründe und Lösungen für besseres Regelverhalten im Niedriglastbereich besprochen.

2 Modellierung und Algorithmus

In diesem Teil der Arbeit werden zu Beginn zwei Möglichkeiten zur Zulufttemperatur-Regelung, Positions- und Durchflussregelung, gegenübergestellt. Einführend werden jeweils die einzelnen Elemente in der Regelungskette mathematisch beschrieben und deren Einflussfaktoren auf die Regelstabilität untersucht. Anschließend wird ein Algorithmus vorgestellt, mit dessen Hilfe das Schwingverhalten im Niedriglastbereich bei Durchflussregelungen verbessert wird. Mit Hilfe von Systemsimulation wird das Systemverhalten mit und ohne diesen Algorithmus untersucht und optimiert.

2.1 Stabilitätsbetrachtung

2.1.1 Positionsregelung

Für eine erste Untersuchung wird die Blockdiagram-Darstellung der einzelnen Elemente in der Zulufttemperatur-Regelung mit Direktansteuerung des Ventils dargestellt, s. Bild 3. Diese Darstellung beinhaltet die Nichtlinearitäten der Strecke. Hierzu zählen der Antrieb, der durch einen Rate-Limiter vereinfacht wird, die nichtlineare charakteristische Kennlinie des Ventils, sowie die nichtlineare Kennlinie des Wärmeübertragers, die durch ein PT1-Glied repräsentiert wird.

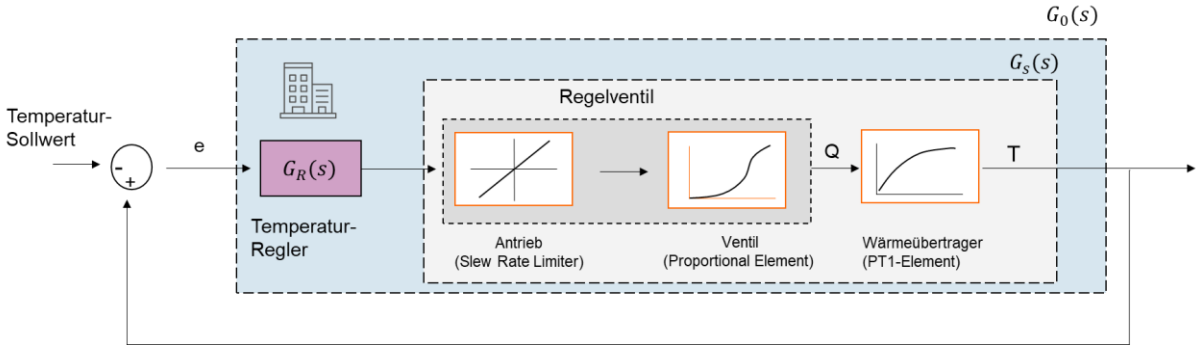

Bild 3: Blockdiagramm-Darstellung der Positionsregelung mit Nichtlinearitäten der Strecke

Um erste Grundaussagen über das Stabilitätsverhalten des Systems zu treffen, ist es in der Regelungstechnik üblich das System in ein lineares zeitinvariantes System (LTI-System) umzuwandeln und mit Hilfe der Übertragungsfunktionen des Systems die Stabilität des geschlossenen Kreislaufs zu untersuchen. Hierzu wird der

Antrieb anstatt durch einen Rate-Limiter vereinfacht mit Hilfe eins PT1-Elements approximiert. Weiter wird die nichtlineare Ventilcharakteristik durch ein proportionales Element abgebildet, s. Bild 4.

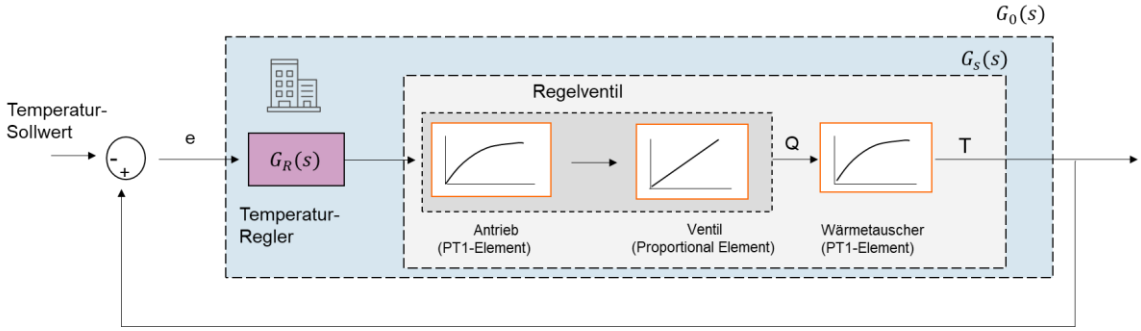

Bild 4: Blockdiagramm-Darstellung der Positionsregelung als ein LTI-System

Die jeweiligen Übertragungsfunktionen können für den Antrieb, Gl. (1), sowie für den Wärmetauscher, Gl. (2), wie folgt erfasst werden, s. Padhee [1]:

$$\frac{C_A}{T_A\, s + 1} \tag{1}$$

$$\frac{C_{W\ddot{U}}}{T_{W\ddot{U}}\, s + 1} \tag{2}$$

Beide Elemente werden als Verzögerungsglied 1. Ordnung vereinfacht. Zusammen ergeben sie die Übertragungsfunktion der Strecke. Die Strecke zusammen mit dem Regler ergibt $G_0(s)$ (wie im Bild 4 eingezeichnet).

Zur Stabilitätsanalyse des geschlossenen Regelkreises kann man nun das Nyquist-Theorem auf das offene System anwenden. Gemäß Nyquist-Theorem wird zur Bewertung der Stabilität des geschlossenen Kreises der Frequenzgangs des offenen Systems angeschaut, s. Guzzella [2]. Eine Möglichkeit der Darstellung bietet das Bode-Diagramm, s. Bild 5.

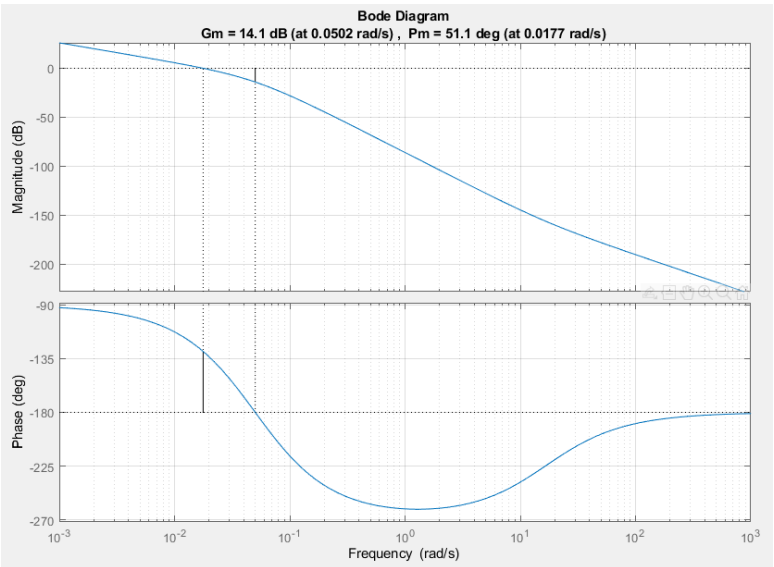

Bild 5: Bode-Diagramm der Positionsregelung mit Phasen- und Amplitudenreserve

Für die Positionsregelung kann man hiermit auf ein stabiles geschlossenes System mit einer Amplitudenreserve von 14.1 dB und einer Phasenreserve von 51.1° schließen. Ein weiterer anschaulicher Beleg für die Stabilität des geschlossenen Regelkreises in Positionsregelung ist, dass im Nyquist-Diagramm der kritische Punkt (-1,0) links von der Kurve liegt, s. Bild 6.

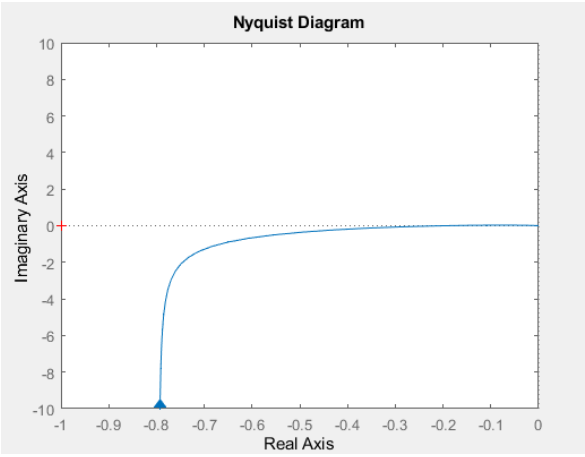

Bild 6: Nyquist-Diagramm der Positionsregelung

Zur Darstellung der Stabilität im Zeitbereich wir die Sprungantwort angeschaut, s. Bild 7. Hier strebt die Sprungantwort einem endlichen Grenzwert zu. Somit ist das System BIBO-stabil (Bounded Input, Bounded Output).

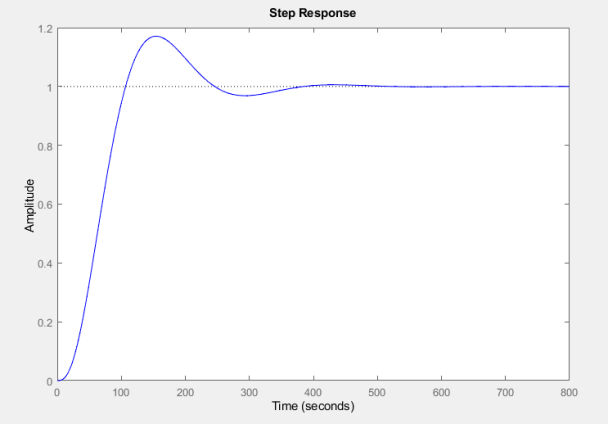

Bild 7: Sprungantwort des geschlossenen Systems bei Positionsregelung

2.1.2 Durchflussregelung

Bei der Durchflussregelung entsteht im Vergleich zu Bild 4 eine Regler-Kaskade mit einem inneren und einem äußeren Regelkreis, s. Bild 8.

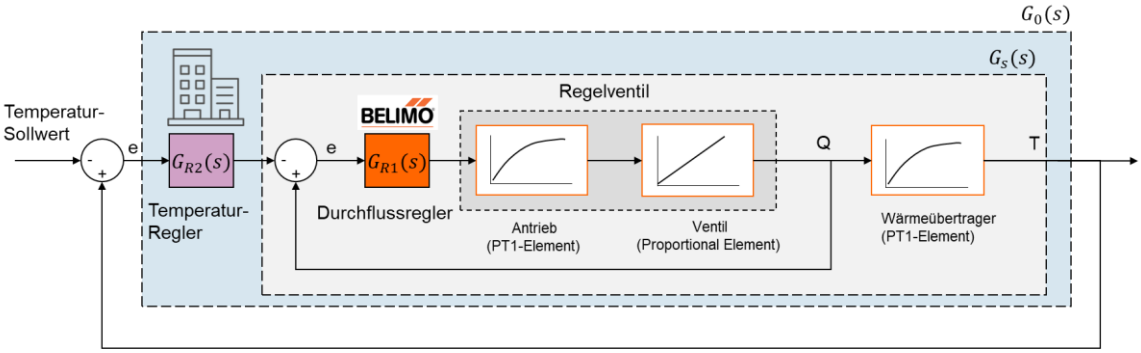

Bild 8: Blockdiagramm-Darstellung der Durchfluss-Regelung

Während die restlichen Übertragungsglieder des Antriebs, des Ventils und des Wärmeübertragers und deren Zeitkonstanten gleichbleiben, ist es wichtig sich mit dem Einfluss des Durchflussreglers auf die Gesamt-Dynamik der Regelung auseinanderzusetzen. Besonderer Fokus gilt hierbei der Öffnungsphase des Ventils. Hierzu wird die nichtlineare charakteristische Ventilkurve untersucht, s. Bild 9.

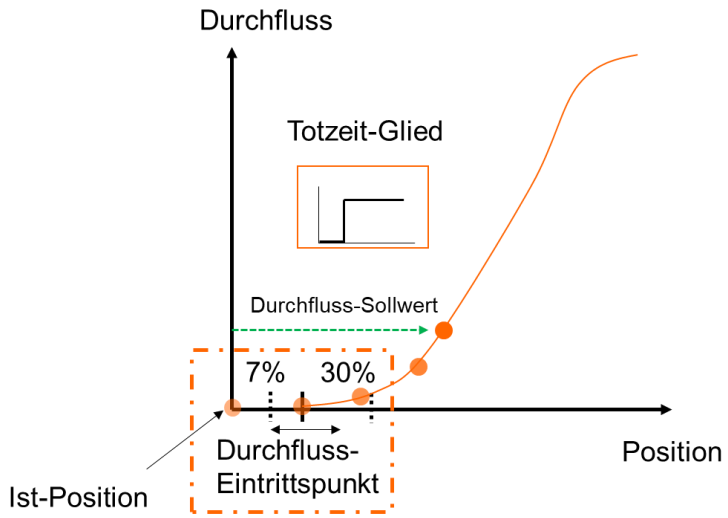

Bild 9: Charakteristische Ventilkurve des Regelkugelhahns mit Fokus im Öffnungsbereich

Während des Öffnungsvorgangs des Regelkugelhahns gibt es eine Ventil-Position, ab welcher ein Durchfluss zu vermessen ist (sog. Durchfluss-Eintrittspunkt). Aufgrund von Fertigungstoleranzen variiert dieser Punkt von Ventil zu Ventil.
Zusätzlich zum verzögerten Eintreffen des Durchflusses aufgrund des Eintrittspunktes, spielen für die Dynamik der Regelung im Öffnungsbereich die Nichtlinearitäten in der Ventilcharakteristik (z.B. Abflachen) eine wesentliche Rolle. Der flache Verlauf der Kennlinie in diesem Bereich hat zufolge, dass das Ventil für die Änderung des Durchflusses einen größeren Weg beschreiten muss. Bei einem standardmäßig eingestellten Regler bedeutet dies eine zusätzliche Verzögerung.
Unter Berücksichtigung der oben genannten Gegebenheiten kann man das Verhalten des Durchfluss-Reglers im Öffnungsbereich mit einem Totzeit-Glied vereinfacht wiedergeben, s. Bild 10.

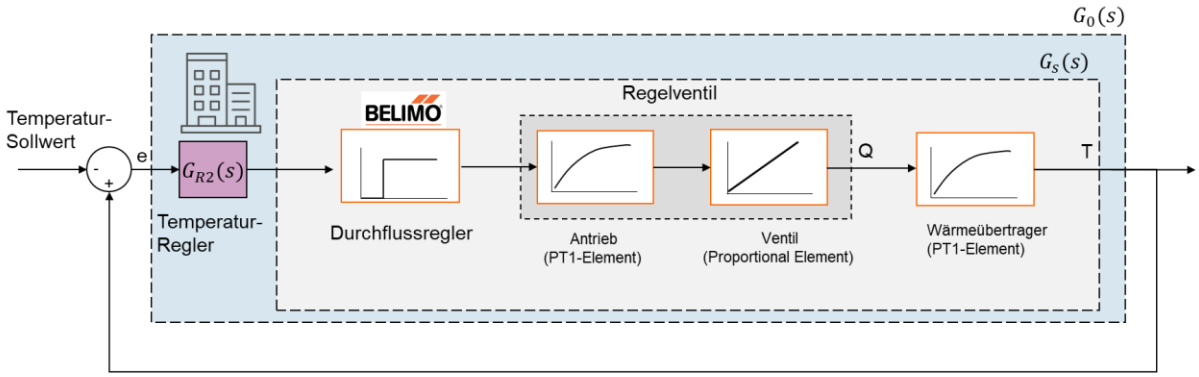

Bild 10: Blockdiagramm-Darstellung der Durchfluss-Regelung als ein LTI-System

Die Betrachtung vom Nyquist-Diagramm für das zusammengesetzte System ergibt, dass im Öffnungsbereich eine viel geringere Phasenreserve zur Verfügung steht und somit die Schwingneigung des Systems erhöht ist, s. Bild 11. Durch die Betrachtung der Sprungantwort des geschlossenen Regelkreises wird diese Aussage bestätigt, s. Bild 12.

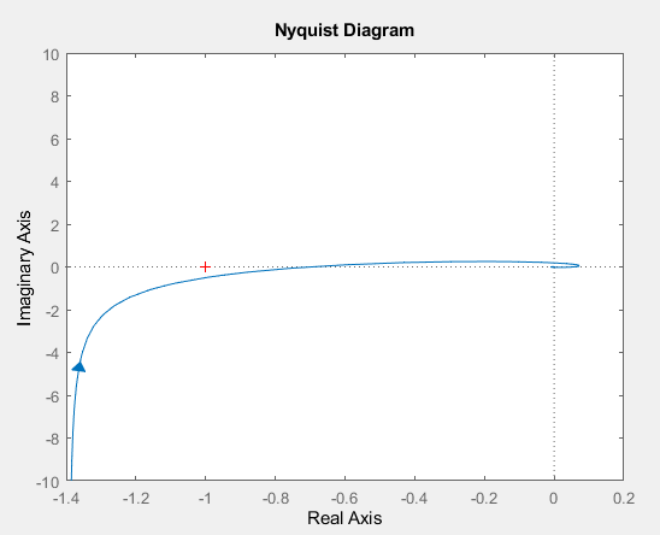

Bild 11: Nyquist-Diagramm der Durchflussregelung

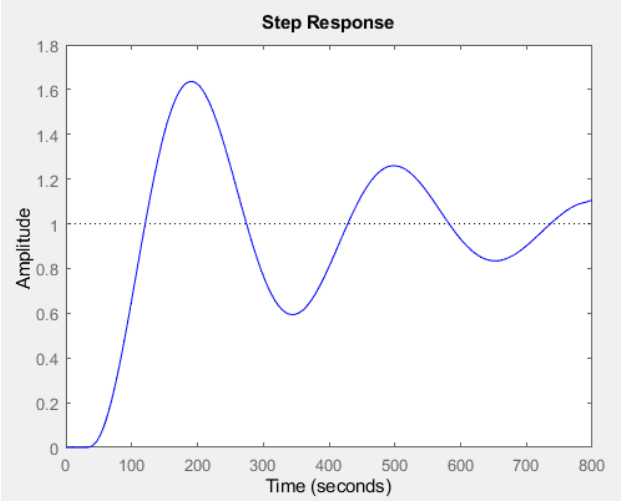

Bild 12: Sprungantwort des geschlossenen Systems bei Durchflussregelung

2.2 Regelungs-Algorithmus

Im Folgenden wird ein Algorithmus vorgestellt, um die Problematik des verschlechterten Regelungsverhalten im Öffnungsbereich zu lösen. Die Grundschaltung hierzu ist dem Bild 13 zu entnehmen. Hier wird mit Hilfe eines Beobachters der Durchflusseintritts-Punkt individuell auf jedes Ventil bei der ersten Inbetriebnahme gelernt. Während des Betriebs wird fortwährend die Genauigkeit der Schätzung erhöht. Ist der Durchflusseintritts-Punkt einmal bekannt, wird dieser bei jeder weiteren Öffnung in einer Vorsteuerung mit der höchsten Ventilgeschwindigkeit angefahren und somit die Anfangs-Totzeit auf das Minimum reduziert.

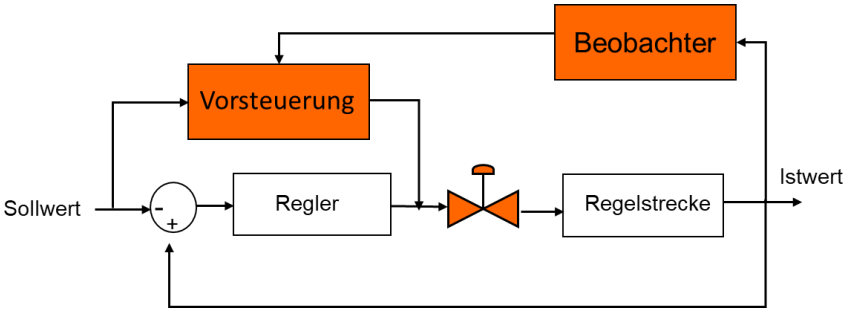

Bild 13: Grundschaltung des Algorithmus mit Beobachter und Vorsteuerung

Mit Hilfe einer gekoppelten thermisch-hydraulischen Simulation wird im Folgenden der Einfluss des Algorithmus auf die Reduktion der Totzeit untersucht, s. Bild 14.

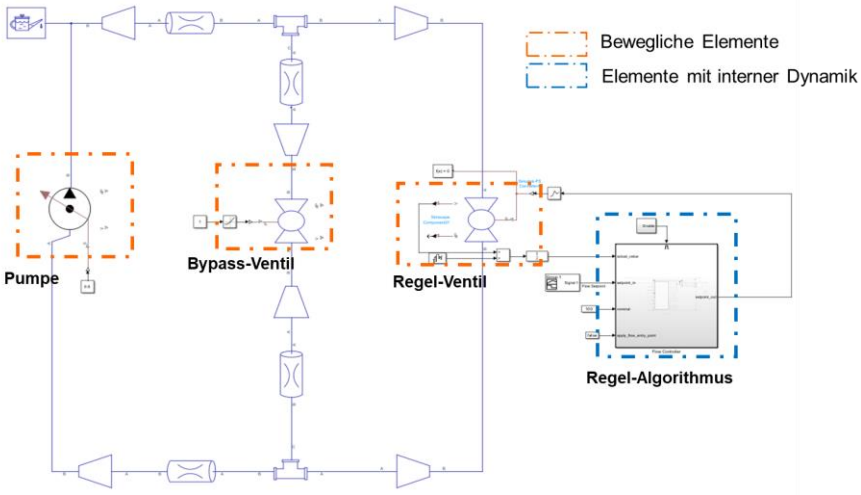

Bild 14: Simulationsmodell des inneren Regelkreises

In einem ersten Schritt wir die Einregelzeit und die Detektion des Durchfluss-Eintrittspunkts bei der ersten Inbetriebnahme untersucht. Für ein besseres Verständnis und zur Verdeutlichung des Algorithmus wurden hier der Eintrittspunkt sowie die Regler-Parameter simulativ eingestellt, s. Bild 15. In diesem Beispiel braucht der Regler 115 Sekunden bis zum Einregeln. Während des Regelvorgangs wird der Eintrittspunkt des Durchflusses gelernt und festgehalten.

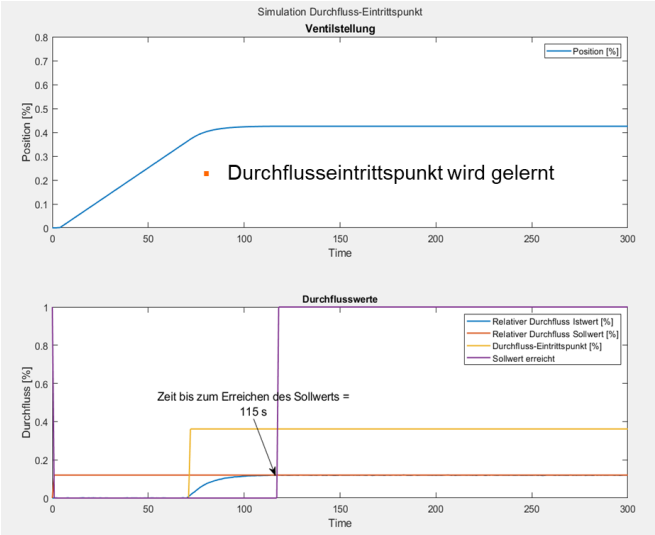

Bild 15: Lernen vom Durchfluss-Eintrittspunkts bei der ersten Inbetriebnahme

Beim nächsten Öffnungsvorgang wird dieser Eintrittspunkt mit Hilfe der Vorsteuerung angefahren und mit derselben Regler-Einstellung die Einregelzeit um 30 Sekunden reduziert, s. Bild 16.
Im nächsten Schritt wird der Einfluss des schnelleren Einregelns im Gesamt-Simulationskreislauf der Zulufttemperatur-Regelung betrachtet, s. Bild 17.
Als Erstes wird das Regelverhalten ohne Einsatz des Algorithmus im Bild 18 dargestellt. Im oberen Abschnitt des Bildes sieht man die Sollwertvorgabe dargestellt als Tageslastprofil. Auffällig hierbei ist das starke Überschwingen und Unterschwingen sowie eine ungenaue Regelung im Niedriglastbereich an beide Enden des Tages-Profils.
Dieses Reglerverhalten ändert sich unter Einsatz vom Durchfluss-Eintrittspunkt-Algorithmus, s. Bild 19. Wir sehen bei dem gleichen Setup kaum Überschwingungen. Zu beobachten sind leichte Unterschwingungen, die aber über kürzeren Phasen bestehen. Die Betrachtung des Verlaufs der Aktuatorposition zeigt einen steileren Verlauf und somit die schnellere Reaktion auf.

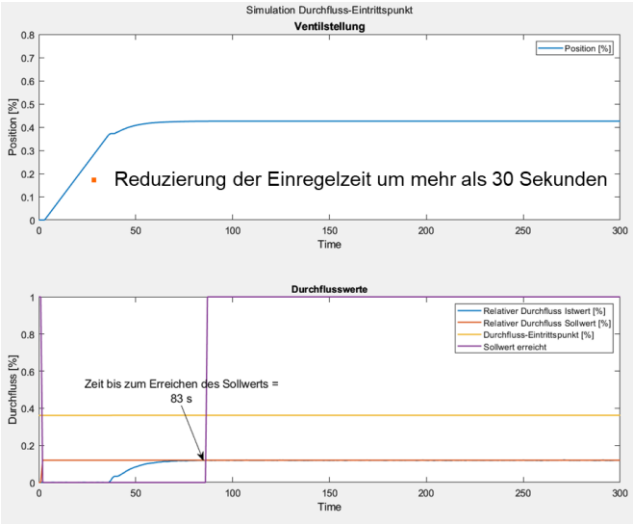

Bild 16: Anwendung vom Durchfluss-Eintrittspunkt-Algorithmus

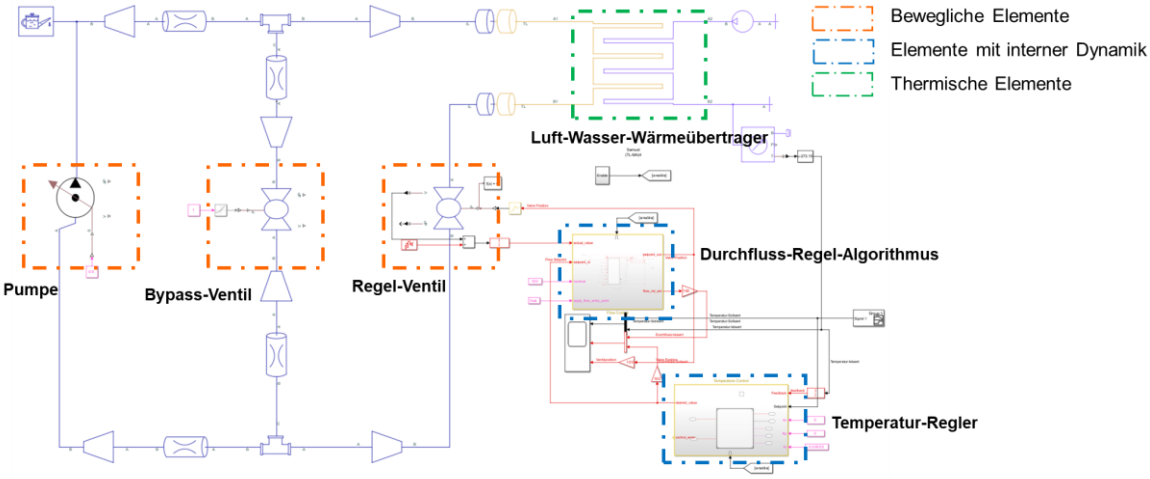

Bild 17: Simulationsmodell des inneren und äußeren Regelkreises

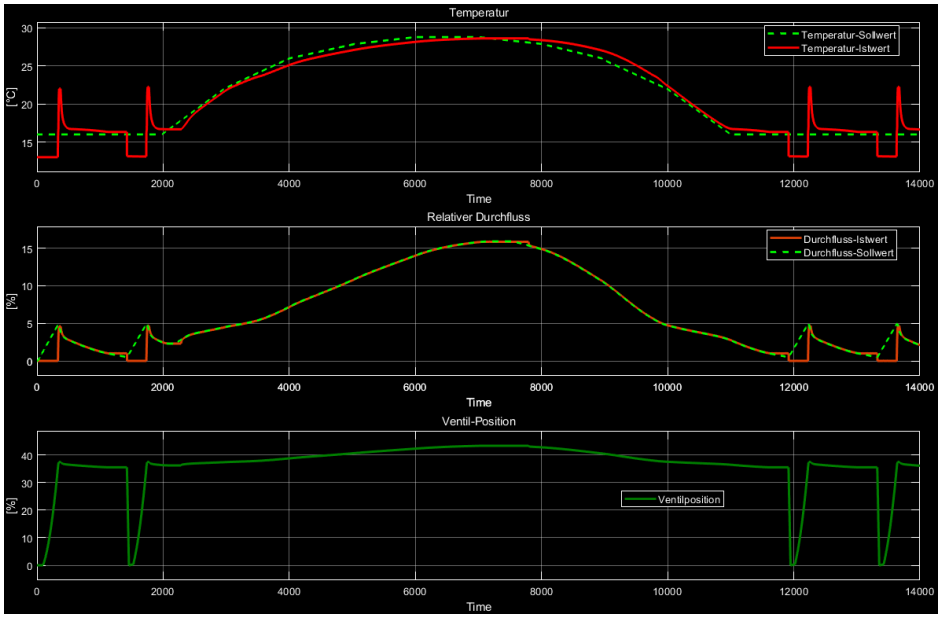

Bild 18: Temperatur, Durchfluss und Positionsverlauf ohne Algorithmus

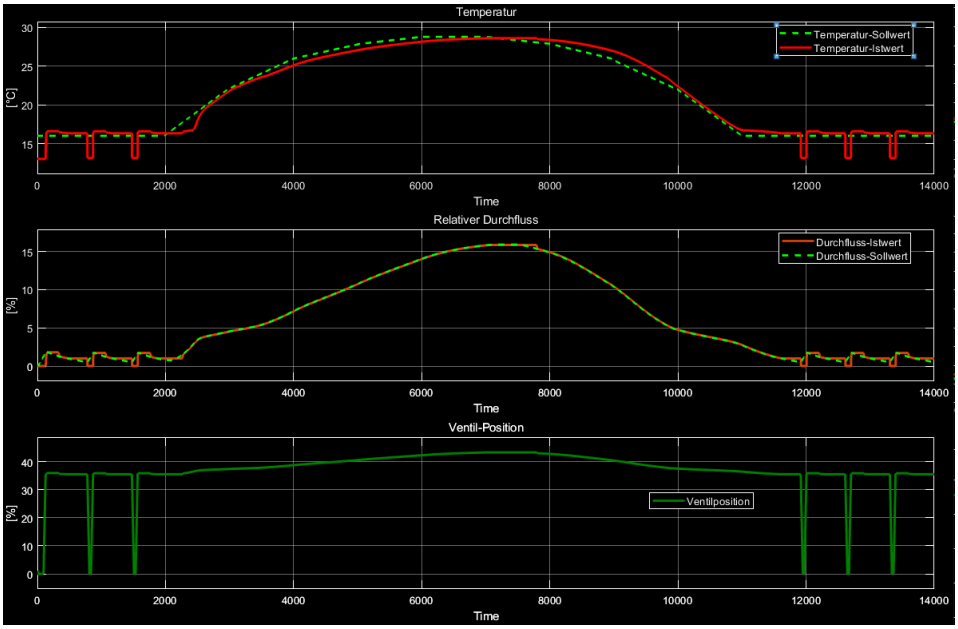

Bild 19: Temperatur, Durchfluss und Positionsverlauf unter Einsatz des Algorithmus

Um einen weiteren Schritt in Richtung Stabilisierung der Regelung im Niedriglastbereich zu machen, wird der Algorithmus erweitert, indem das Ventil beim Schließvorgang nicht ganz geschlossen wird, d.h. nach Unterschreiten des Eintrittspunkts schließt das Ventil nicht weiter, s. Bild 20.

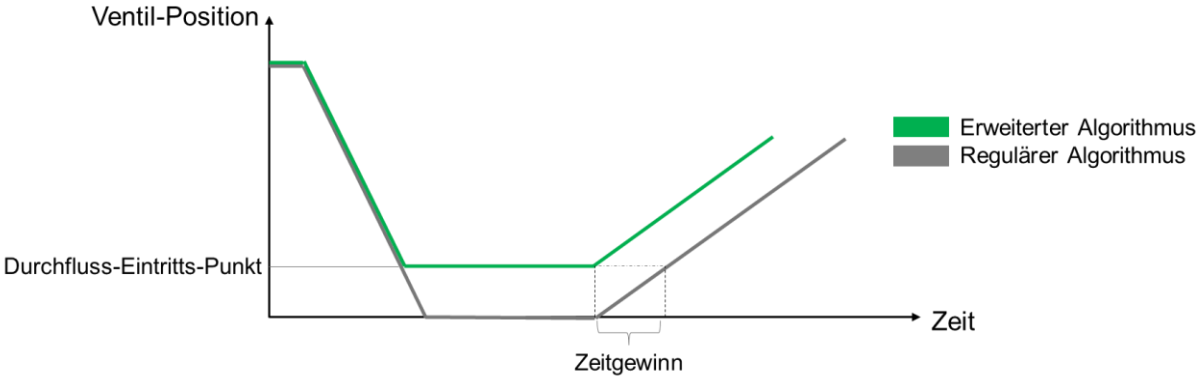

Bild 20: Erweiterung des Eintrittspunkt-Algorithmus in der Schließphase

Diese Erweiterung führt dazu, dass die Einregelzeit bei erneutem Bedarf sich weiter verkürzt und somit die Regelung im Niedriglastbereich noch stabiler ist, s. Bild 21. Die Über- und Unterschwinger reduzieren sich auf ein Minimum und es kann über den gesamten Tagesverlauf stabil geregelt werden.

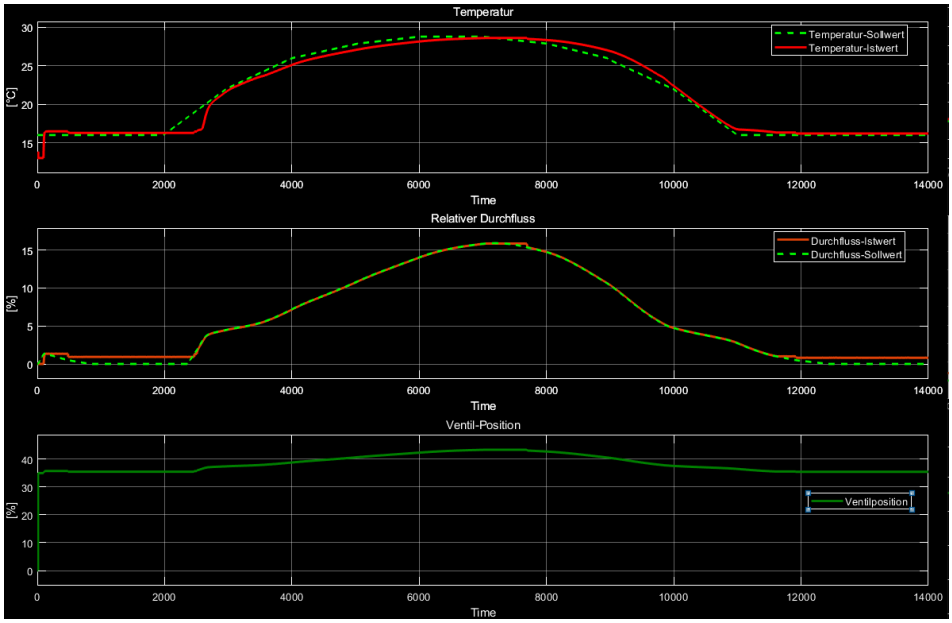

Bild 21: Temperatur, Durchfluss und Positionsverlauf unter Einsatz des Algorithmus

3 Schlussfolgerung

Es lassen sich nach den Untersuchungen in dieser Arbeit folgende Schlussfolgerungen ziehen.

Unter genauer Kenntnis von den Herausforderungen der Regelungsarten, lassen sich mit Hilfe der klassischen Methoden der Regelungstechnik zur Stabilitätsbewertung von LTI-Systemen gezielte Systemvereinfachungen, systematische Problem-Eingrenzung und Ursachenanalyse betreiben.

Mit Hilfe von physikalischer Modellierung und Simulation lassen sich Algorithmen effizient entwickeln, erweitern und an verschiedenen Systemen erproben.

Der in dieser Arbeit entwickelte Durchfluss-Eintrittspunkt-Algorithmus sorgt, ohne Eingriff in den Fertigungsprozess, für mehr Stabilität im täglichen Einsatz des Ventils.

Weiter wird durch Einsatz des Algorithmus dem Systemintegrator ein Teil seiner Arbeit für das wiederholtes Tuning des übergeordneten Temperatur-Reglers zur Durchflussregelung abgenommen.

4 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass der Einfluss des Durchflussreglers in der Ventil-Öffnungsphase in guter Näherung als ein Totzeitglied vereinfacht werden kann. Eine zusätzliche Totzeit in einem rückgekoppelten System zur Zuluft-Temperaturregelung kann die Schwingneigung erhöhen. Diese Gefahr ist insbesondere im Niedriglastbereich vorhanden.

Mittels eines Algorithmus, bei dem der Eintrittspunkt des Durchflusses während des Öffnungsvorgangs des Ventils festgehalten wird, konnte eine merkliche Verbesserung in der Stabilität erzielt werden. Hierbei wurde der Eintrittspunkt während des Öffnungsvorgangs des Ventils in einer Vorsteuerung mit der höchsten Antriebes-Geschwindigkeit angefahren und anschließend in die Durchflussregelung gewechselt. In einer Multiphysikalischen Simulationsumgebung konnte gezeigt werden, dass die dadurch erzielte Verkürzung der Totzeit die Schwingneigung des Systems merklich reduziert.

Für eine weitere Reduzierung der Schwingungen im System wurde der Algorithmus erweitert. Hierbei wurde das Ventil bei Nullbedarf lediglich bis zum Eintrittspunkt zurückgefahren und nicht vollständig geschlossen. Dadurch konnte bei einem erneuen Lastbedarf die Totzeit noch weiter reduziert werden.

5 Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei meinen Arbeitskollegen, Stefan Mischler und Samuel Fux bedanken, die durch ihre fachliche Unterstützung und hilfreichen Anregungen zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben.

Des Weiteren gilt mein Dank meinen Eltern sowie meiner Schwester, die mir stets mit offenem Ohr zur Seite standen.

6 Nomenklatur

Formelzeichen

C_A	Ventil-Verstärkung $(m^3/s/\%h)$
T_A	Zeitkonstante des Antriebs (s)
$C_{W\ddot{U}}$	Thermische Antwort des Wärmeübertragers auf Prozessgrösse $(°C/kg/sec)$
$\dot{Q}$	Durchfluss (m^3/s)
T	Temperatur (K)

Indizes

h	Hub
A	Antrieb

7 Literaturverzeichnis

[1] Padhee, S., A Comparative Analysis of Various Control Strategies Implemented on Heat Exchanger System: A Case Study, Proceedings of the World Congress on Engineering 2010 Vol II, WCE 2010, June 30 - July 2, 2010, London, U.K.

[2] Guzzella, L., Analysis and Synthesis of Single-Input/Single-Output Control Systems, 3., revised edition, vdf Hochschulverlag AG at ETH Zurich, 2011