



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorthesis

Robin Grotkasten

Optimierung und Inbetriebnahme eines
automatisierten Prüfstandes zur
Kapazitätsmessung von Ölausgleichsgefäßen

Robin Grotkasten

Optimierung und Inbetriebnahme eines
automatisierten Prüfstandes zur
Kapazitätsmessung von Ölausgleichsgefäßen

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Informations- und Elektrotechnik
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr. Björn Ingo Lange
Zweitgutachter : Dipl.-Ing. Markus Clos-Averes

Abgegeben am 4. Februar 2018

Robin Grotkasten

Thema der Bachelorthesis

Optimierung und Inbetriebnahme eines automatisierten Prüfstandes zur Kapazitätsmessung von Ölausgleichsgefäßen

Stichworte

Automatisierung, Prüfstand, Ölausgleichsgefäße, SPS

Kurzzusammenfassung

Ein vorhandener Prüfstand für Ölausgleichsgefäße soll in Bezug auf Zuverlässigkeit, Präzision und unter Sicherheitsaspekten optimiert werden. Hierfür wird im Rahmen dieser Bachelorarbeit systematisch ein neues Steuerprogramm entwickelt und getestet, sowie notwendige Umbauten am Schaltschrank und Rohrsystem sowie Sensoren und Aktoren durchgeführt. Die Kommunikation mit einer neuen Ölaufbereitungsanlage und die automatisierte Bewertung der Messdaten sind ebenso Bestandteil der Arbeit. Ziel ist die Übergabe eines Prüfstandes, der täglich im Hamburger Stromnetz für Messungen zum Einsatz kommen kann.

Robin Grotkasten

Title of the paper

Optimization and commissioning of an automated test bench for capacity measurements of oil vessels

Keywords

automation, test bench, oil vessels, PLC

Abstract

An existing test stand for oil vessels should be optimized in terms of reliability, precision and safety aspects. For this purpose, a new control program is systematically developed and tested in this bachelor thesis, as well as necessary modifications to sensors and actuators will be done. The communication with a new oil treatment system and the automated evaluation of the measured data is also part of the work. The aim of the work is handing over a test bench, which can be used daily in the Hamburg power grid for measurements.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Leuten danken, die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben. Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer und Zweitgutachter Herrn Dipl.-Ing. Markus Clos-Averes. Er ist einer der Initiatoren dieses Themas bei der Stromnetz Hamburg GmbH und hat mich in allen Aspekten von der Einarbeitung in das Thema bis zu Detailfragen jederzeit unterstützt. Ich danke meinem Erstgutachter Herrn Prof. Dr. Lange, der mir sinnvolle Tipps für die wissenschaftliche Arbeit gegeben hat. Ein großer Dank an Sebastian Kühne, der einen reibungsfreien Übergang durch gute Dokumentation seiner vorherigen Arbeit ermöglicht hat und mich in die Details des Prüfstandes eingewiesen hat. Ich danke Tino Oehmigen, der mich bei dieser Arbeit durch gutes Hintergrundwissen mit der Ölaufbereitungsanlage, Ideen für Umbauten und durch die Organisation des Feldtests und Zwischentests unterstützt hat. Ich danke hiermit der gesamten Kabelabteilung und speziell den Kabelmonteuren, die mich umfangreich bei der praktischen Umgestaltung des Rohrsystems und durch ihre langjährigen Erfahrungen im Umgang mit Ölkabelsystemen unterstützt haben. Insbesondere möchte ich Erich Rüssel danken, der einen Großteil der Umbauten durchgeführt hat. Ich möchte auch meiner Familie danken für das Durchschauen auf Grammatik- und Rechtschreibfehler.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis	11
Abbildungsverzeichnis	12
Listings	14
1. Einführung	15
1.1. Aufgabenfelder der Stromnetz Hamburg GmbH	15
1.2. Anforderungen an Erdkabel	15
1.3. Beschreibung des Aufbaus eines Ölkabels	16
1.4. Beschreibung des Aufbaus eines Ölkabel-Systems	17
1.5. Funktionsweise von Ölausgleichsgefäßen (ÖAGs)	17
1.6. Isolieröl	18
1.7. Motivation der Arbeit	19
1.8. Entwicklungsstand des Prüfstandes/vorhandene Probleme	21
1.9. Beschreibung der Teilaufgaben	21
2. Theoretische Grundlagen	23
2.1. Relevante physikalische Gesetze	23
2.1.1. Druck	23
2.1.2. Erklärung der Gasgesetze	24
2.1.3. Gesetze der Fluide	25
2.1.4. Viskosität	26
2.2. Physikalische Beschreibung von Ölausgleichsgefäßen	28
2.2.1. Kennlinien-Beispiele von ÖAGs	30
2.2.2. Berücksichtigung des Schweredruckes	31
2.2.3. Arbeitsvolumen	32
2.2.4. defekte Ölausgleichsgefäße	33
2.2.5. Bestimmung des Anfangs-Luftvolumens einer Messkurve	34
3. Praktische Vorarbeiten	39
3.1. Grundlagen zur Ölaufbereitungsanlage	39

3.2. Istzustand des Prüfstandes vor Arbeitsbeginn	42
3.2.1. Beschreibung des Rohrsystems mit Sensoren und Aktoren	42
3.2.2. Beschreibung der Bauelemente im Schaltschrank	43
3.3. Programmiersprachen - Vergleich	46
3.4. Anforderungen und Auswahl der Programmiersprache	46
3.5. Modellierung von Software	47
3.5.1. Zustandsdiagramm (UML statechart)	48
3.5.2. Implementierung eines UML statecharts in Software	50
4. Durchführung der Arbeit	54
4.1. Entwicklung einer Platine zur Simulation eines Ölausgleichsgefäßes	54
4.1.1. Auswahl des Mikrocontrollers	54
4.1.2. Schaltplanentwurf	55
4.1.3. Platinen-Herstellung	58
4.1.4. Programmierung des Mikrocontrollers	59
4.1.5. Messkurven mit der virtuellen ÖAG-Messung	63
4.2. Beschreibung der Optimierung am Rohrsystem	64
4.2.1. Erklärung der möglichen Betriebsarten des Prüfstandes	67
4.2.2. Entlüftung	69
4.3. Umbauten an der Aufbereitungsanlage für Kommunikationsverbindung	70
4.4. Entwicklung der Steuerungssoftware zur Messung von ÖAGs	72
4.4.1. Entleeren-Messung	72
4.4.2. Befüllen-Messung	76
4.4.3. Konzepte im Quellcode	79
4.4.4. Bedienung einer Messung	80
4.4.5. Archivierung	81
4.4.6. Fehler und Fehlbedienung abfangen	82
4.4.7. Genauigkeit einer Messung (Präzision)	83
5. Auswertung und Analyse	85
5.1. Beispieltank F&G 60/0,3	85
5.1.1. Parameterbestimmung aus Herstellerkennlinien	85
5.1.2. Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Messungen	88
5.1.3. Vergleich Entleeren-/Befüllen-Messung mit Herstellerkennlinie	92
5.1.4. Bestimmung des Anfangs-Luftvolumens	94
5.1.5. Ergebnis	96
5.2. Feldtest im Hamburger Stromnetz	96
5.2.1. Messdauer und Durchflussraten	97
5.2.2. Genauigkeit der Durchflussmessturbinen	98
5.2.3. Anmerkungen zur Messung	99
5.2.4. Verwendete Herstellerkennlinie für die Auswertung	99

5.2.5. Messergebnisse	100
6. Zusammenfassung und Ausblick	101
Literaturverzeichnis	104
A. Anhang	106
A.1. UML statechart: Entleeren Messung	106
A.2. UML statechart: Befüllen Messung	106
B. Anhang auf CD	111
B.1. Bachelorthesis	111
B.2. Datenblätter	111
B.3. Quellcode der SPS-Programmierung	111

Abkürzungsverzeichnis

AD-Wandler Analog-Digital-Wandler

AWL Anweisungsliste

FBS Funktionsbausteinsprache

FUP Funktionsplan

HiL Hardware-in-the-Loop

IC integrated circuit (hier: Abkürzung für Mikrocontroller)

IL instruction list

IO-PIN Input/Output-Pin (Anschlusspin eines Mikrocontrollers)

KOP Kontaktplan

KQ-Methode Methode der kleinsten Quadrate

OP Operationsverstärker

ÖAG Ölausgleichsgefäß

ÖAA Ölaufbereitungsanlage

PWM Pulsweitenmodulation

SCL structured control language

SNH Stromnetz Hamburg GmbH

SPS speicherprogrammierbare Steuerung

ST strukturierter Text

UML unified modelling language

ÜNS Überwachungsnetzstation

A Fläche in m²

p Druck in bar

p_s	aktueller Druck in bar (Modellfunktion ÖAG)
$p_{L,0}$	Anfangs-Druck in bar (Modellfunktion ÖAG)
$p_{absolut}$	absoluter Druck in bar
$p_{relativ}$	relativer Druck in bar
p_{ges}	Gesamtdruck in bar
p_{stat}	statischer Druck in bar
p_{stau}	Staudruck (dynamischer Druck) in bar
p_{schwer}	Schweredruck in bar
p_{atm}	atmosphärischer Druck (hier: 1,013 bar)
$p_{L,max}$	Maximaldruck in bar (Modellfunktion ÖAG)
r	Radius in m
d	Durchmesser in m
R	Widerstand in Ω
η	dynamische Viskosität in Ns/m^2
ν	kinematische Viskosität m^2/s
l	Länge in m
F	Kraft in N
n_L	Faktor des vorhandenen Anfangs-Luftvolumens (Modellfunktion ÖAG)
T	Temperatur in K
$T_{L,0}$	Kurventemperatur in K (Modellfunktion ÖAG)
T_s	aktuelle Temperatur in K (Modellfunktion ÖAG)
V	Volumen in m^3
$V_{L,0}$	Anfangs-Luftvolumen in m^3 (Modellfunktion ÖAG)
$V_{S,0}$	Startöl-Volumen in m^3 (Modellfunktion ÖAG)
$V_{\text{Ö}}$	Ölvolumen in m^3 (Modellfunktion ÖAG)
$T_{\text{Ö},0}$	Totöl-Volumen in m^3 (Modellfunktion ÖAG)
V_{AV}	Arbeitsvolumen in m^3

V_{off}	Verschiebungsoffset in m^3 (Modellfunktion ÖAG)
\dot{V}	Volumenstrom in m^3/s
v	Strömungsgeschwindigkeit in m/s
ρ	Dichte kg/m^3
g	Gravitationskonstante in m/s^2
h	Höhe in m
U_{LSB}	minimale unterscheidbare Spannungsstufe in V

Tabellenverzeichnis

1.1. Eigenschaften der bei Stromnetz Hamburg GmbH verwendeten Isolieröle (Quelle: Shell (2010) und Shell (2015))	19
2.1. Kenndaten von zwei Ölausgleichsgefäßen verschiedener Hersteller	30
3.1. Aktoren/Sensoren auf dem Prüfstand mit Messbereich	44
4.1. Druckunterschiede abhängig von Ventilstellungen des Prüfstandes	60
4.2. Genauigkeiten Durchflussmessturbine und Drucksensor	84
5.1. bestimmte Kenndaten aus Herstellerkennlinien	88
5.2. Vergleich der Entleeren-Messreihen	89
5.3. Vergleich der Befüllen-Messreihen	91
5.4. Zeitdauer einer ÖAG-Messung Z60G im Winter (Aufbau und Transport nicht einberechnet)	97
5.5. bestimmtes prozentuales Anfangs-Luftvolumen n_L der gemessenen ÖAGs (ÜNS Süderstraße) (Bestimmung über minimales Fehlerquadrat (und Verhält- nisbildung in Klammern))	100

Abbildungsverzeichnis

1.1. Aufbau eines Einleiterölkabels mit Papierisolierung (Quelle: Schlabbach (1994) , S. 208)	16
1.2. Ölkabel-System mit Einleiter-Kabeln und Überwachungsnetzstation (Zeichnung ist nicht maßstabsgetreu) (Quelle: Kühne (2016a) , S.8)	17
1.3. ein aufgesägtes Ölausgleichsgefäß, die Zellen sind zu sehen (Quelle: eigenes Foto)	18
1.4. Bild des Prüfstands (Stand bei Abgabe dieser Arbeit) (Quelle: eigenes Foto) .	20
2.1. ÖAG-Funktionsweise schematisch (eigene Darstellung)	28
2.2. theoretische Volumen-Druck-Kurven NKT90/0,3 für verschiedene Temperaturen	30
2.3. theoretische Volumen-Druck-Kurven Z60G/0,3-3,5 für verschiedene Temperaturen (Quelle: eigene Darstellung)	31
2.4. Arbeitsvolumen Veränderung ΔV_{AV} bei Temperaturschwankungen NKT90/0,3 (Quelle: eigene Darstellung)	33
2.5. theoretische Volumen-Druck-Kurven NKT90/0,3 für $T_s = 20^\circ\text{C}$ und verschiedene Anfangs-Luftvolumen V_{L0} (Quelle: eigene Darstellung)	35
2.6. Bestimmung des Anfangs-Luftvolumens mithilfe einer Punktwolke (NKT90/0,3 für $T_s = 20^\circ\text{C}$) (Quelle: eigene Darstellung)	38
3.1. Bild der Ölaufbereitungsanlage (Quelle: eigenes Foto)	39
3.2. schematische Darstellung des Rohrsystems vom Prüfstand vor Arbeitsbeginn (Quelle: eigene Darstellung)	42
3.3. Bild des Schaltschranks (Stand bei Abgabe dieser Arbeit) (Quelle: eigenes Foto)	45
3.4. Beispiel UML statechart: Kaffeemaschine (eigene Darstellung)	48
4.1. fertige ÖAG-Simulationsplatine während der Programmierung am PC (Quelle: eigenes Foto)	55
4.2. Erzeugung 3 V analoge Spannung (Quelle: eigene Darstellung)	56
4.3. Erzeugung 24 V digitale Spannung (Quelle: eigene Darstellung)	57
4.4. Auswertung Einheitssignal 4 - 20 mA (Quelle: eigene Darstellung)	57
4.5. Auswertung 24 V (digital) (Quelle: eigene Darstellung)	58
4.6. Messpunkte einer simulierten Entleeren-Messung im Vergleich zur theoretischen Volumen-Druck-Kurve NKT90/0,3 (Quelle: eigene Darstellung)	63

4.7. Messpunkte einer simulierten Befüllen-Messung im Vergleich zur theoretischen Volumen-Druck-Kurve NKT90/0,3 (Quelle: eigene Darstellung)	63
4.8. schematische Darstellung des Rohrsystems vom Prüfstand (Quelle: eigene Darstellung)	64
4.9. Ölfluss im Rohrsystem im Fehlerfall (Druck (Zulauf) > 4,5 bar) (Quelle: eigene Darstellung)	65
4.10. Ölfluss im Rohrsystem beim Entleeren (Quelle: eigene Darstellung)	67
4.11. Ölfluss im Rohrsystem beim Befüllen (Quelle: eigene Darstellung)	68
4.12. Ölfluss im Rohrsystem im Umlaufbetrieb (Quelle: eigene Darstellung)	69
4.13. schematische Darstellung des vollständigen Prüfaufbaus mit Kommunikationsverbindung zur Aufbereitungsanlage (Quelle: eigene Darstellung)	70
4.14. Ergänzung der Aufbereitungsanlage mit externer Steuerung (Quelle: eigene Darstellung, ergänzt zur technischen Dokumentation AAN GmbH (2015))	71
4.15. Programmablaufdiagramm der Entleeren-Messung (Quelle: eigene Darstellung)	75
4.16. Programmablaufdiagramm der Befüllen-Messung (Quelle: eigene Darstellung)	78
4.17. Bedienpanel mit laufender Entleeren Messung eines Z60G ÖAGs (Quelle: eigenes Foto)	81
4.18. Ausschnitt einer archivierten Messung (*.csv in Excel dargestellt)	82
5.1. Herstellerkennlinie F&G Tanks 1976 (basierend auf Messwerten für 20 °C) (Quelle: Archiv Stromnetz Hamburg GmbH)	86
5.2. Herstellerkennlinie F&G Tanks (10 °C) (Erstellungsdatum nicht bekannt) (Quelle: Archiv Stromnetz Hamburg GmbH)	87
5.3. Vergleich der Messpunkte mehrerer Entleeren-Messungen F&G60/0,3 (Quelle: eigene Darstellung)	89
5.4. Vergleich der Messpunkte mehrerer Befüllen-Messungen F&G60/0,3 (Quelle: eigene Darstellung)	91
5.5. Vergleich von Messreihen mit Herstellerkennlinie (1976)	93
5.6. Vergleich von Messreihen mit Herstellerkennlinie (neuer)	94
5.7. Kurvenfitting für Modellfunktion (neuere Herstellerkennlinie)	95
5.8. ÖAG-Messung an der ÜNS Süderstraße (Quelle: eigenes Foto)	96
5.9. Volumenstrom beim Entleeren (vorheriges Befüllen auf Maximaldruck) (Quelle: eigene Darstellung)	98
6.1. sinnvoller Umbau des Prüfstandes aufgrund gewonnener Erkenntnisse (Quelle: eigene Darstellung)	103

Listings

3.1. Definierung von Konstanten	50
3.2. Grundstruktur des Zustandsdiagramms	51
3.3. Grundstruktur mit Transitionen	51
3.4. Bestimmung eines entry-Verhaltens	52
3.5. Grundstruktur mit Transitionen	52
3.6. komplettes Beispielprogramm	52
4.1. OB35 Weckalarm: numerische Integration	79
4.2. Berechnung des geflossenen Volumens	80
4.3. Grundstruktur des Zustandsdiagramms	80

1. Einführung

1.1. Aufgabenfelder der Stromnetz Hamburg GmbH

Die Stromnetz Hamburg GmbH ist der Verteilnetzbetreiber der Hansestadt Hamburg. Sie ist für die Versorgungssicherheit von ca. 1,8 Mio. Einwohnern verantwortlich. Das kommunale Unternehmen ist nach einer Volksentscheidung im Jahre 2013 zur Rekommunalisierung der Energienetze in Hamburg hervorgegangen. Seine Aufgabe ist die Erweiterung, Wartung und Inspektion von Schaltanlagen, Kabeln, Umspannwerken und vielem mehr. Die Netzführung in der City Nord überwacht und steuert das Stromnetz und kann bei Ausfällen durch automatisierte Netzstationen und Umspannwerke meist schnell Fehlerstellen lokalisieren und den Strom über Ersatzwege zum Kunden bringen. Wie die meisten Stromnetze ist das Hamburger Netz historisch gewachsen, viele ältere Kabel erweisen seit Jahrzehnten durch fachgerechte Wartung einen zuverlässigen Dienst. Ein Großteil der Hochspannungsleitungen (110 kV) befindet sich im Erdreich von Hamburg.

1.2. Anforderungen an Erdkabel

Die Problematik bei der Nutzung von hohen Spannungen in Erdkabeln ist die direkte Nähe zum Erdpotential. Bei Freileitungen können durch die großen Abstände der Leitungen zueinander und zur Erde hohe elektrische Feldstärken vermieden werden. Um die Feldstärken bei Erdkabeln zu begrenzen und den Feldstärkeverlauf festzulegen, müssen hochwertige Isolationsmaterialien verwendet werden. Es ist üblich, eine äußere Leitschicht mit Erdpotential um den spannungsführenden Leiter zu führen und dazwischen ein Dielektrikum zu verwenden, welches eine hohe Isolierfähigkeit hat. Hierbei wird das elektrische Feld auf das Dielektrikum begrenzt. Das Dielektrikum muss neben einer hohen Isolierfähigkeit auch bei Temperaturänderungen die Fähigkeit haben, die Bildung von Hohlräumen zu vermeiden. Heute werden hauptsächlich Kabel aus VPE (vernetztes Polyethylen) verlegt, die eine hohe Lebensdauer haben. Vor der Entwicklung dieser hochwertigen Kunststoffisolierungen in den 90er Jahren wurden sogenannte Ölkabel verwendet. Hierbei wird ölgetränktes Papier als Dielektrikum zwischen Leiter und metallischem Schirm verwendet. (vgl. [Küchler \(2017\)](#)) Dieser Kabeltyp macht immer noch einen Großteil der Kabel im Hamburger Stromnetz aus.

1.3. Beschreibung des Aufbaus eines Ölkabels

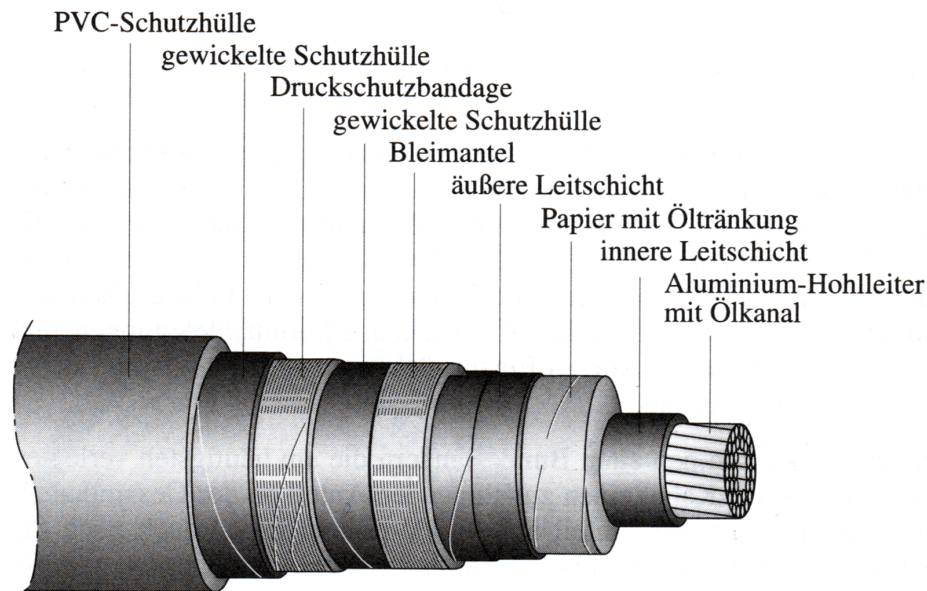


Abbildung 1.1.: Aufbau eines Einleiterölkabels mit Papierisolierung (Quelle: [Schlabbach \(1994\)](#), S. 208)

Bei Ölkabeln wird ein mit dünnflüssigem Mineralöl (Isolieröl) getränktes Papier zur Isolierung genutzt. „Die klassische Kabelisolierung besteht aus vielen Lagen an Papierbändern [...], die wendelförmig und gegeneinander versetzt aufgewickelt werden [...].“ ([Küchler \(2017\)](#), S. 503) Es werden sowohl Einleiterkabel als auch Dreileiterkabel verwendet. Bei Einleiterkabeln wird jeder Leiter einzeln im Erdreich verlegt und durch umwickeltes Papier isoliert. In [Abbildung 1.1](#) ist ein solches Einleiterölkabel zu sehen. Bei Dreileiterkabeln werden die papierumwickelten Außenleiter zusammen in einem Aluminiumrohr verlegt und in symmetrischen Abständen durch sogenannte „Zwickeln“ fixiert.

Das Isolieröl hat die Eigenschaft der Inkompressibilität und lässt sich demnach durch Druck nicht im Volumen verringern. Dennoch ist die Dichte abhängig von der Temperatur des Öls. Ein großer Anteil der Temperaturschwankungen wird durch die Kabel selber erzeugt, da diese sich bei erhöhter Last deutlich erwärmen können. Minimal spielen auch die Temperaturschwankungen des Erdbodens mit ein. Auch außenliegende Garnituren, wie Ventile oder Endverschlüsse, sind Temperaturveränderungen der Umgebung ausgesetzt. Auf Grund dessen muss für eine Aufnahme und Abgabe des veränderten Ölvolumens gesorgt werden. Für diesen Zweck werden Ölausgleichsgefäße (ÖAGs) verwendet.

1.4. Beschreibung des Aufbaus eines Ölkabel-Systems

Der Aufbau eines Ölkabelsystems ist in Abbildung 1.2 zu sehen. Das Ölkabel wird mithilfe von Sperrmuffen in mehrere Abschnitte unterteilt, die einen unabhängigen Ölkreislauf haben. Hiermit wird das Ölvolumen bewusst begrenzt. Am Ende eines Ölkabels werden Endverschlüsse genutzt, die ein Auslaufen des Öls aus den Kabeln verhindern und den Außenleiter für die Weiterführung von der Ummantelung und der Papierisolierung trennen. Bei der Einleiter-Ausführung wird pro Außenleiter mindestens ein Ölausgleichsgefäß benötigt, da die Kabel getrennt unter Druck gehalten werden. Bei der Dreileiterausführung können mehrere ÖAGs parallel geschaltet werden, da das Ölvolumen deutlich größer ist. Die ÖAGs werden z.B. in eigenen Überwachungsnetzstationen (ÜNS) untergebracht, in denen der Druck der Ölkabel in regelmäßigen Abständen überwacht wird. (siehe auch Foto ÜNS Süderstraße in Abbildung 5.8) Früher wurden die ÖAGs auch unterirdisch vergraben bzw. an Masten befestigt. Ein wichtiger Aspekt ist die Reinheit des Öls in Bezug auf Fremdstoffe, wie Wasser, Gas oder kleine Partikel, die die Isolierfähigkeit des Öls herabsetzen können. In Kapitel 3.1 wird auf die Aufbereitung des Isolieröls eingegangen.

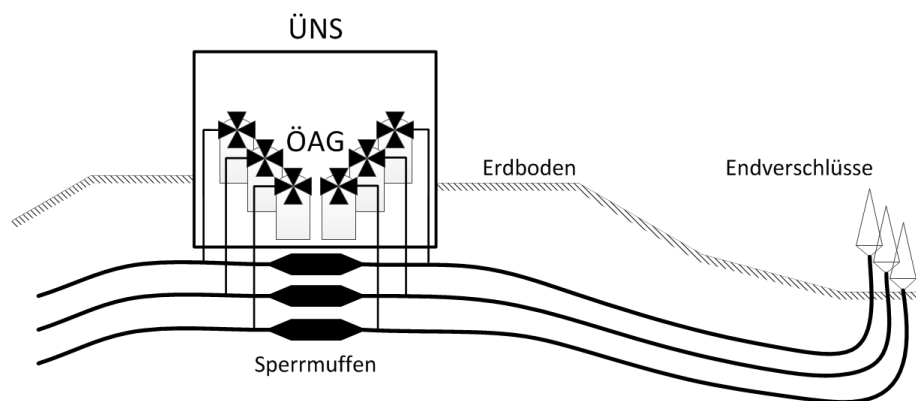


Abbildung 1.2.: Ölkabel-System mit Einleiter-Kabeln und Überwachungsnetzstation (Zeichnung ist nicht maßstabsgetreu) (Quelle: Kühne (2016a), S.8)

1.5. Funktionsweise von Ölausgleichsgefäßen (ÖAGs)

Bei den ÖAGs handelt es sich um zylinderförmige Gefäße, in denen sich mehrere mit Gas gefüllte Metallzellen befinden. Diese Metallzellen haben aufgrund des komprimierbaren Gases eine Pufferfähigkeit. Die ÖAGs können mit Isolieröl gefüllt werden. Je mehr Öl in das Gefäß gefüllt wird, desto größer wird der Druck am Anschluss des ÖAGs, da die Zellen

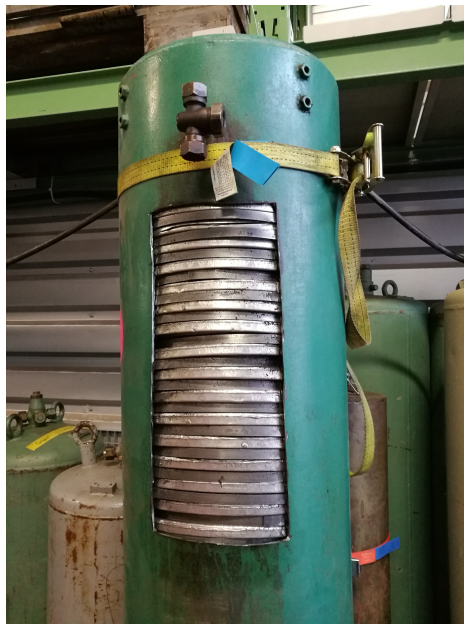


Abbildung 1.3.: ein aufgesägtes Ölausgleichsgefäß, die Zellen sind zu sehen (Quelle: eigenes Foto)

zusammengedrückt werden. Im Normalbetrieb werden die ÖAGs nicht bis zum maximalen Volumen gefüllt, sondern auf einen Arbeitspunkt gebracht, der es ermöglicht, bei Temperaturerhöhung das zusätzliche Volumen des Öl-Kreislaufs aufzunehmen und bei Absenkung der Temperatur Öl abzugeben. Die Physik und die Kennlinien der ÖAGs werden im Kapitel [2.2](#) noch näher betrachtet.

1.6. Isolieröl

Isolieröl, allgemein auch als Transformatorenöl bezeichnet, ist ein flüssiges Silikonöl. In Erdkabeln hat es sich im Zusammenhang mit gewickeltem Papier als Dielektrikum zur sicheren Isolation und zur Schließung von Hohlräumen als sehr sinnvoll erwiesen. Dennoch ist diese Technik in Erdkabeln durch moderne VPE-Werkstoffe überholt. In der Hochspannungstechnik wird es aber dennoch verwendet, um Transformatoren, Schalter, Kondensatoren zu isolieren, zu schmieren und zu kühlen. In diesen Anwendungsfällen ist es immer noch Stand der Technik. (vgl. [Küchler \(2017\)](#))

Bei der Stromnetz Hamburg GmbH wird Shell Diala S4 ZX-IG und der Vorgänger Shell Diala 3 ZX-IG verwendet.

In Tabelle [1.1](#) sind wichtige Eigenschaften dieser beiden Isolieröle dargestellt.

Tabelle 1.1.: Eigenschaften der bei Stromnetz Hamburg GmbH verwendeten Isolieröle (Quelle: [Shell \(2010\)](#) und [Shell \(2015\)](#))

	Shell Diala S3 ZX-IG	Shell Diala S4 ZX-IG
Dichte (20 °C)	886 kg/m ³	806 kg/m ³
kin. Viskosität (40 °C)	8,0 mm ² /s	9,4 mm ² /s
kin. Viskosität (-30 °C)	1100 mm ² /s	381 mm ² /s

1.7. Motivation der Arbeit

Viele ÖAGs sind wie die Öl-Kabel seit Jahrzehnten im Betrieb. Fehler in den Kabeln können durch Druckabfälle im System beobachtet werden, wenn Öl austritt. Die ÖAGs sind jedoch verschlossen und eine Beschädigung an den Metallzellen kann direkt nicht überprüft werden. Da die Metallzellen mechanischer Belastung unterliegen, ist es theoretisch möglich, dass sich Risse bilden und Teile des Gases austreten und sich an der Oberseite des Gefäßes sammeln. Der direkte Kontakt des Öls mit dem Gas kann über lange Zeit zu chemischen Reaktionen (Oxidation etc.) führen. Diese Reaktionsprodukte und kleine Luftbläschen können die Isolierfähigkeit des Öls herabsetzen und die sichere Isolierung ist nicht mehr gewährleistet. Des Weiteren sinkt die Ausdehnungsfähigkeit der defekten Ölausgleichsgefäße, wenn das gesammelte Gas bei der nächsten Entlüftung aus dem Gefäß gespült wird.

Durch modernere Isolierverfahren mit VPE ist die Technik des Ölkabels nahezu verdrängt und nur noch wenige Hersteller produzieren ÖAGs. Die Preise sind durch das geringe Angebot an ÖAGs deutlich gestiegen. Der Austausch der gesamten Ölkabel im Hamburger Raum wird aufgrund des hohen Aufwands noch Jahrzehnte dauern. Es ist demnach ökonomisch sinnvoll, die verwendeten ÖAGs auf den Verschleißzustand zu prüfen und nur im Bedarfsfall zu erneuern. Die Wichtigkeit dieser Überprüfung hat eine unabhängige Untersuchung eines Ölausgleichsgefäßes im Jahre 2015 ergeben. Aufgrund von verdächtigen Bläschen im Öl beim Entleeren und einer stark abweichenden Volumen-Druck-Kurve von der Herstellerkennlinie hat man sich entschieden, das Ölausgleichsgefäß zu öffnen (eine Öffnung zerstört das Ölausgleichsgefäß unwiderruflich). Hier wurden Korrosionserscheinungen an den Metallzellen entdeckt. Teilweise konnte Öl in die Zellen eindringen. Ein unabhängiges Untersuchungsinstitut hat herausgefunden, dass ein bei der Herstellung verwendetes Beizmittel für die Korrosionsstellen verantwortlich ist. Geringe Rückstände dieses Beizmittels sind bei der Herstellung in die Zellen gelangt. (vgl. [Ahrens \(2015\)](#))

Zunächst wurde ein händisches Verfahren genutzt, bei dem durch schrittweises Ablassen von Öl in Verbindung mit einer Druck-Messung eine Volumen-Druck-Kurve des ÖAGs erstellt wird. Diese Kurve kann mit der Hersteller-Kennlinie verglichen werden und es können bei Abweichungen Rückschlüsse auf Defekte gezogen werden. Dieses Verfahren ist sehr umständlich und zeitintensiv. Außerdem sind viele hundert Ausgleichsgefäße im Verteilnetz in Betrieb.

Es wurde nach einer automatisierten Lösung der Überprüfung von ÖAGs gesucht. Ein ehemaliger Student hatte sich dies in einer Diplomarbeit (vgl. Kühne (2016a)) und einer vorangegangenen Studienarbeit (vgl. Kühne (2016b)) zum Thema gemacht. Es wurde bereits ein SPS-gesteuerter, mobiler Prüfstand (Abbildung 1.4) entwickelt und aufgebaut, der die Messung und Erstellung von Volumen-Druck-Kurven automatisieren soll. Die Optimierung dieses Prüfstandes auf Zuverlässigkeit, Präzision und unter Sicherheitsaspekten für den täglichen, mobilen Einsatz ist die Motivation dieser Arbeit.

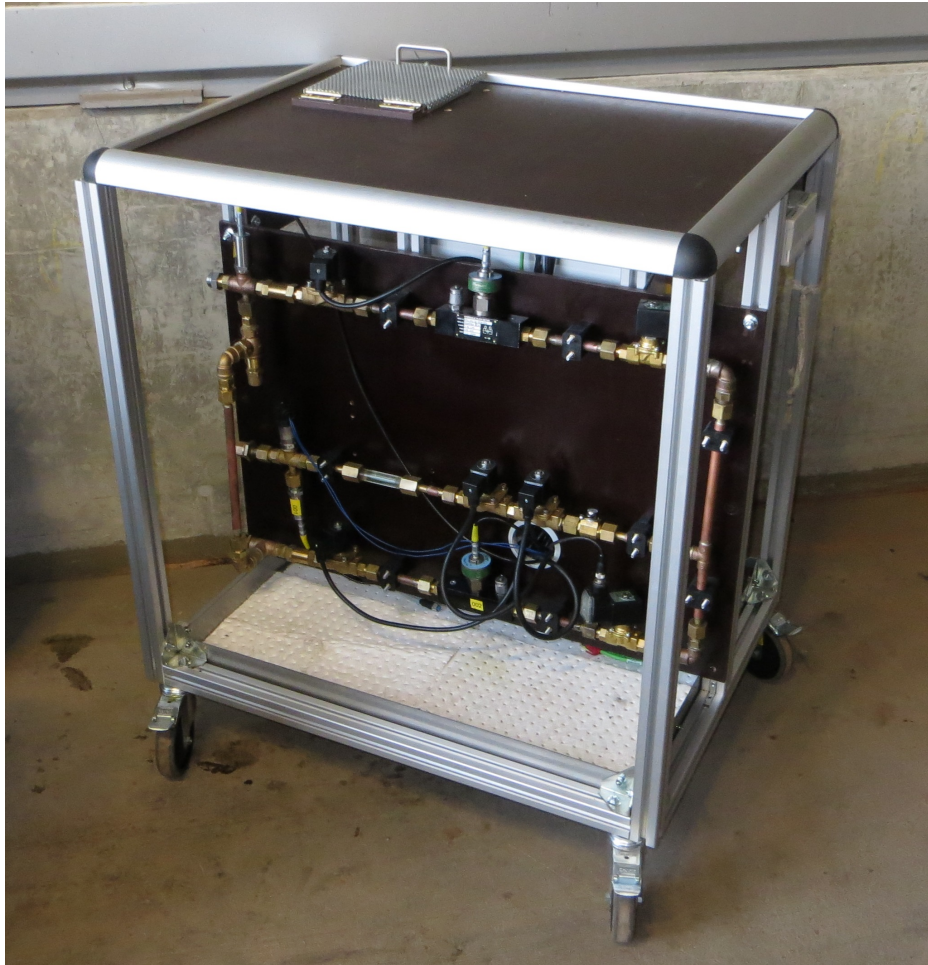


Abbildung 1.4.: Bild des Prüfstands (Stand bei Abgabe dieser Arbeit) (Quelle: eigenes Foto)

1.8. Entwicklungsstand des Prüfstandes/vorhandene Probleme

Der Prüfstand befand sich zu Beginn dieser Arbeit in einem Entwicklungszustand, mit dem eine automatisierte Messung während des Entleerens eines ÖAGs (Entleeren-Messung) durchgeführt werden kann und die Ergebnisse am PC mithilfe händischer Nachbearbeitung der Messwerte graphisch dargestellt werden können. Die technische Funktionsfähigkeit des Prüfstandes ist damit bewiesen.

Dennoch ist der Prüfstand für einen alltäglichen Einsatz im Netz noch nicht geeignet. Die Zuverlässigkeit der Messungen muss optimiert werden, um Abbrüche während eines Messvorgangs zu verhindern. Der Prüfstand war für eine ältere Ölaufbereitungsanlage konzipiert worden. Für die Nutzung mit einer neuen Aufbereitungsanlage sind Umbauten am Rohrsystem und ein veränderter Messablauf nötig. Auch die Messung während des Befüllens eines ÖAGs (Befüllen-Messung) ist aufgrund der neuen Aufbereitungsanlage nicht funktionsfähig, da es bisher keine Möglichkeit gibt, einen Pumpvorgang bei einer Druckmessung zu unterbrechen oder Öl umzuleiten. Hierfür muss eine neue Betriebsart des Prüfstandes eingeführt werden. Nach abgeschlossener Messung ist die Auswertung der Messdaten bisher nur mit zusätzlicher händischer Nachbearbeitung am PC möglich. Eine Vereinfachung des Archivierungsprinzips ist wünschenswert.

1.9. Beschreibung der Teilaufgaben

In folgender Aufzählung werden die Teilprojekte beschrieben, die aus dem aktuellen Entwicklungsstand des Prüfstandes resultieren (Kapitel 1.8).

- **Programmierung der SPS**

Die Hauptaufgabe ist die strukturierte Programmierung der SPS mit allen geforderten Funktionen, um eine bedienfreundliche und sichere Messung von ÖAGs im täglichen Betrieb durchzuführen. Hierzu gehört sowohl die Erkennung von Betriebsfehlern als auch die Archivierung von Messungen. Die Programmierung soll nach eigenen Ideen neu entwickelt werden und wird in Kapitel 4.4 beschrieben.

- **Anfertigung einer einfachen Möglichkeit, um Quellcode zu testen**

Es soll eine einfache Möglichkeit gesucht werden, um Quellcode der SPS zu testen, ohne dies im realen Betrieb mit Öl zu tun, wo kritische Zustände auftreten könnten. Eine Simulationseinrichtung soll gebaut werden, die Sensorwerte des Prüfstandes ausgibt und eine Befüllung/Entleerung eines Ölausgleichsgefäßes simulieren kann.

Hiermit soll die SPS-Programmierung einfach getestet werden und auch Betriebsfehler können sicher simuliert werden. Die Entwicklung der Platine wird im Kapitel 4.1 beschrieben.

- **Durchfluss maximieren**

Der Durchfluss des Rohrsystems muss maximiert werden, damit eine schnellere Entleerung und Befüllung eines ÖAGs möglich ist. Einige Bestandteile des Rohrsystems stehen in Verdacht, durch einen engen Querschnitt niedrige Durchflussraten zu verursachen.

- **Kommunikation des Prüfstandes mit der Ölaufbereitungsanlage**

Es wurde eine neue, leistungsfähigere Ölaufbereitungsanlage für die Befüllung und Entleerung von ÖAGs angeschafft. Der Prüfstand soll für die Ölaufbereitungsanlage angepasst werden. Eine automatisierte An- und Abschaltung der Ölaufbereitungsanlage ist vorteilhaft und wird in Kapitel 3.1 auf Machbarkeit überprüft.

- **Auswertung der Messergebnisse/Archivierung**

Damit vor Ort direkt eine Entscheidung getroffen werden kann, welchen Verschleißgrad ein getestetes Ölausgleichsgefäß hat, soll ein Wert ausgegeben werden, der dem Monteur vor Ort eine erste Einschätzung der Messergebnisse ermöglicht. In Kapitel 2.2.4 wird ein mathematischer Ansatz beschrieben. Für die Protokollerstellung sollen die Messdaten langfristig archiviert werden. Die Archivierung muss über einen mit der SPS verbundenen USB-Stick möglich sein. Hierfür muss ein Skript geschrieben werden, welches die Messwerte abspeichert.

- **Testen des Prüfstandes**

Die Messungen des Prüfstandes sollen verifiziert werden, hierfür werden in Kapitel 5.1 mehrere Messreihen untereinander und mit den Herstellerkennlinien verglichen. Zum Abschluss der Arbeit soll ein Praxistest der Anlage im Hamburger Stromnetz durchgeführt werden und Erkenntnisse für den Bedarf von weiteren Optimierungen bringen. Die Ergebnisse dieses Feldtests werden in Kapitel 5.2 dargestellt.

2. Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel soll das physikalische Verhalten von Ölausgleichsgefäßen betrachtet werden und eine Modellfunktion hergeleitet werden, die sich an die Herstellerkennlinien von ÖAGs anpassen lässt und einen Vergleich zu gemessenen Volumen-Druck-Kurven ermöglicht. Hierfür werden zunächst die wichtigsten Gesetze der Strömungslehre und die Gasgesetze erläutert.

2.1. Relevante physikalische Gesetze

2.1.1. Druck

Der Druck p ist definiert als eine Kraft F , die senkrecht auf eine Fläche A einwirkt.

$$p = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

Auf der Erdoberfläche wirkt ein Luftdruck, der durch die Gewichtskraft der Luftsäule verursacht wird. Dieser Luftdruck schwankt über das Jahr und ist auch abhängig von der Höhe über bzw. unter dem Meeresspiegel. Der festgelegte Normaldruck auf Meereshöhe beträgt 1013,25 hPa. (=1,013 bar). Der Umgebungsdruck wird in dieser Arbeit zur Vereinfachung immer mit 1,013 bar angenommen und wird in dieser Arbeit als p_{atm} bezeichnet.

Relativdruck/Absolutdruck

Bei der Messung des Drucks wird unterschieden zwischen dem Relativ- und Absolutdruck. Der Relativdruck ist die Differenz zum gerade vorhandenen Umgebungsdruck, d.h. in der Regel ist der Absolutdruck um ca. 1,013 bar höher als der Relativdruck. Viele Sensoren können nur eine Differenzmessung machen und geben demnach den Relativdruck aus. Da die Betriebsdrücke der Ölausgleichsgefäße immer mit dem Relativdruck angegeben werden, sind auch in dieser Arbeit alle Werte als Relativdruck angegeben. Für alle Berechnungen in

dieser Arbeit wird dennoch immer der Gesamtdruck benötigt, d.h. der Relativdruck muss folgendermaßen umgerechnet werden:

$$p_{\text{absolut}} = p_{\text{relativ}} + 1,013 \text{ bar} \quad (2.2)$$

2.1.2. Erklärung der Gasgesetze

Gesetz von Boyle-Mariotte

Das Gesetz von Boyle-Mariotte beschreibt den Zusammenhang zwischen Volumen V und Druck p eines idealen Gases. Der Druck p ist umgekehrt proportional zum Volumen V . Bei einer Verdoppelung des Drucks, der auf ein Gas einwirkt, halbiert sich demnach das Volumen. Hierbei wird von einer konstanten Temperatur T ausgegangen. (vgl. [Zierep \(2015\)](#), S.15)

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1} \quad (2.3)$$

Gesetz von Gay-Lussac

Das Gesetz von Gay-Lussac beschreibt den Zusammenhang, dass Volumen V und Temperatur T eines idealen Gases direkt proportional zueinander sind. Bei einer Erwärmung dehnt sich das Gas linear zur Temperatur aus. Hierbei wird von einem konstanten Druck p ausgegangen. (vgl. [Zierep \(2015\)](#), S.15)

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (2.4)$$

Gesetz von Amontons

Das Gesetz von Amontons beschreibt den Zusammenhang zwischen Druck p und Temperatur T . Der Druck ist direkt proportional zur Temperatur. Hierbei wird von einem unveränderbaren Volumen ausgegangen, also z.B. ein nicht dehnbare Gefäß.

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (2.5)$$

Kombiniertes Gasgesetz/Allgemeines Gasgesetz

Mit der Kombination der Gesetze von Amontons und Gay-Lussac kann folgendes allgemeines Gasgesetz hergeleitet werden. Es beschreibt sowohl die Temperatur- als auch Druckabhängigkeit des Volumens eines Gases. (vgl. [Tipler und Mosca \(2015\)](#), S.548)

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad (2.6)$$

2.1.3. Gesetze der Fluide

Der Volumenstrom

Der Volumenstrom \dot{V} ist eine physikalische Größe und beschreibt einen Volumenteil dV , welcher pro Zeiteinheit dt durch einen definierten Querschnitt fließt.

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} \quad (2.7)$$

Kontinuitätsgesetz

Das Kontinuitätsgesetz gilt für inkompressible Flüssigkeiten und besagt, dass bei sich ändernder Querschnittsfläche A der Volumenstrom \dot{V} konstant bleibt. Dies bedeutet, dass an Verengungen die Strömungsgeschwindigkeit v größer wird. (vgl. [Tipler und Mosca \(2015\)](#), S.388)

$$\dot{V} = A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \quad (2.8)$$

Pascal'sches Gesetz

Das Pascal'sche Gesetz besagt, dass der Schweredruck p_{schwer} (hydrostatischer Druck) eines Fluids abhängig von der Flüssigkeitssäule h , der Dichte ρ des Fluids und der Gravitationskonstante g ist. Hierbei wird von einer konstanten Erdbeschleunigung g über die gesamte Höhe ausgegangen. Dies ist für kleine Höhendifferenzen nahe der Erdoberfläche eine gute Näherung. (vgl. [Tipler und Mosca \(2015\)](#), S.376)

$$p_{schwer} = \rho g h \quad (2.9)$$

Bernoulli-Gleichung

Die Bernoulli-Gleichung gilt für die stationäre Strömung eines inkompressiblen und viskositätsfreien Fluids. Sie besagt, dass sich der Gesamtdruck p_{ges} eines Fluids zusammensetzt aus Staudruck p_{stau} , Schweredruck p_{schwer} (siehe Pascal'sches Gesetz) und statischem Druck p_{stat} . Es gilt, dass der Gesamtdruck p_{ges} eines Fluids in z.B. einem Rohrsystem konstant bleibt. Das heißt, dass bei einem fließenden Fluid der statische Druck p_{stat} mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit v abnimmt, während der Staudruck steigt. Der Staudruck p_{stau} ist abhängig von der Dichte des Fluids ρ und der 2. Potenz der Strömungsgeschwindigkeit v . Der Schweredruck p_{schwer} ergibt sich aus der Höhendifferenz h (ist gleichbedeutend mit der Flüssigkeitssäule), der Dichte des Fluids ρ und der Gravitationskonstante g . (vgl. [Tipler und Mosca \(2015\)](#), S.390)

$$p_{ges} = p_{stat} + p_{stau} + p_{schwer} \quad (2.10)$$

$$p_{ges} = p_{stat} + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh \quad (2.11)$$

Hagen-Poiseuille-Gesetz

Das Hagen-Poiseuille-Gesetz beschreibt den Volumenstrom durch ein enges Rohr, abhängig von der Viskosität des Fluids η , der Länge l sowie dem Innenradius r des Rohres und dem Druckunterschied Δp (vgl. [Zierep \(2015\)](#), S.132).

$$\dot{V} = \frac{r^4 \pi \Delta p}{8 \eta l} \quad (2.12)$$

Hierbei ist relevant, dass der Volumenstrom \dot{V} direkt proportional zur Druckdifferenz ist. Der Radius r des Rohres geht mit der 4. Potenz ein. Das Gesetz gilt nur, wenn von einer laminaren Strömung ausgegangen wird. In einem komplexen Rohrsystem mit Abzweigungen und Verengungen können Wirbel auftreten, die zu einer turbulenten Strömung führen und das Ergebnis verfälschen.

2.1.4. Viskosität

Die Viskosität ist ein Maß für die Zähflüssigkeit eines Fluids. Eine hohe Viskosität bedeutet, dass das Fluid dickflüssig und demnach weniger fließfähig als ein Fluid mit geringer Viskosität ist.

Es wird unterschieden zwischen der dynamischen Viskosität η und der kinematischen Viskosität ν . Der Zusammenhang ist folgender, wobei ρ die Dichte des Fluids ist:

$$\eta = \nu \cdot \rho \quad (2.13)$$

Die Einheit der dynamischen Viskosität ist 1 Ns/m^2 . Die Viskosität lässt sich anschaulich so beschreiben: Wenn sich ein Fluid zwischen zwei Platten mit der Fläche A und dem Abstand d befindet, wird eine Kraft F benötigt, um die Platten mit einer Geschwindigkeit v zueinander zu verschieben. Dann berechnet sich die Viskosität folgendermaßen. (vgl. [Tipler und Mosca \(2015\)](#), S.107)

$$\eta = \frac{F \cdot d}{v \cdot A} \quad (2.14)$$

Wasser hat bei 20°C eine Viskosität von 1000 Ns/m^2 .

2.2. Physikalische Beschreibung von Ölausgleichsgefäßen

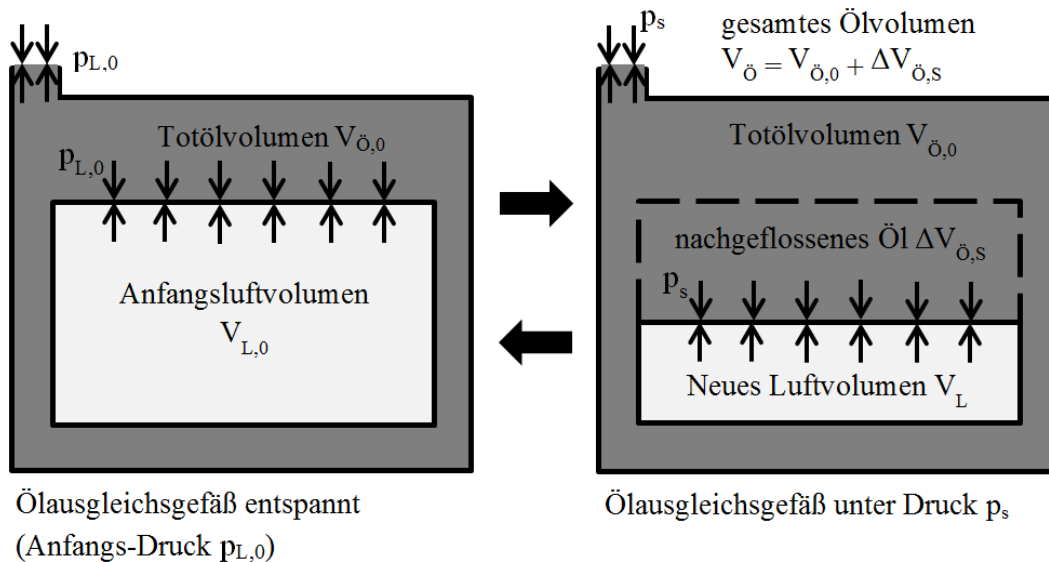


Abbildung 2.1.: ÖAG-Funktionsweise schematisch (eigene Darstellung)

Ein Ölausgleichsgefäß kann als Zusammensetzung aus luftgefüllten, kompressiblen Metallzellen und inkompressiblem Öl beschrieben werden. Im Folgendem soll eine Formel hergeleitet werden, die das aktuelle Ölvolumen im Tank abhängig vom aktuellen Druck p_s und der aktuellen Temperatur T_s beschreibt. In der folgenden Herleitung wird die Vereinfachung getroffen, dass sich die Metallzellen im Arbeitsbereich wie ein ideales Gas verhalten. Die Herleitung beruht auf [Averes \(2015\)](#).

Der Druck-Arbeitsbereich des ÖAGs wird über die Vorkomprimierung der Zellen festgelegt. Dabei werden die Zellen mit einem Druck versehen, der deutlich höher sein kann als der atmosphärische Luftdruck. Dieser Vordruck entspricht üblicherweise dem Minimaldruck des Betriebsbereichs. Er wird hier als Anfangs-Druck $p_{L,0}$ bezeichnet.

Das Öl, welches sich bei entspannten Zellen (maximale mechanische Ausdehnung) im Gefäß befindet, wird als Totölvolumen $V_{\bar{o},0}$ bezeichnet. Es füllt die Hohlräume zwischen Zellen und Tank aus. Da das Totöl für den eigentlichen Ausgleichvorgang keine Rolle spielt und es im entspannten Zustand das ÖAG nicht verlassen kann, wird es in den folgenden Herleitungen nicht betrachtet.

Bei Druckerhöhung von außen werden die Metallzellen zusammengedrückt und nehmen

weniger Volumen in Anspruch und so kann Öl nachfließen. Das nachgeflossene Öl $\Delta V_{\dot{O},S}$ entspricht damit genau dem gesunkenen Volumen der Luft.

$$\Delta V_{\dot{O},S} = V_{L,0} - V_L \quad (2.15)$$

Das neue Volumen der Luft im zusammengedrückten Fall lässt sich mithilfe des allgemeinen Gasgesetzes erklären (Kapitel 2.1.2).

$$V_L = V_{L,0} \cdot \frac{p_{L,0}}{p_s} \cdot \frac{T_s}{T_{L,0}} \quad (2.16)$$

Hierbei entspricht $V_{L,0}$ dem Anfangs-Luftvolumen bei der Kurventemperatur $T_{L,0}$ und dem Anfangs-Druck $p_{L,0}$, die als Startparameter dienen. Das neue Luftvolumen ist proportional zu $1/p_s$ und der aktuellen Temperatur T_s . Die Gleichungen 2.15 und 2.16 lassen sich dann zusammensetzen zur Gleichung:

$$\Delta V_{\dot{O},S} = V_{L,0} \cdot \left(1 - \frac{p_{L,0}}{p_s} \cdot \frac{T_s}{T_{L,0}}\right) \quad (2.17)$$

In der Realität wird zusätzlich zum Totölvolumen eine bestimmte Ölmenge benötigt, um die Zellen vom entspannten Zustand (maximale mechanische Ausdehnung) auf den Minimaldruck (Anfangs-Druck $p_{L,0}$) des Arbeitsbereichs zu bringen. Unter dem Minimaldruck verhält sich das Ausgleichsgefäß deutlich anders als ein ideales Gas, da hier die Eigencharakteristik der Metallzellen überwiegt. Um die Modellfunktion an die Herstellerkennlinien anzupassen, wird demnach nur der Bereich oberhalb des Minimaldrucks verwendet. Hierfür ist ein Volumenoffset nötig, der als Summand zur bisherigen Modellfunktion addiert wird. Dieser Offset wird hier als $V_{S,0}$ bezeichnet.

$$V_{\dot{O}}(p_s, T_s) = V_{S,0} + \Delta V_{\dot{O},S} \quad (2.18)$$

$$V_{\dot{O}}(p_s, T_s) = V_{S,0} + V_{L,0} \cdot \left(1 - \frac{p_{L,0}}{p_s} \cdot \frac{T_s}{T_{L,0}}\right) \quad (2.19)$$

Die Gleichung 2.18 beschreibt das theoretische Volumen im Tank bei einem definierten Druck und einer definierten Temperatur. Die Gleichung lässt sich auch nach dem aktuellen Druck umstellen:

$$p_s(V_{\dot{O}}, T_s) = \frac{p_{L,0} \cdot V_{L,0}}{V_{L,0} - V_{\dot{O}} + V_{S,0}} \cdot \frac{T_s}{T_{L,0}} \quad (2.20)$$

Die hergeleiteten Formeln spiegeln nur ein physikalisches, vereinfachtes Modell der ÖAGs wieder. Das tatsächliche Verhalten der ÖAGs kann hiervon abweichen. In Kapitel 5.1.1 wird die Anpassung der Modellfunktion an eine Herstellerkennlinie detailliert dargestellt und eine Bewertung der Anpassung vorgenommen.

2.2.1. Kennlinien-Beispiele von ÖAGs

Tabelle 2.1.: Kenndaten von zwei Öausgleichsgefäßen verschiedener Hersteller

Bezeichnung	Kürzel	NKT90/0,3	Siemens Z60G/0,3-3,5
Anfangs-Luftvolumen	$V_{L,0}$	153,0 l	158,0 l
Anfangs-Druck	$p_{L,0}$	0,3 bar	0,29 bar
Kurventemperatur	$T_{L,0}$	20 °C (293 K)	20 °C (293 K)
Startöl-Volumen	$V_{S,0}$	1 l	29 l
Totöl-Volumen	$V_{Ö,0}$	50 l	72 l
Maximaldruck	$p_{L,max}$	2,0 bar	3,5 bar

In Tabelle 2.1 sind die Kenndaten von zwei ÖAGs beispielhaft angegeben. Diese Kenndaten wurden aus den Kennlinien der Hersteller durch manuelle Kurvenanpassung ermittelt. Hierbei wird eine Übereinstimmung der Kurve im Druckarbeitsbereich zwischen $p_{L,0}$ und $p_{L,max}$ bevorzugt. Mit diesen Kenndaten und der hergeleiteten Formel 2.19 lässt sich nun eine Volumen-Druck-Kurve erzeugen. Da auch die Temperatur eine Variable ist, wird hier eine Kurvenschar für Temperaturen von 10 °C bis 40 °C erzeugt. Die Kurvenschar für den Tank NKT90/0,3 ist in Abbildung 2.2 und für den Tank Z60G/0,3-3,5 in Abbildung 2.3 dargestellt.

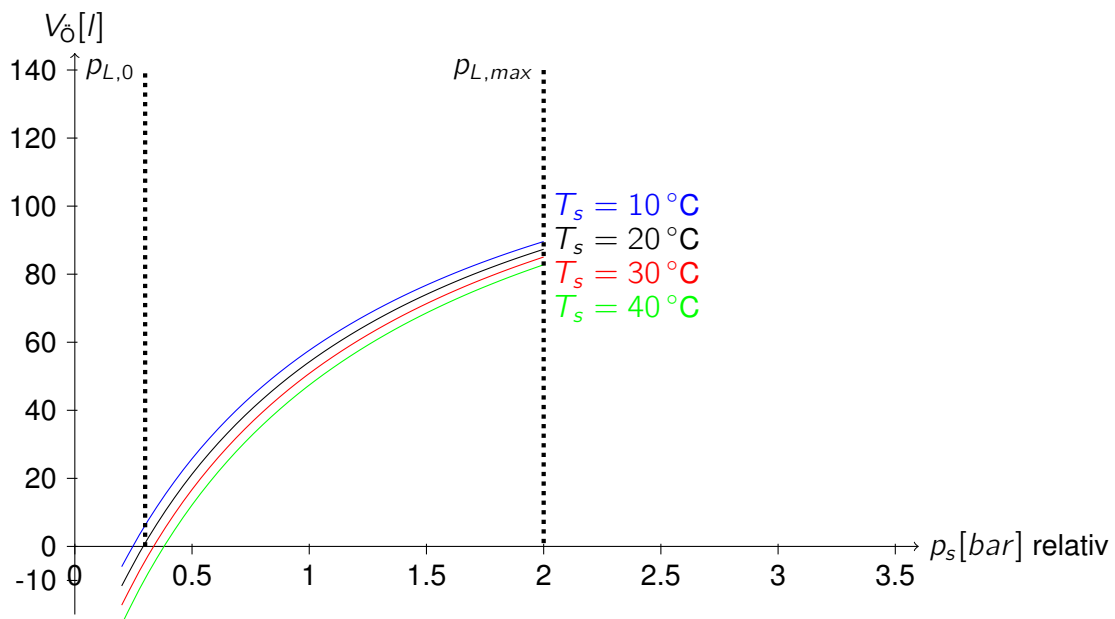


Abbildung 2.2.: theoretische Volumen-Druck-Kurven NKT90/0,3 für verschiedene Temperaturen

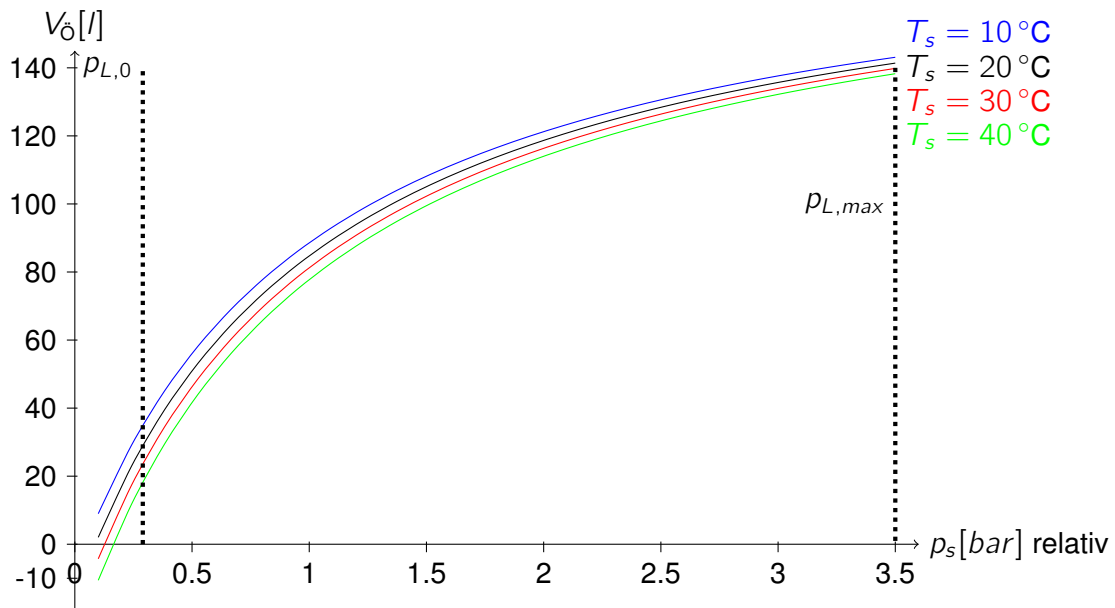


Abbildung 2.3.: theoretische Volumen-Druck-Kurven Z60G/0,3-3,5 für verschiedene Temperaturen (Quelle: eigene Darstellung)

2.2.2. Berücksichtigung des Schweredrucks

Die Berücksichtigung von Höhendifferenzen bei der Druckmessung stellt einen nicht zu vernachlässigenden Sachverhalt dar. Ein Z60G ist ca. 2 m hoch. Aufgrund des Pascal'schen Gesetzes (siehe Kapitel 2.1.3) ist der gemessene Gesamtdruck am unteren Punkt eines ÖAGs höher als der Gesamtdruck am oberen Punkt. Das oft verwendete Shell Diala S4 ZX-IG hat bei 20 °C eine typische Dichte von 806 kg/m³. Bei 2 m ergibt sich ein Druckunterschied von 0,158 bar.

$$\Delta p_{schwer} = \rho g \Delta h \quad (2.21)$$

$$\Delta p_{schwer} = 806 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot 2 \text{ m} \approx 0,158 \text{ bar} \quad (2.22)$$

Die physikalische Modellfunktion 2.19 berücksichtigt eine überliegende Flüssigkeitssäule bisher nicht. Die Formel bezieht sich also immer auf den Druck am höchsten Punkt des ÖAGs, wo kein Schweredruck existiert.

Für die meisten Herstellerkennlinien existieren keine Angaben für die Bezugshöhe der gemessenen/berechneten Kurve.

Die Öldruckberechnungen für Ölkabel der Abteilung 110-kV-Kabelanlagen wurden in der Vergangenheit immer mit der mittleren Höhe der Tanks durchgeführt. Die mittlere Höhe soll demnach auch in dieser Arbeit als Druckmesspunkt für die Herstellerkennlinien angenommen werden.

Um die Komplexität der Modellfunktion nicht weiter zu vergrößern, soll kein variabler Druckoffset in die Funktion eingebaut werden, stattdessen soll die Modellfunktion in bisheriger Form für das Kurvenfitting verwendet werden. Dies ist eine vorgenommene Vereinfachung, mit der bisher gute Erfahrungen bezüglich der Anpassung von Kurven an die Herstellerkennlinien gemacht wurden. Um dennoch gleichbleibende Messbedingungen von ÖAGs zu gewährleisten, soll die Höhendifferenz Δh zwischen Drucksensor und mittlerer Höhe des ÖAGs bei jedem Einsatz des Prüfstandes gemessen und als Parameter manuell in den Prüfstand eingegeben werden, um einen Korrekturwert Δp_{schwer} für die Druckmessung zu berechnen. Alle gemessenen Druckwerte einer ÖAG-Messung müssen dann automatisiert um den entsprechenden Korrekturwert korrigiert werden.

2.2.3. Arbeitsvolumen

Der Arbeitsbereich des NKT90/0,3 liegt zwischen dem Anfangs-Druck $p_{L,0}$ von 0,3 bar und dem Maximaldruck $p_{L,max}$ von 2 bar, dieser Bereich ist in der Abbildung 2.2 gekennzeichnet. Die Öldifferenz in diesem Arbeitsbereich wird in dieser Arbeit als Arbeitsvolumen V_{AV} bezeichnet und ist abhängig von der Temperatur T_s . Für die Kurventemperatur 293 K bzw. 20 °C ergibt sich bei einem NKT90/0,3 ein Arbeitsvolumen von 86,33 l. Das Arbeitsvolumen steht für den Ausgleich, d.h. die Aufnahme bzw. Abgabe von Öl, zur Verfügung.

$$V_{AV}(T_s) = V_{\text{Ö}}(p_{max}, T_s) - V_{\text{Ö}}(p_{L,0}, T_s) \quad (2.23)$$

$$V_{AV}(T_s) = V_{L,0} \cdot \left(1 - \frac{p_{L,0}}{p_{L,max}} \cdot \frac{T_s}{T_{L,0}}\right) - V_{L,0} \cdot \left(1 - \frac{p_{L,0}}{p_{L,0}} \cdot \frac{T_s}{T_{L,0}}\right) \quad (2.24)$$

$$V_{AV}(T_s) = V_{L,0} \cdot \frac{T_s}{T_{L,0}} \cdot \left(1 - \frac{p_{L,0}}{p_{L,max}}\right) \quad (2.25)$$

Aus der Berechnung des Arbeitsvolumens kann eine lineare Abhängigkeit zur Temperatur beobachtet werden. Hier zeigt sich das Gesetz von Gay-Lussac. (vgl. Kapitel 2.1.2) Wenn von einer Temperaturänderung ΔT_s ausgegangen wird, ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\Delta V_{AV}(\Delta T_s) = V_{L,0} \cdot \frac{\Delta T_s}{T_{L,0}} \cdot \left(1 - \frac{p_{L,0}}{p_{L,max}}\right) \quad (2.26)$$

In Abbildung 2.4 ist der Zusammenhang graphisch dargestellt. Bei einer Temperaturänderung von 5 °C vergrößert sich das Arbeitsvolumen bei einem NKT90/0,3 um 2,21 l. Dieser

Umstand ist bei einer Messung nicht zu vernachlässigen, da durch die Abwärme der Pumpe in der Ölaufbereitungsanlage das Öl schnell um 5°C erwärmt werden kann. Dies kann zu einer abweichenden Volumen-Druck-Kurve beim Befüllen und Entleeren eines ÖAGs führen. Die ständige Temperaturmessung des Öls bei beiden Vorgängen ist deshalb unbedingt notwendig. In Kapitel 5.1 werden mehrere reale Messungen von ÖAGs dargestellt, hier lassen sich die Temperaturunterschiede deutlich in den Volumen-Druck-Kurven erkennen.

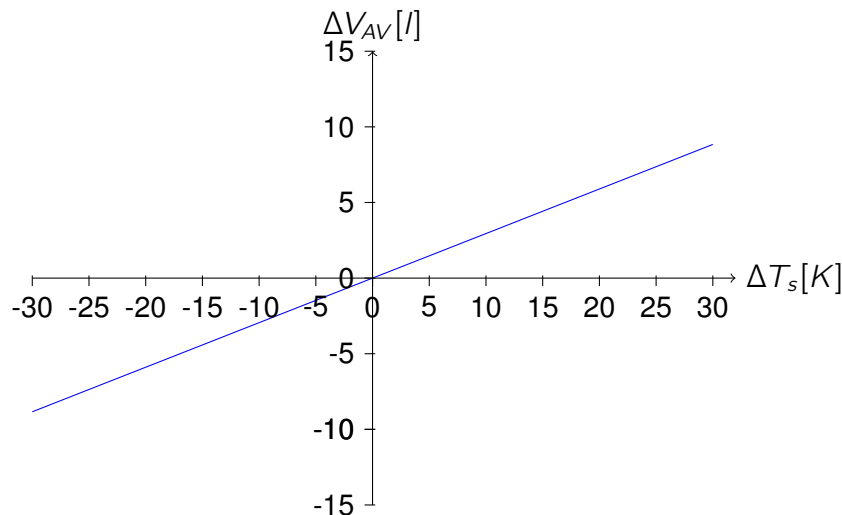


Abbildung 2.4.: Arbeitsvolumen Veränderung ΔV_{AV} bei Temperaturschwankungen NKT90/0,3 (Quelle: eigene Darstellung)

2.2.4. defekte Ölausgleichsgefäße

Ein Ölausgleichsgefäß kann in seinem Nutzungszeitraum einem Verschleiß unterliegen. Die Zellen werden mechanisch belastet oder Korrosionserscheinungen (Erklärung in Kapitel 1.7) können auftreten. Es kann dazu kommen, dass Gas aus den Zellen austritt und sich einerseits im Ölausgleichsgefäß an der Oberseite sammelt oder über lange Zeit mit dem Öl chemische Reaktionen eingeht. Wenn das Ölkabelsystem nicht entlüftet wird, steht die Luft bis dahin weiterhin für das Ausgleichsverhalten zur Verfügung. Die geringere Isolierfähigkeit von Reaktionsprodukten oder kleine Gasbläschen bergen dennoch die Gefahr für Durchschläge in den Ölkabeln. Bei einer Prüfung eines Ölausgleichsgefäßes sollte dieses immer auch „gespült“ werden, d.h. das ÖAG wird so hingestellt, dass sich der Auslass-Anschluss oben befindet. Im ÖAG gesammelte Luft steigt nach oben und wird bei einer Entleerung zusammen mit dem Öl aus dem Tank befördert. Nun ist im Tank nur das tatsächliche Luftvolumen in den Metallzellen vorhanden. Hierdurch kann bei einer nachfolgenden Volumen-Druck-Messung das tatsächliche noch vorhandene Ausgleichsverhalten ermittelt werden. Wenn

man davon ausgeht, dass sich eine Zelle teilweise mit Öl füllt und die fehlende Luft nicht mehr im Tank vorhanden ist (durch „Spülung“ etc.), dann bedeutet dies ein Absinken des Anfangs-Luftvolumens und ein Steigen des Totölvolumens. Das Totölvolumen fließt nicht in die Berechnung der Volumen-Druck-Kurve ein (Formel 2.19). Für das veränderte Anfangs-Luftvolumen lässt sich ein Faktor n_L einführen, der im Bereich von 0 bis 1 beschreibt, wie viel Luftvolumen noch zum Ausgleich zur Verfügung steht. Folgende Formel ergibt sich dann:

$$V_{\dot{O}}(p_s, T_s, n_L) = V_{S,0} + n_L \cdot V_{L,0} \cdot \left(1 - \frac{p_{L,0}}{p_s} \cdot \frac{T_s}{T_{L,0}}\right) \quad (2.27)$$

In Abbildung 2.5 sind für n_L von 100 % bis 70 % die veränderten Volumen-Druck-Kurven dargestellt. Es zeigt sich, dass nun bis zum Maximaldruck $p_{L,max}$ von 2 bar ein kleineres Arbeitsvolumen zur Verfügung steht. Bei bisherigen händischen Messungen an ÖAGs und deren Auswertungen konnte gezeigt werden, dass eine Reduzierung des Anfangsluftvolumens in der Modellfunktion den realen Kurvenverlauf eines defekten Tanks tatsächlich beschreiben kann. (vgl. Ahrens (2015)) Auch für die direkte Berechnung des Arbeitsvolumens kann der Faktor n_L in der Formel 2.26 eingeführt werden:

$$\Delta V_{AV}(\Delta T_s) = n_L \cdot V_{L,0} \cdot \frac{\Delta T_s}{T_{L,0}} \cdot \left(1 - \frac{p_{L,0}}{p_{L,max}}\right) \quad (2.28)$$

Hierbei lässt sich erkennen, dass das Arbeitsvolumen direkt proportional zum Faktor n_L ist.

2.2.5. Bestimmung des Anfangs-Luftvolumens einer Messkurve

Das wichtigste Maß für die Aussage, ob ein Ölausgleichsgefäß weiterhin verwendet werden kann, ist die Bestimmung des noch vorhandenen Anfangsluftvolumens $V_{L,0}$. Dieses beschreibt, welches Volumen für eine Ausregelung zur Verfügung steht. Im Gegensatz zum Arbeitsvolumen ist dieses für die Kurventemperatur festgelegt und ermöglicht so einen guten Vergleich mit anderen Tanks. Der in den vorherigen Kapiteln eingeführte Faktor n_L beschreibt das noch zur Verfügung stehende Anfangs-Luftvolumen als normierter Faktor. Die Ermittlung dieses Faktors aus einer Volumen-Druck-Messung mit diskreten Messwerten soll Gegenstand dieses Kapitels sein. Es ist zu berücksichtigen, dass das tatsächliche Volumen im Tank bei einer Entleeren-Messung nie bekannt ist, da von einem geschätzten Volumen eines heilen Tanks abwärts die Teilvolumina subtrahiert werden bzw. beim Befüllen aufwärts addiert werden. Für eine bessere Übersichtlichkeit wird der Summand V_{off} in der Formel 2.27 eingeführt, mit dem die berechnete Kurve so verschiebbar ist, dass ein einfacher Vergleich möglich ist. Hieraus entsteht nun die Modellfunktion 2.29, mithilfe derer der Parameter

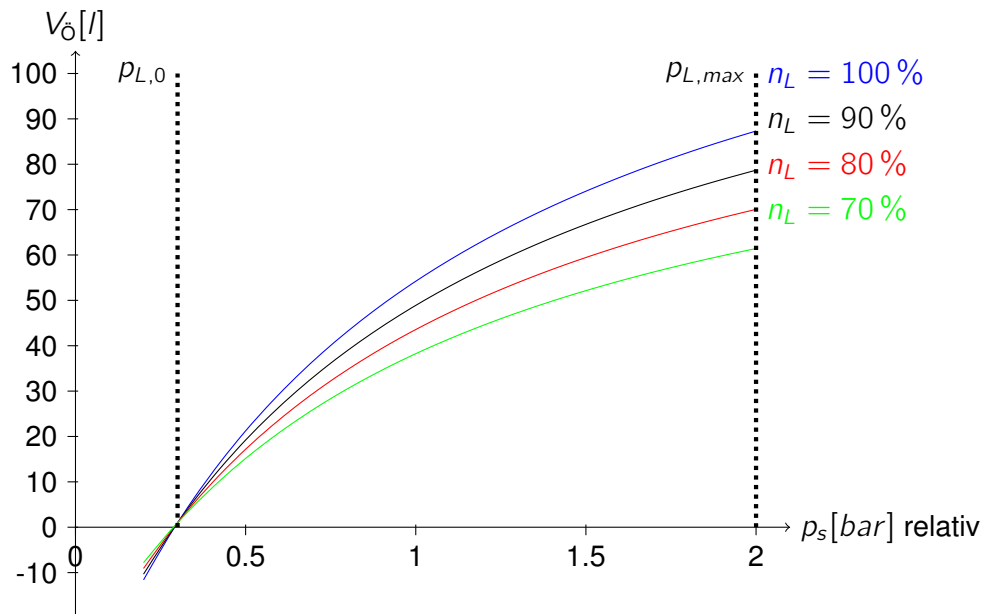


Abbildung 2.5.: theoretische Volumen-Druck-Kurven NKT90/0,3 für $T_s = 20^\circ\text{C}$ und verschiedene Anfangs-Luftvolumen $V_{L,0}$ (Quelle: eigene Darstellung)

n_L aus den Messwerten angenähert bestimmt werden kann.

$$V_{\dot{0}}(p_s, T_s, n_L) = V_{off} + V_{S,0} + n_L \cdot V_{L,0} \cdot \left(1 - \frac{p_{L,0}}{p_s} \cdot \frac{T_s}{T_{L,0}}\right) \quad (2.29)$$

Für eine Bestimmung des Parameters n_L aus einer Messung mit dem Prüfstand bieten sich zwei Verfahren an:

- **Methode der kleinsten Quadrate (kurz: KQ-Methode):** Zur Bestimmung des Parameters n_L und eines Verschiebungsoffsets V_{off} werden für alle Punkte die minimalen Fehlerquadrate zu der Modellfunktion berechnet. Für die Parameter-Bestimmung wird die Modellfunktion 2.29 verwendet. Diese ist hier in ausmultiplizierter Form:

$$V_{\dot{0}}(p_s, T_s, n_L) = [V_{off} + V_{S,0} + n_L \cdot V_{L,0}] - [n_L \cdot V_{L,0} \cdot p_{L,0} \cdot \frac{T_s}{T_{L,0}}] \cdot p_s^{-1} \quad (2.30)$$

Die Modellparameter lassen sich zur besseren Übersichtlichkeit zu α_0 und α_1 zusammenfassen.

$$V_{\dot{0}}(p_s, T_s, n_L) = \alpha_0 - \alpha_1 \cdot p_s^{-1} \quad (2.31)$$

Es lässt sich erkennen, dass sich die Gleichung durch eine einfache Substitution $x = p_s^{-1}$ in eine lineare Gleichung umwandeln lässt. Diese Substitution ermöglicht es, eine einfache lineare Regression für die KQ-Methode anzuwenden. Die lineare Regression soll hier nicht im Einzelnen erläutert werden. Ein Literaturbezug ist [Frost \(2018\)](#).

$$x = p_s^{-1}, y = V_{\bar{O}}(p_s, T_s, n_L) \quad (2.32)$$

$$y = \alpha_0 - \alpha_1 \cdot x \quad (2.33)$$

Die Parameter α_0 und α_1 der am besten angepassten linearen Funktion berechnen sich folgendermaßen (vgl. [Frost \(2018\)](#)):

$$\alpha_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, a_0 = \bar{y} - a_1 \cdot \bar{x} \quad (2.34)$$

Hierbei entsprechen \bar{x} und \bar{y} den Mittelwerten aller Messwerte. x_i ist aufgrund der Substitution der Kehrwert des gemessenen Druckwertes p_s . y_i entspricht dem gemessenen Volumen $V_{\bar{O}}$ zum selben Messzeitpunkt i .

Die gesuchten Modellparameter lassen sich folgendermaßen zurückberechnen:

$$n_L = \frac{-\alpha_1 \cdot T_{L,0}}{V_{L,0} \cdot p_{L,0} \cdot T_s} \quad (2.35)$$

$$V_{off} = \alpha_0 - V_{s,0} - n_L \cdot V_{L,0} \quad (2.36)$$

- **Verhältnisbildung der Volumendifferenz mit einem heilen Tank:** Hierbei wird das gemessene Ölvolumen zwischen zwei Druckwerten $V_{\bar{O},mess}(p_2, p_1)$ mit dem theoretischen Ölvolumen für dieselben Druckwerte $V_{\bar{O},theor}(p_2, p_1)$ verglichen. Für die Berechnung des theoretischen Ölvolumens wird ein n_L von 1 vorausgesetzt. Der Quotient aus den beiden Volumendifferenzen ergibt gerade den Faktor n_L :

$$\begin{aligned} n_L &= \frac{\Delta V_{\bar{O},mess}(p_2, p_1)}{\Delta V_{\bar{O},theor}(p_2, p_1)} = \frac{V_{\bar{O},mess}(p_2) - V_{\bar{O},mess}(p_1)}{V_{\bar{O},theor}(p_2) - V_{\bar{O},theor}(p_1)} \quad (2.37) \\ &= \frac{V_{off} + V_{s,0} + n_L \cdot V_{L,0} \cdot \left(1 - \frac{p_{L,0}}{p_2} \cdot \frac{T_s}{T_{L,0}}\right) - [V_{off} + V_{s,0} + n_L \cdot V_{L,0} \cdot \left(1 - \frac{p_{L,0}}{p_1} \cdot \frac{T_s}{T_{L,0}}\right)]}{V_{s,0} + V_{L,0} \cdot \left(1 - \frac{p_{L,0}}{p_2} \cdot \frac{T_s}{T_{L,0}}\right) - [V_{s,0} + V_{L,0} \cdot \left(1 - \frac{p_{L,0}}{p_1} \cdot \frac{T_s}{T_{L,0}}\right)]} \end{aligned}$$

$$= \frac{n_L \cdot [V_{L,0} \cdot (1 - \frac{p_{L,0}}{p_2} \cdot \frac{T_s}{T_{L,0}}) - V_{L,0} \cdot (1 - \frac{p_{L,0}}{p_1} \cdot \frac{T_s}{T_{L,0}})]}{V_{L,0} \cdot (1 - \frac{p_{L,0}}{p_2} \cdot \frac{T_s}{T_{L,0}}) - V_{L,0} \cdot (1 - \frac{p_{L,0}}{p_1} \cdot \frac{T_s}{T_{L,0}})} = n_L$$

Das zweite Verfahren ist eine starke Näherung bezüglich der Berechnung des noch vorhandenen prozentualen Anfangsluftvolumens, da sich der Kurvenverlauf zwischen den für die Berechnung verwendeten Wertepaaren deutlich von der gemessenen Kurve unterscheiden kann. Die äußersten Wertepaare sind dennoch die aussagekräftigsten. Sie grenzen den Arbeitsbereich des ÖAGs ein und definieren das Arbeitsvolumen. Wie in Kapitel 2.2.3 gezeigt, ist jedoch das Arbeitsvolumen temperaturabhängig und für einen direkten Vergleich zu anderen Messungen ungeeignet. Das Anfangs-Luftvolumen ist dagegen auf eine Temperatur $T_{L,0}$ normiert.

In Abbildung 2.6 sind vier theoretische Messwerte eines Tanks mit $n_L = 70\%$ Anfangsluftvolumen dargestellt. Die Kurve ist um $V_{off} = 26.89$ l nach oben verschoben. Die Messwerte wurden bewusst in der Mitte der Messung gewählt.

Nun kann mithilfe der Formel 2.37 der Parameter n_L aus beliebigen zwei Punkten der Messung bestimmt werden. (Da es sich hier um eine theoretische „Messkurve“ handelt, kommt bei beliebiger Wahl der Messpunkte ein exaktes Ergebnis heraus.)

$$n_L = \frac{V_{\ddot{O},mess}(p_2) - V_{\ddot{O},mess}(p_1)}{V_{\ddot{O},theor}(p_2) - V_{\ddot{O},theor}(p_1)} = \frac{78,04l - 46,82l}{74,06l - 29,46l} = 0,7 \quad (2.38)$$

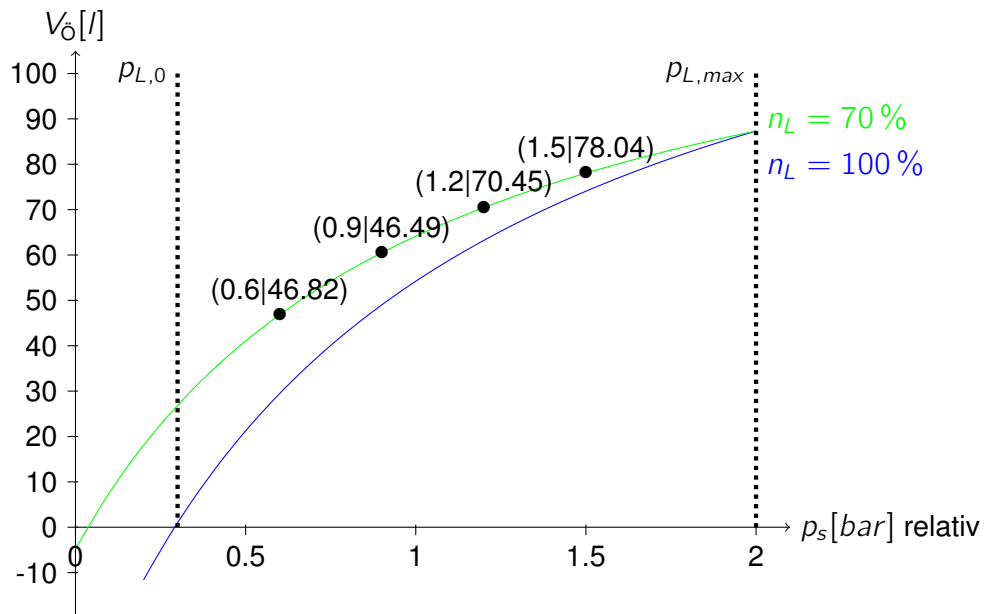


Abbildung 2.6.: Bestimmung des Anfangs-Luftvolumens mithilfe einer Punktwolke (NKT90/0,3 für $T_s = 20^\circ\text{C}$) (Quelle: eigene Darstellung)

3. Praktische Vorarbeiten

3.1. Grundlagen zur Ölaufbereitungsanlage

Um ein ÖAG mit Öl zu befüllen, wird mindestens eine Pumpe benötigt. Das Entleeren ist aufgrund des Überdrucks im ÖAG auch ohne Pumpe möglich. Im Idealfall sollte das Öl vor der Befüllung von Fremdstoffen, wie Gasen (Entgasung), Wasser (Trocknung) oder anderen Partikeln, gereinigt werden.



Abbildung 3.1.: Bild der Ölaufbereitungsanlage (Quelle: eigenes Foto)

Für die Abteilung 110-kV-Kabelanlagen ist eine neue Aufbereitungsanlage angeschafft worden, die diese Reinigungsfunktionen beinhaltet. (Abbildung 3.1) Sie ist auch deutlich leistungsfähiger als das Vorgängermodell der Abteilung. Es handelt sich um eine spezialangefertigte Ölaufbereitungsanlage des Typs ORA 200_So der Firma AAN (Apparate- und Anlagentechnik Nürnberg GmbH). Diese hat einen eingebauten Entgasungskessel mit einem

Volumen von ca. 220 Litern. In diesem kann ein Vakuum erzeugt werden, welches dem Öl Gas entzieht. Zusätzlich kann das Öl in einem internen Kreislauf umgewälzt und auf bis zu 60 °C erhitzt werden. (vgl. [AAN GmbH \(2015\)](#)). Durch die Umwälzung und Einspritzung mithilfe einer Düse zurück in den Kessel, kann die Oberfläche des Öls erhöht werden, um mehr Gas zu entziehen. Die Anlage kann bis zu 200 l/h Öl zur Reinigung fördern.

Der Prüfstand soll mit dieser Aufbereitungsanlage betrieben werden, um ein ÖAG zu befüllen oder zu entleeren. Hierfür sind einige Modifikationen des Prüfstandes notwendig, da dieser ehemals für eine leistungsschwächere Aufbereitungsanlage ohne eigenen Kessel und geschlossenen Ölkreislauf vorgesehen war. Die notwendigen Umbauten am Rohrsystem werden in Kapitel 4.2 beschrieben. Es soll außerdem eine Kommunikationsschnittstelle in der Aufbereitungsanlage ergänzt werden, um die wichtigsten Funktionen vom Prüfstand automatisiert steuern zu können. Dieser Umbau wird in Kapitel 4.3 dargestellt.

Die wichtigsten Funktionen der Aufbereitungsanlage sind folgende:

- **Evakuieren**

Beim Evakuieren wird im Entgasungskessel der Aufbereitungsanlage ein Vakuum erzeugt (der Kessel wird von Gas evakuiert), gleichzeitig kann hierbei das Öl aus einem Ölausgleichsgefäß gesogen werden. Es ist relevant, dass der Durchfluss sowohl durch den Überdruck im Tank als auch durch den Unterdruck im Kessel hervorgerufen wird. Beim Evakuieren wird das Öl durch einen Grobfilter von Schwebeteilchen gereinigt. Die Entleerung eines ÖAGs muss spätestens unterbrochen werden, wenn der Minimaldruck im Tank erreicht wurde oder wenn der Kessel sein Maximalvolumen erreicht hat. Beim Maximalvolumen schaltet sich die Aufbereitungsanlage automatisch ab. Um das weitere Entleeren eines Tanks mit Minimaldruck zu stoppen, muss der Prüfstand den Ölfluss automatisch durch ein Schließen des Magnetventils V_M2 beenden.

- **Abpumpen**

Beim Abpumpen wird mithilfe einer Pumpe das aufbereitete Öl aus dem Entgasungskessel in ein Ölausgleichsgefäß gepumpt. Beim Austritt wird das Öl nochmals durch einen Feinfilter gesäubert. Der Durchfluss kann mit einem manuellen Drosselventil an der Aufbereitungsanlage gedrosselt werden. Wenn der Kessel einen Minimalstand unterschreitet, schaltet sich die Pumpe automatisch ab. Der Prozess muss gestoppt werden, wenn der Maximaldruck des ÖAGs erreicht wurde. Hierbei darf kein Magnetventil des Prüfstandes den Durchfluss bei arbeitender Pumpe einfach unterbrechen, da sich in kurzer Zeit ein sehr hoher Druck aufbaut. Dies kann im schlimmsten Fall zu einem Ölaustritt oder geplatzten Schlauch führen. Um diesen Fall zu verhindern muss ein neues Konzept für den Umbau des Prüfstandes überlegt werden. Eine neue Betriebsart (Umlaufbetrieb) und eine Kommunikationsverbindung zur Aufbereitungsanlage werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt. Die Aufbereitungsanlage hat als Si-

cherheitsvorkehrung einen digitalen Druckschalter, der die Pumpe bei ca. 4 bar Druck (justierbar) am Ausfluss abschaltet.

- **Öl-Reinigung (Entgasung)**

Bevor ein Tank befüllt wird, sollte das Öl entgast werden. Hierfür pumpt eine Umwälzpumpe das Öl im Kreis. Hier kann zusätzlich eine Heizung zugeschaltet werden, die das Öl auf bis zu 60 °C erwärmt. Die Vakuumpumpe läuft während des gesamten Vorgangs. Die Entgasung sollte solange laufen, bis der Druck im Entgasungskessel nicht mehr merklich sinkt. Das bedeutet, dass sich kaum noch Gas aus dem Öl lösen lässt.

3.2. Istzustand des Prüfstandes vor Arbeitsbeginn

Der Prüfstand ist eine automatisierte, mobile Anlage, die mithilfe von Ventilen, Durchfluss- und Drucksensoren ein iteratives Befüllen und Entleeren eines ÖAGs ermöglicht und daraus eine Volumen-Druck-Kurve erstellt. Der Prüfstand selber kann dabei den Ölfluss nur steuern, der Druck zum Befüllen und das Vakuum zum Entleeren werden dabei von der Ölaufbereitungsanlage zur Verfügung gestellt. Im Folgenden wird der Aufbau des Prüfstandes vor Arbeitsbeginn beschrieben.

3.2.1. Beschreibung des Rohrsystems mit Sensoren und Aktoren

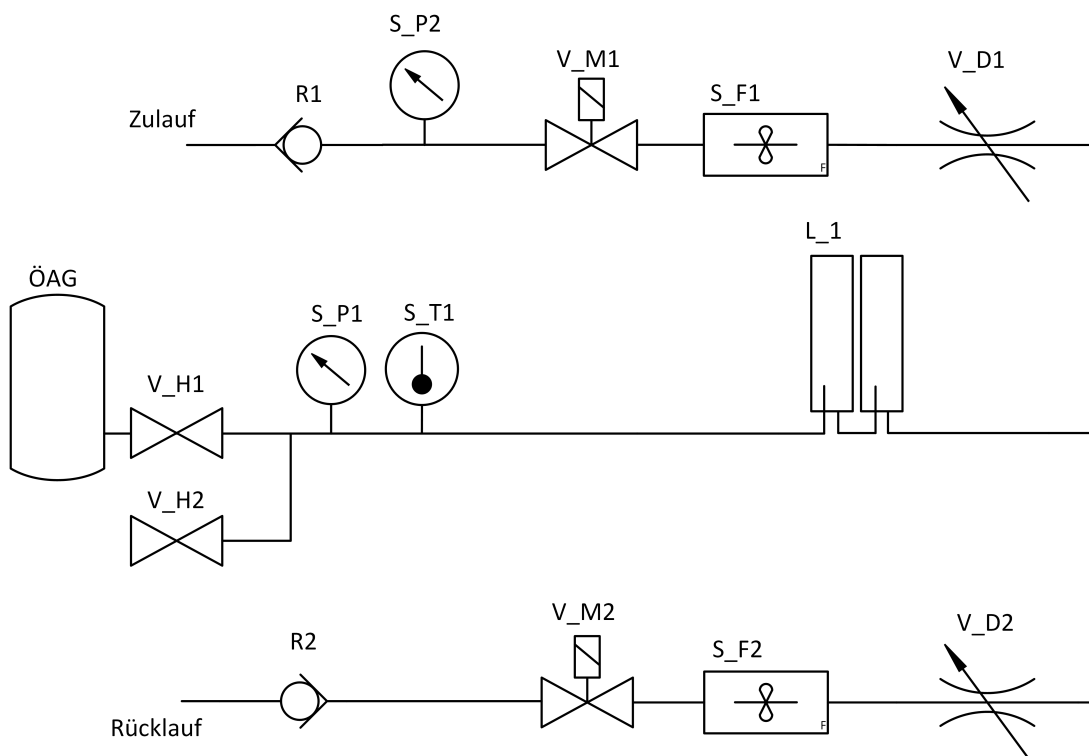


Abbildung 3.2.: schematische Darstellung des Rohrsystems vom Prüfstand vor Arbeitsbeginn (Quelle: eigene Darstellung)

Der Prüfstand ist ein auf Rollen aufgebautes Metallgerüst. In der Mitte ist eine Spanplatte befestigt, auf der das Rohrsystem mithilfe von Plastik-Schellen montiert ist. Das Rohrsystem ist dreigeteilt in einen oberen, mittleren und unteren Zweig. In [Abbildung 3.2](#) ist das Rohrsystem mit den entsprechenden Aktoren/Sensoren schematisch dargestellt. Am oberen Zweig wird

die Zuleitung von der Ölaufbereitungsanlage angeschlossen. Hier wird das Isolieröl bereits aufbereitet und unter Druck in das System gedrückt.

- Ein **Rückschlagventil (R_1)** dient als Sicherheit, dass kein Öl durch fehlerhaften Anschluss in die falsche Richtung fließt.
- Ein **Drucksensor (S_P2)** dient dem elektronischen Erfassen des Drucks der Ölaufbereitungsanlage für den Befüllvorgang.
- Ein **Magnetventil (V_M1)** dient dem gesteuerten Absperrern des Zulaufs.
- Anschließend folgt eine **Durchflussmessturbine (S_F1)** zur elektrischen Messung des Volumenstroms.
- Dann folgt als letztes Glied ein **Drosselventil (V_D1)** zum Begrenzen des Durchflusses.

Der untere Teil des Systems ist ähnlich wie der obere Teil aufgebaut, mit den beiden Unterschieden, dass das Rückschlagventil in umgekehrter Richtung eingebaut ist und kein Drucksensor vorhanden ist. Dieser Zweig dient dem Entleeren des ÖAGs. Die Bauteile haben die Kürzel: **R_2, V_M2, S_F2, V_D2**

Im mittleren Zweig ist auf der linken Seite eine Gabelung mit zwei Handventilen (**V_H1, V_H2**) für den Anschluss von zwei separaten ÖAGs, um einen schnellen Wechsel zwischen ÖAGs zu ermöglichen. Anschließend folgen ein **Temperatursensor (S_T)** und ein **Drucksensor (S_P1)**, um den vorhandenen Druck im ÖAG zu messen und die Temperatur des Öls zu bestimmen. Als letztes Glied im mittleren Zweig folgt eine zweigeteilte **Luftfalle (L_1)**, in der sich vorhandene Luft des Rohrsystems sammelt und mithilfe von zwei Ventilen abgelassen werden kann. Zu Beginn werden so sämtliche Schläuche und Rohre mit einer Spülung von Luft befreit. Die Luftfalle zeigt den Fortschritt an. Auch ist es möglich, dass Gas aus defekten Zellen beim Entleeren der ÖAGs durch den Prüfstand fließt, auch hier dient die Luftfalle einer optischen Überwachung. (vgl. Kühne (2016a))

In Tabelle 3.1 sind die genauen Typbezeichnungen der Sensoren und Aktoren sowie deren Ausgangssignale bzw. Eingangssignale aufgelistet.

3.2.2. Beschreibung der Bauelemente im Schaltschrank

Auf der gegenüberliegenden Seite des Rohrsystems befindet sich ein Schaltschrank mit der Steuerelektronik (Abbildung 3.3). Die Prozesssteuerung wird von einer SPS vom Typ S7-314C-2 PN/DP übernommen. Diese hat 24 Digitaleingänge und 16 Digitalausgänge. Zusätzlich sind 4 Analogeingänge und 2 Analogausgänge vorhanden. (vgl. Siemens (2017))

Tabelle 3.1.: Aktoren/Sensoren auf dem Prüfstand mit Messbereich

Sensor	Modell	Kürzel	Signalhub	Messspanne
Durchflussmessturbine	Stauff PPC-04/12	S_F1	0 - 3 V DC	1 - 15 l/min
Durchflussmessturbine	SFM-015	S_F2		
Drucksensor	Stauff PPC-04/12	S_P1	0 - 3 V DC	-1 - 15 bar (relativ)
Drucksensor	PT-015/2	S_P2		
Temperatursensor	PT100	S_T	/	-200 °C - 850 °C
Aktoren	Modell	Kürzel	Signalhub	Aktion
Magnetventil	2/2-Wege Magnetventil	V_M1	24 V DC (digital) (Schütz)	Zu/auf
Magnetventil	M2120220V00	V_M2		
Drosselventil	Asco SCG203B002	V_D1	4 - 20 mA	0 % - 100 %
Drosselventil		V_D2		

Es wurde das Zusatzmodul DO 8x24VDC/2A mit 8 zusätzlichen Digitalausgängen ergänzt. Außerdem ist ein Siemens Touchpanel (Simatic HMI TP700 COMFORT) mit der SPS verbunden.

Es sind zwei Netzteile für eine 12-V und 24-V Versorgung vorhanden. Die SPS wird mit 24 V versorgt. Die Sensoren haben zum Teil eine 12-V-Versorgung. Zwei Schütze (Q1 und Q2) dienen der Ansteuerung der Magnetventile, die mit 230 V angesteuert werden und das Schaltsignal der SPS (24 V) übersetzen. Im Schaltschrank sind für die Absicherung außerdem Sicherungsautomaten mit unterschiedlichen Auslöseströmen vorhanden und ein PNOTZ Sicherheitsschaltgerät verbaut mit einer redundanten Notausschleife. Im Gefahrenfall kann durch das Betätigen des Notaus-Piltasters die Spannungsversorgung der Magnetventile unterbrochen werden, sodass evtl. austretendes Öl gestoppt wird. Die Rücksetzung des Sicherheitsschaltgeräts findet durch die SPS statt. Der Steuerschrank wurde in Kooperation mit dem Bildungszentrum der Vattenfall Wärme GmbH geplant und zum Großteil von Auszubildenden zusammengebaut. (vgl. Kühne (2016a))



Abbildung 3.3.: Bild des Schaltschranks (Stand bei Abgabe dieser Arbeit) (Quelle: eigenes Foto)

3.3. Programmiersprachen - Vergleich

Die S7-300 lässt sich mit unterschiedlichen Programmiersprachen programmieren. Diese Sprachen sind für speicherprogrammierbare Steuerungen allgemein in der EN61131-3 festgelegt. In Folgendem soll ein kurzer Vergleich der möglichen Sprachen stattfinden und anschließend eine Entscheidung für die Auswahl gemacht werden.

- **strukturierter Text (ST), structured control language (SCL):**
Die Sprache ST ähnelt der Hochsprache C bzw. Pascal und bietet durch die Syntax gute Strukturierungsmöglichkeiten. Mathematische Formeln lassen sich deutlich übersichtlicher programmieren als z.B. bei AWL.
- **Anweisungsliste (AWL), instruction list (IL):**
Die Sprache AWL ähnelt der Syntax von Assembler und ermöglicht hardwarenahes Programmieren. Für mathematische Formeln sind umständliche Ladevorgänge in ein Arbeitsregister (Akkumulator) nötig, die manuell programmiert werden müssen. Strukturierung ist mit Sprungbefehlen sehr umständlich.
- **Funktionsbausteinsprache (FBS), Funktionsplan (FUP)**
FUP ist eine graphisch orientierte Programmiersprache, bei der Symbole für boolsche Verknüpfungen verwendet werden. So können durch einfaches Verbinden solcher Bausteine verknüpfte Steuerungen programmiert werden. Sie ist deshalb bei Anfängern beliebt.
- **Kontaktplan (KOP), ladder diagram (LD):**
KOP ist wie FUP eine graphische Programmiersprache. Sie ist wie FUP besonders für Verknüpfungssteuerungen sinnvoll. Sie erinnert an einen elektrischen Stromlaufplan.
- **Ablaufsprache (AS), sequential function chart (SFC):**
Die AS ist eine Sprache zur erleichterten Programmierung von Schrittketten. Sie erinnert an das Petrinetz. Durch Transitionen kann eine Bedingung für das „Weiterschalten“ der Schrittkette gesetzt werden.

3.4. Anforderungen und Auswahl der Programmiersprache

Für die Steuerung des Prüfstandes wird eine Ablaufsteuerung benötigt, die Messdaten aufzeichnen und archivieren kann und Kennlinien mithilfe von Formeln berechnen und vergleichen kann. Die Programmiersprache muss sinnvoll strukturierbar sein.

Da die Programmierung des Prüfstandes zum Großteil überarbeitet werden soll, wird hier eine Neuauswahl der Programmiersprache getroffen. Bisher wurde der größte Teil der Programmierung mit der Ablaufsprache (AS) programmiert. (vgl. Kühne (2016a))

Die graphischen Programmiersprachen FUP und KOP sind für den Einsatzzweck zwar geeignet, aber die Berechnung der Volumenkurve würde mit der symbolischen Programmierung sehr umständlich und schnell unübersichtlich werden. AWL ist aufgrund fehlender einfacher Strukturierungsmöglichkeiten ebenfalls ungeeignet. Die Ablaufsprache (AS) oder der strukturierte Text (ST) erscheinen sinnvoll. Die Ablaufsprache ermöglicht eine übersichtliche Darstellung von Schrittketten, die hier angebracht ist. Die Möglichkeiten im Umgang mit Formeln und Arrays sind allerdings eingeschränkt, sodass zusätzlich eine 2. Programmiersprache zum Einsatz kommen müsste. Dies ist mithilfe von Unterfunktionen möglich. Um dieses Springen von Programmiersprachen jedoch zu vermeiden, soll in diesem Projekt für die gesamte Programmierung der strukturierte Text (ST) genutzt werden. ST ist die einzige Hochsprache unter den Programmiersprachen. Sie ist ein sehr mächtiges Werkzeug. Komplexe Berechnungen lassen sich sehr einfach implementieren. Durch die Nutzung von Arrays können Messwerte gut gespeichert und verwertet werden. ST selber bietet keine graphische Strukturierung der Ablaufschritte, dennoch ist eine gute Strukturierung durch die Syntax selbst möglich. In Kapitel 3.5 wird ein separates graphisches Verfahren (UML statechart) zur Modellierung von Software vorgestellt, welches sich einfach in ST übersetzen lässt.

3.5. Modellierung von Software

Um bei der Softwareentwicklung dem Wunsche des Kunden bzw. Auftraggebers möglichst nahe zu kommen, ist es sinnvoll, im Vorfeld einen Entwurf der Software zu machen. Dieser Entwurf kann vor der Implementierung der Software mit dem Kunden durchgesprochen werden. Für den Entwurf gibt es viele Ansätze zur Darstellung von Steuerungsaufgaben. Eine Möglichkeit ist die Nutzung der UML (unified modeling language). „Die UML definiert eine allgemeine verwendbare Modellierungssprache (auch Notation genannt). [...] Sie stellt Diagramme und Notationselemente (= einzelne Bestandteile der Diagramme) zur Verfügung, mit deren Hilfe sowohl statische als auch dynamische Aspekte beliebiger Anwendungsgebiete modelliert werden können.“ (Kechner und Salvanos (2015), S.20)

Die UML ist ein sehr mächtiges Werkzeug zur Softwareentwicklung. Sie untergliedert sich in folgende Modellierungsarten (vgl. Kechner und Salvanos (2015)):

- Strukturmodellierung: Bei der Strukturmodellierung können Klassen, Assoziationen, Pakete und Komponenten modelliert werden.

- Verhaltensmodellierung: Das Verhaltensmodell beschreibt Zustände eines Systems und dessen Veränderungen bei Interaktionen.
- Ergänzungsmodellierung: Die Ergänzungsmodellierung bietet weitere Möglichkeiten der Beschreibung bei der Softwareentwicklung.

Im folgenden Abschnitt soll das Zustandsdiagramm erklärt werden. Es gehört zur Gruppe der Verhaltensmodelle der UML und eignet sich sehr gut für die Modellierung von Steuerungsaufgaben.

3.5.1. Zustandsdiagramm (UML statechart)

Ein Zustandsdiagramm (engl. statechart oder state machine) dient der Beschreibung von Zuständen und deren Übergängen. Das Zustandsdiagramm ähnelt in den Grundzügen dem Petrinetz und dem Grafocet. Es weist allerdings Vorteile bei der Nutzung von Hochsprachen, wie ST, auf, da der Code direkt in die Zustände geschrieben werden kann. Die Übersichtlichkeit bleibt durch die graphische Darstellung dennoch gewahrt. Ein Zustandsdiagramm lässt sich mithilfe von systematischem Vorgehen in ST übersetzen. (siehe Kapitel 3.5.2)

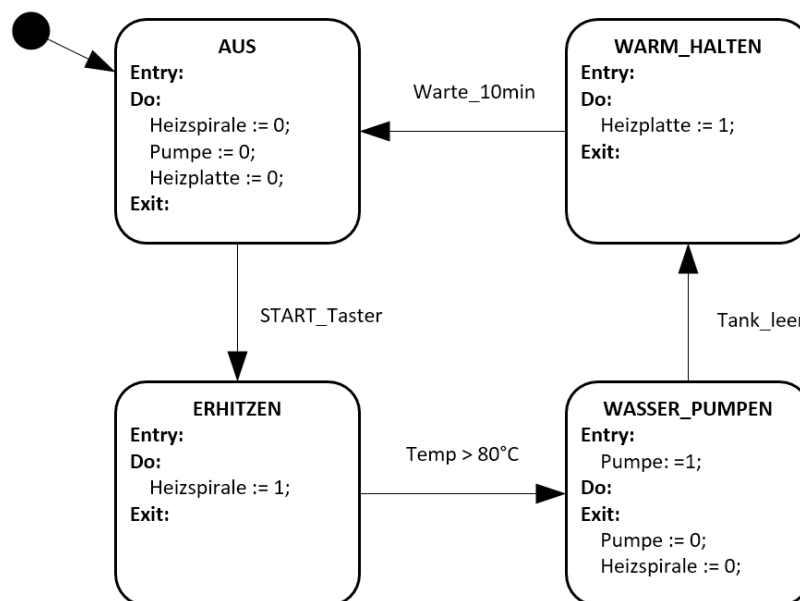


Abbildung 3.4.: Beispiel UML statechart: Kaffeemaschine (eigene Darstellung)

Die Funktion eines UML statecharts soll hier anhand eines einfachen Prozesses (siehe Abbildung 3.4) erklärt werden. Es wird die Aufbereitung eines Kaffees in einer typischen Kaffeemaschine beschrieben.

Zustände und Verhalten

Es gibt sinnhaftig vier Zustände, die eine Kaffeemaschine haben kann. (AUS, ERHITZEN, WASSER_PUMPEN, WARM_HALTEN). „Ein Zustand (SimpleState) modelliert eine Situation, in der gewisse genau definierte Bedingungen gelten.“ (Kechner und Salvanos (2015), S. 311) Eine definierte Bedingung ist z.B. eine eingeschaltete Heizspirale (Heizspirale := 1) im Zustand ERHITZEN. Zustände werden durch abgerundete Rechtecke dargestellt. Die Bezeichnung des Zustandes befindet sich im oberen Teil des Rechtecks. Der Startzustand wird durch einen schwarzen Kreis symbolisiert. Der Startzustand wird sofort verlassen und der Übergang darf nicht durch eine Bedingung verhindert werden. Im Beispiel wird nach dem Startzustand sofort der Zustand AUS aufgerufen. Dieser Zustand kann als Ruhe-Zustand bezeichnet werden, da das System hier wartet, bis eine erste Interaktion auftritt, bzw. nach einem erfolgreichen Durchlauf der Schrittkette wieder hier verweilt. Innerhalb eines Zustandes sind drei typische Verhalten möglich (entry, exit, do):

- entry: Das Verhalten findet beim Aufruf des Zustandes statt.
- exit: Das Verhalten wird durch Verlassen eines Zustandes ausgelöst.
- do: Das Verhalten findet zyklisch (mit jedem Programmzyklus) statt.

Im Beispiel wird beim Aufruf des Zustands WASSER_PUMPEN die Pumpe beim ersten Aufruf des Zustandes eingeschaltet (Entry: Pumpe := 1) und beim Verlassen des Zustandes (Exit: Pumpe := 0) wieder ausgeschaltet.

Event und Transition

Die Übergänge (Transitionen) zwischen Zuständen werden durch Pfeile dargestellt. Eine Transition ermöglicht den Übergang zu einem anderen Zustand. Die Bedingung, wann der nächste Zustand aktiviert wird, ist abhängig von einer definierten Bedingung. Die Bedingung wird an den Pfeil geschrieben. Es gibt unterschiedliche Arten von Bedingungen. Diese können sowohl durch zeitliche (TimeEvent), boolesche (ChangeEvent) als auch asynchrone Signale (SignalEvent) aufgerufen werden. Im Beispiel kann durch das Drücken eines START_Tasters (ChangeEvent) z.B. vom Zustand AUS in den Zustand ERHITZEN gewechselt werden.

Startzustand/Endzustand/Terminator

Wie im Unterkapitel 3.5.1 schon beschrieben, gibt es einen Startzustand, der durch einen schwarzen Kreis symbolisiert wird. Das Ende eines Zustandsdiagrammes kann durch einen Endzustand symbolisiert werden. Dieser wird durch einen weißen Kreis mit einem kleineren schwarzen Kreis im Mittelpunkt dargestellt (Im Beispiel nicht vorhanden). Es kann beliebig viele Endzustände geben. Der Endzustand beendet ein Zustandsdiagramm auf der aktiven Ebene. Sind jedoch noch höhere Ebenen vorhanden, wird in diese höhere Ebene gesprungen. Neben dem Endzustand ist auch ein Terminator möglich, dieser wird durch ein schwarzes Kreuz symbolisiert. Dies ist eine Möglichkeit, ein Zustandsdiagramm auf allen Ebenen zu beenden, z.B. wenn ein kritischer Fehler auftritt.

3.5.2. Implementierung eines UML statecharts in Software

Um ein Modell eines Steuerungsprogramms in eine für eine SPS verständliche Sprache zu übersetzen, können viele Methoden angewandt werden.

Bei dieser Vorgehensmethode wird ein UML statechart in ST (strukturierten Text) übersetzt. Es wird für dieses Verfahren auf die Vorlesungsfolien (Prozessautomatisierung) von Herrn Prof. Dr. Maas (HAW Hamburg) verwiesen (Maaß (2017)). Als externe Quelle kann Kälin (2012) dienen. Das Verfahren wird hier im Detail erklärt, weil es für die Programmierung elementar ist. An der Methode wurden einige Veränderungen bezüglich der Verhaltenserkennung gemacht, die für diesen Einsatzzweck sinnvoll schienen.

Definierung von Zuständen

Die Programmierung eines UML statecharts in ST gestaltet sich wie folgt: Jeder Zustand wird durch eine eindeutige Kennzahl definiert (hier: 0 bis 3). Um das Programm übersichtlicher zu gestalten, werden nicht die Nummern direkt verwendet, sondern es werden Konstanten genutzt, deren Name dem Zustand entspricht. (z.B. AUS: INT = 0;)

```
1 CONSTANTS
2   AUS:           Int = 0; //Zustand AUS
3   ERHITZEN:     Int = 1; //Zustand ERHITZEN
4   WASSER_PUMPEN: Int = 2; //Zustand WASSER_PUMPEN
5   WARM_HALTEN:  Int = 3; //Zustand WARM_HALTEN
6 END_CONSTANTS
```

Listing 3.1: Definierung von Konstanten

Grundstruktur (Case-Schleife)

Das Grundkonstrukt für die Nutzung der Zustände ist eine CASE-Anweisung. Die Variable

state beinhaltet den Wert des aktuellen Zustandes. Wenn state = 1 ist bzw. state = ERHITZEN, wird im folgenden Programm in den entsprechenden Programmteil gesprungen und der dortige Code ausgeführt.

```
1 CASE state OF
2   AUS:           //Zustand AUS
3   ....
4   ERHITZEN:     //Zustand ERHITZEN
5   ....
6   WASSER_PUMPEN: //Zustand WASSER_PUMPEN
7   ....
8   WARM_HALTEN:  //Zustand WARM_HALTEN
9   ....
10 END_CASE;
```

Listing 3.2: Grundstruktur des Zustandsdiagramms

Transitionen und Übergänge

Um nun eine Transition, also einen Übergang zum nächsten Zustand, zu ermöglichen, wird in jedem Zustand am Ende eine IF-Anweisung mit der entsprechenden Bedingung festgelegt. Wenn die Bedingung erfüllt ist, wird der Variable state der neue Zustand zugewiesen:

```
1 CASE state OF
2   AUS:
3   ...
4   IF START_Taster THEN
5     state:= ERHITZEN;           //naechster Zustand
6   END_IF
7
8   ERHITZEN:
9   ...
10  IF Temp > 80 THEN
11    state := WASSER_PUMPEN;     //naechster Zustand
12  END_IF
13  ...
14 END_CASE;
```

Listing 3.3: Grundstruktur mit Transitionen

Verhalten (entry, do, exit)

Das eigentliche Verhalten der Zustände fehlt im obigem Quellcode jedoch noch. Es muss zwischen dem entry-, do- und exit-Verhalten unterschieden werden. Um ein entry-Verhalten zu detektieren, wird eine Art Flankenerkennung für die Variable state eingeführt. Wird ein neuer Zustand erkannt, wird die Variable entry einmalig auf HIGH gesetzt.

```

1 IF (state <> old_state) THEN
2   entry := 1;           //Zustand ist neu (entry = 1)
3 ELSE
4   entry := 0;           //Zustand ist nicht neu (entry = 0)
5 END_IF;
6 old_state := state;

```

Listing 3.4: Bestimmung eines entry-Verhaltens

In jedem Zustand kann nun mithilfe einer IF-Anweisung das entry-Verhalten ausgeführt werden. Das do-Verhalten wird ohne Bedingung im Zustand ausgeführt. Das exit-Verhalten wird beim Verlassen des Zustandes in die IF-Abfrage für die Transition implementiert:

```

1 CASE state OF
2   AUS:
3     IF entry THEN
4       ...           //entry-Verhalten
5     END_IF;
6     ...           //do-Verhalten
7     IF START_Taster THEN
8       ...           //exit-Verhalten
9       state:= ERHITZEN;
10    END_IF;
11    ...
12    ...
13 END_CASE;

```

Listing 3.5: Grundstruktur mit Transitionen

komplettes Beispielprogramm

Die komplette Übersetzung des UML statecharts sieht dann folgendermaßen aus:

```

1 FUNCTION Kaffeemaschine
2
3 CASE state OF
4   AUS:
5     IF entry THEN
6       ;           //entry-Verhalten
7     END_IF;
8     Heizspirale := 0;           //do-Verhalten
9     Pumpe := 0;           //do-Verhalten
10    Heizplatte := 0;           //do-Verhalten
11    IF START_Taster THEN
12      state:= ERHITZEN;           //naechster Zustand
13    END_IF;
14

```

```
15 ERHITZEN:
16   IF entry THEN
17     ; //entry-Verhalten
18   END_IF;
19   Heizspirale := 1; //do-Verhalten
20   IF Temp > 80 THEN
21     state:=WASSER_PUMPEN; //naechster Zustand
22   END_IF;
23
24 WASSER PUMPEN:
25   IF entry THEN
26     Pumpe:=1; //entry-Verhalten
27   END_IF;
28   IF Tank_leer THEN
29     Pumpe:=0 //exit-Verhalten
30     Heizspirale:=0; //exit-Verhalten
31     state:= WARM_HALTEN; //naechster Zustand
32   END_IF;
33
34 WARM HALTEN:
35   IF entry THEN
36     ; //entry-Verhalten
37   END_IF;
38   Heizplatte:=1; //do-Verhalten
39   IF Warte_10min() THEN
40     state:= AUS; //naechster Zustand
41   END_IF;
42 END_CASE;
43
44 END_FUNCTION
```

Listing 3.6: komplettes Beispielprogramm

Mit dem eben dargestellten Beispiel können äquivalent die meisten UML statecharts in Code überführt werden. Die Entwicklung der Software für den Prüfstand wird in Kapitel 4.4 beschrieben. Die entsprechenden UML statecharts dazu befinden sich im Anhang (A.1 und A.2).

4. Durchführung der Arbeit

4.1. Entwicklung einer Platine zur Simulation eines Ölausgleichsgefäßes

Für die Inbetriebnahme eines Prüfstandes sind viele Tests nötig, um Fehler im Quellcode zu finden, Fehlbedienungen abzufangen und die Stabilität des Programms zu prüfen. Um dies ohne Einsatz von Öl zu ermöglichen, ist eine Einrichtung erforderlich, die das Verhalten des Prüfstandes mit angeschlossenem ÖAG und Aufbereitungsanlage simulieren kann. Ein Verfahren zum Testen einer Steuerung über ein simuliertes Modell, welches direkt an die Ein- und Ausgänge der Steuerung angeschlossen wird, wird als „Hardware in the Loop“ (HiL) bezeichnet.

Eine zweite SPS zu nutzen und damit die Sensorwerte zu simulieren, schien als erste Idee sinnvoll, dennoch wäre die Anschaffung einer zweiten SPS sehr teuer. Die Wahl fiel stattdessen auf den Bau einer einfachen Platine mit Mikrocontroller. Die Entwicklung und Herstellung dieser Simulationsplatine wird in diesem Kapitel dargestellt. Ein Bild der fertigen Platine ist in Abbildung 4.1 zu sehen.

Damit die tatsächliche Programmierung der SPS möglichst realitätsnah überprüft werden kann, simuliert die Platine ein vereinfachtes Verhalten des Prüfstandes und kann durch Auswertung der Signale für die Magnetventile und Drosselventile den aktuellen Ölfluss und Druck eines virtuellen ÖAGs berechnen. In der Programmierung des Mikrocontrollers wird dafür die physikalische Modellfunktion eines ÖAGs mit veränderbaren Parametern hinterlegt.

4.1.1. Auswahl des Mikrocontrollers

Auf der Platine wird ein Arduino¹ kompatibles Breakout-Board mit einem 32-bit-Mikrocontroller (STM32F103C) der Firma ST verwendet. (vgl. ST (2015)) Dieser wird über eine serielle Schnittstelle (RS232) programmiert. Der Mikrocontroller hat zwei 12-bit-AD-Wandler, um an insgesamt 16 Eingängen eine Spannung zwischen 0 V und 3,3 V

¹Arduino ist ein Open Source Projekt, indem sowohl Software als auch Hardware für die einfache Mikrocontrollerprogrammierung entwickelt werden

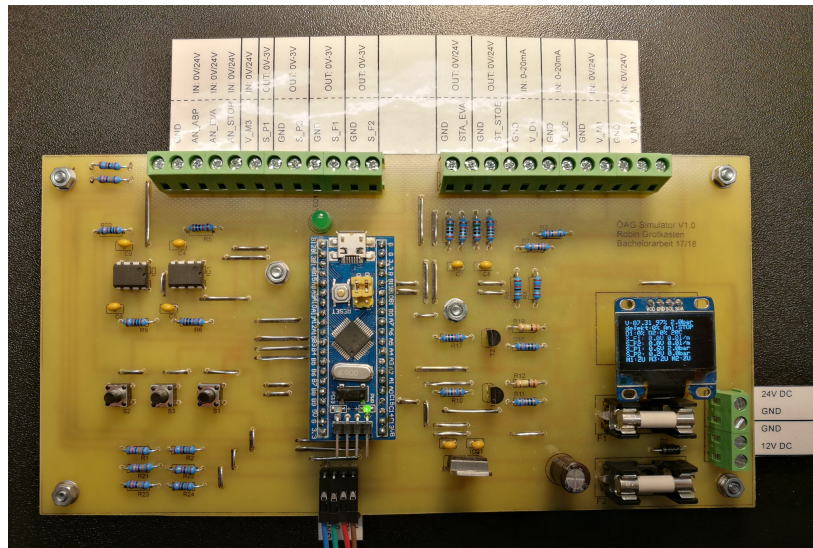


Abbildung 4.1.: fertige ÖAG-Simulationsplatine während der Programmierung am PC (Quelle: eigenes Foto)

auszuwerten. Er hat drei 16-bit-Timer, die für mehrere PWM²-Ausgänge genutzt werden können. Dieser Mikrocontroller wird ausgewählt, da er durch die 32-bit-Architektur im Gegensatz zu einem 8-bit-Mikrocontroller schnelle Fließkommaberechnungen durchführen kann und auch ein graphisches Display mit hohen Wiederholraten ansteuern kann. Die Fließkommaberechnungen sind für eine Echtzeitsimulation der Volumen-Druck-Kurve notwendig. Der Mikrocontroller kann einfach über die Entwicklungsumgebung Arduino programmiert werden. Diese bietet viele Bibliotheken (engl. libraries), die die Programmierung vereinfachen.

4.1.2. Schaltplanentwurf

Das Ziel des Schaltplanentwurfs ist es, die Ein- und Ausgänge des Arduino-Breakout-Boards durch Schaltungstechnik so zu ergänzen, dass Ausgangssignale der Sensoren (Drucksensor 3 V (analog) und Durchflussmessturbinen 3 V (analog)) bzw. die Eingangssignale der Aktoren (Schütze für Magnetventile 24 V (digital) und Drosselventile 4-20 mA), sowie die Kommunikationsverbindung zur Aufbereitungsanlage (24 V) simuliert werden können. Um den Rahmen dieser Arbeit einzugrenzen, wird in folgendem Kapitel nur die allgemeine Auswahl der Schaltungstypen für jede Simulation dargestellt, es wird nicht auf die mathematische Auslegung der Bauelemente (Widerstände, Kondensatoren, Transistoren) eingegangen.

²PWM (Pulsweitenmodulation) ist ein Rechtecksignal mit festgelegter Frequenz, welches im Tastverhältnis verändert werden kann

Die Stromversorgung der Platine wird durch die interne Stromversorgung des Schaltschranks gewährleistet. Es steht ein 12-V- und 24-V-Netzteil zur Verfügung. Ein Spannungsregler erzeugt aus den 12V DC eine 5-V-Gleichspannung auf der Platine. Das Arduino-Breakout-Board erzeugt hieraus intern nochmals 3,3V DC für den Mikrocontroller. Für die Verbindungen zur SPS werden einfache Printklemmen benutzt, um die Platine für Tests schnell an- oder abklemmen zu können. Mithilfe von drei Hubtastern auf der Platine sollen Temperatur und Verschleißgrad des ÖAGs verändert werden können. Auf einem OLED-Display können die momentan simulierten Parameter dargestellt werden. In folgenden Abbildungen wird der Mikrocontroller durch IC (Integrated Circuit) abgekürzt. Ein digitaler Pin des Mikrocontrollers wird als IO-Pin (Input/Output-Pin) bezeichnet.

- **Durchflussmessturbine, Drucksensor: Ausgabe 3 V (analog)**

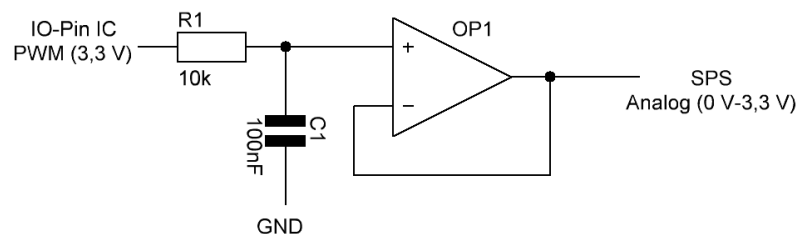


Abbildung 4.2.: Erzeugung 3 V analoge Spannung (Quelle: eigene Darstellung)

Die Durchflussmessturbine und der Drucksensor liefern ihre Messwerte durch eine Gleichspannung von 0 V bis 3 V an die SPS. Der Mikrocontroller kann direkt keine analoge Spannung ausgeben. Es wird stattdessen für jeden Sensor ein PWM-Ausgang des Mikrocontrollers mit 3,3 V digitaler Spannung genutzt. Das PWM-Signal wird mithilfe eines Low-Pass-Filters (R1, C1) geglättet, sodass nahezu eine Analogspannung entsteht. Hinter dem Tiefpassfilter wird zusätzlich ein Operationsverstärker (OP1) als Impedanzwandler angeschlossen, um eine minimale Belastung des Ausgangs und damit ein minimales Absinken der Spannung in den spannungslosen Phasen des PWM-Signals zu gewährleisten. Softwaretechnisch wird das Tastverhältnis des PWM-Signals so begrenzt, dass maximal 3 V der möglichen 3,3 V am Ausgang entstehen.

- **Verbindung Öl-Aufbereitungsanlage: Ausgabe 24 V (digital)**

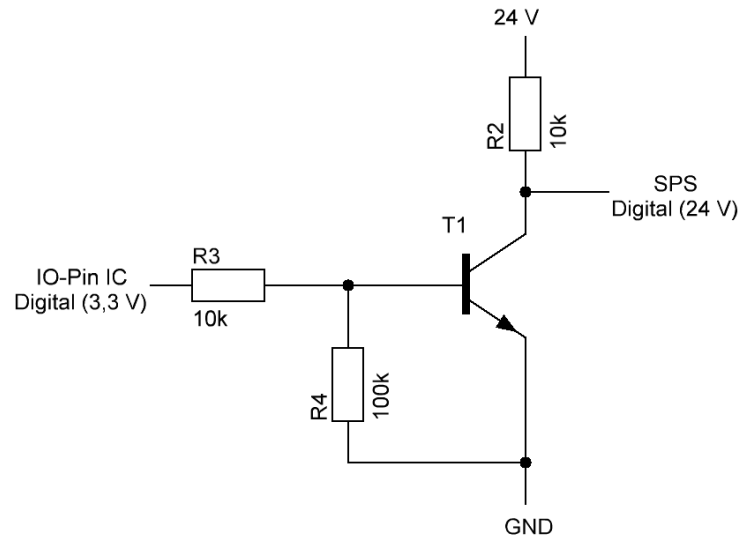


Abbildung 4.3.: Erzeugung 24 V digitale Spannung (Quelle: eigene Darstellung)

Für die Kommunikation des Prüfstandes zur Aufbereitungsanlage soll der Prüfstand die Status-Lampen der Aufbereitungsanlage abfragen können. Die Simulations-Platine soll dies ebenfalls simulieren können. Die SPS nutzt einen Spannungspegel von 24 V. Demnach ist ein Spannungshub 3 V (digital) des Arduinos auf 24 V (digital) zu erzeugen. Hierbei wird ein Transistor BC337-16 (T1) als digitaler Schalter genutzt. Der Transistor wird in Emitterschaltung betrieben. Bei einem digitalen Schaltsignal wird der Widerstand des Transistors R_{CE} annähernd maximal groß bzw. minimal klein. Das Ausgabesignal entspricht dann dem invertierten Eingangssignal. Die Invertierung kann softwaretechnisch ausgeglichen werden.

- **Drosselventil: Auswertung 4 - 20 mA**

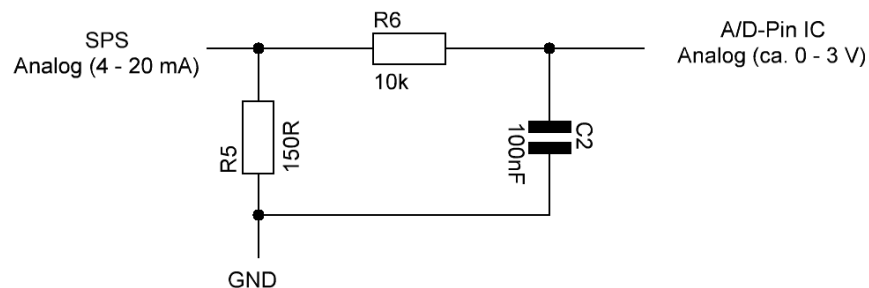


Abbildung 4.4.: Auswertung Einheitssignal 4 - 20 mA (Quelle: eigene Darstellung)

Die SPS gibt ein Stromsignal von 4 - 20 mA an die Drosselventile. Da der Mikrocontroller nur Analog-Eingänge besitzt, die nur Spannungen auswerten können, muss das Stromsignal in ein Spannungssignal umgewandelt werden. Es wird ein "Bürdenwiderstand", also ein Messwiderstand (R5), genutzt, um die Stromstärke in eine dazu proportionale Spannung umzuwandeln. Ein anschließender Tiefpass-Filter (R6, C2) soll das Messsignal glätten.

- **Magnetventil: Auswertung 24 V (digital)**

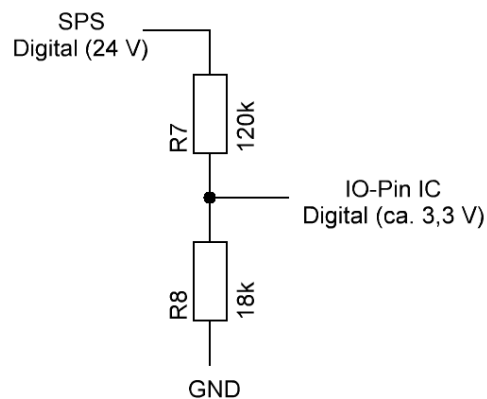


Abbildung 4.5.: Auswertung 24 V (digital) (Quelle: eigene Darstellung)

Um ein digitales Schaltsignal der SPS auszuwerten, muss die Spannungsebene von 24 V (digital) auf 3,3 V (digital) geändert werden. Ein einfacher Spannungsteiler erfüllt diesen Zweck.

4.1.3. Platinen-Herstellung

Das Platinenlayout wird am PC erstellt. Bei der Platine handelt sich um eine kupferbeschichtete Epoxydplatte. Die Leiterbahnen werden mithilfe der Toner-Ätz-Methode in die Kupferbeschichtung der Platte geätzt. Hierfür wird der Toner auf die Platine durch Hitzeinfluss (wie z.B. ein Bügeleisen) von einer Overheadfolie auf das Kupfer übertragen. Eine Natriumpersulfat-Lösung ätzt dann die Kupferbeschichtung zwischen den Leiterbahnen weg.

4.1.4. Programmierung des Mikrocontrollers

Der Mikrocontroller wird über die Entwicklungsumgebung Arduino in C programmiert. In Folgendem wird das implementierte physikalisch-vereinfachte Modell erklärt:

Erklärung des Gesamtberechnungsverfahrens

Die Funktionsweise lässt sich zusammenfassend so beschreiben: Es wird geprüft, welche Ventile (V_M1, V_M2 oder/und V_M3) laut Schaltsignal der SPS geöffnet sind und welche Druckdifferenzen durch die Ventilstellungen hervorgerufen werden. Der Eingang (Zufluss) des Prüfstandes wird bei aktiver Aufbereitungsanlage mit 3 bar angenommen. Der Ausgang (Abfluss) hat 0 bar. Der Druck des ÖAG ist abhängig vom vorhandenen Ölvolumen und wird mithilfe der Volumen-Druck-Kennlinie eines Beispieltanks NKT90/0,3 berechnet. Die Kennlinien wurden detailliert im Kapitel 2.2 erklärt. Hierbei kann per Hubtaster zusätzlich ein Faktor n_L eingestellt werden, der die Kennlinie eines defekten ÖAGs simuliert. Nach der Berechnung des Druckunterschieds kann der Durchfluss in allen drei Zweigen mit dem Hagen-Poiseuille-Gesetz berechnet werden. Hierbei geht die Stellung der Drosselventile proportional in den Durchfluss mit ein. Der entstehende Durchfluss führt zu einem Sinken bzw. Steigen des Volumens im Ölausgleichsgefäß. Hierdurch sinkt der Durchfluss bei fallendem Volumen beim Entleeren bzw. beim steigenden Volumen beim Befüllen, da die Druckdifferenz sich ändert. Die Sensorwerte für die Druckmessung werden mithilfe des Bernoulli-Gesetzes berechnet. Hierbei sinkt der statische Druck proportional zur Strömungsgeschwindigkeit.

Im Folgenden wird das physikalische Modell nochmal im Detail erklärt:

Ventilstellung

Die Stellung der Ventile V_M1, V_M2 und V_M3 führt zu einem Druckunterschied im Rohrsystem und dieser ist für das Ölflussverhalten im Rohrsystem ausschlaggebend (Rohrsystem siehe Abbildung 4.8). Hierbei wird vereinfachend davon ausgegangen, dass der Druck am Zulauf p_{Anlage} und Ablauf p_{Vakuu} immer konstant ist. Nur der Druck des ÖAGs $p_{\text{ÖAG}}(V, T)$ ist variabel vom aktuellen Ölvolumen und der Temperatur abhängig.

Dann kann für jeden Fall der 8 Ventil-Kombinationen (3 Ventile, die auf bzw. zu sein können) einzeln der entstehende Druckunterschied betrachtet werden. In Tabelle 4.1 ist die Berechnung der Druckunterschiede dargestellt. Ist nur ein Ventil geöffnet, kann kein Durchfluss entstehen. Bei zwei geöffneten Ventilen wird das ÖAG entweder gefüllt, entleert oder es existiert Umlaufbetrieb. Beim Befüllen ist das Ventil V_M1 und V_M3 geöffnet, dann herrscht

zwischen den Anschlüssen des Rohrsystems eine Druckdifferenz. Diese ergibt sich aus dem Druck der Ölaufbereitungsanlage p_{Anlage} und dem Druck des ÖAGs $p_{\text{ÖAG}}(V, T)$:

$$\Delta p = p_{Anlage} - p_{\text{ÖAG}}(V, T) \quad (4.1)$$

Tabelle 4.1.: Druckunterschiede abhängig von Ventilstellungen des Prüfstandes

V_M1	V_M2	V_M3	Zustand	Druckunterschied
0	0	0	kein Durchfluss	0 bar
0	0	1	kein Durchfluss	0 bar
0	1	0	kein Durchfluss	0 bar
1	0	0	kein Durchfluss	0 bar
0	1	1	Entleeren	$p_{\text{ÖAG}}(V, T) - p_{Vakuum}$
1	1	0	Umlauf	$p_{Anlage} - p_{Vakuum}$
1	0	1	Befüllen	$p_{Anlage} - p_{\text{ÖAG}}(V, T)$
1	1	1	undefiniert	Fehler

Berechnung des Volumenstroms

Das Hagen-Poiseuille-Gesetz (siehe Kapitel 2.1.3) beschreibt den Volumenstrom in einem Rohr abhängig von dem Druckunterschied und dem Durchmesser, sowie der Länge des Rohres.

$$\dot{V} = \frac{\pi r^4}{8\eta l} \cdot \Delta p \quad (4.2)$$

Dieser Zusammenhang wird in der Simulation verwendet, um mithilfe eines Druckunterschiedes den Volumenstrom zu berechnen. Eine Berechnung über die tatsächlichen Rohrparameter würde allerdings zu keinem sinnvollen Ergebnis führen, da viele andere Faktoren den Volumenstrom beeinflussen. So sind Veränderungen des Durchmessers bei Übergängen schwer zu berücksichtigen. Verwirbelungen, die zu einer nicht laminaren Strömung führen, verfälschen das Ergebnis ebenso. Alle Faktoren in der Simulation zu berücksichtigen, wäre sehr aufwendig und dem Nutzen nicht verhältnismäßig. Stattdessen wird hier ein Faktor (a_1) durch Erprobung ermittelt, der dem realen Verhalten angenähert entsprechen soll.

$$\dot{V} = a_1 \cdot \Delta p \quad (4.3)$$

Zusätzlich zum Druckunterschied an den Enden der Rohre ist auch die Stellung der Drosselventile V_{D1} und V_{D2} relevant. Die Drosselventile verengen den Rohrquerschnitt und können demnach den Volumenstrom verkleinern. Im Modell wird von einem proportionalen Zusammenhang ausgegangen. Ein voll geöffnetes Ventil entspricht dabei einem V_{D1} von 100 %.

Der Volumenstrom \dot{V}_1 im ersten Zweig ergibt sich dadurch insgesamt folgendermaßen:

$$\dot{V}_1 = a_1 \cdot (p_{Anlage} - p_{\ddot{O}AG}(V, T)) \cdot \frac{V_{D1}}{100\%} \quad (4.4)$$

Berechnung eines neuen Volumens nach einem Programmzyklus

Die Berechnung des Volumens im Tank wird iterativ mit einer numerischen Integration durchgeführt, d.h. das neue Ölvolumen im ÖAG V_{neu} ist das Ölvolumen im vorherigen Programmzyklus V_{alt} zuzüglich dem mittleren Durchfluss \dot{V} multipliziert mit dem Zeitschritt dt (Zeitdifferenz zum vorherigen Programmzyklus). Es wird hierbei davon ausgegangen, dass der Durchfluss über einen Programmzyklus konstant ist. Der Zeitschritt dt liegt hierbei in der Größenordnung von 50 ms und ist abhängig vom Berechnungsaufwand in einem Programmzyklus.

$$V_{neu} = V_{alt} + \dot{V} \cdot dt \quad (4.5)$$

Betrachtet man nun den Fall, dass die Ventile V_M1 und V_M3 geöffnet sind, kann das neue Tankvolumen V_{neu} für einen Berechnungszyklus so berechnet werden:

$$V_{neu} = V_{alt} + a_1 \cdot \Delta p \cdot \frac{V_{D1}}{100\%} \cdot dt \quad (4.6)$$

$$V_{neu} = V_{alt} + a_1 \cdot [p_{Anlage} - p_{\ddot{O}AG}(V_{alt}, T)] \cdot \frac{V_{D1}}{100\%} \cdot dt \quad (4.7)$$

Berechnung des statischen Drucks

Damit die Werte der Drucksensoren möglichst realitätsnah erzeugt werden, muss berücksichtigt werden, dass diese im realen Aufbau nur den statischen Druck messen, da sie senkrecht zur Strömungsrichtung messen. Es wird demnach das Bernoulli-Gesetz angewandt, um den statischen Druck aus dem Volumenstrom \dot{V} zu ermitteln. Das Bernoulli-Gesetz (siehe Kapitel 2.1.3) lautet folgendermaßen:

$$p_{ges} = p_{stat} + p_{stau} + p_{schwer} \quad (4.8)$$

Der Schweredruck soll hier vernachlässigt werden. Wird die Gleichung dann umgestellt nach dem statischen Druck ergibt sich:

$$p_{stat} = p_{ges} - p_{stau} \quad (4.9)$$

$$p_{stat} = p_{ges} - \frac{1}{2}\rho v^2 \quad (4.10)$$

Nun kann die Strömungsgeschwindigkeit v durch den Zusammenhang $v = \frac{\dot{V}}{A}$ ersetzt werden.

$$p_{stat} = p_{ges} - \frac{1}{2}\rho \frac{\dot{V}^2}{A^2} \quad (4.11)$$

Da hier ebenfalls wie bei der Berechnung des Volumenstroms keine konstante Querschnittsfläche angenommen werden kann, wird ein weiterer Faktor a_2 eingeführt, der ebenfalls durch Erprobung sinnvoll angepasst wird.

$$p_{stat} = p_{ges} - a_2 \cdot \dot{V}^2 \quad (4.12)$$

4.1.5. Messkurven mit der virtuellen ÖAG-Messung

In folgenden beiden Graphiken (Abbildung 4.6 und 4.7) sind Volumen-Druck-Messungen des Prüfstandes mithilfe der Simulations-Platine zu sehen. Die Messpunkte liegen nahe der Sollkurve, die auch in der Platine hinterlegt ist. Die Gründe für die Abweichungen liegen in der Erzeugung der Analogsignale. Diese werden über PWM erzeugt und geglättet. Dieses Verfahren ist nicht sehr präzise. Dennoch sind die Resultate für die Überprüfung der Programmstruktur und Programmierfehler in der SPS vollkommen ausreichend.

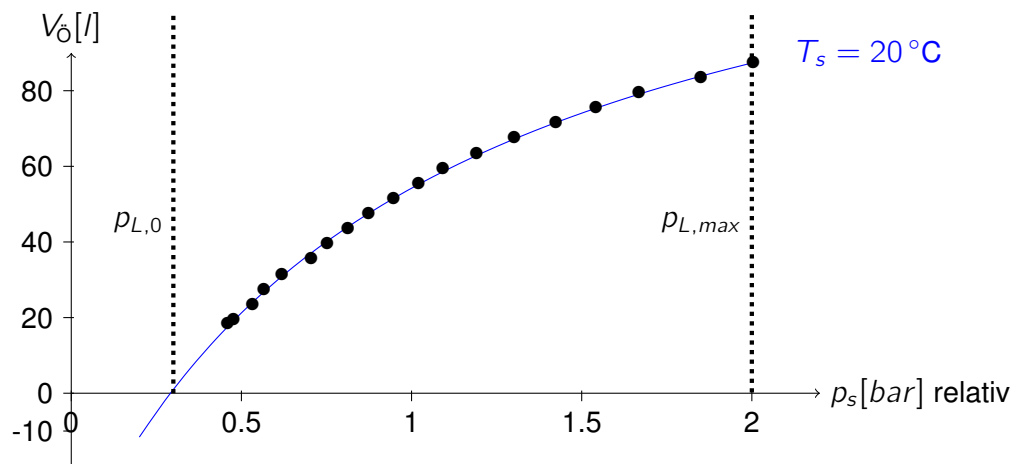


Abbildung 4.6.: Messpunkte einer simulierten Entleeren-Messung im Vergleich zur theoretischen Volumen-Druck-Kurve NKT90/0,3 (Quelle: eigene Darstellung)

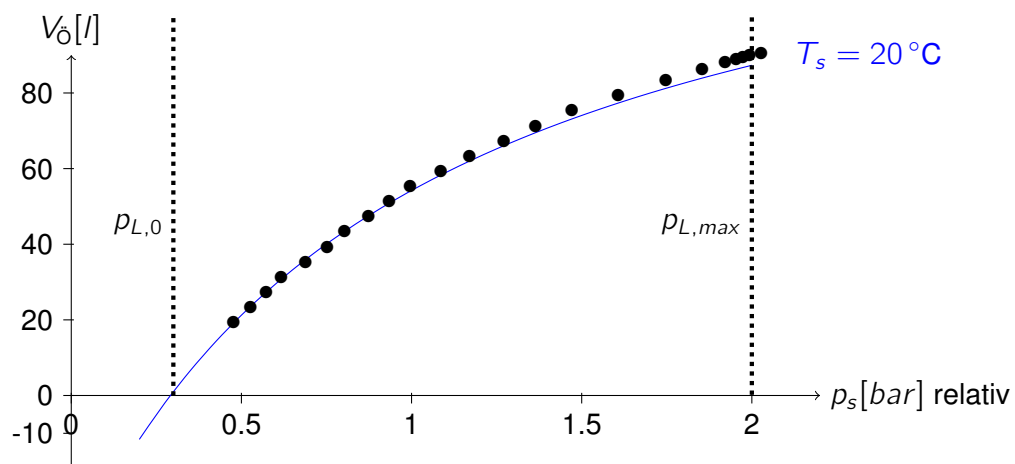


Abbildung 4.7.: Messpunkte einer simulierten Befüllen-Messung im Vergleich zur theoretischen Volumen-Druck-Kurve NKT90/0,3 (Quelle: eigene Darstellung)

4.2. Beschreibung der Optimierung am Rohrsystem

Im Bearbeitungszeitraum der Arbeit wurden einige Änderungen am Aufbau des Rohrsystems des Prüfstandes durchgeführt. Diese Änderungen/Ergänzungen sollen in diesem Kapitel erläutert werden. In Abbildung 4.8 ist der Stand des Rohrsystems zum Abgabetermin dieser Arbeit zu sehen. In Abbildung 3.2 ist zum Vergleich das Rohrsystem zu Beginn dieser Arbeit zu sehen.

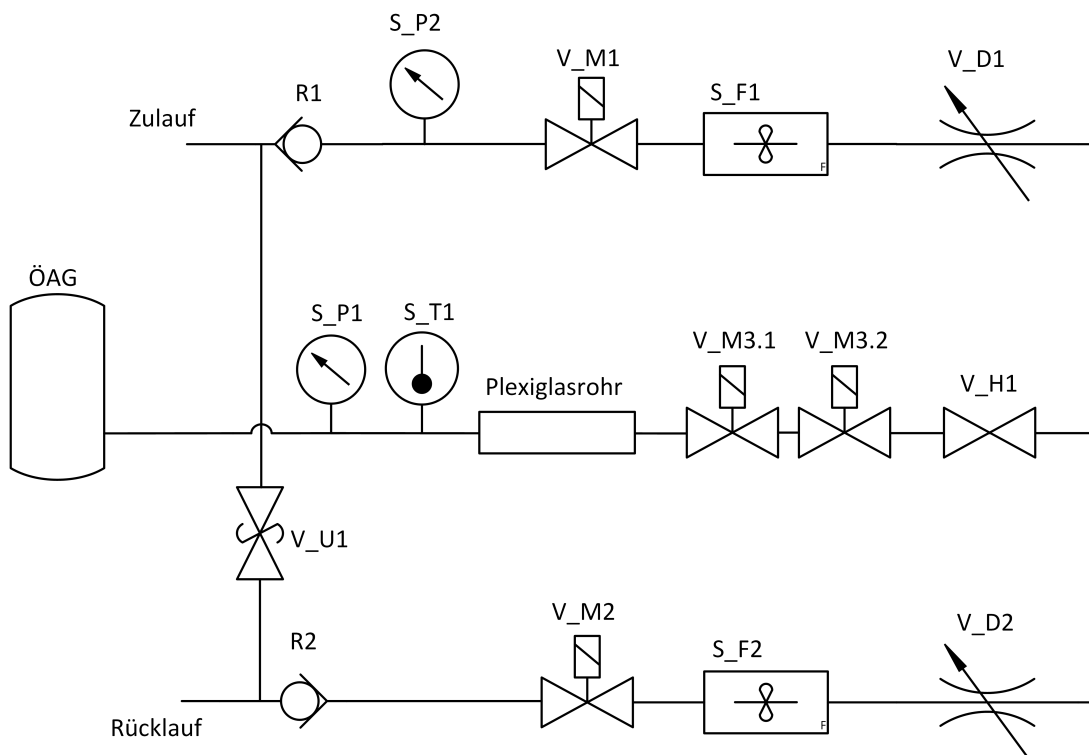


Abbildung 4.8.: schematische Darstellung des Rohrsystems vom Prüfstand (Quelle: eigene Darstellung)

Folgende Änderungen wurden während des Bearbeitungszeitraums durchgeführt:

- Einbau eines Überdruckventils V_U1:** Das Überdruckventil V_U1 verbindet den oberen Zulauf-Zweig des Prüfstandes mit dem unteren Rücklauf-Zweig. Dieses Ventil ist eine Sicherheitsmaßnahme, um gefährliche Überdrücke am Eingang des Prüfstandes zu vermeiden. Im Fehlerfall ist es möglich, dass ein Handventil (z.B. V_H1) oder eines der Magnetventile nicht öffnet. Bei laufender Pumpe würde sich ein hoher Druck vor dem geschlossenen Ventil aufbauen. Das Überdruckventil schaltet bei einem Druck von ca. 4,5 bar auf Durchlauf und baut den Überdruck über den direkten Rückweg

zur Ölaufbereitungsanlage ab. Wenn ein Handventil an der Ölaufbereitungsanlage geschlossen ist oder der Rücklauf-Schlauch nicht angeschlossen ist, kann diese Sicherheitsmaßnahme nicht greifen.

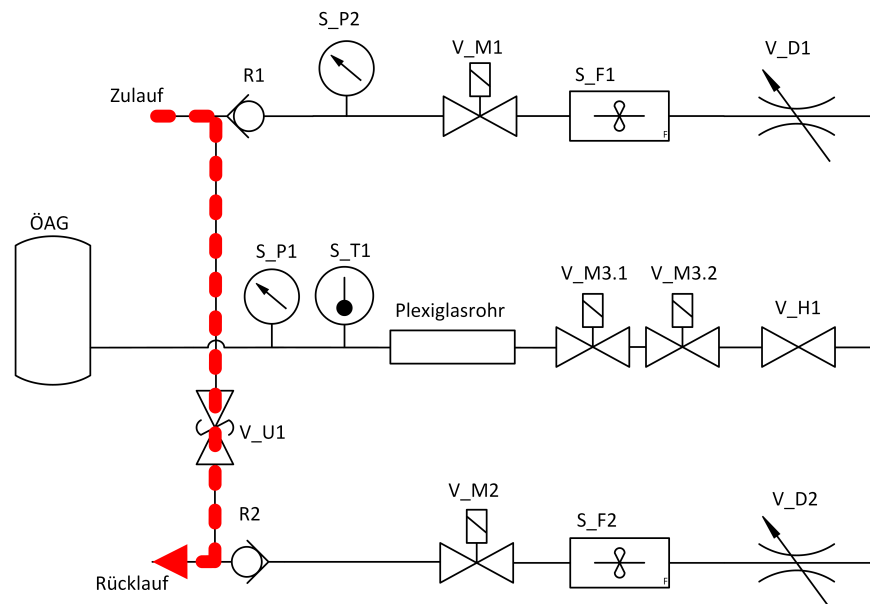


Abbildung 4.9.: Ölfluss im Rohrsystem im Fehlerfall (Druck (Zulauf) > 4,5 bar) (Quelle: eigene Darstellung)

- **Ersetzen der Luftfalle durch ein Plexiglasrohr:**

Die Luftfalle L_1 (siehe Abbildung 3.2) hatte den Zweck, vorhandene Luft im Ölsystem zu fangen und für den Bediener sichtbar zu machen. Es konnte dann über ein Handventil die gesammelte Luft abgelassen werden. Die Luftfalle ist im Zusammenhang mit der neuen Ölaufbereitungsanlage nicht mehr notwendig, da bei einem Entlüftungsvorgang zunächst das Öl aus dem Tank gelassen werden kann und so die Luft in die Aufbereitungsanlage gebracht wird. Hier kann diese sehr einfach durch das vorhandene Vakuum vom Öl getrennt werden.

- **Einbau der Magnetventile V_M3.1 und V_M3.2**

Vor Arbeitsbeginn war im mittleren Zweig kein Magnetventil vorhanden. Eine Befüllmessung wäre hier nur durch ein regelmäßiges Abschalten der Aufbereitungsanlage bei jedem Prüfschritt möglich gewesen.

Die beiden Magnetventile (V_M3.1 und V_M3.2) im mittleren Zweig ermöglichen nun im gesperrten Zustand einen Umlaufbetrieb des Öls (nähere Erläuterung in Kapitel 4.2.1) während einer Befüllmessung. So kann das Öl bei der Messung des aktuellen Drucks des Tanks im Umlauf zur Aufbereitungsanlage zurückgepumpt werden, vorausgesetzt die Magnetventile V_M1 und V_M2 sind zusätzlich geöffnet. Hierdurch

kann die Aufbereitungsanlage während der gesamten Messung pumpen und muss nicht bei jedem Messschritt abgeschaltet werden. Für die Entleeren-Messung ist diese Ergänzung nicht relevant. Der Einsatz von zwei Magnetventilen in Reihe ist dadurch begründet, dass diese nur unidirektional abdichtend sind. Mithilfe von zwei Ventile kann der Durchfluss in beide Richtungen sicher gesperrt werden. Im geöffneten Zustand wird jedoch immer eines der Magnetventile entgegen der Spezifikation des Herstellers von der falschen Seite durchströmt. (Zum Ende des Bearbeitungszeitraums dieser Arbeit konnten vereinzelt Probleme mit dieser Ventilanordnung festgestellt werden. Bei ÖAGs mit Maximaldrücken ab 3,2 bar scheint die hohe Druckdifferenz das Öffnen des gedrehten Ventils V_M3.2 zu verhindern. Im Kapitel 6 wird ein alternativer Aufbau des Rohrsystems vorgeschlagen der eine Nutzung eines Ventils entgegen der Spezifikation umgeht. Dieser Umbau konnte jedoch im Rahmen dieser Arbeit aus zeitlichen Gründen nicht mehr stattfinden.) Die Magnetventile V_M3.1 und V_M3.2 werden zur Vereinfachung immer nur als V_M3 bezeichnet, da diese immer synchron öffnen und schließen.

4.2.1. Erklärung der möglichen Betriebsarten des Prüfstandes

Der Prüfstand hat im Normalbetrieb (nach den eben dargestellten Änderungen am Rohrsystem) drei Betriebsarten, die hier erklärt werden sollen.

Entleeren

Beim Entleeren sind die Ventile V_M3 (V_M3.1 und V_M3.2) und V_M2 geöffnet. Das Ventil V_M1 ist geschlossen. Das Öl fließt aus dem ÖAG durch den Prüfstand in die Aufbereitungsanlage. Das ÖAG wird also entleert.

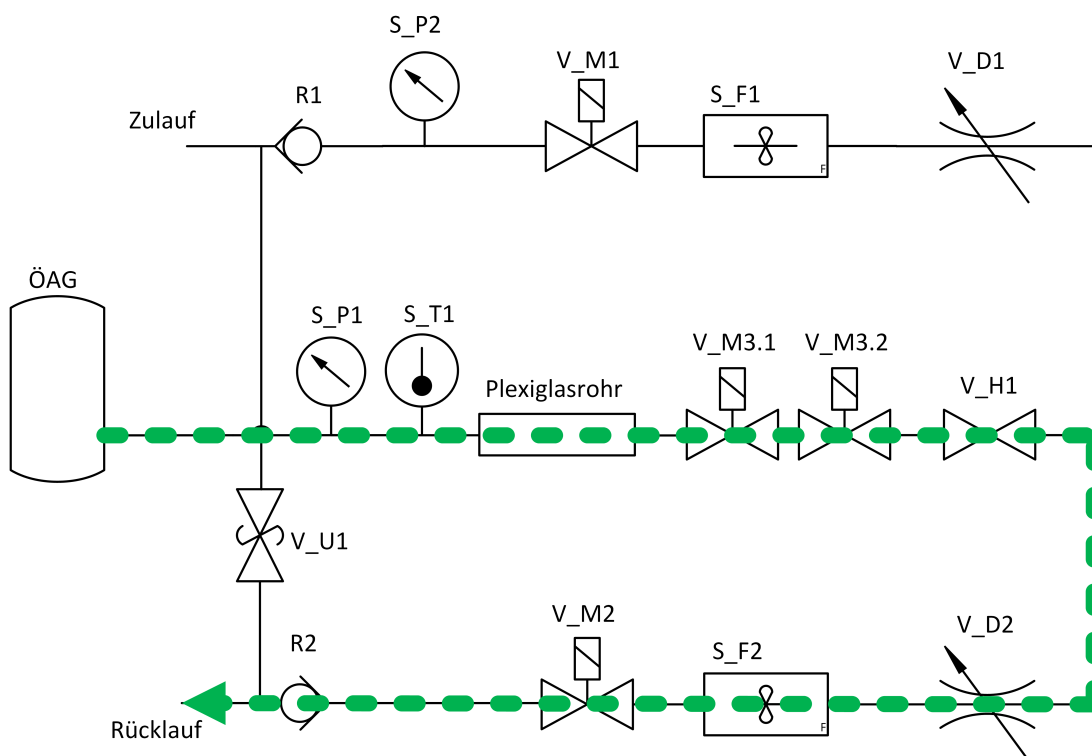


Abbildung 4.10.: Öfluss im Rohrsystem beim Entleeren (Quelle: eigene Darstellung)

Befüllen

Beim Befüllen sind die Ventile V_M1 und V_M3 (V_M3.1 und V_M3.2) geöffnet. Das Ventil V_M2 ist geschlossen. Das Öl fließt von der Aufbereitungsanlage über den Prüfstand in das ÖAG. Das ÖAG wird befüllt.

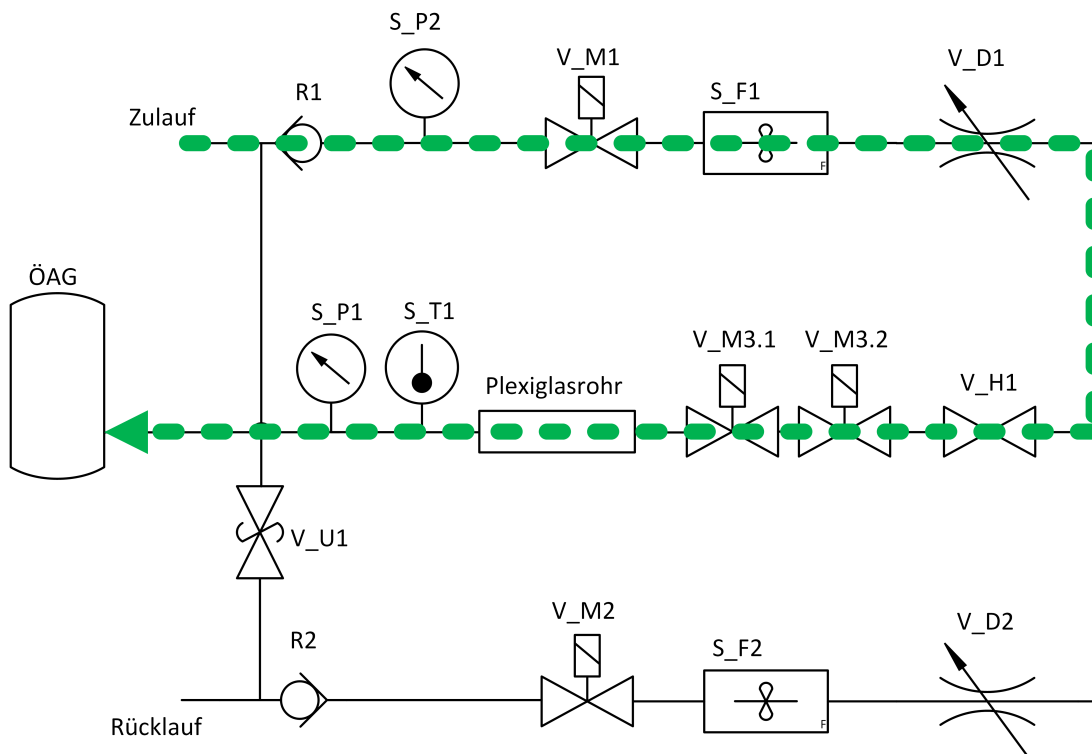


Abbildung 4.11.: Ölfluss im Rohrsystem beim Befüllen (Quelle: eigene Darstellung)

Umlaufbetrieb

Beim Umlaufbetrieb sind die Ventile V_M1 und V_M2 geöffnet. Das Ventil V_M3 (V_M3.1 und V_M3.2) ist geschlossen. Das Öl fließt von der Aufbereitungsanlage über den Prüfstand und wieder zurück in die Aufbereitungsanlage. Dieser Betrieb ist notwendig, um eine statische Druckmessung des ÖAGs durchzuführen. Die Aufbereitungsanlage kann dennoch weiter pumpen.

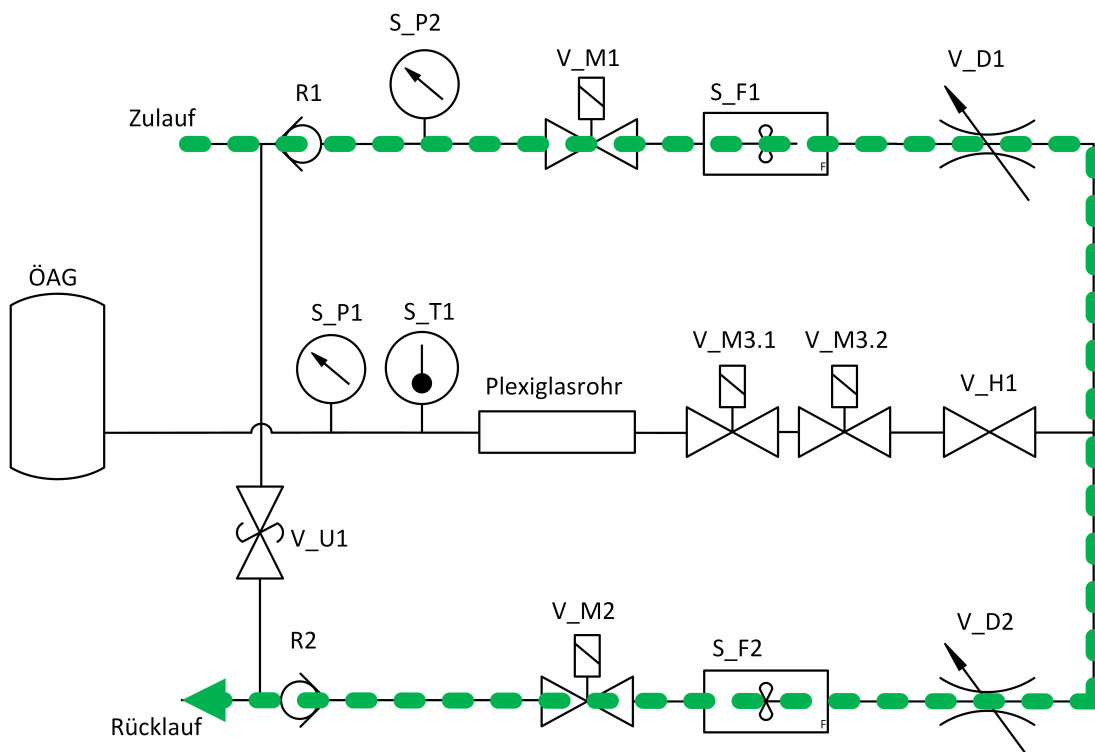


Abbildung 4.12.: Ölfluss im Rohrsystem im Umlaufbetrieb (Quelle: eigene Darstellung)

4.2.2. Entlüftung

Wenn der Prüfaufbau mit Aufbereitungsanlage, Prüfstand und ÖAG für eine ÖAG-Messung aufgebaut wurde, ist es unbedingt notwendig, dass alle Rohre des Prüfstandes und Ölschläuche entlüftet werden. Es muss gewährleistet werden, dass in keinem Fall Luft in das ÖAG gedrückt wird. Dies würde dazu führen, dass die Luft im Betrieb im schlimmsten Fall in ein gesamtes Ölkabelsystem kommt und zum Spannungsdurchschlag führen kann. Die einfachste Möglichkeit der Entlüftung ist durch das Erzeugen eines Ölflusses. Mit dem Ablassen von Öl

aus dem ÖAG, d.h. das Entleeren (siehe Abbildung 4.10) kann Luft aus dem mittleren und unteren Zweig entfernt werden. Durch den Umlaufbetrieb (siehe Abbildung 4.12) kann Luft zusätzlich aus dem oberen Zweig entfernt werden. Durch die Wiederholung dieser beiden Prozesse kann die Luft durch die Ölbewegung komplett in die Aufbereitungsanlage transportiert werden. Die Aufbereitungsanlage kann die Luft dann durch die Evakuierung (Aufbau von Vakuum) vom Öl trennen. In der Steuersoftware des Prüfstandes muss ein Entlüftungsbetrieb durch manuelles Steuern ermöglicht werden.

4.3. Umbauten an der Aufbereitungsanlage für Kommunikationsverbindung

Damit eine erleichterte Bedienung des Prüfstandes im Zusammenhang mit der Aufbereitungsanlage stattfinden kann, soll eine Kommunikationsverbindung mit der Aufbereitungsanlage realisiert werden. Hierbei soll eine abnehmbare, flexible Kabelverbindung zur Aufbereitungsanlage ergänzt werden.

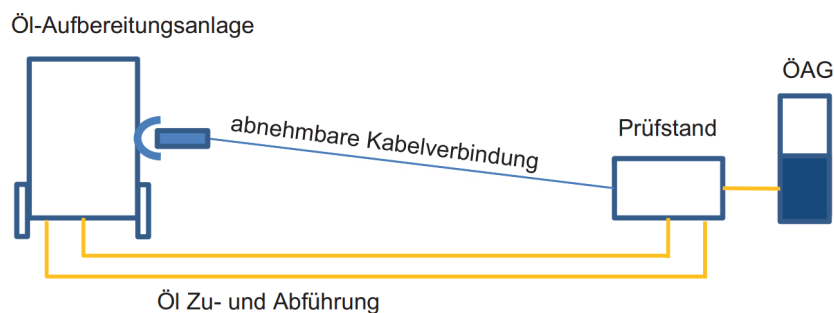


Abbildung 4.13.: schematische Darstellung des vollständigen Prüfaufbaus mit Kommunikationsverbindung zur Aufbereitungsanlage (Quelle: eigene Darstellung)

Eine serielle Kommunikationsverbindung ist wegen tiefgehender Änderungen der SPS-Programmierung der Aufbereitungsanlage nur durch den Hersteller selber möglich. Deshalb wurde eine Alternative entwickelt, die nur Änderungen und Ergänzungen an der Verdrahtung der Aufbereitungsanlage nötig macht und keine programmtechnischen Änderungen nach sich zieht. Ziel ist es, die oben dargestellten Funktionen (Evakuieren, Abpumpen) extern starten und stoppen zu können. Ein Feedback, ob die Anlage die Funktion tatsächlich eingeschaltet hat, ist außerdem wünschenswert. Es muss gewährleistet sein, dass die Anlage auch ohne Kommunikationsverbindung ohne Einschränkungen genutzt werden kann. Das

Stoppen der Anlage sollte mit vorhandener Kommunikationsverbindung zusätzlich auch weiterhin am Bedienpult der Ölaufbereitungsanlage möglich sein. In Abb. 4.14 sind die notwendigen Änderungen zu sehen. Als Grundlage wurde die technische Dokumentation der Ölaufbereitungsanlage genutzt. (vgl. [AAN GmbH \(2015\)](#)) Die drei Taster (-4S3, -9S1, -4S4) werden mithilfe drei ergänzter Relais extern steuerbar. Hierbei sind die Relais (-Q1 und -Q2) in Reihe zu den Start-Tastern und können bei Ansteuerung den Strompfad schließen. Der Stop-Strompfad ist aus sicherheitstechnischen Gründen im unbedienten Fall geschlossen, sodass bei einem Drahtbruch die Anlage automatisch gestoppt wird. Es wird so verhindert, dass die Anlage bei Drahtbruch nicht mehr gestoppt werden kann. Hier muss das ergänzende Relais entsprechend mit in Reihe geschaltet werden, um diese sicherheitstechnische Maßnahme weiterhin aufrecht zu erhalten. Mithilfe des Abgriffs der Schaltsignale von drei Statuslampen (Evakuieren, Abpumpen und Sammelstörung) kann zusätzlich auf den Zustand der Aufbereitungsanlage geschlossen werden. (in Abbildung nicht dargestellt)

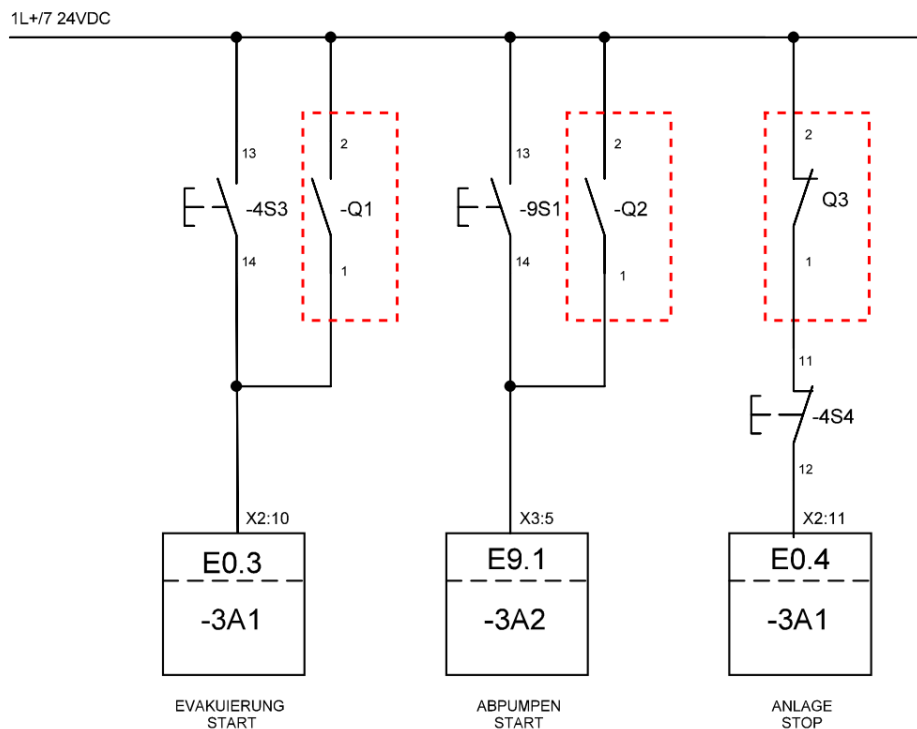


Abbildung 4.14.: Ergänzung der Aufbereitungsanlage mit externer Steuerung (Quelle: eigene Darstellung, ergänzt zur technischen Dokumentation [AAN GmbH \(2015\)](#))

4.4. Entwicklung der Steuerungssoftware zur Messung von ÖAGs

In diesem Kapitel soll der Aufbau des Steuerprogramms vom Prüfstand erklärt werden. Die Bestimmung der Volumen-Druck-Kurve findet mit einem Verfahren statt, welches bereits manuell erprobt ist. Wird von einem vollen ÖAG ausgegangen, wird ein definiertes Teilvolumen mithilfe eines Messgefäßes aus einem ÖAG ausgelassen. Nach dem Entleeren von z.B. 4 Litern kann der Druck mit einem Manometer bestimmt werden. Das Wertepaar aus Druck und Volumen wird notiert. Das Gefäß wird mit diesen Teilentleerungen bis zum Minimaldruck entleert. Die gemessenen Wertepaare können dann ein Koordinatensystem eingetragen werden und eine Volumen-Druck-Kurve des ÖAGs ist erstellt. Das gleiche Verfahren wird auch bei einer Befüllung durchgeführt, so kann mit einer zweiten Messkurve die Messung nochmals verifiziert werden. Nach diesem Verfahren soll auch der Prüfstand arbeiten. Der größte Unterschied ist, dass die Messung des abgelassenen bzw. befüllten Volumens mithilfe einer Durchflusssmessturbine stattfindet und durch die ständige Integration des Volumenstroms das Volumen festgestellt werden kann.

Ein einfaches Werkzeug, um einen Programmablauf darzustellen, ist ein Flowchart. In den folgenden beiden Abschnitten wird ein Überblick über die optimierte Steuerung gegeben. Der grundlegende Aufbau des Ablaufs einer Messung basiert auf Überlegungen der vorangegangenen Diplomarbeit. (vgl. Kühne (2016a))

In den folgenden Darstellung werden noch keine Sonderfälle dargestellt und auch Fehlbedienungen werden hier noch nicht berücksichtigt. Das Flow-Chart dient hier dazu, einfach die Grundlagen der Messung zu erläutern. Im Anhang befindet sich ein vollständiges UML statechart, welches wie in Kapitel 3.5.1 erläutert, aufgebaut ist und den kompletten Ablauf mit Sonderfällen und Fehlbedienungen enthält. Das UML statechart für die Entleeren-Messung befindet sich in Anhang A.1 und für die Befüllen-Messung in A.2.

4.4.1. Entleeren-Messung

Die Entleeren-Messung dient dem Erzeugen einer Volumen-Druck-Kurve während des Entleerens eines Öausgleichsgefäßes. Im Flowchart (Abbildung 4.15) wird der grobe Ablauf der Messung dargestellt. Die einzelnen Oberbegriffe des Flowcharts werden in folgender Aufzählung erläutert. Die Drosselventil V_D1 und V_D2 sind immer komplett geöffnet, da keine kritischen Durchflussraten erreicht werden.

- **Benutzereingaben:** Der Benutzer wählt die Tankparameter ($V_{S,0}$, $V_{L,0}$, $p_{L,0}$, $T_{L,0}$) des zu entleerenden Tanks aus. Außerdem wird der Minimaldruck eingegeben, bis zu dem der Tank entleert werden soll. Mithilfe einer eingegebenen Höhendifferenz zwischen

Drucksensor und mittlerer Tankhöhe kann ein Druckkorrekturwert berücksichtigt werden.

- **Aufbereitungsanlage schalten:** Die Aufbereitungsanlage wird über die Kommunikationsverbindung in die Betriebsart Evakuieren gebracht. Die Ventile V_M1 , V_M2 , V_M3 sind geschlossen.
- **Warten auf stabilen Druck p_1 :** Es wird eine definierte Zeit von 4 s gewartet, bis sich am Drucksensor S_P1 ein stabiler Druck p_1 aufgebaut hat.
- **Druck p_1 Messung:** Es wird über eine Zeitdauer von 3 s ein Mittelwert des aktuellen Drucks p_1 gebildet.
- **Anfangsvolumen V_0 berechnen:** Mithilfe der Volumen-Druck-Formel wird aus dem gemittelten Druckwert des Tanks das Öl-Volumen V_0 zum Startzeitpunkt im Tank geschätzt. Hierfür wird eine Temperatur von 20 °C (293 K) angenommen, da noch kein Öl geflossen ist, um eine tatsächliche Temperatur anzunehmen.

$$V_0 = V_{S,0} + V_{L,0} \cdot \left(1 - \frac{p_{L,0}}{p_1} \cdot \frac{T_1}{T_{L,0}}\right) \quad (4.13)$$

- **Teilvolumen ΔV_{Soil} entleeren:** Die Ventile V_M1 und V_M3 werden geöffnet. Der Volumenstrom \dot{V}_2 , der aus dem Tank fließt, wird numerisch in Echtzeit aufintegriert. Hieraus ergibt sich das bereits geflossene Teilvolumen ΔV_{Teil} . In Kapitel 4.4.3 wird der Quellcode für die numerische Integration erläutert. Wenn das entleerte Teilvolumen ΔV_{Teil} ein definiertes Volumen ΔV_{Soil} (hier: 4 l) erreicht bzw. überschritten hat, werden die Ventile V_M1 und V_M3 geschlossen. Der Volumenstrom kommt nicht sofort zum Erliegen, da die Ventile eine gewisse Zeit zum Abdichten benötigen. Es wird sicherheitshalber weitere 4 Sekunden der Volumenstrom aufintegriert.
- **Warten auf stabilen Druck p_1 :** Es wird 4 Sekunden gewartet, dass sich ein stabiler Druck p_1 am Drucksensor S_P1 einstellen kann.
- **Druck p_1 Messung:** Es wird über eine Zeitdauer von 3 s ein Mittelwert des aktuellen Drucks p_1 gebildet und die Temperatur T_1 des Öls wird erfasst. Eine Mittelung der Temperatur ist aufgrund der Trägheit des Temperatursensors nicht notwendig.
- **Messwerte speichern (p_1 | $V(p_1)$ | T_1):** Das Volumen V_0 , welches im Schritt **Anfangsvolumen V_0 berechnen** geschätzt wurde, wird bei jeder Teilvolumenentleerung um die entleerte Teilvolumenmenge ΔV_{Teil} verringert. (Formel 4.14) Der Wert V_i enthält dann immer das aktuelle Ölvolumen des ÖAGs, wenn von einem korrekten Anfangswert V_0 ausgegangen wird. Der gemittelte Druck p_1 und das aktuelle Ölvolumen

V_i werden zusammen mit der Temperatur T_1 gespeichert.

$$V(p_1) = V_i = V_{i-1} - \Delta V_{Teil} \quad (4.14)$$

- **$p_1 > \text{min. Druck}$:** Es wird geprüft, ob der Druck des ÖAG über dem zulässigen Minimaldruck des Tanks liegt. Wenn der Druck hoch genug ist, wird wieder zum Schritt **Teilvolumen ΔV entleeren** gesprungen. Andernfalls ist die Messung beendet.
- **Aufbereitungsanlage schalten:** Die Aufbereitungsanlage wird über die Kommunikationsverbindung gestoppt.
- **Archivierung:** Alle gespeicherten Wertepaare der Messung und eine ideale, theoretische Kennlinie werden auf einem USB-Stick gespeichert.

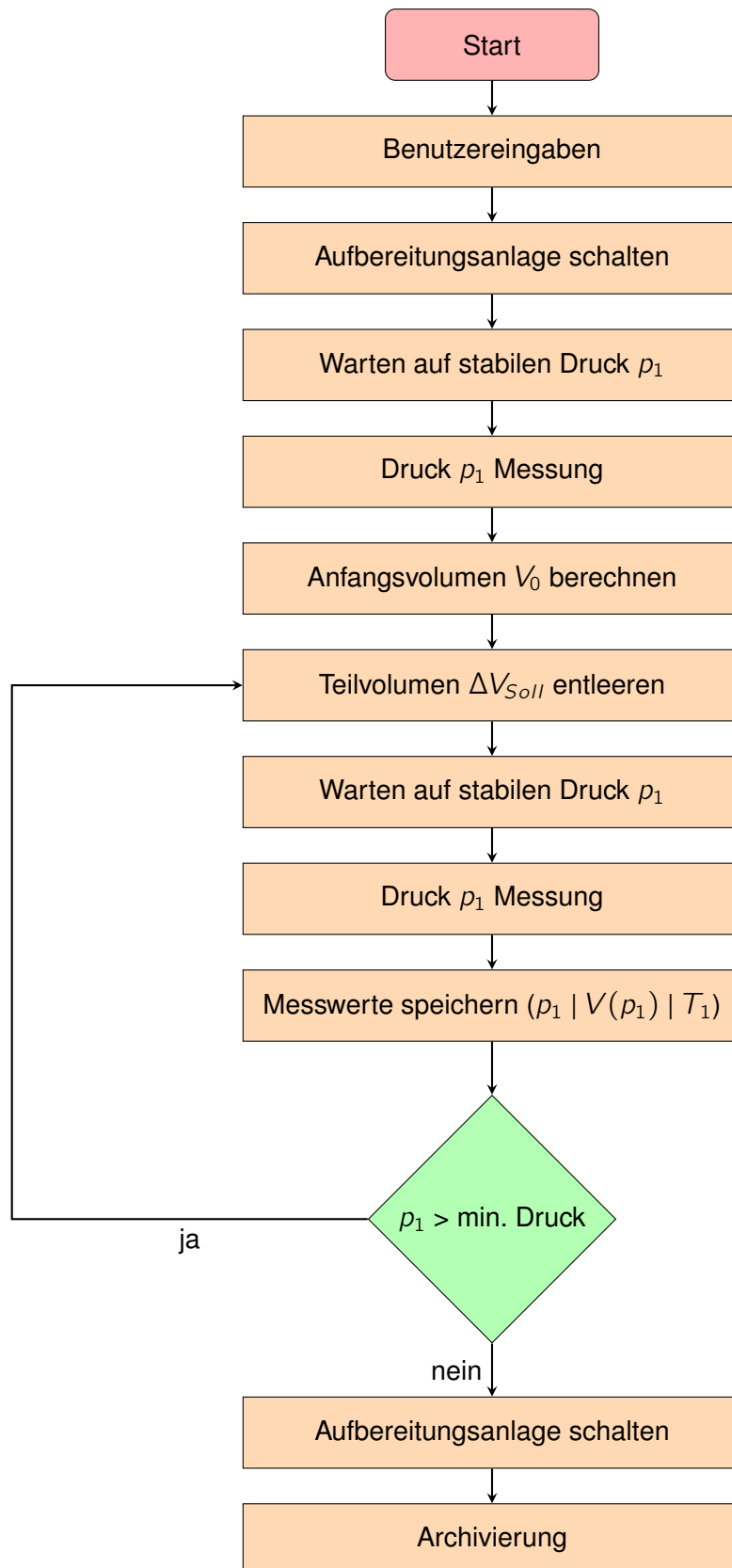


Abbildung 4.15.: Programmablaufdiagramm der Entleeren-Messung (Quelle: eigene Darstellung)

4.4.2. Befüllen-Messung

Wie im Kapitel 4.4.1 soll hier nun zur Vollständigkeit die Befüllen-Messung dargestellt werden. In Abbildung 4.16 ist das entsprechende Flowchart zu sehen. Die Obergriffe des Flowcharts werden in folgender Aufzählung erläutert. Die Drosselventil V_D1 und V_D2 sind immer komplett geöffnet, da keine kritischen Durchflussraten erreicht werden.

- **Benutzereingaben:** Der Benutzer wählt die Tankparameter ($V_{S,0}$, $V_{L,0}$, $p_{L,0}$, $T_{L,0}$) des zu befüllenden Tanks aus. Außerdem wird der Maximaldruck eingegeben, bis zu dem der Tank befüllt werden soll. Mithilfe einer eingegebenen Höhendifferenz zwischen Drucksensor und mittlerer Tankhöhe kann ein Druckkorrekturwert berücksichtigt werden.
- **Aufbereitungsanlage schalten:** Die Aufbereitungsanlage wird über die Kommunikationsverbindung in die Betriebsart Evakuieren und Abpumpen gebracht. Vorher werden die Magnetventile V_M1 und V_M2 für einen Umlaufbetrieb geöffnet.
- **Warten auf Durchfluss:** Sobald ein Durchfluss erkannt wird, wird davon ausgegangen, dass die Anlage erfolgreich pumpt.
- **Warten auf stabilen Druck p_1 :** Es wird eine definierte Zeit von 4 s gewartet, bis sich am Drucksensor S_P1 ein stabiler Druck p_1 aufgebaut hat.
- **Druck p_1 Messung:** Es wird über eine Zeitdauer von 3 s ein Mittelwert des aktuellen Drucks p_1 gebildet.
- **Anfangsvolumen V_0 berechnen:** Mithilfe der Volumen-Druck-Formel wird aus dem gemittelten Druckwert des Tanks das Öl-Volumen V_0 zum Startzeitpunkt im Tank geschätzt. Hierfür wird eine Temperatur von 20 °C (293 K) angenommen, da noch kein Öl geflossen ist, um eine tatsächliche Temperatur anzunehmen.

$$V_0 = V_{S,0} + V_{L,0} \cdot \left(1 - \frac{p_{L,0}}{p_1} \cdot \frac{T_1}{T_{L,0}}\right) \quad (4.15)$$

- **Teilvolumen ΔV_{Soll} befüllen:** Das Ventil V_M3 wird geöffnet und V_M2 gleichzeitig geschlossen. Der Tank wird befüllt. Der Volumenstrom \dot{V}_1 , der in den Tank fließt, wird numerisch in Echtzeit aufintegriert. Hieraus ergibt sich das bereits geflossene Teilvolumen ΔV_{Teil} . In Kapitel 4.4.3 wird der Quellcode für die numerische Integration erläutert. Wenn das befüllte Teilvolumen ΔV_{Teil} ein definiertes Volumen ΔV_{Soll} (hier: 4 l) erreicht bzw. überschritten hat, wird V_M3 wieder geschlossen und V_M2 geöffnet. Das Öl kann wieder im Umlauf fließen.

- **Warten auf stabilen Druck p_1 :** Es wird 4 Sekunden gewartet, dass sich ein stabiler Druck einstellen kann. In den ersten 2 Sekunden wird weiterhin das geflossene Volumen aufintegriert, da die Ventile eine gewisse Zeit für das Abdichten benötigen. Da jetzt ein Umlaufbetrieb herrscht, wird hier eine Differenzmessung der beiden Durchflussmessturbinen durchgeführt:

$$\dot{V}_{\text{ÖAG}} = (\dot{V}_1 - \dot{V}_2) \quad (4.16)$$

- **Druck p_1 Messung:** Es wird über eine Zeitdauer von 3 s ein Mittelwert des aktuellen Drucks p_1 gebildet und die Temperatur T_1 des Öls wird erfasst. Eine Mittelung der Temperatur ist aufgrund der Trägheit des Temperatursensors nicht notwendig.
- **Messwerte speichern (p_1 | $V(p_1)$ | T_1):** Das Volumen V_0 , welches im Schritt **Anfangsvolumen V_0 berechnen** geschätzt wurde, wird bei jeder Teilvolumenbefüllung um die befüllte Teilvolumenmenge ΔV_{Teil} erhöht. (Formel 4.17) Der Wert V_i enthält dann immer das aktuelle Ölvolumen des ÖAGs, wenn von einem korrekten Anfangswert V_0 ausgegangen wird. Der gemittelte Druck p_1 und das aktuelle Ölvolumen V_i werden zusammen mit der Temperatur T_1 gespeichert.

$$V(p_1) = V_i = V_{i-1} + \Delta V_{\text{Teil}} \quad (4.17)$$

- **$p_1 < \text{max. Druck}$:** Es wird geprüft, ob der Druck des ÖAG über dem zulässigen Maximaldruck des Tanks liegt. Wenn der Druck noch unterhalb des Maximaldrucks ist, wird wieder zum Schritt **Teilvolumen ΔV befüllen** gesprungen. Andernfalls ist die Messung beendet.
- **Aufbereitungsanlage schalten:** Die Aufbereitungsanlage wird über die Kommunikationsverbindung gestoppt.
- **Archivierung:** Alle gespeicherten Wertepaare der Messung und eine ideale, theoretische Kennlinie werden auf einem USB-Stick gespeichert.

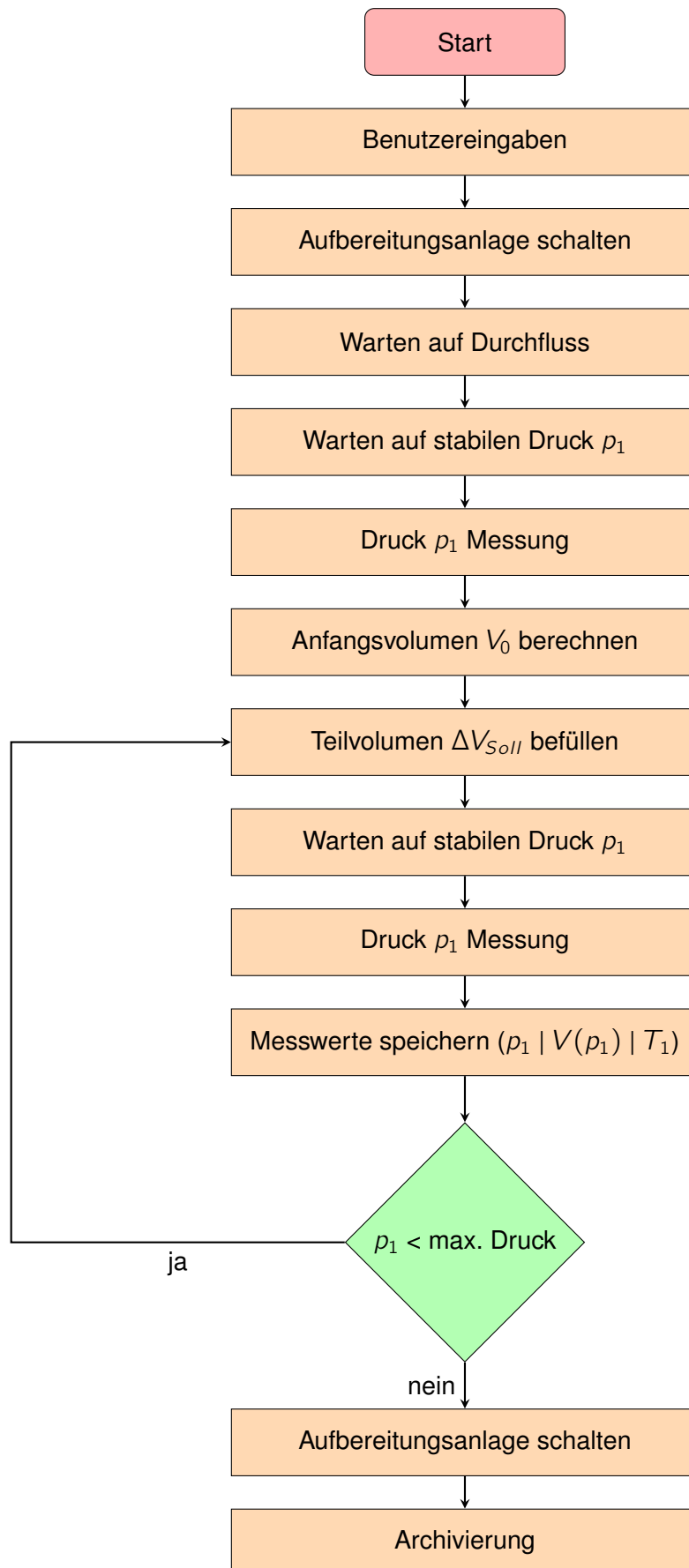


Abbildung 4.16.: Programmablaufdiagramm der Befüllen-Messung (Quelle: eigene Darstellung)

4.4.3. Konzepte im Quellcode

In dieser Arbeit soll der Quellcode für die Steuerung nicht zeilenweise erklärt werden, da dies den Rahmen der Arbeit sprengen würde. Dennoch sollen hier einige Umsetzungen auszugsweise erklärt werden:

numerische Integration mit Weckalarm

Die Berechnung des geflossenen Volumens wird mithilfe der numerischen Integration durchgeführt. Mehr Informationen zum Verfahren der numerischen Integration können der gängigen Literatur entnommen werden. (z.B. [Schuppar und Humenberger \(2015\)](#)). (Im Folgenden wird exemplarisch nur die Entleeren-Messung gezeigt.)

Damit die Zeitschritte bei der numerischen Integration immer identisch sind, wird ein Organisationsbaustein (OB) genutzt, der zyklisch alle 20 ms unabhängig vom eigentlichen Hauptprogramm aufgerufen wird. Er wird auch als Weckalarm bezeichnet.

Im Weckalarm-OB wird zunächst geprüft, ob einer der beiden Zustände **Teilvolumen_entleeren** oder **Warten_stabiler_Druck2** aktiv ist. (Die Zustände ergeben sich aus dem UML statechart im Anhang [A.1](#)). Hier sind die Ventile für eine Entleerung geöffnet.

Dann findet die Aufsummierung des Volumenstroms S_{F2_norm} (in l/min) statt (Zeile 3). Zusätzlich werden die Anzahl der bisherigen Aufsummierungen gezählt (Zeile 4) und die Zeitdifferenz Δt seit dem Startzeitpunkt der Messung berechnet (Zeile 5). `TIME_TCK()` enthält dabei immer die aktuelle Systemzeit in ms.

```

1 IF state = Teilvolumen_entleeren OR
2   state = Warten_stabiler_Druck2 THEN
3   Durchfluss_aufsummiert := Durchfluss_aufsummiert + S_F2_norm;
4   Durchfluss_Anzahl := Durchfluss_Anzahl + 1;
5   Durchfluss_dt := TIME_TO_DINT(TIME_TCK()) - Durchfluss_Startzeit;
6 END_IF;
```

Listing 4.1: OB35 Weckalarm: numerische Integration

Das tatsächliche Volumen kann dann im Hauptprogramm unter Verwendung der im OB35 auf Stand gehaltenen Variablen, berechnet werden. Durch Division der aufsummierten Volumenströme mit der Anzahl der aufsummierten Werte kann der durchschnittliche Volumenstrom \dot{V}_{Mittel} berechnet werden. Dieser durchschnittliche Volumenstrom wird mit der vergangenen Zeit Δt multipliziert und ergibt dann das geflossene Volumen V_{Teil} .

$$V_{Teil} = \dot{V}_{mittel} \cdot \Delta t \quad (4.18)$$

In Quellcode sieht das wie folgt aus:

```
1 Ist_Volumenteil := (Durchfluss_aufsummiert * Durchfluss_dt)
2 / (1000 * 60.0 * Durchfluss_Anzahl);
```

Listing 4.2: Berechnung des geflossenen Volumens

Anpassung des Teilvolumens abhängig von Volumendifferenz

Wenn eine Entleerung oder Befüllung in Teilschritten durchgeführt wird, dann müssen genügend Messpunkte für eine aussagekräftige Kurve erfasst werden. Ein Teilvolumen von 4 l hat sich dabei als sinnvoll herausgestellt. Zum Ende einer Messung ist die Steigung einer Volumen-Druck-Kurve recht hoch, sodass bei 4 l Teilvolumen im letzten Schritt der Maximaldruck deutlich überschritten werden kann. Um dies zu verhindern, reduziert das Steuerprogramm das Soll-Teilvolumen abhängig vom theoretisch noch zu füllenden Öl-Volumen.

In folgendem Programmausschnitt ist diese Reduzierung des Teilvolumens dargestellt. Wenn das geschätzte Volumen bis zum Maximaldruck den doppelten Teilvolumen-Abstand (8 l) unterschreitet, dann wird das Soll-Teilvolumen auf den halben Volumen-Abstand zum Maximaldruck verringert. Bei 6 l Abstand wird das Teilvolumen demnach auf 3 l verringert.

Hierbei ist eine Sicherheit einkalkuliert, da bei einem defekten Tank weniger Volumen befüllt werden kann, als für einen heilen Tank berechnet. Das kleinstmögliche Soll-Teilvolumen wird jedoch auf 0,5 l beschränkt, um zu kleine Teilvolumenschritte zu verhindern. Dieser Wert hat sich durch Tests als sinnvoll erwiesen.

```
1 IF Volumen_bis_maxDruck < Soll_Volumenteil * 2.0 THEN
2   Soll_Volumenteil := Volumen_bis_maxDruck * 0.5;
3   IF (Soll_Volumenteil < 0.5) THEN
4     Soll_Volumenteil := 0.5;
5   END_IF;
6 END_IF;
```

Listing 4.3: Grundstruktur des Zustandsdiagramms

4.4.4. Bedienung einer Messung

Die Bedienung der Messung findet über das HMI Touchpanel statt. In Abbildung 4.17 ist eine laufende Entleeren-Messung mit der gemessenen Volumen-Druck-Kurve (rot) und der theoretisch berechneten Kurve für 20 °C (blau) zu sehen. Im Ausgabefeld „Luftvolumen“ wird das berechnete prozentual noch vorhandene Luftvolumen n_L in Echtzeit angezeigt.



Abbildung 4.17.: Bedienpanel mit laufender Entleeren Messung eines Z60G ÖAGs (Quelle: eigenes Foto)

4.4.5. Archivierung

Ein wichtiger Aspekt einer vorangegangenen Messung ist die sichere und übersichtliche Archivierung der Messdaten. Vor Arbeitsbeginn war eine Speicherung der Messdaten nur für einzelne Messungen möglich und die Darstellung der Messergebnisse mit viel händischer Arbeit verbunden. Nach einiger Recherche konnte eine Möglichkeit der Speicherung über ein VB-Skript gefunden werden. Hierbei wird eine *.csv Datei erstellt, die einfach in Excel importiert werden kann. In Abbildung 4.18 ist eine in Excel importierte *.csv Datei zu sehen. Im oberen Teil befindet sich der Informationskopf mit Infos zum ausgewählten Tank und den entsprechenden Tankparametern, die in der SPS in einer Datenbank hinterlegt sind. Die Werte für den gemessenen Druck, das geflossene Volumen und das theoretische Volumen sind spaltenweise getrennt. Die Erzeugung einer Graphik der Messung gestaltet sich damit recht einfach.

	A	B	C	D	E	F
1	Datum:	12.12.2017 12:20				
2	Messart:	Befuellung				
3	Tanktyp:	F&G 60/0,3				
4	Messwerte:	20				
5	Tankparameter					
6	V_L0	109,5				
7	V_s0	2				
8	p_L0	0,294				
9	T_s0	283				
10	athm. Druck:	1,013				
11	mittlere Temperatur [K]:					
12	T_s	291,8599998				
13	vorhandenes Luftvolumen:					
14	n_L	0,917731443				
15	V_L0	100,491593				
16	ermittelter Kurvenoffset [L]:					
17	V_off	3,660891592				
18						
19						
20	Messzeit [ms]	Relativdruck [bar]	Volumen gemessen	Volumen berechnet [L]	Temperatur [K]	mittlerer Durchfluss [L/min]
21	0	0,30	2,74	-1,18	281,70	0,00
22	61343	0,37	6,76	4,65	288,20	4,27
23	123001	0,42	10,76	8,70	289,70	4,24
24	185615	0,49	14,77	13,48	290,80	4,17
25	249338	0,57	18,76	18,47	291,00	4,08
26	314056	0,65	22,75	22,51	291,50	4,01
27	379908	0,72	26,73	26,27	292,00	3,92

Abbildung 4.18.: Ausschnitt einer archivierten Messung (*.csv in Excel dargestellt)

4.4.6. Fehler und Fehlbedienung abfangen

Im Folgendem sollen die wichtigsten und kritischsten Fehlerzustände während einer Messung erklärt werden:

- Der Volumenstrom (S_F1 oder S_F2) ist größer als 15 l/min:**
 Ein so hoher Volumenstrom wird mit dem momentanen Aufbau des Prüfstandes nicht erreicht. Die maximalen Durchflussraten bei höchster Druckdifferenz liegen unter 7 l/min. Wenn dennoch 15 l/min erreicht werden, liegt demnach ein Defekt der Sensoren vor oder das Öl fließt ohne angeschlossenes ÖAG ins Freie. Die Messung wird zu jedem Zeitpunkt sofort beendet (Ölaufbereitungsanlage wird über die Kommunikationsverbindung abgeschaltet) und eine Fehlermeldung erscheint.
- Der Volumenstrom (S_F1 oder S_F2) ist kleiner als 1 l/min:**
 Wenn der Volumenstrom kleiner als 1 l/min ist, kann der Volumenstrom nicht mehr korrekt erfasst werden, da die Durchflussmessturbinen den vom Hersteller angegebenen Messbereich verlassen. Bei einigen Praxistests wurde festgestellt, dass die

Durchflussmessturbine bei einem Absinken des Volumenstroms unter 0,8 l/min direkt auf 0 l/min springt. Der geringe Durchfluss scheint zu einem Stillstand der drehenden Turbinen zu führen. Im schlimmsten Fall würde ein ÖAG trotz Erreichen des Maximaldrucks weiter gefüllt werden, da kein Durchfluss mehr erfasst wird und das Soll-Teilvolumen niemals erreicht wird. (Da die Ölaufbereitungsanlage während einer Messung manchmal abschaltet, ist diese Fehlererkennung zur Zeit deaktiviert. Die Messung würde sonst jedes Mal gestoppt werden, wenn die Ölaufbereitungsanlage abschaltet. **Bis zur Behebung der Gründe für die Ausfälle der Aufbereitungsanlage muss die Messung bei zu geringen Durchflussraten manuell gestoppt werden.**)

- **Der Druck (S_P2) steigt über 6 bar:**
Wenn der Eingangsdruck des Prüfstandes über 6 bar steigt, liegt ein Fehlerfall vor. Ein Ventil ist geschlossen und das Sicherheitsventil hat nicht geschaltet, da der Rücklauf unterbrochen ist. Die Aufbereitungsanlage wird über die vorhandene Kommunikationsverbindung sofort abgeschaltet und eine Fehlermeldung erscheint.
- **Der ÖAG-Druck (S_P1) hat den Minimal- bzw. Maximaldruck vor Beginn der Messung unter- bzw. überschritten:**
Wenn dieser Fall vorliegt, wurde ein falscher Soll-Wert für den Ziel-ÖAG-Druck eingegeben bzw. eine falsche Messung wurde gestartet. Die Messung wird sofort abgebrochen und eine Fehlermeldung erscheint.

Wenn trotz der eben dargestellten Fehlerzustände ein kritischer Zustand eintritt, dann kann über den Notaus-Taster die Messung sofort beendet werden. Alle Magnetventile werden geschlossen und die Ölaufbereitungsanlage wird gestoppt.

4.4.7. Genauigkeit einer Messung (Präzision)

Die Genauigkeit einer Messung basiert auf mehreren Faktoren. Hierzu zählen die Genauigkeiten von Durchflussmessturbine, Drucksensor und AD-Wandler. Der AD-Wandler der SPS basiert auf dem Prinzip der sukzessiven Approximation und hat eine Auflösung von 12 bit. (vgl. [Siemens \(2017\)](#)) Die Funktionsweise eines AD-Wandlers soll hier nicht näher erläutert werden, es wird auf gängige Literatur verwiesen, z.B. [Wellenreuther und Zastrow \(2008\)](#). Für die Auswertung der Analogwerte von Durchflussmessturbine und Drucksensor wird ein Spannungsbereich von 0 - 3 V benötigt. In der SPS kann ein Messbereich von 0 - 10 V gewählt werden. Hiermit verkleinert sich die nutzbare Auflösung auf ca. 10,26 bit.

$$\frac{2^{12}}{10 V} \cdot 3 V = 1228,8 \approx 2^{10,263} \quad (4.19)$$

In Tabelle 4.2 sind die Genauigkeiten der Sensoren und die durch den AD-Wandler bedingte minimale unterscheidbare Spannungsstufe (U_{LSB}) angegeben.

Tabelle 4.2.: Genauigkeiten Durchflussmessturbine und Drucksensor

Sensor	Messbereich	$U_{LSB}(ADC)$	Genauigkeit Sensor
Durchflussmessturbine	1 l/min - 15 l/min	0,0122 l/min	0,14 l/min ($\pm 1\%$ FS)
Drucksensor	-1 bar - 15 bar	0,0122 bar	0,08 bar ($\pm 0,5\%$ FS)

Da die Genauigkeit der AD-Wandlung sehr viel höher ist als die Genauigkeit der Sensoren, kann die Genauigkeit der AD-Wandlung vernachlässigt werden. Um nun zu ermitteln, wie hoch der absolute Fehler einer gesamten ÖAG-Messung ist, wird hierbei davon ausgegangen, dass das gesamte gemessene Volumen V_{ges} direkt proportional zum mittleren Volumenstrom der gesamten Messung \bar{V} ist.

$$V_{ges} \sim \bar{V} \quad (4.20)$$

Wenn nun bei jeder Durchflussmessung ein relativer Fehler des Volumenstroms von $\pm 1\%$ vorliegt, dann kann im schlimmsten Fall das gemessene Volumen auch um diesen Fehler vom tatsächlichen Wert abweichen.

Es kann also davon ausgegangen werden, dass der maximale Fehler einer Messung bei ca. 1 % des gemessenen Volumens liegt. Bei einem Arbeitsvolumen von 60 l beträgt die Abweichung vom realen Wert demnach 0,6 l.

In Kapitel 5.1 werden mehrere Messkurven desselben Tanks verglichen. Wenn davon ausgegangen wird, dass bei jeder Messung eine Genauigkeit von 1 % zum realen Volumen vorliegt, dann dürfen zwei Messungen maximal 2 % des Arbeitsvolumens voneinander abweichen.

5. Auswertung und Analyse

Der Prüfstand soll in Zukunft ein Großteil der Ölausgleichsgefäße im Hamburger Stromnetz auf Tauglichkeit überprüfen. Es ist demnach sehr wichtig, dass der Prüfstand zuverlässig und genau arbeitet. Im Kapitel 5.1 werden dafür mehrere erstellte Messkurven eines F&G ÖAGs untereinander und mit Herstellerkennlinien für die Verifizierung des Messverfahrens verglichen. Abschließend werden in Kapitel 5.2 die Erkenntnisse aus einem Feldtest an einer ÜNS im Hamburger Stromnetz dargestellt.

5.1. Beispieltank F&G 60/0,3

5.1.1. Parameterbestimmung aus Herstellerkennlinien

Für das ÖAG F&G 60/0,3 existieren mehrere Herstellerkennlinien. Dies ist dadurch begründet, dass der Hersteller F&G wie auch andere Hersteller Tanks über lange Zeiträume herstellt und sich auch die Bauweise über die Jahrzehnte verändern kann. Für die Verifizierung der Messergebnisse des Prüfstandes sollen deshalb zwei vorhandene Kennlinien des Herstellers verwendet werden. Zunächst sollen von diesen beiden Herstellerkurven die Parameter ($V_{L,0}$, $p_{L,0}$, $V_{S,0}$, $T_{L,0}$) der physikalischen Modellfunktion bestimmt werden.

Herstellerkennlinie 1 (1976)

In Abbildung 5.1 ist eine Kennlinie des Herstellers für den Tank F&G 60/0,3 von 1976 zu sehen. Diese basiert laut Angaben auf Messungen eines realen Tanks. Die Modellfunktion (blau) wurde an diese Herstellerkennlinie mit Augenmaß angepasst. Hierbei wurde bewusst auf eine hohe Anpassung im Bereich 0,5 bar bis 2,0 bar Wert gelegt, da bei ca. 0,5 bar ein Wendepunkt in der Herstellerkennlinie vorhanden ist. Der Bereich unterhalb dieses Wendepunktes kann durch die physikalische Modellfunktion demnach nicht beschrieben werden.

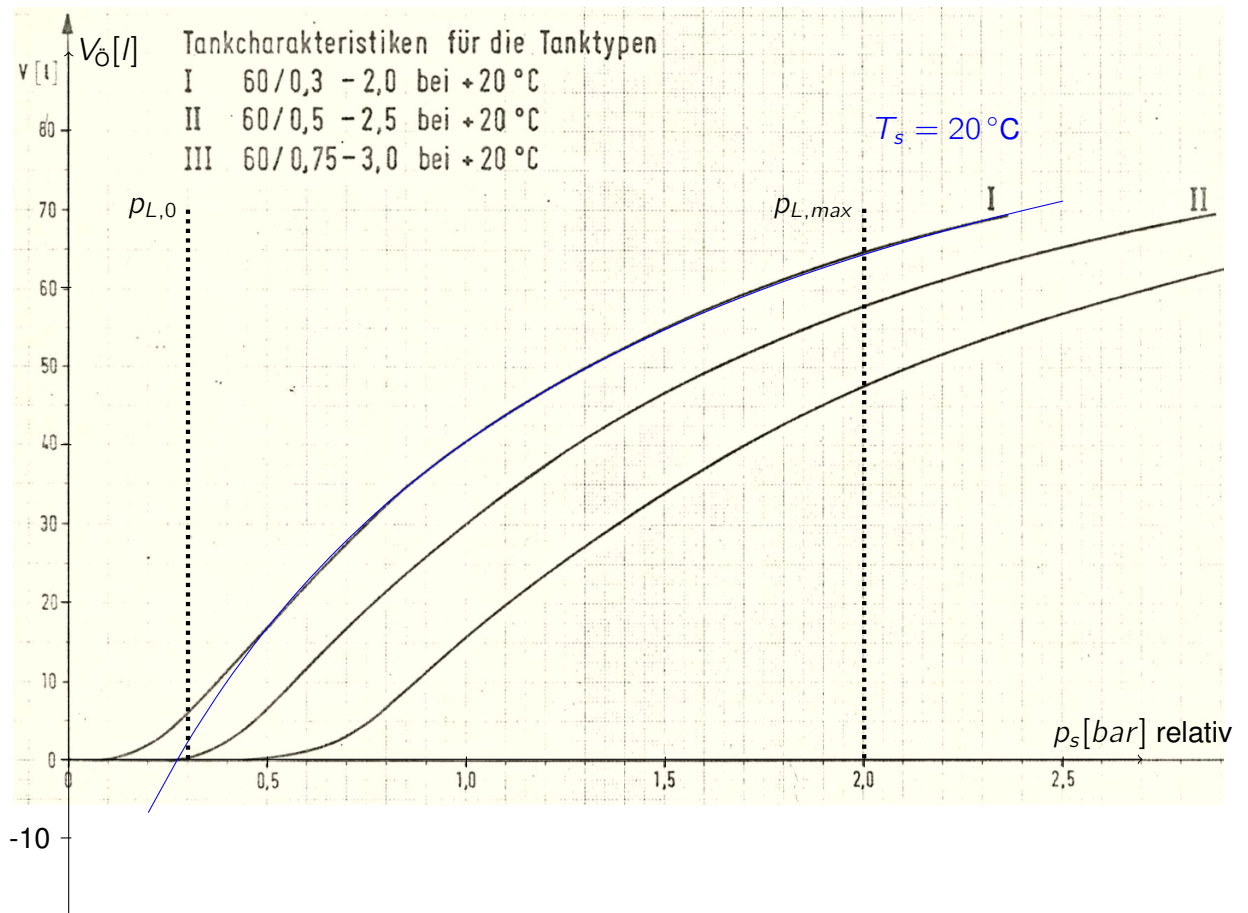


Abbildung 5.1.: Herstellerkennlinie F&G Tanks 1976 (basierend auf Messwerten für 20 °C)
(Quelle: Archiv Stromnetz Hamburg GmbH)

Herstellerkennlinie 2

Es existiert eine weitere Graphik mit Herstellerkennlinien (Abbildung 5.2). Diese beinhaltet eine sehr umfangreiche Darstellung für viele Tanks des Herstellers. Die veränderten Skalierungen sind dabei darunter dargestellt (hier zum Teil ausgeblendet). Ein Erstellungsdatum dieser Kurven ist jedoch nicht vorhanden. Dennoch handelt es sich hierbei wahrscheinlich um eine neuere Kennlinie. Die Modellfunktion (blau) lässt sich hier deutlich besser anpassen. Hier scheint demnach eine theoretisch-physikalische Kennlinie erstellt worden zu sein, die nicht auf praktischen Messungen eines realen Tanks beruht, sondern auf ähnlichen physikalisch vereinfachten Betrachtungen wie die Modellfunktion aus Kapitel 2.19.

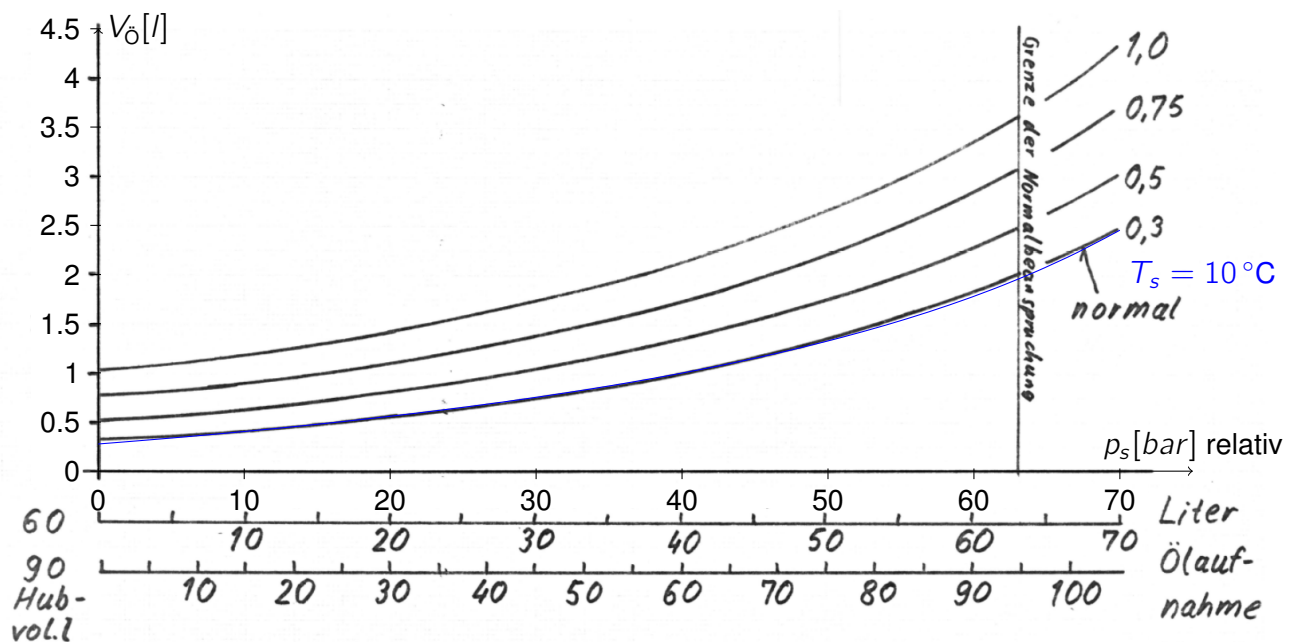


Abbildung 5.2.: Herstellerkennlinie F&G Tanks (10°C) (Erstellungsdatum nicht bekannt)
(Quelle: Archiv Stromnetz Hamburg GmbH)

bestimmte Parameter aus Herstellerkennlinien

Die bestimmten Parameter beider Herstellerkennlinien sind in Tabelle 5.1 zu sehen. Der Anfangs-Druck $p_{L,0}$ kann direkt dem Typenschild der ÖAGs entnommen werden und ist demnach bei beiden Kennlinien mit 0,3 bar identisch. Für die bessere Vergleichbarkeit wurde die Kurventemperatur $T_{L,0}$ für beide Graphen identisch auf 283 K festgelegt. Die aktuelle Temperatur T_s wird für die Bestimmung natürlich der angegebenen Temperatur der Graphik von 293 K bzw. 283 K angepasst. Das Anfangs-Luftvolumen $V_{L,0}$ kann variabel angepasst werden. Das Startölvolumen $V_{s,0}$ ist letztendlich der Offset der Modellfunktion. Dieser Parameter unterscheidet sich bei beiden Graphen um 4 l, hat jedoch kaum Aussagekraft, da das absolute Ölvolumen im Tank nie bekannt ist. Das Anfangs-Luftvolumen unterscheidet sich um ca. 3,5 Liter bei beiden Anpassungen. Da die Anpassung beider Kurven nach Augenmaß stattgefunden hat, ist die Anpassung nur eine Näherung.

Tabelle 5.1.: bestimmte Kenndaten aus Herstellerkennlinien

Bezeichnung	Kürzel	F&G 60/0,3 (1976)	F&G 60/0,3 (neuer)
Anfangs-Luftvolumen	$V_{L,0}$	106,0 l	109,5 l
Anfangs-Druck	$p_{L,0}$	0,3 bar	0,3 bar
Kurventemperatur	$T_{L,0}$	10 °C (283 K)	10 °C (283 K)
Startöl-Volumen	$V_{S,0}$	6 l	2 l

5.1.2. Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Messungen

Zunächst soll die Reproduzierbarkeit der Messungen des Prüfstandes getestet werden. Dafür wird das ÖAG F&G 60/0,3 mehrmals befüllt und entleert und die entstehenden Kennlinien können dann miteinander verglichen werden.

Entleeren-Messung

In Abbildung 5.3 sind die Messreihen von drei Entleeren-Messungen zu sehen. Bei der Betrachtung der Messreihen müssen die Temperaturunterschiede berücksichtigt werden. Diese ergeben sich durch das vorherige Befüllen des Tanks. Die Pumpe erwärmt das Öl durch ihre Abwärme. Mit jeder Befüllung wird die Temperatur des Tanks größer.

Für eine bessere Vergleichbarkeit wurden die Messpunkte um ein $\Delta V_{\bar{O}}$ auf der $V_{\bar{O}}$ -Achse verschoben, sodass bei $p_{L,max}$ jeweils der erste Messpunkt der drei Messreihen etwa übereinander liegt bzw. dem logischen Kurvenverlauf entsprechend angepasst ist.

Damit eine Reproduzierbarkeit der Kurven bestätigt werden kann, muss sowohl die zu erwartende Abweichung durch den Temperaturunterschied $\Delta V_{AV,theor}(\Delta T_s)$ als auch durch den Messfehler der Durchflussmessturbinen berücksichtigt werden. Die Berechnung des Arbeitsvolumens wurde in Kapitel 2.2.3 erläutert. (Für diese Berechnung werden die Parameter der 2. Herstellerkennlinie genutzt.) Die 2%-Abweichung zwischen zwei Messkurve wurde in Kapitel 4.2 begründet. Die zulässige Abweichung des Arbeitsvolumens ergibt sich dann so:

$$\Delta V_{AV,zulaessig} = \Delta V_{AV,theor}(\Delta T_s) + 0,02 \cdot V_{AV} \quad (5.1)$$

In Tabelle 5.2 sind sowohl die tatsächlichen Abweichungen ΔV_{AV} als auch die zulässigen Abweichungen $\Delta V_{AV,zulaessig}$ des Arbeitsvolumens im Bezug auf Messreihe 1 aufgelistet.

Sowohl die Abweichung von Messreihe 2 als auch von Messreihe 3 fallen geringer aus als der theoretisch berechnete maximale Wert. Hiermit kann die Entleeren-Messung als reproduzierbar bezeichnet werden.

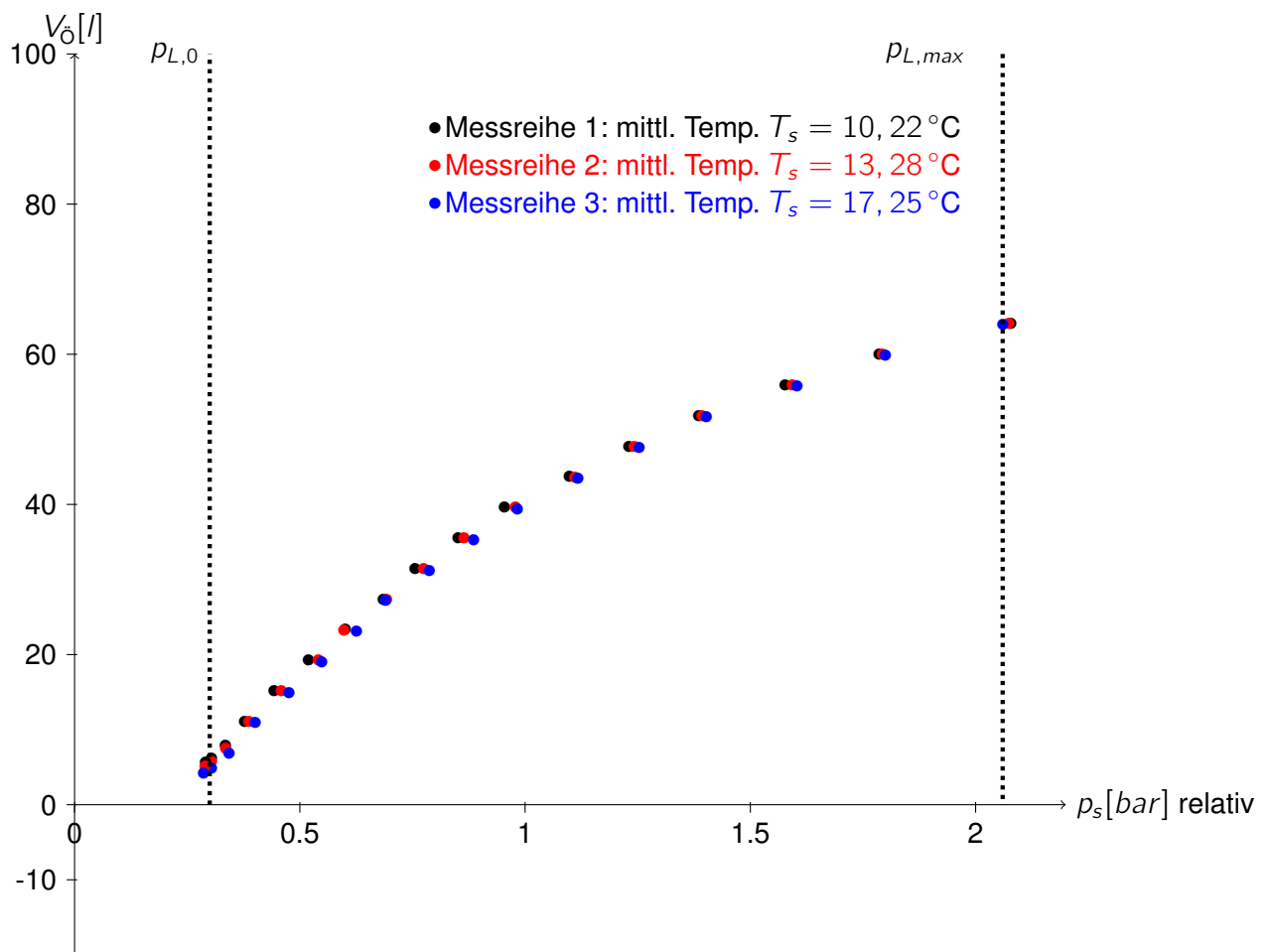


Abbildung 5.3.: Vergleich der Messpunkte mehrerer Entleeren-Messungen F&G60/0,3
(Quelle: eigene Darstellung)

Tabelle 5.2.: Vergleich der Entleeren-Messreihen

	T_s	ΔT_s	V_{AV}	ΔV_{AV}	$\Delta V_{AV,zulaessig}$
Messreihe 1 (Referenz)	10,22 °C	0 °C	58,53 l	0 l	0 l
Messreihe 2	13,28 °C	3,06 °C	58,94 l	0,41 l	1,86 l
Messreihe 3	17,25 °C	7,03 °C	59,67 l	1,14 l	2,76 l

Befüllen-Messung

In Abbildung 5.4 sind die Messreihen von drei Befüllen-Messungen zu sehen. In diesem Abschnitt soll äquivalent zum vorherigen Abschnitt geprüft werden, ob die Messergebnisse der Befüllen-Messungen reproduzierbar sind.

In Tabelle 5.3 sind wieder die tatsächlichen Abweichungen ΔV_{AV} als auch die zulässigen Abweichungen $\Delta V_{AV,zulaessig}$ des Arbeitsvolumens im Bezug auf Messreihe 1 aufgelistet. Die Abweichung zwischen der ersten und zweiten Messreihe liegt bei 1,48 l. Dieser Wert liegt unter der theoretischen maximalen Abweichung. Zwischen Messreihe 1 und Messreihe 3 sollte die theoretische Abweichung maximal 2,15 l betragen und ist mit 2,16 l knapp darüber. Da bei einer Befüllen-Messung die tatsächliche Temperatur des ÖAGs nicht exakt bestimmt werden kann, ist minimale Überschreitung des angenommen zulässigen Grenzwert hinnehmbar. Die Befüllen-Messung gilt hiermit auch als reproduzierbar.

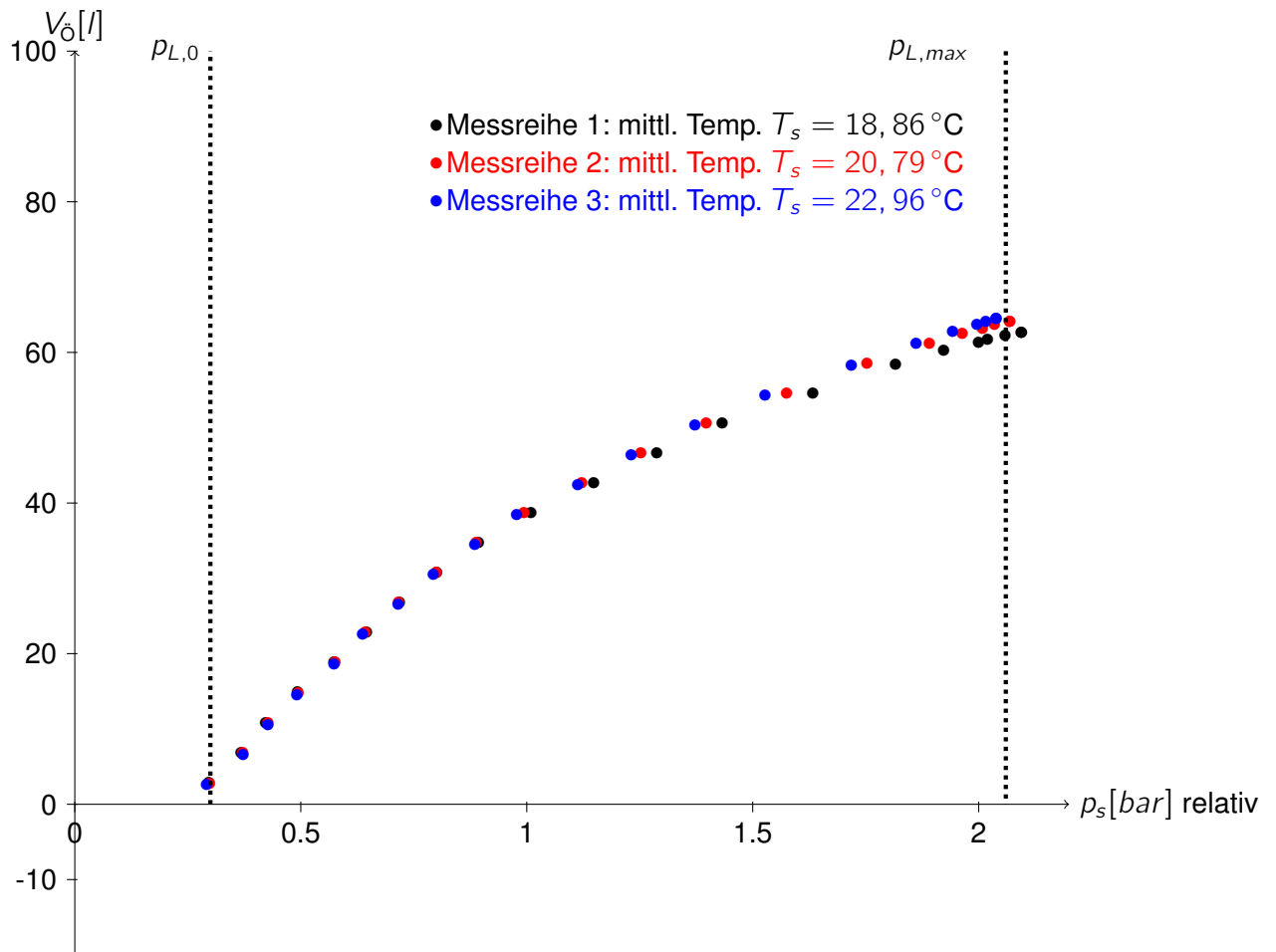


Abbildung 5.4.: Vergleich der Messpunkte mehrerer Befüllen-Messungen F&G60/0,3 (Quelle: eigene Darstellung)

Tabelle 5.3.: Vergleich der Befüllen-Messreihen

	T_s	ΔT_s	V_{AV}	ΔV_{AV}	$\Delta V_{AV,zulaessig}$
Messreihe 1	$18,86^\circ\text{C}$	0°C	59,82l	0l	0l
Messreihe 2	$20,79^\circ\text{C}$	$1,93^\circ\text{C}$	61,31l	1,48l	1,65l
Messreihe 3	$22,96^\circ\text{C}$	$4,1^\circ\text{C}$	61,99l	2,16l	2,15l

5.1.3. Vergleich Entleeren-/Befüllen-Messung mit Herstellerkennlinie

In diesem Abschnitt sollen die Messreihen mit den beiden Herstellerkennlinien verglichen werden. Für den Vergleich wird aufgrund der minimalen Höhendifferenz von Drucksensor und mittlerer Höhe des ÖAG (<20 cm) keine Korrektur der Druckwerte durchgeführt (Erklärung der Druckkorrektur in Kapitel [2.2.2](#)).

Vergleich mit Herstellerkennlinie 1

In Abbildung [5.5](#) sind eine Befüllen- und eine Entleeren-Messkurve mit gemessenen Durchschnittstemperaturen (20,79 °C und 19,18 °C) nahe den 20 °C der Herstellerkennlinie dargestellt. Die Abweichung des Arbeitsvolumens, also die Differenz zwischen den beiden Endpunkten der Messreihen, beträgt 1,28 l. Die zulässige maximale Abweichung des Arbeitsvolumens $\Delta V_{AV,zulaessig}$ der beiden Messreihen darf maximal 1,57 l betragen. Die Abweichung liegt damit unter diesem Grenzwert und die Messungen können sich gegenseitig verifizieren.

Beim Vergleich der Messung mit der eigentlichen Herstellerkennlinie lässt sich erkennen, dass die Entleeren-Messung fast exakt auf der Herstellerkennlinie liegt. Die Messpunkte der Befüllen-Messung weichen im unteren Bereich ab und folgen näherungsweise der physikalischen Modellfunktion. Hier kann mit einem möglichen Hystereseverhalten der Metallzellen argumentiert werden. Beim Zusammendrücken der Metallzellen bei der Befüllung sind die Metallzellen möglicherweise träger.

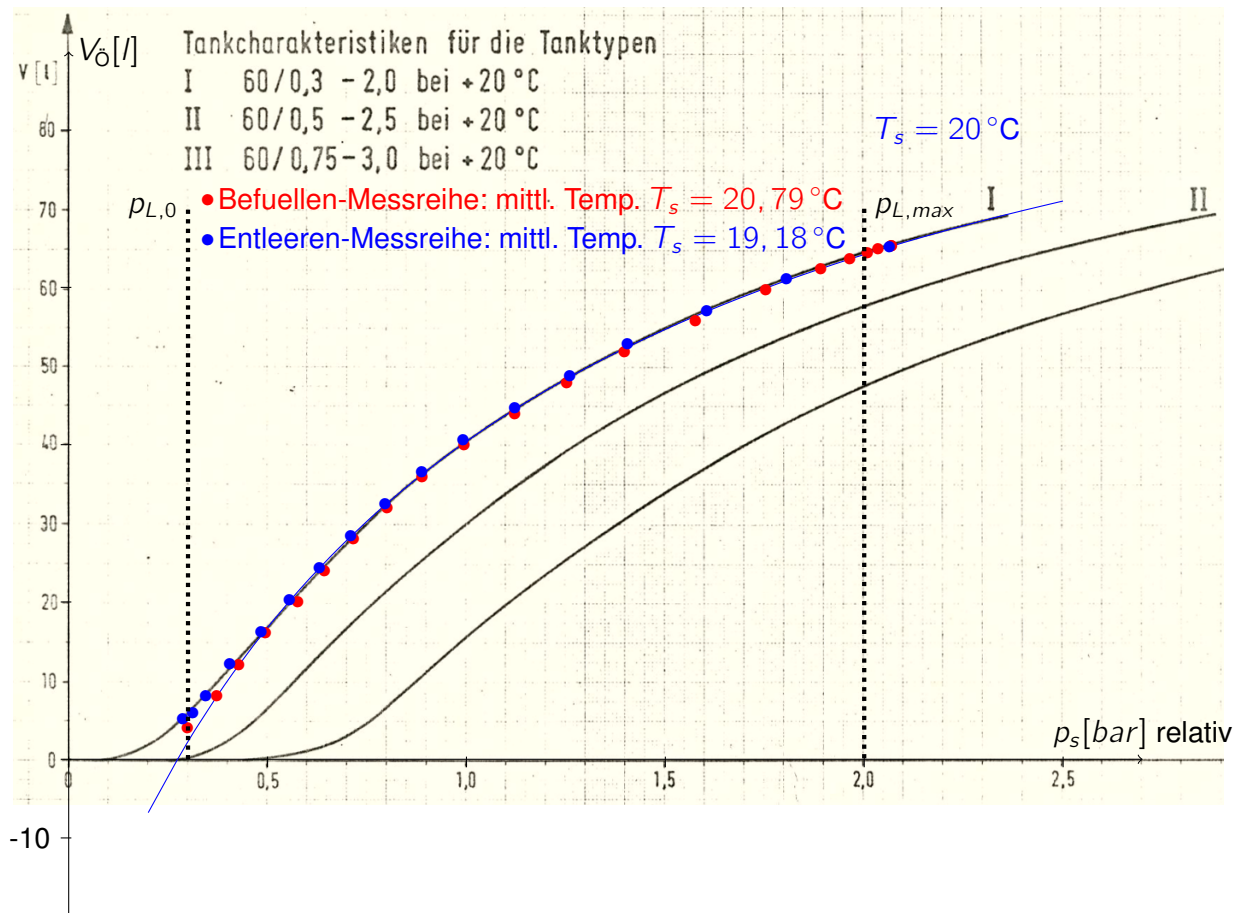


Abbildung 5.5.: Vergleich von Messreihen mit Herstellerkennlinie (1976)

Vergleich mit Herstellerkennlinie 2

In Abbildung 5.6 ist die zweite Herstellerkennlinie wiederum mit den überlagerten Messpunkten einer Befüllen- und Entleeren-Messung zu sehen. Die Bezugstemperatur für die Herstellerkennlinie liegt hier bei 10 Grad. Demnach werden hier für den Vergleich entsprechende Messreihen mit ähnlicher Temperatur gewählt. Die Durchschnittstemperatur der Entleeren-Messung ist mit $10,22\text{ °C}$ sehr nahe der Herstellerkennlinie. Es liegt jedoch keine Messreihe einer Befüllen-Messung vor, die nahe 10 Grad kommt. Jedoch beschreibt der angegebene Temperaturwert von $18,86\text{ °C}$ die Temperatur des eingeflossenen Öls. Der Tank selber ist vermutlich um ein paar Grad kälter, da eine nachfolgende Entleeren-Messung eine Temperatur von $13,28\text{ °C}$ ergeben hat.

Die Abweichung des Arbeitsvolumens der beiden Messreihen beträgt ca. 1,31. Die zulässige

maximale Abweichung des Arbeitsvolumens $\Delta V_{AV, zulässige}$ der beiden Messreihen darf maximal 3,04 l betragen. Die Abweichung liegt damit unter diesem Grenzwert und die Messungen können sich gegenseitig verifizieren

Wenn man die Messpunkte mit der Herstellerkennlinie selber vergleicht, ist eine objektive Bewertung schwierig, da das Diagramm selber ungünstig skaliert ist. Nach Augenmaß folgen die Messpunkte dennoch relativ genau dem Kurvenverlauf der Kennlinie.

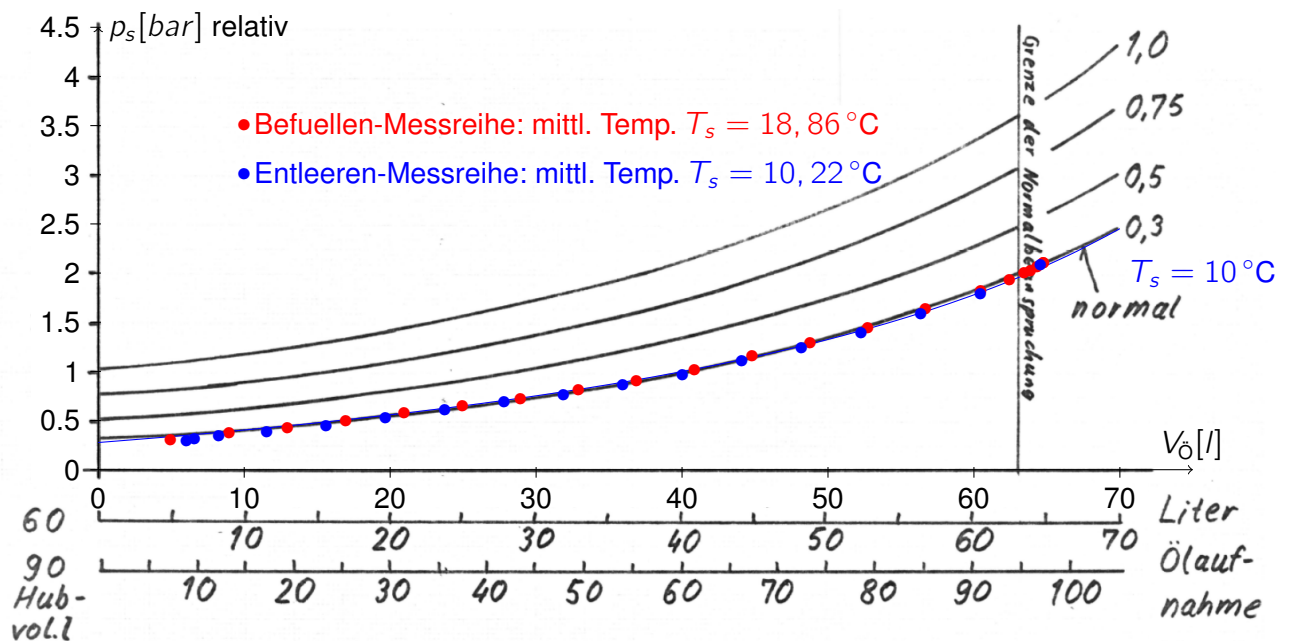


Abbildung 5.6.: Vergleich von Messreihen mit Herstellerkennlinie (neuer)

Ergebnis

Aus dem Vergleich der Messreihen untereinander und dem Vergleich mit der Herstellerkennlinie lässt sich das Messverfahren des Prüfstandes verifizieren. Eine zuverlässige Messung scheint hiermit möglich.

5.1.4. Bestimmung des Anfangs-Luftvolumens

In diesem Kapitel soll anhand der theoretischen Überlegungen aus Kapitel 2.2.5 eine Modellfunktion mit veränderbarem Anfangs-Luftvolumen n_L den Messpunkten angepasst werden und ein Rückschluss auf den Verschleißgrad und beschädigte Metallzellen gestellt werden.

Da in letztem Kapitel bewiesen wurde, dass die Messpunkte fast auf der Herstellerkennlinie liegen, kann nahezu von einem zu 100 % intakten Tank ausgegangen werden. Dennoch soll die Bestimmung des Anfangs-Luftvolumens mit diesen Messwerten zur Vollständigkeit durchgeführt werden. Hierbei sollen sowohl die Methode über die kleinsten Fehlerquadrate als auch die Methode über die Anpassung der Endpunkte genutzt werden. Es sollen hierfür die Kenndaten der zweiten Herstellerkennlinie als Vergleich dienen, da diese keinen Wendepunkt enthält, der von der physikalischen Modellfunktion nicht erfasst werden kann. In Abbildung 5.7 sind die beiden Modellfunktionen mit den überlagerten Messpunkten zu sehen.

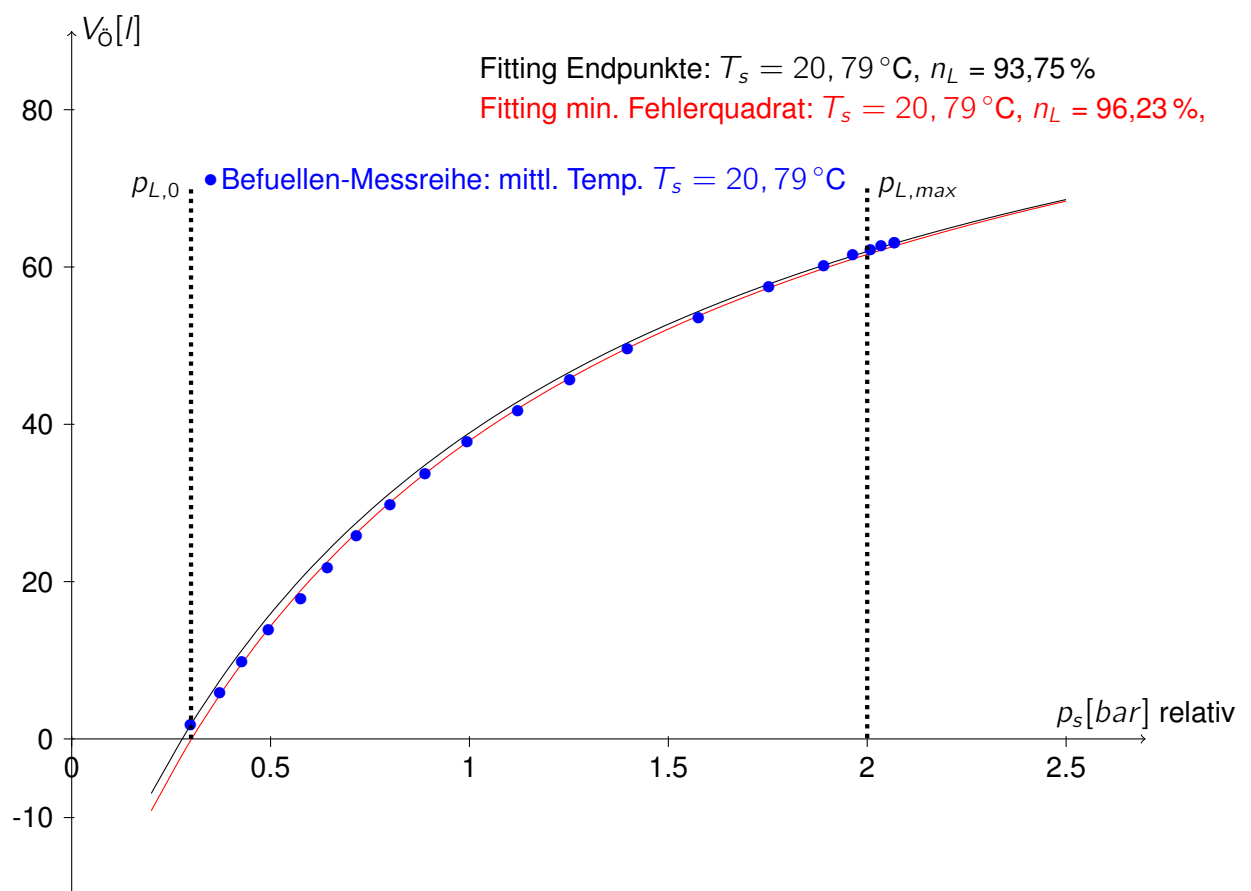


Abbildung 5.7.: Kurvenfitting für Modellfunktion (neuere Herstellerkennlinie)

Aus der Anpassung lässt sich erkennen, dass das angepasste prozentuale Anfangsluftvolumen mit 93,75% und 96,23% nahe an einem heilen Tank liegt. Die angepassten Kurven unterscheiden sich minimal voneinander.

5.1.5. Ergebnis

Aus den durchgeführten Vergleichen dieses Kapitel lässt sich schließen, dass das Messverfahren des Prüfstandes funktioniert, da sich die Messungen verifizieren lassen.

5.2. Feldtest im Hamburger Stromnetz

Zum Abschluss der Arbeit konnte ein tatsächlicher Einsatz im Netz stattfinden. In der ÜNS Süderstraße befinden sich 9 ÖAGs des Typs Siemens Z60G (Arbeitsbereich 0,15 bar - 3,2 bar). Diese ÜNS soll in naher Zukunft saniert werden und eine Überprüfung der Tanks soll Rückschluss auf den Verschleißgrad der ÖAGs bringen. So kann festgestellt werden, ob die Tanks bei der Sanierung erneuert werden müssen.



Abbildung 5.8.: ÖAG-Messung an der ÜNS Süderstraße (Quelle: eigenes Foto)

Die vollständige Darstellung aller gemessenen Kurven wäre für diese Arbeit zu umfangreich, dennoch sollen in Kapitel 5.2.5 die Endergebnisse der Messung kompakt dargestellt werden. Weiterhin sollen in diesem Kapitel einige Erkenntnisse aufgezeigt werden, die dieser Feldtest erbracht hat und Anlass für weitere mögliche Verbesserungen des Prüfstandes gibt.

5.2.1. Messdauer und Durchflussraten

Die Messdauer für eine Messung ist ein nicht zu vernachlässigender ökonomischer Faktor. Trotz der Automatisierung durch den Prüfstand muss mindestens ein Mitarbeiter für die Überwachung der Messung und den Anschluss eines neuen ÖAGs zur Verfügung stehen. Die Messung eines ÖAGs setzt sich aus mehreren Arbeitsschritten zusammen. Hierzu zählt die Zeit für den Anschluss eines neuen ÖAGs, die Entlüftung, das Befüllen des Tanks vom Arbeitsdruck auf Maximaldruck, eine Entleeren-Messung, eine Befüllen-Messung und das Wiederherstellen des anfänglichen Drucks. In folgender Tabelle ist der Zeitaufwand in Minuten für jeden Arbeitsschritt dargestellt. (Hier sind der Transport und der Zeitaufwand für die Organisation und Auswertung einer solchen Messung nicht einberechnet.) (Im Nachhinein konnte festgestellt werden, dass ein zugesetzter Feinfilter am Ausgang der Aufbereitungsanlage die Durchflussraten beim Befüllen negativ beeinflusst hat. Die Durchflussraten dürften bei zukünftigen Messungen beim Befüllen demnach besser ausfallen als hier dargestellt.)

Tabelle 5.4.: Zeitdauer einer ÖAG-Messung Z60G im Winter (Aufbau und Transport nicht einberechnet)

	Zeitdauer
Anschluss (bei bestehendem Prüfaufbau)	ca. 5 min
Entlüftung	ca. 5 min
Maximaldruck herstellen	ca. 15 min
Entleeren-Messung	ca. 40 min
Befüllen-Messung	ca. 30 min
Anfangsdruck wiederherstellen	ca. 15 min
gesamt	1:40 h

In Abbildung 5.9 sind exemplarisch die Durchflussraten abhängig vom Restdruck des ÖAGs von drei Entleeren-Messungen dargestellt. Es liegt ein nahezu proportionaler Zusammenhang vor. Dies zeigte bereits das Gesetz von Hagen-Poiseuille (Kapitel 2.1.3). Der Volumenstrom startet bei nahezu 5 l/min und sinkt dann über den Messverlauf bis auf 1,3 l/min bei 0,3 bar Restdruck. Die Messung muss spätestens beim Unterschreiten von 1 l/min beendet werden, da die Durchflussmessturbinen nur bis zu diesem Wert spezifiziert sind. Aufgrund dieser Tatsache wurden die Messungen nur bis zu einem Minimaldruck von 0,3 bar durchgeführt und nicht bis zum angegebenen Minimum des Arbeitsbereichs von 0,15 bar.

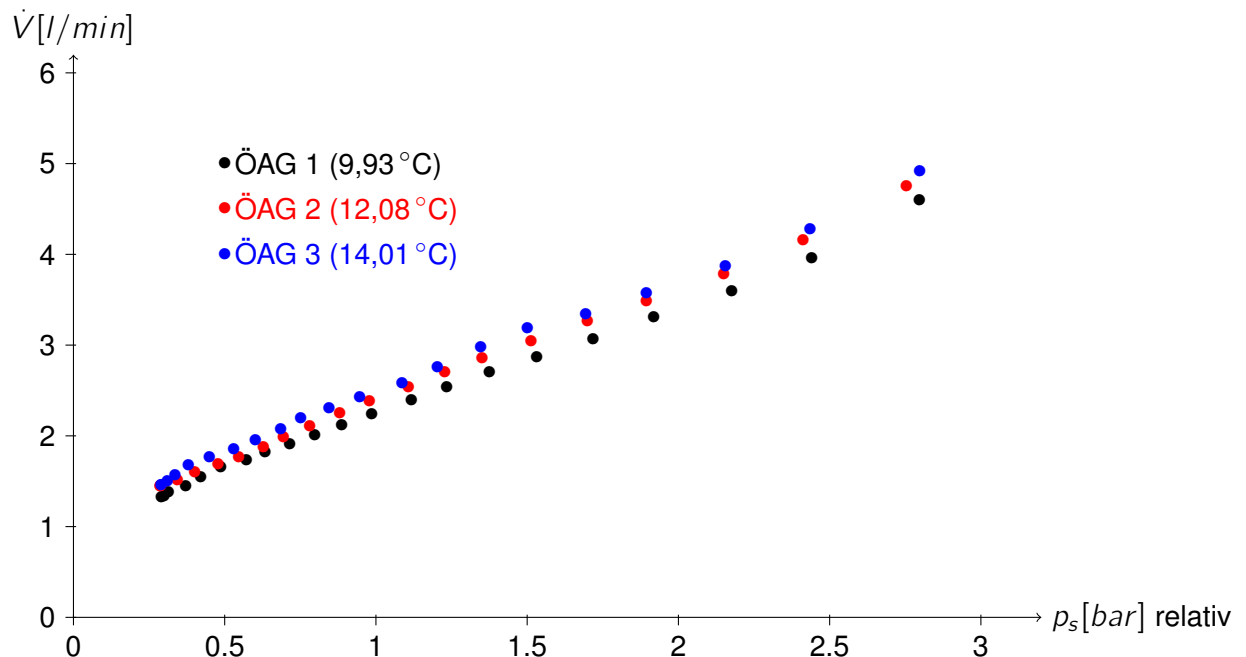


Abbildung 5.9.: Volumenstrom beim Entleeren (vorheriges Befüllen auf Maximaldruck) (Quelle: eigene Darstellung)

Insgesamt muss angemerkt werden, dass die Messungen eine deutliche Zeitspanne benötigen. Da die Messung im Januar stattgefunden hat, hat die geringe Außentemperatur auf die Viskosität des Öls einen negativen Einfluss. Durch vorheriges Befüllen auf den Maximaldruck wird dieser Effekt etwas vermindert, da sich das ÖAG durch das erhitzte einfließende Öl erwärmt. In der Abbildung 5.9 ist eine Abnahme der Durchflussraten bei geringerer Temperatur deutlich zu erkennen. Das Öl wird dickflüssiger und fließt demnach träger durch das Rohr- und Schlauchsystem. Eine Reduzierung der Schlauchlängen auf ein Minimum sollte beim nächsten Feldtest Priorität haben.

5.2.2. Genauigkeit der Durchflussmessturbinen

Nach der Messung des sechsten ÖAGs konnten im Umlaufbetrieb Abweichungen der Durchflussraten der beiden Durchflussmessturbinen von 0,2 l/min bis 0,3 l/min festgestellt werden. Diese Abweichungen konnten auch bei einigen vorherigen Tests festgestellt werden. Ein längeres Spülen im Umlaufbetrieb konnte den Fehler meistens beheben. Die momentane Abweichung ist bis zum Abgabetermin dieser Arbeit noch vorhanden gewesen. Es wird vermutet, dass kleine Dreckpartikel im Öl, die auch beim Entleeren der ÖAGs beobachtet werden konnten, möglicherweise die Turbinen in den Sensoren zusetzen. Dies könnte zu einer verringerten Drehzahl der Turbinen und damit zu falschen Messergebnissen führen. Eine

weitere Untersuchung der Durchflussmessturbinen mit einem Endoskop oder direkt durch den Hersteller sollte veranlasst werden, um die genauen Ursachen dieses Fehlers zu ergründen.

5.2.3. Anmerkungen zur Messung

Da sich der Prüfstand bei der Messung deutlich oberhalb der zu messenden ÖAGs befand, wurde der Druck für eine Analyse der Messergebnisse um 0,118 bar korrigiert. (Höhendifferenz zwischen Drucksensor und mittlerer Tankhöhe: ca. 1,5 m) Die Berechnung einer Druckkorrektur wurde in Kapitel 2.2.2 erläutert.

Weiterhin muss bei dieser Messung angemerkt werden, dass diese im eingebauten Zustand der ÖAGs stattgefunden hat. Da sich die Anschlüsse der ÖAGs unten am Tank befinden, konnten die Tanks vor der Messung nicht gespült werden. Entweichendes Gas aus defekten Metallzellen könnte sich demnach an der Oberseite der ÖAGs befinden und erfüllt weiterhin den Ausgleichscharakter der Tanks. Hiermit kann das berechnete prozentuale Anfangsluftvolumen fälschlicherweise deutlich höher ausfallen. Für zukünftige Messungen muss demnach entweder ein Ausbau der ÖAGs zum Drehen und Spülen stattfinden oder eine zusätzliche Analyse der gelösten Gase mithilfe einer Ölprobe durchgeführt werden. (Bei einigen Überwachungsnetzstationen befinden sich die Anschlüsse der Tanks an der Oberseite, hier gestaltet sich eine Spülung ohne Ausbau der Tanks deutlich einfacher, da ein Ölfluss das oben gesammelte Gas direkt aus dem ÖAG spült.)

5.2.4. Verwendete Herstellerkennlinie für die Auswertung

Bei dem gemessenen Tanktyp handelt es sich, wie schon erwähnt, um einen Siemens Z60G mit einem angegebenen Druckbereich von 0,15 bar bis 3,2 bar. Für den Tanktyp Z60G ist der Abteilung jedoch nur eine Herstellerkennlinie mit einem abweichenden dargestellten Druckbereich von 0,3 bar bis 3,5 bar bekannt. Aus dieser Herstellerkennlinie lässt sich nicht schließen, ob es sich um einen anderen Tanktypen mit unterschiedlichen Parametern handelt oder ob nur ein abweichendes Druck-Intervall des Tanks für die Herstellerkennlinie ausgemessen wurde. Da keine „passendere“ Herstellerkennlinie vorhanden ist, sollen die Parameter der vorhandenen Kurve für eine erste Analyse genutzt werden. Die Ergebnisse müssen jedoch unter diesem Aspekt kritisch betrachtet werden.

5.2.5. Messergebnisse

Die Auswertung der Messergebnisse wurde mithilfe der in Kapitel 2.2.5 vorgestellten Verfahren zur Beurteilung des prozentual vorhandenen Anfangs-Luftvolumens durchgeführt. In Tabelle 5.5 sind die durch Berechnung mithilfe des minimalen Fehlerquadrats bestimmten Faktoren n_L des Anfangs-Luftvolumens dargestellt. Dahinter in Klammern ist zusätzlich der berechnete Faktor n_L , der über die Verhältnisbildung des Differenzvolumens bestimmt wurde, eingefügt.

Insgesamt konnte festgestellt werden, dass das noch vorhandene Anfangs-Luftvolumen der gemessenen ÖAGs zwischen 80,4% und 85,3% schwankt (Mittelwert aus Entleeren- und Befüllen-Messung des minimalen Fehlerquadrats). Die letzten drei gemessenen ÖAGs (1003, 1004 und 1005) werden dabei nicht berücksichtigt. (Begründung im Abschnitt 5.2.2) Da alle 6 ÖAGs eine ziemlich ähnliche Abweichung von der Herstellerkennlinie zeigen bzw. ein ähnliches verbleibendes Anfangs-Luftvolumen haben, liegt die Vermutung nahe, dass die genutzte Herstellerkennlinie diesen gemessenen Tanktyp nicht korrekt beschreibt. Dies ist aufgrund des abweichenden Druckbereichs der Herstellerkennlinie (Kapitel 5.2.4) zu erwarten gewesen. Eine weitere unabhängige Messung eines Z60G Tanks aus einer anderen ÜNS kann diese Annahme bestätigen, da die Befüllen- und Entleeren-Messkurven dieses Tanks näherungsweise mit denen aus der Süderstraße übereinstimmen.

Aufgrund einer fehlenden korrekten Herstellerkennlinie ist demnach eine absolute Bewertung des Verschleißgrades der ÖAGs nicht möglich. Dennoch können die Messergebnisse untereinander verglichen werden. Durch zukünftige Messungen dieses Tanktyps aus anderen Überwachungsnetzstationen können noch bessere Vergleiche ermöglicht werden. Die Erstellung einer angenäherten Herstellerkennlinie aus Durchschnittswerten der besten ÖAGs könnte eine sinnvolle Option sein.

Tabelle 5.5.: bestimmtes prozentuales Anfangs-Luftvolumen n_L der gemessenen ÖAGs (ÜNS Süderstraße) (Bestimmung über minimales Fehlerquadrat (und Verhältnisbildung in Klammern))

Tanknummer	Befüllen n_L	Entleeren n_L	Mittelwert n_L
1003 (fehlerh. Messung)	82,0 % (81,3 %)	88,5 % (87,8 %)	85,3 % (84,5 %)
1004 (fehlerh. Messung)	76,5 % (75,5 %)	82,5 % (82,0 %)	79,5 % (78,8 %)
1005 (fehlerh. Messung)	63,1 % (61,9 %)	80,9 % (80,7 %)	72,0 % (71,3 %)
1006	82,9 % (81,9 %)	77,9 % (78,1 %)	80,4 % (80,0 %)
1007	83,0 % (82,4 %)	79,7 % (79,1 %)	81,4 % (80,8 %)
1008	84,4 % (83,2 %)	82,2 % (81,4 %)	83,3 % (82,3 %)
1009	86,4 % (84,9 %)	83,7 % (83,1 %)	85,1 % (84,0 %)
1010	85,9 % (84,2 %)	84,6 % (84,1 %)	85,3 % (84,1 %)
1011	83,0 % (81,9 %)	83,2 % (83,6 %)	83,1 % (82,7 %)

6. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel soll ein Fazit gezogen werden, welche Optimierungen am Prüfstand im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt werden konnten und welcher Optimierungsbedarf weiterhin besteht.

- **aktueller Entwicklungsstand des Prüfstands:**

- Der Prüfstand befindet sich in einem Zustand, in dem ein erster Feldtest durchgeführt werden konnte. Folgende Verbesserungen wurden im Rahmen dieser Arbeit umgesetzt:
 - * Die Steuersoftware wurde nach eigenen Ideen neu entworfen und programmiert. Die Messungen laufen sehr stabil. Es konnten keine Abbrüche durch ein Versagen der Steuersoftware erkannt werden.
 - * Eine Kompatibilität des Prüfstandes zur neuen Ölaufbereitungsanlage konnte durch Umbauten am Rohrsystem und durch die Einführung einer neuen Betriebsart (Umlaufbetrieb) geschaffen werden.
 - * Eine eingebaute Kommunikationsverbindung zur Ölaufbereitungsanlage ermöglicht eine automatisierte Steuerung über den Prüfstand.
 - * Die erzeugten Messungen können mithilfe eines selbstgeschriebenen VB-Skriptes zuverlässig und übersichtlich archiviert werden.
 - * Sicherheitstechnisch konnten durch die Änderungen am Rohrsystem zum Überdruck-Abbau und durch die Kommunikationsverbindung zur Aufbereitungsanlage einige Verbesserungen gemacht werden.
 - * Für den Vergleich der Messungen mit den Herstellerkennlinien wird ein temperaturunabhängiger Faktor bestimmt, der den prozentualen Anteil des noch vorhandenen Luftvolumens bestimmt. Der Bediener kann diesen Wert direkt vor Ort einsehen.
- Das Ziel einen fertigen Prüfstand für den täglichen Einsatz im Netz zu übergeben, konnte dennoch nicht vollständig erreicht werden. Folgende Probleme bestehen weiterhin:

- * Das bisher unbekannte Problem der starken Abweichungen der Durchflussmessturbinen (beschrieben in Kapitel 5.2.2) konnte im Rahmen der Arbeit nicht mehr gelöst werden.
- * Bezüglich der Engstellen im Rohrsystem hat ein Ausbau der hierfür verdächtigen Luftfalle stattgefunden. Aufgrund eines fehlenden Vergleichs vor und nach dem Umbau kann hier keine Verbesserung nachvollzogen werden.

- **zukünftige Verbesserungen:**

- Aufgrund der Erkenntnisse bisheriger Tests und des abschließenden Feldtests bietet sich ein weiterer Umbau des Rohrsystems wie in Abbildung 6.1 dargestellt an:
 - * Die Zweige des Rohrsystems sollten neu angeordnet werden, um eine bessere Entlüftung zu ermöglichen. Der Rücklauf-Zweig sollte dabei an oberste Stelle. Gesammelte Luft im Rohrsystem kann so nach oben steigen und direkt durch den Ölfluss zur Ölaufbereitungsanlage befördert werden.
 - * Die Nutzung von zwei Magnetventilen in Reihe kann vermieden werden, wenn der Umlaufbetrieb durch ein paralleles Magnetventil V_M3 zum Sicherheitsventil V_U1 realisiert wird. Hierbei ist im Gegensatz zum momentanen Aufbau der Durchfluss durch das Magnetventil nur in eine Richtung gegeben.
 - * Es sollten alternative Durchflusssensoren (S_F1 und S_F2) verwendet werden, die weniger empfindlich gegenüber Verschmutzungen sind.
 - * Der Einbau eines Öl-Filters vor dem Durchfluss-Sensor S_F2 ermöglicht das Herausfiltern von Verschmutzungen im Öl, die aus dem ÖAG kommen.
 - * Die Drosselventile (V_D1 und V_D2) sollten ausgebaut werden, da ihre Funktion nicht benötigt wird. Kritische Durchflussraten werden nicht erreicht.

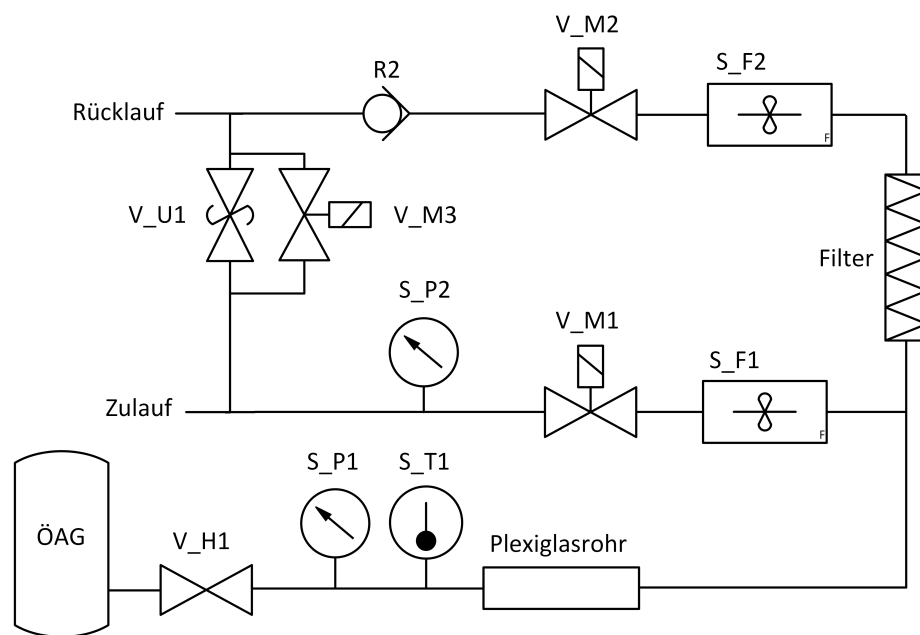


Abbildung 6.1.: sinnvoller Umbau des Prüfstandes aufgrund gewonnener Erkenntnisse
(Quelle: eigene Darstellung)

Literaturverzeichnis

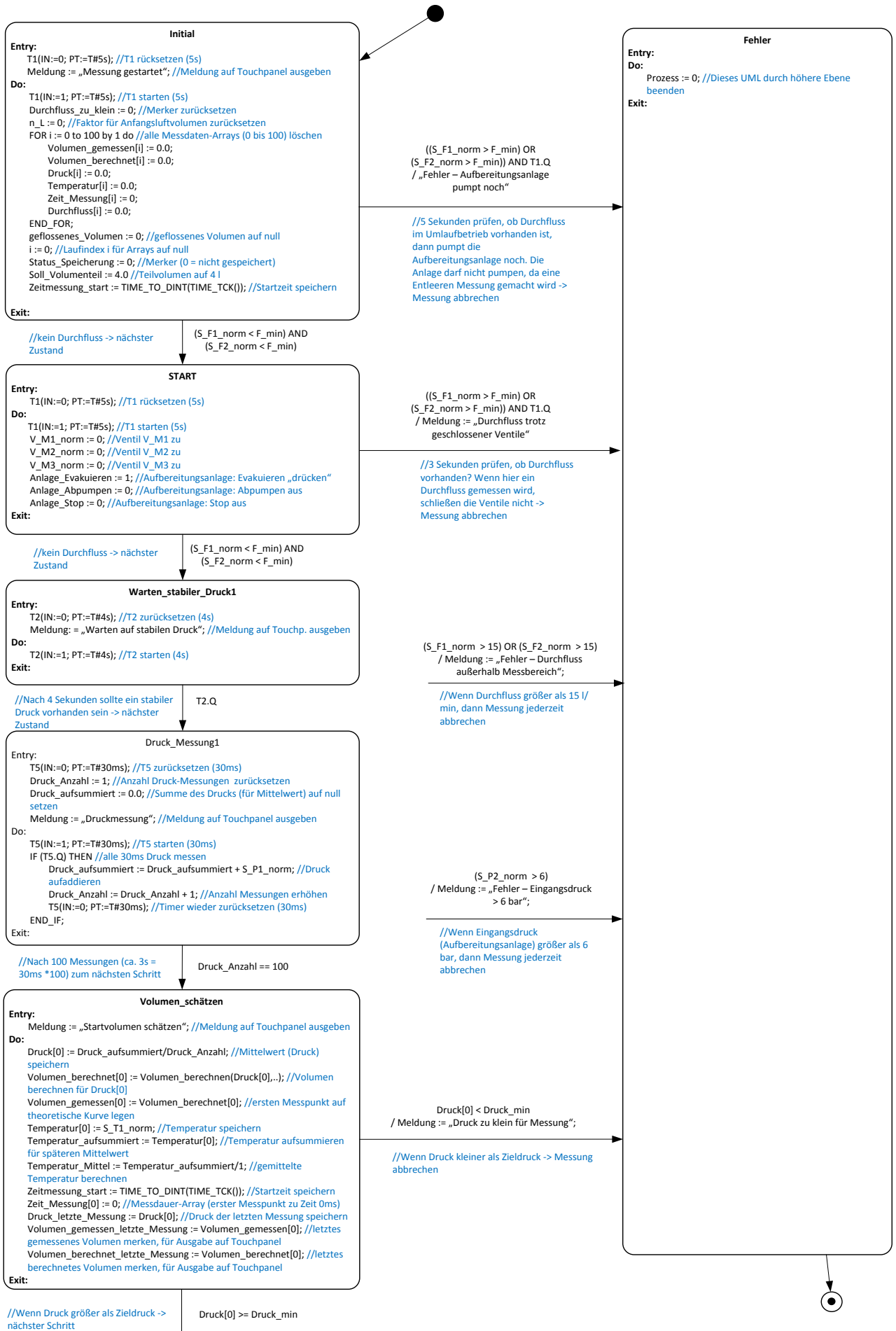
- [AAN GmbH 2015] AAN GmbH (Veranst.): *Ölreinigungsanlage (technische Dokumentation)*. 2015
- [Ahrens 2015] AHRENS, F.: *Untersuchung an defekten Metallzellen aus einem Ausdehnungsgefäß*. 2015
- [Averes 2015] AVERES, M.: *Berechnung von Ölausdehnungsgefäßen*. 2015
- [Frost 2018] FROST, I.: *Einfache lineare Regression*. Wiesbaden : Springer VS, 2018
- [Kechner und Salvanos 2015] KECHNER, C. ; SALVANOS, A.: *UML 2.5 - Das umfassende Handbuch*. Bonn : Rheinwerkallee, 2015
- [Kälin 2012] KÄLIN, Philipp: *Implementierung einer Finiten State Machine*. März 2012. – URL https://www.mikrocontroller.net/attachment/137066/ImplementierungEinerFiniteStateMachine_V1.1.pdf
- [Küchler 2017] KÜCHLER, A.: *Hochspannungstechnik*. Heidelberg : Springer Vieweg, 2017
- [Kühne 2016a] KÜHNE, S.: *Entwicklung und Aufbau eines automatisierten Prüfstandes zur Kapazitätsmessung von Ölausgleichsgefäßen*. Bautzen, 2016
- [Kühne 2016b] KÜHNE, S.: *Programmierung einer automatisierten Anlage zur Befüllung, Entleerung und Kapazitätsmessung von Ölausgleichsgefäßen*. Bautzen, 2016
- [Maaß 2017] MAASS, Prof. Dr. J.: *Vorlesung Prozessautomatisierung (HAW Hamburg)*. 2017
- [Schlabbach 1994] SCHLABBACH, J.: *Elektroenergieversorgung*. Berlin : VDE Verlag GmbH, 1994
- [Schuppar und Humenberger 2015] SCHUPPAR, B. ; HUMENBERGER, H.: *Elementare Numerik für die Sekundarstufe*. Berlin, Heidelberg : Springer Spektrum, 2015
- [Shell 2010] Shell (Veranst.): *Shell Diala S3 ZX-IG Datenblatt*. 2010
- [Shell 2015] Shell (Veranst.): *Shell Diala S4 ZX-IG Datenblatt*. 2015

- [Siemens 2017] Siemens (Veranst.): *SIMATIC S7-300, CPU 314C-2PN/DP Datenblatt*. 2017
- [ST 2015] ST (Veranst.): *STM32F103x8 STM32F103xB Datasheet*. 2015. – Rev. 17
- [Tipler und Mosca 2015] TIPLER, P. A. ; MOSCA, G.: *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*. Heidelberg : Springer-Verlag, 2015
- [Wellenreuther und Zastrow 2008] WELLENREUTHER, G. ; ZASTROW, D.: *Automatisieren mit SPS - Theorie und Praxis*. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2008
- [Zierrep 2015] ZIEREP, J.: *Grundzüge der Strömungslehre*. Wiesbaden : Springer Verlag, 2015

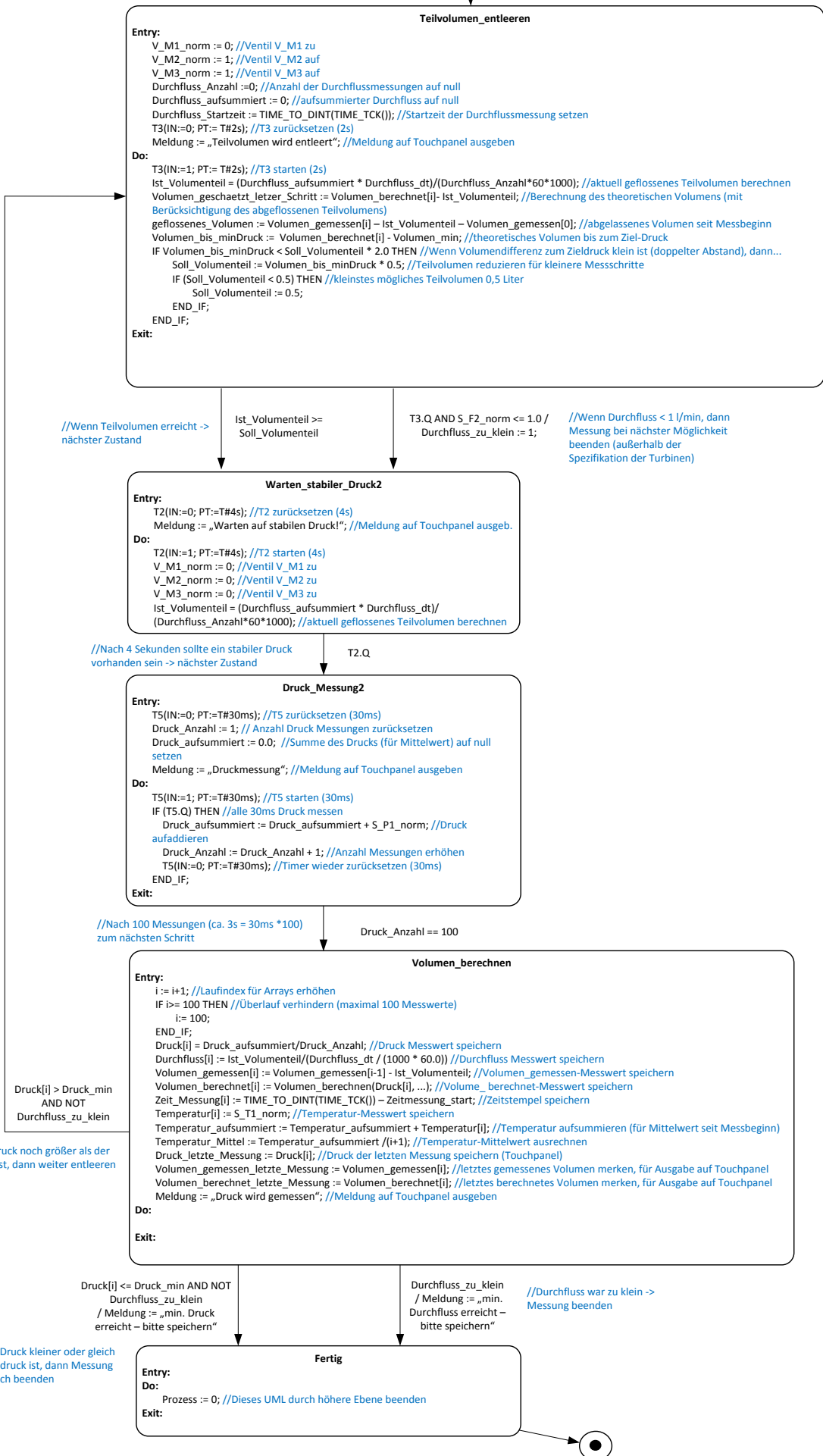
A. Anhang

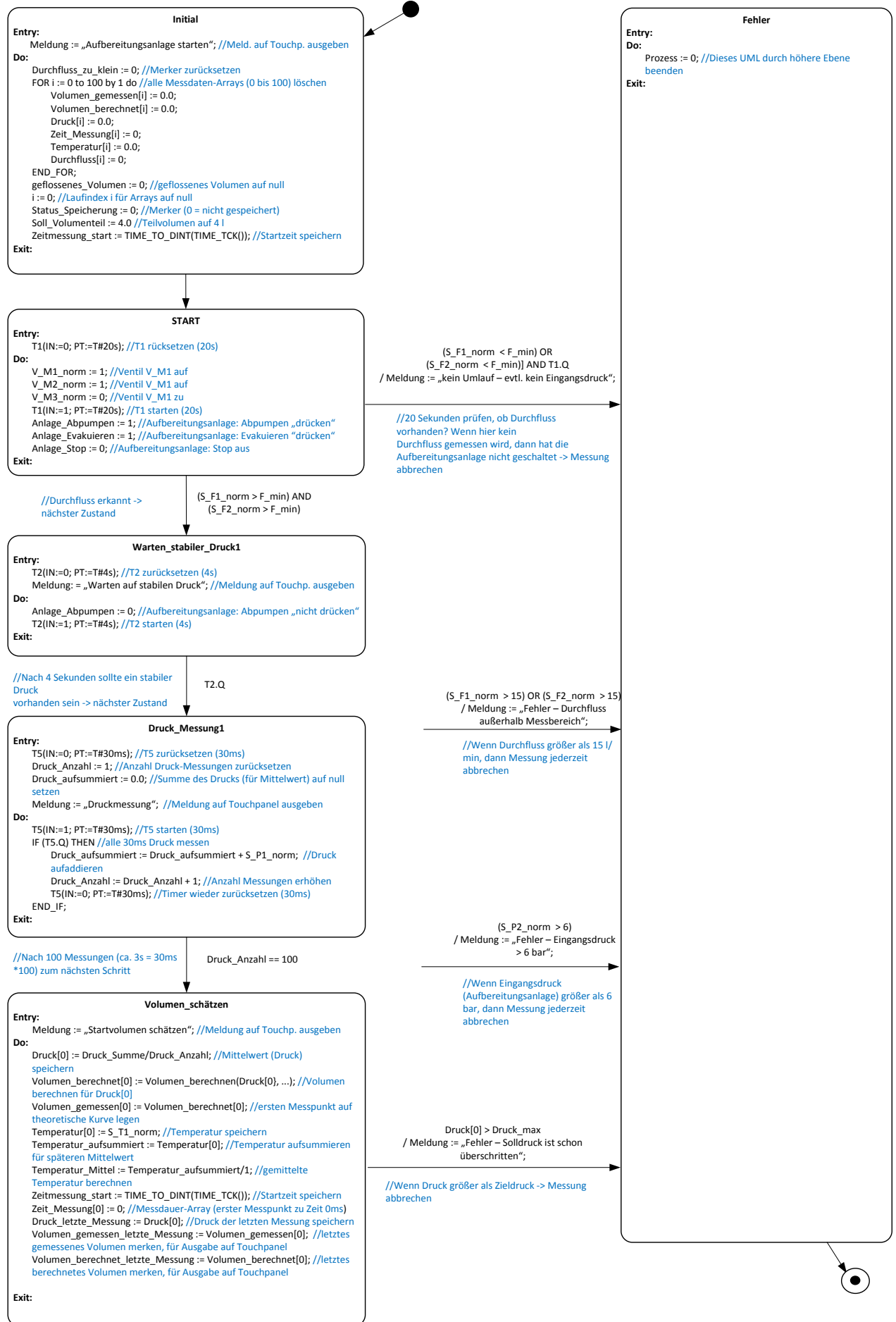
A.1. UML statechart: Entleeren Messung

A.2. UML statechart: Befüllen Messung

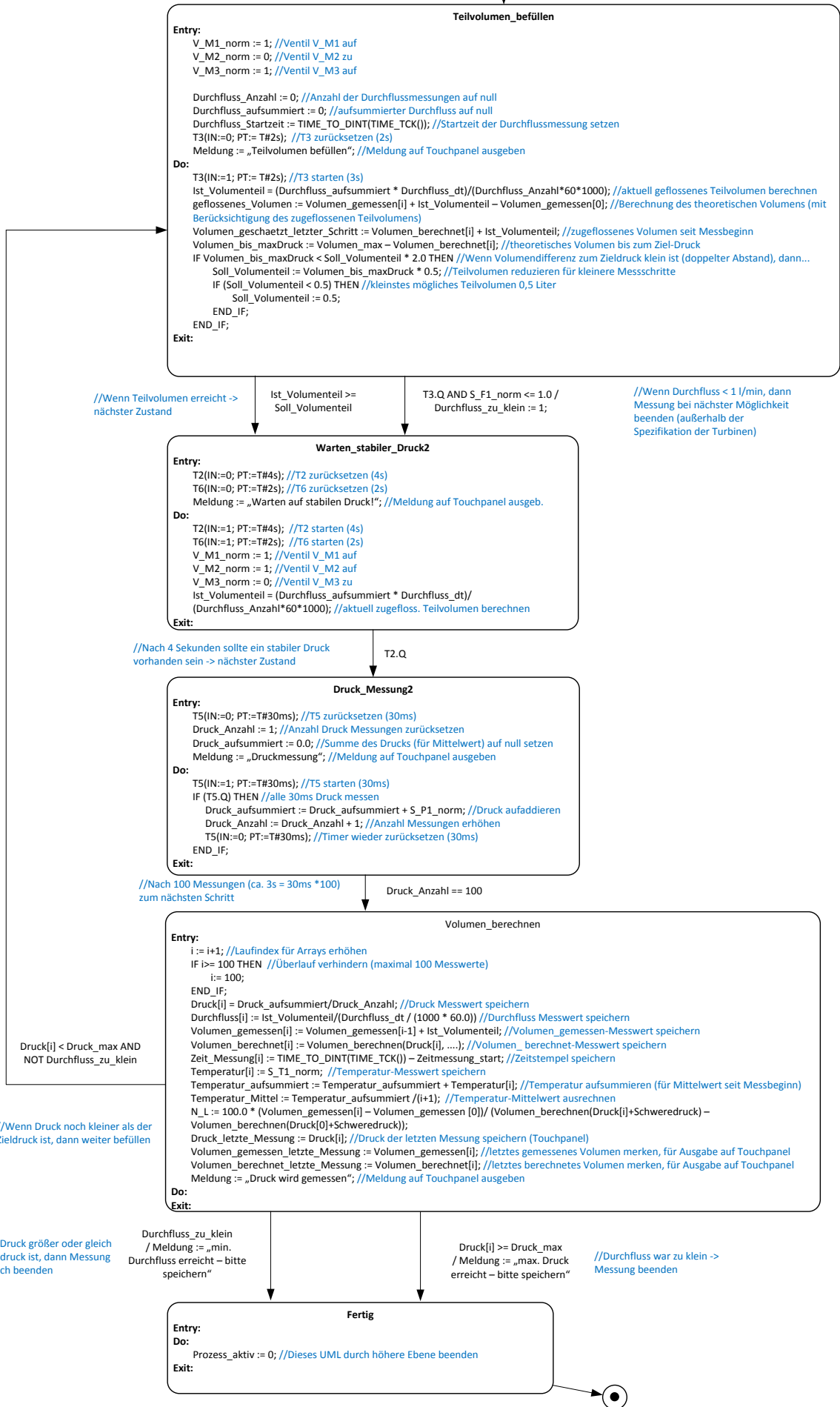


Seite 1





Seite 1



B. Anhang auf CD

Der Anhang dieser Arbeit befindet sich auf CD und ist bei Prof. Dr. Björn Ingo Lange (HAW Hamburg) und Dipl.-Ing. Markus Averages (Stromnetz Hamburg GmbH) einzusehen.

B.1. Bachelorthesis

B.2. Datenblätter

B.3. Quellcode der SPS-Programmierung

Versicherung über die Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) APSO-TI-BM ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, 4. Februar 2018

Ort, Datum

Unterschrift