



Johannes Fischbäck

**Entwurf und Implementierung einer Regelung  
für eine servohydraulische Achse  
in einem hydrostatischen Lagerprüfstand**

**MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Dipl.-Ing. Georg Mörwald

Institut für Fertigungstechnik

---

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

## **Affidavit**

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 indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

---

Datum / Date

---

Unterschrift / Signature

---

# Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Instituts für Fertigungstechnik für die Unterstützung bedanken.

Insbesondere gilt mein Dank Herrn Dipl.-Ing. Georg Mörwald und Herrn Dipl.-Ing. Dr. Jörg Edler für die hervorragende fachliche Betreuung im Rahmen dieser Masterarbeit.

---

## Kurzfassung

Diese Arbeit beschreibt die Modifikation und Automatisierung eines Prüfstandes zur Überprüfung von mechanischen Reglern, welche zur Regelung der Lagerspalthöhen innerhalb hydrostatischer Lagerungen eingesetzt werden. Die Erweiterung gliedert sich in mehrere Teilbereiche.

Hauptaugenmerk liegt auf der Änderung der Aktorik zur Einleitung der Prüfkraft. An die Prüfkraft werden hinsichtlich der Genauigkeit und Dynamik hohe Anforderungen gestellt. Um diese zu erfüllen, wird eine flexible Kraftregelung eines hydrostatisch gelagerten Prüfcylinders umgesetzt.

Zur Bewerkstelligung der regelungstechnischen Aufgaben sowie zur Bedienung des gesamten Prüfstandes wird eine SPS eingesetzt. Die SPS stellt ebenso eine grafische Menüstruktur zur Bedienung des gesamten Prüfstandes zur Verfügung. Durch die Neuverkabelung und den Aufbau eines Schaltschranks wird die gesamte Elektrik des Prüfstandes zentral zusammengeführt.

Messungen nach der Inbetriebnahme zeigen die Verbesserung und neuen Möglichkeiten des modifizierten Prüfstandes.

## Abstract

This thesis shows the modification of a hydraulic test rig. It is used to optimize mechanical controllers, which regulate the gap height of hydrostatic bearings. The solution consists of multiple aspects.

The main focus of this work is the adaption of the actuator to meet the demand for high precision and dynamic force actuation. Thus, a flexible force-feedback control algorithm is implemented to control a testing cylinder.

The software for the controller is realized on a PLC. In addition, the PLC holds a graphical user interface to operate the whole test rig. As part of this work the test rig is rewired and the electrical devices are integrated into one central cabinet.

Final measurements show the improvements and new possibilities due to the modification.

## Formelzeichen

Abkürzung	Einheit	Bezeichnung
$A_K$	$\text{mm}^2$	Druckwirksame Kolbenfläche
$A_{Re}$	$\text{N s}$	Über die Zeit integrierter Absolutwert des Regelfehlers
$c_{ip}$	$\frac{1}{\text{min bar}}$	Interner Leckagebeiwert
$c_{ep}$	$\frac{1}{\text{min bar}}$	Externer Leckagebeiwert
$c_L$	$\frac{\text{N}}{\text{m}}$	Federsteifigkeit der Last
$C_H$	$\frac{l}{\text{bar}}$	Hydraulische Kapazität
$d_L$	$\frac{\text{N s}}{\text{m}}$	Dämpfungskonstante der Last
$d_K$	$\text{mm}$	Kolbendurchmesser
$d_{Ks}$	$\text{mm}$	Kolbenstangendurchmesser
$D_V$	-	Dämpfungsgrad des Ventils
$d_{yK}$	$\frac{\text{N s}}{\text{m}}$	Dämpfungskonstante des Zylinderkolbens
$e$	-	Regelfehler innerhalb des Regelalgorithmus
$F$	$\text{N}$	Gemessene Kraft
$\bar{F}_s$	$\text{N}$	Gleichanteil des periodischen Soll-Kraftverlaufs
$\hat{F}_s$	$\text{N}$	Amplitude des periodischen Soll-Kraftverlaufs
$F_s$	$\text{N}$	Soll-Kraft
$(F_{ss})_F$	$\text{N}$	Spitze-Spitze-Wert des tatsächlichen Kraftverlaufs
$(F_{ss})_{F_s}$	$\text{N}$	Spitze-Spitze-Wert des Soll-Kraftverlaufs
$h$	$\mu\text{m}$	Lagerspalthöhe
$ H $	$\text{dB}$	Amplitudenabweichung
$i_v$	$\text{mA}$	Steuerstrom des Ventils
$K_i$	-	Verstärkung des Integralanteils
$K_p$	-	Verstärkung des Proportionalanteils
$m_L$	$\text{kg}$	Lastmasse
$m_K$	$\text{kg}$	Zylinderkolbenmasse
$p$	$\text{bar}$	Taschendruck
$p_A, p_B$	$\text{bar}$	Druck in Zylinderkammer A bzw. B
$p_L$	$\text{bar}$	Lastdruck
$p_s$	$\text{bar}$	Systemdruck
$Q_A, Q_B$	$\frac{1}{\text{min}}$	Volumenstrom von/zu Zylinderkammer A bzw. B
$Q_L$	$\frac{1}{\text{min}}$	Lastvolumenstrom
$Q_N$	$\frac{1}{\text{min}}$	Nenndurchfluss des Ventils

## Formelzeichen

---

$Q_{ps,max}$	$\frac{1}{\text{min}}$	Maximaler Ventilvolumenstrom bei $p_s$
$Q_{th}$	$\frac{1}{\text{min}}$	Volumenstrom im Arbeitspunkt
$r$	-	Stellgröße innerhalb des Regelalgorithmus
$r_i$	-	Integralanteil an Stellgröße
$r_p$	-	Proportionalanteil an Stellgröße
$t$	s	Zeit
$t_a$	s	Abtastzeit des Reglers
$T_H$	s	Hydraulische Zeitkonstante
$(t_{ND})_{soll}$	s	Zeitpunkt des Nulldurchgangs des Soll-Kraftverlaufs
$(t_{ND})_{tats}$	s	Zeitpunkt des Nulldurchgangs des tatsächlichen Kraftverlaufs
$T_{soll}$	s	Periodendauer des Soll-Kraftverlaufs
$T_T$	ms	Totzeit
$V_{op}$	-	Elektrische Verstärkung
$V_{Qp}$	$\frac{1}{\text{min bar}}$	Volumenstrom-Druck-Verstärkung
$V_{Qy}$	$\frac{1}{\text{min \%}}$	Volumenstrom-Signal-Verstärkung
$V_{tot}$	ml	Totvolumen
$v_V$	mm	Gemessene Ventilschieberauslenkung
$V_V$	$\frac{\text{mm}}{\text{mA}}$	Ventilverstärkung
$w$	-	Führungsgröße innerhalb des Regelalgorithmus
$x$	-	Regelgröße innerhalb des Regelalgorithmus
$y_K$	m	Auslenkung des Zylinderkolbens
$y_V$	mm	Soll-Ventilschieberauslenkung
$\eta$	mPas	Dynamische Viskosität des Öls
$\vartheta$	°C	Temperatur
$\rho$	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Dichte des Öls
$\varphi$	°	Phasenverschiebung
$\omega_V$	$\frac{1}{\text{s}}$	Eigenfrequenz des Ventils

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Prüfstand vor Modifikation . . . . .	2
3.1	Prüfstand nach Modifikation . . . . .	6
3.2	Baugruppe Zylinder . . . . .	7
3.3	Systemische Betrachtung des modifizierten Prüfstandes . . . . .	8
3.4	Hydraulikschaltplan . . . . .	9
3.5	Signalweg der Kraftmessdose . . . . .	10
3.6	Zeitlicher Verlauf der digitalisierten Kraftmess-Signale . . . . .	11
3.7	Histogramm des Kraft-Mess-Signals bei 0 N . . . . .	12
3.8	Histogramm des Kraft-Mess-Signals bei 49 N . . . . .	12
3.9	Histogramm des Kraft-Mess-Signals bei 54 N . . . . .	13
3.10	Histogramm des Kraft-Mess-Signals bei 300 N . . . . .	13
3.11	SPS mit I/O-Modulen . . . . .	16
3.12	Aufbau des Proportionalventils . . . . .	17
3.13	Schnittansicht des Prüfzylinders . . . . .	18
4.1	Parameterbereiche der Sollkurve . . . . .	19
4.2	Schematische Darstellung der Kraftregelung . . . . .	21
4.3	Wirkungsplan des implementierten PI-Reglers . . . . .	21
4.4	Schematische Darstellung des hydraulischen Systems . . . . .	23
4.5	Diskreter Wirkungsplan des Servoventilmodells . . . . .	24
4.6	Führungssprünge der Ventilstellung . . . . .	25
4.7	Volumenstrom-Diagramm . . . . .	26
4.8	Wirkungsplan des Servoventilmodells als Verzögerungsglied zweiter Ordnung . . . . .	27
4.9	Wirkungsplan des Zylinders als Verzögerungsglied erster Ordnung . . . . .	29
4.10	Gemessene und simulierte Sprungantwort der Regelstrecke . . . . .	30
4.11	Dynamisches Reglerverhalten für einen positiven Führungssprung . . . . .	31
4.12	Dynamisches Reglerverhalten für einen negativen Führungssprung . . . . .	32
4.13	Auswirkung der Fehlersummenkorrektur . . . . .	33
4.14	Verläufe der Reglerparameter in Abhängigkeit vom Gleichanteil . . . . .	34
4.15	Kraftverlauf und Abweichung ohne Dither-Signal . . . . .	35
4.16	Kraftverlauf und Abweichung mit Dither-Signal . . . . .	35
4.17	Kraftverlauf für Rechtecksignal mit $\bar{F}_s = 10 \text{ kN}$ und $\hat{F}_s = 5 \text{ kN}$ . . . . .	36
4.18	Kraftverlauf für Rechtecksignal mit $\bar{F}_s = 8 \text{ kN}$ und $\hat{F}_s = 1 \text{ kN}$ . . . . .	37
4.19	Kraftverlauf für Sinussignal mit $\bar{F}_s = 10 \text{ kN}$ und $\hat{F}_s = 5 \text{ kN}$ . . . . .	37
4.20	Bode-Diagramm des geschlossenen Regelkreises . . . . .	39

4.21	Wirkungsplan der geschlossenen Regelstrecke mit Totzeit . . . . .	40
4.22	Simulierter und gemessener Kraftverlauf für rechteckförmige Führungsgröße . . .	40
4.23	Simuliertes und gemessenes Bodediagramm des geschlossenen Regelkreises ( $\bar{F}_s = 10 \text{ kN}$ und $\hat{F}_s = 5 \text{ kN}$ ) . . . . .	41
4.24	Simulierter Führungssprung mit Rückführung der Regelgröße ohne Totzeit . . .	42
4.25	Simuliertes Bodediagramm mit Rückführung der Regelgröße ohne Totzeit . . .	42
5.1	Menübildschirm: Sensorkalibration . . . . .	44
5.2	Menübildschirm: Taschenscheibeninformation . . . . .	45
5.3	Menübildschirm: Ventilsteuerung . . . . .	46
5.4	Menübildschirm: Aufnahme Führungssprung . . . . .	47
5.5	Menübildschirm: Aufnahme Zeitverhalten . . . . .	48
5.6	Menübildschirm: Aufnahme Frequenzverhalten . . . . .	49
5.7	Menübildschirm: Hydraulikaggregat . . . . .	50
5.8	Menübildschirm: Aufwärmphase . . . . .	51
5.9	Menübildschirm: Lastkollektiv definieren . . . . .	52
5.10	Menübildschirm: Dynamische Messung durchführen . . . . .	53
6.1	Temperatur- und Lagerspalthöhenverläufe während der Warmlaufphase . . . . .	56
6.2	Messung bei rechteckförmigem Führungssignal (1 Hz) . . . . .	58
6.3	Detailansicht des Führungssprunges von 7 kN auf 9 kN . . . . .	59
6.4	Messung bei sinusförmigem Führungssignal (2 Hz) . . . . .	60
6.5	Vergleichsmessung bei sinusförmiger Anregung (2 Hz) . . . . .	61
6.6	Messung bei sinusförmigem Führungssignal (15 Hz) . . . . .	62
6.7	Normierte Signalverläufe bei sinusförmigem Führungssignal (15 Hz) . . . . .	63
6.8	Messung bei dreieckförmigem Führungssignal (5 Hz) . . . . .	64
6.9	Messung bei dreieckförmigem Führungssignal (0.1 Hz) . . . . .	65
A.1	Stromlaufplan: Netzteil 24V und SPS CPU . . . . .	69
A.2	Stromlaufplan: Analogeingänge 0 bis 10 V und Sensoren . . . . .	70
A.3	Stromlaufplan: Analogeingänge 0 bis 20 mA und Sensoren . . . . .	71
A.4	Stromlaufplan: Analogausgänge 0 bis 20 mA und Servoventil . . . . .	72
A.5	Stromlaufplan: Digitalausgänge und Relais . . . . .	73
A.6	Klemmenliste X1 . . . . .	75
A.7	Klemmenliste X2 . . . . .	76
A.8	Klemmenliste X3 . . . . .	77
A.9	Klemmenliste X4 . . . . .	78
A.10	Klemmenliste X5 . . . . .	79
A.11	Klemmenliste X6 . . . . .	80
A.12	Klemmenliste X7 . . . . .	81



## *Abbildungsverzeichnis*

---

A.13 Klemmenliste X8 . . . . .	82
A.14 Klemmenliste X9 . . . . .	83
A.15 Werkstattzeichnung: Adapterplatte für Versuchsaufbau zur Druckregelung: Seite 1 von 2 . . . . .	85
A.16 Werkstattzeichnung: Adapterplatte für Versuchsaufbau zur Druckregelung: Seite 2 von 2 . . . . .	86
A.17 Werkstattzeichnung: Adapterplatte: Seite 1 von 2 . . . . .	87
A.18 Werkstattzeichnung: Adapterplatte: Seite 2 von 2 . . . . .	88
A.19 Werkstattzeichnung: Zwischenstück für Druckspeicher: Seite 1 von 1 . . . . .	89
A.20 Simulationsmodell: Servoventil Teil 1 von 2 . . . . .	95
A.21 Simulationsmodell: Servoventil Teil 2 von 2 . . . . .	96
A.22 Simulationsmodell: Zylinder Teil 1 von 1 . . . . .	97
A.23 Simulationsmodell: PI-Regler Teil 1 von 1 . . . . .	98
A.24 Simulationsmodell: Totzeitmodelle Teil 1 von 1 . . . . .	99
A.25 Simulationsmodell: Referenzsignale Teil 1 von 1 . . . . .	100
A.26 Simulationsmodell der Lastdynamik Teil 1 von 1 . . . . .	101
A.27 Kalibrationsprotokoll: 2W1 Megatron KTB82 . . . . .	103
A.28 Kalibrationsprotokoll: 2G1 WayCon T05-G-KA 118673 . . . . .	104
A.29 Kalibrationsprotokoll: 2G2 WayCon T05-G-KA 118674 . . . . .	105
A.30 Kalibrationsprotokoll: 2G3 WayCon T05-G-KA 118675 . . . . .	106

# Tabellenverzeichnis

3.1	Funktionen der Sensoren am Prüfstand . . . . .	10
3.2	Gleichanteile des Spannungssignals der Kraftmessdose . . . . .	11
3.3	X20-Module . . . . .	16
4.1	Hauptstützstellen der Reglerauslegung . . . . .	20
4.2	Parameter für das Modell des Servoventils . . . . .	24
4.3	Auslegungsdaten zur Berechnung des Hydraulikzylinders . . . . .	27
4.4	Lastabhängige Modellparameter . . . . .	29
4.5	Reglerparameter bei positiver Steigung . . . . .	30
4.6	Reglerparameter bei negativer Steigung . . . . .	32
4.7	Koeffizienten der Ausgleichspolynome der Reglerbeiwerte . . . . .	34
6.1	Durchgeführte dynamische Messungen . . . . .	54
A.1	Namensschema der Ein- und Ausgänge . . . . .	90
A.2	Bezeichnung der Ein- und Ausgänge . . . . .	90
A.3	Programmübersicht - Zykluszeit: 0.4 ms . . . . .	91
A.4	Programmübersicht - Zykluszeit: 2 ms . . . . .	92
A.5	Programmübersicht - Zykluszeit: 10 ms . . . . .	92
A.6	Programmübersicht - Zykluszeit: 100 ms . . . . .	92
A.7	Programmübersicht - Zykluszeit: 500 ms . . . . .	93

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Aufgabenstellung</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Hardware</b>	<b>6</b>
3.1	Gesamtsystem . . . . .	8
3.2	Sensorik . . . . .	10
3.2.1	Kraftmessung . . . . .	10
3.2.2	Lagerspaltmessung . . . . .	14
3.2.3	Druckmessung . . . . .	14
3.2.4	Temperaturmessung . . . . .	14
3.3	SPS . . . . .	15
3.4	Aktorik . . . . .	17
<b>4</b>	<b>Kraftregelung</b>	<b>19</b>
4.1	Randbedingungen . . . . .	19
4.2	Prinzip der Kraftregelung . . . . .	21
4.3	Modellbildung . . . . .	23
4.3.1	Modell des Servoventils . . . . .	24
4.3.2	Modell des Hydraulikzylinders . . . . .	27
4.3.3	Bestimmung der Modellparameter . . . . .	29
4.4	Bestimmung der Reglerparameter . . . . .	30
4.5	Reglerverhalten . . . . .	36
4.6	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	40
<b>5</b>	<b>Benutzeroberfläche</b>	<b>43</b>
5.1	Sensorkalibration . . . . .	44
5.2	Taschenscheibeninformation . . . . .	45
5.3	Ventilsteuerung . . . . .	46
5.4	Aufnahme eines Führungssprunges . . . . .	47
5.5	Aufnahme des Zeitverhaltens . . . . .	48
5.6	Aufnahme des Frequenzverhaltens . . . . .	49
5.7	Hydraulikaggregat . . . . .	50
5.8	Aufwärmphase durchführen . . . . .	51
5.9	Lastkollektiv definieren . . . . .	52
5.10	Dynamische Messung durchführen . . . . .	53

<b>6 Messungen</b>	<b>54</b>
6.1 Initialisierungsroutinen . . . . .	54
6.2 Warmlauf . . . . .	55
6.2.1 Ablauf der Messung . . . . .	55
6.2.2 Messung . . . . .	56
6.3 Dynamische Messungen . . . . .	57
6.3.1 Ablauf der Messung . . . . .	57
6.3.2 Messung mit rechteckförmigem Führungssignal . . . . .	58
6.3.3 Messung mit sinusförmigem Führungssignal bei 2 Hz . . . . .	60
6.3.4 Messung mit sinusförmigem Führungssignal bei 15 Hz . . . . .	62
6.3.5 Messungen mit dreieckförmigem Führungssignal . . . . .	64
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>66</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>67</b>
<b>A Anhang</b>	<b>68</b>
A.1 Stromlaufpläne . . . . .	68
A.2 Klemmenlisten . . . . .	74
A.3 Werkstattzeichnungen . . . . .	84
A.4 Software . . . . .	90
A.4.1 Datenmanagement . . . . .	90
A.4.2 Programme . . . . .	91
A.5 Simulationsmodell . . . . .	94
A.6 Kalibrationsprotokolle . . . . .	102

# 1 Einleitung

Moderne speicherprogrammierbare Steuergeräte (SPS) bieten eine Vielzahl von Optionen, die über die Erfüllung von regelungs- und automatisierungstechnischen Aufgaben auf Feldebene hinausgehen. Dem Anwender stehen durch hoch integrierte Bibliotheken Funktionen zur raschen Umsetzung mechatronischer Aufgabenstellungen zur Verfügung. Die vorliegende Arbeit zeigt die Möglichkeiten anhand der Modifikation eines bestehenden Prüfstandes.

Der in Abbildung 1.1 gezeigte Prüfstand wurde im Rahmen der Diplomarbeit von Herrn Georg Mörwald im Jahr 2012 konstruiert, gebaut und in Betrieb genommen. Er dient der Überprüfung von Reglern, welche den Lagerspalt einer hydrostatischen Lagerung bei zeitlich veränderlicher Krafteinwirkung konstant halten. Um ein breites Anwendungsspektrum abdecken zu können, sind zwei voneinander unabhängige Lagertaschentypen (quadratisch und rund) mit je drei um  $120^\circ$  versetzten Lagertaschen in einer Taschenscheibe integriert. Auf die Deckscheibe des hydrostatischen Lagers wirkt eine statische Grundlast von 1 kN in Form von Gewichtsscheiben mit einer Gewichtskraft von je 100 N. Mithilfe einer mechanischen, händisch zu bedienenden Fallvorrichtung kann im Bedarfsfall eine stoßartige Belastung aufgebracht werden. Die hydraulische Energie wird von einem externen Hydraulikaggregat zur Verfügung gestellt.

Die dynamische Krafteinleitung erfolgte vor der Modifikation mit einem pneumatischen Einfaltenbalg. Der Wunsch nach einer höheren Dynamik und einer größeren Spitzenprüfkraft fordert eine andere Art der Krafteinleitung als den Einfaltenbalg. Eine vernachlässigbar kleine Anfahrreibung und dadurch praktisch kein Stick-Slip-Effekt legen einen hydrostatisch gelagerten hydraulischen Zylinder nahe. Dieser wurde im Rahmen der Bachelorarbeit von Herrn Sebastian Gradauer konstruiert. Die Fertigung der Einzelteile des Prüfzylinders erfolgte in der institutseigenen Zentralwerkstätte.

Abbildung 1.1 zeigt den Prüfstand vor seiner Modifikation. Dabei haben die nummerierten Teile folgende Funktion:

1. Pneumatischer Einfaltenbalg zur Krafteinleitung
2. Deckscheibe des hydrostatischen Prüflagers
3. Taschenscheibe des hydrostatischen Prüflagers
4. Ölzuführleitungen für Taschenlager und Ringlager
5. Statische Belastung des Prüflagers in Form von Gewichtsscheiben
6. Ölabfuhrleitungen
7. Fallvorrichtung
8. Ringlager des hydrostatischen Prüflagers
9. Kraftmessdose

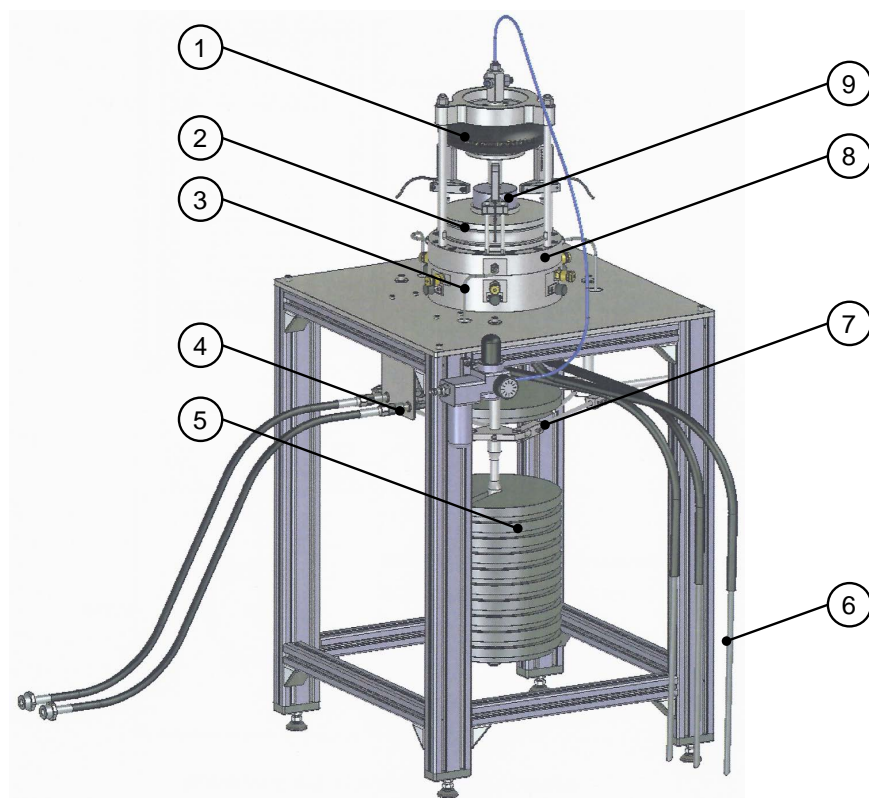


Abbildung 1.1: Prüfstand vor Modifikation, Quelle: Mörwald (2012), S. 5 (leicht modifiziert).

## 2 Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit ist es, eine geregelte, dynamische Kraft auf das Prüflager mithilfe des vorhandenen Hydraulikzylinders aufzubringen. Der Prüfstand ist dazu mit dem vorhandenen hydrostatisch gelagerten Prüfzylinder zu erweitern. Der Zylinder ist zusammenzubauen, am Prüfstand zu montieren und in Betrieb zu nehmen.

Die Regelung des Hydraulikzylinders ist auf einer SPS der X20-Reihe der Firma Bernecker & Rainer (B&R) zu implementieren. Als Spitzenprüfkraft ist 15 kN definiert. Die dem Regler vorgegebenen Kraftverläufe sind periodisch. Die größtmögliche Anregungsfrequenz ist nach erfolgter Regleroptimierung messtechnisch zu ermitteln. Als Signaltypen sollen dem Anwender Sinus-, Rechteck- und Dreieckverläufe zur Verfügung stehen.

Zu jedem Zeitpunkt soll ein sicherer Betrieb des hydrostatisch gelagerten Zylinders gewährleistet werden, damit unbeaufsichtigte Messungen möglich sind. Dazu erforderliche Sicherheitsmaßnahmen sind umzusetzen.

Weiters ist die Messwertaufnahme und Bedienung des Prüfstandes auf der SPS zu implementieren. Die Bedienung soll standortunabhängig von einem PC aus erfolgen können. Die Messwerte der Sensoren sind dem Benutzer nach erfolgter Messung als CSV-Textdatei zur Verfügung zu stellen.

Die Aufgabenstellung lässt sich in folgende Teilbereiche aufteilen:

1. Inbetriebnahme der SPS
2. Inbetriebnahme des Servoventils
3. Inbetriebnahme des Prüfzylinders
4. Aufbau der Elektrik
5. Implementierung der Kraftregelung
6. Programmierung der Benutzeroberfläche

## 2 Aufgabenstellung

---

Eine weitere Detaillierung der Teilaufgaben ist den folgenden Auflistungen zu entnehmen.

### Inbetriebnahme der SPS

- Herstellen einer Verbindung
- Test der I/O-Module
  - Test der analogen Eingänge  $0 \div 10\text{ V}$
  - Test der analogen Eingänge  $0 \div 20\text{ mA}$
  - Test der analogen Ausgänge  $0 \div 20\text{ mA}$
  - Test der digitalen Ausgänge

### Inbetriebnahme des Servoventils

- Herstellen einer Testumgebung
  - Fertigung eines Test-Ventilblocks
- Ansteuerung des Ventils
- Auslesen der Ventilschieberposition
- Druckregelung in einem Schlauchvolumen
  - Implementierung: Aufnahme Sprungantwort

### Inbetriebnahme des Prüfzylinders

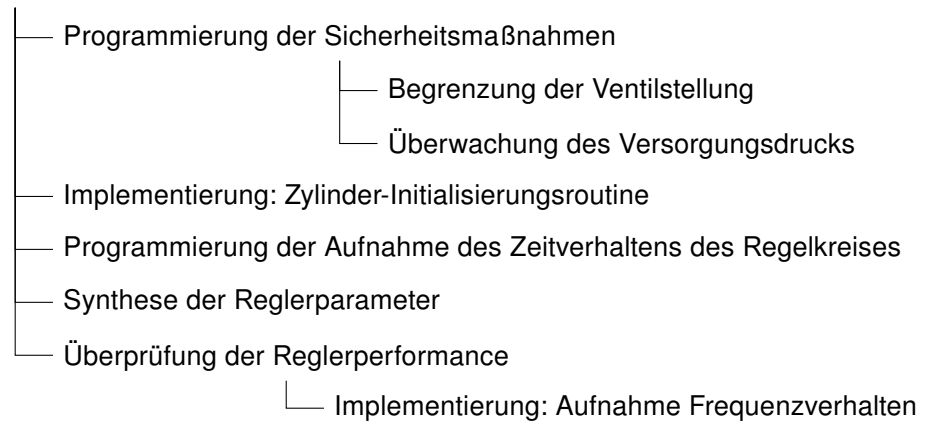
- Zusammenbau des Zylinders
- Fertigung eines Adapterblocks
- Anbau des Zylinders am Prüfstand
  - Zylinderaufnahme adaptieren
  - Hydraulikversorgung herstellen

### Aufbau der Elektrik

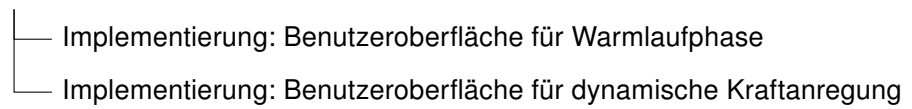
- Inbetriebnahme der Kraftmessdose
  - Aufbau: Schaltung zur Pufferung des Spannungs-Signals
- Stromlaufpläne für gesamten Prüfstand erstellen
- Einbau der Elektrik in Schaltschrank



### Implementierung der Kraftregelung



### Programmierung der Benutzeroberfläche



## 3 Hardware

Die gesamte Hardware war vor Beginn der Arbeit vorhanden. Der Prüfstand ist inklusive der Sensorik in funktionsfähigem Zustand übernommen worden. Am Prüflager wurden keine Veränderungen getroffen.

Abbildung 3.1 zeigt den Prüfstand nach den erfolgten Modifikationen. Dabei bezeichnen die nummerierten Elemente im Bild folgende Teile:

1. Proportional-Servoventil
2. Signalpufferung Kraftmessdose
3. SPS
4. Hydrostatischer Prüfzylinder

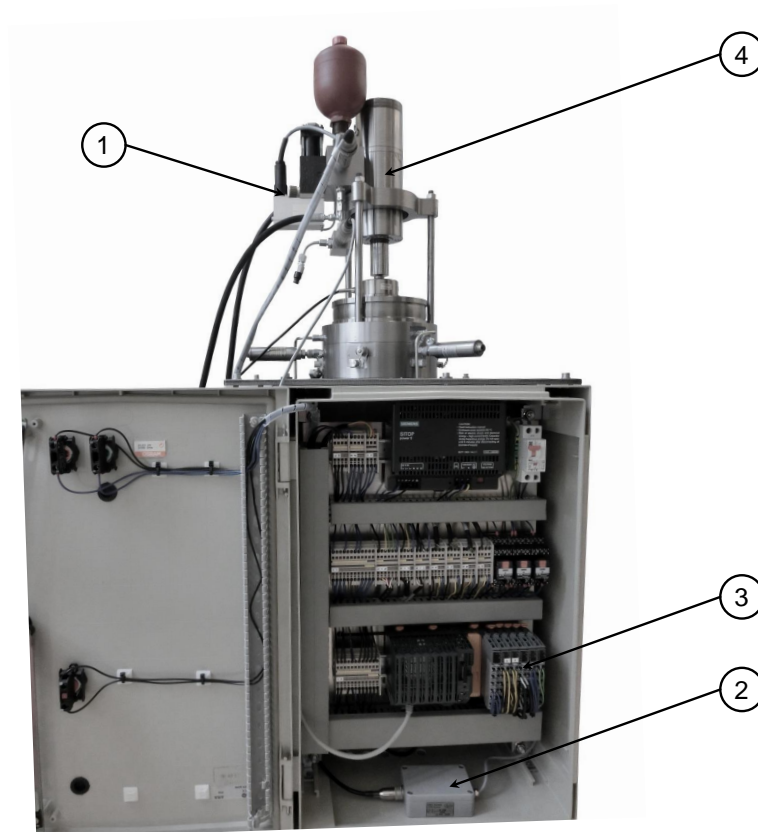


Abbildung 3.1: Prüfstand nach Modifikation, Quelle: Eigene Darstellung.

Am Tischgestell ist im Zuge der Modifikation ein Schaltschrank angebracht worden. In diesem ist die gesamte Elektrik untergebracht.

Der hydrostatisch gelagerte Prüfzylinder ersetzt den Einfaltenbalg. Die sternförmige Aufnahme leitet die Prüfkraft durch die Zugstäbe ab. Die Aufnahme kann nach Anpassung der inneren Ausnehmung an den Außendurchmesser des Prüfzylinders übernommen werden.

Abbildung 3.2 zeigt im Vordergrund die Baugruppe Prüfzylinder. Im unteren Bereich des Bildes ist das Prüflager zu sehen. Die nummerierten Teile in der Abbildung haben folgende Funktion:

1. Hydrospeicher
2. Servo-Proportionalventil
3. Rücklaufleitung
4. Versorgungsleitung für Ringlager
5. Zulaufleitung
6. Drucksensor 6P1
7. Adapterblock

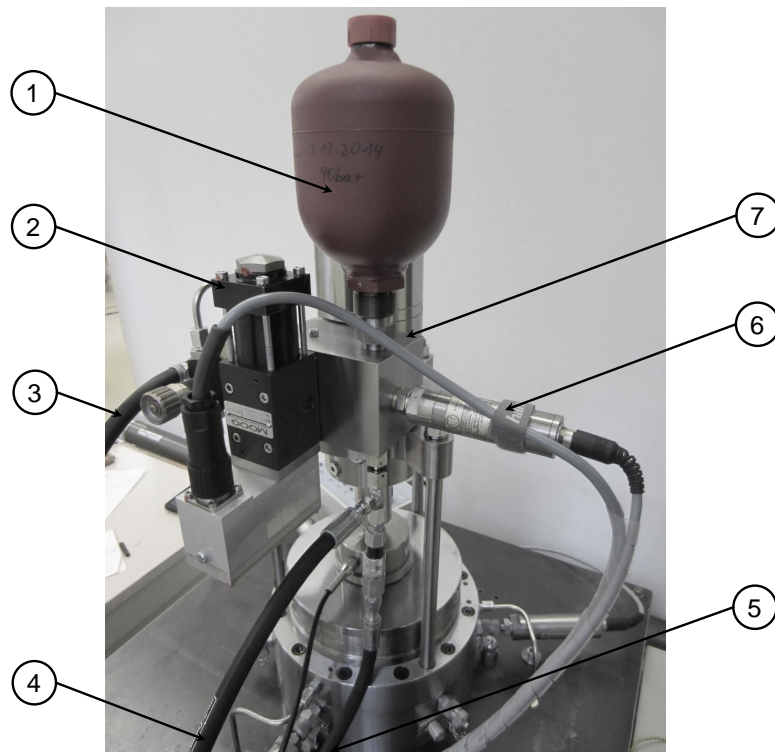


Abbildung 3.2: Baugruppe Zylinder, Quelle: Eigene Darstellung.

### 3.1 Gesamtsystem

Abbildung 3.3 zeigt die Teilsysteme des gesamten Prüfstandes nach der Modifikation. Die Beziehungen sind nach deren Signalcharakter farblich getrennt.

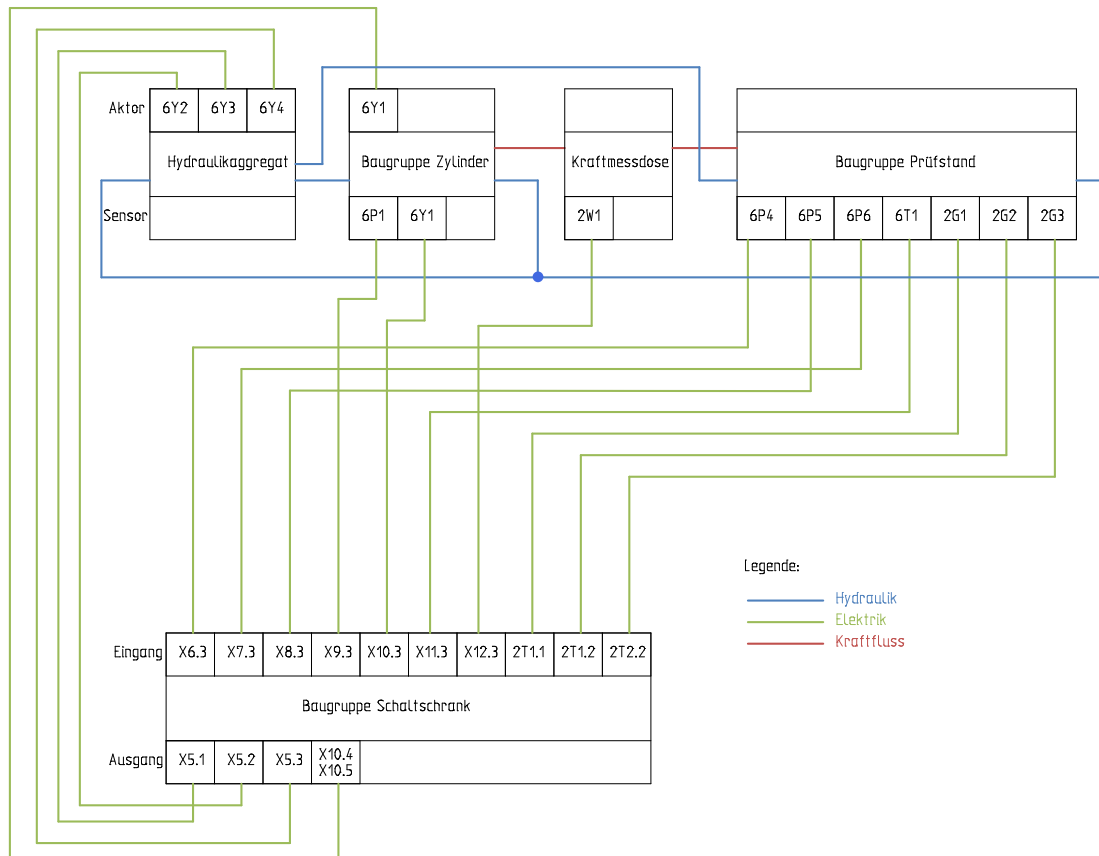


Abbildung 3.3: Systemische Betrachtung des modifizierten Prüfstandes, Quelle: Eigene Darstellung.

### 3 Hardware

In Abbildung 3.4 ist der Hydraulikschaltplan des gesamten Prüfstandes abgebildet. Die Elektrodokumentation, sowie Konstruktionszeichnungen der im Rahmen der Erweiterung angefertigten Bauteile sind dem Anhang beigefügt.

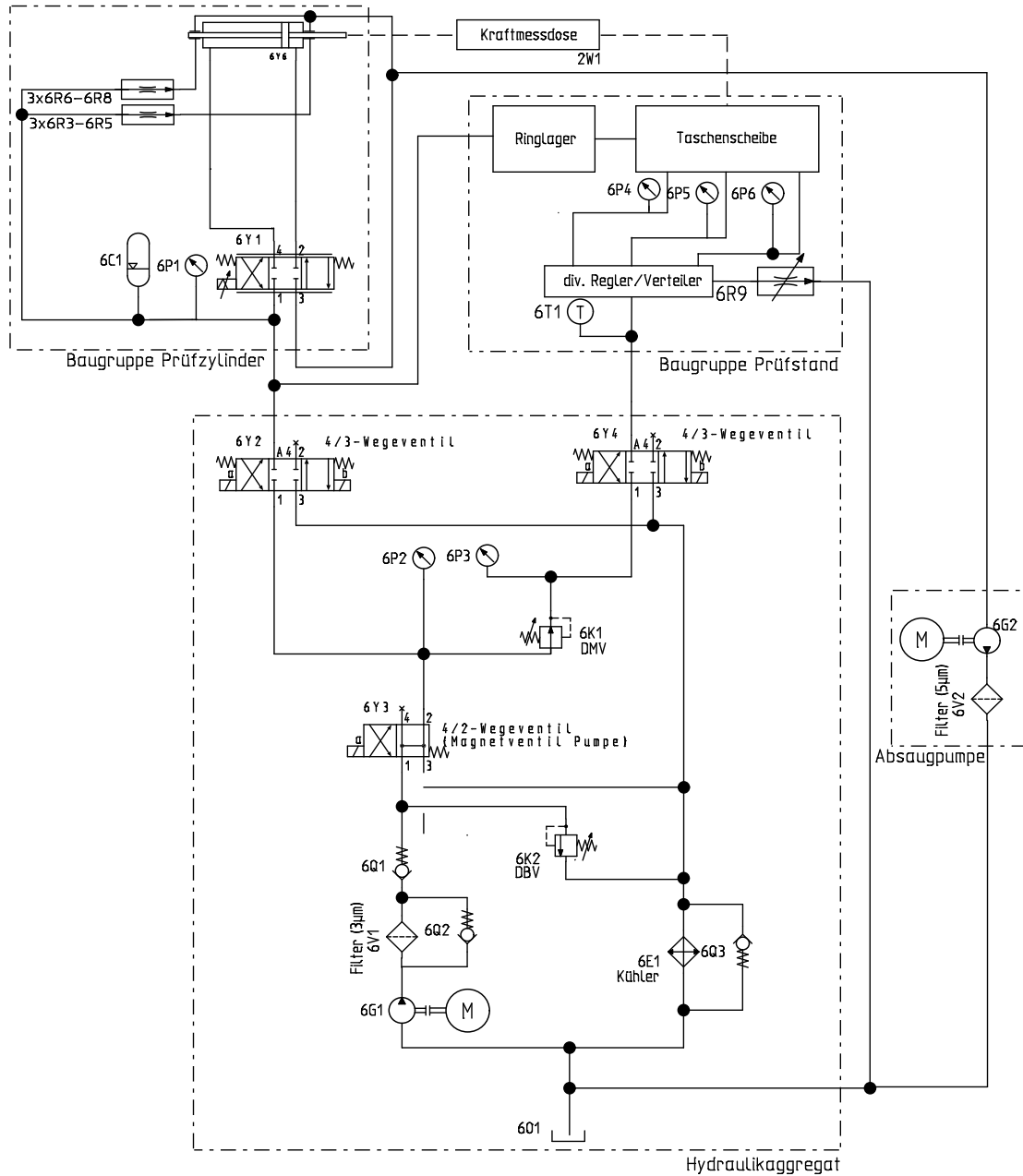


Abbildung 3.4: Hydraulikschaltplan, Quelle: Eigene Darstellung.

## 3.2 Sensorik

Die Sensorik des Prüfstandes umfasst die in Tabelle 3.1 dargestellten Teilbereiche. Alle Sensoren - mit Ausnahme von 6P1 - waren bereits vor Beginn dieser Arbeit Teil des Prüfstandes. Sie wurden im Zuge dieser Arbeit in den zentralen Schaltschrank neu verkabelt.

Tabelle 3.1: Funktionen der Sensoren am Prüfstand, Quelle: Eigene Darstellung.

Teilbereich	Sensor	Funktion
Kraftmessung	2W1	Bestimmung der auf das Prüflager aufgebrachtten Kraft
Lagerspaltmessung	2G1	Bestimmung der Lagerspalthöhe in Lagertasche 1
	2G2	Bestimmung der Lagerspalthöhe in Lagertasche 2
	2G3	Bestimmung der Lagerspalthöhe in Lagertasche 3
Druckmessung	6P1	Bestimmung des Versorgungsdrucks
	6P4	Bestimmung des Drucks in Lagertasche 3
	6P5	Bestimmung des Drucks in Lagertasche 2
	6P6	Bestimmung des Drucks in Lagertasche 1
Temperaturmessung	6T1	Bestimmung der Öl-Temperatur

### 3.2.1 Kraftmessung

Die Kraftmessdose der Firma Megatron hat die Herstellerbezeichnung KTB82-20KN-K-2410. Sie wird intern mit dem Kürzel 2W1 geführt und befindet sich unter dem Hydraulikzylinder auf der Deckscheibe.

Zwischen der Kraftmessdose und Wanklerkarte der SPS befindet sich im Signalweg eine Operationsverstärkerschaltung. Durch die vollständige Gegenkopplung des Ausgangssignals der Operationsverstärkerschaltung ist die elektrische Verstärkung  $V_{op} = 1$ . Abbildung 3.5 zeigt den Signalweg der Kraftmessdose.

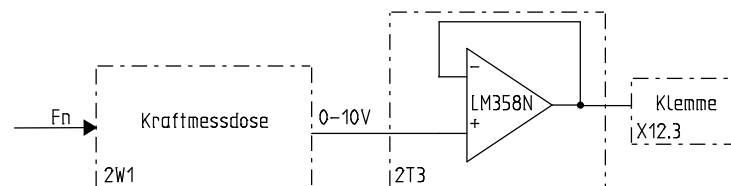


Abbildung 3.5: Signalweg der Kraftmessdose, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Pufferung durch einen Spannungsfolger ist notwendig, um kleine Kräfte erfassen zu können. Je kleiner die messbare Kraft, umso früher kann die Detektion des sicheren Anstehens der Kolbenstange auf der Kraftmessdose erfolgen. Die absolute Genauigkeit der Aussage über die Kraft ist zu diesem Zweck von untergeordneter Rolle. Wichtig ist ein Abheben des gewandelten Wertes vom Offset. Tabelle 3.2 zeigt die Messungen des Gleichanteils im Signal jeweils mit

und ohne Pufferung. Die Messungen wurden mit und ohne Wandlerkarte durchgeführt, um die Problematik und die Eignung des verwendeten Operationsverstärkers für diesen Anwendungsfall zu verdeutlichen. Ohne Pufferung sind Kräfte unter 350 N (174 mV) nicht erfassbar, da sie zu keiner Veränderung des Mess-Signals führen. Durch die Pufferung des Signals sinkt der nicht erfassbare Bereich auf unter 13.6 mV.

Tabelle 3.2: Gleichanteile des Spannungssignals der Kraftmessdose, Quelle: Eigene Darstellung.

Messzustand		Unbelastet	Belastung 1 kN
ohne SPS	ohne Pufferung	13.8 mV	0.48 V
mit SPS		173.6 mV	0.46 V
ohne SPS	mit Pufferung	13.3 mV	0.48 V
mit SPS		13.6 mV	0.45 V

Um die geringste messtechnisch erfassbare Kraft zu ermitteln, wurden zu statischen Lasten digitalisierte Mess-Signale über jeweils einen Zeitraum von vier Sekunden erfasst. Abbildung 3.6 zeigt die stark verrauschten Signale der Kraftmessdose. Der digitalisierte Kraftwert wird auf der SPS als Integer Wert (INT-Wert) mit einer Auflösung von 16 bit gespeichert.

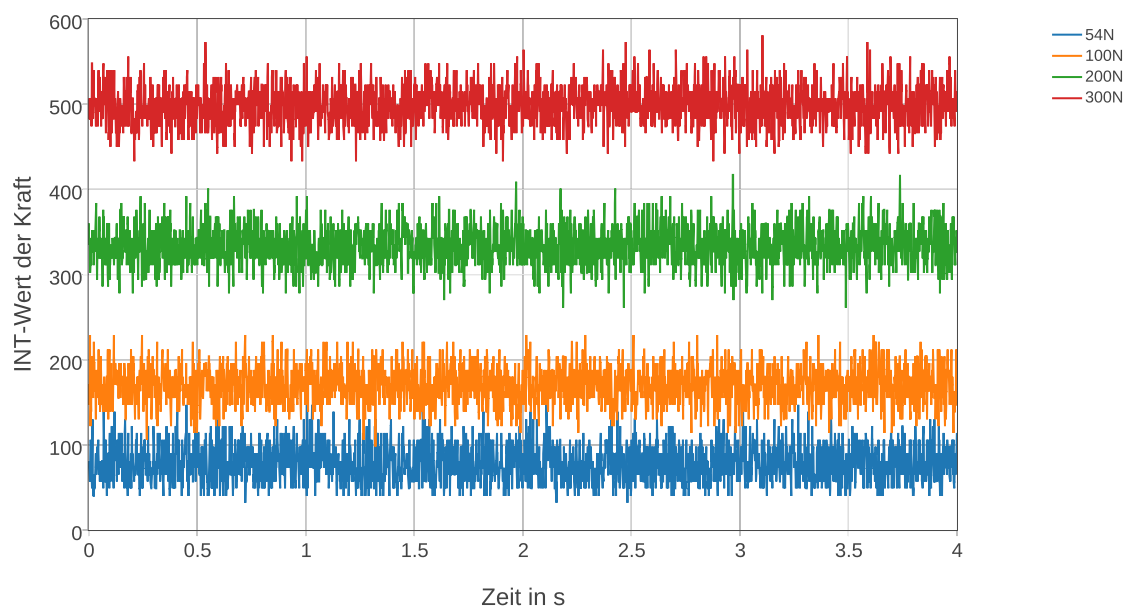


Abbildung 3.6: Zeitlicher Verlauf der digitalisierten Kraftmess-Signale, Quelle: Eigene Darstellung.

Um Informationen über die Signalgüte zu erhalten, eignen sich Histogramme, in denen die relative Häufigkeit des Auftretens eines INT-Wertes dargestellt wird.

Abbildung 3.7 zeigt die Verteilung des Signals bei unbelasteter Kraftmessdose. Man sieht den Offset des Mess-Signals als INT-Wert von 49.

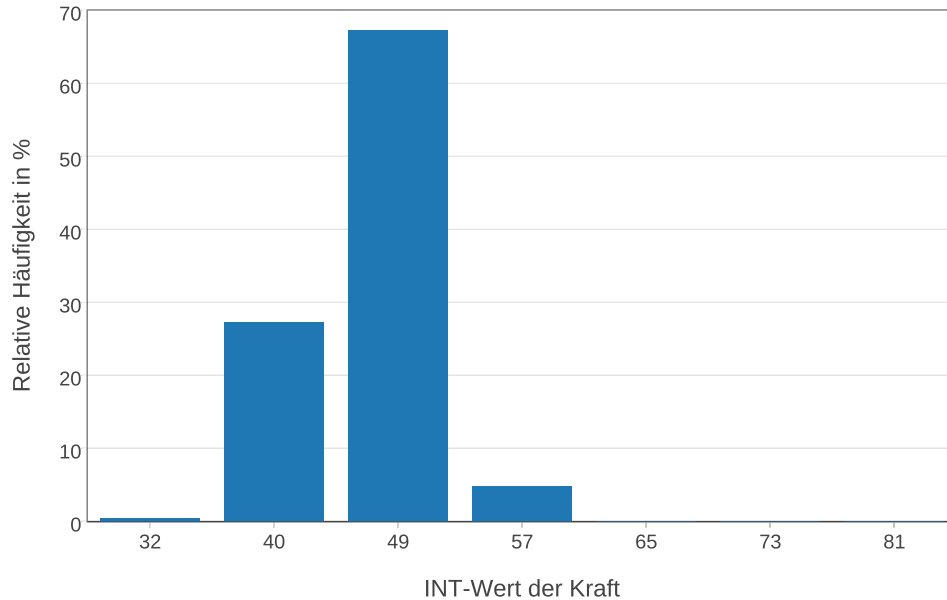


Abbildung 3.7: Histogramm des Kraft-Mess-Signals bei 0 N, Quelle: Eigene Darstellung.

Das Histogramm bei einer Belastung von 49 N ist in Abbildung 3.8 dargestellt. Es ist nicht möglich das Aufliegen des Kolbens auf der Kraftmessdose sicher zu detektieren, da sich das Signal nicht wesentlich vom Offset unterscheidet.

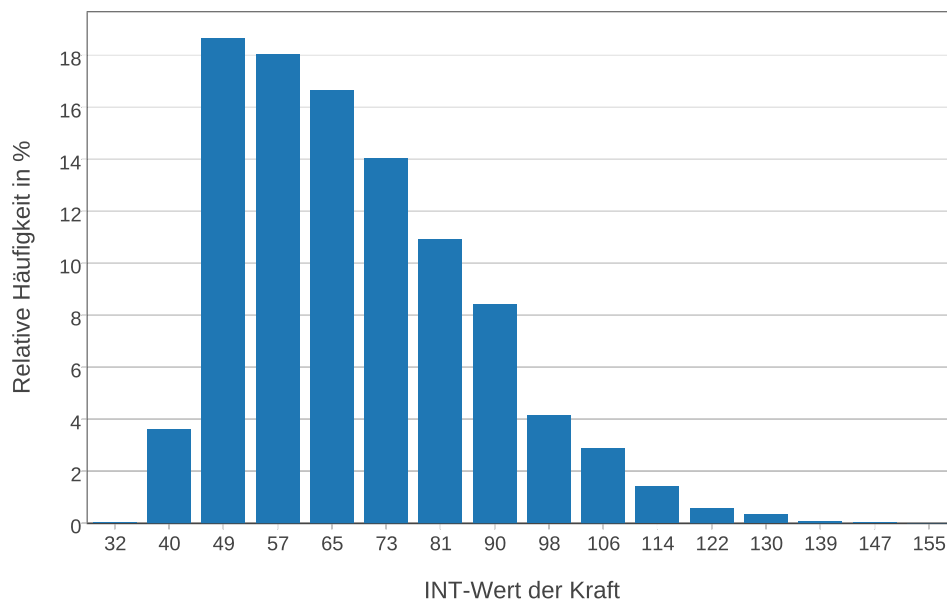


Abbildung 3.8: Histogramm des Kraft-Mess-Signals bei 49 N, Quelle: Eigene Darstellung.



Ab einer Kraft von 54 N ist eine deutliche Veränderung des digitalisierten Mess-Signals erkennbar. Die Verteilung des Signals zeigt Abbildung 3.9.

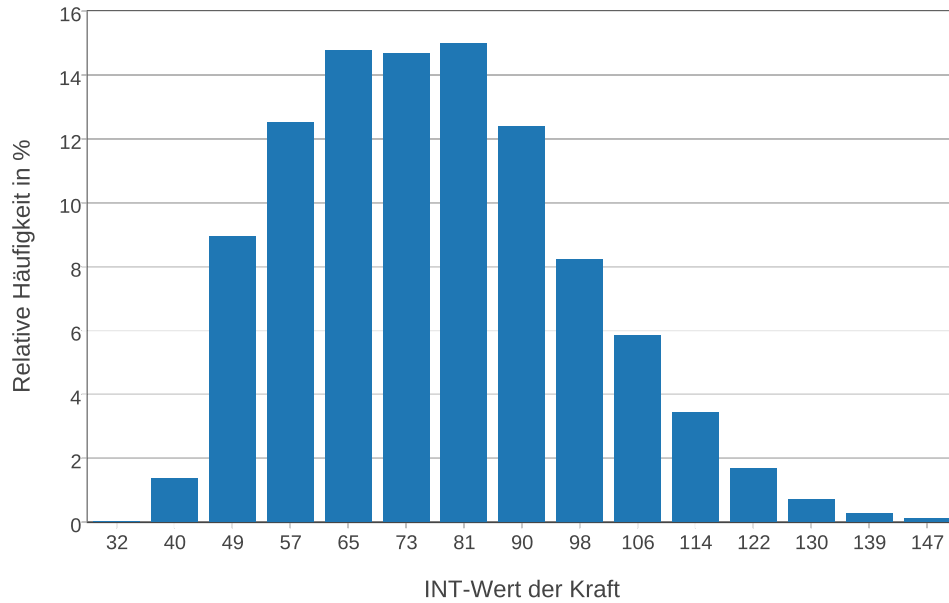


Abbildung 3.9: Histogramm des Kraft-Mess-Signals bei 54 N, Quelle: Eigene Darstellung.

Eine Kraft von 300 N führt zu einem Herausbilden eines Mittelwertes, der sich vom Grundrauschen des Messsignals abhebt. Das Histogramm des Signals zeigt Abbildung 3.10.

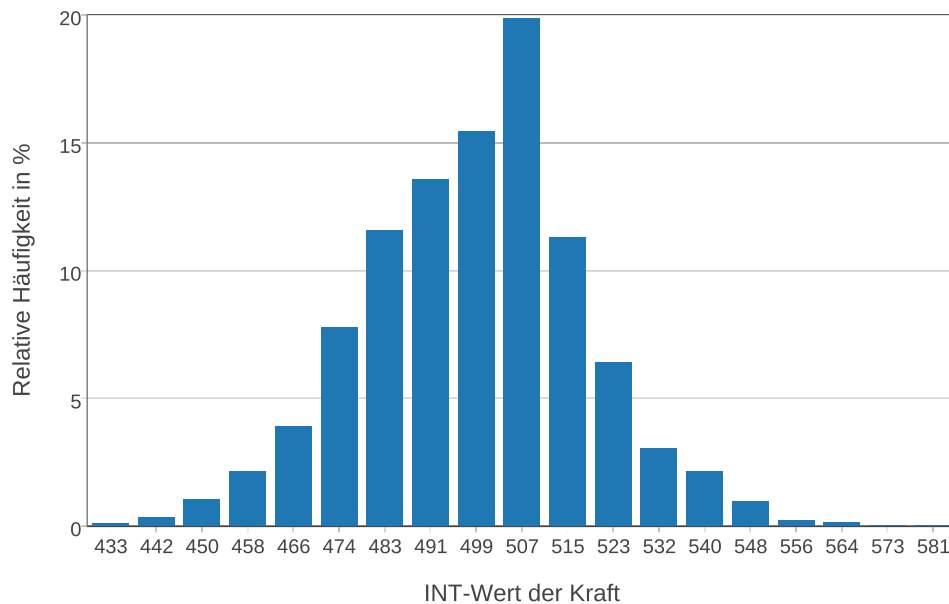


Abbildung 3.10: Histogramm des Kraft-Mess-Signals bei 300 N, Quelle: Eigene Darstellung.

54 N ist als die geringste messtechnisch erfassbare Kraft anzusehen, wenngleich der Messfehler in diesem Bereich groß ist. Ab 300 N steigt die Wahrscheinlichkeit einer korrekt detektierten Kraft, wodurch erst ab diesem Punkt eine Messung als sinnvoll anzusehen ist.

Das Kalibrationsprotokoll der Kraftmessdose ist dem Anhang beigelegt.

#### **3.2.2 Lagerspaltmessung**

Die Wirbelstromsensoren messen die Lagerspalthöhe innerhalb des hydrostatischen Prüflagers. Sie sind an drei Stellen unter der Taschenscheibe angebracht und detektieren den Abstand der Deckscheibe von der Taschenscheibe.

Als Sensoren kommen drei WayCon T05-G-KA mit maximaler Messdistanz von 0,5 mm zum Einsatz, die an zwei 2-Kanal-Verstärkermodule TX2 angeschlossen sind. Die Kalibrationsprotokolle der Sensoren sind dem Anhang beigelegt.

Durch die Einbaulage der Wirbelstromsensoren ergibt sich bei Aufliegen der Deckscheibe ein Offset von 0,1 mm. Für die Messung interessiert die Veränderung zu diesem Wert, wodurch die Höhe des Ölfilms bestimmt wird. Da die Komponenten einen Temperaturdrift aufweisen, muss der Offset vor jeder Messung bestimmt werden. Die Tarierung wird als Teil einer Initialisierungsroutine vor jeder Messung automatisch durchgeführt.

#### **3.2.3 Druckmessung**

An vier Mess-Stellen im System sind Absolutdruckaufnehmer angebracht. Bei allen Drucksensoren handelt es sich dabei um Hydrotechnik PR15. Die Sensoren liefern ein Stromsignal (0 bis 20 mA) an die SPS.

Drei der Sensoren sind an der Taschenscheibe angebracht und können, je nach der in Betrieb befindlichen Taschentype, versetzt werden. Der Anschluss der Sensoren erfolgt über Minimessverschraubungen.

Der vierte Sensor (6P1) dient der Drucküberwachung. Er ist am Adapterblock des Proportionalregelventils angebracht und misst den vom Aggregat aufgebauten Druck direkt vor dem Zylinder. Als Grenzdruck sind 60 bar definiert. Unterhalb dieses Drucks kann durch die hydrostatische Lagerung der Kolbenstange kein ausreichender Lagerspalt garantiert werden. Fällt der Druck unter den Grenzwert, wird ein Verfahren der Kolbenstange durch die Software blockiert.

#### **3.2.4 Temperaturmessung**

Die Temperatur des Öls wird vor der Aufteilung in die Taschen gemessen. Dazu dient ein PT-100 der Firma Hydrotechnik mit einem Stromsignal (0 bis 20 mA) und einem Messbereich von (−50 bis 150 °C) mit der Bezeichnung 6T1.

Insbesondere die Viskosität des Hydrauliköls weist eine starke Temperaturabhängigkeit auf. Das im Prüfstand verwendete Öl ist ein nach DIN 51524 genormtes Öl mit der Typennummer HLP 46. Laut Datenblatt weist das Öl eine dynamische Viskosität von  $\eta = 42 \text{ mPas}$  bei einer Öltemperatur von  $40^\circ\text{C}$  auf. Die Temperaturabhängigkeit der Viskosität ist linear.<sup>1</sup> Durch Viskositätsmessungen am verwendeten Hydrauliköl ist die Viskositätsabnahme mit  $\Delta\eta = 1.54 \frac{\text{mPas}}{^\circ\text{C}}$  bekannt.<sup>2</sup> Für vergleichbare Messungen ist eine Öltemperatur um  $40^\circ\text{C}$  einzuhalten. Die Öltemperatur ist messtechnisch zu erfassen und zu protokollieren.

### 3.3 SPS

Die SPS ist das Verbindungsglied zwischen Sensorik und Aktorik. Sie arbeitet Befehle zyklisch ab und setzt gemäß der auf ihr programmierten Logik Eingangssignale in Ausgangssignale um. Sie ist aus mehreren, über einen Feldbus kommunizierenden Modulen aufgebaut.

Die Zentraleinheit der SPS hat eine CPU mit einer Taktfrequenz von  $0.6 \text{ GHz}$  und  $256 \text{ MB}$  Arbeitsspeicher. Eine CompactFlash-Karte dient als Anwenderspeicher. In der Zentraleinheit ist eine Ethernetschnittstelle zur Kommunikation verfügbar.

Neben der zyklischen Abarbeitung der in Programmen hinterlegten Logik ist die Messdatenerfassung eine zentrale Aufgabe der SPS. Alle A/D-Wandlerkarten erfassen Eingangssignale, welche auf ein gemeinsames Massepotential bezogen sind und wandeln sie mit einer Auflösung von  $12 \text{ bit}$  um. Die Wandlungszeit beträgt  $400 \mu\text{s}$ .

---

<sup>1</sup>Vgl. Findeisen (2015), S. 81 f.

<sup>2</sup>Vgl. Mörwald (2012), S. 39 ff.

Die Module sind in Tabelle 3.3 aufgelistet und in Abbildung 3.11 dargestellt.

Tabelle 3.3: X20-Module, Quelle: Eigene Darstellung.

Bildnummer	Bezeichnung.	Type	Funktion
1	1K1	X20 CP 1584	Zentraleinheit
2	3K2	X20 AI 4322	4xAn. Eing.(0 bis 20 mA)
3	3K1	X20 AI 4322	4xAn. Eing.(0 bis 20 mA)
4	2K1	X20 AI 4222	4xAn. Eing. ( $\pm 10$ V)
5	5K1	X20 DO 8322	8xDig. Ausg. (24 V , 500 mA)
6	4K1	X20 AO 2622	2xAn. Ausg.(0 bis 20 mA)

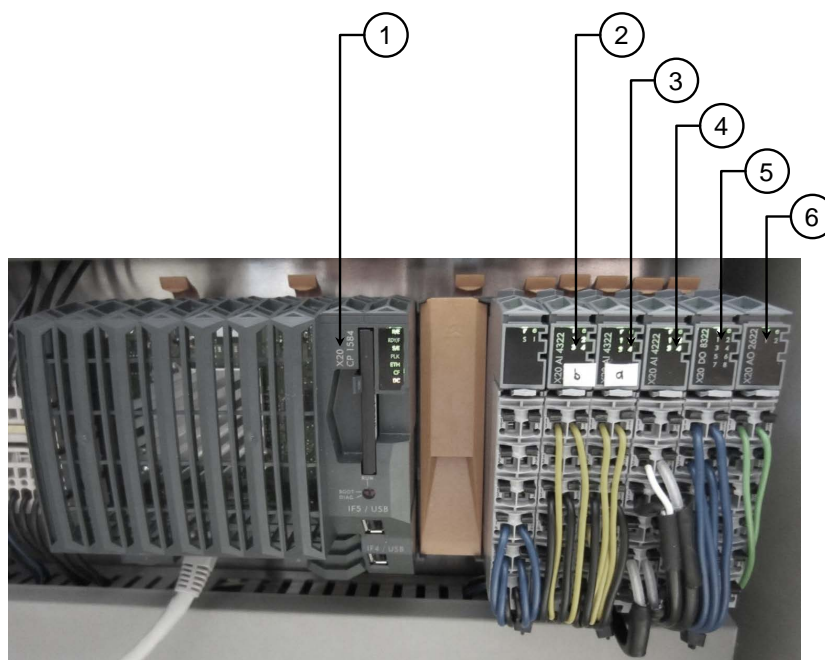


Abbildung 3.11: SPS mit I/O-Modulen, Quelle: Eigene Darstellung.

### 3.4 Aktorik

Ein hydrostatisch gelagerter Prüfzylinder ersetzt den Einfaltenbalg zur Krafteinleitung in das Prüflager.

Das Stetigventil der Firma MOOG mit der Typenbezeichnung D633-203 R04K01MON6P2 und einem Nennvolumenstrom von  $5 \frac{1}{\text{min}}$  steuert den Volumenstrom in die Zylinderkammern A und B. Die Verschaltung ist aus dem Hydraulikschaltplan (Abbildung 3.4) ersichtlich. Der innere Aufbau des Ventils ist in Abbildung 3.12 dargestellt. Die interne Elektronik regelt den permanentmagnetisch erregten Linearmotor, sodass der Steuerkolben eine dem externen Stromsignal entsprechende Stellung einnimmt. In Neutralstellung wird der Steuerkolben durch eine Rückstellfeder in eine Mittelposition bewegt. In dieser Position ergibt sich eine Nullüberdeckung der Steuerkanten.

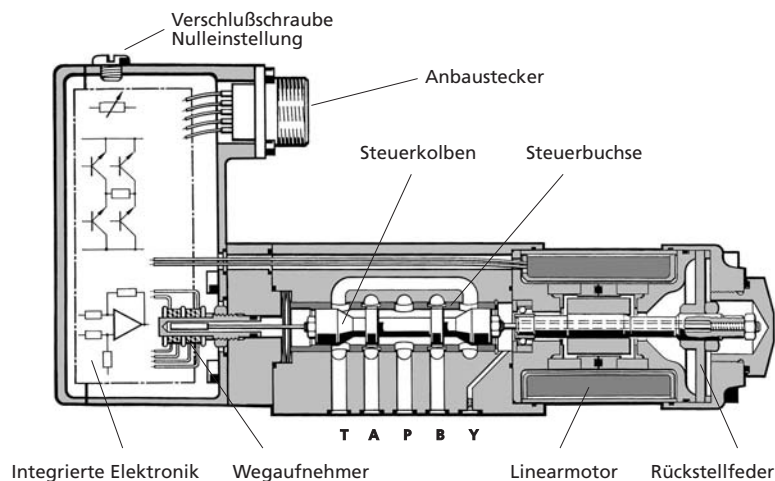


Abbildung 3.12: Aufbau des Proportionalventils, Quelle: MOOG (2009), S. 3.

Um das Ventil mit dem Zylinder zu verbinden, wurde ein Adapterblock geplant und gefertigt. Zusätzlich zu den Anschlüssen für Pumpe, Tank ist ein Hydrospeicher aufgeschraubt. Dieser kompensiert Druckschwankungen im System. Eine Aufnahmebohrung für einen Drucksensor ist notwendig, um den Versorgungsdruck überwachen zu können. In zwei zusätzliche Bohrungen können Drucksensoren eingeschraubt werden. Damit lässt sich der Druck in den Zylinderkammern messen.

Der von Sebastian Gradauer im Rahmen seiner Bachelorarbeit konstruierte Zylinder wird als Teil dieser Arbeit zusammengesetzt und in Betrieb genommen. Abbildung 3.13 zeigt einen Schnitt durch den hydrostatisch gelagerten Prüfzylinder.

Die nummerierten Teile haben folgende Funktion:

1. Ölsammelnut für hydrostatische Kolbenstangenlagerung
2. Tasche mit Zulaufbohrung für hydrostatische Kolbenstangenlagerung
3. Hohle Kolbenstange
4. Doppelabstreifring
5. Ölsammelnut für Lecköl
6. Statische Dichtung durch O-Ring
7. Zylinderkammer B
8. Zylinderkammer A
9. Aufnahme der Zuganker

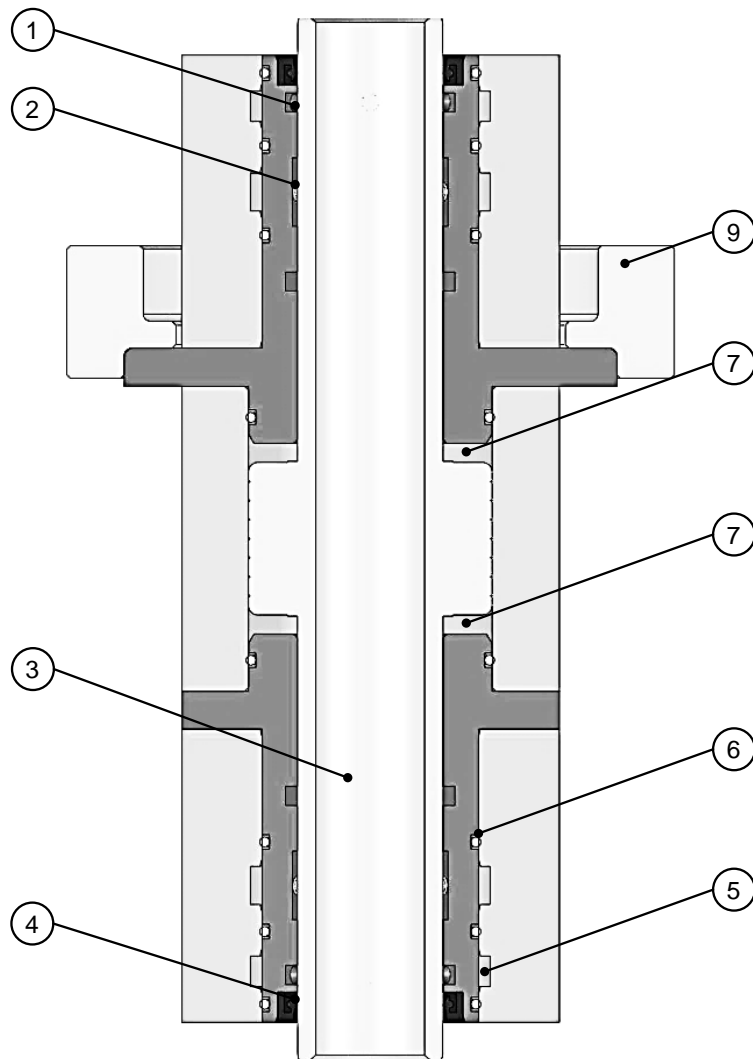


Abbildung 3.13: Schnittansicht des Prüfzylinders, Quelle: Eigene Darstellung.

## 4 Kraftregelung

Eine Kraftregelung ermöglicht es, eine definierte, dynamische Kraft auf das Prüflager aufzubringen. Der Aktor ist ein hydrostatisch gelagerter Gleichgangzylinder, welcher im Rahmen der Bachelorarbeit von Herrn Sebastian Gradauer konstruiert wurde. An die Kraftregelung werden hohe Anforderungen hinsichtlich der Genauigkeit, Dynamik und Flexibilität gestellt. Diese können durch die Umsetzung auf einer SPS erfüllt werden.

### 4.1 Randbedingungen

Das Prüflager wird mit periodischen Kraftverläufen beaufschlagt. Die Signaltypen können zwischen Sinus, Rechteck und Dreieck variieren.

Der Gleichanteil des Signals kann von 200 N bis 10 kN betragen, bei einer Amplitude von bis zu 5 kN. Die kleinste mit dem Sollverlauf erreichte Kraft darf 200 N nicht unterschreiten. Darunter kann nicht mehr gewährleistet werden, dass die Kolbenstange auf der Kraftmessdose aufliegt. Die Anregungsfrequenz kann zwischen 0.1 Hz und 25 Hz liegen. Die obere Grenze wurde nach erfolgter Regloptimierung ermittelt.

In Abbildung 4.1 sind die Parameterbereiche dargestellt.

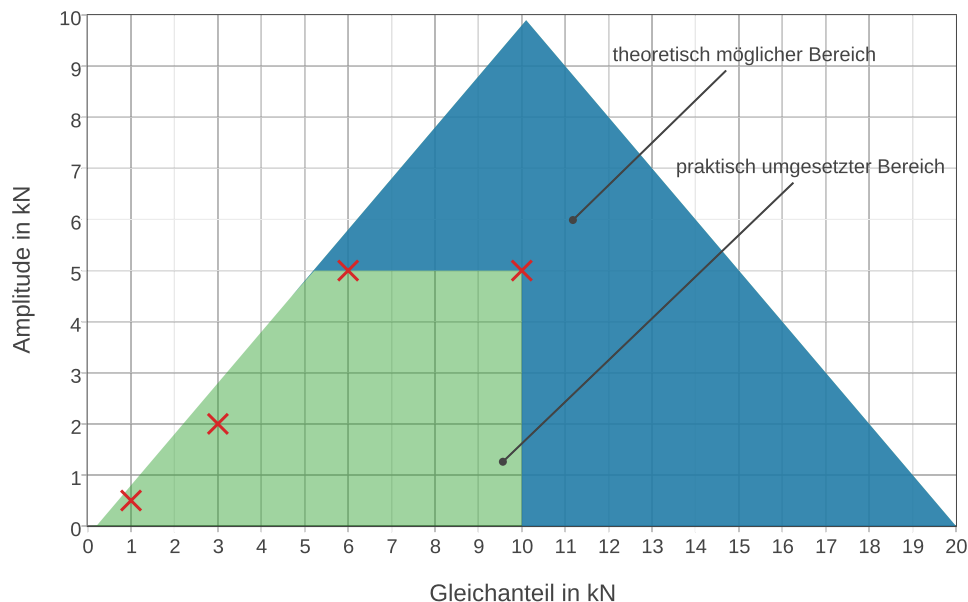


Abbildung 4.1: Parameterbereiche der Sollkurve, Quelle: Eigene Darstellung.

Der in blau dargestellte Bereich ist mit der vorhandenen Hardware theoretisch möglich. Der für die Reglerauslegung herangezogene Bereich ist grün hinterlegt. Die maximale Prüfkraft kann theoretisch 20 kN betragen und ist durch den Messbereich der Kraftmessdose begrenzt. Zur dynamischen Anregung wird eine maximal erreichbare Kraft von 15 kN angesetzt, wodurch eine Sicherheitsreserve gegen das Überschreiten der maximalen Prüfkraft gewährleistet ist.

Die rot markierten Punkte sind Hauptstützstellen der Parameterbestimmung. Deren Gleichanteil und Amplitude sind in Tabelle 4.1 aufgelistet. An diesen Punkten wurden die Reglerparameter experimentell ermittelt.

Die durch den weiten Bereich der Sollkurven-Parameter geforderte Flexibilität der Regelung macht im Betrieb ein dynamisches Errechnen der Reglerparameter notwendig. Um für den gesamten Bereich eine Kraftregelung umzusetzen, werden die Reglerparameter durch den Regelalgorithmus interpoliert. Damit kann jeder Punkt innerhalb des praktisch umgesetzten Bereiches mit der implementierten Kraftregelung erreicht werden.

Tabelle 4.1: Hauptstützstellen der Reglerauslegung, Quelle: Eigene Darstellung.

Hauptstützstelle	Gleichanteil $\bar{F}_s$	Amplitude $\hat{F}_s$
1	10 kN	5 kN
2	6 kN	5 kN
3	3 kN	2 kN
4	1 kN	0.5 kN



## 4.2 Prinzip der Kraftregelung

Der schematische Aufbau des Regelkreises ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

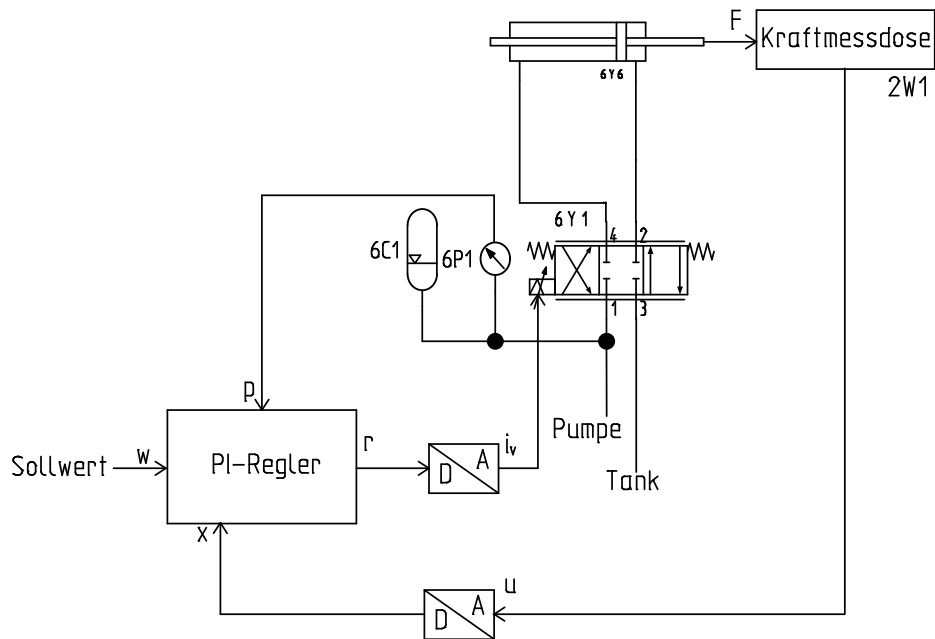


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung der Kraftregelung, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Regelabweichung lässt sich nach Formel 4.1 berechnen.

$$e(t) = w(t) - x(t) \quad (4.1)$$

Dem umgesetzten Regelalgorithmus liegt ein PI-Regler zugrunde. Der Wirkungsplan des Reglers ist in Abbildung 4.3 dargestellt.

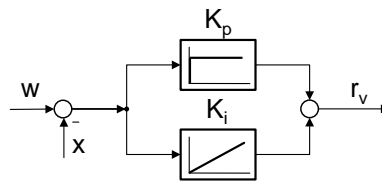


Abbildung 4.3: Wirkungsplan des implementierten PI-Reglers, Quelle: Eigene Darstellung.

Dabei bezeichnet  $K_p$  den Verstärkungsfaktor des Proportionalanteils, und  $K_i$  den des Integralanteils.

Im zeitkontinuierlichen Fall ist die mathematische Beschreibung für die Stellgröße eines PI-Reglers wie in Formel 4.2 angegeben.<sup>3</sup>

$$r(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\delta) \cdot d\delta \quad (4.2)$$

Während der Proportionalanteil in dem Moment wirkt, in dem die Regelgröße von der Führungsgröße abweicht, zieht der integrierende Anteil alle in der Vergangenheit liegenden Abweichungen in Betracht. Dadurch kann im stationären Fall der Regelfehler zu Null werden. Bei einem reinen P-Regler ergibt sich aufgrund der für die Wirkung notwendigen Regelabweichung ein stationärer Regelfehler.

Für den zeitdiskreten Fall gilt für die durch den Regler errechnete Stellgröße zum Zeitpunkt  $t_j$  mit  $j > 0$  die in Formel 4.3 angegebene Berechnungsvorschrift.

$$r(t_j) = K_p \cdot e(t_j) + \frac{K_i}{(t_j - t_{(j-1)})} \cdot \sum_{k=0}^{k=j} e(t_k) \quad (4.3)$$

Die Zeitschrittweite errechnet sich nach Gleichung 4.4

$$t_a = (t_j - t_{(j-1)}) \quad (4.4)$$

Die Größe  $t_a$  ist die Abtastrate des Systems und ist mit der Zykluszeit des Programms, welches die Kraftregelung aufruft, gleichzusetzen. Für die Reglerimplementierungen gilt  $t_a = 0.4 \text{ ms}$ , was der geringsten auf der SPS möglichen Taskzykluszeit entspricht.

Die Anforderung besteht darin, die Reglerparameter  $K_p$  und  $K_i$  so zu wählen, dass sich für das in Kapitel 4.1 beschriebene Anwendungsspektrum ein optimales Führungsverhalten des Reglers ergibt.

---

<sup>3</sup>Philippsen (2015), S. 115.



### 4.3.1 Modell des Servoventils

Das Servoventil ist ein elektro-hydraulischer Umformer. Gemäß des Steuerstroms ergibt sich eine durch die interne Positionsregelung geführte Ventilschieberstellung. Die Ausregelzeit ist bei einer sprunghaften Änderung der Soll-Ventilstellung, verglichen mit der hydraulischen Zeitkonstante des Zylinders, gering. Das Ventil wird daher vereinfacht als linearisiertes Modell zweiter Ordnung abgebildet<sup>4</sup>. Dabei wird der elektrische Teil des Signalweges im Ventil nicht berücksichtigt und der Ventilschieber als schwingungsfähiges System mit Dämpfung betrachtet. Die Bewegungsgleichung des Ventilschiebers in Form eines Wirkungsplans ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

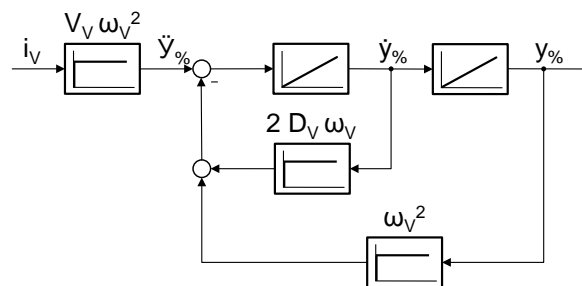


Abbildung 4.5: Diskreter Wirkungsplan des Servoventilmodells, Quelle: Murrenhoff (2008), S. 230 (leicht modifiziert).

Die Parameter für das Modell des Ventilschiebers sind in Tabelle 4.2 aufgelistet.

Tabelle 4.2: Parameter für das Modell des Servoventils, Quelle: Eigene Darstellung.

Größe	Wert	Einheit
$\omega_V$	700	$\frac{1}{s}$
$D_V$	0.35	1
$V_V$	0.2	$\frac{\%}{mA}$

Die Kenngrößen des mechanischen Ventilmodells wurden experimentell durch Vergleich des internen Positionssignals  $v_V\%$  mit den Ergebnissen des Simulationsmodells ermittelt. Abbildung 4.6 stellt die simulierten und gemessenen Führungssprünge des Ventilschiebers dar.

<sup>4</sup>vgl. Murrenhoff (2008), S. 229 ff.

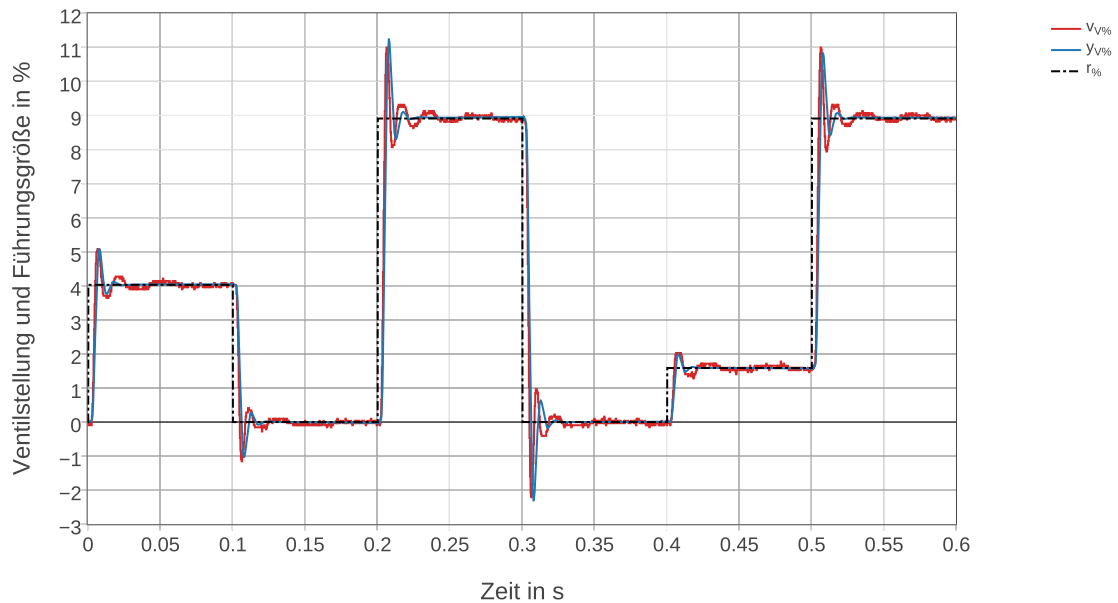


Abbildung 4.6: Führungssprünge der Ventilstellung, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Auslenkung des Ventilschiebers führt zu einem Lastvolumenstrom  $Q_L$ , welcher die zu- und abfließenden Volumenströme in den Zylinder gemäß Gleichung 4.5 darstellt.<sup>5</sup> Für das Servoventil wird eine ideale Nullüberdeckung der Steuerkanten angenommen. Idealisierterweise kommt es zu keiner durch die Ventilstellung abhängigen Leckage.

$$Q_L = Q_A = -Q_B = Q_{ps,max} \cdot \frac{y_{V\%}}{100\%} \cdot \sqrt{1 - \frac{p_L}{p_s} \cdot \text{sign}(y_{V\%})} \quad (4.5)$$

Der lastfreie Volumenstrom  $Q_{ps,max}$  wird als statischer Ventilkennwert aus dem Datenblatt entnommen. Abbildung 4.7 zeigt das dazu erforderliche Diagramm. Unter den vorliegenden Betriebsbedingungen gilt  $Q_{ps,max} = 5.9 \frac{1}{\text{min}}$ .

<sup>5</sup>Murrenhoff (2008), S. 182.

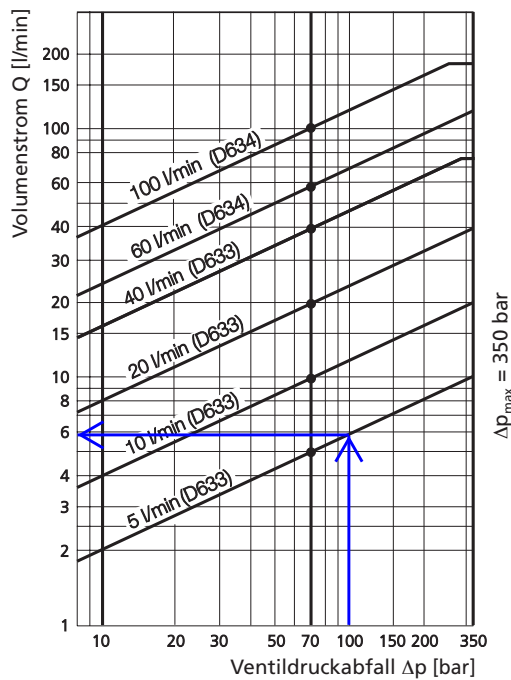


Abbildung 4.7: Volumenstrom-Diagramm, Quelle: MOOG (2009), S. 8.

Durch die Volumenströme  $Q_A$  und  $Q_B$  kommt es zu einer Druckänderung in den Zylinderkammern. Die Differenz des Drucks in den Kammern A und B ist der Lastdruck  $p_L$ , welcher die Kraft auf das Prüflager bewirkt.

Um den wirksamen Lastvolumenstrom durch das Ventil zu berechnen geht man von zwei voneinander unabhängigen Einflussfaktoren aus. Einerseits beeinflusst der durch die Ventil-schieberauslenkung bestimmte blendenförmige Widerstand die Größe des Volumenstroms, andererseits kommt es zu einer Rückwirkung auf den Lastvolumenstrom durch den sich verändernden Lastdruck<sup>6</sup>. Gleichung 4.6 stellt die linearisierte Berechnungsgrundlage für den Lastvolumenstrom durch das Ventil in einem Arbeitspunkt (AP) dar.

$$Q_L = Q_{L,AP} + V_{Qy}(p_L, y_{V\%,AP}) \cdot (y - y_{V\%,AP}) + V_{Qp}(p_{L,AP}, y_{V\%,AP}) \cdot (p_L - p_{L,AP}) \quad (4.6)$$

<sup>6</sup>vgl. Murrenhoff (2008), S. 191 ff.

Die Volumenstromsignalverstärkung  $V_{Qy}$  und die Volumenstromdruckverstärkung  $V_{Qp}$  werden nach Gleichung 4.7 und 4.8 durch die partiellen Ableitungen nach  $y_{V\%}$  und  $p_L$  aus 4.5 gebildet.

$$V_{Qy} = \frac{Q_{ps,max}}{100\%} \cdot \sqrt{1 - \frac{p_{L,AP}}{p_s} \cdot \text{sign}(y_{V\%})} \quad (4.7)$$

$$V_{Qp} = \frac{Q_{ps,max}}{2p_s} \cdot \frac{y_{V\%,AP}}{100\%} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{p_{L,AP}}{p_s} \cdot \text{sign}(y_{V\%,AP})}} \quad (4.8)$$

Der auf das Servoventil reduzierte Wirkungsplan ist in Abbildung 4.8 dargestellt.  $Q_{th}$  bezeichnet den theoretischen Volumenstrom im Arbeitspunkt ohne Rückwirkung der Lastdruckänderung. Die Vorgehensweise zur Ermittlung von  $p_{L,AP}$  und  $y_{V\%,AP}$  ist in Kapitel 4.3.3 beschrieben.

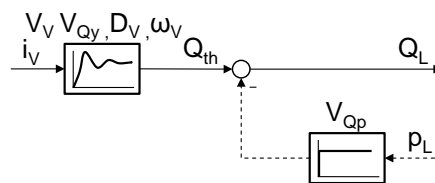


Abbildung 4.8: Wirkungsplan des Servoventilmodells als Verzögerungsglied zweiter Ordnung, Quelle: Murrenhoff (2008), S. 231 (leicht modifiziert).

### 4.3.2 Modell des Hydraulikzylinders

Der Gleichgangzylinder wurde im Rahmen der Bachelorarbeit von Herrn Sebastian Gradauer ausgelegt und konstruiert. Die Auslegungsdaten sind Tabelle 4.3 zu entnehmen.

Tabelle 4.3: Auslegungsdaten zur Berechnung des Hydraulikzylinders, Quelle: Gradauer (2013).

Größe	Wert	Einheit	Bezeichnung
$d_K$	64.4	mm	Durchmesser des Kolbens
$d_{Ks}$	40	mm	Durchmesser der Kolbenstange
$A_K$	$2 \cdot 10^3$	$\text{mm}^2$	Druckwirksame Kolbenfläche
$c_{ep}$	$1.68 \cdot 10^{-3}$	$\frac{1}{\text{min bar}}$	Beiwert für externe Leckagen
$c_{ip}$	$2.71 \cdot 10^{-3}$	$\frac{1}{\text{min bar}}$	Beiwert für interne Leckagen
$y_{K0}$	10	mm	Kolbenauslenkung in der Mittelstellung
$y_{K1}$	15	mm	Kolbenauslenkung bei Anstehen an der Kraftmessdose

Die Bewegungsgleichung des Zylinderkolbens unter Vernachlässigung der Gewichtskraft ist in Gleichung 4.9 angegeben.

$$m_K \cdot \ddot{y}_K = A_K \cdot p_L - d_{yK} \cdot \dot{y}_K - F = A_K \int \left( Q_L \cdot \frac{2}{C_H} \right) dt - d_{yK} \cdot \dot{y}_K - F \quad (4.9)$$

Der geschwindigkeitsproportionale Reibkennwert  $d_{y\dot{k}}$  ist durch die hydrostatische Lagerung des Kolbens vernachlässigbar.

Den Zusammenhang zwischen der Summe aller zu- und abfließenden Volumenströme und der zeitlichen Druckänderung beschreibt die hydraulische Kapazität  $C_H$  gemäß Gleichung 4.10 unter der Annahme symmetrischer Druckänderung<sup>7</sup>. Die Einführung der hydraulischen Kapazität steht in Analogie zur elektrischen Kapazität.

$$\begin{aligned} \dot{p}_L &= \dot{p}_A - \dot{p}_B = \frac{1}{C_{HA}(p_A, V_A)} \cdot [Q_A - c_{ip} \cdot p_L] - \frac{1}{C_{HB}(p_B, V_B)} \cdot [Q_B + c_{ip} \cdot p_L] \\ &= \frac{2}{C_H} \cdot [Q_L - c_{ip} \cdot p_L] \end{aligned} \quad (4.10)$$

Die hydraulische Gesamtkapazität wird vereinfachend als konstant angenommen und nach Gleichung 4.11 berechnet<sup>8</sup>.

$$C_H = \frac{V_{tot} + A_K \cdot y_{K0}}{E'_{\text{Öl}}} = C_{HA} = C_{HB} \quad (4.11)$$

Besonders die Vernachlässigung der Druckabhängigkeit des Öl-Ersatzkompressionsmoduls stellt eine Vereinfachung dar. Bei der Berechnung der Gesamtkapazität wird auch angenommen, dass sich der Kolben in Mittelstellung ( $V_A = V_B$ ) befindet. Tatsächlich ist er bei Belastung aus der Mittelstellung ausgelenkt. Das Totvolumen  $V_{tot}$  beträgt 20 ml.

Der Druckaufbau im Zylinder ist als Verzögerungsglied erster Ordnung modelliert. Die hydraulische Zeitkonstante berechnet sich nach Gleichung 4.12 und die hydraulische Verstärkung ist nach Gleichung 4.13 definiert.<sup>9</sup>

$$T_H = \frac{C_H}{2 \cdot (V_{Qp} + c_{ip})} \quad (4.12)$$

$$V_H = \frac{1}{V_{Qp} + c_{ip}} \quad (4.13)$$

Externe Leckagen sowie Vernachlässigungen bei der Berechnung von  $C_H$  werden über die Anpassung der Modellparameter  $V_H$  und  $T_H$  für den jeweiligen Belastungsfall im Modell berücksichtigt. Die Bestimmung der Modellparameter wird in Kapitel 4.3.3 beschrieben.

<sup>7</sup>vgl. Detiček (1997), S. 21 f.

<sup>8</sup>Murrenhoff (2008), S. 271.

<sup>9</sup>Murrenhoff (2008), S. 259.



Der Wirkungsplan des Druckaufbaus im Zylinder ist in Abbildung 4.9 dargestellt.

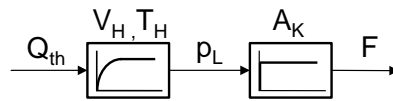


Abbildung 4.9: Wirkungsplan des Zylinders als Verzögerungsglied erster Ordnung, Quelle: Murrenhoff (2008), S. 258 (leicht modifiziert).

### 4.3.3 Bestimmung der Modellparameter

Einige Parameter im Modell müssen arbeitspunktabhängig definiert werden. Die mathematischen Zusammenhänge gelten um den eingestellten Arbeitspunkt. Die in Tabelle 4.4 aufgelisteten Modellparameter müssen abhängig vom Belastungsfall durch den Vergleich von simulierten und aufgenommenen Sprungantworten der Regelstrecke bestimmt werden.

Tabelle 4.4: Lastabhängige Modellparameter, Quelle: Eigene Darstellung.

Größe	Einheit	Bestimmung durch
$y_{V\%,AP}$	%	Ventilstellung bei Gleichanteil von $w(t)$
$p_{L,AP}$	bar	Stationärer Lastdruck bei Gleichanteil von $w(t)$
$T_H$	s	Auswertung der Sprungantwort des Systems
$V_H$	$\frac{\text{bar}}{\frac{1}{\text{min}}}$	Auswertung der Sprungantwort des Systems

Abbildung 4.10 zeigt gemessene und simulierte Verläufe bei einer sprunghaften Änderung der Ventilstellung.

Die hydraulische Verstärkung beträgt für diesen Lastfall  $V_H = 306.92 \frac{\text{bar}}{\frac{1}{\text{min}}}$  und die hydraulische Zeitkonstante  $T_H = 92.1 \text{ ms}$ . Bei geringen Lastdrücken kommt es zu Nichtlinearitäten, die im Modell nicht abgebildet werden können.

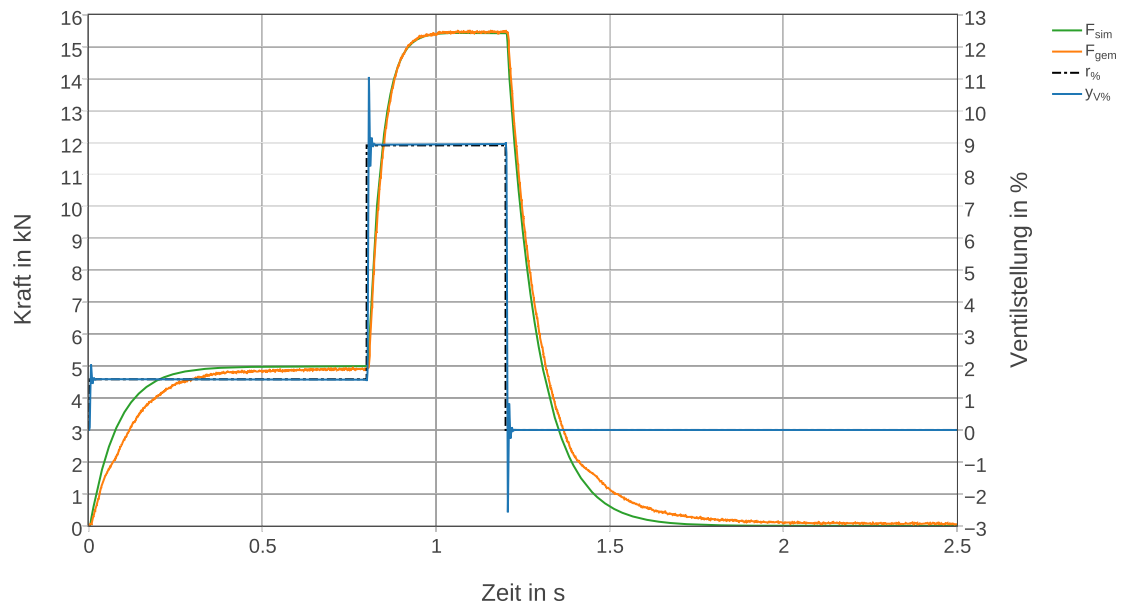


Abbildung 4.10: Gemessene und simulierte Sprungantwort der Regelstrecke, Quelle: Eigene Darstellung.

#### 4.4 Bestimmung der Reglerparameter

Das dynamische Verhalten der geschlossenen Regelstrecke wurde experimentell optimiert. Tabelle 4.5 zeigt die ermittelten Reglerparameterpaare  $K_p^+$  und  $K_i^+$ . Die Werte gelten für den Fall eines sprunghaften Anstiegs der Führungsgröße.

Tabelle 4.5: Reglerparameter bei positiver Steigung, Quelle: Eigene Darstellung.

Hauptstützstelle	Gleichanteil $\bar{F}_s$	Amplitude $\hat{F}_s$	$K_p^+$	$K_i^+$
1	10 kN	5 kN	0.24	3.4
2	6 kN	5 kN	0.2	2.2
3	3 kN	2 kN	0.18	1.9
4	1 kN	0.5 kN	0.178	1.9

Abbildung 4.11 stellt das dynamische Reglerverhalten für einen Führungssprung von 5 kN auf 15 kN dar. In der oberen Hälfte der Abbildung ist der zeitliche Verlauf der durch den Regler errechneten Ventilstellung zu sehen, wobei die Summe der Einzelanteile aus Übersichtlichkeitsgründen gespiegelt dargestellt ist. Im unteren Teil der Abbildung ist der Kraft- und Fehlersummenverlauf abgebildet. Der Verlauf der Istkraft soll sich ohne überzuschwingen der Sollkraft annähern. Dies ist als Randbedingung der Optimierung für den dynamischen Zustand anzusehen und bewirkt ein unterkritisches Annähern der Regelgröße an die Führungsgröße.

Ein großes Über- beziehungsweise Unterschwingen der Kraft deutet auf einen zu groß gewählten Proportionalanteil hin. Das Ventil verändert in dem Moment des Führungssprungs so stark die Stellung, dass es zu einer übermäßig großen Veränderungsrate in der Kraft kommt. Im Optimalfall ergänzen sich Proportionalanteil und Integralanteil in jedem Moment so, dass es zu keinem Überschwingen kommt und der über die Zeit integrierte Absolutwert des Regelfehlers minimal wird. Die sogenannte betragsmäßige Regelfläche berechnet sich anhand Formel 4.14<sup>10</sup>.

$$A_{Re} = \int_0^{\infty} |(F_{\infty} - F(t))| \cdot dt \quad (4.14)$$

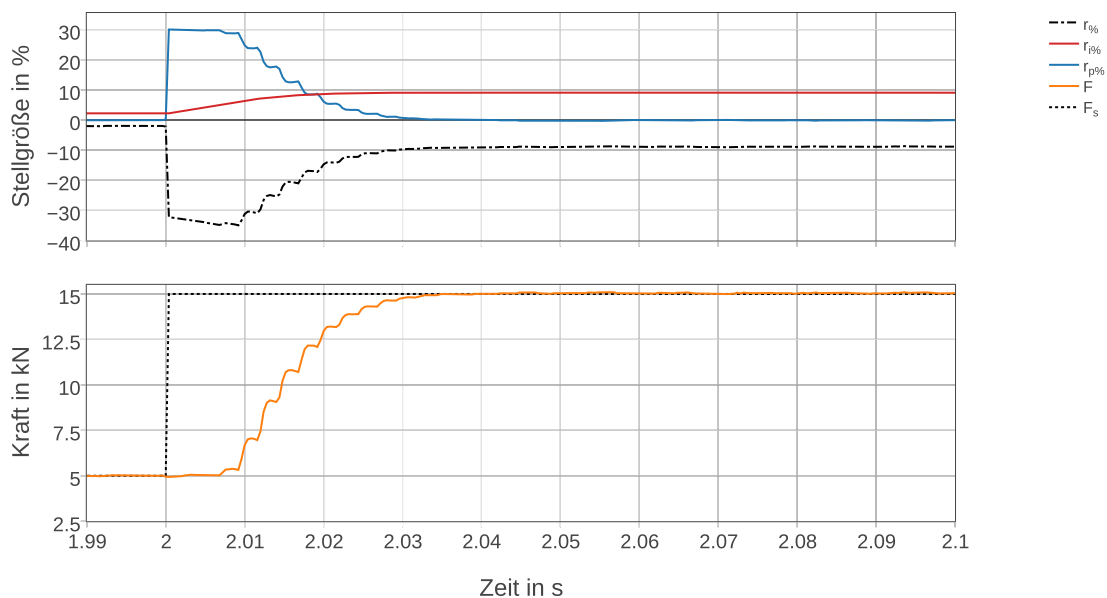


Abbildung 4.11: Dynamisches Reglerverhalten für einen positiven Führungssprung, Quelle: Eigene Darstellung.

<sup>10</sup>Horn/Dourdoumas (2004), S. 181.

Abbildung 4.12 zeigt ein sprunghaftes Abfallen der Führungsgröße von 15 kN auf 5 kN. Es zeigt sich ein unerwünschter Einschwingvorgang, welcher auf zu groß gewählte Reglerparameter zurückzuführen ist.

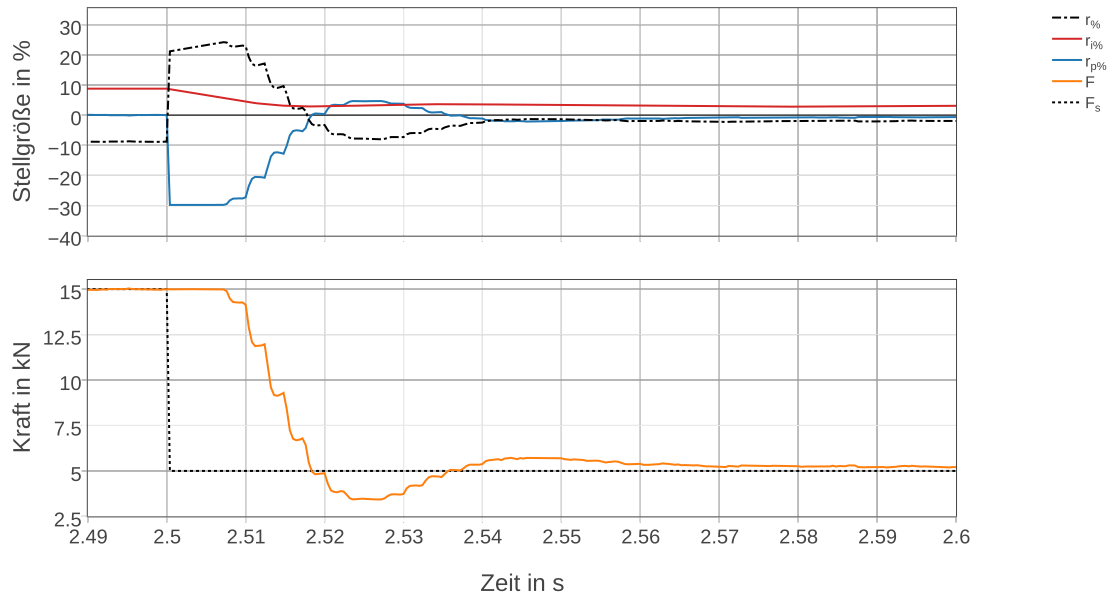


Abbildung 4.12: Dynamisches Reglerverhalten für einen negativen Führungssprung, Quelle: Eigene Darstellung.

Anhand der Kraftverläufe ist erkennbar, dass das Systemverhalten abhängig von der Führungssprungrichtung ist. Tabelle 4.6 zeigt an Hauptstützstellen innerhalb des Bereichs der Sollkurven-Parameter ermittelte Reglerparameterpaare  $K_p^-$  und  $K_i^-$  für den Fall eines sprunghaften Abfallens der Führungsgröße.

Tabelle 4.6: Reglerparameter bei negativer Steigung, Quelle: Eigene Darstellung.

Hauptstützstelle	Gleichanteil $\bar{F}_s$	Amplitude $\hat{F}_s$	$K_p^-$	$K_i^-$
1	10 kN	5 kN	0.16	3.2
2	6 kN	5 kN	0.18	2.4
3	3 kN	2 kN	0.2	2.2
4	1 kN	0.5 kN	0.207	2.18

Die von der Steigung der Führungsgröße abhängige Parameterwahl macht eine Korrektur der Fehlersumme notwendig, um keine Unstetigkeit in der Ventilstellung bei einem Wechsel des Parameterpaares zu erzeugen.

Die Korrektur errechnet sich für den Fall eines Wechsels zum Zeitpunkt  $t_j$  nach Gleichung 4.15.

$$\sum_{k=0}^{k=j} e(t_k) = \sum_{k=0}^{k=j-1} e(t_k) \cdot \frac{(K_i)_{[j-1]}}{(K_i)_{[j]}} \quad (4.15)$$

Die Auswirkung der Korrektur der Fehlersumme ist in Abbildung 4.13 dargestellt. In der oberen Hälfte ist der Signalverlauf ohne Korrektur (o.K.) der Fehlersumme abgebildet. Bei einem Vorzeichenwechsel der Steigung verändert sich die gemessene Kraft plötzlich. Diese sind auf Unstetigkeiten in der Reglerstellgröße zurückzuführen, die mit der Korrektur nicht auftreten.

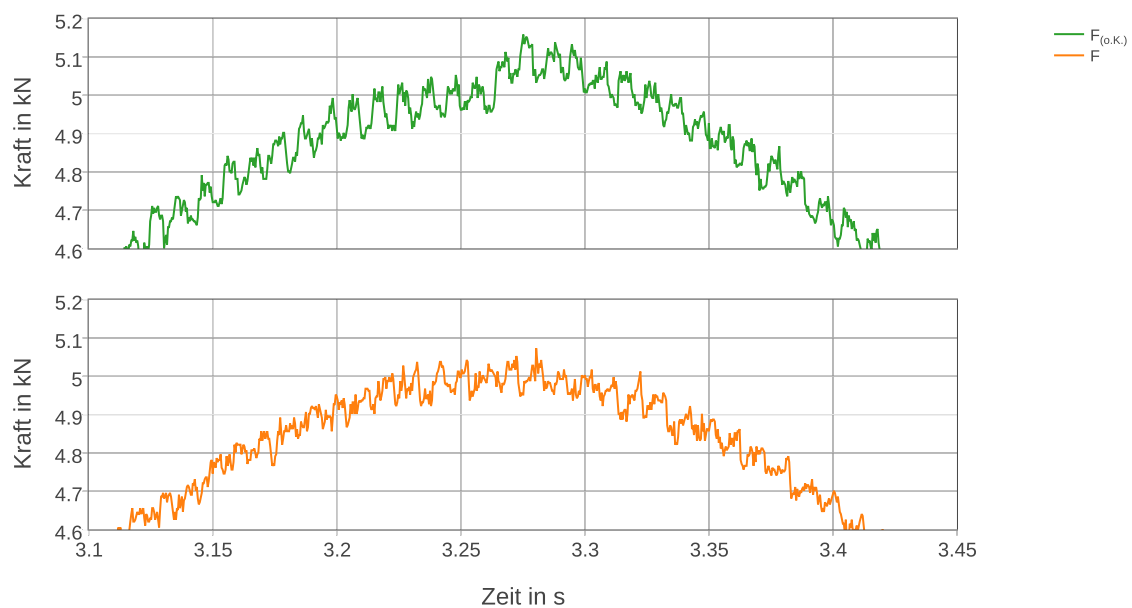


Abbildung 4.13: Auswirkung der Fehlersummenkorrektur, Quelle: Eigene Darstellung.

Zur Ausregelung von zwischen Hauptstützstellen liegenden Punkten innerhalb des Parameterbereichs dient eine Interpolation der Reglerparameter zwischen den Messpunkten. Die Ausgleichspolynome in der Form von Gleichung 4.16.

$$K(\bar{F}_s) = a_3 (\bar{F}_s)^3 + a_2 (\bar{F}_s)^2 + a_1 (\bar{F}_s) + a_0 \quad (4.16)$$

Die Verläufe in Abhängigkeit des Gleichanteils des Sollsignals sind in Abbildung 4.14 ersichtlich. Tabelle 4.7 zeigt die Koeffizienten der Polynomfunktion, durch welche die Reglerparameter dynamisch errechnet werden.

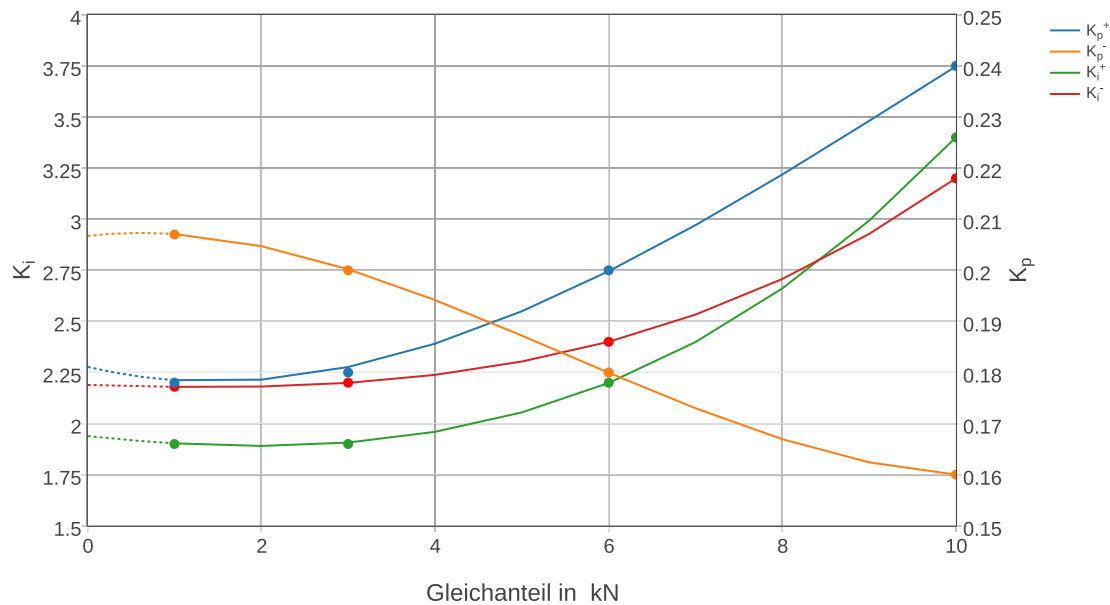


Abbildung 4.14: Verläufe der Reglerparameter in Abhängigkeit vom Gleichanteil, Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 4.7: Koeffizienten der Ausgleichspolynome der Reglerbeiwerte, Quelle: Eigene Darstellung.

	$K_p^+$	$K_i^+$
$a_3^+$	$-4.98506253481192 \cdot 10^{-5}$	$1.10701807686464 \cdot 10^{-3}$
$a_2^+$	$1.49078629102934 \cdot 10^{-3}$	$7.98823309456772 \cdot 10^{-3}$
$a_1^+$	$-4.02940947350792 \cdot 10^{-3}$	$-4.44371574802233 \cdot 10^{-2}$
$a_0^+$	$1.81088409539724 \cdot 10^{-1}$	$1.93867917362904$
	$K_p^-$	$K_i^-$
$a_3^-$	$1.01403868550306 \cdot 10^{-4}$	$8.37130993974382 \cdot 10^{-4}$
$a_2^-$	$-1.67525035347457 \cdot 10^{-3}$	$3.08387571717355 \cdot 10^{-3}$
$a_1^-$	$1.93921357264439 \cdot 10^{-3}$	$-1.34649953064808 \cdot 10^{-2}$
$a_0^-$	$2.06733442199605 \cdot 10^{-1}$	$2.18911210694212$

Der Reglerstellgröße wird zu jedem Zeitpunkt ein Dither-Signal überlagert. Die Aufmodulierung eines Dither-Signals ist notwendig, um ein zeitweiliges Stillstehen des Ventilschiebers zu verhindern. Ein Anfahren aus dem Stillstand hätte einen Stick-Slip-Effekt und dadurch unkontrollierte Bewegungszustände des Ventilschiebers zur Folge. Das Sinussignal hat eine Frequenz von 100 Hz und eine Amplitude von 0.5 % der maximalen Ventilstellung. Die Frequenz des Dither-Signals ist um eine Zehnerpotenz größer als die maximale Anregungsfrequenz gewählt, um die Messung durch das aufmodulierte Signal nicht zu verfälschen. Die Amplitude ist gerade so groß gewählt, dass der Ventilschieber dem Vorgabesignal folgen kann.

## 4 Kraftregelung

Die Signalverläufe in den Abbildungen 4.15 und 4.16 verdeutlichen den Einfluss des Dither-Signals. Für die Darstellung ist jeweils die Phasenverschiebung zwischen Soll- und Istkraft kompensiert und anschließend die Differenz  $\Delta F$  der beiden Signale gebildet worden. Es ist ersichtlich, dass das Dither-Signal zur Stabilität des Kraftverlaufs beiträgt.

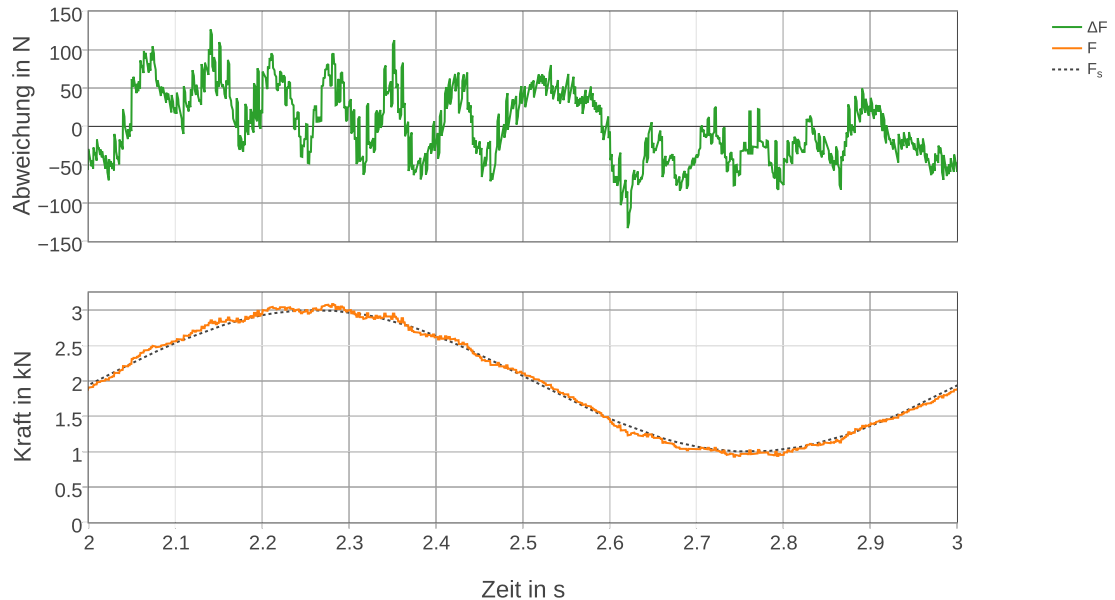


Abbildung 4.15: Kraftverlauf und Abweichung ohne Dither-Signal, Quelle: Eigene Darstellung.

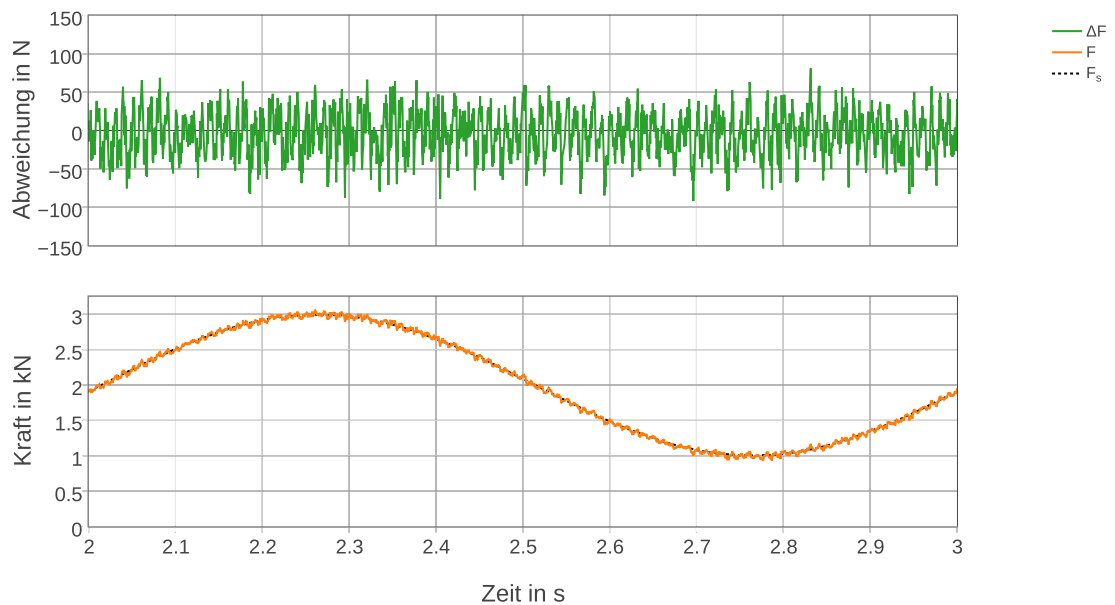


Abbildung 4.16: Kraftverlauf und Abweichung mit Dither-Signal, Quelle: Eigene Darstellung.

## 4.5 Reglerverhalten

Es wurde das Verhalten des geschlossenen Regelkreises für verschiedene Führungsgrößenparameter bestimmt. Im Folgenden sind Abbildungen mit geregelten zeitlichen Kraftverläufen bei deaktiviertem Taschenlager zu sehen. Die Deckscheibe liegt auf der Taschenscheibe auf. Die Verringerung der Steifigkeit des Systems durch den Ölfilm zwischen den Scheiben ist also nicht berücksichtigt.

Abbildungen 4.17 und 4.18 zeigen das Zeitverhalten bei rechteckförmigen Sollsignalen. Erkennbar ist eine Totzeit von 7 ms, welche unabhängig der hinterlegten Sollkurve ist. Das Auftreten der Totzeit begrenzt die maximal mögliche Anregungsfrequenz.

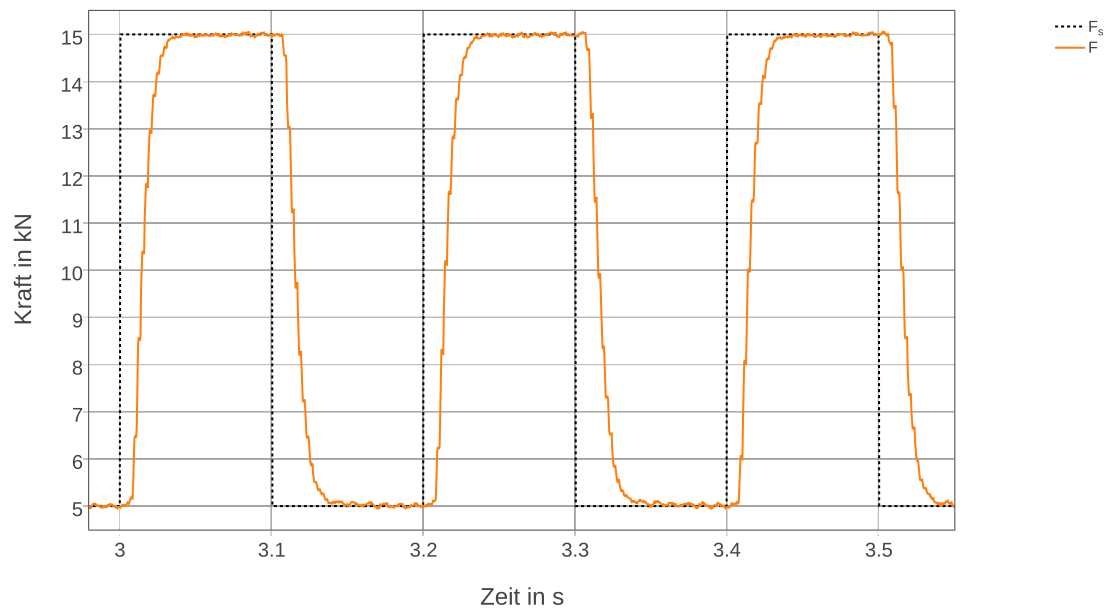


Abbildung 4.17: Kraftverlauf für Rechtecksignal mit  $\bar{F}_s = 10$  kN und  $\hat{F}_s = 5$  kN, Quelle: Eigene Darstellung.



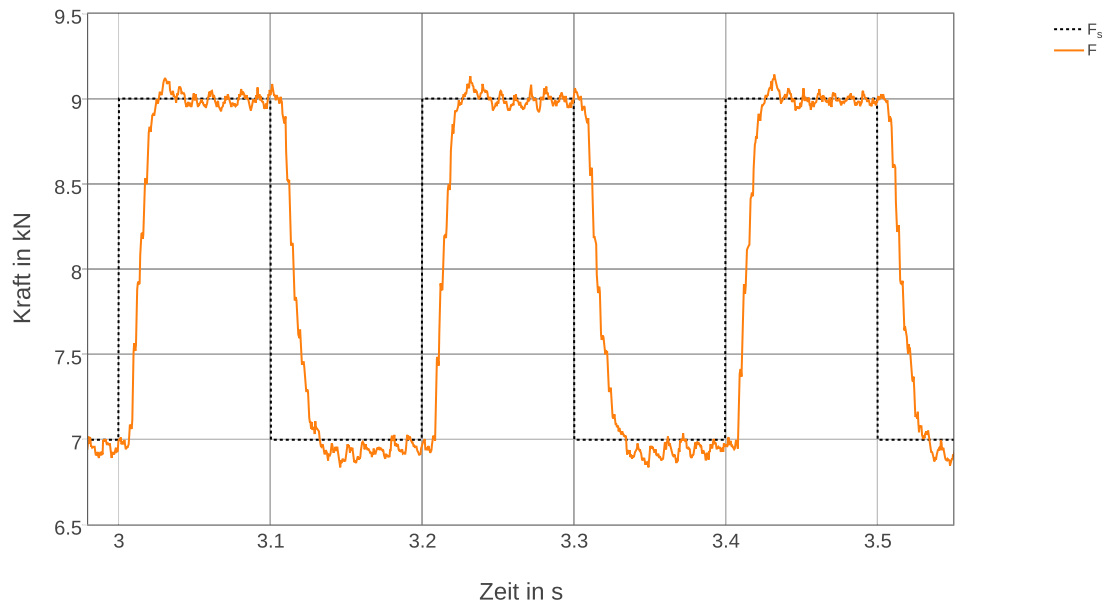


Abbildung 4.18: Kraftverlauf für Rechtecksignal mit  $\bar{F}_s = 8 \text{ kN}$  und  $\hat{F}_s = 1 \text{ kN}$ , Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 4.19 stellt das Zeitverhalten bei sinusförmigem Sollsignal mit einer Anregungsfrequenz von 20 Hz dar. Es zeigt sich der Tiefpasscharakter der Regelstrecke. Dieser hat eine Abschwächung des tatsächlichen Kraftverlaufs bei hohen Anregungsfrequenzen zur Folge. Der zeitliche Versatz zwischen Soll- und Istsignal beträgt 13 ms.

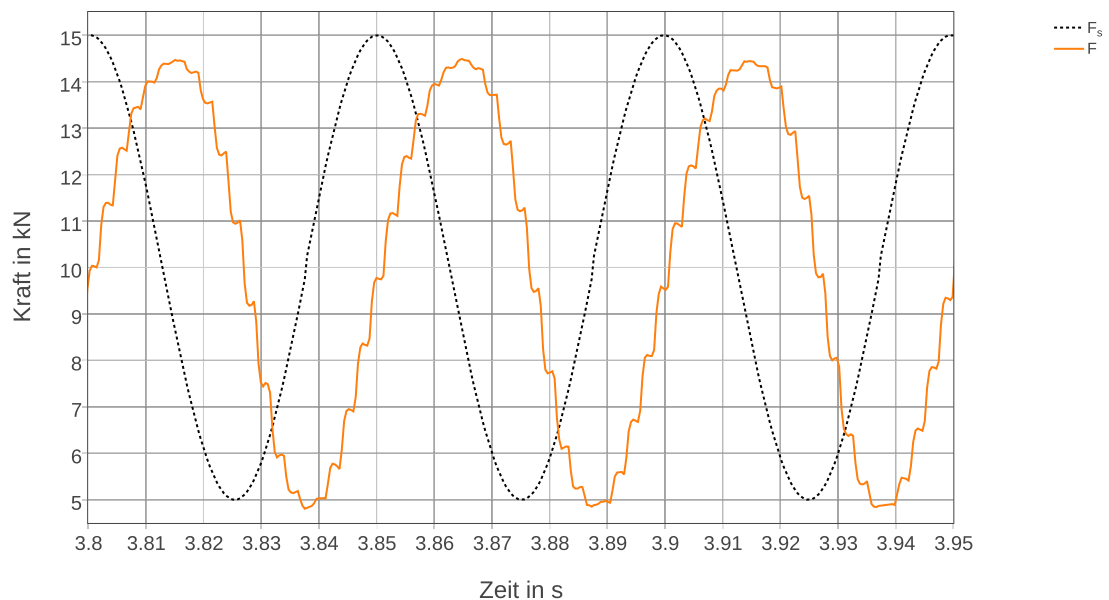


Abbildung 4.19: Kraftverlauf für Sinussignal mit  $\bar{F}_s = 10 \text{ kN}$  und  $\hat{F}_s = 5 \text{ kN}$ , Quelle: Eigene Darstellung.

Zur genaueren Betrachtung des Reglerverhaltens für unterschiedliche Anregungsfrequenzen dient eine Analyse im Frequenzbereich. Zu diesem Zweck werden dem Regler Sinussignale als Führungsgröße vorgegeben. Nach einer Einschwingzeit, die dem Fünffachen der Periodenzeit entspricht, werden über zehn Perioden die Spitze-Spitze-Werte des tatsächlichen Kraftverlaufes sowie die Nulldurchgänge relativ zum Gleichanteil detektiert. Über diesen Zeitraum werden Mittelwerte der Größen gebildet. Die Frequenz wird sukzessive gesteigert, bis die Phasenverschiebung Werte nahe  $180^\circ$  annimmt. Die Totzeit bleibt Teil der Phasenverschiebung und wird nicht herausgerechnet.

Mit den gewonnenen Mittelwerten sind Kenngrößen wie die Amplitudenabweichung und die Phasenverschiebung erchenbar.

Die Amplitudenabweichung in Dezibel berechnet sich nach Formel 4.17.

$$|H| = 20 \cdot \log \left( \frac{(F_{ss})_F}{(F_{ss})_{F_s}} \right) \quad (4.17)$$

Die Phasenverschiebung in Grad berechnet sich wie in Formel 4.18 angegeben.

$$\varphi = \frac{(t_{ND})_{tats} - (t_{ND})_{soll}}{T_{soll}} \cdot 360^\circ \quad (4.18)$$

Die Kenngrößen für alle Anregungsfrequenzen in ein Diagramm aufgetragen, ergeben das Bode-Diagramm. Die Amplitudenabweichung wird doppelt-logarithmisch aufgetragen, während die Phasenverschiebung einfach-logarithmisch dargestellt wird. Das Bode-Diagramm für den geschlossenen Regelkreis ist in Abbildung 4.20 für verschiedene Sollkurven-Parameter dargestellt.

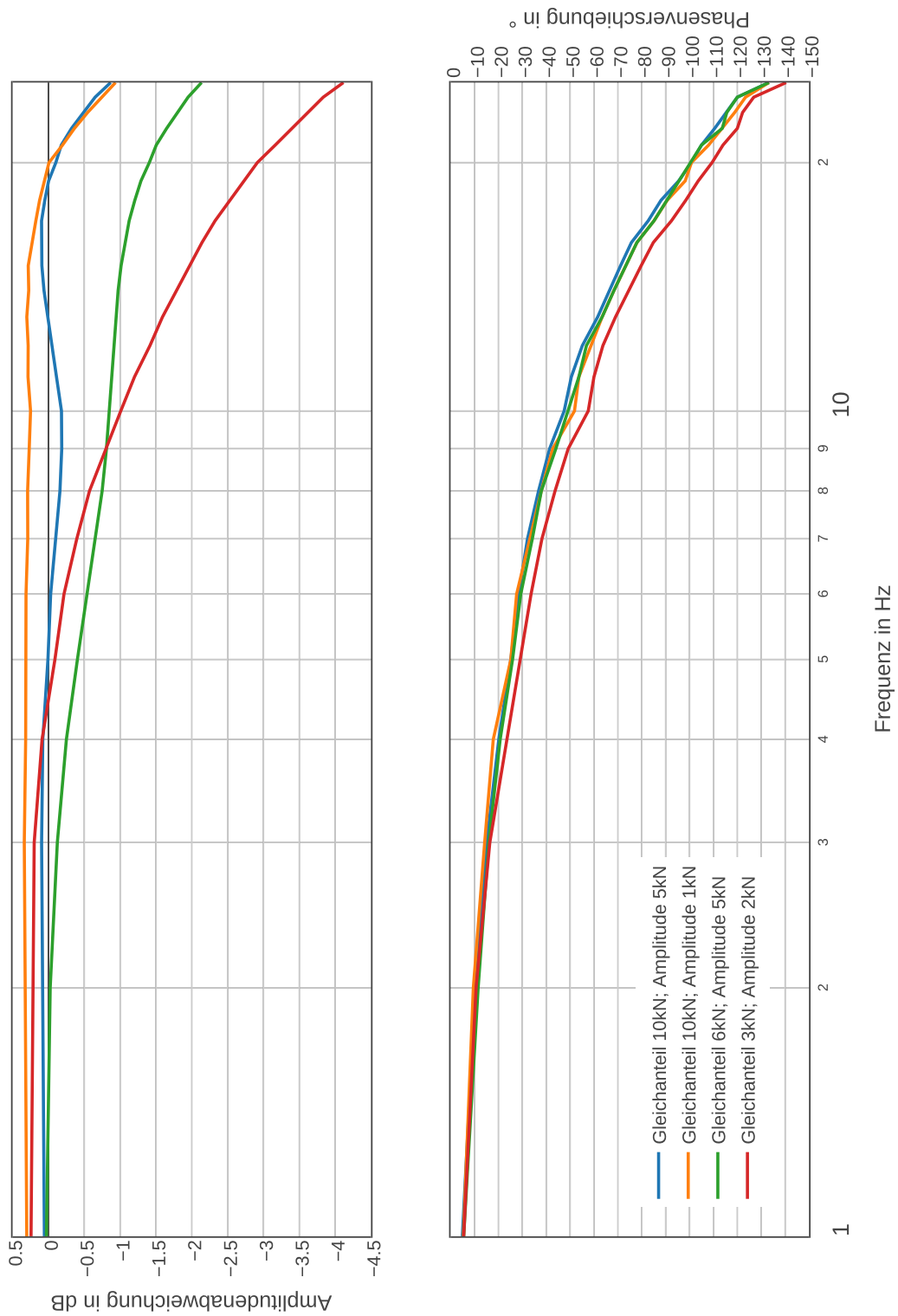


Abbildung 4.20: Bode-Diagramm des geschlossenen Regelkreises, Quelle: Eigene Darstellung.

## 4.6 Diskussion der Ergebnisse

Das in Kapitel 4.3 beschriebene Modell wird mit dem experimentell bestimmten Führungsverhalten der Regelstrecke verglichen. Der Wirkungsplan des modellierten geschlossenen Regelkreises unter Berücksichtigung der Totzeit ist in Abbildung 4.21 dargestellt.

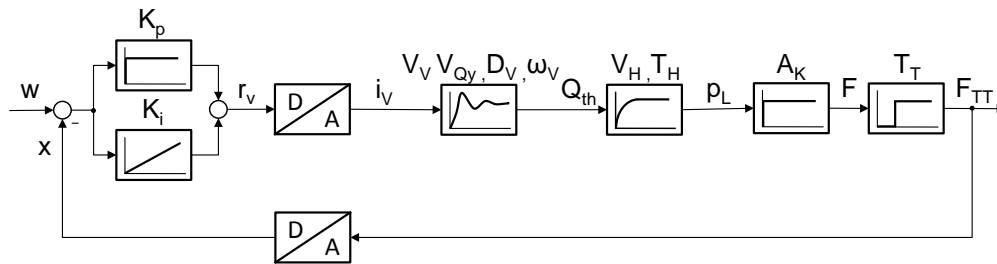


Abbildung 4.21: Wirkungsplan der geschlossenen Regelstrecke mit Totzeit, Quelle: Eigene Darstellung.

Die simulierten und gemessenen Kraftverläufe für ein Rechtecksignal mit  $\bar{F}_s = 10 \text{ kN}$  und  $\hat{F}_s = 5 \text{ kN}$  sind in Abbildung 4.22 dargestellt. Des weiteren ist ein Bode-Diagramm mit den simulierten und gemessenen Werten in Abbildung 4.23 dargestellt.

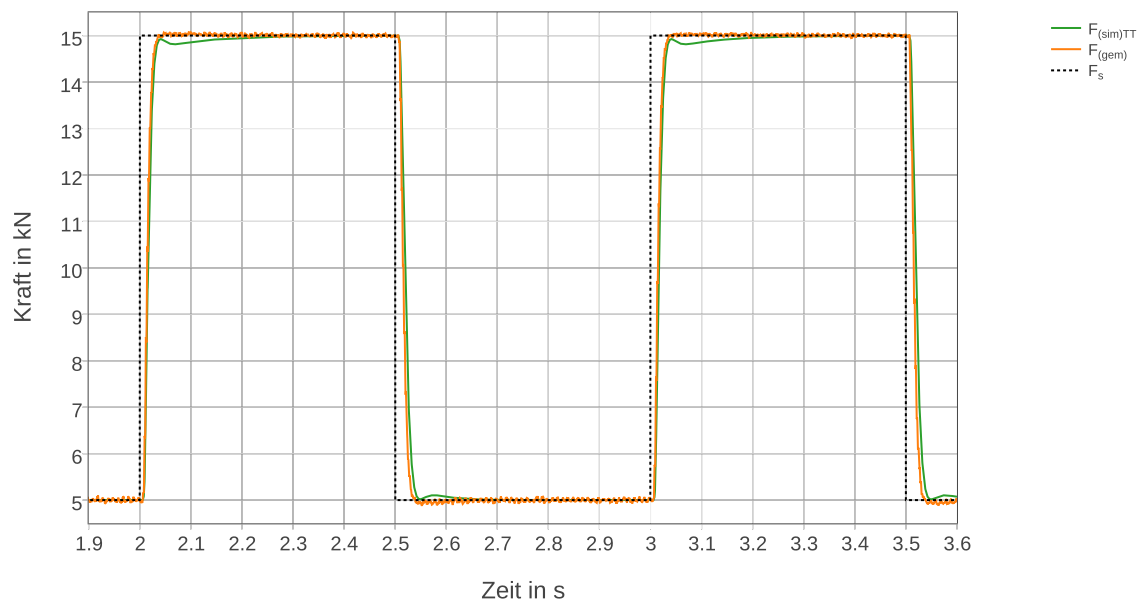


Abbildung 4.22: Simulierter und gemessener Kraftverlauf für rechteckförmige Führungsgröße, Quelle: Eigene Darstellung.

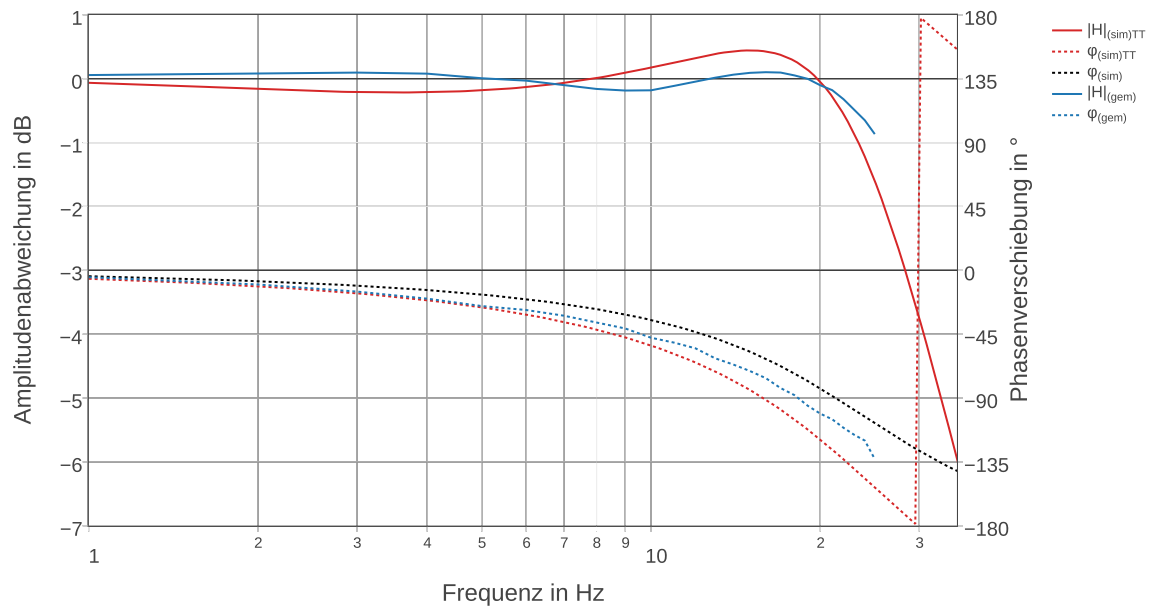


Abbildung 4.23: Simuliertes und gemessenes Bodediagramm des geschlossenen Regelkreises ( $\bar{F}_s = 10 \text{ kN}$  und  $\hat{F}_s = 5 \text{ kN}$ ), Quelle: Eigene Darstellung.

Die Modellparameter sind entsprechend Kapitel 4.3.3 hinterlegt. Die Reglerparameter entsprechen denen, die durch die Optimierung gefunden wurden.

Eine exakte Abbildung der gemessenen Ergebnisse ist mit dem Modell nicht erreichbar. Qualitativ lässt sich jedoch ein Aufschwingen zwischen 10 Hz und 20 Hz mit dem Modell nachrechnen. Eine Aussage kann auch über die maximale Anregungsfrequenz getroffen werden. Der Bereich der Phasenumkehr bei 30 Hz darf mit dem bestehenden Regelalgorithmus nicht erreicht werden. Das System ist in diesem Bereich nicht mehr regelbar.

Die Totzeit von 7 ms ist maßgeblich für die Phasenverschiebung und die Dynamik des Systems verantwortlich. Aus diesem Grund wurde mithilfe der Simulation ein Szenario gerechnet, welches dem Regler das Kraftsignal vor dem Totzeitglied rückführt. Die Anregelzeit kann dadurch verringert werden und der Frequenzbereich in dem die Kraftregelung einsetzbar ist wird größer. Abbildung 4.24 zeigt simulierte Kraft- und Ventilstellungsverläufe eines Führungssprungs von 5 kN auf 15 kN bei denen dem Regler die Regelgröße ohne Totzeit rückgeführt wird. Abbildung 4.25 zeigt das Bode-Diagramm für dieses Szenario.

Die kurzzeitige Auslenkung des Ventilschiebers auf 70 % hat Volumenströme von  $3 \frac{1}{\text{min}}$  durch das Ventil zur Folge. Dies ist mit dem vorhandenen Hydraulikaggregat nicht realisierbar. Mit dem vorhandenen Servoventil und der Zylinderkonstruktion ist jedoch eine Steigerung der Dynamik möglich.

## 4 Kraftregelung

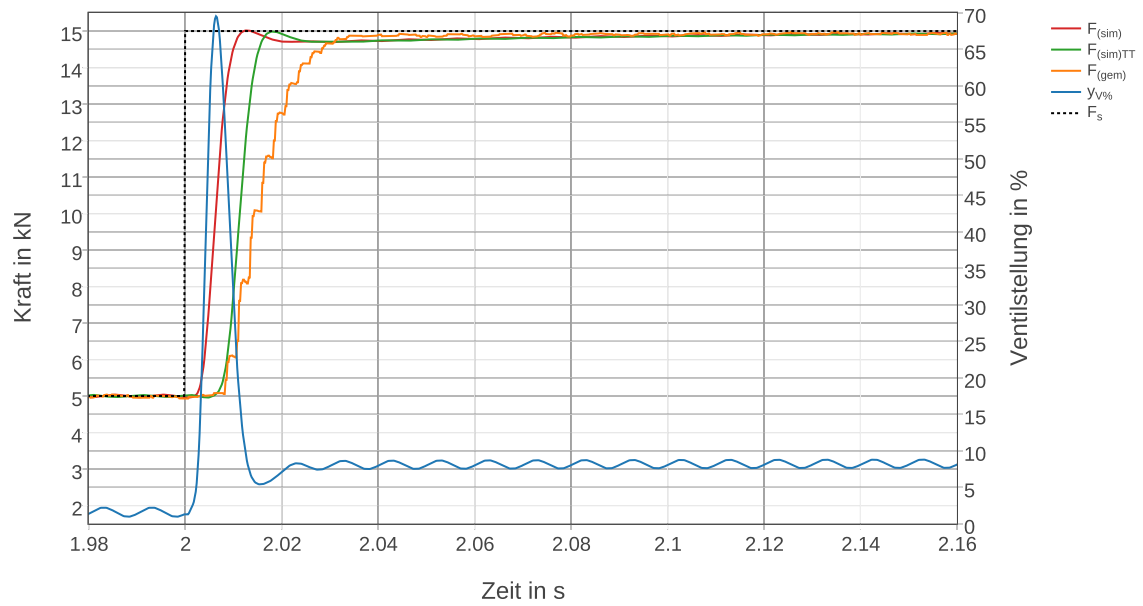


Abbildung 4.24: Simulierter Führungssprung mit Rückführung der Regelgröße ohne Totzeit, Quelle: Eigene Darstellung.

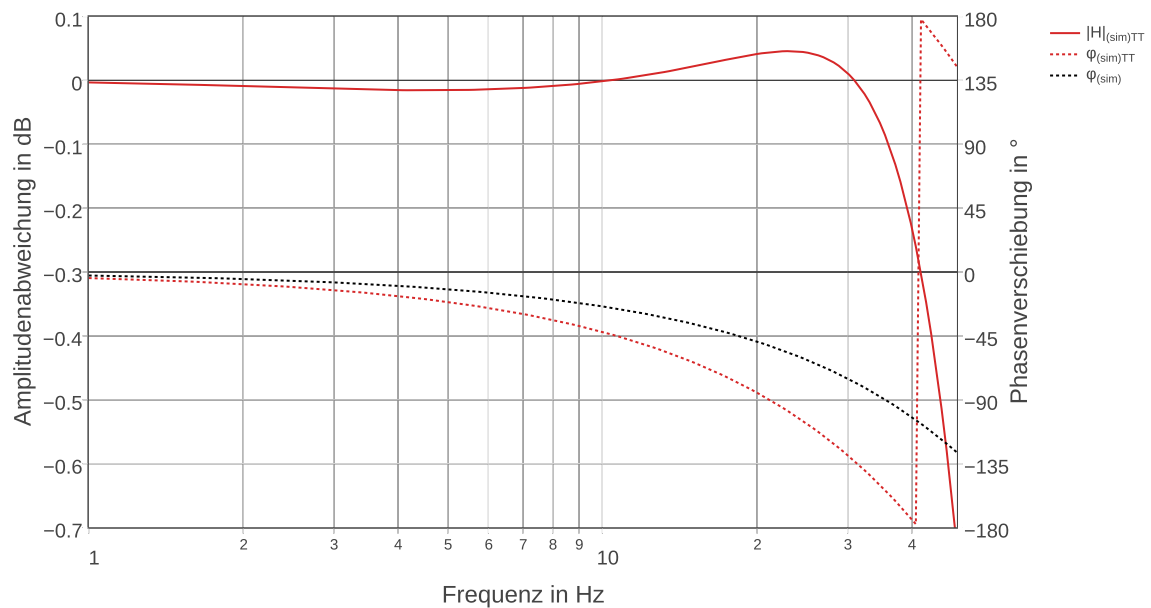


Abbildung 4.25: Simuliertes Bodediagramm mit Rückführung der Regelgröße ohne Totzeit, Quelle: Eigene Darstellung.

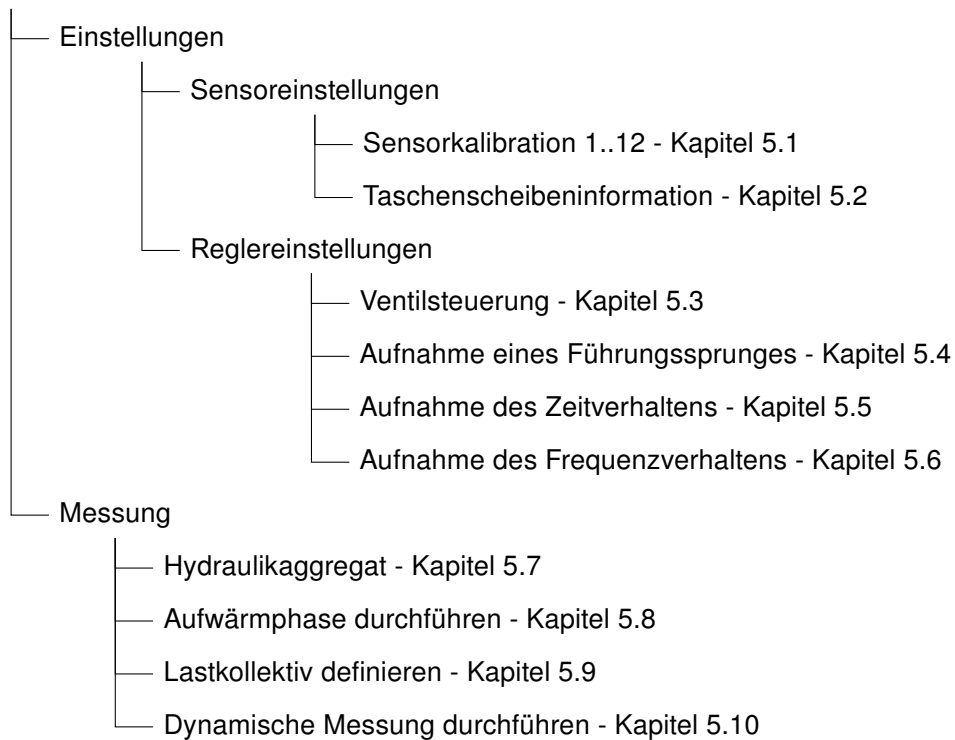
## 5 Benutzeroberfläche

Um den Funktionsumfang des Prüfstandes nutzbar zu machen, wurde eine Benutzeroberfläche programmiert. Diese beinhaltet sowohl Einstellmöglichkeiten für den Reglerentwurf und die Sensorik, als auch Menüs zur Durchführung von Messungen am Prüfstand.

Der Zugriff auf die Benutzeroberfläche der SPS erfolgt mittels VNC-Client. Über einen FTP-Client kann nach erfolgter Messung das Messprotokoll heruntergeladen werden. Der Zugriff auf die SPS kann innerhalb des gesamten IFT-Netzwerks erfolgen.

Ausgehend vom Hauptmenü ist die folgende Menüstruktur hinterlegt. Die Verweise beziehen sich auf die nachfolgenden Kapitel, in welchen die Menüpunkte erläutert werden.

### Hauptmenü



## 5.1 Sensorkalibration

Für jeden Sensor wurde ein Menüpunkt erstellt, in welchem dessen Eigenschaften definiert werden können. Abbildung 5.1 zeigt das Einstellungsfenster für die Kraftmessdose.

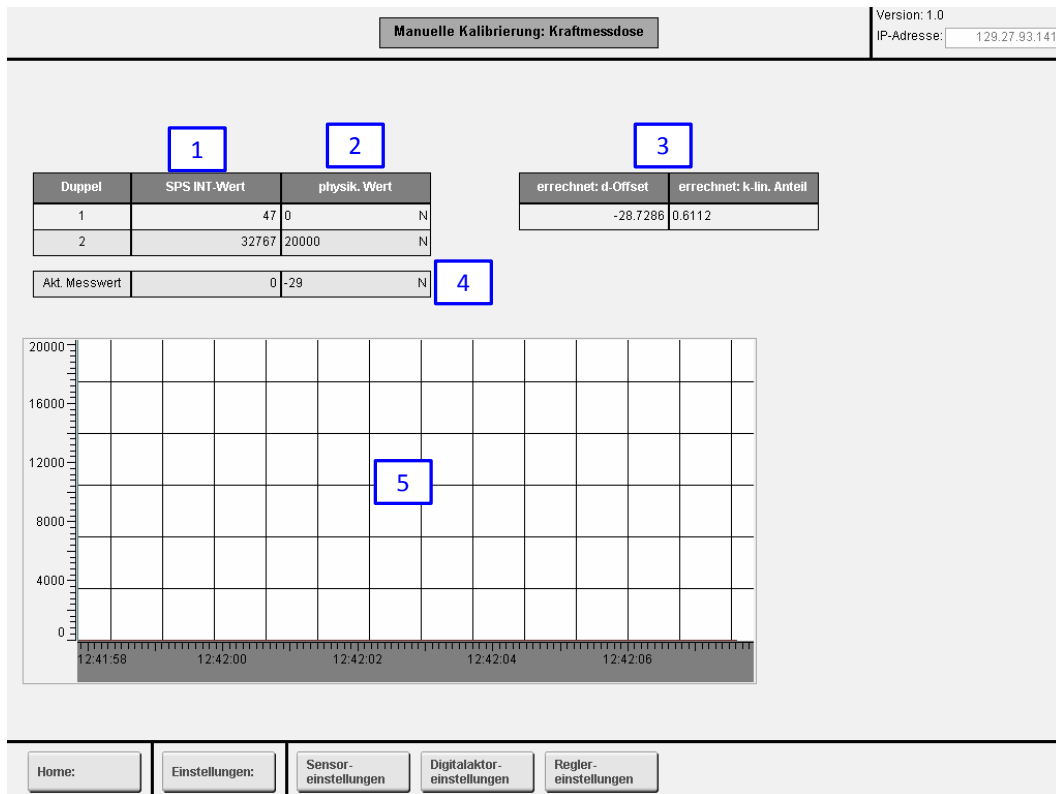


Abbildung 5.1: Menübildschirm: Sensorkalibration, Quelle: Eigene Darstellung.

Jeder Sensor besitzt zwei Wertepaare, welche den Bezug zwischen definiertem physikalischem Messwert (2) und entsprechendem Integer-Wert (1) herstellen. Die Beziehung zwischen den beiden Werten wird idealisierterweise als linear angenommen. Der aktuelle physikalische Messwert (4) wird anhand einer durch Nullpunktverschiebung und Steigung (3) definierten Geradengleichung errechnet. Der zeitliche Verlauf des Messwerts wird ebenfalls angezeigt, um eventuelle Störungsanteile auf dem Mess-Signal erkennen zu können (5).



## 5.2 Taschenscheibeninformation

In diesem Menü sind alle relevanten Informationen, die das Taschenlager betreffen, ersichtlich. Es ist in Abbildung 5.2 dargestellt.

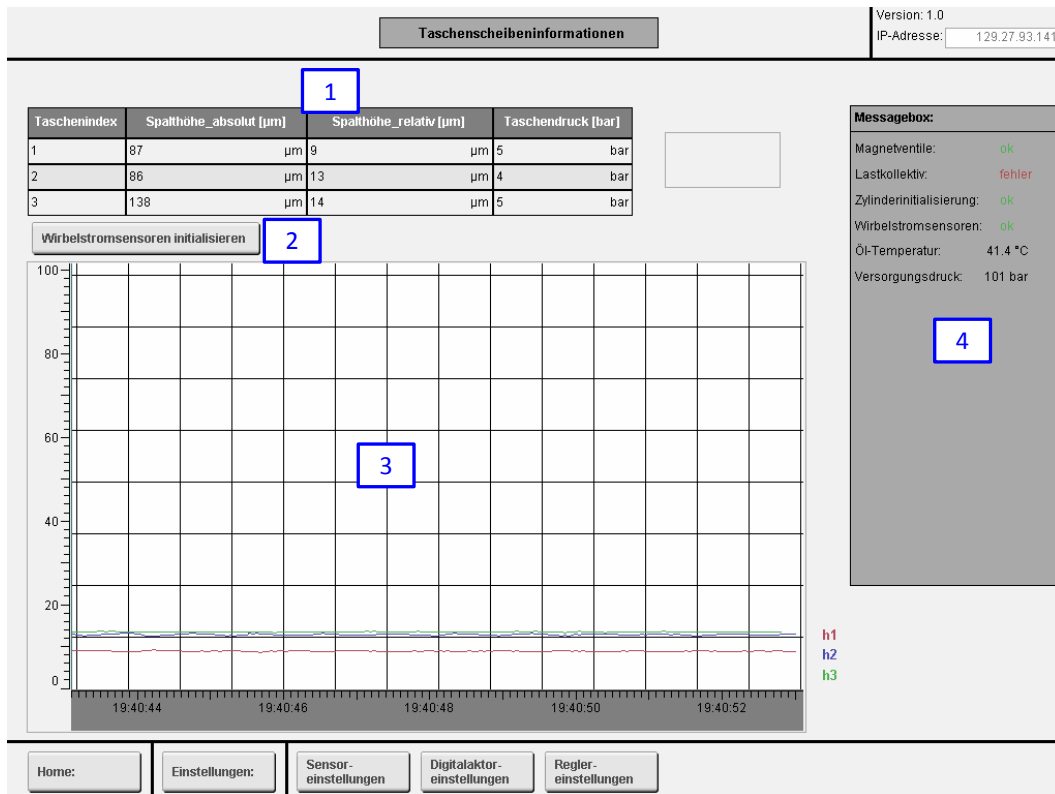


Abbildung 5.2: Menübildschirm: Taschenscheibeninformation, Quelle: Eigene Darstellung.

Für jede Lagertasche werden die aktuellen Messwerte angezeigt (1). Durch einen Klick auf den Button "Wirbelstromsensoren initialisieren" wird die hinterlegte Initialisierungsroutine durchgeführt (2). Der zeitliche Verlauf der relativen Lagerspalthöhen wird ebenfalls dargestellt (3). Außerdem werden allgemeine Informationen über den Prüfstand angezeigt (4). Neben der aktuellen Öltemperatur und dem Versorgungsdruck wird angezeigt, ob die Wirbelstromsensoren und der Zylinder bereits initialisiert wurden und die Magnetventile des Hydraulikaggregats in der richtigen Schaltstellung für den vollständigen Betrieb sind.

## 5.3 Ventilsteuerung

Die einwandfreie Funktion des Servoventils muss zu jedem Zeitpunkt gewährleistet sein. Mithilfe dieses Menüpunktes kann die Ventilstellung manuell vorgegeben und das Verhalten des Ventils überprüft werden. Abbildung 5.3 zeigt den Menübildschirm.

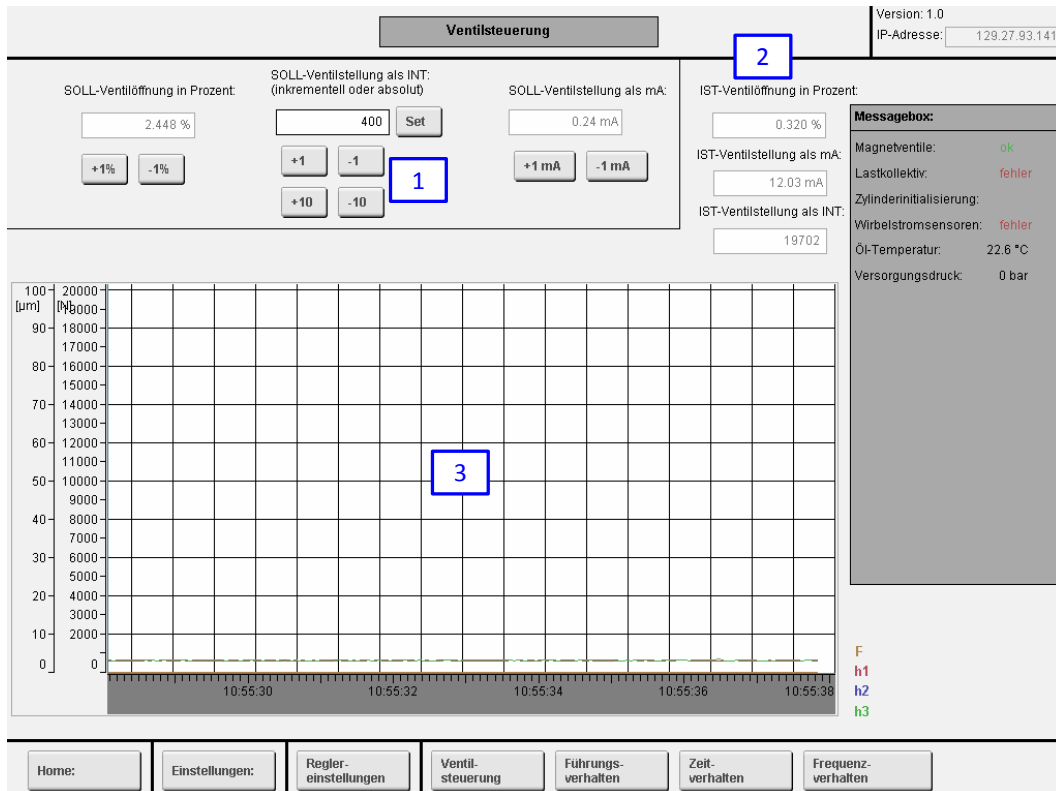


Abbildung 5.3: Menübildschirm: Ventilsteuerung

Die Ventilstellung kann sowohl absolut als auch inkrementell vorgegeben werden (1). Möglich ist die Vorgabe als Integer-Wert, prozentuell oder als Strom. Das Ventil hat einen internen Positionssensor. Dessen aktueller Messwert wird angezeigt (2). Der zeitliche Verlauf der Kraft und Lagerspalthöhen wird ebenfalls dargestellt (3).

## 5.4 Aufnahme eines Führungssprunges

Mit der Analyse des Führungsverhaltens des geschlossenen Regelkreises kann ein Parameterbereich eingegrenzt werden, der zum gewünschten Verhalten der Regelstrecke führt. Abbildung 5.4 zeigt das Menü.

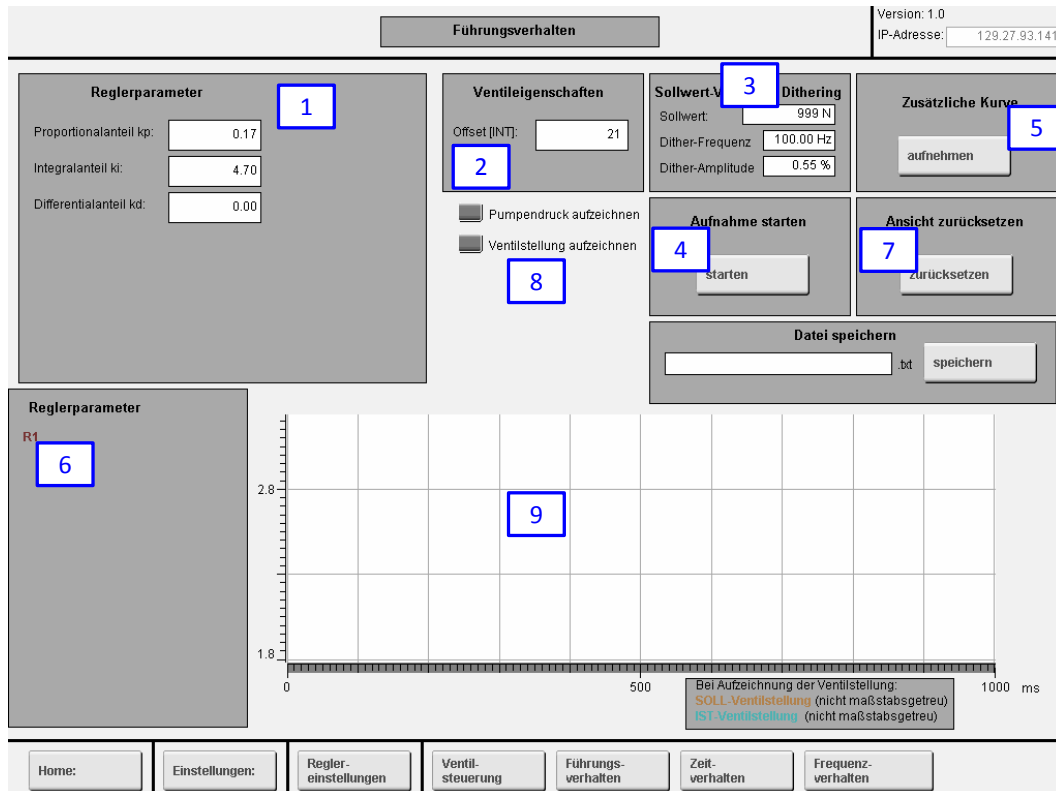


Abbildung 5.4: Menübildschirm: Aufnahme Führungssprung

Es müssen manuell Reglerparameter definiert werden (1). Vor jedem Führungssprung wird die Initialisierungsroutine des Hydraulikzylinders durchlaufen. Dadurch wird sichergestellt, dass der Zylinder auf der Kraftmessdose aufliegt. Die Ventilstellung in diesem Zustand ist von der Öltemperatur abhängig und wird angezeigt (2). Der Endwert des Führungssprungs kann vorgegeben werden (3). Der Einfluss der Parameter des Dithersignals auf das Führungsverhalten kann ebenso bestimmt werden. Der Benutzer startet die Aufnahme manuell (4). Es können bei Bedarf mehrere Führungssprünge übereinander aufgezeichnet werden (5). Die Aufnahme muss für jeden zusätzlichen Verlauf ebenso manuell gestartet werden. Die Reglerparameter der aufgenommenen Führungssprunganworten werden angezeigt (6). Die Anzeige kann wieder zurückgesetzt werden (7). Alle Aufnahmen werden dadurch gelöscht. Wahlweise können Pumpendruck und Ventilstellung aufgezeichnet und angezeigt werden (8). Der zeitliche Verlauf der aufgenommenen Führungssprünge wird dargestellt (9).

## 5.5 Aufnahme des Zeitverhaltens

Die Analyse des Zeitverhaltens des geschlossenen Regelkreises dient der Optimierung und Überprüfung der Reglerparameter. Abbildung 5.5 zeigt den Bildschirm des dazu erstellten Programms.

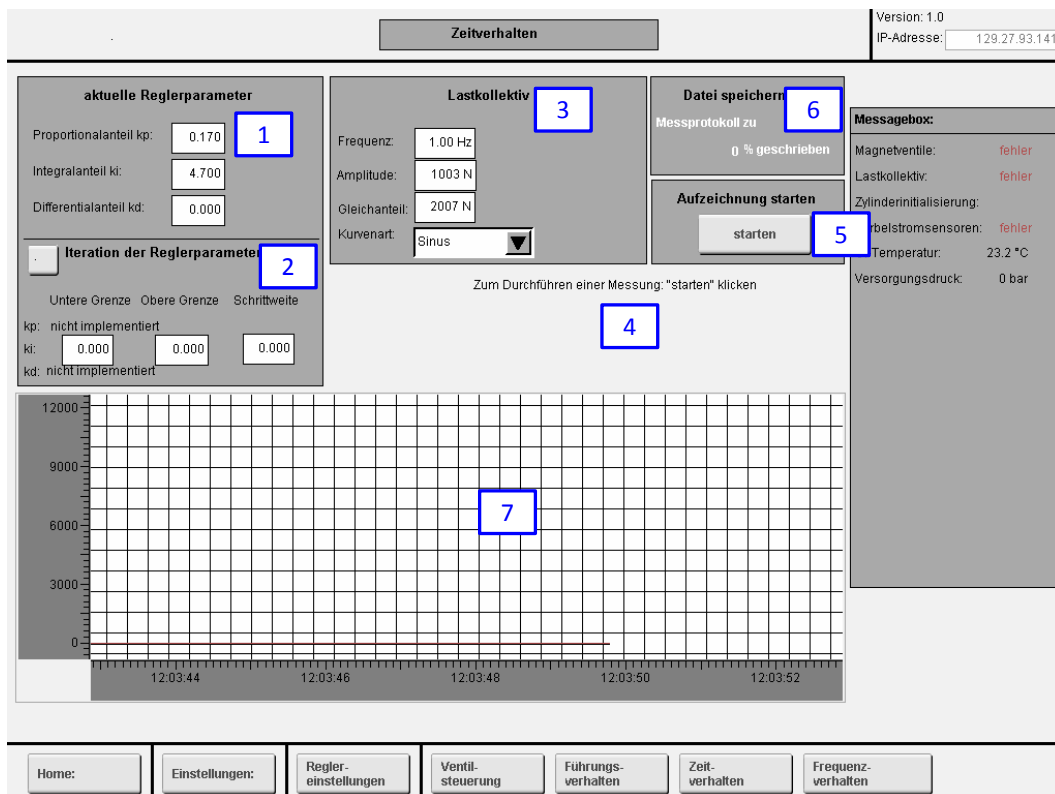


Abbildung 5.5: Menübildschirm: Aufnahme Zeitverhalten

Die Reglerparameter werden durch den Regelalgorithmus errechnet. Zur Überprüfung werden sie dem Benutzer angezeigt (1). Um eine weitere Optimierung vorzunehmen oder den Regler an neue Betriebsbedingungen anzupassen, kann der Integralanteil der Reglerverstärkung zur Variation freigegeben werden (2). Innerhalb der vorgegebenen Grenzen wird der Wert mit der definierten Schrittweite variiert. Das Ergebnis der Messung wird automatisch abgespeichert. Der Benutzer kann den Verlauf des Sollwertes festlegen, um verschiedene Betriebsbedingungen zu überprüfen (3). Der aktuelle Status des Programms wird angezeigt (4). Die Messung kann durch Klick auf "starten" angestoßen werden (5). Die Messdauer ist mit 10 s festgelegt, das Abspeichern dauert jedoch hardwarebedingt länger. Aus diesem Grund wird der Status des Speichervorgangs angezeigt (6). Der zeitliche Verlauf des Soll- und Istwertes wird dargestellt (7). Aufgrund der maximalen Aktualisierungsrate der Werte von 50 Hz kommt es bei höheren Anregungsfrequenzen zu einer zeitlich verzerrten Anzeige des Trendverlaufs.

## 5.6 Aufnahme des Frequenzverhaltens

Das Systemverhalten im Frequenzbereich wird durch die Darstellung im Bode-Diagramm beschrieben. Für das geregelte Gesamtsystem erfolgt die Aufnahme des Diagramms mithilfe des in Abbildung 5.6 dargestellten Menübildschirms.

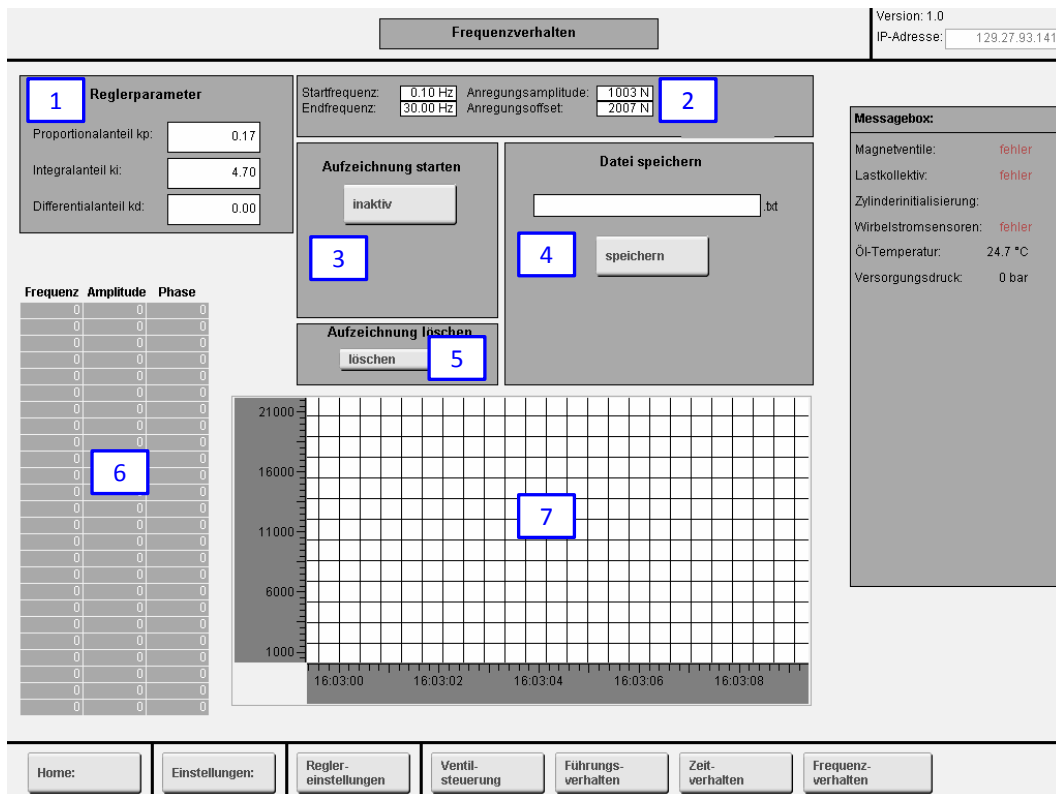


Abbildung 5.6: Menübildschirm: Aufnahme Frequenzverhalten

Die durch den Regelalgorithmus errechneten Parameter werden dem Benutzer angezeigt (1). Die Aufnahme kann für verschiedene Sollkurven-Parameter erstellt werden. Der Benutzer muss dazu die Parameter sowie den Frequenzbereich definieren, für den das Systemverhalten aufgezeichnet werden soll (2). Die Aufnahme muss anschließend manuell gestartet werden (3). Die Ausgabe erfolgt als Text-Datei (4). Durch einen Klick auf den Button "löschen" werden bisherige Aufzeichnungen aus dem temporären Speicher entfernt (5). Zur Übersicht werden dem Benutzer die Messwerte im temporären Speicher dargestellt (6). Der aktuelle zeitliche Verlauf von Soll- und Ist-Kraft wird angezeigt (7).

## 5.7 Hydraulikaggregat

Die Bedienung des Hydraulikaggregats erfolgt über die SPS. Mithilfe des in Abbildung 5.7 dargestellten Menüs werden die dazu erforderlichen Routinen gesteuert.

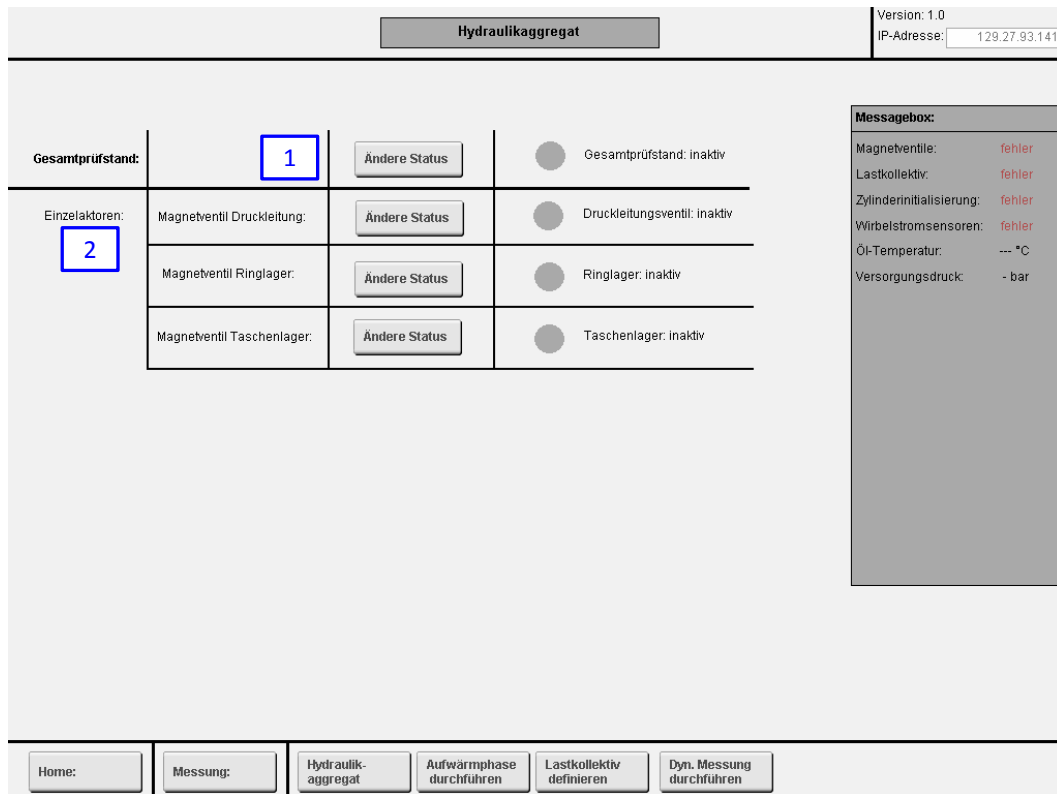


Abbildung 5.7: Menübildschirm: Hydraulikaggregat

Die Aktivierung des Hydraulikaggregats und der Magnetventile für eine Messung kann automatisch erfolgen. Dazu ist ein Klick auf "Gesamtprüfstand: Ändere Status" erforderlich (1). Wahlweise können die einzelnen Aktoren auch manuell geschaltet werden (2).

## 5.8 Aufwärmphase durchführen

Um dynamische Messungen am Prüfstand vornehmen zu können muss dieser auf Betriebstemperatur gebracht werden. Die zur messtechnischen Erfassung notwendigen Eingaben werden über das in Abbildung 5.8 dargestellte Menü getätigt.

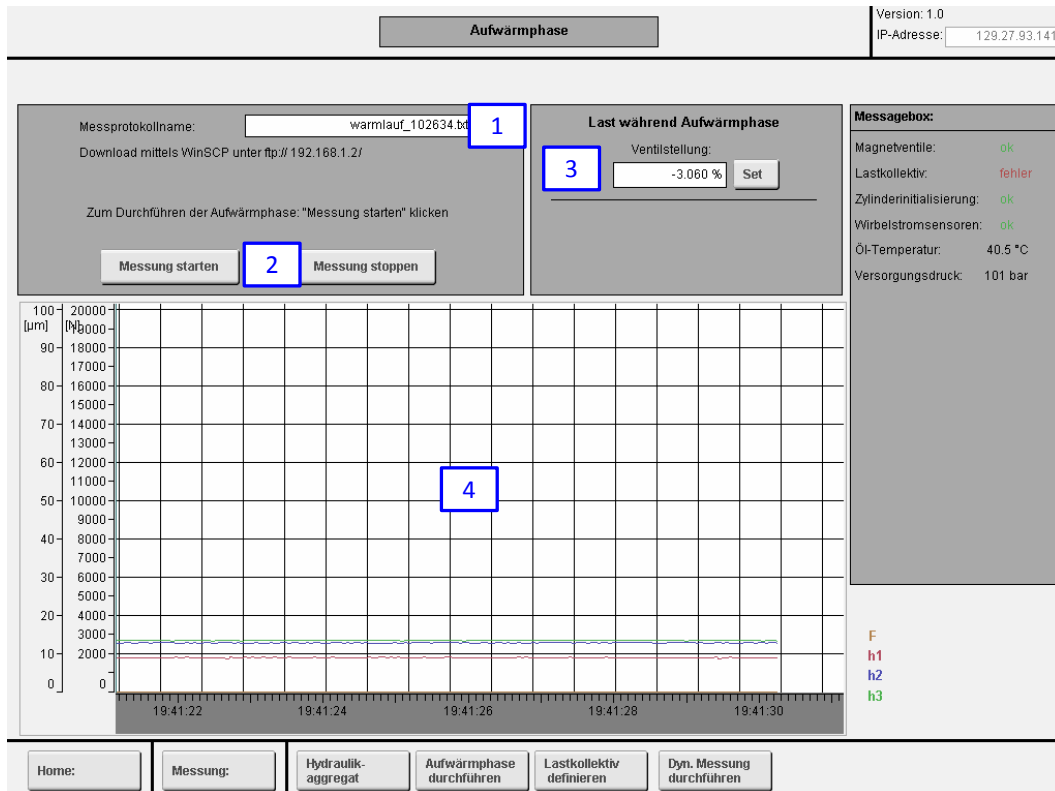


Abbildung 5.8: Menübildschirm: Aufwärmphase

Der Name des Messprotokolls muss vom Benutzer vorgegeben werden (1). Um einen eindeutigen Dateinamen zu erhalten, wird dem Dateinamen automatisiert ein Zeitstempel angehängt. Die Messung muss manuell gestartet werden und kann jederzeit durch den Benutzer unterbrochen werden (2). Notwendige Initialisierungsroutinen werden vor Start der Messwertaufnahme automatisch durchgeführt. Der Zylinder hebt vor Beginn der Messwertaufnahme automatisch ab. Optional kann der Zylinder durch Eingabe einer prozentuellen Ventilstellung angefahren werden (3). Der Zylinder übt bei Anstehen an der Kraftmessdose eine Kraft auf das Prüflager aus. Diese ist jedoch ungerichtet, wodurch sich eine Temperaturabhängigkeit ergibt und ein manuelles Nachstellen erforderlich ist. Änderungen am Ventilstellungswert sollen in Schritten zu je maximal 5 % erfolgen. Eine abrupte Änderung führt zu Druckspitzen im Prüfzylinder, die sich durch die hydrostatischen Lager fortpflanzen und den Doppelabstreifring herauspressen. Die zeitliche Veränderung der Kraft und Lagerspalthöhen werden dargestellt (4).

## 5.9 Lastkollektiv definieren

Die geregelte Krafteinleitung in den Prüfstand erfolgt anhand periodischer Sollsignale. Das Menü zur Definition der Lastkollektivparameter ist in Abbildung 5.9 dargestellt.

The screenshot displays the 'Lastkollektiv' configuration screen. At the top right, it shows 'Version: 1.0' and 'IP-Adresse: 129.27.93.141'. The main area is divided into several sections:

- Parameter Input:**
  - Klasse der Lastkurve:** A dropdown menu with 'Sinus' selected. Other options include 'Dreieck', 'Rechteck', 'Trapez (1/6\*T Steig-/Fallanteil)', and 'Sinus (Zweiweggleichrichtung)'. A blue box '1' highlights this menu.
  - Anregungsfrequenz [Hz]:** Input field with '1.00' and a range '(0.02 - 50 Hz)'. A blue box '2' highlights this field.
  - Anregungsamplitude:** Input field with '1000 N'. A blue box '2' highlights this field.
  - Offset:** Input field with '2000 N'. A blue box '2' highlights this field.
  - Lastkollektiv definieren:** A button to apply the settings. A blue box '3' highlights this button.
- Graph:** A plot of force [N] vs. time [ms]. The y-axis ranges from 1000 to 3000 N, and the x-axis ranges from 0 to 1000.00 ms. A sine wave is shown, starting at 2000 N at 0 ms, peaking at 3000 N, crossing 2000 N at 500 ms, reaching a minimum of 1000 N, and returning to 2000 N at 1000 ms. A blue box '4' highlights the graph area.
- Messagebox:** A panel on the right showing system status:
  - Magnetventile: fehler
  - Lastkollektiv: ok
  - Zylinderinitialisierung: fehler
  - Wirbelstromsensoren: fehler
  - Öl-Temperatur: --- °C
  - Versorgungsdruck: - bar
- Navigation Bar:** A row of buttons at the bottom: 'Home', 'Messung', 'Hydraulik-aggregat', 'Aufwärmphase durchführen', 'Lastkollektiv definieren', and 'Dyn. Messung durchführen'.

Abbildung 5.9: Menübildschirm: Lastkollektiv definieren

Der Benutzer kann aus einer Reihe von periodischen Signaltypen wählen (1). Die Parameter, wie Anregungsfrequenz und -amplitude, sowie der Offset des Signals müssen vom Benutzer vorgegeben werden (2). Durch den Klick auf "Lastkollektiv definieren" werden die Momentanwerte des Sollsignals errechnet (3). Je nach Frequenz der Anregung dauert der Rechenvorgang unterschiedlich lange, da die Momentanwerte in Zeitschritten zu je  $0.4 \text{ ms}$  errechnet werden. Die Werte über eine Periode des Sollsignals werden dargestellt (4).



## 5.10 Dynamische Messung durchführen

Um dynamische Messungen am Prüfstand durchführen zu können, dient der in Abbildung 5.10 dargestellte Menüpunkt.

The screenshot displays the 'Messung durchführen' (Dynamic Measurement) interface. At the top, there is a title bar with 'Messung durchführen' and 'Version: 1.0', and an IP address field showing '129.27.93.141'. Below this, the interface is divided into several sections:

- Messprotokollname:** A text input field containing 'dyn' (annotated with '1'). Below it, a note says 'Download mittels WinSCP unter ftp:// 192.168.1.2/'.
- Status der Messprotokollerstellung:** A box showing '0 % geschrieben' (annotated with '3').
- Messagebox:** A list of system status indicators:
  - Magnetventile: ok
  - Lastkollektiv: fehler
  - Zylinderinitialisierung: ok
  - Wirbelstromsensoren: ok
  - Öl-Temperatur: 40.2 °C
  - Versorgungsdruck: 101 bar
- Measurement Control:** A section with the text 'Zum Durchführen einer Messung: "Messung starten" drücken' and two buttons: 'Messung starten' (annotated with '2') and 'Messung stoppen'.
- Graph:** A large grid area (annotated with '4') showing multiple data series over time. The y-axis is labeled '100 [µm]' and '20000', with values ranging from 0 to 20000. The x-axis shows time from 19:41:50 to 19:41:58. A legend on the right indicates 'F' (blue), 'h1' (red), 'h2' (green), and 'h3' (purple).
- Navigation Bar:** A row of buttons at the bottom: 'Home:', 'Messung:', 'Hydraulik-aggregat', 'Aufwärmphase durchführen', 'Lastkollektiv definieren', and 'Dyn. Messung durchführen'.

Abbildung 5.10: Menübildschirm: Dynamische Messung durchführen

Der Messprotokollname muss vom Benutzer vorgegeben werden (1). Zur eindeutigen Kennung wird er mit einem Zeitstempel erweitert. Das Starten und Stoppen der Messung erfolgt durch Klick auf den jeweiligen Button (2). Da der Speichervorgang hardwarebedingt länger dauert als die Aufnahme der Messwerte wird der Status der Speicherung angezeigt (3). Die zeitlichen Verläufe von Kraft und Lagerspalthöhen werden dargestellt (4).

## 6 Messungen

Im Folgenden werden die Programmabläufe bei der Durchführung von Messungen erläutert. Des Weiteren werden Messwertaufnahmen nach der erfolgten Modifikation diskutiert. Neben einer Messwertaufnahme während des Warmlaufs sind die in Tabelle 6.1 aufgelisteten Messungen durchgeführt worden. Der Versorgungsdruck ist bei allen Messungen auf 100 bar eingestellt.

Tabelle 6.1: Durchgeführte dynamische Messungen, Quelle: Eigene Darstellung.

Messung Nr.	Gleichanteil	Amplitude	Frequenz	Signaltyp
1	8 kN	1 kN	1 Hz	Rechteck
2	8 kN	2 kN	2 Hz	Sinus
3	10 kN	3 kN	15 Hz	Sinus
4	9 kN	4 kN	5 Hz	Dreieck
5	9 kN	4 kN	0.1 Hz	Dreieck

### 6.1 Initialisierungsroutinen

Vor Beginn jeder Messwertaufnahme (Warmlauf und dynamisch) werden Zylinder und Wirbelstromsensoren in zwei sequentiell ablaufenden Routinen initialisiert.

Zum Initialisieren des Zylinders hebt der Kolben ab und wartet am oberen Totpunkt eine Sekunde ab. Danach fährt er langsam an die Kraftmessdose an. In weiterer Folge wird die Ventilstellung sukzessive reduziert, bis der Zylinder die geringstmöglich messbare Kraft ausübt. Damit ist die Zylinderinitialisierungsroutine abgeschlossen.

Die Initialisierung der Wirbelstromsensoren dient der Bestimmung des durch die Einbaulage der Sensoren bedingten Offsets. Dazu hebt der Zylinder nochmalig ab und die Versorgung des Taschenlagers wird abgeschaltet. Danach fährt der Zylinder langsam an und übt bei Anstehen an der Kraftmessdose die maximale Prüfkraft von 15 kN für 1 s aus. Dadurch wird sichergestellt, dass eventuell vorhandenes Öl zwischen Deck- und Lagerscheibe herausgepresst wird. Während dieser Zeit werden die Messwerte der Wirbelstromsensoren aufgenommen, um danach einen Mittelwert zu bilden. Dieser Wert wird für jeden Sensor hinterlegt und dient als Nullpunktverschiebung. Alle in weiterer Folge der Messung angezeigten Werte sind als tarierte Messwerte relativ zu diesem Offset zu sehen.

## 6.2 Warmlauf

Die Warmlaufphase ist notwendig, um alle Komponenten des Prüfstandes auf Betriebstemperatur zu bringen. Die Eigenschaften von Hydrauliköl verändern sich in Abhängigkeit der Öltemperatur. Die Messungen am Prüfstand sind bei einer Öltemperatur von 40°C durchzuführen, um die Vergleichbarkeit der Messergebnisse sicherzustellen. Die Öltemperatur wird durch einen in der Zuleitung zum Taschenlager angebrachten Temperatursensor bestimmt. Durch die örtliche Trennung von Sensor und Taschenscheibe kann die tatsächliche Öltemperatur im Taschenlager nicht bestimmt werden. Das gesamte Prüflager weist eine hohe Masse und damit große Wärmespeicherefähigkeit auf. Durch eine einheitliche Temperatur aller im Ölfluss liegenden Komponenten wird eine Übertragbarkeit der gemessenen Öltemperatur sichergestellt.

Der Warmlauf der Komponenten des Prüfstandes kann messtechnisch erfasst werden. Da der Vorgang über mehrere Stunden gehen kann, werden die Messwerte in Abständen von 100 ms aufgenommen und auf der SD-Karte der SPS gespeichert. Dieser Zeitabstand stellt einen guten Kompromiss zwischen zeitlicher Auflösung und Messprotokollgröße dar.

Nach erfolgter Initialisierung kann vom Benutzer eine Ventilstellung vorgegeben werden, wodurch statische Lasten während der Warmlaufphase aufgebracht werden können.

### 6.2.1 Ablauf der Messung

Durch Drücken des Buttons "Messung starten" wird der in der SPS hinterlegte Ablauf gestartet und kann jederzeit durch "Messung stoppen" vom Benutzer beendet werden. Nach dem Start des Messvorgangs werden die Initialisierungsroutinen aufgerufen. Nach deren Abschluss startet die Messwertaufnahme. Der Zylinder wird automatisch langsam abgehoben und verharzt im oberen Totpunkt. Auf Benutzerwunsch kann er entsprechend der Ventilstellung wieder abgesenkt werden, wobei die Ventilstellung auf  $\pm 10\%$  begrenzt ist, um keine unzulässig hohe Kraft auszuüben. Die Änderung der Ventilstellung soll in maximal 5 %-Schritten erfolgen, um Druckspitzen in den Zylinderkammern zu vermeiden. Eine Kraftregelung während der Aufwärmphase ist nicht möglich.

Nach erfolgter Speicherung kann das Messprotokoll vom FTP-Server heruntergeladen werden. Es erfolgt keine automatische Löschung alter Messprotokolle.

### 6.2.2 Messung

Im Blendenbetrieb wird die Lagerspalthöhe durch Verstellen der Blendenschrauben auf  $50\ \mu\text{m}$  (relativ) im kalten Zustand eingestellt. Anschließend wird die Messung gestartet. In Abbildung 6.1 sind die Verläufe der Spalthöhen und der Öltemperatur während der Warmlaufphase dargestellt. Die Öltemperatur steigt ausgehend von der Raumtemperatur innerhalb von 50 min kontinuierlich an. Bei Erreichen einer Grenztemperatur von  $43\ ^\circ\text{C}$  wird der Lüfter eingeschaltet. Die Temperaturhysterese für den Lüfter beträgt  $3\ ^\circ\text{C}$ . Der Schaltvorgang verursacht elektromagnetische Einstreuungen im Temperatursignal, welche sich als impulsförmige Sensorsignalschwankungen bemerkbar machen. Durch die zeitliche Auflösung der Messwerte von  $100\ \text{ms}$  ist die Einstreuung jedoch nicht bei jedem Schaltvorgang detektiert.

Die öltemperaturabhängigen Spalthöhen verlaufen nur innerhalb der ersten 20 min gleich. Besonders die Spalthöhe der Lagertasche 2 weist eine große Veränderung zwischen kaltem und warmem Zustand auf. Dies ist auf eine unterschiedliche hydraulische Charakteristik der Blendenschrauben zurückzuführen. Durch das von idealen Blenden abweichende Verhalten ist im warmen Zustand ein neuerliches Einstellen der Lagerspalthöhen unabdingbar. Nach 80 min können die Komponenten am Prüfstand als durchwärmt angesehen werden. Ab diesem Zeitpunkt sind weitere Messungen durchführbar.

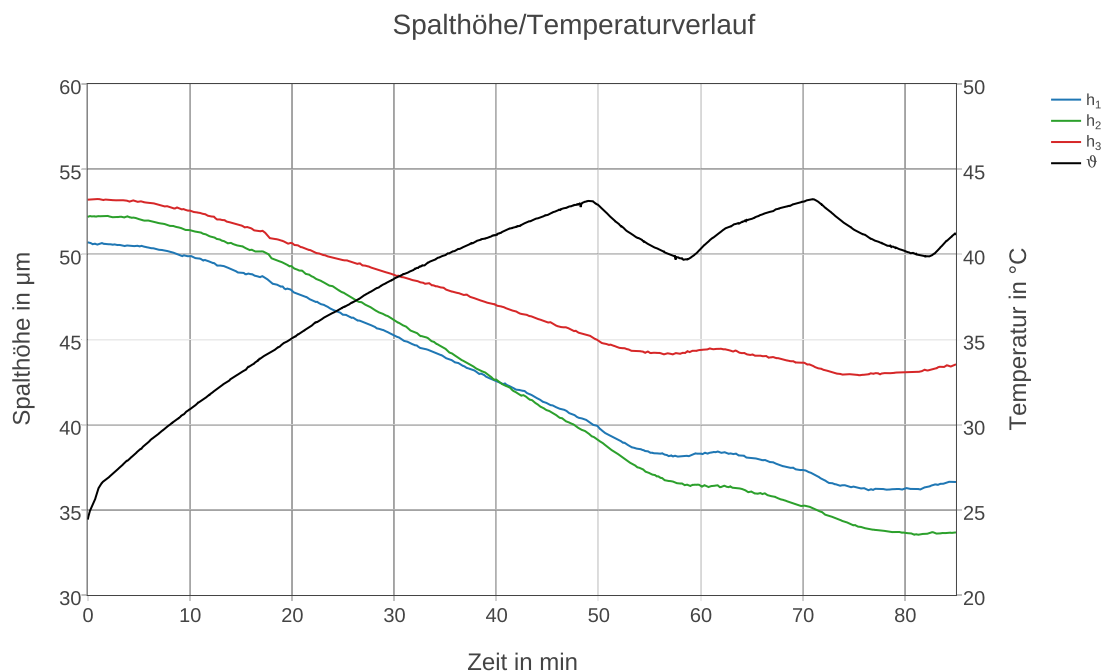


Abbildung 6.1: Temperatur- und Lagerspalthöhenverläufe während der Warmlaufphase, Quelle: Eigene Darstellung.

## 6.3 Dynamische Messungen

Zusätzlich zur Aufzeichnung der Warmlaufphase ist die Messprotokollerstellung während dynamischer, geregelter Krafteinleitung möglich. Dabei werden die Messwerte mit der maximalen Samplerate von 2.5 kHz aufgenommen und über einen Puffer auf der SD-Karte der SPS gespeichert. Da der Schreibvorgang hardwarebedingt drei mal langsamer als die Messwertaufnahme erfolgt, muss nach der Messung gewartet werden, bis der Schreibvorgang abgeschlossen ist. Während dieser Zeit sollten keine Benutzereingaben erfolgen. Maximal kann über eine Zeitdauer von 30 min ohne Unterbrechung gemessen werden, da andernfalls ein Überlauf des Puffers droht. Pro Minute ergibt sich eine Messprotokollgröße von 2.5 MB.

Alle in weiterer Folge diskutierten Messungen werden im Blendenbetrieb durchgeführt. Mittels Blendenschrauben wird die Höhe des Lagerspaltes im unbelasteten Zustand auf  $50\ \mu\text{m}$  eingestellt. Da keine Regelung der Lagerspalthöhe erfolgt, ist diese von der aufgebrachten Kraft abhängig.

### 6.3.1 Ablauf der Messung

Vor der Messung muss ein periodisches Lastkollektiv im Arbeitsspeicher der SPS hinterlegt werden. Dazu dient der Menüpunkt "Lastkollektiv definieren".

Die Messung erfolgt im Menüpunkt "Dynamische Messung durchführen". Durch Klicken auf "Messung starten" wird der in der SPS hinterlegte Ablauf gestartet und kann durch "Messung stoppen" vom Benutzer beendet werden.

Vor der dynamischen Anregung wird der Gleichanteil des Lastkollektivs für 2 s gehalten. Danach erfolgt die periodische Krafteinleitung. Der Benutzer beendet die Messwertaufnahme manuell. Andernfalls wird die Messung automatisch beendet bevor es zu einem Pufferüberlauf kommt. Nach Beendigung der Messwertaufnahme muss der Speichervorgang abgewartet werden.

Nach erfolgter Speicherung kann das Messprotokoll vom FTP-Server heruntergeladen werden.

### 6.3.2 Messung mit rechteckförmigem Führungssignal

Abbildung 6.2 zeigt die Messung für ein rechteckförmiges Führungssignal mit einer Anregungsfrequenz von 1 Hz. Das Signal wurde nachträglich mit einem Butterworth-Filter mit einer Grenzfrequenz von 100 Hz gefiltert. Durch die Filterung werden die Auswirkungen des Dither-Signals entfernt, welches der Ventilstellung überlagert ist.

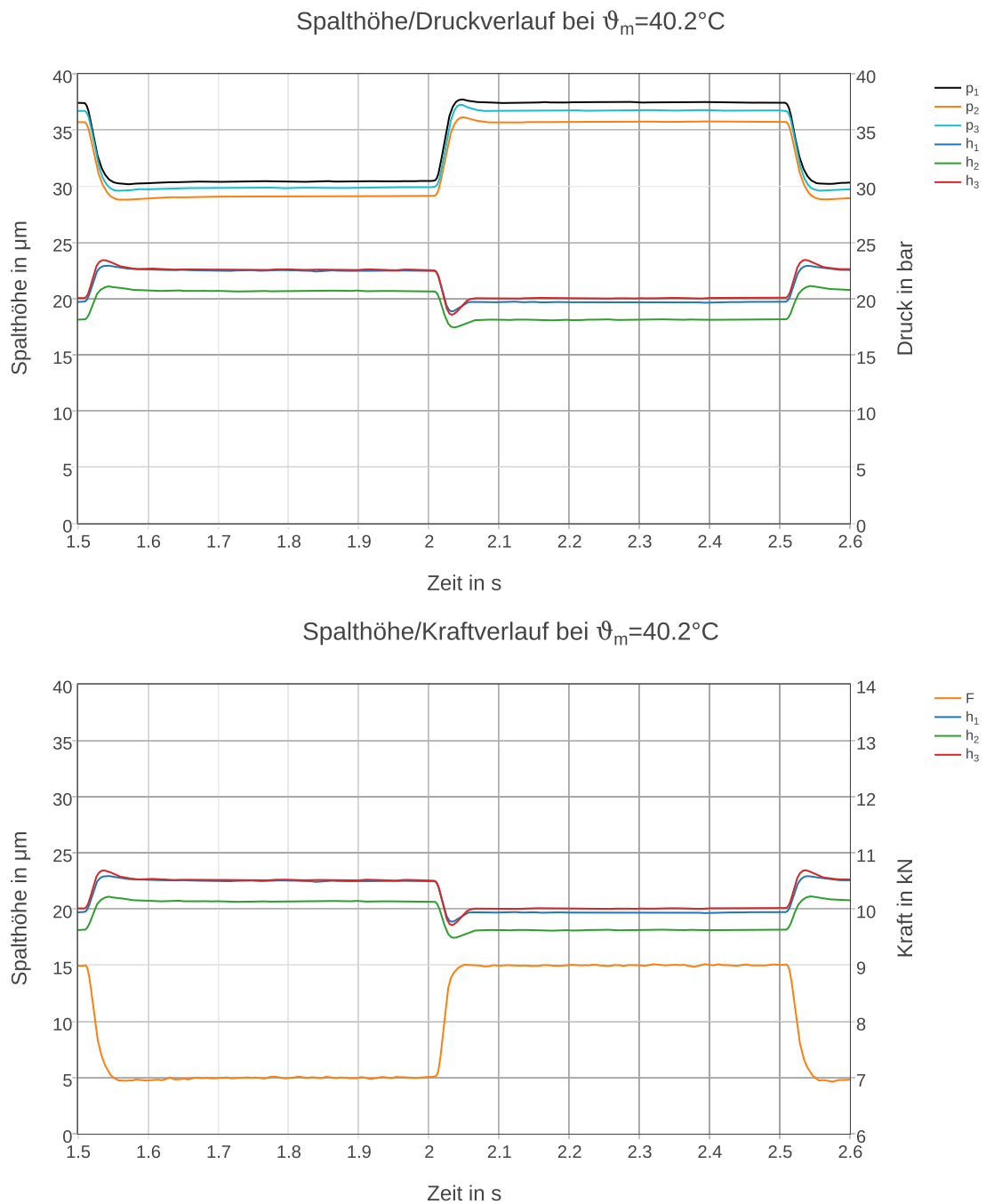


Abbildung 6.2: Messung bei rechteckförmigem Führungssignal (1 Hz), Quelle: Eigene Darstellung.

Die Parameter für Gleichanteil  $\bar{F}_s = 8 \text{ kN}$  und Amplitude  $\hat{F}_s = 1 \text{ kN}$  sind an einem allgemeinen Punkt innerhalb des möglichen Bereichs gewählt. Die Reglerparameter werden vom Regelalgorithmus durch die in Abbildung 4.14 dargestellten Verläufe interpoliert.

Der Anstieg der durch den Hydraulikzylinder aufgebrauchten Kraft erfolgt innerhalb von 50 ms und es kommt zu keinem Überschwingen über den Sollwert. Durch den Lagerspalthöhenverlauf zeigt sich, dass das hydrostatische Lager schwingungsfähig ist. Bei schnellen Lastsprüngen kommt es zu einem stark gedämpften Einschwingvorgang der Lagerspalthöhe. Dieser ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Es zeigt sich eine Totzeit von 7 ms. Diese ist durch die im Signalfloss liegende Aktorik und Sensorik bedingt.

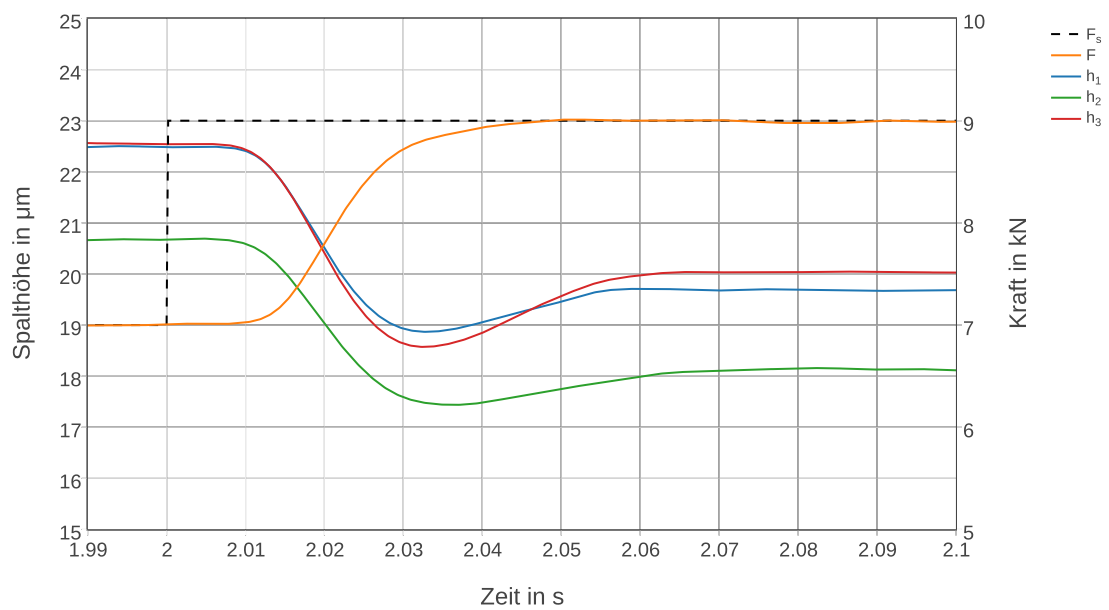


Abbildung 6.3: Detailansicht des Führungssprunges von 7 kN auf 9 kN, Quelle: Eigene Darstellung.

### 6.3.3 Messung mit sinusförmigem Führungssignal bei 2 Hz

Die Verläufe der Messwerte von Taschendruck, Lagerspalthöhe und Kraft sind in Abbildung 6.4 ersichtlich. Der Gleichanteil der Führungsgröße beträgt 8 kN, die Amplitude 2 kN. Die Grenzfrequenz für die nachträgliche Filterung der Signale beträgt 80 Hz.

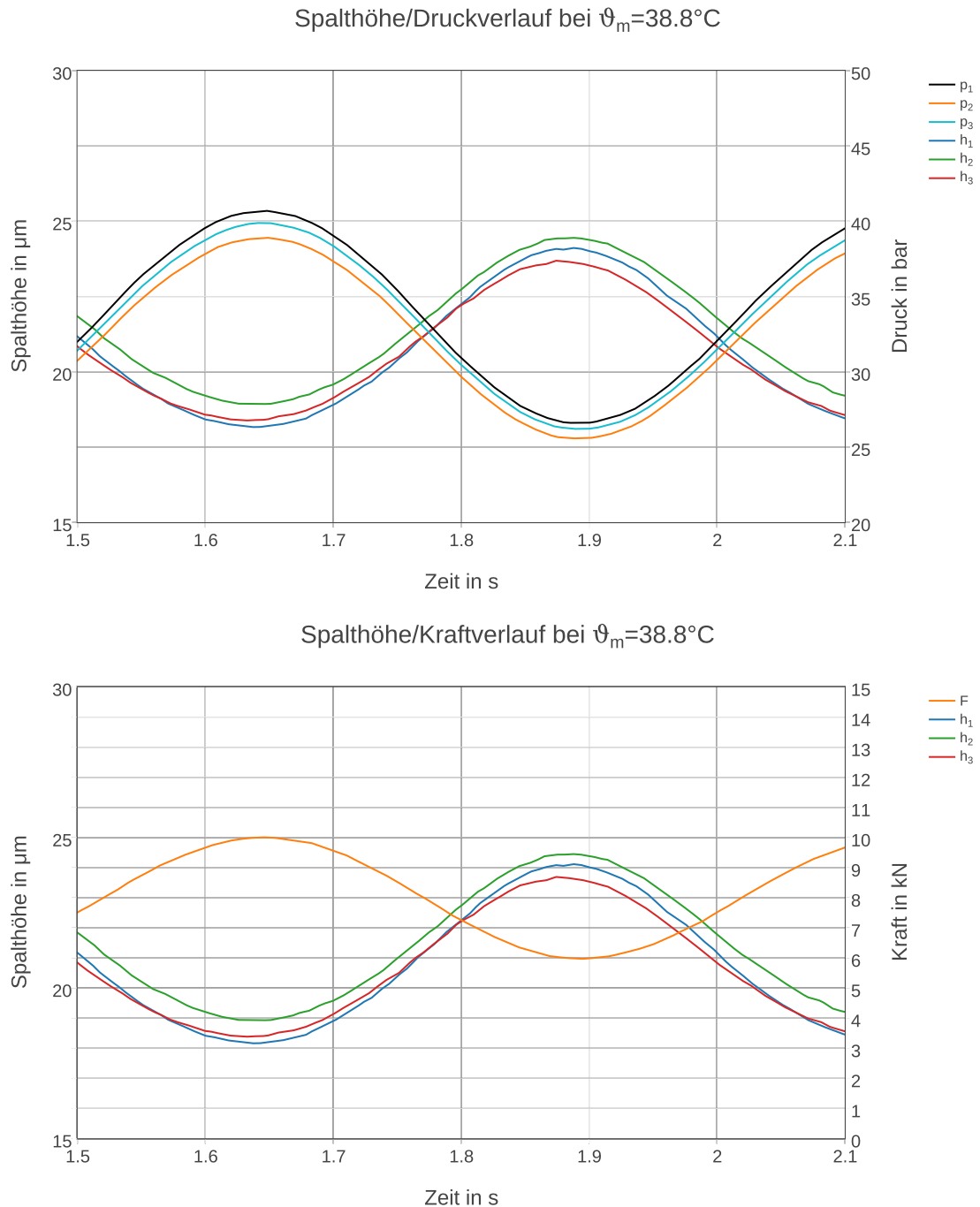


Abbildung 6.4: Messung bei sinusförmigem Führungssignal (2 Hz), Quelle: Eigene Darstellung.



Der Taschendruck stellt sich entsprechend der äußeren Belastung ein. Da im Blendenbetrieb keine Anpassung der Ölmenge auf das Lastniveau erfolgt, verringert sich die Lagerspalthöhe mit ansteigendem Kraftniveau.

Vergleichend dazu ist eine im Jahr 2012 erfolgte Messung im Blendenbetrieb in Abbildung 6.5 dargestellt. Eine Anregung mit einer Frequenz von 2 Hz stellt mit dem pneumatischen Einfaltenbalg die obere Grenze dar. Der Kraftverlauf weist deutliche Abweichungen von einem idealen Sinusverlauf auf.

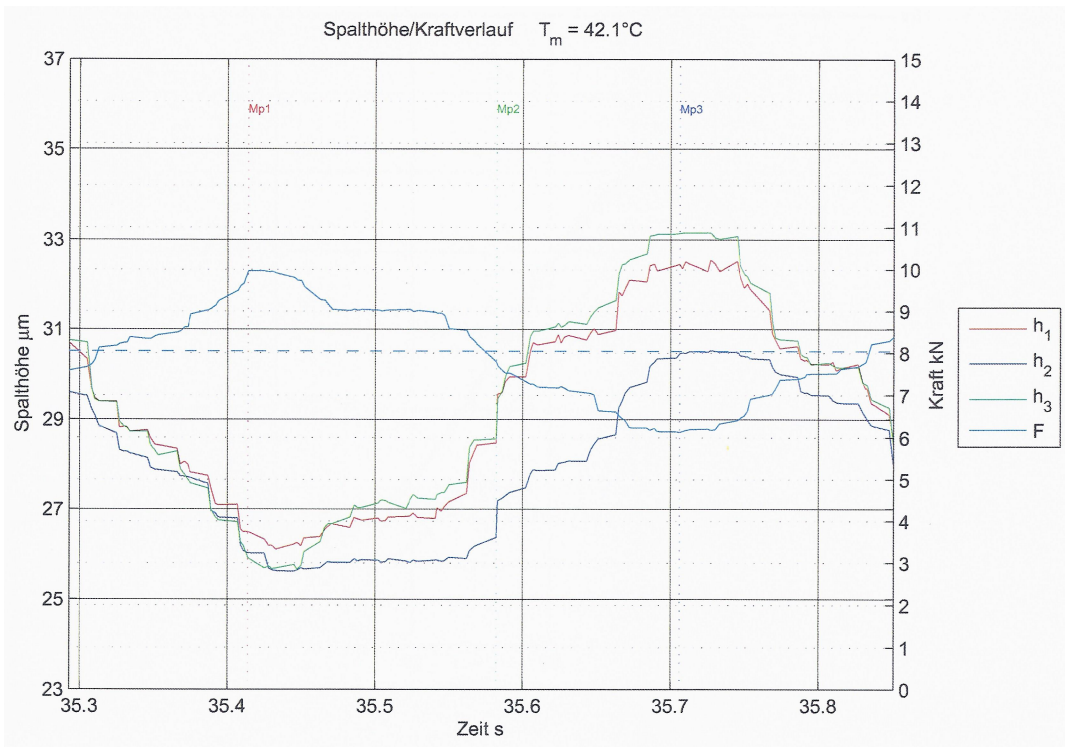


Abbildung 6.5: Vergleichsmessung bei sinusförmiger Anregung (2 Hz), Quelle: Mörwald (2012), S. 74.

### 6.3.4 Messung mit sinusförmigem Führungssignal bei 15 Hz

Durch die Kräfteinleitung mittels des hydrostatisch gelagerten Prüfzylinder ist es möglich, Kraftverläufe mit Frequenzen bis zu 25 Hz geregelt einzuleiten. Abbildung 6.6 zeigt die Verläufe für eine Sinusanregung ( $\bar{F}_s = 10 \text{ kN}$  und  $\hat{F}_s = 3 \text{ kN}$ ) mit einer Frequenz von 15 Hz. Es treten Phasenverschiebungen zwischen den Mess-Signalen auf.

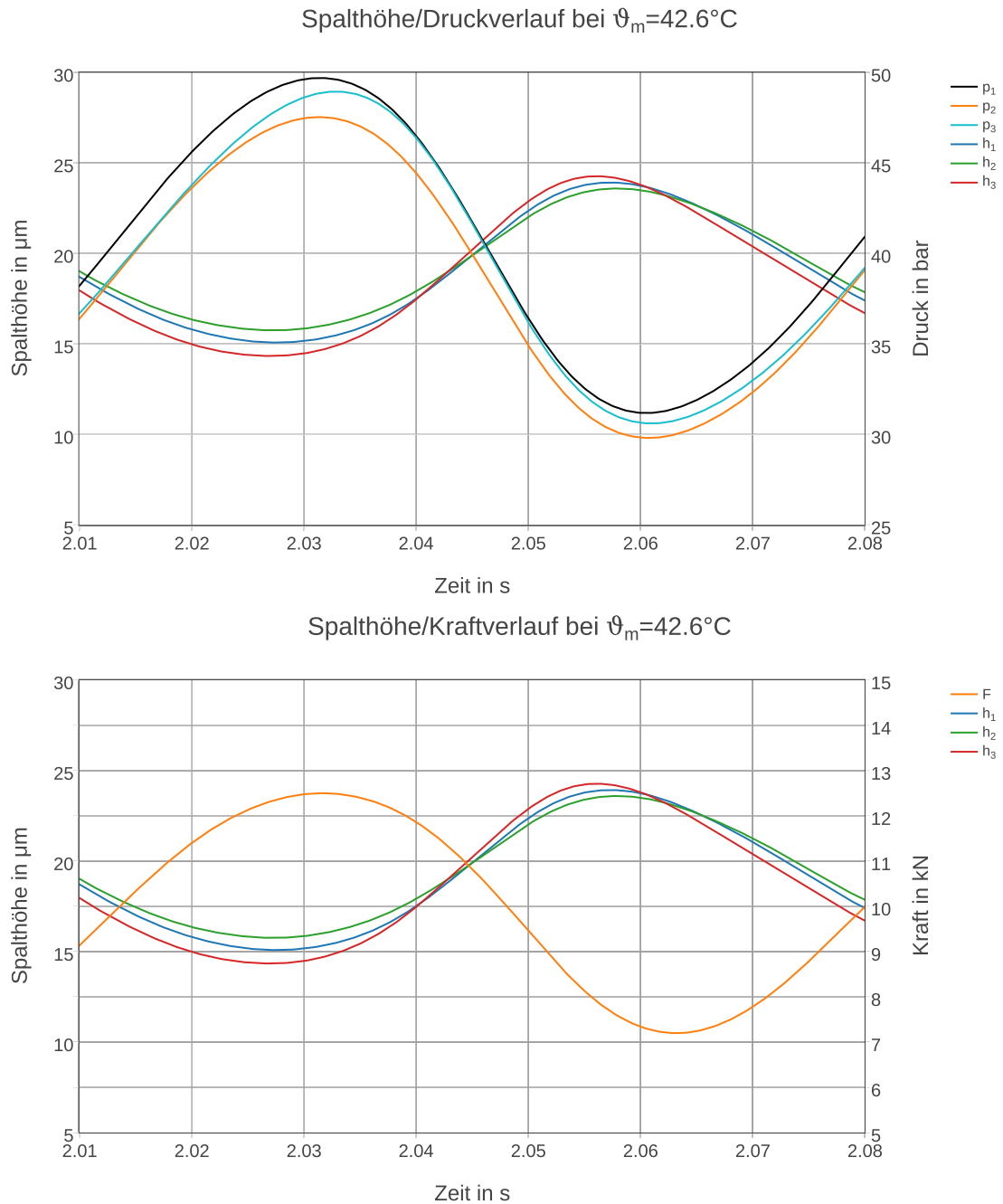


Abbildung 6.6: Messung bei sinusförmigem Führungssignal (15 Hz), Quelle: Eigene Darstellung.

In Abbildung 6.7 sind normierte Signalverläufe dargestellt. Anhand der Messdaten werden im Darstellungszeitraum die Lagerspalthöhen der drei Lagertaschen gemittelt. Danach werden die Messsignale der Kraft und Lagerspalthöhe um deren Mittelwert normiert. Erkennbar sind die zeitlich versetzten Nulldurchgänge zwischen Kraft und Lagerspalthöhe. Die Phasenverschiebung beträgt 5 ms.

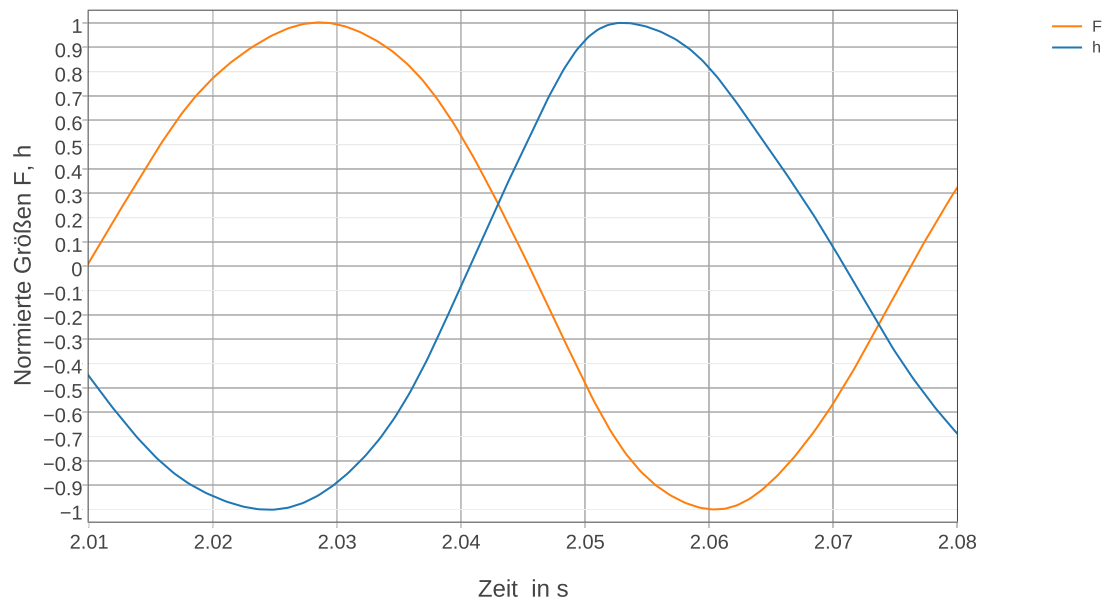


Abbildung 6.7: Normierte Signalverläufe bei sinusförmigem Führungssignal (15 Hz), Quelle: Eigene Darstellung.

### 6.3.5 Messungen mit dreieckförmigem Führungssignal

Bei diesen Messungen wird dem Regler ein dreieckförmiges Führungssignal vorgegeben ( $\bar{F}_s = 9 \text{ kN}$  und  $\hat{F}_s = 4 \text{ kN}$ ). Abbildung 6.8 zeigt die Verläufe bei einer Anregungsfrequenz von 5 Hz. Auffallend sind die Nichtlinearitäten beim Verlauf der Lagerspalthöhen.

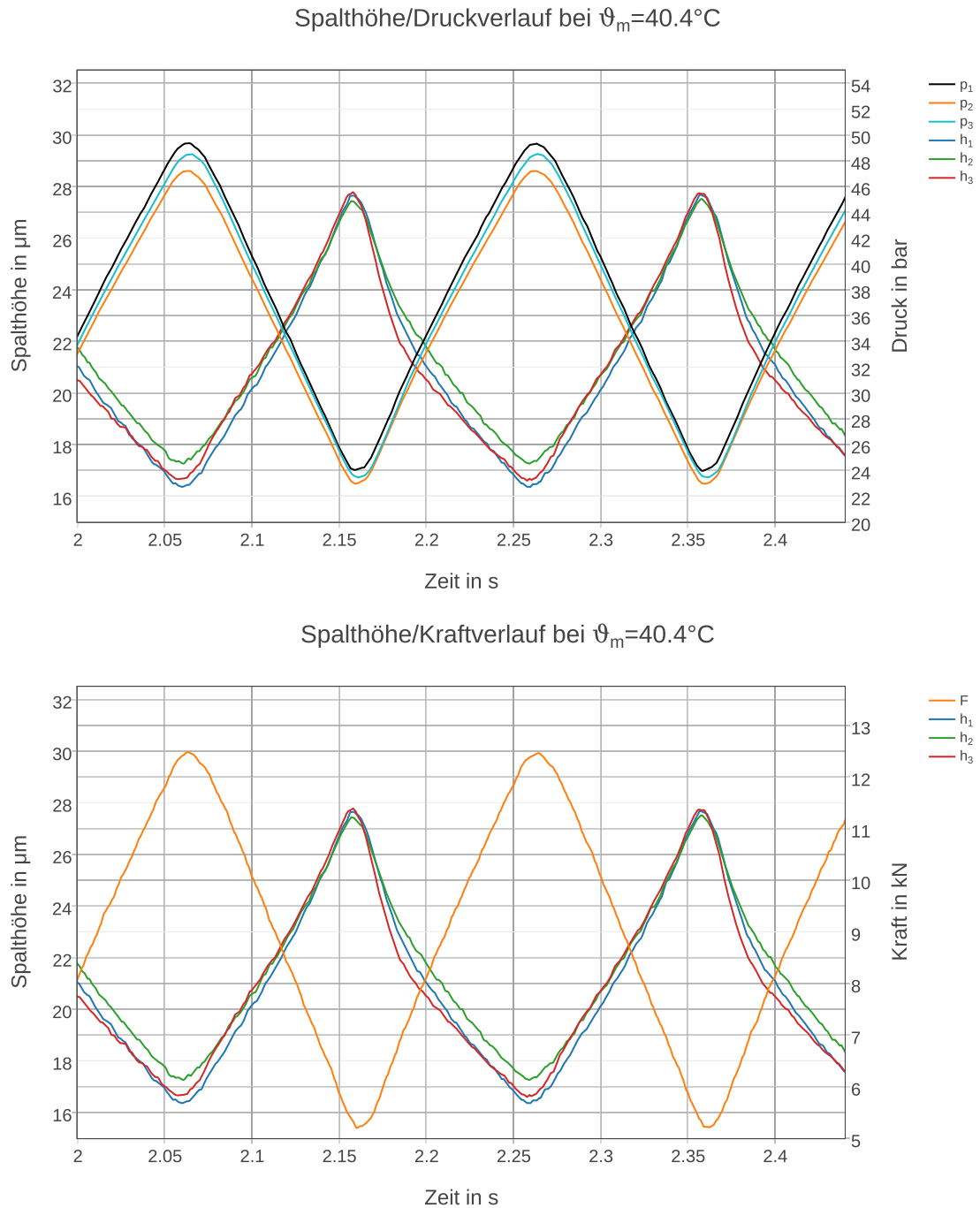


Abbildung 6.8: Messung bei dreieckförmigem Führungssignal (5 Hz), Quelle: Eigene Darstellung.

Die Lagerspalthöhe  $h_3$  sinkt in der ersten Belastungsphase bei ansteigender Kraft übermäßig. Abbildung 6.9 zeigt vergleichend die Verläufe bei 0.1 Hz. Bei dieser Frequenz sind dynamische Effekte auszuschließen. Die bei dieser Frequenz geringeren Nichtlinearitäten sind auf hydraulische Gesetzmäßigkeiten innerhalb des hydrostatischen Prüflagers zurückzuführen.

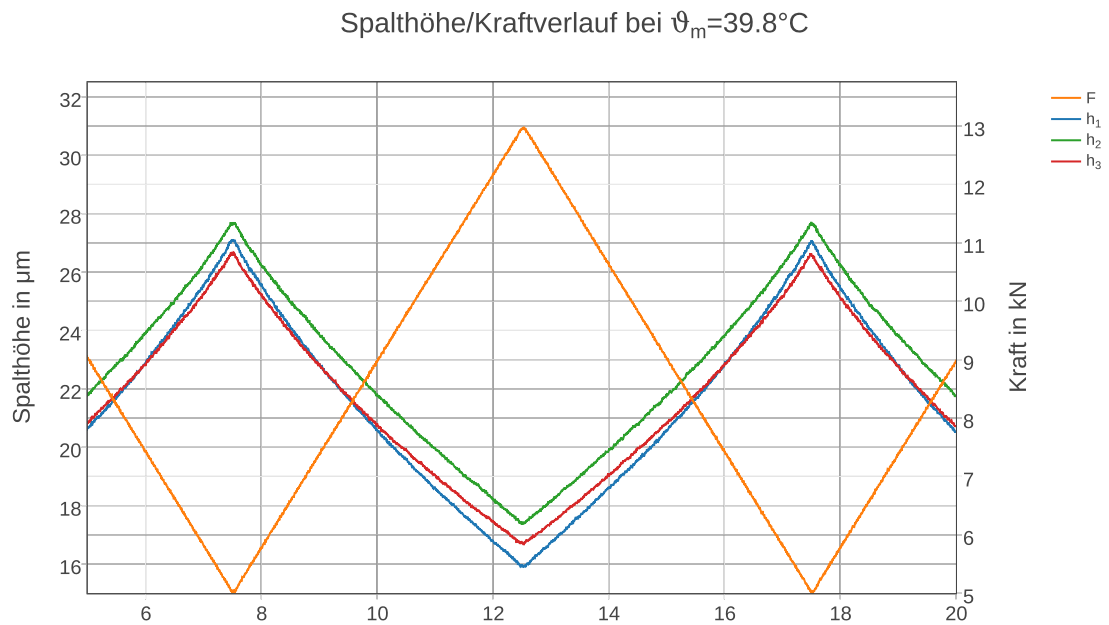
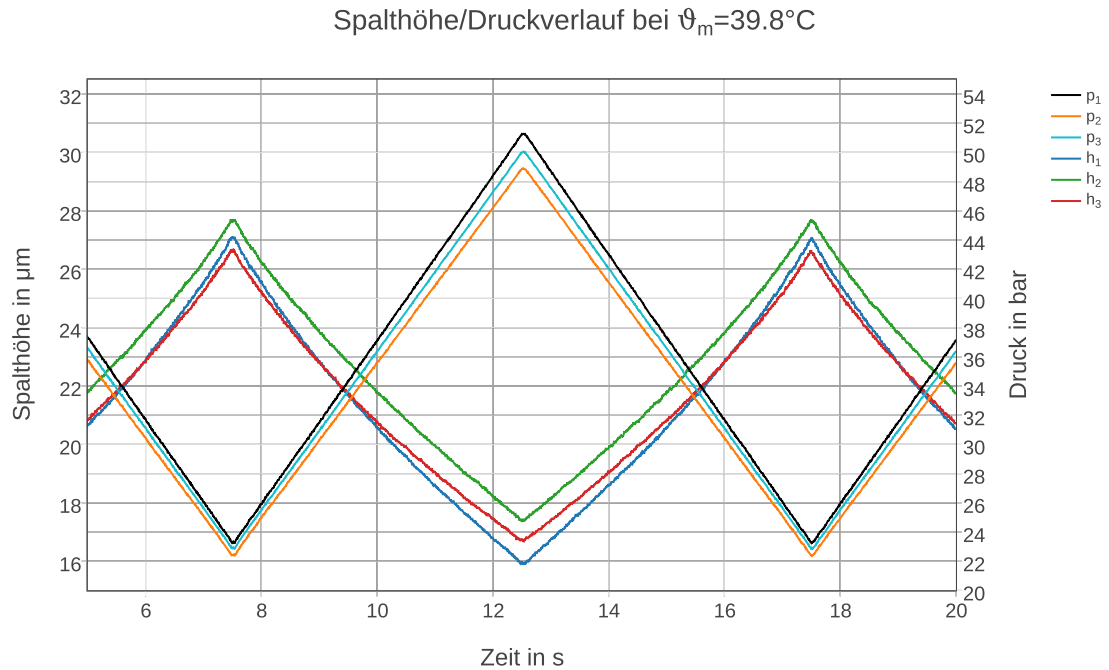


Abbildung 6.9: Messung bei dreieckförmigem Führungssignal (0.1 Hz), Quelle: Eigene Darstellung.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Modifikation können Verbesserungen hinsichtlich der Kraftereinleitung verzeichnet werden. Sowohl im Kraftniveau, als auch in der Dynamik ist eine Erweiterung des nutzbaren Bereichs erfolgt. Es können nun Kräfte bis zu 15 kN bei Anregungsfrequenzen kleiner 25 Hz aufgebracht werden. Dies stellt eine Basis für Untersuchungen auf dem Prüfstand dar. Die Kraftregelung kann sowohl für Sinus-, wie auch für Dreieck- und Rechtecksignale erfolgen. Durch das Modell der Regelstrecke konnten die Ergebnisse nachvollzogen und Einflussfaktoren auf die Regelung bestimmt werden.

Beim Regelungskonzept ist Verbesserungspotential gegeben. Der derzeitige Regelalgorithmus zieht zur dynamischen Anpassung der Reglerparameter nur den Gleichanteil der Führungsgröße in Betracht. Die Zusammenhänge sind statisch definiert und können nicht auf Veränderungen der Systemeigenschaften adaptiert werden. Es gibt in dem System mehrere Zustandsgrößen, die Einfluss auf das Verhalten der Regelstrecke nehmen. Die Steifigkeit des Systems ist durch die veränderliche Ölfilmhöhe variabel. Die Temperatur beeinflusst die Viskosität des Öls und der Systemdruck bestimmt ebenfalls die erreichbare Dynamik.

Ein erweitertes Regelungskonzept kann aus einer modellbasierten adaptiven Regelung bestehen. Durch die Miteinbeziehung von Systemparametern kann dadurch eine weitere Flexibilisierung erreicht werden. Eine Steigerung der Dynamik ist durch die Prädiktion des Streckenverhaltens durch ein totzeitbefreites Modell möglich. Dazu ist jedoch auch ein Hydraulikaggregat erforderlich, welches einen höheren Volumenstrom zur Verfügung stellt.

Die Nutzbarkeit des Prüfstandes ist durch die grafische Menüstruktur erleichtert worden. Durch die auf der SPS umgesetzten Funktionen ist eine Basis für weitere Verbesserungen am Prüfstand geschaffen worden.

Eine Möglichkeit zur Verbesserung bietet auch eine Adaption der Kraftsensorik. Zusätzliche Dehnungsmessstreifen können auf den Zugstäben zwischen Taschenscheibe und Prüfzylinder angebracht werden. Diese messen die Veränderung der Kraft relativ zu dessen Gleichanteil, wodurch sich der Messfehler reduzieren lässt. Der Gleichanteil des Kraftsignals kann weiterhin mit der Kraftmessdose zwischen Kolbenstange und Prüflager gemessen werden.

## Literaturverzeichnis

Bernstein, Herbert (2013): *Messelektronik und Sensoren: Grundlagen der Messtechnik, Sensoren, analoge und digitale Signalverarbeitung*, Springer Vieweg, Wiesbaden

Detiček, Edvard (1997): *Verbesserte Konzepte zur Positions- und Kraftregelung elektrohydraulischer Antriebe*, Dissertation, TUGraz

Findeisen, Dietmar; Helduser, Siegfried (2015): *Ölhydraulik: Handbuch der hydraulischen Antriebe und Steuerungen*, 6.Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden

Gradauer, Sebastian (2013): *Konstruktion eines hydrostatisch gelagerten Prüfzylinders*, Bachelorarbeit, TUGraz

Horn, Martin; Dourdoumas, Nicolaos (2004): *Regelungstechnik: Rechnergestützter Entwurf zeitkontinuierlicher und zeitdiskreter Regelkreise*, Pearson, München

Moog GmbH (2009): *Datenblatt der Ventilreihen 633/634, Rev. 2 (04/2009)*

Mörwald, Georg (2012): *Entwurf und Aufbau eines Prüfstandes zur Untersuchung des Lagerpaltes einer mit mechanischen Reglern betriebenen hydrostatischen Lagerung*, Diplomarbeit, TUGraz

Murrenhoff, Hubertus (2008): *Servohydraulik - Geregelt hydraulische Antriebe*, 3. Auflage, Shaker, Aachen

Philippson, Hans-Werner (2015): *Einstieg in die Regelungstechnik : Vorgehensmodell für den praktischen Reglerentwurf*, 2. Auflage, Hanser, Leipzig

Seitz, Matthias (2012): *Speicherprogrammierbare Steuerungen für die Fabrik- und Prozessautomation*, 3. Auflage, Hanser, Leipzig

Sobe, Klaus (2011): *Entwicklung eines Konzepts zur Regelung servohydraulischer Prüfzylinder*, Diplomarbeit, TUGraz

# **A Anhang**

## **A.1 Stromlaufpläne**



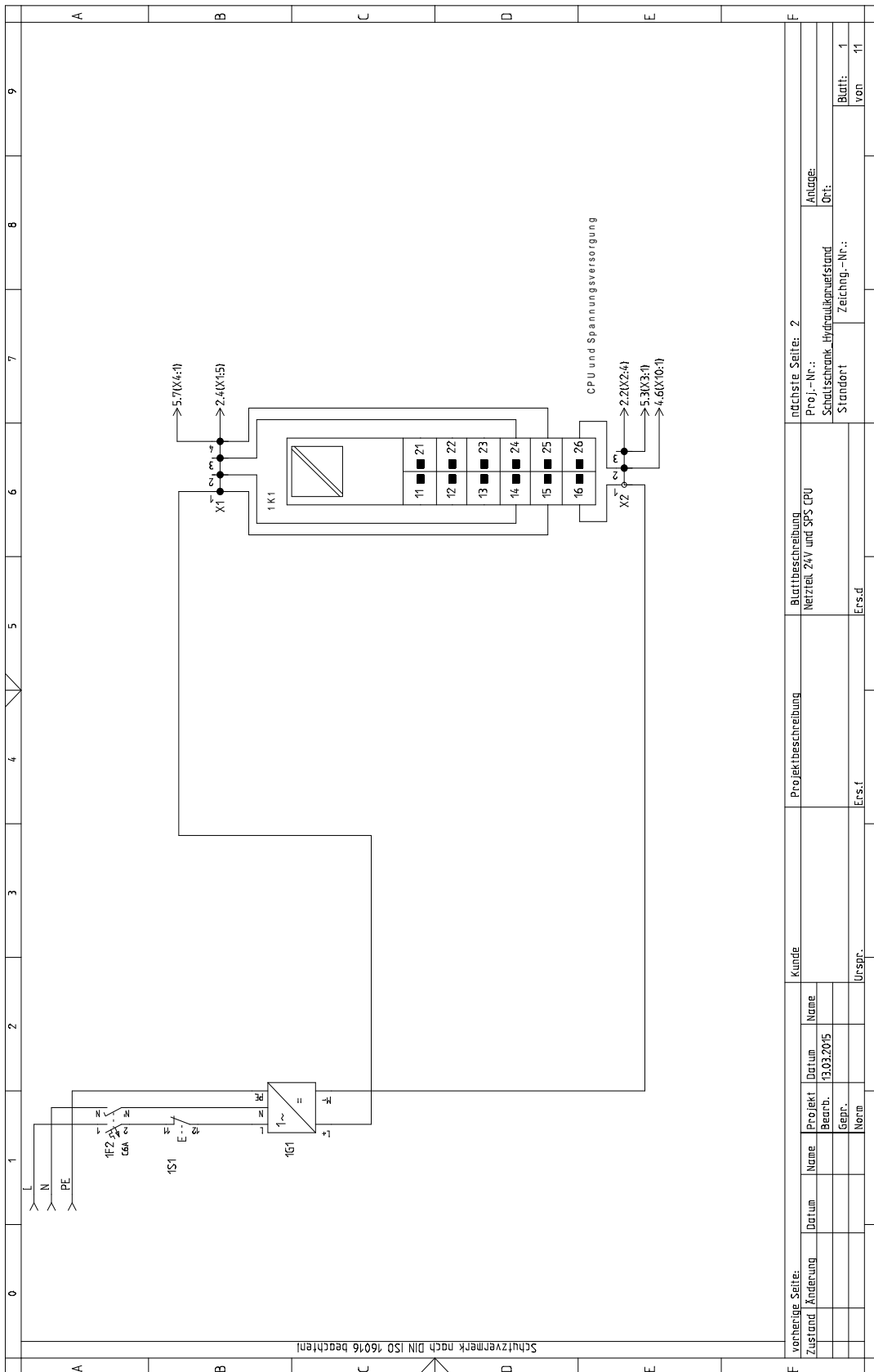


Abbildung A.1: Stromlaufplan: Netzteil 24V und SPS CPU, Quelle: Eigene Darstellung.

# A Anhang

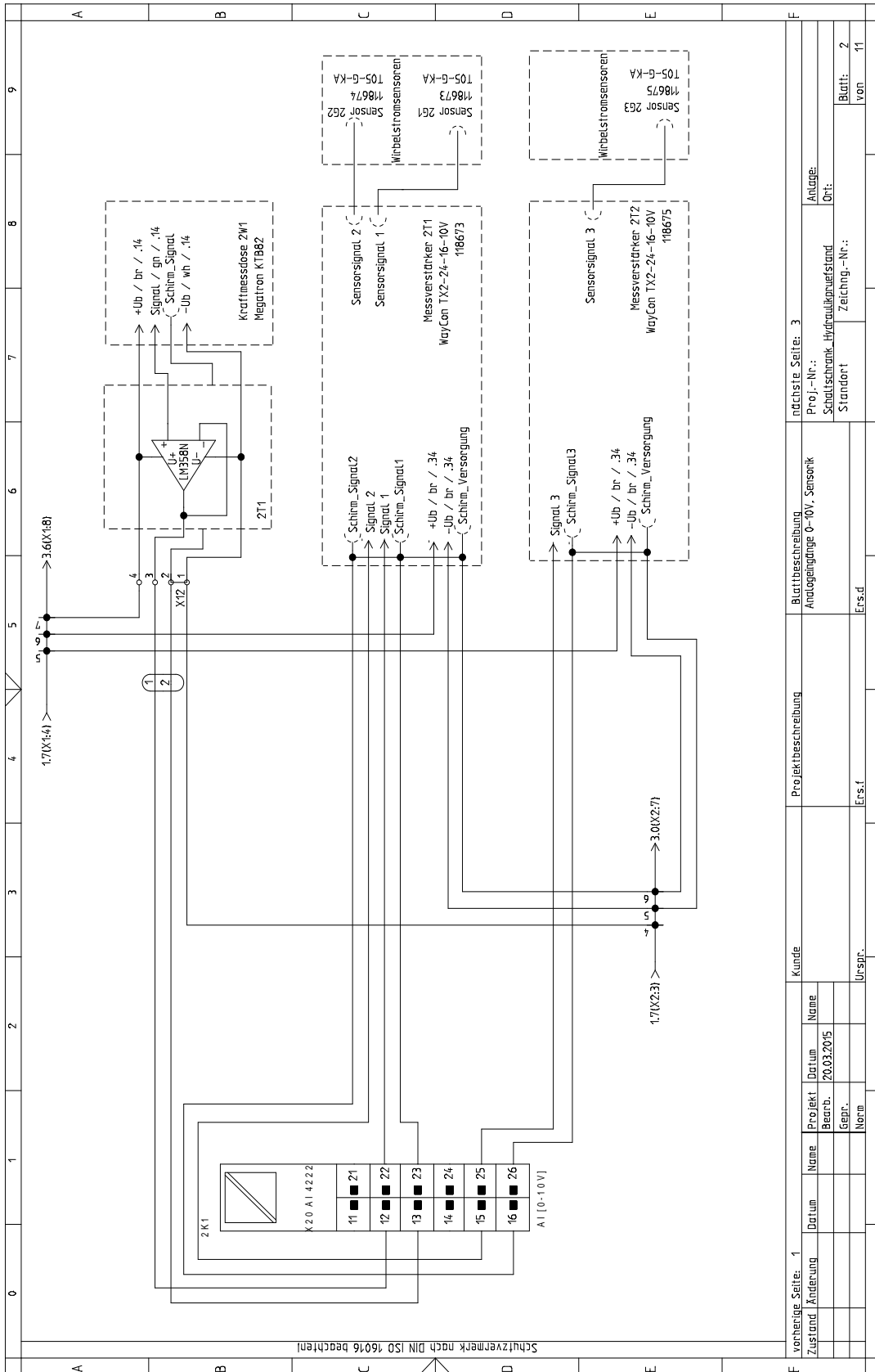
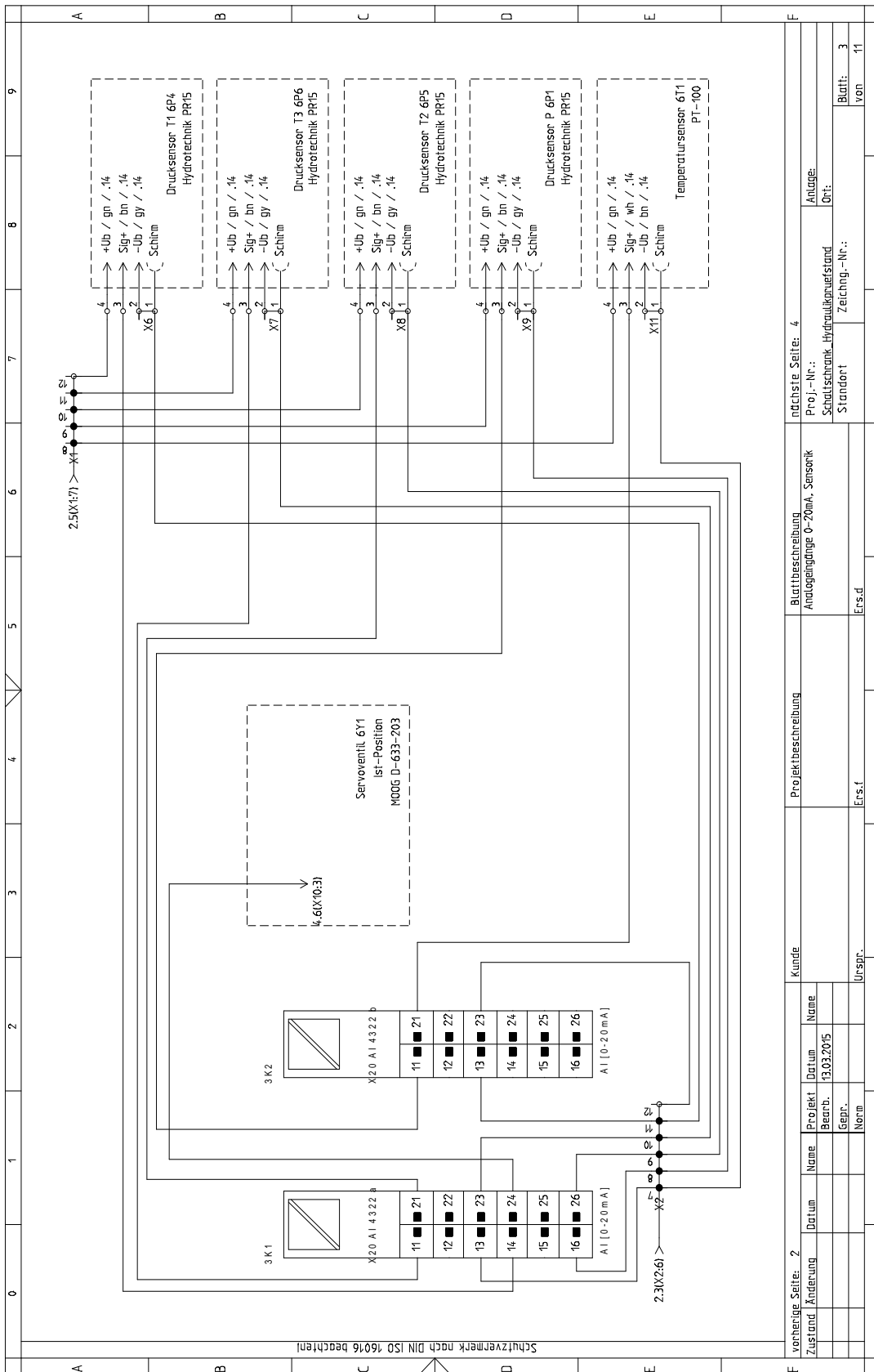


Abbildung A.2: Stromlaufplan: Analogeingänge 0 bis 10 V und Sensoren, Quelle: Eigene Darstellung.



vorherige Seite: 2	Kunde	Blattbeschreibung	Analogeingänge 0-20mA, Sensorik	nächste Seite: 4
Zustand	Projekt	Projektbeschreibung	Proj.-Nr.:	Anlage:
Änderung	Name		Schalttechnik	Hydraulikanneilstand
	Datum		Standort	Ort:
	Bearb.		Zeichnung-Nr.:	Blatt: 3
	Gepr.			von 11
	Name			
	Urspr.			
		Ers.f		
		Ers.d		

Abbildung A.3: Stromlaufplan: Analogeingänge 0 bis 20 mA und Sensoren, Quelle: Eigene Darstellung.

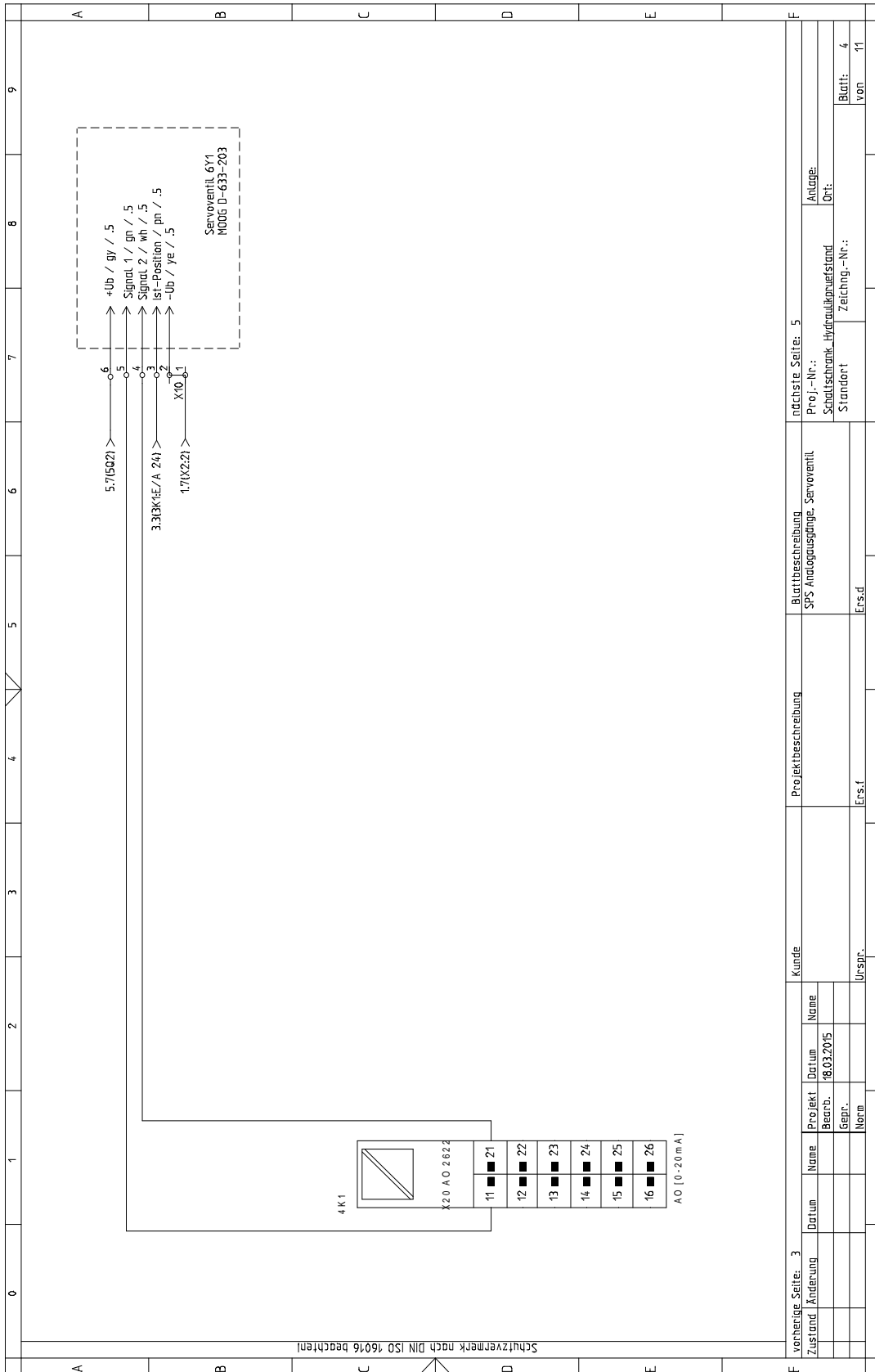


Abbildung A.4: Stromlaufplan: Analogausgänge 0 bis 20 mA und Servoventil, Quelle: Eigene Darstellung.

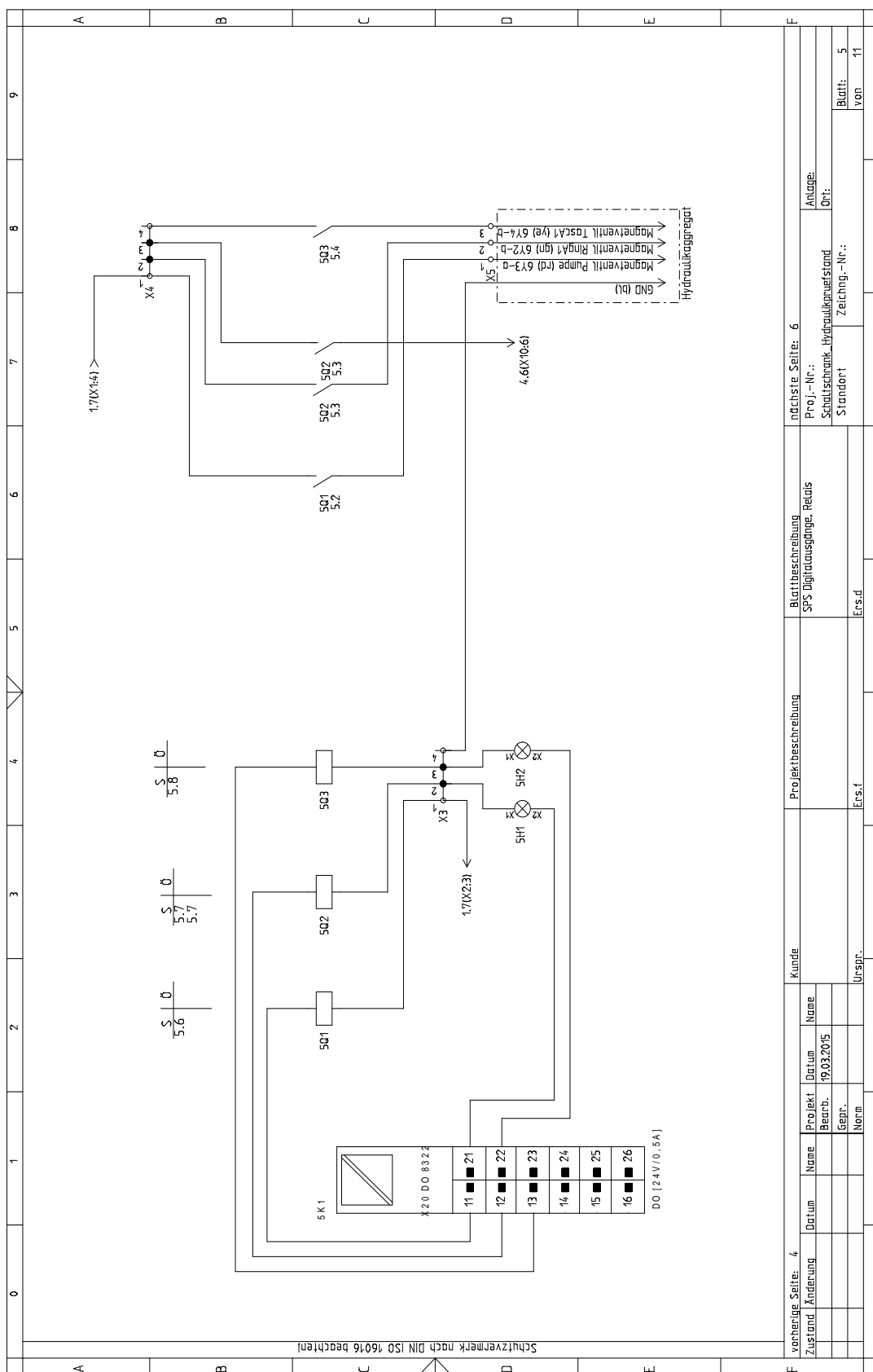


Abbildung A.5: Stromlaufplan: Digitalausgänge und Relais, Quelle: Eigene Darstellung.

## **A.2 Klemmenlisten**

Klemmenliste											
Ziel 1 (extern)	Anlage (-)	Ort (+)	Klemmennummer	Typ	Blatt / Index	Platz	Ziel 2 (intern)				
			1	668330000	1	6	1611+				
			2	668330000	1	6					
1K1E/A 24			3	668330000	1	6					
X13			4	668330000	1	6	X4:1				
X14			5	668330000	2	5					
2K1E/A 15			6	668330000	2	5					
X16			7	668330000	2	5					
X17			8	668330000	3	6					
X18			9	668330000	3	6					
X19			10	668330000	3	7					
X10			11	668330000	3	7					
X11			12	668330000	3	7					
Schutzvermerk nach DIN ISO 16016 beachten											
verhangige Seite:											
Zustand	Änderung	Datum	Name	Projekt	Datum	Name					
				Bearb.	18.07.2015						
				gepr.							
				Norm							
			Kunde		Ers.f		Ers.d				
			urspr.		3		4				
					5		6				
					7		8				
					9		10				
					11		12				
					13		14				
					15		16				
					17		18				
					19		20				
					21		22				
					23		24				
					25		26				
					27		28				
					29		30				
					31		32				
					33		34				
					35		36				
					37		38				
					39		40				
					41		42				
					43		44				
					45		46				
					47		48				
					49		50				
					51		52				
					53		54				
					55		56				
					57		58				
					59		60				
					61		62				
					63		64				
					65		66				
					67		68				
					69		70				
					71		72				
					73		74				
					75		76				
					77		78				
					79		80				
					81		82				
					83		84				
					85		86				
					87		88				
					89		90				
					91		92				
					93		94				
					95		96				
					97		98				
					99		100				
					101		102				
					103		104				
					105		106				
					107		108				
					109		110				
					111		112				
					113		114				
					115		116				
					117		118				
					119		120				
					121		122				
					123		124				
					125		126				
					127		128				
					129		130				
					131		132				
					133		134				
					135		136				
					137		138				
					139		140				
					141		142				
					143		144				
					145		146				
					147		148				
					149		150				
					151		152				
					153		154				
					155		156				
					157		158				
					159		160				
					161		162				
					163		164				
					165		166				
					167		168				
					169		170				
					171		172				
					173		174				
					175		176				
					177		178				
					179		180				
					181		182				
					183		184				
					185		186				
					187		188				
					189		190				
					191		192				
					193		194				
					195		196				
					197		198				
					199		200				
					201		202				
					203		204				
					205		206				
					207		208				
					209		210				
					211		212				
					213		214				
					215		216				
					217		218				
					219		220				
					221		222				
					223		224				
					225		226				
					227		228				
					229		230				
					231		232				
					233		234				
					235		236				
					237		238				
					239		240				
					241		242				
					243		244				
					245		246				
					247		248				
					249		250				
					251		252				
					253		254				
					255		256				
					257		258				
					259		260				
					261		262				
					263		264				
					265		266				
					267		268				
					269		270				
					271		272				
					273		274				
					275		276				
					277		278				
					279		280				
					281		282				
					283		284				
					285		286				
					287		288				
					289		290				
					291		292				
					293		294				
					295		296				
					297		298				
					299		300				
					301		302				
					303		304				
					305		306				
					307		308				
					309		310				
					311		312				
					313		314				
					315		316				
					317		318				
					319		320				
					321		322				
					323		324				
					325		326				
					327		328				
					329		330				
					331		332				
					333		334				
					335		336				
					337		338				
					339		340				
					341		342				
					343		344				
					345		346				
					347		348				
					349		350				
					351		352				
					353		354				
					355		356				
					357		358				
					359		360				
					361		362				
					363		364				
					365		366				
					367		368				
					369		370				
					371		372				
					373		374				
					375		376				
					377		378				
					379		380				
					381		382				
					383		384				
					385		386				
					387		388				
					389		390				
					391		392				
					393		394				
					395		396				
					397		398				
					399		400				
					401		402				
					403		40				

Klemmenliste											
Ziel 1 (extern)	Anlage (-)	Ort (+)	Klemmennummer	Typ	Blatt / Index	Platz	Ziel 2 (intern)				
1614K-			1	1683310000	1	6	1K1E/A 16				
X2:1			2	1683310000	1	6	1K1E/A 26				
X2:4			3	1683310000	1	6					
X2:3			4	1683310000	2	3	X2:4				
X2:4			5	1683310000	2	3	2K1E/A 22				
X2:5			6	1683310000	2	3	2K1E/A 23				
X2:6			7	1683310000	3	1	3K1E/A 13				
X2:7			8	1683310000	3	1	3K1E/A 16				
X8:1			9	1683310000	3	1	3K1E/A 26				
X2:9			10	1683310000	3	1	3K1E/A 23				
X2:10			11	1683310000	3	1	3K2E/A 13				
X2:11			12	1683310000	3	1					
Schutzvermerk nach DIN ISO 16016 beachten											
verhangige Seite: 1											
Zustand	Änderung	Datum	Name	Projekt	Datum	Name					
				Bearb.	18.07.2015						
				gepr.							
				Norm							
		Kunde		Ers.f		Ers.d		Ers.f		Ers.d	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4		5		6	
		Ers.f		3		4		5		6	
		urspr.		3		4					







Klemmenliste																																																																																															
Ziel 1 (extern)	Anlage (-)	Ort (+)	Klemmennummer	Typ	Blatt / Index	Platz	Ziel 2 (intern)																																																																																								
			1	1683310000	5	8	501																																																																																								
			2	1683310000	5	8	502																																																																																								
			3	1683310000	5	8	503																																																																																								
Schutzvermerk nach DIN ISO 16016 beachten!																																																																																															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="4">Zustand</td> <td colspan="4">Kunde</td> <td colspan="4">nächste Seite: 6</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Änderung</td> <td colspan="2">Datum</td> <td colspan="2">Name</td> <td colspan="2">Projekt</td> <td colspan="2">Name</td> <td colspan="2">Projekt-Nr.:</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">18.07.2015</td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">Bearb.</td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">Schadischromk-Hydraulikanlagenstand</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">Gepr.</td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">Standort</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">Norm</td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">Zeichn.-Nr.:</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">Urspr.</td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">Blatt: 5</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">von 9</td> </tr> </table>												Zustand				Kunde				nächste Seite: 6				Änderung		Datum		Name		Projekt		Name		Projekt-Nr.:				18.07.2015				Bearb.				Schadischromk-Hydraulikanlagenstand								Gepr.				Standort								Norm				Zeichn.-Nr.:						Urspr.						Blatt: 5												von 9	
Zustand				Kunde				nächste Seite: 6																																																																																							
Änderung		Datum		Name		Projekt		Name		Projekt-Nr.:																																																																																					
		18.07.2015				Bearb.				Schadischromk-Hydraulikanlagenstand																																																																																					
						Gepr.				Standort																																																																																					
						Norm				Zeichn.-Nr.:																																																																																					
				Urspr.						Blatt: 5																																																																																					
										von 9																																																																																					

Abbildung A.10: Klemmenliste X5, Quelle: Eigene Darstellung.



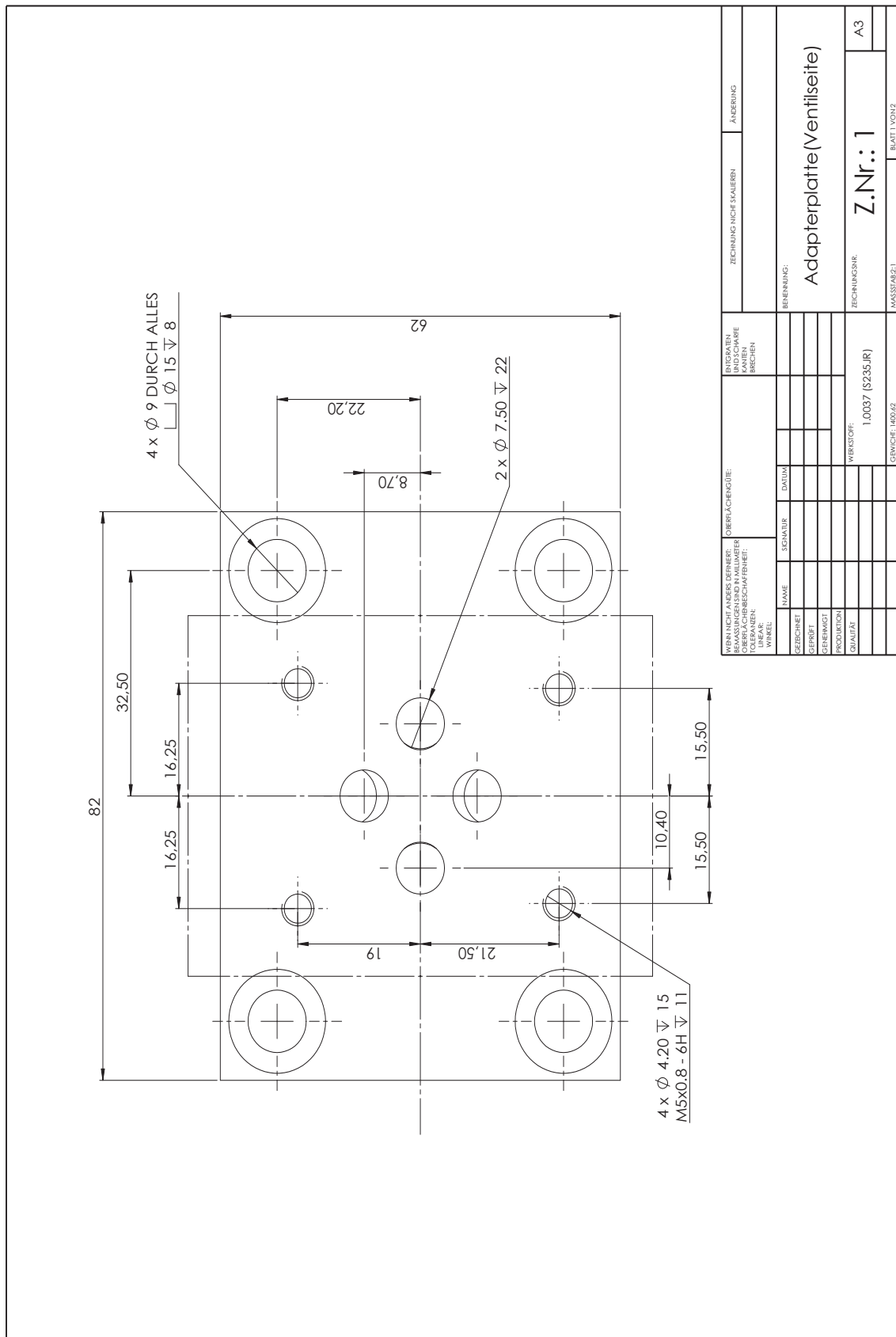






### **A.3 Werkstattzeichnungen**





WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEWÄSSERUNGSNENNUNGSMAßSTAB: LINIEARTEN: WÄHLE		OBERFLÄCHENRÄUHE: NENNUNGSMAßSTAB: WÄHLE		RITZKAVEN UND SCHWARZE BRISCHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
ZEICHNET	NAME	SKALIEREN	DATUM	BENENNUNG: Adapterplatte (Ventilseite)					
GEPRÜFT				ZEICHNUNGSNR.: Z.Nr.: 1					
GENEHMIGT				WIRKSTOFF: 1.0037 (S235JR)					
PRODUKTION				MASSSTAB: 1:1					
QUALITÄT				BLATT 1 VON 2					
				GERÄTE: 1400/42					
				A3					

Abbildung A.15: Werkstattzeichnung: Adapterplatte für Versuchsaufbau zur Druckregelung: Seite 1 von 2, Quelle: Eigene Darstellung.

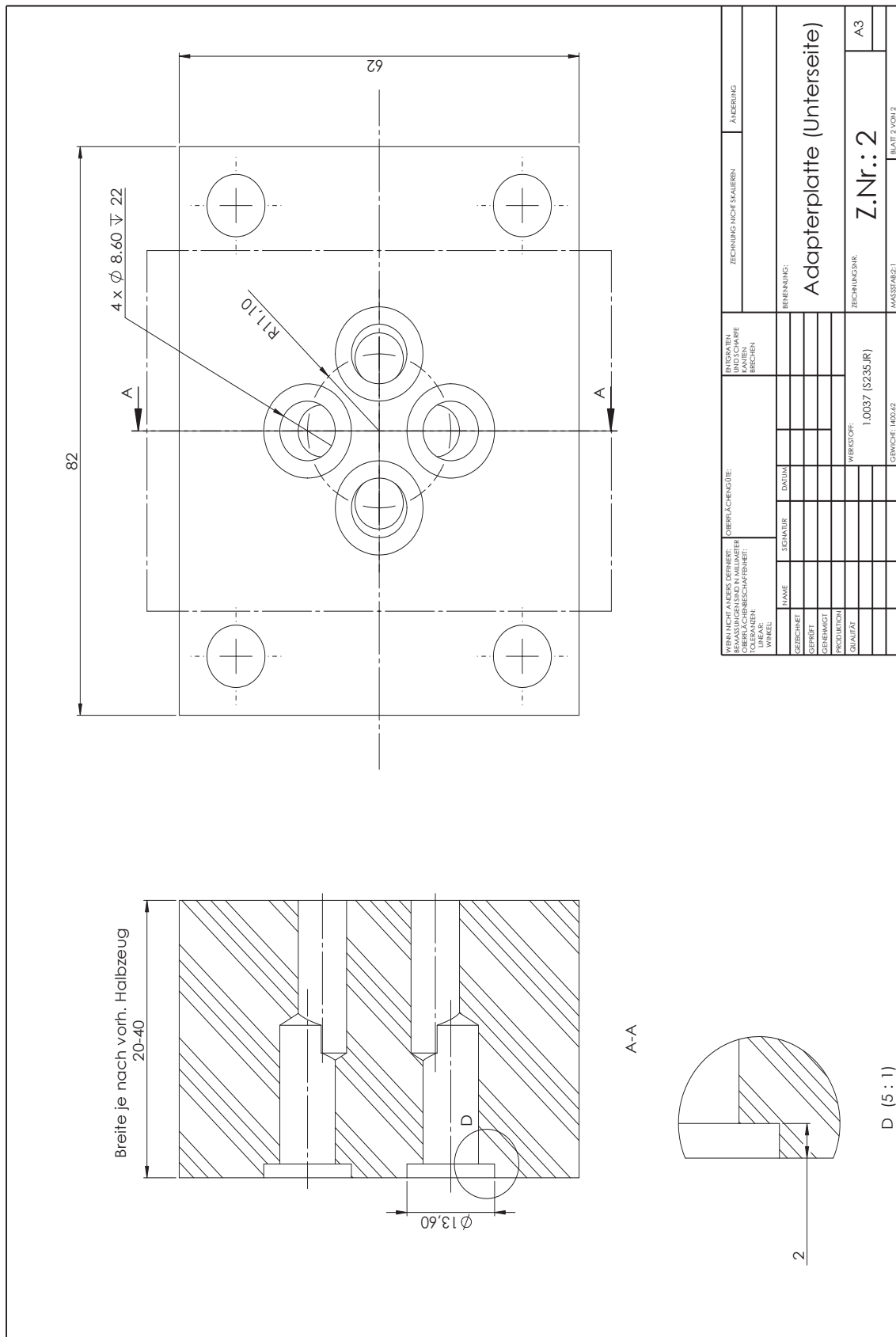
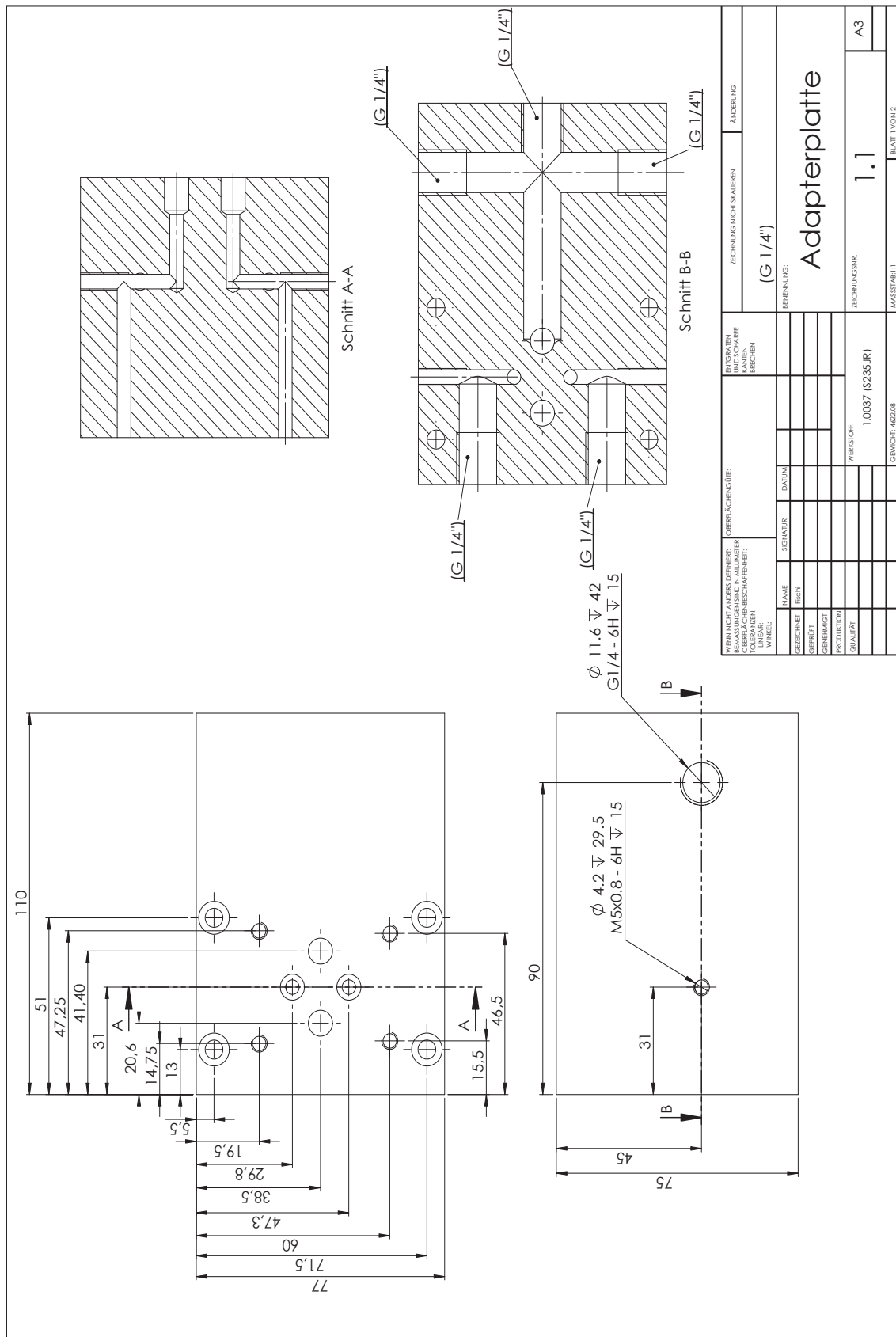
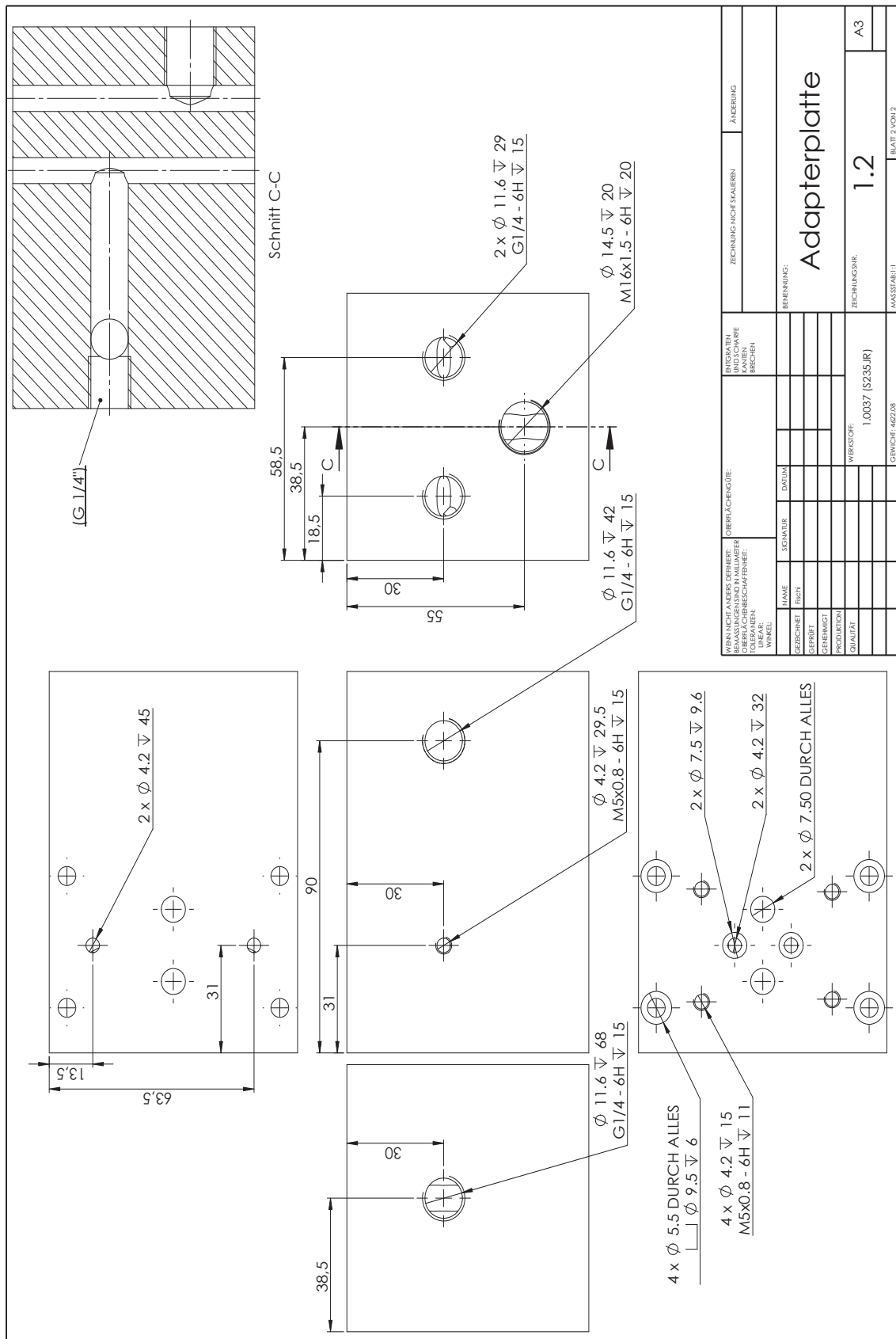


Abbildung A.16: Werkstattzeichnung: Adapterplatte für Versuchsaufbau zur Druckregelung: Seite 2 von 2, Quelle: Eigene Darstellung.



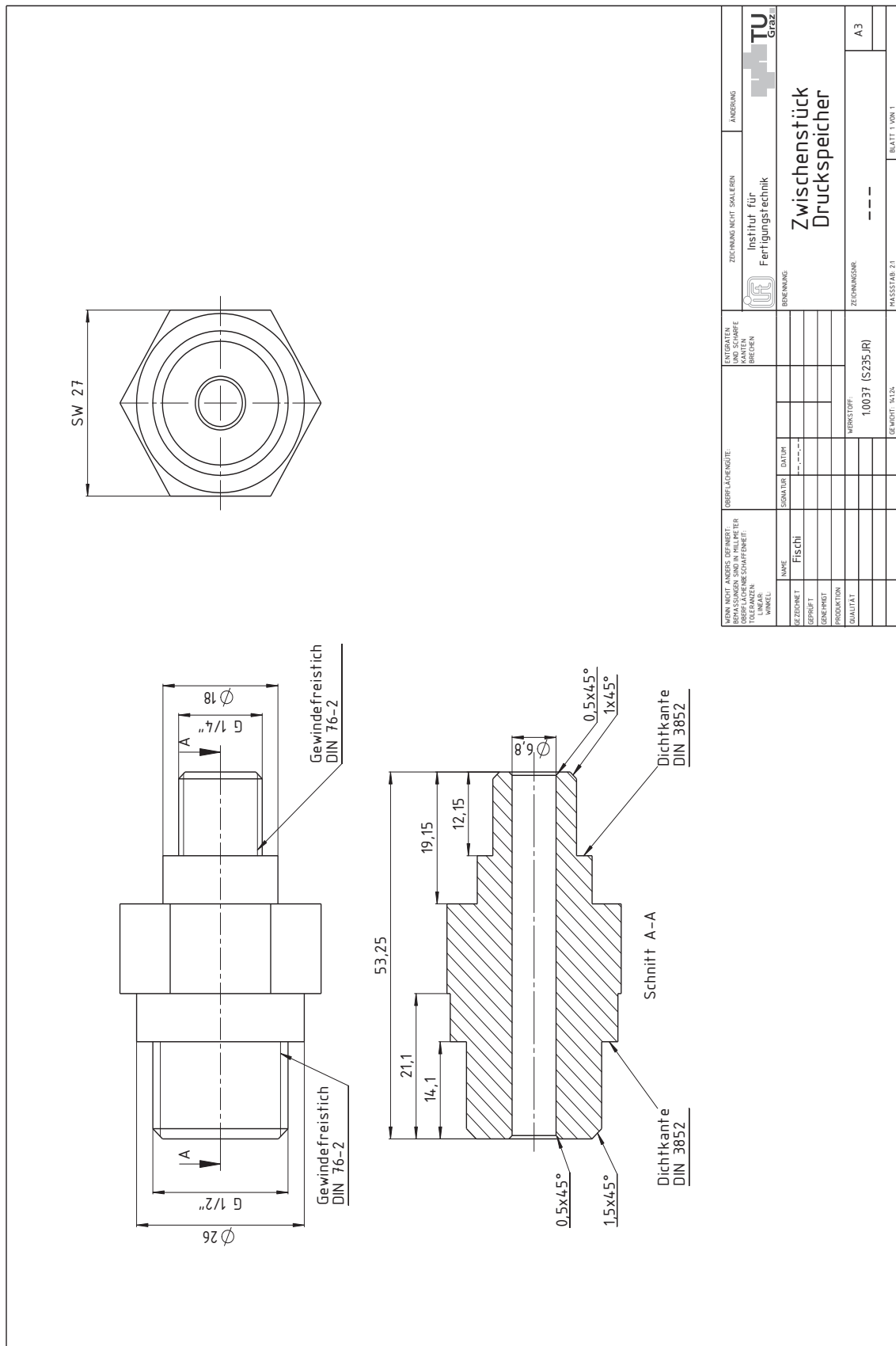
WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEWÄSSERUNGSMESSUNG IN MILLIMETER LÄNGEN: NENNUNGSWEISE LÄNGEN: NENNUNGSWEISE WINKEL: NENNUNGSWEISE		OBERFLÄCHENRÜHE: RINNSCHRAUBEN UND SCHWARZE BRISCHEN		ZEHNUNG: NICHT SKALIEREN ÄNDERUNG	
ZEICHNET	NAME	ZEICHNER	DATEI	BENENNUNG: <b>Adapterplatte</b>	
GEPRÜFT	INCH				
GENEHMIGT					
PRODUKTION					
QUALITÄT					
WIRKSTOFF: 1.0037 (S235JR)				ZEHNUNGSNR: <b>1.1</b>	
GERÄT: 4622/08				MASSSTAB: 1:1	
				BLATT: 1 VON 2	
				A3	

Abbildung A.17: Werkstattzeichnung: Adapterplatte: Seite 1 von 2, Quelle: Eigene Darstellung.



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEWÄSSERUNGSMESSUNGEN IN MILLIMETER LÄNGENMESSUNGEN IN MILLIMETER WINKELMESSUNGEN IN GRADEN LÄNGENMESSUNGEN IN MILLIMETER LÄNGENMESSUNGEN IN MILLIMETER LÄNGENMESSUNGEN IN MILLIMETER LÄNGENMESSUNGEN IN MILLIMETER LÄNGENMESSUNGEN IN MILLIMETER		OBERFLÄCHENRÜHE: RINNSCHRAUBEN UND SCHRAUBEN BRISCHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN ÄNDERUNG	
NAMEN	ZEICHNER	DATEI	BEZEICHNUNG:		
GEZEICHNET	GEZEICHNET	GEZEICHNET	Adapterplatte		
GEPRÜFT	GEPRÜFT	GEPRÜFT	ZEICHNUNGSNR.: 1.2		
GEHEBEN	GEHEBEN	GEHEBEN	MASSSTAB: 1:1		
PRODUKTION	PRODUKTION	PRODUKTION	WIRKSTOFF: 1.0037 (S235JR)		
QUALITÄT	QUALITÄT	QUALITÄT	GERÄTE: 4622/08		
			BLATT: 2 VON 2		

Abbildung A.18: Werkstattzeichnung: Adapterplatte: Seite 2 von 2, Quelle: Eigene Darstellung.



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT GEBRAUCHTEN SIND IN MILLIMETER ANGABEN ANZUSETZEN. SCHWÄRZE: TOLERANZEN: LÄNGE: WINKEL:		BEREICHENUNGSNUMMERN		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BREITEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ANSICHT	
NAME	FSchi	SERIALNR.	DATUM			INSTITUT FÜR FERTIGUNGSTECHNIK		TU Graz	
BEZEICHNUNG						BEREICHENUNGSNUMMERN		Zwischenstück Druckspeicher	
GEPRÜFT						ZEICHNUNGSNR.		A3	
GENEHIGT						WERKSTOFF:		---	
PRODUKTION						10037 (S235JR)			
QUALITÄT						GEWICHT: 1,124		BLATT 1 VON 1	
						MASSSTAB: 2:1			

Abbildung A.19: Werkstattzeichnung: Zwischenstück für Druckspeicher: Seite 1 von 1, Quelle: Eigene Darstellung.

## A.4 Software

### A.4.1 Datenmanagement

Tabelle A.1: Namensschema der Ein- und Ausgänge, Quelle: Seitz (2012), S. 48 (leicht modifiziert).

Kennzeichnung der E/A-Adressierung	Ein-/Ausgang	Variablentyp	Steckplatz	E/A-Kanal
AT	%I Eingang	X Bit	1 2K1	.1 1 ... .. .8 8
	%Q Ausgang	B Byte, 8 bit	2 3K1	
		W Word, 16 bit	3 3K2	
		D Doubleword, 32 bit	4 4K1	
			5 5K1	

Tabelle A.2: Bezeichnung der Ein- und Ausgänge, Quelle: Eigene Darstellung.

	Element	E/A-Kanal	Variablenname
Sensorik	2W1 Kraftmessdose	AT%IW1.1	Sensor[1].Data.INT_SensVal
	2G2 Wirbelstromsensor T1	AT%IW1.2	Sensor[2].Data.INT_SensVal
	2G1 Wirbelstromsensor T2	AT%IW1.3	Sensor[3].Data.INT_SensVal
	2G3 Wirbelstromsensor T3	AT%IW1.4	Sensor[4].Data.INT_SensVal
	6P4 Drucksensor T3	AT%IW2.1	Sensor[5].Data.INT_SensVal
	6P5 Drucksensor T2	AT%IW2.2	Sensor[6].Data.INT_SensVal
	6P6 Drucksensor T1	AT%IW2.3	Sensor[7].Data.INT_SensVal
	6Y1 Servoventil	AT%IW2.4	Sensor[8].Data.INT_SensVal
	6P1 Drucksensor	AT%IW3.1	Sensor[9].Data.INT_SensVal
	6T1 Temperatursensor	AT%IW3.2	Sensor[10].Data.INT_SensVal
	[frei]	AT%IW3.3	Sensor[11].Data.INT_SensVal
	[frei]	AT%IW3.4	Sensor[12].Data.INT_SensVal
Aktorik	6Y1 Servoventil	AT%QW4.1	Analog_Aktor[1].Data.INT_ActVal
	6Y1 Servoventil	AT%QW4.2	Analog_Aktor[2].Data.INT_ActVal
	6Y3 Magnetventil	AT%QX5.1	Digital_Aktor[1].Data.BOOL_ActVal
	5H1 Signalleuchte rot	AT%QX5.2	Digital_Aktor[2].Data.BOOL_ActVal
	6Y2 Magnetventil	AT%QX5.3	Digital_Aktor[3].Data.BOOL_ActVal
	5H2 Signalleuchte grün	AT%QX5.4	Digital_Aktor[4].Data.BOOL_ActVal
	6Y4 Magnetventil	AT%QX5.5	Digital_Aktor[5].Data.BOOL_ActVal
	[frei]	AT%QX5.6	Digital_Aktor[6].Data.BOOL_ActVal
	[frei]	AT%QX5.7	Digital_Aktor[7].Data.BOOL_ActVal
	[frei]	AT%QX5.8	Digital_Aktor[8].Data.BOOL_ActVal

### A.4.2 Programme

Tabelle A.3: Programmübersicht - Zykluszeit: 0.4 ms, Quelle: Eigene Darstellung.

ID	Programmname	Programmfunktion
01	SensorWerteFiltern.st	Erstellung tiefpassgefilterter Sensormomentanwerte
02	BegrenzeVentilstellung.st	Begrenzung der Ventilstellung
03	INIT_Sensor.st	Initialisierungsroutine der Sensoreigenschaften
04	INIT_Aktor.st	Initialisierungsroutine der Aktoreigenschaften
05	Durchf_UI.st	Programmablauf und Benutzereingabe zur Prüfstandsmessung
06	Sprung_UI.st	Programmablauf und Benutzereingabe zur Sprungantwortaufzeichnung
07	Frequenzgang_UI.st	Programmablauf und Benutzereingabe zur Frequenzgangaufzeichnung
08	Zeitverh_UI.st	Programmablauf und Benutzereingabe zur Aufzeichnung des Zeitverhaltens
09	UeberpruefePumpendruck.st	Überprüfung auf ausreichenden Pumpendruck
10	WriteToFile_Messung.st	Schreiben des Messprotokolls zur Prüfstandsmessung
11	WriteToFile_Aufzeichnung.st	Schreiben des Messprotokolls zum Zeitverhalten der Kraftregelung

Tabelle A.4: Programmübersicht - Zykluszeit: 2 ms, Quelle: Eigene Darstellung.

ID	Programmname	Programmfunktion
01	WriteToFile_Frequenzgang.st	Schreiben des Messprotokolls zum Frequenzverhaltens der Kraftregelung
02	WriteToFile_Sprung.st	Schreiben des Messprotokolls zur Sprungantwort der Kraftregelung

Tabelle A.5: Programmübersicht - Zykluszeit: 10 ms, Quelle: Eigene Darstellung.

ID	Programmname	Programmfunktion
01	Zylinder_initialisieren.st	Initialisierung des Hydraulikzylinders
02	Sensoren_initialisieren.st	Initialisierung der Sensoren
03	Taschenscheibeninformation_UI.st	Darstellung von Informationen der Sensoren in der Taschenscheibe

Tabelle A.6: Programmübersicht - Zykluszeit: 100 ms, Quelle: Eigene Darstellung.

ID	Programmname	Programmfunktion
01	Ventiltest_Steuerung.st	Benutzereingaben zur direkten Ansteuerung des Ventils
02	INIT_MOOG.st	Initialisierungsroutine der Ventileigenschaften
03	Aufwaermphase_UI.st	Programmablauf und Benutzereingabe zur Aufzeichnung der Warmlaufphase
04	WriteToFile_Aufwaermphase.st	Schreiben des Messprotokolls zur Warmlaufphase



Tabelle A.7: Programmübersicht - Zykluszeit: 500 ms, Quelle: Eigene Darstellung.

ID	Programmname	Programmfunktion
01	CYCL_Sensor.st	Benutzereingaben der Sensoreigenschaften
02	Sprung_reset.st	Zurücksetzen der Variablen für Sprungantwort der Kraftregelung
03	Frequenzgang_reset.st	Zurücksetzen der Variablen für Frequenzverhalten der Kraftregelung
04	Lastkollektiv_definieren.st	Programmablauf und Benutzereingabe zur Lastkollektivdefinition
05	Hydr_Aggr_Bedienen.st	Programmablauf und Benutzereingabe zur Bedienung des Hydraulikaggregats

## **A.5 Simulationsmodell**

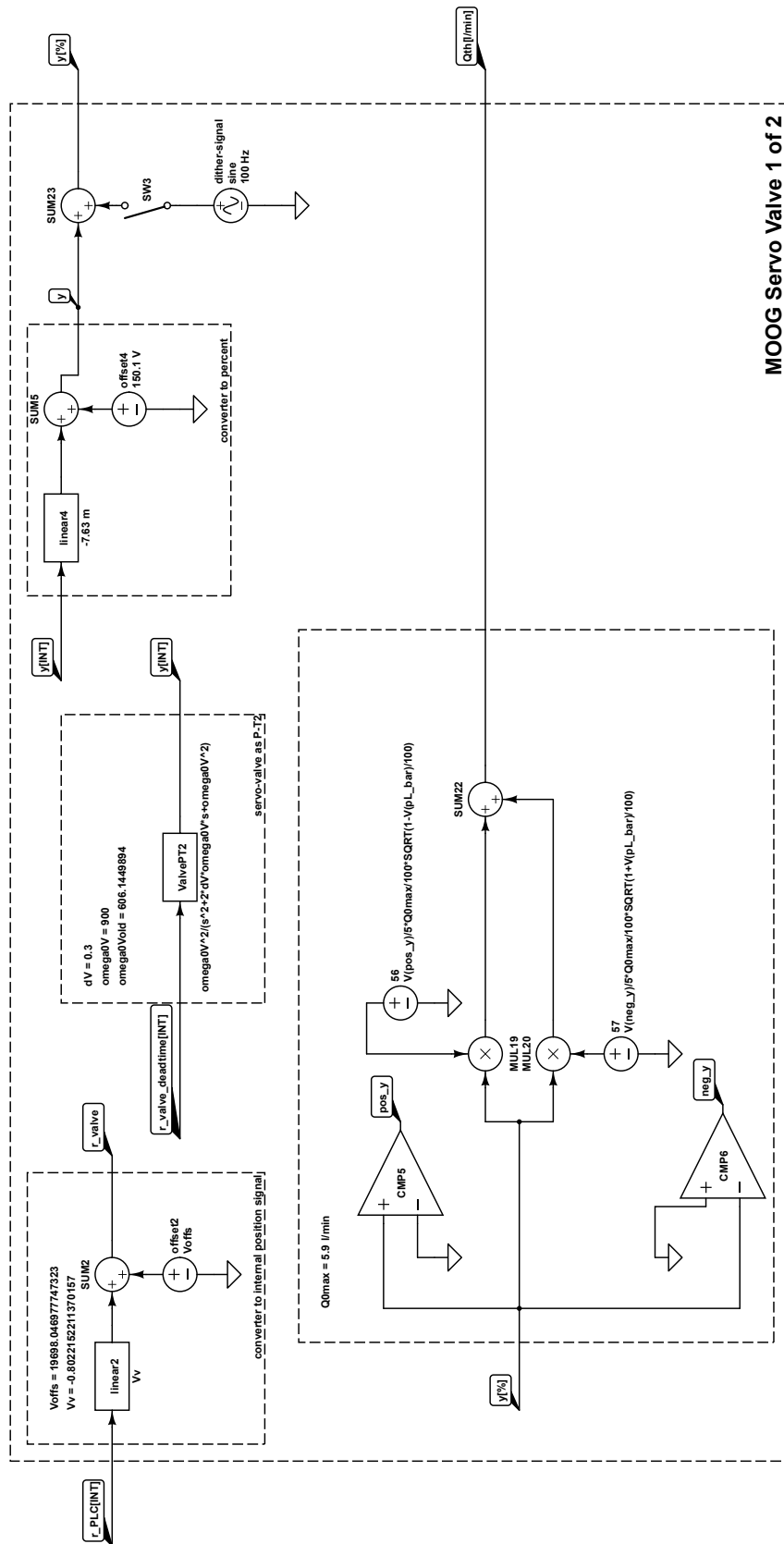
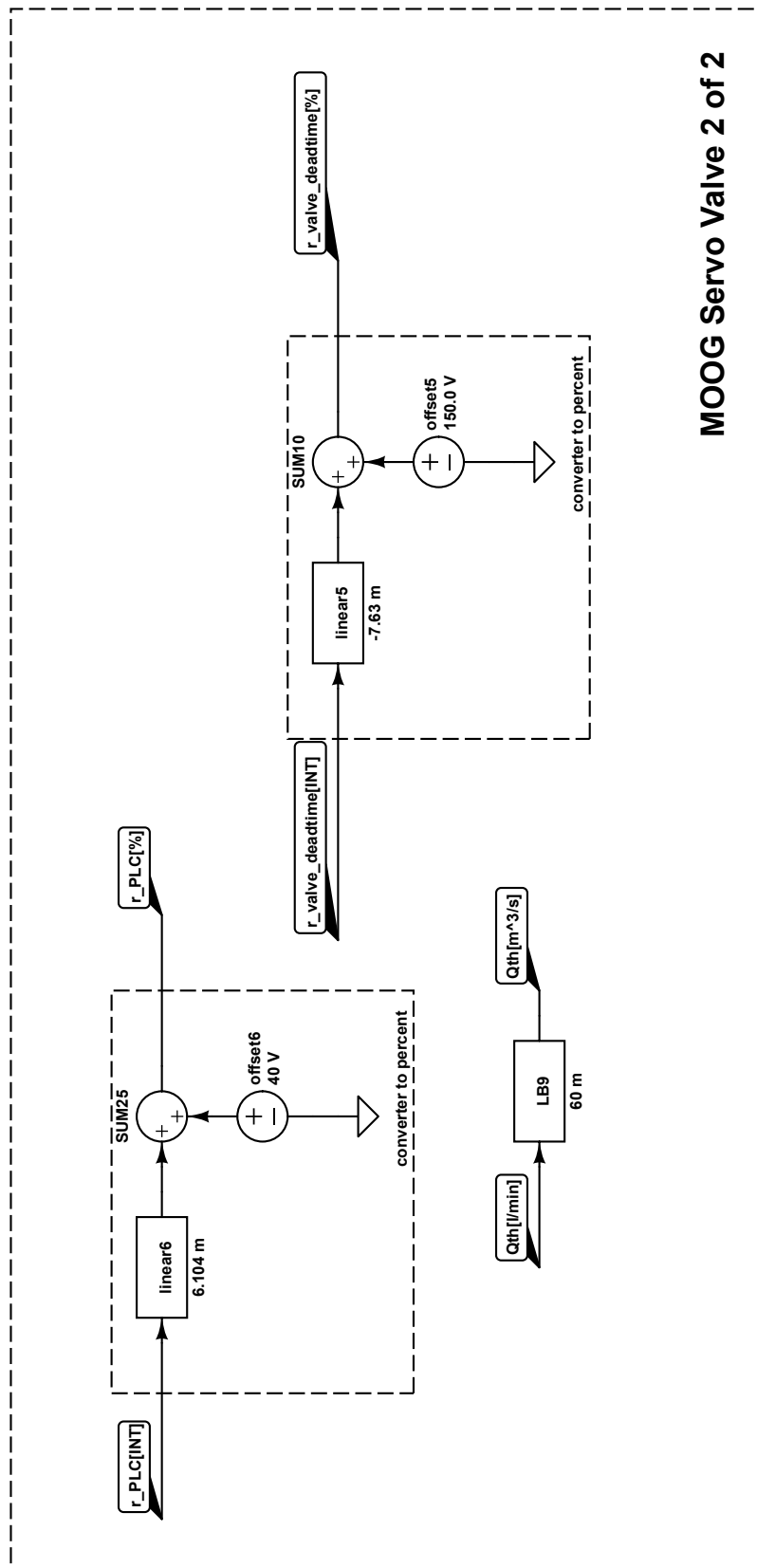


Abbildung A.20: Simulationsmodell: Servoventil Teil 1 von 2, Quelle: Eigene Darstellung.



**MOOG Servo Valve 2 of 2**

Abbildung A.21: Simulationsmodell: Servoventil Teil 2 von 2, Quelle: Eigene Darstellung.

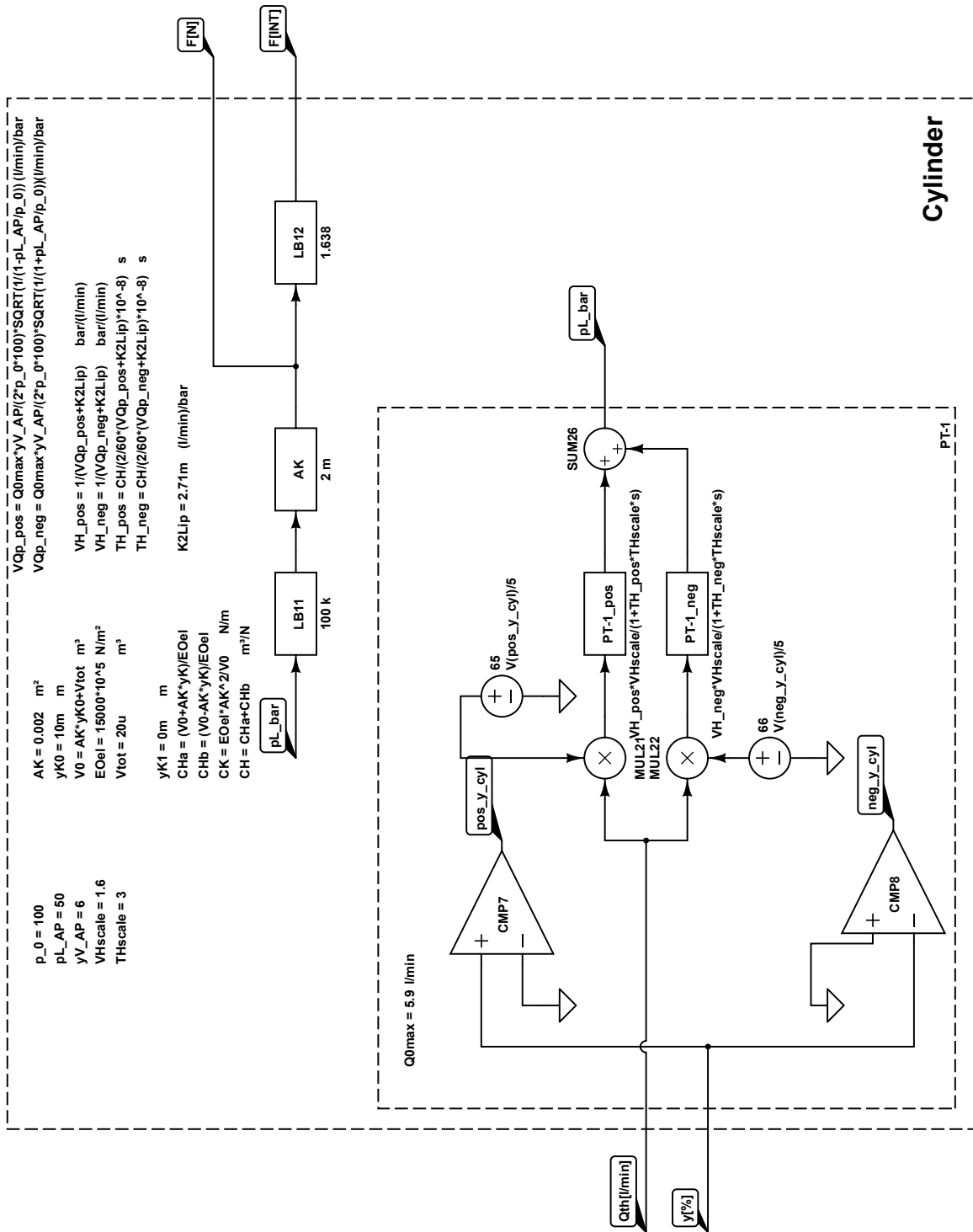


Abbildung A.22: Simulationsmodell: Zylinder Teil 1 von 1, Quelle: Eigene Darstellung.

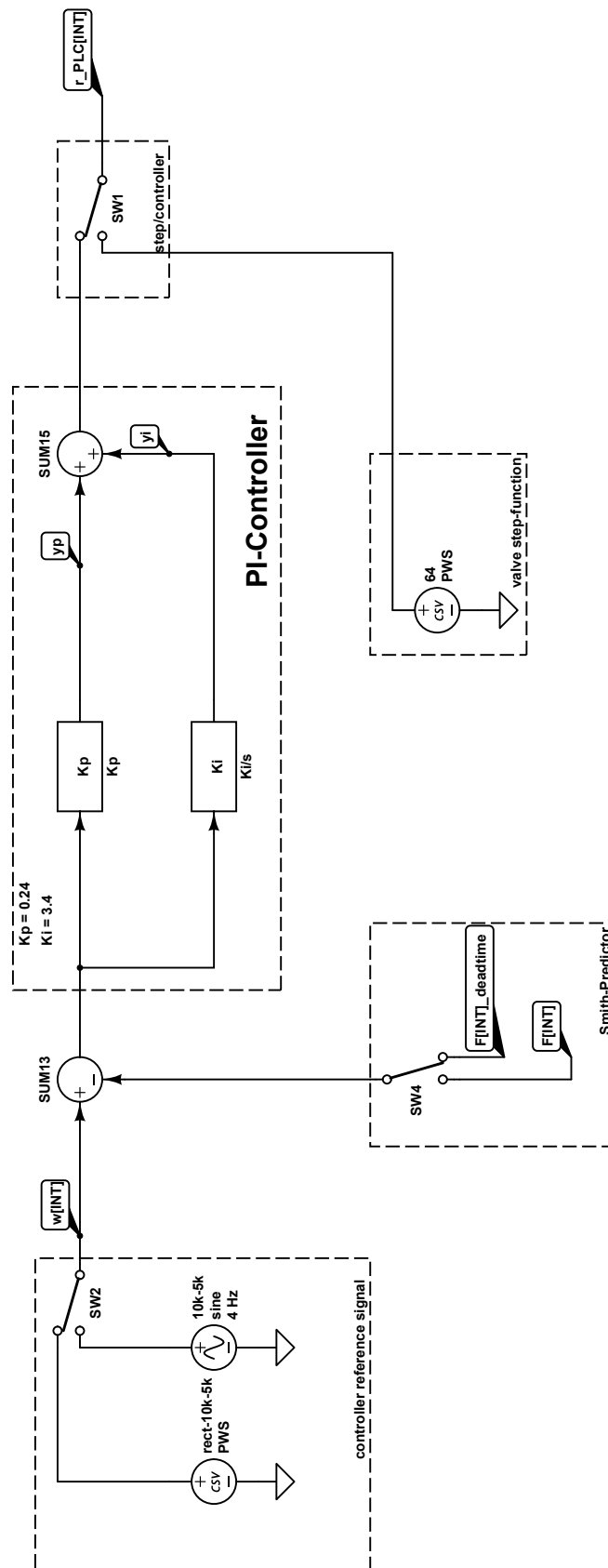


Abbildung A.23: Simulationsmodell: PI-Regler Teil 1 von 1, Quelle: Eigene Darstellung.

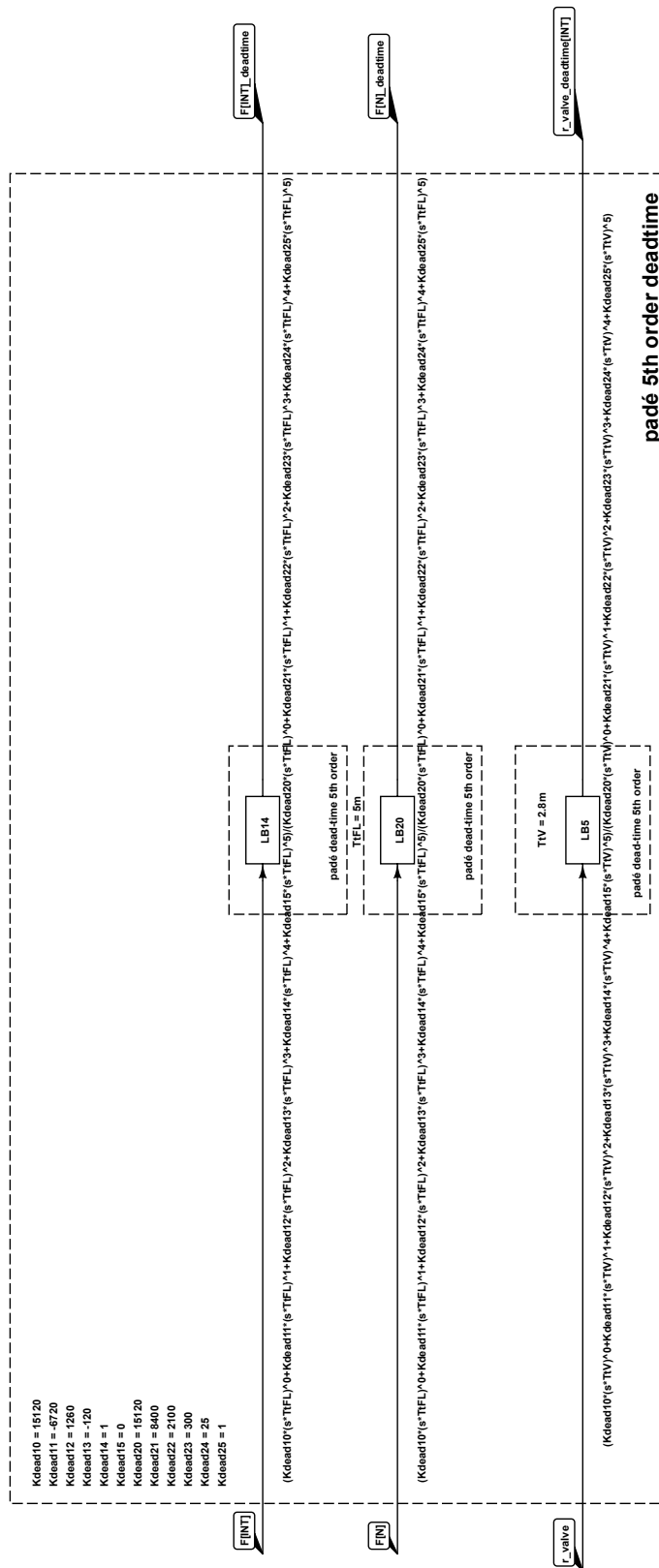


Abbildung A.24: Simulationsmodell: Totzeitmodelle Teil 1 von 1, Quelle: Eigene Darstellung.

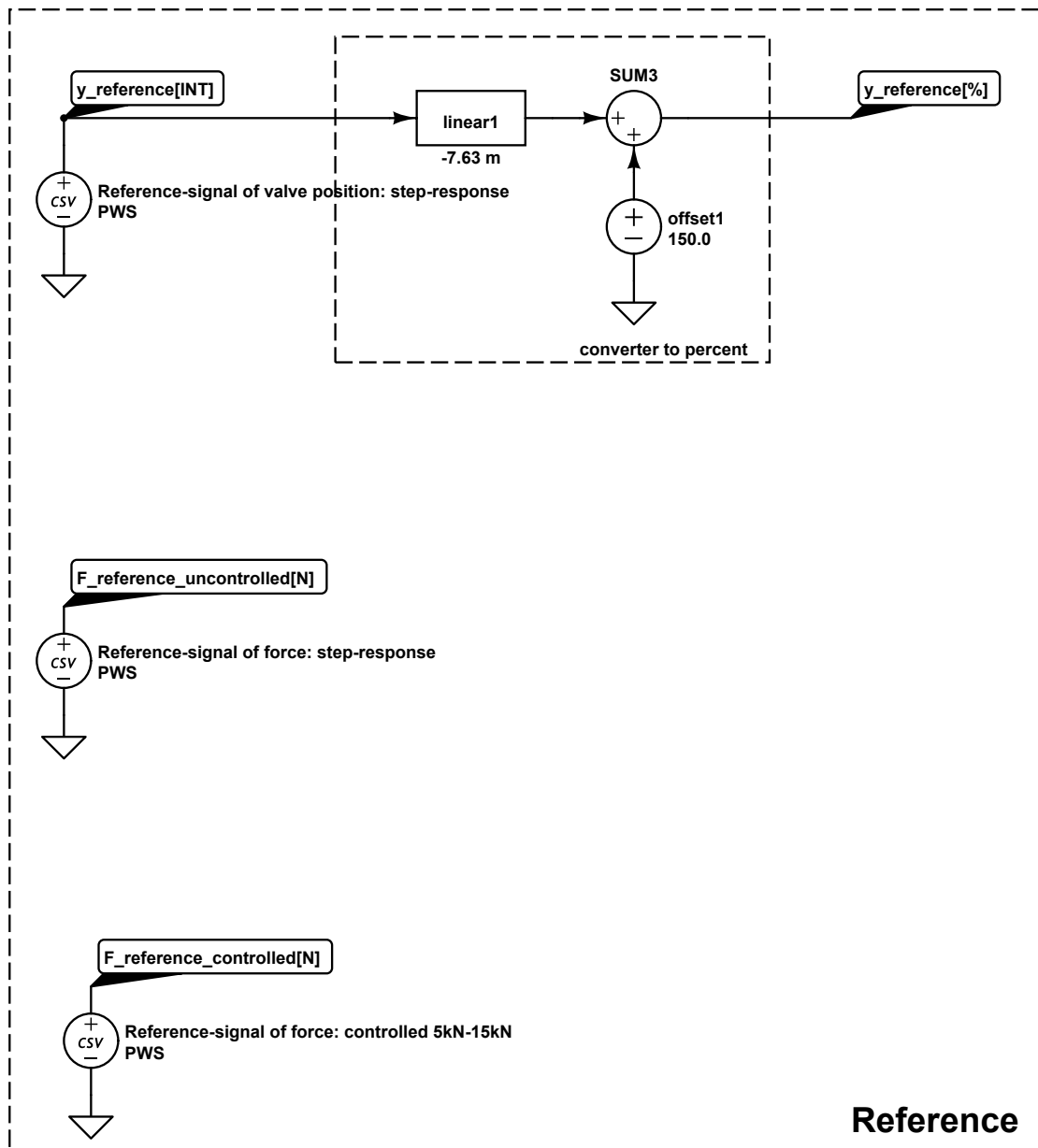


Abbildung A.25: Simulationsmodell: Referenzsignale Teil 1 von 1, Quelle: Eigene Darstellung.



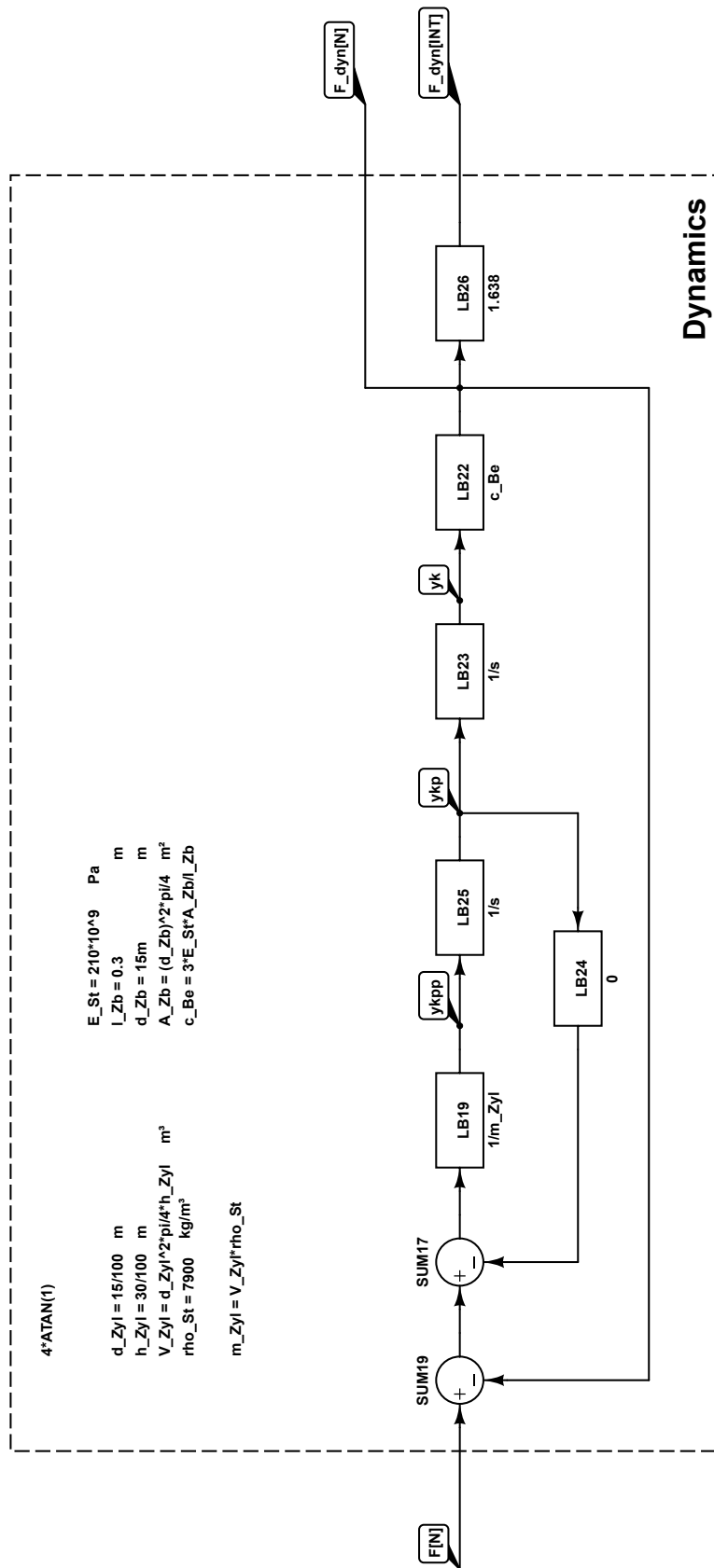


Abbildung A.26: Simulationsmodell der Lastdynamik Teil 1 von 1, Quelle: Eigene Darstellung.

## **A.6 Kalibrationsprotokolle**

# MESSPROTOKOLL

## Serie KTB82



<b>Kraftaufnehmer-Typ</b>	:	<b>KTB82 K 20KN 2410 D</b>
Serien-Nr.	:	07120463
Messbereich	:	20kN
Belastungsart	:	Druck
Versorgungsspannung	:	24V
Ausgangssignal	:	0...10V
Kabel-/Steckerbelegung	:	( $\omega$ ) br = Vers.+ / ws = Vers.- gn = Ausg.+ / ge = Tx.- gr = Rx. / rsl = GW1 bl = GW2 / rt = Tara Schirm auf Gehäuse

### TECHNISCHE DATEN:

#### Grenzwerte des Aufnehmers

Grenzlast / Bruchlast	:	150 % F.S. / 200 % F.S.
Nenn-/Gebrauchs-Temperatur	:	-10...40 °C / -20...60 °C

#### Kennwerte des Aufnehmers

Nichtlinearität	:	0,08 % F.S.
Hysterese	:	0,08 % F.S.
max. Kennlinienabweichung	:	0,2 % F.S.
Temperaturkoeffizient (Offset / Kennwert)	:	0,05 % F.S./10K / 0,05 % F.S./10K
Ein-/Ausgangswiderstand	:	--- / --- Ohm

### MESSWERTE:

Offset	:	0,023 V
Nennsignal	:	10,007 V
Ausgangsspanne	:	9,984 V
Nichtlinearität	:	<0,04

Messung mit Referenzsensoren in einer Messkette. Die Messergebnisse beziehen sich auf den Einbauzustand des Sensors unter den Umgebungsbedingungen, Temperatur 21 °C  $\pm$  2°C, rel.Feuchte 65 %  $\pm$  5% und Luftdruck 948 hPa  $\pm$  50 hPa.

Putzbrunn, den: 14.02.2012

Prüfer / -in : Schmidt

Megatron Industriesensoren \* Geschäftsbereich der Megatron Elektronik AG & Co.  
Hermann-Oberth-Str. 7 \* 85640 Putzbrunn / München \* Germany  
Tel. : 089/46094-0 \* Fax. 089/46094-101  
www.megatron.de

Abbildung A.27: Kalibrationsprotokoll: 2W1 Megatron KTB82, Quelle: Megatron.

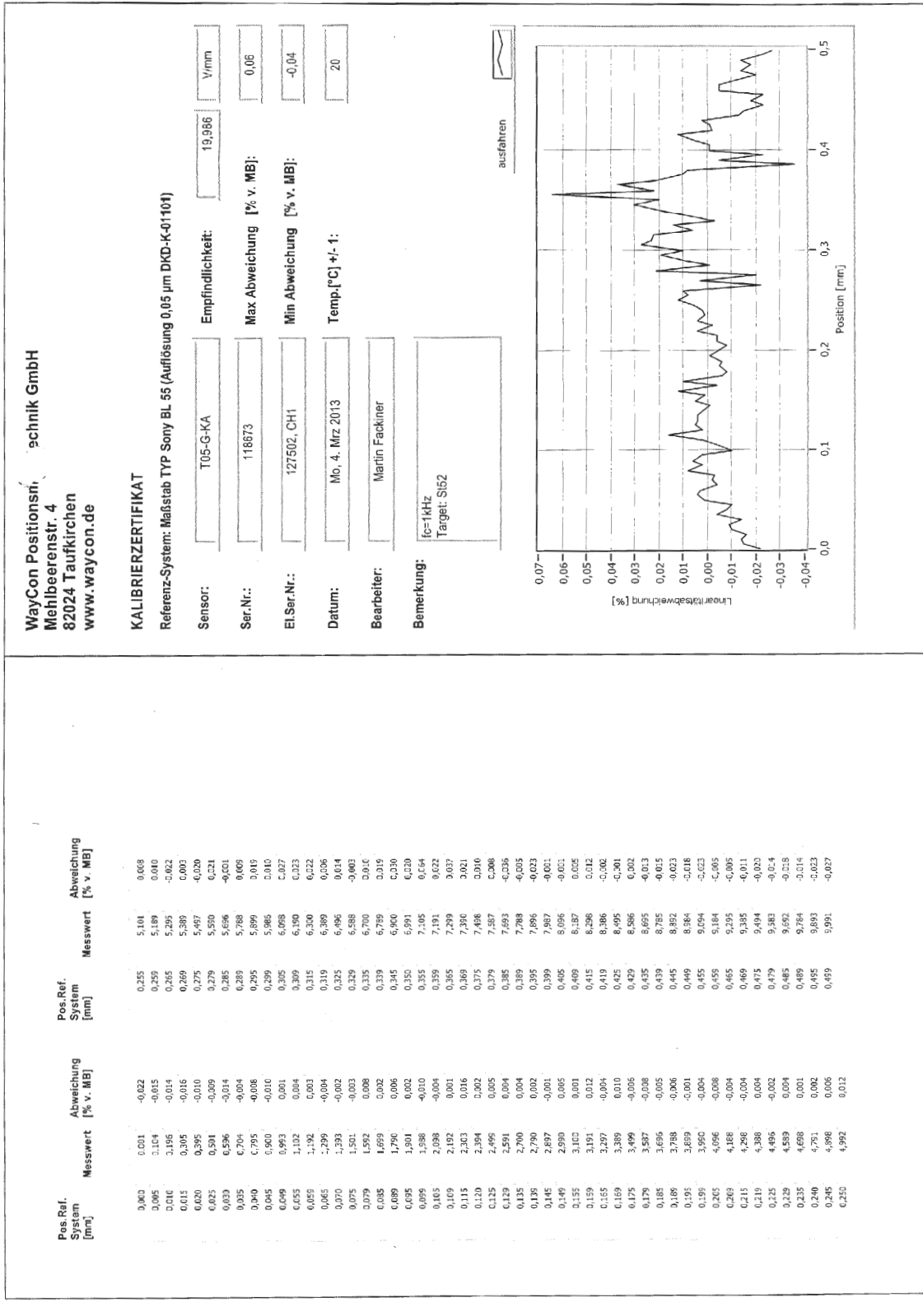


Abbildung A.28: Kalibrationsprotokoll: 2G1 118673, Quelle: WayCon.

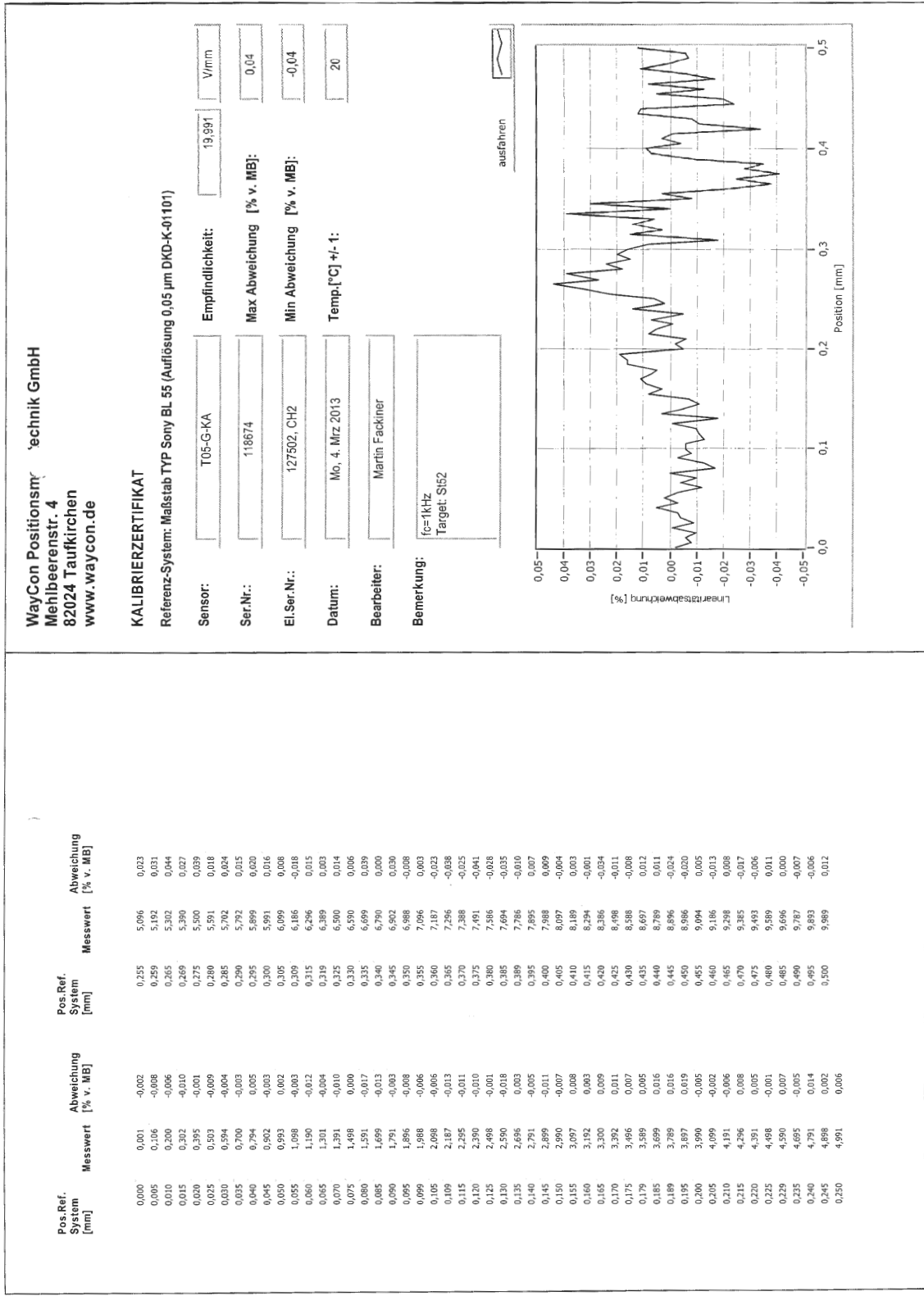


Abbildung A.29: Kalibrationsprotokoll: 2G2 118674, Quelle: WayCon.

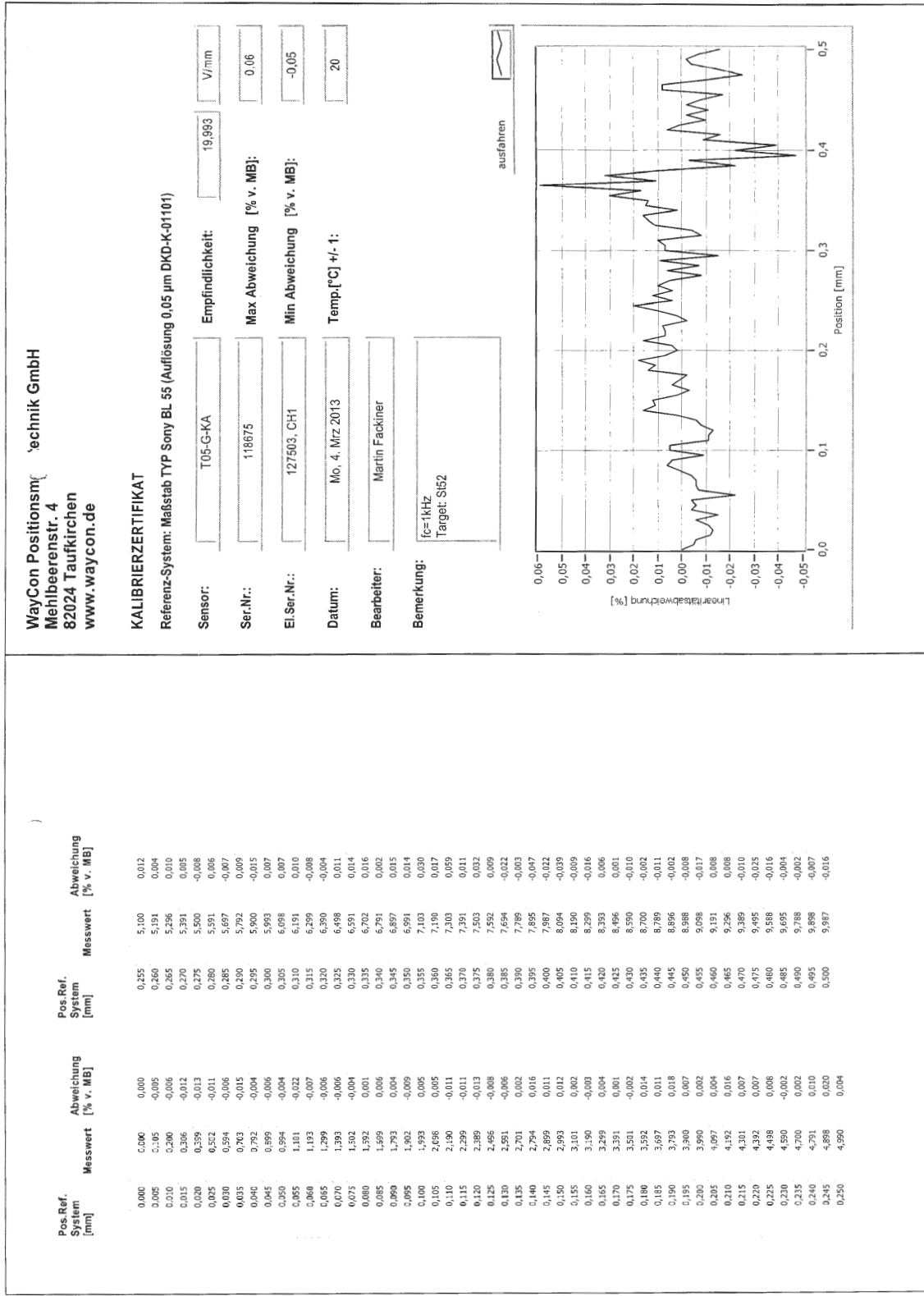


Abbildung A.30: Kalibrationsprotokoll: 2G3 118675, Quelle: WayCon.