



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna | Austria



Diplomarbeit

Analyse hochfrequenter Druckpulsationen einer Kreiselpumpe und deren Übertragungsverhalten im Rohrleitungssystem

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs
(Dipl.-Ing. oder DI), eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Maschinenwesen und
Betriebswissenschaften, von

Stefan Achleitner BSc

Matr. Nr.: 01607470

Unter der Leitung von

Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr. techn. Anton Maly BSc
Institut für Energietechnik und Thermodynamik, E302

Wien, März 2023



Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters 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 dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch 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, im März 2023

Stefan Achleitner BSc

Abstract

Pumping processes with centrifugal pumps are associated with pressure pulsations due to rotor-stator interaction. These pressure fluctuations are able to arouse undesired vibrations and can be taken as a quality criterion for the flow of a centrifugal pump. A centrifugal pump ($Q_n = 600 \text{ m}^3/\text{h}$, $H_n = 85 \text{ m}$ and $n_n = 1475 \text{ 1/min}$) is used as a supply pump at the experimental rig of the Institute for Energy Technology, where tests are carried out on various hydraulic machines. As part of this thesis, the pulsations that develop at the blade passing frequency of this pump are to be quantified and the propagation of these pulsations through the pipe system are to be investigated using two test arrangements.

The high-frequency pulsations at blade passing frequency represent 0.5-1.5% of the pumping head over wide operating ranges of the supply pump. Neither a direct connection between the rotational speed nor the flow rate to the amplitude of the high-frequency pressure pulsations generated at the supply pump can be identified. However a tendency can be seen that those amplitudes have their maximum in each series of measurements at the respective maximum flow rate depending on the rotational speed. These are the operating points at which the pump operates in the overload range. When the overload is reached these high-frequency pressure pulsations rise sharply and reach up to 6% of the head. On average these amount to around 4.3% of the pumping head at the operating point of maximum flow. Close to the design point of the machine at a rotational speed of 1500 rpm and a flow rate of 180 liters per second, the high-frequency pressure fluctuations at blade passing frequency represent 1.3% of the head. The magnitudes of the pulsations determined agree well with the values found in the literature.

During operation on the Pelton turbine test rig the amplitude at blade passing frequency at the measuring point in the pump pit still averages around 55% of the value at the supply pump. During operation on the universal test rig this pulsation at the blade passing frequency at the measuring point in the pump pit has on many operating points decayed to much in order to be detected. If it can be detected it amounts to less than 26% of the amplitude at the supply pump. The difference in the test setup is plausible, since the measuring point in the pump pit at the Pelton turbine test stand is much closer to the supply pump and the flow has to pass fewer disruptive points on the way there. No influence of flow velocity or pressure level on the propagation of high-frequency pressure pulsations at blade passing frequency can be identified. An influence of the blade passing frequency at the upstream measuring point can be determined in none of the measurement series. It can be assumed with a high degree of certainty that these pressure pulsations are not relevant at the upstream measuring points of the two test stand configurations.

In addition to the questions regarding the high-frequency pulsations the pump characteristics curves are recorded at different rotational speeds and the pipe losses of the system are examined using the arrangement of the universal test stand.

Kurzfassung

Fördervorgänge mit Kreiselpumpen sind prinzipbedingt durch Rotor-Stator-Interaktion mit Druckpulsationen verbunden. Diese Druckschwankungen sind in der Lage unerwünschte Schwingungen anzuregen und können als Qualitätskriterium des Förderstroms einer Kreiselpumpe angesehen werden. Am Versuchsstand des Institutes für Energietechnik, wo Versuche an diversen hydraulischen Maschinen durchgeführt werden, kommt eine Kreiselpumpe ($Q_n = 600 \text{ m}^3/\text{h}$, $H_n = 85 \text{ m}$ und $n_n = 1475 \text{ 1/min}$) als Versorgungspumpe zum Einsatz. Im Rahmen dieser Diplomarbeit sollen die entstehenden Pulsationen bei Schaufelpassierfrequenz an dieser Pumpe quantifiziert und in weiterer Folge die Ausbreitung jener Pulsationen durch das Rohrleitungssystem anhand zweier Versuchsanordnungen untersucht werden.

Die hochfrequenten Pulsationen bei Schaufelpassierfrequenz belaufen sich über weite Betriebsbereiche der Versorgungspumpe auf 0,5-1,5% der Förderhöhe. Es kann weder ein direkter Zusammenhang zwischen der Drehzahl noch dem Durchfluss zur Amplitude der an der Versorgungspumpe entstehenden hochfrequenten Druckpulsationen erkannt werden. Jedoch ist eine Tendenz ersichtlich, dass jene Amplituden bei jeder Messreihe am jeweils größtmöglichen Durchfluss in Abhängigkeit der Drehzahl, ihr Maximum aufweisen. Das sind jene Betriebspunkte, an denen die Pumpe im Überlastbereich operiert. Bei Erreichen der Überlast steigen die hochfrequenten Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz stark an und erreichen bis zu 6% der Förderhöhe. Im Durchschnitt belaufen sich diese am Betriebspunkt maximalem Durchflusses auf etwa 4,3% der Förderhöhe. Nahe am Auslegungspunkt der Maschine, bei einer Drehzahl von 1500 Umdrehungen pro Minute und einem Durchfluss von 180 Liter pro Sekunde belaufen sich die hochfrequenten Druckschwankungen bei Schaufelpassierfrequenz auf 1,3% der Förderhöhe. Die ermittelten Größenordnungen der Pulsationen stimmen gut mit in der Literatur zu findenden Werten überein.

Am Pelton-Turbinenversuchsstand beläuft sich die Amplitude bei Schaufelpassierfrequenz an der Messstelle in der Pumpengrube im Durchschnitt noch auf etwa 55% des Wertes an der Versorgungspumpe. Am Universalversuchsstand ist diese Pulsation bei Schaufelpassierfrequenz an der Messstelle in der Pumpengrube an vielen Betriebspunkten bereits zu stark abgeklungen, um nachgewiesen werden zu können. Sofern diese erkennbar ist, beträgt deren Amplitude weniger als 26% des Wertes an der Versorgungspumpe. Der Unterschied in den Versuchsanordnungen ist plausibel, da die Messstelle in der Pumpengrube am Pelton-Turbinenversuchsstand deutlich näher an der Versorgungspumpe liegt und auf dem Weg dorthin weniger Störstellen von der Strömung passiert werden müssen. Es kann kein Einfluss von Strömungsgeschwindigkeit oder Druckniveau auf die Ausbreitung hochfrequenter Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz erkannt werden. Bei keiner der Messreihen kann ein Einfluss der Schaufelpassierfrequenz an der oberwasserseitigen Messstelle nachgewiesen werden. Es ist mit hoher Sicherheit davon auszugehen, dass diese Druckpulsationen am Oberwasser der beiden Versuchsanordnungen nicht relevant sind.

Neben den Fragestellungen betreffend der hochfrequenten Pulsationen werden noch QH-Kennlinien bei unterschiedlichen Drehzahlen aufgenommen und die Rohrleitungsverluste der Anlage anhand der Versuchsanordnung des Universalversuchsstandes untersucht.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung.....	II
Abstract.....	III
Kurzfassung.....	IV
Inhaltsverzeichnis.....	V
Formelzeichenverzeichnis.....	VII
Abkürzungsverzeichnis.....	IX
Kapitel 1: Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Ziel.....	1
1.3 Vorgehensweise.....	1
Kapitel 2: Relevante Theorie.....	3
2.1 QH-Kennlinie von Kreiselpumpen und Anlagenkennlinie.....	3
2.2 Entstehung und Auswirkungen von Druckpulsationen an Kreiselpumpen	3
2.3 Fouriertransformation	5
2.4 Messprinzipien der Sensoren.....	9
Kapitel 3: Aufbau des Versuchsstandes und Versuchsplanung	12
3.1 Aufbau des Versuchsstandes	12
3.2 Versuchsplanung.....	17
3.3 Anforderungen an die Versuchsdurchführung	25
Kapitel 4: Instrumentierung und Software	27
4.1 Messtechnik.....	27
4.2 Adapter	34
4.3 Prozess der Instrumentierung.....	35
4.4 Software.....	36
4.5 Fehlerabschätzung.....	38
Kapitel 5: Kennlinienaufnahme an Versorgungspumpe und Versuchsstand.....	41
5.1 Versuchsablauf.....	41
5.2 QH-Kennlinien.....	43
5.3 Druckverluste	46
5.4 Gegenüberstellung der Endress-Hauser und Kistler Drucksensoren.....	49
Kapitel 6: Auswertung und Analyse der hochfrequenten Druckpulsationen	52

6.1 Ausprägung hochfrequenter Druckpulsationen an der Versorgungspumpe.....	52
6.2 Ausbreitung hochfrequenter Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz im Rohrleitungssystem	64
6.3 Hochfrequente Druckpulsationen am Pelton-Turbinenversuchsstand	67
6.4 Gegenüberstellung der Messungen vom Universalversuchsstand mit dem Pelton-Turbinenversuchsstand.....	70
Kapitel 7: Schlussfolgerungen und Ausblick auf weitere Arbeiten	72
7.1 Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz an der Versorgungspumpe	72
7.2 Ausbreitung der Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz.....	73
7.3 Ausblick	74
Anhang A: Definierte Konstanten	75
Anhang B: Auflistung der Messtechnik	76
Anhang C: Software zur Datenakquise und Interpretation	77
C.1 Softwareversionen	77
C.2 MATLAB Script zur Auswertung hochfrequenter Pulsationen.....	77
Anhang D: Messdaten zur Kennlinienermittlung.....	86
Anhang E: Messdaten der hochfrequenten Druckpulsationen	94
E.1 Ausprägung von Druckpulsationen(Q) über n	94
E.2 Ausbreitung der Druckpulsationen im Rohrleitungssystem	103
Anhang E: Technische Zeichnungen der angefertigten Adapterstücke	114
Literaturverzeichnis	118
Abbildungsverzeichnis	120
Tabellenverzeichnis.....	123

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
$^{\circ}\text{C}$	Grad Celsius	K
A	Rohrleitungsquerschnitt	m^2
mA	Milliampere	A
μA	Microampere	A
B	Magnetische Flussdichte	T
δ	Dämpfungsfaktor	1
ΔF	Frequenzauflösung	1/s
g	Gravitationskonstante	m/s^2
H	Förderhöhe	m
H^*	Dimensionslose Förderhöhe	1
ΔH_{EH}	Höhendifferenz zwischen EH Sensoren	m
ΔH_{DS}	Absolute Amplitude der Druckschwankung DS	m
ΔH_{PG}	Absolute Amplitude der Druckschwankung PG	m
ΔH_V	Höhenverlust	m
H_n	Nennförderhöhe	m
H_V	Verlusthöhe	m
K	Verlustfaktor	s^2/m^5
J	Verlustfaktor	s^2/m^5
L	Elektrodenabstand	m
m	Meter	m
mm	Millimeter	m
n	Drehzahl	1/min
n_n	Nenn Drehzahl	1/min
p_{atm}	Umgebungsdruck	Pa
p_{EHDS}	Druck EH DS	bar
p_{EHSS}	Druck EH SS	bar
p_{KOW}	Druck OW Kistler	bar
p_{KOW_komp}	Druck OW Kistler – kompensiert	bar
p_{0EH}	Druck bei Q_0 DS EH	bar
p_{0KOW}	Druck bei Q_0 OW Kistler	bar
Δp_{0KOW_EH}	Druckdifferenz bei Q_0 zwischen OW Kistler und DS EH	bar
Δp_{abs}	Absolutwert der Druckschwankungsamplitude	bar
Δp^*	Druck bezogen auf volumetrische kinetische Energie	1
Q	Durchfluss	m^3/s
Q^*	Dimensionsloser Durchfluss	1
Q^{**}	Angepasster Dimensionsloser Durchfluss	1
Q_n	Nenn durchfluss	m^3/s
Q_{hydr_max}	Druchfluss bei maximaler hydraulischer Leistung	m^3/s
ρ_w	Dichte des Wassers	kg/m^3
T	Messdauer	s
Δt	Laufzeitdifferenz	s
t_y	Mittelwert der Laufzeiten	s
u	Umfangsgeschwindigkeit am Laufradaustritt	m/s
U_e	Elektrodenspannung	V

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
V	Volt	V
V	Geschwindigkeit	m/s
X	Verlustfaktor	s ² /m ⁵
X _{SA}	Korrekturfaktor(Strömung,Akustik)	-
Z _{LA}	Laufschaufelanzahl	1

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
<i>avg</i>	Average
<i>DK</i>	Drehklang
<i>DS</i>	Druckseite
<i>EH</i>	Endress+Hauser
<i>FFT</i>	Fast Fourier Transformation
<i>IET</i>	Institut für Energietechnik
<i>n.V.</i>	nicht Vorhanden
<i>OW</i>	Oberwasser
<i>PG</i>	Pumpengrube
Q_0	Nulldurchfluss
<i>rpm</i>	rounds per Minute
<i>SS</i>	Saugseite

Kapitel 1: Einleitung

1.1 Motivation

Fördervorgänge mit Kreiselpumpen sind prinzipbedingt durch Rotor-Stator-Interaktion mit Druckpulsationen verbunden. Diese Druckschwankungen sind in der Lage unerwünschte Schwingungen anzuregen und können als Qualitätskriterium des Förderstroms einer Kreiselpumpe angesehen werden.

Am Versuchsstand des Institutes für Energietechnik, an dem Versuche an diversen hydraulischen Maschinen durchgeführt werden, kommt eine Kreiselpumpe ($Q_n = 600 \text{ m}^3/\text{h}$, $H_n = 85 \text{ m}$ und $n_n = 1475 \text{ 1/min}$) als Versorgungspumpe zum Einsatz. Es stehen die Ausprägung dieser Druckpulsationen an der Pumpe und deren Ausbreitung durch das Rohrleitungssystem im Interesse, um die Güte der Versorgung des Versuchsstands zu quantifizieren.

1.2 Ziel

Ziel der Arbeit ist es, die hochfrequenten Druckpulsationen an der als Versorgungspumpe eingesetzten Kreiselpumpe, sowie deren Ausbreitung im Rohrleitungssystem, am Versuchsstand zu evaluieren. Parallel dazu soll die QH-Kennlinie der Versorgungspumpe bei unterschiedlichen Drehzahlen aufgenommen und der tatsächliche Druckverlust im Rohrleitungssystem gemessen werden.

1.3 Vorgehensweise

Am Beginn der Arbeit wird eine Literaturrecherche zum Stand der Technik durchgeführt. Dabei soll evaluiert werden welche Untersuchungen zu Druckpulsationen an Kreiselpumpen bereits durchgeführt wurden, in welcher Größenordnung diese bei den Messungen zu erwarten sind und welche Faktoren bei deren Ausprägung eine Rolle spielen.

Im Anschluss an die Literaturrecherche wird im Rahmen der Versuchsplanung der Versuchsstand analysiert. Hilfestellung hierbei sollen eine Bachelorarbeit des Instituts für Energietechnik liefern, in welcher der Versuchsaufbau bereits beschrieben wurde und die Rohrleitungsverluste ermittelt wurden. Hauptaugenmerk soll bei der Versuchsplanung neben der Einarbeitung in den Versuchsaufbau auf der zweckmäßigen Auswahl und Platzierung von Druckaufnehmern im Rohrleitungssystem liegen.

Es werden zusätzliche Sensoren am Versuchsstand verbaut und für die Auswertung entsprechend verkabelt. Der Versuchsstand wird hierfür geringfügig angepasst, notwendige Adapter zur Sensoraufnahme werden evaluiert, konstruiert und gefertigt.

Die Akquise der Messdaten wird mittels der Software LabView umgesetzt.

Bei den Messreihen werden die QH-Kennlinie der Versorgungspumpe, sowie die hochfrequenten Druckschwankungen an mehreren Stellen im System bei unterschiedlichen Pumpendrehzahlen aufgenommen.

Die Messdaten werden für die Analyse entsprechend aufbereitet. Die Kennlinien werden berechnet und die Messdaten der Druckpulsationen mittels MATLAB einer Fouriertransformation unterzogen, um diese im Frequenzbereich anhand von Frequenzspektra und Wasserfalldiagrammen analysieren zu können.

Die gewonnenen Messdaten und deren Interpretation stellen das Ergebnis der Arbeit dar. Die ermittelten QH-Kennlinien der Versorgungspumpe werden mit Messungen aus der Vergangenheit sowie jenen des Herstellers gegenübergestellt und bei Abweichungen erfolgt eine Ursachensuche. Aus den hochfrequenten Druckschwankungsmessungen sollen Erkenntnisse über die Druckpulsationen an der Versorgungspumpe, sowie deren Übertragungsverhalten im Rohrleitungssystem gewonnen werden. Es erfolgt ein Vergleich der Messergebnisse der Druckpulsationen mit Erkenntnissen anderer Publikationen, eine Analyse möglicher Fehlerquellen sowie ein Ausblick auf weitere Forschungsfragen.

Kapitel 2: Relevante Theorie

Unter Kapitel 2 soll ein Überblick der zum Verständnis der Arbeit relevanten Theorie gegeben werden.

Für weitere Aspekte der hier beschriebenen Theorie sei auf die im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen und Fachliteratur verwiesen.

2.1 QH-Kennlinie von Kreiselpumpen und Anlagenkennlinie

Pumpen, welche nach dem Verdrängungsprinzip arbeiten, liefern in der Regel weitgehend unabhängig vom Gegendruck einen nur durch die Drehzahl vorgegebenen Volumenstrom. Bei Kreiselpumpen hängt hingegen der Förderstrom neben der Drehzahl auch beträchtlich von der Druckdifferenz ab, welche die Pumpe aufbringen muss. Diese Druckdifferenz ist durch die Anlage, in welcher die Pumpe operiert vorgegeben und hängt in erster Linie als Folge von Strömungsverlusten mit dem Volumenstrom zusammen. Ermittelt man für eine spezifische Anlage die erforderlichen Druckdifferenzen als Funktion des Durchflusses erhält man die Anlagenkennlinie. Der Betriebspunkt einer Kreiselpumpe ergibt sich somit immer als Schnittpunkt der maschinenspezifischen Pumpenkennlinie mit der Anlagenkennlinie. [1, p. 809]

Jene Kennlinie, die diesen Druckdifferenzabhängigen Förderstrom einer Kreiselpumpe quantifiziert, wird als QH-Kennlinie bezeichnet. Da die Betriebspunkte einer Kreiselpumpe immer Schnittpunkte aus Anlagen- und Pumpenkennlinie sind, wird deren Ermittlung über Verstimmung der Anlagenkennlinie erreicht.

Die Anlagenkennlinie wird, etwa durch teilweises Schließen eines druckseitigen Absperrorgans, dahingehend verstimmt, dass definierte Durchflusswerte eintreten und die sich dabei einstellende Druckdifferenz werden aufgezeichnet. Trägt man die hierbei ermittelten Druckdifferenzen, umgerechnet auf Förderhöhen über die jeweiligen Durchflusswerte auf, resultiert die QH-Kennlinie der Pumpe.

Die Anlagenkennlinie weist in der Regel einen statischen und einen dynamischen Anteil auf. Der statische Anteil entfällt, wenn das Arbeitsmedium im geschlossenen Kreis gefördert wird. Der dynamische Anteil beschreibt den quadratisch vom Durchfluss abhängigen Druckhöhenverlust im Rohrleitungssystem. Dieser Druckhöhenverlust H_V der Anlage, die Anlagenkennlinie, lässt sich für den geschlossenen hydraulischen Kreis als Funktion des Durchflusses Q über einen Faktor X , welcher die Einheit s^2/m^5 aufweist, gemäß Gl. (2.1) ermitteln. [2, p. 243]

$$H_V = X \times Q^2 \quad (2.1)$$

2.2 Entstehung und Auswirkungen von Druckpulsationen an Kreiselpumpen

Die Inhalte, inklusive Abbildungen, unter diesem Abschnitt zu Entstehung und Auswirkungen von Druckpulsationen an Kreiselpumpen sind [1, pp. 665-670] entnommen.

Druckpulsationen an Kreiselpumpen entstehen durch instationäre Strömungsvorgänge. Diese erzeugen in kompressiblen Medien Druckänderungen, welche sich mit Schallgeschwindigkeit ausbreiten. Diese instationären Strömungen haben ihren Ursprung im ungleichmäßigen Geschwindigkeitsprofil am Laufradaustritt. Das ungleichmäßige Geschwindigkeitsprofil über die Schaufelteilung ist durch das Arbeitsprinzip sowie Sekundärströmungen bedingt und überlagert sich am Laufradaustritt mit der Nachlaufströmung. Dieser Effekt ist in *Abbildung 1* dargestellt.

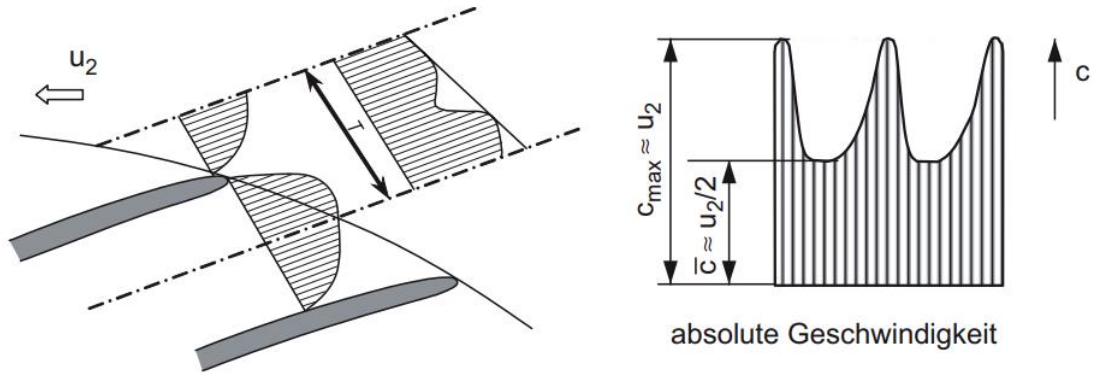


Abbildung 1: Geschwindigkeitsprofil am Laufradaustritt unter Einfluss der Nachlaufströmung [1]

Mit der ungleichmäßigen Geschwindigkeitsverteilung geht eine ungleichmäßige Druckverteilung einher, wobei stets, gemäß Bernoulli, am Geschwindigkeitsmaximum ein Druckminimum verzeichnet werden kann. Läuft nun eine Laufschaufel an einer Leitschaufel oder einem Spiralgehäusesporn vorbei, ändern sich die Strömungsbedingungen signifikant. Dadurch werden im stehenden System entsprechende Änderungen des Druckfeldes hervorgerufen. Ein Teil der in diesen instationären Druckfeldern gespeicherte Energie wird als Druckpulsation in Form von Flüssigkeitsschall, abgestrahlt. Jene Rotor-Stator-Wechselwirkung tritt mit einer Grundfrequenz nach Gl (2.2) auf, welche als "Schaufelpassierfrequenz", abgekürzt SPF bezeichnet wird. Der Drehklang bezeichnet die Anzahl an Umdrehungen pro Sekunde in Hertz. Wird dieser mit der Anzahl an Laufschaufeln z_{LA} multipliziert ergibt sich die Schaufelpassierfrequenz, beziehungsweise der Schaufeldrehklang.

$$SPF = \frac{z_{LA} \times n}{60} \quad (2.2)$$

Neben dem oben beschriebenen Entstehungseffekt durch Aufprallen der Nachlaufströmung an Leitschaufeln oder Spiralgehäusesporn können auch Wirbel in der Nachlaufzone oder Asymmetrien in den Laufschaufelkanälen zu Druckpulsationen führen. Einen großen Effekt hat in der Regel das Aufprallen der Nachlaufströmung, welches im Frequenzspektrum bei Schaufelpassierfrequenz und deren harmonischen auftritt. Durch Asymmetrien in den Laufradkanälen können im Spektrum Pulsationen bei Vielfachen des Drehklangs resultieren. Druckpulsationen durch Wirbel sind in der Teillast bei Frequenzen unterhalb des Drehklangs angesiedelt.

Diese Pulsationen können unerwünschte Strukturschwingungen anregen und aufgrund der Wechselbeanspruchungen Ermüdungsbrüche an Pumpenbauteilen herbeiführen. Die Druckschwankungen, welche sich in den Rohrleitungen ausbreiten, haben die Abstrahlung von Luftschall zur Folge.

2.3 Fouriertransformation

Auf eine mathematische Herleitung sowie Beweise zur Fouriertransformation wird an dieser Stelle verzichtet, es ist ebenso nicht Ziel dieser Arbeit die numerische Umsetzung der Algorithmen zur Fouriertransformation zu beleuchten. Hierfür sei auf Fachliteratur verwiesen. Es werden im Anschluss an einen Überblick zur Fouriertransformation die Themen Aliasing, Leakage-Effekte und der Einsatz von Fensterfunktionen behandelt. Weitergehende Ausführungen zur Fouriertransformation können in [3], [4] oder anderer Fachliteratur gefunden werden.

Überblick

Der Fouriertransformation liegt die Annahme zugrunde, dass jedes beliebige Periodische Signal durch eine Überlagerung von Sinusfunktionen mit unterschiedlichen Amplituden sowie Phasenverschiebungen abgebildet werden kann. Über den Algorithmus einer diskreten Fourier Transformation kann ein Signal, welches im Zeitbereich anhand definierter Messpunkte vorliegt, in dessen Frequenzanteile zerlegt und anhand dieser analysiert werden. Dieser Zusammenhang ist exemplarisch in *Abbildung 2* gezeigt.

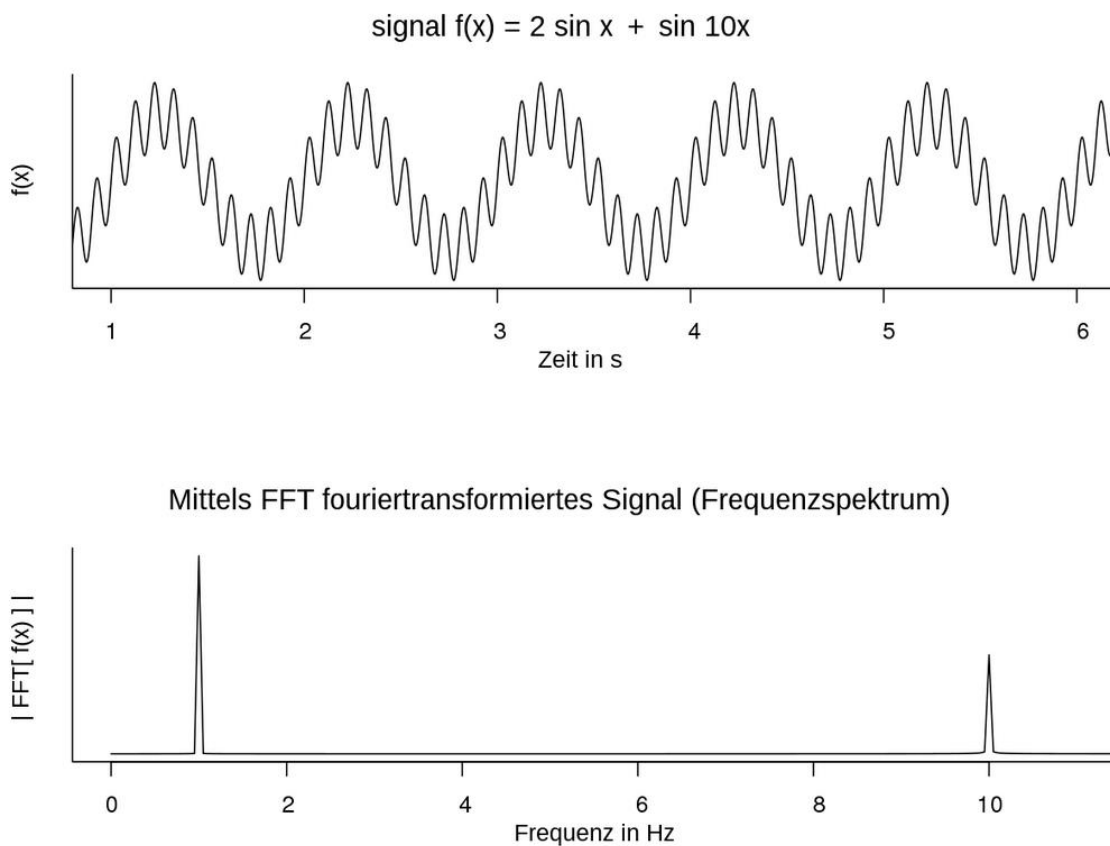


Abbildung 2: Zeitsignal und Frequenzspektrum nach Fouriertransformation [5]

Zur Signalanalyse ist oftmals die Betrachtung im Frequenzbereich zweckmäßig, da die Bestandteile des Signals mit deren Frequenz und Amplitude direkt abgelesen werden können.

Einige Fehlerquellen bei der Fouriertransformation, deren Auswirkungen und Abhilfe werden im Folgenden beleuchtet.

Aliasing-Effekt

Unter dem Aliasing-Effekt versteht man, wenn Frequenzanteile eines Signals, deren Frequenz größer als die halbe Abtastrate ist, in der Auswertung als fehlerhafte Frequenzanteile mit zu niedriger Frequenz auftauchen. Jene Frequenz in Höhe der halben Abtastrate wird als Nyquist-Frequenz bezeichnet. *Abbildung 3* veranschaulicht den Aliasing-Effekt. [6]

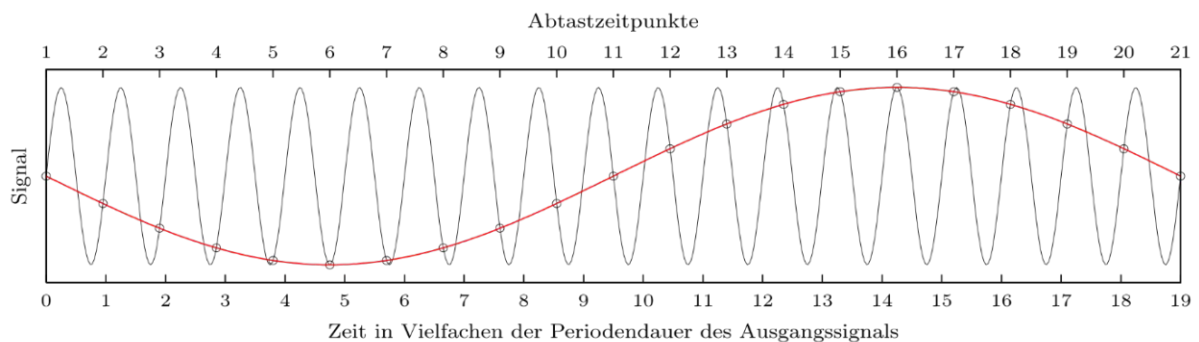


Abbildung 3: Veranschaulichung des Aliasing-Effekts [6]

Die schwarze Linie zeigt das tatsächliche Signal und die rote Linie das aufgrund der zu geringen Abtastrate fehlerhafte Signal. Damit Aliasing-Effekte vermieden werden können muss die Abtastrate daher zumindest die doppelte Nyquist-Frequenz betragen.

Leakage-Effekt

Der Leakage-Effekt beschreibt das Verschmieren der Amplituden im Frequenzspektrum einer diskreten Fouriertransformation, wenn die Messdauer kein ganzzahliges Vielfaches der Periodendauer des abgetasteten Signals beträgt.

Im Rahmen der diskreten Fouriertransformation wird ein Signal, welches eine endliche Zeitdauer besitzt, an dessen Enden periodisch fortgesetzt. Beträgt die Messdauer kein ganzzahliges Vielfaches der Periodendauer kommt es bei dieser Fortsetzung zu Diskontinuitäten. Diese Diskontinuitäten tauchen im Frequenzspektrum als hochfrequente Anteile auf, die eigentlich nicht im Signal enthalten sind. Diese können über der Nyquist-Frequenz zu liegen kommen und in Form von Aliasing-Effekten das Spektrum verschmieren. Es wirkt dabei als würde Energie von Peaks in benachbarte Frequenzen überfließen (engl. "leakage"), was die Spektrallinien ausweitet. [7]

Abbildung 4 zeigt das Beispiel eines Signals, welches mit einem Vielfachen der Periodendauer aufgenommen wurde. Wird dieses in der diskreten Fouriertransformation periodisch fortgesetzt, entsteht im darunter abgebildeten Frequenzspektrum kein Fehler durch den Leakage-Effekt.

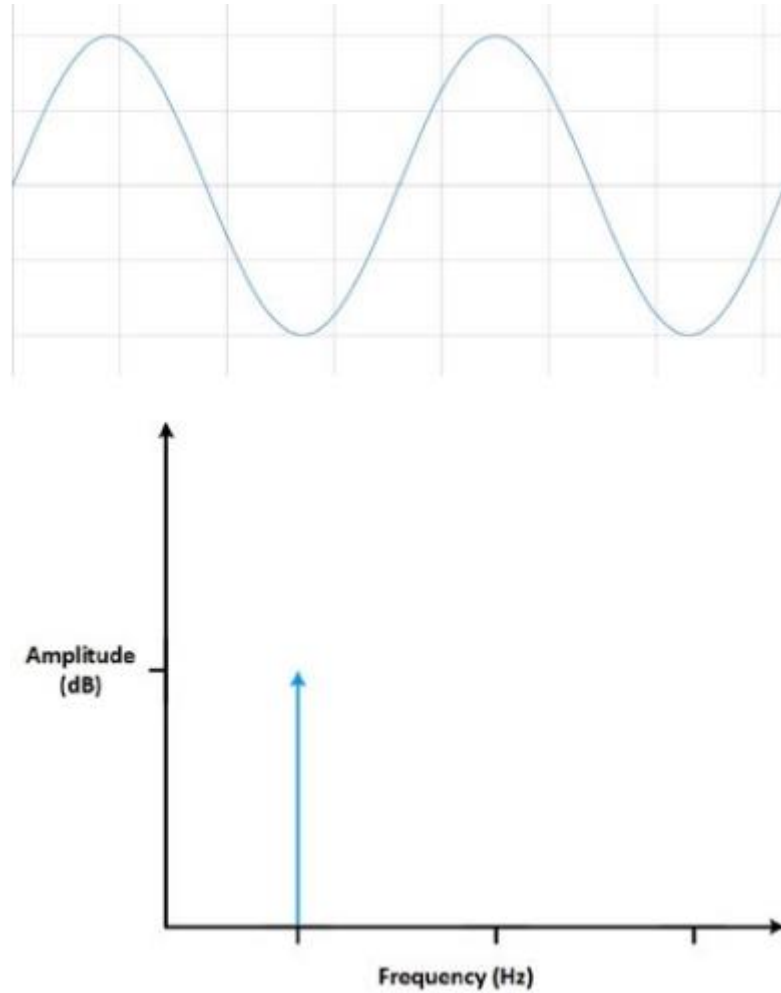


Abbildung 4: Messdauer beträgt ein ganzzahliges Vielfaches der Periodendauer des Signals – es tritt kein Leakage-Effekt auf [7]

Die Auswirkungen, wenn die Messdauer kein ganzzahliges Vielfaches der Periodendauer des Signals beträgt, sind unter *Abbildung 5* dargestellt. Bei periodischer Fortsetzung des Signals entstehen unetliche Übergänge, welche sich im Frequenzspektrum, das unter dem Signal abgebildet ist, als Fehler durch den Leakage-Effekt niederschlägt.

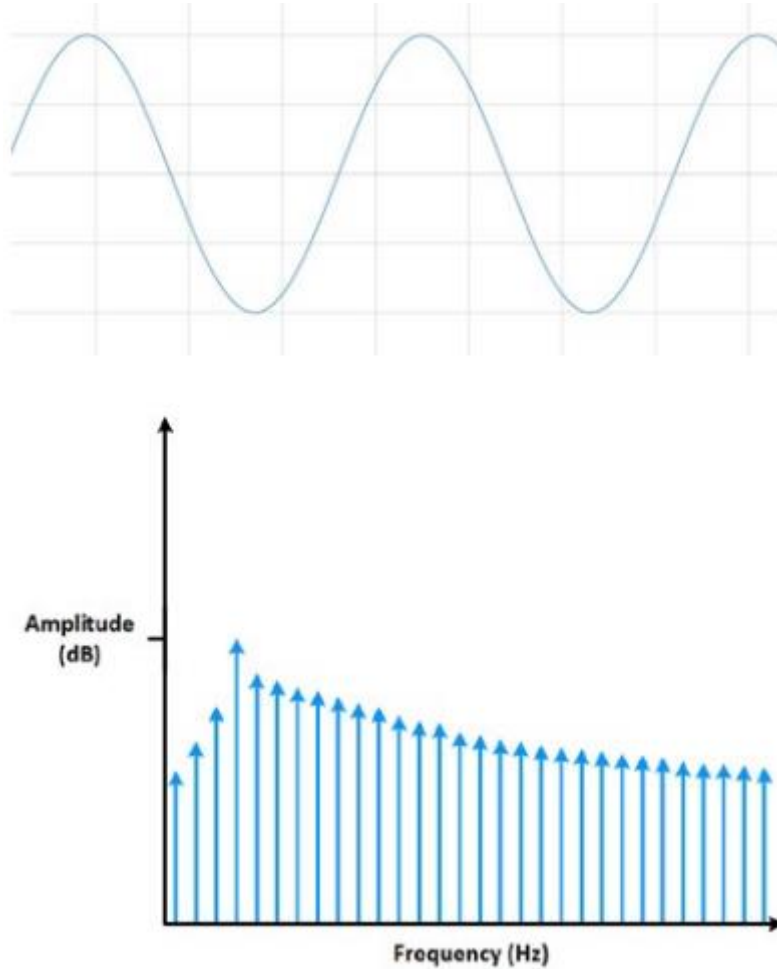


Abbildung 5: Messdauer beträgt kein ganzzahliges Vielfaches der Periodendauer des Signals – es tritt ein Leakage-Effekt auf [7]

Um diesen Einfluss zu vermindern, kann eine Fensterfunktion auf das Signal im Zeitbereich aufgebracht werden. Diese Fensterfunktion sorgt dafür, dass die Amplituden des Messsignals an dessen Beginn und Ende kontinuierlich gegen Null abfallen. Dadurch treffen sich die Endpunkte des periodisch fortgesetzten Signals und die scharfen Übergänge bleiben aus. In *Abbildung 6* ist ein mit einer Fensterfunktion überlagertes, bei einer Messdauer die keinem Vielfachen der Periodendauer entspricht aufgenommenes, Messsignal und darunter dessen über eine diskrete Fouriertransformation ermitteltes Frequenzspektrum ersichtlich. [7]

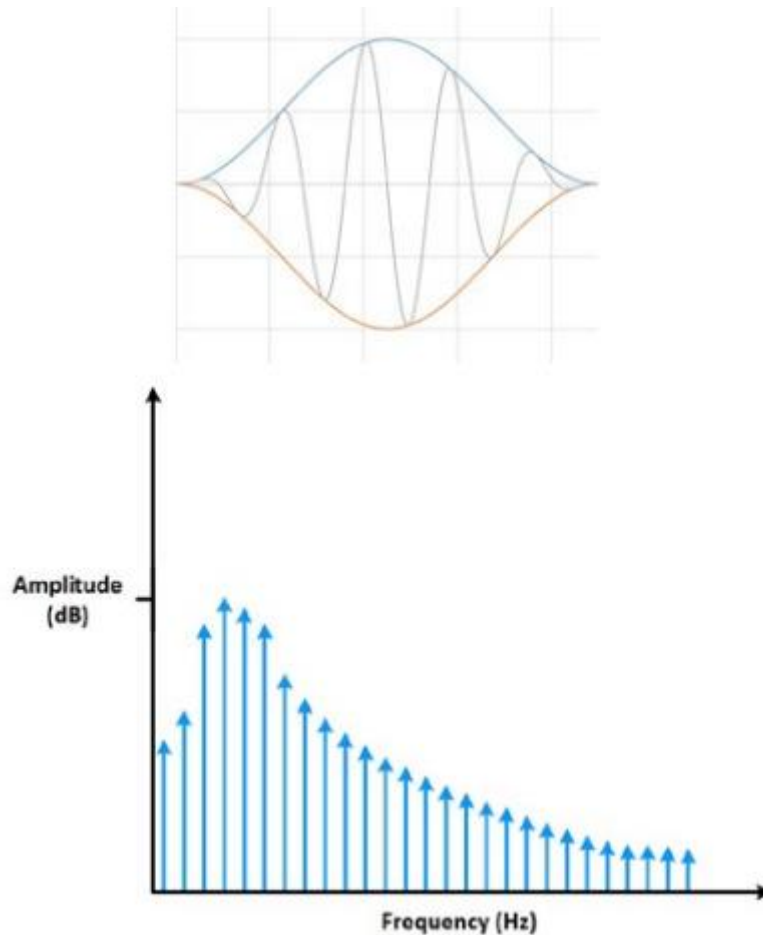


Abbildung 6: Messdauer beträgt kein ganzzahliges Vielfaches der Periodendauer des Signals - Leakage-Effekt, jedoch verringert durch Fensterfunktion [7]

Der Einfluss des Leakage-Effekts kann durch Aufbringen der Fensterfunktion verringert werden. Es existieren verschiedenste Fensterfunktionen. Für die meisten Anwendungen ist die Fensterfunktion nach Hann (abgebildet unter Abschnitt 4.5) zweckmäßig. [7]

2.4 Messprinzipien der Sensoren

An dieser Stelle sollen die Messprinzipien der bei den Versuchen zum Einsatz kommenden Sensoren beleuchtet werden. Die eingesetzten Druckaufnehmer arbeiten nach dem piezoresistiven, die Durchflusssensoren nach dem magnetinduktivem Messprinzip oder über Laufzeitmessungen von Ultraschall.

Druckmessung mittels piezoresistivem Effekt

Der piezoresistive Effekt beschreibt die Veränderung des elektrischen Widerstandes eines Werkstoffs als Reaktion auf eine mechanische Beanspruchung. Dieser Effekt resultiert aus der mit mechanischer Beanspruchung einhergehender Veränderung von Geometrie und Leitfähigkeit des Werkstoffes. Diese Änderung des elektrischen Widerstandes kann über Messbrücken ausgewertet und daraus das druckproportionale Ausgangssignal ausgewertet werden. [8]

Durchflussmessung mittels magnetinduktivem Messprinzip

Das magnetinduktive Messprinzip beruht auf Faradays Induktionsgesetz, wonach eine Spannung induziert wird, wenn sich ein Leiter durch ein Magnetfeld bewegt. Bei der magnetinduktiven Durchflussmessung stellt das strömende Medium diesen bewegten Leiter dar. Die an Messelektroden induzierte Spannung ist dabei proportional zur Strömungsgeschwindigkeit des Mediums. Durch Miteinbeziehung des Rohrleitungsquerschnittes kann dadurch auf den Volumenstrom geschlossen werden. Das Magnetfeld wird durch einen Gleichstrom mit wechselnder Polarität erzeugt. [9]

Letzteres lässt das Magnetfeld periodisch die Ausrichtung ändern, wodurch ein stabiler Nulllauf gewährleistet ist und Störeinflüsse durch Mehrphasenströmung, Inhomogenitäten oder geringe Leitfähigkeit im Fluid vermindert werden. [10]

Die Funktionsweise ist in *Abbildung 7* dargestellt.

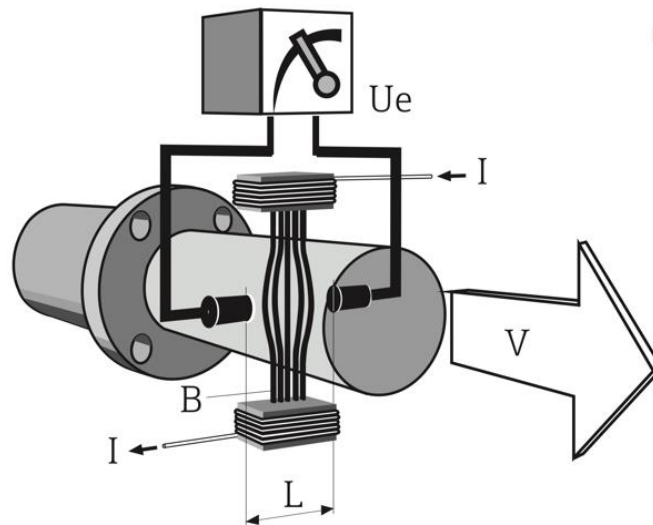


Abbildung 7: Illustrierung des Prinzips der magnetinduktiven Durchflussmessung [13]

Die dabei geltenden Rechenvorschriften, entnommen aus [9], gestalten sich wie in Gl. (2.3) und Gl. (2.4) dargelegt. Es stellen dabei U_e die induzierte Elektrodenspannung, L den Elektrodenabstand, B die magnetische Flussdichte, A den Rohrleitungsquerschnitt, v die Strömungsgeschwindigkeit des Mediums und Q den Volumenstrom dar.

$$U_e = B \times L \times v \quad (2.3)$$

$$Q = A \times v \quad (2.4)$$

Durchflussmessung mittels Ultraschall

Die Inhalte zur Durchflussmessung mittels Ultraschall unter diesem Abschnitt, inklusive der Abbildungen, sind [11] entnommen.

Das Messverfahren mittels Ultraschall beruht auf der Laufzeitmessung von Ultraschallsignalen. Es werden dabei Ultraschallsignale abwechselnd von einem Sensor ausgesendet und vom anderen Sensor empfangen. *Abbildung 8* stellt die Sensoranbringung und das Messprinzip dar.

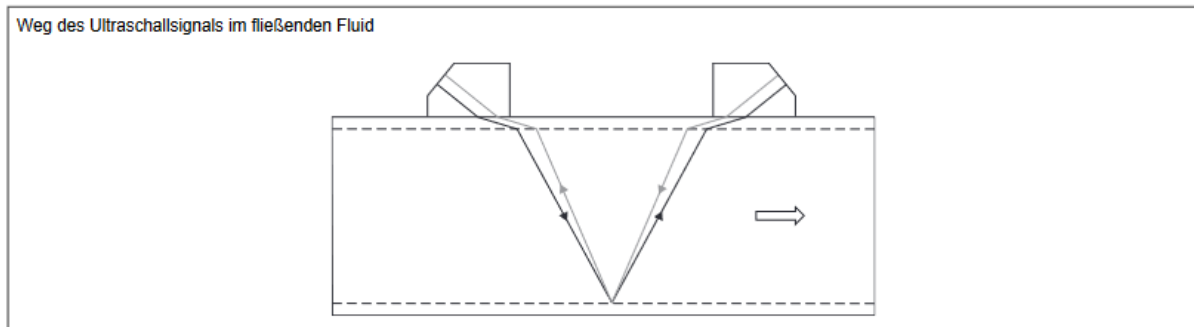


Abbildung 8: Sensoranbringung und Signalübertragung bei der Ultraschall Durchflussmessung [11]

Da das Medium, in welchem sich die Ultraschallsignale ausbreiten, in Bewegung ist, ist die Laufzeit entlang der Flussrichtung kürzer als gegen die Flussrichtung.

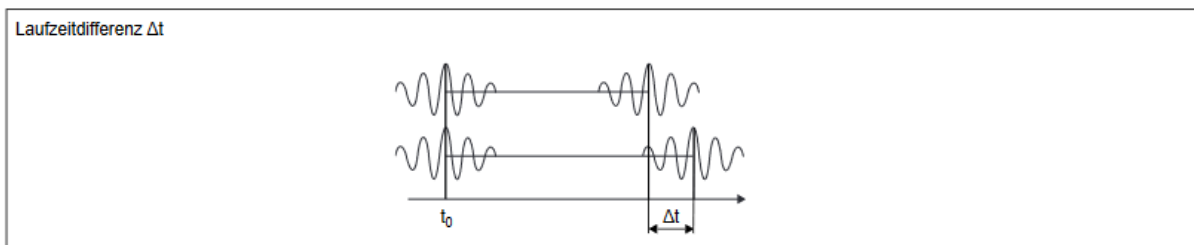


Abbildung 9: Laufzeitdifferenz der Schallsignale für Ausbreitung in- und gegen Strömungsrichtung [11]

Jene Laufzeitdifferenz der Signale, welche in *Abbildung 9* dargestellt ist, erlaubt es die mittlere Strömungsgeschwindigkeit auf dem von den Ultraschallsignalen durchlaufenen Schallweg zu ermitteln. Die Berechnung erfolgt anhand Gl. (2.5), wobei x_{SA} einen Faktor darstellt, welcher die strömungsmechanische und akustische Kalibrierung beinhaltet. A beschreibt die Rohrquerschnittsfläche, Δt die Laufzeitdifferenz und t_v den Mittelwert der Laufzeiten im Fluid.

$$Q = x_{SA} \times A \times \frac{\Delta t}{2 \times t_v} \quad (2.5)$$

Kapitel 3: Aufbau des Versuchsstandes und Versuchsplanung

Kapitel 3 setzt sich zum Ziel den hydraulischen Versuchsstand an dem die Untersuchungen stattfinden zu beschreiben. Ebenso wird der Prozess der Versuchsplanung beschrieben, wo auch die Anforderungen an die Messtechnik und -durchführung definiert werden.

3.1 Aufbau des Versuchsstandes

Der hydraulische Versuchsstand des Institutes für Energietechnik der Technischen Universität Wien befindet sich im TU Science Center am Arsenal im Gebäude OA. Die Versuchsanlage erstreckt sich über ein Tiefbecken zur Wasserentnahme und die Pumpengrube im Untergeschoß, sowie über das mit Ober- und Unterwasserkesseln und den Turbinenprüfständen bestückte Erdgeschoss der Laborhalle. Ein Übersichtsschema des Versuchsstandes ist in *Abbildung 10* gezeigt.

Im Schema (siehe *Abbildung 10*) ist ersichtlich, dass Teile des Versuchsstandes auf unterschiedliche Druckstufen ausgelegt sind. Die mit dicken Linien eingezeichneten Leitungen sind auf einen Nenndruck von 25 bar ausgelegt, die dünn eingezeichneten auf einen Nenndruck von 16 bar. Anhand dieser Druckstufen kann man den Versuchsstand in zwei unterschiedliche Kreisläufe einteilen. Der Kreislauf, dessen Förderstrecke bis zur untersuchten Turbine auf 25 bar Nenndruck ausgelegt ist, wird im Folgenden als Pelton-Turbinenversuchsstand bezeichnet, da dieser in der Regel für Messungen an Pelton-Turbinen verwendet wird. Der zweite Kreislauf, der auf 16 bar Nenndruck ausgelegt ist und einen Ober- sowie Unterwasserkessel beinhaltet wird als Universalversuchsstand bezeichnet.

Am Universalversuchsstand können Messungen sowohl an Turbinen, als auch an Pumpen durchgeführt werden. Der Turbinen- und Pumpenversuchsbetrieb werden an dieser Stelle kurz beschrieben.

Unabhängig von der Betriebsweise entnimmt zunächst die Versorgungspumpe Wasser aus dem Tiefbecken und füllt damit den Unterwasserkessel. Daraufhin werden die Absperrorgane zum Tiefbecken geschlossen und das Rohrleitungssystem mit Wasser aus dem Unterwasserkessel gefüllt. Danach können die jeweiligen Versuche gestartet werden.

Im Turbinenversuchsbetrieb bringt die Versorgungspumpe das Medium auf den gewünschten Arbeitsdruck und fördert es über das Rohrleitungssystem in den Oberwasserbereich im Erdgeschoss des Gebäudes. Das Wasser wird in den Oberwasserkessel, der als Druckspeicher und -puffer dient geleitet. Daraufhin strömt das Arbeitsmedium durch die zu untersuchende hydraulische Maschine und anschließend in den Unterwasserkessel, von wo aus das Wasser zurück an die Versorgungspumpe geleitet wird.

Im Pumpenversuchsbetrieb wird die zu untersuchende hydraulische Maschine im Pumpbetrieb gestartet. Das Arbeitsmedium strömt jetzt aus dem Unterwasserkessel, durch die hydraulische Versuchsmaschine, in den Oberwasserkessel und von dort zur Energiedissipation durch eine der, jetzt im Turbinenbetrieb agierenden, Versorgungspumpen in der Pumpengrube. Nach dem Durchströmen einer der im Turbinenbetrieb arbeitenden Versorgungspumpen strömt das Wasser zurück in den Unterwasserkessel. Bei dieser Versuchsanordnung ist die Möglichkeit gegeben im Unterwasserkessel

den Druck mittels Vakuumpumpen unter das Niveau des Umgebungsdrucks abzusenken, was sich für Kavitationsuntersuchungen als zweckmäßig darstellt.

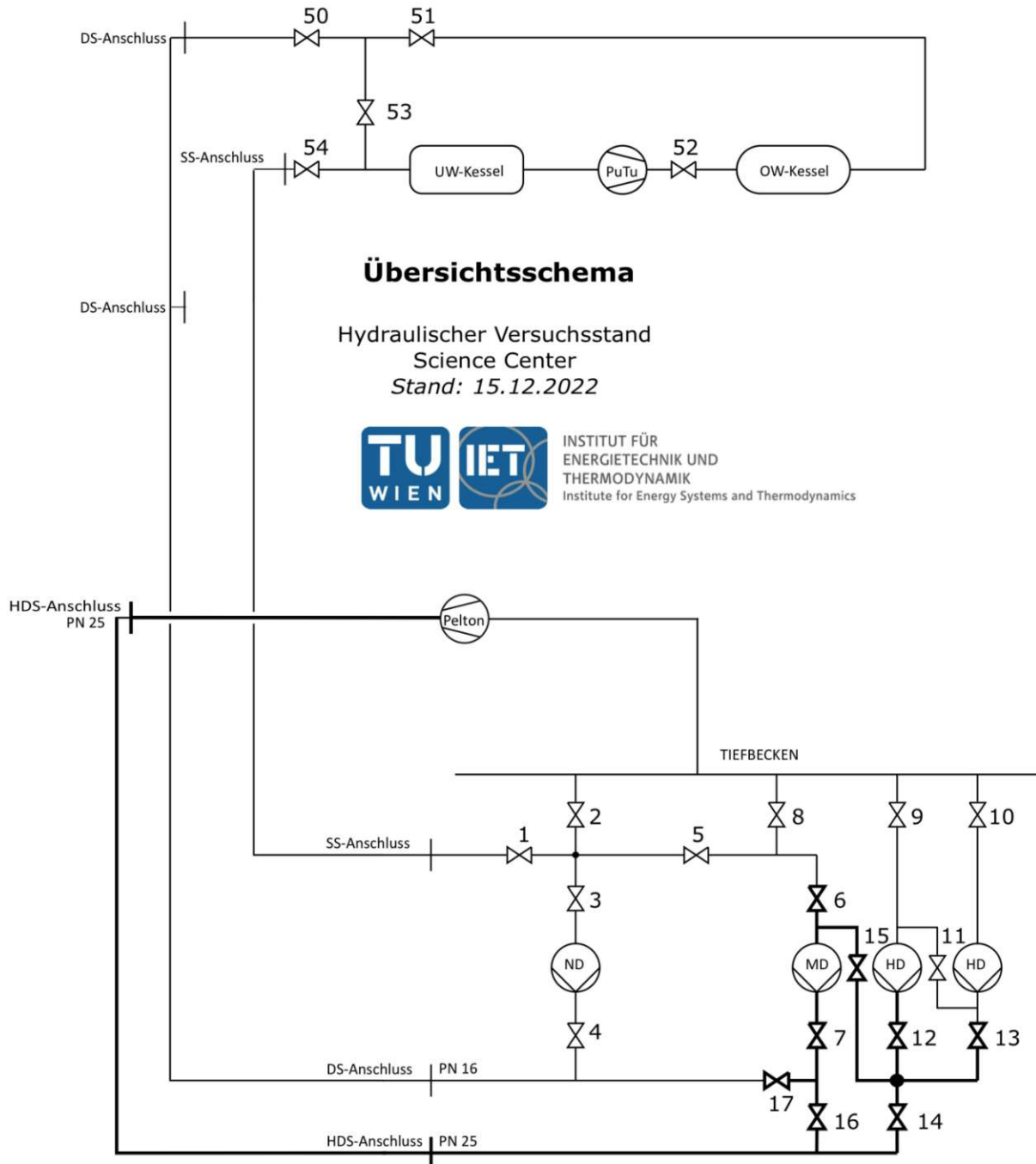


Abbildung 10: Übersichtsschema des hydraulischen Versuchsstandes am Science Center

Die für die Versuche benötigte Wasserversorgung wird von vier Versorgungspumpen, die auf verschiedene Arten parallel und in Serie geschaltet werden bereitgestellt. Bei den vier Pumpen handelt es sich um zwei Pumpen (Nenndaten: $Q_n=135 \text{ m}^3/\text{h}$, $H_n=76 \text{ m}$, $n=2900 \text{ 1/min}$) des Herstellers KSB, die im weiteren als Hochdruckpumpen bezeichnet werden. Eine Pumpe stammt vom Hersteller Vogel (Nenndaten $Q_n = 600 \text{ m}^3/\text{h}$, $H_n = 85 \text{ m}$, $n = 1475 \text{ 1/min}$), die als Mitteldruckpumpe bezeichnet wird. Die vierte Pumpe hat den Hersteller Worthington (Nenndaten: $Q_n = 1800 \text{ m}^3/\text{h}$, $H_n=36 \text{ m}$, $n= 1480 \text{ 1/min}$), welche als Niederdruckpumpe bezeichnet wird. Die Pumpendaten sind den jeweiligen Typenschildern der Maschinen entnommen. Der Antrieb der Nieder- und Mitteldruckpumpe wird über eine Drehstrom Asynchronmaschine des Herstellers Siemens mit 255 kW Antriebsleistung realisiert. Die beiden Hochdruckpumpen verfügen jeweils über eine Gleichstrom Antriebsmaschine des Herstellers ASEA mit 39,5 kW Antriebsleistung.

Im Rahmen dieser Untersuchung steht die Kennlinienaufnahme und Messung der Druckpulsationen bei Betrieb der Mitteldruckpumpe im Fokus. Die anderen Versorgungspumpen werden lediglich an dieser Stelle im Rahmen der Beschreibung des Versuchsstandes erwähnt, bei den Messungen und in der weiteren Arbeit finden keine Untersuchungen an und mit diesen statt.

Mit dem Begriff Versorgungspumpe ist in weiterer Folge stets die Mitteldruckpumpe des Herstellers Vogel (Nenndaten: $Q_n = 600 \text{ m}^3/\text{h}$, $H_n = 85 \text{ m}$, $n = 1475 \text{ 1/min}$) gemeint.

Zusätzlich zum Wasserversorgungskreislauf existieren noch weitere Kühlwasserkreisläufe, um die Temperatur des Arbeitsmediums zu regeln, sowie ein Druckölkreislauf zur Betätigung der ölhydraulischen Stelleinheiten. Auf diese Kreisläufe soll jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen werden.

Versorgungspumpe - Kreiselpumpe des Herstellers Vogel

Die Versorgungspumpe, an der Messungen im Rahmen der Diplomarbeit stattfinden, wurde im Jahre 1984 von der Pumpenfabrik Ernst Vogel GmbH gebaut und hat die Typenbezeichnung 200LCV500ENL. Es handelt sich dabei um eine Kreiselpumpe mit Nenndurchfluss von 600 Kubikmeter pro Stunde, einer Nennförderhöhe von 85 Meter und einer Betriebsdrehzahl von 1475 Umdrehungen pro Minute. Die Pumpe weist einen Laufraddurchmesser von 502 Millimeter und verfügt über 7 Laufschaufeln. Eine technische Zeichnung der Pumpe ist in *Abbildung 12* zu sehen.

Die Herstellerangabe zur QH- und Leistungskennlinie der Versorgungspumpe ist in *Abbildung 11* ersichtlich. Dabei sind je die obersten Linien für den Laufraddurchmesser von 502 Millimeter gültig.

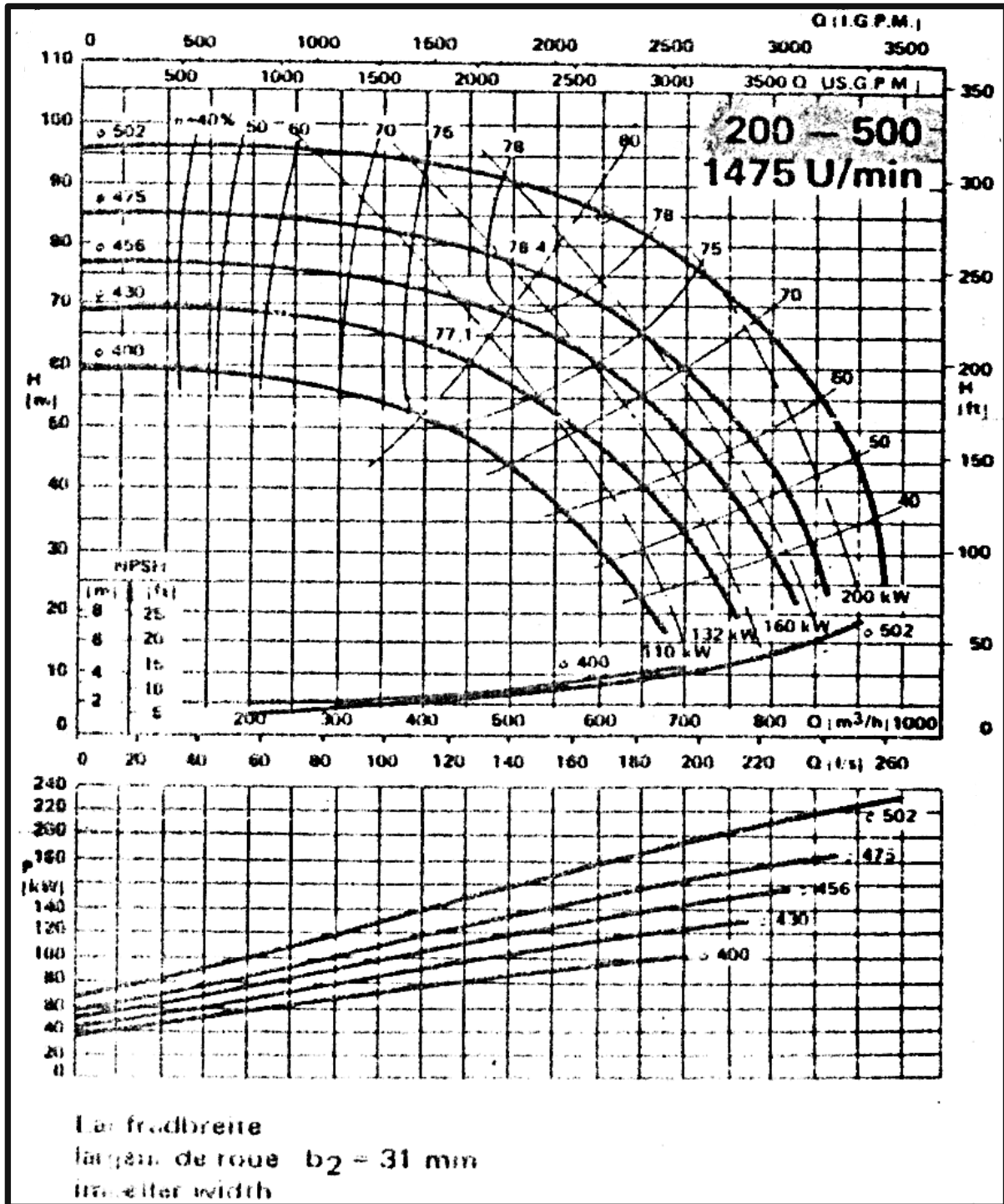


Abbildung 11: Herstellerangaben zur QH- und Leistungskennlinie der Kreiselpumpe 200LCV500ENL

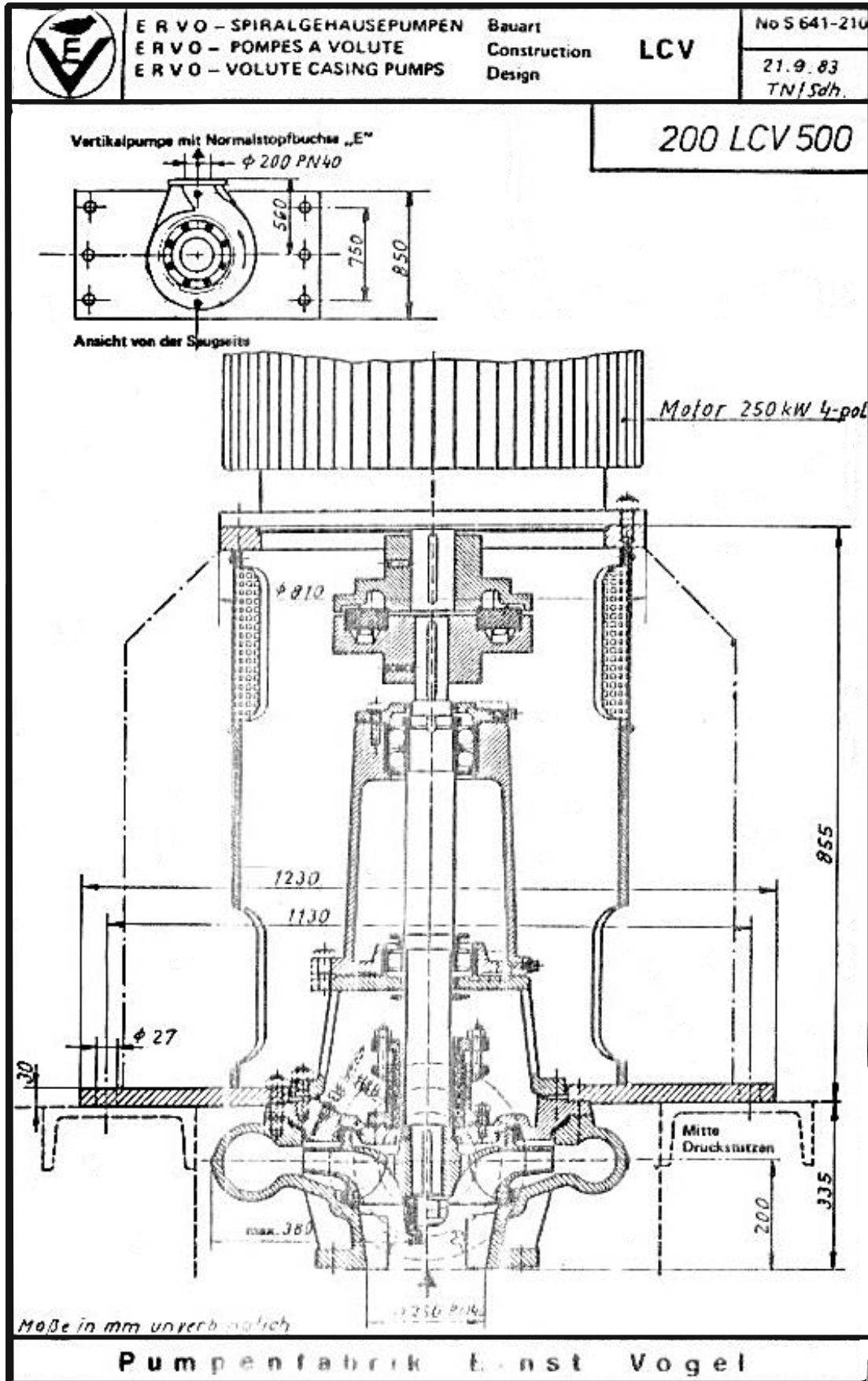


Abbildung 12: Technische Zeichnung der Kreiselpumpe "Vogel 200LCV500 ENL"

Rohrleitungssystem

Am hydraulischen Versuchsstand sind diverse Rohrleitungen mit Nenndurchmessern von 65 mm bis 500 mm verbaut. Als Werkstoffe kommen im Rohrleitungssystem die nichtrostenden Chrom-Nickel-Stähle 1.4301 und 1.4307 zum Einsatz.

Das Rohrleitungssystem kann, wie bereits bei der Beschreibung des Versuchsstandes erwähnt, in zwei Versuchsanordnungen, jene des Pelton-Turbinenversuchsstandes und jene des Universalversuchsstandes unterteilt werden. Am Pelton-Turbinenversuchsstand sind die Rohrleitungen mit Nenndurchmesser 250 mm ausgeführt und auf einen Nenndruck von 25 bar ausgelegt. Der Universalversuchsstand verfügt über ein Leitungssystem mit Nenndurchmesser 500 mm, das auf einen Nenndruck von 16 bar ausgelegt ist.

3.2 Versuchsplanung

Im Rahmen der Versuchsplanung wird ausgearbeitet, welche Messversuche zur Ausarbeitung der Fragestellungen dieser Diplomarbeit notwendig sind. Es wird entschieden, welche Versuche durchgeführt werden sollen und welche Messaufnehmer, an welchen Stellen im System, hierfür nötig sind.

Die hochfrequenten Druckpulsationen sollen zum einen am Universalversuchsstand, zum anderen am Pelton-Turbinenversuchsstand untersucht werden. Für beide Versuchsanordnungen werden die hochfrequenten Druckschwankungen vor- und nach der Versorgungspumpe, nach einigen Metern Förderstrecke in der Pumpengrube und an einer oberwasserseitigen Messtelle aufgenommen. Messreihen finden an beiden Anordnungen anhand mehrerer Drehzahlen der Versorgungspumpe statt. Parallel zur Aufnahme der hochfrequenten Druckpulsationen werden bei den Messungen am Universalversuchsstand die QH-Kennlinien der Versorgungspumpe in Abhängigkeit der Drehzahl aufgenommen und der Druckverlust von der Versorgungspumpe bis hin zum Oberwasser evaluiert.

Neben den für hohe Abtastraten geeigneten Sensoren werden weitere Druckaufnehmer vor- und nach der Versorgungspumpe implementiert, die zur Kennlinienaufnahme herangezogen werden. Es werden somit sechs Druckaufnehmer benötigt, von denen vier hochfrequent abtastbar sein müssen. Zusätzlich muss auch der an die Speicherprogrammierbare Steuerung des Versuchsstandes angebundene Druckaufnehmer nach der Versorgungspumpe verbaut bleiben, da dessen Messsignal für die Steuerung zum Betrieb der Anlage notwendig ist. Damit der Betriebspunkt der Versorgungspumpe bestimmt werden kann ist für jede Versuchsanordnung zusätzlich ein Durchflusssensor notwendig.

Es sind zwei separate Messanordnungen notwendig, um beide Versuchsanordnungen untersuchen zu können. Die beiden Versuchsanordnungen mit deren Messstellen sind in den folgenden Abschnitten 3.2.1 und 3.2.2 beschrieben, zusätzlich sind die Druckmessstellen anhand von Bildaufnahmen unter Abschnitt 3.2.3 dargestellt.

3.2.1 Versuchsanordnung 1: Pelton-Turbinenversuchsstand

Die Akquise der Messreihen startet am Pelton-Turbinenversuchsstand. Die Begründung liegt darin, dass bei dieser Versuchsanordnung bereits ein magnetinduktiver Durchflusssensor oberwasserseitig im Rohrleitungssystem verbaut ist. Dessen Messwerte werden herangezogen, um die Messgenauigkeit einer „clamp-on“ Ultraschall Durchflussmeseinheit, welche in der Pumpengrube verbaut wird, zu verifizieren. Diese Messeinrichtung, welche die Strömungsgeschwindigkeit über Laufzeitmessung eines Ultraschallsignals bestimmt, wird am Universalversuchsstand zur Durchflussmessung herangezogen. Das Schema der Versuchsanordnung mit den Messtellen ist in *Abbildung 13* dargestellt.

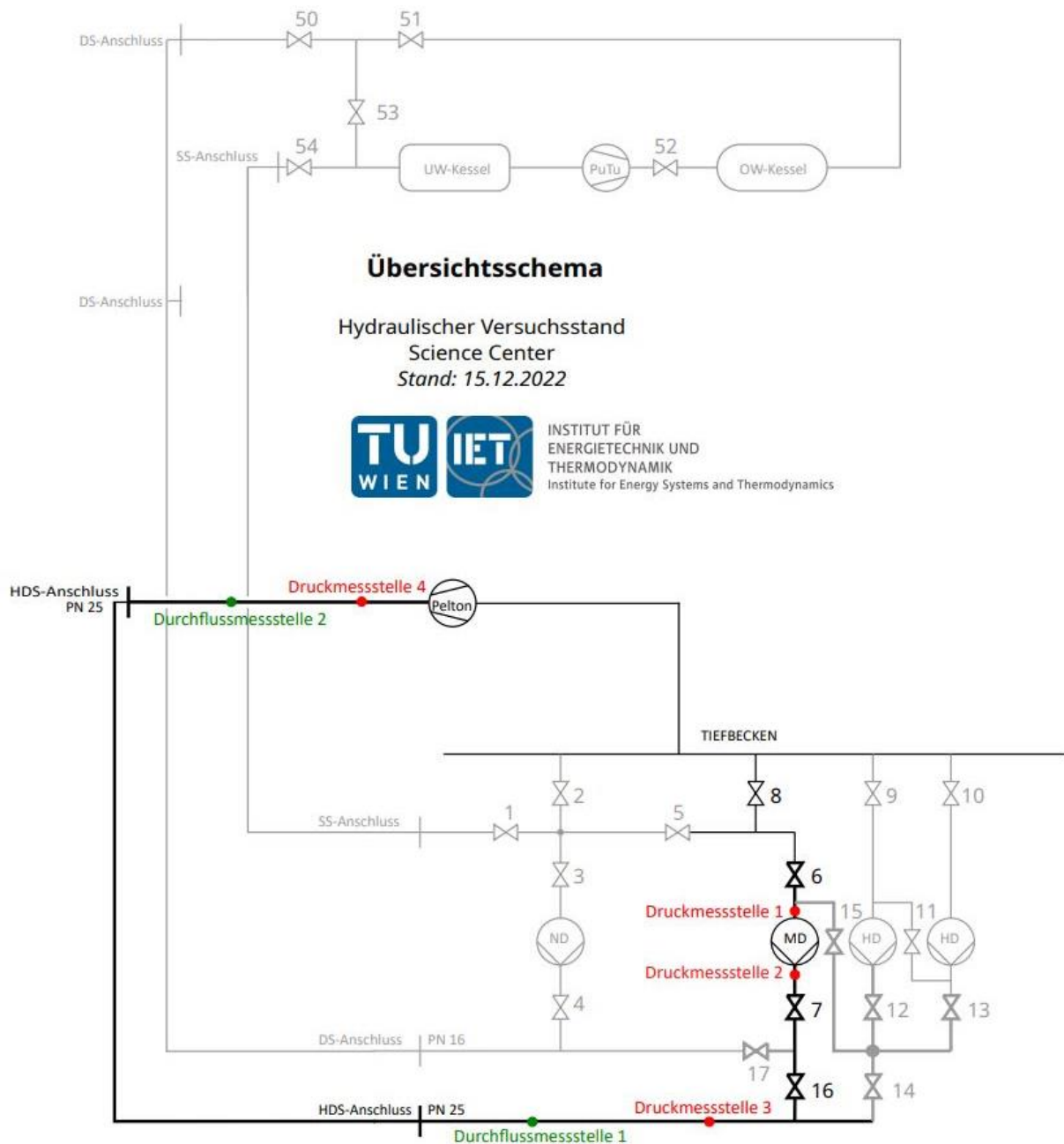


Abbildung 13: Schema des Pelton-Turbinenversuchsstands mit den geplanten Messtellen

Im Schema ersichtlich sind die in rot eingezeichneten Druckmessstellen 1 bis 4, sowie die in grün markierten Durchflussmessstellen 1 und 2. Die ausgegrauten Teile des Rohrleitungssystems werden über die entsprechende Verschaltung siehe *Tabelle 1* abgesperrt.

Absperrorgan	Zustand
6	Offen
7	Offen
8	Offen
16	Offen

Tabelle 1: Zustand der Absperrorgane für die Messreihen am Pelton-Turbinenversuchsstand

Alle nicht in der Tabelle gelisteten Absperrorgane sind verschlossen. Der Volumenstrom wird über die Nadeln der drei Düsen der Pelton-Maschine geregelt. Das Pelton-Laufrad ist nicht verbaut. Die Energiedissipation findet durch Kollision der Wasserstrahlen und deren Auftreffen am Gehäuse sowie im Auffangbecken der Pelton-Maschine statt.

Tabelle 2 gibt Aufschluss, welche Art von Sensoren an welcher Messstelle zum Einsatz kommen. Die Definition der Messstellen ist in dem in *Abbildung 13* dargestellten Schema ersichtlich. Zusätzlich sind Bildaufnahmen der Druckmessstellen unter Abschnitt 3.2.3 zu finden.

Messstelle	Bezeichnung	Art des Sensors
Druck 1	Saugseite Versorgungspumpe	Drucksensor
Druck 1	Saugseite Versorgungspumpe	Hochfrequenter Drucksensor
Druck 2	Druckseite Versorgungspumpe	Drucksensor
Druck 2	Druckseite Versorgungspumpe	Hochfrequenter Drucksensor
Druck 3	Leitungssystem Pumpengrube	Hochfrequenter Drucksensor
Druck 4	Leitungssystem Oberwasser	Hochfrequenter Drucksensor
Durchfluss 1	Durchfluss Leitungssystem Pumpengrube	Durchflusssensor Ultraschall
Durchfluss 2	Durchfluss Leitungssystem Oberwasser	Durchflusssensor Magnetinduktiv

Tabelle 2: Notwendige Sensoren am Pelton-Turbinenversuchsstand

3.2.2 Versuchsanordnung 2: Universalversuchsstand

Für die Untersuchungen am Universalversuchsstand wird dieser in einer Weise verschaltet, in der die verbaute hydraulische Versuchsmaschine nicht durchströmt wird. Dadurch entfällt zum einen der Regelungsaufwand an der Lastseite dieser Maschine. Zum anderen wird vermieden, dass die Messergebnisse durch Einflüsse der Versuchsmaschine verfälscht werden, da diese nicht im Fokus der Untersuchungen steht. Die Druckmessstellen 5 und 6 werden für die Versuche neu instrumentiert, die Druckmessstellen 1 und 2 bleiben in gleicher Weise wie beim Pelton-Turbinenversuchsstand bestehen. Der Durchfluss wird über ein im Rohrleitungssystem des Tiefbeckens (Durchflussmessstelle 3) angebrachtes „clamp-on“ Ultraschall Durchflussmessgerät ermittelt. Das Schema der Versuchsanordnung mit den Messtellen wird in *Abbildung 14* gezeigt.

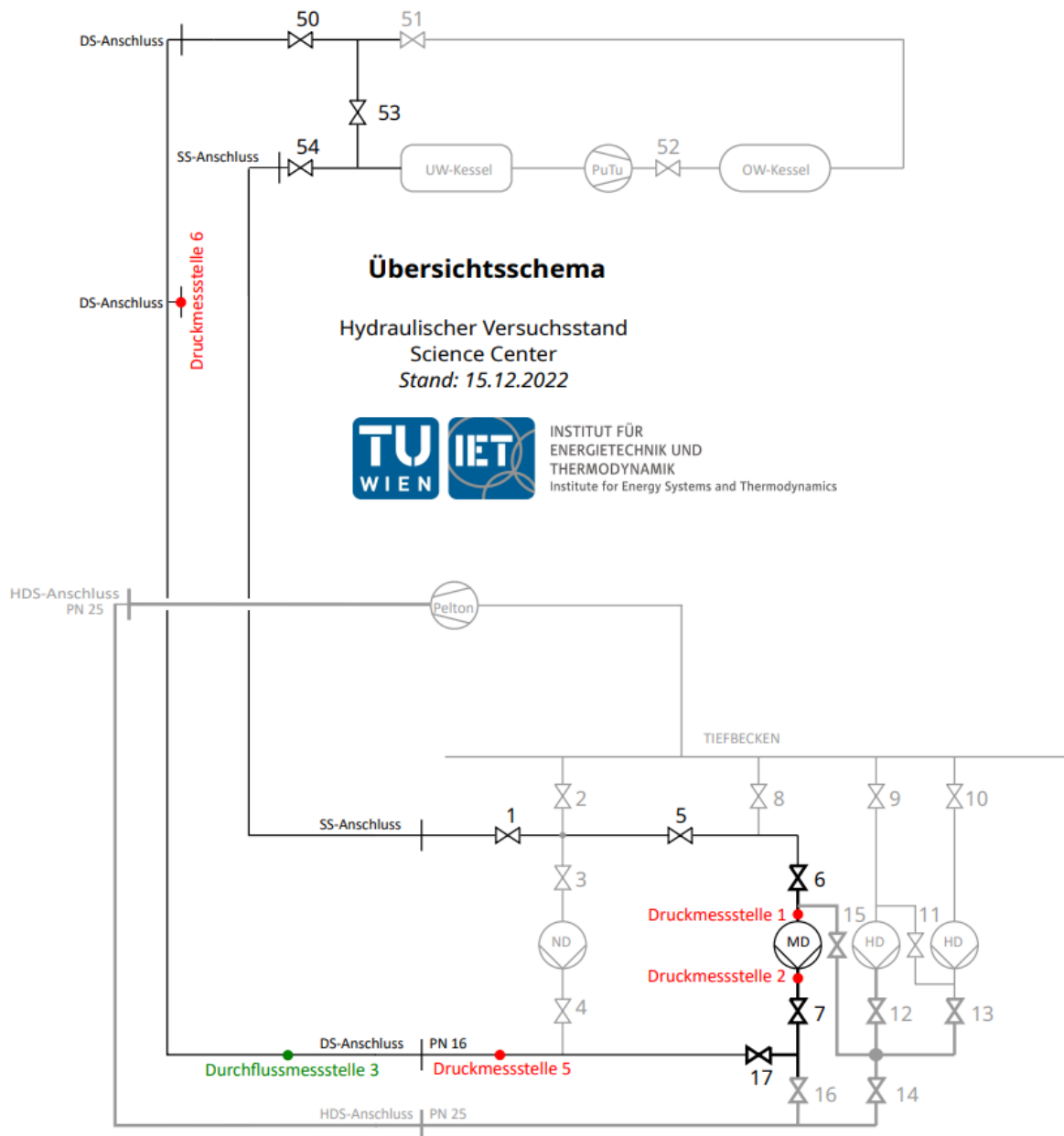


Abbildung 14: Schema des Universalversuchsstands mit den geplanten Messtellen

Im Schema ersichtlich sind die in rot markierten Druckmessstellen 1, 2, 5 und 6, sowie die in grün markierte Durchflussmessstelle 3. Die ausgegrauten Teile des Rohrleitungssystems werden über die entsprechende Verschaltung gemäß *Tabelle 3* abgesperrt.

Absperrorgan	Zustand
1	Offen
5	Offen
6	Offen
7	Offen
8	Offen
17	Offen
50	Offen
53	Geregelt
54	Offen

Tabelle 3: Zustand der Absperrorgane für die Messreihe am Universalversuchsstand

Alle anderen Absperrorgane sind verschlossen. Der Volumenstrom wird über das Ringkolbenventil 53 geregelt, durch diese Drosseleinrichtung findet die Energiedissipation statt. Durch diese Verschaltung wird es vermieden, dass die die hydraulische Versuchsmaschine durchströmt wird.

Tabelle 4 gibt Aufschluss, welche Sensoren an welcher Messtelle zum Einsatz kommen. Die Definition der Messstellen ist in dem in *Abbildung 14* dargestellten Schema ersichtlich. Zusätzlich sind Bildaufnahmen der Druckmessstellen unter Abschnitt 3.2.3 zu finden.

Messtelle	Bezeichnung	Art des Sensors
Druck 1	Saugseite Versorgungspumpe	Drucksensor
Druck 1	Saugseite Versorgungspumpe	Hochfrequenter Drucksensor
Druck 2	Druckseite Versorgungspumpe	Drucksensor
Druck 2	Druckseite Versorgungspumpe	Hochfrequenter Drucksensor
Druck 5	Leitungssystem Pumpengrube	Hochfrequenter Drucksensor
Druck 6	Leitungssystem Oberwasser	Hochfrequenter Drucksensor
Durchfluss 3	Durchfluss Leitungssystem Tiefbecken	Druchflusssensor Ultraschall

Tabelle 4: Notwendige Sensoren am Universalversuchsstand

3.2.3 Messstellenübersicht

An dieser Stelle werden die Druckmessstellen 1 - 6, wie in *Abbildung 13* und *Abbildung 14* definiert, anhand von Bildaufnahmen dargestellt.

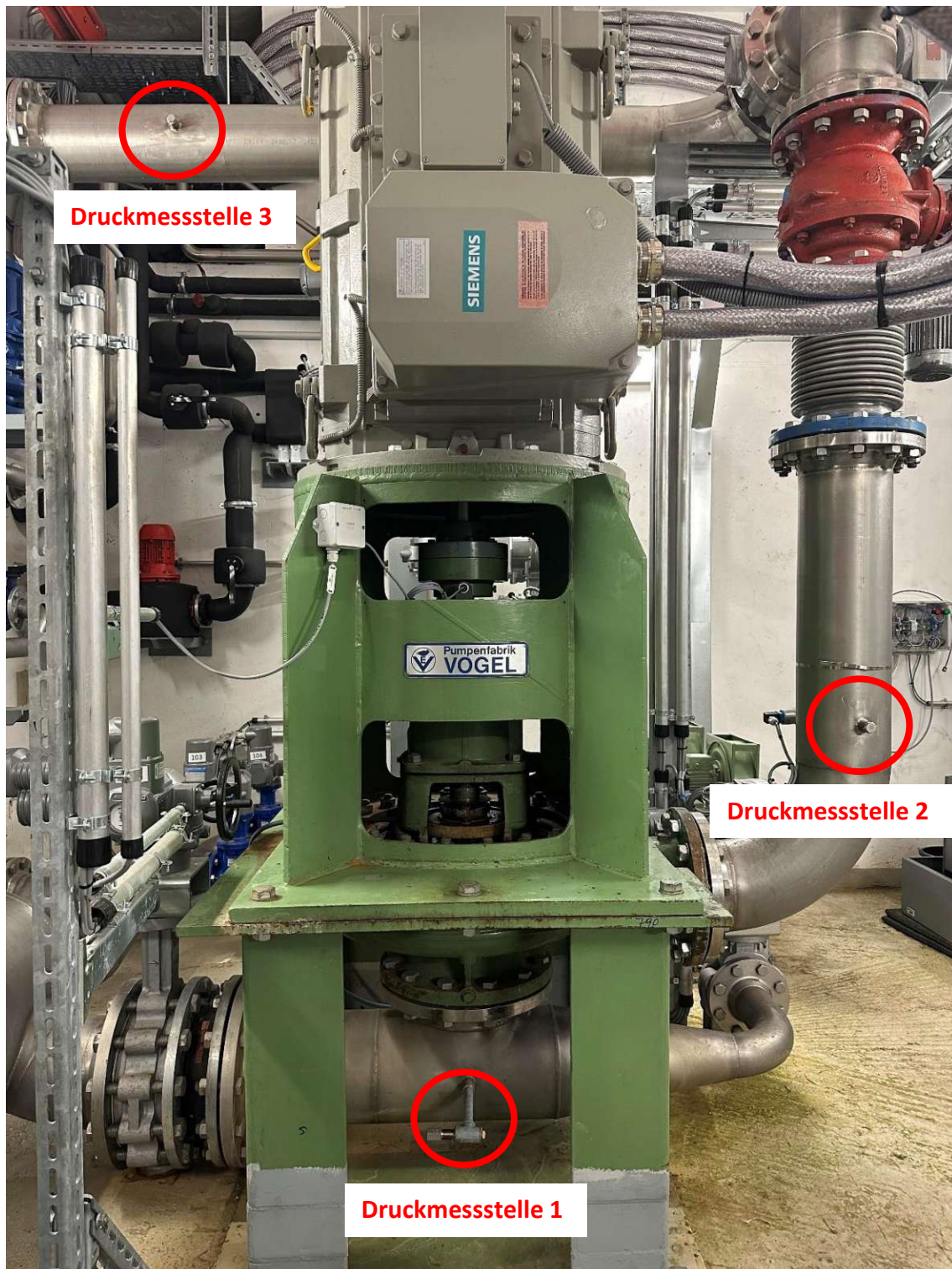


Abbildung 15: Druckmessstellen 1 und 2 an der Saug- und Druckseite der Versorgungspumpe, sowie Druckmessstelle 3 in der Pumpengrube im Rohrleitungssystem des Pelton-Turbinenversuchsstands

Abbildung 15 ist in der Pumpengrube mit Blick auf die Versorgungspumpe aufgenommen und zeigt die Druckmessstellen 1 und 2, welche sich an der Saug- und Druckseite der Pumpe befinden. Diese beiden Messstellen sind an beiden Versuchsanordnungen gleichermaßen vorhanden und weisen daher auch dieselbe Bezeichnung auf.

Darüber hinaus ist in *Abbildung 15* die Druckmessstelle 3 ersichtlich, welche als Druckmessstelle im Rohrleitungssystem des Pelton-Turbinenversuchsstandes in der Pumpengrube herangezogen wird.

Abbildung 16 ist in der Pumpengrube mit Blick von der Niederdruckpumpe aus an jene Stelle, wo die Druckseitige Versorgungsleitung des Universalversuchsstandes die Pumpengrube verlässt, aufgenommen. Es ist die Druckmessstelle 5 ersichtlich, welche als Messtelle im Rohrleitungssystem des Universalversuchsstandes in der Pumpengrube gewählt wurde.



Abbildung 16: Druckmessstelle 5 in der Pumpengrube im Rohrleitungssystem des Universalversuchsstandes

Abbildung 17 ist im Erdgeschoss der Laborhalle mit Blick auf die Rohrleitung vor der Peltonmaschine aufgenommen und zeigt die Druckmessstelle 4, welche als Druckmessstelle am Oberwasser des Pelton-Turbinenversuchsstands gewählt wurde.

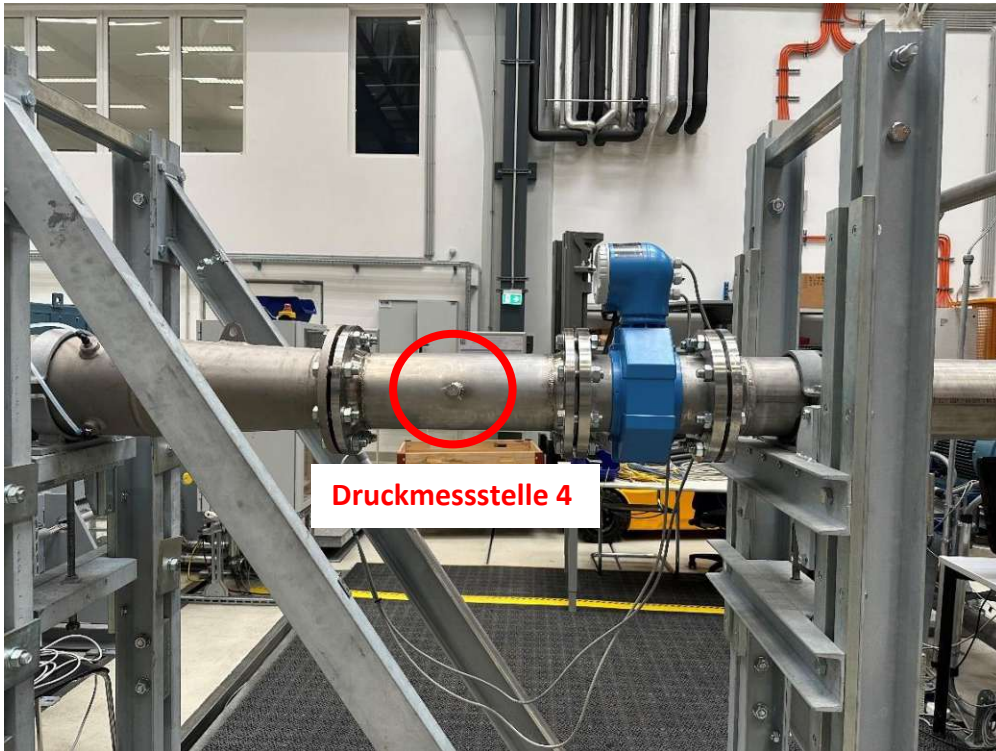


Abbildung 17: Druckmessstelle 4 am Oberwasser des Pelton-Turbinenversuchsstands

Abbildung 18 ist im Erdgeschoss der Laborhalle mit Blick auf einen Blindeckel in der Nähe des Unterwasserkessels des Universalversuchsstands aufgenommen. Es ist die Druckmessstelle 6 ersichtlich, welche als Druckmessstelle am Oberwasser des Universalversuchsstands dient.



Abbildung 18: Druckmessstelle 6 am Oberwasser des Universalversuchsstands

3.3 Anforderungen an die Versuchsdurchführung

Anforderungen an die Messtechnik

Nachdem ausgearbeitet ist, welche Messversuche stattfinden und an welchen Stellen im System Messaufnehmer positioniert werden, gilt es im Folgenden die Anforderungen an die dabei eingesetzte Messtechnik zu definieren.

Da hochfrequente Druckpulsationen im Frequenzbereich der Schaufelpassierrate erwartet werden, ergeben sich die Anforderungen an die hochfrequenten Drucksensoren aus der Bauart der Versorgungspumpe. Diese läuft mit einer maximalen Drehzahl von 1500 Umdrehungen pro Minute und deren Laufrad verfügt über 7 Laufschaufeln. Daraus lässt sich die Schaufelpassierfrequenz gemäß deren Definition in Gl. (2.2) anhand Gl. (3.1) ermitteln.

$$\frac{1500 \frac{1}{\text{min}} \times 7}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} = 175 \text{ Hz} \quad (3.1)$$

Die höchste zu erwartende Schaufelpassierfrequenz liegt also bei 175 Hertz. Damit alle Phänomene, die bei dieser Frequenz auftreten, zweckmäßig abgebildet und Aliasing-Effekte vermieden werden können, erscheint es zweckmäßig mit der mindestens 5-fachen maximal zu erwartenden Schaufelpassierfrequenz abzutasten.

Die gewählte Abtastrate liegt bei 1 kHz. Gleichmaßen muss diese Abtastrate von den Messkarten unterstützt werden.

Bei den hochfrequenten Drucksensoren geht es in erster Linie darum, dass die dynamischen Effekte ausreichend abgebildet werden können. Zur Aufnahme der QH-Kennlinien wird keine allzu hohe Abtastrate benötigt, bei den dabei eingesetzten Sensoren steht in erster Linie die möglichst hohe Messgenauigkeit im Fokus. Da die Aufnahme der QH-Kennlinien parallel zur Messung der hochfrequenten Druckpulsationen durchgeführt wird, findet diese mit derselben Abtastrate statt.

Anforderungen an die Software zur Datenakquise und -auswertung

Die Software zur Akquise der Messdaten muss in der Lage sein alle Sensoren mit der geforderten Frequenz abzutasten und die Daten einlesen zu können. Die Daten müssen in Form einer Tabelle oder ähnlich für jeden Messpunkt abgespeichert werden können. Die Software zur Datenauswertung muss fähig sein, die vorliegenden Messdaten in jenem Format einzulesen.

Zur Ermittlung der diversen Kennlinien müssen an jedem Betriebspunkt die Mittelwerte der Druckaufnehmer und des Durchflusssensors ermittelt werden. Die dabei evaluierten Mittelwerte müssen rechnerisch verarbeitet werden, um in weiterer Folge graphisch als Kennlinien ausgegeben zu werden.

Schließlich gilt es noch für ausgewählte Betriebspunkte die Messwerte der mit hochfrequent abtastbaren Sensoren ausgestatteten Messtellen einer Fouriertransformation zu unterziehen und die ermittelten Spektren graphisch auszugeben, damit eine Interpretation der hochfrequenten Druckpulsationen und deren Ausbreitung im Rohrleitungssystem vorstatten gehen kann.

Zeitliche Anforderungen an die Versuchsdurchführung

Die notwendige Messdauer je Betriebspunkt ergibt sich zum einen aus einer geforderten Mindestanzahl an Messwerten, die in die Mittelung zur Ermittlung des Betriebspunktes einhergehen. Die Messdauer zur Betriebspunktermittlung wird mit 20 Sekunden festgelegt. Die Messdauer zur Ermittlung der hochfrequenten Druckpulsationen ergibt sich aus der geforderten Frequenzauflösung nach der Fouriertransformation.

Unter der Frequenzauflösung ΔF versteht man den Abstand zwischen den im Spektrum als eigenständige Amplituden unterscheidbaren Frequenzen. Diese ist anhand Gl. (3.2) bei definierter Abtastrate invers proportional zur Messdauer T in Sekunden. [12]

$$\Delta F = \frac{1}{T} \quad (3.2)$$

Somit muss sich für die erwünschte Frequenzauflösung, welche mindestens 0,1 Hertz beträgt, die Messdauer über mindestens 15 Sekunden erstrecken.

Kapitel 4: Instrumentierung und Software

Unter Kapitel 4 wird die Instrumentierung des Versuchsstandes, sowie die Software zu Akquise und Verarbeitung der Messdaten beschrieben. Im Rahmen der Instrumentierung werden die Messtechnik, welche aus Sensoren, Messverstärkern und -karten besteht, sowie die am Versuchsstand notwendigen Adapter, beschrieben. Im Anschluss wird der Prozess der Instrumentierung beleuchtet. Ebenso erfolgt eine Beschreibung, welche Software zum Einsatz kommt und die Vorgehensweise bei der Datenverarbeitung wird erläutert.

Die gesamte verwendete Messtechnik ist unter *Anhang B* aufgelistet. Das Script zur Auswertung in MATLAB als auskommentierter Programmcode, sowie weitere Informationen zur eingesetzten Software sind unter *Anhang C* zu finden. Die technischen Zeichnungen der angefertigten Adapterstücke befinden sich unter *Anhang F*.

4.1 Messtechnik

Unter dem Abschnitt der Messtechnik werden die Sensoren, die für die Messreihen am Versuchsstand verbaut werden, beschrieben. Es werden die Messprinzipien, Messbereiche und Messungenauigkeiten der Sensoren beleuchtet. Des Weiteren werden die zum Einsatz kommenden Messverstärker, Messkarten und Messchassis beschrieben und das Schaltschema der Messtechnik wird dargestellt.

4.1.1 Sensoren

Nachdem im Rahmen der Versuchsplanung geklärt wurde, welche Messversuche durchgeführt werden und wo im System Sensoren platziert werden sollen, wird im Folgenden beschrieben, welche Sensoren hierfür Verwendung finden.

Hochfrequent abtastbare Drucksensoren

Wie unter den Anforderungen im Rahmen der Versuchsplanung erläutert müssen die hochfrequent abtastbaren Sensoren in der Lage sein die dynamischen Druckänderungen mit einer Abtastrate von zumindest 1 kHz abzutasten. Die Sensorbaureihe 4075A des Herstellers Kistler, welche für Messungen hochdynamischer Vorgänge beim Gaswechsellvorgang sowie der Einspritzdruckmessung an Verbrennungsmotoren entwickelt wurde, erfüllt diese Anforderungen. Der Sensor, welcher sich das piezoresistive Messverfahren zunutze macht, wird über einen kalibrierten Konstantstrom gespeist. Daraus entsteht ein druckproportionales Ausgangssignal im Millivolt Bereich. Gemessen wird der Absolutdruck, was den Wert des atmosphärischen Luftdrucks zum Zeitpunkt der Messung mit in das Messsignal einfließen lässt. Die Sensoren sind gegen thermische Effekte in einem gewissen Temperaturbereich kompensiert. Für die Sensorbaureihe 4075A reicht der temperaturkompensierte Betriebsbereich von 25-120 Grad Celsius. Die Herstellerangaben zur Messgenauigkeit, gültig innerhalb des Temperaturkompensierten Betriebsbereichs, sind anhand Tabelle 5 dargelegt.

Linearität in %	0,3%**
Thermische Nullpunktänderung in %	<0,5%**
Thermische Empfindlichkeitsänderung in %	<1%

Tabelle 5: Herstellerangaben zur Genauigkeit der Kistler 4075A10 Sensoren

Die Linearität ist ein Maß dafür, welche Ausmaße der maximale Fehlerwert zwischen dem Ist-Wert und dem Messwert beläuft. Die thermischen Einflussfaktoren fassen den Einfluss von Temperaturschwankungen auf die Messgenauigkeit zusammen. Mit ** markierte Kennwerte sind prozentuell auf das Ende des Messbereichs, also den größtmöglichen messbaren Wert des Sensors bezogen. Alle in diesem Abschnitt angegebenen Daten zur Kistler 4075A Sensorbaureihe sind [13] entnommen.

Von diesen hochfrequent abtastbaren Sensoren kommen vier Stück mit einem Messbereich von 0-10 bar an den Messstellen vor- und nach der Versorgungspumpe, in der Pumpengrube und am Oberwasser zum Einsatz.

Prozessdrucksensoren

In Besitz des Institutes für Energietechnik befinden sich ebenso Sensoren des Typs CERABAR PMP71B des Herstellers Endress Hauser, die für präzise Messungen von Prozessdrücken und Füllständen zum Einsatz kommen. Der Messbereich reicht dabei von -1 bar bis 40 bar. Es handelt sich bei dem Sensor um einen Relativdruckaufnehmer, was bedeutet, dass das Messsignal vom atmosphärischen Umgebungsdruck unabhängig ist. Der Sensor bedient sich dem piezoresistiven Messprinzip, die Energieversorgung des Sensors wird über ein Netzteil umgesetzt. Das 4 mA bis 20 mA Messsignal wird nicht durch eine Sensorinterne Schaltung generiert sondern entsteht passiv, das bedeutet über eine Messkarte wird der gesamte druckproportionale Strombedarf des Sensors gemessen (siehe elektrisches Schaltschema *Abbildung 19* unter Kapitel 4.1.4). Die Herstellerangaben zur Messgenauigkeit sind anhand *Tabelle 6* dargelegt.

Referenzgenauigkeit	0,05%
Haupttemperaturfehler	<0,33%
Elektronikfehler für 4-20 mA Ausgang	<0,05%

Tabelle 6: Herstellerangaben zur Genauigkeit des Endress Hauser CERABAR PMP71B Drucksensors

In die Feststellung der Referenzgenauigkeit fließen Linearitätsfehler, die Druckhysterese und die Wiederholbarkeit der Messungen ein. Die Referenzgenauigkeit des Sensors ist gemäß der Normen IEC 62828-1 und IEC 61298-2 ermittelt.

Sämtliche Daten unter diesem Abschnitt zur Endress Hauser CERABAR PMP71A Sensorbaureihe sind [14] entnommen.

Zur Akquise der Messdaten für die QH-Kennlinie kommen zwei dieser Sensoren zum Einsatz. Einer wird an der Druckseite und ein weiterer an der Saugseite der Versorgungspumpe angebracht. Der Druckaufnehmer am Saugrohr dient zusätzlich auch um abzuschätzen, ob an einem bestimmten Betriebspunkt Kavitationseffekte das Messergebnis beeinflussen könnten.

Magnetinduktiver Durchflusssensor

Im Rohrleitungssystem des Pelton-Turbinenversuchsstandes ist ein Durchflusssensor Promag 300 des Herstellers Endress Hauser verbaut. Das Messprinzip des Sensors basiert auf der magnetinduktiven Durchflussmessung. Der Messbereich des Sensors erstreckt sich über Durchflüsse von 20 m³/h bis 600 m³/h. Das Messsignal wird als aktiver 4 mA bis 20 mA Ausgang über eine sensorinterne Schaltung erzeugt. Die Herstellerangaben zur Messgenauigkeit sind anhand *Tabelle 7* dargelegt.

Maximale Messabweichung (Strömungsgeschwindigkeit)	0,5%* +- 1 mm/s
Wiederholbarkeit	0,1%* +- 0,5 mm/s
Genauigkeit des Stromausgangs	+ - 5 µA

Tabelle 7: Herstellerangaben zur Genauigkeit des Endress Hauser Promag 300 Durchflusssensors

Mit * markierte Kennwerte sind prozentuell auf den aktuell angegebenen Messwert bezogen. Die Angaben zur Promag 300 Sensorbaureihe des Herstellers Endress Hauser sind [9] entnommen.

Ultraschall Durchflusssensor

Am Universalversuchsstand kommt ein „clamp-on“ Ultraschall Durchflussmessgerät, welches im Besitz des Institutes für Energietechnik ist, zur Durchflussmessung zum Einsatz. Dieses Durchflussmessgerät, das den Durchfluss über Laufzeitmessung von Ultraschallsignalen ermittelt, hat die Typenbezeichnung FLUXUS F601 und stammt vom Hersteller Flexim. Der Messbereich beläuft sich auf Strömungsgeschwindigkeiten von 0,01 m/s bis 25 m/s. Die zum Einsatz kommenden Ultraschall-Messköpfe haben die Typenbezeichnungen CDQ1NZ7 für die Rohrleitung des Pelton-Turbinenversuchsstand und CDK1NZ7 für den Universalversuchsstand. Es kommen unterschiedliche Messköpfe zum Einsatz, da diese für den jeweiligen Rohrlungsdurchmesser besser geeignet sind. Die Messaufnehmer werden, ohne Eingriff ins Leitungssystem, an der Außenseite der entsprechenden Rohrleitung montiert. Das Messsignal wird als aktiver 4 mA bis 20 mA Ausgang über eine im Messgerät integrierte Schaltung erzeugt. Die Herstellerangaben zur Messgenauigkeit sind anhand *Tabelle 8* dargelegt.

Messunsicherheit des Messsystems	0,3%* +- 0,5 mm/s
Messunsicherheit an der Messstelle	1,0%* +- 0,5 mm/s
Wiederholbarkeit	0,15%* +- 0,5 mm/s
Genauigkeit des Stromausgangs	0,04%* +- 3 µA

Tabelle 8: Herstellerangaben zur Genauigkeit des Flexim FLUXUS F601 Durchflussmessgerätes

Mit * markierte Kennwerte sind prozentuell auf den aktuell angegebenen Messwert bezogen. Die Messunsicherheit des Messsystems bezieht sich auf die Kalibriergenauigkeit der Sensoren, die Messunsicherheit an der Messstelle grenzt den Messfehler des Laufzeitdifferenzverfahrens ein. Die Ausführungen unter diesem Abschnitt zum Flexim FLUXUS F601 Messsystem sind [11] entnommen.

Übersicht der Sensoren anhand der Messstellen

Tabelle 9 und Tabelle 10 stellen eine Auflistung der verwendeten Sensoren anhand der Messstellen für den Pelton-Turbinenversuchsstand, sowie den Universalversuchsstand dar. Es wird neben der Typenbezeichnung auch die Sensornummer angegeben und eine Nomenklatur für jeden Sensor in den Messdaten definiert. Diese Nomenklatur der Sensormesswerte geht in die tabellarische Auflistung der Messwerte unter *Anhang D* ein. Die Messstellen sind anhand der Schemata in *Abbildung 13* und *Abbildung 14* unter Abschnitt 3.2.1 und Abschnitt 3.2.2 definiert, sowie zusätzlich unter Abschnitt 3.2.3 in Form von Bildaufnahmen angeführt.

Messtelle	Hersteller	Bezeichnung	Seriennummer	Nomenklatur
Druck 1	Kistler	4075A10	5976468	Kistler_SS
Druck 1	Endress Hauser	CERABAR PBP71B	T502B801198	EH_SS
Druck 2	Kistler	4075A10	4612816	Kistler_DS
Druck 2	Endress Hauser	CERABAR PBP71B	T502B801198	EH_DS
Druck 3	Kistler	4075A10	4612815	Kistler_PG
Druck 4	Kistler	4075A10	4855850	Kistler_OW
Durchfluss 1	Flexim	CDQ1NZ7	146732	DSS_US
Druchfluss 2	Endress Hauser	Promag 300	R2246E19000	DSS_EH

Tabelle 9: Sensoren anhand der Messstellen am Pelton-Turbinenversuchsstand

Messtelle	Hersteller	Bezeichnung	Seriennummer	Nomenklatur
Druck 1	Kistler	4075A10	5976468	Kistler_SS
Druck 1	Endress Hauser	CERABAR PBP71B	T502B801198	EH_SS
Druck 2	Kistler	4075A10	4612816	Kistler_DS
Druck 2	Endress Hauser	CERABAR PBP71B	T052B701198	EH_DS
Druck 5	Kistler	4075A10	4612815	Kistler_PG
Druck 6	Kistler	4075A10	4855850	Kistler_OW
Durchfluss 3	Flexim	CDK1NZ7	144854	DSS_US

Tabelle 10: Sensoren anhand der Messstellen am Universalversuchsstand

4.1.2 Messverstärker

Verstärker der hochfrequent abtastbaren Kistler Drucksensoren

Jeder der eingesetzten Kistler 4075A10 Drucksensoren wird zusammen mit einem eigenen, auf diesen abgestimmten, Messverstärker des Typs 4618A am Versuchsstand verbaut. Diese Messverstärker sorgen zum einen für die Speisung des Drucksensors mit einem Konstantstrom und verstärken zum anderen die von den Sensoren ankommenden Signal im Millivolt Bereich auf ein Ausgangssignal von 0 V bis 10 V, welches dann mittels Messkarten digitalisiert werden kann. Die Herstellerangaben zur Genauigkeit des Messverstärkers, gültig für einen Betriebsbereich mit Temperaturen zwischen 0 °C und 60 °C, sind unter *Tabelle 11* gelistet.

Kalibrierfehler (Nullpunkt & Empfindlichkeit)	<0,2%**
Thermische Nullpunktänderung in %	<0,5%**
Thermische Empfindlichkeitsänderung in %	<0,2%**

Tabelle 11: Herstellerangaben zur Genauigkeit des Kistler 4618A Messverstärkers

Der Kalibrierfehler gibt an, mit welcher Genauigkeit die Kalibrierung Verstärker und Sensor umgesetzt wird. Mit ** markierte Kennwerte sind prozentuell auf das Ende des Messbereichs, also den größtmöglichen messbaren Wert des Sensors bezogen. Die unter diesem Abschnitt dargestellten Kennwerte zum Messverstärker des Typs 4618A sind [15] entnommen.

4.1.3 Messkarten

Es kommen zur Analog- Digitalwandlung der Messsignale insgesamt drei Messkarten zum Einsatz. Alle Messkarten stammen vom Hersteller National Instruments. Es handelt sich dabei um eine Spannungs-, eine Strom-, sowie eine Universalmesskarte. Für die Werte der Messunsicherheiten ist stets der nicht kalibrierte Fall angegeben.

Spannungsmesskarte NI9215

Bei der Spannungsmesskarte handelt es sich um das Modell NI9215. Diese verfügt über 4 Analoge Differenzspannungseingänge zwischen -10 V und 10 V. Die Genauigkeit der Messkarte beläuft sich bei Temperaturen zwischen 18 °C und 28 °C auf Werte gemäß Tabelle 12.

Empfindlichkeitsfehler in % des Signalwertes	+/-0,6%
Nullpunktfehler in % des Messbereichs (+/-10,4 V)	+/-0,38%

Tabelle 12: Herstellerangaben zur Genauigkeit der NI9215 Differenzspannungsmesskarte

Die gelisteten Daten zur Messkarte NI9215 sind [16]entnommen.

Strommesskarte NI9203

Bei der Spannungsmesskarte handelt es sich um das Modell NI9203. Diese verfügt über 8 Analoge Stromeingänge zwischen -20 mA und 20 mA. Alle Kanäle teilen sich einen gemeinsamen COM-Anschluss. Das hat zur Folge, dass sofern die Messsignale mehrere Sensoren über diese Messkarte ausgewertet werden sollen, das nur das nur bei Sensoren möglich ist, die das Stromsignal passiv als deren gesamte Stromaufnahme in Abhängigkeit der Messgröße ausgeben. Die Genauigkeit der Messkarte beläuft sich bei Temperaturen zwischen 20 °C und 30 °C auf Werte gemäß Tabelle 13.

Empfindlichkeitsfehler in % des Signalwertes	+/-0,54%
Nullpunktfehler in % des Messbereichs (21,4 mA)	+/-0,55%

Tabelle 13: Herstellerangaben zur Genauigkeit der NI9203 Strommesskarte

Die gelisteten Daten zur Messkarte NI9203 sind [17]entnommen.

Universalmeßkarte NI9219

Bei der Universalmeßkarte handelt es sich um das Modell NI9219. Diese verfügt über vier Analoge Kanäle mit jeweils 6 Eingängen, welche neben Strom- und Spannungsmessungen auch Thermoelemente oder Dehnmessstreifen auswerten können. Weitere Anwendungsmöglichkeiten dieser Meßkarte sind deren Datenblatt zu entnehmen. Bei Strommessungen, für welche diese Meßkarte zum Einsatz kommt liegt der Meßbereich zwischen -25 mA und 25 mA. Diese Meßkarte hat den Vorteil, dass jeder der vier Analogen Kanäle über einen eigenen COM Anschluss verfügt. Das erlaubt es dieser Meßkarte bis zu vier Sensoren, die deren Meßsignal als aktiven Stromausgang aussenden, parallel auszuwerten. Die Genauigkeit der Meßkarte beläuft sich bei Temperaturen zwischen 20 °C und 30 °C auf Werte gemäß Tabelle 14.

Empfindlichkeitsfehler in % des Signalwertes	+/-0,1%
Nullpunktfehler in % des Meßbereichs (+/-25 mA)	+/-0,03%

Tabelle 14: Herstellerangaben zur Genauigkeit der NI9219 Universalmeßkarte

Die gelisteten Daten zur Meßkarte NI9219, sowie weitere Ausführungen zu dieser sind in [18] zu finden.

Meßkartenchassis NI-CompactDAQ-9185

Beim Chassis der Meßkarten, welches die Meßkarten mit Spannung versorgt, die Abtastung derer Eingänge koordiniert und die Kommunikation mit dem Rechner zur Auswertung ermöglicht, handelt es sich um das NI-cDAQ-9185 des Herstellers National Instruments. Dieses ist über einen Ethernet Anschluss in des lokale Netzwerk am Versuchsstand eingebunden. [19]

4.1.4 Elektrisches Schaltschema der Messtechnik

Abbildung 19 auf der Folgeseite stellt dar, wie die unter diesem Kapitel vorgestellte Messtechnik am Versuchsstand elektrisch verschalten ist. Die Sensoren sind gemäß der unter Kapitel 4.1 eingeführten Nomenklatur gekennzeichnet und alle Netzteile, Meßkarten, Meßverstärker, Meßumformer sowie das Meßchassis sind beschriftet. Die Verkabelung zwischen den Komponenten ist dabei anhand der in der Abbildung unten eingeblendeten Farblegende hinsichtlich derer Funktion gekennzeichnet.

Die Spannungsversorgung der Messtechnik ist über einen Stromkreis, welcher keine sonstigen Verbraucher beinhaltet, umgesetzt. Zusätzlich ist ein Potentialausgleich über eine Erdungsleitung zwischen dem Netzteil in der Pumpengrube, dem Meßchassis und dem Rohrleitungssystem der Pumpengrube ausgeführt.

4.2 Adapter

An dieser Stelle soll beschrieben werden, inwiefern der Versuchsstand mittels Adapter angepasst werden muss damit die geforderten Sensoren an den gewünschten Stellen am Versuchsstand appliziert werden können.

Am Versuchsstand sind an messtechnisch interessanten Stellen bereits einige Anschweißmuffen mit ½-Zoll Anschlüssen mit Rohrgewinde nach ISO 228 vorhanden, an welchen Sensoren angebracht werden können. Die Drucksensoren des Herstellers Endress Hauser werden mit ½-Zoll Gewindeanschluss nach ISO 228 ausgeliefert, jene des Herstellers Kistler weisen aufgrund deren kompakterer Bauweise einen M12 x 1 Anschluss auf. Daher muss für die Kistler Drucksensoren ein Adapterstück konstruiert und angefertigt werden, damit diese am Versuchsstand instrumentiert werden können. Eine vorhandene Konstruktion des Institutes für Energietechnik wird dabei dahingehend überarbeitet, dass der Sensor tiefer eingeschraubt werden kann und somit der Messaufnehmer plan an der Rohrrinnenwand anliegend platziert werden kann. Alle im Versuchsstand verwendeten Kistler Sensoren werden zusammen mit diesen Adapterstücken verschraubt.

In der Pumpengrube muss am Saugrohr der Versorgungspumpe, um zwei Sensoren an nur einer vorhandenen Anschlussstelle implementieren zu können ein ½-Zoll T-Stück angebracht werden, das wegen dem beschränkten Einbauraum zusätzlich mit einem ½-Zoll Verlängerungsstück von etwa 200 Millimetern Länge versehen werden muss. Auch an der Druckseite der Versorgungspumpe muss ein ½-Zoll T-Stück angebracht werden, da auch hier für die drei zu implementierenden Sensoren nur zwei Messanschlüsse existent sind. Damit eine oberwasserseitige Messung am Pelton-Turbinenversuchsstand stattfinden kann, wird ein Messanschluss in Form einer Anschweißmuffe konstruiert und im Rohrleitungssystem verschweißt. An dieser Stelle ist ursprünglich kein verwendbarer Messanschluss vorhanden. Damit dieser Messanschluss im Nachgang wieder verschlossen werden kann, wird eine Verschlusschraube konstruiert. Am oberwasserseitigen Messanschluss des Universalversuchsstands ist ein Anschluss mit Rohrgewinde nach ISO 228 vorhanden, jedoch mit Gewindeabmaß von einem Zoll. Für diesen Anschluss wird ein Zoll auf ½-Zoll Adapterstück benötigt.

Für die weiteren Drucksensoren sind keine Umbauten notwendig. Sowohl für die Messungen am Rohrleitungssystem des Pelton-Turbinenversuchsstandes als auch an jenem des Universalversuchsstandes existieren hier ½-Zoll Messanschlüsse, die genutzt werden können.

Aufgrund der Gefahr, dass sich Adapterstücke der Kistler Drucksensoren nach Abschluss der Messreihen aufgrund von Kontaktkorrosion nicht mehr zerstörungsfrei aus dem Versuchsstand ausbauen lässt, werden sogenannte Dummies gefertigt. Dabei handelt es sich um funktionslose Dreh- und Frästeile, welche dieselben Abmessungen wie die Kister Drucksensoren aufweisen. Diese können dann anstelle der Kistler Drucksensoren in den Adapterstücken verschraubt werden, um die Messtellen wieder zu verschließen. Dadurch können die Druckaufnehmer nach Abschluss der Messreihen sicher wieder ausgebaut werden, was diese für andere Projekte einsatzbereit hält. Diese Dummies werden auf Basis einer Zeichnung des Institutes für Energietechnik gefertigt.

Eine Auflistung aller verwendeten Adapterstücke findet sich in *Tabelle 15*. Die technischen Zeichnungen der angefertigten Adapterstücke sind unter *Anhang F* zu finden.

Anzahl	Hersteller	Bezeichnung	Norm	Material
2	-	½ Zoll T-Stück	ISO 228	Messing, vernickelt
1	-	½" Verlängerungsstück 200mm	ISO 228	Messing, vernickelt
1	-	1 Zoll auf ½ Zoll Adapter	ISO 228	Messing, vernickelt
4	Eigenfertigung	Kistler-Adapter	-	1.4301
1	Eigenfertigung	Gewindemuffe	ISO 228	1.4301
4	Eigenfertigung	Kistler-Dummy	-	1.4301
1	Eigenfertigung	Verschlusschraube	-	1.4301

Tabelle 15: Auflistung aller verbauten Adapterstücke

4.3 Prozess der Instrumentierung

Im Rahmen der Instrumentierung findet neben der Implementierung der Sensoren mit den jeweiligen Adapterstücken auch die Verkabelung der Sensoren statt. Die Sensoren werden, sofern nötig, mit Messverstärkern verbunden und danach an die Messkarten angeschlossen. Die Messkarten sind über eine LAN-Verbindung an das Netzwerk des Versuchstandes angebunden. Die elektrische Verschaltung der Messtechnik ist unter Kapitel 4.1.4 in *Abbildung 19* zu finden.

Zur Instrumentierung des Pelton-Turbinenversuchsstandes werden die Absperrorgane zum Tiefbecken geschlossen und die Bildverschlüsse der Messstellen am Versuchstand geöffnet, um die Rohrleitungen zu entleeren. Ein oberwasserseitiger Rohrleitungsabschnitt am Pelton-Versuchsstand wird ausgebaut und die Gewindemuffe, welche als zusätzlicher Messanschluss dient, wird eingeschweißt. Diese Anschweißmuffe wird an dem Rohrstück mittig in der horizontalen Halbebene angebracht. Die Anbringung wird mittig in der horizontalen Halbebene gewählt, um Messungenauigkeiten aufgrund von Luftblasen im oberen Bereich der Rohrleitung und wegen Schmutzablagerungen im unteren Bereich der Rohrleitung bestmöglich zu verhindern. Die ½-Zoll T-Stücke werden an der Saug- und Druckseite der Pumpe in der Pumpengrube angebracht. An der Saugseite wird zusätzlich ein halbzölliges Verlängerungsstück von 200 Millimeter Länge implementiert, da andernfalls der Endress Hauser Drucksensor CERABAR PMP71B aufgrund dessen Baugröße nicht eingeschraubt werden kann. Es werden die eigens angefertigten Adapterstücke für die Kistler Druckaufnehmer an allen Messstellen, wo hochfrequente Kistler Sensoren instrumentiert werden eingeschraubt. Bei diesen Adapterstücken wird Sorge dafür getragen, dass die Messaufnehmer mit der richtigen Einschraubtiefe verbaut werden, damit die Sensoren plan an der Rohrrinnenwand zu liegen kommen. Mittels einer Schiebelehre wird die notwendige Einschraubtiefe am Messanschluss ermittelt und die Adapterstücke entsprechend montiert. Für das Einschrauben der Kistler Druckaufnehmer kommt dafür ein eigens vom Institut für Energietechnik angefertigtes geschlitztes Werkzeug zum Einsatz. Die hochfrequent abtastbaren Kistler Druckaufnehmer werden mit deren Messverstärkern verbunden. Dabei wird berücksichtigt, dass jeder Sensor mit seinem eigenen abgestimmten Messverstärker verbunden wird. Die Energieversorgung aller Sensoren wird über Netzteile hergestellt und die Leitungen der Messsignale werden an die Messkarten angeschlossen. Die Messverstärker der Kistler Druckaufnehmer werden an die National Instruments Messkarte NI9215 zur Auswertung des Differenzspannungssignals von 0 V bis 10 V angeschlossen, die Endress Hauser Druckaufnehmer werden an die National Instruments Messkarte NI9203 zur Auswertung des elektrischen Stromsignals zwischen 4 mA und 20 mA angeschlossen. Die als aktive Stromausgänge

ausgeführten Messsignale der Durchflusssensoren Endress Hauser Promag 300 und Flexim FLUXUS F601 werden an die National Instruments Messkarte NI9219 geführt. Die Messkarten werden in dem Chassis NIcDAQ-9185 von National Instruments untergebracht, welches die Messsignale über einen LAN-Anschluss ins Lokale Netzwerk des Versuchsstandes einspeist.

Zur Instrumentierung des Universalversuchsstands werden die entsprechenden Rohrleitungen entleert und der in der Pumpengrube angeordnete Kistler Druckaufnehmer vom Leitungssystem des Pelton-Turbinenversuchsstands samt Adapter ausgebaut und die Messstelle mit einer Verschlusschraube geschlossen. Der ausgebaute Sensor wird samt Adapter an der Messstelle im Rohrleitungssystem des Universalversuchsstandes in der Pumpengrube angebracht. Dabei wird die Einschraubtiefe des Adapterstückes so gewählt, dass der Messaufnehmer bündig zur Rohrrinnenwand zum Liegen kommt. Der oberwasserseitig am Pelton-Turbinenversuchsstand angebrachte Kistler Messaufnehmer wird ausgebaut und der Messanschluss mit einer Verschlusschraube geschlossen. Dieser Sensor wird mit seinem entsprechenden Adapterstück und dem Zoll auf ½-Zoll Adapterstück oberwasserseitig an einem Blinddeckel im Universalversuchsstand implementiert. Bei der Montage wird dafür Sorge getragen, dass der Sensoranschluss am Blinddeckel entlüftet ist.

Die Verkabelung der Sensoren, sowie die Anschlüsse an den Messkarten bleiben für die Messreihen am Universalversuchsstand unverändert, da nur zwei Sensoren samt Adapterstück an eine andere Messstelle wechseln.

Alle verschraubten Adapterstücke und Sensoren werden mit Gewindedichtband versehen. An jenen Stellen, wo Edelstähle direkt miteinander verschraubt werden, wird ein Montagespray verwendet, um die Gefahr von Kontaktkorrosion zu reduzieren.

Die kalibrierten Kistler Druckaufnehmer weisen über eine sensorspezifische Sensitivität (in Millivolt je bar) und einen Offset (in bar) auf. Damit korrekte Messwerte resultieren, ist es von hoher Relevanz, dass jeder dieser Sensoren an einen auf dessen Sensitivität abgestimmten Messverstärker angeschlossen ist. Der Offset der Sensoren wird nicht an der Messtechnik abgeglichen, sondern im Rahmen der Datenauswertung rechnerisch kompensiert.

4.4 Software

Um die Anforderungen aus der Versuchsplanung realisieren zu können erfolgt eine Recherche welche Software dafür am besten geeignet ist.

Da im Rahmen vergangener Messreihen am Versuchsstand zur Messdatenaufnahme zumeist mit LabView von National Instruments gearbeitet wurde und dieses Programm mit den vorhandenen Messkarten kompatibel ist, wird auch im Rahmen dieser Diplomarbeit LabView für die Messdatenakquise herangezogen.

Zur Verarbeitung der Messdaten fällt die Entscheidung auf eine Kombination von Microsoft Excel und MATLAB von Mathworks. Begründet ist die Entscheidung darin, dass beide Softwarepakete große Datenmengen effizient verarbeiten können. Die Fähigkeit Tabellenkalkulationen zur Kennlinienermittlung unkompliziert umzusetzen und die Möglichkeit ermittelte Zusammenhänge direkt graphisch darzustellen, sprechen für die Verwendung von Microsoft Excel. In MATLAB ist ein äußerst leistungsfähiger Algorithmus zur Fouriertransformation, welche zur Auswertung der

hochfrequenten Druckpulsationen im Frequenzbereich notwendig ist, eingebettet. Es besteht in MATLAB die Möglichkeit, die Ergebnisse der Fouriertransformation im Frequenzbereich in Form von Spektren oder Wasserfalldiagrammen zu plotten und darüber hinaus die Messdaten mit Filtern und Fenstern zur Auswertung zu versehen. Durch die Kombination der beiden Softwarepakete sind alle definierten Anforderungen hinsichtlich der Auswertung und Analyse der Messdaten erfüllt.

LabView Programm zur Datenacquire

Die Verarbeitung der digitalisierten Messsignale der Sensoren und die Aufbereitung der Messdaten wird mittels der Software LabView von National Instruments realisiert. Die Ausgabe der Messdaten erfolgt für jeden Messpunkt als Datei im „.TDMS“ Format, die zur Datenverarbeitung in MATLAB eingelesen werden kann. Es wird eine separate Datei im „.TXT“ Format generiert, welche die gemittelten Sensormesswerte für jeden Betriebspunkt enthält.

MATLAB-Programm zur Datenverarbeitung

Die Aufarbeitung der Messdaten mittels MATLAB gliedert sich in mehrere Teilaufgaben. Für jeden Betriebspunkt existiert eine eigene „.TDMS“ Datei, welche die Messdaten aller Sensoren zu jedem Abtastzeitpunkt enthält. Diese Dateien können eingelesen und die enthaltenen Messdaten in einer verarbeitbaren Form anhand einer Matrix abgespeichert werden. Es besteht die Möglichkeit die Messdatenmatrix mit einem Filter, beziehungsweise einer Fensterfunktion zu versehen. Daraufhin kann für ausgewählte Messwerte das Fourierspektrum ermittelt und graphisch dargestellt werden. Definierte Fourierspektren können daraufhin in eine Ergebnismatrix gespeichert werden, welche alle Spektren enthält, die in die Darstellung als Wasserfalldiagramm miteinfließen. Die Auswertung der Amplituden in den Frequenzspektren wird direkt in den Diagrammen des Fourierspektrums, beziehungsweise jenen der Wasserfalldiagramme umgesetzt. Zur Analyse und Weiterverarbeitung werden die Amplituden an charakteristischen Frequenzen in eine Excel-Tabelle übertragen.

Das auskommentierte MATLAB Script zur Auswertung der Messdaten ist unter *Anhang C* zu finden.

Excel-Tabelle zur Datenverarbeitung

In Excel wird die „.TXT“ Datei, welche die gemittelten Sensorwerte an jedem Betriebspunkt enthält, eingelesen. Jene Messwerte sind unter *Anhang D* aufgelistet.

Auf Basis dieser Messwerte werden für jede Messreihe die QH-Kennlinie der Versorgungspumpe und die Druckverluste von der Druckseite bis hin zum Oberwasser ermittelt. Zusätzlich wird die Anlagenkennlinie des Versuchsstandes für die Betriebspunkte bei Maximaldurchfluss ermittelt und die Messergebnisse der Endress Hauser und Kistler Drucksensoren werden gegenübergestellt. Darüber hinaus werden die mittels MATLAB ermittelten Amplituden der Druckpulsationen in eine eigene Tabelle übertragen und dort ausgewertet. Die Grafiken der Kennlinien von Pumpe und Versuchsstand, aber auch jene zu Untersuchungen von Einflüssen auf die Ausprägung und Ausbreitung hochfrequenter Druckpulsationen, sind mittels Excel erstellt.

4.5 Fehlerabschätzung

Abtastrate

Die Akquise der Messdaten am Universalversuchsstand ist mit einer Abtastrate von 1 kHz durchgeführt worden. Am Pelton Turbinenversuchsstand sind die Messreihen zur Kontrolle auf Aliasing-Effekte mit einer Abtastrate von 4 kHz aufgezeichnet worden.

Aus einem Vergleich der Frequenzspektra geht hervor, dass die gleichen charakteristischen Frequenzen aufscheinen. Es wird daher davon ausgegangen, dass bei der Abtastrate von 1 kHz kein Aliasing-Fehler entstanden ist.

Einfluss der Netzfrequenz

Bei der Auswertung der Messreihen des Pelton-Turbinenversuchsstandes sind in den Frequenzspektra der Messreihen dominante Amplituden bei Vielfachen der Netzfrequenz von 50 Hertz ersichtlich. *Abbildung 20* zeigt zur Veranschaulichung das Frequenzspektrum des Betriebspunktes mit Drehzahl 1200 Umdrehungen pro Minute und einem Durchfluss von 15 Liter pro Sekunde vor (links) und nach (rechts) dem Aufbringen von Netzfrequenzfilter und Hann-Fensterfunktion.

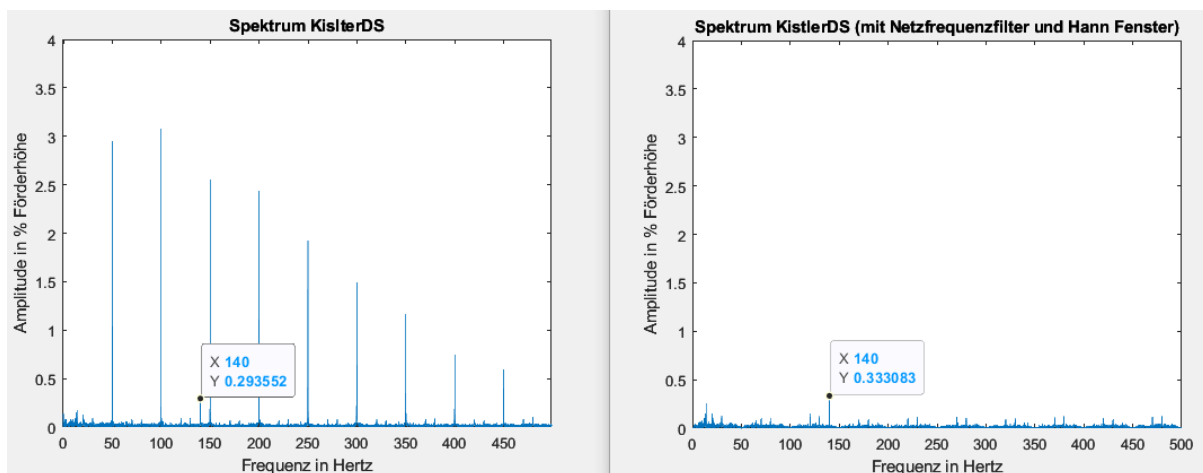


Abbildung 20: Spektrum des hochfrequenten Drucksensors an der Druckseite der Versorgungspumpe bei $n = 1200$ 1/min und $Q = 15$ l/s] vor (links) und nach (rechts) Aufbringen von Netzfrequenzfilter und Fensterfunktion

Die höchsten Peaks bei den harmonischen der Netzfrequenz weisen dabei die etwa 10-fache Amplitude der Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz auf.

Damit diese Messreihen dennoch in die Auswertung miteinbezogen werden können, wird mittels MATLAB ein Kammfilter, der die Netzfrequenz und deren unterharmonische dämpfen soll, erstellt und auf die Messdaten aufgebracht. Dessen Verlauf ist unter *Abbildung 21* gezeigt und dessen Parameter sind im Programmcode unter *Anhang C* ersichtlich.

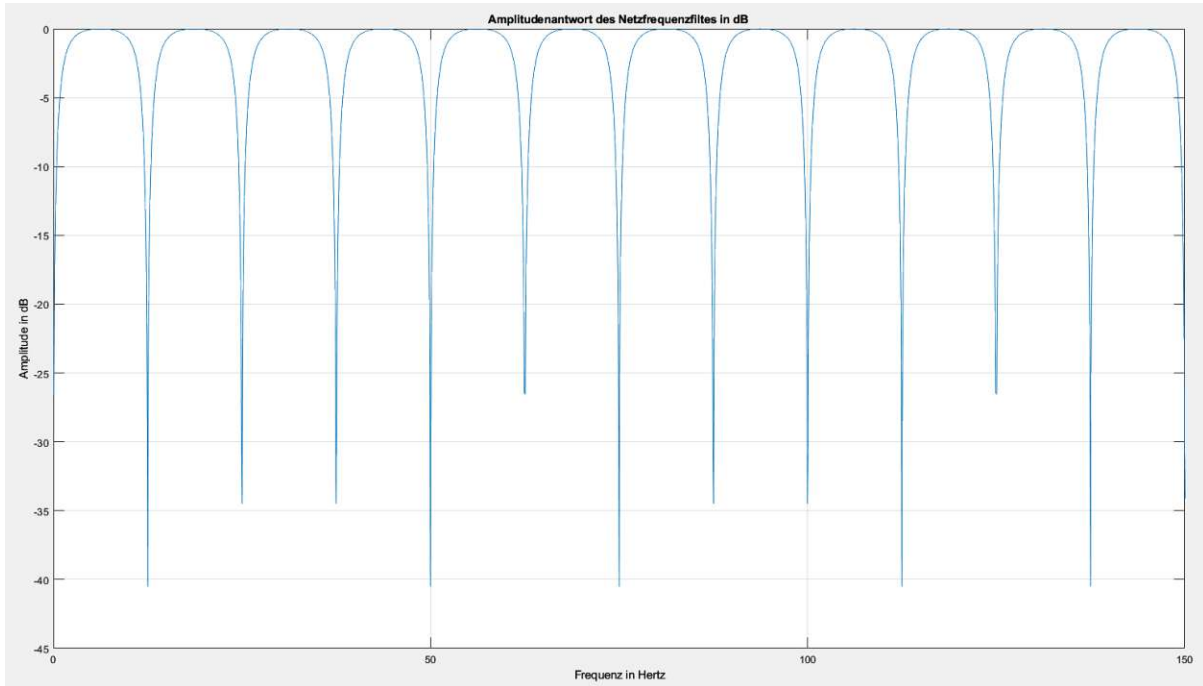


Abbildung 21: Darstellung des Netzfrequenzfilters, dieser setzt sich über die Frequenz periodisch fort

Der Nachteil dieses Filters ist, dass, sofern im Drucksignal Frequenzanteile, welche mit Vielfachen und unterharmonischen der Netzfrequenz zusammenfallen oder nahe an diesen liegen, vorhanden sind, diese verloren gehen oder stark gedämpft werden. Es kann nicht quantifiziert werden, wie groß sich der dadurch entstehende Fehler an den Messreihen am Pelton-Turbinenversuchsstand beläuft.

Das Problem ist an den Messreihen des Universalversuchsstandes nicht vorhanden. Hier wird die Spannungsversorgung der Messtechnik über einen eigenen Stromkreis ohne andere Verbraucher realisiert und ein zusätzlicher Potentialausgleich durchgeführt. Das Schaltschema der Messtechnik ist in *Abbildung 19* unter Kapitel 4.1.4 zu finden.

Einfluss der Fensterfunktion

Da es sehr unwahrscheinlich erscheint mit der Messdauer exakt die Periodendauern des quasiperiodischen Signals zu treffen und die Fouriertransformation streng genommen nur für periodische Signale zulässig ist (siehe Ausführungen unter Kapitel 2.3), wird vor der FFT eine Hann-Fensterfunktion auf die Messsignale aufgebracht.

Ob es hierdurch zu Abweichungen gekommen ist, kann nicht festgestellt werden. *Abbildung 22* stellt den Verlauf der Hann-Fensterfunktion dar.

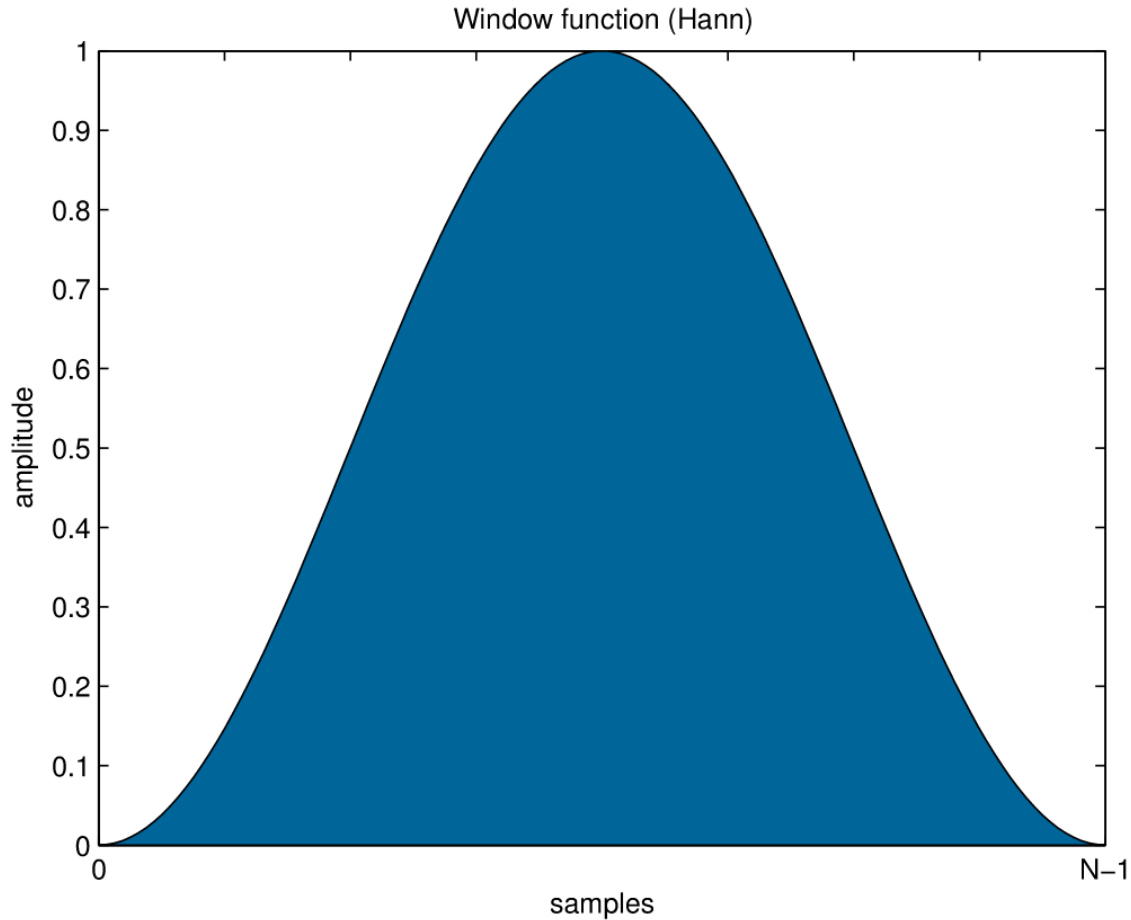


Abbildung 22: Verlauf des Hann-Fensters [20]

Messgenauigkeit, Sensoranordnung und lokale Strömungsphänomene

Die Messgenauigkeiten nach Herstellerangaben aller verwendeter Sensoren sind unter Kapitel 4.1 zu finden.

Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass es durch lokale Strömungsphänomene im Rohrleitungssystem oder an den Adapterstücken zu Messfehlern gekommen ist. Dies betrifft insbesondere das „clamp-on“ Ultraschallmessgerät des Herstellers Flexim, welches für die Durchflussmessungen am Universalversuchsstand zum Einsatz gekommen ist. Die Messgenauigkeit jenes Messgerät reagiert empfindlich auf Störungen in der Strömung. Die Montage erfolgte für die Messreihen am Universalversuchsstand an einer bestmöglich geeigneten Messstelle im Tiefbecken. An dieser sind etwa 4 Meter im Vor- und Nachlauf als gerade Rohrleitung ausgeführt, was dem 8-fachen des Rohrleitungsdurchmessers von 500mm an der Messstelle entspricht.

Kapitel 5: Kennlinienaufnahme an Versorgungspumpe und Versuchsstand

Kapitel 5 setzt sich zum Ziel den Versuchsablauf der Messungen für unterschiedliche Drehzahlen am Universalversuchsstand zu dokumentieren, die Ergebnisse in Form gewonnener Kennlinien zu präsentieren und zu interpretieren. Es werden QH-Kennlinien der Versorgungspumpe, die Rohrleitungsverluste der Anlage von der Druckseite der Versorgungspumpe bis hin zum Oberwasser, sowie eine Anlagenkennlinie ermittelt.

Hinsichtlich der QH-Kennlinien werden diese bei Nenndrehzahl mit Messungen aus der Vergangenheit und den Herstellerangaben verglichen. Für die von der Nenndrehzahl abweichenden Drehzahlen existieren noch keine Messungen, deren Plausibilität wird lediglich anhand von Modellgesetzen abgeschätzt. Die über die Druckaufnehmer gemessenen Rohrleitungsverluste von der Pumpe bis hin zum Oberwasser werden mit Messungen einer Bachelorarbeit des Institutes für Energietechnik gegenübergestellt.

Die Messdaten aller Betriebspunkte, welche in die Auswertung diverser Kennlinien eingeflossen sind, befinden sich in tabellarischer Form unter *Anhang D*.

5.1 Versuchsablauf

Es werden Kennlinien bei den Drehzahlen gemäß *Tabelle 16* aufgenommen. Zusätzlich dazu werden die Betriebspunkte maximal möglichem Durchflusses bei 1300 und 1400 Umdrehungen pro Minute Pumpendrehzahl aufgezeichnet.

Drehzahl in Umdrehungen pro Minute	Abstufung der Messpunkte in Liter pro Sekunde
600	10
800	10
1000	20
1200	20
1500	20

Tabelle 16: Untersuchte Drehzahlen (links) und Messpunkt abstufung (rechts) bei der Kennlinienaufnahme

Die Kennlinienaufnahme gestaltet sich bei jeder Drehzahl in gleicher Weise. Zunächst wird bei Maschinenstillstand ein Messpunkt aufgezeichnet, der zum statischen Höhenausgleich der Drucksensoren an der Saug- und Druckseite der Pumpe herangezogen wird. Im Anschluss daran wird die Maschine bei vollständig geschlossenem Ringkolbenventil (Absperrorgan Nummer 53, vergleiche Schema *Abbildung 14*) auf die gewünschte Drehzahl hochgefahren. Danach werden die gewünschten Durchflüsse, in Abstufungen nach *Tabelle 16*, durch Adjustierung des Ringkolbenventils, welches als Drosselorgan zur Energiedissipation fungiert, eingestellt und die Betriebspunkte aufgezeichnet.

Zur Berechnung der Förderhöhe H , siehe Gl (5.1), wird der Differenzdruck über die Pumpe aus den Drucksignalen der druck- und saugseitig angebrachten Endress Hauser Sensoren p_{EHDS} und p_{EHSS} ermittelt. Dieser Differenzdruck, der über der Pumpe anliegt wird schließlich durch das Produkt aus

der Dichte des Mediums ρ_w und der Gravitationskonstante g dividiert. Anschließend wird der geodätische Höhenunterschied der Sensoren ΔH_{EH} addiert.

$$H = \frac{p_{EHDS} - p_{EHSS}}{\rho_w \times g} + \Delta H_{EH} \quad (5.1)$$

Dieser geodätische Höhenunterschied der Sensoren ΔH_{EH} wird bei Maschinenstillstand aus dem Differenzdruck über die beiden Endress Hauser Sensoren an der Druck- p_{EHDS} und Saugseite p_{EHSS} gemäß Gl. (5.2) ermittelt.

$$\Delta H_{EH} = \frac{p_{EHDS} - p_{EHSS}}{\rho_w \times g} \quad (5.2)$$

Zur Ermittlung der Druckverluste wird am oberwasserseitigen Kistler Drucksensor der geodätische Höhenunterschied und zeitgleich der Atmosphärendruck p_{atm} rechnerisch kompensiert.

Der Differenzdruck bei nulldurchfluss Δp_{0KOW_EHDS} zwischen dem an der Druckseite der Versorgungspumpe verbauten Endress Hauser Druckaufnehmer p_{0EHDS} und dem oberwasserseitigen Kistler Sensor p_{0KOW} wird anhand Gl. (5.3) ermittelt.

$$\Delta p_{0KOW_EHDS} = p_{0KOW} - p_{0EHDS} \quad (5.3)$$

Dieser Differenzdruck bei nulldurchfluss Δp_{0KOW_EHDS} wird gemäß Gl. (5.4) an jedem Betriebspunkt vom Drucksignal des Kistler Drucksensors p_{KOW} abgezogen. Dadurch liegt das vom geodätischen Höhenunterschied, sowie Atmosphärendruck p_{atm} kompensierte Drucksignal des oberwasserseitigen Kistler Drucksensors p_{KOW_komp} vor.

$$p_{KOW_komp} = p_{KOW} - \Delta p_{0KOW_EHDS} \quad (5.4)$$

Die Differenz zwischen dem kompensierten Drucksignal des oberwasserseitigen Kistler Drucksensors p_{KOW_komp} und dem Messwert des Endress Hauser Drucksensors an der Druckseite der Versorgungspumpe p_{EHDS} wird für jeden Betriebspunkt bestimmt und es resultiert anhand Gl. (5.5) die jeweilige Verlusthöhe in Meter.

$$\Delta HV = \frac{p_{KOW_komp} - p_{EHDS}}{\rho_w \times g} \quad (5.5)$$

5.2 QH-Kennlinien

Im Folgenden werden die bei unterschiedlichen Pumpendrehzahlen (gemäß *Tabelle 16*) gemessenen QH-Kennlinien der Versorgungspumpe übersichtsmäßig dargelegt. Bei jener QH-Kennlinie, die bei einer Drehzahl von 1500 Umdrehungen pro Minute aufgenommen ist, erfolgt eine Gegenüberstellung mit vergangenen Messungen, sowie den Herstellerangaben.

Die einzelnen Kennlinien der unterschiedlichen Drehzahlen sind zusätzlich unter *Anhang D* zu finden.

Abbildung 23 stellt die bei unterschiedlichen Pumpendrehzahlen aufgenommenen QH-Kennlinien dar.

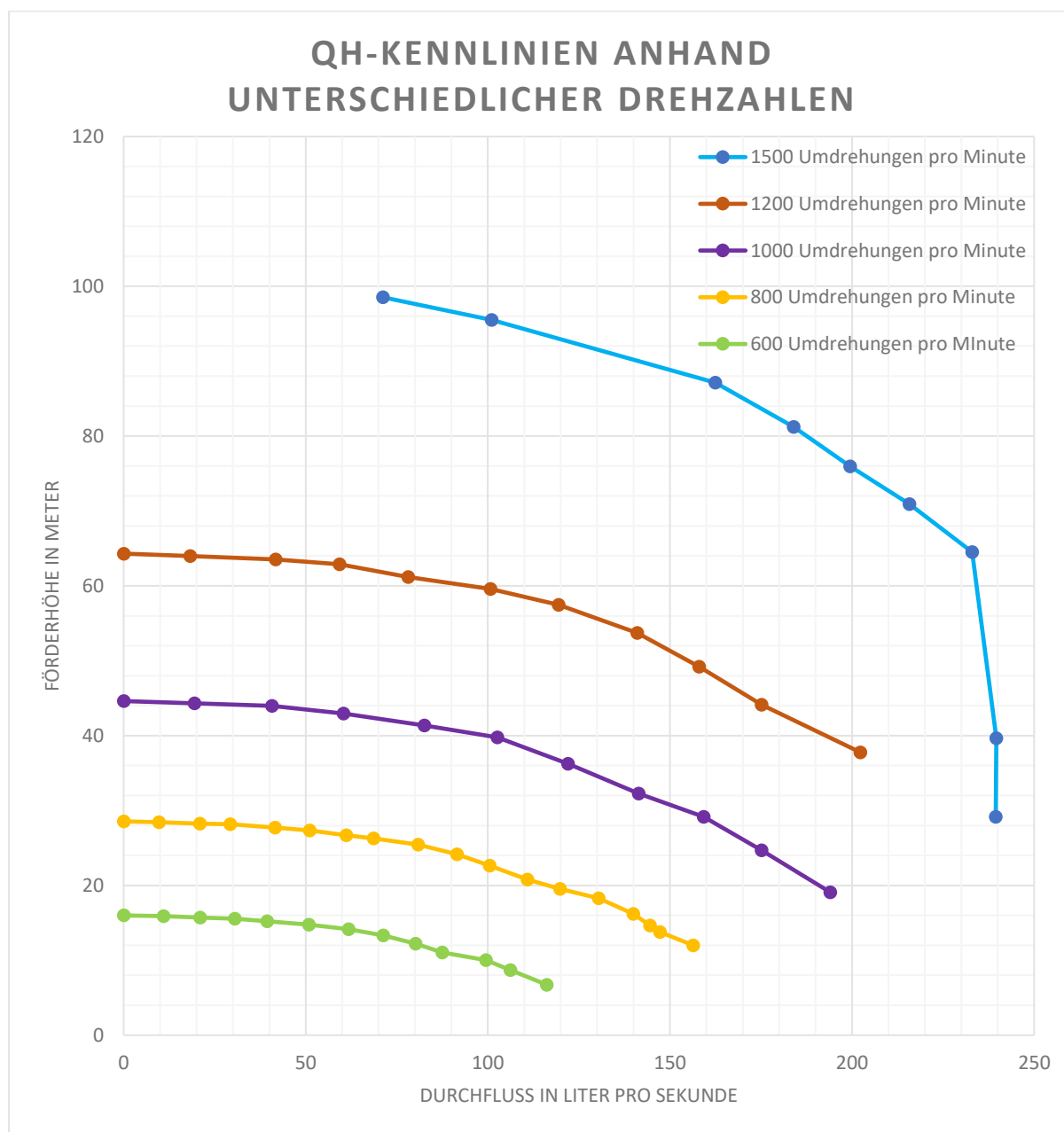


Abbildung 23: Aufgenommene QH-Kennlinien anhand unterschiedlicher Drehzahlen

Die ermittelten QH-Kennlinien wirken plausibel. Wie zu erwarten steigt die Förderhöhe etwa quadratisch mit der Drehzahl, der maximale Durchfluss annähernd linear mit der Drehzahl. Insbesondere bei den Drehzahlen von 600-1000 Umdrehungen pro Minute ist letzteres sehr genau erfüllt.

Zu der bei 1500 Umdrehungen pro Minute aufgenommenen Kennlinie existieren Vergleichswerte. Es liegen neben den Herstellerangaben noch die Messdaten einer früheren Kennlinienmessung des Institutes für Energietechnik vor. Die beiden Vergleichswerte sind bei einer Drehzahl von 1475 Umdrehungen pro Minute aufgenommen. Der Unterschied in den Drehzahlen bleibt unberücksichtigt, da die daraus entstehende Abweichung als vernachlässigbar klein eingeschätzt wird.

Abbildung 24 stellt die ermittelte QH-Kennlinie mit den Vergleichswerten gegenüber.

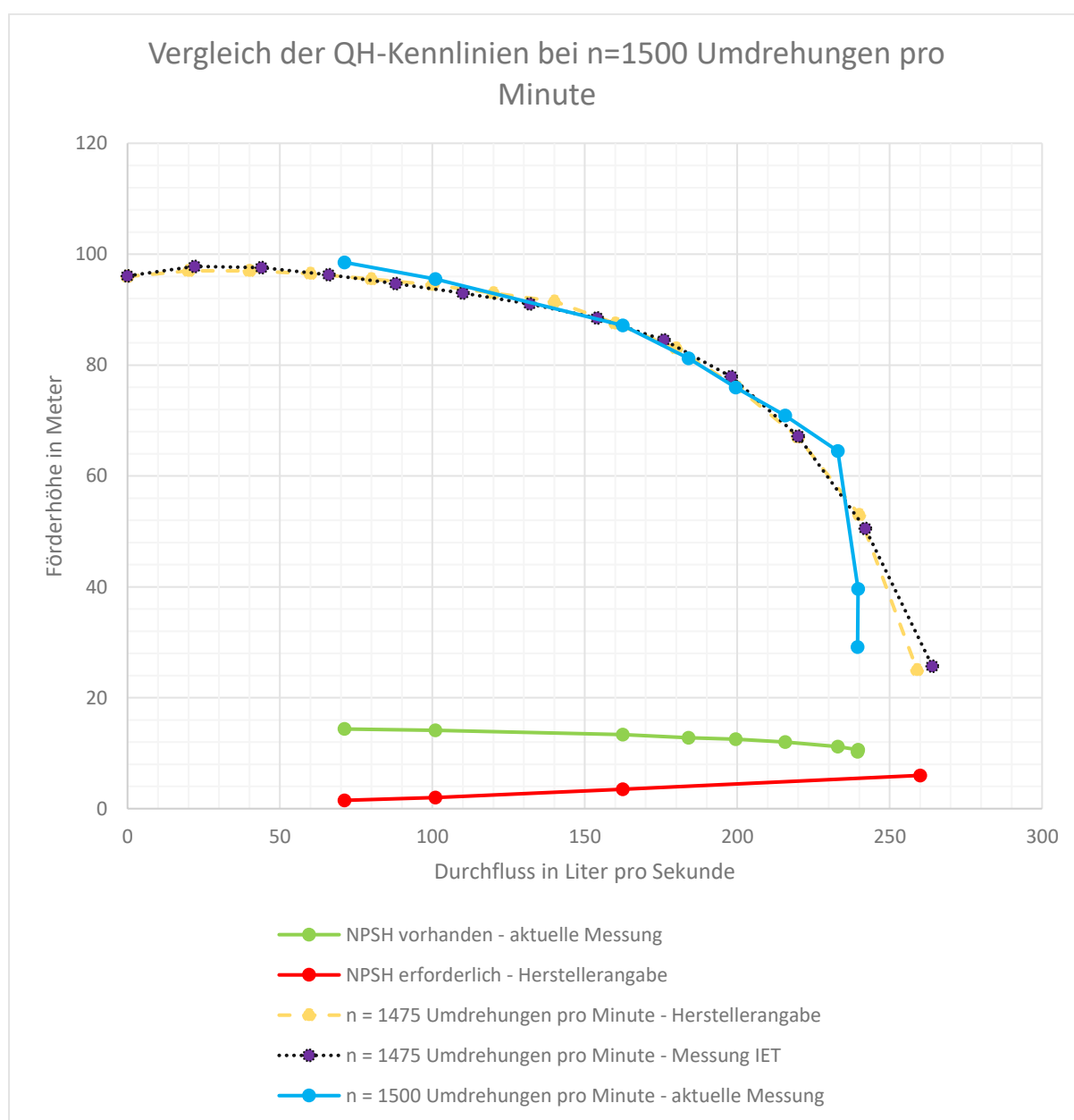


Abbildung 24: Vergleich der QH-Kennlinien bei n = 1500 Umdrehungen pro Minute

Die in violett dargestellte QH-Kennlinie ist den Herstellerdaten der Versorgungspumpe entnommen. Die in gelb dargestellte QH-Kennlinie ist seitens des Institutes für Energietechnik bei einer früheren Messung ermittelt worden. Bezüglich jener beiden Kennlinien lässt sich erkennen, dass diese nur geringfügig voneinander abweichen. Die Pumpe hat also zum Zeitpunkt der Messungen des Institutes für Energietechnik die Herstellerangaben erfüllt.

In hellblau ist die im Rahmen dieser Diplomarbeit ermittelte QH-Kennlinie ersichtlich. Die gemessene Kennlinie startet erst bei einem Durchfluss von 70 Litern pro Sekunde. Die Ursache dafür liegt daran, dass bei geringeren Durchflüssen der Druck im Rohrleitungssystem den Messbereich der eingesetzten Kistler Drucksensoren, welcher bis 10 bar reicht, übersteigt und eine Beschädigung dieser Druckaufnehmer vermieden werden sollte. Zwischen 70 und 230 Litern pro Sekunde Durchfluss liegt die gemessene Kennlinie relativ nahe an jener des Herstellers sowie jener aus zurückliegenden Messungen. Diese Tendenz endet bei Durchflüssen über 230 Litern pro Sekunde. Die Kennlinie fällt an dieser Stelle steil ab, jedes weitere Öffnen des Drosselorgans führt lediglich zu Förderhöhenverlust bei annähernd gleichem Durchfluss.

Es wird vermutet, dass ab einem Durchfluss von 230 Litern pro Sekunde Kavitationseinfluss gegeben ist. Gestützt wird diese These dadurch, dass bei jenen hohen Durchflüssen während der Messung rasselnde Geräusche wahrzunehmen waren, die man Kavitation zuordnen könnte. Gegen diese Vermutung lässt der Vergleich von berechnetem vorhandenen und gemäß Herstellerangaben notwendigem NPSH-Wert schließen. Die Differenz zwischen dem berechneten vorhandenen NPSH-Wert (10,3 m) und dem gemäß Herstellerangaben notwendigen NPSH-Wert (6,0 m) bei 240 Liter pro Sekunde Durchfluss beläuft sich auf 4,3 Meter. Diese Reserve müsste eigentlich kavitationsbehaftetem Betrieb vorbeugen. Die beiden NPSH-Kennlinien sind in *Abbildung 24* zu finden, wobei der anhand der Messdaten ermittelte NPSH-Wert in grün und der nach Herstellerangaben notwendige NPSH-Wert in rot dargestellt sind. Es besteht die Möglichkeit, dass die vom Hersteller angegebenen Mindestwerte für den NPSH-Wert an der über 30 Jahre alten Maschine aufgrund von Verschleißerscheinungen angepasst werden müssen und die Pumpe inzwischen früher zu Kavitation neigt.

Eine andere Vermutung richtet sich an den verbauten Durchflusssensor, der mittels Ultraschall Laufzeitmessung die Strömungsgeschwindigkeit und aus dieser den Durchfluss ermittelt. Dieser reagiert empfindlich auf Störungen in der Strömung. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass trotz der bestmöglichen Wahl des Sensoreinbauortes, aufgrund von lokalen Ablöseerscheinungen oder Wirbelbildung die Messwerte bei hohen Durchflüssen fehlerbehaftet sind.

5.3 Druckverluste

An dieser Stelle werden die Ergebnisse der Messungen zu den Druckverlusten am Universalversuchsstand von der Druckseite der Versorgungspumpe (Druckmessstelle 2) bis hin zur oberwasserseitigen Messstelle (Druckmessstelle 6) anhand unterschiedlicher Drehzahlen präsentiert. Diese Druckverluste werden mit den Messergebnissen einer Bachelorarbeit des IET gegenübergestellt. Ebenso erfolgt die Darstellung jener Anlagenkennlinie des Universalversuchsstandes, bei der alle Absperrorgane im Kreislauf voll geöffnet sind. Die Definition der Messstellen ist *Abbildung 14* unter Abschnitt 3.2.2 zu entnehmen.

Die einzelnen Druckverlustkennlinien bei unterschiedlichen Drehzahlen, welche hierbei eingeflossen sind, sind unter *Anhang D* aufgeführt.

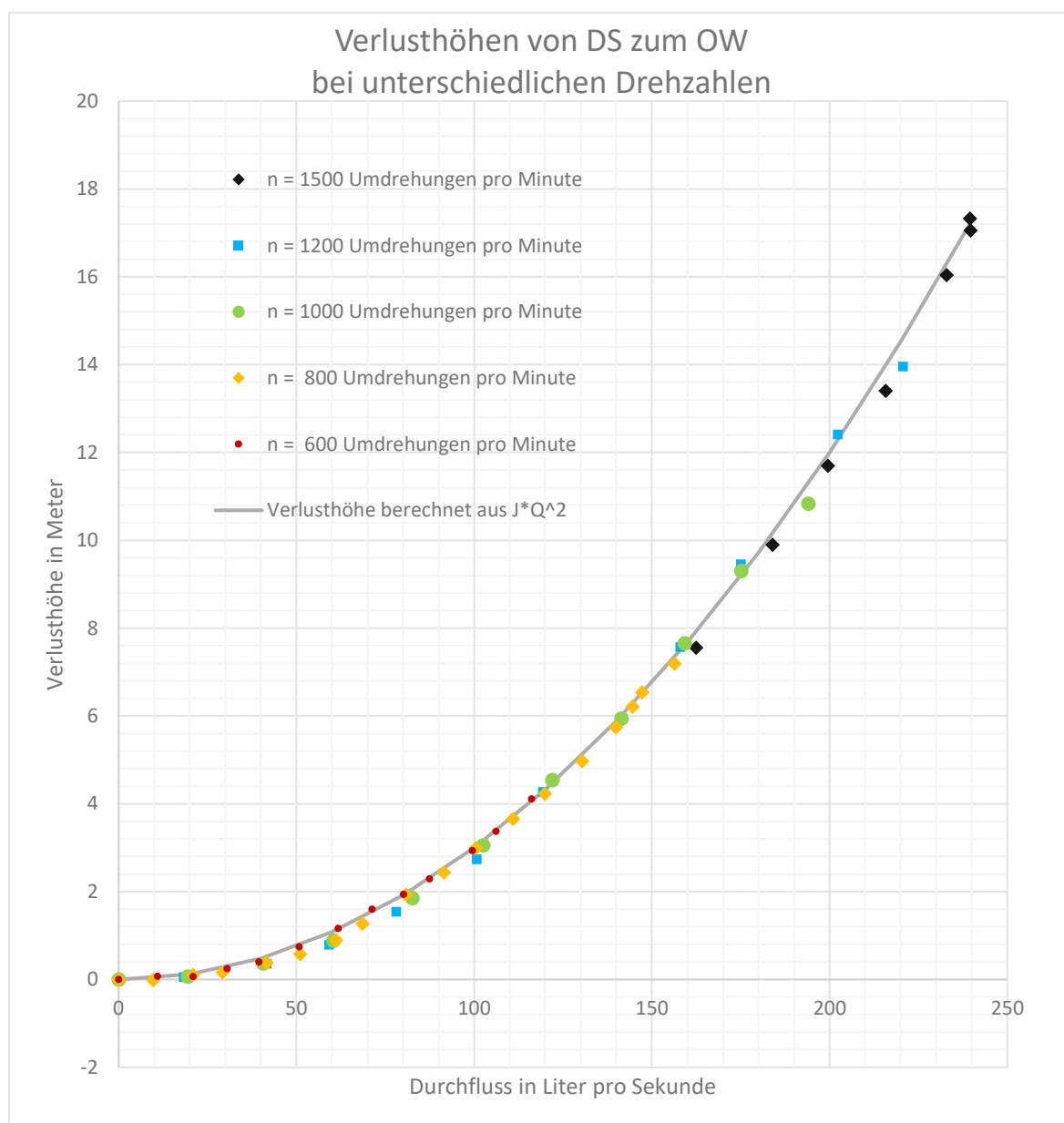


Abbildung 25: Druckverlust von der Druckseite der Versorgungspumpe (Druckmessstelle 2) zum Oberwasser des Universalversuchsstandes (Druckmessstelle 6) bei unterschiedlichen Drehzahlen

Die ermittelten Kennlinien, vergleiche *Abbildung 25*, wirken plausibel. Trotz unterschiedlicher Drehzahlen resultieren beinahe idente Kennlinien, bei denen die Verlusthöhe annähernd quadratisch mit dem Durchfluss zunimmt. Dieses Verhalten war zu erwarten, da die untersuchte Messstrecke vor dem Drosselorgan zu liegen kommt und dadurch nur strömungsgeschwindigkeitsabhängige Rohrleitungsverluste auftreten, welche von der Pumpendrehzahl und dem Druckniveau unabhängig sind.

Die rechnerische Abschätzung über eine quadratische Funktion für die Höhenverluste H_V von der Druckseite der Versorgungspumpe bis zum Oberwasser als Funktion des Durchflusses Q ist über den Faktor J , welcher die Einheit s^2/m^5 aufweist, über Gl. (5.5) möglich. Dieser Faktor beläuft sich auf einen Wert von 300. Er stammt aus einer Approximation der Messdaten über ein Polynom zweiten Grades mittels Microsoft Excel, wobei die linearen und konstanten Anteile des Polynoms nicht berücksichtigt wurden.

$$H_V = J \times Q^2 \quad (5.5)$$

Der quadratische Verlauf der Verlustkennlinie entspricht den Erkenntnissen der Literatur (vergleiche Ausführungen unter Abschnitt 2.1).

Bei der Messreihe mit 1500 Umdrehungen pro Minute sind bei Durchflüssen unter 160 Liter pro Sekunde keine nutzbaren Messwerte vorhanden, da der Messbereich des oberwasserseitigen Drucksensors überschritten wurde. Die geringfügigen Abweichungen vom Trend bei Maximaldurchfluss, welche bei den Drehzahlen 1000 und 1200 Umdrehungen pro Minute erkannt werden können, sind der Versuchsdurchführung geschuldet. Ein Absperrorgan an der Saugseite, welches um den Durchfluss genauer regeln zu können nur 50% geöffnet war, wurde, um den maximal möglichen Durchfluss zu erlangen, voll geöffnet. Die Wirkung dieses Eingriffs beschränkt sich aber auf diese Betriebspunkte maximal möglichem Durchflusses.

Gegenüberstellung der Druckverluste mit zurückliegenden Messungen

Im Rahmen einer Bachelorarbeit des Institutes für Energietechnik sind Messungen zu Druckverlusten am hydraulischen Versuchsstand durchgeführt worden. Deren Ergebnisse können nicht direkt mit jenen dieser Diplomarbeit abgeglichen werden, da der Versuchsstand anders verschalten und Druckaufnehmer an abweichenden Messstellen platziert waren. Jedoch kann an einer ähnlichen Messstrecke ein vergleichbarer Verlauf der Druckverluste aufgezeichnet werden (siehe *Abbildung 26* auf der Folgeseite).

In den Messdaten von *Abbildung 26* ist ein statischer Druckversatz vorhanden, da keine rechnerische Druckkompensation bei Anlagenstillstand durchgeführt wurde. Wenn dieser statische Versatz dahingehend kompensiert wird, dass die Verlustkennlinie bei Nulldurchfluss im Ursprung startet, stimmen die Verlusthöhen in Abhängigkeit des Durchflusses gut überein. Das stützt eine These dieser Bachelorarbeit, dass ein Großteil der Verluste der Pumpengrube und nicht dem oberwasserseitigem Rohrleitungssystem zuzurechnen ist. [21, p. 75]

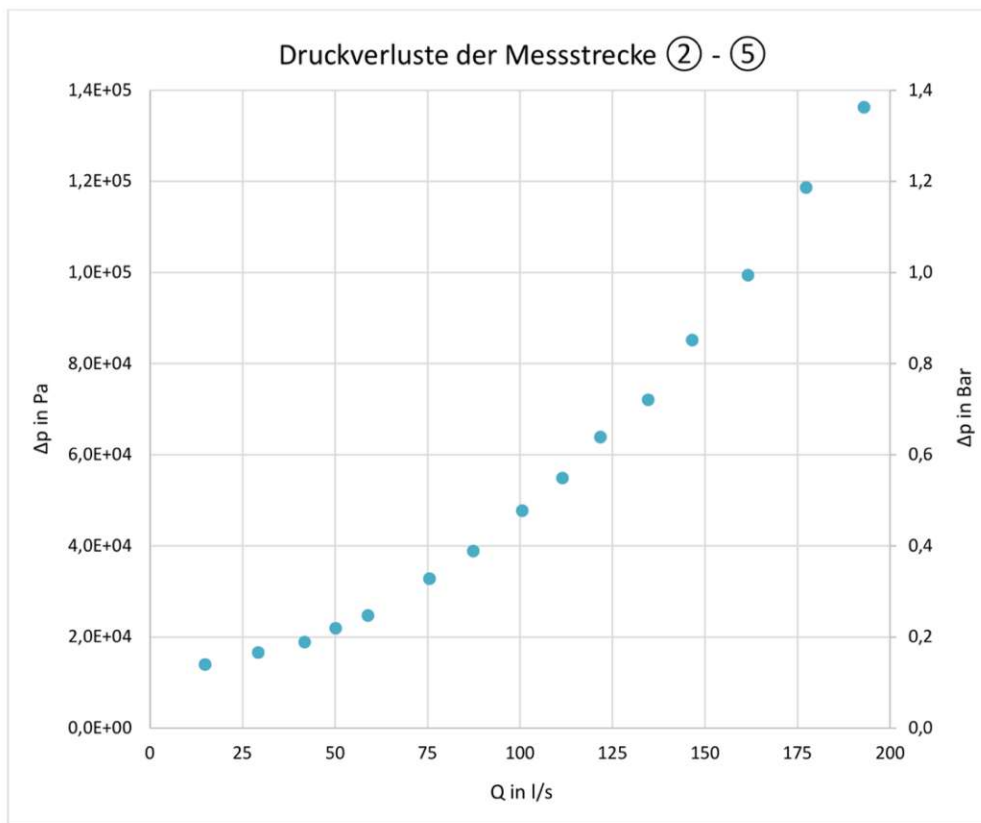


Abbildung 26: Druckverluste von der Druckseite der Pumpe bis zum Oberwasserkessel [21, p. 75]

Anlagenkennlinie des Universalversuchsstandes bei voll geöffneten Absperrorganen

An dieser Stelle wird noch im Rahmen der Kennlinienermittlung des Versuchsstandes eine Anlagenkennlinie, welche ebenso am Universalversuchsstand (vergleiche Schema *Abbildung 14*) aufgezeichnet wurde, dargelegt. Diese Anlagenkennlinie beschreibt die Verlusthöhen in Abhängigkeit des Durchflusses, wobei alle Absperrorgane im Kreislauf voll geöffnet sind.

Abbildung 27 zeigt den Druckverlust der Anlage in Abhängigkeit des Durchflusses. Die Messdaten wurden bei den maximalen Durchflüssen anhand der Drehzahlen 600, 800, 1000, 1200, 1300, 1400 und 1500 Umdrehungen pro Minute der Pumpe ermittelt. Die Anlagenkennlinie resultiert dabei direkt aus diesen Betriebspunkten. Der Bereich zwischen 0 und 116 Liter pro Sekunde Durchfluss ist nicht im Diagramm eingezeichnet, da hier im untersuchten Drehzahlbereich keine Betriebspunkte zu liegen kommen.

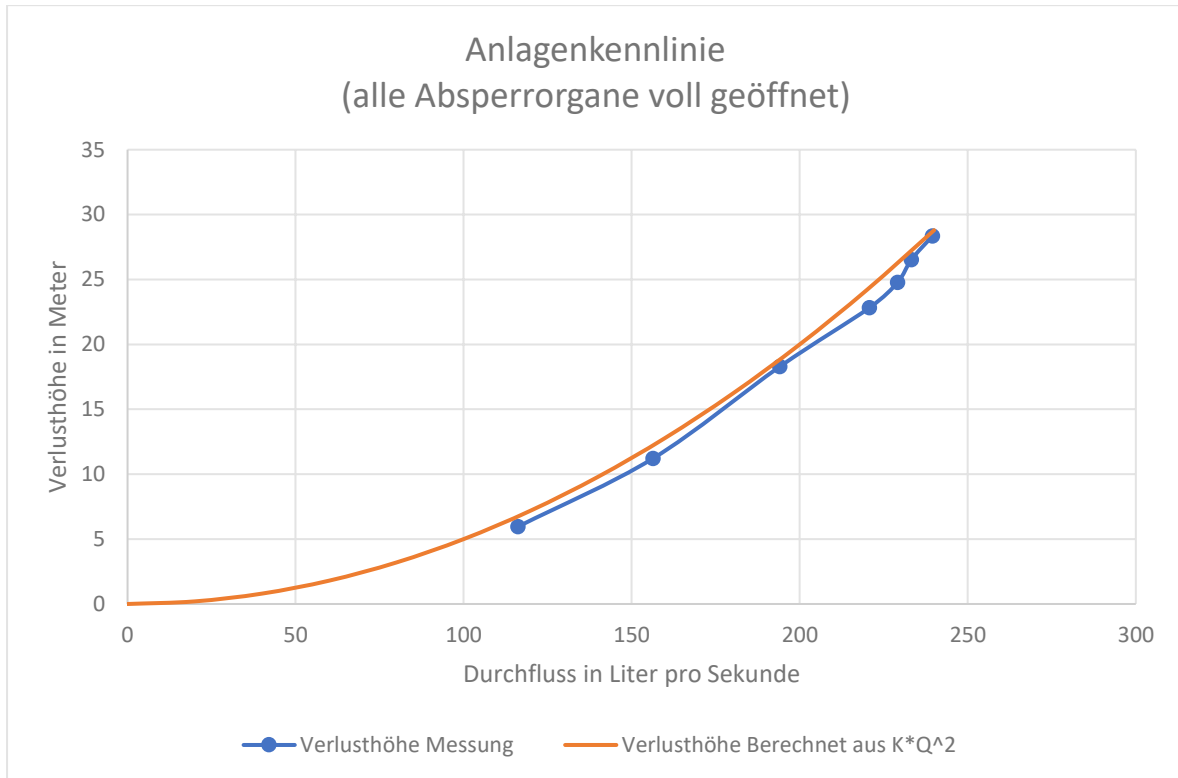


Abbildung 27: Anlagenkennlinie des Universalversuchsstands (alle Absperrorgane voll geöffnet)

Die rechnerische Abschätzung einer quadratischen Anlagenkennlinie ist über den Faktor K , welcher die Einheit s^2/m^5 aufweist, möglich. Dieser Faktor beläuft sich auf einen Wert von 500. Er stammt aus einer Approximation der Messdaten über ein Polynom zweiten Grades mittels Microsoft Excel, wobei dessen lineare und konstante Anteile nicht berücksichtigt werden. Diese Anlagenkennlinie des Universalversuchsstands, welche die Verlusthöhe H_V der Anlage in Abhängigkeit des Durchflusses Q beschreibt, lässt sich somit, bei allen Absperrorganen im Kreis voll geöffnet, über Gl. (5.6) abschätzen.

$$H_V = K \times Q^2 \tag{5.6}$$

Der quadratische Verlauf der Anlagenkennlinie entspricht den Erkenntnissen der Literatur (vergleiche Ausführungen unter Abschnitt 2.1).

5.4 Gegenüberstellung der Endress-Hauser und Kistler Drucksensoren

An dieser Stelle erfolgt die Gegenüberstellung der Messdaten der Endress Hauser Prozessdrucksensoren und der hochfrequent abtastbaren Kistler Drucksensoren. Das Ziel ist es dabei der Frage nachzugehen, ob mit den Kistler Drucksensoren eine Aufzeichnung der Betriebspunkte mit erforderlicher Genauigkeit möglich ist oder die Instrumentierung der Endress Hauser Prozessdrucksensoren für diese Aufgabe notwendig ist.

Es werden dabei die Messdaten der Kistler Sensoren an der Druck- sowie Saugseite der Pumpe herangezogen, da an jenen Messstellen zusätzlich Endress Hauser Prozessdrucksensoren angebracht sind. Es wird zunächst der atmosphärische Luftdruck zum Zeitpunkt der Messungen von den Messwerten der Kistler Druckaufnehmer abgezogen. Danach verbleibt noch immer eine Abweichung zu den Messergebnissen der Endress-Hauser Prozessdrucksensoren. Diese Abweichung, welche auch bei Anlagenstillstand vorhanden ist, beruht auf dem Nullpunktversatz der Kistler Drucksensoren. Diese Abweichung wurde bewusst nicht an den Messverstärkern ausgeglichen, sondern wird im Rahmen der Messdatenauswertung rechnerisch kompensiert. Diese Nullpunktabweichungen werden bei Anlagenstillstand ermittelt und von den Messwerten der beiden Kistler Drucksensoren abgezogen. Daraufhin können die Messergebnisse an der Druck- und Saugseite direkt gegenübergestellt werden.

Die Gegenüberstellung wird dahingehend vollzogen, dass für jeden Messpunkt die absoluten Unterschiede zwischen den vom Umgebungsdruck und Nullpunktversatz bereinigten Messwerten der Kistler Drucksensoren und den Messwerten der Endress Hauser Drucksensoren ermittelt werden. Diese Absolutwerte werden auf den jeweiligen Messwert des Endress Hauser Druckaufnehmers bezogen und schließlich wird aus diesen prozentuellen absoluten Abweichungen der Mittelwert über die Messreihe gebildet. Zusätzlich zum Mittelwert wird auch der Wert der maximalen Abweichung aufgezeichnet.

Tabelle 17 stellt dar, worauf sich die Beträge der relativen Abweichung und die maximal auftretende Abweichung in Prozent über die Messreihen belaufen. Mit avg. ist der englische Begriff average gemeint, mit dieser Abkürzung ist die Spalte der durchschnittlichen Abweichungen gekennzeichnet.

Messreihe	Druckseite max%	Druckseite avg. %	Saugseite max%	Saugseite avg. %
n = 600 [1/min]	0,692	0,409	1,898	0,760
n = 800 [1/min]	0,583	0,482	9,458	2,621
n = 1000 [1/min]	0,385	0,211	5,496	1,304
n = 1200 [1/min]	0,732	0,274	17,259	3,327
n = 1500 [1/min]	0,547	0,197	32,297	6,868

Tabelle 17: Abweichungen der Messsignale der Kistler und Endress Hauser Drucksensoren

Bei der Messreihe mit 1500 Umdrehungen pro Minute Pumpendrehzahl werden an der Druckseite nur Messreihen über 180 l/s Durchfluss ausgewertet. Erst ab diesem Durchfluss kommt das Drucksignal innerhalb des auf 10 bar beschränkten Messbereichs des Kistler Druckaufnehmers zu liegen.

Auf Basis der Auswertung wird ersichtlich, dass an der Druckseite die Messwerte der Kistler und Endress Hauser Druckaufnehmer sehr nahe beieinander liegen. Daraus kann geschlossen werden, dass an der Druckseite, sofern man am Messverstärker den Nullpunktversatz des Kistler Druckaufnehmers korrigiert und dessen Messbereich nicht verlässt, die Instrumentierung des Kistler Druckaufnehmers alleine ausreichend genaue Messergebnisse hervorgebracht hätte.

Eine vollkommen andere Situation spiegelt sich an der Saugseite wieder. Die Abweichungen zwischen den Messwerten der beiden Sensortypen sind zum Teil beträchtlich. Welche Betriebspunkte plausible Messergebnisse und welche besonders starke Abweichungen hervorgebracht haben wird an dieser Stelle untersucht. Es besteht die Vermutung, dass die Abweichung mit dem Druckniveau an der Saugseite in Zusammenhang steht. *Tabelle 18* stellt die durchschnittlichen Abweichungen in % zwischen den Sensoren an der Saugseite in Abhängigkeit des gemessenen Druckniveaus dar.

Messreihe	pÜ Saugseite > 0,5 [bar]	pÜ Saugseite 0,5 < 0,4 [bar]	pÜ Saugseite 0,4 < 0,3 [bar]	pÜ Saugseite 0,3 < 0,2 [bar]	pÜ Saugseite < 0,2 [bar]
n = 600 [1/min]	1,025%	0,318%	0,877%	n.V.	n.V.
n = 800 [1/min]	0,411%	0,695%	3,206%	7,347%	n.V.
n = 1000 [1/min]	0,419%	0,487%	2,644%	5,496%	n.V.
n = 1200 [1/min]	1,260%	3,993%	7,336%	17,259%	n.V.
n = 1500 [1/min]	n.V.	n.V.	0,973%	2,801%	18,259%

Tabelle 18: Durchschnittliche Abweichungen des Kistler Drucksensors vom Messwert des Endress Hauser Drucksensors an der Saugseite in Abhängigkeit des Druckniveaus am Sensor

Es kann über die Messreihen ein gewisser Zusammenhang zwischen Messungengenauigkeiten und niedriger werdendem Druckniveau am Sensor erkannt werden, es wird davon ausgegangen, dass die Messgenauigkeit einhergehend mit dem Druckniveau am Sensor abfällt. Auch die deutlich bessere Messgenauigkeit an der Druckseite, wo ein höheres Druckniveau herrscht, spricht für diese Vermutung. Das Messsignal des Kistler Drucksensors wird ab einem Druckniveau von weniger als 0,3 bar über Umgebungsdruck zunehmend unplausibel. Dies führt zu der Erkenntnis, dass die zusätzliche Instrumentierung des Endress Hauser Druckaufnehmers an der Saugseite definitiv vorteilhaft war.

Schlussfolgerung

Anhand dieser Auswertung ist es also teilweise möglich auf die Instrumentierung von Endress Hauser Prozessdrucksensoren zu verzichten und auch Betriebspunktmessungen über hochfrequent abtastbare Kistler Drucksensoren durchzuführen. Jedoch muss der Nullpunktversatz dieser Sensoren am Messverstärker ausgeglichen werden und, da es sich um Absolutdrucksensoren handelt, der Umgebungsdruck zum Versuchszeitpunkt im Nachgang rechnerisch kompensiert werden. Zusätzlich gilt die Einschränkung, dass ein gewisser Mindestdruck etwa 0,5 bar Überdruck nicht unterschritten werden sollte, um die Messgenauigkeit zu wahren. Letzteres kann an der Saugseite der Versorgungspumpe bei höheren Durchflussraten nicht erfüllt werden.

Wirft man einen Blick auf die Herstellerangaben zur Sensorgenauigkeit, fällt auf, dass die prozentuellen Angaben zur Messgenauigkeit der Kistler Drucksensoren auf die Messobergrenze bezogen sind. Durch diese Definition sind, relativ zum Messergebnis, größere Abweichungen bei geringen Drücken zulässig. Aus den 0,3% Abweichung bei 10 bar werden etwa 3% bei Drücken in der Nähe von 1 bar. Hinzu kommt, dass die Herstellerangaben zur Messgenauigkeit dieser Druckaufnehmer nur eingeschränkt gültig sind, da der kompensierte Temperaturbereich von 25 °C bis 120 °C bei den Messreihen mit Mediumstemperatur 18 °C unterschritten wird.

Kapitel 6: Auswertung und Analyse der hochfrequenten Druckpulsationen

In Kapitel 6 werden die Messergebnisse zu Ausprägung und Ausbreitung der hochfrequenten Druckpulsationen anhand der Messreihen am Universalversuchsstand präsentiert. Die Messdaten werden im Frequenzbereich dargestellt, analysiert und interpretiert. Anschließend werden die Messreihen am Pelton-Turbinenversuchsstand ausgewertet und zuletzt die Ergebnisse beider Versuchsanordnungen zur Plausibilitätskontrolle gegenübergestellt.

Es erfolgen zweierlei Untersuchungen, wobei zum einen die an der Pumpe entstehenden Druckpulsationen evaluiert werden und es zum anderen gilt die Ausbreitung der Pulsationen im Rohrleitungssystem zu quantifizieren.

Zur Darstellung der Frequenzspektra werden Wasserfalldiagramme gewählt, deren X-Achse die Frequenz in Hertz, die Y-Achse je nach Messung Durchfluss, Drehzahl oder Sensornummer und die Z-Achse die Amplitude in % der Förderhöhe darstellt.

Im Rahmen der Auswertung der Messdaten am Universalversuchsstand mittels FFT via MATLAB wurde kein Filter, jedoch ein Hann-Fenster verwendet. Bei der Auswertung der Messdaten am Pelton-Turbinenversuchsstand wurde zusätzlich ein Kammfilter eingesetzt (für Parameter des Filters siehe Abschnitt 4.5).

Informationen zur Ablage der Messdaten der hochfrequenten Druckpulsationen anhand verschiedener Betriebspunkte sowie ausgewählte Darstellungen, welche in die Auswertung eingeflossen sind, sind unter *Anhang E* zu finden. Eine Beschreibung des Scripts zur Auswertung der Messdaten mittels MATLAB sowie Informationen zu dessen Ablage sind unter *Anhang C* ersichtlich.

6.1 Ausprägung hochfrequenter Druckpulsationen an der Versorgungspumpe

Für die Abschätzung der entstehenden Druckpulsationen an der Versorgungspumpe wird der druckseitige hochfrequent abtastbare Kistler Drucksensor (Druckmessstelle 2, siehe Schema *Abbildung 14*) am Universalversuchsstand herangezogen.

Es gilt zu klären welche Betriebsparameter Einfluss auf die Amplitude der entstehenden Pulsationen bei Schaufelblattpassierfrequenz haben und welche Größenordnungen diese Pulsationen annehmen. Es werden die Frequenzspektra in *Abbildung 28* bei Nulldurchfluss, in *Abbildung 29* bei mittlerem Durchfluss und in *Abbildung 30* bei maximalem Durchfluss, jeweils in Abhängigkeit der Drehzahl dargestellt. Aus den Spektra gilt es zu evaluieren, ob neben der Schaufelpassierfrequenz noch weitere dominante Frequenzen ersichtlich sind und es gilt abzuschätzen, ob Tendenzen zu Einflüssen auf deren Ausprägung erkannt werden können. Auf die Darstellung der Signale im Zeitbereich wird verzichtet, da daraus keine relevanten Erkenntnisse gewonnen werden können.

Es sind die charakteristischen Frequenzen des 2-, 7- und 14-fachen Drehklangs in den Spektra erkennbar. Diese sind in den Abbildungen jeweils mit grünen Linien markiert.

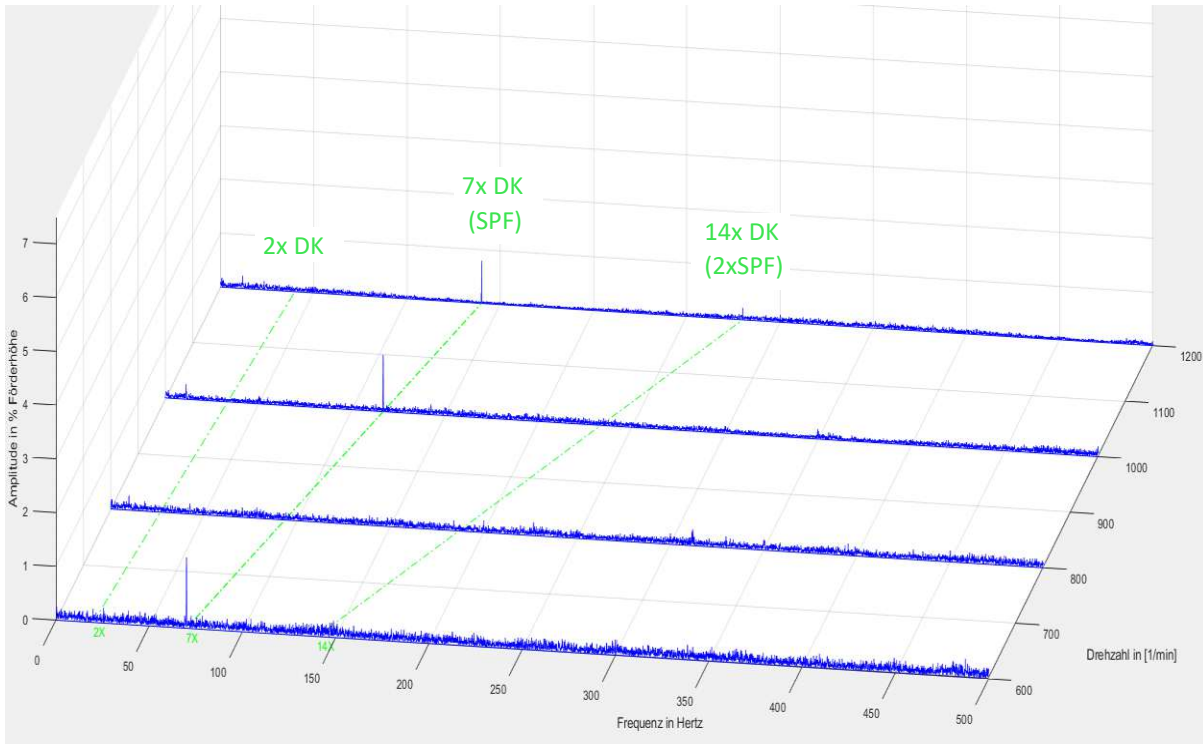


Abbildung 28: Frequenzspektra bei Nulldurchfluss anhand unterschiedlicher Drehzahlen

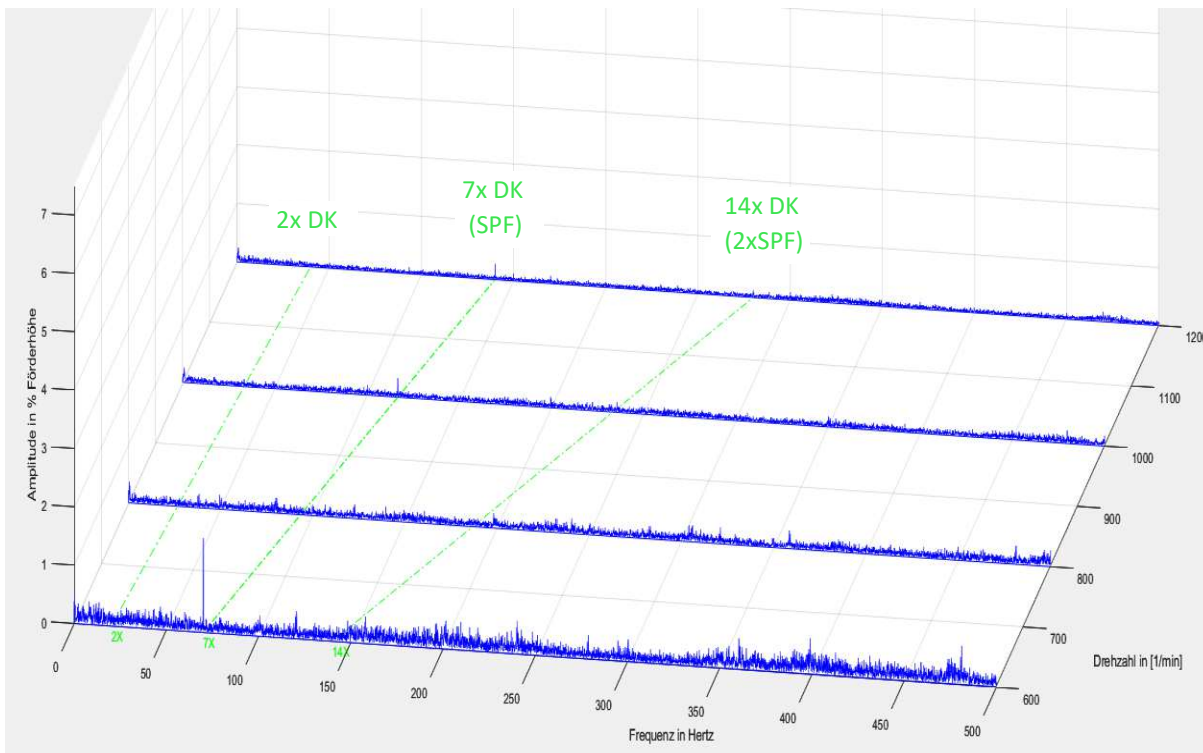


Abbildung 29: Frequenzspektra bei mittlerem Durchfluss (80 Liter pro Sekunde) anhand unterschiedlicher Drehzahlen

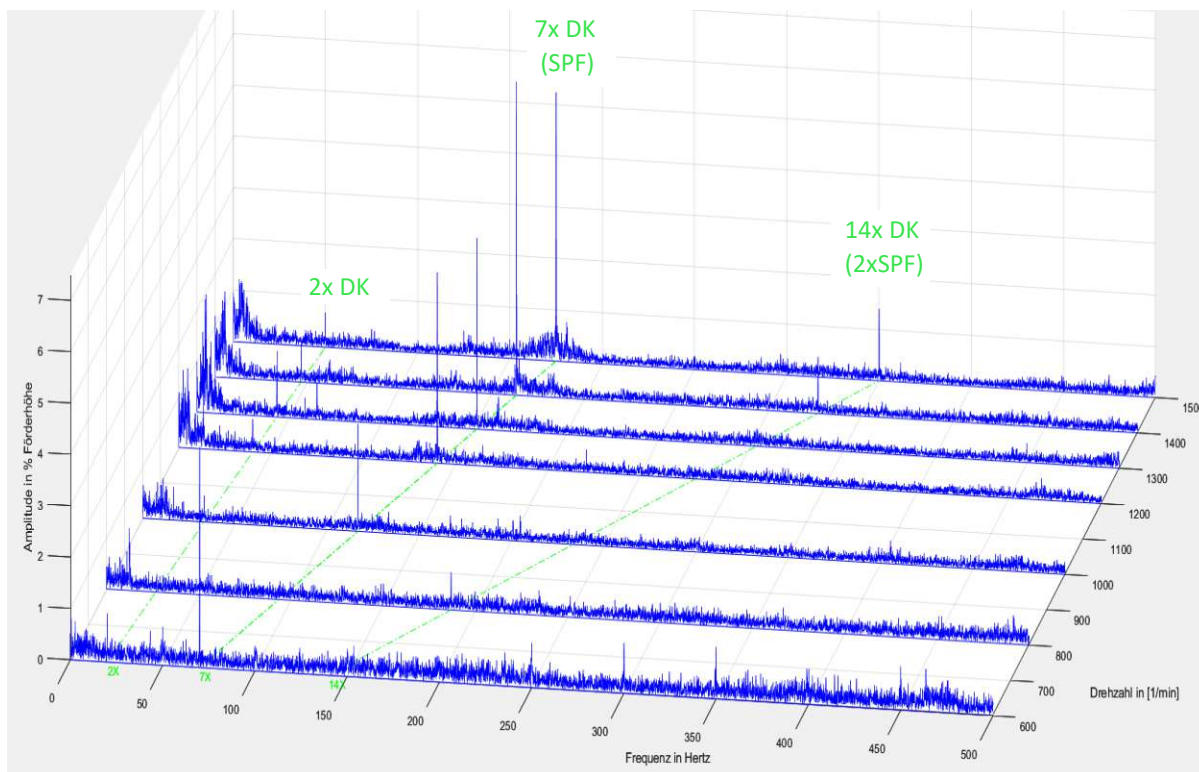


Abbildung 30: Frequenzspektra bei maximalem Durchfluss anhand unterschiedlicher Drehzahlen

Jene Amplitude, die mit dem 7-fachen Drehklang auftritt, ist der Schaufelpassierfrequenz (SPF) zuzuordnen. Es erweckt den Eindruck, als würde das Messrauschen in Abhängigkeit des Durchflusses stark zunehmen. Diese Entwicklung wirkt plausibel, da die Vermutung besteht, dass bei höheren Durchflüssen und damit einhergehend höheren Leistungsaufnahmen der Versuchsstand größere Amplituden hinsichtlich dessen Strukturschwingungen erfährt. Diese Strukturschwingungen finden sich auch in den größeren Amplituden des Messrauschens wieder. Die Zunahme des Messrauschens wird durch den in den Spektren gewählten Bezug der Pulsationen auf die Förderhöhe, welche mit zunehmendem Durchfluss absinkt, jedoch überproportional stark dargestellt.

Es lässt sich anhand der Spektren eine Tendenz erahnen, dass der Durchfluss die Ausbildung der Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz beeinflusst. Ob das zutreffend ist und welche Einflussfaktoren in die Ausprägung der Pulsationen bei Schaufelpassierfrequenz einfließen wird in Kapitel 6.1.1 untersucht.

Welche weiteren charakteristischen Frequenzen im Drucksignal vorhanden sind, welche Größenordnung diese annehmen und welcher Entstehungsmechanismus diesen zugrunde liegt, wird in Kapitel 6.1.2 erarbeitet.

6.1.1 Pulsationen bei Schaufelpassierfrequenz

Die Frequenzspektra zur Ausbildung der Druckpulsationen an der Versorgungspumpe (aufgenommen an Druckmessstelle 2 am Universalversuchsstand, siehe Schema *Abbildung 14*) über alle Drehzahlen als Funktion des Durchflusses sind unter *Anhang E* zu finden.

Ausgewertet aus den unter Anhang E dargestellten Frequenzspektra werden an dieser Stelle die relativen Druckpulsationen, bezogen auf die jeweilige Förderhöhe, in Abhängigkeit der Drehzahl als Funktion von Durchfluss und Druckniveau geplottet. Daraus sollen Einflüsse auf die Amplitude der Druckschwankungen aus Durchfluss und Drehzahl, respektive Druckniveau, ersichtlich werden.

Der Verlauf der Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz über dem Durchfluss anhand der Drehzahlen ist in *Abbildung 31* dargestellt. Aufgrund der nicht nachweisbaren Schaufelpassierfrequenz bei der Messreihe mit 800 Umdrehungen pro Minute, fehlt diese in der Auswertung und wegen des eingeschränkten Messbereichs des druckseitigen hochfrequent abtastbaren Kistler Drucksensors, existieren nur bei hohen Durchflüssen Messdaten von Drehzahlen über 1200 Umdrehungen pro Minute.

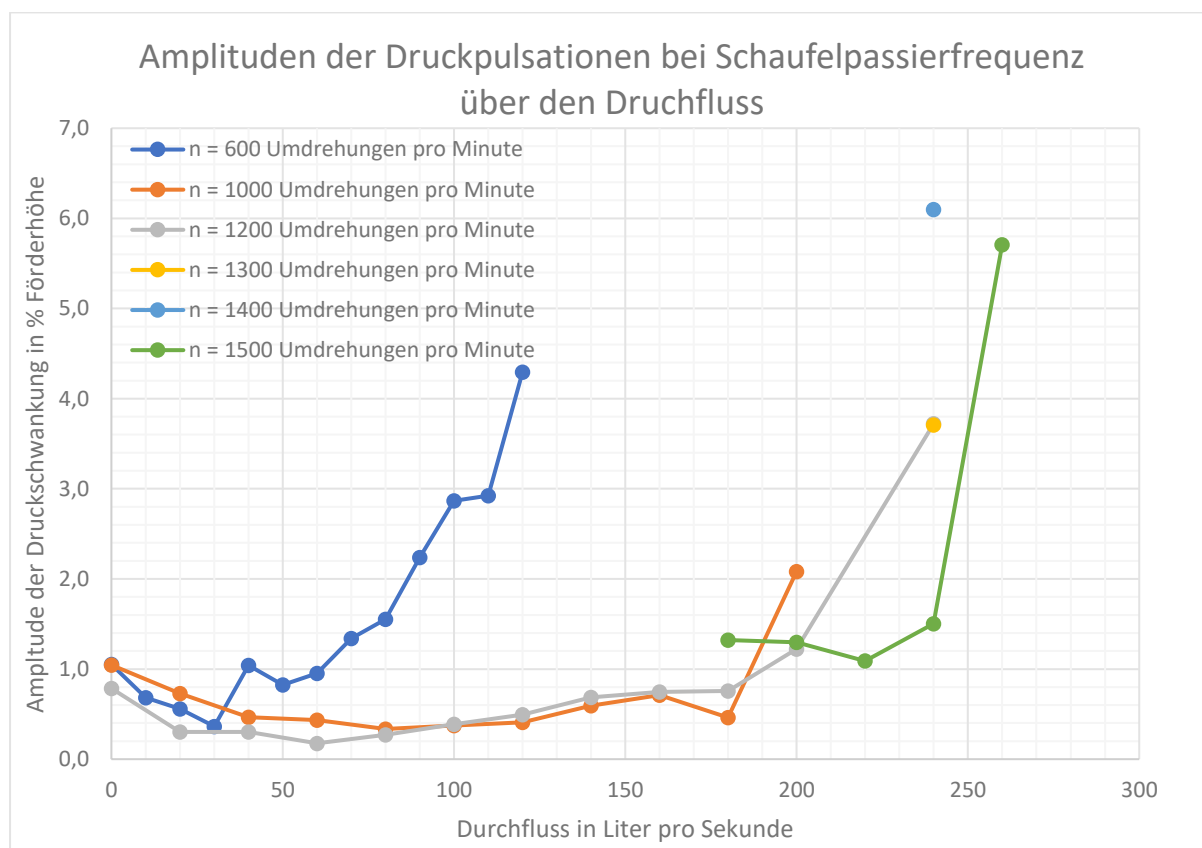


Abbildung 31: Amplituden der Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz über dem Durchfluss

Abbildung 31 lässt darauf schließen, dass die Pulsationen, unabhängig von der Drehzahl, ihren Maximalwert beim jeweils größten zu erreichendem Durchflusswert aufweisen. Damit die Messdaten

anhand letzterer Vermutung erneut betrachtet werden können, wird *Abbildung 31* dahingehend angepasst, dass die Durchflusswerte der Messreihen auf den jeweiligen maximalen Durchflusswert bezogen werden. Der hiermit eingeführte dimensionslose Durchfluss Q^* errechnet sich nach Gl. (6.1).

$$Q^* = \frac{q}{Q_{max}(n)} \quad (6.1)$$

Abbildung 32 zeigt diese überarbeitete Darstellung der Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz in Abhängigkeit des dimensionslosen Durchflusses. Auf der X-Achse ist nun der dimensionslose Durchfluss, welcher Werte zwischen 0 bei Nulldurchfluss und 1 beim maximalem Durchfluss der jeweiligen Messreihe annimmt. In diesem Diagramm ist ersichtlich, dass sich die Pulsationen bei Schaufelpassierfrequenz anhand aller Messreihen über den dimensionslosen Durchfluss in ähnlicher Weise zu einem Maximum beim jeweiligen Höchstdurchfluss ansteigen.

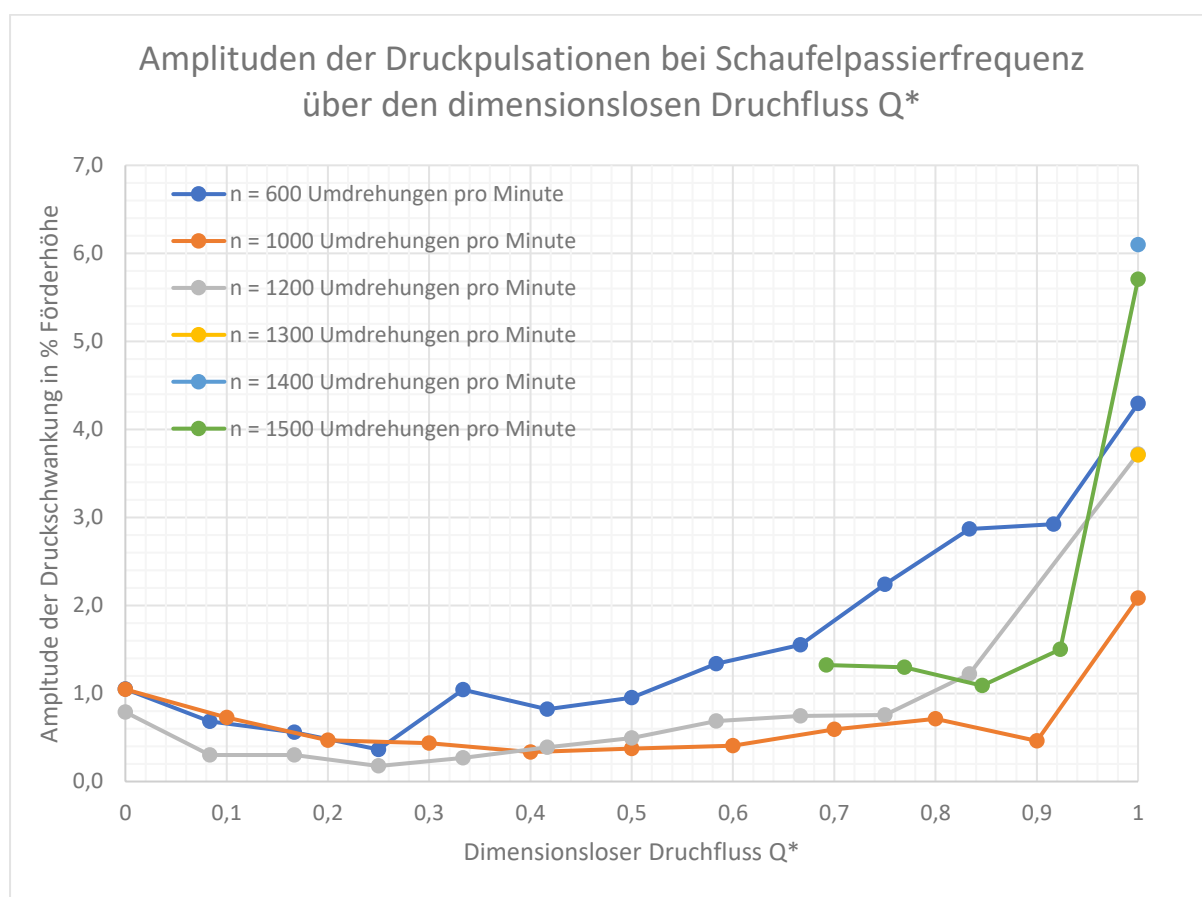


Abbildung 32: Amplituden der Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz über den dimensionslosen Durchfluss

Neben einer möglichen Durchflussabhängigkeit werden die Pulsationen auch hinsichtlich des Einflusses vom Druckniveau untersucht. *Abbildung 33* stellt die Amplituden der Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz in Abhängigkeit des Druckniveaus in Metern Förderhöhe dar.

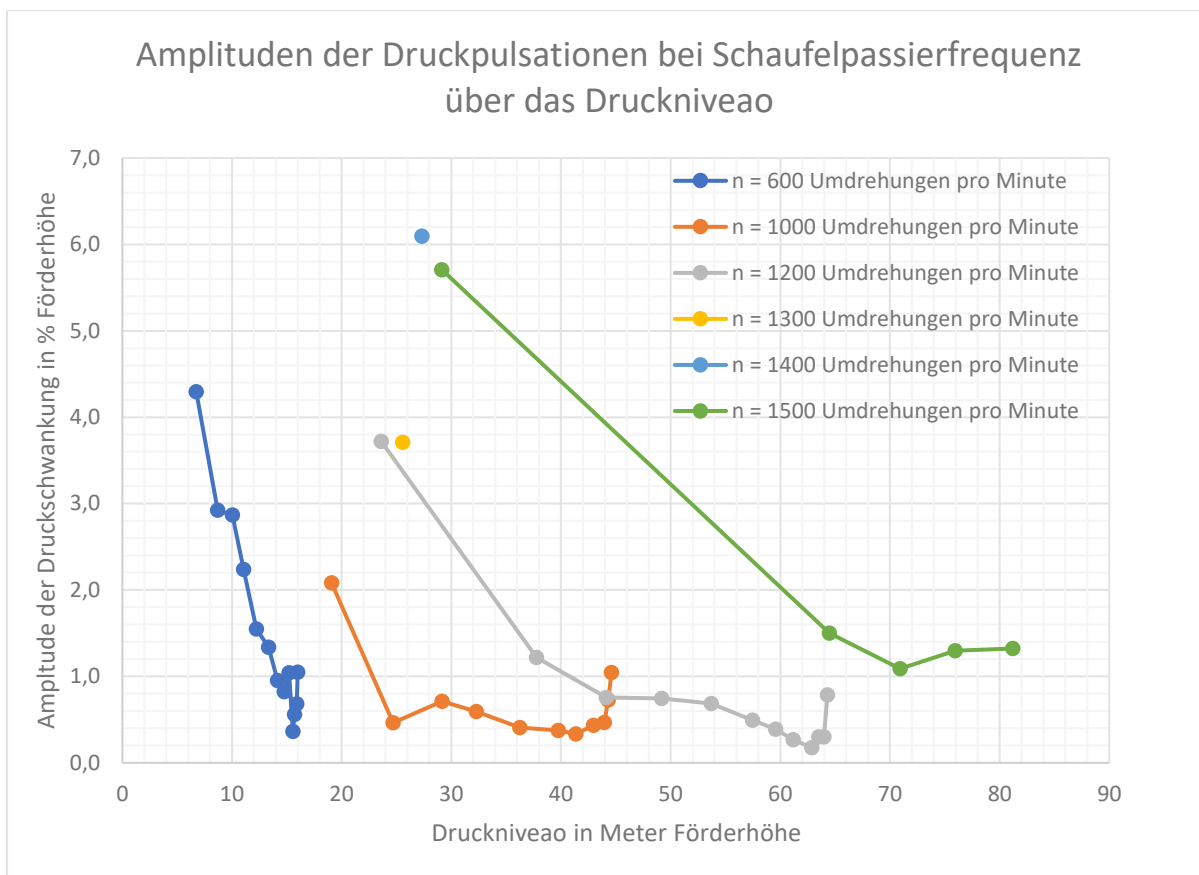


Abbildung 33: Amplituden der Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz über das Druckniveau

Abbildung 33 lässt keine eindeutige Abhängigkeit der Amplitude der Pulsationen aus dem Druckniveau erkennen. Es lässt sich jedoch darauf schließen, dass die Pulsationen, unabhängig von der Drehzahl, ihren Maximalwert beim jeweils geringsten zu erreichendem Druckniveau aufweisen. Damit die Messdaten anhand letzterer Vermutung erneut betrachtet werden können, wird *Abbildung 33* dahingehend angepasst, dass die Werte des Druckniveaus der Messreihen auf die jeweilige minimale Förderhöhe bezogen werden. Die Berechnung dieser dimensionslosen Förderhöhe gestaltet sich nach Gl. (6.2).

$$H^* = \frac{H}{H_{min}(n)} \quad (6.2)$$

Abbildung 34 zeigt die angepasste Darstellung. Auf der X-Achse ist nun die dimensionslose Förderhöhe, welcher Werte zwischen 1 bei minimalem Druckniveau und je nach Messreihe etwa 2,7 beim größtmöglichen Druckniveau annimmt, ersichtlich. Im Diagramm ist zum einen ersichtlich, dass die Pulsationen ein ähnliches Verhalten über das dimensionslose Druckniveau aufweisen. Das Maximum der Pulsationen kommt jeweils am Betriebspunkt des geringsten Druckniveaus zu liegen. Zusätzlich ist ersichtlich, dass auch am Betriebspunkt des maximalen Druckniveaus ein lokales Maximum der Druckpulsationen zu liegen kommt.

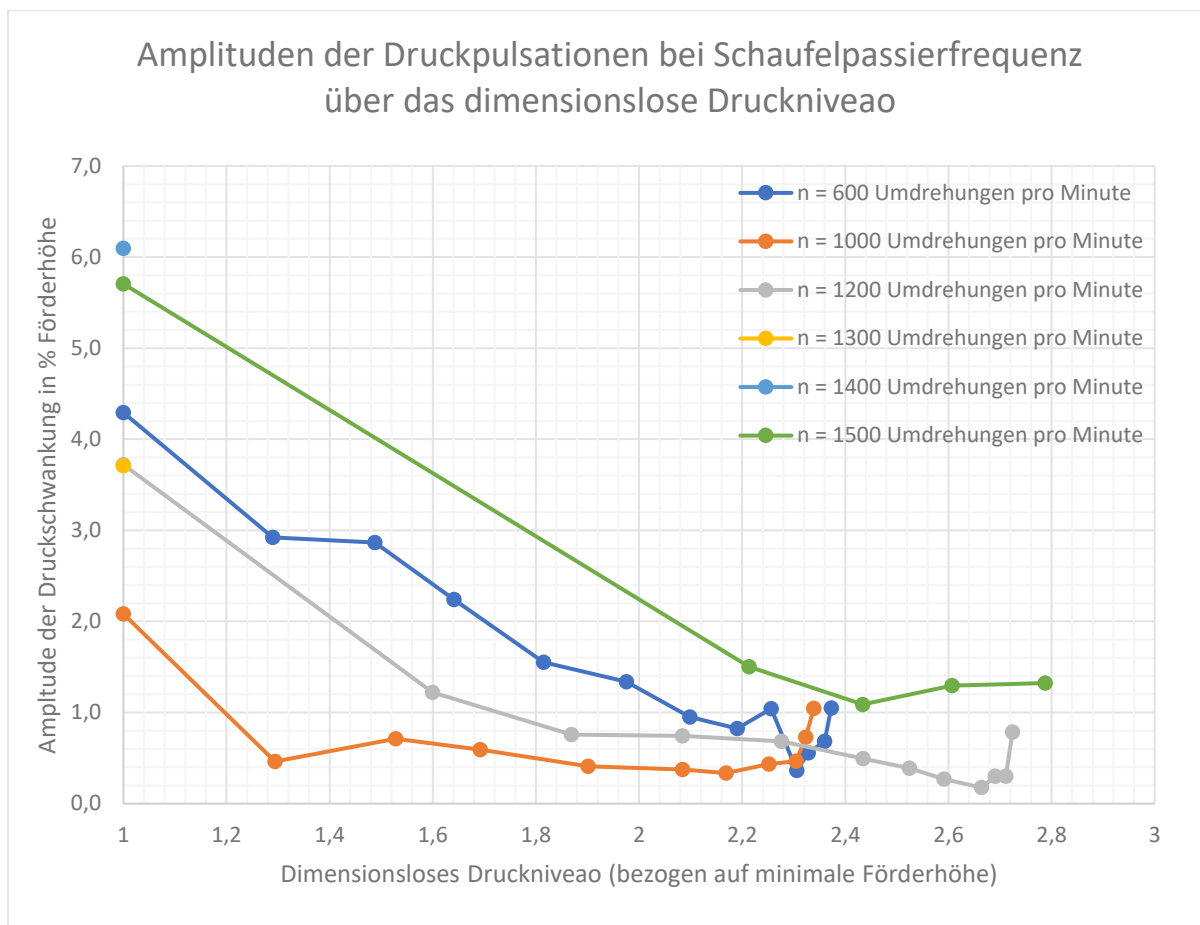


Abbildung 34: Amplituden der Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz über das dimensionslose Druckniveau

Es kann weder ein direkter Zusammenhang zwischen dem Druckniveau, noch dem Durchfluss und der Ausprägung von hochfrequenten Druckschwankungen bei Schaufelpassierfrequenz erkannt werden. Anhand von *Abbildung 32* und *Abbildung 34* ist ersichtlich, dass bei allen Messreihen die Maximalwerte der Pulsationen - bezogen auf die Förderhöhe in Prozent - beim jeweils größtmöglichem Durchfluss, beziehungsweise respektive geringstmöglichem Druckniveau, erreicht wurden. Darüber hinaus kann anhand *Abbildung 34* erkannt werden, dass jeweils am Punkt des größtmöglichen Druckniveaus, also bei Nulldurchfluss, ein lokales Maximum der Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz vorliegt.

Es ergibt sich die Vermutung, dass diese Betriebspunkte bei Maximaldurchfluss deswegen so starke Pulsationen aufwerfen, weil sie bereits im Überlastbereich der Maschine zu liegen kommen. Damit dieser Frage nachgegangen werden kann, wird die abgegebene hydraulische Leistung der Versorgungspumpe untersucht. Die Daten zur Leistungsaufnahme der Antriebsmaschine liegen nicht vor, jedoch kann die Frage der Überlast trotzdem beantwortet werden. Es wird davon ausgegangen, dass beim Betrieb dieser radialen Kreiselpumpe die Leistungsaufnahme über die Antriebsmaschine monoton mit dem zu fördernden Durchfluss ansteigt. Das heißt, dass ab jenem Betriebspunkt, an dem die abgegebene hydraulische Leistung wieder beginnt abzusinken, der Überlastbereich der Maschine erreicht ist. Anhand diesem Kriterium wird der angepasste dimensionslose Durchfluss definiert, welcher den Durchfluss auf den Durchfluss, bei dem das Maximum der hydraulischen Leistung zu

liegen kommt, bezieht. Die Berechnung des angepassten dimensionslosen Durchflusses Q^{**} gestaltet sich nach Gl. (6.3).

$$Q^{**} = \frac{Q}{Q_{Phydr_max}(n)} \quad (6.2)$$

Die Ausbildung dieser Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz über den angepassten Dimensionslosen Durchfluss Q^{**} ist in *Abbildung 35* dargestellt. Die Messpunkte bei maximalem Durchfluss anhand der Drehzahlen von 1300 und 1400 Umdrehungen pro Minute können nicht in das Diagramm einfließen, da für diese nicht validiert werden kann, dass diese im Überlastbereich zu liegen kommen. Es wird jedoch aufgrund des Niveaus der hydraulischen Leistung an diesen Punkten stark davon ausgegangen, dass auch diese in der Überlast angesiedelt sind.

Anhand *Abbildung 35* ist ersichtlich, wann bei welcher Messreihe der Überlastbereich erreicht wird und wie weit in diesem der Betriebspunkt des maximalen Durchflusses zu liegen kommt.

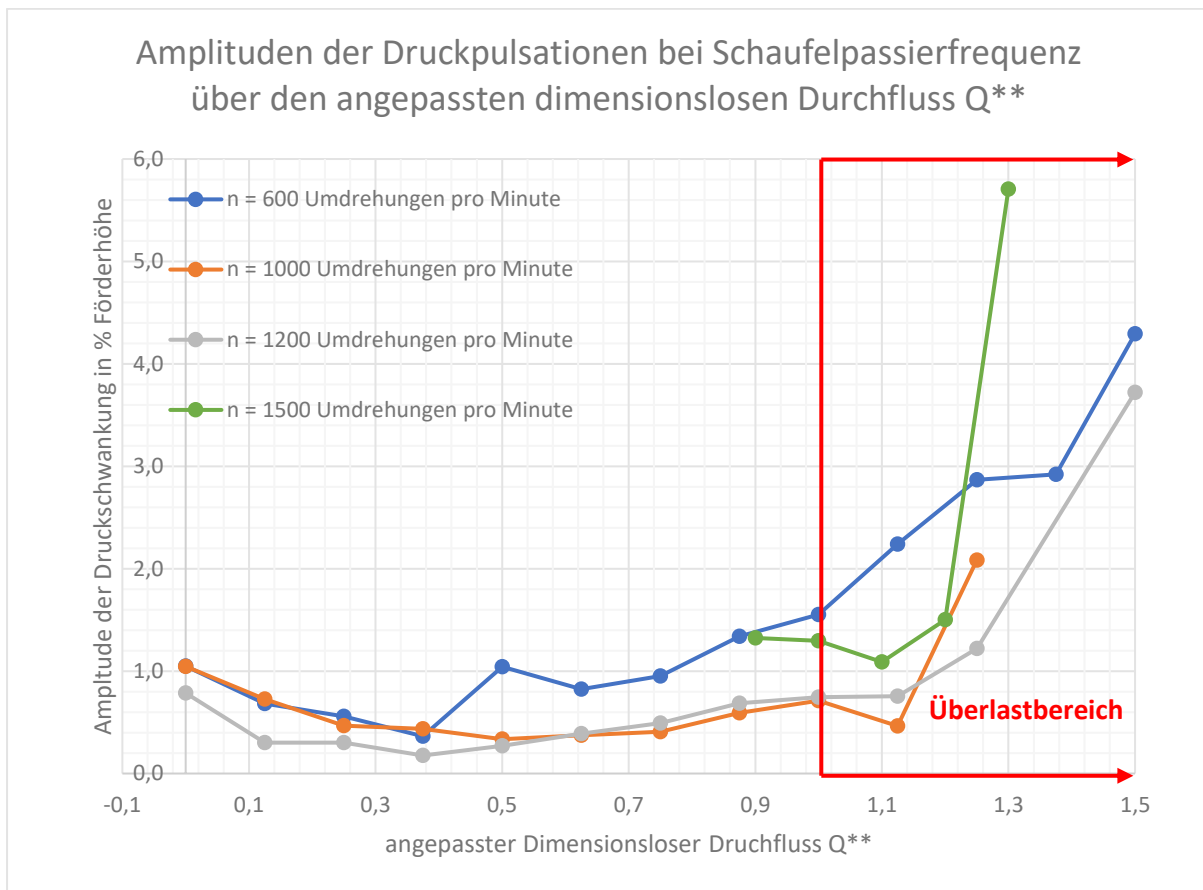


Abbildung 35: Amplituden der Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz über den angepassten dimensionslosen Durchfluss

Über den angepassten dimensionslosen Durchfluss ist ein eindeutiger Einfluss auf die Ausprägung hochfrequenter Druckpulsationen dargelegt. Die größten Amplituden der Druckpulsationen, bezogen

auf die Förderhöhe, kommen im Überlastbereich der Versorgungspumpe zu liegen. Dieser Zusammenhang ist logisch, da die hochfrequenten Druckschwankungen aus instationären Strömungsphänomenen hervorgehen. Strömungsphänomene durch Fehlanströmungen und Wirbelbildung treten in der Überlast, aber auch in der Teillast verstärkt auf. Durch Letzteres erklärt sich auch das lokale Maximum der Druckpulsationen bei Nullförderung.

Auch hinsichtlich der absoluten Amplituden der Pulsationen ist der größte Wert im Überlastbereich der jeweiligen Messreihe zu finden. Eine Ausnahme stellt die Messreihe bei 1000 Umdrehungen pro Minute dar, diese weist eine wesentlich geringere Amplitude als die anderen Messreihen beim Höchstdurchfluss auf und deren maximale Amplitude kommt am Nulldurchfluss zu liegen. Bei dieser Messreihe kommt auch der Betriebspunkt maximalem Durchflusses weniger weit im Überlastbereich zu liegen, als bei den anderen Messreihen.

Fazit zur Ausprägung der hochfrequenten Druckpulsationen

Die hochfrequenten Pulsationen bei Schaufelpassierfrequenz, aufgenommen an der Druckseite der Versorgungspumpe belaufen sich über weite Betriebsbereiche auf 0,5% bis 1,5% der Förderhöhe. Beim Erreichen des Überlastbereichs steigen diese stark an. Es treten Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz mit bis zu 6% der Förderhöhe auf. Im Durchschnitt über die Messreihen erreichen diese am Maximaldurchfluss eine Amplitude von etwa 4,3% der Förderhöhe.

Nahe am Auslegungspunkt der Maschine, bei einer Drehzahl von 1500 Umdrehungen pro Minute und einem Durchfluss von 180 Liter pro Sekunde belaufen sich die Schwankungen auf 1,3% der Förderhöhe.

6.1.2 Pulsationen bei anderen Frequenzen als der Schaufelpassierfrequenz

Neben den Pulsationen bei Schaufelpassierfrequenz konnten in den Frequenzspektra zeitweise noch weitere signifikante Amplituden an anderen Frequenzen ausgemacht werden. Abgesehen vom Sonderfall der Messreihe bei 800 Umdrehungen pro Minute stellt die Schaufelpassierfrequenz jedoch immer die dominante Amplitude dar. Bei fast allen Messreihen werden im Überlastbereich noch weitere Frequenzen ersichtlich. Der Drehklang, dessen zweite harmonische, die doppelte Schaufelpassierfrequenz und erhöhte Amplituden bei Frequenzen unter dem Drehklang.

Zur Interpretation dieser weiteren Peaks wird die Ausbreitung der Druckschwankungen am Universalversuchsstand von der Druckseite der Versorgungspumpe (Druckmessstelle 2, siehe *Abbildung 14*) bis hin zur Messstelle in der Pumpengrube (Druckmessstelle 5, siehe *Abbildung 14*) betrachtet, um zwischen Strömungsphänomenen und mechanischen Strukturschwingungen unterscheiden zu können. Als Kriterium wird dabei herangezogen, dass mechanische Strukturschwingungen weniger stark abklingen als die Strömungsphänomene, welche eine höhere Dämpfung aufweisen.

Es werden die Spektra bei einer Drehzahl von 1500 Umdrehungen pro Minute und einem Durchfluss von 240 Liter pro Sekunde (siehe *Abbildung 36*), sowie bei einer Drehzahl von 1000 Umdrehungen pro Minute und einem Durchfluss von 200 Liter pro Sekunde (siehe *Abbildung 37*) untersucht. In den Frequenzspektra dieser Betriebspunkte sind die Peaks an den charakteristischen Frequenzen, welche

mittels grüner Linie als Vielfache des Drehklangs markiert sind, ersichtlich. Daher eignen sich diese gut zur Interpretation. Über der Y-Achse sind jeweils die beiden Sensoren aufgetragen, wobei 0 den Sensor an der Druckseite der Pumpe und 1 den Sensor in der Pumpengrube darstellt.

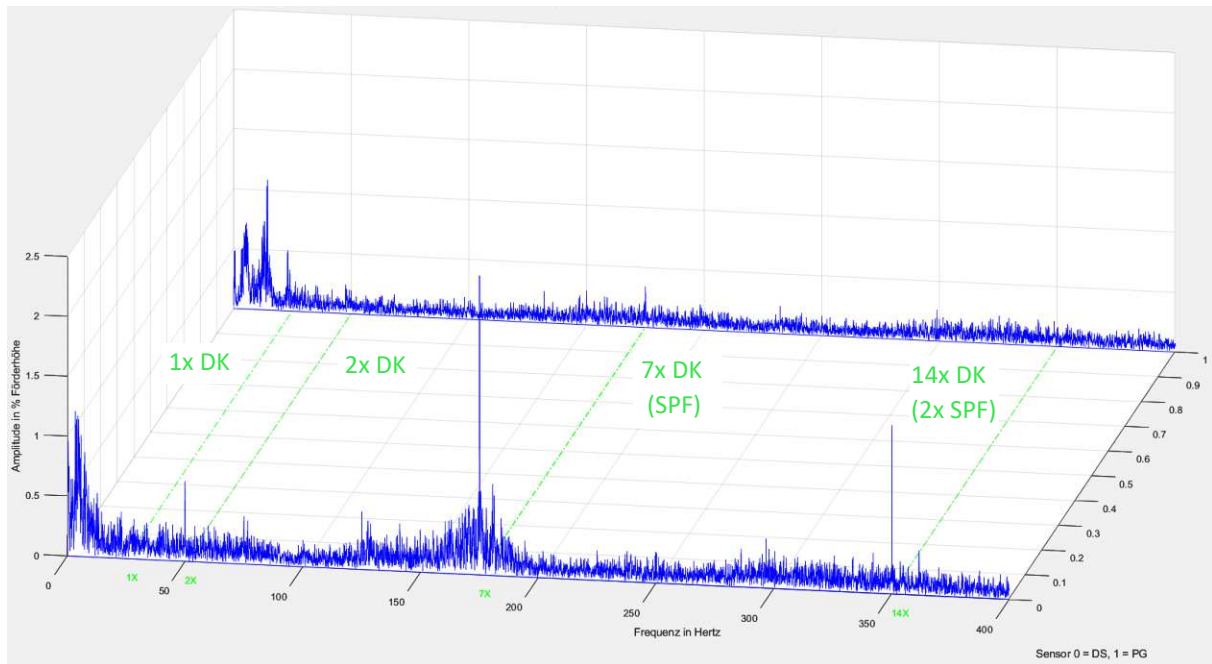


Abbildung 36: Frequenzspektra der Pulsationsausbreitung in der Pumpengrube (Druckmessstelle 2 – Druckmessstelle 5) bei Drehzahl 1500 Umdrehungen pro Minute und 240 Liter pro Sekunde Durchfluss

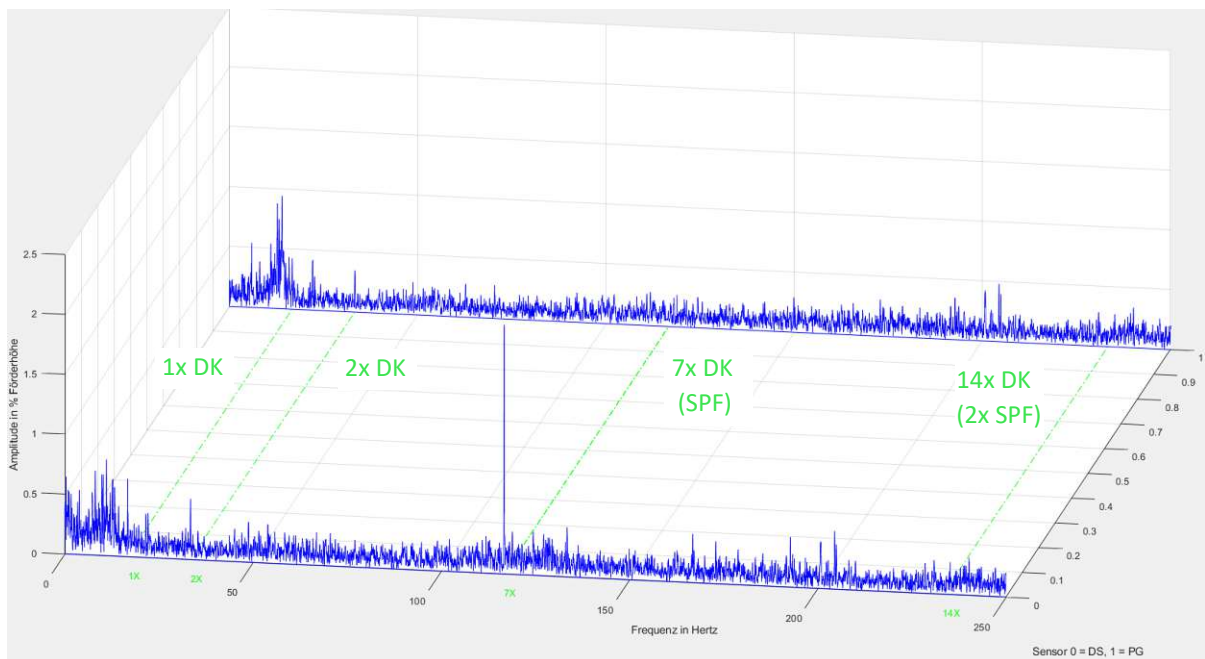


Abbildung 37: Frequenzspektra der Pulsationsausbreitung in der Pumpengrube (Druckmessstelle 2 – Druckmessstelle 5) bei Drehzahl 1000 Umdrehungen pro Minute und 200 Liter pro Sekunde Durchfluss

Es besteht anhand *Abbildung 36* und *Abbildung 37* die Vermutung, dass es sich bei den Peaks am Drehklang (1xDK), unter dem Drehklang (<1xDK) und der zweiten harmonischen des Drehklangs (2xDK) um mechanische Strukturschwingungen handelt. Gegen ein von der Versorgungspumpe ausgehendes Strömungsphänomen spricht, dass die Dämpfung eine andere Größenordnung wie bei den hochfrequenten Pulsationen bei Schaufelpassierfrequenz bis hin zur nächsten Messstelle in der Pumpengrube aufweist. Die vermutlich auf mechanischen Schwingungen basierenden Druckschwankungen klingen vergleichsweise kaum ab, jene bei Frequenzen unter dem Drehklang weisen an der Messstelle im Leitungssystem der Pumpengrube sogar zum Teil ein Maximum auf. Letzteres kann als Indiz herangezogen werden, dass bei Frequenzen unter dem Drehklang wahrscheinlich ein Resonanzeffekt des Rohrleitungssystems in der Pumpengrube vorliegt.

Abbildung 26 stellt die vorhandenen Amplituden in % der Förderhöhe bei den charakteristischen Frequenzen, welche als Vielfache des Drehklangs (abgekürzt DK) dargestellt sind, an der Druckseite der Versorgungspumpe dar.

Amplituden in % Förderhöhe	< 1xDK	1xDK	2xDK	7xDK (SPF)	14xDK (2x SPF)
n = 1000 [1/min] Q = 200 [l/s]	0,5 - 0,8%	0,648%	0,508%	2,083%	n.V.
n = 1500 [1/min] Q = 240 [l/s]	0,5% - 1,2%	n.V.	0,666%	5,231%	1,405%

Tabelle 19: Amplituden der charakteristischen Frequenzen an der Druckseite der Versorgungspumpe

Tabelle 20 fasst die Dämpfung der Amplituden charakteristischer Frequenzen von der Druckseite der Versorgungspumpe bis hin zur Messstelle in der Pumpengrube zusammen. Dabei wird ein Dämpfungsfaktor δ dargestellt, mit dem die Amplitude der Pulsation an der Messstelle in der Pumpengrube $\Delta H_{PG}(f)$ multipliziert werden muss, um den Ausgangswert an der Druckseite der Versorgungspumpe $\Delta H_{DS}(f)$ zu erreichen. Gl. (6.3) verdeutlicht die Berechnung des Dämpfungsfaktors.

$$\delta = \frac{\Delta H_{DS}(f)}{\Delta H_{PG}(f)} \quad (6.3)$$

Dämpfungsfaktor δ	< 1xDK	1xDK	2xDK	7xDK (SPF)	14xDK (2x SPF)
n = 1000 [1/min] Q = 200 [l/s]	teilweise größer	1,522	1,466	15,625	n.V.
n = 1500 [1/min] Q = 240 [l/s]	teilweise größer	n.V.	3,448	15,385	8,772

Tabelle 20: Dämpfung der Amplituden charakteristischer Frequenzen innerhalb der Pumpengrube

Nicht sicher geklärt bleibt die Amplitude bei der doppelten Schaufelpassierfrequenz, diese ist bei den Messreihen mit 1400, 1500 und interessanterweise auch bei jener mit 800 Umdrehungen pro Minute beim maximalen Durchfluss ersichtlich. Bei der Messreihe mit Drehzahl 1200 Umdrehungen pro Minute ist dieser Peak knapp unter dem Maximaldurchfluss ersichtlich. Es besteht die Vermutung, dass es sich hierbei um die zweite harmonische der Schaufelpassierfrequenz handelt und kein separates Phänomen, jedoch fällt das Ausmaß der Dämpfung bis zur Messstelle in der Pumpengrube

geringer aus, als bei der Pulsation mit Schaufelpassierfrequenz. *Tabelle 21* listet die maximalen Amplituden der doppelten Schaufelpassierfrequenz an der Druckseite der Versorgungspumpe, bezogen auf die Förderhöhe in Prozent.

Drehzahl	n = 800 [1/min]	n = 1200 [1/min]	n = 1400 [1/min]	n = 1500 [1/min]
Amplitude 2xSPF	0,736%	0,485%	1,103%	1,614%

Tabelle 21: Maximale Amplituden der doppelten Schaufelpassierfrequenz in % Förderhöhe

Abgesehen von der Schaufelpassierfrequenz, welche in der Regel die dominanten Amplituden in den Spektren aufweist, sind an gewissen Betriebspunkten noch Amplituden bei charakteristischen Frequenzen unter dem Drehklang, beim Drehklang, beim doppelten Drehklang und bei der doppelten Schaufelpassierfrequenz zu finden. *Tabelle 22* stellt die zu erwartenden maximalen Amplituden an der Druckseite der Versorgungspumpe, bezogen auf die Förderhöhe in Prozent, und den vermutenden Entstehungsmechanismus dieser Pulsationen dar.

Charakteristische Frequenz	max. Amplitude in % Förderhöhe	Entstehungsmechanismus
< Drehklang	1%	Mechanische Schwingung, vermutlich durch Strömungsphänomene im Rohrleitungssystem
1x Drehklang	<1%	Mechanische Schwingung, durch Maschine
2x Drehklang	1%	Mechanische Schwingung, durch Maschine
7x Drehklang (SPF)	6%	Strömungsphänomen, durch Schaufelblattdurchgang in der Maschine
14x Drehklang (2x SPF)	1,6%	Strömungsphänomen, vermutlich durch Schaufelblattdurchgang mitverursacht

Tabelle 22: Maximal zu erwartende Amplituden an der Druckseite der Pumpe bei charakteristischen Frequenzen und deren vermuteter Entstehungsmechanismus

6.2 Ausbreitung hochfrequenter Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz im Rohrleitungssystem

Die Frequenzspektra zur Ausbreitung der Druckpulsationen am Universalversuchsstand von der Versorgungspumpe (Druckmessstelle 2) über die Messstelle in der Pumpengrube (Druckmessstelle 5) bis hin zum Oberwasser (Druckmessstelle 6) für alle gemessenen Drehzahlen bei jeweils maximalem Durchfluss, sowie jene, die den Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit oder des Druckniveaus quantifizieren sollen, sind unter *Anhang E* zu finden. Die Definition der Druckmessstellen ist *Abbildung 14* unter Abschnitt 3.2 zu entnehmen.

An dieser Stelle erfolgt durch die Auswertung der Frequenzspektra an mehreren Messstellen bei selbem Betriebspunkt eine Abschätzung der Dämpfung der hochfrequenten Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz im Rohrleitungssystem des Universalversuchsstandes. Die Untersuchung beschränkt sich auf die Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz, da diese die dominante Pulsation darstellen. Pulsationen bei anderen charakteristischen Frequenzen (siehe Kapitel 6.2.1), können nur an ausgewählten Betriebspunkten erkannt werden und weisen in der Regel deutlich geringere Amplituden als die Schaufelpassierfrequenz auf, weshalb diese nicht in die Auswertung mit einfließen.

Es wird dahingehend untersucht, wie sich die hochfrequenten Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz ausbreiten, ob an den Messstellen in der Pumpengrube und am Oberwasser noch Einfluss dieser hochfrequenten Druckpulsationen gegeben ist. Sofern eine Amplitude bei Schaufelpassierfrequenz an diesen Messstellen nachweisbar ist, wird deren Einfluss in Form eines Dämpfungsfaktors, wie in Gl. (6.3) definiert, angegeben, beziehungsweise als Amplitudenverhältnis zur Pulsation an der Druckseite der Versorgungspumpe in Prozent angegeben.

Es erfolgt eine Untersuchung der Einflüsse auf der Ausbreitung hochfrequenter Druckpulsationen. Konkret gilt es zu klären, ob zum einen die Strömungsgeschwindigkeit oder zum anderen das Druckniveau Einfluss auf die Ausbreitung hat.

6.2.1 Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die Ausbreitung hochfrequenter Druckpulsationen

Um der Frage nachzugehen, ob die Übertragung hochfrequenter Druckpulsationen von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig ist, wird die Übertragung an zwei unterschiedlichen Betriebspunkten mit gleichem Druckniveau, jedoch möglichst unterschiedlichem Durchfluss untersucht. Die dabei untersuchten Betriebspunkte für die untersuchten Druckniveaus 60 m (siehe *Tabelle 23*), 40 m (siehe *Tabelle 24*) und 20 m Förderhöhe (siehe *Tabelle 25*) sind untenstehend aufgelistet.

Förderhöhe H	Drehzahl n	Durchfluss Q
59,58 m	1200 1/min	100,77 l/s
64,46 m	1500 1/min	232,96 l/s

Tabelle 23: Betriebspunkte zur Untersuchung der Ausbreitung der Druckpulsationen anhand des Druckniveaus von 60 m Förderhöhe

Förderhöhe H	Drehzahl n	Durchfluss Q
39,75 m	1000 1/min	102,62 l/s
37,76 m	1200 1/min	202,33 l/s

Tabelle 24: Betriebspunkte zur Untersuchung der Ausbreitung der Druckpulsationen anhand des Druckniveaus von 40 m Förderhöhe

Förderhöhe H	Drehzahl n	Durchfluss Q
15,2 m	600 1/min	39,45 l/s
19,07 m	1000 1/min	194,06 l/s

Tabelle 25: Betriebspunkte zur Untersuchung der Ausbreitung der Druckpulsationen anhand des Druckniveaus von 20 m Förderhöhe

Da die Messreihe bei 800 Umdrehungen pro Minute aufgrund nicht nachweisbarer Schaufelpassierfrequenz nicht ausgewertet werden kann, muss auf die Messreihe mit 600 Umdrehungen pro Minute zurückgegriffen werden und die Förderhöhen weichen in der Untersuchung bei einem Druckniveau von 20 Metern Förderhöhe erheblich voneinander ab.

Die ermittelten Frequenzspektren sind nicht an dieser Stelle dargestellt, sondern unter *Anhang E* zu finden. Bei keiner der untersuchten Messreihen ist am Oberwasser eine Amplitude bei Schaufelpassierfrequenz nachweisbar. In der Pumpengrube ist nur an den beiden in *Tabelle 26* dargestellten Betriebspunkten eine eindeutige Amplitude bei Schaufelpassierfrequenz erkennbar.

Förderhöhe H	Drehzahl n	Durchfluss Q
15,2 m	600 1/min	39,45 l/s
64,46 m	1500 1/min	232,96 l/s

Tabelle 26: Betriebspunkte mit nachweisbarer Schaufelpassierfrequenz an der Messstelle in der Pumpengrube

Da die Betriebspunkte sowohl was Durchfluss, als auch Druckniveau betrifft weit auseinanderliegen, kann an dieser Stelle keine Aussage zur Abhängigkeit der Ausbreitung von Pulsationen aus der Strömungsgeschwindigkeit getroffen werden. Jene beiden Betriebspunkte werden jedoch in die Auswertung unter Kapitel 6.2.3, wo alle Betriebspunkte mit nachweisbarem Einfluss der Schaufelpassierfrequenz in der Pumpengrube aufgelistet werden, miteinbezogen.

6.2.2 Einfluss des Druckniveaus auf die Ausbreitung hochfrequenter Druckpulsationen

Eine weitere Frage, die es zu klären gilt ist, ob das Druckniveau einen Einfluss auf die Ausbreitung der hochfrequenten Druckpulsationen ausübt. Hierfür wird die Übertragung bei zwei unterschiedlichen Betriebspunkten mit gleicher Strömungsgeschwindigkeit, aber möglichst unterschiedlichem Druckniveau, untersucht. Die dabei untersuchten Betriebspunkte für die Strömungsgeschwindigkeiten 40 l/s (siehe *Tabelle 27*), 80 l/s (siehe *Tabelle 28*) und 120 l/s Durchfluss (siehe *Tabelle 29*) sind untenstehend aufgelistet.

Förderhöhe H	Drehzahl n	Durchfluss Q
15,2 m	600 1/min	39,45 l/s
63,51 m	1200 1/min	41,74 l/s

Tabelle 27: Betriebspunkte zur Untersuchung der Ausbreitung der Druckpulsationen anhand des Durchflusses von 40 Liter pro Sekunde

Förderhöhe H	Drehzahl n	Durchfluss Q
12,23 m	600 1/min	80,16 l/s
61,17 m	1200 1/min	78,13 l/s

Tabelle 28: Betriebspunkte zur Untersuchung der Ausbreitung der Druckpulsationen anhand des Durchflusses von 80 Liter pro Sekunde

Förderhöhe H	Drehzahl n	Durchfluss Q
6,74 m	600 1/min	116,18 l/s
57,46 m	1200 1/min	119,41 l/s

Tabelle 29: Betriebspunkte zur Untersuchung der Ausbreitung der Druckpulsationen anhand des Durchflusses von 120 Liter pro Sekunde

Die ermittelten Frequenzspektre sind nicht an dieser Stelle dargestellt, sondern unter *Anhang E* zu finden. Bei keiner der Untersuchten Messreihen ist am Oberwasser eine Amplitude bei Schaufelpassierfrequenz nachweisbar. Auch an der Messstelle in der Pumpengrube kann die Amplitude bei Schaufelpassierfrequenz nur an vereinzelteten Betriebspunkten erkannt werden. Diese Messpunkte, an denen die Schaufelpassierfrequenz an der Messstelle in der Pumpengrube ausgemacht werden kann, kommen nicht bei gleichen Durchflüssen zu liegen, sodass keine Aussage zur Abhängigkeit der Ausbreitung hochfrequenter Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz vom Druckniveau getroffen werden kann. Jene Betriebspunkte werden jedoch in der Auswertung unter Kapitel 6.2.3 miteinbezogen.

6.2.3 Fazit zur Ausbreitung hochfrequenter Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz

Alle auswertbaren Messergebnisse zur Ausbreitung der Druckpulsationen in der Pumpengrube aus jenen unter *Anhang E* gelisteten Spektre sind in *Tabelle 30* aufgeführt. Diese Tabelle zeigt die Betriebspunkte und deren gemäß Gl. (6.3) ermittelten Dämpfungsfaktoren δ . Multipliziert man mit diesem Dämpfungsfaktor δ die Amplitude an der Messtelle in der Pumpengrube $\Delta H_{PG}(SPF)$, erreicht man den Ausgangswert an der Druckseite der Versorgungspumpe $\Delta H_{Ds}(SPF)$.

Förderhöhe H	Drehzahl n	Durchfluss Q	Dämpfungsfaktor δ
15,2 m	600 1/min	39,45 l/s	5,195
12,23 m	600 1/min	80,16 l/s	8,168
57,46 m	1200 1/min	119,41 l/s	5,152
23,60 m	1200 1/min	220,71 l/s	12,005
25,55 m	1300 1/min	229,10 l/s	3,817
64,46 m	1500 1/min	232,96 l/s	9,511

27,33 m	1400 1/min	233,25 l/s	12,513
29,14 m	1500 1/min	239,49 l/s	15,400

Tabelle 30: Dämpfungsfaktoren aller auswertbaren Betriebspunkte bei SPF an der Messstelle in der Pumpengrube

Eine Interpretation zur Ausbreitung der Druckpulsationen in Abhängigkeit des Druckniveaus oder der Strömungsgeschwindigkeit ist schwierig. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Ausprägung der Pulsationen an der Messstelle in der Pumpengrube an den meisten Betriebspunkten nicht stark genug ist, um diese erkennen zu können. Das bedeutet, dass ein Einfluss der hochfrequenten Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz am Universalversuchsstand oftmals bereits an der Messstelle in der Pumpengrube nicht mehr nachweisbar ist.

Was an dieser Stelle festgestellt werden kann ist, dass die an der Versorgungspumpe entstehenden Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz keinen Einfluss am Oberwasser des Universalversuchsstandes ausüben. Eine Amplitude, welche der Schaufelpassierfrequenz zugeordnet werden kann, ist am Oberwasser an keinem einzigen Messpunkt nachweisbar.

Die an der Messstelle in der Pumpengrube ankommenden Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz weisen in den Fällen, wo deren Peaks eindeutig nachweisbar sind, weniger als 26% der Amplitude an der Druckseite der Versorgungspumpe auf.

6.3 Hochfrequente Druckpulsationen am Pelton-Turbinenversuchsstand

Die bisher gezeigten Messdaten sind alle den Messungen am Universalversuchsstand entnommen. Am Pelton-Turbinenversuchsstand sind auch vereinzelt Betriebspunkte aufgezeichnet, anhand derer die Ausprägung und Ausbreitung der hochfrequenten Druckpulsationen ermittelt werden kann. Es werden dabei die Messstellen an der Versorgungspumpe (Druckmessstelle 2), im Rohrleitungssystem der Pumpengrube (Druckmessstelle 3) und am Oberwasser (Druckmessstelle 4) herangezogen. Die Definition der Messstellen ist in *Abbildung 13* unter Abschnitt 3.2.1 zu finden.

Zum Zeitpunkt der Messungen ist kein Peltonlaufrad montiert. Dies beschränkt den Durchfluss, aufgrund des damit verbundenen hohen Impulses welcher am Gehäuse der Pelton-Maschine dissipiert werden muss, auf Werte von 15 Liter pro Sekunde. Die Frequenzspektren der Messreihen am Pelton-Turbinenversuchsstand weisen einen Netzfrequenzeinfluss auf, der wie in Kapitel 4.5 beschrieben bereinigt wurde.

Es existiert eine Messreihe bei 600 Umdrehungen pro Minute und variablem Durchfluss, sowie eine Messreihe bei 15 Liter pro Sekunde Durchfluss und variabler Drehzahl.

6.3.1 Ausprägung hochfrequenter Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz

Zur Untersuchung der Ausprägung hochfrequenter Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz am Pelton-Turbinenversuchsstand wird der hochfrequente Druckaufnehmer an der Druckseite der

Versorgungspumpe (Druckmessstelle 2, siehe *Abbildung 13*) anhand der Messreihe bei konstantem Durchfluss von 15 Liter pro Sekunde und variabler Drehzahl herangezogen.

Die Frequenzspektra dieser Messreihe sind zusammen mit jenen der Messreihe bei konstanter Drehzahl und variablem Durchfluss in *Anhang E* zu finden.

Interessant ist, dass auch anhand der Versuchsreihe am Pelton-Turbinenversuchsstand keine Schaufelpassierfrequenz bei der Pumpendrehzahl von 800 Umdrehungen pro Minute ausgemacht werden kann.

Die Ergebnisse zur Ausprägung der hochfrequenten Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz anhand der Versuchsreihe mit konstantem Durchfluss von 15 Liter pro Sekunde am Pelton-Turbinenversuchsstand sind in *Abbildung 38* dargestellt.

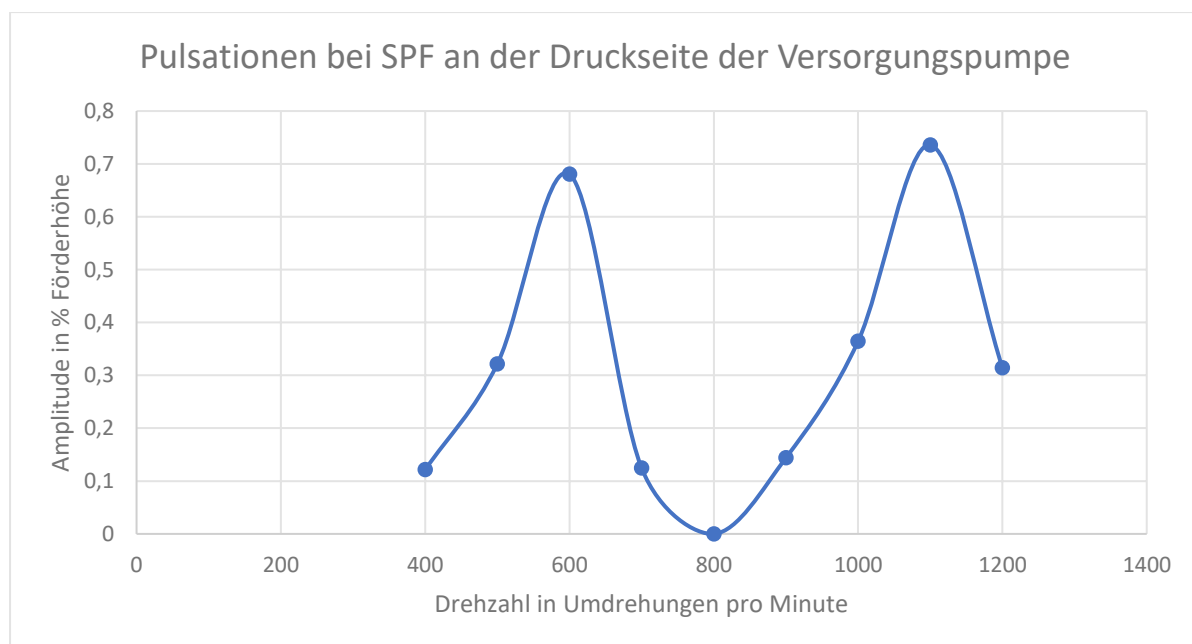


Abbildung 38: Pulsationen bei Schaufelpassierfrequenz an der Druckseite der Versorgungspumpe

Abbildung 38 deutet auf eine erhebliche Abhängigkeit der Drehzahl hinsichtlich der Ausprägung hochfrequenter Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz, zumindest bei geringen Durchflüssen, hin. Eine Drehzahlabhängigkeit bei der Ausprägung hochfrequenter Druckpulsationen mit einem Minimum bei einer Drehzahl von 800 Umdrehungen pro Minute, stellt eine Möglichkeit dar, zu erklären, weshalb bei dieser Drehzahl keine Schaufelpassierfrequenz entdeckt werden kann. Es ist nicht auszuschließen, dass bei jener Drehzahl aufgrund von kinematischen und strömungsmechanischen Zusammenhängen in der Versorgungspumpe die Ausprägung von Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz ausbleibt oder diese durch Strömungsphänomene zunichte gemacht werden.

6.3.2 Ausbreitung hochfrequenter Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz

Anhand der Messreihen bei konstantem Durchfluss und variabler Drehzahl wird das Übertragungsverhalten der Druckpulsationen in Abhängigkeit der Drehzahl am Pelton-Turbinenversuchsstand untersucht. Es werden Frequenzspektra bei den Drehzahlen 500, 600, 700, 900, 1100 und 1200 Umdrehungen pro Minute untersucht.

Durch die Auswertung der Frequenzspektra an mehreren Messstellen bei selbem Betriebspunkt erfolgt eine Abschätzung der Dämpfung der hochfrequenten Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz im Rohrleitungssystem des Pelton-Turbinenversuchsstands. Es werden dabei die hochfrequent abtastbaren Kistler Drucksensoren an der Druckseite der Versorgungspumpe (Druckmessstelle 2), in der Pumpengrube (Druckmessstelle 3) und am Oberwasser (Druckmessstelle 4) herangezogen. Die Definition der Messstellen ist *Abbildung 13* unter Abschnitt 3.2.1 zu entnehmen.

Diese Frequenzspektra, welche hierbei in die Auswertung einfließen, sind unter *Anhang E* zu finden.

Bei allen Messreihen ist an den Messstellen an der Druckseite der Versorgungspumpe und in der Pumpengrube ein Peak bei etwa 15 Hertz zu sehen. Diese Strukturschwingung, welche ihr Maximum an der Messstelle in der Pumpengrube hat, ist am Oberwasser kaum noch nachweisbar.

Einfluss der Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz ist am Oberwasser an keiner der Messstellen nachweisbar.

Tabelle 31 stellt die Betriebspunkte und die jeweiligen ermittelten Dämpfungsfaktoren δ , ermittelt nach Gl. (6.3), von der Druckseite der Versorgungspumpe bis hin zur Messstelle in der Pumpengrube dar. Die Definition dieses Faktors ist Abschnitt 6.1.2 zu entnehmen.

Förderhöhe H	Drehzahl n	Durchfluss Q	Dämpfungsfaktor δ
10,7 m	500 1/min	15 l/s	1,748
15,5 m	600 1/min	15 l/s	2,507
21,4 m	700 1/min	15 l/s	1,713
35,7 m	900 1/min	15 l/s	1,483
53,6 m	1100 1/min	15 l/s	2,193
63,8 m	1200 1/min	15 l/s	1,354

Tabelle 31: Betriebspunkte und deren Dämpfungsfaktoren in der Pumpengrube

Die am Pelton-Turbinenversuchsstand an der Messstelle in der Pumpengrube ankommenden Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz weisen im Durchschnitt noch etwa 55% der Amplitude an der Druckseite der Versorgungspumpe auf. Das bedeutet an einem Betriebspunkt, welcher hochfrequente Druckpulsation bei Schaufelpassierfrequenz von 2% Förderhöhe an der Pumpe aufweist, ist davon auszugehen, dass an der Messstelle in der Pumpengrube noch eine hochfrequente Pulsation bei Schaufelpassierfrequenz mit einer Amplitude von etwa 1,1% der Förderhöhe vorhanden ist.

Am Oberwasser des Pelton-Turbinenversuchsstands ist kein Einfluss der hochfrequenten Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz gegeben.

6.4 Gegenüberstellung der Messungen vom Universalversuchsstand mit dem Pelton-Turbinenversuchsstand

An dieser Stelle sollen zur Plausibilitätskontrolle die Ergebnisse zu Ausprägung und Ausbreitung der Druckpulsationen am Universalversuchsstand und Pelton-Turbinenversuchsstand verglichen werden.

Zunächst sollen die gemessenen Druckpulsationen an der Versorgungspumpe an Betriebspunkten, die vergleichbar sind, anhand der beiden Versuchsanordnungen gegenübergestellt werden. *Abbildung 39* stellt diese Gegenüberstellung dar. Es handelt sich dabei in blau dargestellt um die Messreihe am Pelton-Turbinenversuchsstand mit konstantem Durchfluss von 15 Liter pro Sekunde bei variabler Drehzahl und in orange dargestellt um Messpunkte vom Universalversuchsstand bei Durchfluss von 20 Liter pro Sekunde anhand drei unterschiedlicher Drehzahlen.

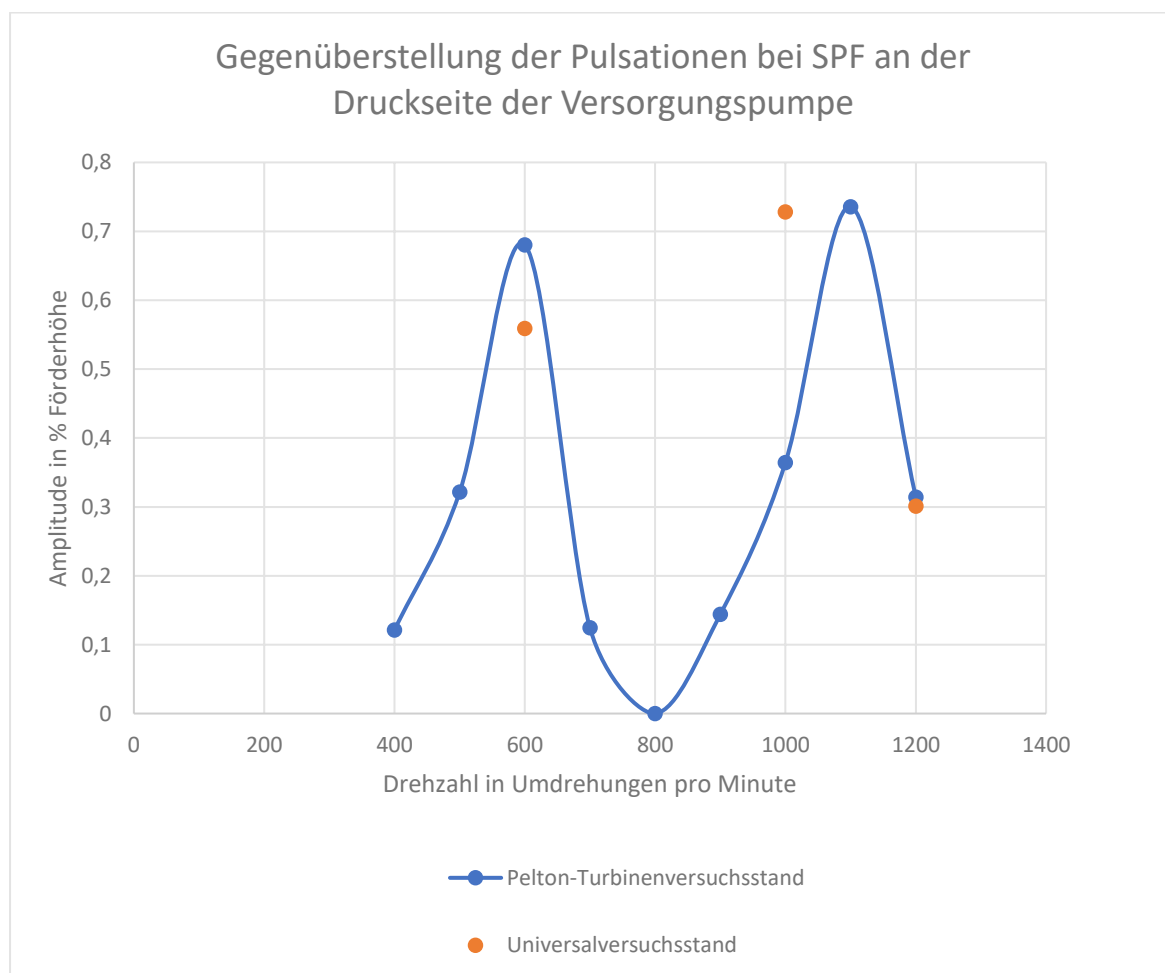


Abbildung 39: Gegenüberstellung der Pulsationen an der Druckseite der Versorgungspumpe bei Schaufelpassierfrequenz

Es handelt sich hierbei nur um ähnliche Betriebspunkte, dennoch stimmen die Messwerte, mit leichter Abweichung bei 1000 Umdrehungen pro Minute, gut überein. Auch an diesem Punkt liegen die Messwerte absolut gesehen nicht weit voneinander entfernt.

Neben den gemessenen Druckpulsationen soll auch die Ausbreitung der Druckpulsationen im Rohrleitungssystem anhand der beiden Versuchsanordnungen gegenübergestellt werden.

Am Universalversuchsstand beläuft sich der Dämpfungsfaktor δ , wie in Gl. (6.3) definiert, von der Versorgungspumpe (Druckmessstelle 2) bis hin zur Messstelle in der Pumpengrube (Druckmessstelle 5) auf Werte von etwa 4 bis 15. Am Pelton-Turbinenversuchsstand nimmt dieser Faktor bis hin zur Messstelle in der Pumpengrube (Druckmessstelle 3) Werte zwischen 1,4 und 2,5 an. Die Definition der Messstellen ist *Abbildung 13* und *Abbildung 14* unter Abschnitt 3.2 zu entnehmen.

Dieses Ergebnis wirkt überaus plausibel, da die Messstelle in der Pumpengrube an der Versuchsanordnung des Pelton-Turbinenversuchsstandes deutlich näher an der Versorgungspumpe zu liegen kommt. Noch dazu kommt, dass der Weg von der Versorgungspumpe bis zur Messstelle in der Pumpengrube am Pelton-Turbinenversuchsstand deutlich weniger Störstellen in Form von Abzweigungen aufweist und der Rohrleitungsübergang von 250 mm Durchmesser nach der Pumpe über einen Konus auf das Rohrleitungssystem des Universalversuchsstandes mit 500 mm Durchmesser entfällt.

An beiden Versuchsanordnungen kann an keinem einzigen Betriebspunkt ein Einfluss der hochfrequenten Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz am Oberwasser (Druckmessstelle 4, bzw. Druckmessstelle 6) erkannt werden.

Kapitel 7: Schlussfolgerungen und Ausblick auf weitere Arbeiten

Kapitel 7 stellt die Schlussfolgerungen dieser Diplomarbeit überblicksmäßig dar. Darüber hinaus erfolgt ein Ausblick auf weitere Forschungsfragen.

7.1 Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz an der Versorgungspumpe

Die größten Amplituden der Druckpulsationen, bezogen auf die Förderhöhe, kommen im Überlastbereich der Versorgungspumpe zu liegen. Dieser Zusammenhang wirkt logisch, da die hochfrequenten Druckschwankungen aus instationären Strömungsphänomenen hervorgehen. Strömungsphänomene durch Fehlanströmungen und Wirbelbildung treten in der Überlast, aber auch in der Teillast verstärkt auf. Durch Letzteres erklärt sich auch das lokale Maximum der Druckpulsationen bei Nullförderung.

Die hochfrequenten Pulsationen bei Schaufelpassierfrequenz belaufen sich über weite Betriebsbereiche der Versorgungspumpe auf 0,5 bis 1,5% der Förderhöhe. Beim Erreichen des Überlastbereichs steigen diese stark an. Es treten Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz mit bis zu 6% der Förderhöhe auf. Im Durchschnitt über die Messreihen erreichen diese am jeweiligen Höchstdurchfluss eine Amplitude von etwa 4,3% der Förderhöhe. Nahe am Auslegungspunkt der Maschine, bei einer Drehzahl von 1500 Umdrehungen pro Minute und einem Durchfluss von 180 Liter pro Sekunde belaufen sich die hochfrequenten Druckschwankungen bei Schaufelpassierfrequenz auf 1,3% der Förderhöhe.

Die Einflussfaktoren auf die Entstehung der hochfrequenten Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz können nicht exakt quantifiziert werden. Es kann kein direkter Zusammenhang zwischen dem Druckniveau oder dem Durchfluss und der Amplitude hochfrequenter Druckschwankungen bei Schaufelpassierfrequenz erkannt werden.

In der Literatur werden Werte für entstehende hochfrequente Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz, jeweils bezogen auf % der Förderhöhe, gemäß *Tabelle 32* angegeben.

Quelle	Pulsationen in % Förderhöhe	Betriebspunkt
[22]	~4%	Teillast
[23]	<1%*	Nennbetriebspunkt
[1]	0,5%-2,5%	Im Allgemeinen in der Teillast am größten
[24]	1,5%	Nennbetriebspunkt
[25]	a) <1,5%* b) <2%*	a) Nennbetriebspunkt b) Teillast $Q/Q_n = 0,25$
[26]	a) ~ 0,3%** b) ~ 1,7%** c) ~ 1,3%**	a) Minimum der Pulsationen $Q/Q_n = 0,8$ b) Überlast $Q/Q_n = 1,4$ c) Nulldurchfluss
[27]	~0,6%	(Nennbetriebspunkt, an der Saugseite) – Zunahme bei Überlast und tiefer Teillast, max bei Nulldurchfluss ~ 1,1%

Tabelle 32: Größenordnungen hochfrequenter Druckpulsationen an Kreiselpumpen aus der Literatur

Die mit * in *Tabelle 32* markierten Werte sind anstatt der Förderhöhe auf die volumetrische kinetische Energie am Laufradaustritt, vergleiche Gl. (7.1), bezogen. Die Werte, welche mit ** markiert sind, sind auf die Nennförderhöhe bezogen.

$$\Delta p^* = \frac{2 \times \Delta p_{abs}}{\rho_W \times u^2} \quad (7.1)$$

Die Größenordnungen der gemessenen Pulsationen und jenen aus der Literatur stimmen gut überein. Die Aussage, dass die Pulsationen im Allgemeinen in der Teillast am größten ausfallen, kann nicht nachgewiesen werden. Es ist ein lokales Maximum bei Nulldurchfluss feststellbar, jedoch kommt das Maximum der Druckschwankungen bei Schaufelpassierfrequenz zumeist im Überlastbereich zu liegen.

Die unterschiedlichen Bezugsarten der Druckpulsationen weichen unter dem Nenndurchfluss nur wenig voneinander ab. Im Überlastbereich resultieren jedoch, einhergehend mit dem starken Förderhöhenabfall, durch die unterschiedlichen Betrachtungsweisen signifikante Abweichungen. Der in dieser Arbeit gewählte Bezug der Druckpulsationen auf die Förderhöhe führt wegen des Förderhöhenabfalls an diesen Betriebspunkten zwar zu überhöhten Amplitudenwerten im Überlastbereich, widerspricht jedoch nicht den Erkenntnissen dieser Arbeit, da auch in Absolutwerten in der Regel das absolute Maximum der Druckpulsationen im Überlastbereich festgestellt werden kann.

Der Bezug der hochfrequenten Druckpulsationen auf die Förderhöhe wurde bewusst gewählt. Damit die Messreihen bei unterschiedlichen Drehzahlen miteinander verglichen werden können und Tendenzen auf die Ausprägung hochfrequenter Druckpulsationen erkannt werden können, ist es notwendig jede Messreihe auf eine Bezugsgröße zu beziehen. Dabei wurden drei Möglichkeiten in Betracht gezogen: die maximale Förderhöhe, die volumetrische kinetische Energie am Laufradaustritt oder die Förderhöhe. Letztere erscheint für die Fragestellungen dieser Diplomarbeit am zweckmäßigsten. Durch diese Definition kann an jedem Betriebspunkt direkt das Ausmaß der Druckpulsationen bezogen auf das aktuelle Druckniveau erkannt werden, was die Güte der Versorgung des Versuchsstandes widerspiegelt.

7.2 Ausbreitung der Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz

An beiden Versuchsanordnungen kann bei keiner der untersuchten Messreihen an der oberwasserseitigen Messstelle ein Einfluss der Schaufelpassierfrequenz nachgewiesen werden. Daraus folgt die Erkenntnis, dass diese Pulsationen der Versorgungspumpe bei Schaufelpassierfrequenz keine Relevanz am Oberwasser beider Versuchsstände haben.

Am Universalversuchsstand ist bei einer Vielzahl an Betriebspunkten kein Einfluss der Schaufelpassierfrequenz an der Messstelle in der Pumpengrube nachweisbar. Sofern bei den Messreihen am Universalversuchsstand diese Pulsation an der Messstelle in der Pumpengrube nachweisbar ist, weist diese weniger als 26% der Amplitude an der Versorgungspumpe auf. Am Pelton-Turbinenversuchsstand kann die Amplitude bei Schaufelpassierfrequenz an der Messstelle in der Pumpengrube nachgewiesen werden. Diese beläuft sich im Durchschnitt auf etwa 55% der Amplitude an der Versorgungspumpe. Der Unterschied in den Versuchsanordnungen ist plausibel, da die Messstelle in der Pumpengrube am Pelton-Turbinenversuchsstand deutlich näher an der

Versorgungspumpe zu liegen kommt und auf dem Weg dorthin von der Strömung weniger Störstellen passiert werden müssen.

Die Quantifizierung des Einflusses von Strömungsgeschwindigkeit oder Druckniveau auf die Ausbreitung von hochfrequenten Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz ist nicht möglich.

Die Untersuchung der Ausbreitung von Druckpulsationen ist auf jene bei Schaufelpassierfrequenz beschränkt, da diese die dominante Pulsation darstellt. Pulsationen bei anderen charakteristischen Frequenzen (siehe Kapitel 6.2.1), können nur an ausgewählten Betriebspunkten erkannt werden und weisen in der Regel deutlich geringere Amplituden als die Schaufelpassierfrequenz auf, weshalb diese nicht in die Auswertung mit einfließen.

7.3 Ausblick

In dieser Diplomarbeit wurden die Pulsationen beim Betrieb der Mitteldruckpumpe des Herstellers Vogel aufgenommen. Die Frage, wie sich die Druckpulsationen bei Betrieb der anderen Pumpen des Versuchsstand oder bei deren Parallelschaltung verhalten bleibt offen, jedoch können sich für die Zukunft hieraus interessante Forschungsfragen für weitere Arbeiten ergeben.

Bei den Messreihen mit 1500 Umdrehungen pro Minute am Universalversuchsstand verhält sich bei hohen Durchflüssen die QH-Kennlinie unerwartet. Bei annähernd gleichem Durchfluss sinkt die ermittelte Förderhöhe kontinuierlich, je weiter das Drosselorgan geöffnet wird. Worauf dieser Effekt beruht, ist nicht geklärt. Es besteht jedoch die Vermutung, dass es sich entweder um einen Messfehler am Durchflusssensor oder eine kavitationsbedingte Förderhöhenabnahme handelt. Es bleibt ungeklärt, ob das Messsignal des über Ultraschall- Laufzeitmessungen arbeitenden Durchflusssensors bei hohen Durchflüssen aufgrund von Störungen in der Strömung unplausibel wird. Ebenso offen bleibt, ob die Versorgungspumpe bei 1500 Umdrehungen pro Minute ab einem Durchfluss von etwa 230 Litern pro Sekunde in kavitationsbehaftetem Betrieb läuft. Da dies auf Basis des NPSH-Werts bei diesen Betriebspunkten gemäß Herstellerangabe nicht der Fall sein sollte, folgt daraus eine weitere Fragestellung, ob sich der notwendige NPSH-Wert für kavitationsfreien Betrieb der Pumpe gegenüber der Herstellerangabe durch Verschleiß verändert hat.

Bei Messungen mit Pumpendrehzahl 800 Umdrehungen pro Minute kann die Schaufelpassierfrequenz an der Druckseite der Versorgungspumpe anhand keiner der beiden Versuchsstandanordnungen nachgewiesen werden. Es ist nicht auszuschließen, dass kinematische und strömungsmechanische Effekte die Entstehung von Pulsationen bei Schaufelpassierfrequenz an dieser Drehzahl verhindern. Hinsichtlich dieser Fragestellung besteht noch Forschungsbedarf.

Anhang A: Definierte Konstanten

Bezeichnung	Wert	Einheit
Dichte des Wassers ρ_w	998,599	kg/m ³
Gravitationskonstante g	9,810665	m/s ²
Wassertemperatur	18	°C
Umgebungsdruck ¹ p_{atm}	978,4	hPa

¹ Atmosphärischer absoluter Luftdruck bei den Versuchen am Universalversuchsstand

Anhang B: Auflistung der Messtechnik

Unter *Tabelle 33* ist das gesamte messtechnische Equipment, welches zum Einsatz gekommen ist, aufgelistet. Die entsprechenden Datenblätter sind im Ordner "Datenblätter" abgelegt. Alternativ können diese anhand der Typenbezeichnungen auf den Websites der Hersteller gefunden werden.

Anzahl	Hersteller	Typenbezeichnung	Beschreibung
4	Kistler	4075A10	hochfrequenter Kistler Drucksensor
4	Kistler	4618A	Messverstärker hochfrequenter Kistler Drucksensor
2	Endress Hauser	CERABAR PBP71B	Endress Hauser Drucksensor
1	Flexim	CDQ1NZ7	Flexim Ultraschall Messköpfe
1	Flexim	CDK1NZ7	Flexim Ultraschall Messköpfe
1	Flexim	FLUXUS F601	Flexim Messumformer Ultraschalldurchflussmessung
1	Endress Hauser	Promag 300	Endress Hauser magnetinduktiver Druchflusssensor
1	National Instruments	NI9203	Strommesskarte
1	National Instruments	NI9215	Spannungsmesskarte
1	National Instruments	NI9219	Universalmesskarte
1	National Instruments	NiDAQ-9185	Messchassis

Tabelle 33: Messtechnisches Equipment

Anhang C: Software zur Datenakquise und Interpretation

Die verwendeten Softwarepakete werden hier hinsichtlich derer Versionen angeführt und das auskommentierte Programm zur Auswertung der hochfrequenten Druckpulsationen wird angeführt.

C.1 Softwareversionen

Der PC, welcher zur Datenauswertung genutzt wird ist, läuft unter dem Betriebssystem Microsoft Windows 10.

Zur Datenakquise kommt das Programm LabView von National Instruments in dessen Version aus dem Jahr 2016 zum Einsatz.

Zur Verarbeitung und graphischer Ausgabe von Daten werden die Programme Excel von Microsoft in Version 2301 und MATLAB von Mathworks in Version R2022b eingesetzt.

Zur Illustrierung von Schemata wird die Open Source Software Inkscape in Version 1.2.2 verwendet.

C.2 MATLAB Script zur Auswertung hochfrequenter Pulsationen

Das MATLAB Script zur Auswertung hochfrequenter Druckpulsationen ist unter dem Namen "AuswertungHFDP.mat" im Ordner "60_Auswertung" abgelegt.

Datei Einlesen und Messdatenmatrix erstellen

Zunächst gilt es, die TDMS-Datei des zu analysierenden Betriebspunktes einzulesen (Programmcode siehe Abbildung 40).

TDMS File in MATLAB einlesen

```
fileName = "C:\Users\user\Desktop\Messwerte_Universalversuchsstand\230116_UniversalMessreihen1200\Uni1200_240.tdms";
info = tdmsinfo(fileName);

info.Channellist

%Anzahl Messkanäle definieren
channelnum = 9;
```

Abbildung 40: TDMS File in MATLAB einlesen

Daraufhin werden aus dieser TDMS-Datei die Messpunkte in Form einer Zeittabelle ausgelesen (Programmcode siehe Abbildung 41).

```

tdmsreadprop(fileName);

group = "Unbenannt";
channel = "KistlerDS (bara)";
tdmsreadprop(fileName, ChannelGroupName=group, ChannelName=channel)

%aus dem TDMS File Zeitschritt, Startzeit und Anzahl der Messpunkte auslesen
timeStep = tdmsreadprop(fileName, ChannelGroupName=group, ChannelName=channel, PropertyNames="wf_increment");
startTime = tdmsreadprop(fileName, ChannelGroupName=group, ChannelName=channel, PropertyNames="wf_start_time");
SamNum = tdmsreadprop(fileName, ChannelGroupName=group, ChannelName=channel, PropertyNames="wf_samples");

%Anzahl der Messpunkte der Variable n zuweisen
n = double(SamNum.wf_samples)

%Messdaten des TDMS Files auslesen und in eine timetable speichern
data = tdmsread(fileName, TimeStep=seconds(timeStep.wf_increment));
ttData = data{1};
head(ttData)
    
```

Abbildung 41: Extrahieren der Daten und abspeichern in einer Zeittabelle

Das Zeitformat in der Tabelle muss von Zeitstempel zu Zeit in Sekunden formatiert werden. Ein Vektor mit der Zeit in Sekunden wird als Variable abgespeichert (Programmcode siehe Abbildung 42).

```

%Das Zeitformat von Zeitstempel auf ein Array mit der Zeit in Sekunden umformatieren
TData = timetable2table(ttData);

Time = TData(:,1) ;

TimeA = table2array(Time);

Time = seconds(TimeA);
    
```

Abbildung 42: Umformatieren der Zeitwerte

Für jeden Sensor wird der Mittelwerte über die Messdauer berechnet, in einer Variable abgespeichert und anschließend wird dieser Mittelwert von den Messwerten subtrahiert. Es wird hierbei in Abbildung 43 nur der Programmcode für die Messwerte eines Sensors gezeigt, in gleicher Weise wurde bei den anderen Sensoren vorgegangen.

```

%Alle Messwerte Mittelwertfrei in Messmatrix zur Weiterverarbeitung abspeichern
KistlerDS = TData(:,2);

KistlerDS = table2array(KistlerDS);

Pressuresum1 = double(sum(KistlerDS));

Pressureavg1 = Pressuresum1/n;

KistlerDS = KistlerDS - Pressureavg1;
    
```

Abbildung 43: Mittelwert der jeweiligen Messdaten berechnen und von diesen subtrahieren

Aus diesen formatierten und Mittelwertbereinigten Messwerten wird schließlich die Messdatenmatrix erstellt (Programmcode siehe Abbildung 44).

```
%Erstellen der mittelwertfreien Messdatenmatrix
A = randn(n,channelnum+1);

A(:,1) = Time;
A(:,2) = KistlerDS;
A(:,3) = KistlerSS;
A(:,4) = KistlerOW;
A(:,5) = KistlerPG;
A(:,6) = EHSS;
A(:,7) = EHDS;
A(:,8) = DSS_US_CH1;
A(:,9) = DSS_US_CH2;
A(:,10) = DSS_EH;
```

Abbildung 44: Erstellen der Messdatenmatrix

Optionen zur Analyse der Messdaten

Die Messdaten können zur Analyse optional

1. als Zeitsignal geplottet werden
2. mit einem Netzfrequenzfilter beaufschlagt werden
3. mit einer Fensterfunktion nach Hann beaufschlagt werden

Ausgabe der Messdaten kann

4. als amplitudenrichtige FFT in % Förderhöhe (ohne Netzfrequenzfilter, ohne Fensterfunktion)
5. als amplitudenrichtige FFT in bar (mit Netzfrequenzfilter, ohne Fensterfunktion)
6. als amplitudenrichtige FFT (mit Netzfrequenzfilter, mit Fensterfunktion)
7. als amplitudenrichtige FFT (ohne Netzfrequenzfilter, mit Fensterfunktion)
8. als auf Maximalamplitude normierte FFT
9. als PowerSpectrumDensity mit linearer Frequenzachse
10. als PowerSpecrumDensity mit logarithmischer Frequenzachse
11. als Wasserfallplot (ein Messsignal über die Zeit)
12. als Wasserfallplot (beliebige Messsignale über beliebige Y-Achse)

umgesetzt werden.

Die Programmcodes sind untenstehend mit Verweis auf die hier angegebene Nummerierung dargestellt.

OPTION Zeitsignal unbehandelt plotten

```
figure

plot(Time,KistlerDS,Time,KistlerPG,Time,KistlerOW)
axis ([3.6 3.7 -2 1])
legend("DS","PG","OW")
xlabel('Zeit (s)')
ylabel('Druckschwankung (bar)')
title('Drucksignale im Zeitbereich')
```

Abbildung 45: 1. Zeitsignal unbehandelt plotten

OPTION Netzfrequenz entfernen und gefiltertes Zeitsignal plotten

```
%Definition welche Spalten der Messdatenmatrix gefiltert werden sollten
%hier nur für die Kistler-Sensoren ausgeführt, da nur hier Netzfrequenzeinfluss vorhanden ist

x = A(:,2:5);

%Filterparameter zur Erstellung des Kammfilters
L = 80; % Band
BW = 2.5; % Bandwidth
GBW = -3.0103; %
Nsh = 1; %
Fs = 1000; % Sampling Frequency

h = fdesign.comb('Notch', 'L,BW,GBW,Nsh', L, BW, GBW, Nsh, Fs);

Hd = design(h, 'butter');

set(Hd, 'PersistentMemory', true);

%Filter aufbringen
y = filter(Hd, x);

%Variablen der gefilterten Messwerte definieren
KistlerDSfil = y(:,1);
KistlerSSfil = y(:,2);
KistlerOWfil = y(:,3);
KistlerPGfil = y(:,4);
```

Abbildung 46: 2. Netzfrequenzfilter aufbringen

OPTION Fensterfunktion aufbringen

```
%Messdaten für ausgewählte Drucksensoren aus Messdatenmatrix auslesen und in
%Variablen abspeichern
C = A(:,2);
B = randn(n,2);
F = A(:,5);
G = A(:,4);

%Fensterfunktionen auf die einzelnen Messdatenspalten aufbringen und in
%eine Matrix mit gefilterten Messdaten B abspeichern
Z = hann(length(C)).*C;
B(:,2) = Z;
B(:,1) = A(:,1);
Z = hann(length(F)).*F;
B(:,3) = Z;
Z = hann(length(G)).*G;
B(:,4) = Z;

%Option: Signale mit Fensterfunktion plotten

%figure
%plot(B(:,1),B(:,2))
%title("Messsignal mit Hanning-Fenster")
%xlabel("t")
%ylabel("X(t)")
```

Abbildung 47: 3. Fensterfunktion aufbringen

OPTION Fensterfunktion (auf gefiltertes Signal) aufbringen

```

%Gefilterte Messdaten in einer Variable abspeichern
D = y;

%Fensterfunktionen auf die einzelnen Messdatenspalten aufbringen und in
%keine Matrix mit gefilterten Messdaten E abspeichern
Z1 = hann(length(D(:,1))).*D(:,1);
Z2 = hann(length(D(:,2))).*D(:,2);
Z3 = hann(length(D(:,3))).*D(:,3);
Z4 = hann(length(D(:,4))).*D(:,4);
E(:,2) = Z1;
E(:,3) = Z2;
E(:,4) = Z3;
E(:,5) = Z4;
E(:,1) = A(:,1);

%Option: gefilterte Signale mit Fensterfunktion plotten

%figure
%plot(E(:,1),E(:,2))
%title("Messsignal (gefiltert) mit Hanning-Fenster")
%xlabel("t")
%ylabel("X(t)")
    
```

Abbildung 48: 3. Fensterfunktion auf gefiltertes Signal aufbringen

OPTION Amplitudenrichtige FFT des Signales in % der Förderhöhe (ohne Fensterfunktion)

```

%gesuchten Sensor angeben: KistlerDS 2, KistlerSS 3, Kistler OW 4,
%Kistler PG 5

Sensornummer = 2;

Y = 200*fft(A(:,Sensornummer)/length(A(:,Sensornummer)))/Pressureavg6;
fs = (1000);
fy = fs*(0:length(Y)-1)/length(Y);
figure
plot(fy,abs(Y));
xlabel('Frequenz in Hertz')
ylabel('Amplitude in % Förderhöhe')
title('Spektrum KistlerDS')
axis ([0 500 0 6])

%Option: Ergebnis der FFT als Spalte in der Amplitudenmatrix abzuspeichern
% Diese Amplitudenmatrix enthält die Messpunkte, welche in die Wasserfalldiagramme eingehen

% Frequenzauflösung=fy;
% Amplituden(:,1)=Y;
    
```

Abbildung 49: 4. Amplitudenrichtige FFT in % Förderhöhe (ohne Fensterfunktion, ohne Netzfrequenzfilter)

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.

OPTION Amplitudenrichtige FFT des Signales mit Druck in bar (ohne Fensterfunktion, mit Netzfrequenzfilter)

```
%gesuchten Sensor angeben: KistlerDS 2, KistlerSS 3, Kistler OW 4,  
%Kistler PG 5  
  
Sensornummer = 3;  
Sensornummer = Sensornummer -1; %hier wegen der Definition der Matrix y mit gefilterten Werten  
  
Y = 2*fft(y(:,Sensornummer))/length(y(:,Sensornummer));  
fs = (1000);  
fy = fs*(0:length(Y)-1)/length(Y);  
figure  
plot(fy,abs(Y));  
xlabel('Frequenz (Hz)')  
ylabel('Amplitude in bar')  
title('Spektrum KistlerDS mit Netzfrequenzfilter')  
axis ([0 1000 0 0.02])
```

Abbildung 50: 5. Amplitudenrichtige FFT in bar (ohne Fensterfunktion, mit Netzfrequenzfilter)

OPTION Amplitudenrichtige FFT des gefilterten Signals (mit Fensterfunktion)

```
%gesuchten Sensor angeben: KistlerDS 2, KistlerSS 3, Kistler OW 4,  
%Kistler PG 5  
  
Sensornummer = 4;  
  
%Faktor der fft mit 2 multipliziert wegen der Fensterung  
Y = 400*fft(E(:,Sensornummer))/length(E(:,Sensornummer))/Pressureavg6;  
fs = (4000);  
fy = fs*(0:length(Y)-1)/length(Y);  
figure  
plot(fy,abs(Y));  
xlabel('Frequenz in Hertz')  
ylabel('Amplitude in % Förderhöhe')  
title('Spektrum (gefiltert) KistlerDS')  
axis ([0 500 0 4.5])  
  
%Option: Ergebnis der FFT als Spalte in der Amplitudenmatrix abzuspeichern  
% Diese Amplitudenmatrix enthält die Messpunkte, welche in die Wasserfalldiagramme eingehen  
  
Frequenzaufloesung = fy;  
Amplituden(:,9)=Y;
```

Abbildung 51: 6. Amplitudenrichtige FFT in % Förderhöhe (mit Fensterfunktion, mit Netzfrequenzfilter)

OPTION Amplitudenrichtige FFT des Signals in % der Förderhöhe (mit Fensterfunktion)

```
%gesuchten Sensor angeben: KistlerDS 2,  
%Kistler PG 3 (!) nur hier!  
% Kistler OW 4 (!) nur hier!  
  
Sensornummer = 2;  
  
%Faktor der fft mit 2 multipliziert wegen der Fensterung  
Y = 400*fft(B(:,Sensornummer)/length(B(:,Sensornummer)))/Pressureavg6;  
fs = (1000);  
fy = fs*(0:length(Y)-1)/length(Y);  
figure  
plot(fy,abs(Y));  
xlabel('Frequenz in Hertz')  
ylabel('Amplitude in % Förderhöhe')  
title('Spektrum KistlerDS mit Fenster')  
axis ([0 500 0 6])  
  
%Option: Ergebnis der FFT als Spalte in der Amplitudenmatrix abzuspeichern  
% Diese Amplitudenmatrix enthält die Messpunkte, welche in die Wasserfalldiagramme eingehen  
  
Frequenzaufloesung=fy;  
Amplituden(:,9)=Y;
```

Abbildung 52: 7. Amplitudenrichtige FFT in % Förderhöhe (mit Fensterfunktion, ohne Netzfrequenzfilter)

```
% Y enthält die Ergebnisse der zuletzt berechneten FFT  
%fy enthält die Frequenzachse der zuletzt berechneten FFT  
  
%Die Variable Test bezieht alle Amplituden im Spektrum auf den Maximalausschlag  
l = max(abs(Y));  
k = abs(Y);  
test = (k/l)  
  
figure  
plot(fy,test);  
xlabel('Frequenz in Hertz')  
ylabel('bezogene Amplitude')  
axis ([0 500 0 1])  
title('Frequenzspektrum - Normiert auf Maximalamplitude')
```

Abbildung 53: 8. FFT normiert auf maximale Amplitude

OPTION: Power Spectrum Density auf linearer Frequenzkala

```
%Sensor auswählen aus Messdatenmatrix: hier KislterDS
x = A(:,2);

xdft = fft(A(:,2));
xdft = xdft(1:n/2+1);
fs = (1000);
psdx = (1/(fs*n)) * abs(xdft).^2;
psdx(2:end-1) = 2*psdx(2:end-1);
freq = 0:fs/n:fs/2;
figure
plot(freq,pow2db(psdx))
grid on
title("Power Spectrum Density - linear scale ")
xlabel("Frequency (Hz)")
ylabel("Power/Frequency (dB/Hz)")
```

Abbildung 54: 9. Power spectrum density mit linearer Frequenzachse

OPTION: Power Spectrum Density auf logarithmischer Frequenzkala

```
%Sensor auswählen aus Messdatenmatrix: hier KislterDS
x = A(:,2);

xdft = fft(A(:,2));
xdft = xdft(1:n/2+1);
fs = (1000);
psdx = (1/(fs*n)) * abs(xdft).^2;
psdx(2:end-1) = 2*psdx(2:end-1);
freq = 0:fs/n:fs/2;
figure
semilogx(freq,pow2db(psdx))
grid on
title("Power Spectrum Density - log scale ")
xlabel("log Frequency (Hz)")
ylabel("Power/Frequency (dB/Hz)")
```

Abbildung 55: 10. Power spectrum density mit logarithmischer Frequenzachse

OPTION Wasserfallplot des Signals als Spektrum(Zeit) zu plotten

```
%Sensor auswählen aus Messdatenmatrix: hier KislterDS
x = A(:,2);

%Parameter des Wasserfallplots(t)
M = 89;
L = 11;
g = bartlett(M);
Ndft = 1024;

%Spectrogram ermitteln als Funktion der Zeit
[s,f,t] = spectrogram(x,g,L,Ndft,fs);

figure
waterplot(s,f,t);
```

Abbildung 56: 11. Wasserfallplot eines Messsignals über der Zeit

OPTION: Wasserfallplot über Definierte Y-Achse

```
%Die Variable Drehzahlen gibt den Y-Achsenbereich an
% (je nach Gegenüberstellung: Sensornummer, Drehzahl, Druchfluss)
Drehzahlen = [1:1:9];

%Wasserfallplot
figure
waterplotnew(Amplituden,Frequenzaufloesung,Drehzahlen)
```

Abbildung 57: 12. Wasserfallplots beliebiger Messsignale über eine beliebig definierte Y-Achse

Die Wasserfallplots als 11. und 12. Option der Auswertung benötigen zusätzliche Definitionen für die dabei aufgerufenen Funktionen. Diese Funktionsdefinitionen sind in *Abbildung 58* aufgeführt.

Funktionsdefinitionen

```
%Definition des Waterfallplots(t)
function waterplot(s,f,t)
% Waterfall plot of spectrogram
waterfall(f,t,abs(s).^2)
%set(gca,XDir="reverse",View=[30 50])
xlabel("Frequency (Hz)")
ylabel("Time (s)")
end

%Definition des Waterfallplots über beliebige Y-Achse
function waterplotnew(Amplituden,Frequenzaufloesung,Drehzahlen)
%neue Waterfall Funktion
p = waterfall(Frequenzaufloesung,Drehzahlen,abs(Amplituden)')
p.EdgeColor = 'b'

%set(gca,XDir="reverse",View=[30 50])
%view(40,40)
view(15,65)
zlabel ("Amplitude in % Förderhöhe")
xlabel("Frequenz in Hertz")
ylabel("Sensornummer")
title("Ausbreitung der Druckpulsationen bei Maximaldurchfluss")
axis([0 500 1 9 0 6.5])

hold on
plot3([70 70],[01 03],[0 0],"-.g","LineWidth",1)
text(70,01,-0.35,"BPF (600)", Color="g")
hold on
plot3([116.7 116.7],[4 6],[0 0],"-.g","LineWidth",1)
text(116.7,04,-0.35,"BPF (1000)",Color="g")
hold on
plot3([140 140],[7 9],[0 0],"-.g","LineWidth",1)
text(140,07,-0.35,"BPF (1200)",Color="g")
%hold on
%plot3([10 20],[600 1200],[0 0],"-.g","LineWidth",0.25)
%text(25,600,-0.15,"1X",Color="g")
text(400,1,-0.55,"DS (600 [1/min])",Color="k")
text(400,2,-0.55,"PG (600 [1/min])",Color="k")
text(400,3,-0.55,"OW (600 [1/min])",Color="k")
text(400,4,-0.55,"DS (1000 [1/min])",Color="k")
text(400,5,-0.55,"PG (1000 [1/min])",Color="k")
text(400,6,-0.55,"OW (1000 [1/min])",Color="k")
text(400,7,-0.55,"DS (1200 [1/min])",Color="k")
text(400,8,-0.55,"PG (1200 [1/min])",Color="k")
text(400,9,-0.55,"OW (1200 [1/min])",Color="k")
end
```

Abbildung 58: Funktionsdefinitionen für die Wasserfallplots

Anhang D: Messdaten zur Kennlinienermittlung

Unter Anhang D sind von *Tabelle 34* bis *Tabelle 40* die Messdaten der Betriebspunkte, welche in die Ermittlung der Kennlinien sowie der Druckverluste eingegangen sind, zu finden. Die Drücke sind in bar, der Durchfluss in Liter pro Sekunde angegeben. Die Nomenklatur der Sensoren ist ident zu jener die in Kapitel 4.1.1 eingeführt wurde. Die oberste Zeile der Tabellen enthält jeweils die Messdaten bei Stillstand der Maschine. Es werden die QH-Kennlinien der Versorgungspumpe anhand der Drehzahlen 600, 800, 1000 und 1200 Umdrehungen pro Minute (siehe *Abbildung 59* bis *Abbildung 62*) präsentiert. Ebenso sind die ermittelten Höhenverlustskurven von der Druckseite der Versorgungspumpe bis zur oberwasserseitigen Messstelle für alle vermessenen Drehzahlen aufgeführt (*Abbildung 63* bis *Abbildung 67*).

Betriebspunkte bei 600 Umdrehungen pro Minute

Kistler_DS	Kistler_SS	Kistler_OW	Kistler_PG	EH_SS	EH_DS	DSS_US
1,810446	1,415627	1,095523	1,403094	0,556242	0,475715	0,055746
3,387941	1,418887	2,675212	2,97783	0,553378	2,042649	0,056042
3,37103	1,413328	2,656963	2,960693	0,550752	2,031586	10,966425
3,360646	1,410862	2,636544	2,939197	0,550198	2,010287	20,987395
3,328584	1,398769	2,592329	2,896748	0,538667	1,98399	30,528054
3,293331	1,393043	2,539675	2,845856	0,533987	1,946345	39,449498
3,227682	1,375544	2,445524	2,752278	0,516469	1,885572	50,842103
3,153791	1,356341	2,325745	2,633431	0,498249	1,806745	61,787558
3,039787	1,331924	2,180389	2,488048	0,477272	1,704707	71,299406
2,918816	1,31209	2,020329	2,329987	0,456502	1,577477	80,164279
2,790985	1,2923	1,854404	2,164582	0,439829	1,446047	87,509385
2,651352	1,258463	1,65612	1,966959	0,405863	1,310839	99,508347
2,496972	1,230785	1,456095	1,767594	0,379105	1,153614	106,215104
2,379304	1,312327	1,269762	1,581562	0,456325	1,039558	116,181845

Tabelle 34: Betriebspunktmessungen bei 600 Umdrehungen pro Minute

Betriebspunkte bei 800 Umdrehungen pro Minute

Kistler_DS	Kistler_SS	Kistler_OW	Kistler_PG	EH_SS	EH_DS	DSS_US
1,809263	1,410454	1,092547	1,401287	0,551253	0,478675	0,055616
4,618953	1,415023	3,902028	4,206241	0,554338	3,273354	0,05589
4,60779	1,413285	3,889715	4,192493	0,551927	3,259843	9,724529
4,582825	1,404794	3,856503	4,164	0,548497	3,238181	20,910229
4,566824	1,399163	3,832785	4,136123	0,540313	3,220531	29,266083
4,51315	1,385426	3,75656	4,061817	0,529051	3,164891	41,608766
4,452692	1,371228	3,679407	3,98182	0,508407	3,107545	51,069723

Kistler_DS	Kistler_SS	Kistler_OW	Kistler_PG	EH_SS	EH_DS	DSS_US
4,388448	1,359546	3,580674	3,888065	0,502259	3,040142	61,141258
4,332481	1,345297	3,490233	3,797865	0,488712	2,986059	68,646234
4,222126	1,320369	3,316946	3,625527	0,46249	2,877529	80,881852
4,067828	1,287017	3,113143	3,42097	0,433297	2,72342	91,522043
3,890648	1,256843	2,884855	3,1932	0,407925	2,54933	100,508645
3,672822	1,223483	2,603775	2,916816	0,373623	2,333318	110,912785
3,511976	1,184946	2,388042	2,700457	0,336858	2,173629	119,872592
3,360265	1,14673	2,159894	2,475037	0,305501	2,01802	130,418536
3,139064	1,131207	1,864597	2,181289	0,288264	1,798362	139,910308
2,961525	1,101015	1,641636	1,960158	0,26401	1,621722	144,540537
2,853263	1,080574	1,505814	1,824062	0,244497	1,517511	147,275192
2,808219	1,214662	1,395902	1,717617	0,372231	1,471569	156,37838

Tabelle 35: Betriebspunktmessungen bei 800 Umdrehungen pro Minute

Betriebspunkte bei 1000 Umdrehungen pro Minute

Kistler_DS	Kistler_SS	Kistler_OW	Kistler_PG	EH_SS	EH_DS	DSS_US
1,811772	1,4078	1,090979	1,406793	0,553857	0,476214	0,05695
6,197901	1,408374	5,479656	5,784033	0,551947	4,843848	0,055755
6,167181	1,407717	5,442451	5,749701	0,550229	4,813088	19,444499
6,125917	1,40003	5,373173	5,678557	0,545178	4,773472	40,742594
6,009798	1,386437	5,209676	5,515499	0,530388	4,660175	60,376399
5,837277	1,371691	4,944263	5,253153	0,515499	4,489738	82,611478
5,663743	1,352723	4,6548	4,964668	0,502147	4,318249	102,61657
5,281973	1,318394	4,128855	4,441007	0,463814	3,937726	122,005409
4,850622	1,28016	3,566559	3,884515	0,429018	3,512841	141,4648
4,509719	1,240181	3,058387	3,378432	0,394865	3,17206	159,288723
4,014786	1,182268	2,403428	2,728697	0,338839	2,678787	175,154954
3,405197	1,116579	1,643438	1,975362	0,277909	2,068917	194,063335

Tabelle 36: Betriebspunktmessungen bei 1000 Umdrehungen pro Minute

Betriebspunkte bei 1200 Umdrehungen pro Minute

Kistler_DS	Kistler_SS	Kistler_OW	Kistler_PG	EH_SS	EH_DS	DSS_US
1,811772	1,4078	1,090979	1,406793	0,553857	0,476214	0,05695
8,119926	1,39715	7,404077	7,708935	0,549512	6,769372	0,055853
8,094349	1,403484	7,369387	7,676241	0,550047	6,73977	18,322697
8,033962	1,390199	7,280252	7,586324	0,53806	6,680611	41,738344
7,968464	1,381922	7,16987	7,477762	0,531794	6,612866	59,270317
7,794161	1,369857	6,921692	7,235106	0,524247	6,437901	78,128494
7,613895	1,357437	6,632449	6,945472	0,507532	6,265607	100,770792
7,384134	1,331598	6,250731	6,564782	0,483758	6,033993	119,410601

6,990569	1,297751	5,697339	6,019201	0,456496	5,640361	141,039183
6,493637	1,253199	5,043771	5,367412	0,409989	5,150436	158,012367
5,956325	1,206897	4,320182	4,649961	0,367635	4,611171	175,136389
5,238483	1,11163	3,318637	3,651311	0,278087	3,898969	202,330874
3,739493	1,008739	1,689604	2,029943	0,187085	2,421662	220,71318

Tabelle 37: Betriebspunktmessungen bei 1200 Umdrehungen pro Minute

Betriebspunkte bei 1300 Umdrehungen pro Minute

Kistler_DS	Kistler_SS	Kistler_OW	Kistler_PG	EH_SS	EH_DS	DSS_US
1,811772	1,4078	1,090979	1,406793	0,553857	0,476214	0,05695
3,939895	0,983565	1,727129	2,071935	0,165858	2,591577	229,099282

Tabelle 38: Betriebspunktmessungen bei 1300 Umdrehungen pro Minute

Betriebspunkte bei 1400 Umdrehungen pro Minute

Kistler_DS	Kistler_SS	Kistler_OW	Kistler_PG	EH_SS	EH_DS	DSS_US
1,811772	1,4078	1,090979	1,406793	0,553857	0,476214	0,05695
4,085765	0,950926	1,765926	2,110041	0,138477	2,737612	233,248116

Tabelle 39: Betriebspunktmessungen bei 1400 Umdrehungen pro Minute

Betriebspunkte bei 1500 Umdrehungen pro Minute

Kistler_DS	Kistler_SS	Kistler_OW	Kistler_PG	EH_SS	EH_DS	DSS_US
1,81547	1,399718	1,08465	1,419247	0,553519	0,476909	0,056107
10	1,373565	10	9,999992	0,526139	10,097823	71,185606
10	1,350824	9,997551	9,996654	0,502231	9,776715	101,023973
9,989784	1,265474	8,74999	9,07388	0,425979	8,881928	162,471655
9,598127	1,216866	7,887136	8,208582	0,372005	8,248943	183,983583
9,052335	1,185302	7,168212	7,490452	0,344566	7,706053	199,513773
8,499586	1,131338	6,456773	6,786069	0,293356	7,16174	215,754864
7,795593	1,045.521	5,492636	5,8284165	0,2166525	6,455329	232,9676155
5,315028	0,98041	2,899484	3,237613	0,156937	3,961862	239,630837
4,253525	0,929075	1,809826	2,157668	0,122412	2,899105	239,494895

Tabelle 40: Betriebspunktmessungen bei 1500 Umdrehungen pro Minute

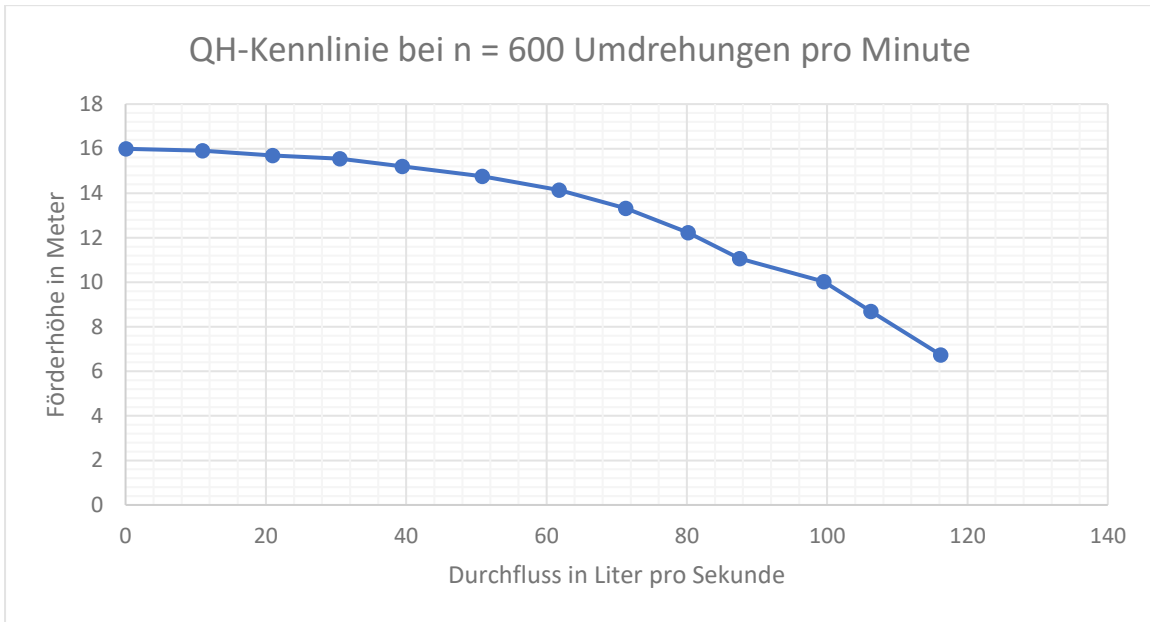


Abbildung 59: QH-Kennlinie bei n = 600 Umdrehungen pro Minute

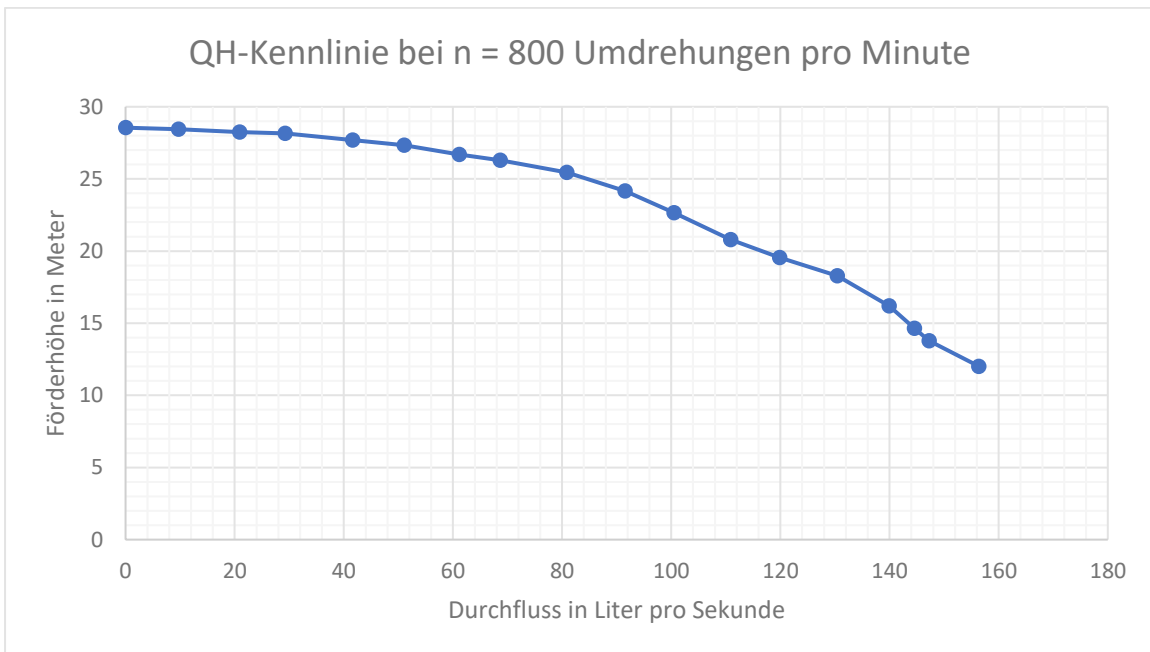


Abbildung 60: QH-Kennlinie bei n = 800 Umdrehungen pro Minute

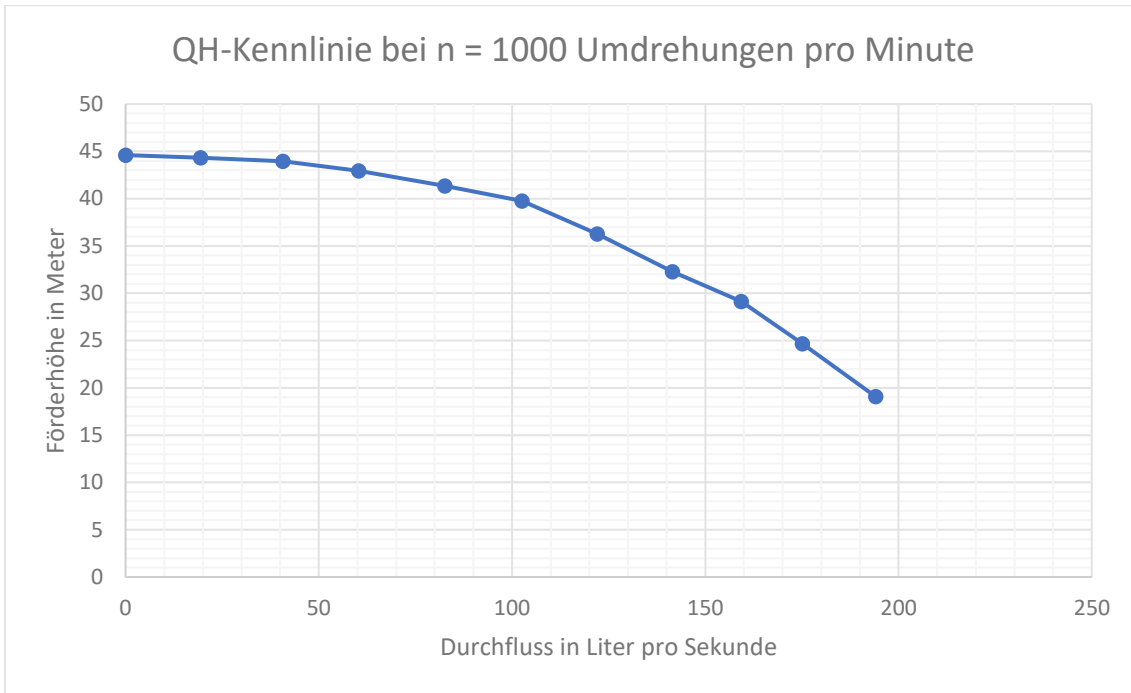


Abbildung 61: QH-Kennlinie bei n = 1000 Umdrehungen pro Minute

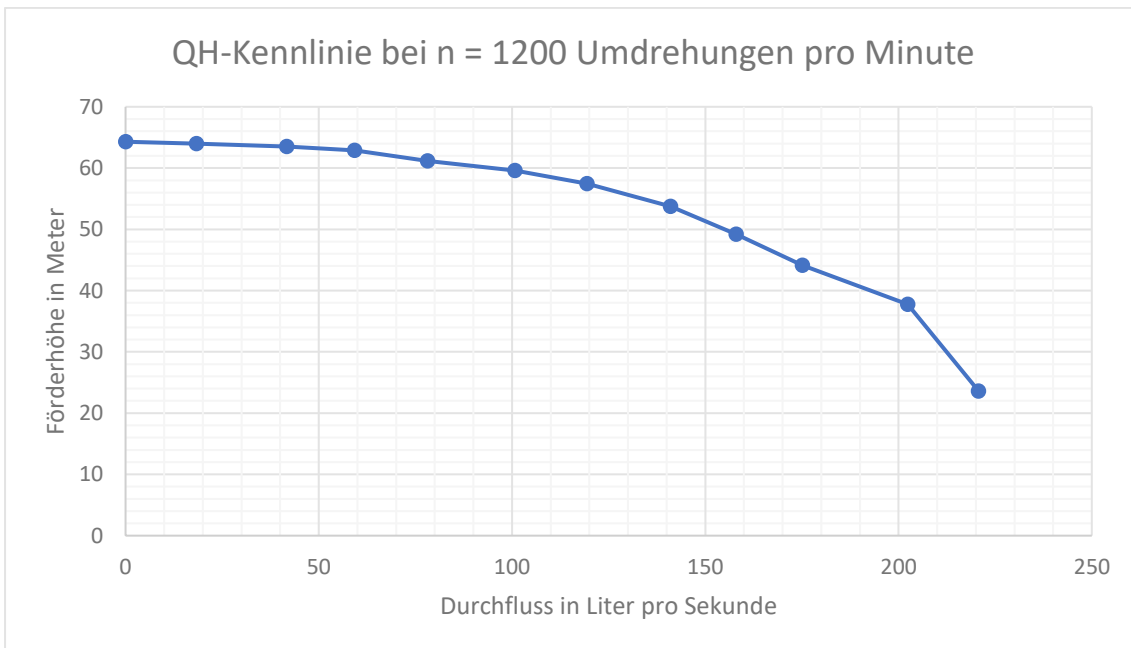


Abbildung 62: QH-Kennlinie bei n = 1200 Umdrehungen pro Minute

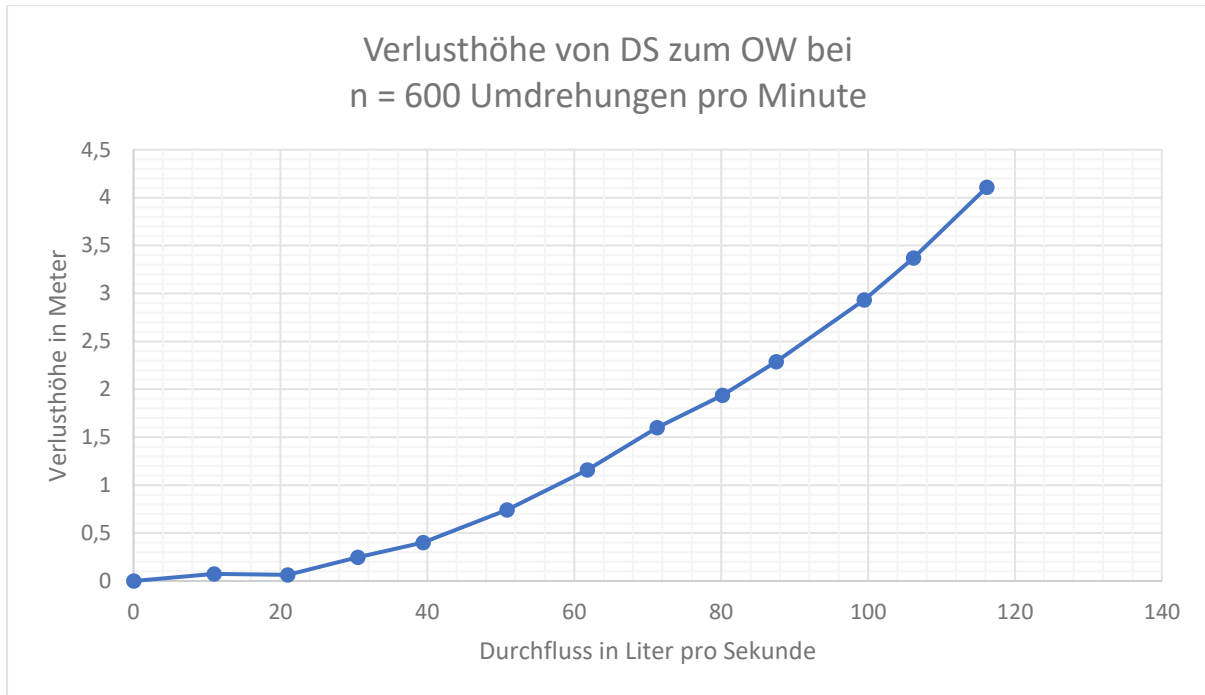


Abbildung 63: Höhenverlust von der Druckseite der Versorgungspumpe bis zum Oberwasser bei n = 600 Umdrehungen pro Minute

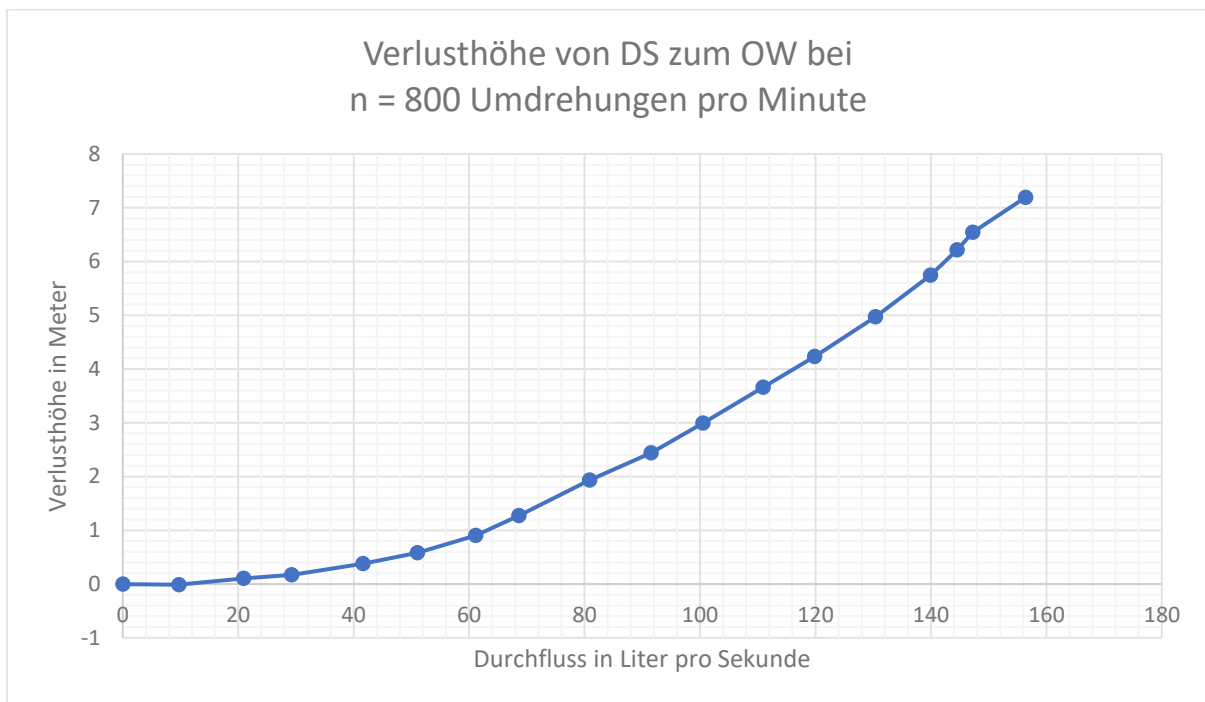


Abbildung 64: Höhenverlust von der Druckseite der Versorgungspumpe bis zum Oberwasser bei n = 800 Umdrehungen pro Minute

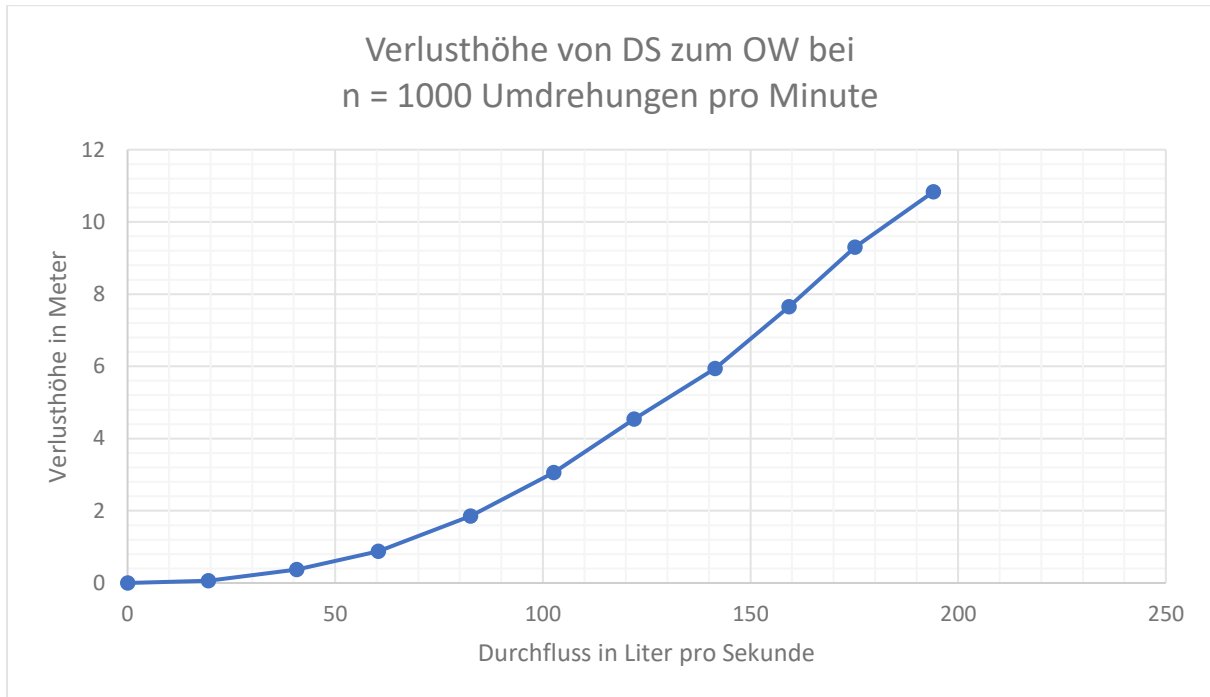


Abbildung 65: Höhenverlust von der Druckseite der Versorgungspumpe bis zum Oberwasser bei n = 1000 Umdrehungen pro Minute

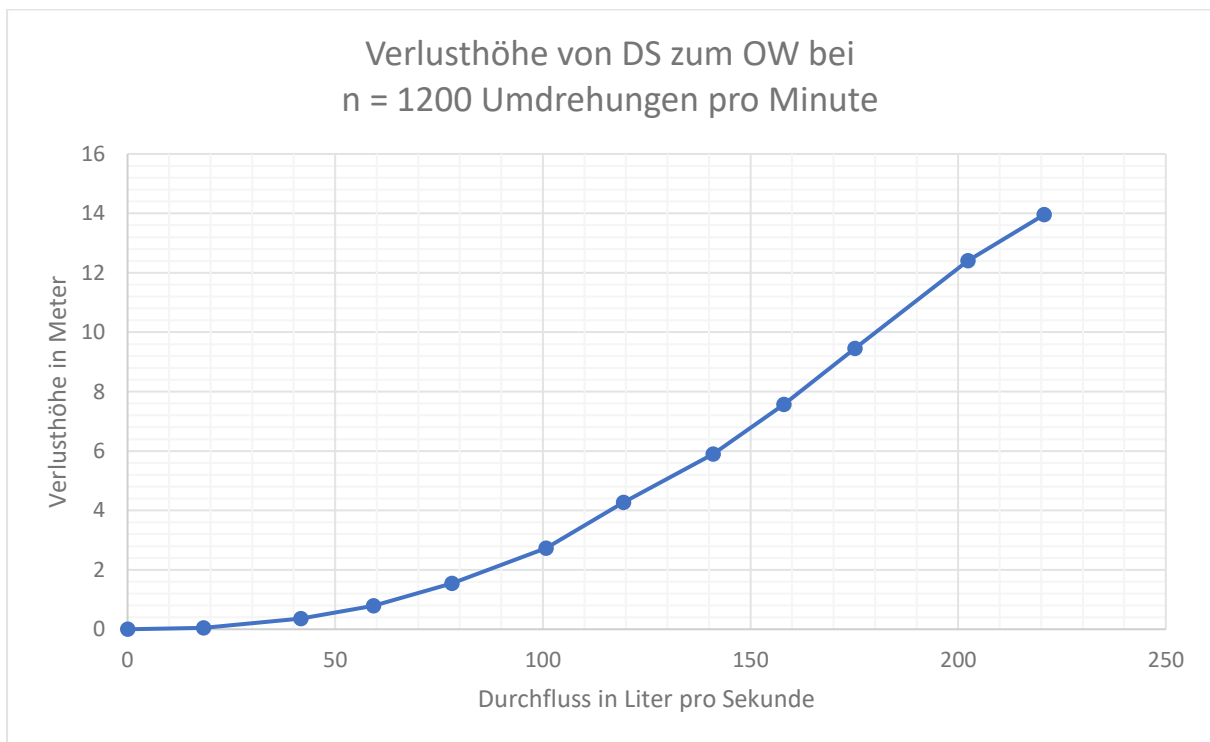


Abbildung 66: Höhenverlust von der Druckseite der Versorgungspumpe bis zum Oberwasser bei n = 1200 Umdrehungen pro Minute

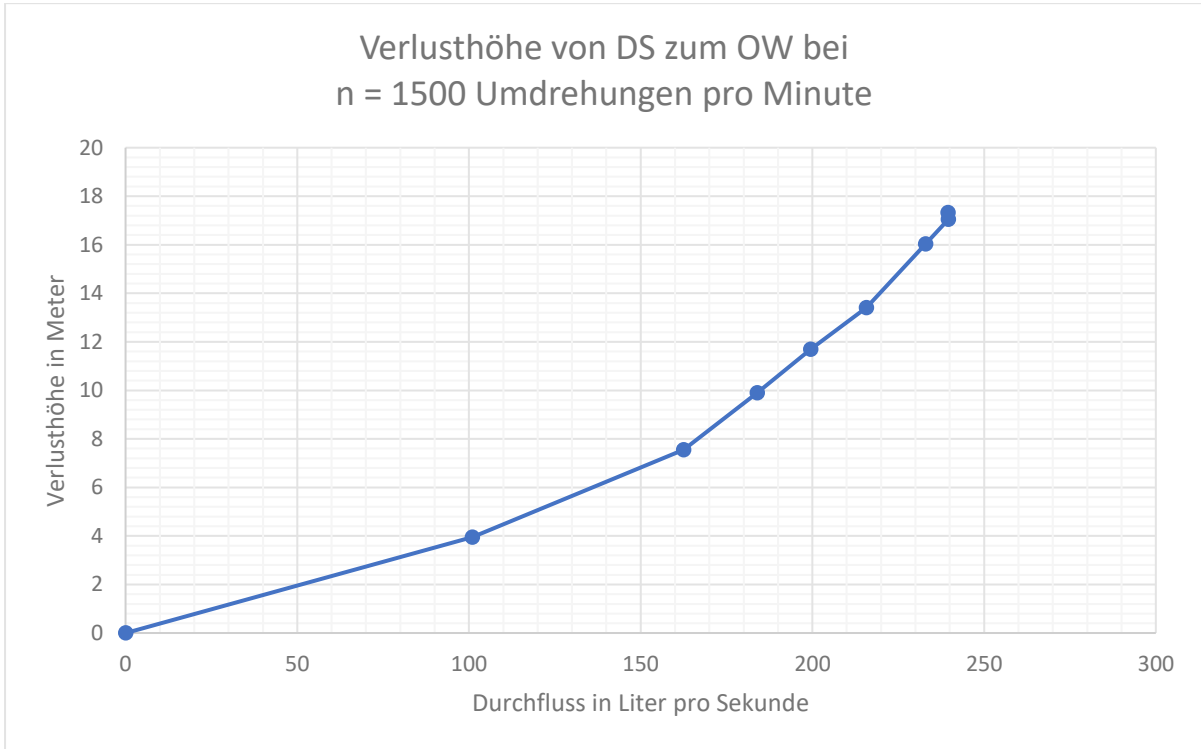


Abbildung 67: Höhenverlust von der Druckseite der Versorgungspumpe bis zum Oberwasser bei $n = 1500$ Umdrehungen pro Minute

Anhang E: Messdaten der hochfrequenten Druckpulsationen

Unter Anhang E sind Informationen zur Ablage der hochfrequent abgetasteten Messdaten zur Analyse der hochfrequenten Druckpulsationen beschrieben und einige ausgewählte Frequenzspektra präsentiert.

Aufgrund der großen Datenmenge erscheint eine direkte Auflistung der Messdaten an dieser Stelle nicht sinnvoll.

Die Messdaten sind in den Ordnern "Messdaten_Universalversuchsstand" und "Messdaten_PeltonTurbinenversuchsstand" zu finden. Dabei ist für jede Messreihe mit konstanter Drehzahl oder konstantem Durchfluss ein eigener Unterordner zu finden. Die Nomenklatur dieser untergeordneten Verzeichnisse und der darin abgelegten Dateien der einzelnen Messpunkte gestaltet sich gemäß "WX_Y". Wobei "W" entweder als "UNI" für den Universalversuchsstand und "PELTON" für den Pelton-Turbinenversuchsstand bezeichnet ist. "X" beschreibt als vierstellige Nummer die Drehzahl in Umdrehungen pro Minute. "Y" beschreibt als dreistellige Nummer den Durchfluss in Litern pro Sekunde. Optional gestaltet sich die Nomenklatur für die Messreihen bei konstantem Durchfluss und variabler Drehzahl. Diese sind gemäß "WQY_X" abgelegt. Das "Q" in der Benennung signalisiert dabei, dass es sich um eine Messreihe bei konstantem Durchfluss handelt.

E.1 Ausprägung von Druckpulsationen(Q) über n

An dieser Stelle werden die Frequenzspektra des hochfrequenten Kistler Drucksensors an der Druckseite der Versorgungspumpe (Druckmessstelle 2, siehe *Abbildung 14*) als Funktion des Durchflusses bei den Drehzahlen 600, 800, 1000, 1200 und 1500 dargelegt. Die grünen Linien markieren die charakteristischen Frequenzen als Vielfache des Drehklangs. Die mit „7x“ markierte Linie ist die Schaufelpassierfrequenz, jene mit „14x“ markierte die doppelte Schaufelpassierfrequenz.

Wie unter Kapitel 6 erwähnt, ist bei den Messreihen mit Drehzahl 800 Umdrehungen pro Minute keine Schaufelpassierfrequenz im Spektrum erkennbar. Bei den Messreihen mit 800 Umdrehungen pro Minute fehlen aufgrund eines Datenfehlers die Messungen bei den Durchflüssen 140 und 150 Liter pro Sekunde. Die dargestellten Frequenzspektra bei 1500 Umdrehungen pro Minute starten bei Durchflüssen von 180 Liter pro Sekunde, da bei geringeren Durchflüssen das Druckniveau am Druckseitigen hochfrequent abtastbaren Druckaufnehmer dessen Messbereich überschreitet.

Die in die Auswertung unter Abschnitt 6.1 eingehenden Frequenzspektra aller Drehzahlen über den Durchfluss am Universalversuchsstand sind von *Abbildung 68* bis *Abbildung 72* ersichtlich.

Darüber hinaus werden die am Pelton-Turbinenversuchsstand ermittelten Frequenzspektra zur Ausprägung der Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz dargestellt. *Abbildung 73* zeigt die Spektra bei 600 Umdrehungen pro Minute und variablem Durchfluss von 0 bis 15 Liter pro Sekunde. *Abbildung 74* zeigt die Spektra bei konstantem Durchfluss von 15 Liter pro Sekunde und variabler Drehzahl von 400 bis 1200 Umdrehungen pro Minute. Da in letzterer Messreihe der Betriebspunkt von 800 Umdrehungen pro Minute wegen eines Datenfehlers nur separat ausgewertet werden kann, ist dieses Spektrum in *Abbildung 75* dargestellt.

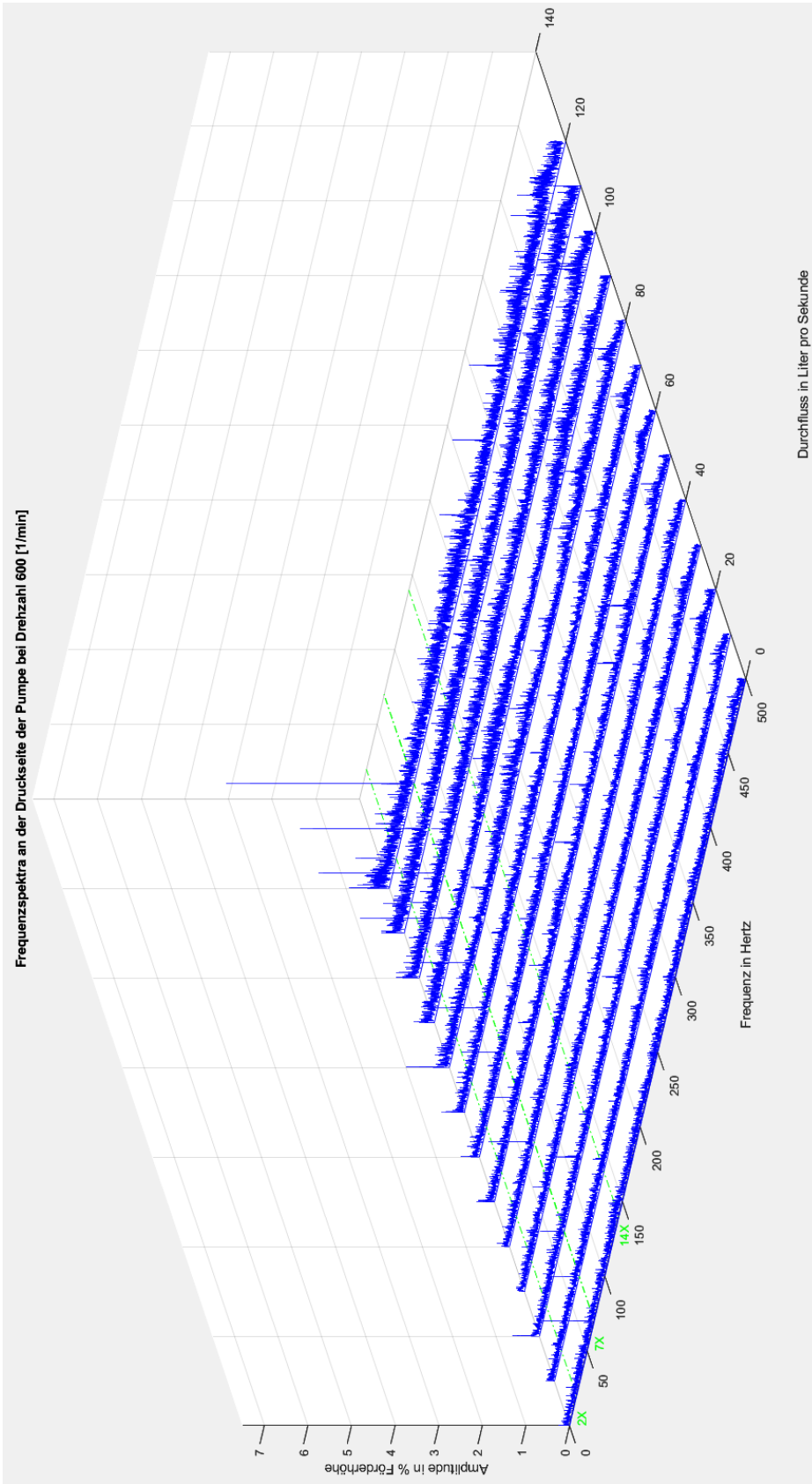


Abbildung 68: Frequenzspektra an der Druckseite der Versorgungspumpe bei Drehzahl 600 Umdrehungen pro Minute

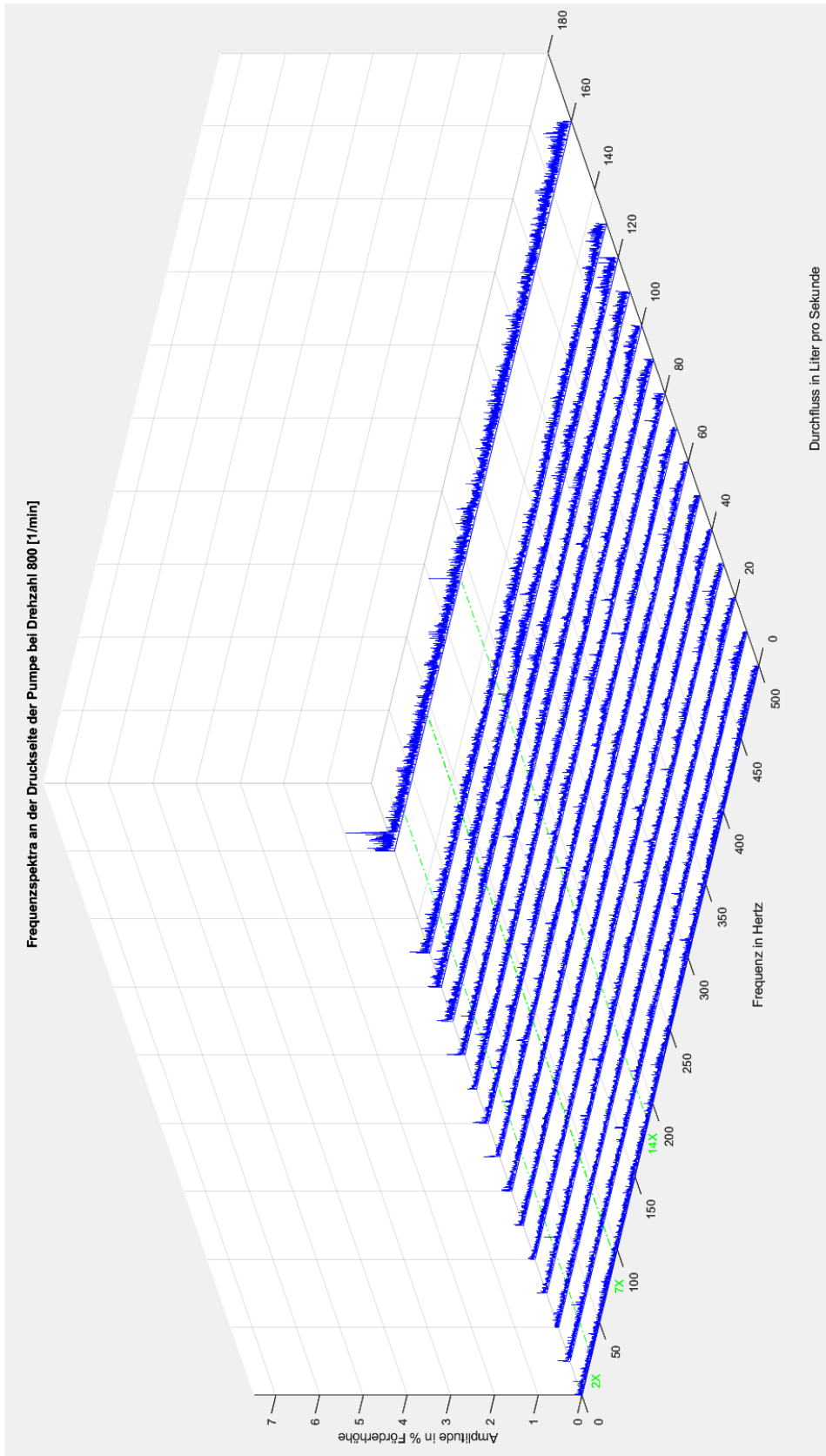


Abbildung 69: Frequenzspektra an der Druckseite der Versorgungspumpe bei Drehzahl 800 Umdrehungen pro Minute

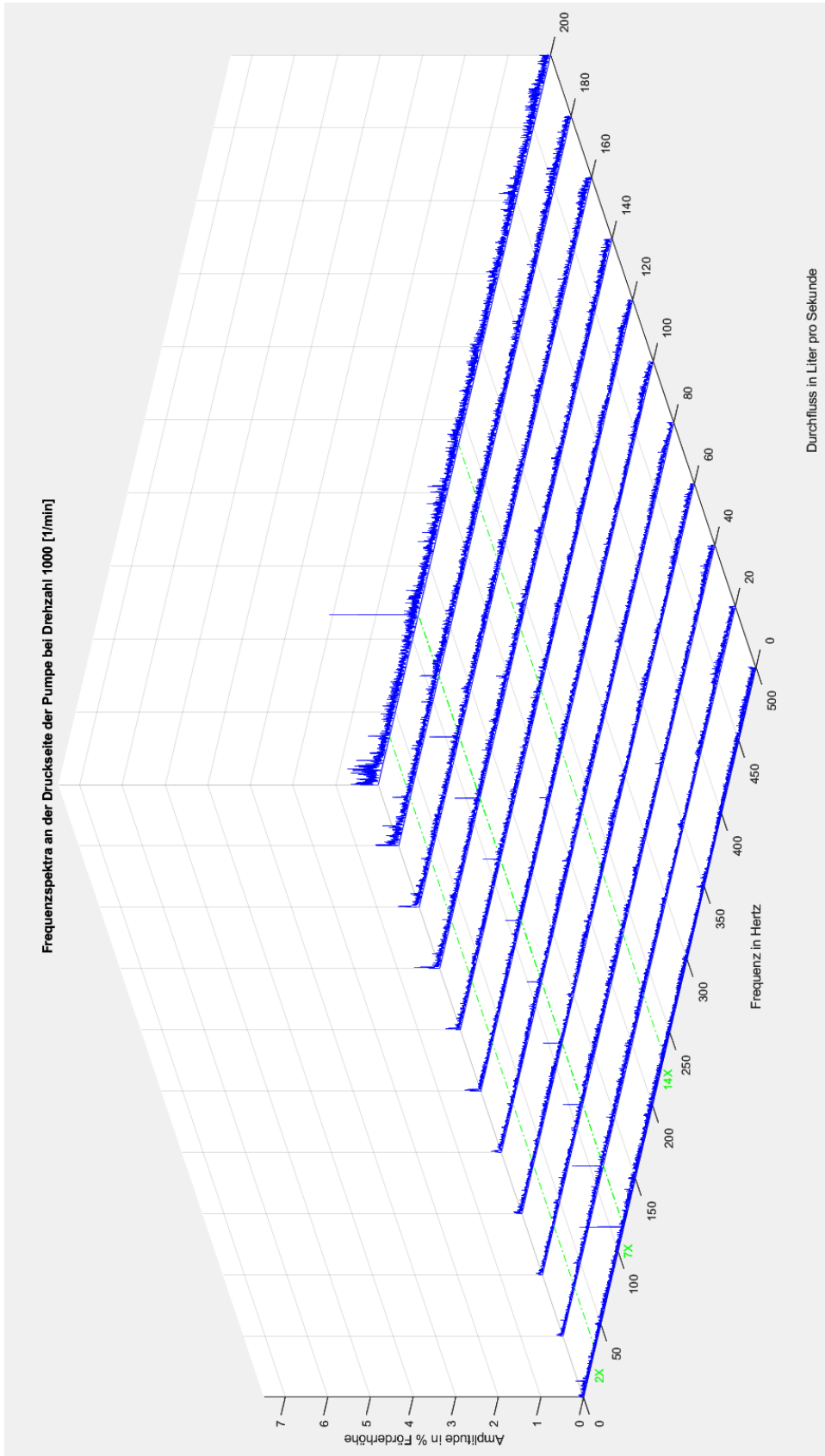


Abbildung 70: Frequenzspektra an der Druckseite der Versorgungspumpe bei Drehzahl 1000 Umdrehungen pro Minute

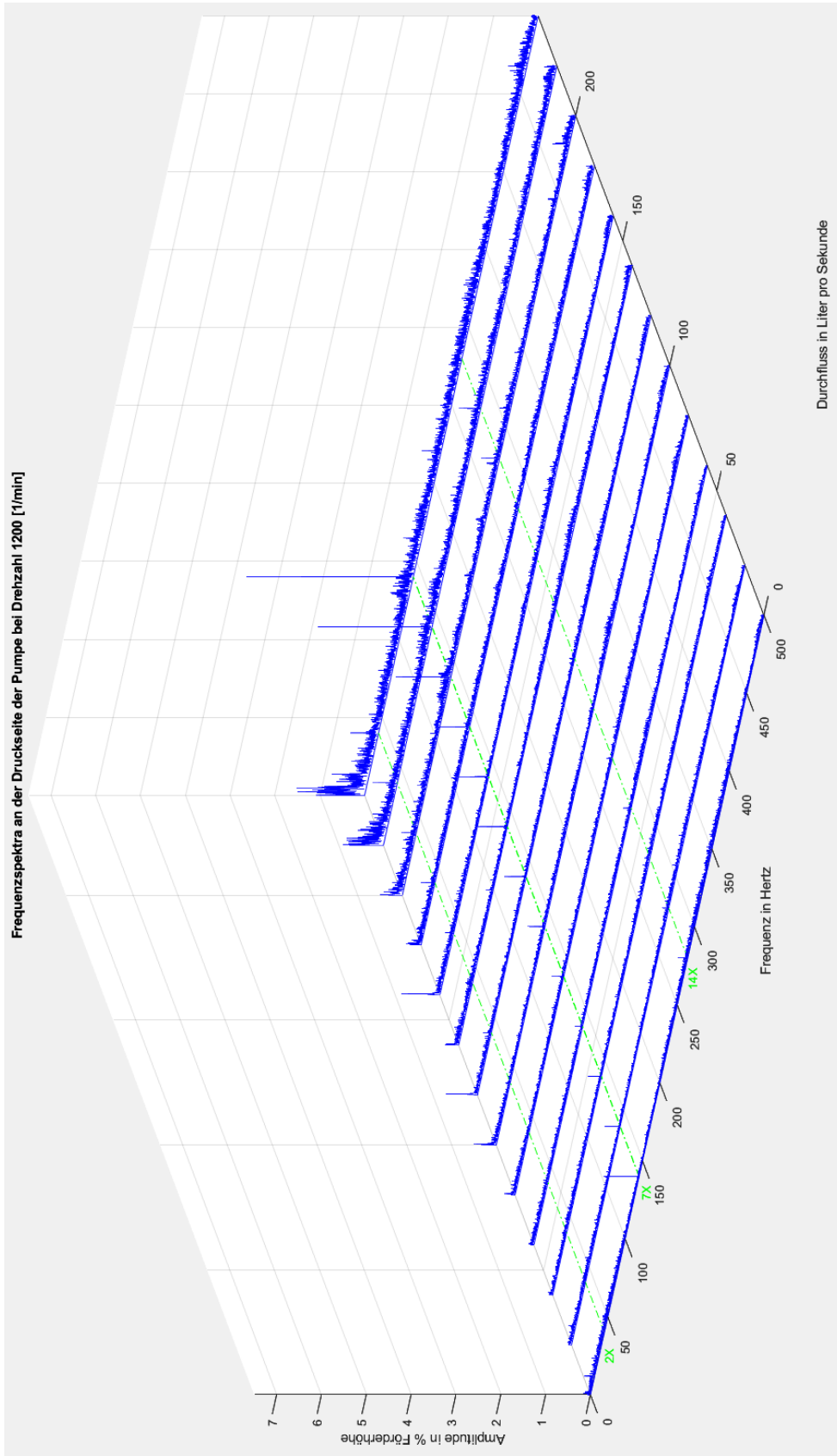


Abbildung 71: Frequenzspektra an der Druckseite der Versorgungspumpe bei Drehzahl 1200 Umdrehungen pro Minute

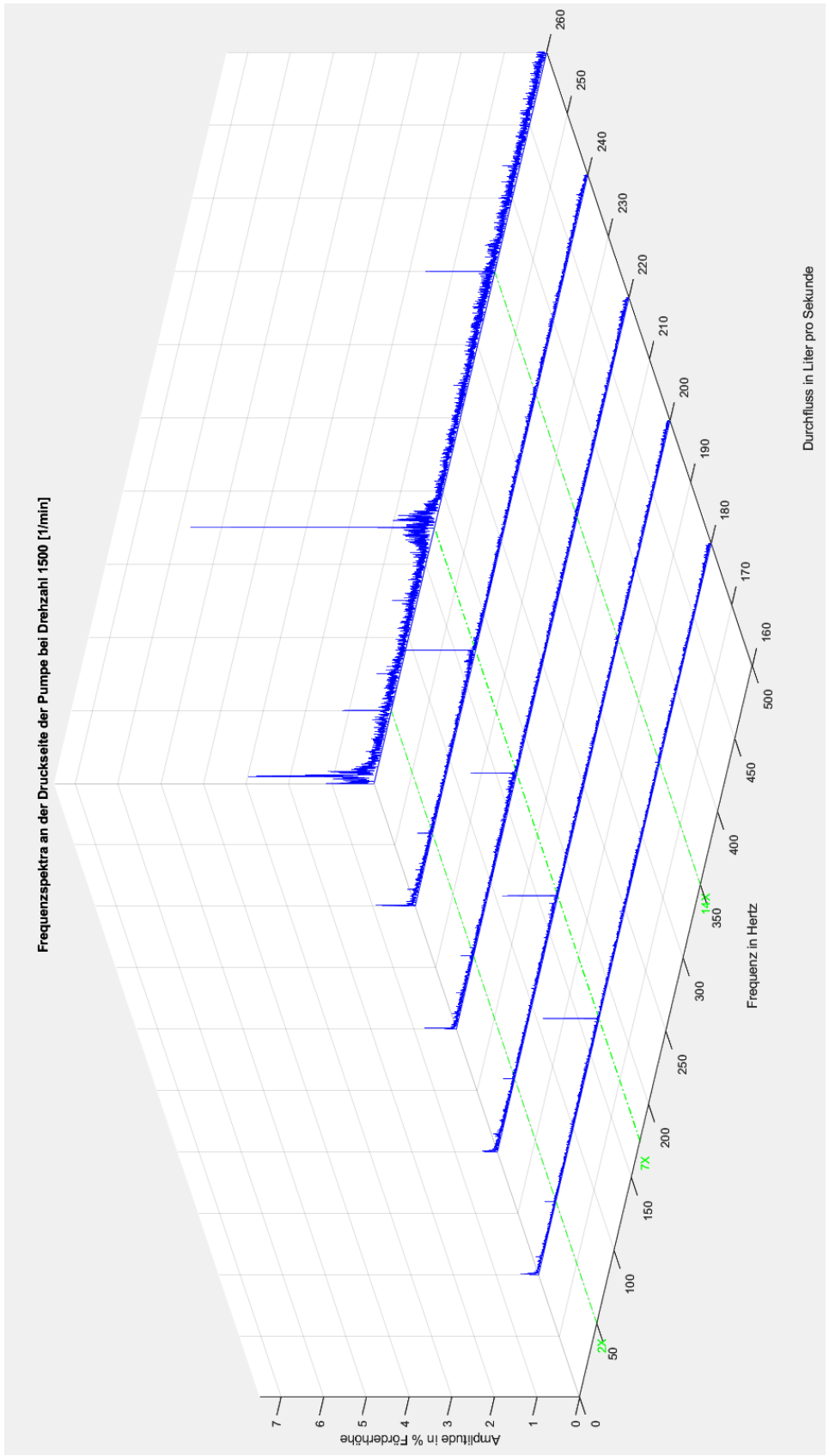


Abbildung 72: Frequenzspektra an der Druckseite der Versorgungspumpe bei Drehzahl 1500 Umdrehungen pro Minute

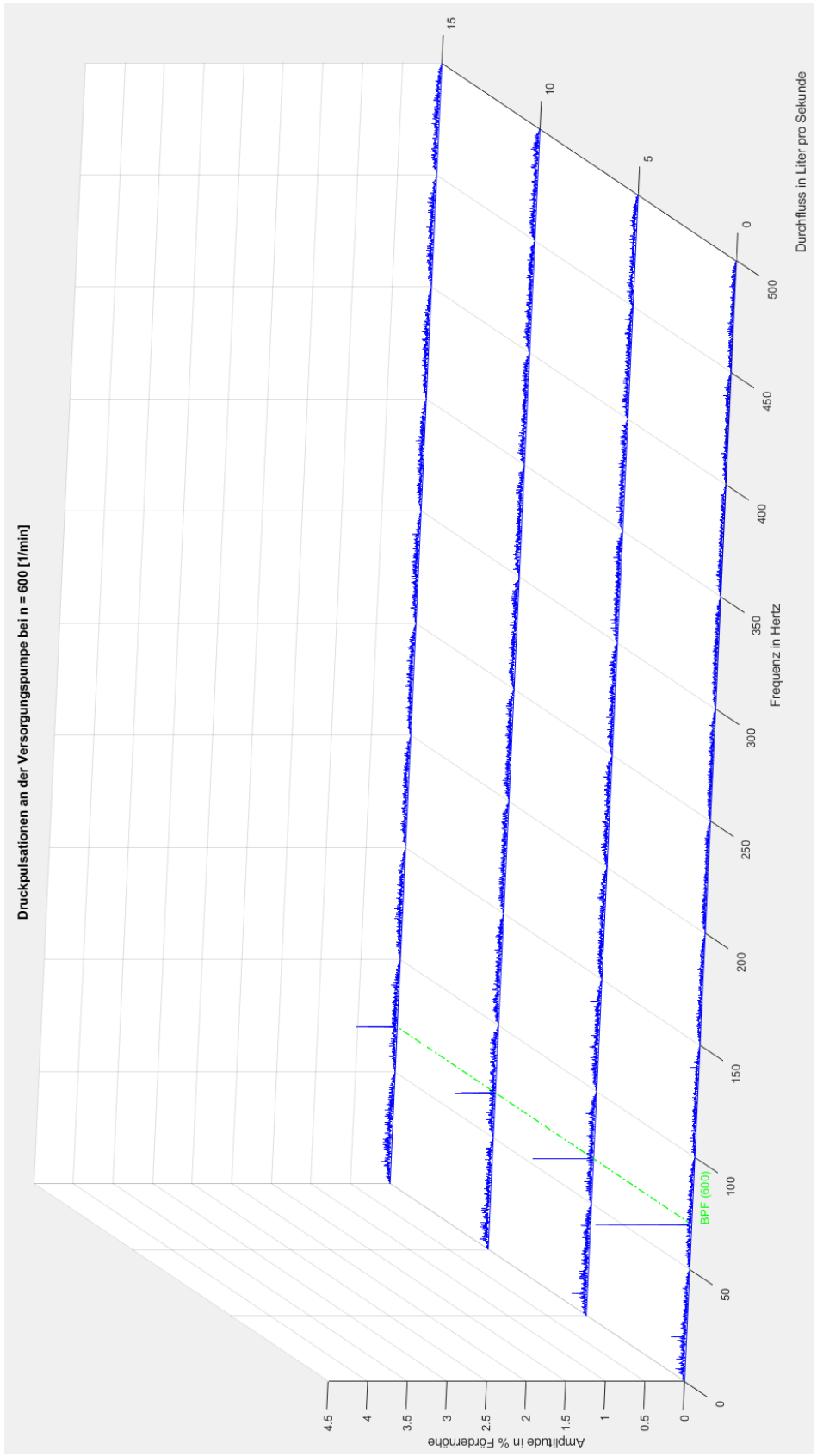


Abbildung 73: Frequenzspektra an der Druckseite der Versorgungspumpe (Pelton-Turbinenversuchsstand) bei n = 600 Umdrehungen pro Minute und variablem Durchfluss

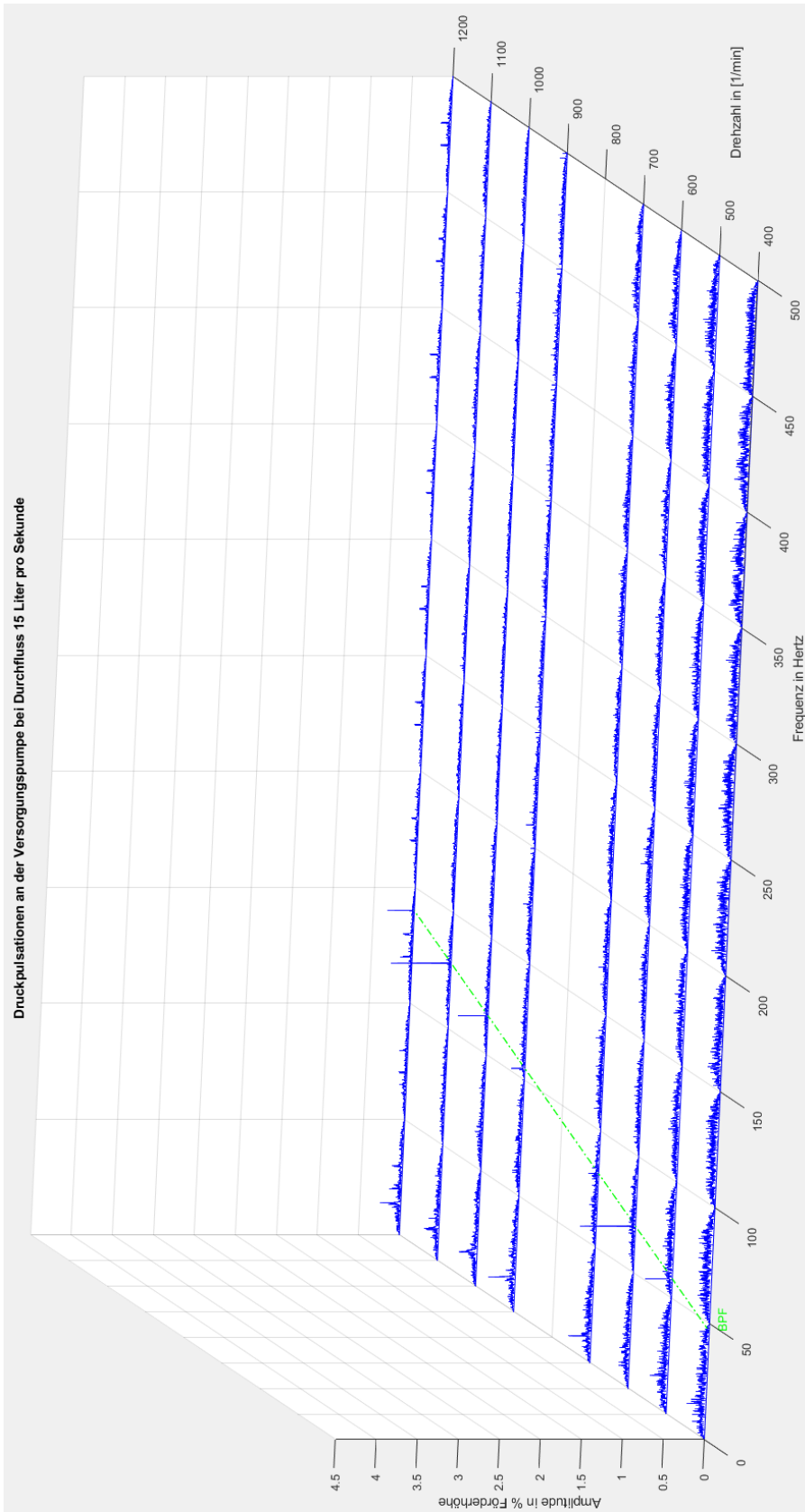


Abbildung 74: Frequenzspektra an der Druckseite der Versorgungspumpe (Pelton-Turbinenversuchsstand) bei $Q = 15$ Liter pro Sekunde und variabler Drehzahl

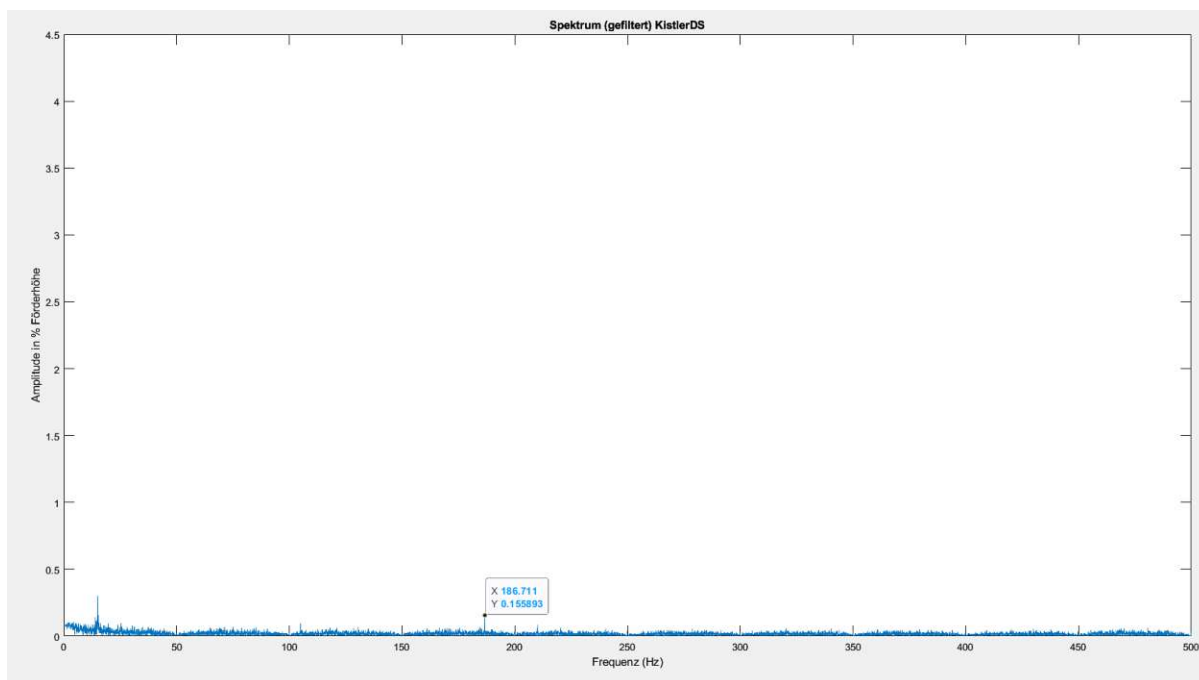


Abbildung 75: Spektrum an der Druckseite der Versorgungspumpe (Pelton-Turbinenversuchsstand) bei $Q = 15$ Liter pro Sekunde und $n = 800$ Umdrehungen pro Minute

E.2 Ausbreitung der Druckpulsationen im Rohrleitungssystem

Hinsichtlich der Ausbreitung von Druckpulsationen werden die Frequenzspektra der hochfrequenten Drucksensoren ausgewählter Betriebspunkte an den Messstellen

- Druckseite der Versorgungspumpe (Druckmessstelle 2)
- Leitungssystem in der Pumpengrube (Druckmessstelle 5 bzw. Druckmessstelle 3)
- Leitungssystem am Oberwasser (Druckmessstelle 6 bzw. Druckmessstelle 4)

dargestellt. Die Frequenzspektra werden in Form eines Wasserfalldiagramms mit den unterschiedlichen Messstellen auf der Y-Achse dargestellt. Die Messstellendefinition ist *Abbildung 13* für den Universalversuchsstand und *Abbildung 14* für den Pelton-Turbinenversuchsstand unter Abschnitt 3.2 zu entnehmen. Die Schaufelpassierfrequenz ist in jeder Abbildung mittels grüner Linien markiert.

Ausbreitung bei Maximaldurchfluss

Es werden am Universalversuchsstand die Frequenzspektra anhand der Drehzahlen 600, 1000, 1200, 1300, 1400 und 1500 bei Maximaldurchfluss an den unterschiedlichen Messstellen in *Abbildung 76* und *Abbildung 77* dargestellt.

Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit

Die Frequenzspektra anhand der Betriebspunkte in Kapitel 6.2.1 zum Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die Ausbreitung von Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz am Universalversuchsstand sind in *Abbildung 80*, *Abbildung 79* und *Abbildung 78* dargestellt.

Einfluss des Druckniveaus

Die Frequenzspektra anhand der Betriebspunkte in Kapitel 6.2.2 zum Einfluss des Druckniveaus auf die Ausbreitung von Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz am Universalversuchsstand sind in *Abbildung 81*, *Abbildung 82* und *Abbildung 83* dargestellt.

Untersuchungen am Pelton-Turbinenversuchsstand

Die Frequenzspektra, welche in die Auswertung der Fragestellung in Abschnitt 6.3.2 zur Ausbreitung von Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz am Pelton-Turbinenversuchsstand sind in *Abbildung 84* und *Abbildung 85* zu finden. Es wird die Ausbreitung der Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz für die Drehzahlen 500, 600, 700, 900, 1100 und 1200 Umdrehungen pro Minute bei konstantem Durchfluss von 15 Liter pro Sekunde untersucht.

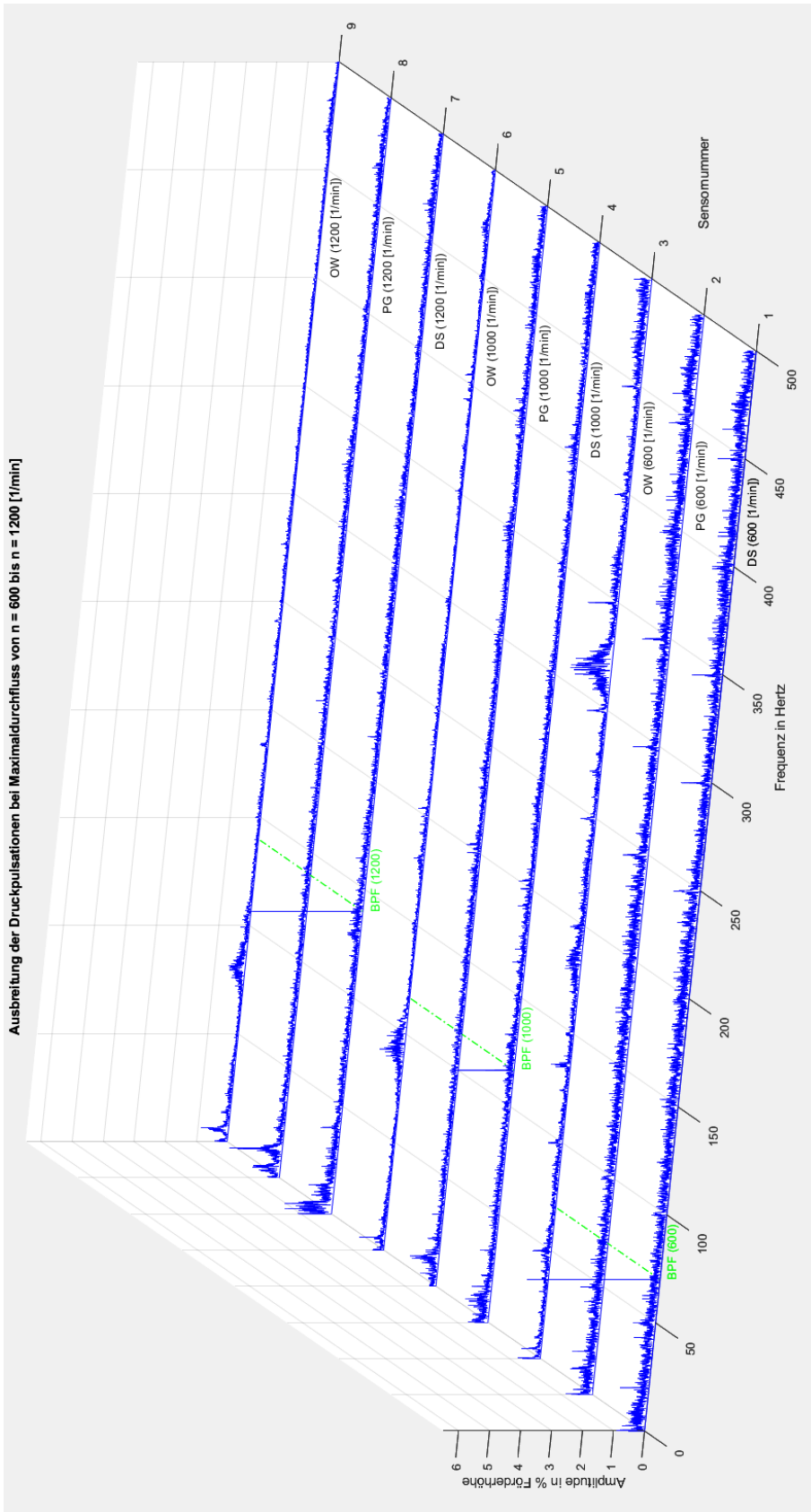


Abbildung 76: Ausbreitung der Druckpulsationen bei Maximaldurchfluss anhand der Drehzahlen 600, 1000 und 1200 Umdrehungen pro Minute am Universalversuchsstand

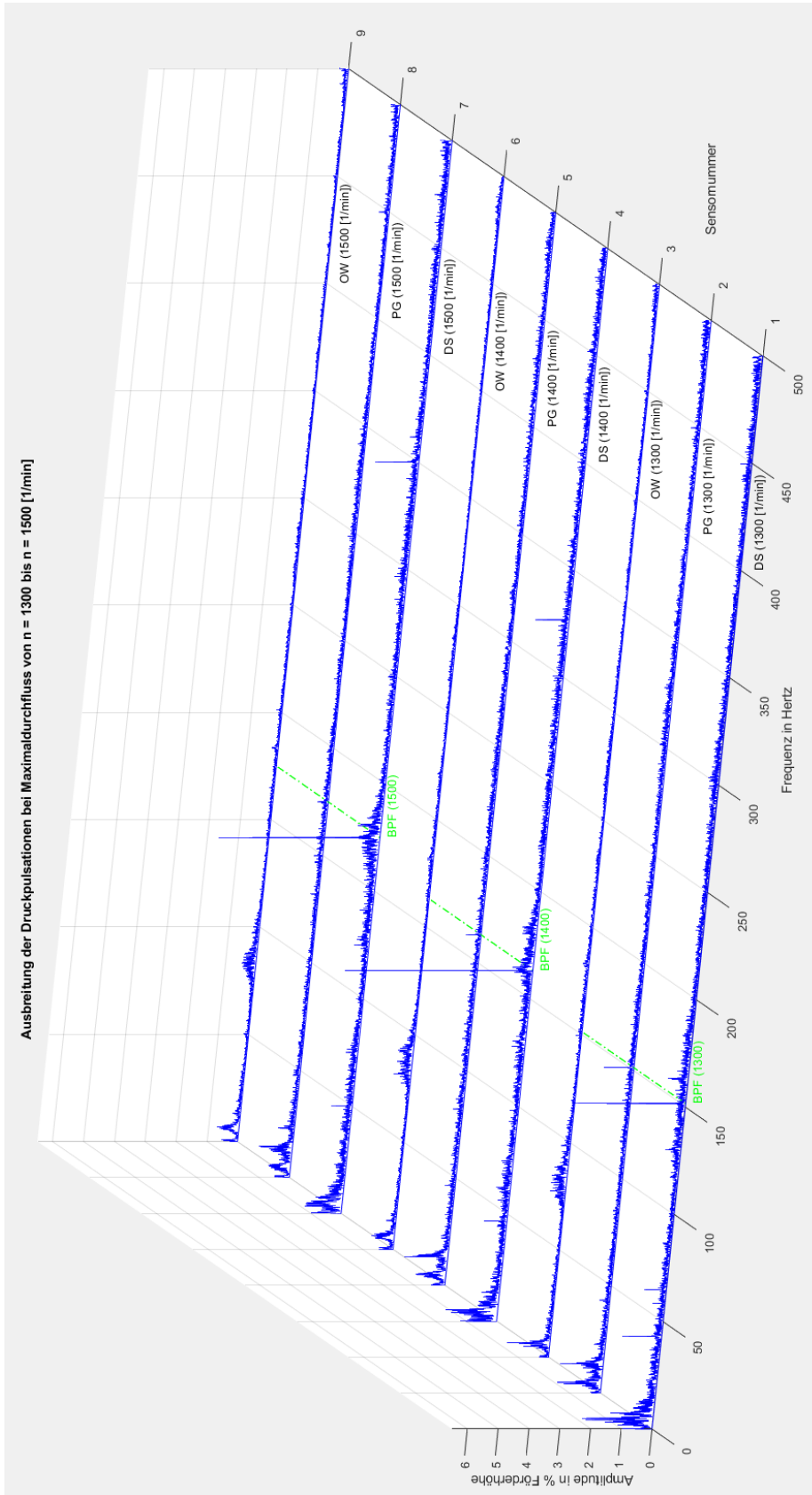


Abbildung 77: Ausbreitung der Druckpulsationen bei Maximaldurchfluss anhand der Drehzahlen 1300, 1400 und 1500 Umdrehungen pro Minute am Universalversuchsstand

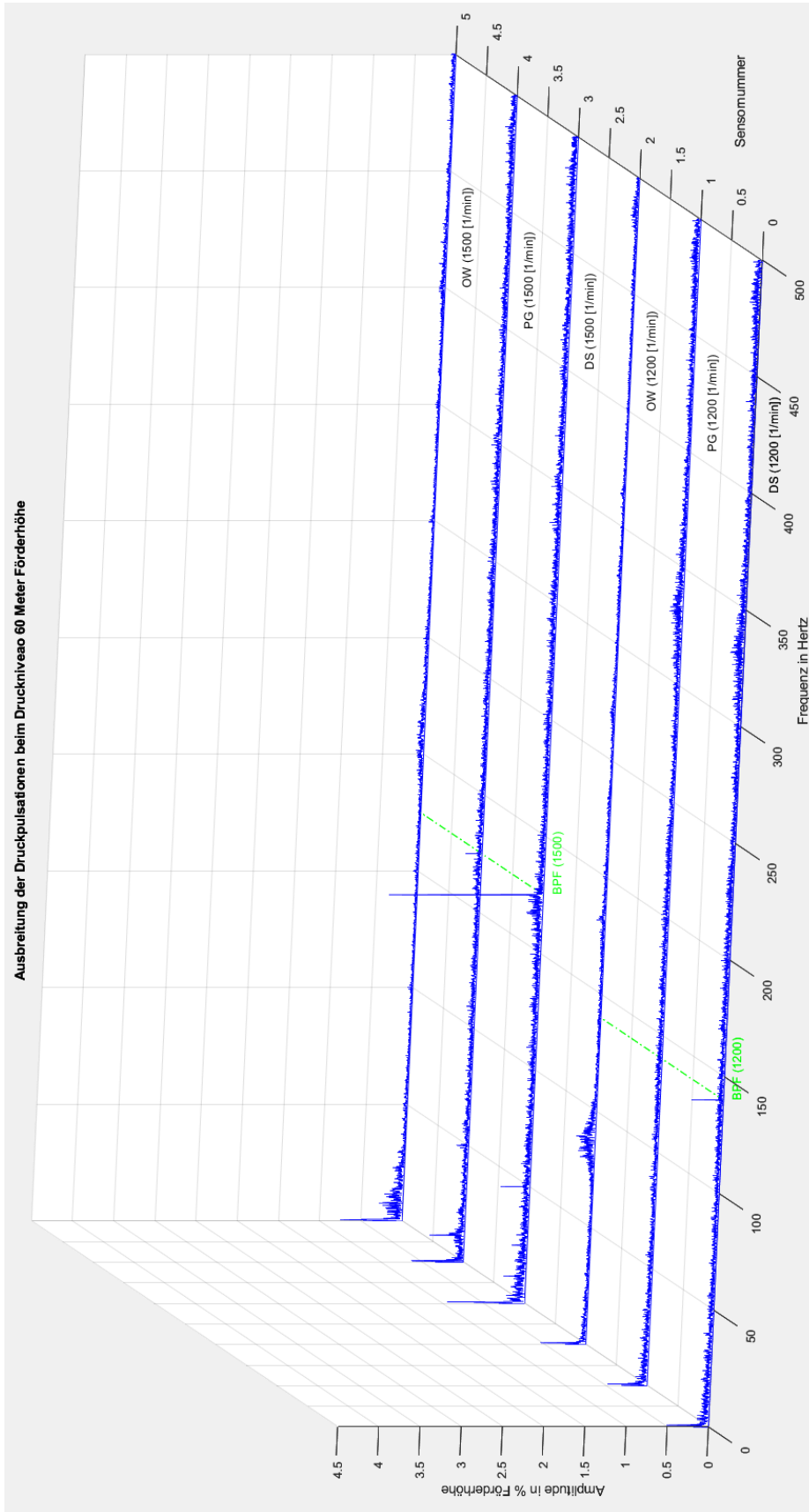


Abbildung 78: Ausbreitung der Pulsationen beim Druckniveau von 60 Metern Förderhöhe am Universalversuchsstand

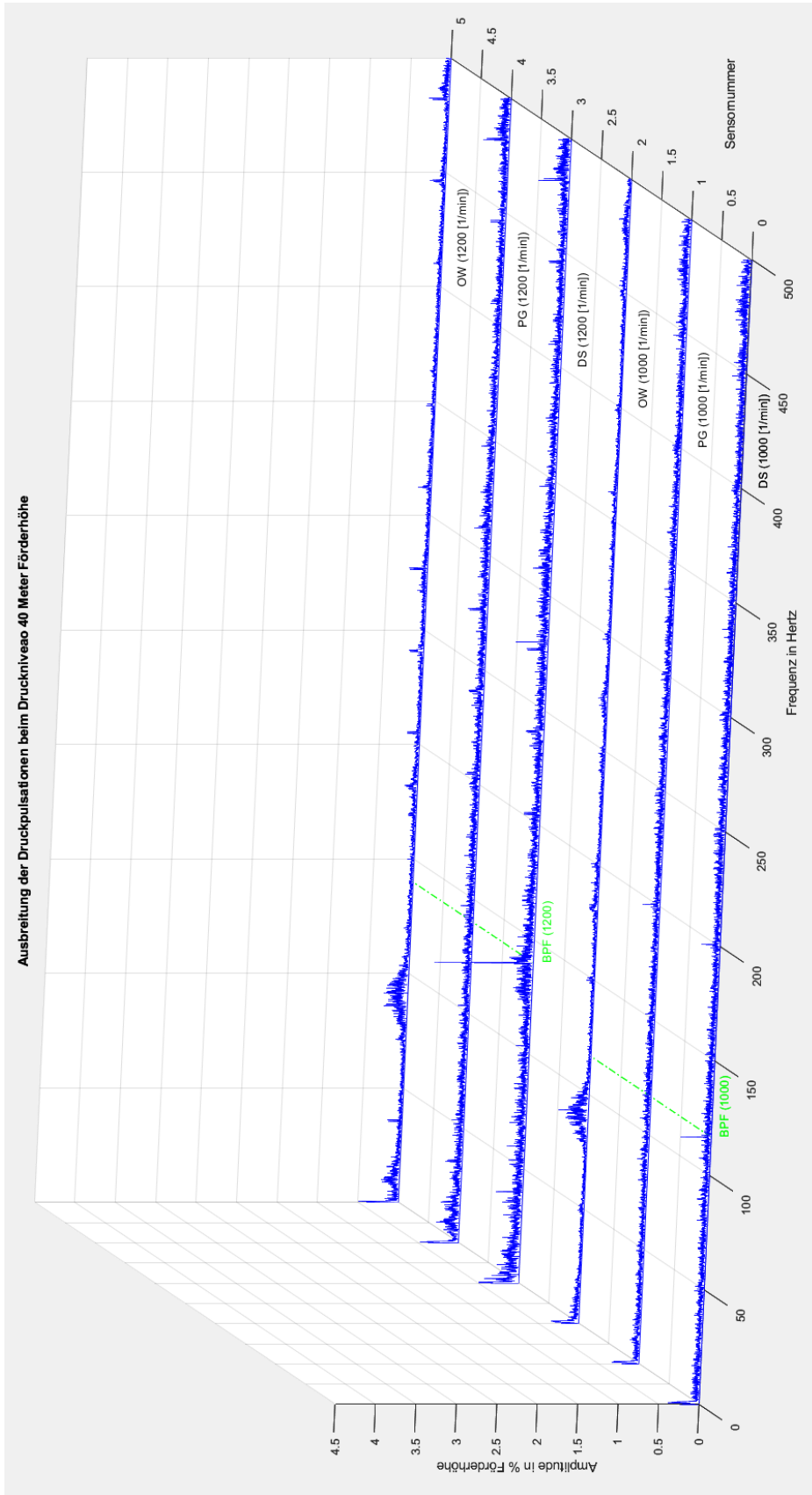


Abbildung 79: Ausbreitung der Pulsationen beim Druckniveau von 40 Metern Förderhöhe am Universalversuchsstand

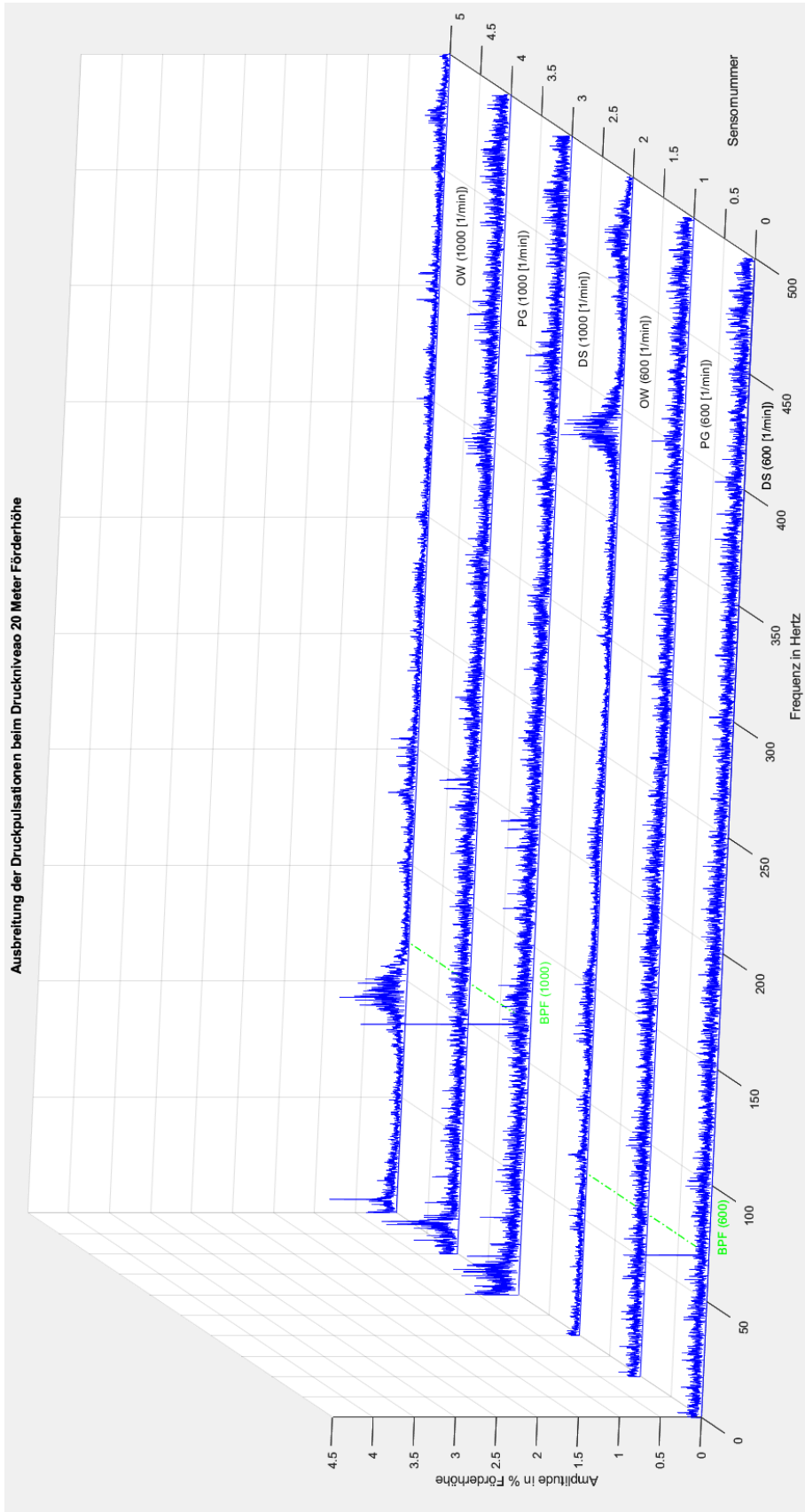


Abbildung 80: Ausbreitung der Pulsationen beim Druckniveau von 20 Metern Förderhöhe am Universalversuchsstand

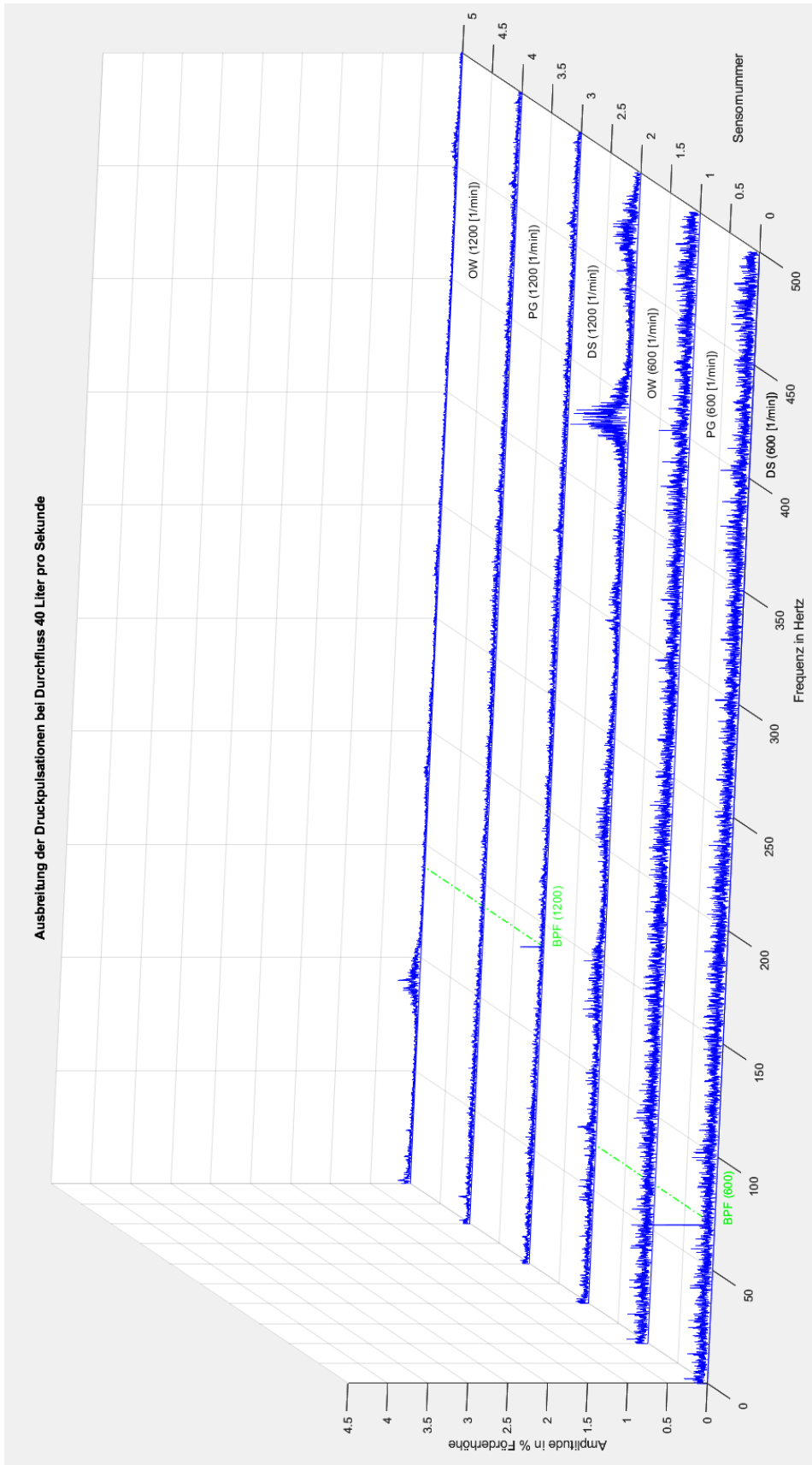


Abbildung 81: Ausbreitung der Pulsationen beim Durchfluss 40 Liter pro Sekunde am Universalversuchsstand

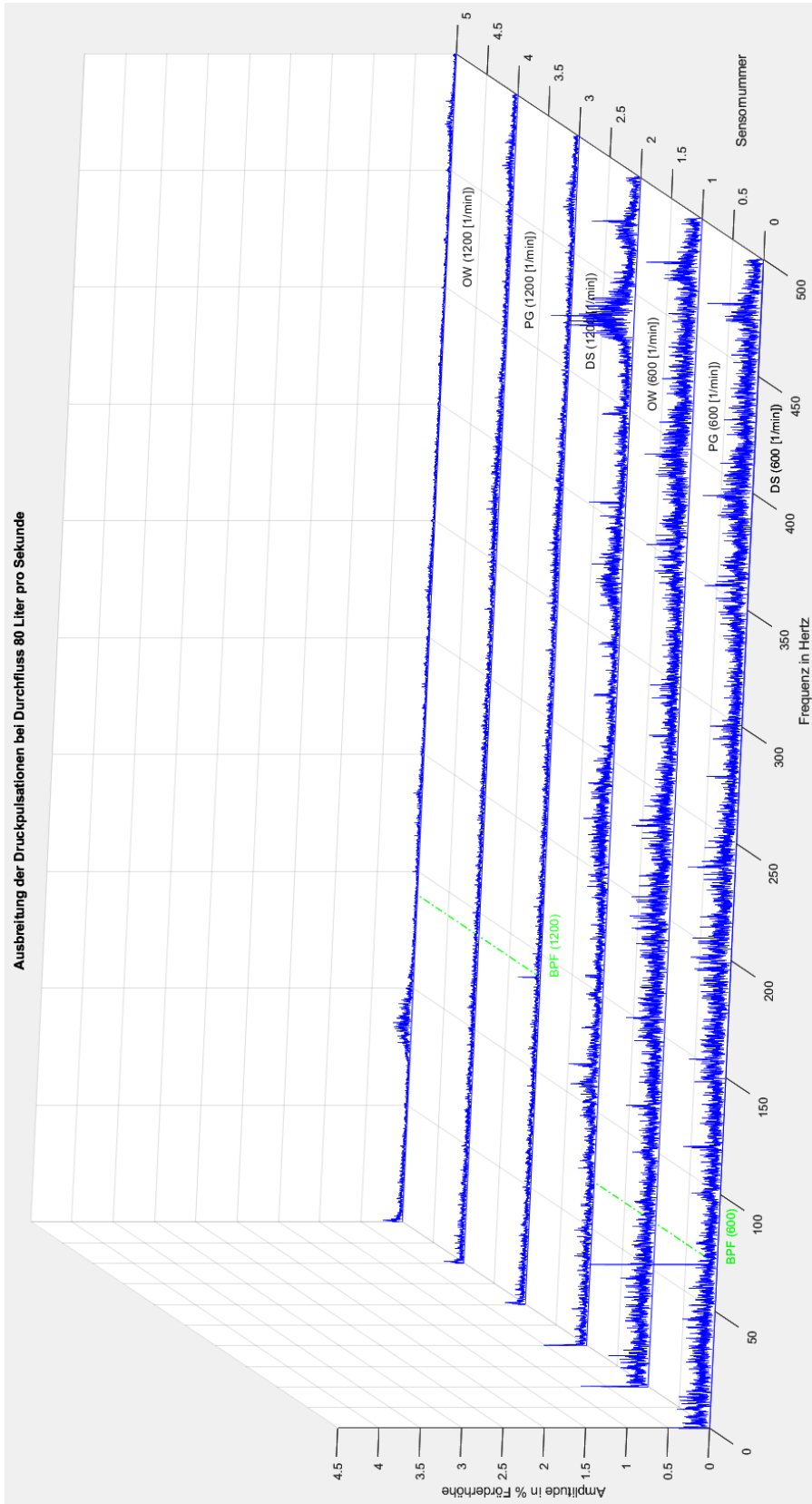


Abbildung 82: Ausbreitung der Pulsationen beim Durchfluss 80 Liter pro Sekunde am Universalversuchsstand

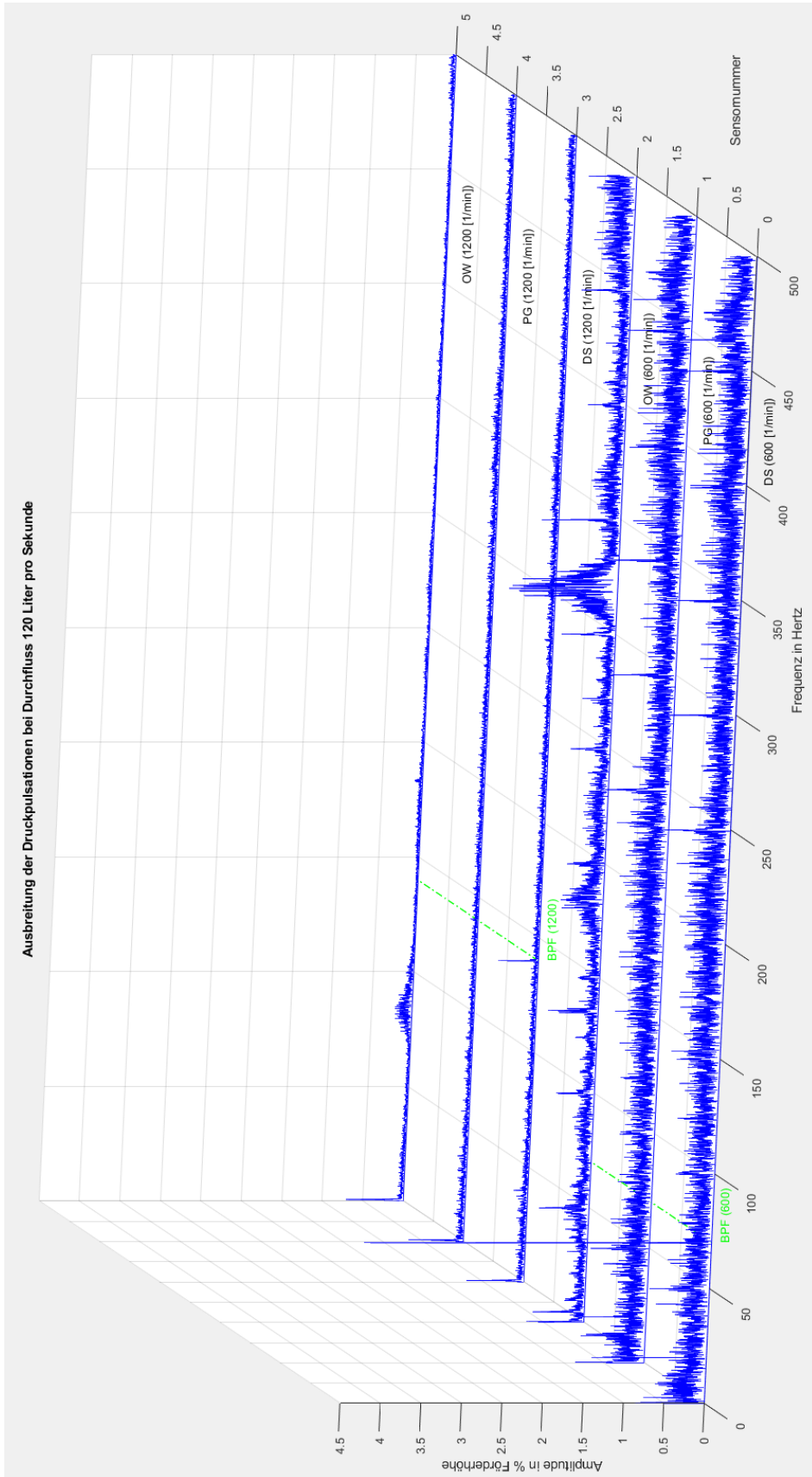


Abbildung 83: Ausbreitung der Pulsationen beim Durchfluss 120 Liter pro Sekunde am Universalversuchsstand

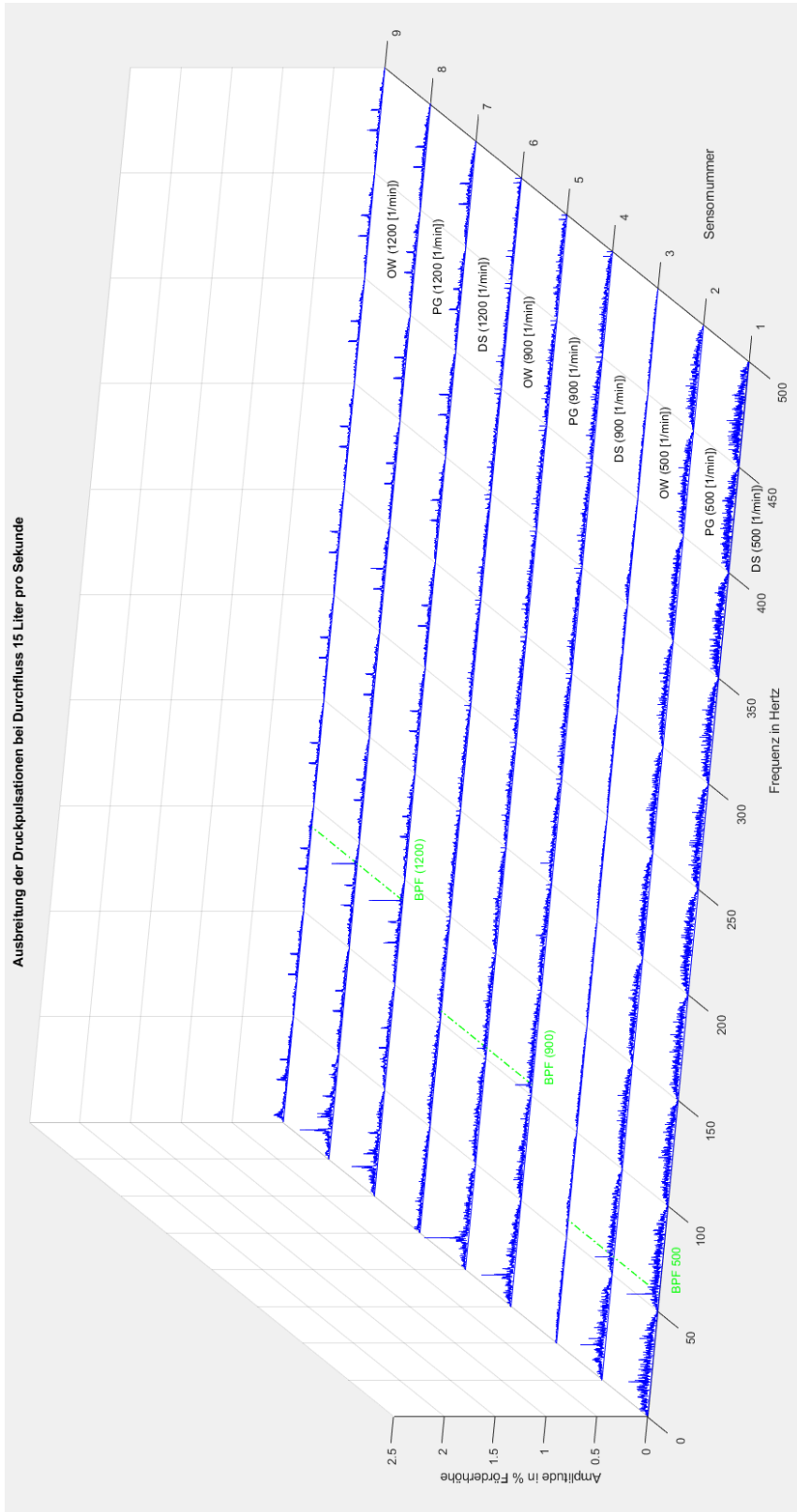


Abbildung 84: Ausbreitung der Druckpulsationen bei Durchfluss 15 Liter pro Sekunde am Pelton-Turbinenversuchsstand bei Drehzahlen 500, 900 und 1200 Umdrehungen pro Minute

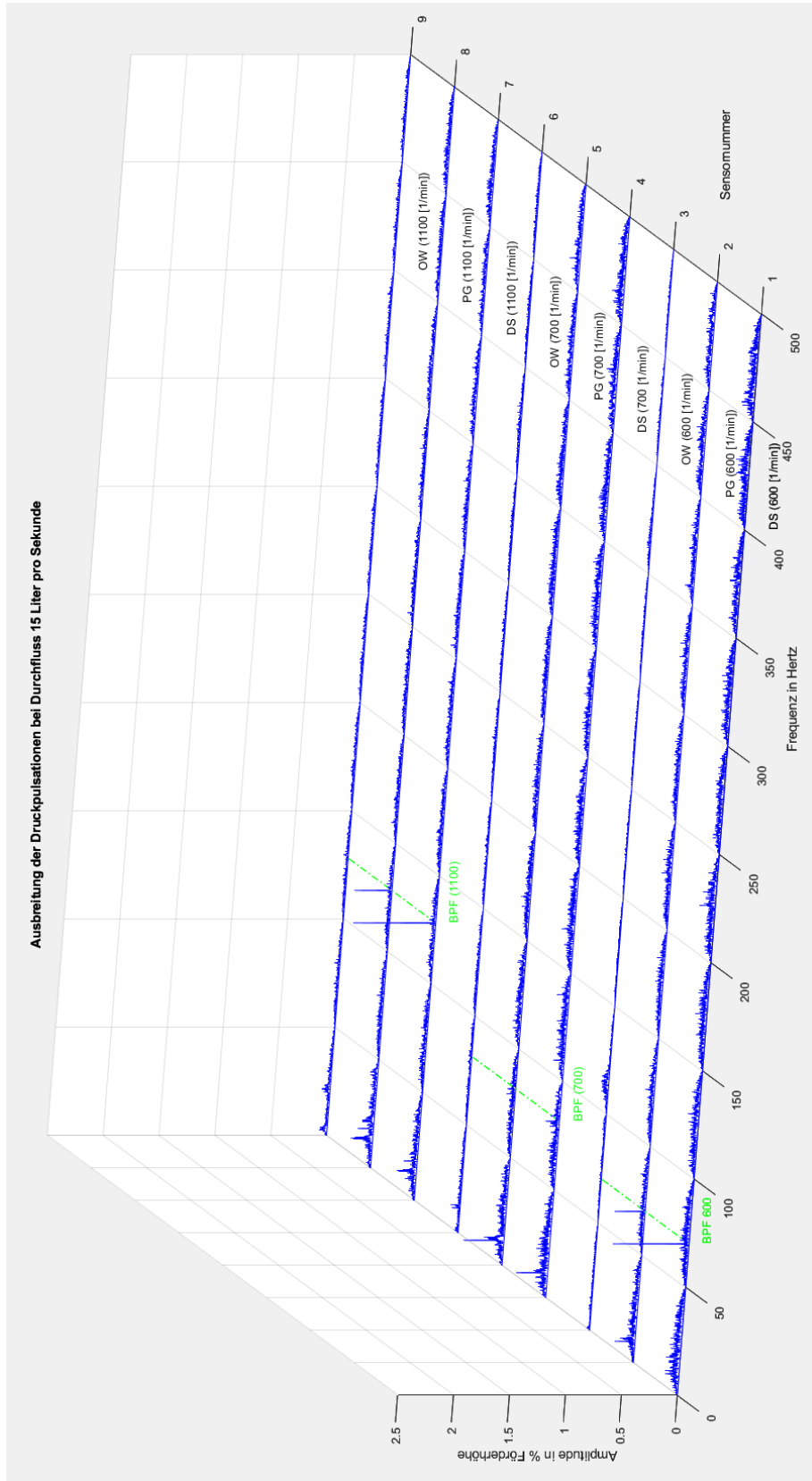


Abbildung 85: Ausbreitung der Druckpulsationen bei Durchfluss 15 Liter pro Sekunde am Pelton-Turbinenversuchsstand bei Drehzahlen 600, 700 und 1100 Umdrehungen pro Minute

Anhang E: Technische Zeichnungen der angefertigten Adapterstücke

Unter Angang F sind die technischen Zeichnungen der Adapterstücke, die im Rahmen der Instrumentierung gefertigt wurden, aufgeführt. Die Beschreibung der Adapterstücke ist unter Abschnitt 4.2 zu finden.

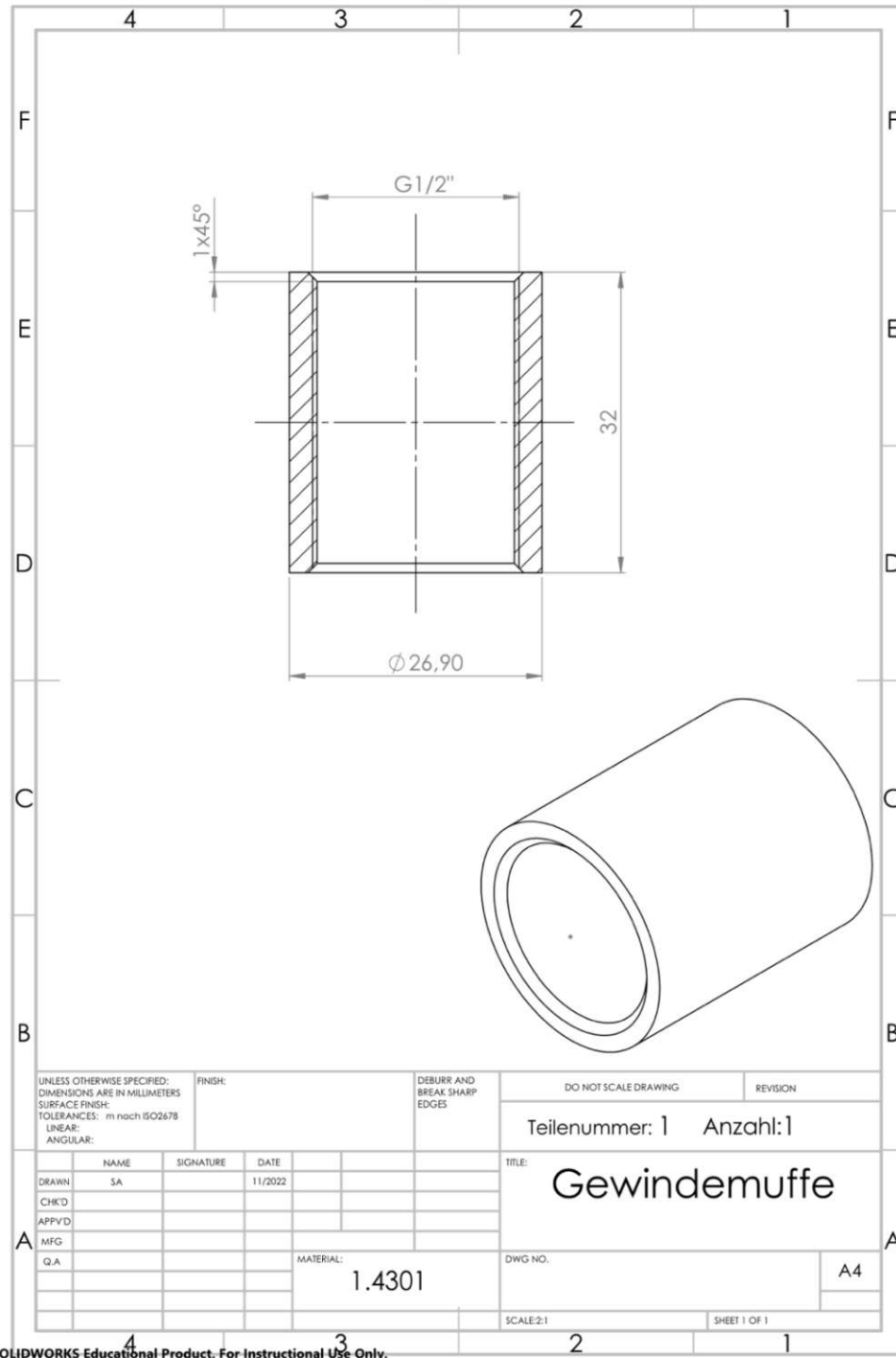


Abbildung 86: Technische Zeichnung der Gewindemuffe (Teilenummer 1)

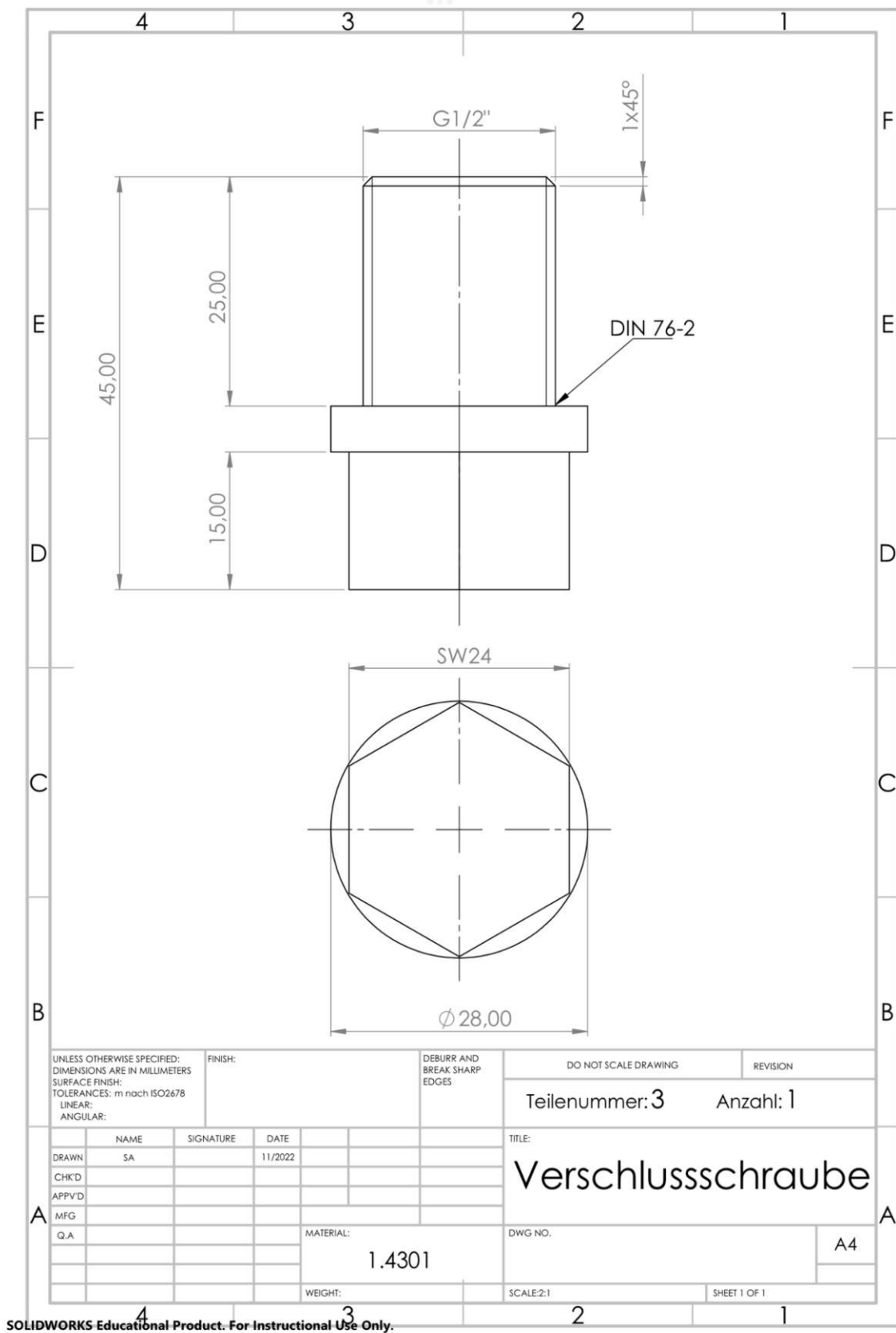


Abbildung 87: Technische Zeichnung der Verschlusschraube (Teilenummer 3)

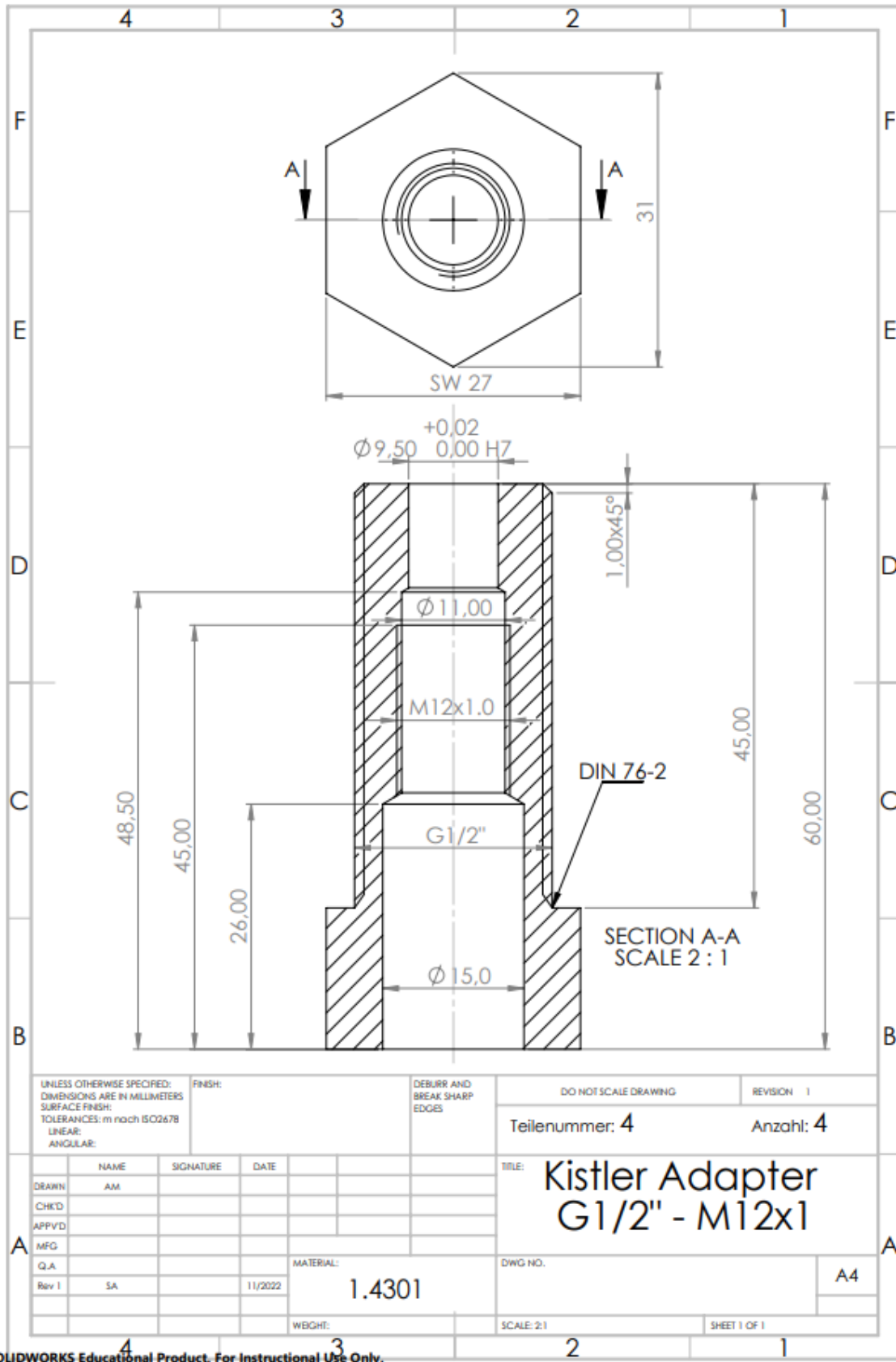


Abbildung 88: Technische Zeichnung des Kistler Adapters 1/2" - M12x1 (Teilenummer 4)

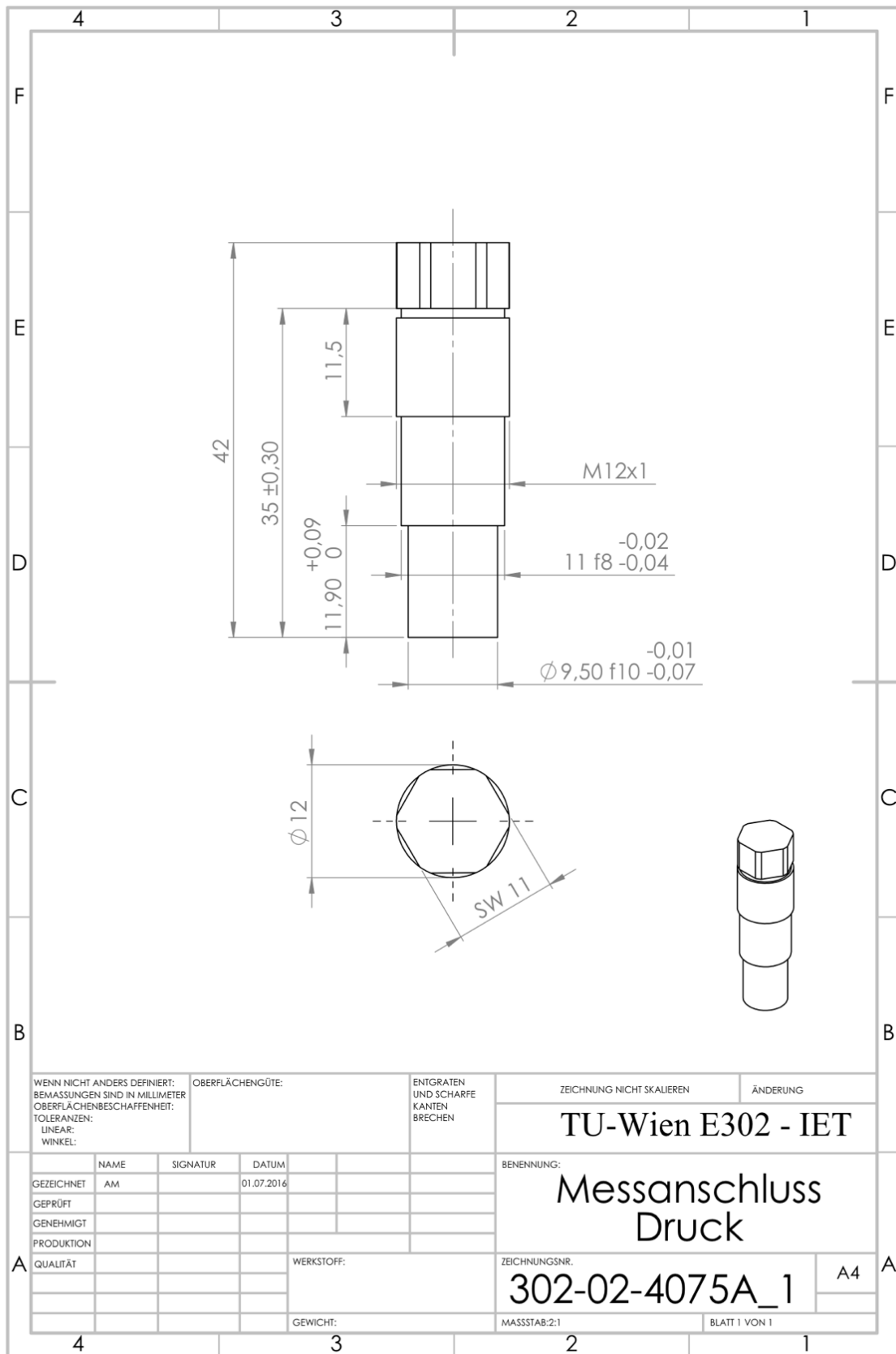


Abbildung 89: Technische Zeichnung des Kistler Dummys (Teilenummer 5)

Literaturverzeichnis

- [1] J. Gülich, Kreispumpen, Springer Vieweg, 2013.
- [2] C. Bauer, Vorlesungsskriptum Hydraulische Maschinen und Anlagen I & II, Institut für Energietechnik und Thermodynamik E302, 2022.
- [3] J. Lange and T. Lange, Fourier-Transformation zur Signal- und Systembeschreibung, Springer Vieweg, 2018.
- [4] T. Butz, Fouriertransformation für Fußgänger, Vieweg+Teubner, 2011.
- [5] "Wikipedia - Schnelle Fourier-Transformation," [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Schnelle_Fourier-Transformation. [Accessed 13 Februar 2023].
- [6] "Wikipedia, Alias-Effekt," [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Alias-Effekt>. [Accessed 7 Februar 2023].
- [7] National Instruments, "Understanding FFTs and Windowing".
- [8] Kistler, 2023. [Online]. Available: <https://www.kistler.com/DE/de/piezoresistiver-effekt/C00000142>. [Accessed 11 Februar 2023].
- [9] Endress+Hauser, "Technische Information Proline Promag W 300," 2019.
- [10] Endress+Hauser, [Online]. Available: <https://www.endress.com/de/messgeraete-fuer-die-prozesstechnik/durchflussmessung-produktuebersicht/magnetisch-induktive-durchflussmessung>. [Accessed 11 Februar 2023].
- [11] Flexim, "Technische Spezifikation FLUXUS F601," 2020.
- [12] NTi Audio, [Online]. Available: <https://www.nti-audio.com/de/service/wissen/fast-fourier-transformation-fft>. [Accessed 13 Februar 2023].
- [13] Kistler, "Datenblatt Typ 4043A..,4045A..,4073A..,4075A..," 2013.
- [14] Endress+Hauser, "Technische Information Cerabar PMP71B," 2022.
- [15] Kistler, "Datenblatt Typ 4618A0,4618A2, 4618A4," 2011.
- [16] National Instrumens, "NI 9215 Datasheet," 2016.
- [17] National Instruments, "NI 9203 Datasheet," 2015.
- [18] National Instruments, "NI-9219 Specifications," 2022.
- [19] National Instruments, "Specifications cDAQ-9185," Amplicon, 2017.

- [20] "Wikipedia, Fensterfunktion," [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Fensterfunktion#Von-Hann-Fenster>. [Accessed 09 Februar 2023].
- [21] M. Schmid, "Untersuchung der Verluste in den Rohrleitungen des hydrodynamischen Labors im Science Center," TU WIEN - Institut für Energietechnik, 2021.
- [22] R. Praetor and H. J. Kecke, "Unterschiedliche Berechnungsmöglichkeiten von radialen Kreiselpumpen," *Chemie Ingenieur Technik*, no. 73, pp. 1262-1270, 2001.
- [23] R. Spence and J. Amaral-Teixeira, "Investigation into pressure pulsations in a centrifugal pump using numerical methods supported by industrial tests," *Computers & Fluids*, no. 37, pp. 690-704, 2008.
- [24] M. Solis, F. Bakir and S. Khelladi, "PRESSURE FLUCTUATIONS REDUCTION IN CENTRIFUGAL PUMPS: INFLUENCE OF IMPELLER GEOMETRY AND RADIAL GAP," in *ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting*, Colorado, 2009.
- [25] J. F. Guelich and U. Bolleter, "Pressure Pulsations in Centrifugal Pumps," *Journal of Vibration and Acoustics*, no. 114, pp. 272-279, April 1992.
- [26] J. Parrondo-Gayo, J. González-Pérez and J. Fernández-Francos, "The Effect of the Operating Point on the Pressure Fluctuations at the Blade Passing Frequency in the Volute of a Centrifugal Pump," *Journal of Fluids Engineering*, no. 124, pp. 784-790, 2002.
- [27] C. Lehr, A. Linkamp and A. Brümmer, "Pulsationen an kavitierenden Kreiselpumpen bei Schaufelpassierfrequenz," TU Dortmund.
- [28] Endress+Hauser, "Technische Information Proline Promag 50W, 53W," 2017.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Geschwindigkeitsprofil am Laufradaustritt unter Einfluss der Nachlaufströmung [1].....	4
Abbildung 2: Zeitsignal und Frequenzspektrum nach Fouriertransformation [5]	5
Abbildung 3: Veranschaulichung des Aliasing-Effekts [6]	6
Abbildung 4: Messdauer beträgt ein ganzzahliges Vielfaches der Periodendauer des Signals – es tritt kein Leakage-Effekt auf [7]	7
Abbildung 5: Messdauer beträgt kein ganzzahliges Vielfaches der Periodendauer des Signals – es tritt ein Leakage-Effekt auf [7]	8
Abbildung 6: Messdauer beträgt kein ganzzahliges Vielfaches der Periodendauer des Signals - Leakage-Effekt, jedoch verringert durch Fensterfunktion [7]	9
Abbildung 7: Illustrierung des Prinzips der magnetinduktiven Durchflussmessung [13]	10
Abbildung 8: Sensoranbringung und Signalübertragung bei der Ultraschall Durchflussmessung [11]	11
Abbildung 9: Laufzeitdifferenz der Schallsignale für Ausbreitung in- und gegen Strömungsrichtung [11]	11
Abbildung 10: Übersichtsschema des hydraulischen Versuchstands am Science Center	13
Abbildung 11: Herstellerangaben zur QH- und Leistungskennlinie der Kreiselpumpe 200LCV500ENL15	
Abbildung 12: Technische Zeichnung der Kreiselpumpe “Vogel 200LCV500 ENL”	16
Abbildung 13: Schema des Pelton-Turbinenversuchsstands mit den geplanten Messstellen	18
Abbildung 14: Schema des Universalversuchsstands mit den geplanten Messstellen	20
Abbildung 15: Druckmessstellen 1 und 2 an der Saug- und Druckseite der Versorgungspumpe, sowie Druckmessstelle 3 in der Pumpengrube im Rohrleitungssystem des Pelton-Turbinenversuchsstands	22
Abbildung 16: Druckmessstelle 5 in der Pumpengrube im Rohrleitungssystem des Universalversuchsstands.....	23
Abbildung 17: Druckmessstelle 4 am Oberwasser des Pelton-Turbinenversuchsstands	24
Abbildung 18: Druckmessstelle 6 am Oberwasser des Universalversuchsstands	24
Abbildung 19: Elektrisches Schaltschema der Messtechnik	33
Abbildung 20: Spektrum des hochfrequenten Drucksensors an der Druckseite der Versorgungspumpe bei [n = 1200 1/min und Q = 15 l/s] vor (links) und nach (rechts) Aufbringen von Netzfrequenzfilter und Fensterfunktion	38
Abbildung 21: Darstellung des Netzfrequenzfilters, dieser setzt sich über die Frequenz periodisch fort	39
Abbildung 22: Verlauf des Hann-Fensters [20]	40
Abbildung 23: Aufgenommene QH-Kennlinien anhand unterschiedlicher Drehzahlen	43
Abbildung 24: Vergleich der QH-Kennlinien bei n = 1500 Umdrehungen pro Minute	44
Abbildung 25: Druckverlust von der Druckseite der Versorgungspumpe (Druckmessstelle 2) zum Oberwasser des Universalversuchsstands (Druckmessstelle 6) bei unterschiedlichen Drehzahlen ..	46
Abbildung 26: Druckverluste von der Druckseite der Pumpe bis zum Oberwasserkessel [21, p. 75] ..	48
Abbildung 27: Anlagenkennlinie des Universalversuchsstands (alle Absperrorgane voll geöffnet)	49
Abbildung 28: Frequenzspektra bei Nulldurchfluss anhand unterschiedlicher Drehzahlen	53
Abbildung 29: Frequenzspektra bei mittlerem Durchfluss (80 Liter pro Sekunde) anhand unterschiedlicher Drehzahlen	53
Abbildung 30: Frequenzspektra bei maximalem Durchfluss anhand unterschiedlicher Drehzahlen...	54
Abbildung 31: Amplituden der Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz über dem Durchfluss55	
Abbildung 32: Amplituden der Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz über den dimensionslosen Durchfluss	56

Abbildung 33: Amplituden der Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz über das Druckniveau	57
Abbildung 34: Amplituden der Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz über das dimensionslose Druckniveau	58
Abbildung 35: Amplituden der Druckpulsationen bei Schaufelpassierfrequenz über den angepassten dimensionslosen Durchfluss	59
Abbildung 36: Frequenzspektra der Pulsationsausbreitung in der Pumpengrube (Druckmessstelle 2 – Druckmessstelle 5) bei Drehzahl 1500 Umdrehungen pro Minute und 240 Liter pro Sekunde Durchfluss	61
Abbildung 37: Frequenzspektra der Pulsationsausbreitung in der Pumpengrube (Druckmessstelle 2 – Druckmessstelle 5) bei Drehzahl 1000 Umdrehungen pro Minute und 200 Liter pro Sekunde Durchfluss	61
Abbildung 38: Pulsationen bei Schaufelpassierfrequenz an der Druckseite der Versorgungspumpe .	68
Abbildung 39: Gegenüberstellung der Pulsationen an der Druckseite der Versorgungspumpe bei Schaufelpassierfrequenz.....	70
Abbildung 40: TDMS File in MATLAB einlesen	77
Abbildung 41: Extrahieren der Daten und abspeichern in einer Zeittabelle	78
Abbildung 42: Umformatieren der Zeitwerte	78
Abbildung 43: Mittelwert der jeweiligen Messdaten berechnen und von diesen subtrahieren	78
Abbildung 44: Erstellen der Messdatenmatrix	79
Abbildung 45: 1. Zeisignal unbehandelt plotten.....	79
Abbildung 46: 2. Netzfrequenzfilter aufbringen.....	80
Abbildung 47: 3. Fensterfunktion aufbringen.....	80
Abbildung 48: 3. Fensterfunktion auf gefiltertes Signal aufbringen.....	81
Abbildung 49: 4. Amplitudenrichtige FFT in % Förderhöhe (ohne Fensterfunktion, ohne Netzfrequenzfilter).....	81
Abbildung 50: 5. Amplitudenrichtige FFT in bar (ohne Fensterfunktion, mit Netzfrequenzfilter)	82
Abbildung 51: 6. Amplitudenrichtige FFT in % Förderhöhe (mit Fensterfunktion, mit Netzfrequenzfilter).....	82
Abbildung 52: 7. Amplitudenrichtige FFT in % Förderhöhe (mit Fensterfunktion, ohne Netzfrequenzfilter).....	83
Abbildung 53: 8. FFT normiert auf maximale Amplitude.....	83
Abbildung 54: 9. Power specrum density mit linearer Frequenzachse	84
Abbildung 55: 10. Power specrum density mit logarithmischer Frequenzachse	84
Abbildung 56: 11. Wasserfallplot eines Messsignals über der Zeit.....	84
Abbildung 57: 12. Wasserfallplots beliebiger Messsignale über eine beliebig definierte Y-Achse	85
Abbildung 58: Funktionsdefinitionen für die Wasserfallplots	85
Abbildung 59: QH-Kennlinie bei n = 600 Umdrehungen pro Minute	89
Abbildung 60: QH-Kennlinie bei n = 800 Umdrehungen pro Minute	89
Abbildung 61: QH-Kennlinie bei n = 1000 Umdrehungen pro Minute	90
Abbildung 62: QH-Kennlinie bei n = 1200 Umdrehungen pro Minute	90
Abbildung 63: Höhenverlust von der Druckseite der Versorgungspumpe bis zum Oberwasser bei n = 600 Umdrehungen pro Minute.....	91
Abbildung 64: Höhenverlust von der Druckseite der Versorgungspumpe bis zum Oberwasser bei n = 800 Umdrehungen pro Minute.....	91
Abbildung 65: Höhenverlust von der Druckseite der Versorgungspumpe bis zum Oberwasser bei n = 1000 Umdrehungen pro Minute.....	92

Abbildung 66: Höhenverlust von der Druckseite der Versorgungspumpe bis zum Oberwasser bei n = 1200 Umdrehungen pro Minute.....	92
Abbildung 67: Höhenverlust von der Druckseite der Versorgungspumpe bis zum Oberwasser bei n = 1500 Umdrehungen pro Minute.....	93
Abbildung 68: Frequenzspektra an der Druckseite der Versorgungspumpe bei Drehzahl 600 Umdrehungen pro Minute.....	95
Abbildung 69: Frequenzspektra an der Druckseite der Versorgungspumpe bei Drehzahl 800 Umdrehungen pro Minute.....	96
Abbildung 70: Frequenzspektra an der Druckseite der Versorgungspumpe bei Drehzahl 1000 Umdrehungen pro Minute.....	97
Abbildung 71: Frequenzspektra an der Druckseite der Versorgungspumpe bei Drehzahl 1200 Umdrehungen pro Minute.....	98
Abbildung 72: Frequenzspektra an der Druckseite der Versorgungspumpe bei Drehzahl 1500 Umdrehungen pro Minute.....	99
Abbildung 73: Frequenzspektra an der Druckseite der Versorgungspumpe (Pelton-Turbinenversuchsstand) bei n = 600 Umdrehungen pro Minute und variablem Durchfluss	100
Abbildung 74: Frequenzspektra an der Druckseite der Versorgungspumpe (Pelton-Turbinenversuchsstand) bei Q = 15 Liter pro Sekunde und variabler Drehzahl	101
Abbildung 75: Spektrum an der Druckseite der Versorgungspumpe (Pelton-Turbinenversuchsstand) bei Q = 15 Liter pro Sekunde und n = 800 Umdrehungen pro Minute	102
Abbildung 76: Ausbreitung der Druckpulsationen bei Maximaldurchfluss anhand der Drehzahlen 600, 1000 und 1200 Umdrehungen pro Minute am Universalversuchsstand	104
Abbildung 77: Ausbreitung der Druckpulsationen bei Maximaldurchfluss anhand der Drehzahlen 1300, 1400 und 1500 Umdrehungen pro Minute am Universalversuchsstand	105
Abbildung 78: Ausbreitung der Pulsationen beim Druckniveau von 60 Metern Förderhöhe am Universalversuchsstand	106
Abbildung 79: Ausbreitung der Pulsationen beim Druckniveau von 40 Metern Förderhöhe am Universalversuchsstand	107
Abbildung 80: Ausbreitung der Pulsationen beim Druckniveau von 20 Metern Förderhöhe am Universalversuchsstand	108
Abbildung 81: Ausbreitung der Pulsationen beim Durchfluss 40 Liter pro Sekunde am Universalversuchsstand	109
Abbildung 82: Ausbreitung der Pulsationen beim Durchfluss 80 Liter pro Sekunde am Universalversuchsstand	110
Abbildung 83: Ausbreitung der Pulsationen beim Durchfluss 120 Liter pro Sekunde am Universalversuchsstand	111
Abbildung 84: Ausbreitung der Druckpulsationen bei Durchfluss 15 Liter pro Sekunde am Pelton-Turbinenversuchsstand bei Drehzahlen 500, 900 und 1200 Umdrehungen pro Minute.....	112
Abbildung 85: Ausbreitung der Druckpulsationen bei Durchfluss 15 Liter pro Sekunde am Pelton-Turbinenversuchsstand bei Drehzahlen 600, 700 und 1100 Umdrehungen pro Minute.....	113
Abbildung 86: Technische Zeichnung der Gewindemuffe (Teilenummer 1)	114
Abbildung 87: Technische Zeichnung der Verschlusschraube (Teilenummer 3)	115
Abbildung 88: Technische Zeichnung des Kistler Adapters 1/2" - M12x1 (Teilenummer 4)	116
Abbildung 89: Technische Zeichnung des Kistler Dummies (Teilenummer 5).....	117

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zustand der Absperrorgane für die Messreihen am Pelton-Turbinenversuchsstand.....	19
Tabelle 2: Notwendige Sensoren am Pelton-Turbinenversuchsstand.....	19
Tabelle 3: Zustand der Absperrorgane für die Messreihe am Universalversuchsstand	21
Tabelle 4: Notwendige Sensoren am Universalversuchsstand	21
Tabelle 5: Herstellerangaben zur Genauigkeit der Kistler 4075A10 Sensoren	28
Tabelle 6: Herstellerangaben zur Genauigkeit des Endress Hauser CERABAR PMP71B Drucksensors	28
Tabelle 7: Herstellerangaben zur Genauigkeit des Endress Hauser Promag 300 Durchflusssensors...	29
Tabelle 8: Herstellerangaben zur Genauigkeit des Flexim FLUXUS F601 Durchflussmessgerätes	29
Tabelle 9: Sensoren anhand der Messstellen am Pelton-Turbinenversuchsstand	30
Tabelle 10: Sensoren anhand der Messstellen am Universalversuchsstand	30
Tabelle 11: Herstellerangaben zur Genauigkeit des Kistler 4618A Messverstärkers	31
Tabelle 12: Herstellerangaben zur Genauigkeit der NI9215 Differenzspannungsmesskarte	31
Tabelle 13: Herstellerangaben zur Genauigkeit der NI9203 Strommesskarte	31
Tabelle 14: Herstellerangaben zur Genauigkeit der NI9219 Universalmesskarte	32
Tabelle 15: Auflistung aller verbauten Adapterstücke	35
Tabelle 16: Untersuchte Drehzahlen (links) und Messpunktastufung (rechts) bei der Kennlinienaufzeichnung.....	41
Tabelle 17: Abweichungen der Messsignale der Kistler und Endress Hauser Drucksensoren.....	50
Tabelle 18: Durchschnittliche Abweichungen des Kistler Drucksensors vom Messwert des Endress Hauser Drucksensors an der Saugseite in Abhängigkeit des Druckniveaus am Sensor.....	51
Tabelle 19: Amplituden der charakteristischen Frequenzen an der Druckseite der Versorgungspumpe	62
Tabelle 20: Dämpfung der Amplituden charakteristischer Frequenzen innerhalb der Pumpengrube	62
Tabelle 21: Maximale Amplituden der doppelten Schaufelpassierfrequenz in % Förderhöhe	63
Tabelle 22: Maximal zu erwartende Amplituden an der Druckseite der Pumpe bei charakteristischen Frequenzen und deren vermuteter Entstehungsmechanismus	63
Tabelle 23: Betriebspunkte zur Untersuchung der Ausbreitung der Druckpulsationen anhand des Druckniveaus von 60 m Förderhöhe.....	64
Tabelle 24: Betriebspunkte zur Untersuchung der Ausbreitung der Druckpulsationen anhand des Druckniveaus von 40 m Förderhöhe.....	65
Tabelle 25: Betriebspunkte zur Untersuchung der Ausbreitung der Druckpulsationen anhand des Druckniveaus von 20 m Förderhöhe	65
Tabelle 26: Betriebspunkte mit nachweisbarer Schaufelpassierfrequenz an der Messstelle in der Pumpengrube	65
Tabelle 27: Betriebspunkte zur Untersuchung der Ausbreitung der Druckpulsationen anhand des Durchflusses von 40 Liter pro Sekunde	66
Tabelle 28: Betriebspunkte zur Untersuchung der Ausbreitung der Druckpulsationen anhand des Durchflusses von 80 Liter pro Sekunde	66
Tabelle 29: Betriebspunkte zur Untersuchung der Ausbreitung der Druckpulsationen anhand des Durchflusses von 120 Liter pro Sekunde	66
Tabelle 30: Dämpfungsfaktoren aller auswertbaren Betriebspunkte bei SPF an der Messstelle in der Pumpengrube	67
Tabelle 31: Betriebspunkte und deren Dämpfungsfaktoren in der Pumpengrube	69

Tabelle 32: Größenordnungen hochfrequenter Druckpulsationen an Kreiselpumpen aus der Literatur	72
Tabelle 33: Messtechnisches Equipment.....	76
Tabelle 34: Betriebspunktmessungen bei 600 Umdrehungen pro Minute	86
Tabelle 35: Betriebspunktmessungen bei 800 Umdrehungen pro Minute	87
Tabelle 36: Betriebspunktmessungen bei 1000 Umdrehungen pro Minute	87
Tabelle 37: Betriebspunktmessungen bei 1200 Umdrehungen pro Minute	88
Tabelle 38: Betriebspunktmessungen bei 1300 Umdrehungen pro Minute	88
Tabelle 39: Betriebspunktmessungen bei 1400 Umdrehungen pro Minute	88
Tabelle 40: Betriebspunktmessungen bei 1500 Umdrehungen pro Minute	88