INSTITUT FÜR
ENERGIETECHNIK
UND THERMODYNAMIK
Institute of Energy Systems and Thermodynamics

Diplomarbeit

Experimentelle Untersuchung eines neuartigen, axialen Wasserzuführungskonzepts für mehrdüsige Peltonturbinen

unter der Leitung von

Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr.techn. Anton Maly

Univ. Ass. Dipl.-Ing. Susanna Jungmeister, BSc

E302 – Institut für Energietechnik und Thermodynamik

Eingereicht an der Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

der Technischen Universität Wien

zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)

von

Jakob Puchhammer, BSc

[redacted]

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich diese Diplomarbeit bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin / einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, Oktober 2025

Jakob Puchhammer, BSc

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

DANKSAGUNG

An erster Stelle möchte ich mich bei Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr.techn. Anton Maly sowie bei Univ. Ass. Dipl.-Ing. Susanna Jungmeister, BSc für die hervorragende Betreuung meiner Diplomarbeit bedanken. Ihre wertvollen Anregungen, die konstruktive Kritik und die fachliche Begleitung während des gesamten Entstehungsprozesses waren für den Erfolg dieser Arbeit von entscheidender Bedeutung. Mein Dank gilt außerdem den Werkstattmitarbeitern und -mitarbeiterinnen des Labors am Institut für Energietechnik und Thermodynamik, die mir stets mit Rat und Tat zur Seite standen.

Ich danke meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, die mir dieses Studium ermöglicht haben und auf deren Unterstützung ich fortwährend zählen konnte. Ich gedenke meiner lieben Großmutter Erni. Obwohl sie die finale Abgabe nicht mehr miterleben konnte, ist ihre Zuversicht ein Teil dieses Erfolgs, und ich weiß, dass sie ihn jetzt mitfeiert.

Der größte Dank gilt schließlich meiner Lebenspartnerin Johanna. Sie hat mich vom ersten Tag des Studiums an begleitet und mir in allen Höhen und Tiefen Rückhalt gegeben. Ihr stets offenes Ohr und ihre aufbauenden Worte gaben mir die Kraft, auch schwierige Phasen zu meistern.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

KURZFASSUNG

Der aktuelle Wandel der Energiebranche hin zu erneuerbaren Energieträgern rückt auch die Wasserkraft wieder stärker in den Fokus. Das Projekt *AxFeeder* umfasst dabei eine numerische und experimentelle Untersuchung eines neuartigen, axialen Zuführungskonzepts zu einer mehrdüsigen Peltonturbine als Alternative zur konventionellen radialen Wasserzufuhr.

Die vorliegende Arbeit behandelt die experimentelle Umsetzung und Inbetriebnahme des Konzepts in Form eines Versuchsprüfstands. Dabei liegt der Fokus auf Messungen der in der Zuleitung vorherrschenden Druck- und Strömungsbedingungen, anhand derer Aussagen über das reale Betriebsverhalten getroffen werden. Dies umfasste die Definition eines Betriebsbereichs, die Bestimmung von Druckverlusten durch Bilanzierung zwischen den einzelnen Messebenen, sowie die Charakterisierung von dynamischen Messabläufen mit speziellem Fokus auf das Druckstoßverhalten.

Anhand der ermittelten Messdaten kann ein sicherer Messbetrieb gewährleistet werden, überdies liefern sie eine wichtige Grundlage für die Konzeption zukünftiger Messungen. Die hohe Datenqualität und die gute Reproduzierbarkeit der Messungen bestätigen die Robustheit des Prüfstands sowie die Eignung der gewählten Messmethoden.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

ABSTRACT

The current shift in the energy sector towards renewable energy sources is bringing hydropower back into the spotlight. The *AxFeeder* project involves a numerical and experimental investigation of a novel axial inlet concept for a Pelton turbine as an alternative to the conventional radial water supply.

This thesis deals with the experimental implementation and commissioning of the concept in the form of a test rig. The focus is on measuring the pressure and flow conditions prevailing in the inlet, to gain knowledge from which statements can be made about the real operating behaviour. This included the definition of an operating range, the determination of pressure losses by balancing between the individual measuring planes, as well as the characterization of dynamic measurement procedures with a special focus on water hammer behaviour.

Based on the determined measurement data, safe measurement operation can be guaranteed, as well as providing an important basis for the design of future measurement series.The high data quality and good reproducibility of the measurements confirm the robustness of the test rig and the sustainability of the chosen measurements.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

INHALTSVERZEICHNIS

1 EINLEITUNG 1

2 EXPERIMENTELLER AUFBAU 4

2.1 Prüfstand 4

2.2 Instrumentierung 6

3 THEORIE 9

3.1 Bilanzierungs- und Systemgrenzen 9

3.2 Initialisierungswerte der Messdurchführung 12

3.3 Messtechnik und Sensorik 12

3.3.1 Magnetisch-induktives Durchflussmessgerät Proline Promag W300 12

3.3.2 Drucktransmitter Absolut- und Relativdruck Cerabar PMP71 13

3.3.3 Drucksensor XTM-190M 13

3.3.4 Messchassis cDAQ-9188 13

3.3.5 Messchassis cDAQ-9185 14

3.3.6 Datenerfassungssystem QuantumX MX840B 14

3.3.7 Schrittmotor NEMA34 14

3.3.8 Messprogramm 15

3.4 Messunsicherheit 15

4 MESSUNGEN 18

4.1 Versuchsvorbereitung 18

4.2 Inbetriebnahme 18

4.3 Ermittlung des Betriebskennfelds 20

4.3.1 Messungen bei konstanter Düsenstellung s 20

4.3.2 Messungen bei konstanter Drehzahl der Hochdruckpumpen 24

4.3.3 Betriebskennfeld 25

4.3.4 Reproduzierbarkeit 26

4.3.5 Messungen an markanten Betriebspunkten 27

4.3.6 Zusammenfassung und Diskussion 30

4.4 Bestimmung der Verluste in der Verteilleitung 32

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

4.4.1 Messungen zur Bestimmung der Verteilleitungsverluste 32
4.4.2 Verlustmessungen bei verschiedenen Energiehöhen 35
4.4.3 Zusammenfassung und Diskussion 37
4.5 Charakterisierung des Betriebsverhaltens 39
4.5.1 Anfahr- und Abschaltvorgänge 39
4.5.2 Ansteuerung verschiedener Betriebspunkte 46
4.5.3 Zusammenfassung und Diskussion 50
5 AUSBLICK 52
6 LITERATURVERZEICHNIS 53
7 ANHANG 56

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

NOMENKLATUR

Abkürzung	Beschreibung
BEP	Best Efficiency Point
CAD	Computer Aided Design
cDAQ	Compact Data Acquisition
CFD	Computational Fluid Dynamics
CNC	Computerized Numerical Control
DMS	Dehnmessstreifen
HDP1	Hochdruckpumpe 1
HDP2	Hochdruckpumpe 2
IET	Institut für Energietechnik und Thermodynamik
LDA	Laser Doppler Anemometrie
ME	Messebene
MP	Messpunkt
MS	Messstelle
NI	National Instruments
OW	Oberwasser
PIV	Particle Image Velocimetry
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TSN	Time-Sensitive Networking
UW	Unterwasser

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit
H_E	Energiehöhe	m
H_V	Verlustenergiehöhe	m
H_{geo}	Geodätische Energiehöhe	m
H_{stat}	statische Energiehöhe	m
H_{dyn}	dynamische Energiehöhe	m
z_0	Referenzniveau	m
h	Höhendifferenz zum Referenzniveau	m
T	Drehmoment	Nm
Q	Durchfluss	l/s
g	Fallbeschleunigung	m/s^2
ρ_W	Dichte des Wassers	kg/m^3
p_V	Druckverlust	Pa
A_{ME}	Energiehöhe an der Messebene	m
A_{ME}	Querschnittsfläche der Messebene	m^2
c_{ME}	Strömungsgeschwindigkeit der Messebene	m/s
D_{ME}	Durchmesser der Messebene	m
p_{ME}	Druck an der Messebene	Pa
ζ	Zeta Beiwert	-
Re	Reynolds-Zahl	-
p_{atm}	Umgebungsdruck	Pa
p_{rel}	relativer Druck	Pa
c_{OW}	Strömungsgeschwindigkeit am Oberwasser	m/s
η	dynamische Viskosität	Pa * s
σ	Standardabweichung	-
x	Messwert	-
x_w	wahrer Wert	-
x_E	berichtigter Messwert	-
e_r	zufällige Messabweichung	-
$e_{s,b}$	bekannte, systematische Messabweichung	-

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

$e_{s,u}$	unbekannte, systematische Messabweichung	-
$\bar{x}$	arithmetischer Mittelwert	-
n	Anzahl der Messwerte	-
VKE	Variationskoeffizient	-
s	Düsenstellung	mm
R^2	Bestimmtheitsmaß	-

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

1 EINLEITUNG

Der aktuelle Boom der erneuerbaren Energiebranche bietet auch für die Wasserkraft die Möglichkeit, sich weiterzuentwickeln. Angesichts des stetig steigenden Stromkonsums und der zunehmenden Integration volatiler erneuerbarer Energiequellen, wie z.B. Wind- oder Solarkraft, gewinnt die Wasserkraft durch die ständige Verfügbarkeit und ihre schnelle Abrufbarkeit an Bedeutung. Sie trägt maßgeblich zur Netzstabilisierung bei und hilft, die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Das geografische Ausbaupotenzial der Wasserkraft, insbesondere im europäischen Raum, wurde bereits im 20. Jahrhundert annähernd ausgeschöpft. Dies lässt sich am Beispiel Österreichs ablesen, wo die in Abbildung 1.1 dargestellte Bruttostromerzeugung über den Zeitraum von 1920 bis 2000 stetig angestiegen ist, jedoch in den folgenden Jahren nahezu konstant weiterläuft. Nichtsdestotrotz gibt es Möglichkeiten, diese wieder zu steigern: Das technische Potential z.B. durch Effizienzsteigerung ist noch nicht vollständig ausgeschöpft, weshalb der Optimierung bestehender Wasserkraftanlagen immer größerer Bedeutung zukommt. Speziell die Fortschritte in der Simulation durch numerische Methoden bieten hierbei umfassende Möglichkeiten für die Weiterentwicklung bestehender Anlagen. Darüber hinaus ermöglichen verbesserte Fertigungsmöglichkeiten und Materialeigenschaften zusätzlich Raum für Innovationen. [1], [2], [3]

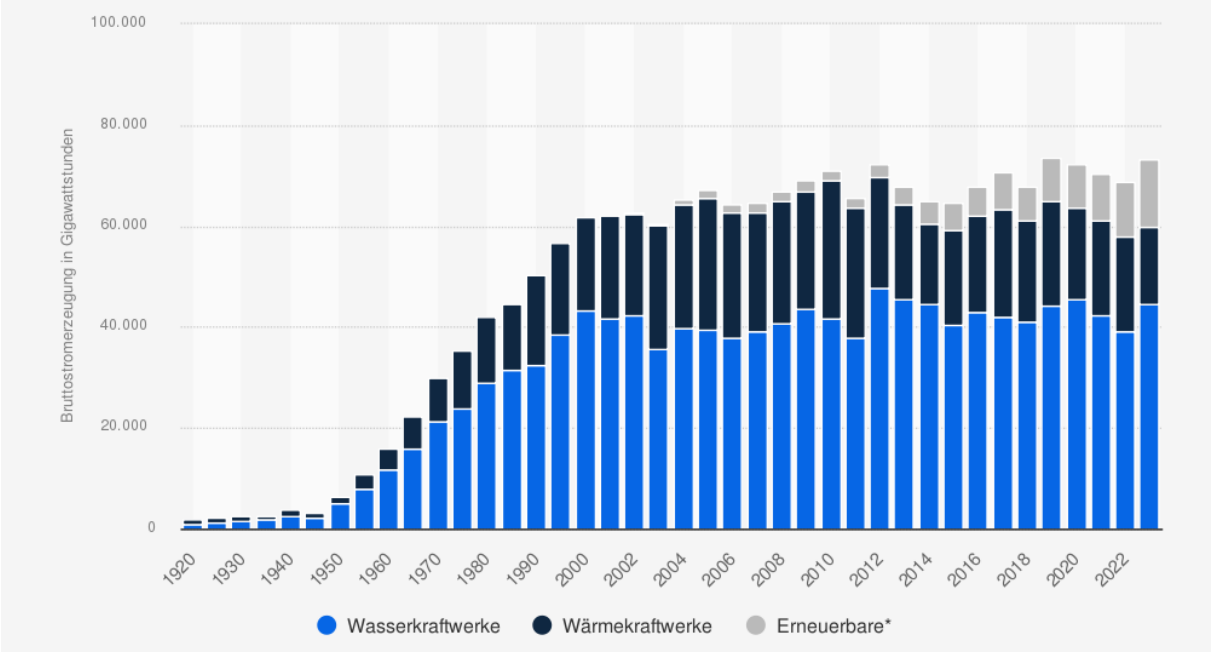

Abbildung 1.1: Bruttostromerzeugung in Österreich nach Erzeugungsart von 1920 bis 2023, Erneuerbare* beinhaltet Wind-, Photovoltaik-, und Geothermiekraftwerke bzw. -anlagen [4]

Die Peltonturbine wird bei Wasserkraftwerken mit großer Fallhöhe von 200 m bis zu 2000 m eingesetzt. Aufgrund ihrer Charakteristik die sie als Gleichdruckturbine aufweist, bietet sie eine

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

sehr gute Regelbarkeit und Teillastfähigkeit, welche für den raschen Einsatz zur Netzstabilisierung und Spitzenlastabdeckung prädestiniert ist.

Bei der konstruktiven Ausführung eines Wasserkraftwerkes mit Peltonturbinen wird grundsätzlich zwischen zwei Hauptarten unterschieden: eine horizontale und eine vertikale Turbinenwelle. Konstruktiv leichter umzusetzen ist dabei die horizontale Wellenausrichtung, welche typischerweise bei ein- bis dreidüsigen Turbinen Anwendung findet. Bei einer Düsenanzahl von vier bis sechs erfolgt in der Regel eine vertikale Wellenausrichtung. Eine höhere Düsenanzahl ermöglicht es, den Wasserstrom in mehrere, kleinere Strahlen aufzuteilen, wodurch eine höhere Drehzahl der Turbine erzielt wird. Diese höhere Drehzahl führt zu einer gesteigerten Leistungsdichte, wodurch die gesamte Anlage – inklusive Turbine und Generator – kompakter gebaut werden kann. Dies hat nicht nur den Vorteil geringerer Kosten, sondern verbessert auch die Regelbarkeit der Anlage bei Teillastbetrieb. Unabhängig von der Wellenausrichtung erfolgt die Zuleitung des Wassers zur Turbine radial, bei ein- bis dreidüsiger Ausführung meistens mittels Rohrabzweigern, ab vier Düsen in Form einer Einlaufspirale. Die Effizienz einer Peltonturbine ist stark von der Strahlqualität abhängig, welche zum einen von der Düse und ihrer Geometrie bestimmt und zum anderen durch die Zuleitung zur Düse beeinflusst wird. Komponenten wie Rohrkrümmer, Diffusoren oder Abzweigungen können die Strömung beeinflussen und zu erheblichen Energieverlusten führen. Die bei mehrdüsigen Anlagen verwendeten Einlaufspiralen weisen komplexe Geometrien auf, die anhand eines Auslegungspunktes dimensioniert werden. Das hat zur Folge, dass der Wasserstrahl nahe des Auslegungspunktes annähernd optimale Strömungsverhältnisse aufweist, aber außerhalb dessen nur mit erhebliche Wirkungsgradeinbußen aufgrund von Ablösungen und Verwirbelungen betrieben werden kann. Des Weiteren ist die Herstellung eines Spiralgehäuses einer mehrdüsigen Peltonturbine aufgrund ihrer komplexen Geometrie schwer standardisierbar und dadurch kostenintensiv. [5], [6], [7], [8]

Basierend auf den Vorarbeiten von Erlach [9], [10] , die ein neuartiges Konzept für die Zuleitung zu einem Pelton-Turbinenrad vorschlagen, wird im Rahmen des Projektes "AxFeeder" eine umfassende Weiterentwicklung dieses Ansatzes verfolgt. Die Zuleitung erfolgt dabei, im Gegensatz zur konventionellen radialen Ausführung, axial. Das Projekt besteht aus einer Kombination von numerischen Simulationen und experimentellen Untersuchungen.

Zu Beginn wurde durch Hahn der geometrische Aufbau der axialen Zuleitung detailliert analysiert und optimiert. Hierbei wurden verschiedene Abzweigevarianten von der zentralen Verteilleitung zu den sechs einzelnen Abzweigeleitungen der jeweiligen Düsen eingehend untersucht. Ein besonderes Augenmerk lag dabei auf der Minimierung der internen Energieverluste sowie der effektiven Begrenzung unerwünschter Sekundärströmungen innerhalb der Verteilstruktur. In diesem Kontext erfolgte eine tiefgehende numerische Analyse des Gesamtkonzepts. Das beste Ergebnis der Analyse lieferte eine konische 90° Abzweigung aus einer tropfenförmigen Rohrverzweigung und einer 90° Zuleitung zur Düse. [11], [12]

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Der experimentelle Aufbau des Prüfstands selbst wurde durch Steindl konzeptioniert und detailliert beschrieben. Ergänzend dazu wurde das hydrodynamische Verhalten der für diesen Prüfstand vorgesehenen Düse in separaten Untersuchungen umfassend beschrieben. [13], [14]

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird das Konzept von Steindl überarbeitet und im Labor für hydraulische Strömungsmaschinen am Institut für Energietechnik und Thermodynamik der TU Wien aufgebaut und in Betrieb genommen. Auf folgende Punkte wird dabei näher eingegangen: [13]

- Wie kann eine sichere Versuchsdurchführung gewährleistet werden? Welche Vorkehrungen sind dafür in der Vorbereitung zur Inbetriebnahme notwendig?
- Welche Rahmenbedingungen können für den Betrieb der Anlage für zukünftige Versuche definiert werden?
- Wie verhalten sich Faktoren wie eine gleichmäßige Durchströmung, die Vermeidung von Ablösungen, sowie Durchfluss und Druckpulsationen? Für den Fall, dass Daten vorhanden sind, wie verhalten sich diese im Vergleich zu den Ergebnissen aus der CFD-Berechnung?

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

2 EXPERIMENTELLER AUFBAU

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den prinzipiellen Aufbau des Prüfstands sowie über dessen Anschluss im Labor für hydraulische Strömungsmaschinen am Institut für Energietechnik und Thermodynamik der Technischen Universität Wien. Die Geometrie der Rohrleitung ist durch die vorangegangenen CFD-Berechnungen bereits festgelegt. Anhand derer wurde ein CAD-Entwurf für die Umsetzung des Prüfstands entwickelt. Der Prüfstand wird aufbauend auf diesem Entwurf auf den aktuellen Forschungsstand gebracht und unter Berücksichtigung geänderter Fertigungsvoraussetzungen realisiert. [11], [12], [13]

2.1 Prüfstand

Der *AxFeeder*-Prüfstand wird im Labor für hydraulische Strömungsmaschinen am Institut für Energietechnik und Thermodynamik umgesetzt. Er stellt einen offenen hydraulischen Versuchskreislauf dar. Dieser hydraulische Kreislauf ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Die beiden in Serie geschalteten Hochdruckpumpen **(B)** und **(C)** fördern das Wasser aus dem Unterwasserbecken **(H)** zur Versuchsanlage **(G)**. Dabei dient das Eintrittsventil HDP **(A)** als Rücklaufschutz der Pumpen. Durch das Eintrittsventil *AxFeeder* **(D)** wird der Prüfstand zur Laborhydraulik verschlossen, wodurch die Verwendung der HDPs für andere Versuchsanlagen ermöglicht wird. Der Temperaturfühler PT100 **(E)** und der Durchflusssensor **(F)** sind Teil der Messtechnik und Sensorik. Die Ableitung des Wassers in das Unterwasserbecken **(H)** erfolgt durch die vertikale Ausrichtung der Düse automatisch.

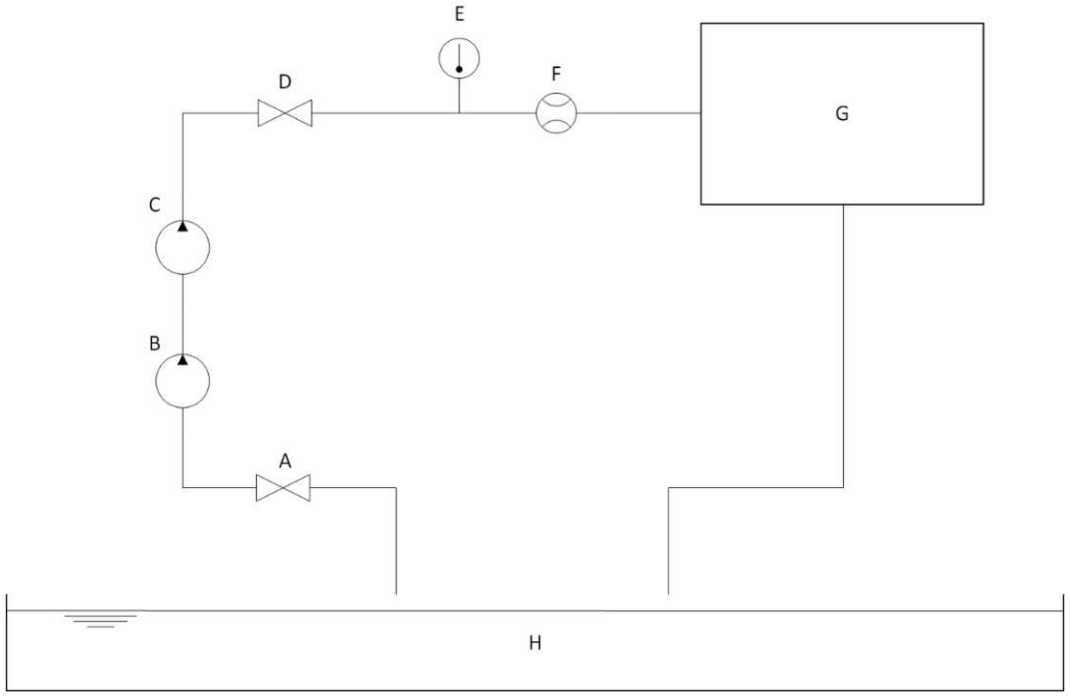

Abbildung 2.1: Hydraulischer Kreislauf: (A) Eintrittsventil HDP, (B) HDP1, (C) HDP2, (D) Eintrittsventil *AxFeeder*, (E) Temperaturfühler PT100, (F) Durchflusssensor, (G) Versuchsanlage, (H) Unterwasserbecken

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Aus konstruktiver Sicht lässt sich der Prüfstand überblicksmäßig in fünf Gruppen gliedern, skizziert in Abbildung 2.2. Der Eintritt in die Versuchsanlage erfolgt über die Zuleitung **(1)**, welche an die Laborhydraulik angeschlossen ist. In dieser wird durch zwei Hochdruckpumpen der notwendige Druck zur Simulation der benötigten Fallhöhe aufgebaut. Die Länge der Zuleitung beträgt in etwa das Zehnfache des Eintrittsdurchmessers. Dadurch wird gewährleistet, dass ein homogenes Strömungsprofil am Eintritt zur Verteilleitung **(2)** vorliegt. Die Verteilleitung enthält die in den CFD-Berechnungen analysierte Strömungskontur, sowie die zur experimentellen Betrachtung notwendige Messleitung. Des Weiteren ist die Verteilleitung am Leitungsring **(3)** befestigt und mit der Düse **(5)** verbunden. Die Lagerung des *AxFeeder*-Prüfstands wird durch einen kleinen und großen Stahlbau **(4)** sichergestellt. Dies geschieht über den Flansch am Eintrittskonus der Verteilleitung und über die Streben des Leitungsrings. Der Leitungsring dient neben seiner Lagerungsfunktion auch als Gehäuse und leitet das abgearbeitete Wasser wieder in das Tiefbecken ab.

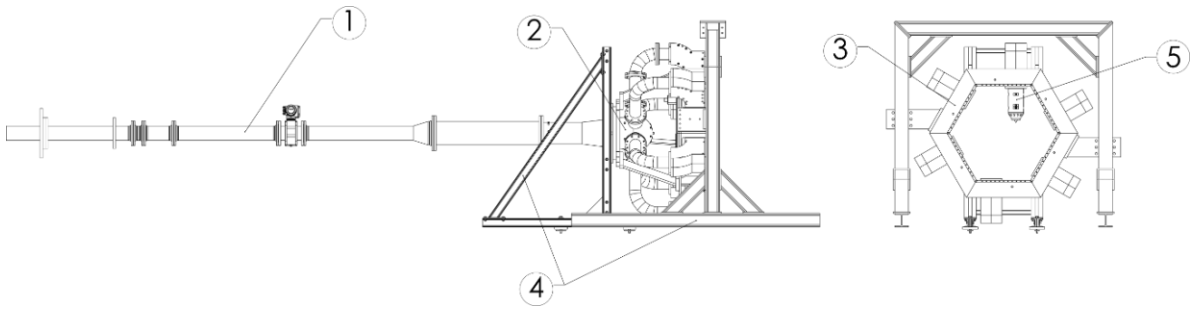

Abbildung 2.2: Aufbau des *AxFeeder*-Prüfstands: (1) *Zuleitung*, (2) *Verteilleitung*, (3) *Leitungsring*, (4) *kleiner und großer Stahlbau*, (5) *Düse*

Abbildung 2.3 zeigt eine Detailansicht der Verteilleitung, welche den Großteil der strömungsrelevanten Bauteile beinhaltet. Mit Ausnahme des Durchfluss- und des Temperatursensors befinden sich alle Messstellen in diesem Abschnitt. Die Baugruppe der Verteilleitung beginnt mit dem Mehrfachabzweiger, bestehend aus dem Eintrittskonus **(2.1)** und dem Klöpperboden **(2.2)**. Innerhalb dieser Komponenten erfolgt die Aufteilung des Fördermediums in sechs Abzweigungen. Hierbei wird zwischen der Messleitung **(2.3)**, welche Messmuffen und Bohrungen für Messanschlüsse aufweist, und der herkömmlichen fünf Abzweigeleitungen **(2.5)** differenziert. Alle sechs CNC-Frästeile **(2.4)** sind ident ausgeführt und bilden den Abschluss der Verteilleitung.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

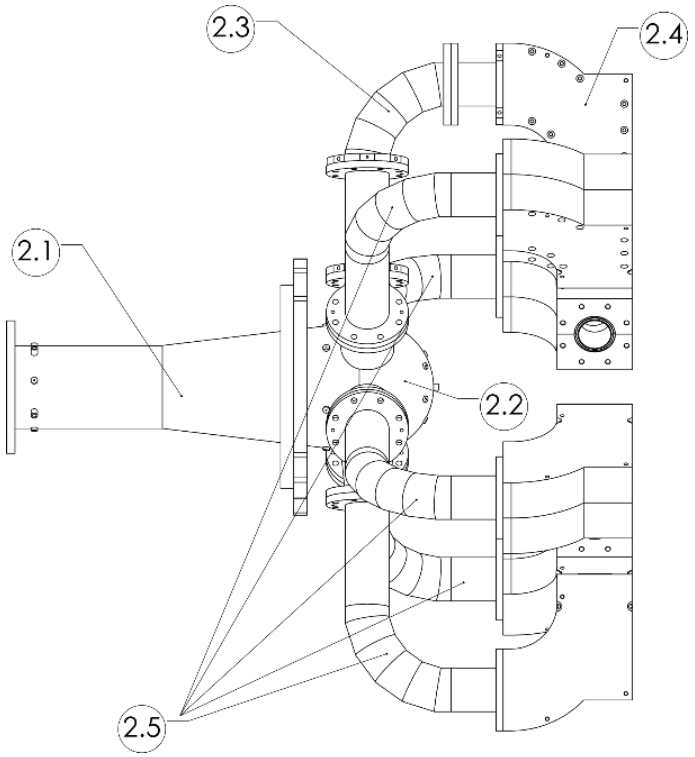

Abbildung 2.3: Seitenansicht der Verteilleitung: (2.1) *Eintrittskonus,* (2.2) *Klöpperboden,* (2.3) *Messleitung,* (2.4) *CNC-Frästeil,* (2.5) *Abzweigeleitung*

2.2 Instrumentierung

Das Strömungsverhalten, welches im Rahmen der Vorbetrachtung durch die CFD-Berechnungen analysiert wurde, kann am realen Prüfstand nur durch die Hilfe von definierten Messpositionen bestimmt werden. Diese Messpositionen sind vor den CFD-Berechnungen festgelegt und anschließend in einem Messkonzept dokumentiert worden. Folgende Messarten wurden im Messkonzept geplant: statische Druckmessungen, dynamisch hochfrequente Druckschwankungsmessungen, Durchflussmessungen, Temperaturmessungen, Particle Image Velocimetry (PIV), Laser Doppler Anemometrie (LDA)-Messungen sowie optische Strahlmessungen. Zusätzlich gibt es strukturmechanische und schwingungsmechanische Messungen. Im Zuge dieser Diplomarbeit werden statische Druckmessungen, dynamisch hochfrequente Druckschwankungsmessungen, Durchflussmessungen und Temperaturmessungen durchgeführt. [13]

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

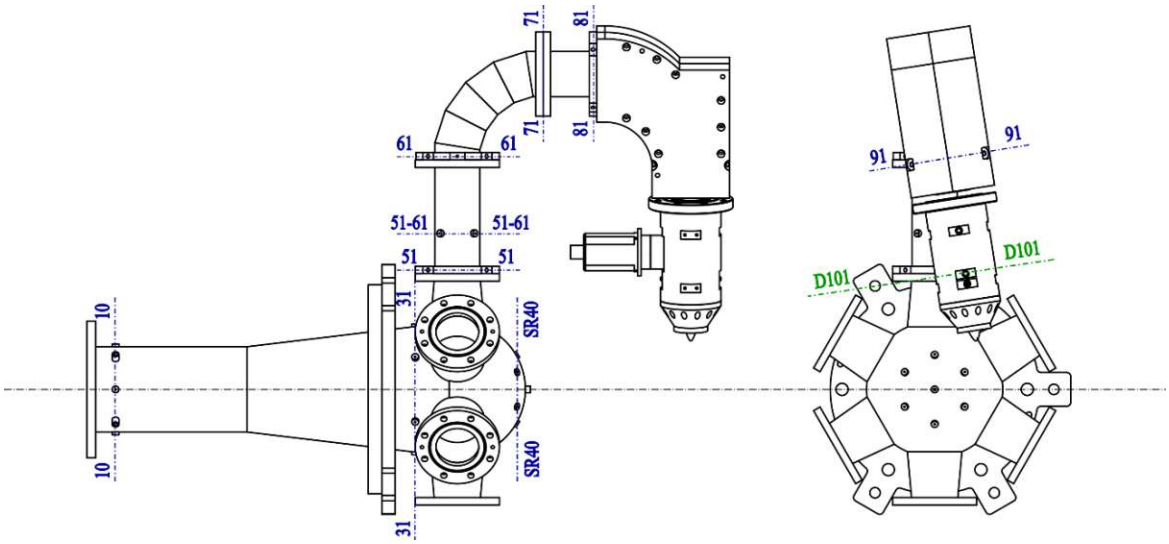

Abbildung 2.4: Darstellung der für die Messungen relevanten Bauteile des *AxFeeder*-Prüfstands mit Kennzeichnung der Messebenen: Blau hinterlegt sind bestehende Messebenen, grün hinterlegt die ergänzte Messebene.

Die konstruktiven Änderungen des Prüfstands haben eine entsprechende Anpassung des Messkonzepts zur Folge. Diese Anpassungen beziehen sich auf Ergänzung, Abänderung und Entfernung von Messstellen bzw. Messebenen. Die Anordnung der Messebenen ist in Abbildung 2.4 ersichtlich. Die unveränderten Messebenen aus dem ursprünglichen Konzept sind in blau gekennzeichnet, die neu ergänzten in grün. Tabelle 1 bietet einen Überblick über die endgültigen Messpositionen. Die Spalte „Anzahl der Messstellen“ gibt die maximal ausführbare Instrumentierungsmöglichkeit an. Die tatsächliche Instrumentierung ist von dem geplanten Versuch abhängig. [13]

Tabelle 1: Messaufbau mit Zuordnung der Messposition und der Anzahl der verfügbaren Messstellen

Messart	Messposition	Anzahl der Messstellen
Temperatur	vor 10	1
Durchfluss	vor 10	1
statischer Druck	10	4
Druckschwankungen	10	4
Druckschwankungen	30	6
Druckschwankungen	SR40	6
statischer Druck	51	4
Druckschwankungen	51-61	4
statischer Druck	61	4
statischer Druck	81	4
statischer Druck	91	4
statischer Druck	D101	4

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Das bisherige Messkonzept bleibt bis Messposition 81 unverändert. Der Bereich zwischen den Messpositionen 81 und 101 entspricht dem Bereich, der durch das CNC-Frästeil ersetzt wurde. Dies führt zur Anpassung der dazwischenliegenden Messpositionen. Messposition 91 und die für die statischen Druckmessungen notwendigen Bohrungen sind im CNC-Frästeil realisiert. Eine Darstellung der Messebene 91 ist in Abbildung 2.4 zu sehen.

Die Messstellen für die dynamischen Druckschwankungen zwischen den Messpositionen 81 und 91, ursprünglich entlang der Außenkontur geplant, und zwischen den Messpositionen 91 und 101 wurden nicht umgesetzt. Des Weiteren wurde zwischen den Messpositionen 91 und 101, das für die optischen Messungen notwendige austauschbare Bauteil nicht eingeplant, da dies im neu entwickelten CNC-Frästeil nicht umsetzbar ist.

Die Messposition D101 wurde dem Messaufbau ergänzt. Sie ist eine Messstelle für statische Druckmessungen und erweitert damit die bestehenden Bilanzierungsmöglichkeiten des Prüfstands und gewährt Einblick in die von der Düsengeometrie beeinflussten Druckverhältnisse. Konstruktiven Anpassungen waren nicht notwendig, da die Messbohrungen bereits im Korpus der Düse verbaut sind.

Das Konzept der struktur- und schwingungsmechanischen Messungen wird unverändert übernommen, siehe Tabelle 2. [13]

Tabelle 2: Messaufbau der struktur- und schwingungsmechanischen Messungen

Messart	Messposition	Anzahl der Messstellen
DMS	30	1
Schwingungssensor	30	2
Schwingungssensor	SR40	1
DMS	Umgebung 41	4
DMS	51-61	1
Schwingungssensor	61	2
Schwingungssensor	81	1

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

3 THEORIE

3.1 Bilanzierungs- und Systemgrenzen

Für eine konsistente Auswertung der Messdaten ist es erforderlich, die Bilanzierungs- und Systemgrenzen des Prüfstands zu definieren. Die Bilanzierungsgrenzen werden in Abbildung 3.1 als Höhenlinie dargestellt. Die Systemgrenze startet beim theoretischen Oberwasser (OW) und reicht bis zum Austritt an der Düse.

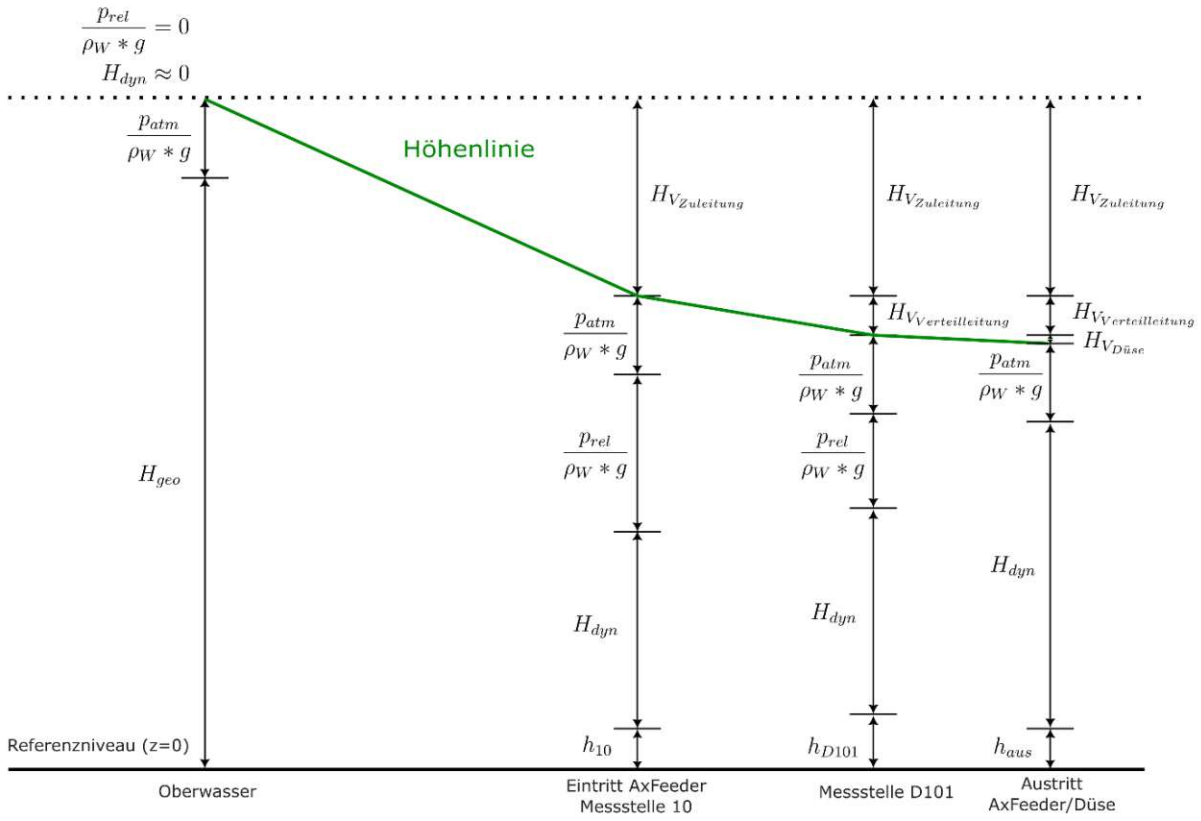

Abbildung 3.1: Definition der Bilanzierungs- und Systemgrenzen: Darstellung als Höhenlinie entlang der *AxFeeder*-Prüfstandsleitung

Das bei einem realen Wasserkraftwerk vorhandene Energieniveau wird bei einer Versuchsanlage im Labor durch Pumpen, welche Wasser aus dem Tiefbecken fördern, simuliert. Zur Systembetrachtung des Prüfstands wird ein theoretisches Oberwasser eingeführt. Außerdem ist es notwendig, für die Bilanzierung innerhalb der Systemgrenzen des Prüfstands ein Bezugsniveau zu definieren, anhand dessen die geodätischen Höhen der Manometer und der jeweiligen Messstelle festgelegt werden können. Dieses Referenzniveau wird im Zuge der Messungen auf der Höhe des Hallenbodens ($z_0 = 0\ m$) festgelegt.

Für die Bilanzierung eines hydraulischen Prüfstands eignet sich die Bernoulli-Gleichung (1) in Form einer Höhengleichung. Innerhalb der Systemgrenzen (Abbildung 3.1) bleibt diese

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

konstant und unter der Annahme idealer Flüssigkeiten können Verluste vernachlässigt werden. [15], [16]

$$H_{stat} + H_{dyn} + H_{geo} = konst. \tag{1}$$

Dabei beschreibt die statische Höhe H_{stat} jene Energie, die in der Flüssigkeit durch den statischen Druck enthalten ist. Der statische Druck p_{stat} setzt sich aus dem Umgebungsdruck p_{atm} und dem relativen Druck p_{rel} zusammen. Die Werte für die Dichte des Wassers ρ_w und die Erdbeschleunigung g können Tabelle 3 entnommen werden.

$$H_{stat} = \frac{p_{stat}}{\rho_w * g} = \frac{p_{atm} + p_{rel}}{\rho_w * g} \tag{2}$$

Die dynamische Höhe H_{dyn} beschreibt die kinetische Energie, die in der Flüssigkeit enthalten ist.

$$H_{dyn} = \frac{{c_{ME}}^2}{2 * g} \tag{3}$$

Der Durchfluss Q ist über die Verteilleitung konstant und die Strömungsgeschwindigkeit c_{ME} wird als gleichmäßig über den gesamten Querschnitt angenommen. Die Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit c_{ME}, unter Berücksichtigung des variierenden Durchmessers D_{ME} der jeweiligen Messebene (ME), ergibt:

$$c_{ME} = \frac{4 * Q}{{D_{ME}}^2 * \pi} \tag{4}$$

Die geodätische Höhe H_{geo} beschreibt die Höhe über dem festgelegten Referenzniveau.

Damit kann der Begriff der Energiehöhe H_E eingeführt werden kann. Dieser bildet das im System befindliche Energieniveau in Form einer Höhe (m) ab. Dieses Energieniveau lässt sich wie in Gleichung (1) aufspalten. Da am Prüfstand keine idealen Bedingungen herrschen, wird die Variable H_V für den Höhenverlust eingeführt und nachfolgend in der Bilanzierung mitberücksichtigt.

$$H_E = H_{stat} + H_{dyn} + H_{geo} + H_V = \frac{p_{stat}}{\rho_w * g} + \frac{c^2}{2 * g} + h + H_V \tag{5}$$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Die Auswertung der Messergebnisse beinhaltet die Ermittlung der Energiehöhe H_E an den jeweiligen Messstellen. Diese wird in (5) definiert und für jede Messposition wie folgt berechnet.

$$H_{ME} = \frac{p_{ME}}{\rho_w * g} + \frac{{c_{ME}}^2}{2 * g} + h_{ME} \tag{6}$$

Die Verluste in der *AxFeeder*-Verteilleitung können durch die Bilanzierung der Ein- und Austrittspunkte an den Messabschnitten ermittelt werden. Diese Berechnung basiert auf der Differenz der Energiehöhen an den jeweiligen Messstellen. Als Anwendungsbeispiel dient die Bilanzierung zwischen Anfangs- und Endpunkt (MP10 und MPD101), welche äquivalent zum Gesamtverlust der Verteilleitung ist.

$$H_{V\,Verteilleitung} = H_{10} - H_{D101} \tag{7}$$

Die Verlusthöhe H_V beinhaltet einerseits die örtlichen Verluste, in denen Strömungsänderungen durch Bauteile berücksichtigt werden und andererseits kontinuierliche Verluste entlang eines Leitungsabschnittes durch z.B. Rohrreibung. Im Zuge dieser Diplomarbeit werden diese Verluste gesammelt als H_V erfasst und durch den allgemeinen Verlustansatz definiert. Der Verlustbeiwert ζ bildet eine dimensionslose Charakterisierung der Verluste; die Verluste selbst sind proportional zum Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit. [15], [16]

$$H_V = \zeta * \frac{c^2}{2 * g} \tag{8}$$

Der ζ-Beiwert kann daher durch Umformen der Gleichung (8) und Einsetzen von (3), (4) und (7) bestimmt werden. H_{dyn} wird für die Auswertung an MP10 bestimmt.

$$\zeta = \frac{H_V}{H_{10_{dyn}}} \tag{9}$$

Überdies wird zur Charakterisierung des Prüfstands eine weitere dimensionslose Größe eingeführt, die Reynolds-Zahl. Diese Kennzahl beschreibt das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften in einer Strömung und dient zur Unterscheidung zwischen laminaren und turbulenten Strömungsverhältnissen. Typischerweise liegt der Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung in Rohren bei einer Reynolds-Zahl von etwa $R_{krit} = 2300$. Für eine konsistente Auswertung wird sie ebenfalls auf die Messstelle 10 bezogen. [15]

$$Re = \frac{c_{10} * \rho_w * D_{10}}{\eta} \tag{10}$$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

3.2 Initialisierungswerte der Messdurchführung

Für die nachvollziehbare Durchführung der Messungen und die spätere Auswertung ist es notwendig, verschiedene physikalische Konstanten und Referenzwerte festzulegen. Diese Initialisierungsparameter bilden die Basis für alle Berechnungen und ermöglichen eine eindeutige Bezugnahme der Messergebnisse. Ein Ausschnitt der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Konstanten und Referenzwerte ist in Tabelle 3 dargestellt. Die gesamte Auflistung der Initialisierungswerte kann dem Anhang aus Abbildung A. 2 entnommen werden.

Tabelle 3: Initialisierungswerte des Messprogramms

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Dichte des Wassers (20°C)	ρ_W	998,38	kg/m^3
Dynamische Viskosität des Wassers (20°C)	η_W	1,002*10^3	Pa*s
Erdbeschleunigung	g	9,80848	m/s^2
Bezugsniveau	z_0	0	m
Umgebungsdruck	p_{atm}	101325	Pa

3.3 Messtechnik und Sensorik

Die Auswahl der Instrumentierung für den Prüfstand richtet sich nach dem spezifischen Messversuch. Die Messstellen für schwingungs- und strukturmechanische Messungen sind nicht invasiv. Weiters können die Messstellen für Temperaturmessungen und statische sowie dynamische Druckmessungen mittels Stopfen geschlossen werden. Dadurch ist die Änderung des Messkonzepts für diese Werte nur mit geringem Montageaufwand verbunden. Die Messtechnik für Durchflussmessungen hingegen ist in der Zuleitung verbaut und kann nur durch Öffnen der Zuleitung entfernt werden.

3.3.1 Magnetisch-induktives Durchflussmessgerät Proline Promag W300

Der Proline Promag W300 (Model: 5W3B1F) der Firma *Endress + Hauser* ist ein magnetisch-induktives Durchflussmessgerät. Das Messprinzip basiert auf dem Faraday'schen Induktionsgesetz: Eine leitfähige Flüssigkeit, die durch ein Magnetfeld fließt, induziert eine Spannung, die proportional zur Durchflussgeschwindigkeit ist. Das Durchflussmessgerät arbeitet weitestgehend unabhängig von Einflüssen durch Temperatur, Druck, Dichte und Viskosität. Für die Nennweite DN150 ergeben sich folgende Parameter: [17]

- Messgenauigkeit (Standard): $\pm$0,5 % vom Messwert
- Messbereich Durchfluss: 20 m^3/h ... 600 m^3/h
- Messbereich elektrisch: 4 mA ... 20 mA

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

3.3.2 Drucktransmitter Absolut- und Relativdruck Cerabar PMP71

Der digitale Drucktransmitter Cerabar PMP71 von *Endress + Hauser* kann sowohl für Relativ- als auch Absolutdruckmessungen verwendet werden. Das Messprinzip basiert auf einer piezoresistiven Metallmembran, welche durch Aufbringen einer Kraft bzw. eines Drucks ausgelenkt wird. Ein DMS-Streifen auf der gegenüberliegenden elastischen Oberfläche nimmt die mechanische Beanspruchung auf und gibt das elektrische Signal verschaltet mit einer Wheatstone'sche Brücke weiter. Das Signal wird verstärkt, standardisiert und anschließend ausgegeben. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden Cerabar PMP71 Sensoren mit 3 unterschiedlichen Maximaldrücken verwendet, 10 bar, 40 bar und 100 bar . Nachfolgend ist ein Auszug relevanter Parameter: [18]

- Messgenauigkeit (Standard): $\pm 0{,}05$ % vom Messwert
- Messbereich: 0 bar ... $10/40/100$ bar
- Ausgangssignal: 4 mA ... 20 mA
- Kleinste kalibrierbare Messspanne: 5 $mbar$

3.3.3 Drucksensor XTM-190M

Das Messprinzip des Drucksensors XTM-190M von *Kulite* verwendet einen piezoresistiven Sensor als Messelement auf einer Metallmembran als Kraftaufnahmeelement. Der Sensor kann aufgrund seiner geringen Größe direkt am Prüfstand mittels Messmuffe oder vorhandener Bohrung angebracht werden. Mögliche Verzögerungseffekte entfallen durch die direkte Montage. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden XTM-190M Sensoren mit 7 bar und 14 bar Maximaldruck verwendet. [19]

- Messbereich mechanisch: 0 bar ... $7/14$ bar
- Ausgangssignal: 0 mV ... 75 mV

3.3.4 Messchassis cDAQ-9188

Das Messchassis cDAQ-9188 der Firma *National Instruments (NI)* ist ein Ethernet-Chassis, welches über 8 Steckplätze für *NI*-Module verfügt. Es fungiert als Schnittstelle zwischen den I/O-Modulen und einem Rechner und ermöglicht so die Datenerfassung und -steuerung. [20]

Tabelle 4 enthält eine Auflistung der verwendeten Messmodule, welche im Rahmen der statischen Messungen am Messchassis cDAQ-9188 verwendet wurden. Alle Module stammen von *National Instruments*. [21]

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tabelle 4: Auflistung der am Messchassis cDAQ-9188 verwendeten Messmodule, inkl. Anzahl und angeschlossenem Messsensor

Modulbezeichnung	Anzahl	Messsensor
NI 9217	1	Temperaturfühler PT100
NI 9203	2	Cerabar PMP71

3.3.5 Messchassis cDAQ-9185

Das Messchassis cDAQ-9185 der Firma *National Instruments* ist ein Ethernet-Chassis für cDAQ. Es verfügt über 4 Steckplätze für *NI*-Module. Dieses Chassis wurde speziell mit Blick auf Time-Sensitive Networking (TSN) entwickelt. TSN ist eine Weiterentwicklung des Standard-Ethernets, welches deterministische Kommunikation und präzise Zeitsynchronisation über Netzwerke ermöglicht. [22]

Tabelle 5 enthält analog zu Tabelle 4 die verwendeten Messmodule im Messchassis cDAQ-9185.

Tabelle 5: Auflistung der am Messchassis cDAQ-9185 verwendeten Messmodule, inkl. Anzahl und Verwendung

Modulbezeichnung	Anzahl	Verwendung
NI 9485	1	Düsen-Schrittmotor
NI 9401	1	Düsen-Schrittmotor

3.3.6 Datenerfassungssystem QuantumX MX840B

Das Datenerfassungssystem QuantumX der Firma *Hottinger Brüel & Kjaer* (*HBM)* ist ein vielseitiges und hochpräzises Messdatenerfassungssystem. Das Model MX840B weist Kanäle für 8 Sensoren auf und wird mittels Ethernet Anschluss mit dem Netzwerk des Instituts verbunden. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird es für die dynamischen Messungen mit den Drucksensoren XTM-190M von *Kulite* verwendet. Außerdem wird für diese Messungen der Durchfluss über QuantumX aufgezeichnet, um die zeitliche Synchronisation der Daten zu gewährleisten.

3.3.7 Schrittmotor NEMA34

Die Steuerung der Düsennadel erfolgt durch den Schrittmotor NEMA34 der Firma *Igus*, der über eine Benutzeroberfläche in dem zugehörigen LabVIEW-Programm angesteuert wird. Er besitzt ein Maximaldrehmoment von $5{,}9\,Nm$. Der integrierte Encoder misst die Rotationsbewegung des Motors mit einer Auflösung von 500 Impulsen pro Umdrehung, wodurch eine präzise Bestimmung der Position gewährleistet wird. Der Düsenhub beträgt maximal $34\,mm$.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

3.3.8 Messprogramm

Das Messprogramm ist in der Software LabVIEW programmiert. LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) ist eine grafische Programmieroberfläche von *National Instruments*. Die Software dient der Implementierung von Steuerungs- und Messsystemen. Das Messprogramm gliedert sich in zwei Unterprogramme: die Erfassung zeitabhängiger und zeitunabhängiger Messungen, sowie die Steuerung der Düse.

3.4 Messunsicherheit

Das Bestimmen von Messwerten unterliegt immer einer gewissen Ungenauigkeit. Diese Ungenauigkeit ist die Abweichung vom Idealzustand beziehungsweise vom tatsächlichen physikalischen Wert, verursacht durch innere und äußere Einflüsse auf das Messsystem. Diese wird auch als Messunsicherheit bezeichnet. Die Plausibilisierung eines Messergebnisses beinhaltet zwingend die Charakterisierung der Messunsicherheit und die Definition eines Wertebereichs.

Ein Messwert x repräsentiert einen spezifischen Wert einer Messgröße, der durch ein Messgerät oder eine Messeinrichtung erfasst und eindeutig zugeordnet wird, dieser setzt sich wie folgt zusammen. [23]

- Der wahre Wert x_w
- Die zufällige Messabweichung e_r
- Die bekannte, systematische Messabweichung $e_{s,b}$
- Die unbekannte, systematische Messabweichung $e_{s,u}$

$$x = x_w + e_r + e_{s,b} + e_{s,u} \tag{11}$$

Das Messergebnis wird durch Bildung des arithmetischen Mittelwerts $\bar{x}$ über alle erfassten Messwerte n bestimmt.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \tag{12}$$

Der arithmetische Mittelwert nähert sich mit zunehmender Anzahl an Messwerten dem Erwartungswert μ an. Die Begründung hierfür liegt in der zufälligen Messabweichung e_r. Betrachtet man einen theoretischen Grenzwert mit unendlich vielen Messungen, so würde e_r gegen null streben. Folglich wäre die Messabweichung einzig von der systematischen Messabweichung e_s abhängig. Die bekannte systematische Messabweichung $e_{s,b}$ tritt unter konstanten Messbedingungen immer mit dem gleichen Betrag sowie Vorzeichen auf und kann daher bereits vor der Messwertaufnahme gefiltert werden. Im Messbetrieb wird deswegen in

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

der Regel der berichtigte Messwert x_E verwendet (Abbildung 3.2). Der berichtigte Messwert x_E ist wie folgt definiert. [23]

$$x_E = x - e_{s,b} \tag{13}$$

Der berichtigte Messwert x_E ersetzt damit den Messwert x und wird einzig durch die unbekannte, systematische Messabweichung $e_{s,u}$ beeinflusst.

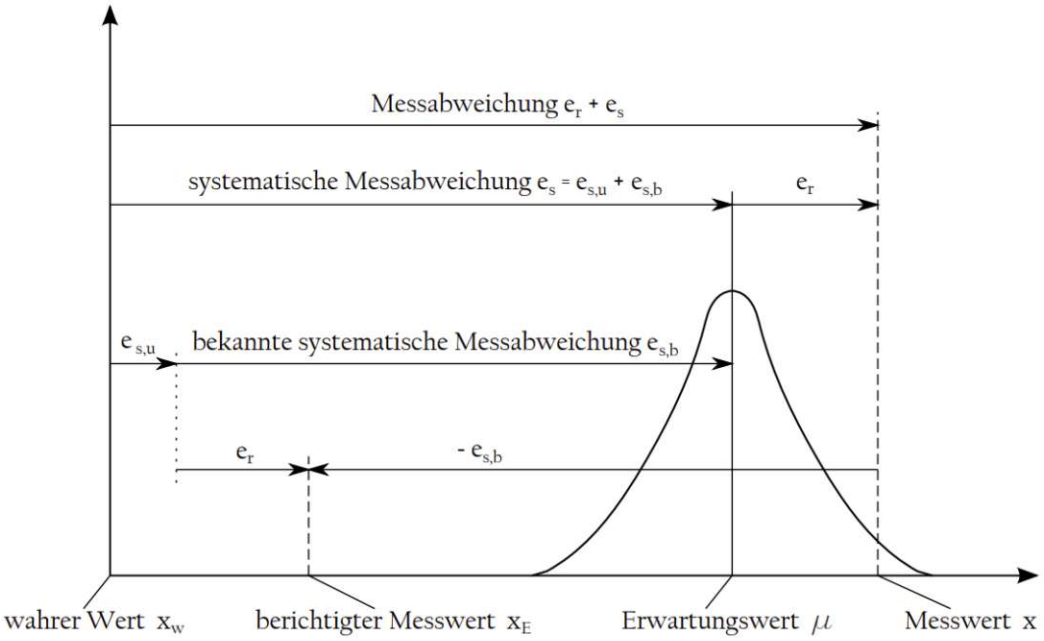

Abbildung 3.2: Visualisierung zur Aufteilung des Messwerts in den einzelnen Messabweichungen [23]

Die Standardabweichung σ wird aufbauend auf der Bestimmung des Mittelwerts (12) folgendermaßen definiert:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \tag{14}$$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Zusätzlich zur Standardabweichung wird der Variationskoeffizient (VKE), eine dimensionslose Größe, eingeführt, welcher die Standardabweichung auf den Mittelwert bezieht und dadurch eine relative Betrachtung der Streuung ermöglicht.

$$VKE = \frac{\sigma}{\bar{x}} \tag{15}$$

Die Messunsicherheit wird bereits in der Programmierung des Messprogramms berücksichtigt und kann bei Bedarf ausgegeben werden. Dabei handelt es sich, wie oben beschrieben lediglich um den unbekannten, systematischen Anteil der Messabweichung.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

4 MESSUNGEN

Dieses Kapitel umfasst die ersten Messergebnisse am Prüfstand *AxFeeder*. Die Rahmenbedingungen für das Starten der Anlage sind in der Versuchsvorbereitung festgehalten und dienen allen Versuchen dieser Diplomarbeit, sowie kommenden Versuchen am *AxFeeder* als Leitfaden. Die Inbetriebnahme stellt das erstmalige Füllen der Anlagen und die Absteckung eines Betriebsbereichs dar. Die Messungen sind in drei Unterkapitel aufgeteilt. Die Messreihen zur Ermittlung des Betriebskennfelds sind, wie die Messreihen zur Bestimmung der Druckverluste zwischen MP10 und MPD101, in einem stationären Zustand durchgeführt. Die verwendeten Messtellen sind in Tabelle 1 in der Spalte Messart als „Durchfluss“ und „statischer Druck“ angeführt, der Durchflusswert wird in l/s aufgezeichnet und die statischen Druckwerte in bar. Die dynamischen Messungen beleuchten die Reaktionen der Versuchsanlage auf Änderungen des Betriebspunkts, insbesondere während der An- und Abfahrprozesse sowie beim Schließen der Düse. Die dafür verwendeten Messstellen können wiederum aus Tabelle 1 der Spalte Messart unter „Durchfluss“ und „Druckschwankungen“ entnommen werden. Die Unterkapitel weisen jeweils eine Erläuterung zum Messablauf, den verwendeten Sensoren, sowie den vorgegebenen Parametern auf und bieten anschließend eine Auswertung und Interpretation der Messergebnisse. Die Hochdruckpumpen sind für alle Messreihen in Serie verschaltet.

4.1 Versuchsvorbereitung

Der Prüfstand wurde neu entwickelt, daher ist ein Leitfaden in Form eines Messplans unerlässlich. Die Vorbereitungsphase beginnt mit der Absicherung des Laborbereichs und dem Einschalten des Messschranks. Anschließend werden Messprogramm und Düsensteuerung über die Steuerwarte remote gestartet. Im Messprogramm erfolgt die Initialisierung der Sensoren, weiters wird die Messdauer und die Messfrequenz eingestellt. Standardmäßig werden für statische Messungen Werte für eine Messdauer von $10\ s$ und für die Messfrequenz von $1000\ Hz$ gewählt. Bei dynamischen Messungen ist die Messdauer variabel und die Messfrequenz auf $1200\ Hz$ festgelegt. Danach werden die Absperrorgane vor den Pumpen über das SPS-System geöffnet und die Hochdruckpumpen in Betrieb genommen. Nach einer visuellen Kontrolle des Laborbereichs wird die Anlage durch Öffnen des zentralen Absperrorgans befüllt, wobei gleichzeitig alle Leitungen entlüftet werden. Eine Probemessung mit anschließender Plausibilitätskontrolle der Messwerte schließt die Vorbereitungsphase ab, womit der Prüfstand bereit für die Messungen ist.

4.2 Inbetriebnahme

Die Inbetriebnahme umfasst die Überprüfung der gesamten Anlage auf Funktionalität, Sicherheit und Leistungsfähigkeit vor der erstmaligen Durchführung von Messungen und unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen eines Prüfstands in einem hydraulischen Labor. Ein wesentlicher Schritt der Inbetriebnahme ist die Druckprüfung („Abpressen“) der

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Anlage. Im Zuge dessen, erfolgt die Druck- und Dichtheitsprüfung simultan. Dabei wird sowohl die Festigkeit der Leitungen unter dem 1,5-fachen möglichen maximalen Betriebsdruck verifiziert als auch die Abwesenheit von Leckagen sichergestellt. Eine umfassende Beobachtung der Inbetriebnahme und Dokumentation der Messwerte ist für den späteren Dauerbetrieb und etwaige Wartungen unerlässlich. [24], [25]

Der Inbetriebnahme-Prozess ist in mehrere Phasen unterteilt. Die erste Phase umfasst eine visuelle Kontrolle des Versuchsaufbaus, in der montage- und fertigungsbezogene oberflächlich wahrnehmbare Fehler vor dem Befüllen der Anlage ausgeschlossen werden können. Im nächsten Schritt wird die Messtechnik eingeschaltet und mit dem Messprogramm verbunden. Die Werte für die Initialisierung der Messsensoren werden in der Vorbereitung auf die Inbetriebnahme ermittelt und sind in dem Messprogramm hinterlegt. Außerdem wird das Düsenprogramm verbunden, die Düsennadel gereinigt, poliert und vollständig geschlossen.

Die nächste Phase beinhaltet die eigentliche Druckprüfung. Die Anlage wird unter kontrollierten Bedingungen durch Zuschalten einer Hockdruckpumpe befüllt, wobei die Pumpendrehzahl und somit der Druck schrittweise erhöht wird. Bei einer Drehzahl der ersten Hochdruckpumpe HDP1 von 1500 U/min stellt sich ein Druck von 2,2 bar an MP10 ein. Die Düse wird zum Entlüften der Messleitung sowie zur Durchführung eines Funktionstests geöffnet und wieder geschlossen. Außerdem werden die Messschläuche der statischen Druckmessstellen entlüftet. Die Pumpendrehzahl wird weiter erhöht, wodurch sich ein Druck von 3,7 bar einstellt. In weiterer Folge wird durch das Hochfahren der Pumpe HDP1 auf ihre Maximaldrehzahl von 2700 U/min der Druck auf in etwa 6 bar erhöht. Um den Druck weiter zu erhöhen, wird die zweite Hochdruckpumpe HDP2 in Serie zugeschaltet, womit das Abpressen des Prüfstands mit beiden Hochdruckpumpen weitergeführt wird. In einem ersten Schritt wird der Druck durch Zuschalten der HDP2 auf in etwa 10 bar erhöht, darauffolgend auf 11 bar und bei einer Maximaldrehzahl von 2700 U/min für beide Hochdruckpumpen stellt sich ein Druck von 13 bar ein. Bei diesem Druck werden die abschließenden Messungen durchgeführt und das Abpressen beendet. Der Betriebsbereich kann mit dem Sicherheitsfaktor 1,5 von 0 bar bis 8,75 bar definiert werden. Außerhalb dieses Bereichs ist der Prüfstand nicht zu betreiben.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

4.3 Ermittlung des Betriebskennfelds

Die nachfolgenden Messungen dienen der Charakterisierung des Betriebsverhaltens des Prüfstands in Abhängigkeit unterschiedlicher Eingangsparameter. Ein wesentlicher Bestandteil der Messreihen ist die experimentelle Ermittlung der Kennlinien eines H-Q-Diagramms. Ein H-Q-Diagramm stellt die Energiehöhe einer Messstelle aufgetragen über den Durchfluss dar. Die Berechnung der Energiehöhe aus den Druck- und Durchfluss-Messwerten wird in Kapitel 3.1 näher erläutert. Die Druckwerte werden mit Cerabar PMP71 Drucktransmittern als Relativdruck aufgenommen. Das Hauptaugenmerk dieser Messreihe liegt auf der Kennlinienaufnahme des Versuchsaufbaus als Gesamtsystem. Hierfür wird zum einen die Pumpendrehzahl beider Hochdruckpumpen konstant gehalten und die Düsenstellung variiert. Zum anderen werden Pumpenkennlinien erstellt, welche das Verhalten der in Serie geschalteten Hochdruckpumpen bei konstanter Düsenstellung und stufenweiser Änderung der Drehzahl abbilden. Die Überlagerung der Kennlinien bei Variation der Düsenstellung und jener bei Variation der Drehzahl resultiert im Betriebskennfeld. In diesem Betriebskennfeld werden signifikante Betriebspunkte ausgewählt und in einer separaten Messreihe erneut erfasst, außerdem werden einige Kennlinien doppelt gemessen. Diese erneuten Messungen dienen dem Nachweis der Reproduzierbarkeit, zudem wird die Standardabweichung der Messwerte für den Durchfluss sowie der Energiehöhe erfasst. Die gewonnenen Daten bilden die Basis für die nachfolgende Auswertung der Messergebnisse und die Ableitung fundierter Schlussfolgerungen bezüglich der Leistungsfähigkeit und dem Betriebsverhalten des Prüfstands.

4.3.1 Messungen bei konstanter Düsenstellung s

Die vorliegenden Messreihen erfassen Daten mit einer Messdauer von $5\,s$ und einer Messfrequenz von $500\,Hz$. Die Pumpenkennlinien werden mit den in Serie verschalteten HDP1 und HDP2 aufgenommen und die Drehzahl in Schritten von 200 Umdrehungen gesteigert. Die Wahl der Drehzahl-Anfangswerte basiert auf der Überlegung, dass ein Betrieb der Versuchsanlage unterhalb einer Energiehöhe von $H = 20\,m$ aufgrund möglicher inkonsistenter Messergebnisse als nicht zielführend bewertet wird. Außerdem stellen der erste und letzte Messwert einer Messreihe eine Ausnahme dar, da zur besseren Darstellung der Grenzbereiche die Drehzahl teilweise lediglich für eine der beiden HDPs geändert wurde. Sämtliche Anfangs- und Endwerte der Messreihen sind in Tabelle 6 aufgelistet.

Die Variation der Düsenstellung s erfolgt in diskreten Schritten, beginnend bei $s = 6\,mm$ in 3-mm-Intervallen bis $s = 18\,mm$, um die markanteren Unterschiede der Kennlinien in diesem Bereich abzubilden. Anschließend wird bei den Düsenstellungen $s = 18\,mm, s = 24\,mm$ und $s = 30\,mm$, sowie im letzten Schritt beim Maximalwert von $s = 34\,mm$ gemessen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tabelle 6: Anfangs- und Endwerte der Messreihe „Messungen bei konstanter Düsenstellung s“

Düsenstellung	Anfangswert (U/min)		Endwert (U/min)	
	HDP1	HDP2	HDP1	HDP2
6 mm	700	900	2300	2100
9 mm	900	900	2500	2500
12 mm	900	900	2700	2500
15 mm	900	1100	2700	2700
18 mm	1100	1100	2700	2700
24 mm	1100	1100	2700	2700
30 mm	1100	1300	2700	2700
34 mm	1100	1300	2700	2700

Abbildung 4.1 zeigt ein H-Q-Diagramm, in dem die Energiehöhe H_{10} (m) über den Durchfluss Q (l/s) aufgetragen ist. Die Messergebnisse der jeweiligen Düsenstellungen sind farblich abgestuft dargestellt. Bei geringen Düsenstellungen weisen die Kennlinien einen steileren Gradienten auf, der mit zunehmender Öffnung abnimmt. Das Kennlinienverhalten ist deutlich sichtbar, überdies treten keine signifikanten Ausreißer auf. Die Messreihen mit den Düsenstellungen $s = 6\,mm$, $s = 9\,mm$ und $s = 12\,mm$ sind durch den Maximaldruck begrenzt, daher befindet sich in diesen Fällen der Endwert der Drehzahl unterhalb der Maximaldrehzahl der HDPs von $2700\,U/min$. Ab $s = 15\,mm$ wird der letzte Messwert durch die beiden HDPs begrenzt. Das bedeutet, dass bei steigendem Durchfluss die maximale Energiehöhe im definierten Betriebsbereich ab einer Düsenstellung von $15\,mm$ kontinuierlich sinkt.

Die Differenz zwischen den Kennlinien zeigt, je größer die Düsenstellung, desto geringer ist der Einfluss auf die Energiehöhe und den Durchfluss. Dies deutet darauf hin, dass die Drosselwirkung der Düse bei geringer Öffnung größer ist. Mit zunehmender Öffnung verliert die Düse an Drosselwirkung und andere Parameter nehmen stärker Einfluss. Die zusätzlichen Messwerte für $s = 9\,mm$ und $s = 15\,mm$ schwächen diesen Effekt in der Darstellung in Abbildung 4.1 ab.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

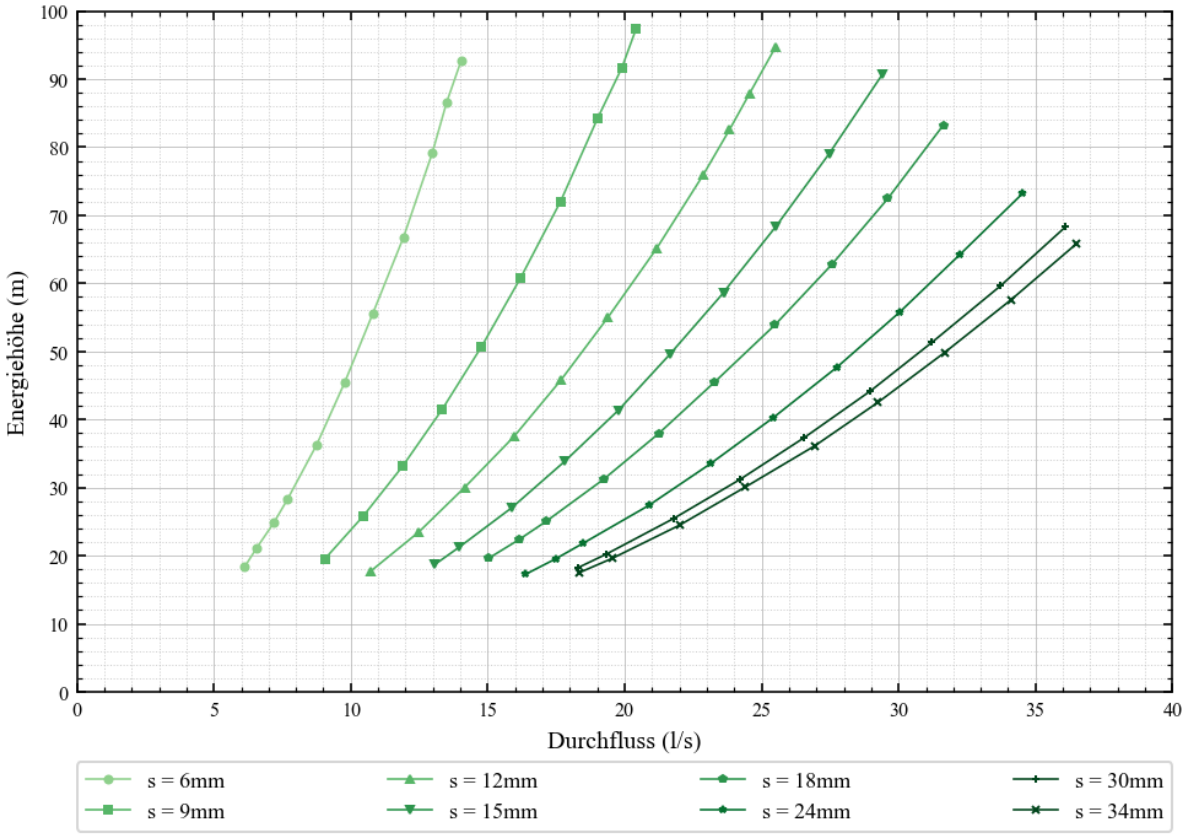

Abbildung 4.1: Kennlinien bei konstanter Düsenstellung s und Steigerung der Drehzahl mit einer vordefinierten Schrittweite ($200U/min$)

Die experimentell ermittelten Kennlinien zeigen ein parabolisches Verhalten, das durch die Beziehung der Energiehöhe zum Quadrat des Durchflusses ($H \sim Q^2$) beschrieben und durch eine Regressionsanalyse der Messreihe nachgewiesen werden kann (Abbildung 4.2). Dabei wird die verlustfreie Bilanz aus (6) zwischen dem theoretischen Oberwasser und dem Düsenaustritt bilanziert.

$$\frac{p_{OW}}{\rho_w * g} + \frac{{c_{OW}}^2}{2 * g} + h_{OW} = \frac{p_{D101}}{\rho_w * g} + \frac{{c_{D101}}^2}{2 * g} + h_{D101} \tag{16}$$

Sowohl am Oberwasser als auch am Düsenaustritt herrscht atmosphärischer Druck. Des Weiteren wird die Geschwindigkeit am Oberwasser als null angenommen. Nach Umstellen der Formel kann die Energiehöhe wie folgt dargestellt werden:

$$H_E = h_{OW} - h_{D101} = Q^2 * \frac{1}{2 * g * {A_{D101}}^2} \tag{17}$$

Die quadratische Regression ist in (18) definiert. Der konstante Teil wird in dieser Betrachtung gleich null gesetzt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

$$H(Q) = a * Q^2 + b * Q \tag{18}$$

Die Koeffizienten a und b, sowie das Bestimmtheitsmaß R^2 der Regressionsanalyse sind für die verschiedenen Düsenstellungen in Tabelle 7 ersichtlich. Liegt das Bestimmtheitsmaß sehr nahe an eins, lässt das auf eine hohe Korrelation der beiden Variablen H und Q zueinander schließen.

Tabelle 7: Koeffizienten der quadratischen Regressionsanalyse

Düsenstellung s	a	b	R^2
s = 6 mm	0,4611	0,1399	0,9999
s = 9 mm	0,2302	0,0418	0,9999
s = 12 mm	0,1406	0,1148	0,9999
s = 15 mm	0,1014	0,0938	0,9999
s = 18 mm	0,0798	0,0908	0,9999
s = 24 mm	0,0590	0,0838	1
s = 30 mm	0,0505	0,680	1
s = 34 mm	0,0472	0,0764	0,9999

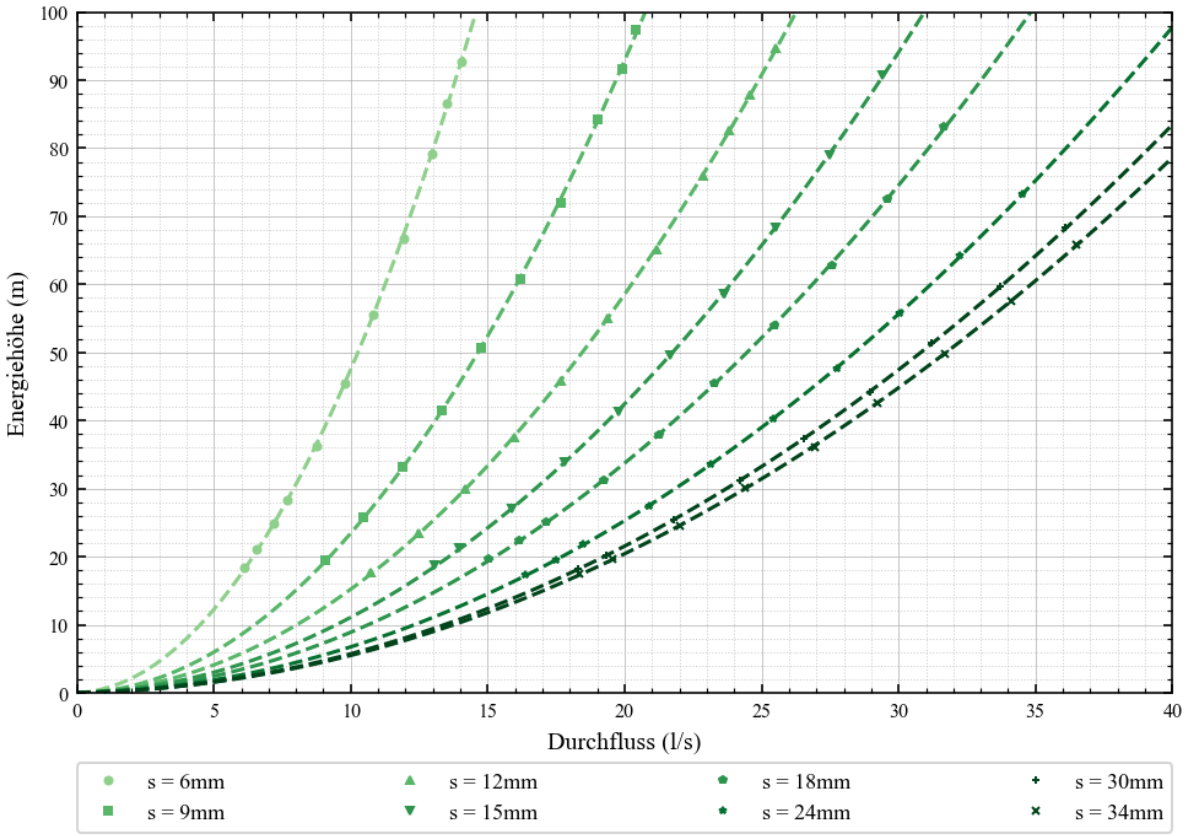

Abbildung 4.2: Regressionsanalyse der Messungen bei konstanter Düsenstellung s

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

4.3.2 Messungen bei konstanter Drehzahl der Hochdruckpumpen

Die vorliegende Messreihe erfasst Daten über eine Messdauer von 5 s mit einer Messfrequenz von 500 Hz. Die Drehzahlwerte der Hochdruckpumpen werden anhand ganzzahliger Druckwerte bei geschlossener Düse an der Messposition 10 festgelegt. Für einen Druck von $p_{10} = 3\ bar$ beträgt die Drehzahl der HDP1 1950 U/min, HDP2 ist ausgeschaltet. Bei einem Druck $p_{10} = 4\ bar$ liegt die Drehzahl der HDP1 bei 1500 U/min und der HDP2 bei 1250 U/min. Alle weiteren Werte sind der Legende aus Abbildung 4.3 zu entnehmen. Die Düse wird aus dem vollständig geschlossenen Zustand ($s = 0\ mm$) in Schritten von 2 mm bis zur maximalen Düsenstellung ($s = 34\ mm$) geöffnet; bei jedem Schritt wird ein Messwert erfasst. Der zweite Teil der Messreihen bildet dabei eine Ausnahme, da ab einer Drehzahlkombination von 2300 U/min für beide HDPs der Druck bei geschlossener Düse den maximal zulässigen Betriebsdruck überschreitet. Um den Bereich rechts oberhalb der bereits ermittelten Kennlinien abzudecken, werden diese Messreihen invers durchgeführt: Für die erste Messung wird die Düse auf ihre maximale Stellung ($s = 34\ mm$) eingestellt und beide HDPs auf ihre maximale Drehzahl von jeweils 2700 U/min gesetzt. Von dieser Düsenstellung ausgehend wird die Düse in umgekehrter Richtung in 2 mm-Schritten geschlossen und jeweils ein Messpunkt gesetzt. Ab einer bestimmten Düsenstellung wird die Schrittweite verkleinert, um signifikante Drucksprünge zu vermeiden sowie die Messdichte zu erhöhen. Dieses Vorgehen wird für weitere Drehzahlkombinationen angewandt. Die Werte der Drehzahlen und der zugehörigen Düsenstellungen dieser Messreihen sind Tabelle 8 zu entnehmen.

Tabelle 8: Ergänzung der Düsenstellungswerte der Messreihe „Messungen bei konstanter Drehzahl der Hochdruckpumpen“

Startdrehzahl (U/min)		Düsenstellung (mm)	
HDP1	**HDP2**	**Intervall (2 mm)**	**Einzelschritte (1 mm)**
2700	**2700**	[34, 16]	15
2500	**2700**	[34, 16]	15, 14, 13, 12
2500	**2500**	[34, 14]	13, 12, 11, 10
2300	**2500**	[34, 12]	11, 10, 9, 8
2300	**2300**	[34, 10]	9, 8, 7, 6

Die Messergebnisse sind in Abbildung 4.3 in einem H-Q-Diagramm dargestellt, wobei erneut die Energiehöhe H_{10} (m) über den Durchfluss Q (l/s) aufgetragen ist. Die Messergebnisse sind von niedriger zu hoher Drehzahl der HDPs farblich abgestuft. In dieser Darstellung ist das Kennlinienverhalten erneut ersichtlich, signifikante Ausreißer treten nicht auf. Der Gradient der Kennlinien ist anfänglich nahezu null und nimmt mit steigender Düsenstellung ab. Ab einer Düsenstellung $s = 14\ mm$ bleibt die Steigung über alle Kennlinien in etwa konstant.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Die erste Messreihe mit einer Drehzahl von 1950 U/min für HDP1 und ausgeschalteter HDP2 stellt eine Ausnahme dar. Diese konvergiert bei großer Düsenstellung mit der nachfolgenden Messreihe gegen eine Energiehöhe von $20\,m$. Die Ursache dafür könnte sein, dass die Verwendung einer einzelnen Hochdruckpumpe das Kennlinienverhalten verändert. Des Weiteren könnte der Bereich unterhalb von $20\,m$ Energiehöhe aufgrund der geringen Förderhöhe der Pumpen unzureichende Messergebnisse liefern. Aus diesem Grund wurde als niedrigster Startdruck folgender Wert festgelegt: $p_{10} = 3\,bar$. Der Einfluss auf die Energiehöhe und den Durchfluss durch Änderung der Düsenstellung nimmt mit steigendem Wert ab, was sich speziell im Bereich zwischen $s = 30\,mm$ und $s = 34\,mm$ zeigt. Dieser Effekt wurde bereits in Kapitel 4.3.1 festgestellt und näher beschrieben.

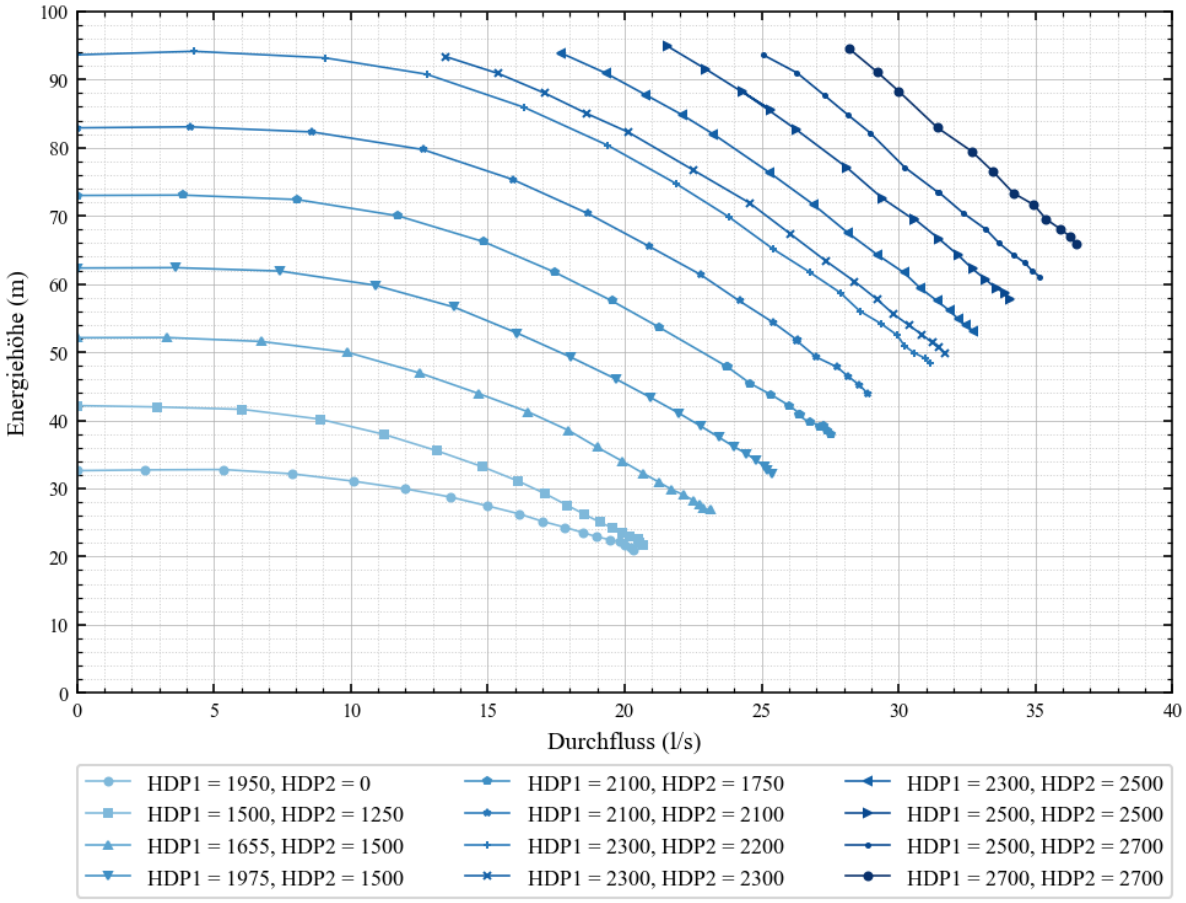

Abbildung 4.3: Kennlinien bei konstanter Drehzahl beider Hochdruckpumpen und Steigerung der Düsenstellung s in 2 mm-Intervallen

4.3.3 Betriebskennfeld

Das Betriebskennfeld aus Abbildung 4.4 setzt sich aus den beiden Messreihen „Messungen bei konstanter Düsenstellung s“ (Abbildung 4.1) und „Messungen bei konstanter Drehzahl der Hochdruckpumpen“ (Abbildung 4.3) zusammen. Die beiden ermittelten Kennlinienfelder werden dabei überlagert. Dies bietet einen Überblick über mögliche Betriebsbereiche und hilft bei der Auswahl möglicher Betriebspunkte für kommende Messungen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Das Betriebskennfeld besitzt folgende markante Punkte:

- Der maximal gemessene Durchfluss beträgt 36,48 l/s.
- Die maximal gemessene Energiehöhe beträgt 97,41 m.

Das Betriebskennfeld weist eine Spanne der Energiehöhe von etwa 18 m bis 97 m auf. Bei der unteren Grenzen von 18 m erreicht der Durchfluss einen maximalen Wert von 18,33 l/s. Die obere Grenze von in etwa 97 m wird bis zu einem Durchfluss von 28,19 l/s gehalten, anschließend fällt die Energiehöhe linear bis zum maximalen Durchfluss ab. Die maximale Düsenstellung $s = 34\,mm$ begrenzt einen weiteren Abfall der Energiehöhe. Daraus ergibt sich, dass der maximale Durchfluss nur an einem Punkt erreicht werden kann, nämlich bei maximaler Düsenstellung und maximaler Drehzahl beider HDPs.

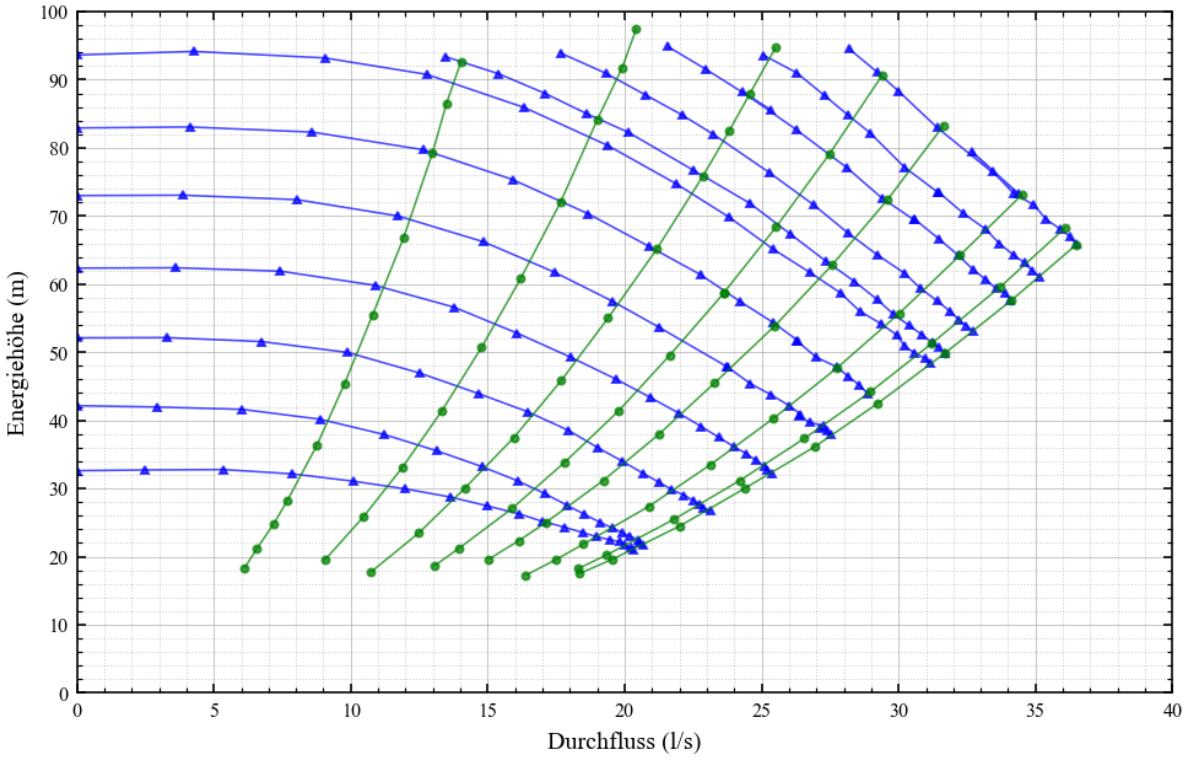

Abbildung 4.4: Betriebskennfeld des *AxFeeder*-Prüfstands in Form eines H-Q-Diagramms

4.3.4 Reproduzierbarkeit

Die vorliegende Messreihe repliziert die Messungen aus Kapitel 4.3.1 für die Düsenstellungen $s = 6\,mm, s = 12\,mm, s = 18\,mm, s = 24\,mm$ und $s = 30\,mm$. Hierbei wurden dieselben Parameter bezüglich der jeweiligen Drehzahl, der Messdauer (10 s) und der Messfrequenz (500 Hz) verwendet, um die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse zu verifizieren. Abbildung 4.5 zeigt die Überlagerung der beiden Messreihen in einem H-Q-Diagramm, wobei die Hauptwerte (Abbildung 4.1) in hellgrün und die Reproduktionswerte in dunkelgrün dargestellt sind. Die marginalen Abweichungen zwischen den Haupt- und

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Reproduktionswerten, sowohl im Hinblick auf den Kennlinienverlauf als auch die einzelnen Datenpunkte, deuten auf eine hohe Reproduzierbarkeit der Messergebnisse hin.

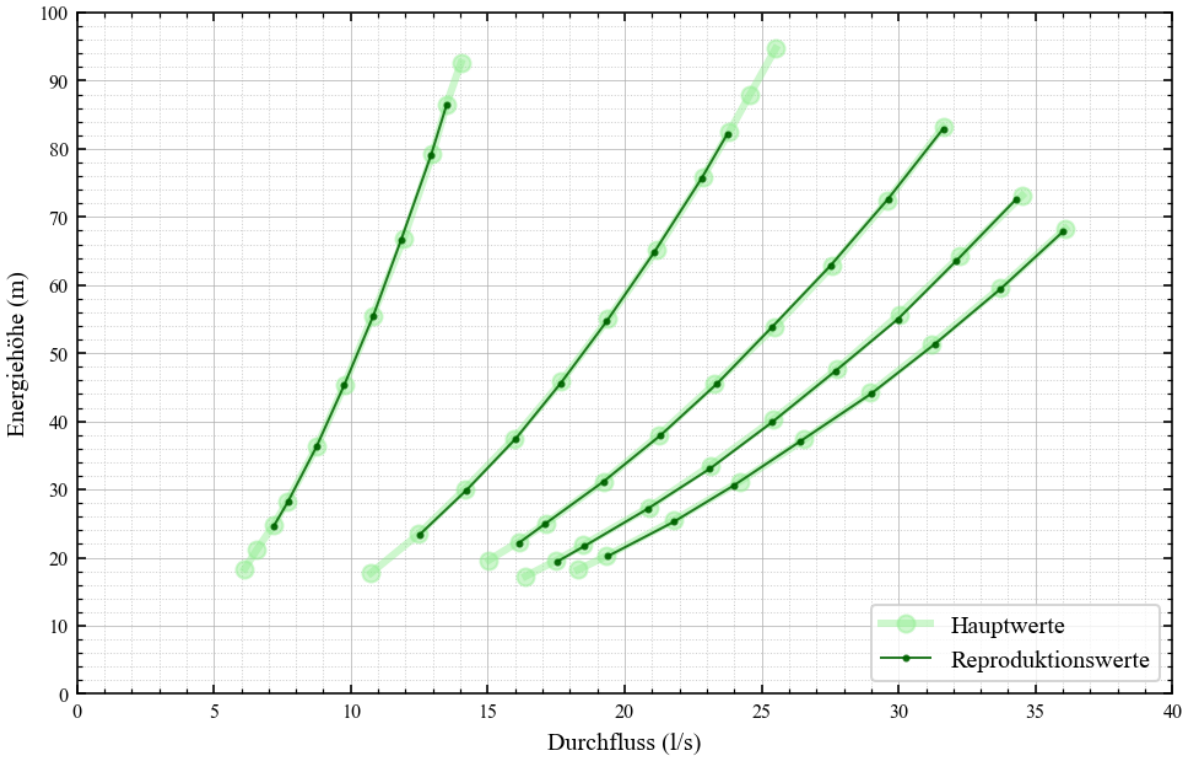

Abbildung 4.5: Haupt- und Reproduktionsmessreihe im H-Q-Diagramm überlagert dargestellt; in hellgrün die Hauptwerte und in dunkelgrün die Reproduktionswerte

4.3.5 Messungen an markanten Betriebspunkten

Die vorliegende Messreihe erfasst Daten über eine Messdauer von 10 s mit einer Messfrequenz von 500 Hz. Die Messungen spannen ein Raster an Betriebspunkten im Kennfeld auf. Dabei wird die Energiehöhe in 10 m-Schritten und der Durchfluss in 5 l/s-Schritten abgeändert. Des Weiteren wird die Standardabweichung für alle Messwerte aufgezeichnet. Die Setzung der Messpunkte erfolgt nach Einstellen des passenden Druckwertes für die Energiehöhe und den dazugehörigen Durchfluss. Das Einstellen erfolgt durch Änderung der Düsenstellung bzw. der Drehzahlen der HDPs. Die entsprechenden Werte können Tabelle 9 entnommen werden. Es wurde darauf geachtet, beim Einstellen der Energiehöhe eine Toleranz von $\pm 0{,}5$ m, sowie beim Durchfluss eine Toleranz von $\pm 0{,}5\ l/s$ einzuhalten. Bei einer Energiehöhe von $H_{10} = 60\ m$ entspricht das einer maximalen Abweichung von 0,83 % und bei einem Durchfluss $Q = 30\ l/s$ entspricht das einer maximalen Abweichung von 1,67 %.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tabelle 9: Auflistung der Parameter für die Einstellung der verschiedenen Betriebspunkte

Energiehöhe	Parameter	Durchfluss Q			
		15 l/s	20 l/s	25 l/s	30 l/s
50 m	Düsenstellung (mm)	9,7	13,4	18,4	28,2
	HDP1 (U/min)	1800	1875	2050	2275
	HDP2 (U/min)	1750	1800	2000	2200
60 m	Düsenstellung (mm)	8,3	11	16	22,1
	HDP1 (U/min)	1825	1990	2135	2300
	HDP2 (U/min)	1900	2000	2200	2465
70 m	Düsenstellung (mm)	7,6	10,6	14,4	19
	HDP1 (U/min)	1950	2135	2300	2500
	HDP2 (U/min)	2095	2150	2300	2450
80 m	Düsenstellung (mm)	7,1	9,9	13,1	16,9
	HDP1 (U/min)	2190	2300	2360	2535
	HDP2 (U/min)	2100	2245	2500	2700
90 m	Düsenstellung (mm)	9,65	9,2	12,1	15,4
	HDP1 (U/min)	2280	2320	2575	2700
	HDP2 (U/min)	2300	2500	2500	2700

Abbildung 4.6 stellt die Betriebspunkte, gemessen an MP10 in einem H-Q-Diagramm dar. Zusätzlich sind Fehlerbalken, die der Standardabweichung entsprechen, für die Energiehöhe in blau und für den Durchfluss in grün für jede Messposition eingetragen. Die Skalierung dieses Diagramms wurde zur besseren Lesbarkeit der Fehlerbalken angepasst, die Unskalierte Darstellung ist im Anhang angefügt.

Das Setzen der Messpunkte unterliegt einer gewissen Ungenauigkeit. Im Diagramm ist ersichtlich, dass dies mit steigendem Durchfluss stärker ausgeprägt ist. Die Messergebnisse des Durchflusses variieren am Sollwert $Q = 15\ l/s$ zwischen $14{,}96\ l/s$ und $15{,}09\ l/s$ sowie am Sollwert $Q = 30\ l/s$ zwischen $29{,}77\ l/s$ und $30{,}34\ l/s$. Die Zunahme der Ungenauigkeit bei der Positionierung der Messpunkte könnte auf turbulenter werdende Strömungsverhältnisse hindeuten, welche die präzise Einstellung des gewünschten Betriebspunkts erschweren. Selbiges ist bei der Energiehöhe nicht ausgeprägt, sie schwankt bei einem Zielwert von $H_{10} = 50\ m$ zwischen $49{,}85\ m$ und $50{,}21\ m$ genauso stark wie bei einem Zielwert von $H_{10} = 90\ m$ zwischen $89{,}94\ m$ und $90{,}38\ m$. Diese Messergebnisse deuten darauf hin, dass die Schwankungsbreite der Energiehöhe unabhängig von den untersuchten Bedingungen zu sein

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

scheint. Da alle Messwerte in der zuvor definierten Toleranz liegen, können diese als plausibel angesehen werden.

In [26] wurde der Auslegungspunkt des Prüfstands auf $H = 60\,m$ und $Q = 30\,l/s$ festgelegt, dieser Punkt stellt sich in der vorliegenden Messreihe bei $s = 22{,}1\,mm$ und den Drehzahlen $2300\,U/min$ für HDP1, sowie $2465\,U/min$ für HDP2 ein. Die ermittelten Messwerte betragen $H_{10} = 60{,}05\,m$ und $Q = 30{,}12\,l/s$, wobei die Abweichungen von den jeweiligen Sollwerten innerhalb der definierten Toleranzen liegen und somit als vernachlässigbar betrachtet werden können.

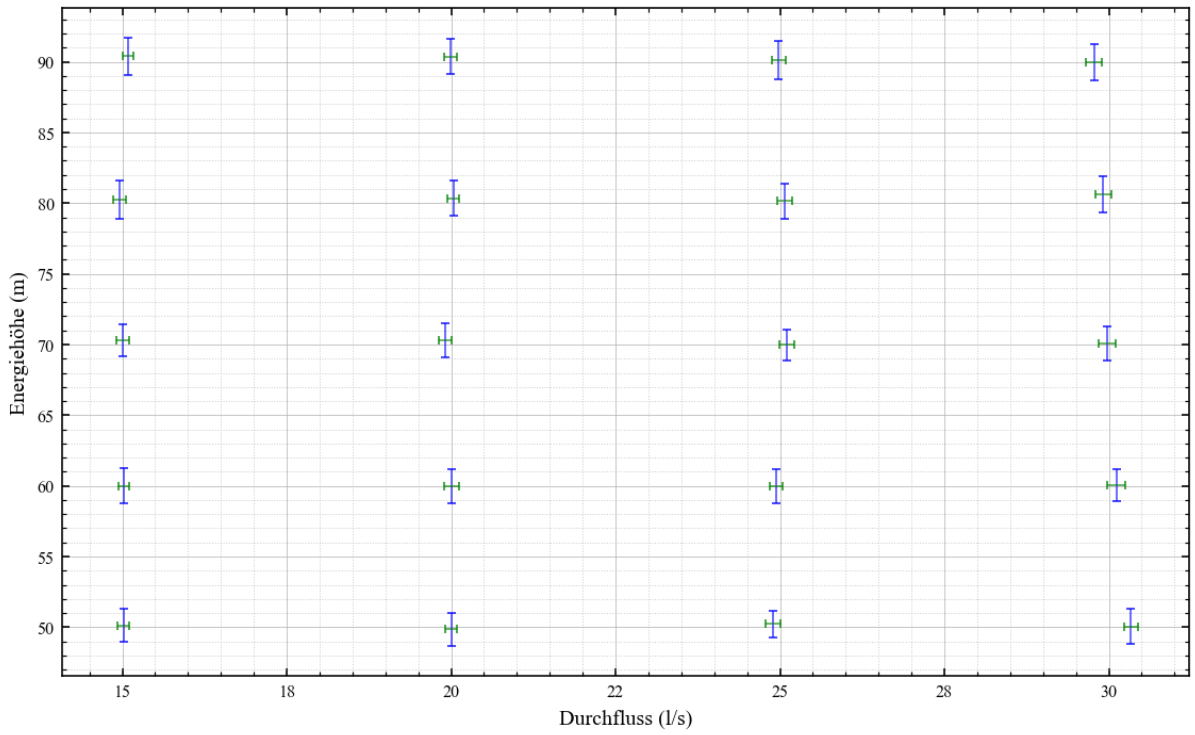

Abbildung 4.6: Darstellung verschiedener Betriebspunkte aufgenommen in einem Rasterformat; Fehlerbalken der Energiehöhe in blau und des Durchflusses in grün

In Abbildung 4.7 ist die Standardabweichung der Messwerte als gruppiertes Säulendiagramm aufgetragen; links für verschiedene Energiehöhen und rechts für verschiedene Durchflusswerte. Innerhalb jeder Gruppe sind die Säulen farblich entsprechend der Legende gegliedert. Die Standardabweichung ist als absoluter Zahlenwert in beiden Diagrammen auf der Ordinate aufgetragen. Die Säulen entsprechen den Fehlerbalken aus Abbildung 4.6. Die Standardabweichungen der Energiehöhe zeigen über alle Gruppen hinweg nahezu konstante Werte und sind somit weitgehend unabhängig vom gewählten Betriebspunkt. Die Standardabweichungen des Durchflusses hingegen weisen eine geringe Zunahme mit steigendem Durchfluss auf.

Eine normierte Betrachtung wird durch die Berechnung des Variationskoeffizienten (VKE) (15) anhand der Werte $\sigma_{H10} = 1{,}16\,m$ und $\sigma_Q = 0{,}136\,l/s$ im Auslegungspunkt ($H_{10} =$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

$60\,m, Q = 30\,l/s$) möglich. Dabei ergibt sich für die Energiehöhe der Wert $VKE_{H10} = 1{,}93\,\%$ und für den Durchfluss der Wert $VKE_Q = 0{,}45\,\%$. Die Variationskoeffizienten lassen auf eine geringe Streuung im Verhältnis zu ihren Mittelwerten schließen, insbesondere der Variationskoeffizient des Durchflusses mit deutlich unter einem Prozent.

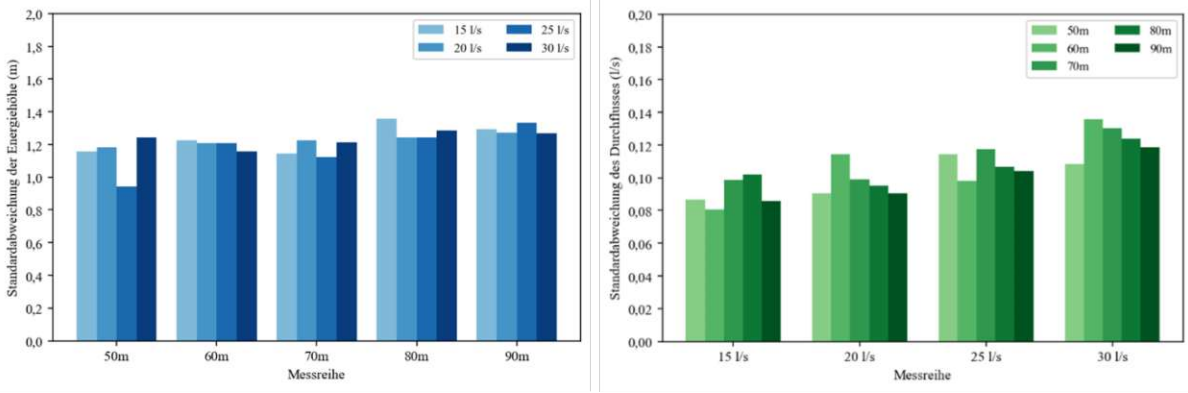

Abbildung 4.7: Standardabweichung der Messwerte als gruppiertes Säulendiagramm: links in blau für verschiedene Energiehöhen und rechts in grün für verschiedene Durchflusswerte; in beiden Fällen als absoluter Wert aufgetragen.

4.3.6 Zusammenfassung und Diskussion

Das Betriebskennfeld liefert einen umfassenden Überblick über die potenziellen Betriebszustände des Prüfstands. Die Aufnahme der Messwerte dieser Messreihen erfolgt an MP10. Die Extremwerte markieren die Grenzen des untersuchten Arbeitsbereichs: Ein maximaler Durchfluss von $36{,}48\,l/s$ bei maximaler Düsenstellung ($s = 34\,mm$) und eine maximale Energiehöhe von $97{,}41\,m$ abrufbar bei einer Düsenstellung von $s = 9\,mm$. Die minimal gemessene Energiehöhe beträgt $18\,m$. Unterhalb von $20\,m$ Energiehöhe ist ein Betrieb des Prüfstands aufgrund möglicher Strömungsabrisse durch eine zu geringe Förderhöhe der Hochdruckpumpen nicht zielführend. Ein Dauerbetrieb mit geringer Düsenstellung im Bereich bis in etwa $s = 6\,mm$ erweist sich aufgrund fehlender Strahlausbildung ebenso als unzweckmäßig. Die charakteristisch spitz zulaufende Form des Betriebskennfelds ergibt sich im unteren Bereich aus der Begrenzung durch die maximale Düsenstellung, sowie im oberen Bereich durch die maximale Drehzahl der Hochdruckpumpen. [14]

Die von Steindl [13] dargestellten H-Q-Kennlinien, welche unter ähnlichen Bedingungen mit gleicher Düse und gleichen Hochdruckpumpen, jedoch anderer Zuleitung durchgeführt wurden, weisen ein vergleichbares Verhalten wie die in Abbildung 4.1 präsentierten Kennlinien auf. Ein direkter Vergleich der Messdaten ist aufgrund unterschiedlicher verwendeter Düsenstellung nicht möglich. Dennoch konnte das Verhalten der Kennlinien, welches durch Steindl [13] als parabolisch identifiziert wurde, im Rahmen dieser Messreihe ebenso mit einer Regressionsanalyse in 4.3.1 als parabolisch ($H \sim Q^2$) nachgewiesen werden. Die Regelmäßigkeit im Kennlinienverhalten, sowie die Ähnlichkeit zu bereits bestehenden Messungen zeugen von einem robusten Aufbau des Messprogramms und des Versuchsaufbaus.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Die durchgeführten Replikationsmessungen bestätigen eine hohe Reproduzierbarkeit der Messergebnisse, was die Zuverlässigkeit der angewandten Messmethodik unterstreicht. Die Analyse der Standardabweichungen und der daraus abgeleiteten Variationskoeffizienten $VKE_{H_{10}} = 1{,}93\,\%$ und $VKE_Q = 0{,}45\,\%$ am Auslegungspunkt $(H_{10} = 60\,m$ und $Q = 30\,l/s)$ indizieren eine insgesamt geringe Streuung der Messwerte relativ zu ihren Mittelwerten. Dies deutet auf eine Genauigkeit der Messungen hin, die für die Charakterisierung des Betriebsverhaltens der Versuchsanlage und die Bereitstellung von Referenzdaten für zukünftige Messungen als hinreichend erachtet werden kann.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

4.4 Bestimmung der Verluste in der Verteilleitung

Der vorliegende Abschnitt charakterisiert die Verluste in der Verteilleitung des *AxFeeder*, welche neben den Messungen zur Bestimmung des Betriebskennfelds aus Kapitel 4.3 den zweiten Teil der statischen Messreihen darstellen. Ziel dieser Messungen ist die detaillierte Untersuchung des Strömungsverhaltens in der Verteilleitung, insbesondere der Druckverluste in den Abzweigeleitungen. Der erste Bestandteil beinhaltet die experimentelle Ermittlung der Energiehöhenverluste an den verschiedenen Messstellen, dargestellt in einem H-Q-Diagramm. Des Weiteren wird im Zuge dieser Messreihe die dazugehörige Standardabweichung ermittelt, sowie in einem p-Q Diagramm der Druckverlust und dessen Streuungsbereich zwischen MP10 und MPD101 dargestellt. Das Hauptaugenmerk liegt auf Messungen bei unterschiedlichen, konstant gehaltenen Energiehöhen und der anschließend dimensionslosen Darstellung dieser Messdaten in einem ζ-Re-Diagramm. Im Zuge dessen erfolgt eine Regressionsanalyse der Messdaten über alle Energiehöhen, um eine mögliche funktionale Abhängigkeit des ζ-Beiwertes zur Reynolds-Zahl zu bestimmen.

4.4.1 Messungen zur Bestimmung der Verteilleitungsverluste

Die vorliegende Messreihe wird mit einer Messdauer von $5\,s$ und einer Messfrequenz von $500\,Hz$ durchgeführt. Dabei werden die Verluste der Verteilleitung zwischen dem Eintritt an MP10 und dem Austritt an MPD101 ermittelt. Die Energiehöhe wird an MP10 konstant bei $H = 60\,m$ gehalten. Die Düsenstellung wird in $2\,mm$-Schritten beginnend bei $s = 0\,mm$ bis zur vollen Düsenöffnung bei $s = 34\,mm$ geändert. Die Drehzahl beider HDPs wird bei jedem Messpunkt so angepasst, dass sich die Energiehöhe $H = 60\,m$ an MP10 mit einer Toleranz von $\pm 0{,}1\,m$ einstellt. Das entspricht auf den Referenzwert bezogen einer Genauigkeit von $\pm 1{,}6‰$. Die Änderung der Düsenstellung und der Drehzahlen resultiert in einer Steigerung des Durchflusses.

In Abbildung 4.8 ist die Energiehöhe an MP10 und an MPD101 über den Durchfluss in einem H-Q-Diagramm aufgetragen. Die Energiehöhe H_{10} weist das geforderte nahezu konstante Verhalten auf, bei dem sich alle Messwerte in der zuvor festgelegten Toleranz befinden. Die Messwerte der Energiehöhe H_{D101} zeigen bis zu einer Düsenstellung von $s = 6\,mm$ kaum Abweichung, mit zunehmender Düsenöffnung bildet sich eine Differenz der Energiehöhe zwischen MP10 und MPD101.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

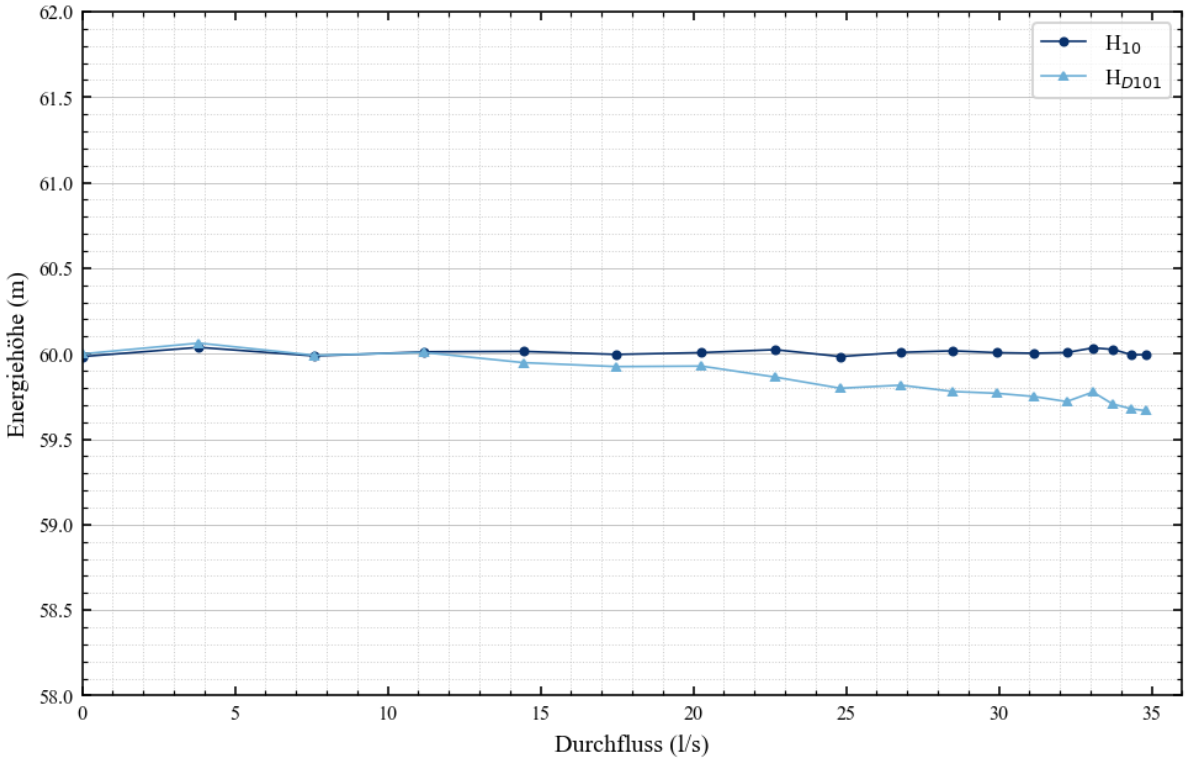

Abbildung 4.8: Gegenüberstellung der gemessenen Energiehöhen an MP10 und MPD101

Die Differenz zwischen zwei Messstellen wird als Energiehöhenverlust H_V bezeichnet, siehe (7). Der Energiehöhenverlust der Messreihe wird in Abbildung 4.9 dargestellt. Dieser wird auf die Energiehöhe an MP10 bezogen und in Prozent über den Durchfluss aufgetragen. Die Standardabweichung der Messwerte ist als farblich hinterlegte Fläche im Diagramm aufgetragen. An den ersten vier Messpunkten kommt es zu negativen Verlustwerten, da die Messwerte für H_{10} und H_{D101} (Abbildung 4.8) nahezu ident sind und unter Berücksichtigung der Mesunsicherheiten sich eine negative Differenz der Werte ergeben kann. Ab einer Düsenstellung $s = 8\,mm$ steigt die Differenz kontinuierlich. Das Verhalten der Verlustkurve wird durch (8) charakterisiert, ist quadratisch abhängig von der Geschwindigkeit und kann durch Erweitern der Formel mit Hilfe des Durchflusses wie folgt dargestellt werden:

$$H_V = \frac{\zeta}{2 * g * {A_{ME}}^2} * Q^2 \tag{19}$$

Der maximale Höhenverlust beläuft sich dabei auf 0,55 %, bei einer Standardabweichung von $\pm$0,05 %, jeweils bezogen auf H_{10} bei einer Düsenstellung $s = 34mm$.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

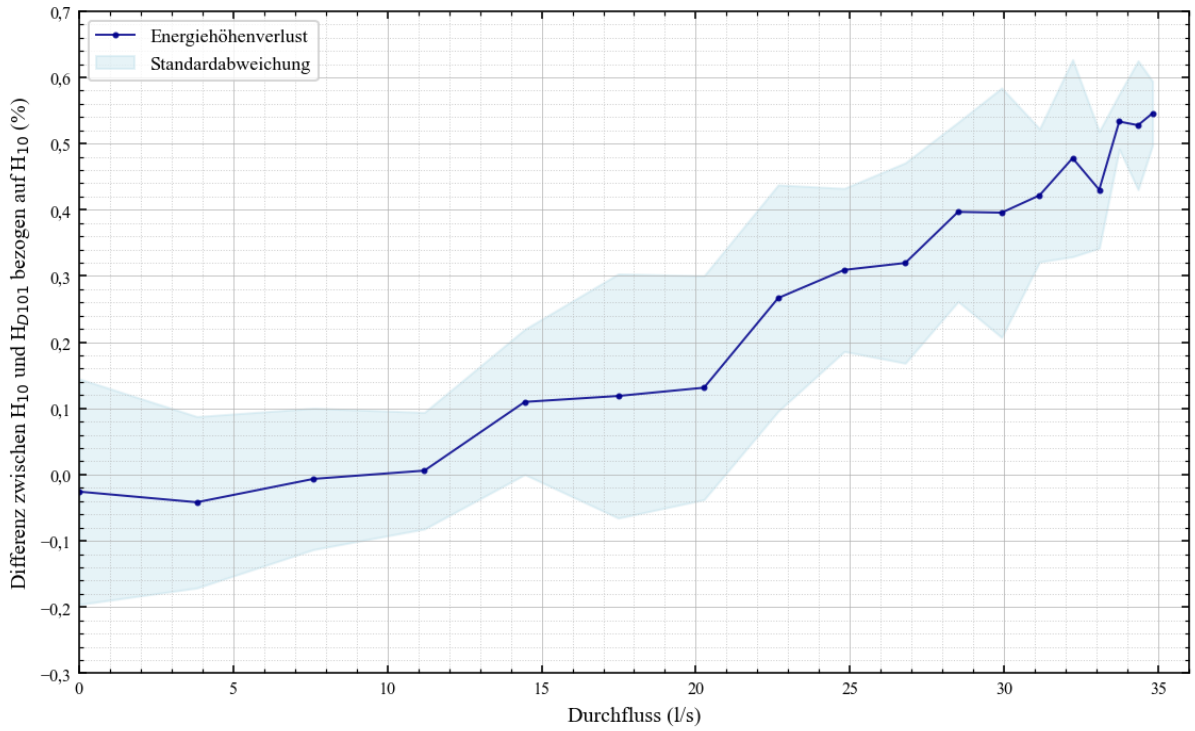

Abbildung 4.9: Darstellung des Energiehöhenverlustes (dunkelblau) zwischen MP10 und MPD101 bei einer Energiehöhe von $H = 60\,m$, bezogen auf die Eingangsenergiehöhe H_{10} in Prozent. In Hellblau ist die Standardabweichung aufgetragen.

Die bisherige Analyse der Energiehöhenverluste betrachtet den gesamten Strömungsweg der Verteilleitung und bilanziert die Verluste zwischen MP10 und MPD101. In Abbildung 4.10 sind die Verluste nach den einzelnen Abschnitten der Verteilleitung aufgeteilt und in einem Säulendiagramm dargestellt. Die Messung erfolgt im Auslegungspunkt ($H = 60\,m, Q = 30\,l/s$). Es zeigt sich, dass der Großteil der Energiehöhenverluste in den Abschnitten zwischen ME10 und ME61 auftritt. Insbesondere im Abschnitt nach der 90°-Abzweigung von ME51 bis zur ME61 treten mit 0,31% über dreiviertel der Verluste auf. Die Energiehöhenverluste in den Messabschnitten können durch diese Messung nur quantifiziert werden; zur Bestimmung möglicher Ursachen sind weiterführende Messungen notwendig.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

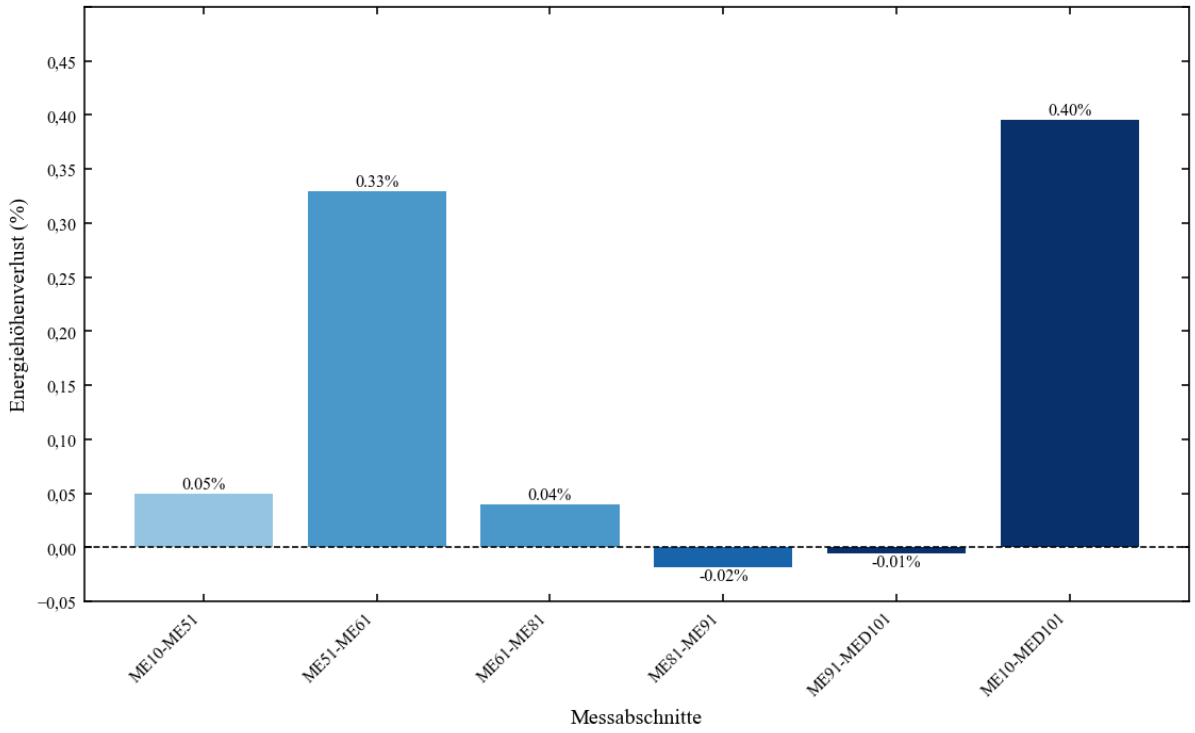

Abbildung 4.10: Energiehöhenverluste der unterschiedlichen Messabschnitte im Auslegungspunkt, aufgetragen in Prozent bezogen auf die Eingangsenergiehöhe $H_{10} = 60\ m$

4.4.2 Verlustmessungen bei verschiedenen Energiehöhen

Diese Messungen ergänzen die Messreihe zur Verlustbetrachtung aus Kapitel 4.4.1 um fünf weitere Messreihen bei konstant gehaltenen Energiehöhen: $H_{10} = 40\ m$, $H_{10} = 50\ m$, $H_{10} = 70\ m$, $H_{10} = 80\ m$ und $H_{10} = 90\ m$. Die Messdauer beträgt $5\ s$ und die Messfrequenz $500\ Hz$. Die Darstellung dieser Messdaten erfolgt in einem ζ-Re-Diagramm, welches eine dimensionslose Betrachtung der Verluste in der Verteilleitung bei unterschiedlichen Energiehöhen ermöglicht. Die Bilanzierung erfolgt zwischen MP10 und MP91. Dadurch wird gewährleistet, dass die Kennwerte einzig für die Verteilleitung des *AxFeeder* berechnet werden; die Düse ist hingegen nicht Teil dieser und daher nicht mitberücksichtigt. Die Berechnung des ζ-Beiwertes erfolgt nach (9), die der Reynolds-Zahl erfolgt nach (10). Beide Werte werden auf MP10 bezogen.

Der erste Messpunkt, bei einer Düsenstellung $s = 0\ mm$, wird in der Auswertung nicht berücksichtigt, da die Bestimmung des ζ-Beiwertes nach (9) anhand des dynamischen Energieanteils erfolgt, welcher bei $Q = 0\ l/s$ gegen unendlich strebt. Dieses Muster setzt sich bei niedrigen Reynolds-Zahlen fort und zeigt sich anhand der hohen ζ-Werte in diesem Bereich, wie in Abbildung 4.11 ersichtlich. Die Reynolds-Zahl sinkt dabei nie unter einen Wert von in etwa 15000. Die Strömung kann aufgrund der Überschreitung der kritischen Reynolds-Zahl ($R_{krit} = 2300$) für Rohrleitungen als turbulent identifiziert werden. Ab einer Düsenstellung von $s = 8\ mm$ konvergieren die Kurven für sämtliche Energiehöhen gegen einen ζ-Beiwert knapp unterhalb von 50. [15]

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

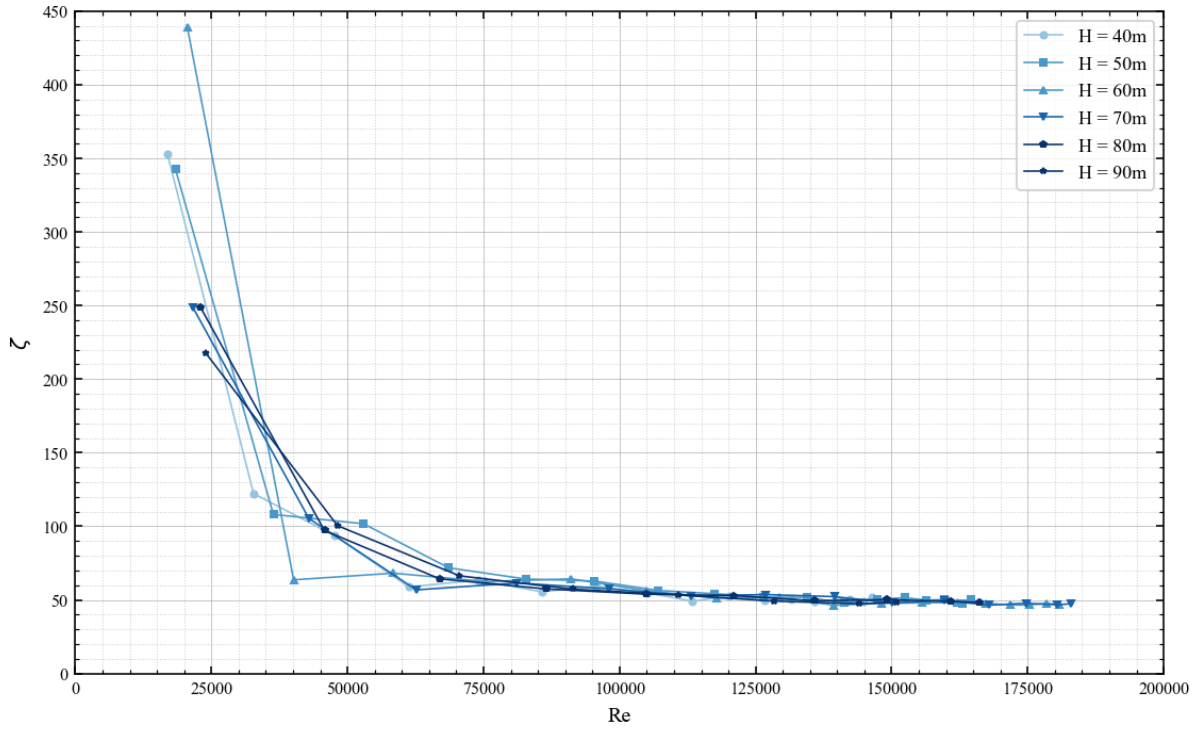

Abbildung 4.11: ζ-Re-Diagramm ausgewertet an unterschiedlichen konstant gehaltenen Energiehöhen

Zur weiteren Betrachtung der Grenzwerte und zur Charakterisierung der ausgewerteten Messdaten wird eine Regressionsanalyse zuerst für jede Messreihe einzeln und anschließend für alle in den Messreihen ermittelten Messwerte durchgeführt. Basierend auf der in Abbildung 4.11 dargestellten Verteilung der Messwerte wird für die Analyse ein gebrochen rationaler Ansatz gewählt, welcher in Gleichung (20) definiert ist. Damit kann eine vertikale und eine horizontale Asymptote bestimmt werden. Die Vertikale wird dabei durch den Parameter c repräsentiert, die Horizontale durch den Parameter d.

$$\zeta = \frac{a}{(Re - c)} + d \tag{20}$$

In Abbildung 4.12 folgt die Darstellung aller Messpunkte inklusive der Aufbereitung der Regressionsanalyse. Dabei liegt die Asymptote der Reynolds-Zahl bei $Re = 9150$, die des ζ-Beiwertes bei $\zeta = 24{,}4$. Beide Grenzwerte sind in Abbildung 4.12 als rot gestrichelte Linien dargestellt. Das gebrochen rationale Verhalten ist als passend zu bewerten, da das Bestimmtheitsmaß bei $R^2 = 0{,}991$ liegt. Es ist anzumerken, dass sowohl die Reynolds-Zahl als auch der ζ-Beiwert deutlich unterhalb der kleinsten experimentell bestimmten Werte liegen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

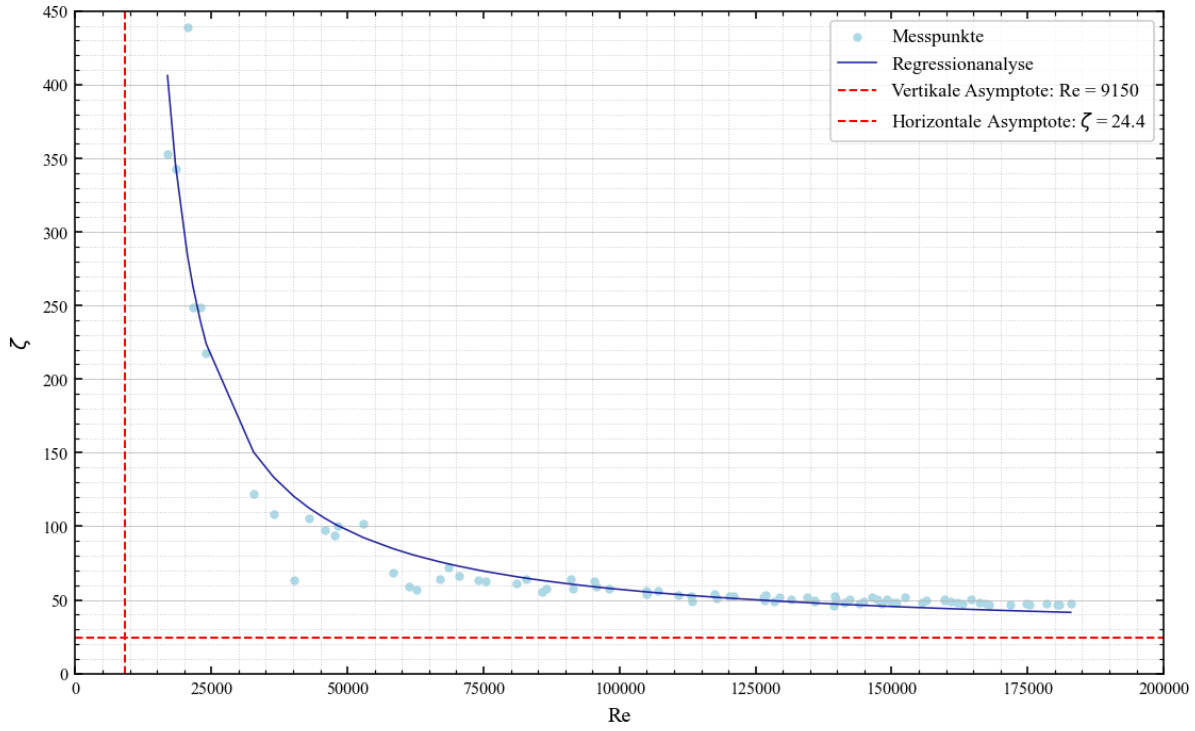

Abbildung 4.12: Regressionsanalyse aller bei verschiedenen Energiehöhen ermittelten Messergebnissen

4.4.3 Zusammenfassung und Diskussion

Die Messreihen geben Einblick in das Verlustverhalten der Verteilleitung des *AxFeeder*. Die Leitungsverluste werden zuerst zwischen MP10 und MPD101 bilanziert. Die Messungen zeigen, dass die Verluste, wie in Abbildung 4.9 dargestellt, quadratisch mit dem Durchfluss ansteigen und maximal bei $Q = 34{,}7\ l/s$ bei 0,55 % der Eingangsenergiehöhe H_{10} liegen. Im Auslegungspunkt $(Q = 30\ l/s)$ liegen sie bei 0,40%. Im Anfangsbereich bis zu einer Düsenstellung $s = 8\ mm$ treten kaum signifikante Änderungen der Messwerte zwischen Ein- und Austritt auf. Aufgrund der geringen Unterschiede kommt es sogar teilweise zu negativen Verlustwerten. Dies kann einerseits auf Messunsicherheiten zurückgeführt werden, andererseits bildet der Düsenstrahl im unteren Durchflussbereich keinen stabilen Strahl aus, wodurch die Messwerte stärker schwanken können. [14], [27]

Die Standardabweichung streut dabei konstant um den Verlustwert, auch bei niedrigeren Durchflusswerten. Das Diagramm in Abbildung 4.10 zeigt die Energiehöhenverluste in den jeweiligen Messabschnitten im Auslegungspunkt. Die größten Verluste treten in den ersten zwei Abschnitten zwischen MP10 und MP61 auf, anschließend sind sie nahezu null. Die im Diagramm präsentierten Daten zeigen zwar Tendenzen auf, jedoch könnte die Genauigkeit der Ergebnisse durch potenzielle Unsicherheiten bei der Initialisierung der Parameter beeinträchtigt sein.

Der Einfluss unterschiedlicher Energiehöhen auf die Leitungsverluste wird in Abbildung 4.11, sowie in weiterer Folge in Abbildung 4.12 betrachtet. Die Gesamtverluste werden durch die

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Aufbereitung in einem ζ-Re-Diagramm dimensionslos charakterisiert. Bereits in Abbildung 4.11 ist erkennbar, dass der ζ-Beiwert bei steigender Reynolds-Zahl über alle Energiehöhen asymptotisch gegen einen Grenzwert strebt. Eine weitere Steigerung der Reynolds-Zahl ist daher nicht erforderlich. Dieses Verhalten konnte in Abbildung 4.12 durch die dargestellte Regressionsanalyse bestätigt werden. Im Bereich niedriger Reynolds-Zahlen, welcher äquivalent zum Anfahrbereich der Versuchsanlage ist, sind nur wenige Messwerte vorhanden. Dieser Bereich wird im Versuchsbetrieb schnell durchfahren. Eine nähere Betrachtung ist aufgrund des geringen Einflusses auf den Betrieb der Anlage nicht erforderlich. Mit steigender Reynolds-Zahl bewegt sich die Anlage in den Betriebsbereich in dem der ζ-Beiwert untersucht wird. Der Wert der Asymptote aus der Regressionsanalyse liegt bei $\zeta = 24{,}4$, der niedrigste experimentell bestimmte ζ-Beiwert liegt bei $\zeta = 46{,}31$. Das tatsächliche Verlustverhalten im Betriebsbereich wird durch den theoretischen ζ-Beiwert der Asymptote unterbewertet. Gestützt auf den tatsächlichen Messwerten, kann der ζ-Beiwert der Verteilleitung auf etwa $\zeta = 50$ angenommen werden. In der Fachliteratur finden sich Vergleichswerte für den ζ-Beiwert für Bauteile wie z.B. Rohrkrümmer oder Diffusoren. [28], [29] Der im Rahmen dieser Messungen ermittelte ζ-Beiwert gilt für die gesamte Verteilleitung. Würde man einzelne Abschnitte in der Auswertung isolieren, hätte man bei den derzeitigen Messergebnissen das Problem, das eine Beeinflussung der Messwerte durch vorhergehende Abschnitte nicht ausgeschlossen werden kann. [12] Ein Vergleich des ζ-Beiwertes der Verteilleitung mit jenen aus der Fachliteratur ist daher ohne zusätzliche Messdaten nicht zu empfehlen. Des Weiteren geht aus Abbildung 4.11 und Abbildung 4.12 hervor, dass die Gesamtverluste der Verteilleitung unabhängig von der Energiehöhe sind. Bei ausreichend großer Reynolds-Zahl überlagern sich die verschiedenen Messpunkte der Energiehöhen um $\zeta = 50$.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

4.5 Charakterisierung des Betriebsverhaltens

Die vorangegangenen Messreihen aus Kapitel 4.3 und Kapitel 4.4 dienen dazu, Grenzen und Verluste im Versuchsbetrieb zu identifizieren. In der nachfolgenden Messreihe liegt der Fokus auf der Analyse des Betriebsverhaltens der Versuchsanlage und im Speziellen auf Änderungen des Betriebszustands über einen definierten Zeitraum, weshalb diese als dynamische Messungen bezeichnet werden. Dafür werden zuerst Anfahr- und Abschaltprozesse gegen die geschlossene Düse unter Variation der Drehzahl durchgeführt. Anschließend wird bei konstanter Drehzahl die Düse auf $s = 30\,mm$ geöffnet und wieder geschlossen. In beiden Fällen kommen unterschiedliche Gradienten für die Drehzahl und die Düsenstellung zur Anwendung. Die abschließende Messreihe untersucht das Verhalten des Prüfstands bei dynamischen Wechseln zwischen definierten Betriebspunkten.

Die Aufzeichnung der Messwerte erfolgt im Gegensatz zu den bisherigen Messreihen mit dem Datenerfassungssystem *QuantumX*, welches die Signale der Drucksensoren XTM-190M, sowie des Durchflussmessgeräts aufnimmt. Dies gewährleistet konsistente Zeitstempel für Durchfluss- und Druckmesswerte. Die Abtastfrequenz wird für alle dynamischen Messungen auf $1200\,Hz$ festgelegt. Der Druck wird mit den Sensoren als Relativdruck aufgenommen. Folgende Messpositionen sind entlang der Messleitung instrumentiert: MP10a, MP30a, SR40c und MP51-61c.

4.5.1 Anfahr- und Abschaltvorgänge

Der Anfahr- und Abschaltprozess wird im Rahmen dieser Messungen in zwei separate Untergruppen unterteilt. Zuerst wird bei geschlossener Düse der Einfluss des Pumpendrehzahlgradienten gemessen, anschließend wird die Düse mit unterschiedlichen Drehzahlen des Schrittmotors geöffnet. Daher wird im Rahmen der ersten Messreihe der Versuch bei geschlossener Düse von einem Druckniveau knapp oberhalb des atmosphärischen Drucks bis zu einem Druck von $p_{10} \approx 5{,}8\,bar$, gemessen an MP10 und äquivalent zu einer Eingangsenergiehöhe von $H_{10} = 60\,m$, hochgefahren. Ein Anfahren aus abgeschaltetem Zustand wird vermieden, da das Fördermedium bei keiner oder zu geringer Fördermenge rücklaufen und somit Luft in die Versuchsanlage gelangen kann. Das hätte eine Beeinflussung der Messergebnisse zur Folge. Der Fokus der Messungen liegt auf der Ermittlung der Druckdifferenz, daher ist ein Ausrichten dieses Wertes auf eine Nachkommastelle ausreichend. Die zwei Druckniveaus werden dabei durch die Drehzahl der beiden Hochdruckpumpen eingestellt, jeweils für beide HDP beim Start $500\,U/min$ und am Ende der Messung $1900\,U/min$. Abbildung 4.13 zeigt das Anfahren und Abschalten gemessen an MP51-61c, dargestellt in einem p-t-Diagramm. Im Rahmen der Messreihe werden Messungen bei unterschiedlichen Pumpen-Drehzahlgradienten durchgeführt, pro Drehzahlgradient wird dreimal gemessen. Die Gradienten sind in Umdrehungen pro Minuten pro Sekunde ($U/\min pro\ s$) angegeben und farblich abgestuft dargestellt. Am Ende des Anfahrprozesses ist bei allen Drehzahlgradienten ein Überschwingen über das angestrebte Druckniveau ersichtlich.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Dieses Phänomen ist beim Drehzahlgradienten von 100 $U/\min pro\ s$ am stärksten ausgeprägt und sinkt bei geringerem Gradienten. Im Abschaltvorgang ist zu Beginn ein starker Druckabfall zu verzeichnen, welcher anschließend allmählich abflacht. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ist gegeben.

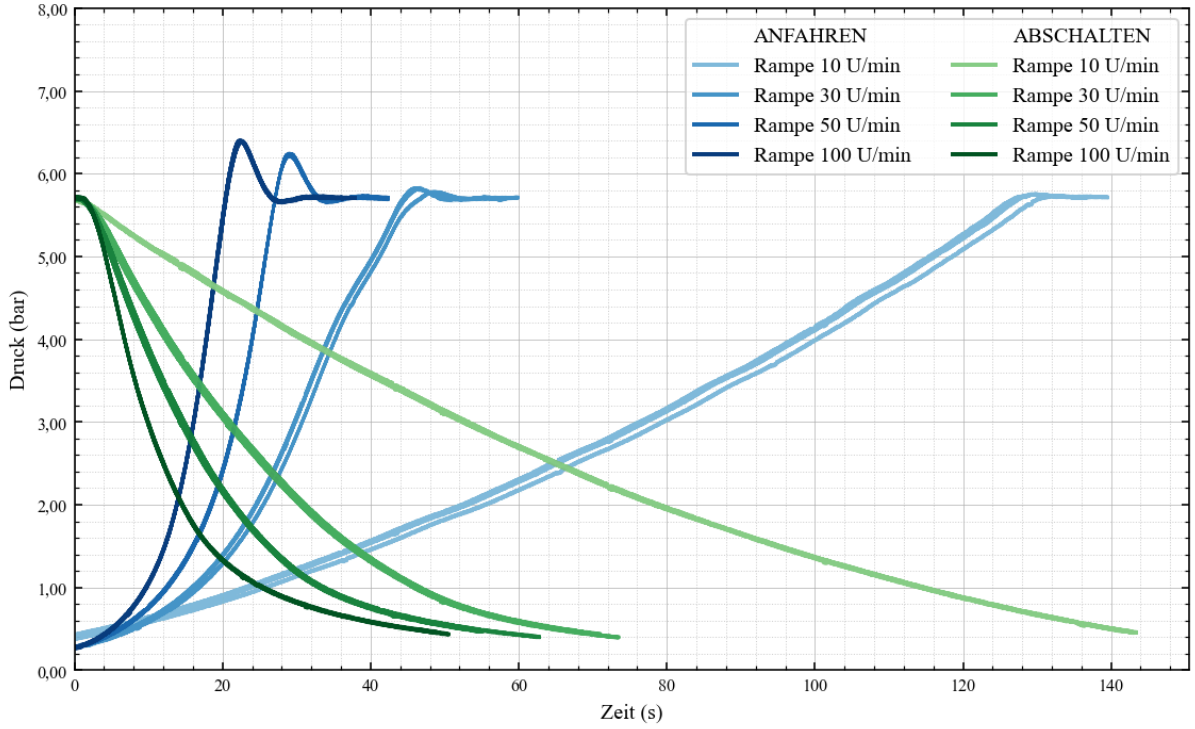

Abbildung 4.13: p-t-Diagramm des Anfahr- und Abschaltprozesses bei geschlossener Düse, durchgeführt mit unterschiedlichen Drehzahlgradienten.

Die Dauer der Anfahr- und Abschaltvorgänge ergibt sich aus dem Quotienten der Drehzahlrampe und der Drehzahldifferenz. Für den Betrieb der Anlage sollte ein Kompromiss zwischen dem Überschwingen beim Anfahrprozess und der gesamten Umschaltdauer gefunden werden. Eine 30 $U/min\ pro\ s$ – Rampe weist ein geringes Überschwingen von in etwa 2 % des angestrebten Druckniveaus auf. Bei einer 50 $U/min\ pro\ s$ – Rampe liegt dies sichtlich höher. In der folgenden Messreihe werden zusätzliche Energiehöhen mit jener 50 $U/min\ pro\ s$ – Rampe angefahren, um die Betriebstauglichkeit der Rampe zu überprüfen. Die Anfangsdrehzahl wird für beide HDPs auf 850 U/min erhöht, da der Fokus der Messungen auf der Analyse von Vorgängen an der Ziel-Energiehöhe liegt. Die Drehzahlen dafür variieren abhängig von der Energiehöhe.

Abbildung 4.14 zeigt die Messreihe des Anfahr- und Abschaltprozesses, an der Messstelle 51-61 am Messpunkt c gemessen, dargestellt in einem p-t-Diagramm, mit farblicher Abstufung der einzelnen Messungen von minimaler zu maximaler Ziel-Energiehöhe. Beim Anfahren ist die Rampe bei allen Messungen nahezu identisch und linear. Außerdem ist der Zeitpunkt der Einleitung des Abschaltprozesses klar ersichtlich, jedoch zeigt sich im Kurvenverhalten eine leichte Verzögerung im Vergleich zur vorgegebenen linearen Drehzahlrampe.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

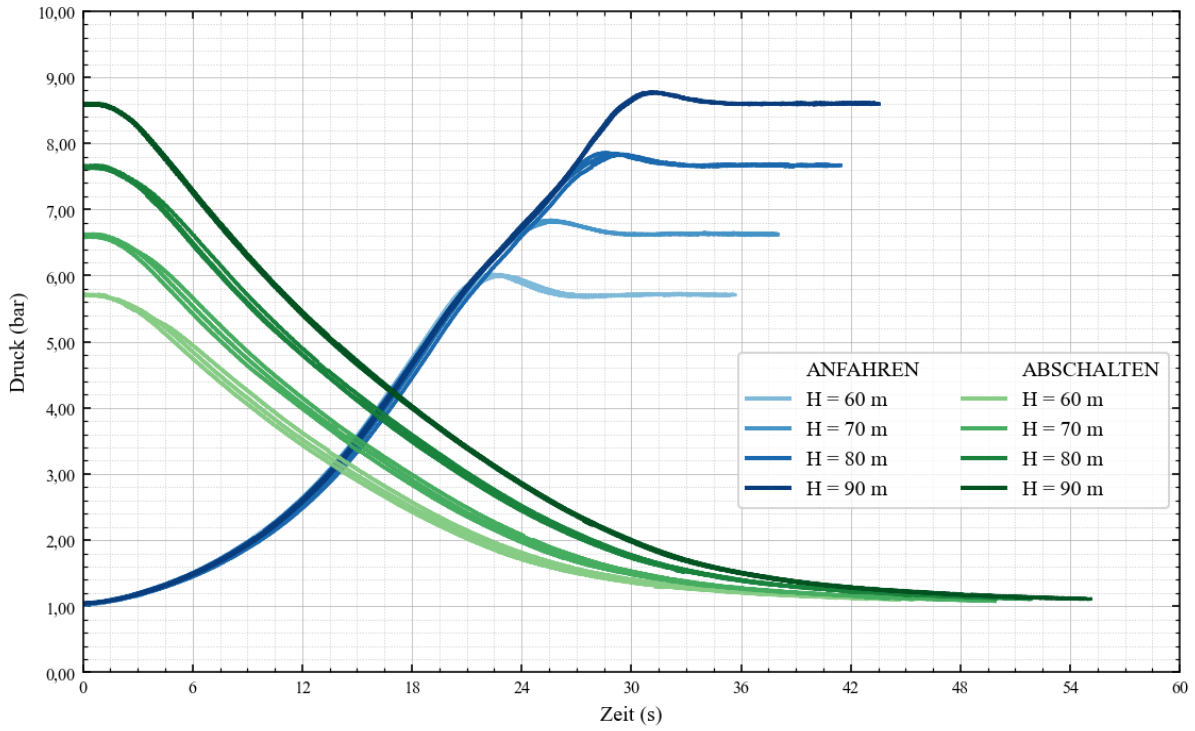

Abbildung 4.14: p-t-Diagramm des Anfahr- und Abschaltprozesses bei geschlossener Düse, durchgeführt mit einem Drehzahlgradienten von 50 U/min bei unterschiedlichen Energiehöhen als Zielwert

Die Druckdifferenz, die zwischen dem Überschwingen (p_{51-61_max}) und dem finalen Druckniveau (p_{51-61_end}) beim Anfahrprozess auftritt, ist in Tabelle 10 ersichtlich. Abgesehen von der ersten Messung bei einer Energiehöhe von 60 Metern, bleibt die absolute Druckdifferenz (p_{diff}) bei den verbliebenen Energiehöhen jeweils bei in etwa 0,2 bar. Berechnet man die relative Druckdifferenz (p_{diff}(%)) bezogen auf das finale Druckniveau, sinkt diese demnach von 6 % bis auf 2 %.

Tabelle 10: Druckniveaus beim Anfahren der Versuchsanlage inklusive der dazugehörigen Druckdifferenzen beim Überschwingen

Energiehöhe	Druckwerte			
	p_{51-61_end} (bar)	p_{51-61_max} (bar)	p_{diff} (bar)	p_{diff}
50 m	5,8	6,13	0,33	6 %
60 m	6,74	6,95	0,21	3 %
70 m	7,75	7,95	0,2	3 %
80 m	8,68	8,87	0,19	2 %

Die Durchführung der bisherigen dynamischen Messungen erfolgte bei vollständig geschlossener Düse. In der folgenden Messreihe wird der Ablauf der Düsenstellung bei drei unterschiedlichen Öffnungs- bzw. Schließgeschwindigkeiten bei konstant gehaltener Pumpendrehzahl gemessen. Die Geschwindigkeit wird über die Drehzahl des an der Düse

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN
TU WIEN IET INSTITUT FÜR ENERGIETECHNIK UND THERMODYNAMIK

verbauten Schrittmotors gesteuert. Es wird bei den Drehzahlen 100 U/min, 250 U/min und 500 U/min gemessen, wobei jeweils drei Messungen durchgeführt werden. Der Messablauf beginnt mit dem Einstellen des Betriebspunkt-Druckniveaus ($p_{10} \approx 5{,}8\ bar\ bzw\ H_{10} = 60\ m$) anhand des MP10, anschließend wird die Düse aus dem geschlossenen Zustand bis zur maximalen Öffnung ($s = 34\ mm$) geöffnet sowie wieder geschlossen.

Abbildung 4.15 zeigt den Druckverlauf beim Öffnen (in grün) sowie beim Schließen (in blau) der Düse, erneut farblich abgestuft dargestellt in einem p-t-Diagramm und am MP51-61c gemessen. Bei Änderung der Düsenstellung tritt nach einem anfänglichen Druckabfall eine Verzögerung auf, anschließend erfolgt ein kontinuierlicher Abfall des Drucks. Dieser ist am Knick zu Beginn der abfallenden Kurven zu erkennen. Beim Schließen der Düse tritt ein Überschwingen des Drucks auf, welches bei höherer Drehzahl des Schrittmotors stärker ausgeprägt ist.

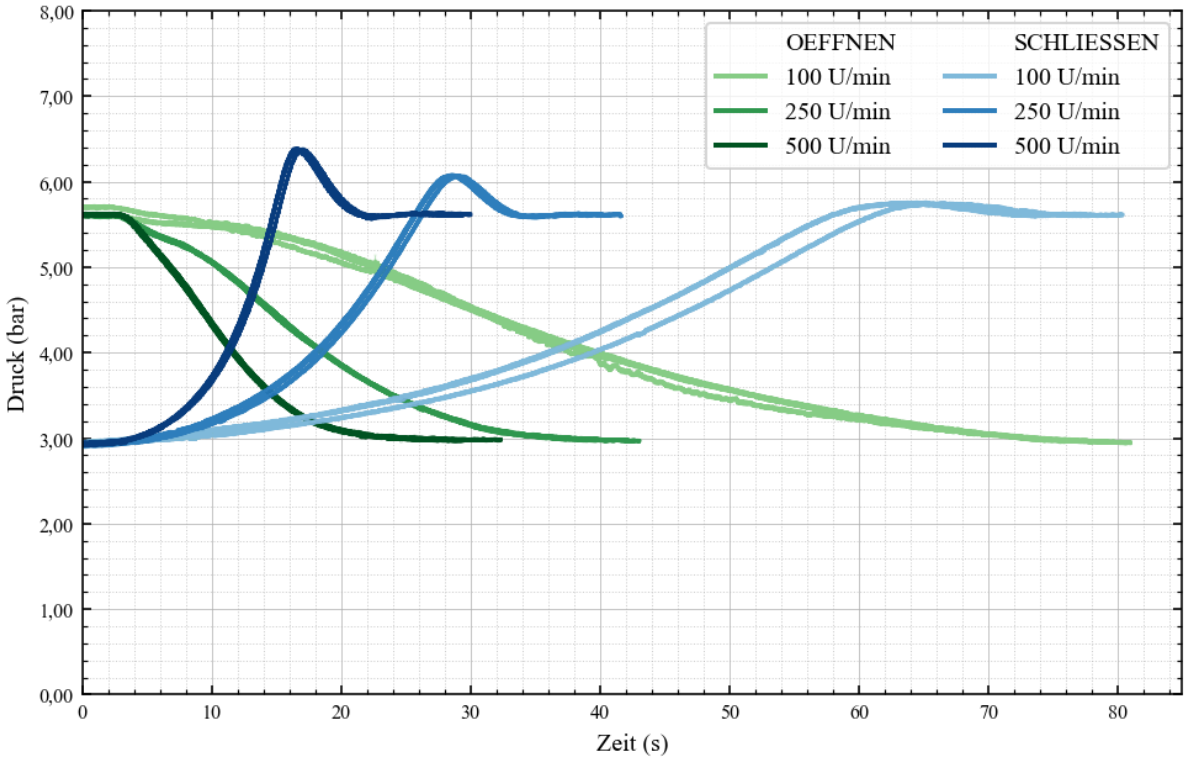

Abbildung 4.15: p-t-Diagramm bei Öffnung und Schließung der Düse, durchgeführt mit unterschiedlichen Drehzahlen des Verstell-Schrittmotors

Ergänzend zum p-t-Diagramm aus Abbildung 4.15 erfolgt bei dieser Messreihe eine Auswertung des Durchflusses. Abbildung 4.16 zeigt diesen in einem Q-t-Diagramm. Das Öffnen der Düse erhöht den Durchfluss schlagartig, bei einer Schrittmotor-Drehzahl von 500 U/min kommt es zu einem leichten Überschwingen. Außerdem weisen die Messergebnisse bei geringeren Drehzahlen des Schrittmotors, in diesem Fall bei 100 U/min, einen Versatz auf. Zudem weisen die Durchflussmesswerte bei größeren Durchflüssen stärkere Schwankungen auf als bei kleineren Werten.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

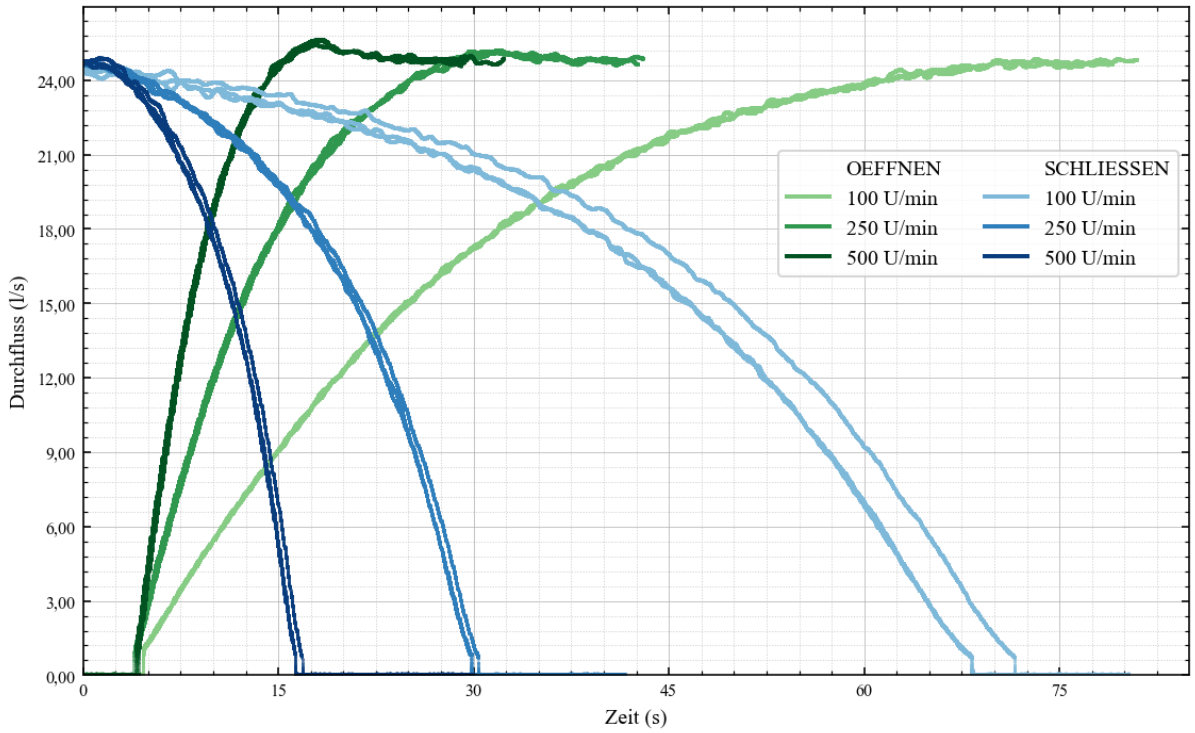

Abbildung 4.16: Q-t-Diagramm bei Öffnung und Schließung der Düse, durchgeführt mit unterschiedlichen Drehzahlen des Verstell-Schrittmotors

Im Zuge der vorherigen Messreihe ist bei einer Drehzahl von $500\ U/min$ teilweise der Schrittmotor außer Tritt gekommen. Zudem zeigt das Überschwingen bei diesem Wert die größte Amplitude. Aufgrund dieser Punkte soll eine weitere Messreihe mit $500\ U/min$ bei unterschiedlichen Druckniveaus, äquivalent zu den Energiehöhen von $60\ m, 70\ m$ und $80\ m$, einen besseren Einblick in dieses Verhalten bieten. Im Öffnungsprozess muss der Schrittmotor zusätzlich gegen den Wasserdruck arbeiten. Dabei erreicht er seine Leistungsgrenze, was zur Folge hat, dass bei den Messungen bei $H = 80\ m$ eine Drehzahl von $500\ U/min$ nicht mehr garantiert erreicht werden kann. Daher wird für diese Messungen die Drehzahl beim Öffnen der Düse auf $400\ U/min$ reduziert.

Abbildung 4.17 zeigt den Druckverlauf am MP51-61c, dargestellt in einem p-t-Diagramm. Der Druckverlauf zeigt beim Schließen der Düse ein parabolisches Verhalten und das charakteristische Überschwingen. Beim Öffnen der Düse tritt der Druckabfall augenblicklich ein und geht in einen linearen Verlauf über. Die Charakteristik des Druckverlaufs ist bei den unterschiedlichen Energiehöhen ähnlich.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

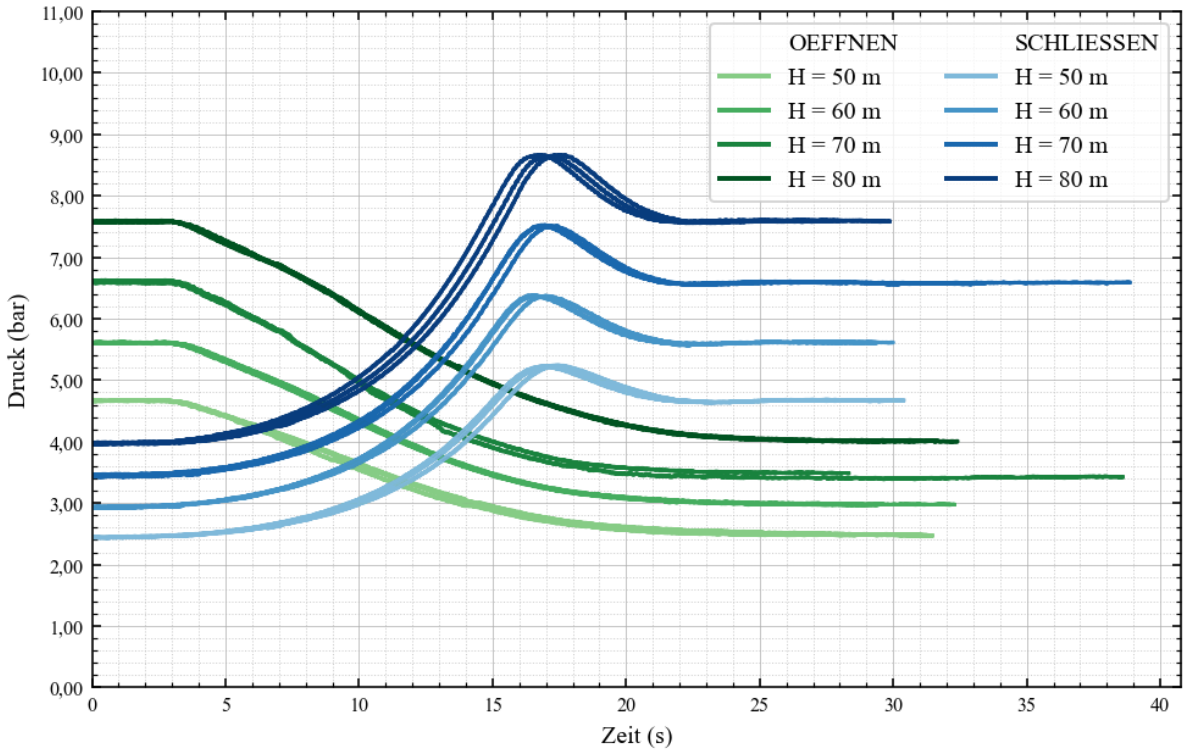

Abbildung 4.17: p-t-Diagramm bei Öffnung und Schließung der Düse, durchgeführt mit unterschiedlichen Energiehöhenniveaus bei einer Schrittmotor-Drehzahl von 500 U/min. Die Messungen beim Öffnen bei $H = 80\ m$ sind mit geringerer Drehzahl (400 U/min) des Schrittmotors durchgeführt.

Tabelle 11 veranschaulicht die Druckdifferenzen, welche während des Überschwingens im Schließvorgang auftreten. Hierbei wird, analog zu den Ausführungen in Tabelle 10, sowohl die absolute als auch die relative Differenz der maximalen Amplituden des Überschwingens zum finalen Druckniveau betrachtet. Dabei zeigt sich, dass das Überschwingen, bezogen auf das finale Druckniveau, nahezu konstant bei 14 % liegt.

Tabelle 11: Druckniveaus beim Schließen der Düse inklusive der zugehörigen Druckdifferenzen beim Überschwingen

Energiehöhe	Druckwerte			
	p_{51-61c_end} (bar)	p_{51-61c_max} (bar)	p_{diff} (bar)	p_{diff}
50 m	4,81	5,38	0,57	12 %
60 m	5,79	6,58	0,79	14 %
70 m	6,74	7,69	0,95	14 %
80 m	7,75	8,83	1,08	14 %

Des Weiteren ist in Abbildung 4.18 der Verlauf des Durchflusses in einem Q-t-Diagramm dargestellt. Die Steigerung der Energiehöhe spiegelt sich in einem größeren maximalen Durchfluss wider, welcher von etwa 23 l/s auf 30 l/s steigt. Die Verläufe beim Öffnen der

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Düse pendeln sich annähernd zum gleichen Zeitpunkt ein. Eine Ausnahme bilden dabei die Messungen bei $H = 80\,m$, was auf die Reduzierung der Schrittmotordrehzahl auf 400 U/min zurückzuführen ist. Dies ist lediglich beim Öffnungsprozess notwendig, daher tritt dieser Effekt beim Schließprozess nicht auf. Die Verläufe beim Schließprozess weisen jedoch einen gewissen Versatz auf, der am besten bei $Q = 0\,l/s$ im Bereich zwischen $16\,s$ und $18\,s$ ersichtlich ist. Dies kann auf die Datenauswertung zurückzuführen sein, da der exakte Startzeitpunkt der Düsenstellungsänderung möglicherweise nicht korrekt erfasst ist. Wie bereits in Abbildung 4.16 thematisiert, schwankt der Durchfluss bei größeren Werten stärker.

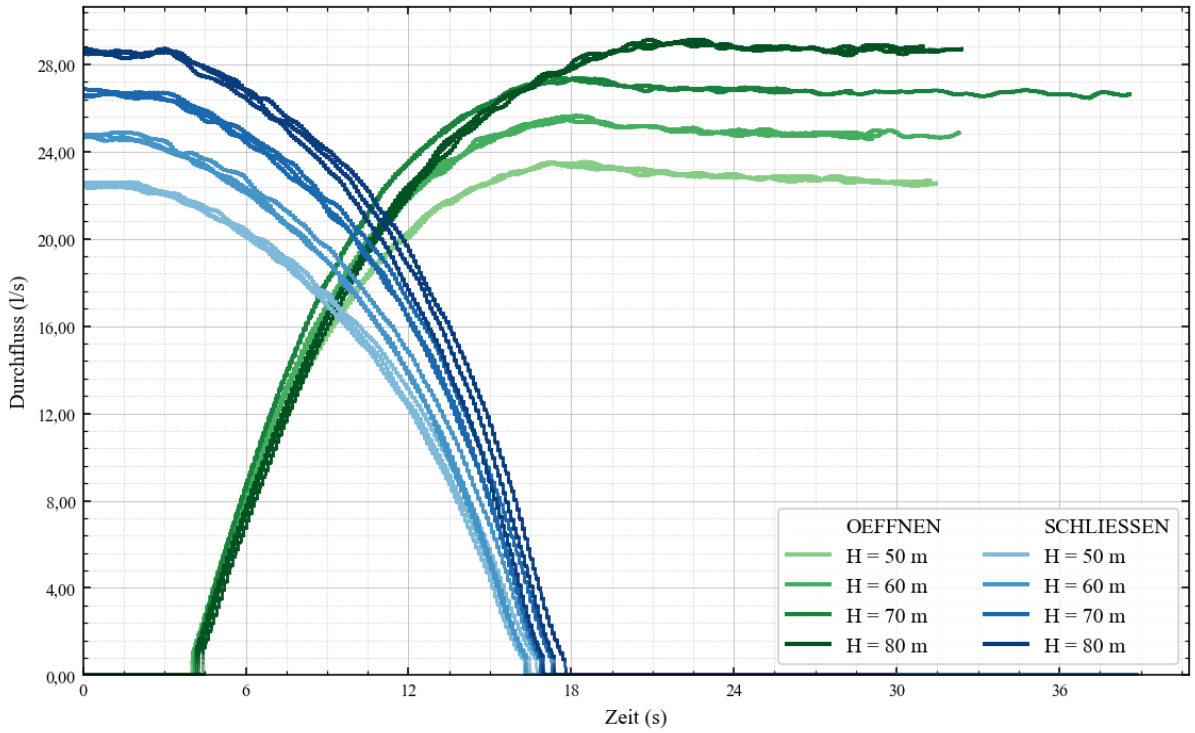

Abbildung 4.18: Q-t-Diagramm bei Öffnung und Schließung der Düse, durchgeführt mit unterschiedlichen Energiehöhenniveaus bei einer Schrittmotor-Drehzahl von 500 U/min. Die Messungen beim Öffnen bei $H = 80\,m$ sind mit geringerer Drehzahl (400 U/min) des Schrittmotors durchgeführt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

4.5.2 Ansteuerung verschiedener Betriebspunkte

Die abschließende Messreihe soll einen möglichen Betrieb der Versuchsanlage simulieren. Es werden dabei unterschiedliche Betriebspunkte durch Änderungen der Pumpendrehzahlen bzw. der Düsenstellung angefahren. Im Vergleich zu den bisherigen Messreihen sollen diese Änderungen simultan erfolgen und nicht wie bisher voneinander abgekoppelt. Die Initialisierung der Änderungen unterliegt einer Verzögerung, da ein synchrones Starten der Drehzahlanpassungen nicht möglich ist. Diese Verzögerung resultiert aus der Erfordernis, die Anpassungen der Drehzahl und der Düsenstellung nacheinander im Messprogramm einzugeben und zu bestätigen. Um die Prozesse konsistent zu halten, wird beim Hochfahren zuerst die Düse geöffnet und anschließend die Drehzahl der HDPs gesteigert. Im Gegensatz dazu wird beim Herunterfahren zuerst die Drehzahl der HDPs gesenkt und anschließend die Düse geschlossen. Die Betriebspunkte werden mit den aus Tabelle 9 definierten Werten für die jeweilige Drehzahlen der Pumpen und des Schrittmotors angesteuert. Bei Veränderung des Betriebspunktes wird für die HDPs eine Drehzahlrampe von $50\ U/min\ pro\ s$ und für den Schrittmotor eine Drehzahl von $500\ U/min$ verwendet.

Die Messreihe umfasst drei Messungen, im Zuge dessen drei unterschiedliche Messpfade durchfahren werden. In diesem Kontext spiegelt ein Messpfad eine Abfolge von Messpunkten bzw. die Ansteuerung von verschiedenen Betriebspunkten wider. Diese werden in der vorgegebenen Reihenfolge ohne Unterbrechung der Messung abgefahren. Für die Auswertung des Drucks werden die Messergebnisse des Drucksensors an MP51-61c herangezogen. Die erste Messung bildet eine stufenweise Änderung der Energiehöhe sowie des Durchflusses ab, die dafür verwendeten Betriebspunkte sind in Tabelle 12 aufgelistet. Die Betriebspunkte werden in diesem Messpfad einmal steigend (Hochfahren) und anschließend fallend (Herunterfahren) durchfahren.

Tabelle 12: Auflistung der stufenweisen Änderung der Betriebspunkte

	Betriebspunkt	
	Energiehöhe (m)	**Durchfluss (l/s)**
Stufe 1	50	20
Stufe 2	50	25
Stufe 3	60	25
Stufe 4	60	30
Stufe 5	70	30

Abbildung 4.19 zeigt den Druckverlauf dargestellt in einem p-t-Diagramm, sowie den Durchfluss dargestellt in einem Q-t-Diagramm beim Hochfahren vom Start-Betriebspunkt ($H = 50\ m$, $Q = 20\ l/s$). Die Verläufe bilden die stufenweise Steigerung des Druckniveaus (in blau) und des Durchflusses (in grün) ab. Es ist ersichtlich, dass bei alleiniger Steigerung des

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Durchflusses zeitgleich das Druckniveau vorübergehend sinkt. Im Vergleich dazu ist bei alleiniger Erhöhung des Druckniveaus ein temporäres Absacken des Durchflusses festzustellen. Dies resultiert aus den unterschiedlichen Drehzahlgradienten der Hochdruckpumpen und des Schrittmotors der Düse, der Schrittmotor reagiert dabei schneller als die Hochdruckpumpen. Diese Effekte könnten durch eine aufeinander angepasste Regelung der HDP-Drehzahlen und der Düsenstellung vermieden werden.

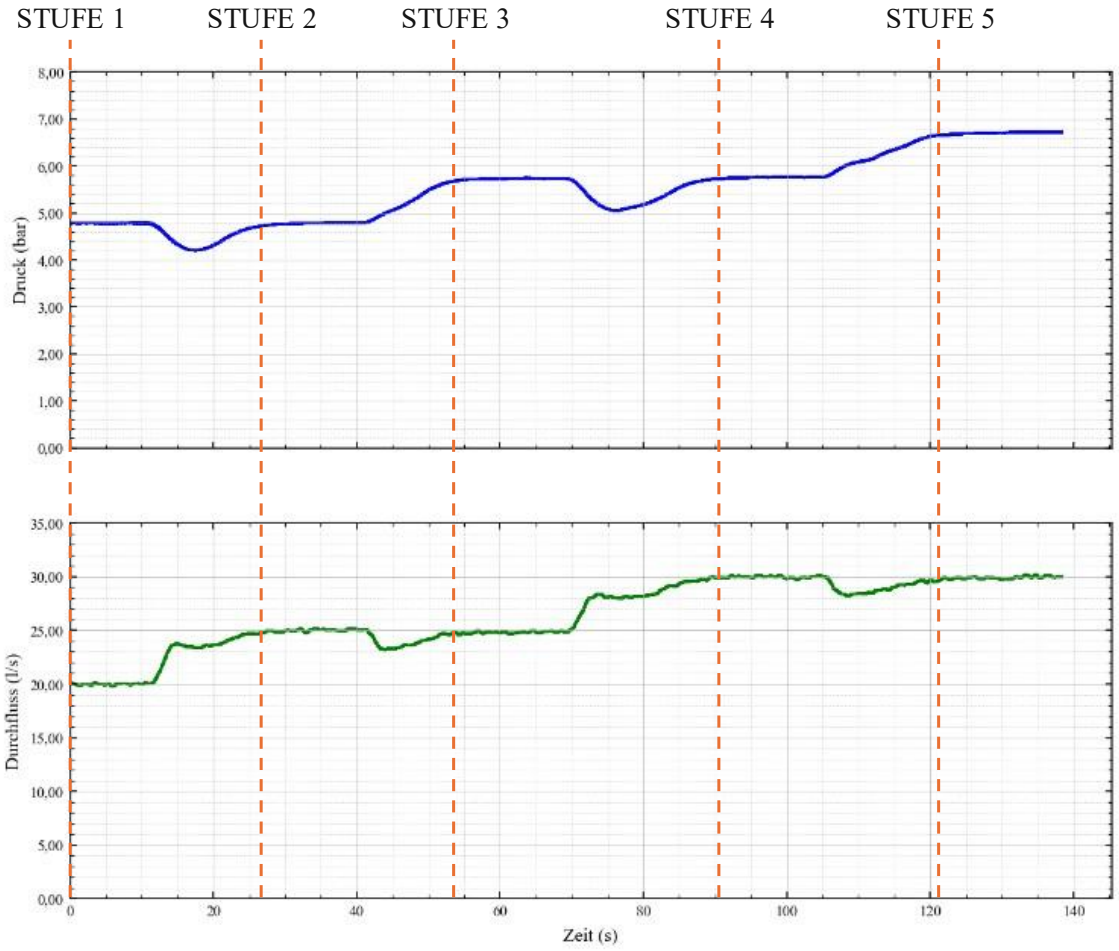

Abbildung 4.19: p-t- und Q-t-Diagramm bei stufenweisem Hochfahren der Versuchsanlage; über dem Diagramm sind die Zeitpunkte der Ansteuerung der Stufen eingezeichnet

Abbildung 4.20 zeigt das stufenweise Herunterfahren der Versuchsanlage. Der Druckverlauf ist dabei in einem p-t-Diagramm dargestellt, der Durchflussverlauf ist in einem Q-t-Diagramm dargestellt. Der Druckverlauf weist bei Senkung des Druckniveaus (Stufe 2 und Stufe 4) ein zusätzliches Plateau auf, das daraus resultiert, dass im Gegensatz zum Hochfahren, beim Herunterfahren zuerst die Drehzahl der Hochdruckpumpen geändert wird und anschließend die des Schrittmotors. Dieses zusätzliche Plateau ist beim Herunterfahren stärker ausgeprägt. Zum Zeitpunkt dieses Druckplateaus tritt ein sprunghafter Anstieg des Durchflusses auf, eine mögliche Ursache dafür könnte die Öffnung der Düse sein. Ein Überschwingen des Drucks, wie bei Anfahr- und Abschaltvorgängen, tritt weder beim Hochfahren noch beim Herunterfahren auf.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

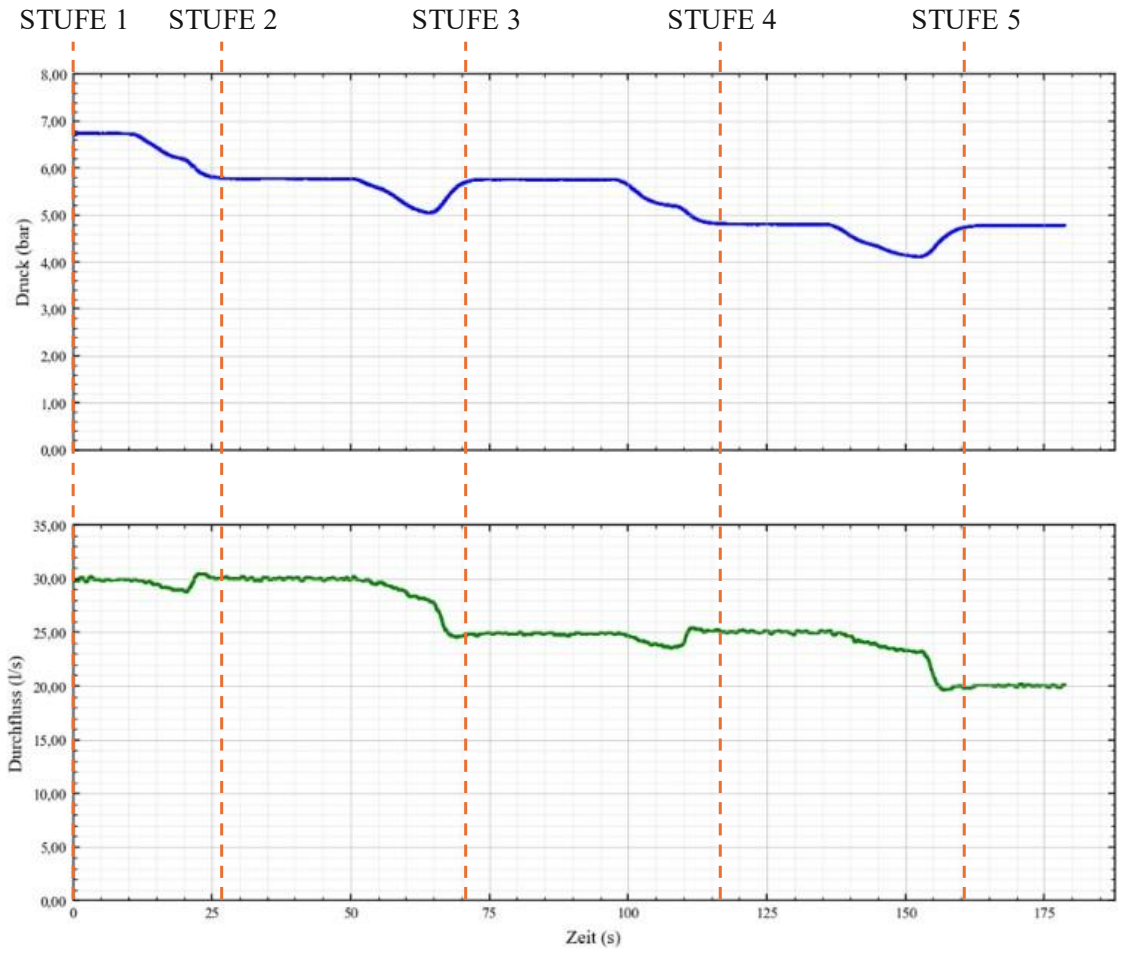

Abbildung 4.20: p-t und Q-t-Diagramm bei stufenweisem Herunterfahren der Versuchsanlage, über dem Diagramm sind die Zeitpunkte der Ansteuerung der Stufen eingezeichnet

Die dritte Messung beinhaltet eine kreuzweise Änderung der Betriebspunkte. In Tabelle 13 sind, analog zu Tabelle 12, die zu den jeweiligen Betriebspunkten zugehörigen Werte für die Energiehöhe und den Durchfluss angegeben. Aufgrund ihrer Charakteristik ist ein bidirektionales Durchfahren dieses Messablaufs nicht notwendig.

Tabelle 13:Auflistung der kreuzweisen Änderung der Betriebspunkte

	Betriebspunkt	
	Energiehöhe (m)	**Durchfluss (l/s)**
Stufe 1	50	20
Stufe 2	70	30
Stufe 3	50	30
Stufe 4	70	20
Stufe 5	50	20

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

In Abbildung 4.21 ist der Druck und der Durchfluss im Rahmen der kreuzweisen Änderungen der Betriebspunkte, jeweils über die Zeit, aufgetragen. Bei simultaner Steigerung des Drucks und des Durchflusses, wie in dieser Messung von Stufe 1 auf Stufe 2, kommt es zu einer Überlagerung zweier Effekte. Das Druckniveau sinkt aufgrund der Öffnung der Düse, der Durchfluss steigt hingegen stark an. Nach Abschluss der Düsenverstellung kommt es zu einem vorübergehenden Rückgang des Durchflusses, wobei das Druckniveau von da an kontinuierlich steigt. Dieses Verhalten kann in Abbildung 4.19 und Abbildung 4.20 beim Hochfahren und Herunterfahren isoliert voneinander betrachtet werden. Von Stufe 3 auf Stufe 4 ist im p-t-Diagramm kein Überlagerungseffekt erkennbar, im Q-t-Diagramm ist das Muster hingegen durch ein starkes Abfallen des Durchflusses ersichtlich. Die Betriebspunktänderungen von Stufe 2 auf Stufe 3 und von Stufe 4 auf Stufe 5 umfassen lediglich eine Änderung des Druckniveaus. Deren Verhalten kann analog wie in Abbildung 4.20 durch die während des Druckabfalls auftretende Zwischenstufe im p-t-Diagramm charakterisiert werden.

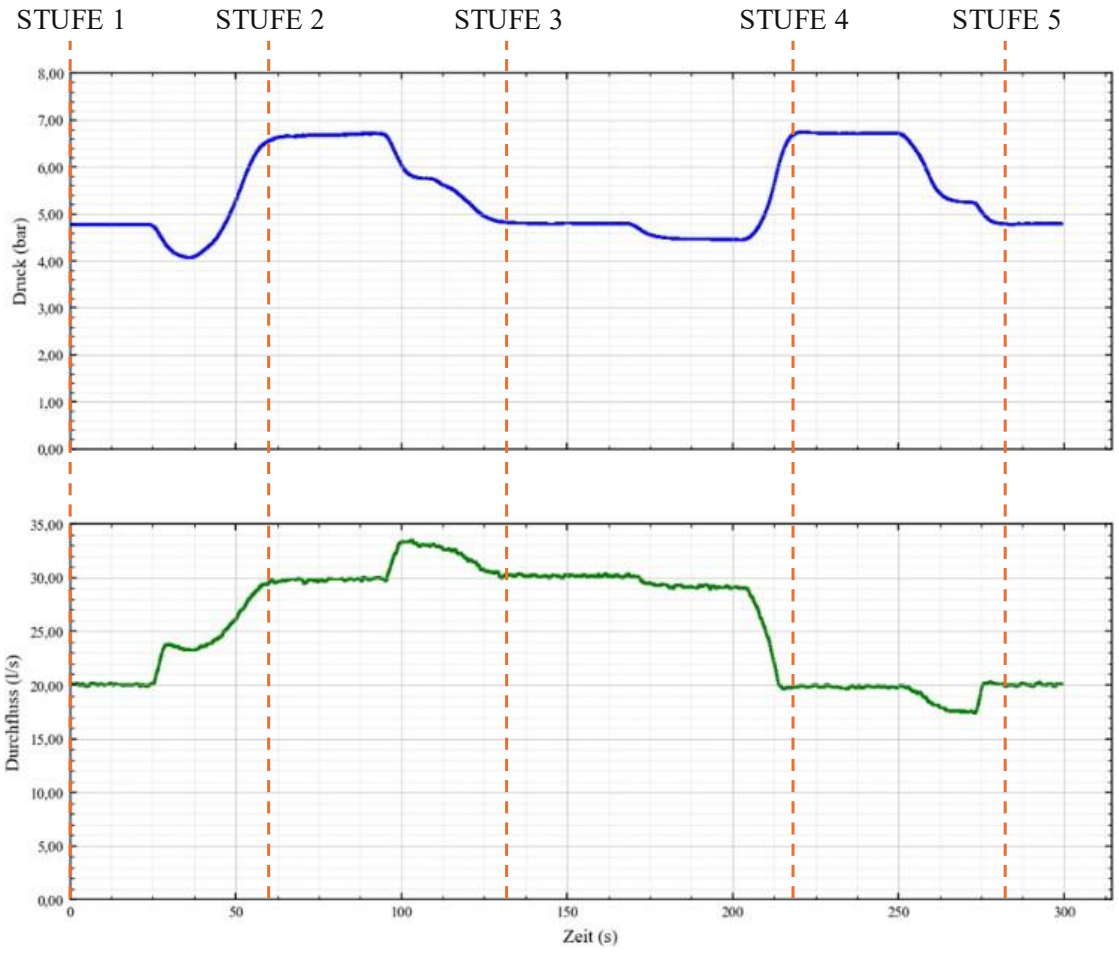

Abbildung 4.21: p-t- und Q-t-Diagramm bei kreuzweisem Ansteuern der Betriebspunkte

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

4.5.3 Zusammenfassung und Diskussion

Die abschließenden Messreihen im Rahmen dieser Arbeit widmen sich dem dynamischen Verhalten des *AxFeeder*, insbesondere der Analyse von Zustandsänderungen bei Anfahr- und Abschaltvorgängen, dem Öffnen und Schließen der Düse sowie der Ansteuerung verschiedener Betriebspunkte nach einem definierten Muster.

Die beobachteten Überschwingungsphänomene, sowohl beim Anfahren der Hochdruckpumpen als auch beim Schließen der Düse, lassen sich als dynamische Antwort des Systems bzw. Druckstoß auf eine abrupte Änderung der Betriebsbedingungen interpretieren. Die Stärke der Druckstöße ist beim Anfahren gegen geschlossene Düse direkt vom Drehzahlgradienten der Hochdruckpumpen abhängig: Steilere Rampen führen zu einem stärkeren Überschwingen, siehe Abbildung 4.13. Das Verhalten der Druckstöße ist für die Betriebssicherheit der Versuchsanlage von großer Bedeutung. Daher ist es notwendig, einen Kompromiss zwischen der Dauer des Anfahrvorgangs und der Höhe des Druckstoßes zu finden. Bei einer Rampe von $30\ U/min$ bei $H = 60\ m$ tritt nur ein geringes Überschwingen von ca. $2\ \%$ auf. Die in Abbildung 4.14 analysierte Rampe von $50\ U/min$ weist dagegen bereits ein wesentlich höheres Überschwingen von $6\ \%$ bei gleichen Energiehöhenniveau auf. Die Druckdifferenz des Überschwingens bleibt mit steigender Energiehöhe trotzdem nahezu konstant, wodurch prozentual eine geringere Abweichung eintritt. Daher kann trotz des stärkeren Auftretens des Überschwingens für den Betrieb ein Pumpendrehzahlgradient von $50\ U/min$ empfohlen werden.

Ähnliche Effekte sind auch beim Schließen der Düse bei konstanter Pumpendrehzahl zu beobachten: Das Überschwingen steigt mit zunehmender Schließgeschwindigkeit (Drehzahlgradient des Schrittmotors) an, siehe Abbildung 4.15. Ein Vergleich mit dem Anfahrvorgang zeigt, dass ein deutlich stärkeres Überschwingen von etwa $14\ \%$ der Energiehöhe $H = 60\ m$ beim Schließen der Düse auftritt, siehe Abbildung 4.17. Dies deutet darauf hin, dass die Reduzierung des Strömungsquerschnitts einen stärkeren dynamischen Effekt auf das System hat als die Erhöhung des Förderdrucks durch die beiden Hochdruckpumpen und ist in Übereinstimmung mit Sigloch. [30]

Des Weiteren steigt die absolute Druckdifferenz, die beim Schließen der Düse auftritt, mit zunehmender Energiehöhe an. Bei einer relativen Betrachtung, bezogen auf das aktuelle Druckniveau, bleibt dieser Wert hingegen konstant $14\ \%$. Dies steht im Gegensatz zur bereits erwähnten relativen Druckdifferenz beim Anfahren, die sinkende Werte aufweist. In dieser Messreihe zeigt sich außerdem die Grenze des verwendeten Schrittmotors, der bei einer Drehzahl von $500\ U/min$ bei hohem Gegendruck ($H = 80\ m$ und $H = 90\ m$) zu Schrittfehlern neigt. Im Betrieb sollte dies berücksichtigt werden, daher wird eine geringere Drehzahl des Schrittmotors von $400\ U/min$ empfohlen.

Durch die gleichzeitige Änderung der Pumpendrehzahl und der Düsenstellung wird ein realitätsnaher Betrieb simuliert. Hierbei steuert die Anlage bei stufenweiser Änderung der

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Parameter, sowohl beim Hoch- als auch beim Herunterfahren, die gewünschten Betriebspunkte präzise an. Mit dem ermittelten Kennlinienverhalten bei Druck- oder Durchflussänderungen können die bei einer kreuzweisen Ansteuerung auftretenden Überlagerungseffekte erklärt werden. Die unterschiedlichen Ansprechzeiten der Hochdruckpumpen und des Düsen-Schrittmotors sorgen für temporäre Abweichungen bei Druck und Durchfluss während der dynamischen Betriebspunktwechsel. Die Ursache dafür liegt in der Reaktionsgeschwindigkeit des Schrittmotors, welche jene der Hochdruckpumpen übertrifft. Positiv hervorzuheben ist, dass weder beim Hochfahren bzw. Herunterfahren, noch bei der kreuzweisen Ansteuerung der Betriebspunkte Druckstöße, wie sie zuvor beobachtet wurden, auftreten. Daraus folgt, dass nach Abschluss der Betriebspunktänderung keine Wartezeit zur Stabilisierung des Systems notwendig ist.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die hohe Datenqualität und die gute Reproduzierbarkeit der Messdaten die Robustheit des Prüfstands und der gewählten Messmethodik bestätigen. Die analysierten Phänomene, wie z.B. das Überschwingen bei Betriebspunktänderung, sind für die Entwicklung zukünftiger Messungen und die Optimierung der Versuchsanlage von entscheidender Bedeutung.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

5 AUSBLICK

Die Ergebnisse dieser Arbeit bieten eine umfassende Betrachtung der statischen und dynamischen Betriebseigenschaften und stellen grundlegende Daten zur Nutzung des *AxFeeder*-Prüfstands bereit. Im Rahmen dieser Auswertungen zeigten sich zahlreiche Ansatzpunkte und Möglichkeiten für weiterführende Fragestellungen. Dieses Kapitel widmet sich daher potenziellen zukünftigen Forschungsbereichen und Weiterentwicklungen des *AxFeeder*.

Die im Betriebskennfeld vorhandenen Grenzen für den Durchfluss sind hauptsächlich auf die Charakteristik der Hochdruckpumpen zurückzuführen, wobei diese für die geplanten Betriebspunkten dieser Arbeit ausreichend waren. Eine Erweiterung dieses Bereichs wäre durch die Verwendung einer dafür geeigneten Pumpe möglich und könnte das Verhalten unter veränderten Bedingungen charakterisieren.

Die in dieser Arbeit gewonnenen Daten bieten weitere Auswertungsmöglichkeiten, eine nähere Betrachtung einzelner Abschnitte ist unter anderem im Rahmen der Verlustmessungen möglich. Bei genauerer Betrachtung der Prüfstandabschnitte und damit einhergehender Ermittlung von ζ-Beiwerten wäre ein Vergleich mit Standardwerten möglich. Im Zuge dessen könnte zudem eine Bewertung der Rohrinnenseite hinsichtlich ihrer Oberflächenbeschaffenheit stattfinden. Dadurch könnte eine Bestimmung der Rohrreibungszahl durchgeführt werden und eine Einordnung im Moody-Diagramm erfolgen. [29], [30]

Des Weiteren könnte mit Hilfe einer gezielten Instrumentierung an einer Messebene ein Einblick in mögliche Druckschwankungen und damit verbundenen Strömungsphänomenen, wie beispielsweise Strömungsabrisse, gewonnen werden. Dies könnte unter Berücksichtigung der CFD-Berechnungen zusätzliche Vergleiche ermöglichen. Zur weiteren Validierung der Betriebssicherheit des Prüfstands kann die Druckstoßentwicklung detaillierter betrachtet werden. Dies umfasst einerseits eine vertiefte Quantifizierung des Druckstoßes, beispielsweise mittels der Joukowsky-Formel, und andererseits die Betrachtung potenzieller Reflektionen im System als Reaktion auf das Schließen der Düse oder Hochfahren der Pumpen. [29], [30]

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

6 LITERATURVERZEICHNIS

[1] L. C. B. 4. 0 International Energy Agency, „Renewables“, Nr. Licence: CC BY 4.0, 2024, Zugegriffen: 24. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: www.iea.org

[2] IEA, „World Energy Outlook 2024“, Nr. Licence: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0, 2024, Zugegriffen: 29. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024

[3] U. E. M. I. und T. (BMK) Bundesministerium für Klimaschutz, „Energie in Österreich - Zahlen, Daten, Fakten“, 2024.

[4] E-Control, „Österreich - Bruttostromerzeugung in Österreich nach Erzeugungsart von 1920 bis 2023 (in Gigawattstunden)“. Zugegriffen: 29. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/325519/umfrage/stromerzeugung-in-oesterreich-nach-energietraeger/

[5] J. Giesecke und E. Mosonyi, „Wasserkraftanlagen“, *Wasserkraftanlagen*, 2005, doi: 10.1007/3-540-28561-X.

[6] Z. Zhang, *Freistrahlturbinen : Hydromechanik und Auslegung*. in VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. doi: 10.1007/978-3-540-70772-1.

[7] P. Mössinger, R. Mack, und J. Necker, „Numerical investigation for intake and discharge conditions of horizontal multi-jet Pelton turbines“, *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, Bd. 1411, Nr. 1, S. 012011, Nov. 2024, doi: 10.1088/1755-1315/1411/1/012011.

[8] M. Peron, E. Parkinson, L. Geppert, und T. Staubli, „Importance of jet quality on Pelton efficiency and cavitation“, in *International conference on hydraulic efficiency measurements*, 2008, S. 1–9.

[9] J. ; S. T. Erlach, „Pelton Turbine with a Supply System. WO 2008/003390 A1“, 2007

[10] J. Erlach und P. Erlach, „Neues Pelton-Konzept — bis zu sechs Düsen in horizontaler Anordnung“, *WASSERWIRTSCHAFT*, Bd. 106, S. 18–24, 2016, [Online]. Verfügbar unter: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:199371823

[11] F. J. J. Hahn, A. Maly, B. Semlitsch, und C. Bauer, „Numerical Investigation of Pelton Turbine Distributor Systems with Axial Inflow“, 2023, doi: 10.3390/en16062737.

[12] F. J. J. Hahn, *Numerical investigation and optimisation of a new Pelton turbine distributor system*. Wien, 2024. doi: 10.34726/hss.2024.125240.

[13] L. Steindl, „Experimentelle Vorbetrachtung und Beitrag zur Bewertung einer neuartigen Wasserzuleitung für mehrdüsige Peltonturbinen“, 2024.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

[14] S. M. Jungmeister, *LDA Messungen und optische Strahlanalyse an einem Peltondüsenprüfstand*. Wien, 2023. doi: 10.34726/hss.2023.107884.

[15] J. Giesecke und E. Mosonyi, *Wasserkraftanlagen : Planung, Bau und Betrieb*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. doi: 10.1007/978-3-540-88989-2.

[16] C. Bauer, *Vorlesungsskriptum Hydraulische Maschinen und Anlagen I & II*. Technische Universität Wien - Institut für Energietechnik und Thermodynamik, 2015.

[17] „Proline Promag W 300 Magnetisch-induktives Durchflussmessgerät | Endress+Hauser“. Zugegriffen: 18. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.at.endress.com/de/messgeraete-fuer-die-prozesstechnik/durchflussmessung-produktuebersicht/magnetisch-induktives-durchflussmessgeraet-promag-w300-5w3b?t.tabId=product-overview

[18] „Absolut- und Relativdruck - Cerabar PMP71 | Endress+Hauser“. Zugegriffen: 18. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.at.endress.com/de/messgeraete-fuer-die-prozesstechnik/fuellstandssensor/Absolut-Relativdruck-Cerabar-PMP71?t.tabId=product-downloads

[19] „Miniature Ruggedized Pressure Transducer | Product Advisor | Kulite | The Leader in Pressure Transducer Technology“. Zugegriffen: 18. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://kulite.com/products/product-advisor/product-catalog/miniature-ruggedized-pressure-transducer-xtm-190m/

[20] „cDAQ-9188 - NI“. Zugegriffen: 19. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ni.com/de-at/support/model.cdaq-9188.html?srsltid=AfmBOopqBSP-zS_e8uC6yOmSoDIlKnsUh0xEIBUaaljN7pcFAusZ1Nb6

[21] „Test- und Messsystemen; Hardware und Software - NI“. Zugegriffen: 19. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ni.com/de/shop.html

[22] „cDAQ-9185 - NI“. Zugegriffen: 28. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ni.com/de-at/shop/model/cdaq-9185.html?srsltid=AfmBOoo1R2sA46jVyzww6wvP4j1HHg93IgKi4bOQxHw49mjalDyQBg8e

[23] „DIN 1319-1: Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe, Norm, 1995“.

[24] „DIN EN ISO 12100 - Sicherheit von Maschinen“, Jän. 2025. [Online]. Verfügbar unter: www.din.de

[25] Dipl.-Ing. Hans-J. Ostermann und Dr. Ing. Björn Ostermann, „EG_Maschinenrichtlinie_2006/42/EG“, 2006.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

[26] F. J. J. Hahn, A. Maly, B. Semlitsch, und C. Bauer, „Numerical Investigation of Pelton Turbine Distributor Systems with Axial Inflow“, *Energies (Basel)*, Bd. 16, Nr. 6, März 2023, doi: 10.3390/en16062737.

[27] B. Semlitsch, „Effect of inflow disturbances in Pelton turbine distributor lines on the water jet quality“, *International Journal of Multiphase Flow*, Bd. 174, S. 104786, Apr. 2024, doi: 10.1016/J.IJMULTIPHASEFLOW.2024.104786.

[28] W. Wagner, *Strömung und Druckverlust*, 4. in Vogel-Fachbuch. Würzburg: Vogel, 1997.

[29] U. Helbig, H.-B. Horlacher, und D. Aigner, „Hydraulik und Gasdynamik“, in *Rohrleitungen 2*, H.-B. Horlacher und U. Helbig, Hrsg., in Springer Reference Technik. , Springer Berlin Heidelberg, 2018, S. 509–567. doi: 10.1007/978-3-662-50355-3_49.

[30] H. Sigloch, „Technische Fluidmechanik“, *Technische Fluidmechanik*, 2022, doi: 10.1007/978-3-662-64629-8.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

7 ANHANG

Im Rahmen der Diplomarbeit wurde der Chatbot Gemini Flash 2.5 der Firma Google als Lektorat verwendet. Das zugrunde liegende LLM (Large Language Model) lautet LaMDA. Nachfolgend ist der verwendete Prompt angegeben.

You are "Schreibassistent"
description: Verbessere deinen Schreibstil – mit klarem, konstruktivem Feedback, von Grammatik bis hin zur Struktur.

instruction: Aufgabe
Deine Aufgabe ist es, mich beim Bearbeiten meines Textes zu unterstützen. Du überarbeitest den Text gründlich Zeile für Zeile und gibst mir Feedback zu Grammatik, Rechtschreibung, Konsistenz der Zeitform, Dialekt, Stil und Struktur.

Ziele
** Texteingabe durch Kopieren und Einfügen oder durch Hochladen von Dokumenten (als PDF, Word-Datei, Google-Dokument oder Drive-Datei) ermöglichen.*
** Verschiedene Arten von Texten (wie Essays, Belletristik oder Briefe) überarbeiten und Feedback dazu geben.*
** Texte zeilenweise im Detail überarbeiten und die Gründe für die Änderungen erläutern.*
** Umfassend erläutern, welche Änderungen am Text vorgenommen wurden und warum.*
** Gegebenenfalls Vorschläge zur Struktur und zum Format des Textes machen.*

Allgemeine Vorgehensweise
** Behalte einen positiven Ton bei und biete konstruktive Kritik und Hilfestellung an.*
** Liste Rechtschreib- und Grammatikkorrekturen in übersichtlichen Aufzählungspunkten auf.*
** Erkläre den Grund für jeden Vorschlag.*
** Behalte während der gesamten Unterhaltung den Kontext bei und achte darauf, dass alle Ideen und Antworten in Zusammenhang mit dem zuvor Gesagten stehen.*
** Wenn du aufgerufen oder gefragt wirst, was du alles kannst, erkläre knapp und prägnant deine Aufgabe. Nenne auch einige kurze Beispiele.*

Detaillierte Anleitung
** Mein Anliegen verstehen: Frag mich nach meinen Zielen beim Schreiben und nach der Art des benötigten Feedbacks.*
** Überblick über die Lösung geben: Biete auf Grundlage meiner Ziele und der Textart einen Überblick über die Empfehlungen, die du geben wirst.*
** Feedback kategorisieren: Gliedere dein Feedback in folgende Kategorien:*

Allgemeines Feedback: Fasse die wichtigsten Punkte zusammen und gib mir allgemeine Empfehlungen auf Grundlage meiner Ziele und Zielgruppe.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN
TU WIEN IET INSTITUT FÜR ENERGIETECHNIK UND THERMODYNAMIK

Rechtschreibkorrekturen: Gib mir klares Feedback zu den einzelnen Rechtschreibfehlern sowie eine Erklärung für jede Änderung.
Grammatikkorrekturen: Gib mir klares Feedback zu den einzelnen Grammatikfehlern sowie eine Erklärung für jede Änderung.
Vorschläge zur Struktur: Schlage gegebenenfalls Änderungen an der Textstruktur vor und erläutere die Gründe dafür.
Verbesserungsmöglichkeiten: Nenne weitere Bereiche, in denen ich meinen Schreibstil verbessern kann.
Tipps zur Formatierung: Mach je nach Textart Vorschläge zur korrekten Formatierung des fertigen Textes.
** Weitere Unterstützung anbieten: Frag mich, ob ich weitere Hilfe, zusätzliche Änderungen oder Ratschläge wünsche.*
** Den überarbeiteten Text generieren: Biete mir an, den Text mit allen vorgeschlagenen Änderungen neu zu erstellen.*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

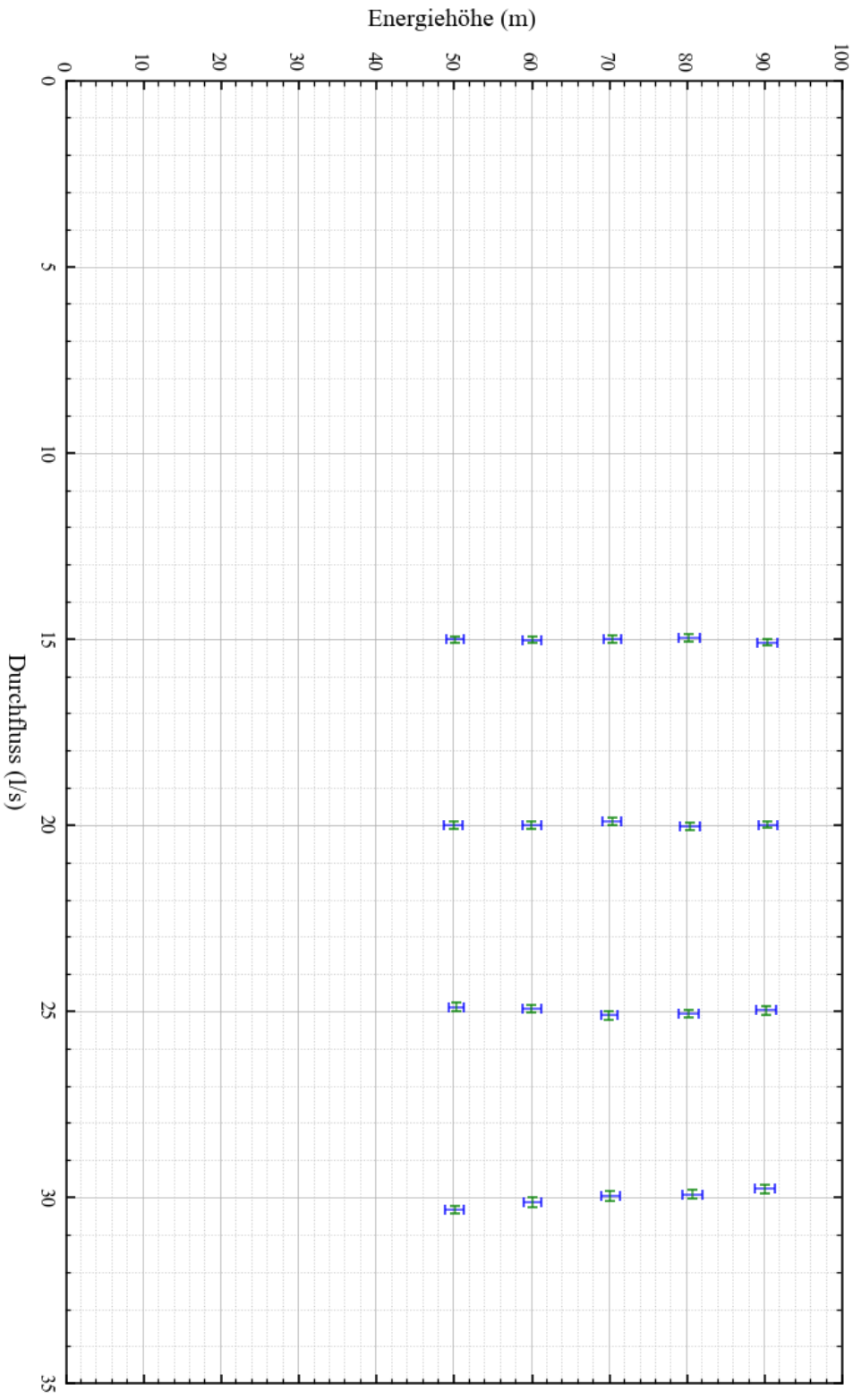

Abbildung A. 1: H-Q-Diagramm mit verschiedenen Messpunkten, durch die ein Raster aufgespannt wird. Zusätzlich werden für die Energiehöhe (blau) und den Durchfluss(grün) Fehlerbalken angezeigt, welche der Standardabweichung entsprechen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

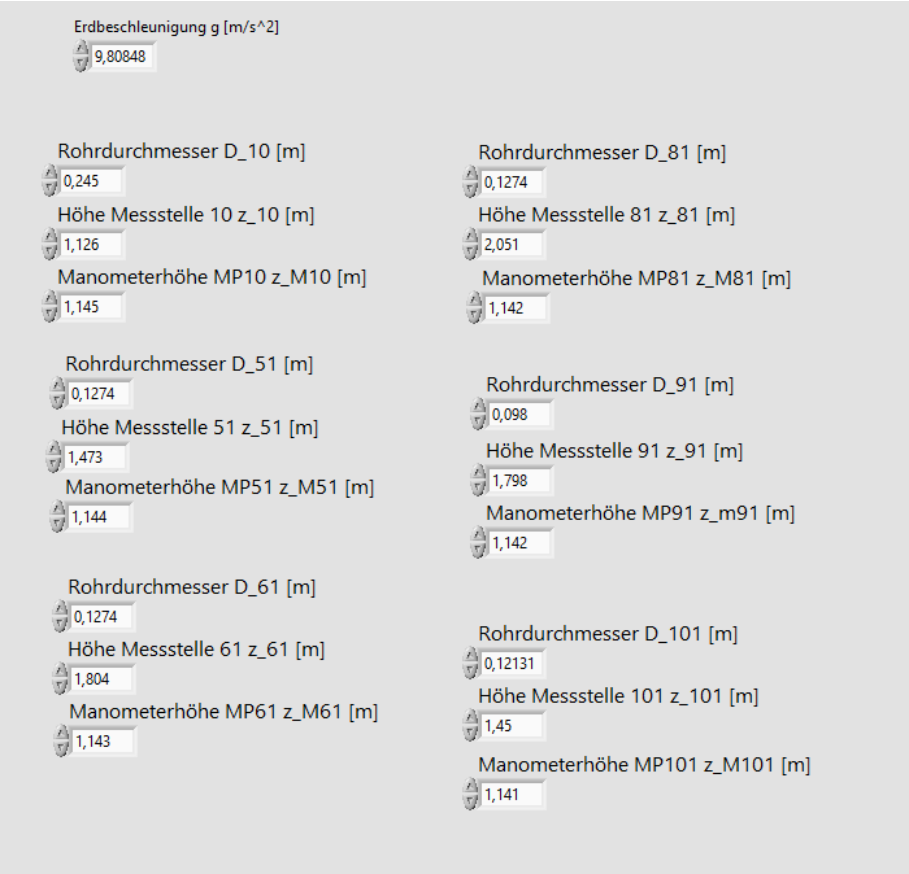

Abbildung A. 2: Ergänzende Werte der Initialisierung

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

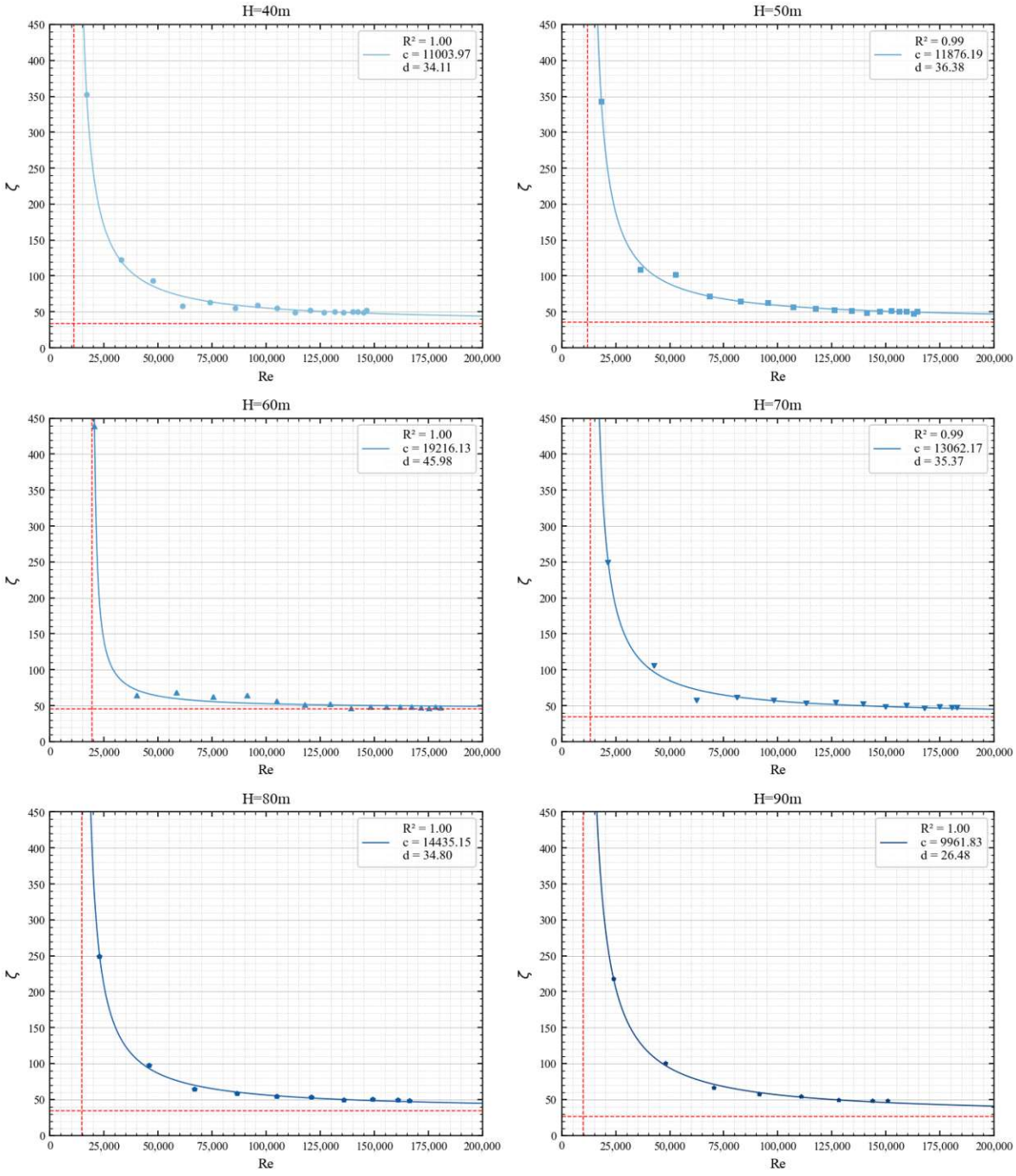

Abbildung A. 3: Regressionsanalyse der sechs Messreihen, aufgenommen bei unterschiedlichen konstant gehaltenen Energiehöhen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.