

Entwicklung und Validierung eines hydraulischen Weitbereichsreglers

Diplomarbeit

ausgeführt zum Zweck der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs (Dipl.-Ing.)
der Studienrichtung Maschinenbau
unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn Franz Haas
betreut von **Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn Jörg Edler**
Institut für Fertigungstechnik

eingereicht an der Technischen Universität Graz
Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften
von

Martin Braun, BSc
1031532

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche gekennzeichnet habe.

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, am.....

(Datum/date)

.....

(Unterschrift/signature)

Danksagung

Zunächst möchte ich mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die mich während der vorliegenden Arbeit unterstützt und motiviert haben.

Ganz besonders gilt dieser Dank der TEST-FUCHS GmbH und meinem dortigen Betreuer MSc Ing. Andreas Strohmer, welcher mir diese Diplomarbeit hat. Ebenfalls möchte ich mich bei Franz Berka, Ing. Andreas Überreiter und meinem Betreuer seitens der Technischen Universität Graz Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Jörg Edler dafür bedanken, dass sie jederzeit für Fragen zur Verfügung standen.

Neben den Betreuern und Ansprechpartnern seitens der TEST-FUCHS GmbH und Technischer Universität Graz möchte ich einen Dank an die Eltern meiner Freundin und meiner Freundin Katrin aussprechen, welche mir selbst in schweren Zeiten beiseite standen und somit am Erfolg dieses Studiums maßgebend beteiligt waren.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Eltern dafür bedanken, dass sie stets ihr Bestes gegeben haben, um mich in meinem beruflichen Werdegang zu unterstützen.

Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Schaltung verschiedenster Messgeräte und Ventile der Fluidtechnik zu entwickeln und im Anschluss zu testen, welche in einem möglichst großen Bereich sowohl für Druckregelung als auch für Volumenstromregelung geeignet ist. Dabei soll die Schaltung eine ausreichende Genauigkeit besitzen, um in den von der Test-Fuchs GmbH entwickelten Prüfständen als Standardlösung eingesetzt werden zu können.

Abstract

The objective of this master thesis is to develop and afterwards test a hydraulic circuit including different measuring devices and hydraulic valves to control pressure and flow in a broad range. Therefore the circuit should have a sufficient accuracy to use it as a standard solution for the TEST-FUCHS hydraulic test rigs.

Inhaltsverzeichnis

Statutory Declaration	I
Danksagung	II
Kurzfassung	III
Abstract	III
Formelzeichen, Bezeichnungen und häufig verwendete Abkürzungen	VIII
1. Einleitung	1
1.1. Begründung und Ziele des Projektes	1
1.2. Technische Spezifikation	2
2. Anforderungsanalyse	3
2.1. Medien	3
2.1.1. Skydrol® LD-4	3
2.1.2. AeroShell® Fluid 41	4
2.2. Versorgung der Schaltung	4
2.3. Betriebsart	5
2.4. Druckabfall	5
2.5. Sollwertsprung und Regelgenauigkeit	5
2.6. Weitere besondere Betriebszustände laut Wartungsanleitungen	5
2.7. Zusammenfassung der Anforderungen:	6
3. Funktionsanalyse	7
3.1. Istwerterfassung	8
3.1.1. Druckmessung	8
3.1.2. Volumenstrommessung	9
3.2. Stellelemente	10
3.2.1. Druckventile	11
3.2.2. Volumenstromventile	13
3.2.3. Wegeventile	16
4. Mathematische Systembeschreibung	18
4.1. Berechnung Brückenhilfsglied A	18
4.1.1. Fall 1: Bereich innerhalb der Überdeckung	18
4.1.2. Fall 2: Bereich außerhalb der Überdeckung	20
4.1.3. Betrachtung Stetigventil	21
4.1.4. Betrachtung des Regelkreises für Druckregelung	21
4.1.5. Einfluss der Systemparameter auf das Verhalten des Regelkreises	25
5. Komponentenrecherche	27
5.1. Istwerterfassung	27

5.1.1.	Druckmessung	27
5.1.2.	Volumenstrommessung.....	28
5.2.	Stellelemente	29
5.2.1.	Bestehende Variante.....	29
5.2.2.	Alternative für Bosch 3WRCBH32	31
5.2.3.	Weitere Alternativen	32
5.2.4.	Vergleich der Einbauventile.....	33
5.2.5.	Lösung mit konventioneller Ventiltechnik.....	34
6.	Lösungsvarianten	37
6.1.	Elektronisch geregelte Variante mit Bosch Regelventil und kombinierter Lageregelung.....	37
6.1.1.	Ventile	38
6.1.2.	Messmittel.....	38
6.1.3.	Kosten.....	39
6.2.	Elektronisch geregelte Variante mit ATOS Regelventil und kombinierter Lageregelung.....	40
6.2.1.	Ventile	41
6.2.2.	Messmittel.....	41
6.2.3.	Kosten.....	41
6.3.	Konventionelle Variante mit SUN Einschraubventilen.....	42
6.3.1.	Ventile	43
6.3.2.	Messmittel.....	43
6.3.3.	Kosten.....	43
6.4.	Vergleich der Varianten	44
7.	Testvorbereitung	45
7.1.	Versorgung	45
7.1.1.	Auslegung Gas-Vorspanndruck im Speicher	46
7.2.	Belastungsaufbau	48
7.2.1.	Komponenten des Belastungsaufbaus	48
7.3.	Verbindungsleitungen im Testaufbau	50
7.4.	Testablauf	51
7.4.1.	Funktionstests	51
8.	Test der Variante ATOS	60
8.1.	Hydraulikschaltplan	60
8.2.	Fotos Testaufbau	61
8.3.	Testergebnisse.....	61
8.3.1.	Test Stick-Slip Effekt	61
9.	Test der Variante Bosch	64

9.1.	Hydraulikschaltplan	64
9.2.	Vorbereitung.....	65
9.2.1.	Test Stick-Slip Effekt	65
9.2.2.	Einstellung der Reglerparameter für Druckregelung	65
9.3.	Funktionstests Druckregler	72
9.3.1.	Druckregelung im Zulauf	72
9.3.2.	Druckregelung im Zulauf mit einer Schlauchleitung	75
9.3.3.	Druckregelung im Ablauf	77
9.3.4.	Übergang Druckregelung Zulauf/Ablauf.....	79
9.4.	Einstellung Volumenstromregler.....	81
9.5.	Test Volumenstromregelung	82
9.5.1.	Stromregelung im Zulauf	82
9.5.2.	Stromregelung im Ablauf bis 50 l/min	83
9.5.3.	Stromregelung im Ablauf über 50 l/min.....	83
9.6.	Übergangsverhalten Druck-Durchflussregelung	84
9.6.1.	Übergangsverhalten im Zulauf	84
9.7.	Implementierung des parallelgeschalteten Regelventils	85
10.	Test der konventionellen Variante	86
10.1.	Hydraulikschaltplan.....	86
10.2.	Einstellung Druckregelung	87
10.3.	Funktionstests Druckregler	88
10.3.1.	Druckregelung im Zulauf.....	88
10.3.2.	Druckregelung im Ablauf.....	89
10.3.3.	Übergang Druckregelung Zulauf/Ablauf	90
10.4.	Einstellung Stromregelung.....	92
10.5.	Funktionstests Stromregler	94
10.5.1.	Stromregelung im Zulauf.....	94
10.5.2.	Stromregelung im Ablauf bis 50 l/min.....	95
10.5.3.	Stromregelung im Ablauf über 50 l/min	96
10.6.	Übergangsverhalten Druckregelung/ Durchflussregelung	96
11.	Zusammenfassung der Testergebnisse.....	98
11.1.	Druckregelung	98
11.2.	Stromregelung	99
11.3.	Übergangsverhalten Druck-Durchflussregelung.....	100
12.	Zusammenfassung und Ausblick.....	101
13.	Literaturverzeichnis	103
	Abbildungsverzeichnis.....	106

Tabellenverzeichnis.....	110
Anhang.....	112
Anhang A: Hydraulikschaltpläne und Stückliste Lösungsvariante.....	112
Anhang B: Hydraulikschaltpläne und Stückliste Testaufbau.....	119
Anhang C: Fotos Testaufbau	128

Formelzeichen, Bezeichnungen und häufig verwendete Abkürzungen

Zeichen	Beschreibung	Einheit
A	Fläche	m^2
B	Durchflussbeiwert	$l/(min\ mm)\sqrt{bar}$
C_H	Hydraulische Kapazität	l/bar
D_V	Dämpfungsgrad des Ventils	-
$E'_{\dot{t}}$	Ersatzkompressionsmodul	bar
f_0	Kennfrequenz des Ventils	$1/s$
g	Gravitationskonstante	m^2/s
i	Strom (Eingangssignal)	A
m	Masse	kg
NG	NenngroÙe	mm
n_μ	Nullstellen der Übertragungsfunktion	-
p	Druck	bar
p_0	Versorgungsdruck	bar
p_A	Druck auf Seite A	bar
P_{kriti}	Kritischer P Wert (Regler)	-
p_L	Lastdruck	bar
p_v	Polstellen der Übertragungsfunktion	-
\dot{p}	Druckänderungsgeschwindigkeit	bar/s
Q	Volumenstrom	l/min
Q_A	Volumenstrom vom/zum Anschluss A	l/min
Q_L	Lastvolumenstrom	l/min
t_{ent}	Entladezeit des Speichers	S
U	Spannung (Eingangssignal)	V

V_0	Ölvolumen	l
V_0	Speichervolumen	l
V_K	Kreisverstärkung	-
V_{pU}	Druck-Spannungs-Verstärkung	V/bar
V_{py}	Druck-Signal-Verstärkung	bar/mm
V_{Qp}	Volumenstrom-Druck-Verstärkung	(l/min)/bar
V_{Qu}	Volumenstrom-Signal-Verstärkung	(l/min)/V
V_{Qy}	Volumenstrom-Signal-Verstärkung	(l/min)/mm
V_{tot}	Totvolumen des Kompressionsraumes	l
V_V	Ventilverstärkung	mm/A
y	Stellweg	mm
y_0	Überdeckung	mm
\dot{y}	Stellgeschwindigkeit	m/s
\ddot{y}	Stellbeschleunigung	m/s ²
α_D	Durchflusskennzahl	l/(min m ²)√(kg/bar m ²)
Δp	Druckdifferenz	bar
ΔV_{ad}	Adiabate Gasvolumenänderung	l
κ	Istentropenexponent	kJ/kgK
ν	kinematische Viskosität	mm ² /s
ρ	Dichte	kg/m ³
ω_V	Kreisfrequenz des Ventils	1/s

1. Einleitung

1.1. Begründung und Ziele des Projektes

Das Unternehmen TEST-FUCHS GmbH wurde 1946 in Groß-Siegharts im nördlichen Waldviertel gegründet. Vorerst beschäftigten sich zwei Mitarbeiter an der Reparatur elektrischer Maschinen, doch bereits Anfang der 60er begann man mit dem Bau von Prüfgeräten für die Luftfahrt. Heute ist die TEST-FUCHS GmbH mit mehr als 400 Mitarbeitern einer der führenden Hersteller im Prüfanlagenbau. Die eigens entwickelten, konstruierten und gefertigten Hydraulikprüfstände dienen zur wiederkehrenden Überprüfung von verschiedensten Komponenten wie beispielsweise Hydraulikzylindern, Hydraulikmotoren oder Hydraulikventilen. Diese Prüfkörper entstammen hauptsächlich der Flugzeugindustrie und müssen gemäß der jeweiligen Wartungsanleitung getestet werden. Dabei ist meist ein bestimmter Druck bzw. Volumenstrom zu regeln, wobei sowohl niedrige als auch hohe Parameter gefordert sind. Diese Anforderung verursachte in der Vergangenheit Schwierigkeiten bei der Inbetriebnahme der Prüfstände. Um derartige Probleme zu vermeiden und die Inbetriebnahmephase zu verkürzen, soll hier eine Standardlösung entwickelt und im Anschluss auf einem hauseigenen Prüfstand getestet werden.

Die einzelnen Aufgabenpunkte dieses Projekts lauten folgendermaßen:

- Analyse und Ergänzung der gestellten Anforderungen
- Bauteilrecherche
- Erarbeiten von mehreren Lösungsvarianten
- Erstellung von Bewertungskriterien
- Bewertung der Lösungsvarianten
- Detailkonstruktion der besten Lösung
- Beschaffung der notwendigen Komponenten
- Erstellung eines Testplanes
- Planung eines Testaufbaues
- Inbetriebnahme des Testaufbaues
- Prüfen des Testaufbaues laut Testplan
- Verbesserung der Lösung
- Verifizierung der Lösung laut Anforderungsliste
- Dokumentation

1.2. Technische Spezifikation

Die erwünschten technischen Eckdaten der Schaltung wurden von der TEST-FUCHS GmbH zur Verfügung gestellt und sind in Tab. 1 ersichtlich. Diese Werte dienen jedoch lediglich als Richtlinie zur Vorauswahl der Komponenten und sind nicht bindend. Durch Analyse der Wartungsanleitungen der Prüfkörper soll die Spezifikation eingeschränkt werden, um so die beste Lösung zu finden.

Allgemein	
Medium	Skydrol® LD-4 bzw. AeroShell® Fluid 41
Fluidtemperaturbereich	10 bis 80°C
Versorgungsdruckbereich	50 bis 450 bar
Betriebsart	Zulauf & Ablauf
Druckregelung	
Druckbereich	2 bis 450 bar
Statische Regelgenauigkeit	± 0,5 % Istwert
Sollwertsprung	Innerhalb ±5% in 500ms
Max. Druckabfall	20%
Volumenstromregelung	
Bereich	-250 l/min bis 250 l/min
Stabiler Regelbereich	-50 l/min bis 250 l/min
Statische Regelgenauigkeit	± 0,5 % Istwert
Sollwertsprung	Innerhalb ±5% in 500ms

Tab. 1: Technische Spezifikation, Quelle: Eigene Darstellung.

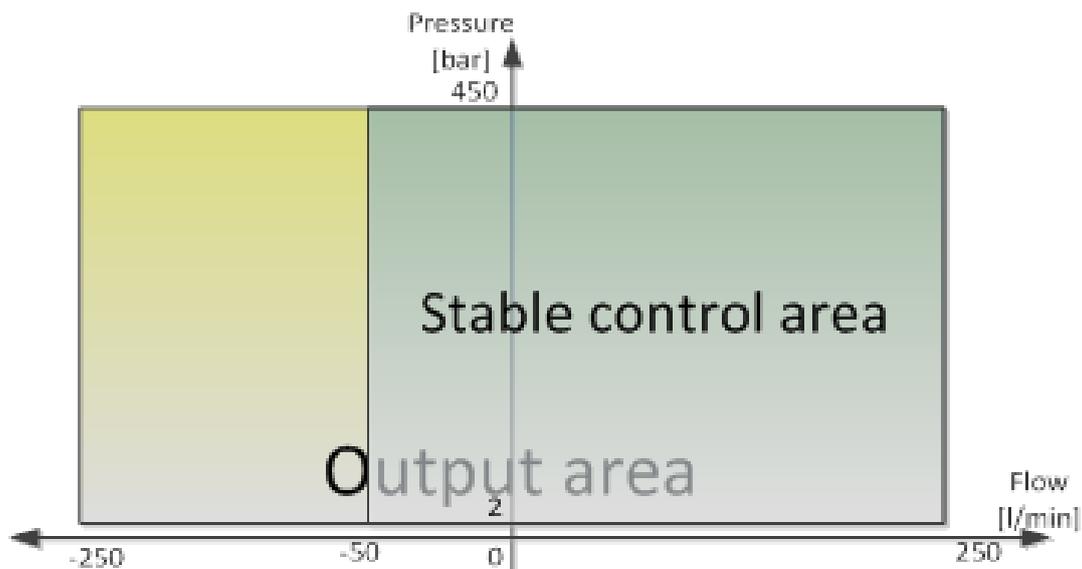


Abb. 1: Regelbereich, Quelle: Eigene Darstellung.

2. Anforderungsanalyse

2.1. Medien

2.1.1. Skydrol® LD-4

2.1.1.1. Dichtungswerkstoffe

Das Medium Skydrol® LD-4 gehört zur Gruppe der schwerentflammbaren Druckflüssigkeiten Typ HFD. Diese Medien weisen zwar eine hohe Oxidationsbeständigkeit und einen guten Verschleißschutz auf, jedoch erfordern sie spezielle Dichtungsmaterialien.¹ In Standardkomponenten für die Industriehydraulik werden HFD verträgliche Dichtungen im Regelfall nicht eingesetzt, weshalb bislang bei der TEST-FUCHS GmbH die Ventile demontiert und nachträglich ein Wechsel der Dichtringe vorgenommen wurde. Dem entsprechend muss beim vorliegenden Projekt auch auf den notwendigen Aufwand für einen Dichtungswechsel geachtet werden.

Laut Klinger GmbH sind folgende Materialien für das Medium Skydrol LD-4 empfohlen:²

- EPDM
- FKM-Viton (bedingt)

Die TEST-FUCHS GmbH setzt für Skydrolprüfstände Ventile mit EPDM AP540 Dichtungen ein, weshalb diese auch hier bevorzugt verwendet werden sollen.

2.1.1.2. Viskosität

In der Spezifikation ist ein Temperaturbereich von 10°C bis 80°C angegeben. Skydrol LD-4 besitzt laut Solutia Inc. die in Tab. 2 eingetragenen kinematischen Viskositätswerte:

Temperatur [°C]	Kinematische Viskosität [mm ² /s]
-54	2000 max.
38	10,65 min.
99	3,66 min.

Tab. 2: Viskositätswerte Skydrol® LD-4, Quelle: In Anlehnung an Solutia Inc. (2003), S. 4.

Da für die Einsatztemperaturen des hydraulischen Weitbereichsreglers keine genauen Werte der Viskosität verfügbar sind, werden diese interpoliert.

Somit ergibt sich die kinematische Viskosität von Skydrol® LD-4 bei 10°C und bei 80°C folgendermaßen:

$$v_{10\text{SKY}} = \text{max. } 616,1 \text{ mm}^2/\text{s}$$

$$v_{80\text{SKY}} = \text{min. } 6,2 \text{ mm}^2/\text{s}$$

Hier könnten beide Werte bei den eingesetzten Komponenten Probleme verursachen. Ist dies der Fall und sind laut Hersteller geringere bzw. höhere Viskositäten angegeben, wird im Kapitel 5 die zulässige Einsatztemperatur des betroffenen Bauteils berechnet.

¹ Vgl. Hochleitner (2010a), S. 43.

² Vgl. KLINGER GmbH (Hrsg.) (2012), S. 8.

2.1.2. AeroShell® Fluid 41

2.1.2.1. Dichtungswerkstoffe

Das Medium AeroShell® Fluid 41 gehört zur Gruppe der Mineralöle und ist somit gut mit herkömmlichen Dichtungsmaterialien verträglich. Beständige Dichtungen laut Klinger GmbH sind:³

- NBR
- FKM-Viton

Diese Dichtungen sind im Gegensatz zu EPDM in Standardkomponenten verfügbar. Leider gibt es derzeit keinen Dichtungswerkstoff, der für beide Medien als zufriedenstellende Lösung gilt. Deshalb wird im Nachfolgenden bei der Bauteilwahl darauf Wert gelegt, dass die Ventile und Messgeräte entweder bereits Skydrol® LD-4 beständige Dichtungen aufweisen oder einfach umrüstbar sind. Im Falle eines Prüfstandes, welcher AeroShell® Fluid 41 verwendet, sind die Standardkomponenten mit NBR bzw. FKM Dichtungen einzusetzen.

2.1.2.2. Viskosität

Laut Shell International Petroleum Company Limited weist AeroShell® Fluid 41 folgende kinematischen Viskositätswerte auf:

Temperatur [°C]	Kinematische Viskosität [mm ² /s]
-40	600 max.
40	13,2 min.
100	4,9 min.

Tab. 3: Viskositätswerte AeroShell® Fluid 41, Quelle: In Anlehnung an Shell International Petroleum Company Limited (Hrsg.), S. 106.

Wie zuvor werden die Werte bei 10°C und bei 80°C interpoliert.

$$V_{10FL41} = \text{max. } 233,3 \text{ mm}^2/\text{s}$$

$$V_{80FL41} = \text{min. } 7,7 \text{ mm}^2/\text{s}$$

Hier könnte der Wert bei einer Temperatur von 80°C außerhalb der Einsatzgrenzen der verwendeten Komponenten liegen. Da jedoch der Viskositätsbereich von Skydrol® LD-4 beinahe um den Faktor 3 größer ist, wird in dieser Arbeit, falls eine Einschränkung des Temperaturbereichs notwendig ist, der Bereich bei Einsatz von Skydrol® LD-4 angegeben.

2.2. Versorgung der Schaltung

Da es sich bei der zu entwickelnden Lösung um eine Standardschaltung handelt, soll diese so konzipiert sein, dass sie direkt mittels einer druckgeregelten Pumpe versorgt wird bzw. an eine Hochdruckschiene mit mehreren Abnehmern angeschlossen werden kann.

Nach Recherche der Bauteilkataloge der Hydraulikkomponentenhersteller ist anzumerken, dass die Forderung nach einem maximalen Druck von 450 bar nicht sinnvoll ist, da hier beinahe keine Komponenten verfügbar sind. Dieser Wert ist mit den meisten Komponenten nur durch Überbeanspruchung möglich, wobei nicht sichergestellt ist, dass die Bauteile den auftretenden Belastungen standhalten. Daher wird der spezifizierte Maximaldruck auf 350

³ Vgl. KLINGER GmbH (Hrsg.) (2012), S. 8.

bar beschränkt. Der angegebene Volumenstrom von 250 l/min ist jedoch bei bestimmten Prüfverfahren notwendig, weshalb der Wert beibehalten wird.

2.3. Betriebsart

Die zu konstruierende Lösung soll dem Prüfkörper sowohl vorgeschaltet als auch nachgeschaltet werden können, wodurch sich folgende notwendige Funktionen ergeben:

- Zulauf- Druckregelung
- Zulauf- Stromregelung
- Ablauf- Druckregelung
- Ablauf- Stromregelung

2.4. Druckabfall

Angegeben sind 20% Druckabfall bei 450 bar und 250 l/min, was einem Wert von 90 bar entspricht. Da die Schaltung allerdings, wie oben erwähnt, auch im Ablauf eingesetzt wird und Drücke im Bereich von 3 bar geregelt werden sollen, ist es hier von Vorteil wenn der Druckabfall einen geringen Wert annimmt.

2.5. Sollwertsprung und Regelgenauigkeit

Bezüglich der Regelgenauigkeit stellt der Wert von $\pm 0,5\%$ vom Istwert gerade bei Messung des Druckes eine Herausforderung dar, da die Toleranz der meisten Messgeräte auf den Endwert bezogen wird. Hier gilt deshalb, je genauer, desto besser die Lösung. Bezüglich des Sollwertsprunges ist der Wert von 500 Millisekunden nicht als Ziel zu sehen. Ist eine schnellere Regelzeit möglich, dann soll dies realisiert werden.

2.6. Weitere besondere Betriebszustände laut Wartungsanleitungen

Die wiederkehrende Überprüfung der zu testenden Komponenten beinhaltet meist folgende Testverfahren:

- Leckageprüfung unter Hochdruck
- Leckageprüfung unter geringem Druck
- Einregeln bestimmter Geschwindigkeiten
- Messen des Druckverlustes

Bei einigen genannten Punkten ist der Ablaufdruck zu regeln. Bei geringen Parametern erfordert das eine gewisse Ventillinnengröße, um nicht bereits mit dem Druckabfall über das Ventil einen höheren Wert zu erhalten.

Außerdem muss bei der Leckageprüfung die Versorgungsleitung leckölfrei verschlossen werden, um den Druckabfall über eine gewisse Zeit beobachten zu können. Diese Forderung ist ebenfalls bei der Bauteilauswahl zu berücksichtigen bzw. durch geeignete Zusatzkomponenten sicherzustellen.

2.7. Zusammenfassung der Anforderungen:

Um die genannten Anforderungen zu erfüllen, ergibt sich folgende Spezifikation:

Dichtungsmaterial	EPDM AP 540 bzw. NBR
Fluidtemperaturbereich	Je Komponente zu bestimmen
Druckbereich	bis 350 bar
Volumenstrombereich	0-250l/min
Betriebsart	Zulauf & Ablauf
Regelgenauigkeit	$\pm 0,5$ % Istwert
Sollwertsprung	Innerhalb $\pm 5\%$ in 500ms
Max. Druckabfall	gering
Zusätzliche Funktionen	hydraulisch Dicht

Tab. 4: Zusammenfassung der Anforderungen, Quelle: Eigene Darstellung.

3. Funktionsanalyse

Für die Erfüllung der unter Tab. 4 genannten Anforderungen ist ein geregelter hydraulischer Antrieb notwendig. Laut Murrenhoff kann dieser gemäß Abb. 2 charakterisiert werden.

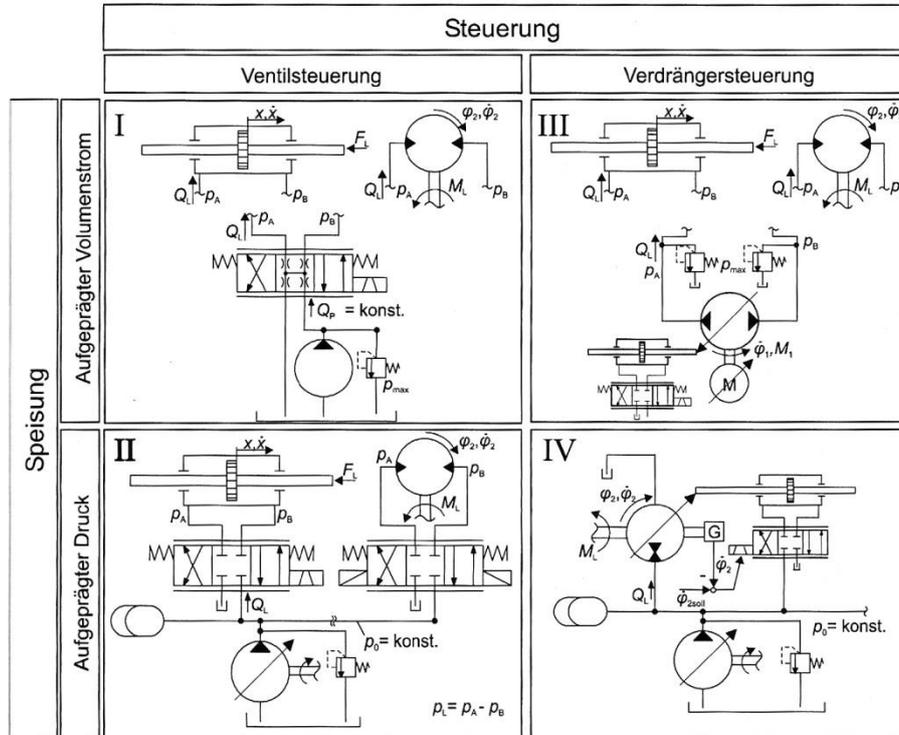


Abb. 2: Grundsaltungen geregelter hydraulischer Antrieben, Quelle: Murrenhoff (2012), S. 27.

Wie bereits erwähnt, soll der hydraulische Weitbereichsregler so konzipiert sein, dass er an eine druckgeregeltere Pumpe bzw. an eine Hochdruckschiene mit konstantem Druck angeschlossen werden kann. Dies entspricht der Speisung in Form eines aufgeprägten Druckes in Abb. 2. Die Verdrängersteuerung weist einen besseren Wirkungsgrad und höhere Kosten als die Ventilsteuerung auf, jedoch ist das Zeitverhalten bei der Ventilsteuerung besser.⁴ Da im vorliegenden Fall sowohl das Zeitverhalten als auch die Kosten eine wichtige Rolle spielen, kommt hier nur die Ventilsteuerung in Frage.

Um Druck und Volumenstrom nicht nur steuern sondern regeln zu können, ist ein Regelkreis notwendig. Dazu werden die Prozessgrößen mittels geeigneter Sensorsysteme gemessen und der Regeleinrichtung zugeführt. Diese generiert abhängig von Soll- und Istwert das Stellsignal, welches dem Stellelement zugeführt wird.⁵

In Abb. 3 ist der Aufbau eines Regelkreises schematisch dargestellt. Der Antrieb stellt im vorliegenden Fall die zu prüfende Komponente dar.

⁴ Vgl. Murrenhoff (2012), S. 29ff.

⁵ Vgl. Murrenhoff (2012), S. 125.

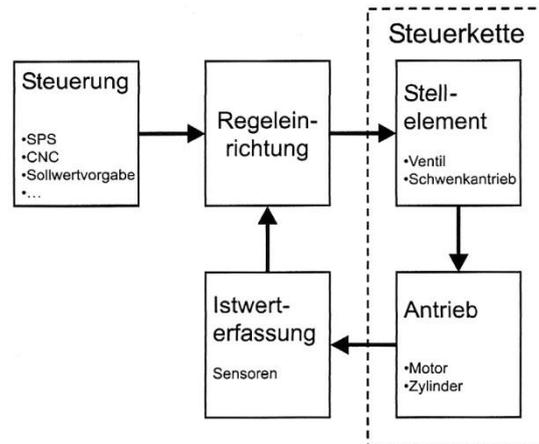


Abb. 3: Schematischer Aufbau eines Regelkreises, Quelle: Murrenhoff (2012), S. 125.

Das bedeutet, dass folgende Komponenten für den hydraulischen Weitbereichsregler notwendig sind:

- Istwterfassung: Drucksensor, Volumenstromsensor
- Stellelement: Ventil bzw. Verschaltung von Ventilen

3.1. Istwterfassung

3.1.1. Druckmessung

Zur Messung der Prozessgröße Druck kommen in der Fluidtechnik sowohl mechanische Systeme wie beispielsweise Manometer als auch elektrische Systeme zum Einsatz.⁶ Da bei diesem Projekt der Druck nicht nur abgelesen, sondern dem Regelkreis zugeführt werden muss, sind elektrische Druckaufnehmer notwendig.

Diese können laut der Bosch Rexroth AG folgendermaßen unterschieden werden:⁷

- metallische Dehnmessstreifen (DMS)
- Halbleiter-DMS
- piezoelektrische Druckaufnehmer

Bei der TEST-FUCHS GmbH testete man bereits in der Vergangenheit mehrere Typen, wobei die besten Erfahrungen mit den piezoelektrischen Druckaufnehmern Typ PR23 von Keller AG gewonnen wurden. Diese Druckaufnehmer sollen daher auch im vorliegenden Projekt zum Einsatz kommen. Das Symbol für elektrische Druckmessgeräte wird im Schaltkreis gemäß Abb. 4 dargestellt.



Abb. 4: Symbol Druckaufnehmer, Quelle: ISO 1219-1, S. 61.

⁶ Vgl. Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2004), S. 230f.

⁷ Vgl. Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2004), S. 231.

3.1.2. Volumenstrommessung

Zur Bestimmung des Volumenstromes kommen in der Fluidtechnik standardmäßig die in Abb. 5 dargestellten Messgeräte zum Einsatz.

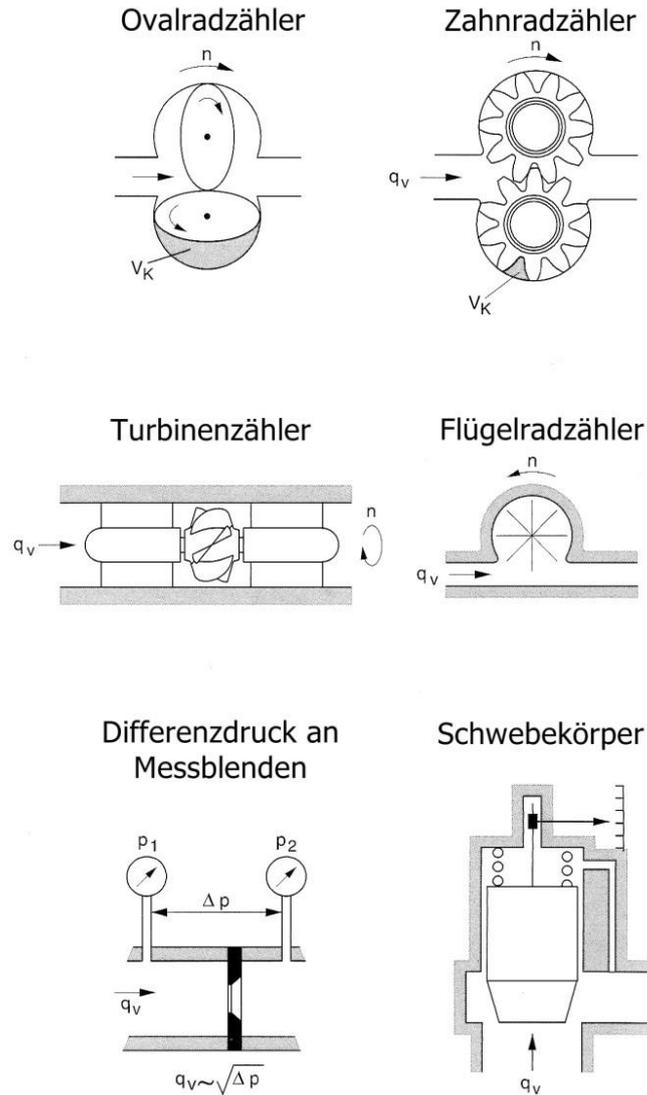


Abb. 5: Volumenstrommessgeräte, Quelle: In Anlehnung an Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2004), S. 232.

Auch hier validierte die TEST-FUCHS GmbH in der Vergangenheit bereits mehrere Bauformen. Dabei wurden die besten Ergebnisse mit den Zahnradzählern VC von Kracht GmbH erzielt, welche auch für den hydraulischen Weitbereichsregler eingesetzt werden sollen. Die schematische Darstellung der Messgeräte zur Bestimmung des Volumenstromes ist in Abb. 6 ersichtlich.

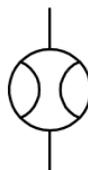


Abb. 6: Symbol Volumenstrommessgerät, Quelle: ISO 1219-1, S. 63.

3.2. Stellelemente

Hydraulische Ventilsteuerungen können durch Grundelemente, sogenannte hydraulische Halbbrücken beschrieben werden. Mittels Kombination dieser Halbbrücken lassen sich sämtliche schaltungstechnischen Möglichkeiten ableiten.⁸

Die wichtigsten hydraulischen Halbbrücken sind in Abb. 7 zusammengefasst.

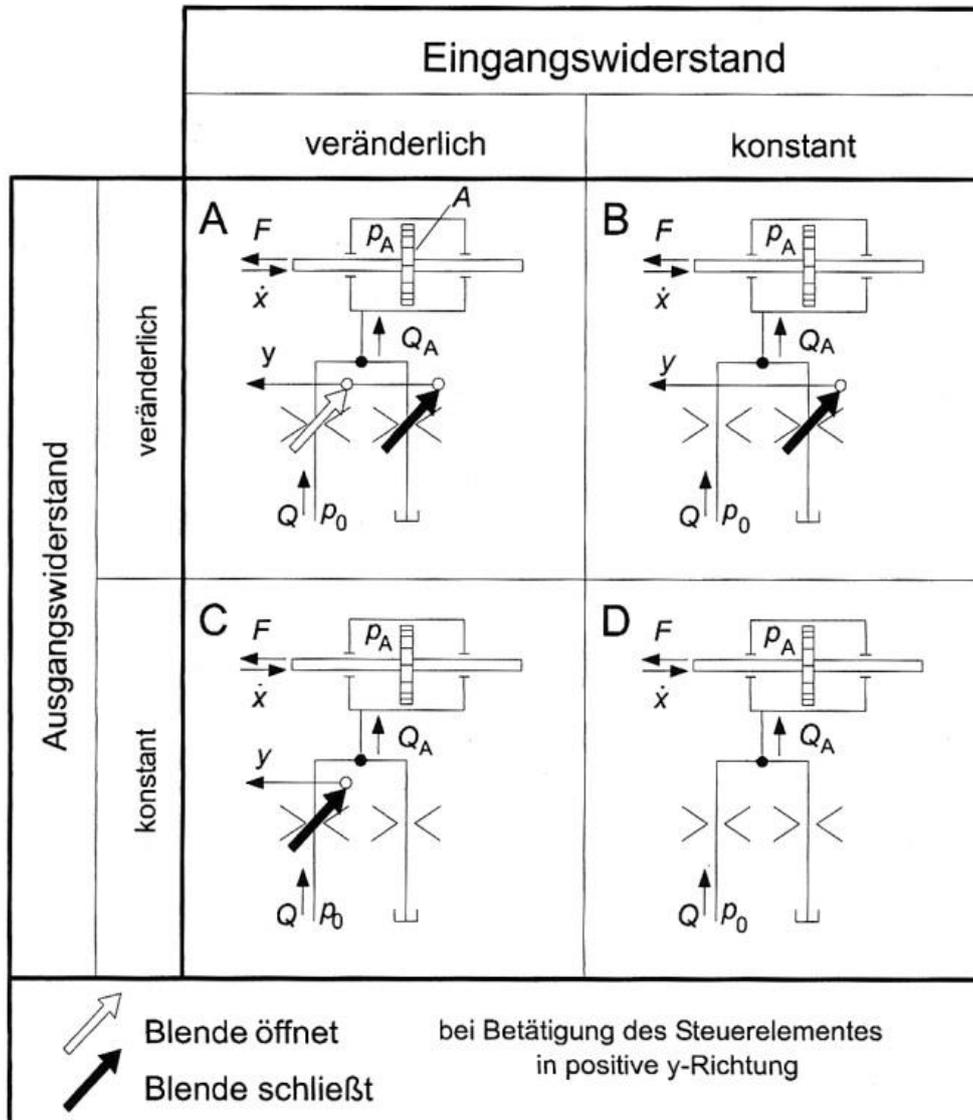


Abb. 7: Hydraulische Brückenhalfglieder, Quelle: Murrenhoff (2012), S. 31.

Um die notwendigen Funktionen zu erfüllen, ist ein Aufbau gefordert, der sowohl im Zulauf als auch im Ablauf den Volumenstrom drosselt und den Druck begrenzt. Werden dafür Standardkomponenten verwendet, ist eine Schaltung notwendig, die der in Abb. 8 dargestellten entspricht. Je nach Ausführung der Schaltung bzw. der Ventile ist das mit einer Kombination der Brückenhalfglieder A bis C erreichbar.

⁸ Vgl. Murrenhoff (2012), S. 30.

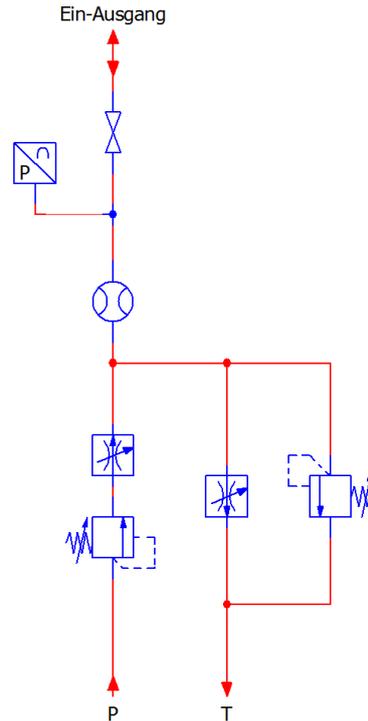


Abb. 8: Schematischer Aufbau hydraulischer Weitbereichsregler, Quelle: Eigene Darstellung.

Bevorzugt sind jedoch als Stellelemente in hydraulischen Regelkreisen Stetigventile im Einsatz. Diese können nach ihrem stationären Verhalten in die drei Gruppen Druckventile, Volumenstromventile und Wegeventile unterteilt werden.⁹

3.2.1. Druckventile

Zur Regelung des Druckes mit Druckventilen sind zwei Arten möglich, welche nachfolgend kurz erläutert werden.

3.2.1.1. Primärregelung mittels Druckbegrenzungsventil

Bei dieser Art von Regelung wird der Eingangsdruck auf eine Messfläche geleitet, die mittels einer vorgespannten Feder kraftbeaufschlagt ist. Ist die Federkraft größer als die Druckkraft, bleibt das Schließelement verschlossen. Übersteigt jedoch die Druckkraft die Federkraft, so wird eine Verbindung in den drucklosen Tank geöffnet und die überschüssige Flüssigkeit abgeführt.¹⁰

Es entsteht somit ein Regelkreis, welcher über das Kräftegleichgewicht ohne Einsatz von externen Messmitteln bereits den Druck konstant hält.

Um beispielsweise vom Bedienpult den Druck und somit die Federvorspannung am Ventil verstellen zu können, werden Druckbegrenzungsventile mit kraftgesteuertem Proportionalmagnet eingesetzt.¹¹

Das Verhalten eines Druckbegrenzungsventils entspricht dem des hydraulischen Brückengliedes B in Abb. 7. Schematisch werden sie wie in Abb. 9 ersichtlich dargestellt, wobei das gezeigte Symbol einem Ventil mit verstellbarer Federvorspannung entspricht.

⁹ Vgl. Murrenhoff (2012), S. 47.

¹⁰ Vgl. Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2003a), S. 201.

¹¹ Vgl. Hochleitner (2010b), S. 51.

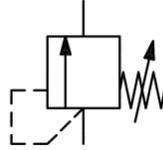


Abb. 9: Symbol Druckbegrenzungsventil, Quelle: ISO 1219-1, S. 83.

Für den hydraulischen Weitbereichsregler ist eine Druckregelung mittels Druckbegrenzungsventil nur eingeschränkt verwendbar, da die Möglichkeit besteht, dass die Schaltung an eine Hochdruckschiene angeschlossen wird. Durch den Umstand, dass hier der Primärdruck begrenzt wird, könnte somit im Gesamtsystem nie ein höherer Druck als der am Ventil eingestellte herrschen.

3.2.1.2. Sekundärregelung mittels Druckminderventil

Anders als beim Druckbegrenzungsventil, das den Eingangsdruck begrenzt, beeinflusst das Druckminderventil den Ausgangsdruck. Daher ist es möglich, den Druck in einem Teil des Kreislaufes auf einen niedrigeren Wert als den Systemdruck zu halten. Auch hier wird die hydraulische Kraft mit einer Federkraft verglichen, jedoch bewegt sich bei Überschreiten des eingestellten Wertes der Kolben in Schließrichtung (siehe Abb. 10).¹²

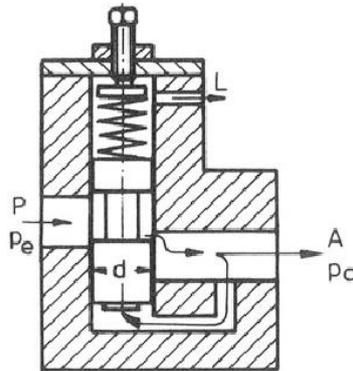


Abb. 10: Funktion Druckminderventil, Quelle: Bauer (2011), S. 134.

Es entsteht somit ebenfalls ein eigenständiger Regelkreis, der der hydraulischen Halbbrücke C entspricht. Schematisch werden Druckminderventile gemäß Abb. 10 dargestellt, wobei das Symbol dem Ventil mit verstellbarer Federvorspannung entspricht.

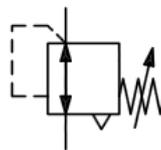


Abb. 11: Symbol Druckminderventil, Quelle: ISO 1219-1, S. 83.

Im Allgemeinen besitzen Druckminderventile die zwei Anschlüsse P und A. Liegt jedoch ein System vor, bei dem der Druck in A durch äußere Einflüsse ansteigen kann, so ist es notwendig, diesen zu verringern, indem eine Verbindung zum drucklosen Tank geöffnet wird.¹³ Jene Funktion weisen die sogenannten 3-Wege Druckregler auf, welche der hydraulischen Halbbrücke A entsprechen.

¹² Vgl. Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2003a), S. 220.

¹³ Vgl. Bauer (2011), S. 134.

3.2.2. Volumenstromventile

Volumenstromventile werden unterteilt in Drosselventile und Stromregelventile.¹⁴

3.2.2.1. Blenden- bzw. Drosselventile

Drosselventile verändern den Volumenstrom durch Veränderung eines Drossel- bzw. Blendenquerschnittes. Für eine kurze Drossellänge kann die Strömung durch die Gleichung von Bernoulli beschrieben werden.¹⁵

$$Q = \alpha_D * A * \sqrt{\frac{2 * \Delta p}{\rho}} \quad (3.1)$$

Vorteilhaft ist hier die einfache Bauform und die Eignung zur Durchströmung in beide Richtungen, jedoch kann die Abhängigkeit vom Differenzdruck Δp in einigen Fällen Probleme verursachen bzw. ein nachjustieren des Drosselquerschnittes erfordern. Beispielsweise betrachte man den Unterschied folgender Systeme mit gleicher Pumpe und gleicher Drosseleinstellung.

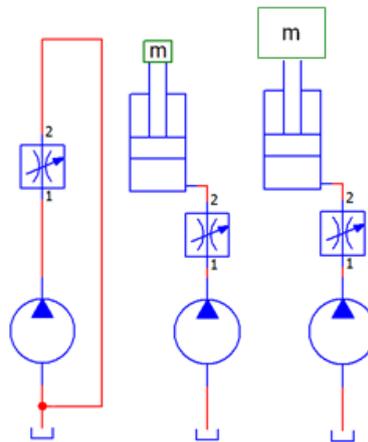


Abb. 12: Vergleich Drosselschaltungen, Quelle: Eigene Darstellung.

Im linken System in Abb. 12 ist der Druck im Anschluss 2 näherungsweise 0 bar, während im mittleren und rechten System dieser Druck durch den massebelasteten Zylinder höher ausfällt. Dadurch ergeben sich verschiedene Druckabfälle an der Drossel und somit verschiedene Volumenströme bei gleicher Drosseleinstellung.

Mit Drosselventilen können sämtliche hydraulischen Brückenhalfglieder realisiert werden.

Für die Anwendung in Regelkreisen werden Drosselventile mit hubgesteuertem Proportionalmagnet verwendet.¹⁶

Die schematische Darstellung dieser Ventile ist in Abb. 13 ersichtlich.



Abb. 13: Symbol Drosselventil, Quelle: ISO 1219-1, S. 84.

¹⁴ Vgl. Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2003a), S. 229.

¹⁵ Vgl. Murrenhoff (2012), S. 160.

¹⁶ Vgl. Hochleitner (2010b), S. 50.

3.2.2.2. Stromregelventile

Stromregelventile besitzen neben der verstellbaren Drossel noch eine zweite Drosselstelle, die als Druckwaage arbeitet. Durch diesen Aufbau wird der Druckabfall über die verstellbare Messdrossel konstant gehalten und es stellt sich ein konstanter Volumenstrom unabhängig vom anliegenden Differenzdruck ein.¹⁷

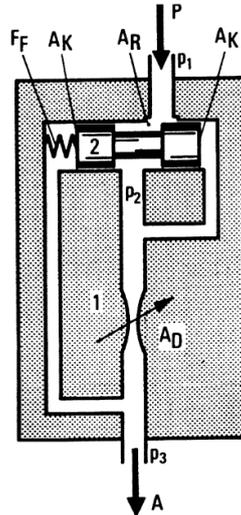


Abb. 14: Stromregelventil, Quelle: Hochleitner (2010a), S. 109.

Dem genannten Vorteil wirken jedoch zwei schwerwiegende Nachteile entgegen:

- **Durchströmung nur in eine Richtung möglich**

Da sich bei Durchströmung in die Gegenrichtung die Kraftverhältnisse an der Druckwaage ändern, weisen Stromregelventile nur eine Durchflussrichtung auf. Folglich werden sie schematisch wie Drosselventile mit einem zusätzlichen Pfeil für die Durchflussrichtung dargestellt. Durch Verwendung einer Gleichrichterschaltung mit vier Rückschlagventilen (siehe Abb. 15), lässt sich das Problem beheben. Die Rückschlagventile weisen jedoch einen gewissen Druckabfall auf, der zur Überwindung der Federkraft notwendig ist. Im vorliegenden Projekt bereitet dieser Umstand Schwierigkeiten, da bei Verwendung im Ablauf selbst bei vollständig offener Drossel zumindest der Öffnungsdruck der Rückschlagventile aufzubringen ist.

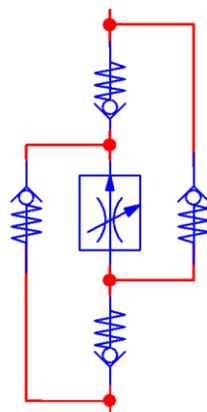


Abb. 15: Gleichrichterschaltung, Quelle: Eigene Darstellung.

¹⁷ Vgl. Hochleitner (2010a), S. 108.

- **Anfahrssprung**

Dieser kommt daher, dass anfangs die Druckwaage geöffnet und aufgrund des Einflusses von Trägheits-, Reibungs- und Federkraft eine gewisse Zeit notwendig ist, um einzuregeln.¹⁸ Man könnte den Anfahrssprung mit unterschiedlichen Maßnahmen vermeiden bzw. verringern, da jedoch dessen Dauer kurz ist, wird hier nicht näher darauf eingegangen.

Da Stromregelventile Drosselventile mit einer zusätzlichen Druckwaage sind, können auch sie mit Proportionalmagneten in einem Regelkreis verwendet werden. Die realisierbaren Brückenhalbglieder sind B, C und D. Durch die erwähnten Nachteile ist allerdings für die gegebene Aufgabenstellung die Verwendung einer Druckwaage nur unter Einschränkung der Funktion möglich. Es handelt sich dabei jedoch um eine besonders einfache Lösung der Volumenstromregelung, da mittels Kräftegleichgewicht ein eigenständiger Regelkreis entsteht. Daher wird auch diese Art der Volumenstromregelung noch weiter verfolgt.

¹⁸ Vgl. Hochleitner (2010a), S. 109.

3.2.3. Wegeventile

Durch die Einbindung von stetig verstellbaren Wegeventilen in einen Regelkreis kann ebenfalls eine Druck- bzw. Volumenstromregelung realisiert werden. Die möglichen Brückenhalfglieder sind hier in den meisten Fällen durch den Typ A zu beschreiben.

Für das Verhalten im Regelkreis sind die Durchflusscharakteristik, die Widerstandscharakteristik und im Besonderen die Überdeckungsverhältnisse am Steuerschieber von Bedeutung. Die Überdeckung bezeichnet die Überlappungslänge zwischen den Steuerkanten (siehe Abb. 16) und wird meist in Prozent vom Gesamthub des Ventilschiebers angegeben.¹⁹

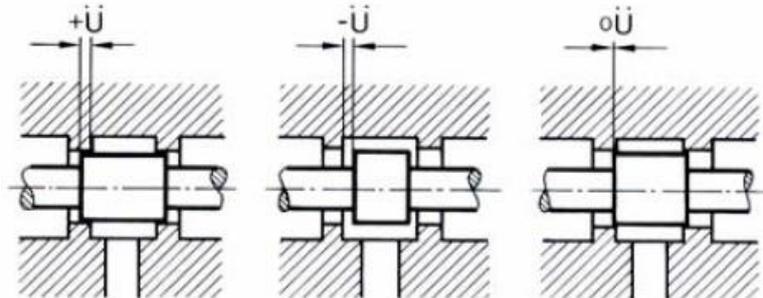


Abb. 16: Schaltüberdeckung, Quelle: Hochleitner (2010a), S. 135.

Für die Druckregelung ist eine Null- bzw. Negativüberdeckung notwendig, da bei positiver Überdeckung die Signale innerhalb des Überdeckungsbereiches nicht übertragen werden. Für die Regelung der Prozessgröße Volumenstrom kann hingegen auch eine positive Überdeckung gewählt werden.²⁰

3.2.3.1. Typen stetig verstellbarer Wegeventile

- **Servoventile**

Die stufenlose Verstellung des Kolbens wird bei Servoventilen durch einen Torque-Motor realisiert, welcher in Abb. 17 ersichtlich ist. Er liefert proportional zum durchfließenden Steuerstrom ein Moment oder eine Kraft auf das hydraulische Steuerventil.²¹

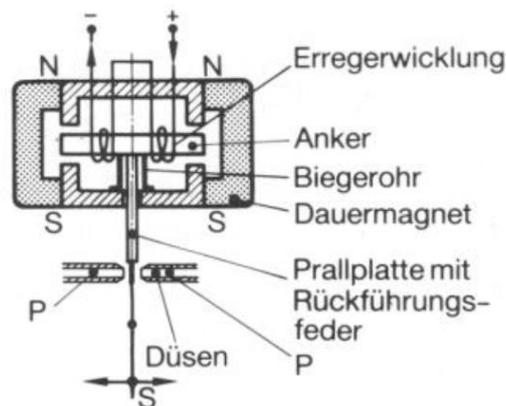


Abb. 17: Torque Motor, Quelle: Hochleitner (2010b), S. 43.

¹⁹ Vgl. Murrenhoff (2012), S. 261f.

²⁰ Vgl. Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2003b), S. 136.

²¹ Vgl. Bauer (2011), S. 161.

In Abb. 18 ist ein zweistufiges Servoventil dargestellt. Der obere Teil ist hier der elektrische Stellmotor, welcher am hydraulischen Steuerventil montiert ist.

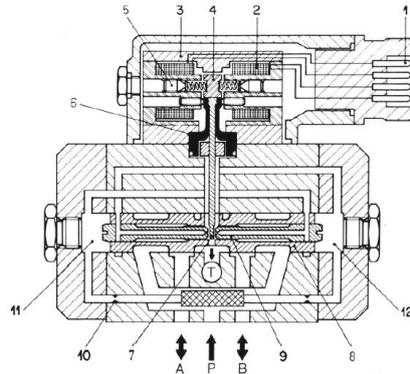


Abb. 18: Servoventil, Quelle: Bauer (2011), S. 162.

Servoventile weisen gute dynamische Eigenschaften auf, jedoch haben sie laut Bauer folgende Nachteile:²²

- hohe Kosten
- hohe Filterfeinheit benötigt

Des Weiteren ist laut der TEST-FUCHS GmbH bei Servoventilen ein Dichtungstausch kaum möglich, weshalb im vorliegenden Projekt auf sie verzichtet und der folgende Stetigventiltyp verwendet wird.

- **Proportionalventile**

Diese Ventile sind im Aufbau den konventionellen Wegeventilen ähnlich. Proportional-Wegeventile sind robuster und preiswerter als Servoventile, besitzen aber eine geringere Genauigkeit. Als elektromechanische Wandler werden hier hubgesteuerte Proportionalmagnete verwendet.²³

Als Regelventile mit Null-Überdeckung (siehe Abb. 19) weisen Proportionalventile kaum schlechtere dynamische Eigenschaften auf, weshalb sie auch bei geschlossenen Regelkreisen Anwendung finden.²⁴

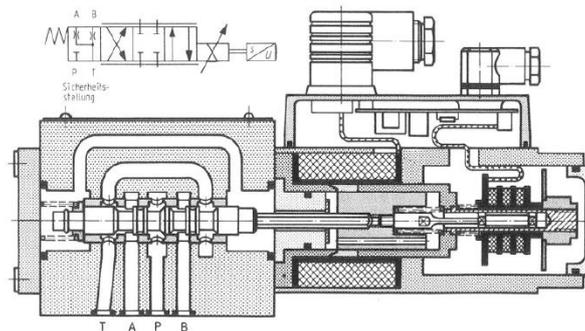


Abb. 19: Regelventil NG10, Quelle: Bauer (2011), S. 179.

Wie in Abb. 19 ersichtlich, ist der Aufbau eines Regelventils relativ einfach, wodurch auch der Dichtungstausch kein Problem darstellt.

²² Vgl. Bauer (2011), S. 159.

²³ Vgl. Hochleitner (2010b), S. 48ff.

²⁴ Vgl. Bauer (2011), S. 159.

4. Mathematische Systembeschreibung

Um ein Verständnis für den Einfluss der verschiedensten Parameter wie beispielsweise der Höhe des Versorgungsdruckes auf das Verhalten des Systems zu gewinnen, wird in diesem Kapitel ein Regelkreis, welcher mittels eines stetig verstellbaren Wegeventils den Druck im System regelt, analysiert.

Wie zuvor bereits erwähnt, kann für die Druckregelung nur ein Ventil mit Negativer- bzw. Nullüberdeckung verwendet werden.

Bei Regelventilen wird meist nullüberdecktes Verhalten angestrebt. Da bei real ausgeführten Schieberventilen allerdings immer ein Radialspiel zwischen Schieber und Hülse vorhanden ist, ist eine ideale Nullüberdeckung nicht möglich. Das Verhalten eines realen Regelventils entspricht somit eher dem der negativen Überdeckung.²⁵

4.1. Berechnung Brückenhalfglied A

Wird die vorliegende Aufgabenstellung mit einem Regelventil bewältigt, kann das System durch das hydraulische Brückenhalfglied A beschrieben werden.

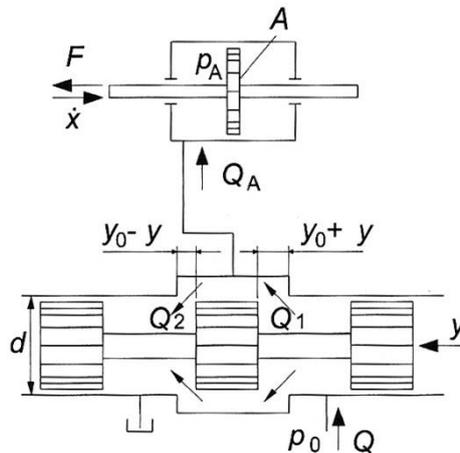


Abb. 20: Brückenhalfglied A, Quelle: Murrenhoff (2012), S. 165.

Dafür muss zwischen 2 Fällen unterschieden werden:

- Bereich innerhalb der Überdeckung ($|y| < y_0$)
- Bereich außerhalb der Überdeckung ($|y| \geq y_0$)

4.1.1. Fall 1: Bereich innerhalb der Überdeckung

Die beiden Volumenströme Q_1 und Q_2 ergeben sich nach der Gleichung von Bernoulli, wobei der Tankdruck mit 0 bar angenommen wird.

$$Q_1 = B * (y_0 + y) * \sqrt{p_0 - p_A} \quad (4.1)$$

$$Q_2 = B * (y_0 - y) * \sqrt{p_A} \quad (4.2)$$

Der Durchflusskoeffizient B berechnet sich gemäß Gleichung (4.3).

²⁵ Vgl. Murrenhoff (2012), S. 200.

$$B = \alpha_D * \pi * d * \sqrt{\frac{2}{\rho}} \quad (4.3)$$

Durch Anwendung der Kontinuitätsgleichung erhält man:

$$Q_A = Q_1 - Q_2 \quad (4.4)$$

$$Q_A = B[(y_0 + y) * \sqrt{p_0 - p_A} - (y_0 - y) * \sqrt{p_A}] \quad (4.5)$$

Die partielle Ableitung des Volumenstromes nach dem Stellweg y entspricht der Volumenstrom-Signalverstärkung V_{Qy} .

$$V_{Qy} = \frac{\partial Q_A}{\partial y} = B[\sqrt{p_0 - p_A} + \sqrt{p_A}] \quad (4.6)$$

Für die Berechnung der Druckverstärkung wird die Voraussetzung $Q_A=0$ angewandt.

$$Q_1 = Q_2 \quad (4.7)$$

$$(y_0 + y)^2 * (p_0 - p_A) = (y_0 - y)^2 * p_A \quad (4.8)$$

$$p_A = p_0 * \frac{(y_0 + y)^2}{(y_0 + y)^2 + (y_0 - y)^2} \quad (4.9)$$

Durch partielle Ableitung des Druckes p_A nach dem Stellweg y erhält man die Druck-Signalverstärkung V_{py} .

$$V_{py} = \frac{\partial p_A}{\partial y} = p_0 * \frac{y_0^3 - y_0 * y^2}{(y_0^2 + y^2)^2} \quad (4.10)$$

Da die berechneten Gleichungen nichtlinear und für eine mathematische Beschreibung nur schwer zu handhaben sind, wird eine Linearisierung im Arbeitspunkt durchgeführt. Für diese Linearisierung wird eine Taylorreihenentwicklung angewandt und nach dem zweiten Term abgebrochen.

$$Q_A = f(y, p_A) \quad (4.11)$$

$$Q_A = Q_{A,AP} + \left. \frac{\partial Q_A}{\partial y} \right|_{AP} (y - y_{AP}) + \left. \frac{\partial Q_A}{\partial p_A} \right|_{AP} (p_A - p_{AP}) \quad (4.12)$$

Als Arbeitspunkt wird dabei die Ventilposition $y_{AP} = 0$ und der Druck $p_{AP} = p_0/2$ angenommen.

$$\left. \frac{\partial Q_A}{\partial y} \right|_{AP,1} = \sqrt{2} * B * \sqrt{p_0} \quad (4.13)$$

Die Ableitung des Volumenstromes Q_A nach dem Druck p_A kann in diesem Fall mithilfe folgender Beziehung berechnet werden:

$$\left. \frac{\partial Q_A}{\partial p_A} \right|_{AP} = - \left. \frac{\partial Q_A}{\partial y} \right|_{AP} * \left. \frac{\partial y}{\partial p_A} \right|_{AP} \quad (4.14)$$

Im Arbeitspunkt ergibt sich somit die Druck-Signalverstärkung gemäß Gleichung (4.15).

$$\left. \frac{\partial p_A}{\partial y} \right|_{AP,1} = \frac{p_0}{y_0} \quad (4.15)$$

Durch Einsetzen von (4.13) und (4.15) in (4.12) erhält man die linearisierte Gleichung zur Beschreibung des Systems.

$$Q_A = \sqrt{2} * B * \sqrt{p_0} * y - \frac{\sqrt{2} * B * y_0}{\sqrt{p_0}} * (p_A - \frac{p_0}{2}) \quad (4.16)$$

$$Q_A = \sqrt{2} * B * \sqrt{p_0} * y - \frac{\sqrt{2} * B * y_0}{\sqrt{p_0}} * p_A + \frac{B * y_0 * \sqrt{p_0}}{\sqrt{2}} \quad (4.17)$$

$$Q_A = V_{Qy,1} * y - V_{Qp,1} * p_A + Q_0 \quad (4.18)$$

4.1.2. Fall 2: Bereich außerhalb der Überdeckung

Innerhalb dieses Bereichs ist im Falle eines positiven Stellwertes y die Verbindung in den Tank verschlossen und bei negativen Stellwerten die Verbindung zur Versorgung. Für die mathematische Beschreibung des Systems wird hier jedoch nur der Fall positiver Stellwerte betrachtet. Der Volumenstrom Q_A entspricht somit Q_1 , welcher wie zuvor mit der Gleichung von Bernoulli berechnet werden kann.

$$Q_A = Q_1 = B * (y_0 + y) * \sqrt{p_0 - p_A} \quad (4.19)$$

Durch partielle Ableitung von Q_A nach dem Stellweg y ergibt sich die Volumenstrom-Signalverstärkung V_{Qy} und durch partielle Ableitung nach dem Druck p_A die Volumenstrom-Druckverstärkung V_{Qp} für diesen Bereich.

$$V_{Qy} = \frac{\partial Q_A}{\partial y} = B \sqrt{p_0 - p_A} \quad (4.20)$$

$$V_{Qp} = \frac{\partial Q_A}{\partial p_A} = -\frac{B}{2} * \frac{y_0 + y}{\sqrt{p_0 - p_A}} \quad (4.21)$$

Wie im Fall 1 wird die Taylorreihenentwicklung durchgeführt, um die Gleichungen zu linearisieren.

$$Q_A = f(y, p_A) \quad (4.22)$$

$$Q_A = Q_{A,AP} + \left. \frac{\partial Q_A}{\partial y} \right|_{AP} (y - y_{AP}) + \left. \frac{\partial Q_A}{\partial p_A} \right|_{AP} (p_A - p_{AP}) \quad (4.23)$$

In diesem Fall wird jedoch der Arbeitspunkt mit $y = y_0$ und $p_A = p_0/2$ definiert. Somit ergeben sich die Volumenstrom-Signalverstärkung und die Volumenstrom-Druckverstärkung im Arbeitspunkt zu:

$$\left. \frac{\partial Q_A}{\partial y} \right|_{AP,2} = \frac{B * \sqrt{p_0}}{\sqrt{2}} \quad (4.24)$$

$$\left. \frac{\partial Q_A}{\partial p_A} \right|_{AP,2} = -\frac{\sqrt{2} * B * y_0}{\sqrt{p_0}} \quad (4.25)$$

Dadurch ergibt sich die linearisierte Gleichung für den Volumenstrom Q_A für den Fall $|y| \geq y_0$

$$Q_A = Q_{A,AP,2} + \frac{B * \sqrt{p_0}}{\sqrt{2}} * (y - y_0) - \frac{\sqrt{2} * B * y_0}{\sqrt{p_0}} * \left(p_A - \frac{p_0}{2} \right) \quad (4.26)$$

$$Q_A = Q_{A,AP,2} + \frac{B * \sqrt{p_0}}{\sqrt{2}} * y - \frac{\sqrt{2} * B * y_0}{\sqrt{p_0}} * p_A \quad (4.27)$$

$$Q_A = Q_{A,AP,2} + V_{Qy,2} * y - V_{Qp,2} * p_A \quad (4.28)$$

4.1.3. Betrachtung Stetigventil

Um das dynamische Verhalten des Stetigventils ohne Einschränkungen beschreiben zu können, ist ein Gleichungssystem höherer Ordnung notwendig. Da im vorliegenden Fall jedoch nur der Einfluss gewisser Parameter auf das Gesamtsystem untersucht wird, reicht eine einfache Betrachtung des Stetigventils.

Dazu kann das Ventil mit reduzierter, aber ausreichender Genauigkeit als PT_2 -Element angesehen werden.²⁶

Der Wirkungsplan eines Stetigventils ist in Abb. 21 abgebildet.

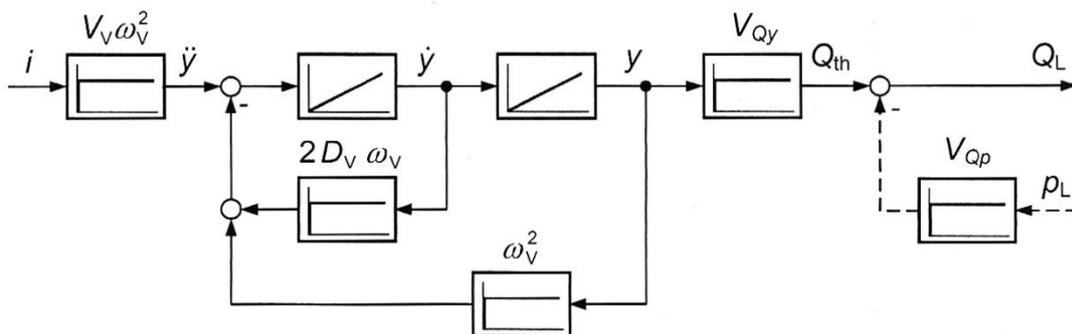


Abb. 21: Lineares Modell eines Servoventils, Quelle: Murrenhoff (2012), S. 239.

4.1.4. Betrachtung des Regelkreises für Druckregelung

Für einen Regelkreis sind die Komponenten Regeleinrichtung, Stellelement, Antrieb und Istwerterfassung notwendig, die bei der vorliegenden Betrachtung des Regelkreises für Druckregelung folgendermaßen definiert werden:

4.1.4.1. Regeleinrichtung

Als Regeleinrichtung dient ein PID Regler, da er jeder Strecke optimal angepasst werden kann²⁷.

Der PID Regler setzt sich aus je einem Proportional-, Integral- und Differentialglied zusammen.²⁸ Der Wirkungsplan dieses Reglers ist in Abb. 22 dargestellt.

²⁶ Vgl. Murrenhoff (2012), S. 238.

²⁷ Vgl. Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2003b), S. 175.

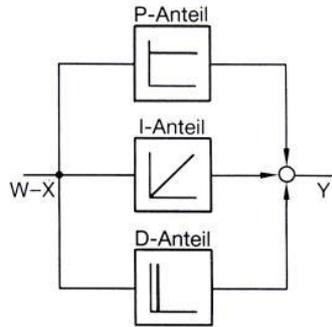


Abb. 22: Wirkungsplan eines PID Reglers, Quelle: Hochleitner (2010c), S. 14.

4.1.4.2. Stellelement

Für das Stellelement wird eine andere Form des zuvor beschriebenen linearisierten Modells eines Servoventils verwendet. Im dargestellten Ventil wird das Eingangssignal durch einen bestimmten Strom i vorgegeben. Bei der TEST-FUCHS GmbH werden vorwiegend Regelventile mit spannungsproportionaler Ansteuerung verwendet, weshalb diese auch hier begutachtet wird.

4.1.4.3. Antrieb

Für die Betrachtung des Antriebes dient ein Gleichgangszylinder gemäß Abb. 23, welcher sich in seiner Endlage befindet. In der Endlage gleicht der Zylinder einem Behälter.

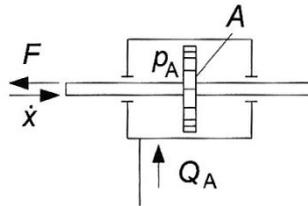


Abb. 23: Zylinder als Antrieb, Quelle: Murrenhoff (2012), S. 165.

In einem Behälter ist die Druckänderungsgeschwindigkeit abhängig von der hydraulischen Kapazität C_H und dem zufließenden Volumenstrom Q und kann nach Gesetz (4.29) beschrieben werden.²⁹

$$\dot{p} = \frac{Q}{C_H} \quad (4.29)$$

Die hydraulische Kapazität C_H ist gemäß Gleichung (4.30) definiert. V_{tot} stellt dabei das Totvolumen in den Verbindungsleitungen dar, V_0 das Kompressionsvolumen und $E'_{öl}$ den Ersatzkompressionsmodul des Öles, welcher üblicherweise mit einem Wert von 20.000 bar angenommen wird.³⁰

$$C_H = \frac{V_{tot} + V_0}{E'_{öl}} \quad (4.30)$$

Der Druckabfall der Verbindungsleitungen zum Prüfling wird vernachlässigt.

²⁸ Vgl. Hochleitner (2010c), S. 14.

²⁹ Vgl. Murrenhoff (2012), S. 411.

³⁰ Vgl. Murrenhoff (2012), S. 280.

4.1.4.4. Istwerterfassung

Zur Vereinfachung werden sämtliche Verstärkungsfaktoren der Messeinrichtung vernachlässigt und somit angenommen, dass dem Regler direkt das Drucksignal zugeführt wird.

4.1.4.5. Regelkreis

Zusammenfassend ist in Abb. 24 der Wirkungsplan des Regelkreises für Druckregelung ersichtlich, welcher die genannten Komponenten beinhaltet.

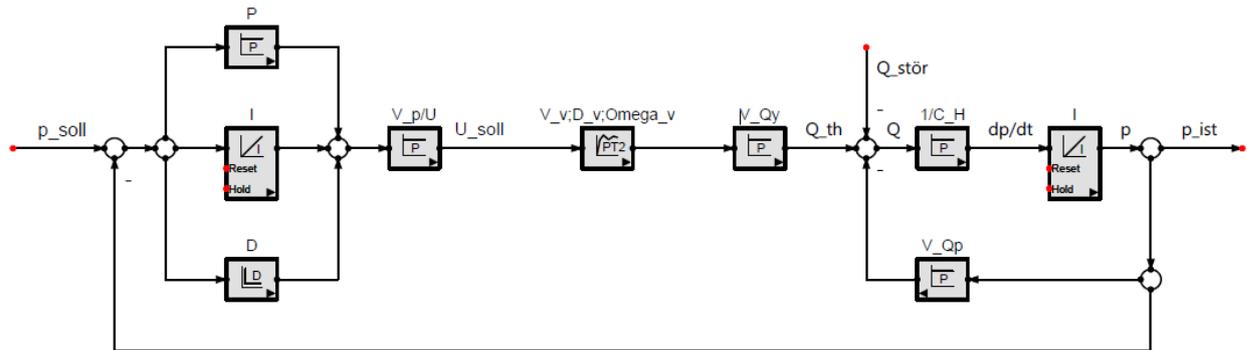


Abb. 24: Regelkreis für Druckregelung, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Übertragungsfunktion dieses Regelkreises ergibt sich für Führungsgrößenregelung gemäß Gleichung (4.31).

$$G_{FG}(s) = \frac{V_{pU} \left(P + \frac{I}{s} + Ds \right) \frac{V_V \omega_V^2}{s^2 + 2D_V \omega_V s + \omega_V^2} V_{Qy} \frac{1}{V_{Qp} + C_{HS}}}{1 + V_{pU} \left(P + \frac{I}{s} + Ds \right) \frac{V_V \omega_V^2}{s^2 + 2D_V \omega_V s + \omega_V^2} V_{Qy} \frac{1}{V_{Qp} + C_{HS}}} \quad (4.31)$$

Um den Einfluss der jeweiligen Parameter auf das Verhalten des Systems zu ermitteln, wird eine Untersuchung der Kreisverstärkung durchgeführt.

Im geschlossenen Regelkreis bereitet der Regler die Differenz zwischen Sollwert und Istwert zur Stellgröße auf, sodass die Regelabweichung behoben werden kann. Dabei ist die Regelung umso wirkungsvoller, je mehr der Fehler verstärkt wird. Die Verstärkung des Gesamtsystems wird Kreisverstärkung V_K genannt.³¹

Für die Ermittlung der Kreisverstärkung wird der offene Regelkreis betrachtet und das Produkt aller Verstärkungsfaktoren berechnet.³²

Die Definition von V_K lautet demnach:

$$G_O(s) = \frac{V_K}{(s)^q} * \frac{\prod_{\mu}(s - n_{\mu})}{\prod_{\nu}(s - p_{\nu})} \quad (4.32)$$

Die Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises ist in Gleichung (4.34) ersichtlich.

$$G_O(s) = V_{pU} \left(P + \frac{I}{s} + Ds \right) \frac{V_V \omega_V^2}{s^2 + 2D_V \omega_V s + \omega_V^2} V_{Qy} \frac{1}{V_{Qp} + C_{HS}} \quad (4.33)$$

³¹ Vgl. Hochleitner (2010c), S. 232.

³² Vgl. Murrenhoff (2012), S. 430f.

Vereinfacht ergibt sich Gleichung (4.33) zu Gleichung (4.34).

$$G_O(s) = \frac{DV_V V_{pU} V_{Qy} \omega_V^2 s^2 + PV_V V_{pU} V_{Qy} \omega_V^2 s + IV_V V_{pU} V_{Qy} \omega_V^2}{s^4 C_H + s^3 (V_{Qp} + 2C_H D_V \omega_V) + s^2 (C_H \omega_V^2 + 2D_V V_{Qp} \omega_V) + s V_{Qp} \omega_V^2} \quad (4.34)$$

Die Nullstellen dieser Übertragungsfunktion berechnen sich durch Nullsetzen des Zählerpolynoms.

$$n_{\mu 1} = -\frac{P - \sqrt{P^2 - 4DI}}{2D} \quad (4.35)$$

$$n_{\mu 2} = -\frac{P + \sqrt{P^2 - 4DI}}{2D} \quad (4.36)$$

Analog erhält man durch Nullsetzen des Nennerpolynoms die Polstellen.

$$p_{v1} = -\omega_V (D_V - \sqrt{D_V^2 - 1}) \quad (4.37)$$

$$p_{v2} = -\omega_V (D_V + \sqrt{D_V^2 - 1}) \quad (4.38)$$

$$p_{v3} = 0 \quad (4.39)$$

$$p_{v4} = -\frac{V_{Qp}}{C_H} \quad (4.40)$$

Da das System eine Polstelle im Ursprung aufweist, hat der Regelkreis einfach integrierendes Verhalten (Strecke ohne Ausgleich)³³.

Die Kreisverstärkung des Systems berechnet sich damit zu:

$$V_K = \frac{DV_V V_{pU} V_{Qy} \omega_V^2}{C_H} \quad (4.41)$$

Die Ventilverstärkung V_V ist meist aufgrund einer internen Lageregelung nicht zugänglich, weshalb sie mit der Volumenstrom-Signalverstärkung V_{Qy} zu der Volumenstrom-Signalverstärkung V_{QU} zusammengefasst werden kann.³⁴

$$V_{QU} = V_V V_{Qy} \quad (4.42)$$

Damit ergibt sich die Kreisverstärkung gemäß Gleichung (4.43).

$$V_K = \frac{DV_{QU} V_{pU} \omega_V^2}{C_H} \quad (4.43)$$

³³ Vgl. Murrenhoff (2012), S. 431.

³⁴ Vgl. Murrenhoff (2012), S. 239.

4.1.5. Einfluss der Systemparameter auf das Verhalten des Regelkreises

Anhand der hergeleiteten Gleichungen lässt sich der Einfluss der Ventil- und Systemparameter folgendermaßen beschreiben:

4.1.5.1. Versorgungsdruck

Wie unter Kapitel 4.1.1 und 4.1.2 beschrieben, beeinflusst der Versorgungsdruck die Volumenstrom-Signalverstärkung V_{Qy} . Dabei weist sie im Bereich innerhalb der Überdeckung den doppelten Wert gegenüber außerhalb der Überdeckung auf.

$$V_{Qy_1} = \sqrt{2} * B * \sqrt{p_0} \quad (4.44)$$

$$V_{Qy_2} = \frac{B * \sqrt{p_0}}{\sqrt{2}} \quad (4.45)$$

Da die Volumenstrom-Signalverstärkung einen linearen Einfluss auf die Kreisverstärkung des Systems hat, sollte demnach der Versorgungsdruck möglichst hoch gewählt werden.

4.1.5.2. Ventileigenfrequenz

Gemäß Gleichung (4.41) beeinflusst die Eigenfrequenz des Stellelementes Ventil die Kreisverstärkung im Quadrat, weshalb deren Größe einen signifikanten Einfluss auf das System hat.

In Ventildatenblättern ist meist die Kennfrequenz f_0 bei einem Phasengang von -90° gegeben. Aus diesem kann jedoch laut Murrenhoff mittels folgender Vorgehensweise die Ventileigenfrequenz ermittelt werden:

Bei der Kennfrequenz wird die Amplitudenüberhöhung aus dem Amplitudengang abgemessen und die Überhöhung \ddot{U} berechnet.

$$\ddot{U} = \lg \left| \frac{\text{Amplitude Eingangsgröße}}{\text{Amplitude Ausgangsgröße}} \right| \quad (4.46)$$

Mittels Tab. 5 kann die Dämpfung des Ventils abgelesen werden:

Überhöhung \ddot{U}	-0,301	-0,151	0	0,097	0,222	0,398	0,699	1
Dämpfung D	1	0,707	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05

Tab. 5: Zusammenhang Überhöhung und Dämpfung, Quelle: Murrenhoff (2012), S. 201.

Mit der erhaltenen Dämpfung und Gleichung (4.47) erhält man die Ventileigenfrequenz.

$$\omega_V = f_0 \sqrt{1 - D^2} \quad (4.47)$$

Im weiteren Sinne hat auch hier der Versorgungsdruck einen bedeutenden Einfluss, welcher in Abb. 25 dargestellt ist.

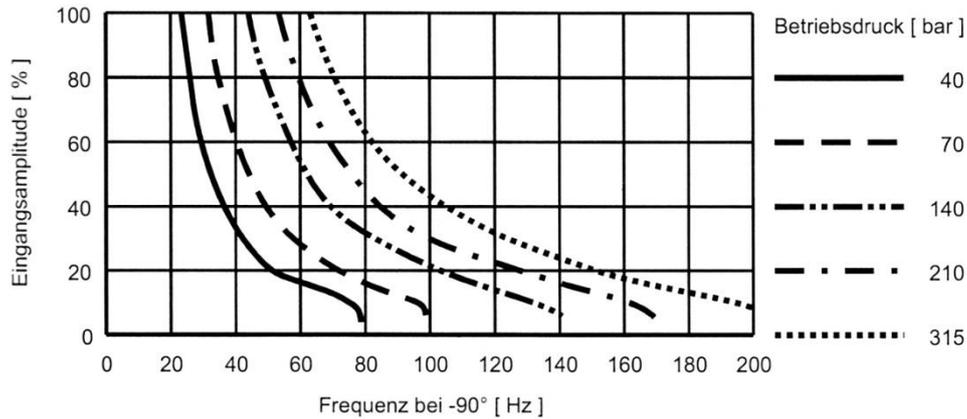


Abb. 25: Einfluss des Betriebsdruckes auf die Kennfrequenz, Quelle: Murrenhoff (2012), S. 83.

4.1.5.3. Ölvolumen

Der Einfluss des Ölvolumens auf die Kreisverstärkung ist durch die hydraulische Kapazität C_H gegeben. Das Gesamtvolumen, welches sich aus Totvolumen V_{tot} und Kompressionsvolumen V_0 zusammensetzt, beeinflusst nach Gleichung (4.30) die hydraulische Kapazität linear. Folglich wirkt sich das Ölvolumen auf die Kreisverstärkung gemäß Gleichung (4.48) aus.

$$V_K = \frac{DV_{QU}V_{pU}\omega_v^2 E'_{\text{öl}}}{V_{tot} + V_{tot}} \quad (4.48)$$

4.1.5.4. Antrieb

Einen weiteren entscheidenden Einfluss auf die Dynamik des Regelkreises hat die Streckendynamik.³⁵ Im offenen Regelkreis des betrachteten Systems ist eine Polstelle vorhanden, die durch die hydraulische Kapazität im Nenner bestimmt ist. Je nach Ölgesamtvolumen liegt entweder diese Polstelle oder die durch das Stellelement definierten näher an der imaginären Achse.

Für ein rasches Abklingen der Eigenfunktion ist es notwendig, dass sämtliche Polstellen möglichst weit von der imaginären Achse entfernt sind.³⁶

Wie eingangs bereits beschrieben, soll der hydraulische Weitbereichsregler bei der wiederkehrenden Wartung von verschiedensten Komponenten zum Einsatz kommen. Dabei werden verschiedenste Prüflinge gemäß deren Wartungsanweisungen als Stecke im Regelkreis eingesetzt. Je nach Prüfling entsteht somit eine unterschiedliche Streckendynamik, an die der Regelkreis angepasst werden muss. Für das vorliegende Projekt wird zum Test der Grenzen des Stellelementes jedoch angenommen, dass das Ventil die limitierende Komponente im System darstellt.

³⁵ Vgl. Murrenhoff (2012), S. 263.

³⁶ Vgl. Tieste/Romberg (2015), S. 83.

5. Komponentenrecherche

5.1. Istwerterfassung

Wie unter Kapitel 3.1.1 erwähnt, wurden seitens der TEST-FUCHS GmbH in der Vergangenheit bereits mehrere Systeme zur Istwerterfassung getestet. Aus diesem Grund soll im vorliegenden Projekt der Schwerpunkt bei der Suche nach besser geeigneten Stellelementen liegen und die bestehenden Systeme für Druck- und Volumenstrommessung weiter verwendet werden.

5.1.1. Druckmessung

Die TEST-FUCHS GmbH verwendet zur Messung der Prozessgröße Druck die piezoelektrischen Druckaufnehmer des Herstellers Keller GmbH.



Abb. 26: Keller PR23 Druckmessumformer, Quelle: Keller AG (2008), S. 1.

Nachfolgend ein Auszug der wichtigsten technischen Daten der Keller PR23 Druckaufnehmer laut Datenblatt:

Typ:	Keller PR23/8465.03 EPDM
Linearität+Hysterese+Repetitierbarkeit:	typ. $\pm 0,2\%$ vom Maximalwert max. $\pm 0,5\%$ vom Maximalwert
Temperaturkoeffizient des Nullpunkts:	max. 0,01% vom Maximalwert je °C
Temperaturkoeffizient der Empfindlichkeit:	max. 0,02% vom Maximalwert je °C
Betriebstemperatur:	-40°C bis 100°C
Frequenzbereich:	1kHz
Signalausgang:	4-20 mA
Speisung:	8-28 VDC

Tab. 6: Auszug technische Daten Keller PA23, Quelle: In Anlehnung an Keller AG (2008), S. 2.

Diese Druckaufnehmer werden bei der TEST-FUCHS GmbH kalibriert, um eine maximale Abweichung von $\pm 0,25\%$ nicht zu überschreiten. Bezüglich der Dichtungsmaterialien sind Keller PR23 sowohl mit EPDM als auch mit NBR Dichtungen verfügbar, wodurch ein Dichtungsaustausch nicht notwendig ist.

5.1.2. Volumenstrommessung

Die TEST-FUCHS GmbH verwendet bei Hydraulikkomponentenprüfständen zur Volumenstrommessung die Zahnraddurchflussmesser des Herstellers Kracht AG.



Abb. 27: Kracht VC Zahnraddurchflussmesser, Quelle: Kracht GmbH (Hrsg.) (2012), S. 1.

Für den gegebenen Volumenstrom von 250l/min ist der Typ VC5 notwendig. Die technischen Daten des Kracht VC5 Durchflussmessers laut Datenblatt sind in Tab. 7 zusammengefasst.

Typ:	Kracht VC5 E1PS
Messbereich	1 – 250 l/min
Max. Druck	400 bar (Hochdruckausführung)
Zulässiger Druckabfall:	16 bar
Betriebsmitteltemperatur:	-30°C bis 130°C mit EPDM Dichtungen
Auflösung	191,5 Impulse pro Liter
Linearitätsfehler:	max. $\pm 0,1\%$ vom Messwert
Reproduzierbarkeit:	max. 0,1% vom Messwert
Genauigkeit:	$\pm 0,3\%$ vom Messwert ab $\geq 20\text{mm}^3/\text{s}$
Dichtungsmaterialien:	FKM, EPDM, FEP, FFKM

Tab. 7: Auszug technische Daten Kracht VC, Quelle: In Anlehnung an Kracht GmbH (Hrsg.) (2012), S. 5ff.

Die Genauigkeit der Kracht VC Zahnraddurchflussmesser von $\pm 0,3\%$ vom Messwert wäre zwar ausreichend, allerdings erhält man durch die Auflösung von 191,5 Impulsen pro Liter beispielsweise bei einem Volumenstrom von 1l/min nur ein Messsignal je 313 Millisekunden. Dieser Wert ist für eine zufriedenstellende Messung zu gering, weshalb bei der TEST-FUCHS GmbH standardmäßig eine Serienschaltung zweier Zahnraddurchflussmesser mit Bypassleitung ausgeführt wird.

Dazu wird dem Messgerät mit einem Messbereich von 1 bis 250 l/min ein zweites mit einem Bereich von 0,16 bis 16 l/min nachgeschaltet (siehe Abb. 28).

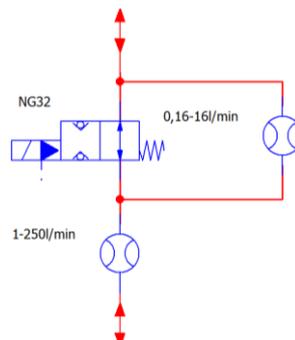


Abb. 28: Schaltung zur Volumenstrommessung, Quelle: Eigene Darstellung.

5.2. Stellelemente

Um eine optimale Lösung für den vorliegenden Fall zu finden, wird vorerst das bestehende System analysiert und versucht, ähnliche Ventile einzusetzen, um ohne Änderungen an den Befestigungsblöcken bereits eine Verbesserung der Situation zu bewirken. Im zweiten Schritt wird durch erneutes Studium der Herstellerkataloge nach einer Möglichkeit gesucht, welche mittels konventioneller Ventiltechnik die geforderte Funktion erfüllt.

5.2.1. Bestehende Variante

Standardmäßig wird von der TEST-FUCHS GmbH für ähnliche Aufgabenstellungen ein 3 Wege- Regelventil für Blockeinbau Typ 3WRCBH32 des Herstellers Bosch-Rexroth AG verwendet (siehe Abb. 29). Als Pilotventil dient ein Regelventil Typ 4WRPEH6 (Abb. 30). Die Druck bzw. Volumenstromregelung überlagert man mittels eigens gestaltetem elektronischem PID Regler der Lageregelung des Ventils. Dabei verursachte die Regelung von kleinen Drücken und Volumenströmen mit dem Bosch 3WRCBH32 in der Vergangenheit immer wieder Probleme.

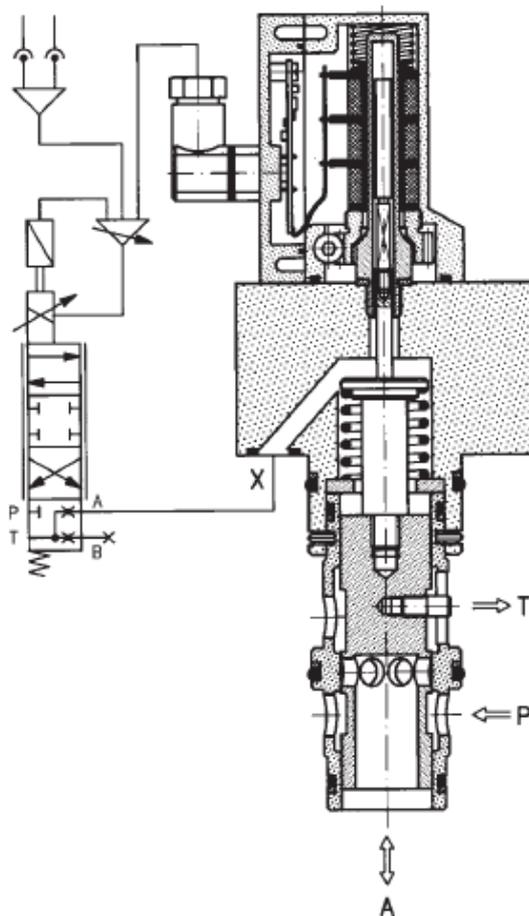


Abb. 29: Bosch 3WRCBH32, Quelle: Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2005), S. 3.

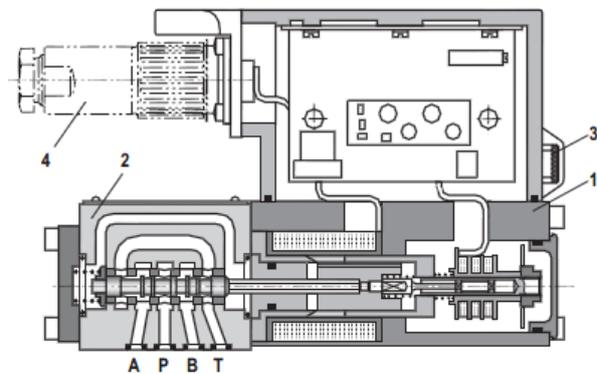


Abb. 30: Bosch 4WRPEH6, Quelle: Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2015), S. 4.

Auszug technische Daten 3WRCBH:

Typ	3WRCBH32V380M-1X/M
Nenngröße	32
Nennvolumenstrom (bei 5 bar Ventildruckabfall)	380l/min
Max. Betriebsdruck	315 bar
Betriebsmitteltemperatur	-20°C bis 80°C
Viskositätsbereich	10mm ² /s bis 800mm ² /s max. zulässig
Überdeckung	0
Hysterese	< 0,1 %
Stellzeit für Signalsprung 0-100%	28ms
-3dB Frequenz bei ±100%	rund 15Hz (Steuerdruck=100 bar, p _A =50 bar)
-90° Frequenz bei ±100%	rund 20Hz (Steuerdruck=100 bar, p _A =50 bar)
Versorgung Wegaufnehmer	±15V
Signal Wegaufnehmer	±10V
Dichtungsmaterial	NBR

Tab. 8: Auszug technische Daten 3WRCBH, Quelle: In Anlehnung an Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2005), S. 2ff.

Auszug technische Daten Pilotventil 4WRPEH6:

Typ	4WRPEH6C3B24L-2X/G24K0A1M
Nenngröße	6
Nennvolumenstrom (bei 70 bar Ventildruckabfall)	24l/min
Max. Betriebsdruck	315 bar
Betriebsmitteltemperatur	-20°C bis 70°C
Viskositätsbereich	10mm ² /s bis 800mm ² /s max. zulässig
Hysterese	< 0,2 %
Stellzeit für Signalsprung 0-100%	<10ms
-3dB Frequenz bei ±100%	rund 55Hz
-90° Frequenz bei ±100%	rund 55Hz
Versorgungsspannung	24V
Sollwerteingang	±10V
Dichtungsmaterial	NBR

Tab. 9: Auszug technische Daten 4WRPEH6, Quelle: In Anlehnung an Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2015), S. 2ff.

Wie aus den technischen Daten ersichtlich ist, gibt es diese Ventile nicht mit EPDM Dichtungen, weshalb nachträglich ein Tausch vorgenommen werden muss. Jener Vorgang wurde aber bei der TEST-FUCHS GmbH in der Vergangenheit bereits des Öfteren durchgeführt und verursachte keinerlei Schwierigkeiten.

Der angegebene Viskositätsbereich schränkt die obere Einsatztemperatur des Ventils bei Verwendung von Skydrol LD-4 auf 43,7°C (interpoliert) ein. Für die untere Temperaturgrenze stellt die Viskosität von 800mm²/s mit einer interpolierten Temperatur von 1,5°C keine Probleme dar.

Gemäß Tab. 8 und Tab. 9 beträgt der maximale Betriebsdruck der bisher verwendeten Komponenten 315 bar.

Da hydraulische Komponenten kurzfristig auftretende Spitzendrücke aushalten müssen, wird bei der Dimensionierung vom Nenndruck ausgegangen und zusätzlich eine Sicherheit von 2,5 bis 4 eingerechnet.³⁷

Durch diese Sicherheit darf eine geringfügige Erhöhung des Nenndruckes auf 350 bar die Funktionalität nicht einschränken.

5.2.2. Alternative für Bosch 3WRCBH32

5.2.2.1. ATOS LIQZO

Als Alternative für das Bosch 3WRCBH wird das Ventil Typ LIQZO des Herstellers ATOS spa betrachtet, welches gleiche Einbaumaße wie das bestehende Produkt aufweist. Dabei bietet der Hersteller die Hauptstufe inklusive Pilotventil an.

Vorteilhaft ist hier, dass der Hauptkolben von beiden Seiten hydraulisch betätigt wird. Dadurch könnten bei kleinen Drücken die mit dem Bosch 3WRCBH entstandenen Probleme behoben werden.

Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass sich die verbauten Abdichtungen der Steuerkammern des Hauptschiebers nachteilig auswirken, da diese Ruckgleiten bzw. Stick-Slip³⁸ Effekte verursachen können.

Der Preis exklusive Umsatzsteuer des ATOS LIQZO beträgt laut Angebot vom 07.07.2015 2.860,- Euro.

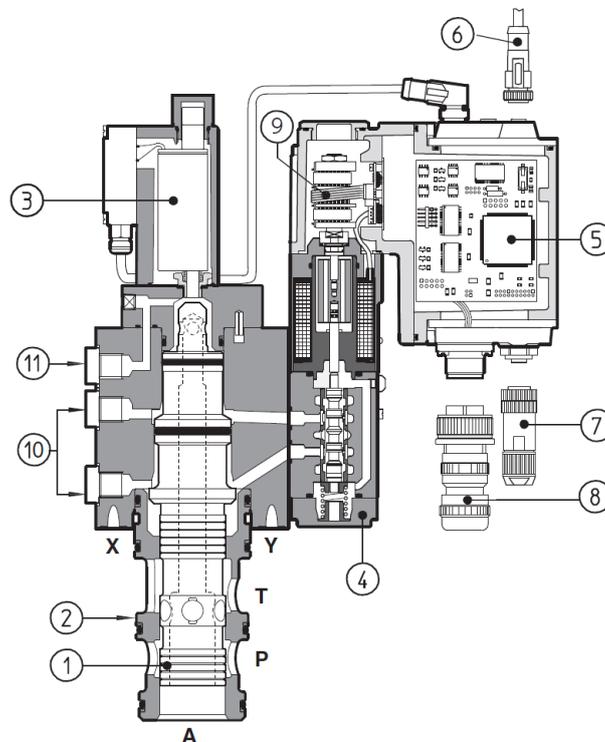


Abb. 31: ATOS LIQZO, Quelle: Atos spa (Hrsg.) (2015), S. 1.

³⁷ Vgl. Hochleitner (2010a), S. 92.

³⁸ Vgl. Bauer (2011), S. 194.

Auszug technische Daten LIQZO:

Typ	LIQZO-LEB-SN-NP-323L4
Nenngröße	32
Nennvolumenstrom (bei 5 bar Ventildruckabfall)	330l/min
Max. Betriebsdruck	350 bar
Betriebsmitteltemperatur	-20°C bis 80°C
Viskositätsbereich	15mm ² /s bis 380mm ² /s max. zulässig
Hysterese	< 0,1 %
Stellzeit für Signalsprung 0-100%	<22ms
-3dB Frequenz bei ±90%	rund 18Hz (Steuerdruck unbekannt)
-90° Frequenz bei ±90%	rund 20Hz (Steuerdruck unbekannt)
Versorgungsspannung	24V
Sollwerteingang	±10V
Dichtungsmaterial	FKM

Tab. 10: Auszug technische Daten LIQZO, Quelle: In Anlehnung an Atos spa (Hrsg.) (2015), S. 2ff.

Wie zuvor wird der interpolierte Betriebsmitteltemperaturbereich bei Einsatz von Skydrol® LD-4 aufgrund der Viskosität auf minimal 20,9°C und maximal 37,8°C begrenzt.

5.2.3. Weitere Alternativen

Weitere Alternativen für das bestehende Ventil sind:

Moog SE3

Der Hydraulikkomponentenhersteller Moog Hydrolux S.A.R.L bietet den Typ SE3 in der Nenngröße 30 an, wobei die Einbaumaße sich von denen der Nenngröße 32 unterscheiden. Um das Ventil verwenden zu können, sind neue Einbaublöcke notwendig. Da jedoch dieser Aufwand für das vorliegende Projekt zu hoch ist, wird auf die weitere Betrachtung dieses Ventils verzichtet.

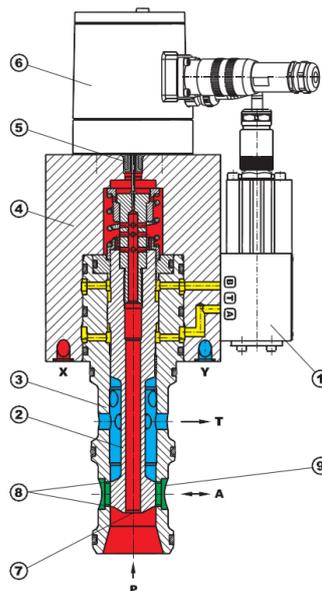


Abb. 32 Moog SE3, Quelle: MOOG HYDROLUX S.a.r.l. (Hrsg.) (2015), S. 3.

4 Wege Regelventile für Plattenaufbau.

Hier wird das Ventil 4WSE3E32 von der Bosch Rexroth AG betrachtet, da es gute dynamische Eigenschaften aufweist. Die Preise dieser Typen liegen aber deutlich über denen der Einbauventile, weshalb auf eine weitere Untersuchung wird.

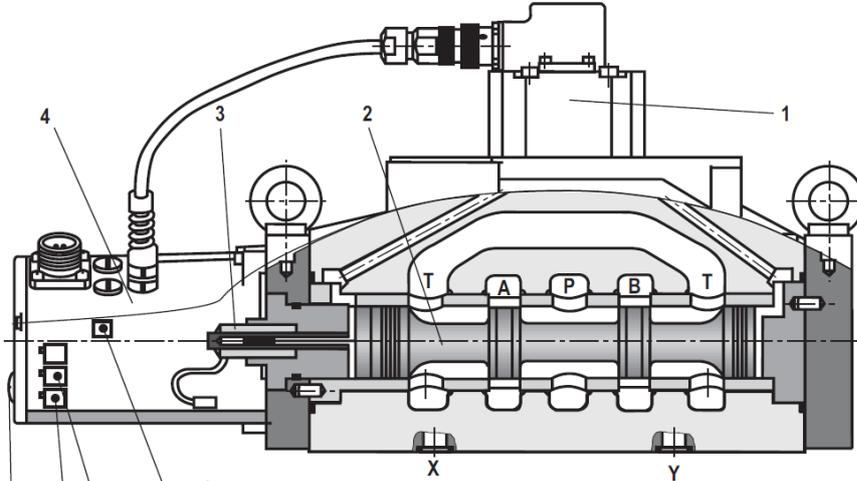


Abb. 33: Bosch 3WSE3E32, Quelle Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2012), S. 3.

5.2.4. Vergleich der Einbauventile

Ventil	Bosch 3WRCBH32	ATOS LIQZO
Nennndruck	315 bar	350 bar
Stellzeit 0-100%	<28ms	<22ms
Betriebsmitteltemperatur	1,5°C bis 43,7°C	20,9°C bis 37,8°C
-3dB Frequenz bei ±95%/Steuerdruck		18Hz / ubk.
-90° Frequenz bei ±95%/Steuerdruck		20Hz / ubk.
-3dB Frequenz bei ±100%/Steuerdruck	15Hz / 100 bar	
-90° Frequenz bei ±100%/Steuerdruck	20Hz / 100 bar	
Preis exkl. Ust	€2.921,-	€2.860

Tab. 11: Vergleich der Einbauventile, Quelle: Eigene Darstellung.

Leider ist kein direkter Vergleich der dynamischen Kenngrößen möglich, da im Datenblatt des Ventils LIQZO kein Steuerdruck angegeben wird. Anhand der Stellzeit ist jedoch ersichtlich, dass mit dem ATOS LIQZO schnellere Positionsänderungen als mit dem Bosch 3WRCBH möglich sind.

5.2.5. Lösung mit konventioneller Ventiltechnik

Da die bestehende Variante aufwendig ist und auch bei einfachen Projekten, die beispielsweise lediglich die Regelung von Druck erfordern, der gesamte Aufbau notwendig ist, wird durch den Einsatz von Druckwaagen und ähnlichen Bauteilen versucht, eine kombinierte Regelung von Druck bzw. Durchfluss zu erreichen. Dadurch werden die Kosten für Proportionalventile mit hoher Nenngröße eingespart und man erreicht einen modularen Aufbau durch Trennung der Funktionen Druckregelung und Durchflussregelung.

5.2.5.1. Druckregelung mit SUN PSJT

Die Sun Hydraulics Corporation bietet eine Sonderbauform eines 3-Wege-Druckregelventils an, bei dem die Grundstellung durch eine Feder in der Position, welche die Leitungen 1 und 3 verbindet, gehalten wird (siehe Abb. 34).

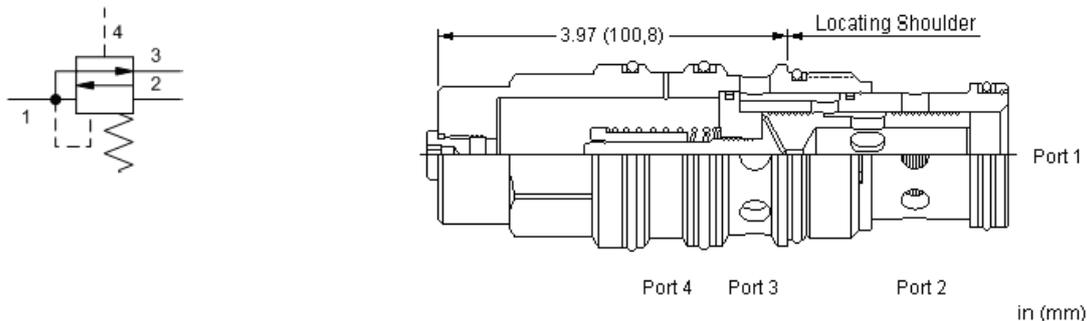


Abb. 34: Sun PSJT, Quelle: Sun Hydraulics Corporation (Hrsg.) (2015), S. 1 Onlinequelle [21.02.2016].

Dieses Bauteil entspricht den Anforderungen des vorliegenden Projektes und ist mit Skydrol® LD-4 beständigen Dichtungen verfügbar. Hier ist lediglich zu beachten, dass der Druck in Leitung 4 mindestens um den Federdruck von 7 bar höher sein muss als der gewünschte Druck in Leitung 1.

Der Preis exklusive Umsatzsteuer des PSJT laut Angebot vom 31.08.2015 beträgt 792,06 Euro.

Auszug Technische Daten PSJT:

Typ	PSJTXEN
Nenngröße	Serie 4
Federdruck	7 bar
Nennvolumenstrom	80gpm, entspricht rund 303 l/min
Max. Betriebsdruck	350 bar
Dichtungsmaterial	EPDM

Tab. 12: Auszug technische Daten PSJT, Quelle: In Anlehnung an Sun Hydraulics Corporation (Hrsg.) (2015), S. 1 Onlinequelle [21.02.2016].

Der Einsatzbereich bezüglich Viskosität aller Sun Ventile ist 2,8mm²/s bis 380mm²/s und bezüglich Betriebsmitteltemperatur bei Einsatz von EPDM Dichtungen -60°C bis 130°C.³⁹

Somit weist dieses Bauteil eine bessere Verträglichkeit gegenüber niedriger Viskosität als die betrachteten Proportionalventile auf. Die interpolierte untere Einsatztemperatur bei Verwendung von Skydrol® LD-4 liegt hier bei 20,9°C.

³⁹ Vgl. Sun Hydraulics Corporation (Hrsg.) (o.J.) Onlinequelle [21.02.2015].

5.2.5.2. Volumenstromregelung

Die Volumenstromregelung wird mittels konventioneller Ventiltechnik, wie unter Kapitel 3.2.2 bereits erwähnt, durch den Einsatz von Druckwaagen realisiert. Dabei zu beachten, dass eine Begrenzung des Volumenstromes dadurch geschieht, dass die Drosselstelle in der Druckwaage bei Erreichen des gewünschten Volumenstromes schließt. Im Ablauf bewirkt das ein Ansteigen des Druckes, was unter bestimmten Voraussetzungen zu einer Beschädigung des Systems führen kann.

Beispielsweise würde bei dem in Abb. 35 gezeigten, vereinfachten System eines doppelwirkenden Zylinders (angenommenes Flächenverhältnis von 2:1) bei Begrenzung des Volumenstromes im Ablauf, der Druck in der Ringkammer auf den doppelten Wert des Druckes in P ansteigen.

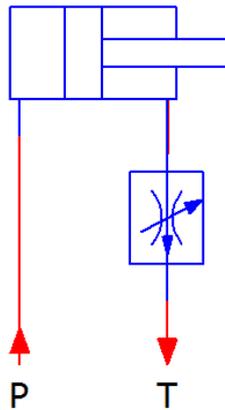


Abb. 35: Stromregelung im Ablauf, Quelle: Eigene Darstellung.

Damit im Ablauf eine Stromregelung mittels Druckwaage ohne Gefahr möglich ist, muss parallel zum Stromregelventil ein Ventil zur Druckbegrenzung eingesetzt werden (siehe Abb. 36).

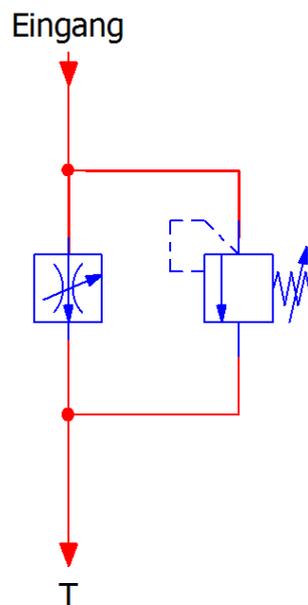


Abb. 36: Abgesicherte Stromregelung im Ablauf, Quelle: Eigene Darstellung.

5.2.5.3. Verfügbare Ventile

2-Wege Stromregelventile sind für den vorliegenden Fall nur unter Verwendung einer Gleichrichterschaltung von Rückschlagventilen verwendbar. Da die Rückschlagventile allerdings einen zu hohen Staudruck aufweisen, wird davon abgesehen und versucht eine Stromregelung für Zulauf und Ablauf mit anderen Mitteln zu erreichen.

Dazu bietet die Sun Hydraulics Corporation den Typ LHHT an (siehe Abb. 37). Dieses Ventil arbeitet in Verbindung mit einer externen Messblende als Druckwaage in beide Richtungen. Wie das SUN PSJT ist auch das LHHT mit EPDM Dichtungen verfügbar. Der Differenzdruck über die externe Drossel kann entweder mit 3,5 bar, 5 bar oder 7 bar⁴⁰ bestellt werden, wobei hier der kleinste Wert gewählt wird, um insgesamt einen niedrigen Druckverlust zu erhalten.

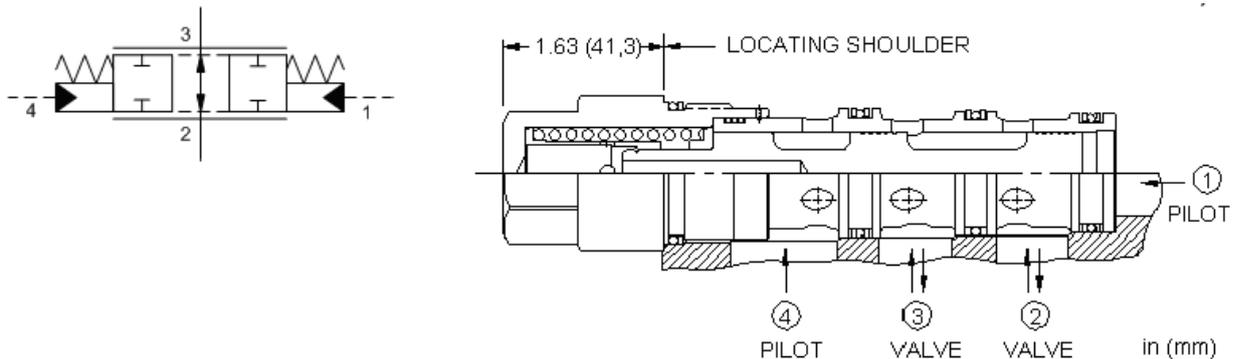


Abb. 37: Sun LHHT, Quelle: Sun Hydraulics Corporation (Hrsg.) (2015), S. 1 Onlinequelle [21.02.2016].

Der Preis exklusive Umsatzsteuer der Druckwaage laut Angebot vom 31.08.2015 beträgt 543,18 Euro.

Auszug Technische Daten LHHT:

Typ	LHHTXDE
Nenngröße	Serie 3
Federdruck	3,5 bar
Nennvolumenstrom	240 l/min
Max. Betriebsdruck	350 bar
Dichtungsmaterial	EPDM

Tab. 13: Auszug technische Daten LHHT, Quelle: In Anlehnung an Sun Hydraulics Corporation (Hrsg.) (2015), S. 1 Onlinequelle [21.02.2016].

Dieses Ventil weist, aufgrund der Viskositätsgrenzen für alle Sun Ventile unter Verwendung von Skydrol® LD-4, eine interpolierte Mindesttemperatur des Fluides von 20,9°C auf.

⁴⁰ Vgl. Sun Hydraulics Corporation (Hrsg.) (2015), S. 1 Onlinequelle [21.02.2016].

6. Lösungsvarianten

6.1. Elektronisch geregelte Variante mit Bosch Regelventil und kombinierter Lageregelung

Diese Variante ist eine Abwandlung der bestehenden Lösung. In Abb. 38 ist ein Bildausschnitt des Hydraulikschaltplanes ersichtlich. Die vollständigen Schaltpläne aller Varianten inklusive Stückliste sind im Anhang ab Seite 112 beigefügt.

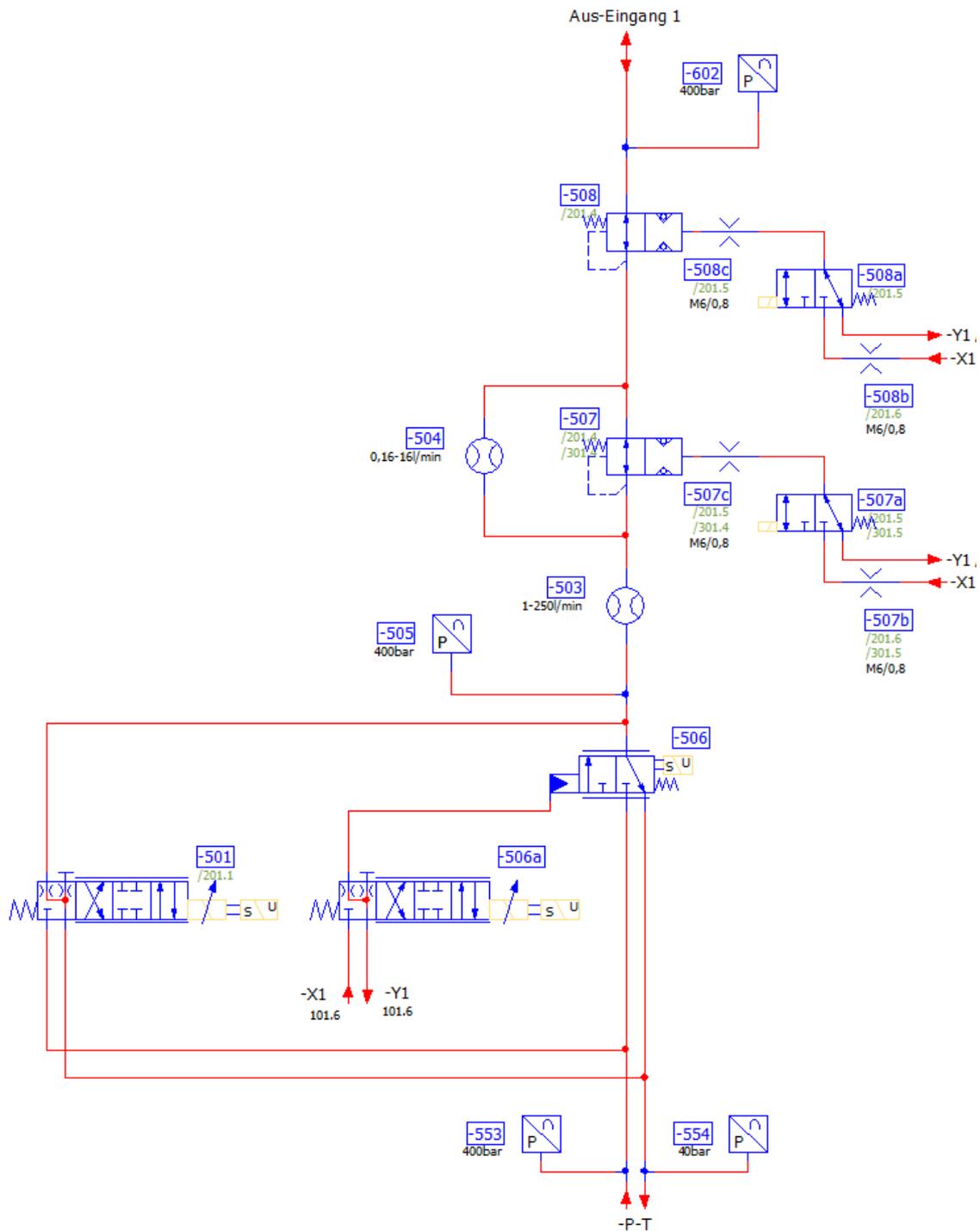


Abb. 38: Schaltplan der elektronisch geregelten Variante mit Bosch Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.

6.1.1. Ventile

Aufgrund von Problemen mit der Regelung kleiner Drücke und Volumenströme mit dem Bosch Regelventil wird versucht, die bestehende Lösung durch Parallelschalten eines Regelventils geringerer Nenngröße zu optimieren.

Als parallelgeschaltetes Regelventil dient vorerst ein Ventil Typ 4WRPEH6 mit 40 l/min Volumenstrom bei 35 bar Druckabfall je Steuerkante⁴¹. Im Kapitel 9 wird ermittelt, ob eventuell ein Typ mit größerem bzw. kleinerem Nennvolumenstrom notwendig ist.

Beide Ventile werden im Regelkreis zusammengefasst und so angesteuert, dass beispielsweise für eine Position von $\pm 3\%$ die NG6 Stufe und darüber das NG32 Ventil verwendet wird.

Kombinierte Lageregelung:

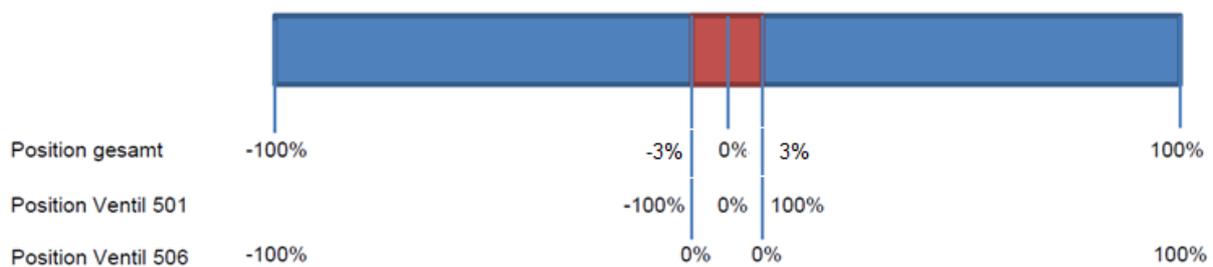


Abb. 39: Kombinierte Lageregelung, Quelle: Eigene Darstellung.

Zur leckölfreien Abdichtung erfordert diese Schaltung eine zusätzliche Absperrinrichtung, welche mittels Ventil 508 realisiert ist.

6.1.2. Messmittel

6.1.2.1. Druckmessung

Zur Messung der auftretenden Drücke werden die in Tab. 14 eingetragenen Druckaufnehmer verwendet.

Position	Typ	Maximaldruck [bar]	Max. Abweichung [\pm bar]
505/602/553	PA23/8465.03-400bar K10,15 AP540SM 4-20mA	400	1
554	PA23/8465.03-40bar K10,15 AP540SM 4-20mA	40	0,1

Tab. 14: Eingesetzte Druckaufnehmer, Quelle: Eigene Darstellung.

Für die in der Spezifikation angegebene statische Regelgenauigkeit von 0,5% vom Istwert sind hier mehrere Druckaufnehmer notwendig, da die bevorzugten Keller PR23 Aufnehmer eine Abweichung von $\pm 0,25\%$ beim Maximalwert aufweisen. Als sinnvoll erweist sich dabei ein Druckaufnehmer, welcher genau die Anforderungen für den einzelnen Prüfpunkt erfüllt. Dieses Messgerät soll so nah wie möglich am Prüfling angebracht werden. Im vorliegenden Fall wird dazu die Position 602 verwendet, welche auch mittels Kaskadenregelung⁴² die Druckabfälle an den Absperrventilen und Volumenstrommessern kompensieren soll. Für eine

⁴¹ Vgl. Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2015), S. 2.

⁴² Vgl. Zacher/Reuter (2014), S. 256.

schnelle Rückführung des Druckistwertes ist es allerdings notwendig, dass die Länge der Rohrleitung zwischen Regelventil und Druckaufnehmer, welche die Totzeit des Systems für Druckregelung repräsentiert, möglichst gering ist. Dazu wird ein Druckaufnehmer direkt nach den Regelventilen eingesetzt (Position 505 in Abb. 38). Ebenso ist es in bestimmten Fällen notwendig, den Versorgungsdruck und den Druck im Rücklauf zu messen, wofür die Sensoren 553 und 554 vorgesehen sind. In manchen Fällen kann jedoch auf die Bauteile 602, 553 und 554 verzichtet werden, weshalb diese mit höheren Positionsnummern versehen sind.

6.1.2.2. Volumenstrommessung

Für die Messung der Prozessgröße Volumenstrom wird die standardmäßig bei der TEST-FUCHS GmbH verwendete Serienschaltung zweier Zahnradurchflusssensoren verwendet.

6.1.3. Kosten

Zum Vergleich werden nur die Kosten der eingesetzten Ventile und Messgeräte betrachtet, da sowohl Einbaublöcke als auch Grundplatten der Bauteile je nach Anforderungsfall variieren. Bei den verwendeten 2/2 Wege Einbauventilen handelt es sich um eine Eigenanfertigung der TEST-FUCHS GmbH, wobei der Preis nicht angegeben werden darf. Vernachlässigt wird dabei der Preis der Düsen (Position 507b/c und 508b/c) und jener der eventuell notwendigen Dichtungsmaterialien

Position	Gerät	Type	Preis excl. Ust.[€]
501	Regelventil	4WRPEH6C3B40L-2X/G24K0/A1M (0811404603)	1.467,-
503	Volumenzähler	VC 5 E1 PS/155 1-250l/min/400bar blank	1.020,-
504	Volumenzähler	VC0,2 E1PS/156 0,16-16l/min/400bar blank	582,-
505	Druckmessumformer	PA23/8465.03-400bar KI0,15 EPDM 4-20mA	330,-
506	Regelventil	0.811.402.611	1.335,-
506a	Regelventil	4WRPEH6C3B24L-2X/G24K0/A1M	1.586,-
507a	Wegeventil	WH1H-G24-SKY	163,-
508a	Wegeventil	WH1H-G24-SKY	163,-
553	Druckmessumformer	PA23/8465.03-400bar KI0,15 EPDM 4-20mA	330,-
554	Druckmessumformer	PA23/8465.03-40bar KI0,15 AP540SM 4-20mA	330,-
602	Druckmessumformer	PA23/8465.03-400bar KI0,15 EPDM 4-20mA	330,-
Summe			7.636,-

Tab. 15: Kosten Variante Bosch, Quelle: Eigene Darstellung.

6.2. Elektronisch geregelte Variante mit ATOS Regelventil und kombinierter Lageregelung

In Abb. 40 ist ein Bildausschnitt der Variante mit dem ATOS Regelventil dargestellt.

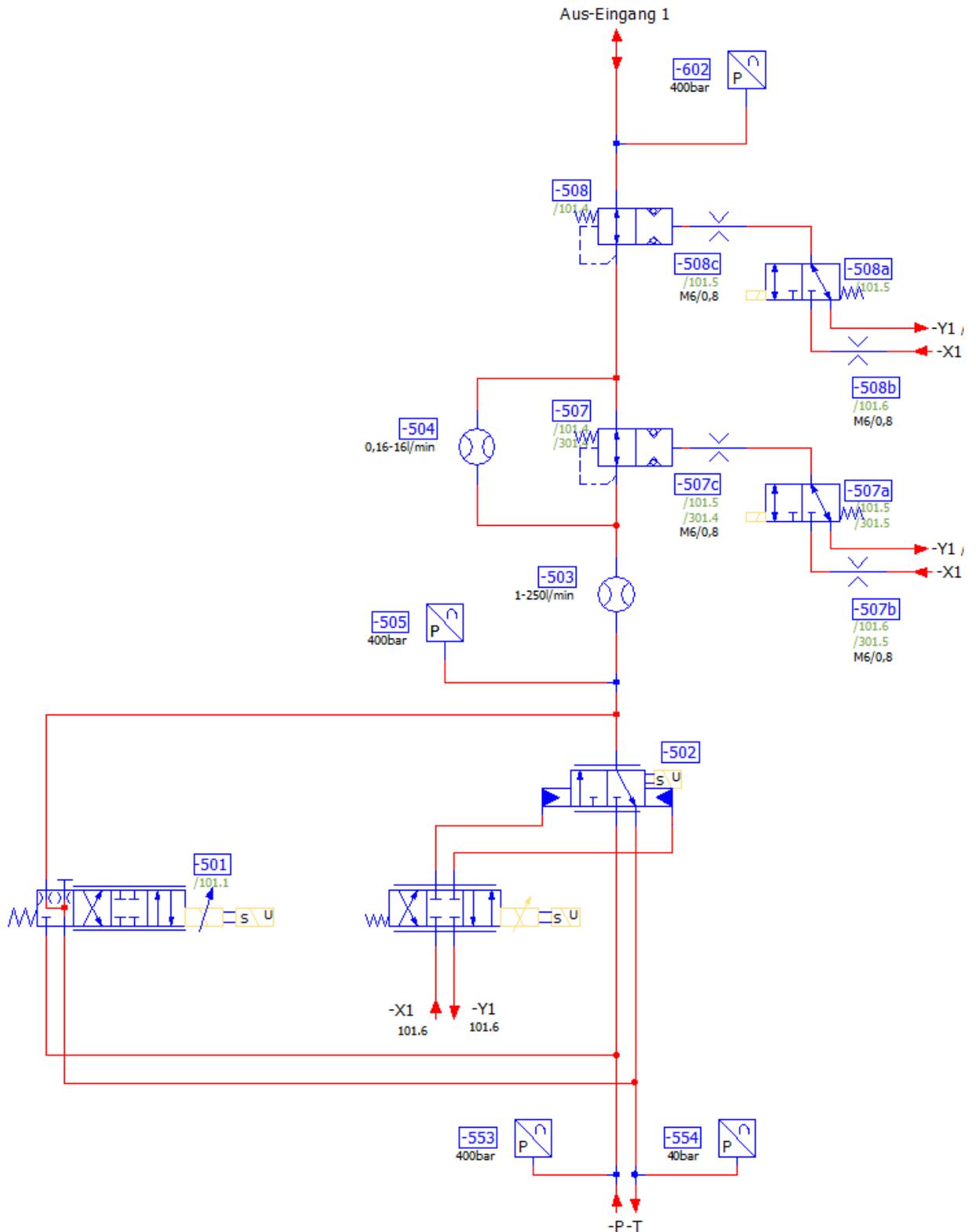


Abb. 40: Schaltplan der elektronisch geregelten Variante mit ATOS Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.

6.2.1. Ventile

Diese Variante unterscheidet sich von der bisherigen nur durch das 3-Wege-Regelventil in der Nenngröße 32. Auch hier wird die kombinierte Lageregelung angewandt.

6.2.2. Messmittel

Sämtliche in der ersten Variante genannten Messmittel kommen bei dieser ebenfalls zum Einsatz.

6.2.3. Kosten

Es werden wie zuvor nur die Kosten der eingesetzten Ventile und Messgeräte ohne den 2/2 Wege-Einbauventilen betrachtet.

Position	Gerät	Type	Preis excl. Ust.[€]
501	Regelventil	4WRPEH6C3B40L-2X/G24K0/A1M (0811404603)	1.467,-
502	Regelventil	LIQZO-LEB-SN-NP-323L4	2.860,-
503	Volumenzähler	VC 5 E1 PS/155 1-250l/min/400bar blank	1.020,-
504	Volumenzähler	VC0,2 E1PS/156 0,16-16l/min/400bar blank	582,-
505	Druckmessumformer	PA23/8465.03-400bar KI0,15 EPDM 4-20mA	330,-
507a	Wegeventil	WH1H-G24-SKY	163,-
508a	Wegeventil	WH1H-G24-SKY	163,-
553	Druckmessumformer	PA23/8465.03-400bar KI0,15 EPDM 4-20mA	330,-
554	Druckmessumformer	PA23/8465.03-40bar KI0,15 AP540SM 4-20mA	330,-
602	Druckmessumformer	PA23/8465.03-400bar KI0,15 EPDM 4-20mA	330,-
Summe			7.575,-

Tab. 16: Kosten Variante ATOS, Quelle: Eigene Darstellung.

6.3. Konventionelle Variante mit SUN Einschraubventilen

Nachfolgend der Bildausschnitt der konventionellen Variante mit SUN Einschraubventilen.

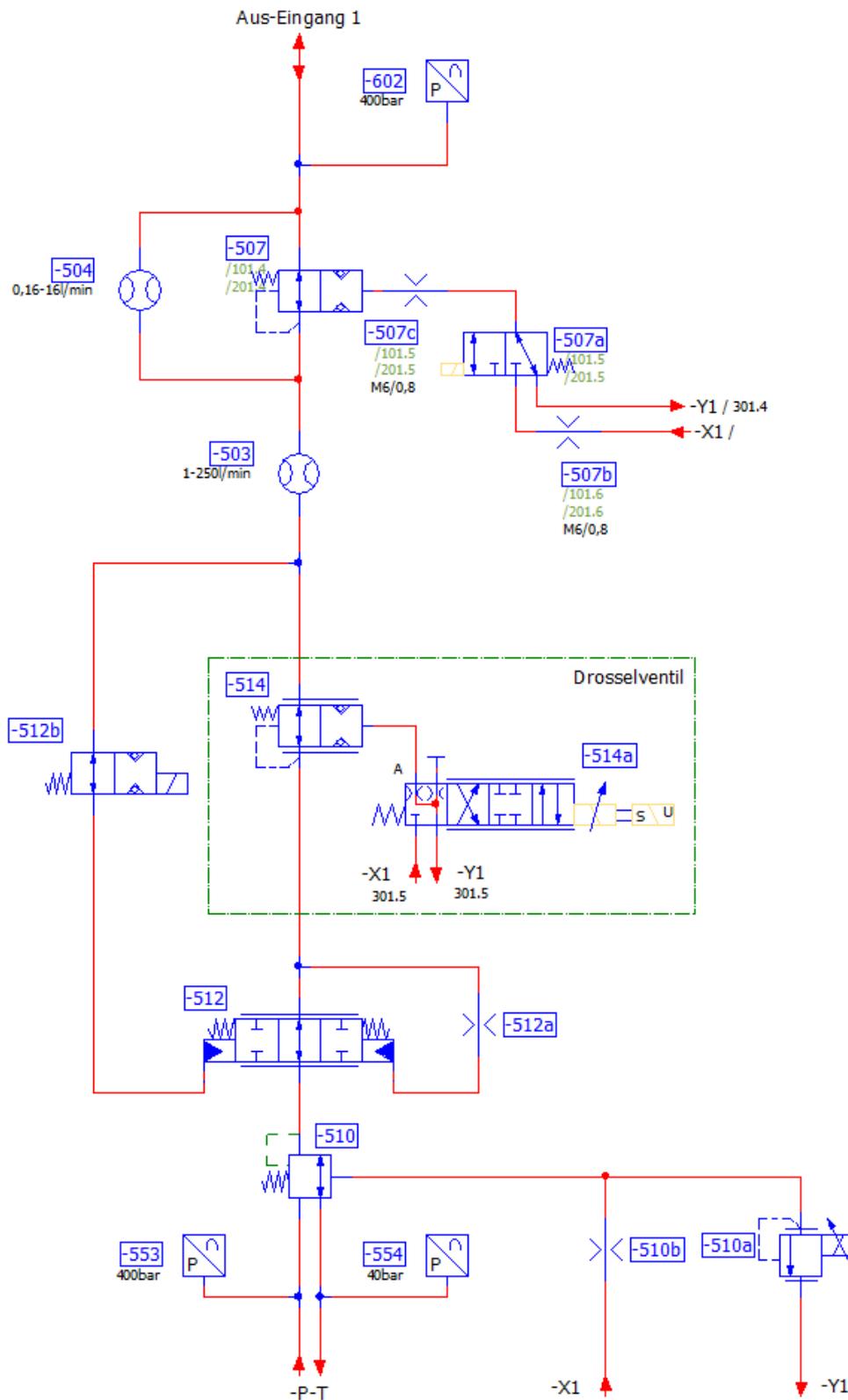


Abb. 41: Schaltplan der konventionellen Variante, Quelle: Eigene Darstellung.

6.3.1. Ventile

Bei dieser Variante ist die Position 510 für Druckregelung und die Druckwaage 512 und das Drosselventil 514 für Volumenstromregelung zuständig. Es entsteht somit ein modularer Aufbau, wobei im Falle des Bedarfs von lediglich einer Funktion nur deren Komponenten notwendig sind.

Als Drosselventil kommt eine Eigenanfertigung der TEST-FUCHS GmbH zum Einsatz. Hier kann aber jedes andere Drosselventil verwendet werden, welches bei einem Volumenstrom von 250 l/min nicht mehr als 3,5 bar Druckabfall aufweist. Zu beachten ist dabei, dass dieses Ventil leakagefrei abdichten muss, damit in Kombination mit dem Ventil 512b das System hydraulisch dicht ist und auf ein zusätzliches Absperrlement wie in den beiden anderen Varianten verzichtet werden kann.

Die Düsendurchmesser der im Schaltplan eingezeichneten Positionen 510b und 512a werden in Kapitel 10 ermittelt.

6.3.2. Messmittel

Auch die konventionell Variante kommt nicht ohne überlagerten elektronischen Regelkreis aus, da im Falle der Druckregelung die Druckverluste über alle Ventile und Volumenstrommesser kompensiert werden müssen. Folglich sind auch hier genaue Messinstrumente notwendig. Bezüglich Druckregelung kann auf den Aufnehmer direkt nach dem Druckregelventil verzichtet werden. Ebenso ist die Notwendigkeit der Komponenten 553 und 554 bei dieser Schaltung weniger von Bedeutung.

6.3.3. Kosten

Wie zuvor werden nur die Kosten der eingesetzten Ventile und Messgeräte ohne den 2/2 Wege-Einbauventilen betrachtet. Da bei dieser Variante das Absperrventil 508 entfällt und dafür das Drosselventil 514 hinzukommt, wird im Sinne einer besseren Vergleichbarkeit angenommen, dass beide in etwa den gleichen Preis aufweisen.

Position	Gerät	Type	Preis excl. Ust.[€]
503	Volumenzähler	VC 5 E1 PS/155 1-250l/min/400bar blank	1.020,-
504	Volumenzähler	VC0,2 E1PS/156 0,16-16l/min/400bar blank	582,-
507a	Wegeventil	WH1H-G24-SKY	163,-
510	3-Wege Druckregelventil	SUN PSJT-XEN	792,-
510a	Druckbegrenzungsventil	DBET5X/350G24K4M	913,-
512	Regelement	SUN LHHT-XFE	513,-
512b	2/2 Wege Sitzventil	VP1-S-1/4-G24	183,-
514a	Regelventil	0.811.404.600	1.280,-
553	Druckmessumformer	PA23/8465.03-400bar KI0,15 EPDM 4-20mA	330,-
554	Druckmessumformer	PA23/8465.03-40bar KI0,15 AP540SM 4-20mA	330,-
602	Druckmessumformer	PA23/8465.03-400bar KI0,15 EPDM 4-20mA	330,-
Summe			6.436

Tab. 17: Kosten konventionelle Variante, Quelle: Eigene Darstellung.

6.4. Vergleich der Varianten

Da jede Variante die geforderten Funktionen erfüllt und sich erst im späteren Test deren Unterschied zeigen wird, ist hier vorerst nur eine Betrachtung der Vor- bzw. Nachteile angegeben.

Variante Bosch

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> Flexibilität, da mittels elektronischer Ansteuerung viele Freiheitsgrade keine Dichtungen an Hauptschiebern der Regelventile 	<ul style="list-style-type: none"> teuerste Variante hydraulische Ansteuerung des 3 Wege-Regelventils in nur einer Richtung nicht modular, immer alle Regelventile notwendig Dichtungstausch an Ventilen notwendig zusätzliche Absperreinrichtung notwendig kleiner Viskositätsbereich

Tab. 18: Vor- und Nachteile Variante Bosch, Quelle: Eigene Darstellung.

Variante ATOS

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> Flexibilität, da mittels elektronischer Ansteuerung viele Freiheitsgrade 	<ul style="list-style-type: none"> nicht modular, immer alle Regelventile notwendig Dichtungstausch an Ventilen notwendig zusätzliche Absperreinrichtung notwendig Dichtungen am NG32 Hauptschieber kleiner Viskositätsbereich

Tab. 19: Vor- und Nachteile Variante ATOS, Quelle: Eigene Darstellung.

Konventionelle Variante

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> Modularität geringste Kosten kein Dichtungsaustausch notwendig keine zusätzliche Absperreinrichtung notwendig größerer Viskositätsbereich 	<ul style="list-style-type: none"> wenige Freiheitsgrade, da Verhalten durch Federn und Düsen gegeben.

Tab. 20: Vor- und Nachteile konventionelle Variante, Quelle: Eigene Darstellung.

7. Testvorbereitung

7.1. Versorgung

Zur Versorgung des Testaufbaus dient ein von der TEST-FUCHS GmbH entwickelter Prüfstand mit den in Tab. 21 angeführten technischen Daten.

Typ	HPM-S-NR-60-50
Medium	Skydrol® LD-4
Max. Druck Hochdruckkreis	5000psi, entspricht 344,8 bar
Max. Volumenstrom Hochdruckkreis	60gpm, entspricht 227,1 l/min
Max. Druck Steuerölversorgung	5600psi, entspricht 386,2 bar
Max. Volumenstrom Steuerölversorgung	4,2gpm, entspricht 16 l/min

Tab. 21: Technische Daten Versorgungsprüfstand, Quelle: Eigene Darstellung.



Abb. 42: HPM-S-NR-60-50, Quelle: Eigene Darstellung.

Dieser Prüfstand wird eingesetzt, um verschiedenste Hydraulikkomponenten zu testen. Er besitzt mehrere frei verschaltbare Ausgänge, an denen geregelter Druck oder Volumenstrom angelegt werden kann. Für den vorliegenden Fall sind der Hochdruckkreis mit dem Anschluss P1 und die Steuerölversorgung mit dem Anschluss X1 der zu testenden Varianten verbunden. Somit erreicht man, dass der Versorgungsdruck in P1 je nach durchzuführendem Test eingestellt werden kann und in X1 immer ein höherer Druck als in P1 herrscht, um beispielsweise 2/2 Wege-Einbauventile sicher verschließen zu können. Die Anschlüsse T1 und Y sind je mit einem freien Rücklauf verbunden, um einen möglichst geringen Staudruck zu erhalten. In nachfolgender Abb. 43 ist die Versorgung des Testaufbaus schematisch dargestellt.

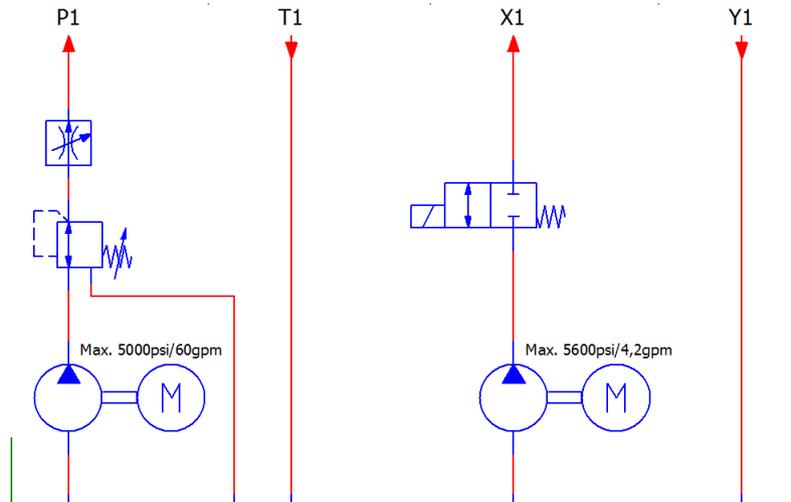


Abb. 43: Schematische Versorgung des Testaufbaus, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Verbindung des Prüfstandes mit den zu testenden Ventilen stellt der Versorgungsaufbau dar, welcher in Abb. 44 ersichtlich ist. Hier sind zwei Zahnraddurchflussmesser für die Messung der Volumenströme in P1 und T1, sowie 2 Druckaufnehmer vorgesehen. Im Anschluss T1 ist zusätzlich ein Sicherheitsventil (Position 557) angebracht, welches bei einem Druck von 20 bar öffnet. Dieses ist notwendig, um bei eventuell nicht angeschlossener Kupplung 550 ein Ansteigen des Rücklaufdruckes zu verhindern. Außerdem ist in der Leitung P1 ein Blasenspeicher mit einem Volumen von 10 Litern installiert, um schnelle Regelzeiten durch einen stabilen Versorgungsdruck zu ermöglichen und auftretende Pulsationen zu dämpfen.

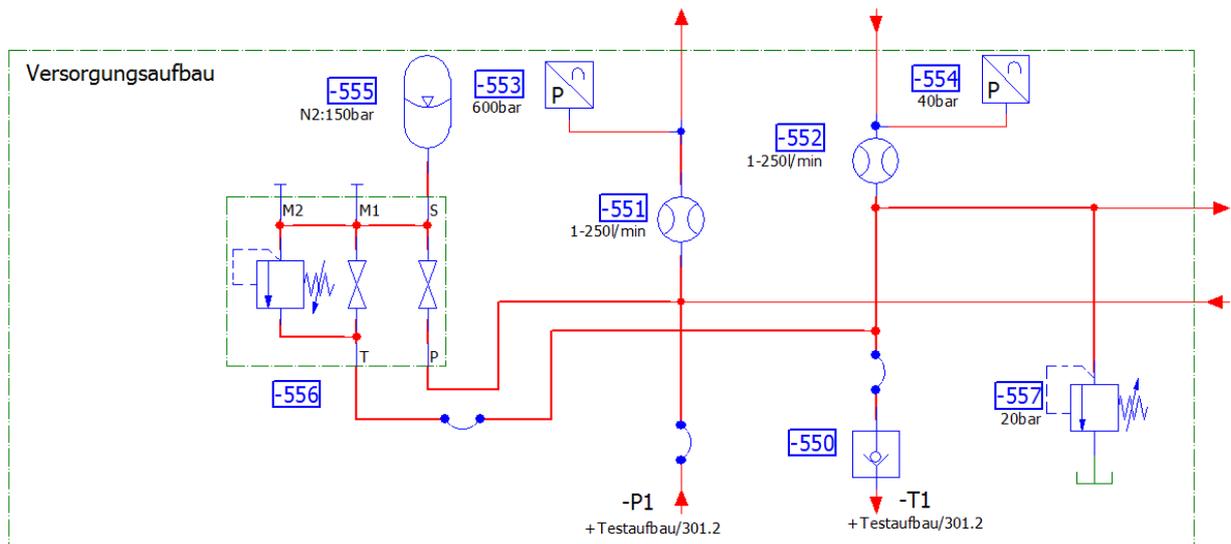


Abb. 44: Versorgungsaufbau, Quelle: Eigene Darstellung.

7.1.1. Auslegung Gas-Vorspanndruck im Speicher

Laut HYDAC Technology GmbH sind folgende Grenzwerte bei Blasenspeichern zu beachten, wobei p_0 dem Gas-Vorspanndruck, p_1 dem minimalen Systemdruck und p_2 dem maximalen Systemdruck entspricht.

$$p_0 \leq 0,9p_1 \quad (7.1)$$

$$\frac{p_2}{p_0} \leq 4 \quad (7.2)$$

Der maximal mögliche Druck mit dem Versorgungsprüfstand beträgt rund 340 bar. In der Projektspezifikation des hydraulischen Weitbereichsreglers ist ein Versorgungsdruckbereich von 50 bis 350 bar angegeben. Für den Test der Varianten würde das bedeuten, dass je Versorgungsdruck der Gasfülldruck im Speicher angepasst werden müsste, um optimale Bedingungen zu schaffen. Da jedoch der Versorgungsdruck einen signifikanten Einfluss auf die Kreisverstärkung hat, wird dieser mit 340 bar festgelegt. Der zur Speicherauslegung notwendige minimale Systemdruck wird mit 200 bar definiert.

Somit ergeben sich für den Gas-Vorspanndruck im Blasenspeicher folgende Werte:

$$p_0 \leq 0,9 * 200bar \leq 180bar \quad (7.3)$$

$$p_0 \geq \frac{p_2}{4} \geq \frac{200bar}{4} \geq 85bar \quad (7.4)$$

Eine weitere Dimensionierungsformel besagt, dass p_0 bei Pulsationsdämpfung 60% des mittleren Betriebsdruckes betragen soll.⁴³ Der mittlere Betriebsdruck wird hier dem maximalen Systemdruck von 340 bar gleichgesetzt.

$$p_0 = 0,6 * p_m = 0,6 * 340bar = 204bar \quad (7.5)$$

Der Wert von 204 bar überschreitet die zuvor berechnete Grenze. Ebenso steigt das zur Verfügung stehende Ölvolumen, je niedriger der Gasfülldruck ist. Um einen Kompromiss aus Pulsationsdämpfung und Speichervermögen zu finden, wird ein Stickstoffdruck von 150 bar gewählt.

Geht man von der Annahme aus, dass die Zustandsänderung im Speicher adiabat verläuft, was aufgrund kurzer Schaltzeiten eine gute Näherung darstellt,⁴⁴ kann das System mit Gleichung (7.6) beschrieben werden.

$$\Delta V_{ad} = V_0 \left[\left(\frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{1}{\kappa}} - \left(\frac{p_0}{p_2} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \right] \quad (7.6)$$

Somit ergibt sich für eine N₂-Füllung mit einem Druck von 150 bar die adiabate Änderung des Gasvolumens von:

$$\Delta V_{ad} = 10 \left[\left(\frac{150}{200} \right)^{\frac{1}{1,4}} - \left(\frac{150}{340} \right)^{\frac{1}{1,4}} \right] = 2,569l \quad (7.7)$$

Der berechnete Wert entspricht dem Ölvolumen, welches vom Blasenspeicher bei einer Entspannung von 340 bar auf 200 bar abgegeben wird. Bei einem maximalen Volumenstrom von 220 l/min resultiert folgende Dauer zur Entladung des Speichers:

$$Q = 220 \frac{l}{min} = 220 \frac{l}{min} \frac{1}{60} \frac{min}{s} = 3,666 \frac{l}{s} \quad (7.8)$$

⁴³ Vgl. HYDAC Technology GmbH (Hrsg.) (2015), S. 19.

⁴⁴ Vgl. Matthies/Renius (2014), S. 179.

$$t_{ent} = \frac{\Delta V_{ad}}{Q} = \frac{2,569l}{3,666 \frac{l}{s}} = 0,702s \quad (7.9)$$

Die Zeit t_{ent} bedeutet, dass bei einem Volumenstrom von 220 l/min, bei völligem Zusammenbrechen des Versorgungsdruckes, der Speicher den Volumenstrom für eine Zeit von rund 0,7 Sekunden aufrechterhalten kann und der Druck dabei auf 200 bar abfällt. Im Test finden schnelle Schaltvorgänge innerhalb von 50 Millisekunden statt. Bei Druckabfall in der Versorgung steht somit vom Blasenspeicher ein Ölvolumen von rund 2,6 Litern zur Verfügung, um einen völligen Druckabfall zu verhindern.

7.2. Belastungsaufbau

Um die Grenzen der jeweiligen Variante zu testen, ist es notwendig, dass Komponenten am Ausgang des hydraulischen Weitbereichsreglers eingesetzt werden, welche das Verhalten verschiedenster Prüflinge simulieren können. Zu diesem Zweck dient der in Abb. 45 gezeigte Belastungsaufbau.

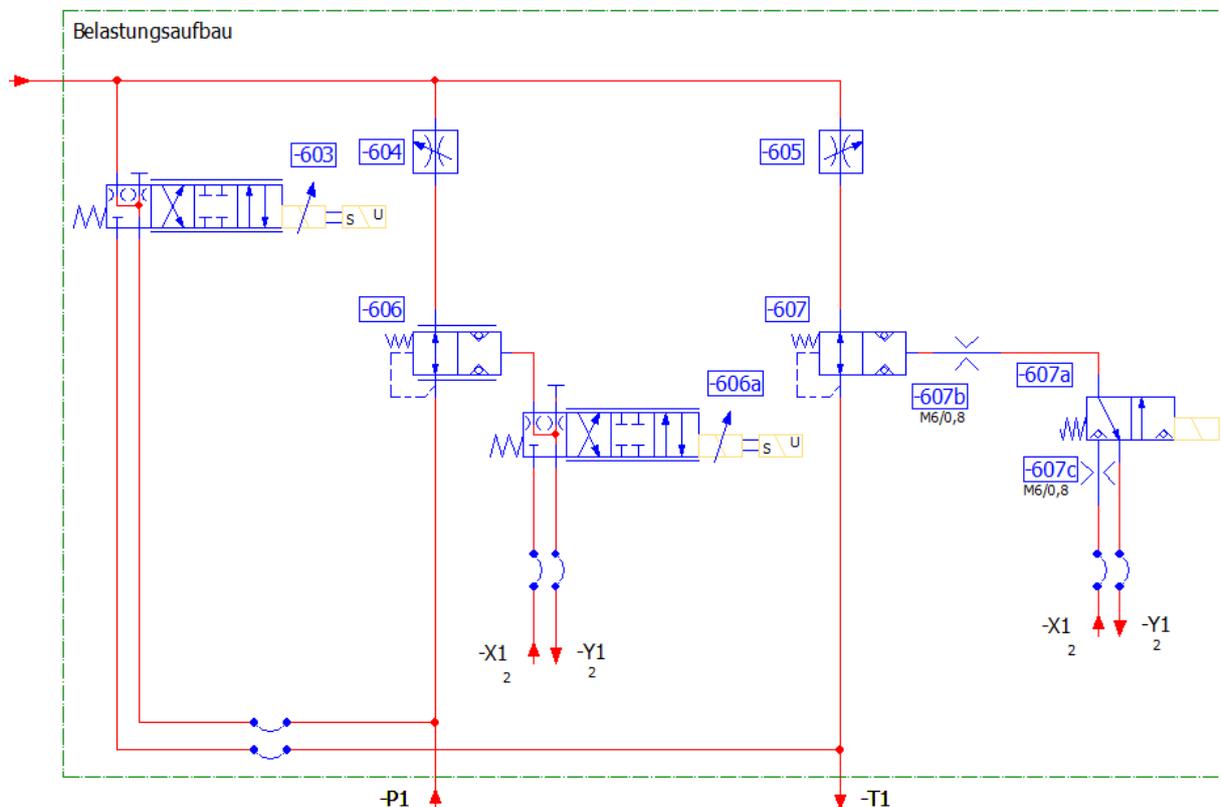


Abb. 45: Belastungsaufbau, Quelle: Eigene Darstellung.

7.2.1. Komponenten des Belastungsaufbaus

4/3 Wege Regelventil 603

Bei diesem Ventil handelt es sich um ein Regelventil des Typs Bosch 4WRPEH6, welches auch in der kombinierten Lageregelung zum Einsatz kommt. Mit einer Schaltzeit von unter 10 Millisekunden⁴⁵ eignet es sich für eine schnelle Umschaltung von Zulauf auf Ablauf. Des

⁴⁵ Vgl. Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2015), S. 5.

Weiteren kann damit eine Belastungsfunktion wie beispielweise eine Sinusschwingung vorgegeben werden.

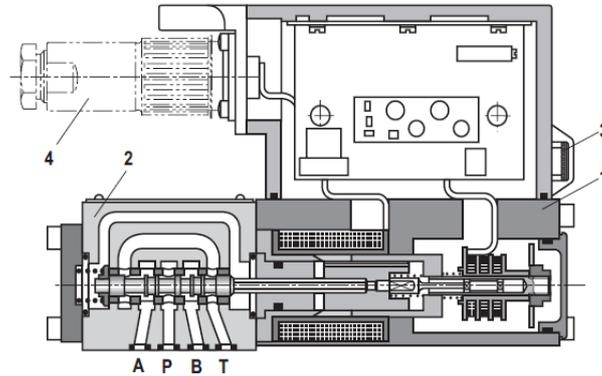


Abb. 46: Bosch 4WRPEH, Quelle: Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2015), S. 4.

Drosselventil 606

Dabei handelt es sich um das 2/2-Wege-Einbauventil in der Nenngröße 32, welches auch in der konventionellen Variante als Drossel fungiert. Anders als zuvor wird jedoch hier ein größeres Pilotventil benötigt, um schnelle Schaltvorgänge zu ermöglichen. Ein angemessenes Regelventil für diesen Zweck ist der Typ 4WRPEH6 mit einem Volumenstrom von 12l/min bei 35 bar Druckabfall je Steuerrante⁴⁶.

Schaltventil 607:

Um auch im Ablauf hohe Volumenströme zu ermöglichen, ist ein weiteres 2/2 Wege-Einbauventil als Schaltventil installiert. Als Pilot dient hier ein Typ WH1H-G24 des Herstellers HAWE Hydraulik SE mit einem maximalen Volumenstrom von 8 l/min⁴⁷. Laut der TEST-FUCHS GmbH gab es in der Vergangenheit mit dieser Konfiguration Probleme bezüglich eines klemmenden Pilotventils. Diese ließen sich durch den Einbau von je einer Düse in den Leitungen A und P beheben, weshalb auch hier die Düsen Position 607b und 607c zum Einsatz kommen.

Drossel 604 und 605:

Die beiden Drosseln 604 und 605 werden eingesetzt, um weitere Einstellmöglichkeiten im Belastungsaufbau zu erhalten. Diese Aufgabe verrichten zwei Drosselventile Typ MG30G1X⁴⁸ der Bosch Rexroth AG.

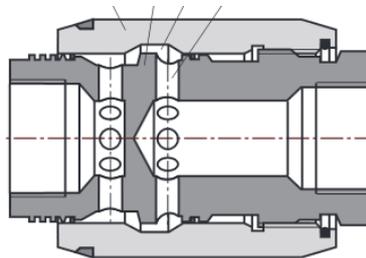


Abb. 47: Drossel MG30, Quelle: Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2015), S. 1181.

⁴⁶ Vgl. Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2015), S. 2.

⁴⁷ Vgl. HAWE Hydraulik SE (Hrsg.) (2015), S. 2.

⁴⁸ Vgl. Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2013a), S. 1181.

7.3. Verbindungsleitungen im Testaufbau

Damit keinerlei negative Einflüsse durch nachgiebige Elemente wie beispielsweise Schläuche entstehen, ist im Regelbereich ab dem Ausgang der zu testenden Schaltung bis zum Eingang der Belastungsventile keine Schlauchleitung vorhanden.

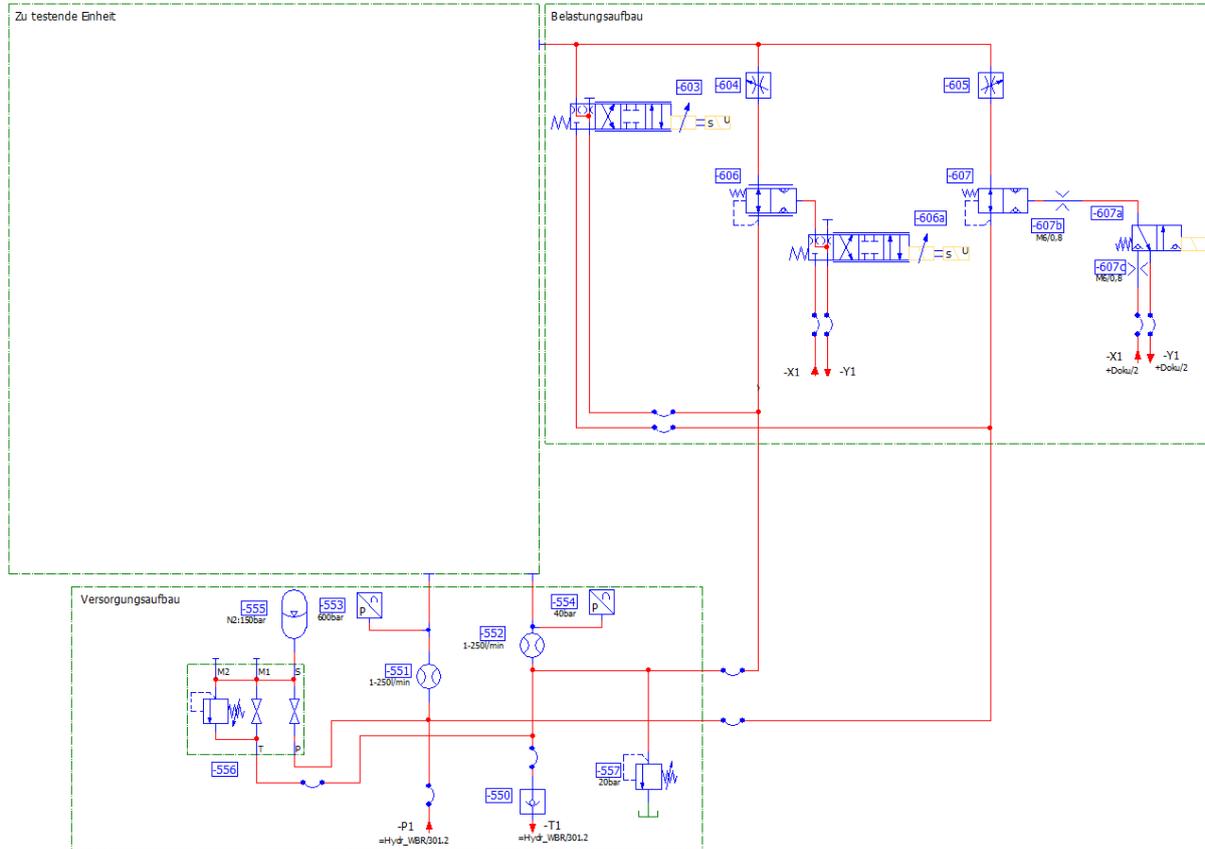


Abb. 48: Testaufbau, Quelle: Eigene Darstellung.

Des Weiteren ist der Testaufbau so kompakt wie möglich gestaltet, um lange Verbindungsleitungen im Regelbereich zu vermeiden. Bezüglich der Verschraubungen sind die in Tab. 22 angeführten Typen in Verwendung.

Rohrdurchmesser [mm]	Bau-reihe	Verwendung
25	S	Leitung zwischen Zahnraddurchflussmesser 503 und sämtlichen Belastungsventilen
30	S	Sämtliche Hochdruckleitungen bis auf o.g.
35	L	Sämtliche Rücklaufleitungen
8	S	Sämtliche Leitungen für NG6 Ventile, sowie alle Steuerölleitungen
10	L	Sämtliche NG6 Rücklaufleitungen, sowie Steuerölrückläufe

Tab. 22: Verschraubungstypen Testaufbau, Quelle: Eigene Darstellung.

7.4. Testablauf

Die Eigenschaften von Regelventilen sind laut Hochleitner mit folgenden Kennzahlen zu beschreiben:

Statische Werte	Dynamische Werte
Nulldurchfluss	Amplitudengang
Reproduzierbarkeit	Phasengang
Hysterese	
Linearität	
Ansprechempfindlichkeit	
Umkehrspanne	

Tab. 23: Kennzahlen Regelventile, Quelle: In Anlehnung an Hochleitner (2010b), S. 71ff.

Diese Kennzahlen werden seitens der Komponentenhersteller ermittelt und sind im Datenblatt des jeweiligen Ventils ersichtlich. Für den vorliegenden Fall ist somit ein erneutes Bestimmen der Werte nicht notwendig, weshalb das Hauptaugenmerk der Tests bei der Erfüllung der notwendigen Funktionen liegt.

Grundsätzlich soll der hydraulische Weitbereichsregler folgende Funktionen erfüllen:

- Druckregelung Zulauf
- Druckregelung Ablauf
- Durchflussregelung Zulauf
- Durchflussregelung Ablauf
- Druckregelung und Durchflussbegrenzung Zulauf
- Druckregelung und Durchflussbegrenzung Ablauf
- Durchflussregelung und Druckbegrenzung Zulauf
- Durchflussregelung und Druckbegrenzung Ablauf

7.4.1. Funktionstests

Um die Eignung der Varianten als Weitbereichsregler zu testen, ist eine Überprüfung jeder Funktion mit verschiedensten Einstellwerten notwendig. Bezüglich der Regelung unterscheidet man zwischen Störgrößenregelung und Führungsgrößenregelung.⁴⁹ Auf eine Betrachtung des Systems bei Führungsgrößenregelung wird jedoch bewusst verzichtet, da in diesem Fall einem instabilen System durch die Verwendung einer Rampe entgegengewirkt werden kann.

Zum Validierung der Eigenschaften bei Störgrößenregelung sind mehrere Tests notwendig, bei denen man bestimmte Betriebspunkte einstellt und mit den Belastungsventilen Störungen des Zustandes verursacht. Bevor diese Funktionstests durchgeführt werden können, ist es erforderlich, anhand verschiedenster Verfahren die Systemparameter zu optimieren, um die physikalischen Grenzen des Aufbaues zu ermitteln.

Der Ablauf der durchgeführten Funktionstests ist auf den folgenden Seiten beschrieben.

⁴⁹ Vgl. Murrenhoff (2012), S. 423f.

7.4.1.1. Druckregelung im Zulauf

Randbedingungen:

Versorgungsdruck: 340 bar

Gasfülldruck Speicher: 150 bar

Vorgehensweise:

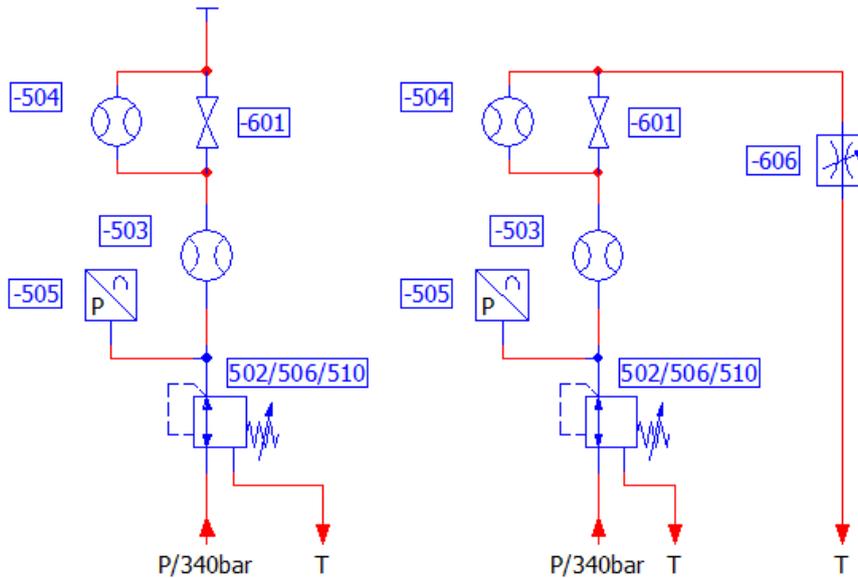


Abb. 49: Schematische Schaltung für Test des Druckreglers im Zulauf, Quelle: Eigene Darstellung.

1. Einstellen des Druckes bei geschlossenen Belastungsventilen (siehe Abb. 49 links).
2. Sprunghafte Öffnung des Belastungsventils 606 auf eine Öffnung, welche bei dem gegebenen Druck einen maximalen Volumenstrom ergibt (siehe Abb. 49 rechts).
3. Sobald der Druck stabil ist, sprunghaftes Verschließen des Ventils 606.

Dieser Test stellt beispielsweise ein zu prüfendes Schaltventil dar, welches sprunghaft verschlossen wird.

Folgende Drücke sollen dabei eingestellt werden:

2 bar	10 bar	50 bar	100 bar	150 bar
200 bar	250 bar	275 bar	290 bar	

Tab. 24: Druckstufen Zulaufest, Quelle: Eigene Darstellung.

Testergebnisse:

- Stabilität bei statischer Druckregelung
- Einregelzeit bei Sprung von 0 l/min auf maximalen Volumenstrom im Zulauf
- Einregelzeit bei Sprung von max. Volumenstrom auf 0 l/min im Zulauf

7.4.1.2. Druckregelung im Ablauf

Randbedingungen:

Versorgungsdruck: 340 bar

Gasfülldruck Speicher: 150 bar

Vorgehensweise:

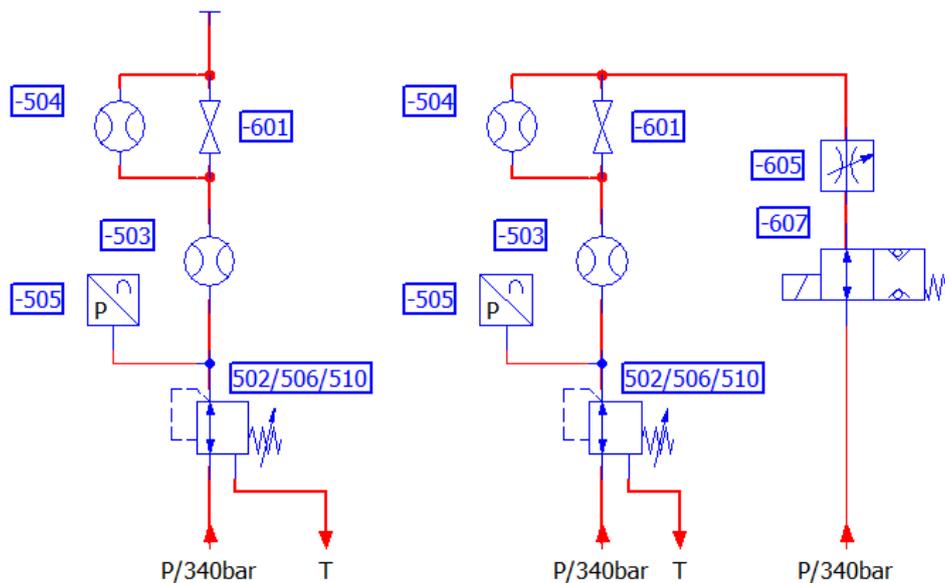


Abb. 50: Schematische Schaltung für Test des Druckreglers im Ablauf, Quelle: Eigene Darstellung.

1. Einstellen des Druckes bei verschlossenen Belastungsventilen (Abb. 50 links).
2. Sprunghafte Öffnung des Ventils 607 um einen maximalen Volumenstrom im Ablauf zu ermöglichen (Abb. 50 rechts). Die Drossel 605 muss dabei so positioniert werden, dass sich bei gegebenem Druck 505 ein maximaler Volumenstrom ergibt.
3. Sprunghaftes Verschließen der Position 607, um auch hier die Dauer bis zum erneuten Erreichen des Druckes zu bestimmen.

Einzustellende Drücke:

2 bar	10 bar	50 bar	100 bar	150 bar
200 bar	250 bar	275 bar	290 bar	

Tab. 25: Druckstufen Ablauftest, Quelle: Eigene Darstellung.

Testergebnisse:

- Stabilität bei statischer Druckregelung
- Einregelzeit bei Sprung von 0 l/min auf maximalen Volumenstrom im Ablauf
- Einregelzeit bei Sprung von max. Volumenstrom auf 0 l/min

7.4.1.4. Stromregelung im Zulauf

Randbedingungen:

Versorgungsdruck: 340 bar

Gasfülldruck Speicher: 150 bar

Vorgehensweise:

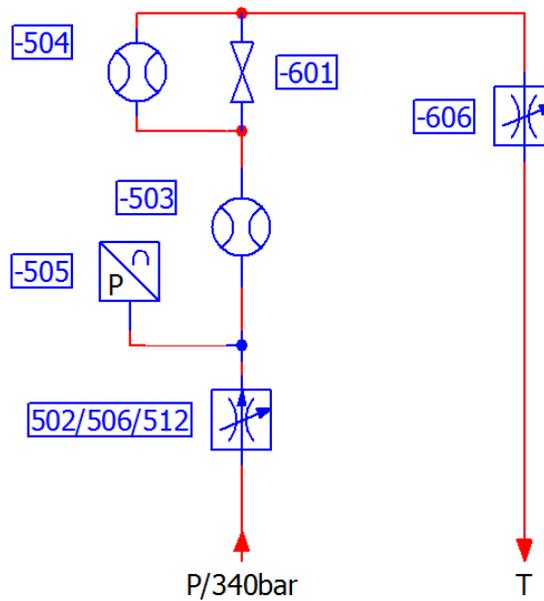


Abb. 52: Schematische Schaltung für Test des Stromreglers im Zulauf, Quelle: Eigene Darstellung.

1. Einstellen des Volumenstromes am Regelventil, wobei Ventil 606 so positioniert werden soll, dass sich ein maximaler Staudruck am Druckaufnehmer 505 ergibt.
2. Sprung auf volle Öffnung mit Drossel 606, um die Stabilität der Volumenstromregelung ohne Gegendruck zu testen.
3. Sprunghaftes Verschließen der Komponente 606 auf den Ausgangszustand.

Folgende Volumenströme sollen dabei eingestellt werden:

5 l/min	20 l/min	50 l/min	100 l/min	150 l/min	220 l/min
---------	----------	----------	-----------	-----------	-----------

Tab. 27: Volumenstromstufen Zulaufest, Quelle: Eigene Darstellung.

Testergebnisse:

- Stabilität der Volumenstromregelung im Zulauf
- Einregelzeit bei Sprung von maximalen auf geringen Staudruck
- Einregelzeit bei Sprung von geringen auf maximalen Staudruck

7.4.1.5. Stromregelung Ablauf

Da in der Spezifikation für die Volumenstromregelung im Ablauf ein stabiler Regelbereich bis maximal 50 l/min angegeben ist, ist das Ventil 607 in der Belastungsschaltung als Schaltventil ausgeführt. Folglich ist eine sprungartige Verstellung bei hohen Volumenströmen im Ablauf nicht möglich. Bis rund 50 l/min kann das Regelventil Position 603 als Drossel verwendet werden, um einen niedrigen Gegendruck bei gegebenem Durchfluss anzulegen. Durch Öffnen des Schaltventils 607 ergibt sich der Sprung auf einen maximalen Gegendruck. Um allerdings nicht auf den Test des Stromreglers bei hohen Volumenströmen im Ablauf verzichten zu müssen, wird hier eine andere Vorgehensweise angewandt.

Vorgehensweise für Volumenströme bis 50 l/min:

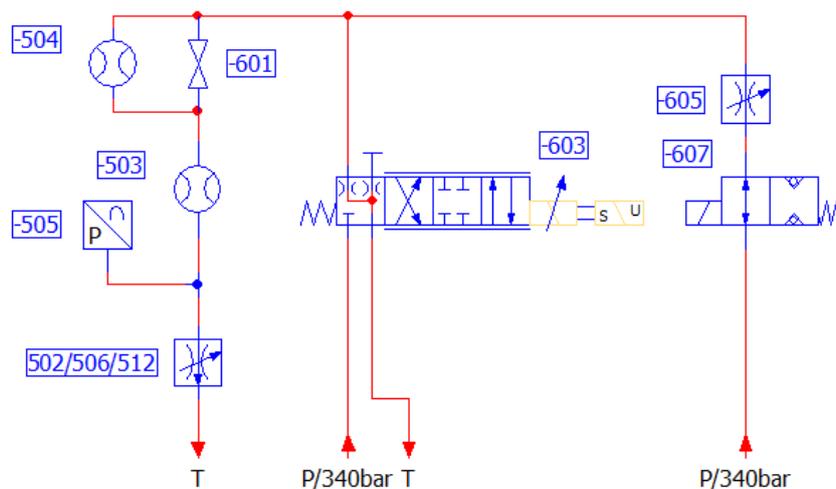


Abb. 53: Schematische Schaltung für Test des Stromreglers im Ablauf bis 50 l/min, Quelle: Eigene Darstellung.

Randbedingungen:

Versorgungsdruck: 340 bar

Gasfülldruck Speicher: 150 bar

Ablauf:

1. Einstellen des Volumenstromes am Regelventil, wobei Ventil 603 so positioniert werden soll, dass sich ein minimaler Druck am Druckaufnehmer 505 bei dem gegebenen Durchfluss einstellt.
2. Öffnung des Ventils 607, um maximalen Druck an Position 505 zu erhalten.
3. Schließen von Position 607.

Einzustellende Volumenströme:

5 l/min	20 l/min	50 l/min
---------	----------	----------

Tab. 28: Volumenstromstufen Ablauf bis 50 l/min, Quelle: Eigene Darstellung.

Testergebnisse:

- Stabilität der Volumenstromregelung im Ablauf
- Einregelzeit bei Sprung von geringen auf maximalen Staudruck
- Einregelzeit bei Sprung von maximalen auf geringen Staudruck

Vorgehensweise für Volumenströme über 50 l/min:

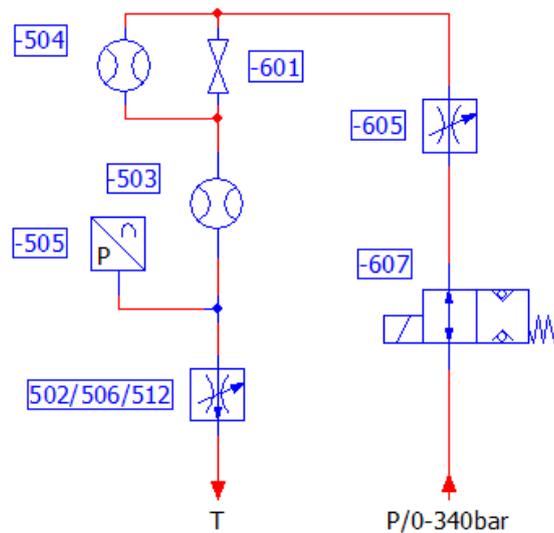


Abb. 54: Schematische Schaltung für Test des Stromreglers im Ablauf über 50 l/min, Quelle: Eigene Darstellung.

Randbedingungen:

Versorgungsdruck: 0 bar bis 340 bar

Gasfülldruck Speicher: 150 bar

Ablauf:

Für diesen Test müssen das Schaltventil 607 und die Drossel 605 vollständig geöffnet sein. Der variable Druck in 505 wird mittels Verstellung des Versorgungsdruckes realisiert. Zu beachten ist, dass der in der Versorgungsleitung angebrachte Speicher deaktiviert bleibt, um ein lineares Ansteigen des Druckes über den ganzen Bereich zu ermöglichen.

1. Einstellen des Volumenstromes am Regelventil bei geringem Versorgungsdruck.
2. Anheben des Versorgungsdruckes auf 340 bar.
3. Absenken des Druckes in P.

Einzustellende Volumenströme:

100 l/min	150 l/min	220 l/min
-----------	-----------	-----------

Tab. 29: Volumenstromstufen Ablauf ab 50 l/min, Quelle: Eigene Darstellung.

Testergebnisse:

- Stabilität der Volumenstromregelung im Ablauf

7.4.1.6. Übergangverhalten Druckregelung/Durchflussregelung

Ziel dieses Tests ist es, das Verhalten bei gleichzeitiger Aktivierung beider Regelkreise zu ermitteln, wobei grundsätzlich folgende Kombinationen möglich sind:

- Übergang Druckregelung auf Durchflussbegrenzung im Zulauf
- Übergang Durchflussregelung auf Druckbegrenzung im Zulauf
- Übergang Druckregelung auf Durchflussbegrenzung im Ablauf
- Übergang Durchflussregelung auf Druckbegrenzung im Ablauf

Wie bereits in Kapitel 5.2.5.2 beschrieben, basieren im Zulauf beide Regelarten auf dem Prinzip, dass die Verbindung zur Versorgung verschlossen wird und sowohl Druck als auch Durchfluss abnehmen. Im Ablauf liegt hier ein grundlegender Unterschied, da eine Strombegrenzung im Ablauf ein Ansteigen des Druckes bewirkt. Abhilfe kann dabei ein separates Druckbegrenzungsventil schaffen, welches den Maximaldruck im System nicht über einen gewissen Wert ansteigen lässt. Bei dem vorliegenden Aufbau kann der Ablaufdruck im schlimmsten Fall auf den Versorgungsdruck ansteigen, weshalb auf den Einsatz einer Maximaldruckabsicherung verzichtet wird. Das bedeutet, dass im Falle der konventionellen Variante im Ablauf keine gleichzeitige Aktivierung beider Regelfunktionen möglich ist. Da somit kein Vergleich der Varianten angestellt werden kann, wird der Übergangstest nur im Zulauf durchgeführt.

Vorgehensweise:

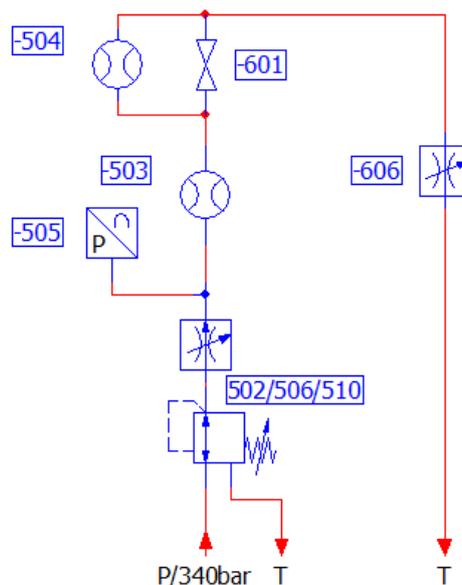


Abb. 55: Schematische Schaltung für Test des Stromregler im Ablauf über 50 l/min, Quelle: Eigene Darstellung.

Randbedingungen:

Versorgungsdruck: 0 bar bis 340 bar

Gasfülldruck Speicher: 150 bar

Ablauf:

1. Vorgabe eines bestimmten Druckes und Durchflusses am Regelventil. Dabei soll anfänglich ein Druck bei verschlossener Drossel 606 eingeregelt werden.
2. Vollständige Öffnung des Ventils 606, um von Druckregelung zur Durchflussbegrenzung überzugehen.

- Schließen des Ventils 606, um das Verhalten bei Übergang von Durchflussregelung auf Druckbegrenzung zu ermitteln.

Folgende Parameter sollen dabei eingestellt werden:

Druck [bar]	Volumenstrom [l/min]
50	20
	150
150	20
	150
250	20
	150

Tab. 30: Einstellwerte für Übergangstest bei p/Q Regelung, Quelle: Eigene Darstellung.

Testergebnisse:

- Übergangsverhalten

8. Test der Variante ATOS

8.1. Hydraulikschaltplan

In Abb. 56 ist ein Bildausschnitt des Hydraulikschaltplanes dieser Variante dargestellt. Die vollständigen Schaltpläne inklusive Stückliste sämtlicher Varianten sind im Anhang ab Seite 119 beigefügt.

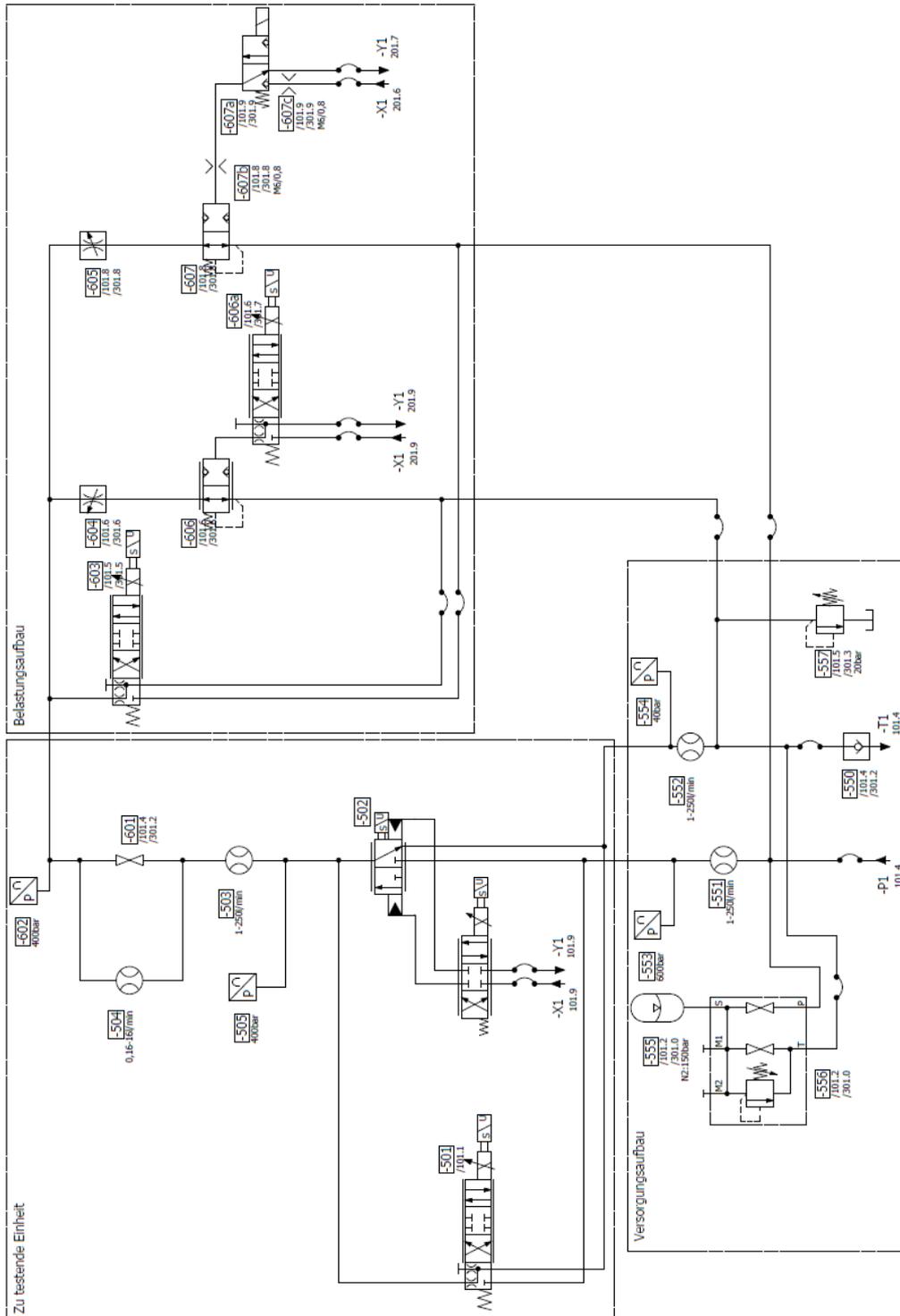


Abb. 56: Hydraulikschaltplan Testaufbau Variante ATOS, Quelle: Eigene Darstellung.

8.2. Fotos Testaufbau

Um den Testaufbau besser veranschaulichen zu können, sind Fotografien jeder Variante im Anhang ab Seite 128 ersichtlich.

8.3. Testergebnisse

8.3.1. Test Stick-Slip Effekt

Wie bereits erwähnt, besteht die Gefahr bei diesem Ventil, dass durch die Abdichtung des Hauptschiebers Ruckgleiten auftreten kann. Deshalb wird vor der Implementierung des Regelkreises für Druck- und Durchflussregelung dieser Effekt untersucht und verschiedenste Möglichkeiten betrachtet, um ihn zu verringern bzw. zu vermeiden.

Dazu wurde folgender Test durchgeführt:

Randbedingungen:

Versorgungsdruck: 200 bar

Gasfülldruck Speicher: 150 bar

Ablauf:

1. Ventil 603 (NG6 Belastungsventil) und Ventil 506 (ATOS LIQZO) auf 20% Öffnung von P nach A stellen.
2. Mit einer Rampe von 2% pro Sekunde das Ventil 502 nach -20% (Öffnung von A nach T) positionieren.

Ergebnisse:

In Abb. 57 ist der Verlauf der Größen Druck, Volumenstrom und Ventilposition für diesen Test abgebildet. Zusätzlich zu den vorhandenen Messeinrichtungen wurden hier noch die Drücke A und B des Pilotventils gemessen, welche als *Pressure_511* und *Pressure_513* dargestellt sind.

Dabei sind sowohl im Verlauf der *Position_506* als auch in dem der beiden Pilotdrücke deutliche Anzeichen für ein Ruckgleiten erkennbar.

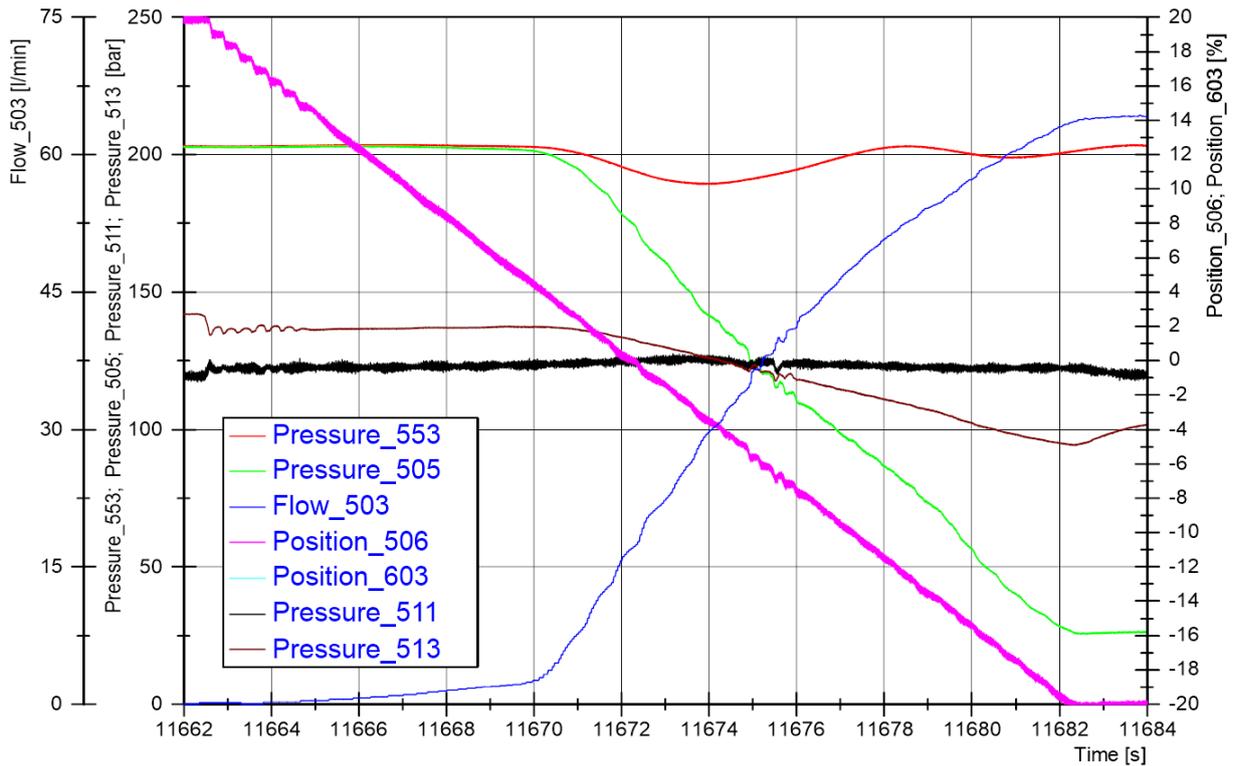


Abb. 57: Ergebnis Stick-Slip Test Variante ATOS mit Messung Pilotdruck, Quelle: Eigene Darstellung.

Zur Verminderung bzw. Behebung dieses Problems werden zwei Möglichkeiten in Betracht gezogen:

1. Entfernen der Dichtungen

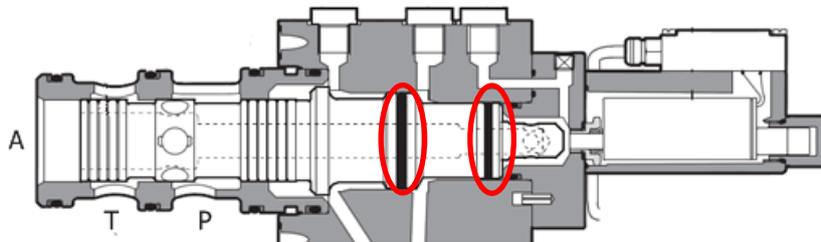


Abb. 58: Hauptstufe des ATOS LIQZO, Quelle: In Anlehnung an Atos spa (Hrsg.) (2015), S. 1.

Ein Entfernen der Hauptschieberabdichtungen ist in diesem Fall wegen folgenden Gründen nur bedingt möglich:

- Die Funktion des Ventils wird bei hohen Drücken beeinträchtigt, da durch den hohlen Kolben der Druck in A auch an den Steuerflächen des Hauptkolbens anliegt.
- Die erhöhte Leckage am Hauptschieber erfordert ein größeres Pilotventil.

Aufgrund dieser beiden Gründe wird auf den Ausbau der Dichtungen verzichtet.

2. Anlegen eines Dithersignals

Eine Möglichkeit, damit am Kolben keine Haftreibung entsteht, ist das Anlegen eines hochfrequenten Dither- oder Brummsignals.⁵⁰

⁵⁰ Vgl. Hochleitner (2010b), S. 76.

Um den Stick-Slip Effekt zu vermeiden, wurden verschiedenste Kombinationen aus Frequenz und Amplitude versucht. Dabei waren erst bei einer Frequenz von 10Hz und einer Amplitude von 5% sichtbare Verbesserungen erkennbar. Der Verlauf bei einer Positionsänderung von +20% auf -20% mit diesem Dithersignal ist in Abb. 59 ersichtlich.

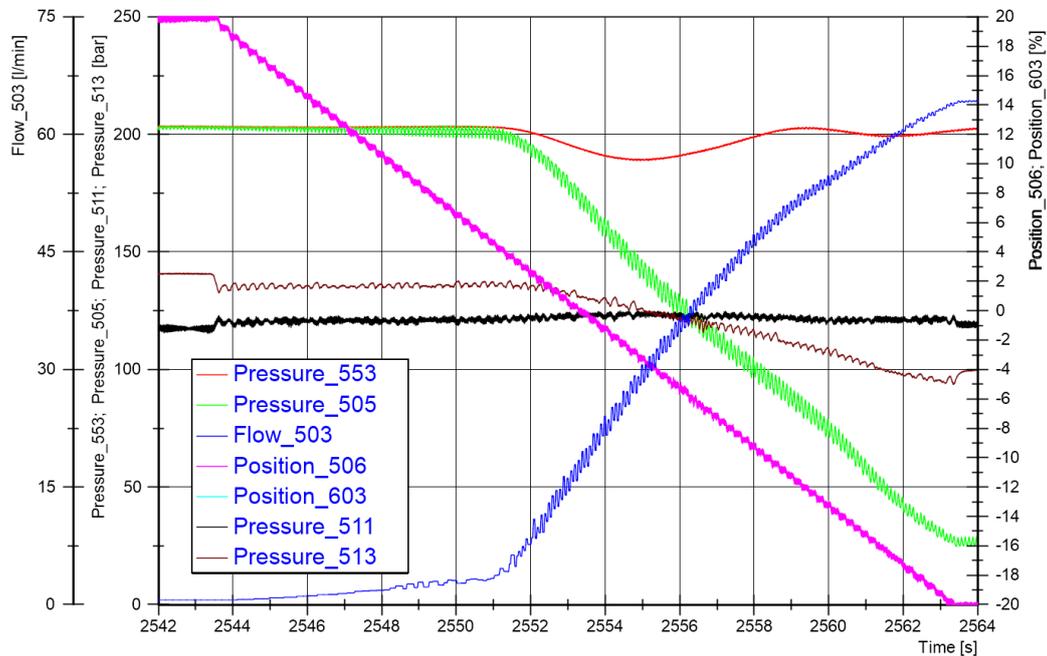


Abb. 59: Ergebnis Stick-Slip Test Variante ATOS mit Dithersignal, Quelle: Eigene Darstellung.

Gemäß Abb. 59 verursacht das Brummsignal jedoch deutliche Amplituden der Kurven *Pressure_505* und *Flow_503*, welche nicht hinzunehmen sind. Aus diesem Grund ist auch diese Möglichkeit nicht zielführend.

Für die Anwendung als Stellelement im Regelkreis sind teils geringe Positionsänderungen notwendig, um den geregelten Parameter konstant halten zu können. Durch das vorhandene Rückgleiten ist es allerdings kaum möglich, diese geringen Änderungen durchzuführen, weshalb auf eine weitere Betrachtung der elektronisch geregelten Variante mit dem ATOS Regelventil verzichtet wird.

9. Test der Variante Bosch

9.1. Hydraulikschaltplan

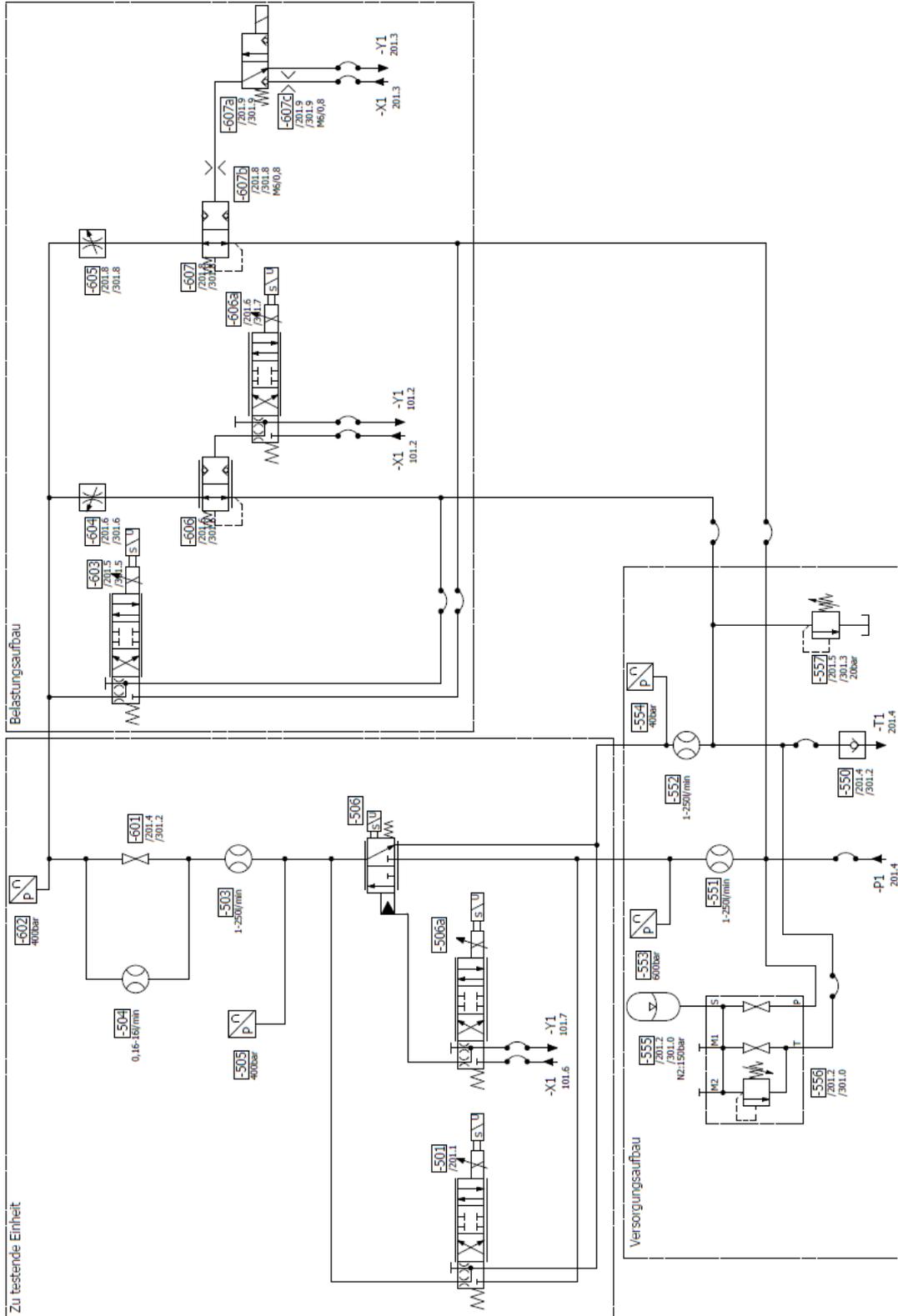


Abb. 60: Hydraulikschaltplan Testaufbau Variante Bosch, Quelle: Eigene Darstellung.

9.2. Vorbereitung

9.2.1. Test Stick-Slip Effekt

Da das Bosch Regelventil keine Abdichtung am Hauptkolben besitzt, darf auch hier kein Ruckgleiten vorhanden sein. Um jedoch mit Sicherheit ausschließen zu können, dass der Effekt bei der erstgetesteten Variante nicht durch andere Störquellen hervorgerufen worden ist, wurde der Stick-Slip-Test auch bei dieser Variante durchgeführt.

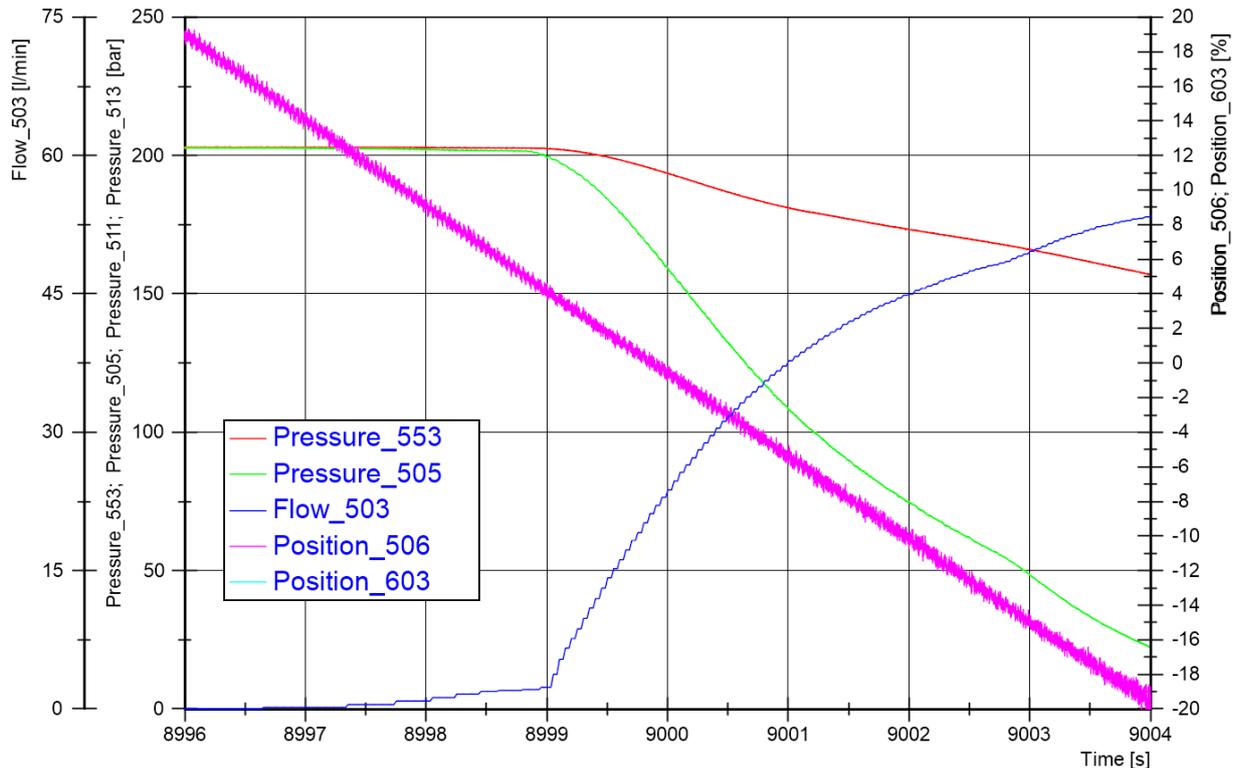


Abb. 61: Ergebnis Stick Slip Test Variante Bosch, Quelle: Eigene Darstellung.

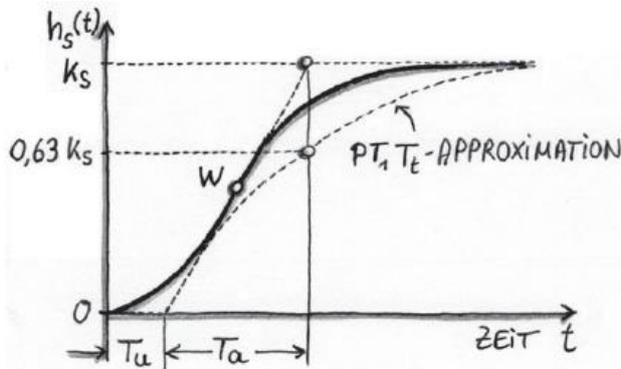
Wie in Abb. 61 ersichtlich, ist auch hier ein gewisses Rauschen in der *Position_506* vorhanden. Das Rauschen tritt aber im Gegensatz zum Stick-Slip Effekt am ATOS Ventil gleichmäßig über den ganzen Bereich auf und wirkt sich nicht auf den geregelten Druck *Pressure_505* aus. Dieses Verhalten ist besser geeignet für den Einsatz im hydraulischen Weitbereichsregler, weshalb nun eine Betrachtung des Regelkreises für Druck- und Volumenstromregelung durchgeführt wird.

9.2.2. Einstellung der Reglerparameter für Druckregelung

Für die Regelung des Druckes verwendet man bei der TEST-FUCHS GmbH einen PID Regler. Dieses System wird auch hier angewandt und durch verschiedenste Methoden versucht, ein Optimum bezüglich Einregelzeit und Stabilität zu finden. In der Literatur sind mehrere Vorgehensweisen zur Bestimmung der optimalen PID Parameter angegeben. Für den vorliegenden Fall werden zwei Methoden in Betracht gezogen und deren Anwendbarkeit verifiziert.

9.2.2.1. Methode der Sprungantwort

Diese Methode findet Anwendung bei Systemen mit Totzeit. Zur Bestimmung der PID Werte muss ein Sprung mit der Stellgröße durchgeführt und die Antwort der Regelgröße gemessen werden. Dabei erhält man einen Zeitverlauf, der dem in Abb. 62 ähnlich ist. Aus dem Verlauf werden der Endwert K_S , die Reaktionszeit T_U und die Anstiegszeit T_A abgelesen und mit den in Abb. 63 ersichtlichen Formeln die Reglerparameter berechnet.⁵¹



REGLER-TYPEN	REGLEREINSTELLWERTE		
	K_R	T_I	T_D
P	$\frac{1}{K_S} \cdot \frac{T_a}{T_u}$	-	-
PI	$\frac{0,9}{K_S} \cdot \frac{T_a}{T_u}$	$3,33 T_u$	-
PID	$\frac{1,2}{K_S} \cdot \frac{T_a}{T_u}$	$2 T_u$	$0,5 T_u$

Abb. 63: Parametereinstellung bei Sprungverfahren, Quelle: Tieste/Romberg (2015), S. 134.

Abb. 62: Zeitverlauf bei Sprungverfahren, Quelle: Tieste/Romberg (2015), S. 133.

Die daraus erhaltenen Parameter gelten für folgende Übertragungsfunktion eines PID-Reglers:

$$G_R(s) = K_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (9.1)$$

Die TEST-FUCHS GmbH verwendet die PID Übertragungsfunktion in einer modifizierten Form, um die Parameter unabhängig voneinander optimieren zu können. Dabei ist die Übertragungsfunktion des TEST-FUCHS PID-Reglers gemäß Gleichung (9.2) definiert.

$$G_R(s) = P + \frac{I}{s} + \frac{Ds}{1 + T_D s} \quad (9.2)$$

Eine Umrechnung der Parameter und Umsetzung des Verfahrens am Testaufbau wurde durchgeführt, lieferte aber keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Grund dafür ist, dass die Reaktionszeit T_U hier im Bereich weniger Millisekunden liegt und mit dem vorhandenen Messsystem mit einer Abtastrate von 1000 Hz nicht eindeutig bestimmt werden konnte.

⁵¹ Vgl. Tieste/Romberg (2015), S. 132.

9.2.2.2. Methode des Stabilitätsrandes

Bei der Methode des Stabilitätsrandes ist vorerst ein reiner P-Regler zu parametrieren und dessen Parameter K_R allmählich zu steigern, bis das System Schwingungen ausführt. In diesem Punkt wird der K_R Wert und die Periodendauer der Schwingung notiert, um mit den in Abb. 64 genannten Formeln die Einstellwerte des PID Reglers zu erhalten.⁵²

REGLER-TYPEN	REGLEREINSTELLWERTE		
	K_R	T_I	T_D
P	$0,5 K_{R\text{KRIT}}$	-	-
PI	$0,45 K_{R\text{KRIT}}$	$0,85 T_{\text{KRIT}}$	-
PID	$0,6 K_{R\text{KRIT}}$	$0,5 T_{\text{KRIT}}$	$0,12 T_{\text{KRIT}}$

Abb. 64: Parametereinstellung bei der Methode des Stabilitätsrandes, Quelle: Tieste/Romberg (2015), S. 132.

Diese Methode ist zwar nicht ungefährlich, da durch ein schwingendes System Bauteile überlastet werden können, jedoch erwiesen sich deren Ergebnisse als zufriedenstellend.

Zur Analyse des Systems bei verschiedensten Drücken und Volumenströmen wurde ein Test für die Ermittlung der kritischen P-Werte bei mehreren Betriebspunkten durchgeführt. Aufgrund der Gefährlichkeit der Methode war der Versorgungsdruck auf einen Wert von 250 bar begrenzt. Als zu testende Betriebspunkte wurden jeweils verschiedene Drücke bei einem Volumenstrom von 75 l/min und bei 175 l/min gewählt.

Vorgehensweise:

Randbedingungen:

Versorgungsdruck: 250 bar

Gasfülldruck Speicher: 150 bar

Ablauf:

1. Geforderten Druck einstellen.
2. Belastungsventil so positionieren, dass sich bei dem eingestellten Druck der gewünschte Volumenstrom im Zulauf ergibt.

Folgende Drücke wurden dabei eingestellt:

50 bar	150 bar	200 bar	225 bar	235 bar	240 bar	245 bar
--------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

Tab. 31: Druckstufen Zulauftest, Quelle: Eigene Darstellung.

Ergebnisse:

Da der Volumenstrom über das Stellelement Regelventil gemäß Bernoulligleichung hauptsächlich vom Druckabfall Δp und der Ventilgeometrie abhängig ist,⁵³ dient hier als Kriterium für die Betrachtung des kritischen P-Anteils der Druckabfall. Somit ergibt sich der in Abb. 65 dargestellte Verlauf der Größen P_{krit} und Position_{506} über Δp .

⁵² Vgl. Tieste/Romberg (2015), S. 132.

⁵³ Vgl. Murrenhoff (2012), S. 160f.

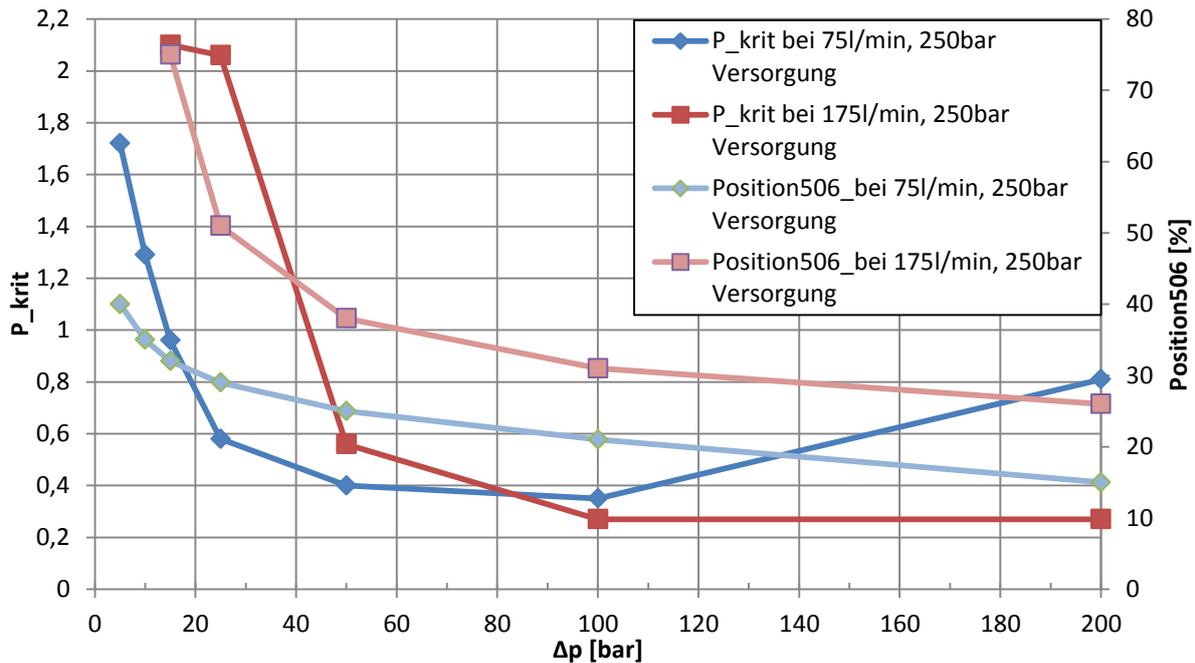


Abb. 65: Verlauf P_{krit} und Ventilposition über Δp , Quelle: Eigene Darstellung.

Dabei sind drei Symptome ersichtlich:

- **Ansteigen der Kurven bei niedrigem Δp**

Unterhalb von 100 bar Druckabfall steigen sowohl Positionskurve als auch Reglerparameter enorm an. Der Anstieg der Positionskurve kann dabei durch die umgeformte Bernoulli-Gleichung erläutert werden.

$$y = \frac{Q}{\alpha_D \pi d} \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}} \quad (9.3)$$

Bei niedrigem Druckabfall ist somit eine höhere Positionsänderung notwendig, um den Volumenstrom konstant zu halten. Dementsprechend muss auch die Kreisverstärkung durch Steigerung der Reglerparameter erhöht werden.

- **Ablachen der Reglerparameterkurve ab einer Position von 50%**

Die Drosselgeometrie des Bosch 3WRCBH Ventils ist durch die Öffnung eines Kreissegmentes gegeben. Dabei entsteht bis zu einer Position von rund 50% ein progressiver Anstieg und ab der Mitte ein degressiver Verlauf der Fläche über der Ventilposition. Durch diesen degressiven Verlauf steigen auch die kritischen Reglerparameter ab rund 50% Istwert kaum mehr an.

- **Ansteigen der Reglerparameter bei niedrigem Volumenstrom und hohem Δp**

Dieses Verhalten entsteht durch die Feinststeuerkerben am Bosch Regelventil. Aufgrund der geringen Öffnung im Bereich der Kerben ist eine größere Positionsänderung und daraus resultierend höhere Reglerparameter notwendig.

Die beiden letztgenannten Symptome beruhen auf dem Verlauf der Geometrie über der Ventilposition. Um diesen Verlauf zu zeigen, wurden die Prozessgrößen während einer Positionsänderung von 0% auf 100% gemessen und aufgezeichnet.

Mit den erhaltenen Daten und der Bernoulligleichung kann die Drosselfläche berechnet werden. Um eine qualitative Aussage über den Verlauf der Fläche A zu erhalten, wird die Dichte des Mediums mit 1009 kg/m^3 definiert⁵⁴ und zur Vereinfachung eine Durchflusskennzahl von 1 angenommen.

$$A = \frac{Q}{\alpha} * \sqrt{\frac{\rho}{2 * \Delta p}} = \frac{Q}{1} * \sqrt{\frac{1009 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{2\Delta p}} \quad (9.4)$$

$$A = Q * 22,461 * \sqrt{\frac{1}{\Delta p}} \quad (9.5)$$

In Abb. 66 ist das Ergebnis dieser Berechnung abgebildet. Dabei sind sowohl der Einfluss der Feinststeuerkerben bis 20%, als auch das nichtlineare Verhalten durch Öffnung des Querschnittes in Form eines Kreissegmentes ersichtlich.

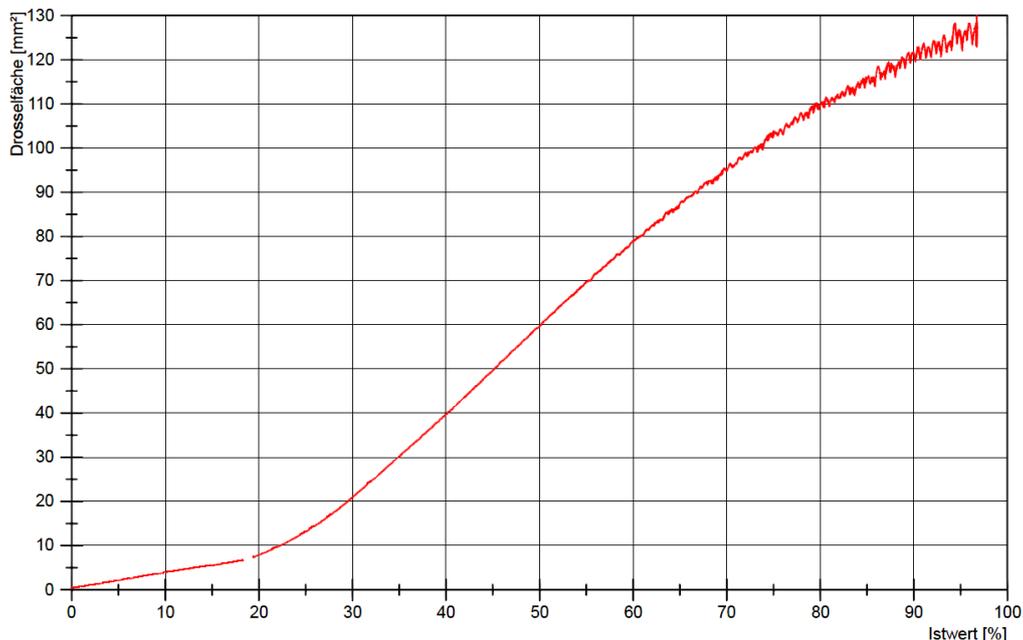


Abb. 66: Verlauf Drosselfläche über Istwert mit Bosch 3WRCBH, Quelle: Eigene Darstellung.

Aufgrund dieser Erkenntnisse kann man auf eine hohe Abhängigkeit der Reglerparameter von folgenden Punkten schließen:

- Druckabfall
- Ventilgeometrie

9.2.2.3. Implementierung Kompensationskurve

Da die Ventilgeometrie und der Druckabfall erhebliche Unterschiede an den möglichen Reglerparametern ergeben, ist eine Anpassung dieser an das Kennfeld unumgänglich. Dabei wird jedoch lediglich eine Kompensation des Druckabfalles betrachtet. Eine Anpassung an die Ventilgeometrie könnte zwar in gewissen Bereichen das System weiter optimieren, aufgrund des dafür notwendigen Aufwands wird diese jedoch nicht durchgeführt.

⁵⁴ Vgl. Solutia Inc. (2003), S. 6.

Die Kompensation des Druckabfalls wird umgesetzt, indem die Reglerparameter durch eine Kurve angepasst werden, welche bei hohem Druckabfall den Faktor 1 aufweist und bei niedrigem steigt. Dabei sind die Faktoren so angepasst, dass ein Verlauf entsteht, welcher stets unterhalb der für 75 l/min und 175 l/min liegt und die Kurve in den Randbereichen auf die Werte 4,3 bzw. 1 begrenzt (siehe Abb. 67). Da der hydraulische Weitbereichsregler sowohl im Zulauf als auch im Ablauf den Druck regeln soll, wird die Kurve für beide Betriebsmodi implementiert. Dabei kommen die negative Kurve bei negativer Position und die positive bei positiver Position des Bosch 3WRCBH Regelventils zum Einsatz. Für die Berechnung der Druckdifferenz der negativen Kurve wird der Rücklaufdruck mit 0 bar angenommen.

$$\Delta p_{Zulau\text{f}}(t) = p_{553}(t) - p_{505}(t) \quad (9.6)$$

$$\Delta p_{Ablau\text{f}} = p_{505} \quad (9.7)$$

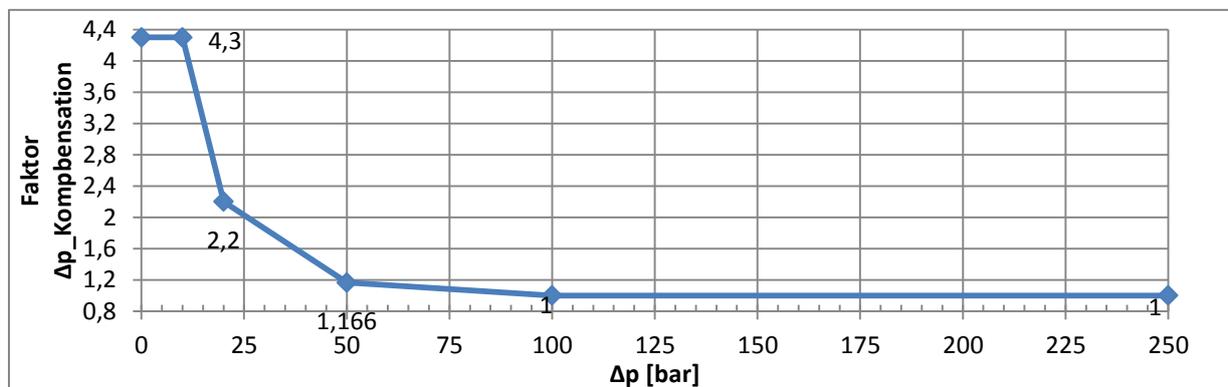


Abb. 67: Faktoren Δp Kompensation, Quelle: Eigene Darstellung.

Dabei bewirkt beispielsweise eine sprunghafte Änderung von 100 bar auf 10 bar Druckabfall eine sprunghafte Erhöhung der Reglerparameter um den Faktor 4,3. Dieser unmittelbare Sprung könnte das System schnell an die Stabilitätsgrenzen bringen, weshalb zur Glättung der berechneten Druckdifferenz ein gleitender Mittelwert über 200 Millisekunden dient.

$$\Delta p_{GM}^{(200)} = \frac{1}{200} * \sum_{i=0}^{199} \Delta p(t - i) \quad (9.8)$$

Die Implementierung der Kurve bringt außerdem den Vorteil, dass die optimalen Reglerparameter nur in einem Betriebspunkt ermittelt werden müssen. Es ist jedoch zu beachten, dass dieser Betriebspunkt eine Ventilposition außerhalb des Feinsteuerbereichs erfordert, da man sonst zu hohe Parameter erhält. Für den vorliegenden Fall wurde folgender Betriebspunkt verwendet:

Versorgungsdruck: 340 bar
 N2-Speicherdruck: 150 bar
 Eingestellter Druck: 240 bar
 Volumenstrom: 75 l/min

Dabei ergaben sich ein kritischer P-Wert von 0,27 und eine Periodendauer von 0,0222 Sekunden, woraus für die verwendeten PI und PID-Übertragungsfunktionen die in Tab. 32 eingetragenen Werte resultieren.

Parameter	PI-Regler	PID-Regler
P	0,12	0,16
I	6,4	14,6
D		0,002

Tab. 32: Berechnete Reglerparameter Druckregelung, Quelle: Eigene Darstellung.

Da der sich ergebende D-Anteil beim PID Regler gering ist, wird auf diesen verzichtet. Damit entsteht die Übertragungsfunktion eines reinen PI-Reglers, weshalb hier die PI-Ergebnisse verwendet werden. Diese PI Parameter wurden eingestellt und mit den unter Kapitel 7.4.1 genannten Funktionstests validiert. Dabei ergab sich, dass die Werte geringfügig zu hoch waren, weshalb die in Tab. 33 ersichtlichen Parameter eingestellt wurden.

Parameter	PI-Regler
P	0,1
I	6

Tab. 33 Angepasste Reglerparameter Druckregelung, Quelle: Eigene Darstellung.

9.3. Funktionstests Druckregler

Mit den Reglereinstellungen laut Tab. 33 und der implementierten Δp Kompensationskurve wurden die Funktionstests für Druckregelung durchgeführt. Man hätte hier das System noch weiter optimieren können, um in jedem Punkt die Grenzen des Möglichen zu erreichen. Da bei praktischen Anwendungen des Weitbereichsreglers jedoch meist negative Einflüsse durch Schlauchleitungen bzw. durch keine optimale Versorgung vorhanden sind und das System ohnehin auf diese Einflüsse angepasst werden muss, wurde hier auf eine weitere Optimierung verzichtet.

Bei den durchgeführten Tests verzichtete man vorerst auf die Implementierung der kombinierten Lageregelung und realisierte lediglich mittels Bosch 3WRCBH die Druckregelung. Dabei wurde bei den relevanten Druckstufen sowohl ein Test ohne Anpassung der Reglerparameter an den Druckabfall als auch einer mit Kompensation durchgeführt.

9.3.1. Druckregelung im Zulauf

In Abb. 68 ist das Ergebnis bei einem eingeregelteten Druck von 250 bar und aktivierter Kompensation zu sehen.

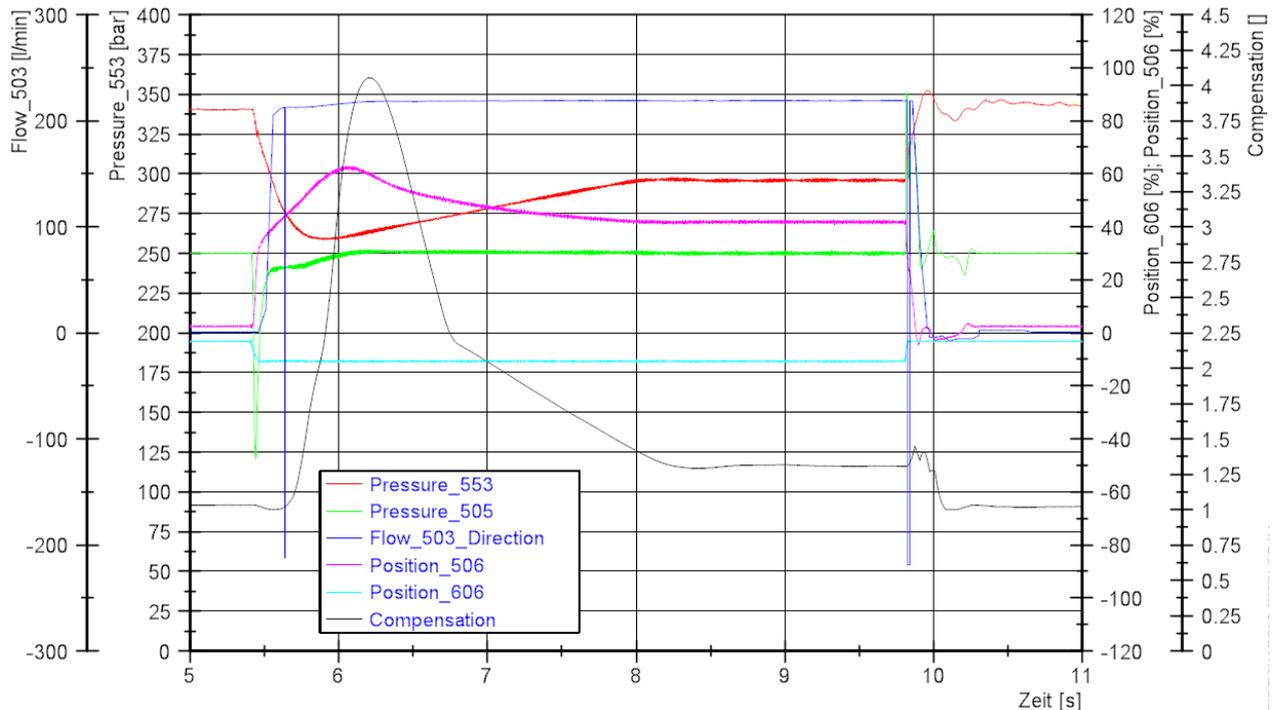


Abb. 68: Testergebnis Zulaufdrucktest bei 250 bar mit Δp -Kompensation am Bosch Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.

Es ergeben sich entsprechend gute Regelzeiten und ein stabiler Verlauf des eingeregelteten Druckes. Der Sprung des Volumenstromes bei einer Zeit von rund 5,6 Sekunden ist als Fehlsignal zu interpretieren.

Nachfolgend sind die Ergebnisse dieses Tests zusammengefasst. Zu erwähnen ist dabei, dass für die beiden Drücke 2 bar und 10 bar die Messabweichung mit dem eingesetzten 400 bar Druckaufnehmer höher als 5% des Sollwertes ist, weshalb eine eindeutige Bestimmung der Werte bei diesen Drücken nicht möglich ist. Um jedoch einen ungefähren Richtwert zu erhalten, sind deren Ergebnisse bei geglättetem Druckverlauf angegeben. Dies gilt für sämtliche durchgeführten Tests bei den Drücken von 2 bar und 10 bar.

Δp - Kompensation Eingestellter Druck [bar]	Einregelzeit bis $\pm 5\%$ Sollwert bei Sprung 0 l/min \rightarrow max. Volumenstrom [s]		Einregelzeit bis $\pm 5\%$ Sollwert bei Sprung max. Volumenstrom \rightarrow 0 l/min [s]	
	Aus	Ein	Aus	Ein
2	4	3*	1,1	1*
10	1	0,87*	0,27	0,24*
50	0,27	0,25*	0,29	0,27*
100	0,14		0,17	
150	0,11		0,12	
200	0,11		0,12	
250	0,14	0,12	0,11	0,09
275	0,12**	0,12**	0,2	0,08
290	0,14**	0,11**	0,4	0,16

Tab. 34: Ergebnisse Zulaufdrucktest mit Bosch Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.

In Tab. 34 sind zwei Sonderfälle zu beachten:

* Bei niedrigen Drücken muss das Ventil 506 aufgrund der Leckage der anderen Komponenten eine negative Position einnehmen, um bei einem Volumenstrom von 0 l/min den Druck halten zu können. Dadurch greift aber die Kompensationskurve für negative Drücke ein. Dies ergibt unterhalb von 10 bar einen Anpassungsfaktor von 4,3. Da es sich nur um geringe negative Öffnungen handelt, liegt der Bereich innerhalb der Feinsteuerkerben und die höheren Reglerparameter verursachen keinerlei Probleme.

** Beim Sprung von 0 l/min auf maximalen Volumenstrom fiel der Versorgungsdruck im Test auf rund 260 bar. Dadurch ist es bei hohen eingestellten Drücken nicht möglich, auf die Einregelzeit zu schließen. Um jedoch auch hier einen Richtwert für die Beurteilung zu haben, wird die Zeit bis zum Wendepunkt im Drucksignal *Pressure_505* gemäß Abb. 69 gemessen.

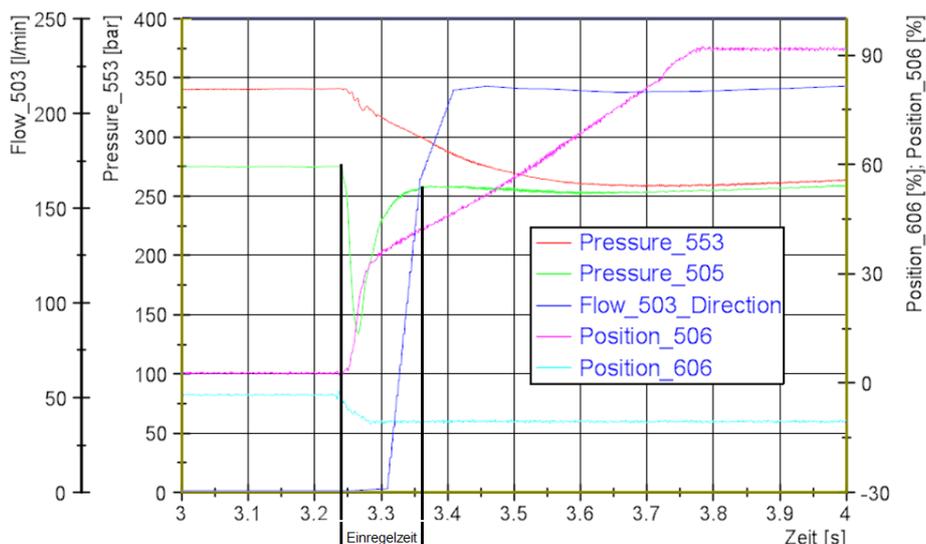


Abb. 69: Zeitmessung bei Sprung von 0 l/min auf max. Volumenstrom im Zulaufdrucktest, Quelle: Eigene Darstellung.

In Tab. 34 ist der Einfluss der Δp Kompensation ersichtlich. Bei niedrigen Drücken sind hier, obwohl hohe Faktoren eingesetzt werden (siehe *), kaum Vorteile erkennbar, ebenso bei hohen Drücken am Sprung von 0 l/min auf maximalen Volumenstrom. Deutlich merkbar ist jedoch die Verbesserung der Regelzeit am Sprung nach 0 l/min. Hier ergibt sich im Falle des Druckes von 290 bar eine Verringerung um den Faktor 2,5.

Ebenfalls zu erkennen ist in Tab. 34, wie unterhalb von 50 bar die Einregelzeit steigt. Grund für dieses Verhalten ist, dass das Bosch 3WRCBH nur in eine Richtung hydraulisch betätigt wird. In jene Richtung die zum Öffnen des Ventils notwendig ist, wirken nur der eingestellte Druck und die Feder, weshalb dieses Phänomen mit sinkendem Druck stärker wird. Um das zu veranschaulichen, sind die Kräfte zum Öffnen des Ventils in Abb. 70 dargestellt.

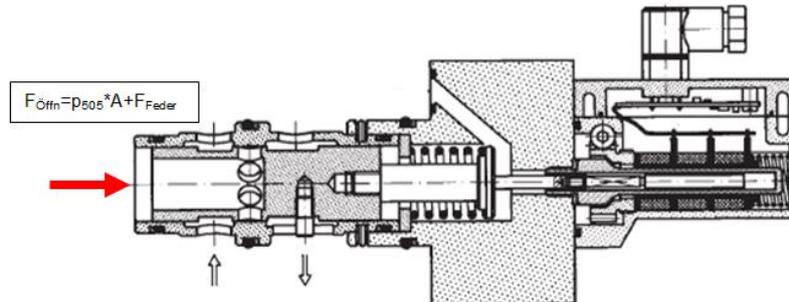


Abb. 70: Kräfte zum Öffnen des Bosch 3WRCBH, Quelle: In Anlehnung an Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2005), S. 1.

Ein weiteres Problem, welches auf diesem Umstand beruht ist, dass bei niedrigen Drücken und hohen Volumenströmen ein Rauschen am Drucksignal erscheint, welches in Abb. 71 zu sehen ist. Dabei ist bei einem Volumenstrom von 0 l/min das Rauschen aufgrund der Toleranz des Druckaufnehmers ersichtlich und in der Bildmitte jenes aufgrund des Ventils. Dieser Effekt resultiert dadurch, dass bei geringen Öffnungskräften die Lageregelung des Bosch 3WRCBH an deren Grenzen stößt. Bei einem Druck von 50 bar ist das Rauschen nicht mehr vorhanden.

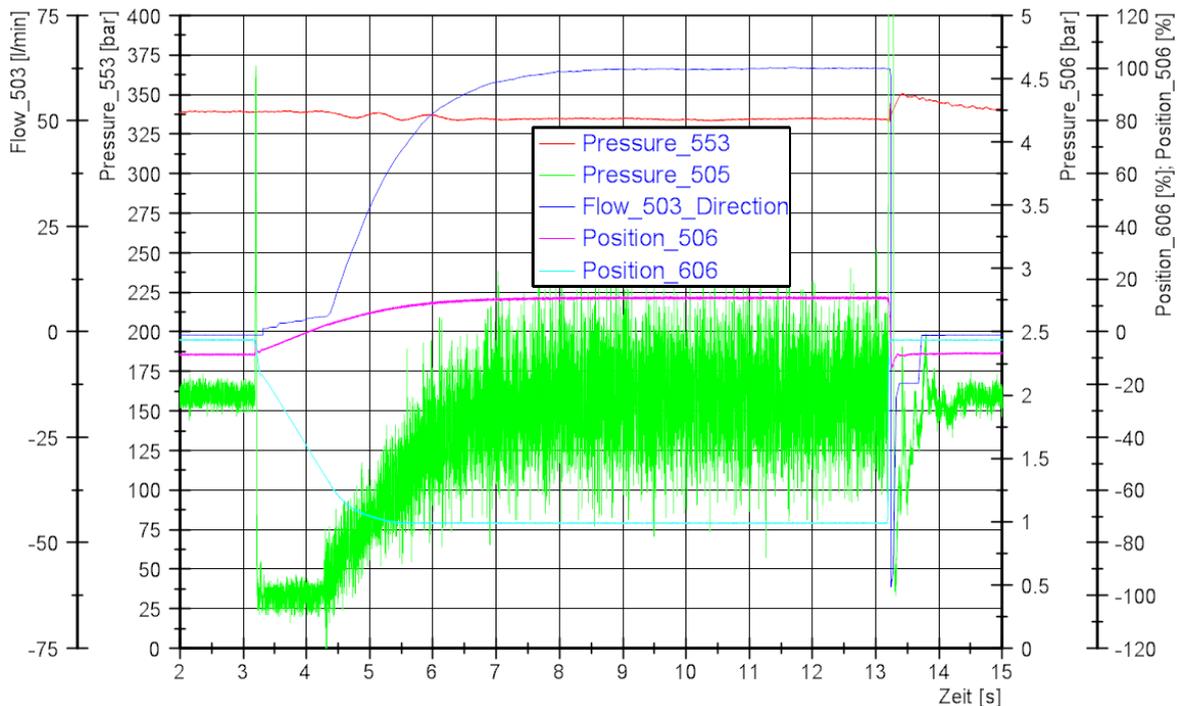


Abb. 71: Testergebnis Zulaufdrucktest bei 2 bar ohne Δp -Kompensation am Bosch Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.

9.3.2. Druckregelung im Zulauf mit einer Schlauchleitung

Um die negativen Einflüsse durch nachgiebige Bauteile beweisen zu können, wurde eine Schlauchleitung mit einem Innendurchmesser von 0,75 Zoll und einer Länge von 20 Metern Typ Aeroquip FC325-12 AQP Spiral in das System integriert und der Drucktest im Zulauf durchgeführt. Der Testaufbau ist in Abb. 72 dargestellt, wobei der Schlauch die Positionsnummer SC1 aufweist.

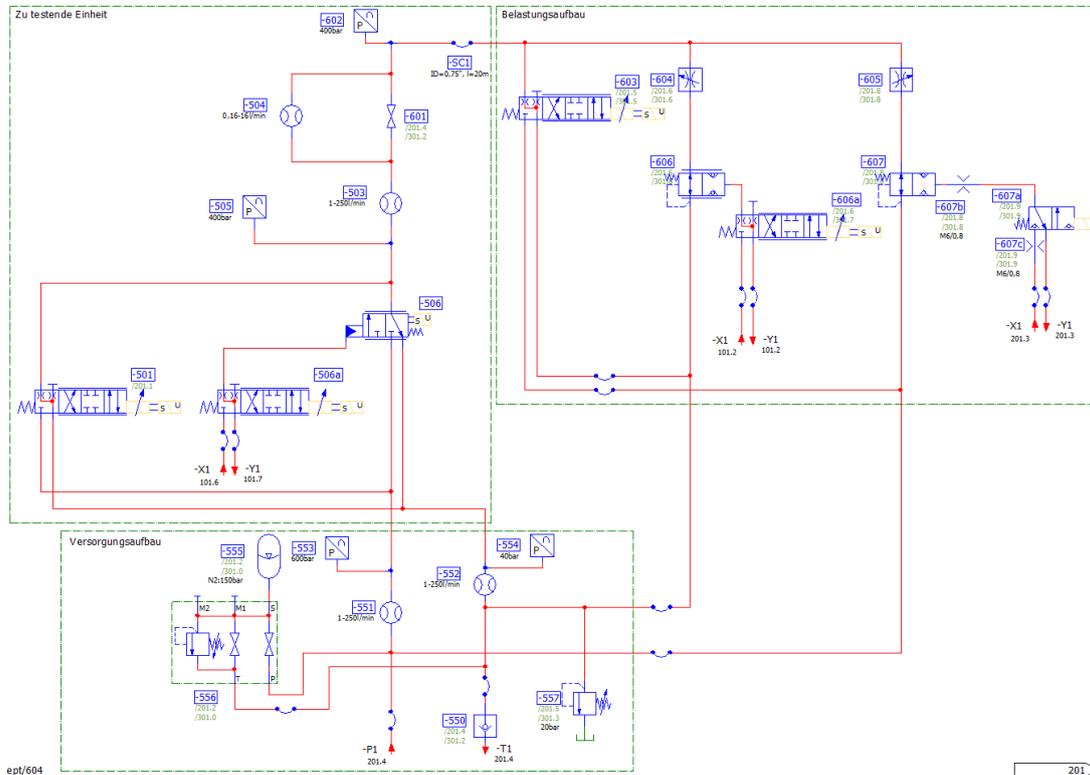


Abb. 72: Hydraulikschaltplan Testaufbau mit Schlauch, Quelle: Eigene Darstellung.

Dieser Schlauch dehnt sich mit zunehmendem Druck aus und verschlechtert dadurch das Verhalten des Systems. Nachfolgend ist das Ergebnis mit einem eingestellten Druck von 275 bar abgebildet.

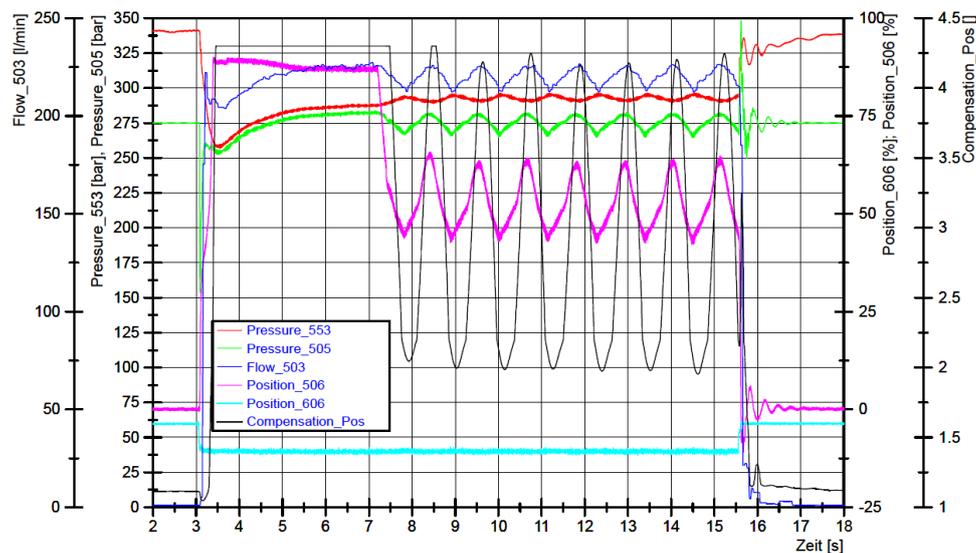


Abb. 73: Testergebnis Drucktest im Zulauf bei 275 bar mit Schlauch und Bosch Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.

In Abb. 73 ist ab einer Zeit von rund 7 Sekunden erkennbar, wie das gesamte System Schwingungen ausführt. Dieses Verhalten zeigt, dass sich hier die Δp Kompensation zu aggressiv auswirkt, wobei es nur bei Drücken oberhalb von 250 bar auftritt. Ersichtlich ist ebenfalls, wie bei sprunghafter Änderung des Volumenstromes auf 0 l/min das System für eine Zeit von über einer Sekunde nachschwingt. Bei dem Sprung von 0 l/min auf maximalen Volumenstrom ist jedoch kein negativer Einfluss erkennbar. In Tab. 35 sind die Werte für die Dauer des Nachschwingens bei sprunghafter Änderung des Volumenstromes auf 0l/min zusammengefasst.

Eingeregelter Druck [bar]	Nachschwingzeit bei Verschließen des Ventils 606 [s]
2	Nicht vorhanden
10	0,8
50	1,4
100	2,6
150	4
200	2,8
250	3
275	Dauerhaft vorhanden

Tab. 35: Testergebnisse Vorlaufdrucktest mit Schlauch und Bosch Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.

Um das dauerhafte Nachschwingen bei einem Druck von 275bar zu zeigen, ist der Bereich ab 15 Sekunden in Abb. 74 mit einer anderen Skalierung nochmals dargestellt.

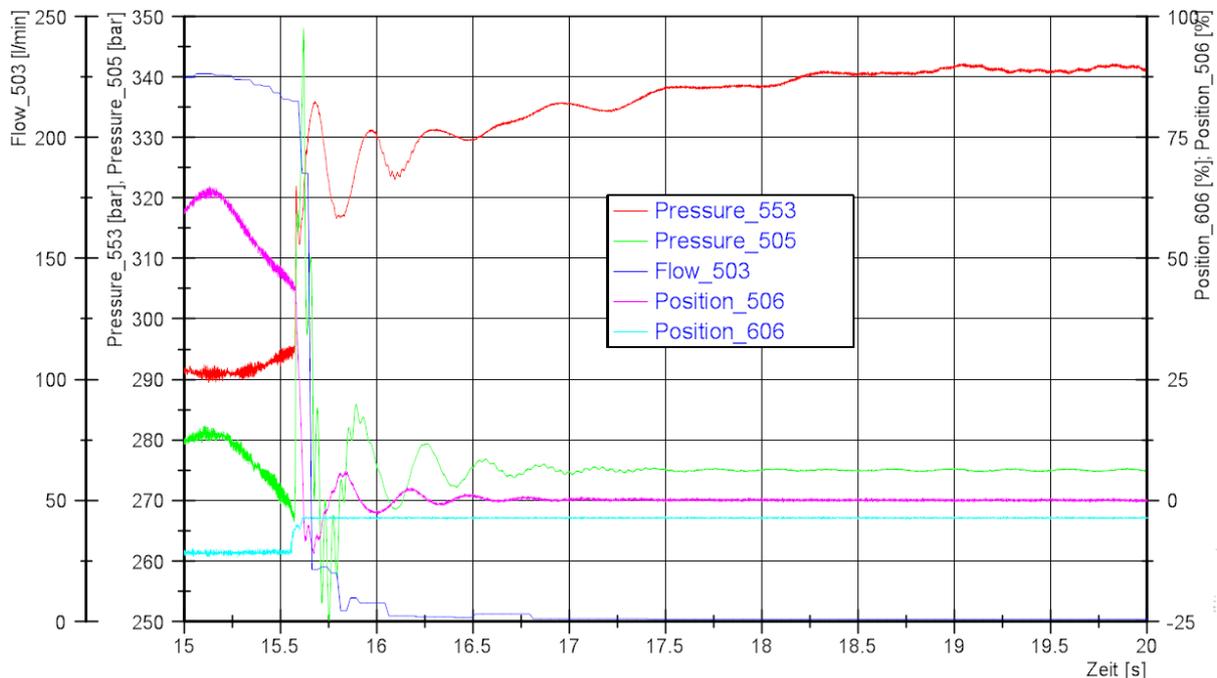


Abb. 74: Testergebnis Vorlaufdrucktest bei 275 bar mit Schlauch und Bosch Regelventil, Bereich ab 15s, Quelle: Eigene Darstellung.

9.3.3. Druckregelung im Ablauf

Die Schlauchleitung wurde anschließend wieder demontiert und die restlichen Funktionstests durchgeführt. In Abb. 75 ist der Verlauf des Drucktests im Ablauf bei einem eingestellten Druck von 100 bar abgebildet. Deutlich zu erkennen ist das unregelmäßige Verhalten bei Verschließen des Ventils 607 ab einer Zeit von rund 5,3 Sekunden. Ursache dafür ist, dass im Test zu wenig Steueröl zur Verfügung stand und somit der Steueröldruck soweit sank, bis sich die 2/2 Wege-Einbauventile öffneten. Um dem entgegenzuwirken, wurde der Versorgungsdruck auf 320 bar gesenkt. Zwar blieb dieses Verhalten bei sämtlichen Druckstufen noch während des Verschließens des Ventils 607 bestehen, beim Öffnen ist jedoch der Einfluss auf das Drucksignal 505 vernachlässigbar. Eine weitere Abhilfe kann hier durch einen zusätzlichen Steuerölspeicher geschaffen werden. Da jedoch kein zusätzlicher Speicher zur Verfügung stand, wird im Folgenden nur die Höhe des Druckanstiegs und die Regelzeit beim Sprung von 0 l/min auf maximalen Volumenstrom zur Beurteilung herangezogen.

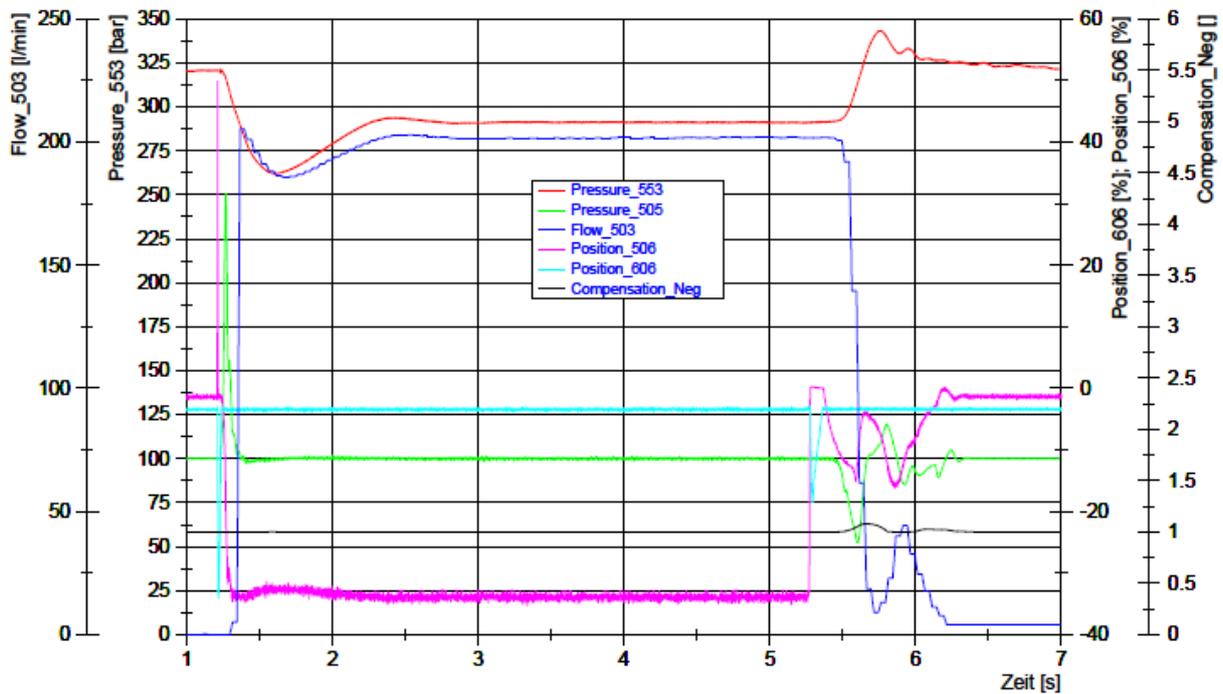


Abb. 75: Testergebnis Ablaufdrucktest bei 100 bar mit Δp -Kompensation am Bosch Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Ergebnisse der übrigen Druckstufen sind in Tab. 36 ersichtlich.

Δp- Kompensation Eingestellter Druck [bar]	Einregelzeit bis $\pm 5\%$ Sollwert bei Sprung 0l/min \rightarrow max. Volumenstrom [s]	
	Aus	Ein
2	Kein Wert	1,4
10	2,4	1,2
50	0,35	0,33
100	0,11	
150	0,1	
200	0,12	
250	0,14	
275	0,17	

Tab. 36: Ergebnisse Ablaufdrucktest Variante Bosch, Quelle: Eigene Darstellung.

Es ist eine deutliche Verbesserung der Werte bei Verwendung der Δp Kompensation ablesbar. Für den Druck von 2 bar würde dieser Unterschied noch gravierender ausfallen, jedoch liegt hier kein Messergebnis mit deaktivierter Anpassungskurve vor.

9.3.4. Übergang Druckregelung Zulauf/Ablauf

In Abb. 76 ist der Verlauf mit einem Druck von 275 bar bei Übergang von positiven Volumenstrom (Durchflussrichtung P→A) zu negativen Volumenstrom (Richtung A→T) unter Verwendung der Δp Kompensation dargestellt.

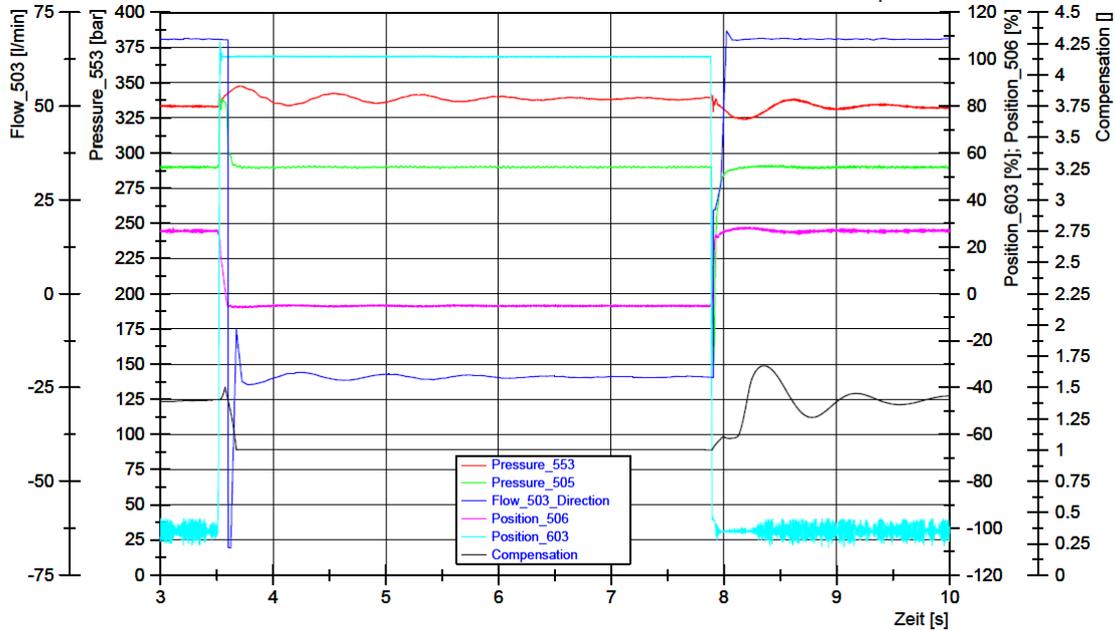


Abb. 76: Testergebnis Übergangstest bei 275 bar mit Δp -Kompensation am Bosch Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Ergebnisse sämtlicher Druckstufen sind in Tab. 37 zusammengefasst.

Δp- Kompensation Eingestellter Druck [bar]	Einregelzeit bis $\pm 5\%$ Sollwert bei Sprung pos. \rightarrow neg. Volumenstrom [s]		Einregelzeit bis $\pm 5\%$ Sollwert bei Sprung neg. \rightarrow pos. Volumenstrom [s]	
	Aus	Ein	Aus	Ein
2	7,5	1,9	7,2	1,9
10	0,48	0,32	0,7	0,28
50	0,12	0,12	0,13	0,12
100	0,08		0,07	
150	0,07		0,07	
200	0,08		0,07	
250	0,09	0,08	0,07	0,07
275	0,1	0,09	0,08	0,07
290	0,12	0,09	0,07	0,07

Tab. 37: Ergebnisse Übergangsdruktest Variante Bosch, Quelle: Eigene Darstellung.

Bei diesem Test wurde festgestellt, dass bei jenem Betriebspunkt, der eine Ventilposition um 0% erfordert, das Kriterium zur Auswahl der positiven bzw. negativen Kompensationskurve problematisch ist. Ist beispielsweise eine geringe Positionsänderung in den negativen Bereich erforderlich, so werden die Reglerparameter um den Faktor 4,3 angehoben, was schnell zur Instabilität des Systems führen kann. Mit den aufgelisteten Drücken war ein Erreichen dieses Zustands allerdings nicht möglich. Um ihn dennoch zu finden, wurde der Wegaufnehmer am Bosch 3WRCBH so manipuliert, dass bei einem eingestellten Wert von 10 bar eine Position von rund 0% notwendig ist. Das Ergebnis dieses Versuchs ist in Abb. 77 ersichtlich.

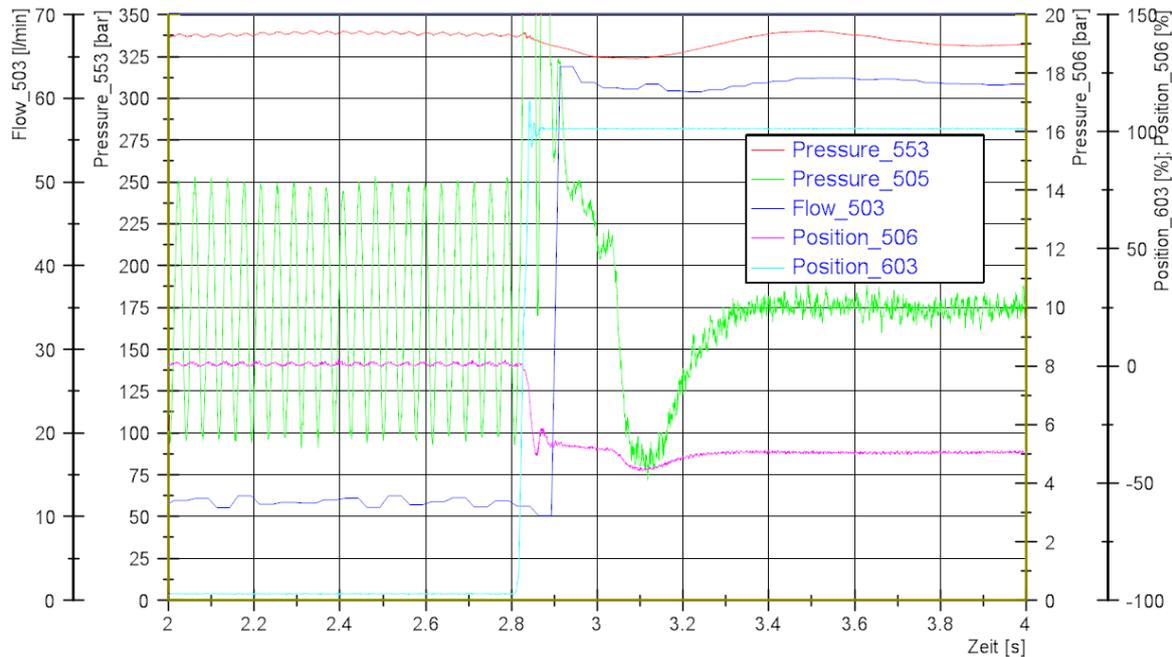


Abb. 77: Kritisches Verhalten bei 0 % Istwert der Variante Bosch, Quelle: Eigene Darstellung.

Anhand der Ergebnisse der durchgeführten Übergangstests ist ebenfalls das Problem bei Regelung von kleinen Drücken erkennbar. Dabei würde das parallelgeschaltete Ventil 501 Abhilfe schaffen. Um jedoch die genaue Größe dieses Ventils bestimmen zu können, wird vorerst auf die Ergebnisse der Funktionstests bei Stromregelung eingegangen, um auch hier die Betriebspunkte zu ermitteln, welche mit dem Bosch 3WRCBH nicht mehr zufriedenstellend bewerkstelligt werden können.

9.4. Einstellung Volumenstromregler

Die Einstellung des Stromreglers wurde wie die Einstellung des Druckreglers mit der Methode des Stabilitätsrandes⁵⁵ durchgeführt. Auch hier versuchte man die Implementierung der Δp Kompensation. Dabei stellte sich jedoch ein signifikanter Unterschied im Verhalten bei Druckregelung bzw. Stromregelung heraus.

Während bei Druckregelung der Druckabfall am Ventil sich nur durch Absinken des Versorgungsdruckes ändert und das System somit in einem kleinen Bereich der Kompensationskurve agiert, kann es bei Konstanthalten eines Volumenstromes vorkommen, dass durch äußere Einflüsse sprunghafte Änderungen des Druckabfalles entstehen. Diese würden ein Springen der Anpassungsfaktoren auslösen und somit schnell eine Instabilität hervorrufen. Daher ist eine Δp Kompensation in der Form, wie sie bei Druckregelung eingesetzt wird, bei Volumenstromregelung nicht sinnvoll.

Im Gegensatz dazu gibt es bei der Regelung der Prozessgröße Volumenstrom mit dem Bosch Regelventil andere Einflüsse, die eine Anpassung der PID-Faktoren erfordern. Einer dieser Einflüsse ist die Abhängigkeit der möglichen Reglerparameter vom anliegenden Staudruck. Um das zu beweisen wurde folgender Test durchgeführt:

Randbedingungen:

Versorgungsdruck: 340 bar
 Gasfülldruck Speicher: 150 bar

Ablauf:

1. Geforderten Volumenstrom einstellen.
2. Belastungsventil so positionieren, dass sich bei dem eingestellten Volumenstrom der gewünschte Staudruck im Zulauf ergibt.

Ergebnisse:

Staudruck [bar]	Volumenstrom: 220 l/min	
	P _{krit}	Position 506 [%]
20	0,06	29,5
50	0,075	30
212	0,25	37

Tab. 38: Ergebnisse Methode des Stabilitätsrandes bei Volumenstromregelung, Quelle: Eigene Darstellung.

Setzt man den kritischen P-Wert bei einem Staudruck von 212 bar ins Verhältnis zu dem bei 20 bar, ergibt sich eine mögliche Anhebung um 416%, was auf die Notwendigkeit einer Anpassungskurve an den Staudruck schließen lässt. Da in diesem Fall die Bestimmung und Implementierung einer Anpassungskurve für sämtliche Betriebspunkte mit einem enormen Zeitaufwand verbunden ist, wird hier darauf verzichtet und lediglich die Reglerparameter verwendet, welche bei geringem Staudruck notwendig sind.

Die in Tab. 39 eingetragenen Parameter erwiesen sich dabei als passend.

⁵⁵ Vgl. Tieste/Romberg (2015), S. 132.

Parameter	PI-Regler
P	0,04
I	0,7

Tab. 39: Reglerparameter für Stromregler, Quelle: Eigene Darstellung.

9.5. Test Volumenstromregelung

9.5.1. Stromregelung im Zulauf

Das Ergebnis bei einem eingestellten Volumenstrom von 210 l/min mit sprunghafter Änderung des Staudruckes ist in Abb. 78 dargestellt.

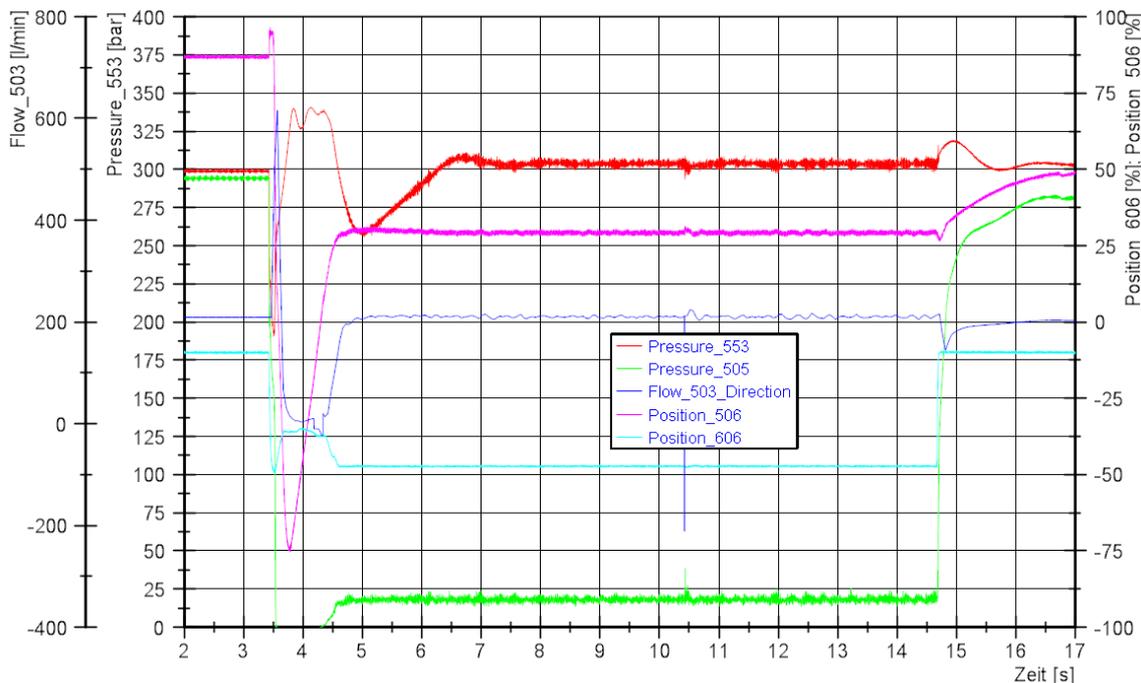


Abb. 78: Testergebnis Zulaufstromtest bei 210 l/min mit Bosch Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.

Dabei ist die Regelzeit von über 1,5 Sekunden bei beiden Sprüngen erkennbar. Da jedoch bereits hier gewisse Anzeichen der hochfrequenten Schwingung aufgrund zu hoher Kreisverstärkung vorhanden sind, können die PID-Parameter nicht erhöht werden, um die Regelzeit zu verbessern.

Die Ergebnisse der übrigen Einstellwerte sind in Tab. 40 zusammengefasst.

Eingestellter Volumenstrom [l/min]	Einregelzeit bis $\pm 5\%$ Sollwert bei Sprung max. \rightarrow min. Staudruck [s]	Einregelzeit bis $\pm 5\%$ Sollwert bei Sprung min. \rightarrow max. Staudruck [s]
5	1,5	11,4
20	1,13	4,8
50	0,7	3,4
100	1,3	1,3
150	1,6	0,8
210	1,3	1,2

Tab. 40: Ergebnisse Zulaufstromtest mit Bosch Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.

9.5.2. Stromregelung im Ablauf bis 50 l/min

In Abb. 79 ist das Diagramm bei einem Volumenstrom von 50 l/min im Ablauf bei sprunghafter Änderung des anliegenden Druckes ersichtlich. Auch hier ist das Problem vorhanden, dass bei Verschließen des Ventils 607 der Steueröldruck zusammenbricht und das ganze System nicht mehr ordnungsgemäß funktioniert. Aus diesem Grund wird zur Bewertung lediglich die Zeit bei Sprung von geringen auf hohen Gegendruck herangezogen.

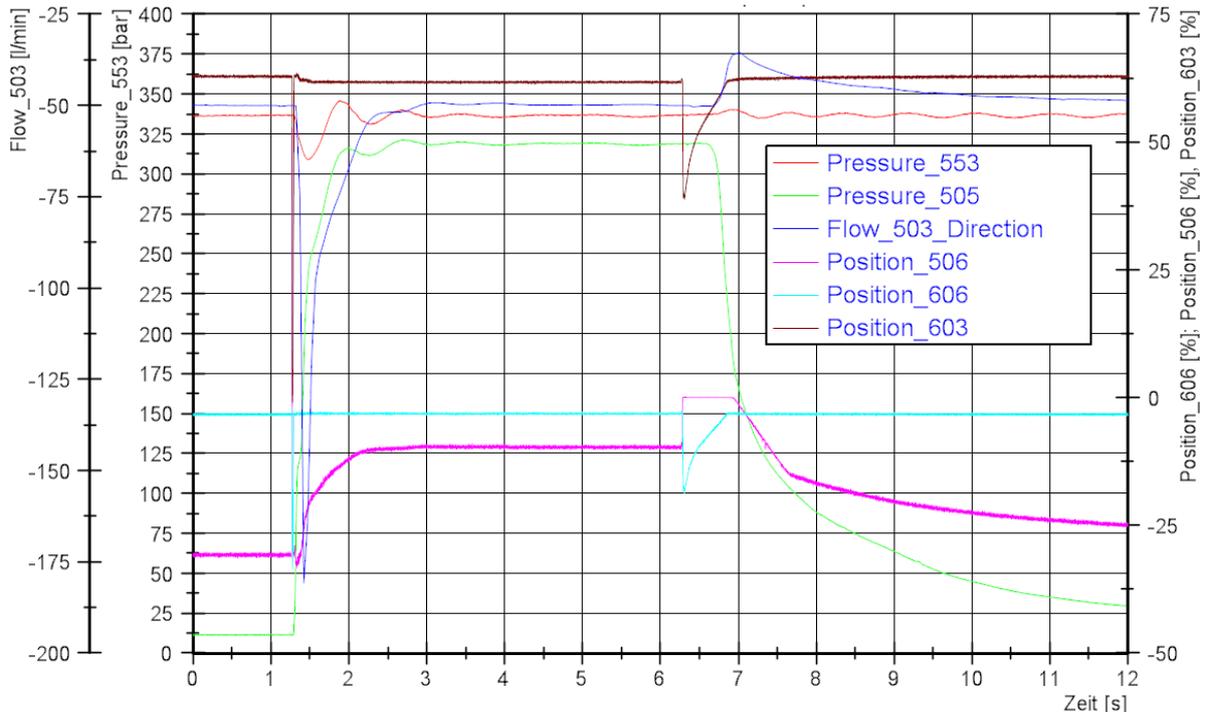


Abb. 79: Testergebnis Ablaufstromtest bei 50 l/min mit Bosch Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.

Eingestellter Volumenstrom [l/min]	Einregelzeit bis $\pm 5\%$ Sollwert bei Sprung min. \rightarrow max. Staudruck [s]	Höchster Volumenstrom bei Sprung min. \rightarrow max. Staudruck [l/min]
5	1,8	161,1
20	2,8	116,5
50	1,1	180,8

Tab. 41: Ergebnisse Ablaufstromtest bis 50 l/min mit Bosch Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.

9.5.3. Stromregelung im Ablauf über 50 l/min

Da mit dem verwendeten Testaufbau keine sprunghafte Verstellung des Gegendruckes bei einem Volumenstrom von über 50 l/min im Ablauf möglich ist, wurden diese Volumenströme durch Variation des Versorgungsdruckes auf Stabilität geprüft. Dabei ergab sich für 100 l/min, 150 l/min und 220 l/min kein instabiles Verhalten.

9.6. Übergangsverhalten Druck-Durchflussregelung

Bei manchen wiederkehrenden Komponentenprüfungen kann es notwendig sein, dass sowohl Druck- als auch Durchflussregler aktiv sind. Dazu ist bei der TEST-FUCHS GmbH ein Regelkreis im Einsatz, der das Verhalten der beiden Regler im Übergangsbereich definiert.

Dieser Regelkreis bleibt im Zuge des vorliegenden Projektes unverändert. Zum Vergleich mit der konventionellen Variante wurde allerdings auch hier ein Test durchgeführt, um das Verhalten bei gleichzeitiger Aktivierung beider Regler zu testen.

9.6.1. Übergangsverhalten im Zulauf

In nachfolgender Abb. 80 ist das Verhalten bei 250 bar und 150 l/min mit sprunghafter Änderung des Staudruckes dargestellt.

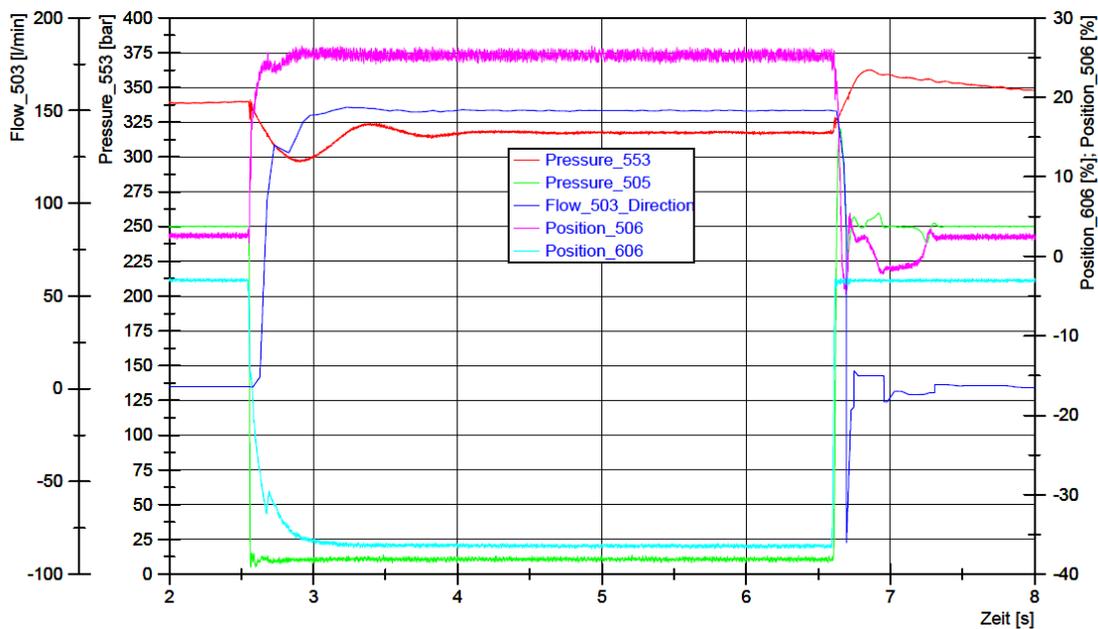


Abb. 80: Testergebnis Übergangstest bei 250 bar und 150 l/min mit Bosch Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Ergebnisse der getesteten Kombinationen aus Druck und Volumenstrom sind in Tab. 42 zusammengefasst.

Einge- stellter Druck [bar]	Einge- stellter Volumen- strom [l/min]	Einregelzeit bis $\pm 5\%$ Sollwert am Volumenstrom bei Übergang Druckregelung \rightarrow Stromregelung [s]	Einregelzeit bis $\pm 5\%$ Sollwert am Druck bei Übergang Stromregelung \rightarrow Druckregelung [s]
50	20	0,76	0,19
50	150	0,44	0,36
150	20	0,84	0,21
150	150	0,41	0,11
250	20	0,98	0,3
250	150	0,35	0,06

Tab. 42: Ergebnisse Übergangstest mit Bosch Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.

9.7. Implementierung des parallelgeschalteten Regelventils

Anhand der Testergebnisse ist festzustellen, dass das Bosch 3WRCBH Regelventil bei geringem Druck im Anschluss A die größten Schwächen hat. Dieses Verhalten tritt jedoch verstärkt bei hohen Volumenströmen auf, wobei das parallelgeschaltete NG 6 Regelventil keine Abhilfe schaffen kann. Sinnvoll wäre bei einem Versorgungsdruck von 340 bar ein Ventil, welches bei 300 bar Druckabfall einen Volumenstrom von rund 220 l/min aufweist. Da sich je nach Einsatzgebiet des hydraulischen Weitbereichsreglers der Versorgungsdruck und somit auch der Druckabfall ändern, macht es Sinn das parallelgeschaltete Ventil an den Anwendungsfall anzupassen. Wenn beispielsweise das Bosch 3WRCBH für sämtliche Regelungen oberhalb von 100 bar Gegendruck angewandt wird und das NG6 Regelventil darunter, kann über den gesamten Bereich die Kreisverstärkung erhöht und somit bessere Regelzeiten realisiert werden. Aufgrund der Tatsache dass es sinnvoller ist, das parallelgeschaltete Ventil je nach Anforderungsfall auszuwählen, wird hier auf die Implementierung der kombinierten Lageregelung vollständig verzichtet.

10. Test der konventionellen Variante

10.1. Hydraulikschaltplan

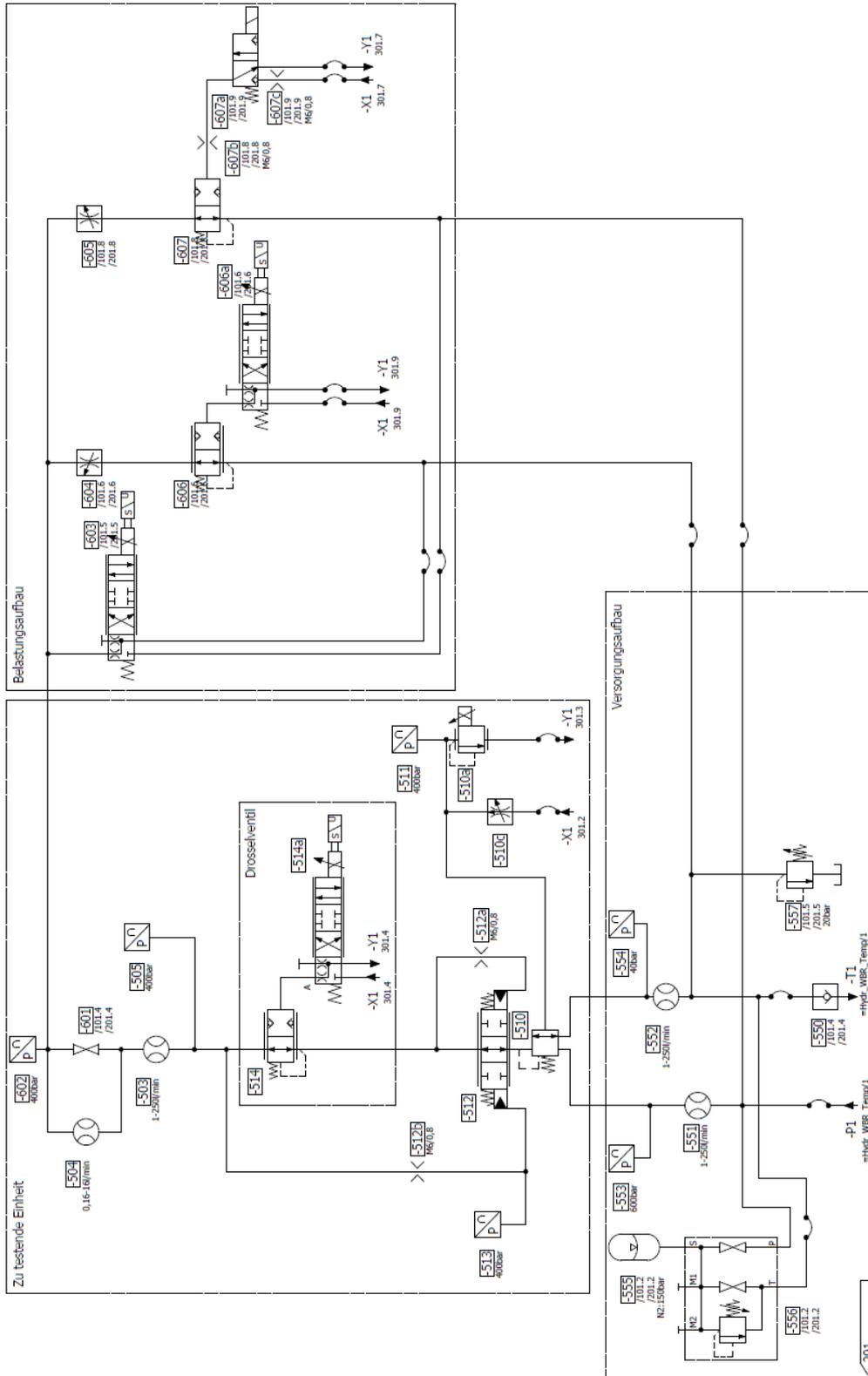


Abb. 81: Hydraulikschaltplan Testaufbau konv. Variante, Quelle: Eigene Darstellung.

10.2. Einstellung Druckregelung

Als Vorsteuerstufe für das SUN PSJT Druckregelventil dient ein NG6 Druckbegrenzungsventil Typ DBET des Herstellers Bosch Rexroth AG. Dieses Ventil besitzt die in Abb. 83 dargestellte Druck/Volumenstromkennlinie.

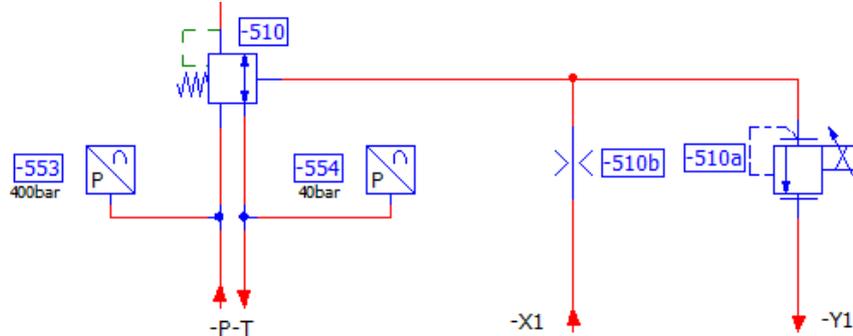
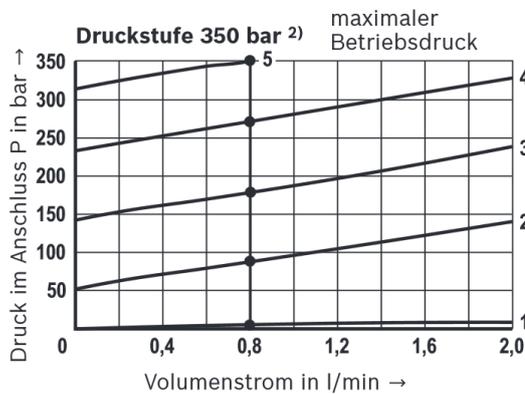


Abb. 82: SUN PSJT inkl. Pilotventil, Quelle: Eigene Darstellung.



Kurve 1 bei 0 % Sollwert
 Kurve 2 bei 25 % Sollwert
 Kurve 3 bei 50 % Sollwert
 Kurve 4 bei 75 % Sollwert
 Kurve 5 bei 100 % Sollwert 1; 2)
 Die Kennlinien wurden ohne Gegendruck im Anschluss T gemessen. ($p_T = 0$ bar)

Abb. 83: p/Q Kennlinie DBET, Quelle: Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2013b), S. 10.

In Abb. 82 ist für die Limitierung des Pilotvolumenstromes eine einfache Drossel vorgesehen. Dabei würde jedoch, je nach eingestelltem Druck, der Druckabfall und somit der Volumenstrom variieren. Um diesem Verhalten entgegenzuwirken, wird anstelle der Drossel ein 2-Wege Stromregelventil der Nenngröße 6 Typ 2FRM der Bosch Rexroth AG verwendet. Dadurch kann der Volumenstrom durch das Druckbegrenzungsventil so reguliert werden, dass ein möglichst breites Band an Drücken regelbar ist. Die Kennlinie des Bosch 2-Wege Stromregelventils ist in Abb. 84 dargestellt, wobei die Linie mit der Bezeichnung 6Q das verwendete Ventil beschreibt.

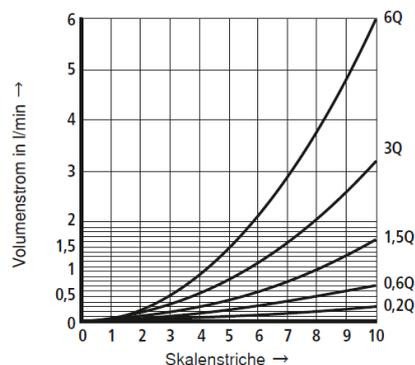


Abb. 84: Kennlinie Bosch 2FRM6, Quelle: Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2013a), S. 1254.

Ein optimales Verhalten wurde im Test mit einer Öffnung des Stromregelventils von 2,5 Skalenstrichen erzielt, was einem Volumenstrom von 0,4 l/min entspricht.

10.3. Funktionstests Druckregler

10.3.1. Druckregelung im Zulauf

In Abb. 85 ist das Ergebnis des Drucktests im Zulauf bei 250 bar und sprunghafter Änderung des Volumenstromes von 0 l/min auf 220 l/min abgebildet.

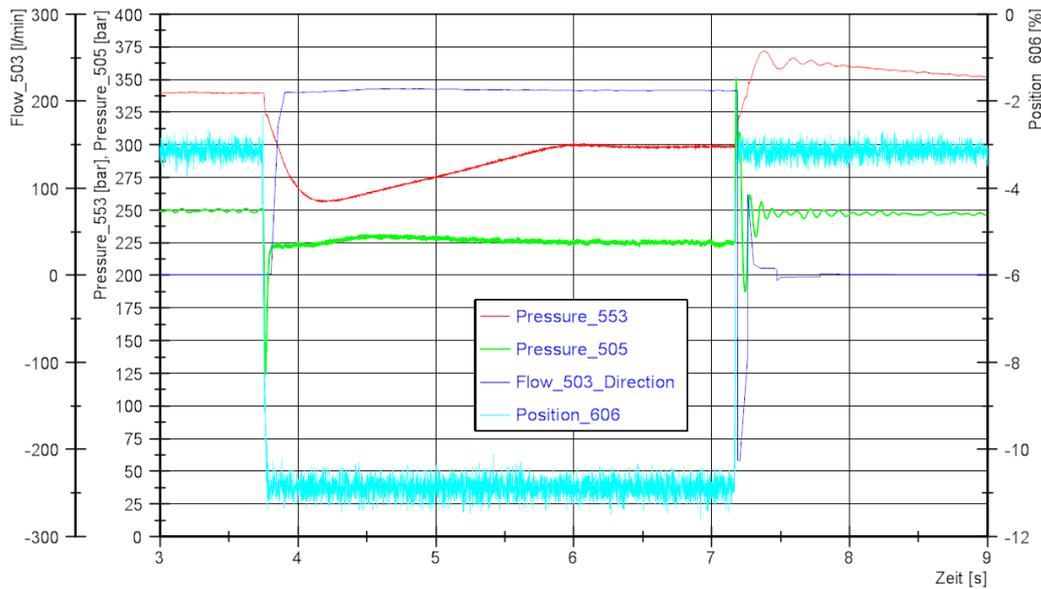


Abb. 85: Testergebnis Zulaufdrucktest mit konv. Variante bei 250 bar, Quelle: Eigene Darstellung.

Nachfolgend sind die Ergebnisse der übrigen Druckstufen zusammengefasst. Zu beachten ist, dass durch den Druckabfall bei hohen Volumenströmen der Sollwert nicht erreicht wird, weshalb zusätzlich der sich ergebende Druck angegeben ist. Die Regelzeit ist in diesem Fall die Zeit bis zum Erreichen des resultierenden Druckes bei maximalem Volumenstrom.

Eingestellter Druck [bar]	Einregelzeit bis $\pm 5\%$ Sollwert bei Sprung 0 l/min \rightarrow max. Volumenstrom [s]	Druck 505 bei maximalem Volumenstrom [bar]	Einregelzeit bis $\pm 5\%$ Sollwert bei Sprung max. Volumenstrom \rightarrow 0 l/min [s]
2	0,03	0,45	0,34
10	0,11	3	1,65
50	0,63	26	0,21
100	0,5	70	0,22
150	0,04	120	0,26
200	0,04	192	0,29
250	0,05	225	0,16
275	0,07	250	0,19
290	0,1	260	0,16

Tab. 43: Ergebnisse Zulaufdrucktest mit konv. Variante, Quelle: Eigene Darstellung.

Wie in Abb. 85 und Tab. 43 zu sehen ist, sind auch hier gute Regelzeiten möglich. Bei genauerer Betrachtung des Diagramms fallen jedoch bei 0 l/min Schwingungen auf, welche sowohl vor dem Sprung auf maximalen Volumenstrom als auch nach dem Sprung auf 0 l/min vorkommen. Diese Schwingungen und andere Unregelmäßigkeiten am Drucksignal sind bei sämtlichen getesteten Druckniveaus vorhanden. Grund dafür ist, dass durch die steile p/Q Kennlinie des Pilotventils geringfügige Änderungen am Volumenstrom durch das Ventil bereits ein starkes Ansteigen bzw. Absinken des eingestellten Druckes bewirken.

Ersichtlich ist auch die deutliche Verminderung des eingestellten Druckes bei hohem Volumenstrom, die durch den Druckabfall der Komponenten zwischen Druckaufnehmer 505 und SUN PSJT entsteht. Um dieses Verhalten auszugleichen, wäre ein nachgeführter Regelkreis notwendig, welcher jedoch nicht realisiert wird.

10.3.2. Druckregelung im Ablauf

In Abb. 86 ist der Verlauf bei Druckregelung im Ablauf mit einem eingestellten Druck von 100 bar abgebildet. Im Gegensatz zur zweiten Variante gibt es hier keine Probleme aufgrund zu hohem Steuerölverbrauch, weshalb auch bei dem Sprung von maximalem Volumenstrom auf 0 l/min kein unregelmäßiges Verhalten auftritt. Ein Fehlverhalten das vorkommt, jedoch beinahe keinen Einfluss hat, ist durch die kurzfristige Öffnung des Ventils 606 bei rund 0,55 Sekunden gegeben.

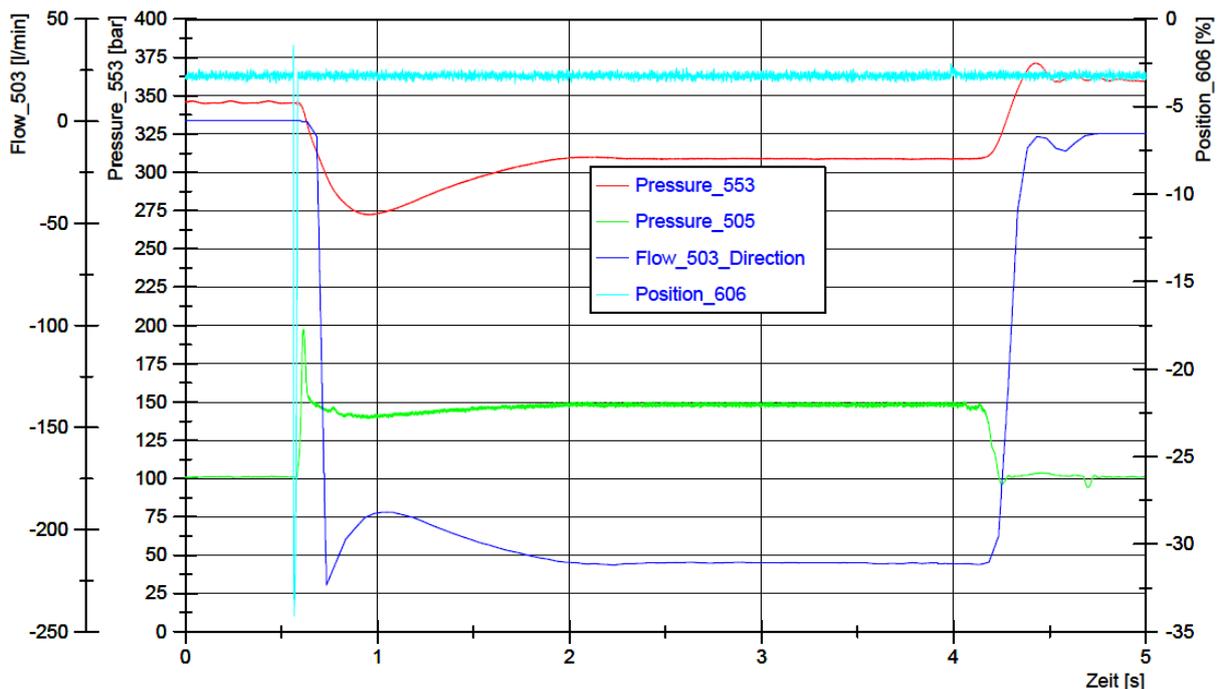


Abb. 86: Testergebnis Ablaufdrucktest mit konv. Variante bei 100 bar, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Ergebnisse der übrigen Druckstufen sind in Tab. 44 zusammengefasst. Da bei der zweitgetesteten Variante keine Messung am Sprung von maximalem Volumenstrom auf 0 l/min möglich ist, werden diese Werte auch hier nicht angeführt.

Eingeregelter Druck [bar]	Einregelzeit bis $\pm 5\%$ Sollwert bei Sprung 0 l/min \rightarrow max. Volumenstrom [s]	Druck 505 bei maximalem Volumenstrom [bar]
2	0,7	35,4
10	0,72	35,9
50	0,39	89,2
100	0,63	147,9
150	0,33	207,7
200	0,68	258,1
250	0,04	303,5

Tab. 44: Ergebnisse Ablaufdrucktest, Quelle: Eigene Darstellung.

10.3.3. Übergang Druckregelung Zulauf/Ablauf

In Abb. 87 ist das Verhalten mit einem eingestellten Druck von 275 bar bei dem Übergang von positiven (Durchflussrichtung P \rightarrow A) zu negativen Volumenstrom (Durchflussrichtung A \rightarrow T) dargestellt.

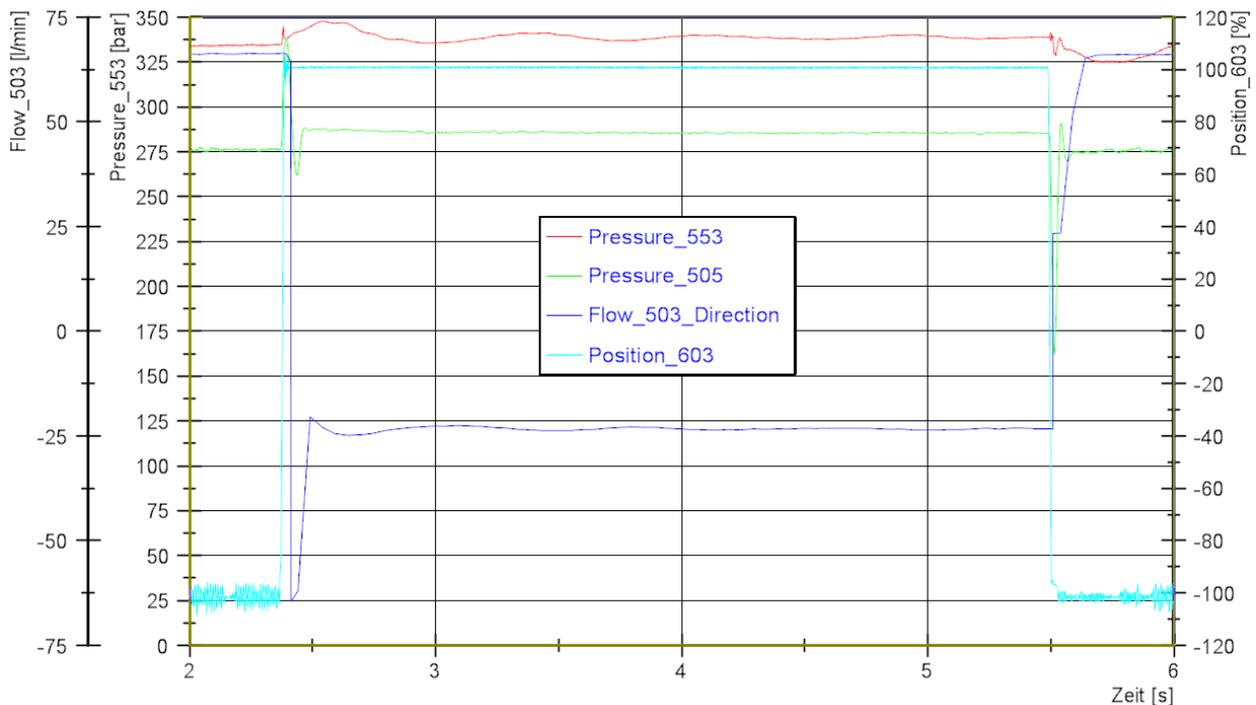


Abb. 87: Testergebnis Übergangdrucktest mit konv. Variante bei 275 bar, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Ergebnisse der übrigen Druckstufen sind in Tab. 45 zusammengefasst. Auf die Angabe des Druckes nach dem Sprung wird verzichtet, da dieser aufgrund der geringen Volumenströme im Übergangstest lediglich geringfügig vom anfangs eingestellten abweicht.

Eingestellter Druck [bar]	Einregelzeit bis $\pm 5\%$ Sollwert bei Sprung pos. \rightarrow neg. Volumenstrom [s]	Einregelzeit bis $\pm 5\%$ Sollwert bei Sprung neg. \rightarrow pos. Volumenstrom [s]
2	0,17	0,82
10	0,14	0,15
50	0,09	0,07
100	0,09	0,08
150	0,1	0,08
200	0,08	0,07
250	0,08	0,05
275	0,08	0,05
290	0,05	0,04

Tab. 45: Ergebnisse Übergangsdrucktest mit konv. Variante, Quelle: Eigene Darstellung.

10.4. Einstellung Stromregelung

Bei dem System aus Druckwaage und Drosselventil ist eine Optimierung nur durch Düsen in den Steuerleitungen der Druckwaage möglich. Anfangs war lediglich eine Düse (Pos. 512a) vorgesehen. Versuche ergaben jedoch, dass eine höhere Stabilität erreichbar ist, wenn auf beiden Seiten eine Düse eingesetzt wird. Dabei erwies sich ein Blendendurchmesser von 0,8 Millimetern als passend.

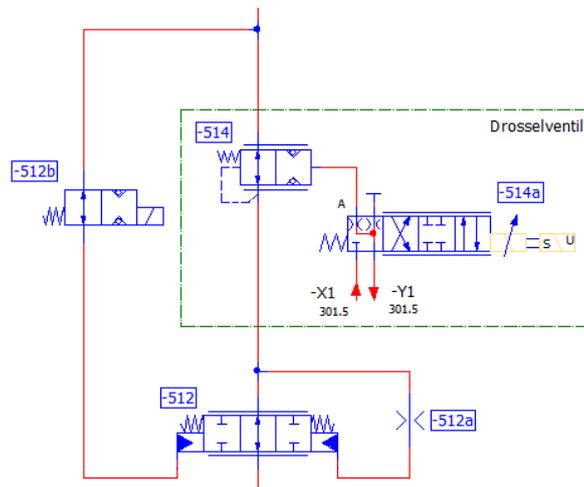


Abb. 88: SUN LHHT und Drosselventil, Quelle: Eigene Darstellung.

Bei den Versuchen, den optimalen Blendendurchmesser zu finden wurden jedoch folgende zwei Probleme dieser Variante festgestellt:

- **Druckwaage öffnet bei hohem Volumenstrom vollständig**

Der Kolben der verwendeten Druckwaage steht bei einem Druckabfall unter 3,5 bar an der externen Messdrossel in der offenen Mittelstellung. Erhöht sich dieser Druckabfall, so bewegt sich der Kolben in Richtung linke oder rechte Endlage, wobei die Feder gestaucht bzw. gedehnt wird. Dieses Verhalten ergibt, dass bei geringer Öffnung der Druckwaage die Feder am stärksten belastet ist und im Gegensatz bei maximaler Öffnung nur eine geringe Federkraft zur Verfügung steht. Daraus resultiert, dass bei niedrigem Volumenstrom der Nenndruckabfall von 3,5 bar über die externe Drossel gehalten wird und im Gegensatz bei hohem Volumenstrom der Wert auf rund 1 bar sinkt. Ab einem gewissen Durchfluss übersteigt der Einfluss der Strömungskräfte innerhalb der Druckwaage die Federkraft, sodass deren Position nicht mehr gehalten werden kann und die Druckwaage die offene Grundstellung einnimmt. Die Folge daraus ist, dass der Volumenstrom nicht mehr begrenzt wird und sprunghaft auf das Maximum ansteigt.

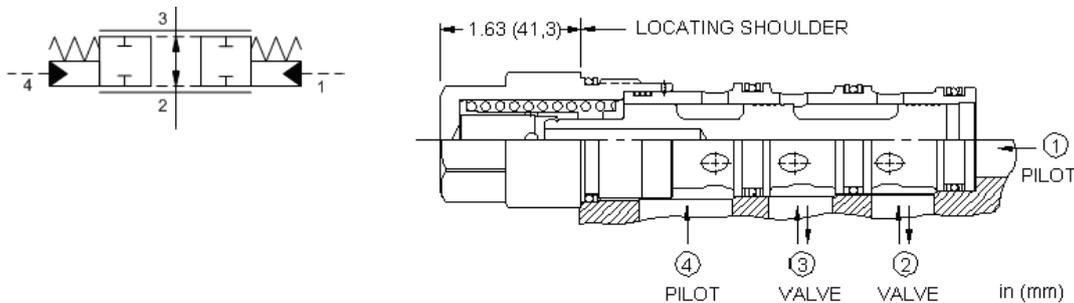


Abb. 89: Schematische Darstellung und Schnittzeichnung des Sun LHHT, Quelle: Sun Hydraulics Corporation (Hrsg.) (2015), S. 1 Onlinequelle [21.02.2016].

Um dieses Verhalten zu zeigen, wurde folgender Test durchgeführt:

Randbedingungen:

Versorgungsdruck: 340 bar
 Gasfülldruck Speicher: 150 bar

Ablauf:

1. Drossel 514 vollständig öffnen, damit der maximale Volumenstrom eingestellt werden kann.
2. Drosselventil 606 anfangs offen halten und danach allmählich schließen, um eine Steigerung des Gegendruckes am Druckaufnehmer 505 zu erreichen.

Ergebnisse:

In Abb. 90 ist das Ergebnis dieses Tests abgebildet. Die Druckdifferenz stellt dabei die Differenz der beiden Signale *Pressure_513* und *Pressure_505* dar. Erkennbar ist, dass der Druckabfall bei einem Volumenstrom von rund 120 l/min nur einen Wert von ca. 1 bar aufweist, weshalb auch bei maximaler Öffnung der NG 32 Drossel kein höherer Volumenstrom möglich ist. Ab einer Zeit von 15 Sekunden ist das sprunghafte Öffnen der Druckwaage zu sehen.

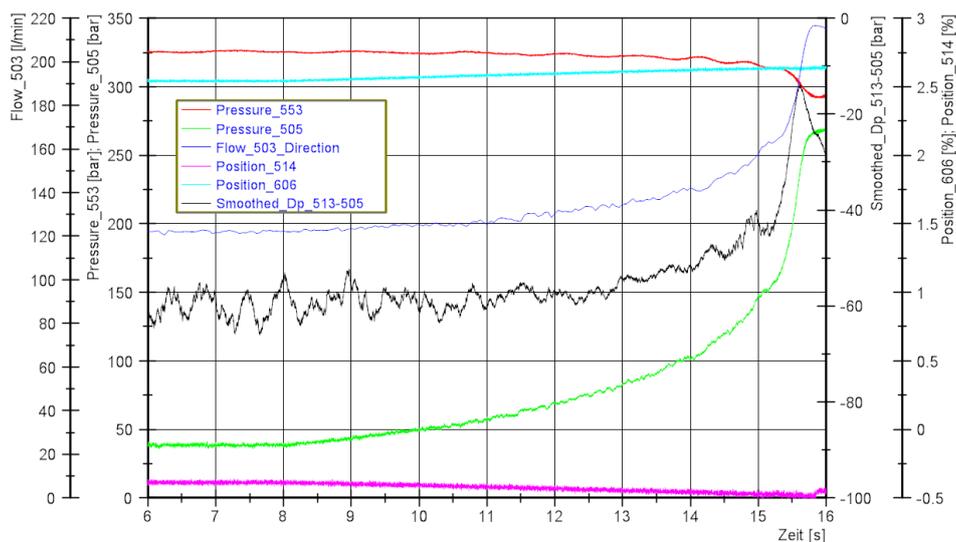


Abb. 90: Öffnen der Druckwaage bei hohem Volumenstrom, Quelle: Eigene Darstellung.

Es ergibt sich somit, dass die verwendete Druckwaage 3,5 bar Druckabfall nur für einen maximalen Volumenstrom von rund 100 l/min verwendet werden kann. Aufgrund dessen wäre hier eine Druckwaage mit größerem Druckabfall besser geeignet, da damit ein höherer Volumenstrom möglich wäre und durch die stärkere Feder der Einfluss der Strömungskräfte geringer ausfallen würde. Leider ist ein Tausch der Feder im Ventil bzw. eine erneute Bestellung einer Druckwaage mit 7 bar Δp nicht möglich.

- **Drosselventil wandert bei steigendem Gegendruck**

Ebenfalls in Abb. 90 erkennbar ist, dass sich bei Steigerung des Gegendruckes das Drosselventil 514 öffnet. Dieses Verhalten wird jedoch durch die Tatsache, dass mit der verwendeten Kombination aus Drossel und Druckwaage ohnehin keine hohen Volumenströme möglich sind, nicht weiter untersucht.

10.5. Funktionstests Stromregler

Da mit den verwendeten Komponenten der maximale regelbare Volumenstrom rund 100 l/min beträgt, hätte man auf weitere Tests verzichten können, da dies nicht den Anforderungen entspricht. Um jedoch einen Vergleich der Varianten anstellen zu können, wurden die Funktionstests bis zu einem Volumenstrom von 100 l/min durchgeführt.

10.5.1. Stromregelung im Zulauf

In Abb. 91 ist das Ergebnis mit einem eingestellten Volumenstrom von 100 l/min bei sprunghafter Verstellung des Belastungsventils 606 ersichtlich. Deutlich erkennbar ist dabei die Positionsänderung des Drosselventils 514.

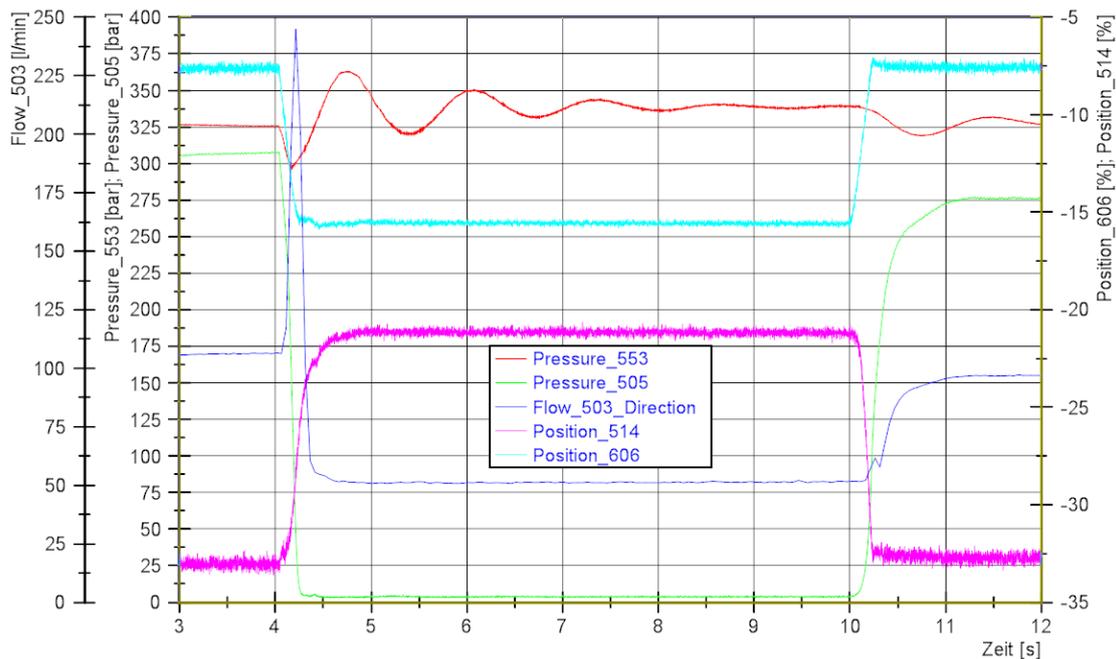


Abb. 91: Testergebnis Zulaufstromtest bei 100 l/min mit konv. Variante, Quelle: Eigene Darstellung.

Außerdem wurde im Test festgestellt, dass bei geringen Volumenströmen ein gewisser Gegendruck notwendig ist, da sonst die Druckwaage vollständig schließt. Daher ist in Tab. 46 auch der eingestellte Gegendruck eingetragen. Wie zuvor bei der Druckregelung wird der Volumenstrom nach dem Sprung angegeben und bezüglich der Regelzeit die Zeit bis zum Erreichen dieses Volumenstromes gemessen.

Einge- stellter Volumen- strom [l/min]	Einregelzeit bis $\pm 5\%$ Sollwert bei Sprung max. \rightarrow min. Staudruck [s]	Anliegender Volumen- strom bei min. Staudruck [l/min]	Gegendruck [bar]	Einregelzeit bis $\pm 5\%$ Sollwert bei Sprung min. \rightarrow max. Staudruck [s]
5	0,59	1,1	121,5	0,64
20	0,38	10,8	67,1	0,38
50	1,1	23,7	9,9	0,37
100	0,38	51,3	3,6	0,82

Tab. 46: Ergebnisse Zulaufstromtest mit konv. Variante, Quelle: Eigene Darstellung.

10.5.2. Stromregelung im Ablauf bis 50 l/min

In Abb. 92 ist das Verhalten bei einem eingestellten Volumenstrom von 50 l/min und sprunghafter Verstellung des Staudruckes ersichtlich. Dabei ist wieder das Problem erkennbar, dass bei Verschließen des 2/2 Wege-Einbauventils mit der Position 607 zu wenig Steueröl zur Verfügung steht, um die restlichen Ventile ordnungsgemäß in Position zu halten. Folglich wird auch hier nur der erste Sprung zur Quantifizierung des Systems herangezogen.

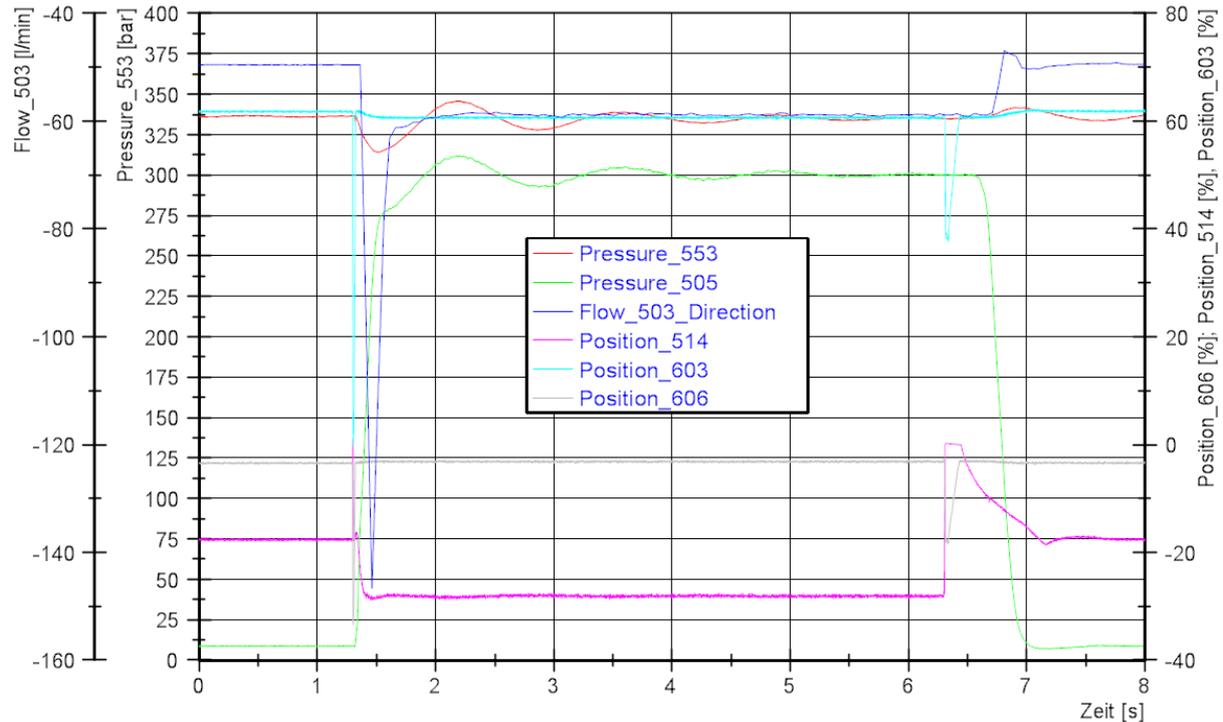


Abb. 92: Testergebnis Ablaufstromtest bei 50 l/min mit konv. Variante, Quelle: Eigene Darstellung.

Eingestellter Volumenstrom [l/min]	Einregelzeit bis $\pm 5\%$ Sollwert bei Sprung min. \rightarrow max. Staudruck [s]	Anliegender Volumenstrom bei max. Staudruck [l/min]	Gegendruck [bar]
5	0,26	19,1	46,8
20	0,23	30,4	38,4
50	0,31	58,6	8,6

Tab. 47: Ergebnisse Ablaufstromtest bis 50 l/min mit konv. Variante, Quelle: Eigene Darstellung.

10.5.3. Stromregelung im Ablauf über 50 l/min

Da der maximale Volumenstrom aufgrund der Druckwaage rund 100 l/min beträgt, ist nur ein Test bei diesem Wert möglich. Die Durchführung ergab keinerlei neuartige Probleme weshalb auch im Ablauf 100 l/min unter den genannten Einschränkungen möglich sind.

10.6. Übergangverhalten Druckregelung/ Durchflussregelung

Analog der Variante mit dem Bosch 3-Wege Regelventil wurde auch mit dieser Variante der Test im Übergangsbereich von Druck- auf Volumenstromregelung durchgeführt.

Im Gegensatz zur zweiten Variante ist hier kein zusätzlicher Regelkreis notwendig, um diese Funktion erfüllen zu können. Unerlässlich ist jedoch, dass die Zusammenhänge zwischen Ventilstrom an den Pilotventilen und den daraus resultierenden Systemparametern bekannt sind. Diese beiden Kennlinien müssen in der Steuerung hinterlegt werden, damit die Ventile im Falle der Aktivierung beider Regler die richtige Position aufweisen.

Für den Test des Übergangsverhaltens verzichtete man auf die Aufnahme der beiden Kennlinien und deren Implementierung. Die Ventile wurden dabei im Vorhinein bereits richtig positioniert. Bezüglich der Volumenstromstufen wurde die zweite Variante mit 20 l/min und 150 l/min getestet. Aufgrund der Probleme mit der Druckwaage sind mit diesem Aufbau allerdings nur Volumenströme bis 100 l/min möglich, weshalb hier die Testergebnisse bei 20 l/min und 100 l/min angegeben sind.

In Abb. 93 ist der Verlauf bei eingestellten Werten von 250 bar und 100 l/min zu sehen.

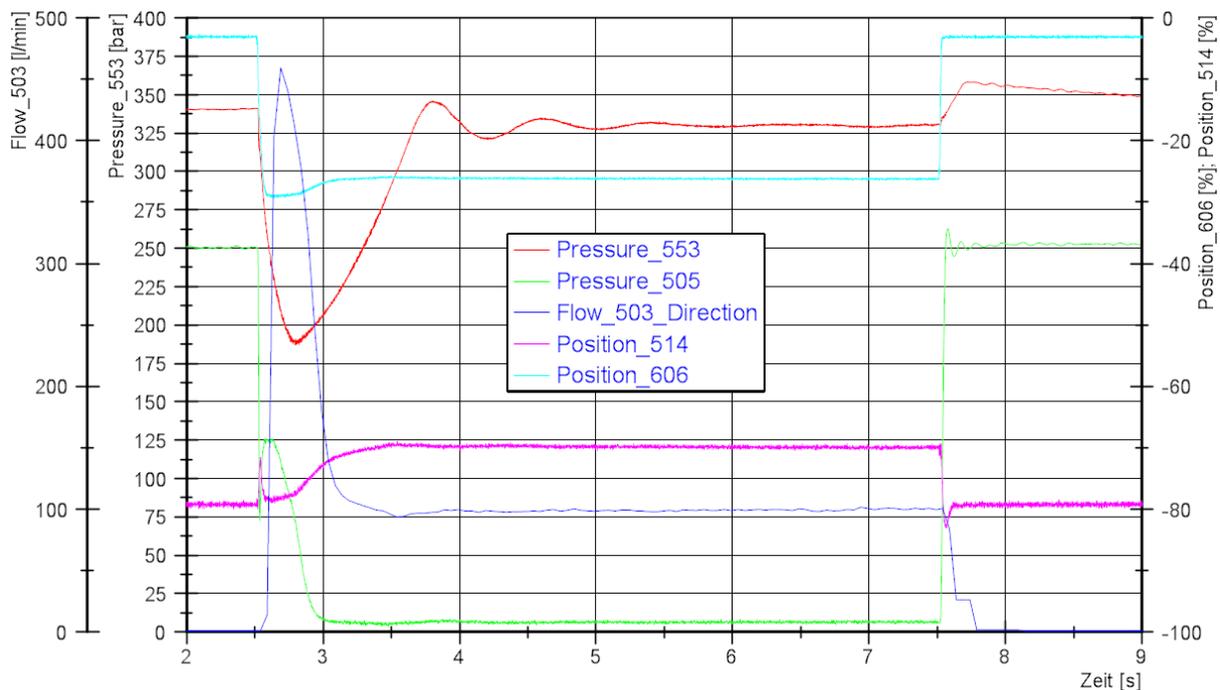


Abb. 93: Testergebnis Übergangstest bei 250 bar und 100 l/min mit konv. Variante, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Ergebnisse der übrigen Einstellwerte sind in Tab. 48 zusammengefasst.

Einge- stellter Druck [bar]	Einge- stellter Volumen- strom [l/min]	Einregelzeit bis $\pm 5\%$ Sollwert am Volumenstrom bei Übergang Druckregelung \rightarrow Stromregelung [s]	Einregelzeit bis $\pm 5\%$ Sollwert am Druck bei Übergang Stromregelung \rightarrow Druckregelung [s]
50	20	1,5	0,08
50	100	1,04	0,22
150	20	0,83	0,06
150	100	0,4	0,12
250	20	0,54	0,09
250	100	0,75	0,05

Tab. 48: Ergebnisse Übergangstest konv. Variante, Quelle: Eigene Darstellung.

In Abb. 93 ist erstmals der unter Kapitel 3.2.2.2 genannte Nachteil aufgrund des Anfahrspunges der Druckwaage ersichtlich. Hier steigt der Volumenstrom auf einen Wert von über 450 l/min an, bis die Druckwaage nach zirka 0,2 Sekunden reagiert. Diese Durchflussspitze kann ein empfindliches System schnell beschädigen, was den Einsatz der Bauteile für Volumenstromregelung im hydraulischen Weitbereichsregler unmöglich macht.

11. Zusammenfassung der Testergebnisse

Um eine quantitative Aussage über die bessere Eignung einer Variante für den Einsatz als hydraulischer Weitbereichsregler treffen zu können, werden im Folgenden die relevantesten Testergebnisse verglichen.

11.1. Druckregelung

Bei der Druckregelung hat die Variante mit dem Bosch 3WRCBH Regelventil Schwierigkeiten bei hohen Volumenströmen und geringen Drücken. Dieses Problem ist mit dem SUN 3-Wege-Druckregelventil nicht vorhanden, jedoch weist hier das Drucksignal über den gesamten Bereich kleine Unregelmäßigkeiten auf.

In Abb. 94 ist ein Vergleich der Ergebnisse der beiden Varianten bei dem durchgeführten Vorlaufdrucktest ersichtlich. Die darin enthaltenen Einregelzeiten stellen die Zeit bis zum Erreichen des Druckes beim Sprung von 0 l/min auf maximalen Volumenstrom dar, wobei für die Variante mit dem Bosch Regelventil die Werte mit aktivierter Δp Kompensation angeführt sind.

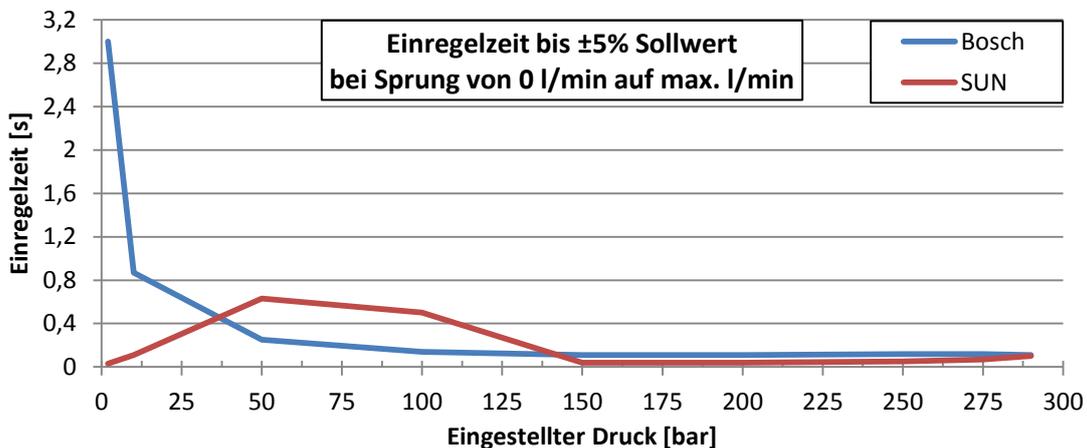


Abb. 94: Vergleich der Einregelzeiten bei Zulaufdrucktest, Quelle: Eigene Darstellung.

Dabei ist ein deutlicher Unterschied der Regelzeiten erkennbar. In Abb. 95 sind die Ergebnisse des durchgeführten Übergangstests bei dem Sprung von positiven (Richtung P→A) zu negativen Volumenstrom (Richtung A→T) eingetragen.

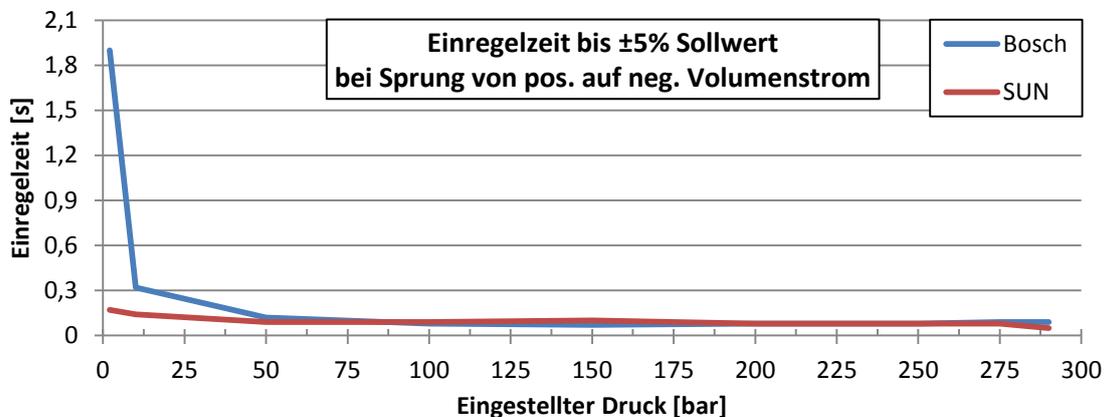


Abb. 95: Vergleich der Einregelzeiten bei Übergangstest, Quelle: Eigene Darstellung.

Die erreichten Werte bei Druckregelung zeigen, dass auch mit einfachen Komponenten bereits gute Ergebnisse erzielbar sind. So ergeben sich mit dem konventionellen Aufbau teils bessere Regelzeiten als mit der elektronisch geregelten Variante mit angewandter Δp Kompensation. Jedoch sind auch hier einige Schwachstellen aufgefallen, die den Einsatz als Standardlösung nur bedingt ermöglichen.

Die größte Schwachstelle der konventionellen Variante ist dabei, dass das Verhalten vollständig durch das verwendete Pilotventil und dessen Versorgung bzw. Dämpfung bestimmt wird. Dabei gibt es nur wenige Optimierungsmöglichkeiten um das System entsprechend den Anforderungen anzupassen.

11.2. Stromregelung

Bei der Regelung der Prozessgröße Volumenstrom weisen beide Varianten schwerwiegende Nachteile auf. Während mit dem Bosch Regelventil die einseitige hydraulische Vorsteuerung Probleme verursacht, wird mit der SUN Druckwaage nur ein maximaler Volumenstrom von 100 l/min erreicht.

In Abb. 95 ist die Regelzeit bei dem durchgeführten Zulaufstromtest über dem eingestellten Volumenstrom aufgetragen. Dabei ist zu erkennen, dass im Arbeitsbereich der Druckwaage die konventionelle Lösung wesentlich bessere Ergebnisse erzielt.

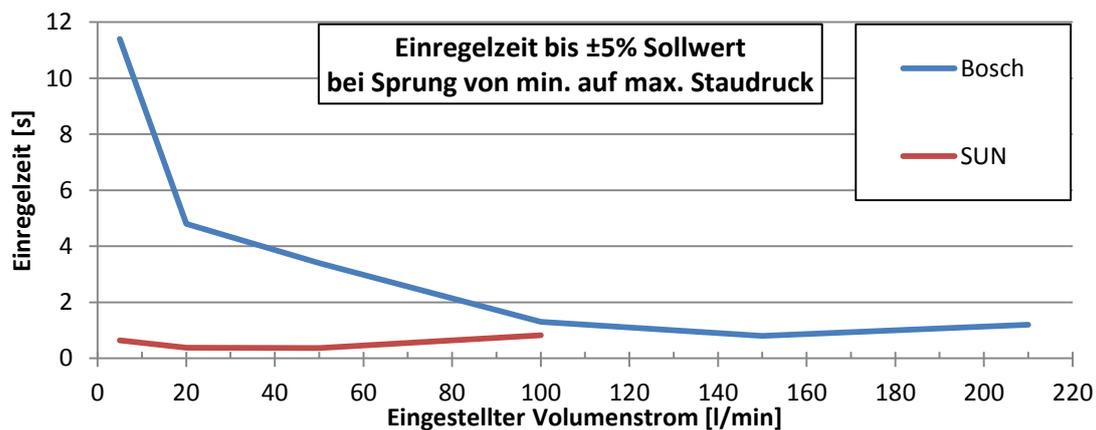


Abb. 96: Vergleich der Einregelzeiten bei Zulaufstromtest, Quelle: Eigene Darstellung.

Außerhalb des Arbeitsbereiches der Druckwaage sind jedoch auf beiden Seiten gravierende Probleme vorhanden. Auf der einen Seite entstehen diese durch das sprunghafte Öffnen der Druckwaage bei hohem Volumenstrom und auf der anderen durch das vollständige Verschließen der Waage bei niedrigem Durchfluss und hohem Druckabfall. Wie zuvor bei der konventionellen Druckregelung gibt es auch hier nur wenige Eingriffsmöglichkeiten um das Verhalten des Systems zu optimieren.

11.3. Übergangverhalten Druck-Durchflussregelung

Anhand der Testergebnisse ist festzustellen, dass mit beiden Varianten, bei Übergang von Volumenstromregelung zu Druckbegrenzung durchaus akzeptable Ergebnisse erzielbar sind. Aufgrund des maximalen Volumenstromes von 100 l/min mit der konventionellen Variante kann jedoch nur das Ergebnis bei einem Volumenstrom von 20 l/min für einen Vergleich herangezogen werden (siehe Abb. 97).

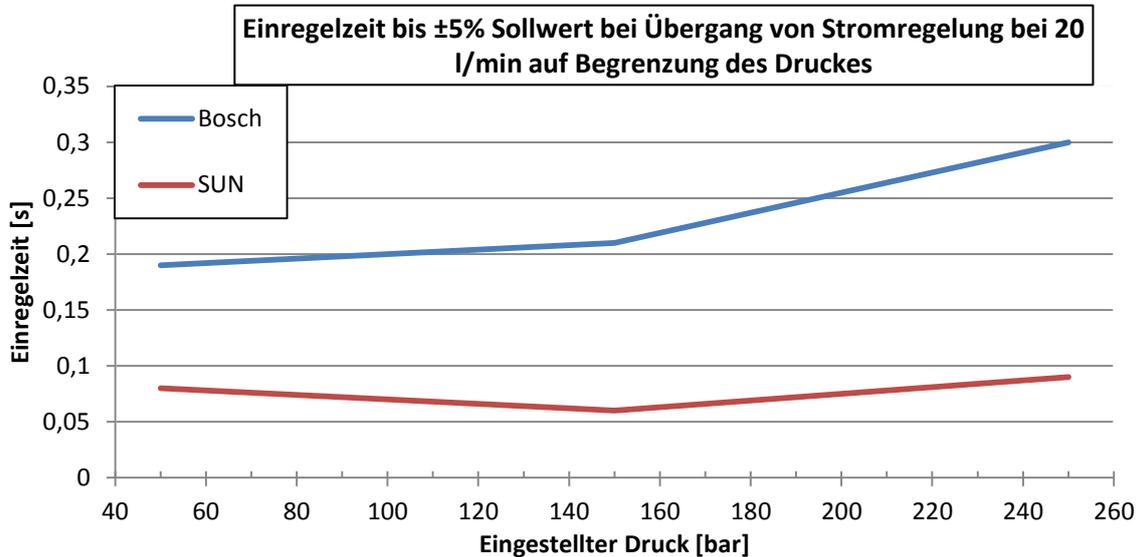


Abb. 97: Vergleich der Einregelzeiten bei Übergangstest, Quelle: Eigene Darstellung.

Bei dem Übergang von Druckregelung bei 0 l/min zu Volumenstrombegrenzung sind allerdings keine zufriedenstellenden Ergebnisse möglich. Dabei ist bei der elektronisch geregelten Variante erneut das Problem bei geringen Staudrücken vorhanden und bei der konventionellen Variante der negative Einfluss des Anfahrspunges der Druckwaage.

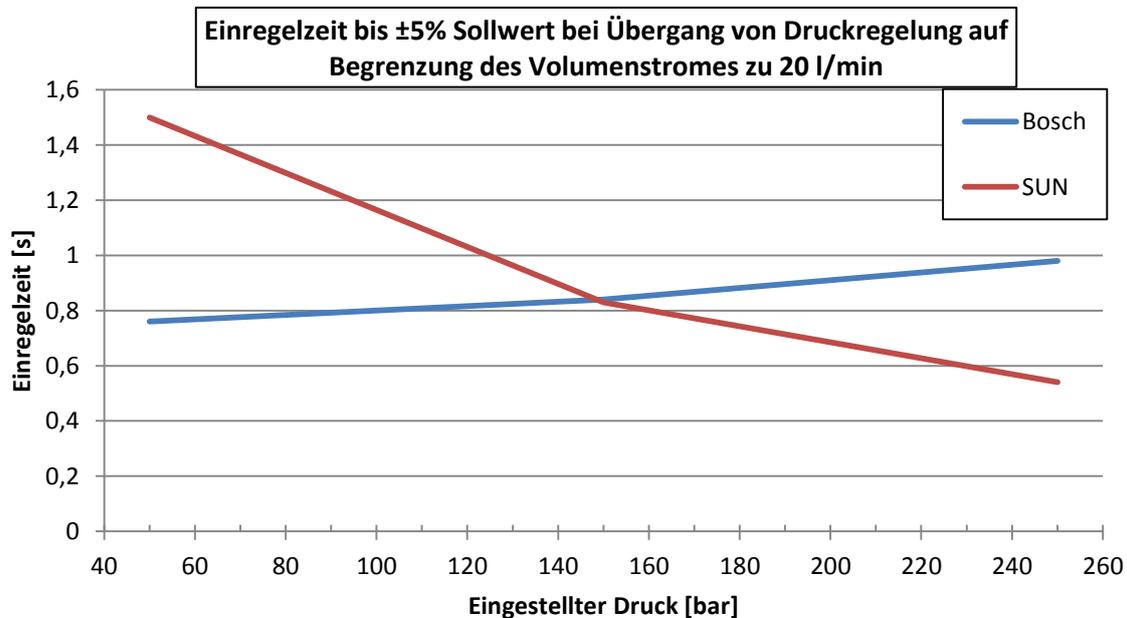


Abb. 98: Vergleich der Einregelzeiten bei Übergangstest, Quelle: Eigene Darstellung.

12. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel des vorliegenden Projektes war es, eine Schaltung durch Kombination verschiedenster Ventile aufzubauen, um eine Regelung der Prozessgrößen Druck und Volumenstrom über einen möglichst großen Bereich realisieren zu können. Dabei sollten die von der TEST-FUCHS GmbH standardmäßig verwendeten Messmittel eingesetzt werden und somit der Schwerpunkt der Arbeit bei der Suche nach geeigneten Stellelementen liegen.

Zur Bestimmung der Einflussgrößen auf das Verhalten des Systems wurde in Kapitel 4 anhand eines einfachen Systems für Druckregelung eine mathematische Beschreibung des Regelkreises durchgeführt. Dabei wurde bewiesen, dass die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Kreisverstärkung die folgenden sind:

- hydraulische Kapazität C_H und damit das Ölvolumen im System
- Eigenfrequenz des Ventils ω_V
- Volumenstrom-Signalverstärkung V_{Qy}

Geht man davon aus, dass das Ventil die begrenzende Komponente darstellt, kann somit durch Beachten einiger Punkte ein System mit guter Kreisverstärkung erreicht werden. Als wichtige Einflussfaktoren sind dabei die Länge der Verbindungsleitungen zum Prüfling, welche das Ölvolumen beeinflussen und die Höhe des Versorgungsdruckes, welche sowohl auf die Eigenfrequenz als auch auf die Volumenstrom-Signalverstärkung einen Einfluss hat. Bei der Wahl der Komponenten ist ein Ventil zu verwenden, das eine möglichst hohe Eigenfrequenz aufweist.

In diesem Projekt waren die Kosten der Komponenten ein dominierendes Kriterium, weshalb auf die Verwendung von hochdynamischen Servoventilen für Plattenaufbau verzichtet wurde. Stattdessen wählte man als Schritt zur Verbesserung den Ansatz, dass der Bereich bei niedrigen Parametern durch ein parallel geschaltetes NG6 Regelventil abgedeckt werden soll. Für hohe Volumenströme wurde ein, dem bisher verwendeten Ventil, ähnliches 3-Wege-Regelventil mit geringfügig besseren dynamischen Werten vorgesehen.

Im durchgeführten Test stellte sich jedoch heraus, dass das ATOS Ventil aufgrund der Dichtungen am Hauptschieber deutliche Anzeichen von Stick-Slip-Verhalten aufweist, welche auch durch Anlegen eines Brummsignals nicht verringert werden konnten. Daher wurde das bisher eingesetzte Bosch 3-Wege-Regelventil und parallel dazu das NG6 Regelventil aufgebaut. Dabei stellte sich heraus, dass die Schwächen dieser Komponente hauptsächlich bei hohem Volumenstrom und niedrigem Staudruck liegen, wobei auch das NG6 Ventil das System nicht beeinflussen kann.

Als zweite Verbesserungsmöglichkeit wurde der Einsatz von konventionellen Komponenten, welche die Prozessgrößen mittels Kräftegleichgewicht konstant halten, in Betracht gezogen. Dabei stellte sich heraus, dass auch mit einer einfachen Lösung bereits gute Ergebnisse hinsichtlich Regelzeiten zu erreichen sind. Die angegebenen Schwachstellen sind jedoch für den Einsatz als Standardlösung zu dominierend, weshalb auch diese Variante für die vorliegende Aufgabenstellung nicht optimal ist. Dagegen würde bei einem Prüfstand, bei dem die geforderten Parameter mittels Handrad eingestellt werden, diese Variante eine gute, einfache und kostengünstige Lösung darstellen.

Da alle drei Lösungsvarianten in gewissen Bereichen Schwierigkeiten hatten, wurde die Problemstellung im Zuge dieser Arbeit nicht gelöst. Abschließend können allerdings, da anhand der Testergebnisse die kritischen Betriebspunkte und deren Ursachen bekannt sind, für zukünftige Projekte die Kriterien zur Auswahl der Komponenten angegeben werden.

Dabei sind bei der Suche nach Stellelementen für einen hydraulischen Prüfstandsregler folgende Punkte zu beachten:

- Die Regelung mittels Regel-Wegeventilen lässt sich aufgrund der vielseitigen Optimierungsmöglichkeiten besser an die Anforderungen anpassen, weshalb diese Variante vorzuziehen ist.
- Das Ventil darf keinesfalls Dichtungen am Hauptschieber aufweisen, da diese Rückgleiten verursachen.
- Aufgrund des asymmetrischen Aufbaus der verwendeten 3-Wege-Einbauventile, beeinflusst der Staudruck das Systemverhalten stark. Hier sollten die höheren Kosten für ein Regelventil in Plattenbauweise hingenommen und diese Bauform für einen Weitbereichsregler eingesetzt werden.

Beachtet man diese Punkte, kann eine Schaltung realisiert werden, welche auch über einen großen Bereich stabil regelbar ist.

13. Literaturverzeichnis

- 1 Atos spa (Hrsg.) (2015): *Proportional 3-way cartridges*, digital, ohne Verlagsangaben. http://www.atos.com/english/technical_tables/english/FS340.pdf [Stand 21.02.2016].
- 2 Bauer, Gerhard (2011): *Ölhydraulik*, Grundlagen, Bauelemente, Anwendungen, 10. aktualisierte und ergänzte Auflage, Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, Wiesbaden. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-8244-8>.
- 3 Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2003a): *Hydraulik. Grundlagen und Komponenten*, Der Hydraulik Trainer, Band 1, 3. Ausgabe, OMEGON Fachliteratur, Ditzingen.
- 4 Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2003b): *Proportional- und Servoventil-Technik*, Der Hydraulik Trainer, Band 2, 2. Auflage, ohne Verlagsangaben.
- 5 Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2004): *Hydraulik in Theorie und Praxis*, Bosch Rexroth. The Drive & Control Company, 3. Auflage, ohne Verlagsangaben.
- 6 Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2005): *3-Wege-Regelventile, Blockeinbau, vorgesteuert, mit induktivem Wegaufnehmer*, Typ 3WRCB 25...50, ohne Verlagsangaben. http://www.boschrexroth.com/various/utilities/mediadirectory/index.jsp?publication=NET&ccat_id=20000&remindCcat=on&pagesize=50&search_action=submit&language=de&search_query=29217&MEDIA_TYPE=Datenblatt&History=p549553&DisplayType=tile [Stand 21.02.2016].
- 7 Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2012): *Servo-Wegeventil in 4-Wege-Ausführung*, Typ 4WSE3E 32, ohne Verlagsangaben. http://www.boschrexroth.com/various/utilities/mediadirectory/index.jsp?publication=NET&ccat_id=20000&remindCcat=on&pagesize=50&search_action=submit&language=de&search_query=29622&MEDIA_TYPE=Datenblatt&History=p549564&DisplayType=tile [Stand 21.02.2016].
- 8 Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2013a): *Produktkatalog Industriehydraulik*, Teil 4: Schaltventile, ohne Verlagsangaben. www.boschrexroth.com/various/utilities/mediadirectory/download/index.jsp?object_nr=R999000295 [Stand 21.02.2016].
- 9 Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2013b): *Proportional-Druckbegrenzungsventil direktgesteuert, ohne/mit integrierter Elektronik (OBE)*, Typ DBET und DBETE, ohne Verlagsangaben. http://www.boschrexroth.com/various/utilities/mediadirectory/index.jsp?publication=NET&ccat_id=20000&remindCcat=on&pagesize=50&search_action=submit&language=de&search_query=29162&MEDIA_TYPE=Datenblatt&History=p548346&DisplayType=tile [Stand 21.02.2016].
- 10 Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2015): *Regel-Wegeventile, direktgesteuert, mit elektrischer Wegrückführung und integrierter Elektronik (OBE)*, Typ 4WRPEH, ohne Verlagsangaben. http://www.boschrexroth.com/various/utilities/mediadirectory/index.jsp?publication=NET&ccat_id=20000&remindCcat=on&pagesize=50&search_action=submit&language=de&search_query=29035&MEDIA_TYPE=Datenblatt&History=p549448&DisplayType=tile [Stand 21.02.2016].
- 11 HAWE Hydraulik SE (Hrsg.) (2015): *Wegesitzventile Typ WN und WH*, leckölfrei dicht(Typ WN auch als Wegeschieber), ohne Verlagsangaben. <http://downloads.hawe.com/7/4/D7470A1-de.pdf> [Stand 21.02.2016].

- 12 Hochleitner, Heinrich (2010a) Technische Universität Graz (Hrsg.): *Fluidtechnik I, Druckflüssigkeiten, Grundlagen - Formeln, Behältergestaltung, Ventile, Speicher, Filter, Heizung und Kühlung*, ohne Verlagsangaben.
- 13 Hochleitner, Heinrich (2010b) Technische Universität Graz (Hrsg.): *Proportional- und Servotechnik*, Teil 1: Proportionalhydraulik, ohne Verlagsangaben.
- 14 Hochleitner, Heinrich (2010c) Technische Universität Graz (Hrsg.): *Proportional- und Servotechnik*, Teil 3: Regelungstechnische Grundsatzbetrachtungen in der Prop- und Servotechnik, ohne Verlagsangaben.
- 15 HYDAC Technology GmbH (Hrsg.) (2015): *Hydac Speichertechnik*, Fluidtechnische Effizienz durch Energiemanagement, ohne Verlagsangaben. <http://www.hydac.com/de-de/service/downloads-software-auf-anfrage/prospekte/speichertechnik.html>, D300-14-08-15_Speicher_Katalogversion.pdf [Stand 21.02.2016].
- 16 International Organization for Standardization (Hrsg.) (2007): *Fluid power systems and components - Graphic symbols and circuit diagrams*, Graphic symbols for conventional use and data-processing applications.
- 17 Keller AG (2008): *Piezoresistive Drucktransmitter*, Absolut-, Relativ- und Differenzdruck, ohne Verlagsangaben. <http://www.keller-druck.com/picts/pdf/german/23g.pdf> [Stand 21.02.2016].
- 18 KLINGER GmbH (Hrsg.) (2012): *Kautschuk und Elastomere*, ohne Verlagsangaben. http://www.klinger.de/fileadmin/pdf/Dichtungen/KLINGER-KGS/KLINGER_Elastomere_Katalog_D.pdf [Stand 21.02.2016].
- 19 Kracht GmbH (Hrsg.) (2012): *Zahnrad-Durchflussmesser VC*, ohne Verlagsangaben. http://kracht.eu/uploads/tx_tproducts/datasheet/VC_DE_01-12_neu.pdf [Stand 21.02.2016].
- 20 Matthies, Hans Jürgen; Renius, Karl Theodor (2014): *Einführung in die Ölhydraulik*, Für Studium und Praxis, 8., überarb. und erw. Aufl., Springer Vieweg, Wiesbaden. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-06715-1>.
- 21 MOOG HYDROLUX S.a.r.l. (Hrsg.) (2015): *SE3 3/3-Way Servo cartridge valve*, NB30, 50, 63, ohne Verlagsangaben. <http://www.moog.com/literature/ICD/se3series.pdf> [Stand 21.02.2016].
- 22 Murrenhoff, Hubertus (2012): *Servohydraulik - Geregelte hydraulische Antriebe*, Umdruck zur Vorlesung, 4. neu überarb. Aufl., Shaker Verlag, Aachen.
- 23 Shell International Petroleum Company Limited (Hrsg.): *The Aeroshell Book*, 19. Aufl., ohne Verlagsangaben. <http://www.shell.com/content/dam/shell-new/local/corporate/aviation/downloads/pdf/aeroshell-book-2012-2013/theaeroshellbook.pdf> [Stand 21.02.2016].
- 24 Solutia Inc. (2003): *Skydrol*, Type IV Fire Resistant Hydraulic Fluids, ohne Verlagsangaben. http://skydrol-ld4.com/technical_bulletin_skydrol_4.pdf [Stand 21.02.2016].
- 25 Sun Hydraulics Corporation (Hrsg.) (o.J.): *Ölviskositäten, Temperaturen und Reinheitsgrad*. <http://www.sunhydraulics.com/de/tech-resources/%C3%B6lviskosit%C3%A4ten-temperaturen-und-reinheitsgrad> [Stand 21.02.2016].
- 26 Sun Hydraulics Corporation (Hrsg.) (2015): *Modell PSJT*, Hauptstufen-3-Wege-Druckregelventil, direkt gesteuert, betätigt über Anschluss 4. <http://www.sunhydraulics.com/de/model/PSJT>, PSJT_full_DE_metric.pdf [Stand 21.02.2016].
- 27 Tieste, Karl-Dieter; Romberg, Oliver (2015): *Keine Panik vor Regelungstechnik!*, Erfolg und Spaß im Mystery-Fach des Ingenieurstudiums, 3., aktualisierte Aufl., Springer Vieweg, Wiesbaden. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-06348-1>.

28 Zacher, Serge; Reuter, Manfred (2014): *Regelungstechnik für Ingenieure, Analyse, Simulation und Entwurf von Regelkreisen*, 14., korrig. Aufl., Springer Vieweg, Wiesbaden.
<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-2216-1>.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Regelbereich, Quelle: Eigene Darstellung.....	2
Abb. 2: Grundsaltungen geregelter hydraulischer Antrieben, Quelle: Murrenhoff (2012), S. 27.....	7
Abb. 3: Schematischer Aufbau eines Regelkreises, Quelle: Murrenhoff (2012), S. 125.....	8
Abb. 4: Symbol Druckaufnehmer, Quelle: ISO 1219-1, S. 61.....	8
Abb. 5: Volumenstrommessgeräte, Quelle: In Anlehnung an Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2004), S. 232.	9
Abb. 6: Symbol Volumenstrommessgerät, Quelle: ISO 1219-1, S. 63.	9
Abb. 7: Hydraulische Brückenhalbglieder, Quelle: Murrenhoff (2012), S. 31.....	10
Abb. 8: Schematischer Aufbau hydraulischer Weitbereichsregler, Quelle: Eigene Darstellung.	11
Abb. 9: Symbol Druckbegrenzungsventil, Quelle: ISO 1219-1, S. 83.....	12
Abb. 10: Funktion Druckminderventil, Quelle: Bauer (2011), S. 134.	12
Abb. 11: Symbol Druckminderventil, Quelle: ISO 1219-1, S. 83.	12
Abb. 12: Vergleich Drosselschaltungen, Quelle: Eigene Darstellung.	13
Abb. 13: Symbol Drosselventil, Quelle: ISO 1219-1, S. 84.	13
Abb. 14: Stromregelventil, Quelle: Hochleitner (2010a), S. 109.	14
Abb. 15: Gleichrichterschaltung, Quelle: Eigene Darstellung.	14
Abb. 16: Schaltüberdeckung, Quelle: Hochleitner (2010a), S. 135.	16
Abb. 17: Torque Motor, Quelle: Hochleitner (2010b), S. 43.	16
Abb. 18: Servoventil, Quelle: Bauer (2011), S. 162.	17
Abb. 19: Regelventil NG10, Quelle: Bauer (2011), S. 179.	17
Abb. 20: Brückenhalbglied A, Quelle: Murrenhoff (2012), S. 165.....	18
Abb. 21: Lineares Modell eines Servoventils, Quelle: Murrenhoff (2012), S. 239.....	21
Abb. 22: Wirkungsplan eines PID Reglers, Quelle: Hochleitner (2010c), S. 14.....	22
Abb. 23: Zylinder als Antrieb, Quelle: Murrenhoff (2012), S. 165.....	22
Abb. 24: Regelkreis für Druckregelung, Quelle: Eigene Darstellung.	23
Abb. 25: Einfluss des Betriebsdruckes auf die Kennfrequenz, Quelle: Murrenhoff (2012), S. 83.....	26
Abb. 26: Keller PR23 Druckmessumformer, Quelle: Keller AG (2008), S. 1.....	27
Abb. 27: Kracht VC Zahnrad durchflussmesser, Quelle: Kracht GmbH (Hrsg.) (2012), S. 1.	28
Abb. 28: Schaltung zur Volumenstrommessung, Quelle: Eigene Darstellung.	28
Abb. 29: Bosch 3WCBH32, Quelle: Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2005), S. 3.....	29
Abb. 30: Bosch 4WRPEH6, Quelle: Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2015), S. 4.	29
Abb. 31: ATOS LIQZO, Quelle: Atos spa (Hrsg.) (2015), S. 1.....	31
Abb. 32 Moog SE3, Quelle: MOOG HYDROLUX S.a.r.l. (Hrsg.) (2015), S. 3.	32

Abb. 33: Bosch 3WSE3E32, Quelle Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2012), S. 3.	33
Abb. 34: Sun PSJT, Quelle: Sun Hydraulics Corporation (Hrsg.) (2015), S. 1 Onlinequelle [21.02.2016].	34
Abb. 35: Stromregelung im Ablauf, Quelle: Eigene Darstellung.	35
Abb. 36: Abgesicherte Stromregelung im Ablauf, Quelle: Eigene Darstellung.	35
Abb. 37: Sun LHHT, Quelle: Sun Hydraulics Corporation (Hrsg.) (2015), S. 1 Onlinequelle [21.02.2016].	36
Abb. 38: Schaltplan der elektronisch geregelten Variante mit Bosch Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.	37
Abb. 39: Kombinierte Lageregelung, Quelle: Eigene Darstellung.	38
Abb. 40: Schaltplan der elektronisch geregelten Variante mit ATOS Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.	40
Abb. 41: Schaltplan der konventionellen Variante, Quelle: Eigene Darstellung.	42
Abb. 42: HPM-S-NR-60-50, Quelle: Eigene Darstellung.	45
Abb. 43: Schematische Versorgung des Testaufbaus, Quelle: Eigene Darstellung.	46
Abb. 44: Versorgungsaufbau, Quelle: Eigene Darstellung.	46
Abb. 45: Belastungsaufbau, Quelle: Eigene Darstellung.	48
Abb. 46: Bosch 4WRPEH, Quelle: Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2015), S. 4.	49
Abb. 47: Drossel MG30, Quelle: Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2015), S. 1181.	49
Abb. 48: Testaufbau, Quelle: Eigene Darstellung.	50
Abb. 49: Schematische Schaltung für Test des Druckreglers im Zulauf, Quelle: Eigene Darstellung.	52
Abb. 50: Schematische Schaltung für Test des Druckreglers im Ablauf, Quelle: Eigene Darstellung.	53
Abb. 51: Schematische Schaltung für Test des Druckreglers bei Übergang von Zulauf auf Ablauf, Quelle: Eigene Darstellung.	54
Abb. 52: Schematische Schaltung für Test des Stromreglers im Zulauf, Quelle: Eigene Darstellung.	55
Abb. 53: Schematische Schaltung für Test des Stromreglers im Ablauf bis 50 l/min, Quelle: Eigene Darstellung.	56
Abb. 54: Schematische Schaltung für Test des Stromreglers im Ablauf über 50 l/min, Quelle: Eigene Darstellung.	57
Abb. 55: Schematische Schaltung für Test des Stromregler im Ablauf über 50 l/min, Quelle: Eigene Darstellung.	58
Abb. 56: Hydraulikschaltplan Testaufbau Variante ATOS, Quelle: Eigene Darstellung.	60
Abb. 57: Ergebnis Stick-Slip Test Variante ATOS mit Messung Pilotdruck, Quelle: Eigene Darstellung.	62
Abb. 58: Hauptstufe des ATOS LIQZO, Quelle: In Anlehnung an Atos spa (Hrsg.) (2015), S. 1.	62
Abb. 59: Ergebnis Stick-Slip Test Variante ATOS mit Dithersignal, Quelle: Eigene Darstellung.	63
Abb. 60: Hydraulikschaltplan Testaufbau Variante Bosch, Quelle: Eigene Darstellung.	64

Abb. 61: Ergebnis Stick Slip Test Variante Bosch, Quelle: Eigene Darstellung.....	65
Abb. 62: Zeitverlauf bei Sprungverfahren, Quelle: Tieste/Romberg (2015), S. 133.....	66
Abb. 63: Parametereinstellung bei Sprungverfahren, Quelle: Tieste/Romberg (2015), S. 134.	66
Abb. 64: Parametereinstellung bei der Methode des Stabilitätsrandes, Quelle: Tieste/Romberg (2015), S. 132.	67
Abb. 65: Verlauf P_{krit} und Ventilposition über Δp , Quelle: Eigene Darstellung.	68
Abb. 66: Verlauf Drosselfläche über Istwert mit Bosch 3WRCBH, Quelle: Eigene Darstellung.	69
Abb. 67: Faktoren Δp Kompensation, Quelle: Eigene Darstellung.	70
Abb. 68: Testergebnis Zulaufdrucktest bei 250 bar mit Δp -Kompensation am Bosch Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.	72
Abb. 69: Zeitmessung bei Sprung von 0 l/min auf max. Volumenstrom im Zulaufdrucktest, Quelle: Eigene Darstellung.....	73
Abb. 70: Kräfte zum Öffnen des Bosch 3WRCBH, Quelle: In Anlehnung an Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2005), S. 1.....	74
Abb. 71: Testergebnis Zulaufdrucktest bei 2 bar ohne Δp -Kompensation am Bosch Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.	74
Abb. 72: Hydraulikschaltplan Testaufbau mit Schlauch, Quelle: Eigene Darstellung.	75
Abb. 73: Testergebnis Drucktest im Zulauf bei 275 bar mit Schlauch und Bosch Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.....	75
Abb. 74: Testergebnis Vorlaufdrucktest bei 275 bar mit Schlauch und Bosch Regelventil, Bereich ab 15s, Quelle: Eigene Darstellung.	76
Abb. 75: Testergebnis Ablaufdrucktest bei 100 bar mit Δp -Kompensation am Bosch Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.	77
Abb. 76: Testergebnis Übergangstest bei 275 bar mit Δp -Kompensation am Bosch Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.	79
Abb. 77: Kritisches Verhalten bei 0 % Istwert der Variante Bosch, Quelle: Eigene Darstellung.....	80
Abb. 78: Testergebnis Zulaufstromtest bei 210 l/min mit Bosch Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.....	82
Abb. 79: Testergebnis Ablaufstromtest bei 50 l/min mit Bosch Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.....	83
Abb. 80: Testergebnis Übergangstest bei 250 bar und 150 l/min mit Bosch Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.....	84
Abb. 81: Hydraulikschaltplan Testaufbau konv. Variante, Quelle: Eigene Darstellung.	86
Abb. 82: SUN PSJT inkl. Pilotventil, Quelle: Eigene Darstellung.	87
Abb. 83: p/Q Kennlinie DBET, Quelle: Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2013b), S. 10.....	87
Abb. 84: Kennlinie Bosch 2FRM6, Quelle: Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2013a), S. 1254.....	87
Abb. 85: Testergebnis Zulaufdrucktest mit konv. Variante bei 250 bar, Quelle: Eigene Darstellung.....	88
Abb. 86: Testergebnis Ablaufdrucktest mit konv. Variante bei 100 bar, Quelle: Eigene Darstellung.....	89

Abb. 87: Testergebnis Übergangsdrucktest mit konv. Variante bei 275 bar, Quelle: Eigene Darstellung.....	90
Abb. 88: SUN LHHT und Drosselventil, Quelle: Eigene Darstellung.....	92
Abb. 89: Schematische Darstellung und Schnittzeichnung des Sun LHHT, Quelle: Sun Hydraulics Corporation (Hrsg.) (2015), S. 1 Onlinequelle [21.02.2016].....	92
Abb. 90: Öffnen der Druckwaage bei hohem Volumenstrom, Quelle: Eigene Darstellung. ...	93
Abb. 91: Testergebnis Zulaufstromtest bei 100 l/min mit konv. Variante, Quelle: Eigene Darstellung.....	94
Abb. 92: Testergebnis Ablaufstromtest bei 50 l/min mit konv. Variante, Quelle: Eigene Darstellung.....	95
Abb. 93: Testergebnis Übergangstest bei 250 bar und 100 l/min mit konv. Variante, Quelle: Eigene Darstellung.....	96
Abb. 94: Vergleich der Einregelzeiten bei Zulaufdrucktest, Quelle: Eigene Darstellung.....	98
Abb. 95: Vergleich der Einregelzeiten bei Übergangsdrucktest, Quelle: Eigene Darstellung.....	98
Abb. 96: Vergleich der Einregelzeiten bei Zulaufstromtest, Quelle: Eigene Darstellung.....	99
Abb. 97: Vergleich der Einregelzeiten bei Übergangstest, Quelle: Eigene Darstellung.....	100
Abb. 98: Vergleich der Einregelzeiten bei Übergangstest, Quelle: Eigene Darstellung.....	100

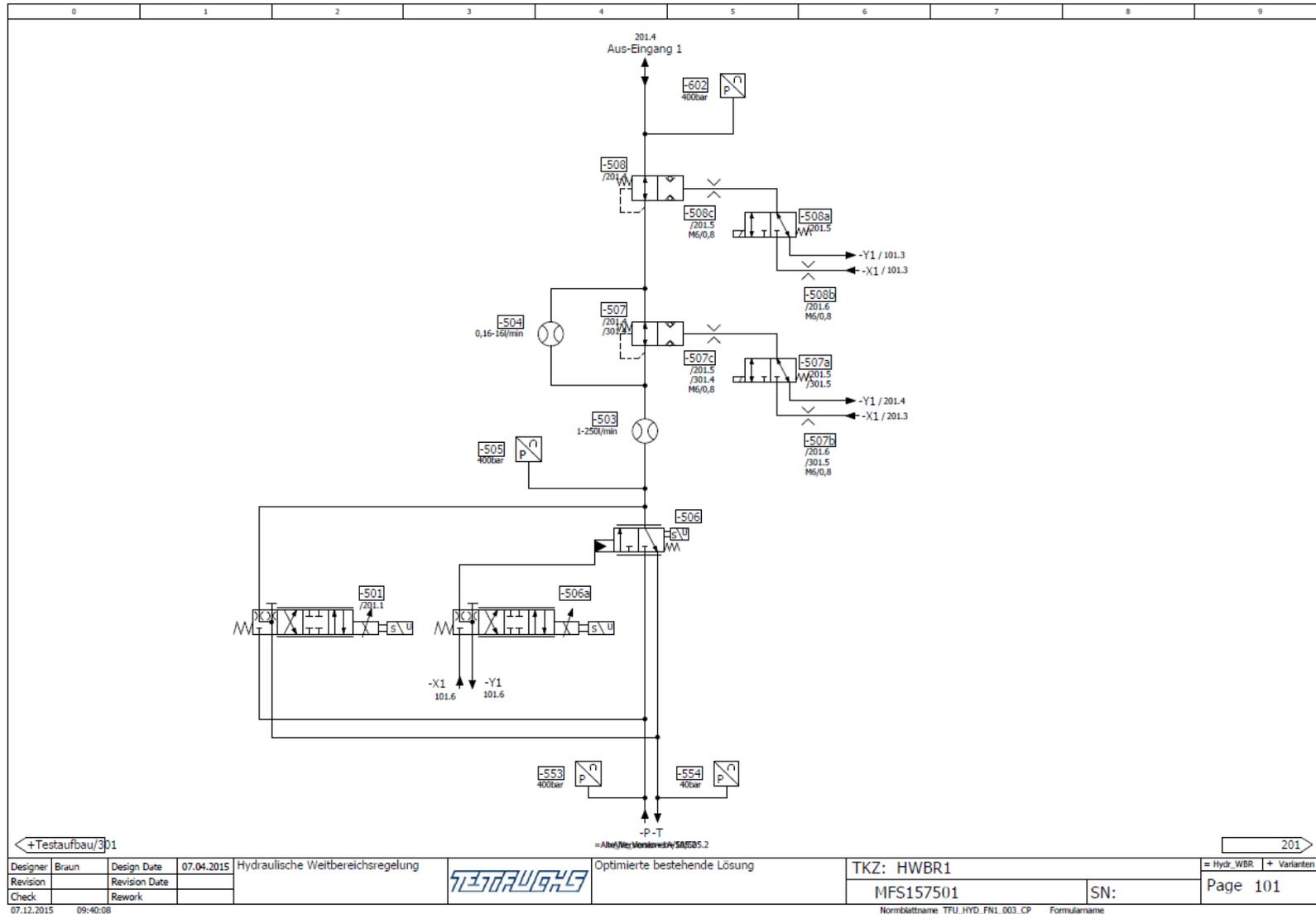
Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Technische Spezifikation, Quelle: Eigene Darstellung.....	2
Tab. 2: Viskositätswerte Skydrol® LD-4, Quelle: In Anlehnung an Solutia Inc. (2003), S. 4... 3	3
Tab. 3: Viskositätswerte AeroShell® Fluid 41, Quelle: In Anlehnung an Shell International Petroleum Company Limited (Hrsg.), S. 106.	4
Tab. 4: Zusammenfassung der Anforderungen, Quelle: Eigene Darstellung.....	6
Tab. 5: Zusammenhang Überhöhung und Dämpfung, Quelle: Murrenhoff (2012), S. 201. ...	25
Tab. 6: Auszug technische Daten Keller PA23, Quelle: In Anlehnung an Keller AG (2008), S. 2.....	27
Tab. 7: Auszug technische Daten Kracht VC, Quelle: In Anlehnung an Kracht GmbH (Hrsg.) (2012), S. 5ff.	28
Tab. 8: Auszug technische Daten 3WRCBH, Quelle: In Anlehnung an Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2005), S. 2ff.....	30
Tab. 9: Auszug technische Daten 4WRPEH6, Quelle: In Anlehnung an Bosch Rexroth AG (Hrsg.) (2015), S. 2ff.....	30
Tab. 10: Auszug technische Daten LIQZO, Quelle: In Anlehnung an Atos spa (Hrsg.) (2015), S. 2ff.....	32
Tab. 11: Vergleich der Einbauventile, Quelle: Eigene Darstellung.	33
Tab. 12: Auszug technische Daten PSJT, Quelle: In Anlehnung an Sun Hydraulics Corporation (Hrsg.) (2015), S. 1 Onlinequelle [21.02.2016].	34
Tab. 13: Auszug technische Daten LHHT, Quelle: In Anlehnung an Sun Hydraulics Corporation (Hrsg.) (2015), S. 1 Onlinequelle [21.02.2016].	36
Tab. 14: Eingesetzte Druckaufnehmer, Quelle: Eigene Darstellung.....	38
Tab. 15: Kosten Variante Bosch, Quelle: Eigene Darstellung.	39
Tab. 16: Kosten Variante ATOS, Quelle: Eigene Darstellung.	41
Tab. 17: Kosten konventionelle Variante, Quelle: Eigene Darstellung.	43
Tab. 18: Vor- und Nachteile Variante Bosch, Quelle: Eigene Darstellung.	44
Tab. 19: Vor- und Nachteile Variante ATOS, Quelle: Eigene Darstellung.	44
Tab. 20: Vor- und Nachteile konventionelle Variante, Quelle: Eigene Darstellung.	44
Tab. 21: Technische Daten Versorgungsprüfstand, Quelle: Eigene Darstellung.	45
Tab. 22: Verschraubungstypen Testaufbau, Quelle: Eigene Darstellung.	50
Tab. 23: Kennzahlen Regelventile, Quelle: In Anlehnung an Hochleitner (2010b), S. 71ff. ...	51
Tab. 24: Druckstufen Zulaufttest, Quelle: Eigene Darstellung.....	52
Tab. 25: Druckstufen Ablauftest, Quelle: Eigene Darstellung.....	53
Tab. 26: Druckstufen Übergangstest, Quelle: Eigene Darstellung.	54
Tab. 27: Volumenstromstufen Zulaufttest, Quelle: Eigene Darstellung.	55
Tab. 28: Volumenstromstufen Ablauf bis 50 l/min, Quelle: Eigene Darstellung.	56
Tab. 29: Volumenstromstufen Ablauf ab 50 l/min, Quelle: Eigene Darstellung.	57
Tab. 30: Einstellwerte für Übergangstest bei p/Q Regelung, Quelle: Eigene Darstellung.....	59

Tab. 31: Druckstufen Zulaufstest, Quelle: Eigene Darstellung.....	67
Tab. 32: Berechnete Reglerparameter Druckregelung, Quelle: Eigene Darstellung.....	71
Tab. 33 Angepasste Reglerparameter Druckregelung, Quelle: Eigene Darstellung.	71
Tab. 34: Ergebnisse Zulaufdrucktest mit Bosch Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.	73
Tab. 35: Testergebnisse Vorlaufdrucktest mit Schlauch und Bosch Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.	76
Tab. 36: Ergebnisse Ablaufdrucktest Variante Bosch, Quelle: Eigene Darstellung.	78
Tab. 37: Ergebnisse Übergangsdruktest Variante Bosch, Quelle: Eigene Darstellung.	79
Tab. 38: Ergebnisse Methode des Stabilitätsrandes bei Volumenstromregelung, Quelle: Eigene Darstellung.	81
Tab. 39: Reglerparameter für Stromregler, Quelle: Eigene Darstellung.	82
Tab. 40: Ergebnisse Zulaufstromtest mit Bosch Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.	82
Tab. 41: Ergebnisse Ablaufstromtest bis 50 l/min mit Bosch Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.	83
Tab. 42: Ergebnisse Übergangstest mit Bosch Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.....	84
Tab. 43: Ergebnisse Zulaufdrucktest mit konv. Variante, Quelle: Eigene Darstellung.	88
Tab. 44: Ergebnisse Ablaufdrucktest, Quelle: Eigene Darstellung.	90
Tab. 45: Ergebnisse Übergangsdruktest mit konv. Variante, Quelle: Eigene Darstellung....	91
Tab. 46: Ergebnisse Zulaufstromtest mit konv. Variante, Quelle: Eigene Darstellung.	94
Tab. 47: Ergebnisse Ablaufstromtest bis 50 l/min mit konv. Variante, Quelle: Eigene Darstellung.	95
Tab. 48: Ergebnisse Übergangstest konv. Variante, Quelle: Eigene Darstellung.	97

Anhang

Anhang A: Hydraulikschaltpläne und Stückliste Lösungsvariante



Schülername nach DIN ISO 15016 beachten
Observe the security warning i.a.w. DIN ISO 15016
Disavow the note of accuracy secondo DIN ISO 15016

Abb. A-1: Hydraulikschaltplan elektronisch geregelte Variante mit Bosch Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.

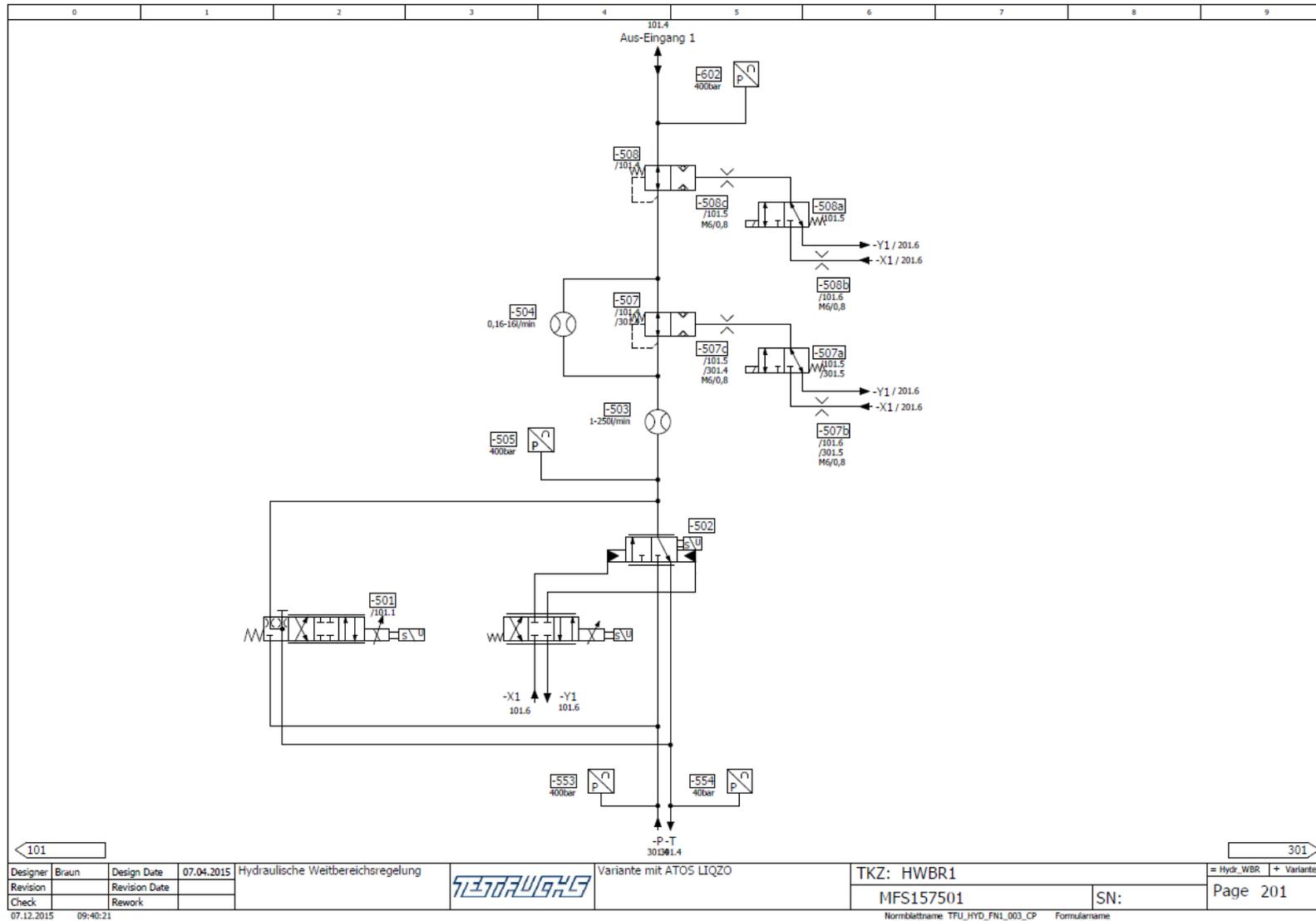


Abb. A- 2: Hydraulikschaltplan elektronisch geregelte Variante mit ATOS Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.

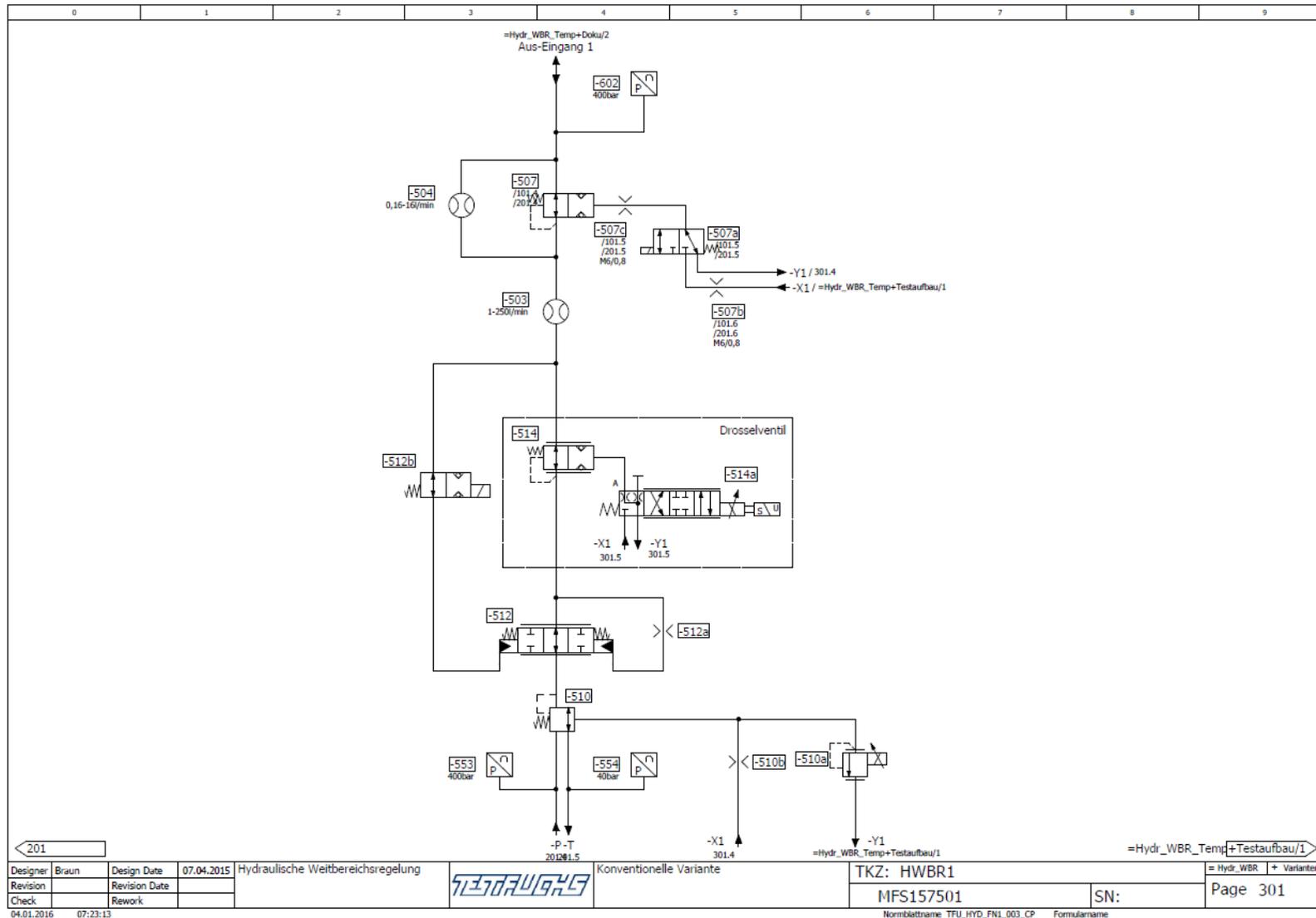


Abb. A- 3: Hydraulikschaltplan konventionelle Variante, Quelle: Eigene Darstellung.

Stückliste / Part List							
BMK Designation	Seite Page	Gerät Device	Type Type	Stk. Pcs.	Hersteller Manufacturer	TF Art-Nr. TF Item-No.	
=Hydr_WBR+Varianten-501	101.1	Regelventil SO150	4WRPEH6C3B40L-2X/G24K0/A1M (0811404603)	2 STK	Test-Fuchs	104180761	
=Hydr_WBR+Varianten-502	201.4	3-Wege-Regelventil	LIQZO-LEB-5N-NP-323L4	1 STK	ATOS	104180870	
=Hydr_WBR+Varianten-503	101.4	Volumenzähler	VC 5 E1 PS/155 1-250l/min/400bar blank	3 STK	Kracht GmbH	104100382	
=Hydr_WBR+Varianten-504	101.4	Volumenzähler	VC0,2 E1PS/156 0,16-16l/min/400bar blank	3 STK	Kracht GmbH	104100389	
=Hydr_WBR+Varianten-505	101.3	Druckmessumformer mit Zertifikat	PA23/8465.03-400bar KI0,15 AP5405M 4-20m	2 STK	Keller AG	104070986	
=Hydr_WBR+Varianten-506	101.4	Regelventil	0.811.402.611	1 STK	Rexroth Bosch Group	104180320	
=Hydr_WBR+Varianten-506a	101.3	Regelventil	4WRPEH6C3B24L-2X/G24K0/A1M	1 STK	Rexroth Bosch Group	104180524	
=Hydr_WBR+Varianten-507	101.4	Hülse von 2/2-Wege-Normcartridge	M605079-1, NW32	3 STK	Test-Fuchs	107090688	
=Hydr_WBR+Varianten-507	101.4	Steuerkolben von 2/2-Wege-Normcartridge	M605079-2, NW32, Schalt-/Regelventil	3 STK	Test-Fuchs	107090689	
=Hydr_WBR+Varianten-507	101.4	Aufstoßfederführung NW32 für Cartridge	M552273, DL=19mm	3 STK	Test-Fuchs	107090719	
=Hydr_WBR+Varianten-507	101.4	Druckfeder	D-222C	3 STK	Gutekunst + Co	107020497	
=Hydr_WBR+Varianten-507a	101.5	Wegeventil	WH1H-G24-SKY	3 STK	Hawe Hydraulik	104180473	
=Hydr_WBR+Varianten-507a	101.5	Deckel NG32 für Vorsteuerventil	M893084-2; HAWE WH 1 H	3 STK	Test-Fuchs	107504634	
=Hydr_WBR+Varianten-507b	101.6	Düse	M1097269-7, M6/0,8	3 STK	Test-Fuchs	107090192	
=Hydr_WBR+Varianten-507c	101.5	Düse	M1097269-7, M6/0,8	3 STK	Test-Fuchs	107090192	
=Hydr_WBR+Varianten-508	101.4	Hülse von 2/2-Wege-Normcartridge	M605079-1, NW32	2 STK	Test-Fuchs	107090688	

+ Testaufbau/5											
Designer	Braun	Design Date	07.04.2015	Hydraulische Weitbereichsregelung				Stückliste Hydraulik		TKZ: HWBR1	
Revision		Revision Date								= Hydr_WBR + Varianten	
Check		Rework						MPA157501		SN: Page 1	
04.01.2016 07:40:12								Normblattname: TFU_HYD_FN1_003_CP Formularname		TFU_HYD_MPA_F01_001	

Osservare le note di sicurezza secondo DIN ISO 18016
 Observe the safety warnings i.a.w. DIN ISO 18016
 Schutzwinkel nach DIN ISO 18016 beachten

Tab. A- 1: Stückliste Lösungsvarianten Seite 1, Quelle: Eigene Darstellung.

Stückliste / Part List							
BMK Designation	Seite Page	Gerät Device	Type Type	Stk. Pcs.	Hersteller Manufacturer	TF Art-Nr. TF Item-No.	
=Hydr_WBR+Varianten-508	101.4	Steuerkolben von 2/2-Wege-Normcartridge	M605079-2, NW32, Schalt-/Regelventil	2 STK	Test-Fuchs	107090689	
=Hydr_WBR+Varianten-508	101.4	Aufstoßfederführung NW32 für Cartridge	M552273, DL=19mm	2 STK	Test-Fuchs	107090719	
=Hydr_WBR+Varianten-508	101.4	Druckfeder	D-222C	2 STK	Gutekunst + Co	107020497	
=Hydr_WBR+Varianten-508a	101.5	Wegeventil	WH1H-G24-SKY	2 STK	Hawe Hydraulik	104180473	
=Hydr_WBR+Varianten-508a	101.5	Deckel NG32 für Vorsteuerventil	M893084-2; HAWE WH 1 H	2 STK	Test-Fuchs	107504634	
=Hydr_WBR+Varianten-508b	101.6	Düse	M1097269-7, M6/0,8	2 STK	Test-Fuchs	107090192	
=Hydr_WBR+Varianten-508c	101.5	Düse	M1097269-7, M6/0,8	2 STK	Test-Fuchs	107090192	
=Hydr_WBR+Varianten-510	301.4	3-Wege Druckregelventil	PSJT-XFE	1 STK	Sun Hydraulics	104173079	
=Hydr_WBR+Varianten-510a	301.6	Druckbegrenzungsventil	DBET5X/350G24K4M	1 STK	Rexroth Bosch Group	104180038	
=Hydr_WBR+Varianten-510b	301.5	Düse		1 STK		tdb	
=Hydr_WBR+Varianten-512	301.4	Regelement	LHHT-XDE	1 STK	Sun Hydraulics	104173077	
=Hydr_WBR+Varianten-512a	301.4	Düse		1 STK		tdb	
=Hydr_WBR+Varianten-512b	301.3	Wegeventil	VP1-S-1/4-G24	1 STK	Hawe Hydraulik	104180631	
=Hydr_WBR+Varianten-514	301.4	Hülse von Proportional-Drosselventil	M643134-1, NW32, 2-Wege-Ausführung	1 STK	Test-Fuchs	107090696	
=Hydr_WBR+Varianten-514	301.4	Steuerkolben von Prop.-Drosselventil	M643134-2, NW32, 2-Wege-Ausführung	1 STK	Test-Fuchs	107090697	
=Hydr_WBR+Varianten-514	301.4	Aufstoßfederführung NW32 für Cartridge	M552273, DL=19mm	1 STK	Test-Fuchs	107090719	

1			3
Designer	Braun	Design Date	07.04.2015
Revision		Revision Date	
Check		Rework	
Hydraulische Weitbereichsregelung		Stückliste Hydraulik	
TKZ: HWBR1		= Hydr_WBR + Varianten	
MPA157501		SN:	Page 2
04.01.2016	07:43:17	Normblattname	TFU_HYD_FNL_003_CP
		Formularname	TFU_HYD_MPA_F01_001

Osservare le note di sicurezza secondo DIN ISO 10016
 Observe the security warning i.a.w. DIN ISO 16016
 Schutzwarnung nach DIN ISO 16016 beachten

Tab. A- 2: Stückliste Lösungsvarianten Seite 2, Quelle: Eigene Darstellung.

Anhang B: Hydraulikschaltpläne und Stückliste Testaufbau

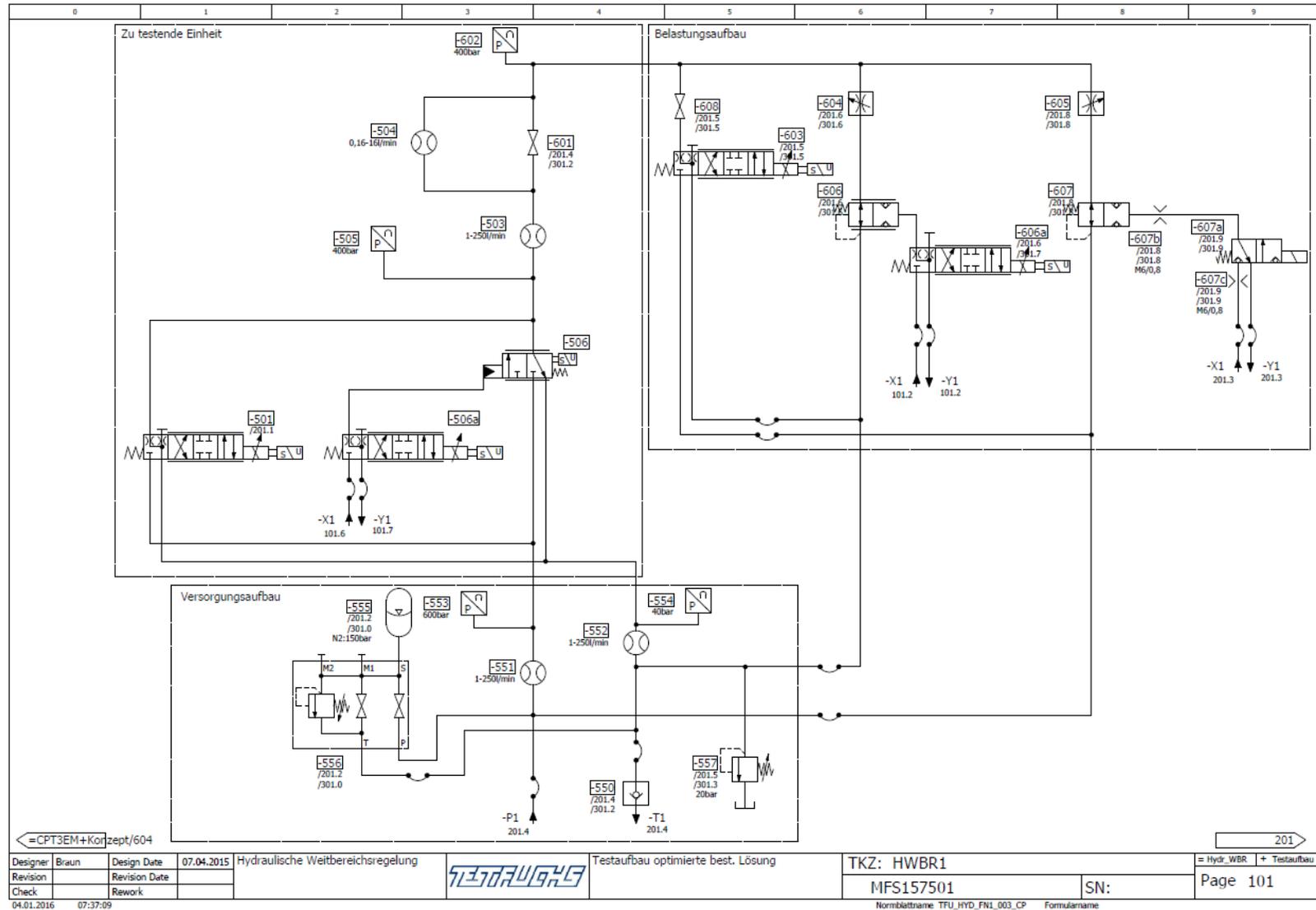
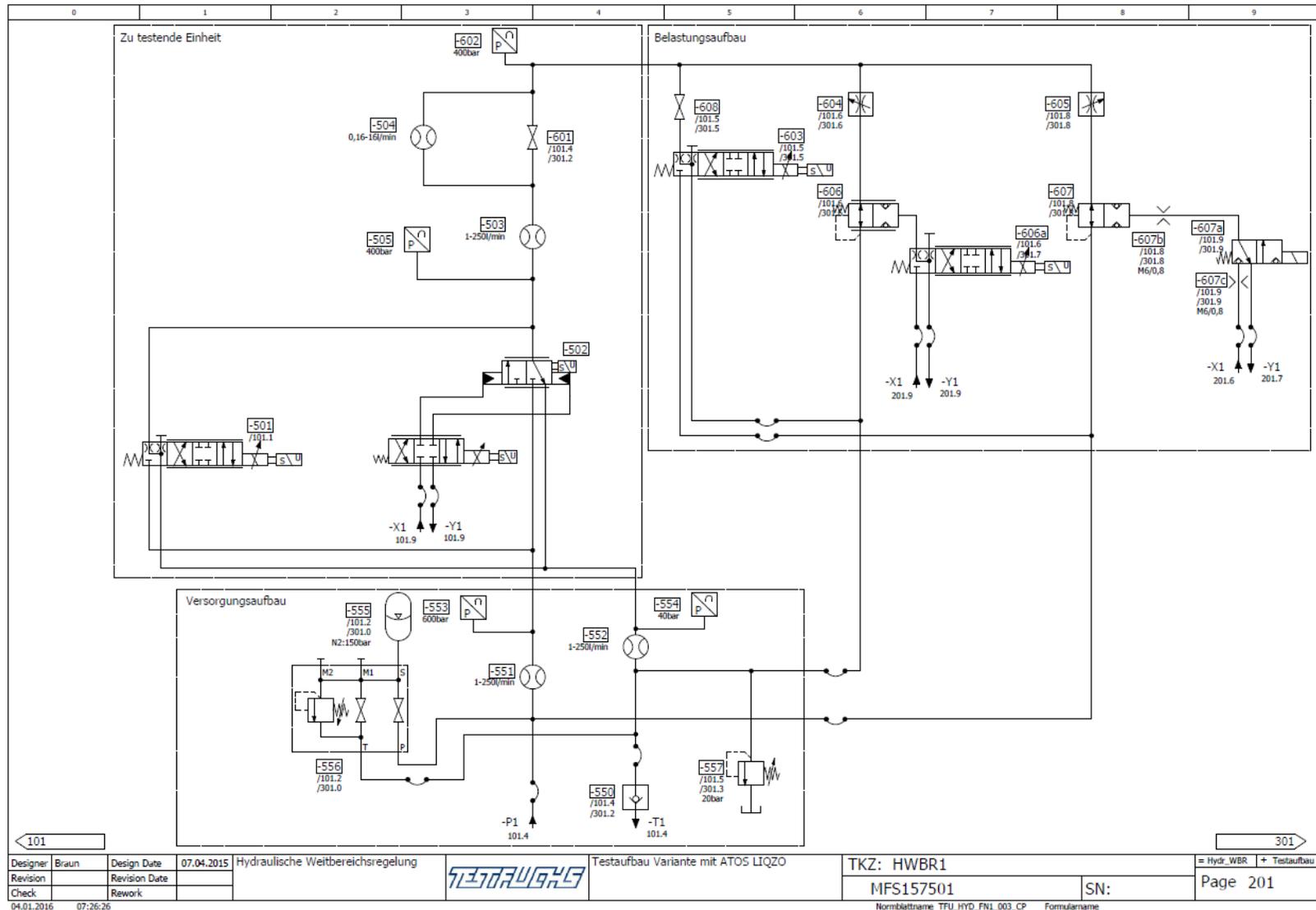


Abb. A- 4: Hydraulikschaltplan Testaufbau Variante Bosch, Quelle: Eigene Darstellung.



Schutzvermerk nach DIN ISO 16016 beachten
Osservare le note di sicurezza secondo DIN ISO 16016

Abb. A- 5: Hydraulikschaltplan Testaufbau Variante ATOS, Quelle: Eigene Darstellung.

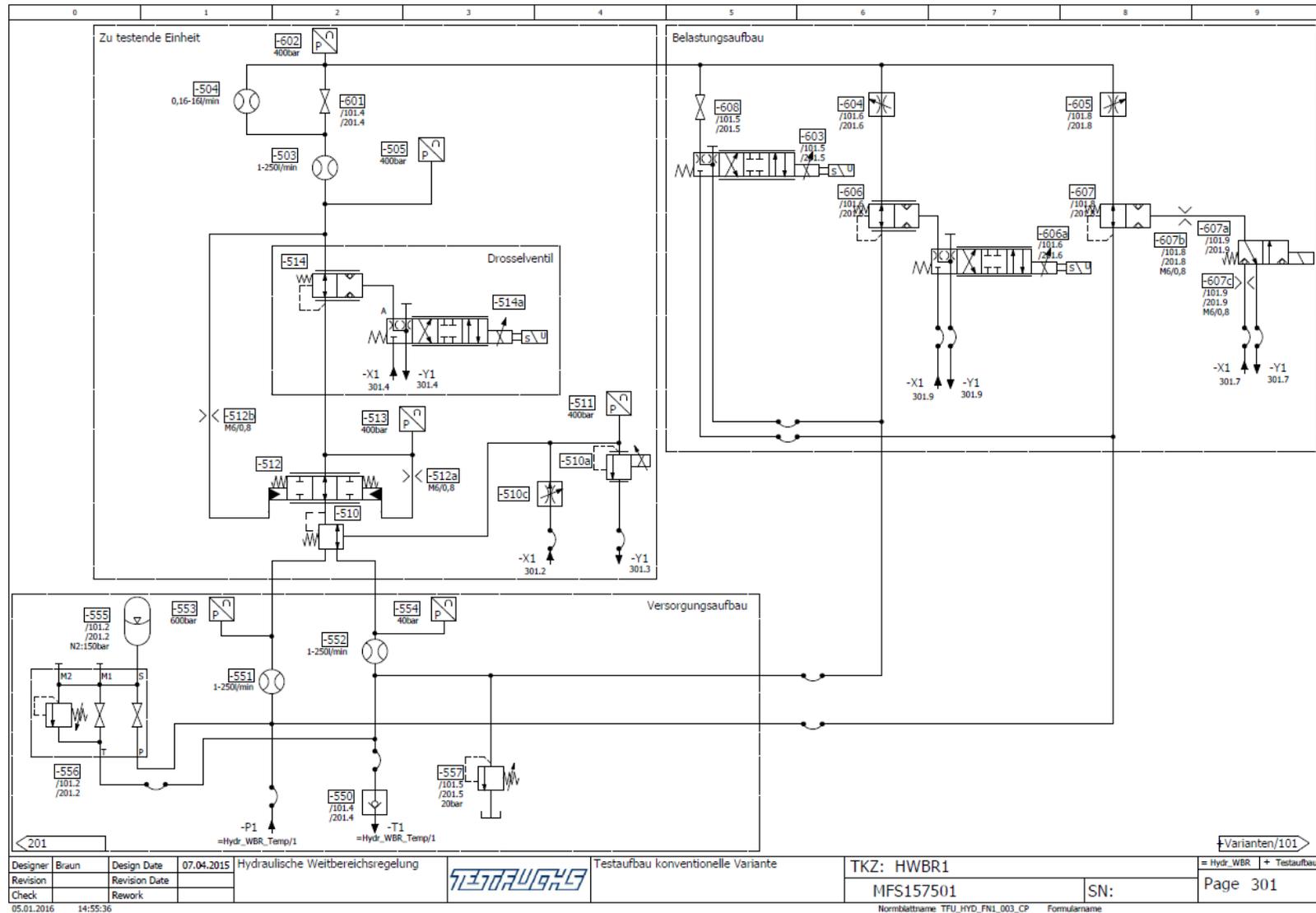


Abb. A- 6: Hydraulikschaltplan Testaufbau konv. Variante, Quelle: Eigene Darstellung.

Stückliste / Part List							
BMK Designation	Seite Page	Gerät Device	Type Type	Stk. Pcs.	Hersteller Manufacturer	TF Art-Nr. TF Item-No.	
=Hydr_WBR+Testaufbau-501	101.1	Regelventil SO150	4WRPEH6C3B40L-2X/G24K0/A1M (0811404603)	2 STK	Test-Fuchs	104180761	
=Hydr_WBR+Testaufbau-501	101.1	Anschlußplatte	R901099586 G 665/01	2 STK	Bosch	104180406	
=Hydr_WBR+Testaufbau-502	201.4	3-Wege-Regelventil	LIQZO-LEB-SN-NP-323L4	1 STK	ATOS	104180870	
=Hydr_WBR+Testaufbau-502	201.4	Aufbaublock NW32 für 3-Wege-Regelventil	M495052, 0 811 402 611 Fa. Bosch	1 STK	Test-Fuchs	107518805	
=Hydr_WBR+Testaufbau-502	201.4	Aufbauplatte für 3/2 Wege- Regelventil	M1084220-1; brüniert	1 STK	Test-Fuchs	107503910	
=Hydr_WBR+Testaufbau-503	101.4	Volumenzähler	VC 5 E1 P5/155 1-250/min/400bar blank	3 STK	Kracht GmbH	104100382	
=Hydr_WBR+Testaufbau-503	101.4	Anschlußplatte	MVC 5 R2 E05 seitlich G1 skydroloffest	3 STK	Kracht GmbH	104100167	
=Hydr_WBR+Testaufbau-504	101.3	Volumenzähler	VC0,2 E1P5/156 0,16-16l/min/400bar blank	3 STK	Kracht GmbH	104100389	
=Hydr_WBR+Testaufbau-504	101.3	Anschlußplatte	MVC 0,2 R3 C05 seitlich G1/2	3 STK	Kracht GmbH	104100165	
=Hydr_WBR+Testaufbau-505	101.2	Druckmessumformer mit Zertifikat	PA23/8465.03-400bar K10,15 AP5405M 4-20m	3 STK	Keller AG	104070986	
=Hydr_WBR+Testaufbau-506	101.4	Regelventil	0.811.402.611	1 STK	Rexroth Bosch Group	104180320	
=Hydr_WBR+Testaufbau-506	101.4	Dichtsatz für 3-Wege-Regelventil	M807149, Fa. Bosch Typ: 0.811.402.611	1 STK	Test-Fuchs	107510869	
=Hydr_WBR+Testaufbau-506	101.4	O-Ring	AP540 SM 8x2mm	1 STK	Gehrckens C. Otto	107060609	
=Hydr_WBR+Testaufbau-506	101.4	Aufbaublock NW32 für 3-Wege-Regelventil	M495052, 0 811 402 611 Fa. Bosch	1 STK	Test-Fuchs	107518805	
=Hydr_WBR+Testaufbau-506	101.4	Aufbauplatte für 3/2 Wege- Regelventil	M1084220-1; brüniert	1 STK	Test-Fuchs	107503910	
=Hydr_WBR+Testaufbau-506a	101.2	Regelventil	4WRPEH6C3B24L-2X/G24K0/A1M	1 STK	Rexroth Bosch Group	104180524	

Schutzvermerk nach DIN ISO 15016 beachten

Observe the security warning i.a.w. DIN ISO 15016

Designer	Braun	Design Date	07.04.2015	Hydraulische Weitbereichsregelung		Stückliste Hydraulik	TKZ: HWBR1	= Hydr. WBR + Testaufbau
Revision		Revision Date					MPA157501	Page 1
Check		Rework					SN:	

04.01.2016 07:37:53 Normblattname: TFU_HYD_FN1_003_CP Formulardname: TFU_HYD_MPA_F01_001

Tab. A- 4: Stückliste Testaufbau Seite 1, Quelle: Eigene Darstellung.

Stückliste / Part List							
BMK Designation	Seite Page	Gerät Device	Type Type	Stk. Pcs.	Hersteller Manufacturer	TF Art-Nr. TF Item-No.	
=Hydr_WBR+Testaufbau-506a	101.2	Dichtungssatz für Servoventil	M762284, Typ 0 811 404 6XX, Fa. Bosch	1 STK	Test-Fuchs	107504828	
=Hydr_WBR+Testaufbau-510	301.2	3-Wege Druckregelventil	PSJT-XFE	1 STK	Sun Hydraulics	104173079	
=Hydr_WBR+Testaufbau-510	301.2	Montageblock	QAY/S (für PSJT-XFE)	1 STK	Sun Hydraulics	104173080	
=Hydr_WBR+Testaufbau-510a	301.4	Druckbegrenzungsventil	DBETSX/350G24K4M	1 STK	Rexroth Bosch Group	104180038	
=Hydr_WBR+Testaufbau-510c	301.4	2-Wege-Stromregelventil	2FRM6B76-3X/6.0QM/V	1 STK	Rexroth Bosch Group	104170074	
=Hydr_WBR+Testaufbau-510c	301.4	Anschlußplatte	R901099586 G 665/01	1 STK	Bosch	104180406	
=Hydr_WBR+Testaufbau-511	301.4	Druckmessumformer mit Zertifikat	PA23/8465.03-400bar KI0,15 AP540SM 4-20m	1 STK	Keller AG	104070986	
=Hydr_WBR+Testaufbau-512	301.2	Regelelement	LHHT-XDE	1 STK	Sun Hydraulics	104173077	
=Hydr_WBR+Testaufbau-512	301.2	Montageblock	PNY/S (für Regelelement LHHT-XDE)	1 STK	Sun Hydraulics	104173078	
=Hydr_WBR+Testaufbau-512a	301.3	Düse	M1097269-7, M6/0,8	1 STK	Test-Fuchs	107090192	
=Hydr_WBR+Testaufbau-512b	301.1	Düse	M1097269-7, M6/0,8	1 STK	Test-Fuchs	107090192	
=Hydr_WBR+Testaufbau-513	301.1	Druckmessumformer mit Zertifikat	PA23/8465.03-400bar KI0,15 AP540SM 4-20m	1 STK	Keller AG	104070986	
=Hydr_WBR+Testaufbau-514	301.2	Steuerkolben von Prop.-Drosselventil	M643134-2, NW32, 2-Wege-Ausführung	1 STK	Test-Fuchs	107090697	
=Hydr_WBR+Testaufbau-514	301.2	Hülse von Proportional-Drosselventil	M643134-1, NW32, 2-Wege-Ausführung	1 STK	Test-Fuchs	107090696	
=Hydr_WBR+Testaufbau-514	301.2	Dichtsatz für 2/2-Wege-Normcartridge	M721250, NW32, abgedichtet, AP540	1 STK	Test-Fuchs	107507891	
=Hydr_WBR+Testaufbau-514	301.2	Aufstoßfederführung NW32 für Cartridge	M552273, DL=19mm	1 STK	Test-Fuchs	107090719	

1				3				
Designer	Braun	Design Date	07.04.2015	Hydraulische Weitbereichsregelung		Stückliste Hydraulik	TKZ: HWBR1	= Hydr_WBR + Testaufbau
Revision		Revision Date					MPA157501	SN:
Check		Rework						
04.01.2016	07:38:50						Normblattname: TFU_HYD_FNI_003_CP	Formularname: TFU_HYD_MPA_F01_001

Osservare le note di sicurezza secondo DIN ISO 16016
 Observe the security warning i.a.w. DIN ISO 16016
 Schutzwarnung nach DIN ISO 16016 beachten

Tab. A- 5: Stückliste Testaufbau Seite 2, Quelle: Eigene Darstellung.

Stückliste / Part List							
BMK Designation	Seite Page	Gerät Device	Type Type	Stk. Pcs.	Hersteller Manufacturer	TF Art-Nr. TF Item-No.	
=Hydr_WBR+Testaufbau-514	301.2	Druckfeder	D-222C	1 STK	Gutekunst + Co	107020497	
=Hydr_WBR+Testaufbau-514	301.2	Einzelblock NW32 mit SAE 2"-SD, G1 1/4"	M383214-1, 1.1730 brüniert, X/Y intern	1 STK	Test-Fuchs	107090398	
=Hydr_WBR+Testaufbau-514a	301.2	Regelventil	0.811.404.600	1 STK	Bosch Rexroth	104180037	
=Hydr_WBR+Testaufbau-514a	301.2	Wegaufnehmer induktiv	1.837.001.263 +/-7mm Gruppe A	1 STK	Rexroth Bosch Group	104180813	
=Hydr_WBR+Testaufbau-514a	301.2	Block für Vorsteuerkolben für	M895137-1, Mengenregelventil	1 STK	Test-Fuchs	107504635	
=Hydr_WBR+Testaufbau-514a	301.2	Dichtungssatz für Servoventil	M762284, Typ 0 811 404 6XX, Fa. Bosch	1 STK	Test-Fuchs	107504828	
=Hydr_WBR+Testaufbau-550	101.4	Kupplung	STUCCHI-F-A30 1-1/2 BSP SO150	3 STK	Test-Fuchs	104090868	
=Hydr_WBR+Testaufbau-551	101.4	Anschlußplatte	MVC 5 R2 E05 seitlich G1 blank	3 STK	Kracht GmbH	104100385	
=Hydr_WBR+Testaufbau-551	101.4	Anschlußplatte	MVC 5 R2 E05 seitlich G1 skydrolfest	3 STK	Kracht GmbH	104100167	
=Hydr_WBR+Testaufbau-552	101.4	Volumenzähler	VC 5 E1 PS/155 1-250l/min/400bar blank	3 STK	Kracht GmbH	104100382	
=Hydr_WBR+Testaufbau-552	101.4	Anschlußplatte	MVC 5 R2 E05 seitlich G1 skydrolfest	3 STK	Kracht GmbH	104100167	
=Hydr_WBR+Testaufbau-553	101.3	Druckmessumformer mit Zertifikat	PA23/8465.03-600bar KI0,15 AP5405M 4-20m	3 STK	Keller AG	104070983	
=Hydr_WBR+Testaufbau-554	101.5	Druckmessumformer mit Zertifikat	PA23/8465.03-40bar KI0,15 AP5405M 4-20mA	3 STK	Keller AG	104070982	
=Hydr_WBR+Testaufbau-555	101.2	Blasenspeicher mit Zertifikat	SB400-10A1/214U-400A	3 STK	HYDAC Technology GmbH	104130247	
=Hydr_WBR+Testaufbau-555	101.2	Übergangsstück für Speicher	S309 EPDM/S35532	3 STK	HYDAC Technology GmbH	104130318	
=Hydr_WBR+Testaufbau-556	101.2	Sicherheits-Absperblock mit Zertifikat	SAF32M15N400A	3 STK	HYDAC Technology GmbH	104130273	

2	4
---	---

Designer	Braun	Design Date	07.04.2015	Hydraulische Weitbereichsregelung		Stückliste Hydraulik	TKZ: HWBR1	= Hydr_WBR + Testaufbau
Revision		Revision Date					MPA157501	SN:
Check		Rework						

04.01.2016 07:39:15 Normblattname: TFU_HYD_FNI_003_CP Formularname: TFU_HYD_MPA_F01_001

Observe the safety warning i.a.w. DIN ISO 10016
 Osservare le note di sicurezza secondo DIN ISO 10016
 Schutzwarnung nach DIN ISO 10016 beachten

Tab. A- 6: Stückliste Testaufbau Seite 3, Quelle: Eigene Darstellung.

Stückliste / Part List							
BMK Designation	Seite Page	Gerät Device	Type Type	Stk. Pcs.	Hersteller Manufacturer	TF Art-Nr. TF Item-No.	
=Hydr_WBR+Testaufbau-557	101.5	Druckbegrenzungsventil	VLP200P-34-01-D 20-100bar G3/4	3 STK	Stasto Ing. Stocker KG	104170895	
=Hydr_WBR+Testaufbau-601	101.4	Kugelhahn	BKH-255-20 11261-B0FA-501 (EPDM)	3 STK	Stasto Ing. Stocker KG	104171536	
=Hydr_WBR+Testaufbau-602	101.3	Druckmeßumformer	PA23/8465.03-400bar KJ0,15 EPDM 4-20mA	3 STK	Keller AG	104070354	
=Hydr_WBR+Testaufbau-603	101.5	Regelventil SO150	4WRPEH6C3B40L-2X/G24K0/A1M (0811404603)	3 STK	Test-Fuchs	104180761	
=Hydr_WBR+Testaufbau-603	101.5	Anschlußplatte	R901099586 G 665/01	3 STK	Bosch	104180406	
=Hydr_WBR+Testaufbau-604	101.6	Drosselventil	MG30G1X/V	3 STK	Bosch Rexroth	104170477	
=Hydr_WBR+Testaufbau-605	101.8	Drosselventil	MG30G1X/V	3 STK	Bosch Rexroth	104170477	
=Hydr_WBR+Testaufbau-606	101.6	Steuerkolben von Prop.-Drosselventil	M643134-2, NW32, 2-Wege-Ausführung	3 STK	Test-Fuchs	107090697	
=Hydr_WBR+Testaufbau-606	101.6	Hülse von Proportional-Drosselventil	M643134-1, NW32, 2-Wege-Ausführung	3 STK	Test-Fuchs	107090696	
=Hydr_WBR+Testaufbau-606	101.6	Dichtsatz für 2/2-Wege-Normcartridge	M721250, NW32, abgedichtet, AP540	3 STK	Test-Fuchs	107507891	
=Hydr_WBR+Testaufbau-606	101.6	Aufstoßfederführung NW32 für Cartridge	M552273, DL=19mm	3 STK	Test-Fuchs	107090719	
=Hydr_WBR+Testaufbau-606	101.6	Druckfeder	D-222C	3 STK	Gutekunst + Co	107020497	
=Hydr_WBR+Testaufbau-606	101.6	Einzelblock NW32 mit SAE 2"-SD, G1 1/4"	M383214-1, 1.1730 brüniert, X/Y intern	3 STK	Test-Fuchs	107090398	
=Hydr_WBR+Testaufbau-606a	101.6	Regelventil	0.811.404.601	2 STK	Bosch Rexroth	104180022	
=Hydr_WBR+Testaufbau-606a	101.6	Wegaufnehmer induktiv	1.837.001.263 +/-7mm Gruppe A	3 STK	Rexroth Bosch Group	104180813	
=Hydr_WBR+Testaufbau-606a	101.6	Deckel NW32 mit Bohrbild DIN24340, A6	M1063110, für HAWE Druckventil CMV1	3 STK	Test-Fuchs	107502107	

3					5			
Designer	Braun	Design Date	07.04.2015	Hydraulische Weitbereichsregelung		Stückliste Hydraulik	TKZ: HWBR1	= Hydr_WBR + Testaufbau
Revision		Revision Date				MPA157501	SN:	Page 4
Check		Rework						
04.01.2016	07:37:21					Normblattname: TFU_HYD_FNL_003_CP	Formularname	TFU_HYD_MPA_F01_001

Osservare le note di sicurezza secondo DIN ISO 10016
 Observe the safety warning i.a.w. DIN ISO 10016

Tab. A- 7: Stückliste Testaufbau Seite 4, Quelle: Eigene Darstellung.

Stückliste / Part List							
BMK Designation	Seite Page	Gerät Device	Type Type	Stk. Pcs.	Hersteller Manufacturer	TF Art-Nr. TF Item-No.	
=Hydr_WBR+Testaufbau-606a	101.6	Dichtungssatz für Servoventil	M762284, Typ 0 811 404 6XX, Fa. Bosch	3 STK	Test-Fuchs	107504828	
=Hydr_WBR+Testaufbau-606a	101.6	Druckbegrenzungsventil	CMV1B-500	3 STK	Hawe Hydraulik	104171354	
=Hydr_WBR+Testaufbau-606a	201.6	Regelventil	0.811.404.601	1 STK	Bosch Rexroth	104180022	
=Hydr_WBR+Testaufbau-607	101.8	Hülse von 2/2-Wege-Normcartridge	M605079-1, NW32	3 STK	Test-Fuchs	107090688	
=Hydr_WBR+Testaufbau-607	101.8	Steuerkolben von 2/2-Wege-Normcartridge	M605079-2, NW32, Schalt-/Regelventil	3 STK	Test-Fuchs	107090689	
=Hydr_WBR+Testaufbau-607	101.8	Dichtsatz für 2/2-Wege-Normcartridge	M721250, NW32, abgedichtet, AP540	3 STK	Test-Fuchs	107507891	
=Hydr_WBR+Testaufbau-607	101.8	Aufstoßfederführung NW32 für Cartridge	M552273, DL=19mm	3 STK	Test-Fuchs	107090719	
=Hydr_WBR+Testaufbau-607	101.8	Druckfeder	D-222C	3 STK	Gutekunst + Co	107020497	
=Hydr_WBR+Testaufbau-607	101.8	Einzelblock NW32 mit SAE 2"-SD, G1 1/4"	M383214-1, 1.1730 brüniert, X/Y intern	3 STK	Test-Fuchs	107090398	
=Hydr_WBR+Testaufbau-607a	101.9	Wegeventil	WH1H-G24-SKY	3 STK	Hawe Hydraulik	104180473	
=Hydr_WBR+Testaufbau-607a	101.9	Deckel NG32 für Vorsteuerventil	M893084-2; HAWE WH 1 H	3 STK	Test-Fuchs	107504634	
=Hydr_WBR+Testaufbau-607a	101.9	O-Ring	AP540 5M 8x2mm	3 STK	Gehrckens C. Otto	107060609	
=Hydr_WBR+Testaufbau-607b	101.8	Düse	M1097269-7, M6/0,8	3 STK	Test-Fuchs	107090192	
=Hydr_WBR+Testaufbau-607c	101.9	Düse	M1097269-7, M6/0,8	3 STK	Test-Fuchs	107090192	
=Hydr_WBR+Testaufbau-608	101.5	Hochdruckkugelhahn	BKH-G1/4-06 11261 EPDM	3 STK	Stasto Ing. Stocker KG	104171510	

4						+Varianten/1	
Designer	Braun	Design Date	07.04.2015	Hydraulische Weitbereichsregelung		Stückliste Hydraulik	
Revision		Revision Date				TKZ: HWBR1	
Check		Rework				= Hydr_WBR + Testaufbau	
						Page 5	
04.01.2016 07:37:21						TFU_HYD_MPA_F01_001	

Osservare le note di sicurezza secondo DIN ISO 16016
 Observe the safety warning i.a.w. DIN ISO 16016
 Schutzwarnung nach DIN ISO 16016 beachten

Tab. A- 8: Stückliste Testaufbau Seite 5, Quelle: Eigene Darstellung.

Anhang C: Fotos Testaufbau

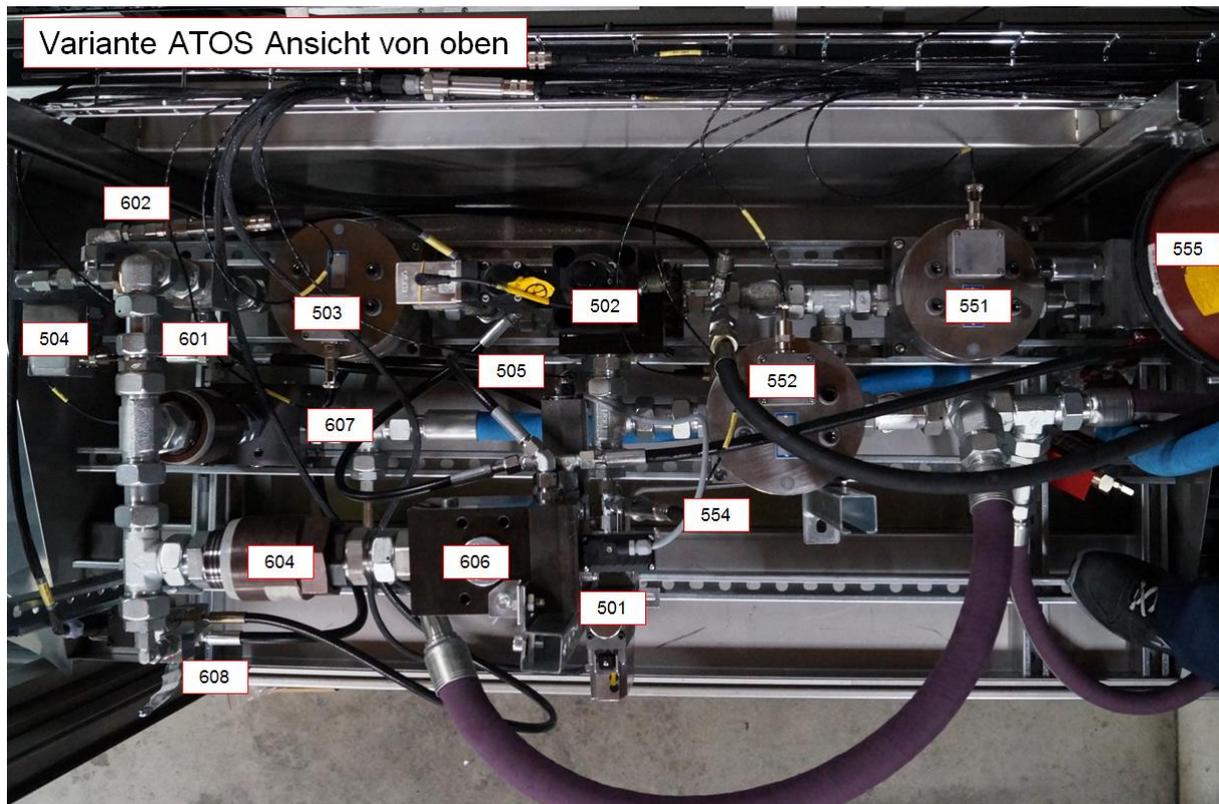


Abb. A- 7: Fotografie Testaufbau Variante ATOS von oben, Quelle: Eigene Darstellung

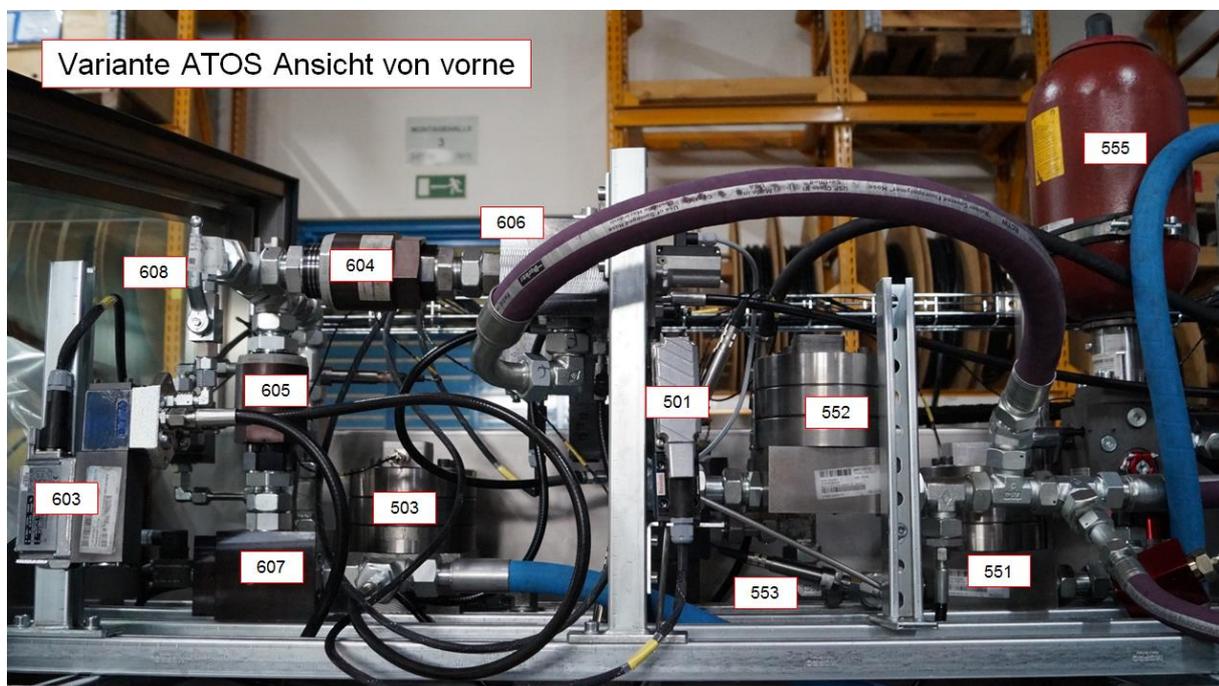


Abb. A- 8: Fotografie Testaufbau Variante ATOS von vorne, Quelle: Eigene Darstellung

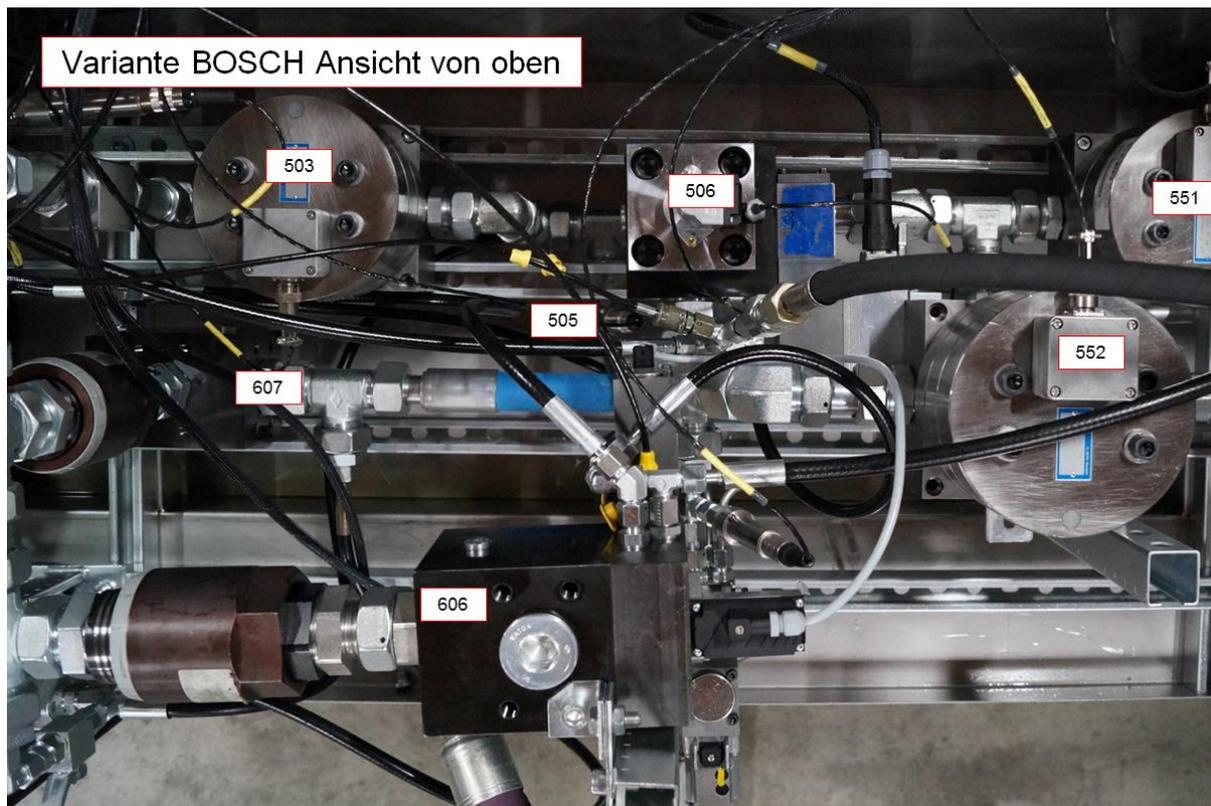


Abb. A- 9: Fotografie Testaufbau Variante Bosch von oben, Quelle: Eigene Darstellung

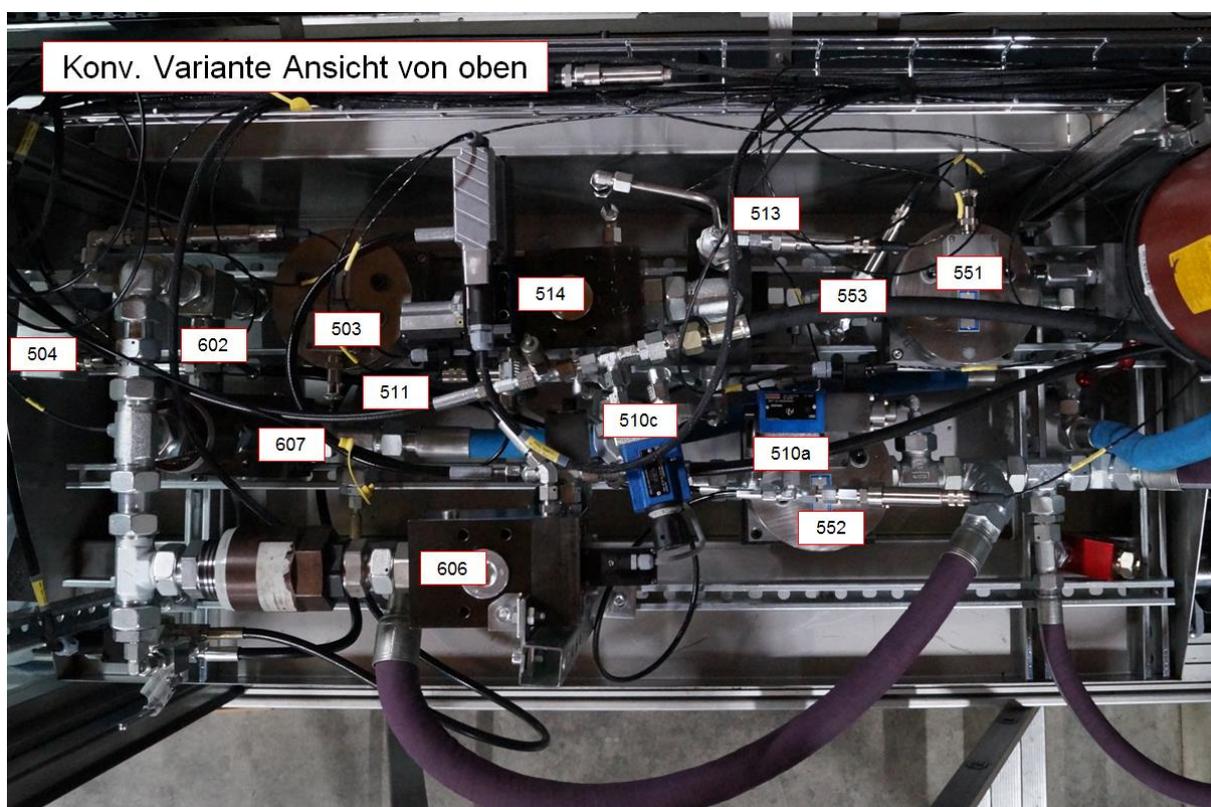


Abb. A- 10: Fotografie Testaufbau konv. Variante von oben, Quelle: Eigene Darstellung

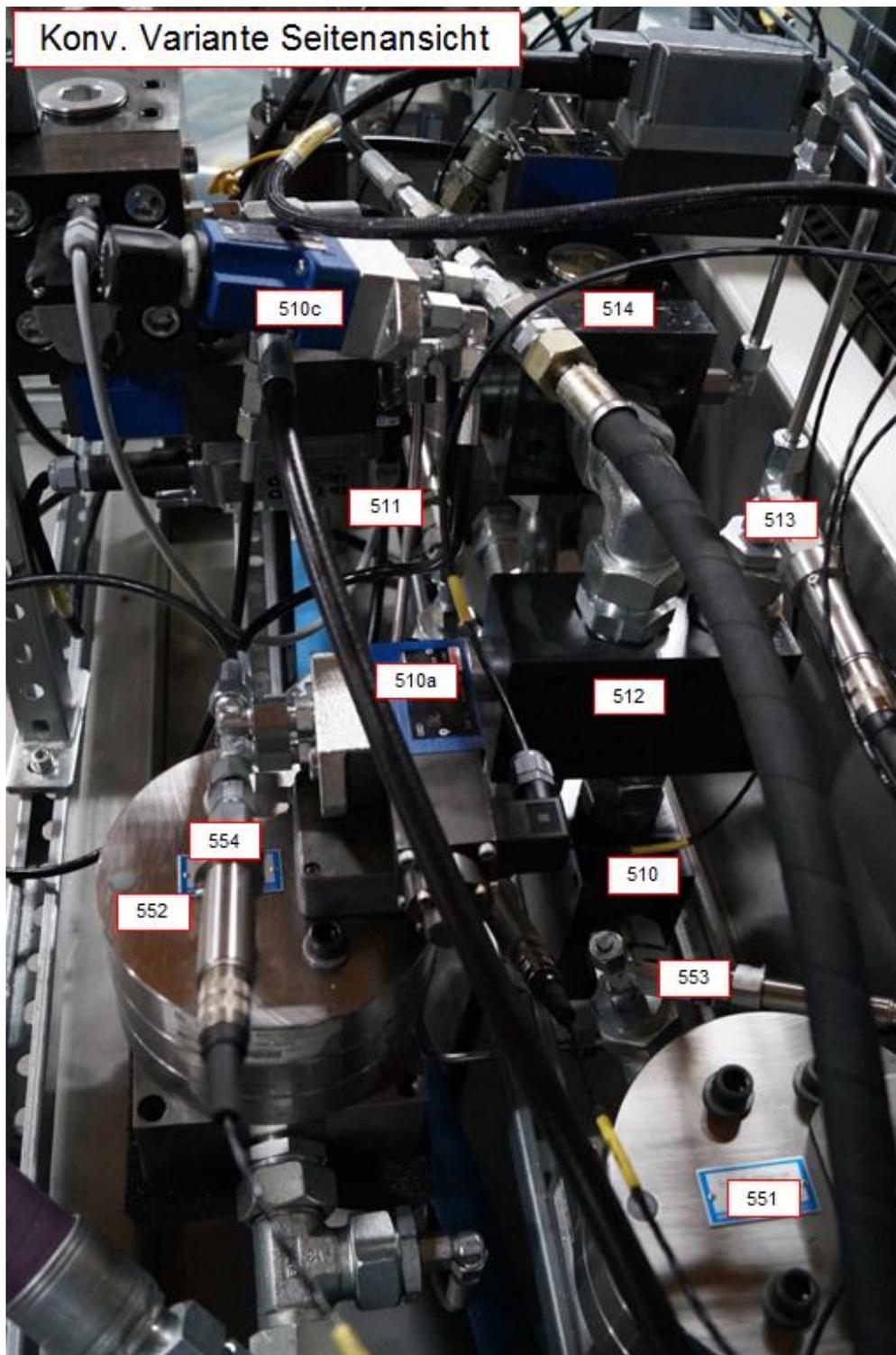


Abb. A- 11: Fotografie Testaufbau konv. Variante Seitenansicht, Quelle: Eigene Darstellung