



## ROPA-DR-70 boosting

Timo Heubach  
Festo – Robotics, Dept. BC-DS

Ruiter Straße 82  
D-73734 Esslingen Berkheim, Germany  
E-Mail: [timo.heubach@festo.com](mailto:timo.heubach@festo.com)

20. Januar 2022

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>II</b>
<b>1 Problemstellung</b>	<b>1</b>
<b>2 Abhilfe</b>	<b>2</b>
2.1 Simulation . . . . .	5
2.2 Testbench . . . . .	9
<b>3 Zusammenfassung</b>	<b>15</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Aufbau Swivel Drive mit Ventilblock . . . . .	2
2.2	Aufbau Swivel Drive mit Ventilblock und boosting Valves . . . . .	3
2.3	Volumenstrom in Abhängigkeit des Stellsignals . . . . .	4
2.4	Test Modell . . . . .	5
2.5	Simulationsergebnisse Test Modell . . . . .	6
2.6	Gesamtes Modell Swivel Drive . . . . .	7
2.7	Simulationsergebnisse im Vergleich . . . . .	8
2.8	Simulationsergebnisse im Vergleich (Volumenströme) . . . . .	9
2.9	Versuchsaufbau . . . . .	10
2.10	Messergebnisse Versuchsaufbau (1) . . . . .	12
2.11	Messergebnisse Versuchsaufbau (2) . . . . .	13
2.12	Messergebnisse Versuchsaufbau Regelbarkeit . . . . .	14

# 1 Problemstellung

Der pneumatisch betriebene Roboter von Festo besitzt sechs Achsen. Jede Achse hat einen eigenen Schwenkantrieb (engl. Swivel Drive) und einen eigenen Ventilblock mit jeweils vier Piezoventilen (siehe [Abbildung 2.1](#)). Die Achse zwei, das sogenannte Schultergelenk, muss das größte Drehmoment aufbringen, weshalb dieser Antrieb der größte im gesamten Roboter ist. Dieser Antrieb ist der sogenannte *ROPA – DR – 70*. Die Zahl 70 steht dabei für das maximale Drehmoment in Newtonmeter, welches dieser Antrieb erzeugen kann. Die geforderte Geschwindigkeit dieses Antriebes liegt bei  $90\frac{\circ}{s}$ .

Durch verschiedene Simulationen und Messungen am realen Antrieb wurde festgestellt, dass die maximale Geschwindigkeit bei  $70\frac{\circ}{s}$  liegt und somit nicht der gewünschten maximal Geschwindigkeit entspricht. Der limitierende Faktor ist hierbei der Durchfluss der Piezoventile am Ventilblock. Diese haben einen maximalen Durchfluss von  $60\frac{l}{min}$ . Aufgrund der Größe der Kammern im Antrieb reicht dieser nicht aus, den gewünschten Druck in den Kammern schnell genug aufzubauen. Dadurch erreicht der Antrieb eine geringere maximale Geschwindigkeit.

## 2 Abhilfe

Wie in [Kapitel 1](#) beschrieben, kann durch eine Erhöhung des Volumenstroms der Ventile, die maximale Geschwindigkeit des Drehgelenkes erhöht werden. In [Abbildung 2.1](#) ist der bisherige Aufbau des Antriebes und des Ventilblockes dargestellt. Für jede Kammer gibt es ein Belüftungs- und ein Entlüftungsventil. An Anschluss eins liegt der Versorgungsdruck und an Anschluss drei der Umgebungsdruck an.

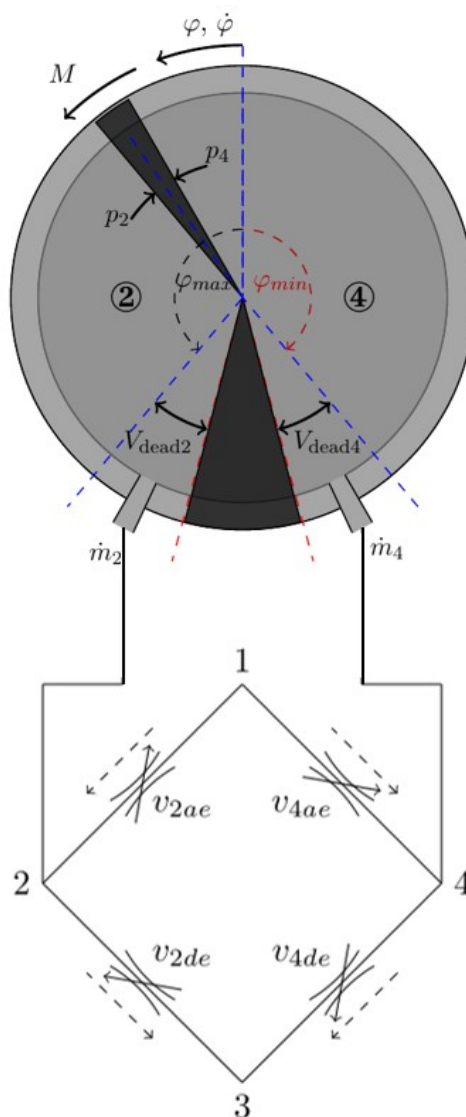


Abbildung 2.1: Aufbau Swivel Drive mit Ventilblock

## 2 Abhilfe

Die Überlegung ist nun wie der maximale Durchfluss, welcher in die Kammer hinein und wieder heraus strömt, erhöht werden kann und dabei weiterhin stufenlos einstellbar ist.

Zu jedem Piezoventil soll ein zusätzliches Schaltventil parallel dazu eingebaut werden. Dieser Aufbau ist in [Abbildung 2.2](#) zu sehen.

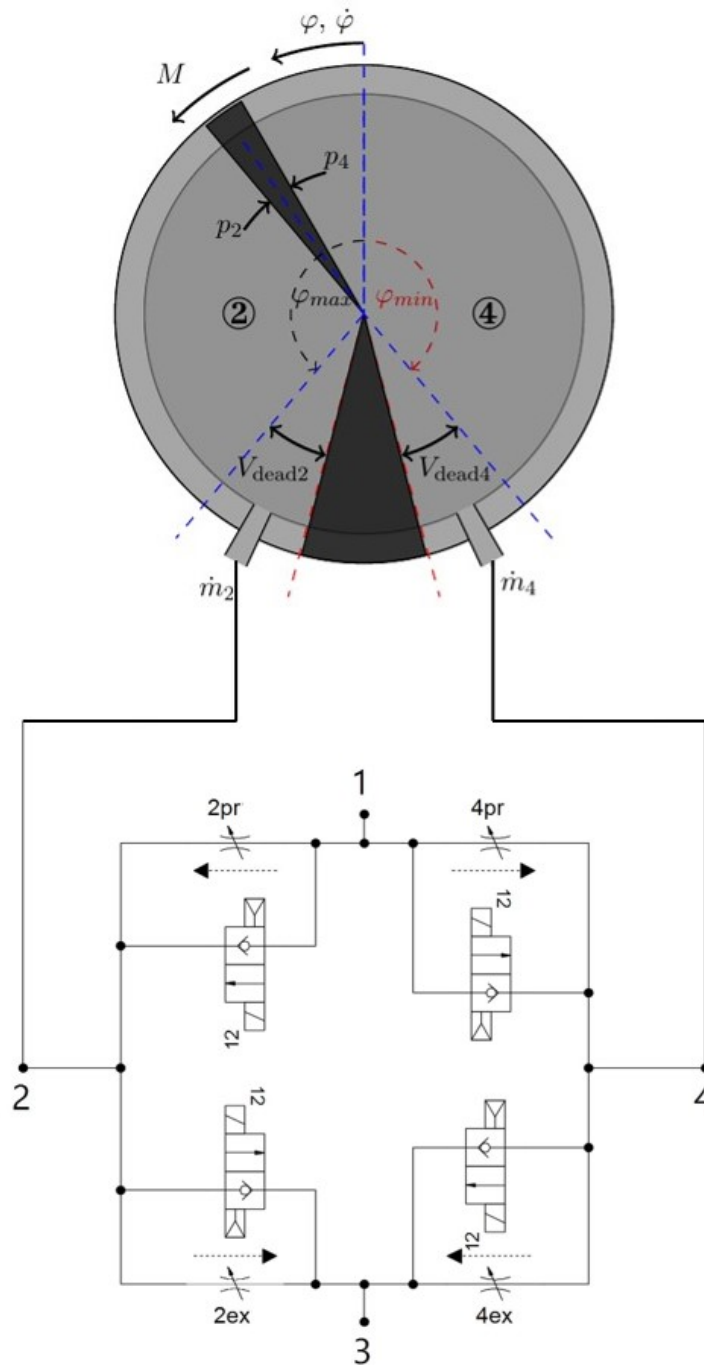


Abbildung 2.2: Aufbau Swivel Drive mit Ventilblock und boosting Valves

Diese Schaltventile, auch boosting Valves genannt, dürfen einen maximalen Durchfluss von  $60 \frac{l}{min}$  haben. Allgemein, darf der maximale Durchfluss der Schaltventile nicht größer als der des Piezoventils sein. Um nicht an die obere Grenze zu gehen, wird im Folgenden von einem Durchfluss von  $50 \frac{l}{min}$  ausgegangen. Der Durchfluss wird bei Parallelschaltungen addiert, d.h. es ist nun ein maximaler Durchfluss von bis zu  $110 \frac{l}{min}$  möglich. Die Schwierigkeit besteht nun darin, das Schaltventil und das Piezoventil so anzusteuern, dass weiterhin ein stufenloses Einstellen des Durchflusses möglich ist. Dafür soll das Piezoventil bei einem Durchfluss von  $50 \frac{l}{min}$  (muss größer oder gleich wie der Durchfluss des Schaltventils sein) sofort auf 0% Öffnung geschaltet werden und gleichzeitig das Schaltventil geöffnet werden. Anschließend wird der Durchfluss wieder über das Piezoventil geregelt. Ist also ein Durchfluss von z.B.  $80 \frac{l}{min}$  gefragt, liefert das Schaltventil  $50 \frac{l}{min}$  und das Piezoventil, durch eine Öffnung von 50%, die fehlenden  $30 \frac{l}{min}$ . Um das System stabiler zu machen, ist es sinnvoll eine Schalthysterese einzubauen. Diese wurde erst ab [Abschnitt 2.2](#) hinzugefügt. In [Abbildung 2.3](#) ist die Thematik, wie gerade beschrieben, dargestellt. Dabei ist der Volumenstrom  $\dot{V}$  über das Stellsignal  $u$  aufgezeigt.

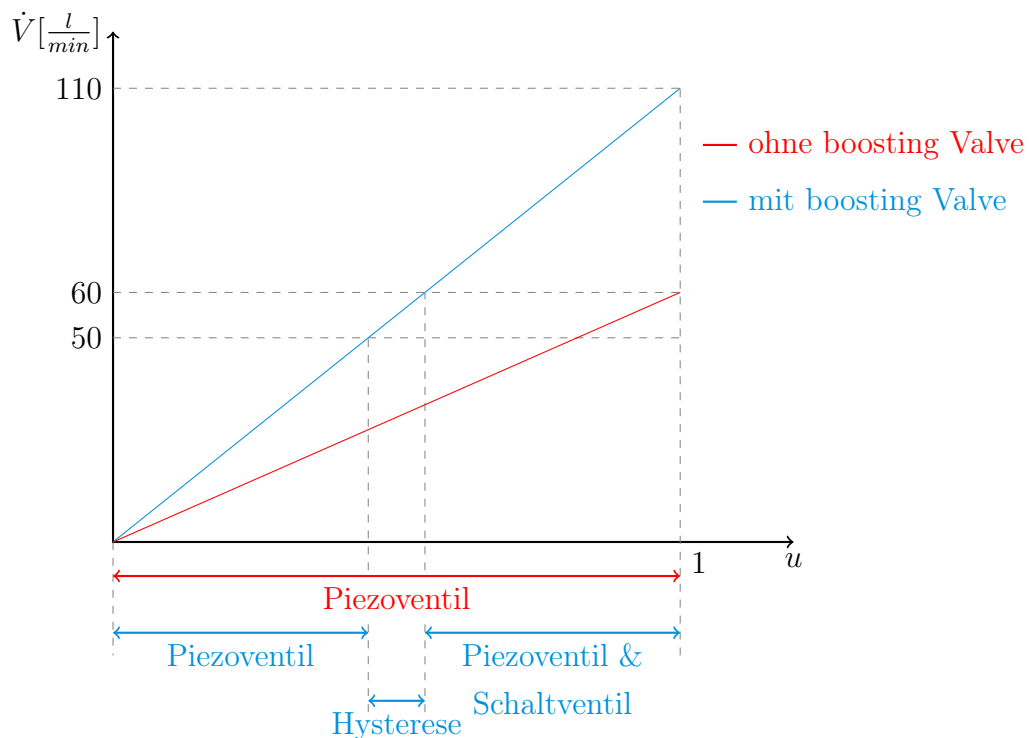


Abbildung 2.3: Volumenstrom in Abhängigkeit des Stellsignals

Im Folgenden wird diese Funktionsweise [Anhand einer Simulation in Matlab Simulink](#) überprüft.

## 2.1 Simulation

Als erstes wird in der Simulation nur die Funktionsweise der Ventile (Piezovenile und Schaltventile) ohne Rückkopplung des Druckes und der Temperatur in den Kammern betrachtet. Dies dient lediglich zum Grundverständnis und zur Überprüfung der Ansteuerung. Dafür wird an jedem Ventil ein Druckverhältnis von 6bar zu 0bar angelegt.

In [Abbildung 2.4](#) ist das Test Modell dargestellt. Auf der linken Seite wird das Stellsignal  $u$  in das System gegeben und über eine Ansteuerlogik auf die einzelnen Ventile weitergegeben. In den vier Ventilblöcken sind jeweils die Be- und Entlüftungsventile vorhanden. Das Ventil wandelt das Stellsignal in den dazugehörigen Massenstrom um. Auf der rechten Seite wird dieser in einen Volumenstrom umgerechnet.

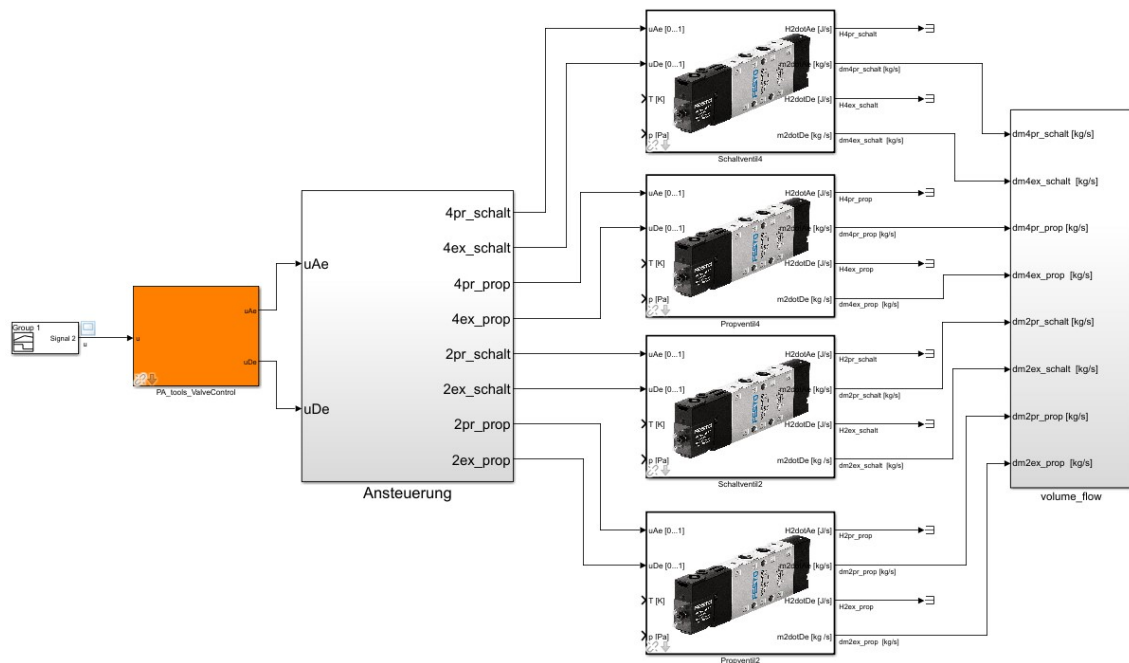


Abbildung 2.4: Test Modell

In [Abbildung 2.5](#) sind die Simulationsergebnisse dargestellt. Links oben ist das Stellsignal  $u$  zu sehen, welches linear von null bis eins ansteigt und wieder abfällt. In den rechten zwei Schaubildern sind die Volumenströme für das Belüften der Kammer 4 dargestellt. Im oberen Schaubild ist der Durchfluss des Piezovenils (Proportionalventil) zu sehen. Dieser steigt linear bis zu einem Volumenstrom von  $50 \frac{1}{\text{min}}$  an und fällt dann auf null ab. In diesem Moment wird das Schaltventil eingeschaltet und liefert den gewünschten Durchfluss. Anschließend steigt der Volumenstrom des Piezovenils bis zu den geforderten  $60 \frac{1}{\text{min}}$  an. Im linken unteren Schaubild ist die



## 2 Abhilfe

Summe des Durchflusses für das Belüften von Kammer vier und das Entlüften von Kammer zwei dargestellt. Dort ist gut zusehen, wie der Volumenstrom linear auf maximal  $110 \frac{\text{l}}{\text{min}}$  ansteigt.

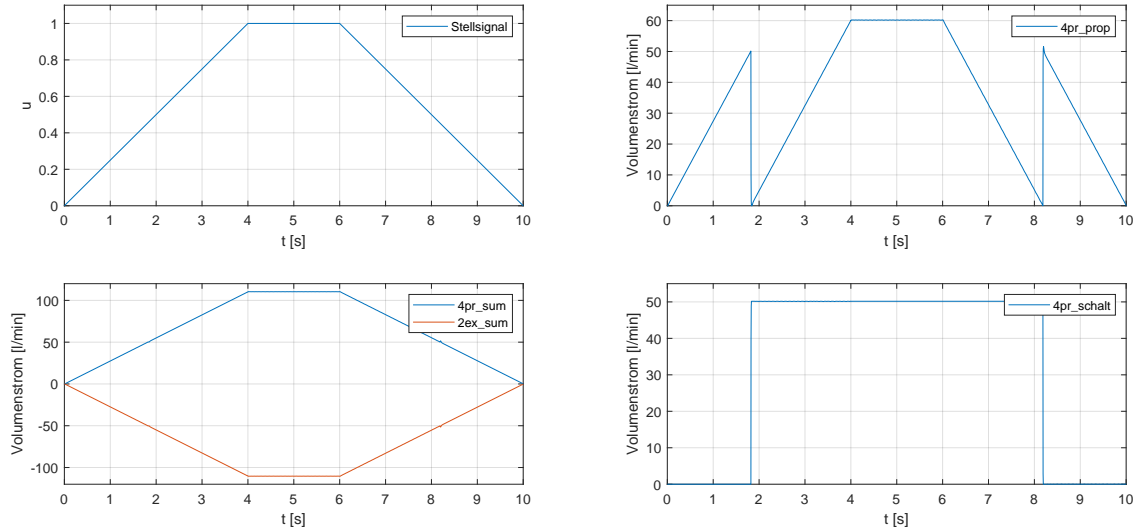


Abbildung 2.5: Simulationsergebnisse Test Modell

Durch die positiven Ergebnisse aus der ersten Simulation, wurde das Modell des gesamten Antriebes mit den oben erstellten Zusammenhängen erweitert und verändert. Das Modell hat als Eingangsgröße wieder das Stellsignal  $u$ . Als Ausgangsgröße erhalten wir hier den Winkel  $\varphi$ . Das heißt, das Modell wandelt die gestellten Massen bzw. Volumenströme in eine Bewegung um. Als erstes wird aus dem Durchfluss der Druck in den Kammern und anschließend das daraus resultierende Drehmoment berechnet. Als letztes wird daraus der Winkel und die Geschwindigkeit ermittelt. Der Aufbau der Ventile ist in [Abbildung 2.6](#) zu sehen. Zusätzlich zum Stellsignal gibt es zwei weitere Eingangsgrößen für die Ventile. Dabei handelt es sich um den Druck und die Temperatur, welche in den Kammern anliegt. Dadurch kann das Verhalten der Ventile realitätsnah simuliert werden.

## 2 Abhilfe

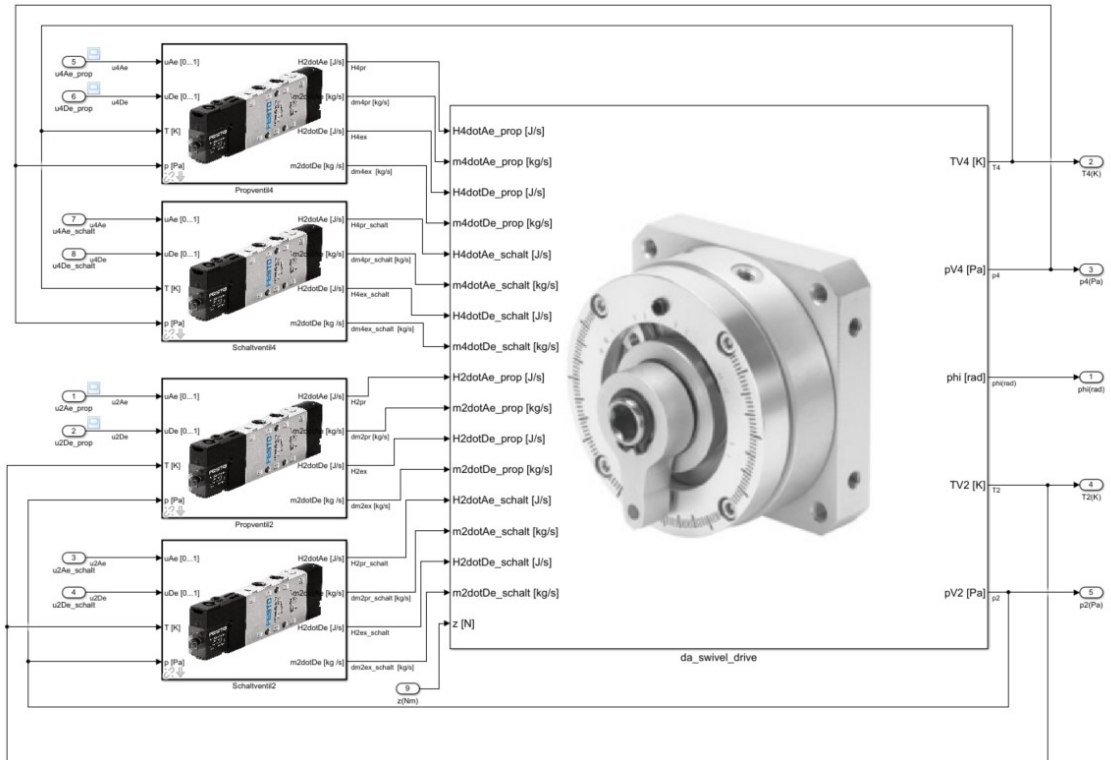


Abbildung 2.6: Gesamtes Modell Swivel Drive

Um zu überprüfen, ob das Modell korrekte Ergebnisse liefert, wird in [Abbildung 2.7](#) das Simulationsergebniss mit dem ursprünglichen Modell für den Swivel Drive verglichen (ohne boosting Ventile). Bei dem ursprünglichen Model, werden die Piezoventile so eingestellt, dass sie einen maximalen Durchfluss von  $110 \frac{1}{\text{min}}$  haben. Im oberen Schaubild ist wieder das Stellsignal  $u$  zu sehen. Darunter sind die Drücke in den Kammern dargestellt. Im dritten Schaubild ist der Verlauf des Winkels aufgezeigt. Im letzten Schaubild ist die Geschwindigkeit dargestellt.

Zwischen den zwei Simulationsergebnissen gibt es keine Abweichung, weshalb die Kurven aufeinander liegen. Außerdem ist im unteren Schaubild zu erkennen, dass die maximal Geschwindigkeit auf ca.  $120 \frac{\circ}{\text{s}}$  angehoben wurde.

## 2 Abhilfe

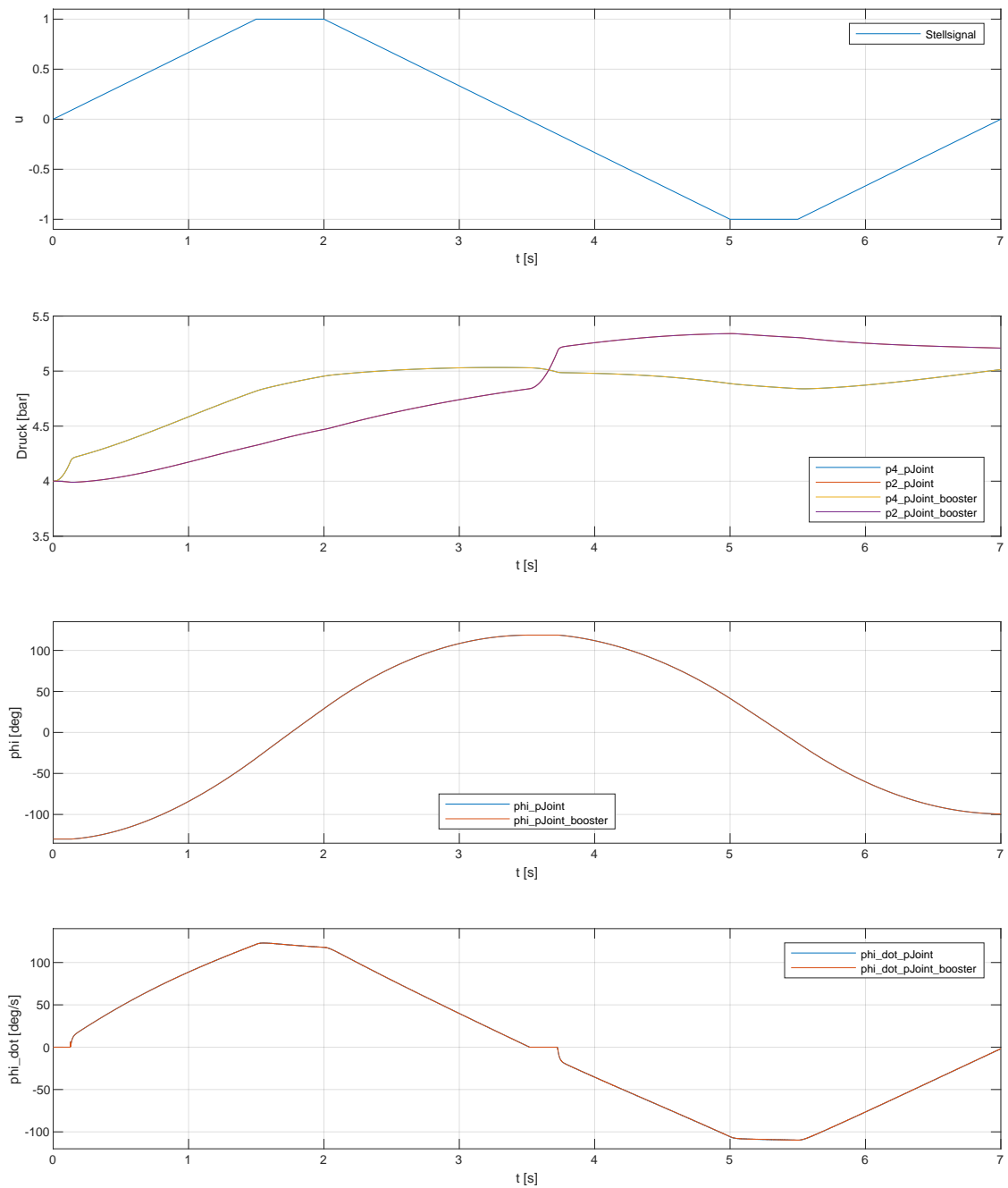


Abbildung 2.7: Simulationsergebnisse im Vergleich

Als nächstes werden die Volumenströme in [Abbildung 2.8](#) miteinander verglichen. Auch hier ist kein Unterschied zwischen den beiden Modellen zu sehen. Der maximale Volumenstrom wird auf ca.  $90 \frac{1}{\text{min}}$  angehoben.

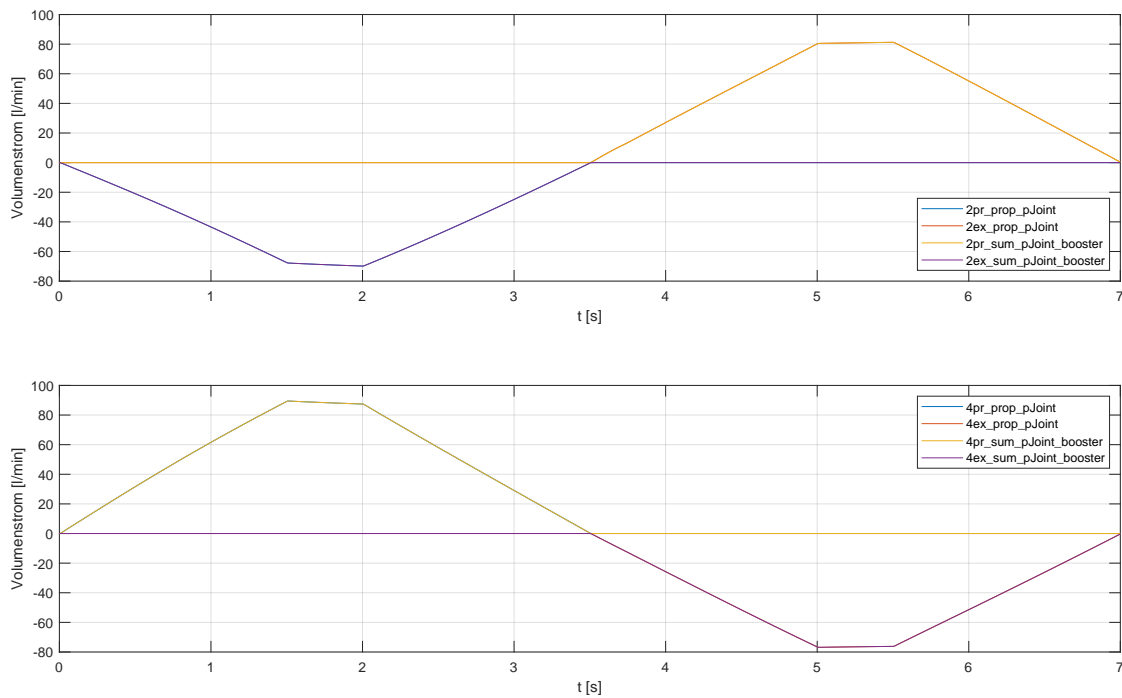


Abbildung 2.8: Simulationsergebnisse im Vergleich (Volumenströme)

Bisher wird davon ausgegangen, dass die Psi Funktion für die Piezoventile identisch ist, wie die der Schaltventile. In der Realität können diese minimal unterschiedlich sein. Dadurch würde bei dem Model, mit dem boosting Ventil, der Übergang zwischen nur Piezoventil und Piezoventil mit Schaltventil nicht 100%ig linear verlaufen. Im Umschaltmoment kommt es dadurch zu einem leichten Sprung im Verlauf des Volumenstromes und damit auch der Geschwindigkeit.

Im Folgenden wird die Thematik an einem realen Versuchsaufbau untersucht.

## 2.2 Testbench

In [Abbildung 2.9](#) ist der Versuchsaufbau zusehen. Die Steuerung erfolgt über eine MicroLabBox von der Firma dSpace. Dafür wird aus einem Matlab Simulink Modell der Code für diese Steuerung generiert. Anschließend lässt sich der Versuchsaufbau über das Programm ControlDesk steuern. Die MicroLabBox ist direkt mit der Platine des Versuchsaufbaus verbunden. Als boosting Ventile werden Schnellschaltventile verwendet. Vor jedem Ventil ist eine Drossel eingebaut, um manuell den gewünschten Durchfluss für die Schnellschaltventile einzustellen. Im Normalfall werden diese Schnellschaltventile sehr warm, weshalb die Spannungsversorgung und das

## 2 Abhilfe

Schaltsignal vom Ausgang auf der Platine geschaltet werden. Dadurch liegen keine Dauerhaften 24V am Ventil an. Der Versorgungsdruck kann über das Druckregelventil eingestellt werden.

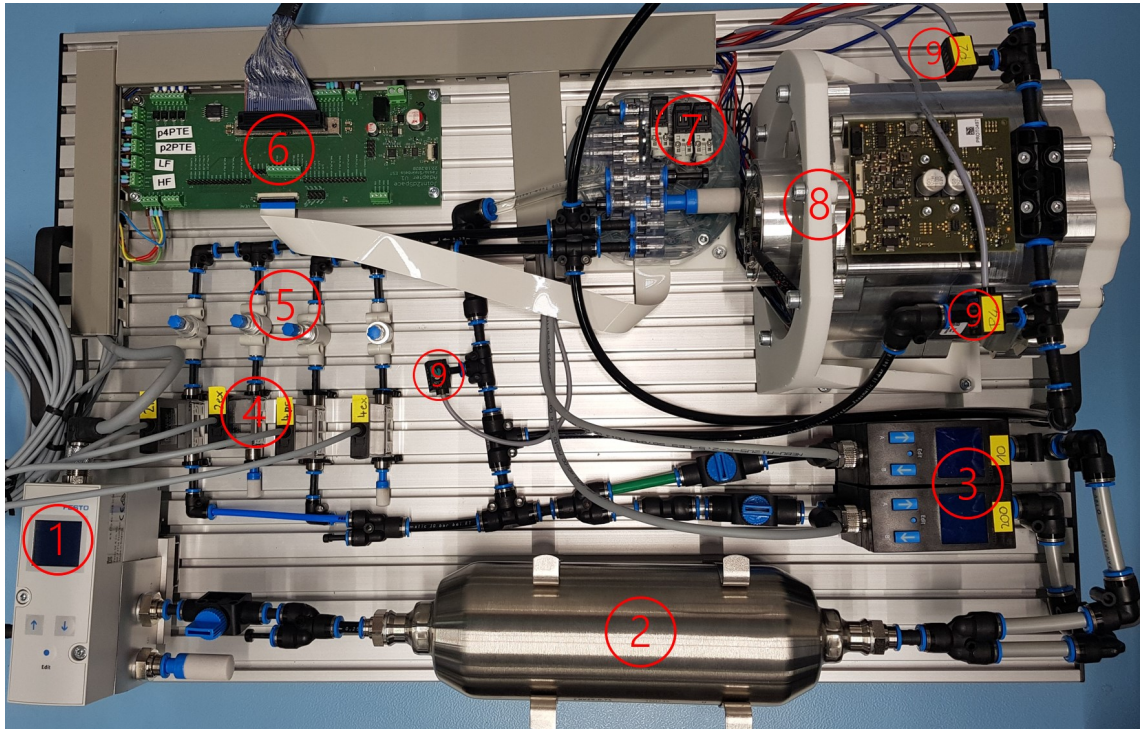


Abbildung 2.9: Versuchsaufbau

1. Druckregelventil
2. Druckluftbehälter
3. Durchflusssensoren
4. Schnellschaltventile
5. Drosselventile
6. Platine
7. Ventilblock mit Piezoventilen
8. Schwenkantrieb *ROPA – DR – 70*
9. Drucksensoren

Auf das System wird ein lineares Stellsignal gegeben und alle relevanten Größen

gemessen. Bei den folgenden Messungen wird ein Versorgungsdruck von 6bar und ein Durchfluss von  $50 \frac{1}{\text{min}}$  bei den boosting Ventilen eingestellt.

In [Abbildung 2.10](#) ist der erste Teil der Messergebnisse dargestellt. Im oberen Schaubild ist das Stellsignal zusehen. In den Schaubildern darunter sind die Drücke in den Kammern, der Volumenstrom, der Winkel und die Geschwindigkeit aufgezeigt. Der maximale Volumenstrom beträgt hier ca.  $75 \frac{1}{\text{min}}$ . Dadurch ergibt sich eine Höchstgeschwindigkeit von bis zu  $115 \frac{\circ}{\text{s}}$ . Beim Verlauf des Volumenstromes und der Geschwindigkeit, ist im Umschaltmoment (Piezo schließt und Schaltventil öffnet) ein kleiner Sprung zusehen. Das kann entweder daran liegen, dass ein Piezoventil nicht exakt kalibriert ist oder der Durchfluss eines Schaltventiles nicht exakt  $50 \frac{1}{\text{min}}$  beträgt.

## 2 Abhilfe

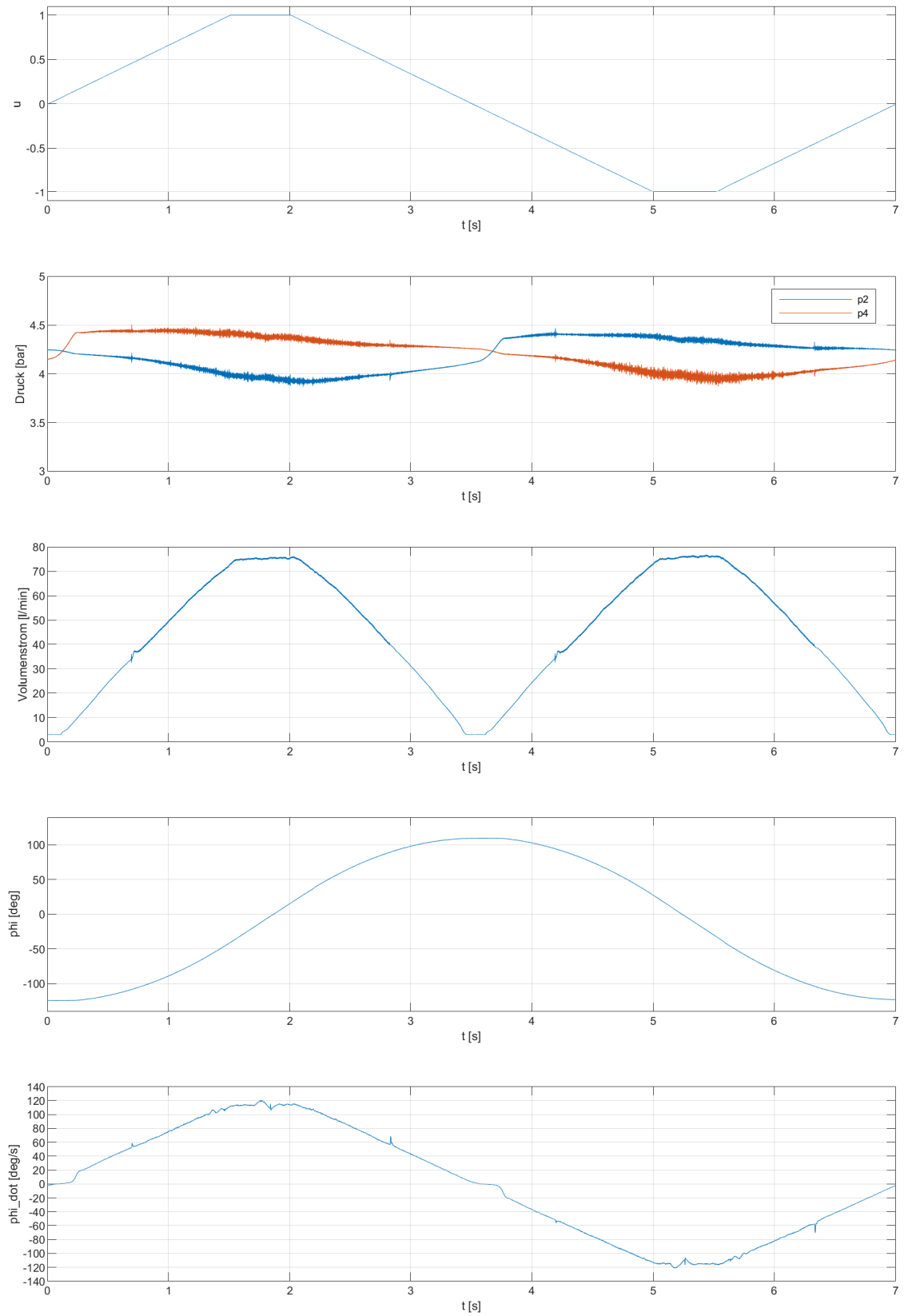


Abbildung 2.10: Messergebnisse Versuchsaufbau (1)

In [Abbildung 2.11](#) sind die Öffnungen der einzelnen Ventile aufgezeigt. Hier ist wieder gut zu erkennen, dass das Piezoventil proportional zum Stellsignal öffnet und ab einem bestimmten Punkt das Schaltventil ein- und das Piezoventil ausgeschaltet wird. Danach öffnet das Piezoventil linear, bis es 100% geöffnet ist. Im oberen Schaubild ist zu erkennen, dass das Ventil *2ex\_prop* (lilafarbenes Signal) nicht auf 100% öffnet. Das liegt an der nicht exakten Kalibrierung dieses Ventils.

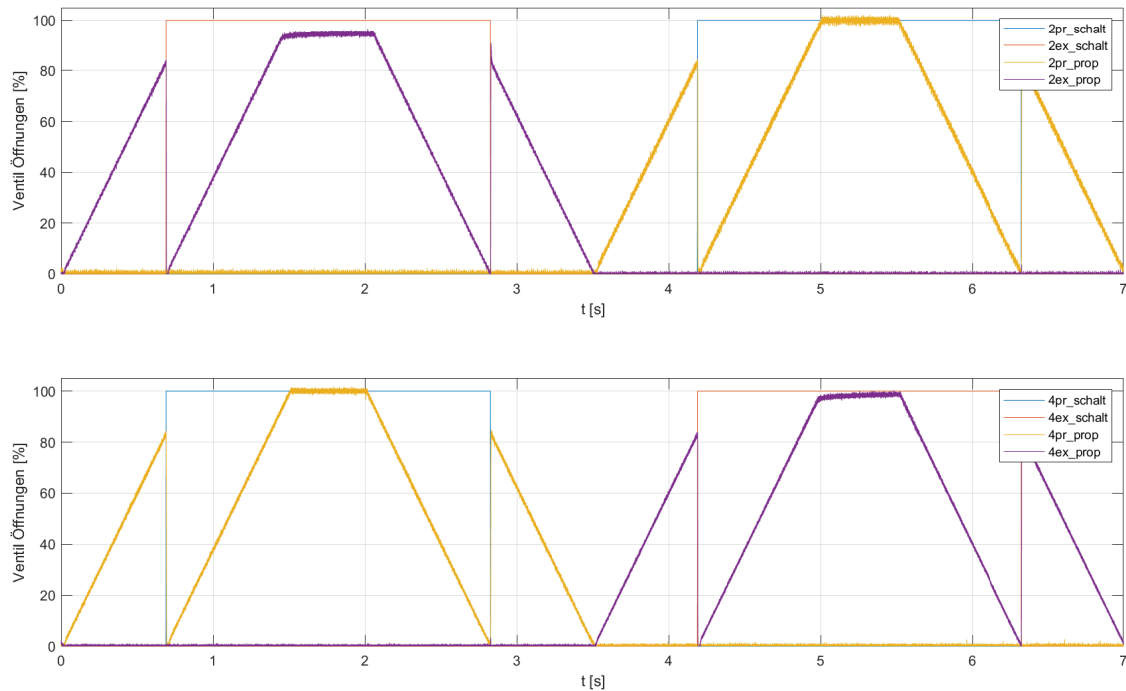


Abbildung 2.11: Messergebnisse Versuchsaufbau (2)

Als letztes wird die Regelbarkeit des Systems untersucht (Positionsregelung). Dafür wird ein einfacher PI - Regler verwendet. Außerdem wurde eine Hysterese von  $3,3 \frac{1}{\text{min}}$  implementiert, damit es im Umschaltmoment zu keinem Schwingen der Ventile kommt.

In [Abbildung 2.12](#) sind die Messergebnisse aufgezeigt. Im oberen Schaubild ist die vorgegebene Bahn und der gemessene Winkel aufgezeigt. Darunter ist die Regelabweichung zusehen. In den unteren zwei Schaubildern sind wieder die Öffnungen der einzelnen Ventile dargestellt. Dort ist die Hysterese gut zu erkennen. Das Schaltventil schaltet bei einem höheren Stellsignal zu als es abschaltet. Die Regelabweichung ist für einen einfachen PI - Regler in einem akzeptablen Bereich. Um noch geringere Abweichungen zu erreichen muss ein anderes Regelkonzept verwendet werden (z.B. mit einem modellbasierten Ansatz).



## 2 Abhilfe

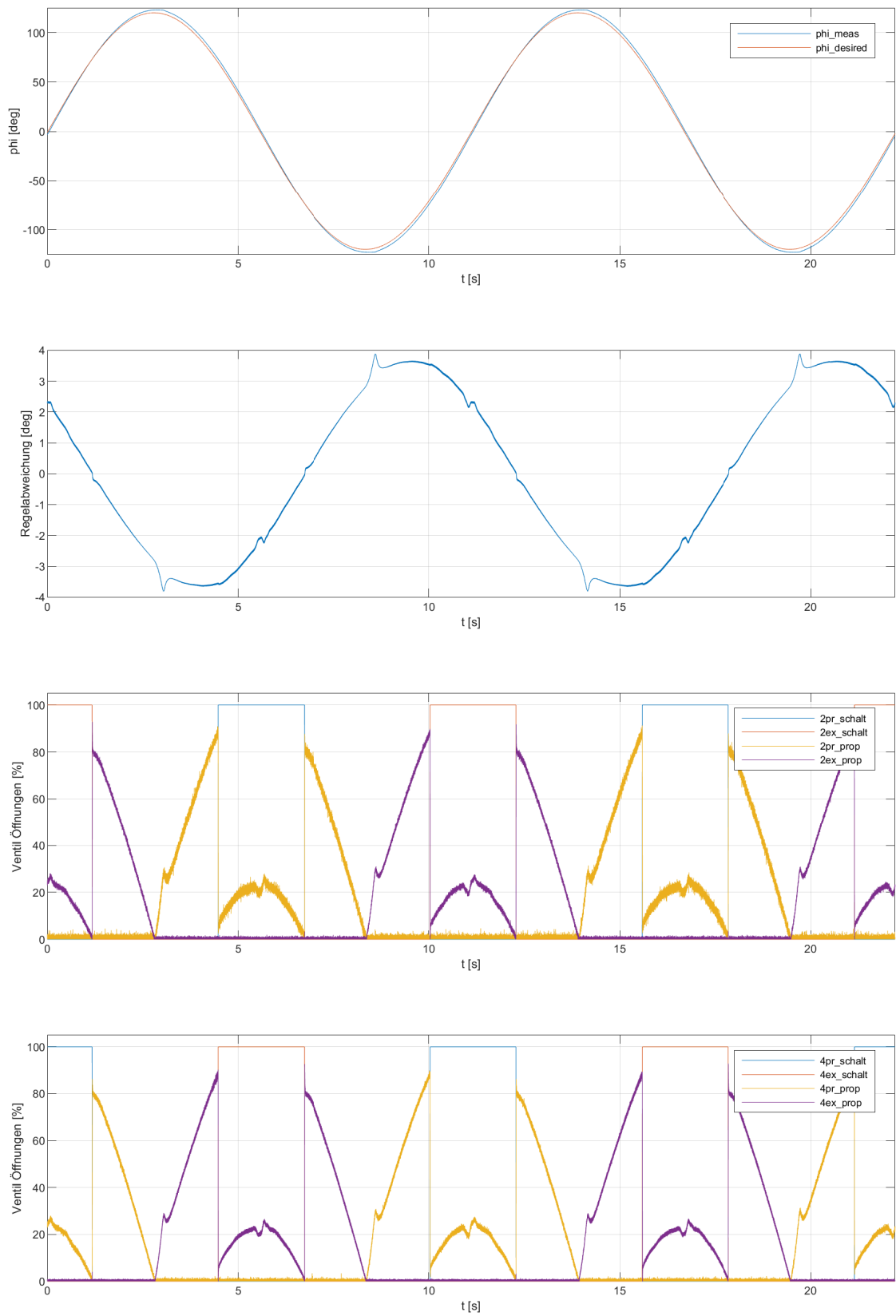


Abbildung 2.12: Messergebnisse Versuchsaufbau Regelbarkeit

### 3 Zusammenfassung

Durch eine Parallelschaltung zwischen Proportionalventil und Schaltventil, kombiniert mit einer geeigneten Ansteuerung, kann eine exakte Regelung für höhere Durchflüsse realisiert werden. Dadurch ist es möglich höhere Geschwindigkeiten in einem pneumatischen Schwenkantrieb zu erreichen, ohne Abstriche in der exakten Regelung machen zu müssen. Dies kann eine gute Lösung sein, um das Problem, maximal Geschwindigkeit des Antriebs *ROPA – DR – 70* ist zu gering, zu lösen. Dafür müssen allerdings vier Schaltventile im nahen Umfeld zur Achse zwei untergebracht werden. Außerdem muss der Durchfluss der Schaltventile, so exakt wie möglich  $50 \frac{l}{min}$  (hat sich durch mehrere Messungen bestätigt) betragen. Im Umschaltmoment kommt es noch zu leichten Sprüngen des Volumenstromes und dadurch auch in der Bewegung. Dafür muss noch eine Lösung gefunden werden, damit diese so gering wie möglich sind.