

Johannes Klausner, BSc

Druck/Zeit-Methode (Gibson-Methode)

**Konzeption, Konstruktion und Aufbau eines Prüfstandes mit
Prüfstandsmessung und anschließender Erprobung im Feld**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Dipl.-Ing. Mark Guggenberger

Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen

Vorstand: O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Jaberg

Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften

Graz, Dezember 2017

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

Datum

Unterschrift

Vorwort

Diese Masterarbeit stellt den Abschluss meines im Oktober 2012 begonnenen Maschinenbau-Studiums an der TU Graz dar. Daher möchte ich an dieser Stelle die Möglichkeit nutzen, um all jenen Mitarbeitern des Instituts für Hydraulische Strömungsmaschinen, die mich während meiner Masterarbeit tatkräftig unterstützt haben, meinen Dank auszusprechen.

Großer Dank gebührt Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn Helmut Jaberg, der mir die Durchführung meiner Masterarbeit, trotz des nicht unerheblichen Personal- und Sachaufwandes, an seinem Institut ermöglicht hat, sowie für das mir entgegen gebrachte Vertrauen, die Druck/Zeit-Methode für sein Institut erarbeiten zu dürfen.

Ich bedanke mich bei den Herren Erwin Pischler und Josef Papst für ihren Einsatz beim Aufbau des Prüfstandes sowie für ihre Bereitschaft, mich an ihrem Erfahrungsschatz teilhaben zu lassen.

Mein Dank gilt Herrn Ing. Kurt Maass und Herrn Dipl.-Ing. (FH) Florian Senn, die mir bei Fragen zur Verkabelung der Sensoren und bei der Problemlösung beim Messprogramm stets wohlwollend zur Seite gestanden sind.

Den Herren Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn Helmut Benigni und Dipl.-Ing. Stefan Leithner, BSc danke ich für ihre fortwährende Unterstützung und ihre konstruktiven Hilfestellungen.

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Mark Guggenberger, der mich während meiner gesamten Masterarbeit tatkräftig unterstützt hat und stets ein offenes Ohr für meine Anliegen und eine helfende Hand bereit hatte. Das von ihm an den Tag gelegte Engagement und seine außergewöhnlich hohe Sachkenntnis hat mir stets imponiert und mich fortwährend motiviert vorangetrieben.

Mein Dank gilt dem Bereichsleiter der Erzeugung, Herrn Prok. Mag. Dipl.-Ing. Christian Rupp, sowie den Herren Dipl.-Ing. Stefan Leitner und Ing. Thomas Kelich von der Kärntner Elektrizitäts-Aktiengesellschaft für die Ermöglichung einer Feldmessung in einem ihrer Kraftwerke.

Johannes Klausner
Graz, im Dezember 2017

Zusammenfassung

Die Druck/Zeit-Methode zur Messung des Durchflusses in Rohrleitungen beruht auf dem zweiten Newtonschen Gesetz und den abgeleiteten Gesetzen der Fluidmechanik. Die Gesetze beschreiben die Beziehungen zwischen dem Kraftverlauf und der Impulsänderung der Wassermasse, gemessen aus der Änderung des Differenzdruckes innerhalb einer Messstrecke.

Der Druckverlauf wird in Form einer Differenzmessung in zwei Messquerschnitten erfasst, über die Zeitdauer der Impulsänderungsperiode aufintegriert und daraus der der Impulsänderung zugrundeliegende Volumenstrom berechnet. Die Impulsänderung wird vornehmlich durch kontinuierliches Schließen des Regulier- oder Absperrorgans der hydraulischen Maschine erzeugt.

Inhalt der Arbeit ist die Konzeption, Konstruktion und der Aufbau eines Prüfstandes inklusive der Durchführung von Prüfstandsmessungen. Anhand der aus den Messungen erhaltenen Daten wurde das in der Norm für die Abnahmemessungen von hydraulischen Turbinen, Speicherpumpen und Pumpturbinen (IEC 60041) dargestellte Auswerteprogramm entwickelt, erprobt und optimiert. Die Konzeption des Prüfstandes erfolgte weitestgehend nach den in der Norm IEC 60041 für die Druck/Zeit-Methode geltenden Vorschriften.

Als Referenz für die berechneten Volumenströme wurden die Messwerte einer magnetisch-induktiven Durchflussmessung herangezogen. Die Ergebnisse der Prüfstandsmessung zeigten, dass die Volumenstromrechnung auch für Betriebszustände, die außerhalb des Gültigkeitsbereiches der Norm liegen, valide Ergebnisse liefert. Die noch ergänzende Feldmessung ist im Frühjahr 2018, in einem Kraftwerk der KELAG, vorgesehen.

Diese Arbeit umfasst den theoretischen Hintergrund der Druck/Zeit-Methode sowie die zu berücksichtigenden Einflussgrößen und Alternativen. Ebenso erfolgt eine detaillierte Beschreibung des Prüfstandsaufbaus, der verwendeten Messsysteme und des Auswerteprogrammes. Schlussendlich werden sämtliche Messergebnisse dargelegt und erläutert.

Abstract

The pressure/time-method for measuring the discharge in penstocks is based on Newton's second law and the derived laws of fluid mechanics. The laws describe the relationship between the change in force and the change in momentum of the water of mass, measured from the variation in the differential pressure within a measuring section.

The pressure profile is recorded in the form of a differential measurement in two measuring cross sections, integrated over the duration of the momentum change period. With this results the discharge underlying the change of momentum is calculated. The change in momentum is primarily generated by a continuous closing of a shut-off device of a hydraulic machine.

Content of this thesis is the conception, construction and the build-up of a test rig including the execution of test rig measurements. Based on the data obtained from the measurements, the evaluation program described in the standard for field acceptance testes to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines (IEC 60041) was developed, tested and optimized. The conception of the test rig was largely based on the regulations in the standard IEC 60041 for the pressure/time-method.

The measurement values of a magnetic-inductive discharge measurement were used as a reference for the calculated discharges. The results of the test rig measurement showed that the discharge calculation provides valid results for operating states that are outside the validity range of the standard. The supplementary field measurement is planned for spring 2018, in a KELAG power plant.

This thesis includes the theoretical background of the pressure/time-method as well as the factors and alternatives to be considered. Additionally, a detailed description of the test rig, the used measuring systems and the evaluation program will also be provided. Finally, all measurement results are presented and explained.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Volumenstrommessverfahren	1
1.1.1	Akustische Durchflussmessung	3
1.1.2	Magnetisch-induktive Durchflussmessung	4
1.1.3	Messflügelmethode	5
1.1.4	Winter-Kennedy-Methode	7
1.1.5	Druck/Zeit-Methode	7
1.2	Physikalische Grundlagen.....	9
1.2.1	Herleitung des Beschleunigungszusammenhanges	9
1.2.2	Herleitung der Volumenstromgleichung.....	10
1.3	Physikalische Daten	12
1.3.1	Erdbeschleunigung	12
1.3.2	Dichte des Wassers nach Herbst und Rögener (IEC 60041).....	13
1.3.3	Dichte des Wassers nach IAPWS-IF97	14
2	Druck/Zeit-Methode nach IEC 60041	16
2.1	Prinzip der Methode	16
2.1.1	Differentielle Druck/Zeit-Methode	18
2.1.2	Methode der separaten Diagramme	22
2.2	Allgemeine Anforderungen	24
2.2.1	Gültigkeitsbedingungen	24
2.2.2	Anforderungen an die Druckmessstellen.....	25
2.2.3	Anforderungen an die Messleitungen	26
2.2.4	Überprüfung der Druckmessung.....	27
2.3	Messunsicherheit	27
2.4	Anforderungen an die Druckmessinstrumente nach IEC 62006.....	27
2.4.1	Druckaufnehmer	28
2.4.2	Federmanometer	28
2.4.3	Pegelmessgeräte	28
3	Einflussgrößen bei der Druck/Zeit-Methode	30
3.1	Penstockfaktor	30
3.2	Leckagevolumenstrom	33
3.3	Reibungseinfluss.....	34
3.4	Messunsicherheit	35
3.4.1	Systematische Messunsicherheit.....	35
3.4.2	Zufällige Messunsicherheit	38
3.4.3	Totale Messunsicherheit	39

4	Prüfstand	40
4.1	Aufbau	41
4.2	Druckmessstellen	44
5	Mess- und Auswertesystem.....	45
5.1	Hardware	45
5.1.1	Messwertaufnehmer.....	45
5.1.2	Datenerfassungsgerät	50
5.2	Software	56
5.2.1	Messprogramm	56
5.2.2	Auswerteprogramm	61
6	Prüfstandsmessung	75
6.1	Verschiedene Messanschlüsse und Messstrecken	76
6.1.1	Messanschluss nach Norm.....	78
6.1.2	Individueller Messanschluss.....	81
6.1.3	Messanschluss mittels Ringleitung	85
6.1.4	Einfluss der Messanschlüsse	89
6.1.5	Einfluss der Messstrecken.....	91
6.1.6	Einfluss der Druckaufnehmer.....	91
6.1.7	Einfluss unterschiedlicher Abtastfrequenzen	93
6.1.8	Einfluss unterschiedlicher Schließzeiten.....	94
6.2	Messung mit Leckagevolumenstrom	95
6.2.1	Leckagevolumenstrom mittels Bypassleitung.....	95
6.2.2	Leckagevolumenstrom durch abgesetztes Schließen	97
6.2.3	Vergleich der Messergebnisse	98
7	Feldmessung	100
8	Ausblick	101
9	Abbildungsverzeichnis.....	102
10	Tabellenverzeichnis.....	105
11	Literaturverzeichnis.....	107
12	Anhang	111
12.1	Betriebsanleitung des Auswerteprogrammes	111
12.2	Tabellen, Abbildungen und Zeichnungen.....	115

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Einheit	Erklärung	Anmerkung
Lateinische Formelzeichen			
A	[m ²]	Messquerschnitt	
A _i	[m ²]	Einzelnettofläche	
A _T	[m ²]	Gesamtnettofläche	
B	[m]	halbe Wellenlänge	
B	[m]	Breite	
C	[Pa]	Druckverlust vor Beginn des Schließvorganges	
\vec{c}	[m/s]	Geschwindigkeitsvektor	
c	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit	
D	[m]	Abstand	
D	[m]	Rohrinnendurchmesser	
E	[-]	Amplitudenverhältnis	
è	[kg·m ⁸]	kinetische Energie	
e _r	[m ³ /s]	absolute Streuung	
F	[m ⁻¹]	Penstockfaktor	
F	[N]	Kraft	1 N = 1 kg·m/s ²
\vec{F}	[N]	Kraftvektor	
f	[m]	Korrekturwert	
f	[%]	Messunsicherheit	
f _s	[S/s]	Datenerfassungsrate	
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung	
g	[J/kg]	spezifische Freie Enthalpie	
h	[m]	Höhe	
H _j , H _{j+1}	[m]	Amplitude	
I _i	[-]	Exponent nach IAPWS	
J _i	[-]	Exponent nach IAPWS	
k	[kg/m ⁵]	Proportionalitätsfaktor	
k	[-]	Rohrreibungsbeiwert	
L	[m]	Messlänge	
m	[kg]	Masse	
n _i	[-]	Koeffizient nach IAPWS	
n	[-]	Anzahl der Messpunkte einer Messreihe	
p	[Pa]	Druck	1 bar = 10 ⁵ Pa
\vec{p}	[kg·m/s]	Impulsvektor	

Q	$[m^3/s]$	Volumenstrom	
Q_k, q_k	$[m^3/s]$	Leckagevolumenstrom	
R	$[J/kgK]$	spezifische Gaskonstante	$R = 461,526 J/kgK$
Re	$[-]$	Reynolds-Zahl	
R_{ij}	$[-]$	Koeffizient nach Herbst und Rögner	
s	$[s]$	Kalibrationskonstante	
s_Y	$[-]$	geschätzte Standardverteilung	
$s_{\bar{Y}}$	$[-]$	Standardverteilung des Mittelwertes	
T	$[K]$	Temperatur	$0\text{ °C} = 273,15\text{ K}$
t	$[s]$	Zeit	
t	$[-]$	Studenten-t-Verteilung	
V	$[m^3]$	Volumen, Kontrollvolumen	
v	$[m/s]$	Strömungsgeschwindigkeit	
V_{ai}	$[m/s]$	Strömungs-Normalgeschwindigkeit	
v	$[m^3/kg]$	spezifisches Volumen	
x	$[-]$	Exponentialfaktor	
\ddot{x}	$[m/s^2]$	Beschleunigung	
Y	$[m^3/s]$	Messwert des Volumenstromes	
\bar{Y}	$[m^3/s]$	Mittelwert des Volumenstromes	
y	$[mH_2O]$	Kalibrationskonstante	
z	$[m]$	Seehöhe, geodätische Höhe	

Griechische Formelzeichen

α	$[-]$	Druckverhältnis
α	$[^\circ]$	Krümmwinkel
β	$[-]$	Temperaturverhältnis
γ	$[-]$	dimensionslose spezifische Freie Enthalpie
Δ	$[-]$	Differenz
ζ	$[Pa]$	Druckverlust
ζ_v	$[-]$	Verlustbeiwert
ϑ	$[K]$	thermodynamische Temperatur
ν	$[-]$	Freiheitsgrad
π	$[-]$	Druckverhältnis
ϱ	$[kg/m^3]$	Dichte
τ	$[-]$	Temperaturverhältnis
φ	$[^\circ]$	Breitengrad

Indizes

0	Wert am Integrationsbeginn
1, 2	Größen im entsprechenden Messquerschnitt
a, abs	absolut
amb	Umgebung
d	downstream (nachgelagerter Messpunkt)
d, dyn	dynamisch
fr	Reibung
geo	geodätisch
i	laufende Variable
inst	instationäres Verhalten der Datenerfassung
j	laufende Variable
k	Wert am Integrationsende
leak	Leckage
M	Messung
mittel	Mittelwert
max	Maximum
offset	Offset, Versatz
penst	Geometrie
PT	instationär
p/t	Druck/Zeit-Messung
r	relativ
ref	Referenzmessung
s	statisch
s	Sättigungszustand
sta	stationär
sys	systematisch
tot	total
u	upstream (vorgelagerter Messpunkt)
v	Verlust
zuf	zufällig
π	Ableitung der dimensionslosen Freien Enthalpie

Abkürzungen

ADM	akustische Durchflussmessung
DME	Druckmessebene
DN	Nenndurchmesser
EN	Europäische Norm
FS	gesamter Messbereich (Full Scale)
IAPWS	International Association for the Properties of Water and Steam
IEC	International Electrotechnical Commission
I/O	Eingabe/Ausgabe
ISO	International Organization for Standardization
kHz	Kilohertz
mA	Milliampere
mH ₂ O	Meter Wassersäule
MHz	Megahertz
MID	magnetisch-induktive Durchflussmessung
OW	Oberwasser
PN	Nenndruck
ppm	parts per million
PVC-U	Hart-PVC (Polyvinylchlorid)
RDME	Referenzebene Druckmessebene
SI	Internationales Einheitensystem
TDMS	Technical Data Management Streaming
UW	Unterwasser
V	Volt
VAC	Volt Wechselspannung
VDC	Volt Gleichspannung
VI	Virtuell Instrument

1 Einleitung

Die Messung des Volumenstroms in Wasserkraftwerken ist von großem Interesse, besonders in Hinblick auf die Wirkungsgradermittlung der hydraulischen Maschinen.

Werden Wirkungsgradmessungen bei Fallhöhen über ca. 100 m physikalisch vornehmlich durch die thermodynamische Methode vorgenommen, so erfolgen sie bei Fallhöhen unter 100 m mittels Volumenstrommessverfahren.

Je nach geforderter Genauigkeit, Zweck und Anwendbarkeit kommen verschiedene Messverfahren zum Einsatz. Eine permanente Volumenstrommessung erfolgt häufig unter Anwendung einer stationären Ultraschall-Durchflussmeseinrichtung oder mittels der kalibrierten Winter-Kennedy-Methode. Neuere rohrgebundene Kraftwerksanlagen verfügen durchwegs über stationäre Volumenstrommesssysteme; die Mehrzahl der älteren Anlagen weisen aber solche Systeme nicht auf. Dadurch und um von stationären Volumenstrommesssystemen unabhängige Messungen durchzuführen, wird der Einsatz von mobilen Messsystemen (siehe Abschnitt 1.1) notwendig, wie beispielsweise der Druck/Zeit-Methode. Diese wird vielfach auch nach ihrem Begründer Norman Rothwell Gibson als Gibson-Methode bezeichnet.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Druck/Zeit-Methode als Methode zur Volumenstrommessung am Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen einzuführen, um Wirkungsgradmessungen in rohrgebunden Kraftwerken mit hoher Genauigkeit und kostengünstigen Konditionen bei geringen Stillstandzeiten des Kraftwerkes vornehmen zu können.

1.1 Volumenstrommessverfahren

Für diverse Anwendungsfälle stehen eine Reihe von Volumenstrommessverfahren zur Auswahl und beschränken sich in der Folge auf jene Verfahren, die für den Einsatz in Druckrohrlösungen von Kraftwerken eine Rolle spielen. Die Methoden werden grundsätzlich in relative und in absolute Messverfahren unterschieden. Ein relatives Verfahren ist zum Beispiel die Winter-Kennedy-Methode. Absolute Volumenstrommessverfahren sind die akustische Durchflussmessung, die magnetisch-induktive Durchflussmessung, die Messflügelmethode oder die Druck/Zeit-Methode. Tabelle 1-1 zeigt die auf den Messwert bezogene Genauigkeit der Messverfahren.

Tabelle 1-1: Messgenauigkeit unterschiedlicher Volumenstrommessverfahren

Volumenstrommessverfahren	Messgenauigkeit
Winter-Kennedy-Methode	$> \pm 1 \%$ * [1]
Akustische Durchflussmessung	$\pm 1 \%$ [2]
Magnetisch-induktive Durchflussmessung	$< \pm 0,5 \%$ [2]
Messflügelmethode	$< \pm 1 \%$ [3]
Druck/Zeit-Methode	$> \pm 1,5 \%$ [4]

*) gilt für relative Volumenstrommessung; ohne Messfehler der Absolutmessung

Abbildung 1.1 zeigt verschiedene in der Praxis, zum Zwecke der Wirkungsgradermittlung, durchgeführte Messverfahren. Die der Graphik zu Grunde liegenden Maschinendaten entstammen den im Zeitraum von 1996 bis 2016 in der IGHEM veröffentlichten Berichten über Kraftwerksmessungen sowie aus Anlagenmessungen, die vom Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen durchgeführt wurden.

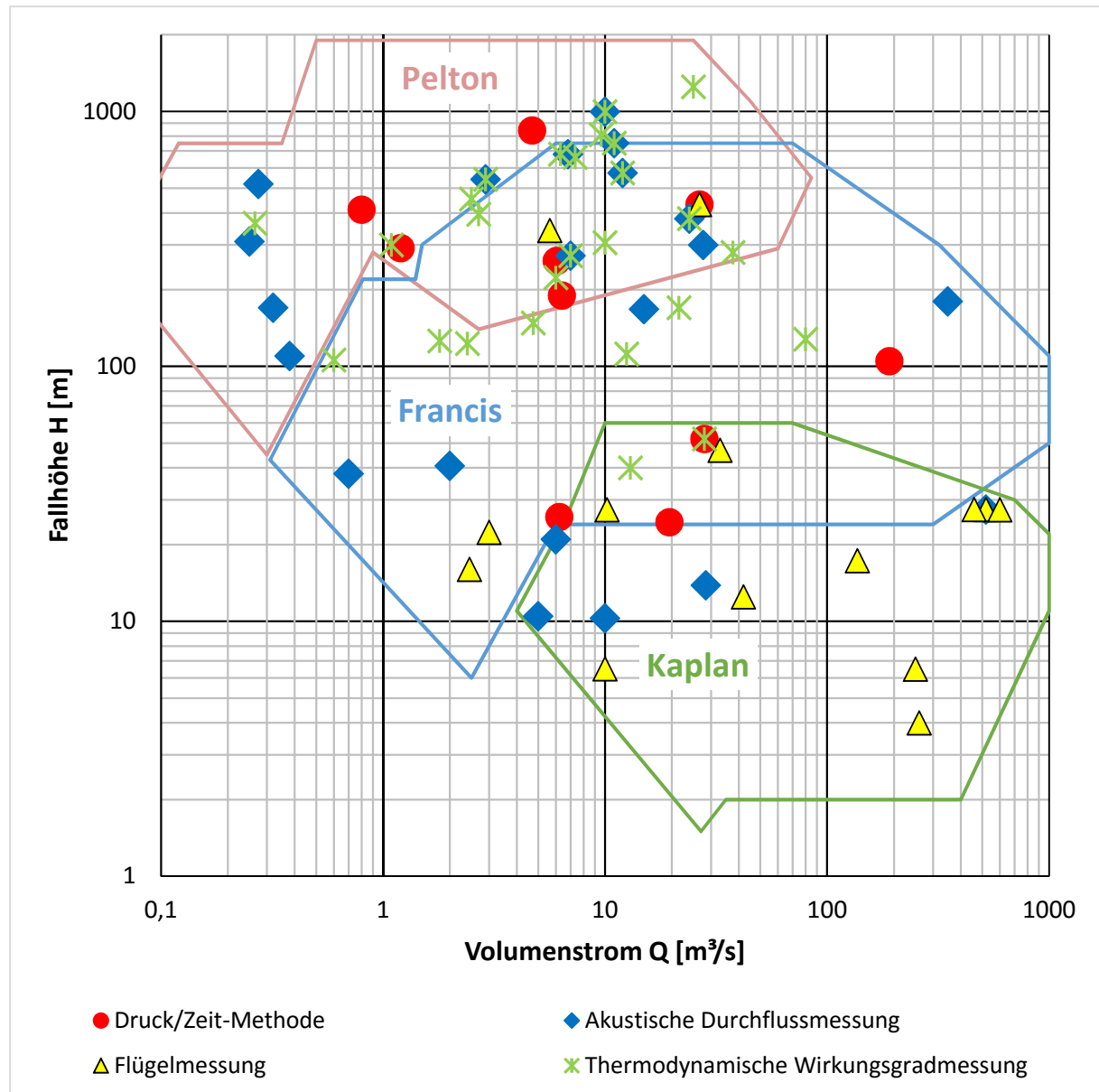


Abbildung 1.1: Messverfahren zur Wirkungsgradermittlung

Aus Abbildung 1.1 ist ersichtlich, dass die akustische Durchflussmessung bei Fallhöhen über 10 m und die thermodynamische Wirkungsgradmessung vornehmlich bei Fallhöhen über 100 m eingesetzt wird. Für die rohrleitungsgebundene Druck/Zeit-Methode sind Anwendungsfälle für Fallhöhen über 25 m dokumentiert. Bei Kaplanmaschinen unter 10 m Fallhöhe wird ausschließlich die Messflügelmethode angewandt. Einschränkungen der Messverfahren hinsichtlich der Größe des Volumenstromes gibt es keine.

In der Folge sind die angeführten Verfahren kurz beschrieben.

1.1.1 Akustische Durchflussmessung

Bei der akustischen Durchflussmessung (ADM) handelt es sich um ein absolutes Messverfahren, dessen Messprinzip auf der Ausbreitung von Schallwellen, deren Frequenzbereich sich oberhalb des für den Menschen wahrnehmbaren Bereichs – dem Ultraschall ($> 18 \text{ kHz}$) – befindet, beruht. Dabei wird zwischen dem Dopplerverfahren und dem Laufzeitdifferenzverfahren unterschieden.

Das Dopplerverfahren verwendet sowohl zum Senden als auch zum Empfangen der Schallwellen denselben Schallmesskopf. Um das Verfahren anwenden zu können, ist ein Fluid erforderlich, das mit entsprechenden Partikeln beladen ist, die eine Reflexion der Schallwellen ermöglichen. Da es bei Messungen in den 1970er Jahren zu Fehlfunktionen kam, litt der Ruf dieses Verfahrens und es wird in Wasserkraftwerken kaum noch angewandt. Um das Ultraschall-Dopplerverfahren zielführend einsetzen zu können, müssen die vorhandenen Partikel eine ausreichende Größe aufweisen und deren Schallgeschwindigkeit sich erheblich von der des zu messenden Fluids unterscheiden. Dadurch findet das Verfahren heute für medizinische Anwendungsfälle (Blutdurchflussmessung) und zur Messung des Durchflusses von Trüben (z.B. Eisenerz) seine Verwendung. [5]

Das Laufzeitdifferenzverfahren beruht auf der direkten Messung der Laufzeitdifferenz von Schallwellen in einem bewegten Fluid. In einer Rohrleitung werden dazu außer- oder innerhalb der Rohrwand Schallmessköpfe positioniert, die das Rohr diagonal durchschallen. Die Schallmessköpfe sind gegenüberliegend positioniert und fungieren sowohl als Sender als auch als Empfänger (siehe Abbildung 1.2). In Folge des bewegten Fluids benötigt jene Schallwelle, die sich in Strömungsrichtung ausbreitet, eine geringere Laufzeit als jene, die sich entgegen der Strömungsrichtung ausbreitet. Der sich daraus ergebende Laufzeitunterschied ist der mittleren Strömungsgeschwindigkeit und damit dem Volumenstrom direkt proportional. Zur Anwendung kommen zwei mögliche Verfahren. Das Frequenzbandverfahren beruht auf schallwellendefinierter Frequenzfolge und das Impulsverfahren auf einzelnen Schallimpulsen bestimmter Zeitdauer. [6]

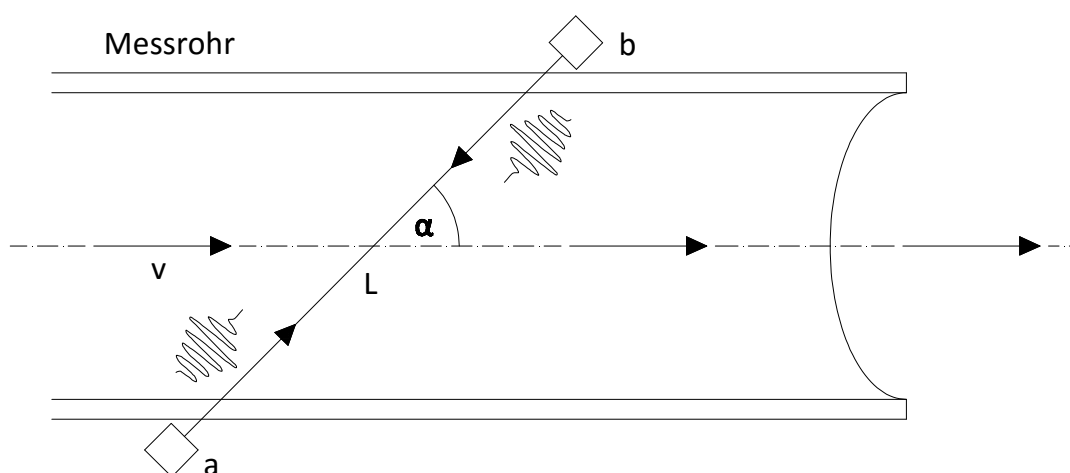


Abbildung 1.2: Laufzeitmessung in einer Rohrleitung [7]

Um systematische Fehler, die auf Grund möglicher Querströmungskomponenten auftreten können zu reduzieren und die tatsächliche Geschwindigkeitsverteilung in der Rohrleitung zu erhalten, werden in der Praxis vier Paare von Schallmessköpfen in zwei Messebenen platziert. Dadurch ist sichergestellt, dass die akustische Durchflussmessung die gewünschte Messgenauigkeit liefert und tatsächlich als absolutes Messverfahren angesehen werden kann. [4] Abbildung 1.3 zeigt den Einbau einer Ultraschall-Messstrecke.



Abbildung 1.3: Einbau einer Ultraschall-Messstrecke

Das sogenannte Clamp-on-Verfahren eignet sich besonders für die Anwendung bei Feldmessungen. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass die Sensoren außen am Rohr mittels Magnete angebracht werden und dadurch keine baulichen Veränderungen an der Rohrleitung vorzunehmen sind. Die Anwendung dieses Messverfahrens erstreckt sich bei Rohrleitungen bis DN 6500.

1.1.2 Magnetisch-induktive Durchflussmessung

Das Messprinzip der magnetisch-induktiven Durchflussmessung (MID) beruht auf dem Faraday'schen Induktionsgesetz. Die Voraussetzung für die Funktionalität ist ein elektrisch leitfähiges Medium. Die Einbringung des Magnetfeldes erfolgt, wie in Abbildung 1.4 dargestellt, über zwei gegenüberliegende Feldspulen, die beispielsweise in der Hoch- und Tieflage des Rohres angebracht sind. Da das Rohr vom Fluid durchströmt ist, bewegt sich sozusagen ein "elektrischer Leiter" in einem Magnetfeld. Das führt zufolge Induktion zu einer Spannung, die an zwei an der Rohrwand positioniert Messelektroden erfasst wird. Die gemessene

Spannung ist der Strömungsgeschwindigkeit und dem Durchfluss proportional. Die Erzeugung des Magnetfeldes erfolgt durch getakteten Gleichstrom wechselnder Polarität. Das gewährleistet eine stabile Nullpunktslage und darüber hinaus wird die Messung weniger anfällig gegenüber mehrphasigen Medien, Inhomogenitäten oder geringerer Leitfähigkeit. [8] Das Einsatzgebiet der magnetisch-induktiven Durchflussmessung beschränkt sich von DN 3 bis DN 2000. [9]

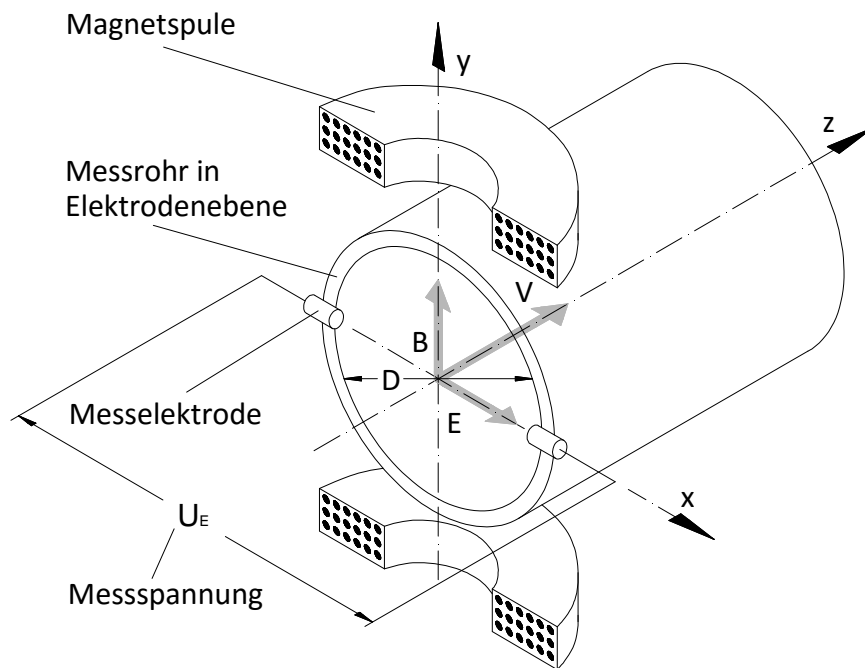


Abbildung 1.4: Prinzip der magnetisch-induktiven Durchflussmessung [10]

1.1.3 Messflügelmethode

Die Volumenstrommessung basiert auf der Geschwindigkeitsmessung – repräsentiert durch die Messung der Drehzahl des Messflügels – und der Querschnittsmessung. Voraussetzung ist die achsparallele Anströmung des Messflügels, wo bereits Geometrien existieren, die eine Abweichung der Anströmrichtung zur Hauptströmungsrichtung von $\pm 5\%$ erlauben und immer noch eine Messgenauigkeit von unter $\pm 1\%$ aufweisen. Die geometrische Form der Flügel-schaukel entspricht der eines Propellers. Die daraus hervorgehenden Propellerflügelgeräte werden unterschieden in solche, deren Flügel eine horizontale Flügelachse (siehe Abbildung 1.5) und solche, deren Flügel eine vertikale Flügelachse aufweisen, die sich besonders zur Volumenstrommessung in Rohrleitungen eignen. Der Messbereich ist grundsätzlich von der Propellergeometrie abhängig und beträgt im Falle des Universalflügels mit 125 mm Durchmesser 0,025 m/s bis 10 m/s. [3]

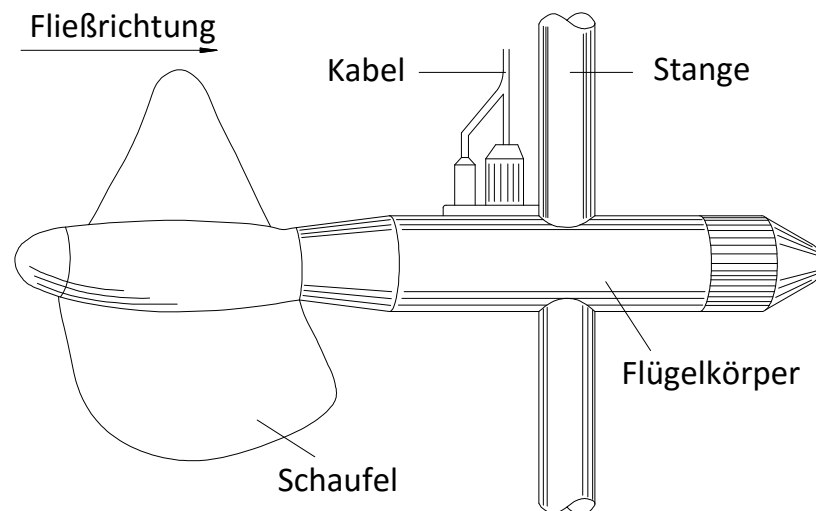


Abbildung 1.5: Schematische Darstellung eines Messflügels [3]

Messquerschnitte werden in Abhängigkeit der Geometrie des Strömungsquerschnittes in Messfelder eingeteilt und gleichzeitig in möglichst vielen Messpunkten gemessen. In Rohrleitungen wird meist über zwei orthogonal zueinanderstehende Durchmessern gemessen. [11] Zur Aufnahme der Messflügel ist ein Messflügelgerüst erforderlich. Dieses muss den einwirkenden Strömungskräften standhalten und darf nur eine geringe Querschnittsversperrung von maximal 6 % zur Folge haben. Abbildung 1.6 zeigt das Messflügelgerüst zur Messung einer Kaplanmaschine.

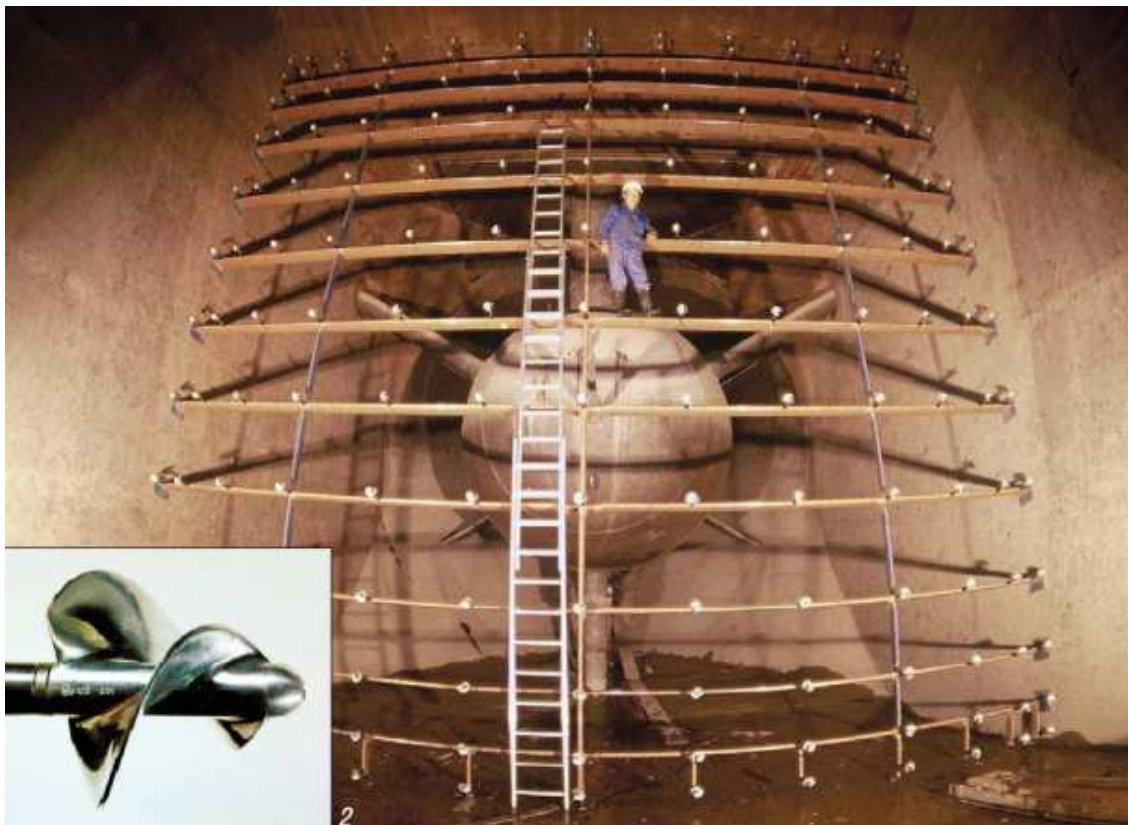


Abbildung 1.6: Messaufbau zur Flügelmessung [12]

1.1.4 Winter-Kennedy-Methode

Bei der Winter-Kennedy-Methode handelt es sich um ein Verfahren der indirekten Volumenstrommessung, das häufig bei Francis-Turbinen/-Pumpturbinen und Kaplan-Turbinen Anwendung findet. Es beruht auf der Messung des Differenzdrucks zwischen zwei Druckmessstellen. Der Zusammenhang zwischen der gemessenen Druckdifferenz beider Messstellen und dem Durchfluss wird mittels eines absoluten Volumenstrommessverfahrens festgestellt und in der Folge die Winter-Kennedy-Messeinrichtung auf den proportionalen Zusammenhang kalibriert. Der funktionale Zusammenhang zwischen Differenzdruck und Volumenstrom wird durch die Bernoulli-Gleichung beschrieben. [13]

Die Anordnung der Druckmessstellen ist vom zu messenden Maschinentyp abhängig, wobei die Druckaufnehmer sowohl in zwei Rohrabchnitten bzw. in einem als auch in zwei radialen Spiralquerschnitten angeordnet werden können. [14] Unabhängig von der getroffenen Anordnung ist vor allem darauf zu achten, dass der sich einstellende Differenzdruck hinreichend groß ist. [15] Ein Auszug über mögliche Anordnungen der Druckmessstellen liefert Abbildung 1.7. Weitere Anordnungsmöglichkeiten finden sich in der IEC 60041.

Wie bereits erwähnt, ist – um mit Hilfe der Winter-Kennedy-Methode Abnahmemessungen durchführen zu können – die vorherige Kalibrierung des Messsystems unter Anwendung eines absoluten Messverfahrens erforderlich. [14]

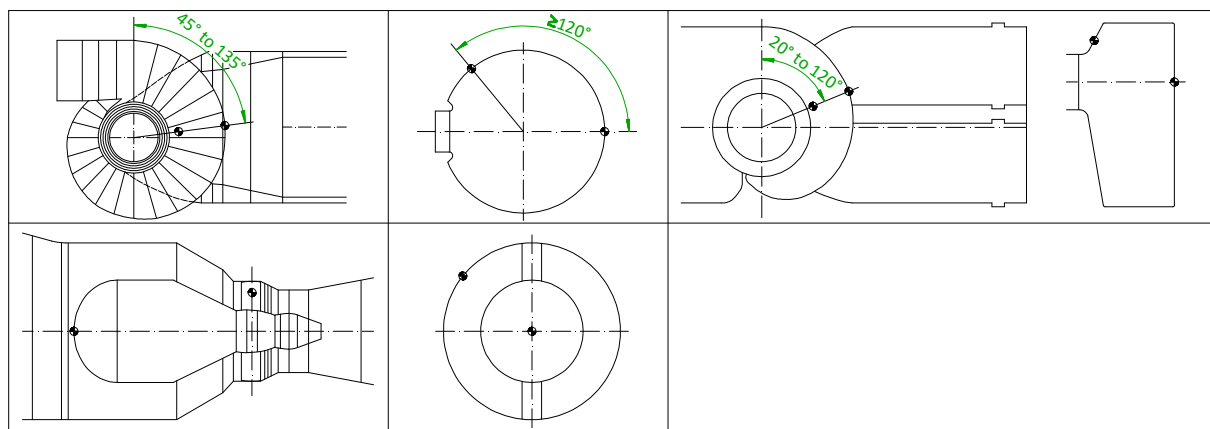


Abbildung 1.7: Anordnungsmöglichkeit der Druckmessstellen bei der Winter-Kennedy-Methode [15]

1.1.5 Druck/Zeit-Methode

Die Druck/Zeit-Methode zur Messung des Durchflusses in Rohrleitungen beruht auf dem zweiten Newtonschen Gesetz und den abgeleiteten Gesetzen der Fluidmechanik. Die Gesetze beschreiben die Beziehungen zwischen dem Kraftverlauf und der Impulsänderung der Wassermasse, gemessen aus der Änderung des Differenzdruckes innerhalb einer Messstrecke.

Der Druckverlauf wird in Form einer Differenzmessung in zwei Messquerschnitten erfasst, über die Zeitdauer der Impulsänderungsperiode aufintegriert und daraus der der Impulsänderung zugrundeliegende Volumenstrom berechnet. Die Impulsänderung wird vornehmlich durch kontinuierliches Schließen des Regulier- oder Absperrorgans erzeugt.

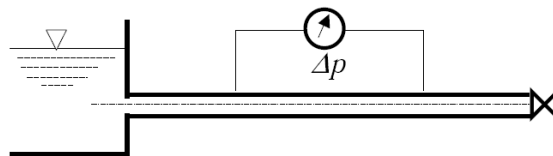
Ursprünglich erforscht und eingeführt wurde die Druck/Zeit-Methode vom US-Amerikaner Norman Rothwell Gibson im Jahr 1923. Zunächst erfolgte die Anwendung vor allem in Nordamerika. Später wurde sie auch in Europa und in anderen Teilen der Welt eingeführt. Auf Grund einer ständig verbesserten Genauigkeit der Druckaufnehmer, der vereinfachten computergestützten Datenerfassung sowie Datenverarbeitung erfreut sich dieses Verfahren weltweit steigender Beliebtheit. [16]

Die Druck/Zeit-Methode zeichnet sich vor allem durch geringe Anschaffungskosten des Messsequipments und den geringen Messaufwand aus. Das Messverfahren erfordert jedoch rohrleitungsgebundene Anlagen, die kontinuierliche Absperrbarkeit des Triebwasserstromes der hydraulischen Maschine sowie die Erfassbarkeit des daraus resultierenden Druckstoßes innerhalb einer Messstrecke. Dazu ist der Zugang zur Rohrleitung im Bereich der Messebenen sowie das Vorhandensein von Druckmessanschlüssen erforderlich. Die Anwendbarkeit der Messmethode gilt theoretisch für alle Fallhöhen.

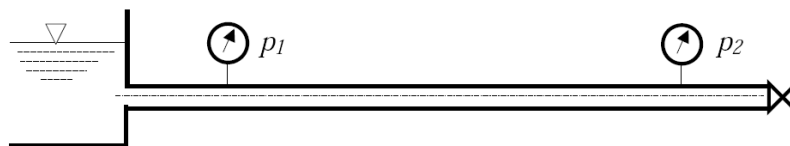
1.1.5.1 Messmethoden

Zur Anwendung der Druck/Zeit-Methode bestehen im Wesentlichen drei verschiedene Möglichkeiten des Messaufbaus (siehe Abbildung 1.8). Version 1 beruht auf der klassischen Gibson-Differentialdruckmessung. Version 2 symbolisiert die Absolutdruckmessung an zwei Messstellen in der Rohrleitung und bei Version 3 befindet sich eine Messstelle in einem Rohrleitungsquerschnitt und als Referenz wird der Oberwasserpegel herangezogen.

Version 1



Version 2



Version 3



Abbildung 1.8: Diverse Versionen der Druck/Zeit-Methode [17]

1.2 Physikalische Grundlagen

In den Abschnitten 1.2.1 und 1.2.2 ist der theoretische Zusammenhang der Druck/Zeit-Methode unter Zugrundelegung der Impulsgleichung und der instationären Bernoulli-Gleichung dargestellt.

1.2.1 Herleitung des Beschleunigungszusammenhanges

Das zweite Newtonsche Axiom besagt, dass die zeitliche Änderung des Impulses $\vec{p} = m \cdot \vec{c}$ eines Körpers proportional der auf den Körper wirkenden Kraft \vec{F} ist.

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} \vec{p} \quad (1.1)$$

Als Grundlage zur Betrachtung einer stationären Strömung dient die Impulsänderung eines raumfesten Kontrollvolumens. Abbildung 1.9 zeigt eine Stromröhre mit abgeschlossenem Kontrollvolumen.

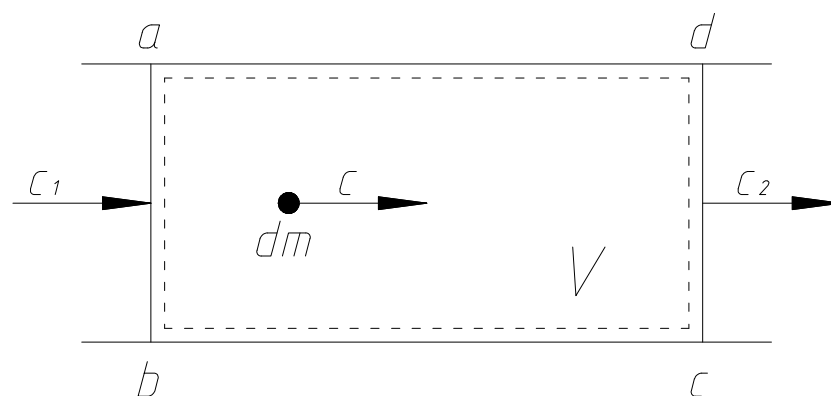


Abbildung 1.9: Impulsänderung im raumfesten Kontrollvolumen

Ein Flüssigkeitsteilchen mit der Masse $dm = \rho \cdot dV$ und der Geschwindigkeit c besitzt den Impuls $d\vec{p} = \vec{c} \cdot dm = \vec{c} \cdot \rho \cdot dV$. Durch Integration aller Flüssigkeitsteilchen innerhalb des Kontrollvolumens V ergibt sich der Gesamtimpuls der abgeschlossenen Flüssigkeitsmenge:

$$\vec{p}(t) = \int_V \rho \cdot \vec{c} \cdot dV \quad (1.2)$$

Durch Ableiten der Gleichung (1.2) nach der Zeit t , entsteht der Impulserhaltungssatz in nachstehender Form.

$$F = \int_V \frac{d(\rho \cdot c)}{dt} dV \quad (1.3)$$

Unter der Annahme eines konstanten Rohrleitungsquerschnittes A ergibt sich folgende Umformung:

$$F = \int_0^L \frac{d(\varrho \cdot c)}{dt} A \cdot dx \quad (1.4)$$

Dabei ist ersichtlich, dass eine Division der Gleichung (1.4) durch den Rohrleitungsquerschnitt A auf den instationären Anteil der Bernoulli-Gleichung (1.8) führt.

Da der Rohrleitungsquerschnitt A als auch die Dichte ϱ als konstant angenommen werden und die Änderung der Strömungsgeschwindigkeit nach der Zeit dc/dt vom Integrationsweg unabhängig ist, können diese Terme vor das Integral geschrieben werden.

$$F = \varrho \cdot A \cdot \frac{dc}{dt} \int_0^L dx \quad (1.5)$$

Die Umformung der Masse

$$m = \varrho \cdot L \cdot A \quad (1.6)$$

sowie die Integration des rechten Terms der Gleichung (1.5) führt zum Newtonschen Grundgesetz.

$$F = m \cdot \ddot{x} \quad (1.7)$$

Wie bereits erwähnt, findet sich der Trägheitszusammenhang im instationären Anteil der Bernoulli-Gleichung (1.8) wieder, aus der in der Folge die Volumenstromgleichung hergeleitet wird.

1.2.2 Herleitung der Volumenstromgleichung

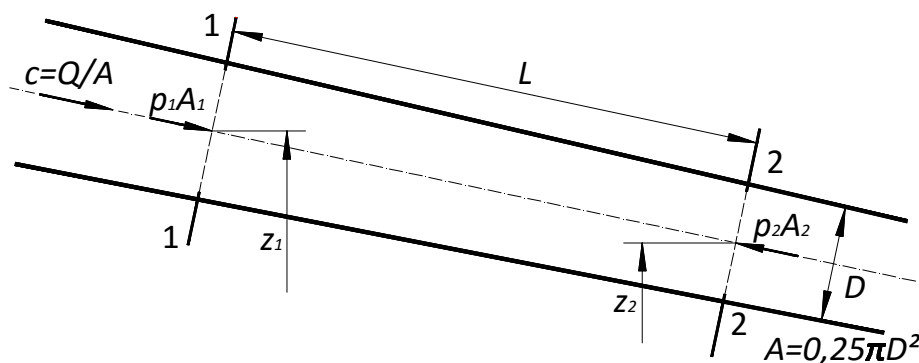


Abbildung 1.10: Rohrleitungsabschnitt zur Erklärung des theoretischen Hintergrundes [19]

Abbildung 1.10 zeigt einen Ausschnitt aus einer Rohrleitung mit zwei Rohrleitungsquerschnitten (1-1 und 2-2). Die sich dazwischen befindliche Messstrecke mit der Länge L weist keine

Unregelmäßigkeiten auf. Der Rohrleitungsquerschnitt $A(x)$ ändert sich jedoch entlang der Messstrecke. Weiters wird angenommen, dass die Geschwindigkeits- und Druckverteilung in jedem Rohrleitungsquerschnitt konstant verhält und dass sich weder die Fluidichte ϱ noch der Strömungsquerschnitt $A(x)$ zufolge eines auftretenden Druckstoßes verändern. Damit gilt die instationären Bernoulli-Gleichung [20],

$$p + \varrho \cdot \frac{c^2}{2} + \varrho \cdot g \cdot z + \varrho \cdot \int \frac{\partial c}{\partial t} dx = \text{konstant} \quad (1.8)$$

wobei p dem statischen Druck, $\varrho \cdot \frac{c^2}{2}$ dem dynamischen Druck, $\varrho \cdot g \cdot h$ dem geodätischen Druck und $\varrho \cdot \int \frac{\partial c}{\partial t} dx$ dem instationären Anteil entspricht. Durch Einsetzen der mittels der Kontinuitätsgleichung beschriebenen Strömungsgeschwindigkeit

$$c = \frac{Q}{A} \quad (1.9)$$

sowie des aus der Rohrreibung herrührenden Druckverlustterms Δp_v ergibt sich die erweiterte instationäre Bernoulli-Gleichung.

$$p_1 + \frac{\varrho \cdot Q^2}{2 \cdot A_1^2} + \varrho \cdot g \cdot z_1 = p_2 + \frac{\varrho \cdot Q^2}{2 \cdot A_2^2} + \varrho \cdot g \cdot z_2 + \Delta p_v + \varrho \cdot \int_0^L \left(\frac{dQ}{dt} \right) \cdot \frac{dx}{A(x)} \quad (1.10)$$

Gleichung (1.10) lässt sich in folgende Terme gliedern:

- Statische Druckdifferenz

$$\Delta p_s = p_2 - p_1 + \varrho \cdot g \cdot z_2 - \varrho \cdot g \cdot z_1 \quad (1.11)$$

- Dynamische Druckdifferenz

$$\Delta p_d = \frac{\varrho \cdot Q^2}{2 \cdot A_2^2} - \frac{\varrho \cdot Q^2}{2 \cdot A_1^2} \quad (1.12)$$

- Druckverlust

$$\Delta p_v = k \cdot Q(t) \cdot |Q(t)| \quad (1.13)$$

- Penstockfaktor

$$F = \int_0^L \frac{dx}{A(x)} \quad (1.14)$$

Durch Einsetzen der angeführten Terme (1.11) bis (1.14) ergibt sich die Differentialgleichung in nachstehender Form:

$$\varrho \cdot F \cdot \frac{dQ}{dt} = -\Delta p_s - \Delta p_d - \Delta p_v \quad (1.15)$$

Der Term auf der linken Gleichungsseite beschreibt den instationären Anteil, des sich zeitlich verändernden Volumenstroms während des Schließens und veranschaulicht die Trägheit der Flüssigkeitsmasse im betrachteten Messabschnitt. [19]

Nach der Trennung der Variablen erfolgt die Integration über das Zeitintervall (t_0, t_k) in dem sich der Volumenstrom vom Anfangswert auf den Endwert, der im Idealfall Null ist, ändert. Das Ergebnis ist der Volumenstrom vor dem Schließen des Absperr- oder Regulierorgans. Ein eventuell auftretender Leckagevolumenstrom Q_k wird durch die obere Integrationsgrenze bei der Integration des Volumenstroms berücksichtigt.

$$Q_0 = \frac{1}{\rho \cdot F} \cdot \int_{t_0}^{t_k} [\Delta p_s(t) + \Delta p_d(t) + \Delta p_v(t)] dt + Q_k \quad (1.16)$$

Gleichung (1.16) zeigt, dass zur Berechnung des Durchflusses sowohl der reibungsbedingte Druckverlustterm Δp_v als auch der Term der dynamischen Druckdifferenz Δp_d von der gemessenen statischen Druckdifferenz Δp_s zu trennen ist. Die Berechnung der beiden Terme Δp_v und Δp_d erfolgt unter Berücksichtigung ihrer quadratischen Abhängigkeit vom Volumenstrom. [19]

Die Bezeichnung der in der Herleitung vorkommenden Terme entspricht in der IEC 60041 folgender Zuordnung:

Tabelle 1-2: Äquivalente Bezeichnungen

Herleitung	IEC 60041	Bezeichnung
Δp_s	Δp	Statische Druckdifferenz
Δp_v	ζ	Reibungsverlust
Q_0	Q	Gemessener Volumenstrom
Q_k	q_k	Leckagevolumenstrom
c	v	Strömungsgeschwindigkeit

1.3 Physikalische Daten

1.3.1 Erdbeschleunigung

Die tatsächliche Gestalt der Erde weicht auf Grund der Erdrotation von der exakten Kugelform ab und weist am Äquator einen größeren Erdradius auf als an den Polen. Folglich nimmt die Erdbeschleunigung mit ansteigendem Breitengrad zu. Weiters spielt auch die Seehöhe eine Rolle, die bei Zunahme die wirkende Erdbeschleunigung verringert. Der gesetzmäßige Zusammenhang der Erdbeschleunigung g ist in der IEC 60041 angeführt und in Abbildung 1.11 graphisch veranschaulicht:

$$g = 9,7803 \cdot (1 + 0,0053 \cdot \sin^2 \varphi) - 3 \cdot 10^{-6} \cdot z \quad (1.17)$$

Als Referenzwert zur Berechnung der dem Breitengrad und der Seehöhe entsprechenden Erdbeschleunigung wird jene am Äquator herangezogen, sie beträgt $9,7803 \text{ m/s}^2$; φ beschreibt den Breitengrad und z die Höhe über dem mittleren Meeresspiegel. [4]

Der internationale Standardwert der Erdbeschleunigung beträgt $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$.

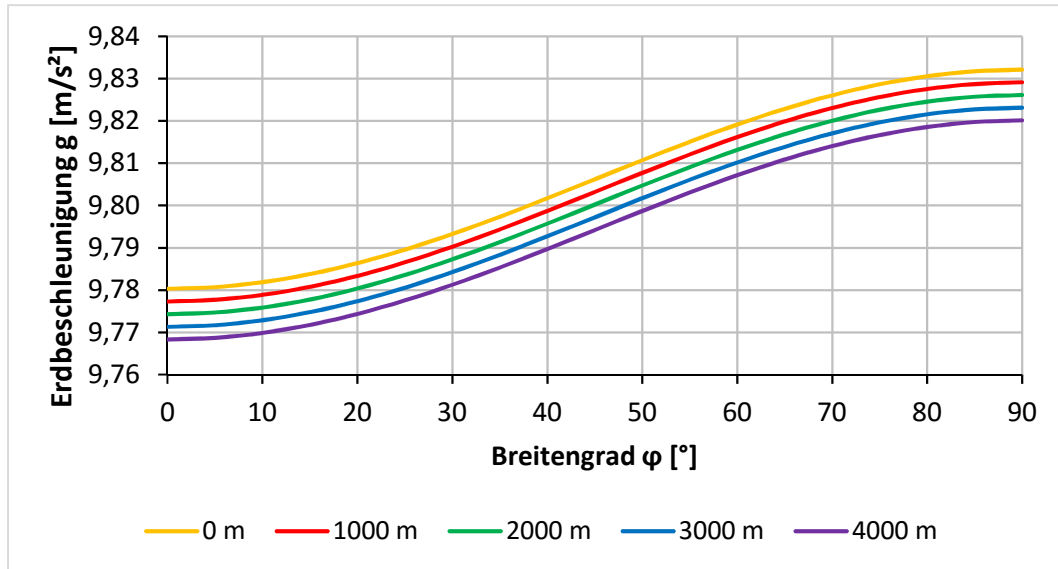


Abbildung 1.11: Erdbeschleunigung als Funktion des Breitengrades und der Seehöhe

1.3.2 Dichte des Wassers nach Herbst und Rögner (IEC 60041)

Grundsätzlich gilt die Berechnung der Dichte des Wassers nach Herbst und Rögner für destilliertes Wasser. Im Allgemeinen kommt jedoch weder bei Prüfstandmessungen noch bei Feldmessungen destilliertes Wasser zur Anwendung. Auf Grund einer geringen Menge ungelöster Bestandteile ist die Dichte des tatsächlich verwendeten Wassers größer als jene des destillierten Wassers. Diese Abweichung beträgt in der Regel weniger als 0,05 % und ist häufig vernachlässigbar. Somit kann die tatsächliche Dichte des Wassers durch jene des destillierten Wassers mit hinreichender Genauigkeit angenähert werden. [21]

Die in der IEC 60041 angeführten Tabellen, betreffend die Stoffwerte des Wassers, beruhen auf der Berechnung von Herbst und Rögner aus dem Jahr 1977. Die Grundlage dafür bereitet die Zustandsgleichung der Freien Enthalpie des Wassers. [4]

Die Gleichung beschreibt die Dichte ϱ als Funktion der Temperatur ϑ und des Drucks p .

$$\varrho = 10^2 \cdot \left[\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 R_{ij} \cdot \alpha^j \cdot \beta^{(i-1)} \right]^{-1} \quad (1.18)$$

Die in Gleichung (1.18) vorkommenden Koeffizienten (α, β) sind folgend definiert:

$$\alpha = \frac{1}{\vartheta^*} \cdot (\vartheta - \vartheta_1) \quad (1.19)$$

Für den Temperaturbereich von 273,15 K bis 293,15 K (0 °C bis 20 °C) gilt: $\vartheta_1 = 273,15$ K;
 Für den Temperaturbereich von 293,15 K bis 323,15 K (20 °C bis 50 °C) gilt: $\vartheta_1 = 293,15$ K;
 beiden Temperaturbereichen gemeinsam ist $\vartheta^* = 1$ K.

$$\beta = \frac{1}{p^*} \cdot (p_{abs} + 200 \cdot 10^5) \quad (1.20)$$

p_{abs} entspricht dem Absolutdruck in Pa und für p^* gilt: $p^* = 10^5$ Pa

Die Berechnung der Dichte nach Herbst und Rögner besitzt für den Druckbereich $p_{abs} = 0$ bis $150 \cdot 10^5$ Pa Gültigkeit.

In Abhängigkeit des Temperaturbereichs sind für R_{ij} unterschiedliche Koeffizienten zu verwenden. Diese sind im Anhang in Tabelle 12-1 für die zwei relevanten Temperaturbereiche angeführt.

1.3.3 Dichte des Wassers nach IAPWS-IF97

Die *International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS)* – eine Vereinigung von 15 Staaten, darunter Deutschland, Frankreich, Italien und Russland – hat eine Studie erarbeitet, welche die thermodynamischen Eigenschaften von Wasser und Dampf mit sehr hoher Genauigkeit beschreibt und die Berechnung nach Herbst und Rögner übertrifft. Die Formulierungen wurden in der "IAPWS Industrial Formulation 1997" veröffentlicht.

Die Berechnungsmodelle gliedern sich anhand verschiedener mathematischer Zusammenhänge in fünf Gruppen, diese sind schematisch in Abbildung 1.12 dargestellt.

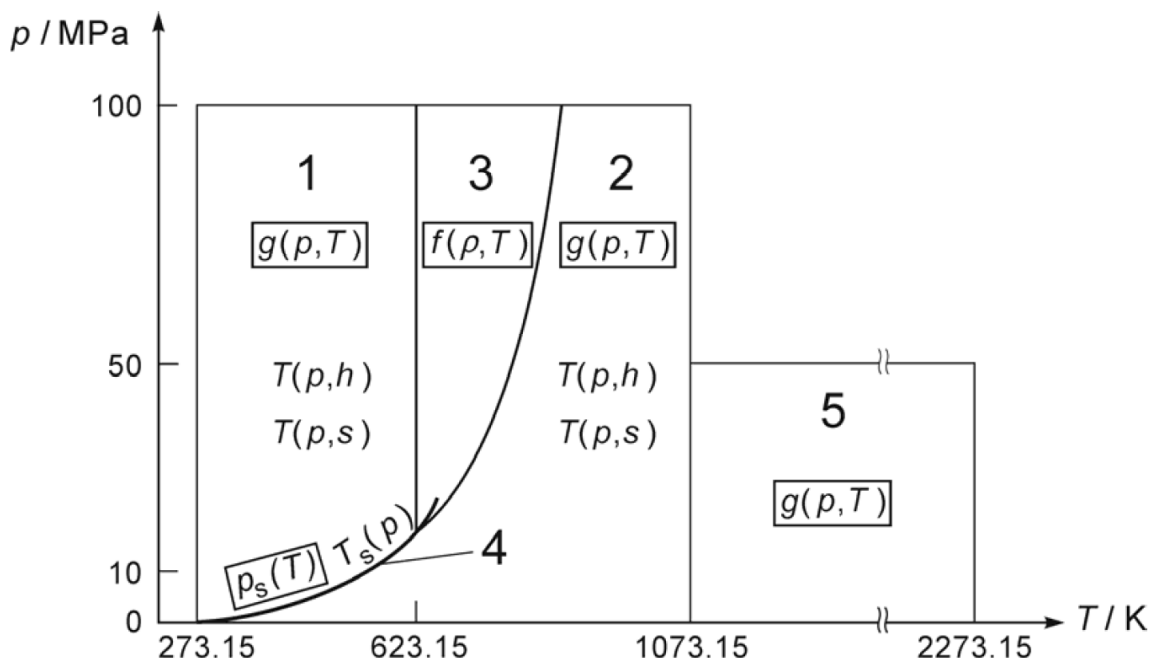


Abbildung 1.12: Gruppen und Gültigkeitsbereich der IAPWS-IF97 [22]

Die Gültigkeit der Stoffwerte umfasst den Bereich:

$$\begin{aligned} 273,15 \text{ K} \leq T \leq 1073,15 \text{ K} & \quad p \leq 100 \text{ MPa} \\ 1073,15 \text{ K} \leq T \leq 2273,15 \text{ K} & \quad p \leq 50 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Für die Anwendung der Druck/Zeit-Methode ist Gruppe 1 relevant, mit nachstehendem Gültigkeitsbereich:

$$273,15 \text{ K} \leq T \leq 623,15 \text{ K} \quad p_s(T) \leq p \leq 100 \text{ MPa}$$

Die Kurve $p_s(T)$ entspricht dem Verlauf des Dampfdruckes.

Als Berechnungsgrundlage der Stoffwerte in der Gruppe 1 dient die Fundamentalgleichung der spezifischen Freien Enthalpie g in der dimensionslosen Form.

$$\gamma(\pi, \tau) = \frac{g(p, T)}{R \cdot T} = \sum_{i=1}^{34} n_i \cdot (7,1 - \pi)^{l_i} \cdot (\tau - 1,222)^{j_i} \quad (1.21)$$

Darin bedeuten $\pi = p/p^*$ und $\tau = T^*/T$ dimensionslose Größen, $p^* = 16,53 \text{ MPa}$ und $T^* = 1386 \text{ K}$ dimensionsbehaftete Referenzgrößen und die spezifische Gaskonstante von Wasser $R = 461,526 \text{ J/kgK}$. Die angeführten Koeffizienten und Exponenten n_i , l_i und j_i sind im Anhang in Tabelle 12-2 zusammengefasst.

Den zur Bestimmung der Dichte relevanten Zusammenhang beschreibt Gleichung (1.22).

$$v = \left(\frac{\partial g}{\partial p} \right)_T = \frac{R \cdot T}{p} \cdot \pi \cdot \gamma_\pi \quad (1.22)$$

Indem die Gleichung das spezifische Volumen v darstellt, ist zur Erlangung der Dichte ϱ der Kehrwert zu bilden und durch Einsetzen von

$$\gamma_\pi = \sum_{i=1}^{34} -n_i \cdot l_i \cdot (7,1 - \pi)^{l_i-1} \cdot (\tau - 1,222)^{j_i} \quad (1.23)$$

ergibt sich die Dichte $\varrho(p, T)$ in kg/m^3 entsprechend der Gleichung (1.24):

$$\varrho(p, T) = \left\{ \frac{R \cdot T}{p} \cdot \pi \cdot \left[\sum_{i=1}^{34} -n_i \cdot l_i \cdot (7,1 - \pi)^{l_i-1} \cdot (\tau - 1,222)^{j_i} \right] \right\}^{-1} \quad (1.24)$$

Die Ungenauigkeit der Dichtebestimmung beträgt nach IAPWS-IF97 für die für die Druck/Zeit-Methode relevante Gruppe $1 \pm 0,003 \%$. Das bedeutet, dass die Bestimmung der Dichte für die Anwendung der Druck/Zeit-Methode forthin nach IAPWS-IF97 durchgeführt wird.

2 Druck/Zeit-Methode nach IEC 60041

Die internationale Norm IEC 60041 aus dem Jahr 1991 hat die Abhandlung von Abnahmeversuchen zur Bestimmung der hydraulischen Leistung von Wasserturbinen, Speicherpumpen und Pumpturbinen zum Inhalt. Der Teil 10.4 befasst sich mit der Druck/Zeit-Methode (Gibson-Methode), wobei sehr umfassend die Aufnahme des Druck-Zeit-Diagramms auf Basis einer photographischen Aufzeichnung der Quecksilbersäule mittels eines U-Rohr-Manometers sowie die Ermittlung des Differenzdruck-Zeit-Integrals unter Anwendung der Planimetrie beschrieben wird.

Die beschriebene Messmethode, einschließlich der damit einhergehenden Auswertevorschriften, wird dem Stand der Technik nicht mehr gerecht. Die Durchführung der Druck/Zeit-Methode erfolgt heutzutage, dank einer ständig verbesserten Genauigkeit der analogen Druckaufnehmer, vereinfacht durch eine computergestützte Datenerfassung und Datenverarbeitung.

Nachdem die Gültigkeit des Normabschnittes nach wie vor besteht, wird er der Vollständigkeit halber in Abschnitt 2 detailliert wiedergegeben.

2.1 Prinzip der Methode

Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei der Druck/Zeit-Methode um eine Methode zur Durchflussmessung, die auf dem zweiten Newtonschen Gesetz und den abgeleiteten Gesetzen der Fluidmechanik beruht. Diese Gesetze geben die Beziehung zwischen dem Kraftverlauf und der Impulsänderung der Wassermasse, gemessen aus der Änderung des Differenzdruckes zwischen zwei Rohrquerschnitten, an. Die Impulsänderung resultiert aus der Beschleunigung oder Verzögerung der zwischen zwei Messquerschnitten befindlichen Wassermasse und beruht auf dem Schaltvorgang eines Absperr- oder Regulierorgans, beispielsweise Schieber, Leitapparat oder Düsenadel.

Prinzipiell besitzt die Druck/Zeit-Methode sowohl für den Turbinen- als auch für den Pumpbetrieb Gültigkeit. Sie ist unabhängig von der Betätigungsrichtung des Absperr- oder Regulierorgans und ist sowohl für Öffnen als auch für Schließen anwendbar. Trotzdem erfolgt im Turbinenbetrieb die praktische Anwendung nur für den Fall des Schließens.

Im folgenden Abschnitt wird der mathematische Zusammenhang der Druck/Zeit-Methode in seinen Grundzügen beschrieben.

In einer von einem reibungsfreien Fluid durchströmten Rohrleitung mit dem konstanten Strömungsquerschnitt A , bewirkt eine Änderung der Strömungsgeschwindigkeit dv/dt die Entstehung eines Differenzdruckes Δp . Dieser wirkt zwischen dem vorgelagerten und dem nachgelagerten Strömungsquerschnitt. Der vorgelagerte Strömungsquerschnitt wird mit dem Index u (upstream) und der nachgelagerte Strömungsquerschnitt mit dem Index d (downstream) bezeichnet. Beide Messquerschnitte weisen zueinander den Abstand L auf. Die Masse des Fluids wird mit dem Term $\rho \cdot L \cdot A$ beschrieben, dv/dt kennzeichnet die Impulsänderung und der

Term $A \cdot \Delta p$ den Kraftverlauf. Der beschriebene Zusammenhang kommt in Gleichung (2.1) zum Ausdruck.

$$\varrho \cdot L \cdot A \cdot \frac{dv}{dt} = -A \cdot \Delta p \quad (2.1)$$

Die Druckdifferenz ergibt sich folgendermaßen:

$$\Delta p = p_d - p_u \quad (2.2)$$

Wird t als jene Zeit angenommen, während der sich die Strömungsgeschwindigkeit ändert und beschreibt ζ den Druckverlust innerhalb der Messstrecke zufolge der in der Rohrleitung vorherrschenden Reibung, so gilt folgender Zusammenhang:

$$A \cdot \int_0^t dv = -\frac{A}{\varrho \cdot L} \int_0^t (\Delta p + \zeta) dt \quad (2.3)$$

Somit errechnet sich der Durchfluss vor dem Schließen des Absperr- oder Regulierorgans entsprechend Gleichung (2.4):

$$Q = A \cdot v_0 = \frac{A}{\varrho \cdot L} \int_0^t (\Delta p + \zeta) dt + A \cdot v_t \quad (2.4)$$

Der Term $A \cdot v_t$ beschreibt den Leckagevolumenstrom q_k . Dieser tritt fallweise bei geschlossenem Absperr- oder Regulierorgan auf und ist getrennt vom Nennvolumenstrom zu ermitteln. Die Bestimmung des Leckagevolumenstroms (siehe Abschnitt 3.2) erfordert – auf Grund der in der Regel geringen Menge verglichen mit dem Nennvolumenstrom – nicht dieselbe Genauigkeit.

Die graphische oder numerische Aufzeichnung des Druck-Zeit-Verlaufs erfordert ein sukzessives, kontinuierliches Schließen des Absperr- oder Regulierorgans, sowie die Erfassung der daraus resultierenden Druckänderung zwischen zwei Messquerschnitten. Der Druckverlauf wird entlang der Zeitachse aufintegriert.

Die auftretende Druckänderung beruht auf der Veränderung der Reibungssituation und des Impulses zwischen beiden Messquerschnitten. Jene Einflüsse, die aus der Änderung der Reibungssituation und des Impulses außerhalb der Messstrecke auftreten, sind in beiden Messquerschnitten vorhanden und heben sich daher gegenseitig auf.

Es wurden unterschiedliche Druck/Zeit-Methoden entwickelt, die sich lediglich in der Messausrüstung und für den Fall der graphischen Auswertung in der Berechnungsmethode der Druck-Zeit-Integrale unterscheiden. Eine weitere Unterscheidung besteht in der Art der Aufzeichnung der Messwerte als Differenz- oder als Absolutdruckwerte.

2.1.1 Differentielle Druck/Zeit-Methode

2.1.1.1 Allgemeines

Zusätzlich zu den in Abschnitt 2.2 genannten allgemein gültigen Anforderungen

- soll die Messstrecke unter Volllast zumindest einen Betrag von $50 \text{ m}^2/\text{s}$, resultierend aus dem Produkt der Länge der Messstrecke zwischen den beiden Messquerschnitten und der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in der Rohrleitung, aufweisen.
- Vor Beginn der Messung ist ein konstanter Volumenstrom einzustellen und ein stabiler Betriebszustand abzuwarten. Der Druck-Zeit-Zusammenhang wird sodann durch kontinuierliches Schließen des Absperr- oder Regulierorgans erreicht, indem die resultierende zeitabhängige Relativdruckänderung aufgezeichnet wird.
- Um eine valide Aufzeichnung der Differenzdruckänderung während des Schließvorganges zu erhalten, empfiehlt es sich, die Zeitdauer der Messwertaufzeichnung auf mindestens 20 Sekunden vor Beginn und nach Ende der Schließbewegung auszudehnen.
- Vor Beginn der Messung ist eine Kalibration des Messsystems durchzuführen. Darüber hinaus ist vor jeder Messung der Nullpunkt des Messsystems sowie die Kalibration der verwendeten Druckaufnehmer zu überprüfen.

2.1.1.2 Differentieller Quecksilber-Druckmesser (Gibson-Gerät)

Dabei handelt es sich um das erste Messgerät, das für die Druck/Zeit-Methode eingesetzt wurde. Richtigerweise spricht man nur dann von der Gibson-Methode, wenn die Messung mit dem Gibson-Gerät durchgeführt wird. Das Messgerät liefert ein Druck-Zeit-Diagramm in Form einer photographischen Aufzeichnung der Quecksilbersäule eines U-Rohr-Manometers. Die Ermittlung des Integrals $\int \Delta p \cdot dt$ wird unter Anwendung der Planimetrie durchgeführt.

2.1.1.2.1 Auswertung des Diagramms

Die im Folgenden beschriebene Vorgehensweise bezieht sich auf Abbildung 2.1.

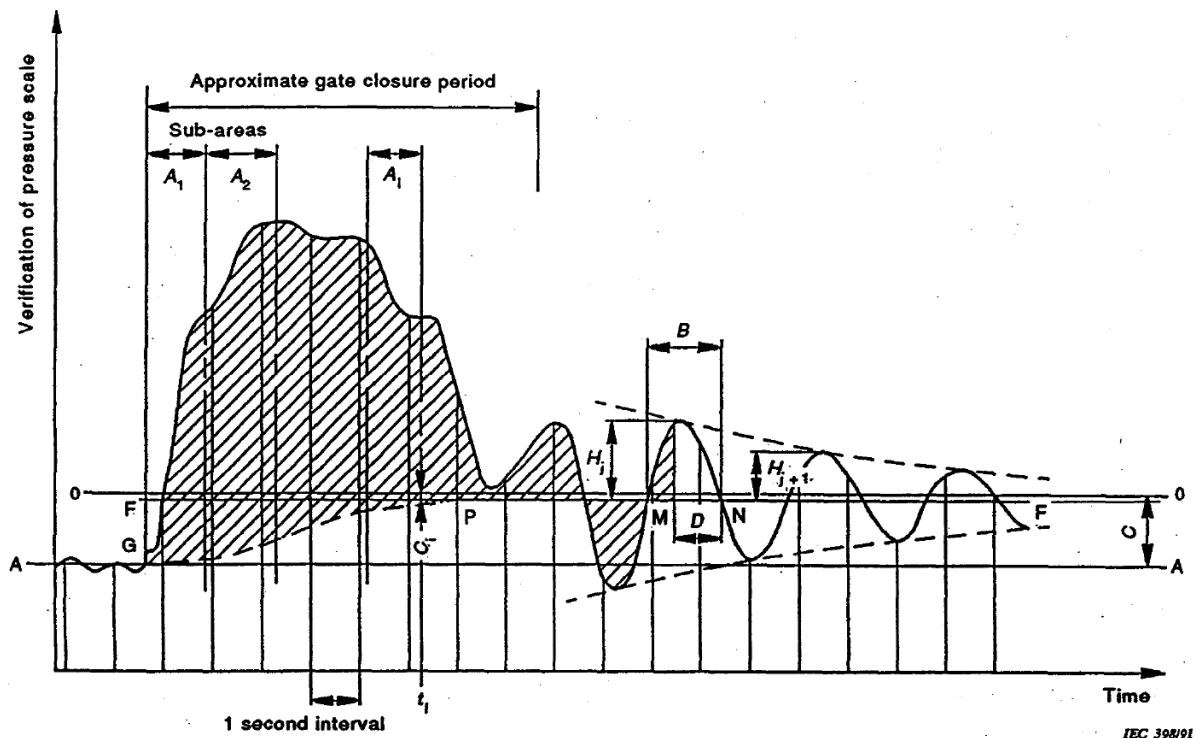


Abbildung 2.1: Beispiel eines Druck-Zeit-Diagramms; aufgezeichnet mit einem Quecksilber-Druckmesser [4]

Voranzustellen ist, dass alle Längen, Höhen, Abstände und Flächen in einem kohärenten Einheitensystem vorliegen sollen.

- Zeichnen einer horizontalen Linie 0-0. Diese repräsentiert die Nulllinie des Gibson-Geräts und des Diagramms.
- Zeichnen einer horizontalen Linie A-A. Diese entspricht dem mittleren Druckverlust während des Betriebs, bevor der Schließvorgang eingeleitet wird.
- Zeichnen einer horizontalen Linie F-F. Diese stellt den mittleren Druckverlust auf Grund eines Leakagevolumenstroms nach erfolgtem Schließen des Absperr- oder Regulierorgans dar. Außerdem ist die Linie F-F mit der Mittellinie der nachfolgenden Druckschwankungen deckungsgleich, die nach dem Schließvorgang auftreten. Somit ist die Linie F-F mit der Linie 0-0 nahezu ident.
- Messen des Abstandes B entlang der Linie F-F. Der Abstand B entspricht der halben Periode der Nachlaufwellen. Vom so erhaltenen Wert ist ein Korrekturwert f zu subtrahieren, der die Schlitzbreite des photographischen Aufzeichnungsgerätes berücksichtigt.
- Messen der Höhe H der Amplitudenwerte zweier aufeinander folgender abklingender Nachlaufwellen. Als Bezugslinie dient die Linie F-F. Ausgehend von diesen beiden Werten wird sodann das Verhältnis E berechnet:

$$E = \frac{H_j}{H_{j+1}} \quad (2.5)$$

f) Berechne

$$D = (B - f) \cdot \frac{\arctan\left(\frac{2 \cdot \pi}{\ln E}\right)}{\pi} \quad (2.6)$$

und subtrahiere den Abstand D des Punktes N . Der Punkt N ergibt sich aus dem Schnittpunkt der fallenden Flanke der Nachlaufwelle mit der Linie F-F. Der dadurch ebenfalls erhaltene Punkt M definiert das Ende des Diagramms.

Zeichnen der Versuchs-“Recoveryline“ (Begriff siehe [4]) GPM, wie in Abbildung 2.1 dargestellt.

- g) Messen der Fläche A_T mittels eines Planimeters. Die Fläche A_T wird vom aufgezeichneten Druckverlauf und von der Recoveryline begrenzt. Die so erhaltene Fläche wird sodann in eine Mehrzahl von Segmentflächen A_1, A_2, \dots, A_n unterteilt. Weiters ist für jede dieser Segmentflächen eine entsprechende Korrektur vorzunehmen. Diese entspricht dem Produkt aus dem vertikalen Anstieg des Segments und seiner tatsächlichen Breite.
- h) Der Durchfluss errechnet sich entsprechend folgender Gleichung:

$$Q = \frac{g}{s \cdot y} \cdot \frac{A_T}{F} + q_k \quad (2.7)$$

s und y sind Kalibrationskonstanten des Diagramms (der Längenmaßstab entspricht einer Zeit von 1 Sekunde und der Höhenmaßstab entspricht einer Wassersäule von 1 m)

F ist der Penstockfaktor mit dem Verhältnis L/A . L entspricht der Länge des Messbereiches und A beschreibt den Messquerschnitt der Rohrleitung.

q_k entspricht dem möglichen Leckagevolumenstrom bei geschlossenem Absperr- oder Regulierorgans

- i) Festlegen einer neuen Recoveryline. Dabei ist die Annahme zu erfüllen, dass zu einer bestimmten Zeit t_i der verbleibende Druckverlust durch nachstehende Gleichung beschrieben wird:

$$C_i = C \cdot (1 - r_i)^x \quad (2.8)$$

C ist der Druckverlust vor Beginn des Schließvorganges (Differenz zwischen den Linien 0-0 und A-A)

x ist der Exponentialfaktor von Q im Druckverlustterm ($x = 2$ für Rohrleitungen mit einer Reynolds-Zahl größer als $5 \cdot 10^6$; für geringere Reynolds-Zahlen ist x jedes Mal neu zu bestimmen)

$$r_i = \frac{a_i}{A_T + A_L} \quad (2.9)$$

$$a_i = \sum_{k=1}^i A_K \quad (2.10)$$

$$A_L = q \cdot F \cdot \frac{s \cdot y}{g} \quad (2.11)$$

- j) Berechnen eines neuen Wertes des Durchflusses entsprechend den in Punkt *h*) und *i*) beschriebenen Abläufen. Wenn sich zwei aufeinanderfolgende Werte von Q innerhalb einer Differenz von 0,1 % befinden, ist die Berechnung zu beenden. Der letzte erhaltene Wert des Durchflusses entspricht somit jenem Durchfluss, der zu Beginn des Schließvorgangs auftritt. Ist dem nicht so, ist zu Punkt *j*) zurückzukehren und der Durchfluss Q neuerlich zu berechnen.

2.1.1.3 Differenzdruckaufnehmer

Differenzdruckaufnehmer mit hohen Abtastraten erlauben es, die Druck-Zeit-Funktion genauer aufzunehmen und in weiterer Folge eine computergestützte Berechnung durchzuführen.

2.1.1.3.1 Anforderungen an das Messsystem

- a) Die Eigenfrequenz des Messsystems sollte zehn Mal größer sein als die Hauptfrequenz des Druck-Zeit-Signals.
- b) Die Ansprechzeit des Messsystems soll unter 10^{-2} s liegen.
- c) Die Linearität des Messsystems soll über den gesamten Messbereich besser als $2 \cdot 10^{-3}$ sein.
- d) Die digitale Aufzeichnung der Druck-Zeit-Funktion erfordert eine Abtastrate von mindestens 50 Hz.
- e) Während der Aufzeichnung der Druck-Zeit-Funktion darf keine Überlastung des Messsystems auftreten.
- f) Das Messsystem soll mit dem Leitungsdruck kalibriert werden, der gleich dem mittleren statischen Druck ist, der am höchsten Messquerschnitt bei Nulldurchfluss auftritt.
- g) Werden Tiefpassfilter oder Druckdämpfeinrichtungen zum Dämpfen von Hochfrequenzschwingungen eingesetzt, dürfen diese das Integral des Differenzdruckes nicht verändern.
- h) Das Datenverarbeitungssystem darf keine Fehler einbringen, die größer als 0,05 % des mittleren Differenzdruckes und größer als 1 ms sind.
- i) Das Messsystem darf nicht temperaturempfindlich sein und ist bei konstanter Temperatur zu warten, um thermische Verlagerungen und andere Probleme zu vermeiden.

2.1.1.3.2 Berechnung des Durchflusses

Die Aufnahme der Differenzdrücke erfolgt mittels eines Differenzdruckaufnehmers, der das Signal digital aufgezeichnet. Die so erhaltenen Werte werden computergestützt verarbeitet. Der Durchfluss errechnet sich sodann nach Gleichung (2.12):

$$Q = \frac{A}{\rho \cdot L} \cdot \int_0^t (\Delta p + \zeta) dt + q_k \quad (2.12)$$

2.1.2 Methode der separaten Diagramme

2.1.2.1 Funktionsweise

Bei dieser Variante der Druck/Zeit-Methode werden die Druckänderungen an zwei Messquerschnitten der Rohrleitung getrennt voneinander gemessen und getrennt aufgezeichnet (siehe Version 2 der Abbildung 1.8). Zusätzlich zu den in Abschnitt 2.2.1 angeführten Anforderungen, gelten noch weitere Anforderungen. So soll der Abstand L der beiden Messquerschnitte in der Rohrleitung mindestens 50 m betragen. Außerdem soll der Penstockfaktor F zwischen dem Wasserschloss und dem nachgelagerten Messquerschnitt mindestens den vierfachen Wert des Penstockfaktors aufweisen, der zwischen dem Wasserschloss und dem vorgelagerten Messquerschnitt vorliegt.

Es ist ebenso möglich, nur einen Messquerschnitt in der Rohrleitung heranzuziehen und als zweiten Messpunkt den Pegel des Oberwasserspeichers zu verwenden (siehe Version 3 der Abbildung 1.8). Diese Messmethode kann jedoch nur angewendet werden, wenn sich im Triebwasserweg kein Wasserschloss befindet und die Länge der Rohrleitung, welche für die Berechnung des Penstockfaktors herangezogen wird, 2 % der Gesamtlänge nicht überschreitet.

Die Funktionsweise ist ansonsten mit dem in Abschnitt 2.1.1 beschriebenen Ablauf ident.

Die verwendete Ausrüstung ist in Abbildung 2.2 veranschaulicht und umfasst folgende Komponenten:

- je einen Druckaufnehmer pro Messquerschnitt,
- eine Kalibriereinrichtung zur Kalibration der Druckaufnehmer,
- einen Zeitmesser,
- Pegelmessgeräte zur Messung des Pegelstandes und der Veränderung des Pegels im Wasserschloss,
- ein Aufnahmegerät zur Aufzeichnung sämtlicher Messwerte

Folgendes ist bei jeder Messung aufzuzeichnen:

- die Kalibrierungsdiagramme der verwendeten Druckaufnehmer vor und nach dem Schließen des Absperr- oder Regulierorgans
- das Druck-Zeit-Diagramm vor, während und nach dem Schließen. Nach dem Schließen sollen zumindest vier weitere Druckwellen aufgezeichnet werden.

- der Wasserschlosspegelstand über der Zeit oder der stationäre Pegel nach dem Schließen, für den Fall, dass nur ein Messquerschnitt verwendet wird.

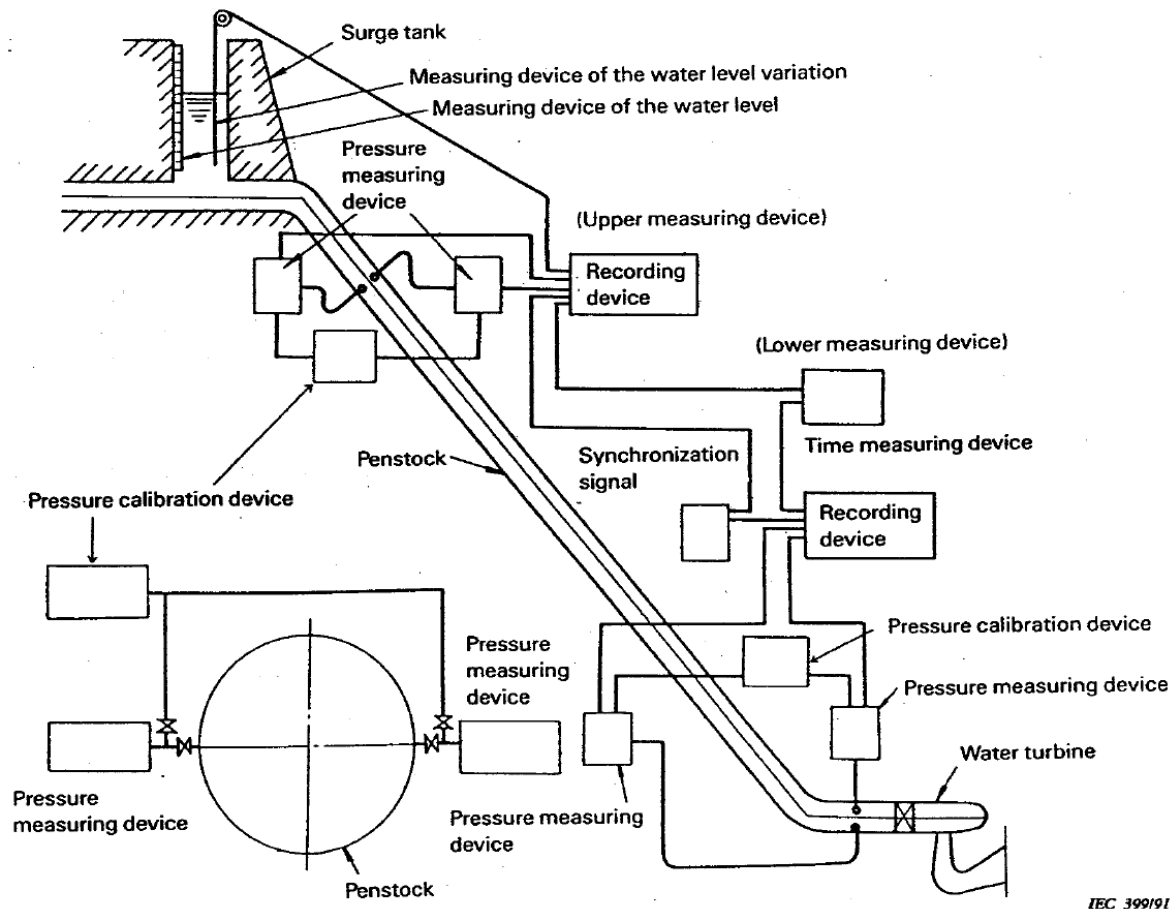


Abbildung 2.2: Anordnung des Messaufbaus zur Druck-Zeit-Messung mittels der Methode der separaten Diagramme [4]

2.1.2.2 Berechnung des Durchflusses

- a) **Planimetrie-Methode:** Der Durchfluss ist zufolge folgender Formel zu berechnen:

$$Q = \frac{g}{F} \cdot \left(\frac{A_{Td}}{y_d \cdot s_d} - \frac{A_{Tu}}{y_u \cdot s_u} \right) + q_k \quad (2.13)$$

Die dabei verwendeten Symbole sind denen aus Abschnitt 2.1.1.2.1 äquivalent. Der Index u bezieht sich auf das Diagramm des vorgelagerten Messquerschnitts und der Index d auf das des nachgelagerten Messquerschnitts.

Die Gesamtnettoflächen A_{Tu} und A_{Td} der Druck-Zeit-Diagramme der beiden Messquerschnitte werden unter Anwendung der Planimetrie ermittelt. Dem vorangestellt ist die Ermittlung der Recoveryline zur Berechnung der Druckverluste und der Pegelveränderung im Wasserschloss, sofern eines vorhanden ist. Die Berechnung der Druckverluste erfolgt auf die gleiche Art und Weise, wie in Abschnitt 2.1.1.2.1 beschrieben.

- b) **Numerische Methode:** Um die Anwendung der Planimetrie zu vermeiden, existieren Computerprogramme, die es ermöglichen, die Recoveryline zu bestimmen. Darüber hinaus lässt sich auf diese Art und Weise die Gesamtnettofläche und damit der Volumenstrom ermitteln. Dafür ist es erforderlich, dass das Diagramm in ca. 30 Segmente unterteilt wird. Die Unterteilung erfolgt derart, dass jedes Segment demselben Zeitschritt entspricht, wobei die Zeitschritte im Falle beider Diagramme (geodätisch höherer und tieferer Messquerschnitt) identisch sind. Die Berechnung ist für eine gewisse Anzahl an Berechnungsdurchläufen zu wiederholen. Dies ist so lange durchzuführen, bis der Unterschied zweier aufeinanderfolgender Volumenströme kleiner als 0,1 % ist.

2.2 Allgemeine Anforderungen

2.2.1 Gültigkeitsbedingungen

Die Anwendung der Druck/Zeit-Methode setzt folgende allgemein gültige Bedingungen voraus:

- a) Zwischen den beiden Druckmessquerschnitten soll die Oberfläche geschlossen sein.
- b) Im Falle des geschlossenen Absperr- oder Regulierorgans sollte der Leckagevolumenstrom 5 % des gemessenen Durchflusses nicht übersteigen. Dabei soll die Messung des Leckagevolumenstroms mit einer Genauigkeit von 0,2 % des gemessenen Durchflusses durchgeführt werden.
- c) Im Falle mehrerer Zuflüsse hat die Aufnahme des Druck-Zeit-Signals für alle Zuflüsse gleichzeitig und unabhängig voneinander zu erfolgen.
- d) Innerhalb des Messabschnittes soll die Rohrleitung einen geraden Verlauf mit konstantem Rohrleitungsquerschnitt aufweisen. Dabei ist darauf zu achten, dass keine signifikanten Unregelmäßigkeiten auftreten. Als Mindestentfernung der beiden Messquerschnitte sind 10 m nicht zu unterschreiten.
- e) Die Strömungsquerschnitte der Rohrleitung sowie die Länge des Messabschnittes zwischen den beiden Strömungsquerschnitten sind mit ausreichender Genauigkeit zu ermitteln. Diese sind erforderlich, um den Penstockfaktor F zu bestimmen. Dafür ist eine Genauigkeit von mindestens 0,2 % gefordert. Konstruktionszeichnungen sollen dabei ausschließlich zur Kontrolle der vor Ort aufgenommenen Maße herangezogen werden.
- f) Die Summe des Druckverlustes zwischen den beiden Messquerschnitten und des dynamischen Drucks soll 20 % der durchschnittlichen Änderung des Differenzdrucks, der während des Schließens des Absperr- oder Regulierorgans aufgezeichnet wurde, nicht überschreiten. Die oben angeführten Drücke beziehen sich auf die bei maximalen Durchfluss gemessenen Werte.
- g) Der Differenzdruckaufnehmer ist nach Möglichkeit so anzuordnen, dass die Messleitungen zum geodätisch höher gelegenen und zum geodätisch tiefer gelegenen Strömungsquerschnitt nahezu die gleiche Länge aufweisen.
- h) Druckdiagramme in denen die während des Betriebs ermittelte Linie A-A über der statischen Linie 0-0 liegt, sind als zweifelhaft zu betrachten.

- i) Jede Durchführung der Durchflussmessung erfordert die Messung der Wassertemperatur mit einer Genauigkeit von ± 1 K.

2.2.2 Anforderungen an die Druckmessstellen

Allgemein gilt, dass an jedem Messquerschnitt – unabhängig von dessen geometrischer Form – zumindest zwei Paar gegenüberliegender Druckmessstellen vorzusehen sind. Diese sind derart zu verteilen, dass sie eine Ebene aufspannen, die normal auf die Rohrleitungsachse ausgerichtet ist. Unter optimalen Bedingungen kann die Anzahl der Druckmessstellen reduziert werden.

Im Falle einer kreisförmigen Rohrleitung sind die vier Druckmessstellen über den Umfang im rechten Winkel zueinander anzuordnen. Dabei ist darauf zu achten, dass keine Druckmessstelle im Bereich des höchsten und des tiefsten Punktes des Messquerschnitts angebracht wird. Der dieser Forderung zu Grunde liegende Hintergrund ist jener, dass am höchsten Punkt des Rohrleitungsquerschnittes eventuell Luftblasen aufsteigen können. Am tiefsten Punkt besteht die Gefahr der Ablagerung von mit der Strömung mittransportierten Verunreinigungen, wie zum Beispiel Sand.

Erfolgt die Anwendung bei Rohrleitungen mit rechteckigem Querschnitt, sollten die Druckmessstellen nicht im Bereich der Ecken platziert werden. Idealerweise erfolgt deren Anbringung an den Viertelpunkten der senkrechten Wände. Ist die Anordnung an der Decke bzw. am Boden der Rohrleitung unumgänglich, sind entsprechende Vorkehrungen zu treffen, um Störungen durch Luftblasen und Verunreinigungen zu vermeiden.

Einzelne Mittelwerte der Druckmessungen in einem Messquerschnitt sollten sich nicht um mehr als 0,5 % der spezifischen hydraulischen Energie ($E = g \cdot H$) der Maschine oder 20 % der spezifischen kinetischen Energie unterscheiden. Die Berechnung der beiden Größen erfolgt aus der mittleren Strömungsgeschwindigkeit, die im jeweiligen Messquerschnitt vorherrscht. Sind die soeben beschriebenen Anforderungen nicht erreichbar oder ist es nicht möglich, einen defekten Druckaufnehmer auszutauschen, so ist der fehlerhafte Druckaufnehmer aus der Messung auszuschließen oder ein anderer Messquerschnitt auszuwählen.

Die konstruktive Ausführung der Druckmessstellen soll, wie in Abbildung 2.3 dargestellt, erfolgen. Es ist empfehlenswert, die Druckmessstellen aus rostfreiem Material zu fertigen. Deren Einbringung erfolgt direkt in der Wand der Rohrleitung.

Die zylindrische Bohrung der Druckmessstelle soll einen Durchmesser von 3 mm bis 6 mm aufweisen. Die minimale Länge der Bohrung darf dabei zumindest den zweifachen Bohrungsdurchmesser nicht unterschreiten. Die Ausrichtung der Bohrung zur Wand der Rohrleitung hat senkrecht zu erfolgen. Außerdem ist darauf zu achten, dass die Bohrung gratfrei ist und auch sonst keine Unregelmäßigkeiten aufweist. Treten Unregelmäßigkeiten an den Druckmessbohrungen auf, kann dies zur Verfälschung des tatsächlich vorherrschenden Drucks führen. Aus diesem Grund sollte die Kante der Bohrung zur Rohrleitungsinnenseite mit einem Radius $r \leq d/4$ ausgeformt werden.

Die Oberfläche der Rohrleitung soll im Bereich der Druckmessbohrung glatt und parallel zur Strömung ausgerichtet sein. Diese Bedingungen gelten für den Nahbereich um die Druckmessbohrung. Das umfasst zumindest 300 mm stromaufwärts und 100 mm stromabwärts. Im Falle von Betonrohrleitungen sind die Druckmessstellen im Zentrum einer ebenen Platte mit mindestens 300 mm Durchmesser anzuordnen. Als mögliche Plattenwerkstoffe seien nichtrostender Stahl und Bronze genannt. Die Platte ist wandbündig in den Beton einzuarbeiten. In allen genannten Fällen ist darauf zu achten, dass die Druckmessstellen mindestens einen Abstand von $2 D$ zu allen signifikanten Unregelmäßigkeiten der Rohrleitung, wie zum Beispiel zu Krümmern, aufweisen.

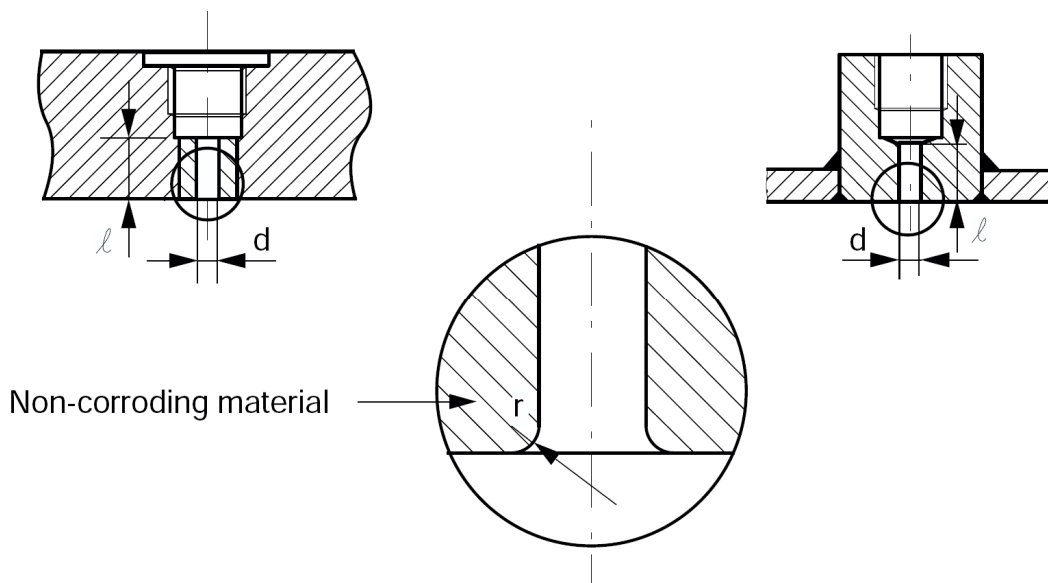


Abbildung 2.3: Konstruktive Gestaltung der Druckmessstelle [21]

2.2.3 Anforderungen an die Messleitungen

Die Druckmessstellen jedes Messquerschnittes sollen mittels Ventile zu einer gemeinsamen Ringleitung zusammengeführt werden, an welcher der Druckaufnehmer angeschlossen ist. Um die durch die Reibung verursachte Dämpfung zu minimieren, sollen alle Anschlussleitungen so kurz wie möglich ausgeführt werden. Außerdem sind die Anschluss- als auch die Ringleitung aus einem nicht elastischen Werkstoff zu fertigen und sollen einen ausreichenden Durchmesser aufweisen. Als Richtwerte für Anschluss- und Ringleitung werden 18 mm für die Verwendung von Flüssigkeitsmanometern und 8 mm für die Verwendung von Druckaufnehmern empfohlen.

Alle Druckverbindungen und Rohrleitungen sind auf Dichtheit zu überprüfen. Darüber hinaus ist dafür Sorge zu tragen, dass die Rohrleitungen zwischen den Druckmessstellen und dem Druckaufnehmer frei von Luft sind. Diese Überprüfungen sind periodisch durchzuführen, idealerweise vor jeder Messung.

2.2.4 Überprüfung der Druckmessung

Um die geforderte Genauigkeit des aufgezeichneten Druck-Zeit-Diagramms sicher zu stellen, sollen die Strömungsbedingungen im Messquerschnitt derart sein, dass die Differenz zwischen dem gemessenen Druck an einer beliebigen Druckmessstelle und dem Durchschnitt des gemessenen Drucks an allen Druckmessstellen 20 % des dynamischen Drucks nicht überschreitet. Außerdem soll für ein und denselben Messquerschnitt folgendes gelten. Der an einem beliebigen Paar von gegenüberliegenden Druckmessstellen gemessene gemittelte Druckwert darf sich von dem gemittelten Druckwert, der mit einem anderen Paar von gegenüberliegenden Druckmessstellen gemessen wird um nicht mehr als 10 % des dynamischen Drucks unterscheiden.

Dadurch kann die Berücksichtigung der Geschwindigkeitsverteilung, die Länge der geraden Rohrleitung und der Zustand der Wand im Bereich der Druckmessstellen erforderlich werden. Tritt bei einer Druckmessstelle ein Fehler auf, soll die Ursache der Unstimmigkeit bestimmt und beseitigt werden. Ist das nicht möglich, ist dieser Messpunkt aus der Messung auszuschneiden. Es sollten jedoch zumindest zwei Druckmessstellen pro Messquerschnitt verwendet werden.

Die oben angeführten Überprüfungen sind vor Messbeginn durchzuführen. Die dafür notwendigen Aufbauten sind im Anschluss an die Überprüfung unverzüglich abzubauen, um den eigentlichen Messaufbau nicht zu behindern.

2.3 Messunsicherheit

Die Druck/Zeit-Methode erfordert Messinstrumente mit einer entsprechend hohen Genauigkeit sowie dem im Umgang mit den Messinstrumenten geschulten Personal. Dieses soll in der Lage sein, die jeweiligen Tests durchzuführen sowie die sich daraus ergebenden Berechnungen. Außerdem ist die Unsicherheit des Messergebnisses abzuschätzen.

Unter Optimumbedingungen ist für den Fall der Verwendung einer computergestützten Differenzdruckmessung eine Genauigkeit von $\pm 1,5 \%$ bis $\pm 2 \%$ mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % erreichbar. Im Falle aller anderen Messaufbauten ist eine Genauigkeit von $\pm 1,8 \%$ bis $\pm 2,3 \%$ erzielbar.

2.4 Anforderungen an die Druckmessinstrumente nach IEC 62006

Flüssigkeitsmanometer und Eigengewichtsmanometer sollten als primäre Messinstrumente eingesetzt werden. Eigengewichtsmanometer oder ihre modernen Äquivalente können zur Kalibration der Druckaufnehmer eingesetzt werden.

2.4.1 Druckaufnehmer

Druckaufnehmer sind elektromechanische Geräte, die die mechanischen Effekte, die durch das Einwirken eines Druckes entstehen, in elektrische Signale umwandeln. Der Messbereich der Druckaufnehmer richtet sich nach den Messbereich der jeweiligen Anwendung.

Nachstehend sind einige Vorteile von Druckaufnehmern angeführt:

- vereinfachte Integration in elektrische Datenerfassungssysteme
- ermöglicht eine rasche und genaue Antwort auf Grund des vernachlässigbaren Volumenstroms entlang der Druckmessstellen
- einfache Ermittlung des Mittelwertes schwankender Differenzdrücke
- ermöglicht die Aufzeichnung instationärer Drücke unter Verwendung gewöhnlicher elektrischer Ausrüstung

Druckaufnehmer sollen die folgenden Merkmale aufweisen:

- angemessene Kalibrierstabilität
- hohe Reproduzierbarkeit und vernachlässigbare Hysterese
- geringe Nullpunktverschiebung und geringe Temperaturempfindlichkeit
- die zur Kalibration der Druckaufnehmer verwendete Methode soll valid sein

Es gibt einen großen Bereich an Differenzdruckaufnehmern, die verwendet werden können, um den folgenden Wert direkt aus einer einzigen Messung zu erhalten: $(p_1 - p_2)/\rho \cdot g + (z_1 - z_2)$. Jedoch sind die folgend angeführten möglichen Probleme zu beachten:

- Leittechnik: Die Verwendung von Differenzdruckaufnehmern kann zu Fehlern führen, wenn sich die Flächen der beiden Messquerschnitte voneinander unterscheiden.
- Abnahmeversuch: Die Ursache möglicher Druckveränderungen kann nicht ermittelt werden.

2.4.2 Federmanometer

Diese Art von Druckmessern verwendet den mechanischen Anschlag eines einfachen Spiralschleifenschlauchs oder einer Messblende um den Druck anzuzeigen. Der Messbereich dieses Druckaufnehmers ist unter Beachtung des zu messenden Druckbereichs zu wählen. Das kann bewerkstelligt werden, indem zwischen den beteiligten Parteien eine Übereinkunft getroffen wird. Das ist unter der Voraussetzung zulässig, dass der Druckaufnehmer im optimalen Messbereich (in der Regel zwischen 60 % und 100 % der Skaleneinteilung) eine genügende Genauigkeit aufweist und die Kalibrierung aufrecht ist.

2.4.3 Pegelmessgeräte

Jener Bereich, an dem die Pegelmessung am freien Spiegel durchgeführt wird, ist so auszuwählen, dass die beiden folgenden Bedingungen erfüllt sind.

- Die Wasseroberfläche soll ruhig und frei von Störungen sein. Abschnitte in denen das Profil der Strömungsgeschwindigkeit zum Beispiel durch Krümmungen oder andere Störeinflüsse gestört ist, sollen vermieden werden.
- Die Fläche die zur Bestimmung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit des Wassers verwendet wird, soll genauestens definiert und einfach zu ermitteln sein.

Pegelstände werden im Allgemeinen von einem Referenzniveau z_M aus gemessen. Die in Frage kommenden Methoden sind:

- Plattenmessgerät
- Haken- und Stechpegelmessgerät
- Schwimmermessgerät
- Pegellatte
- Ultraschallmessgerät

Die oben angeführten Methoden sind nur im Falle eines frei zugänglichen Pegels anwendbar. Ist der Pegel nicht frei zugänglich, können folgende Messgeräte verwendet werden:

- Flüssigkeitsmanometer
- untergetauchte Druckaufnehmer
- Messgeräte, die Druckluft verwenden

2.4.3.1 Messunsicherheit der Pegelmessverfahren

In Tabelle 2-1 sind die absoluten systematischen Messunsicherheiten, die an Pegelmesseinrichtungen bei ruhigem Wasserspiegel und bei Strömungsgeschwindigkeiten unter 1,5 m/s mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % auftreten dargestellt.

Tabelle 2-1: Systematische Messunsicherheit der Pegelmessverfahren [4]

Messverfahren	Messunsicherheit
Plattenmessgeräte mit feststehendem Maßstab	$\pm 0,01 \text{ m bis } \pm 0,04 \text{ m}$
Schwimmermessgeräte	$\pm 0,005 \text{ m bis } \pm 0,015 \text{ m}$
Haken- und Stechpegelmessgeräte	$\pm 0,002 \text{ m bis } \pm 0,01 \text{ m}$
Einperlmessgeräte	$\pm 0,005 \text{ m bis } \pm 0,015 \text{ m}$
Pegelmesssonde	$\pm (2 \text{ bis } 6) \cdot 10^{-3} z_{\max} \text{ m}$

Im Falle turbulenter Strömung und einer Strömungsgeschwindigkeit über 1,5 m/s, wie es beispielsweise am Austritt aus dem Turbinensaugrohr der Fall ist, können die Unsicherheiten des Messverfahrens beträchtlich höher sein.

Weitere Verfahren, wie zum Beispiel die Ultraschallmessung, kommen so lange als Pegelmessverfahren in Frage, so lange sie die geforderte Genauigkeit erfüllen.

3 Einflussgrößen bei der Druck/Zeit-Methode

3.1 Penstockfaktor

Beim Penstockfaktor F handelt es sich um einen Geometriebeiwert. Dieser drückt das Verhältnis der Länge L der Rohrleitung zu deren Querschnittsfläche A im Messabschnitt aus. Die Definition des Penstockfaktors resultiert aus der instationären Bernoulli-Gleichung (siehe Abschnitt 1.2.2).

$$F = \int_0^L \frac{dx}{A(x)} \quad (3.1)$$

Obige Gleichung lässt sich für den Fall einer geraden Rohrleitung mit konstantem Strömungsquerschnitt folgendermaßen anschreiben.

$$F = \sum_{i=1}^k \frac{l_i}{A_i} \quad (3.2)$$

Befinden sich im Messabschnitt der Rohrleitung Unregelmäßigkeiten, beispielsweise in Form von Krümmern, so besitzt die Gleichung (3.2) keine Gültigkeit mehr. Der Grund liegt in der Veränderung des Geschwindigkeitsprofils entlang des Messabschnittes. Die Autoren Adamkowski, Janicki und Krzemianowski regen in diesem Fall zur Ermittlung des Penstockfaktors das folgende sechstufige Vorgehen (siehe Abbildung 3.1) an: [19]

Schritt 1: Bestimmen der Randbedingungen. Diese umfassen die Geometrie des Rohrleitungssystems sowie den auftretenden bzw. zu erwartenden Volumenstrom. Zusätzlich ist ein entsprechendes Berechnungsgebiet festzulegen.

Schritt 2: Das ausgewählte Berechnungsgebiet ist sodann in n numerische Querschnitte zu unterteilen. Diese Subquerschnitte (i -te Strömungsquerschnitte; $i = 1, 2, \dots, n$) sind jeweils normal zur Achse situiert.

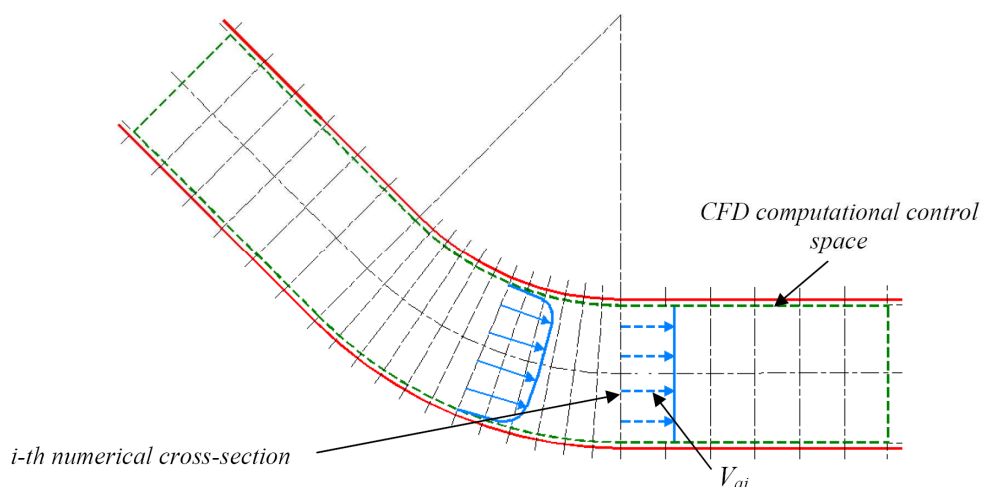


Abbildung 3.1: Krümmersegment mit markiertem Berechnungsgebiet [19]

Schritt 3: Die Geschwindigkeitsverteilung in den einzelnen Elementen der Rohrleitung innerhalb des Berechnungsgebietes ist zu simulieren. Dazu soll eine entsprechende Computersoftware verwendet werden.

Schritt 4: Berechnen der Mittelwerte der Strömungs-Normalgeschwindigkeit V_{ai} für jeden i -ten Strömungsquerschnitt aus den zuvor erhaltenen CFD-Ergebnissen und der Annahme der gleichen kinetischen Energie, die sich aus der simulierten und der gleichmäßigen Strömungsgeschwindigkeitsverteilung ergibt. Dazu gilt der nachfolgend angeführte Zusammenhang:

$$\dot{e}_{k\,CFD\,i} = \dot{e}_{k\,a\,i}; \quad \varrho = const. \quad (3.3)$$

$$\dot{e}_{k\,CFD\,i} = \iint_{A_i} \frac{1}{2} \cdot V_i^2 \cdot [\varrho \cdot V_i \cdot dA] = \frac{1}{2} \cdot \varrho \cdot \iint_{A_i} V_i^3 dA \quad (3.4)$$

$$\dot{e}_{k\,a\,i} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot V_{ai}^2 = \frac{1}{2} \cdot \varrho \cdot A_i \cdot V_{ai}^3; \quad \dot{m} = \varrho \cdot V_{ai} \cdot A_i \quad (3.5)$$

↓

$$V_{ai} = \left(\frac{\iint_{A_i} V_i^3 dA}{A_i} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.6)$$

V_i ist die im i -ten Strömungsquerschnitt normalstehende Axialkomponente der Strömungsgeschwindigkeit.

Schritt 5: Basierend auf der so erhaltenen Strömungsgeschwindigkeit wird unter Anwendung der Kontinuitätsgleichung auf den äquivalenten Strömungsquerschnitt A_{ei} eines jeden numerischen Strömungsquerschnittes geschlossen.

$$A_{ei} = \frac{Q_j}{V_{ai}}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.7)$$

Schritt 6: In weiterer Folge ist für den betrachteten Volumenstrom Q_j durch jedes untersuchte Rohrleitungselement der äquivalente Wert des Faktors F_{eQj} nach folgender Formel zu berechnen:

$$F_{eQj} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{l_{i \rightarrow i+1}}{0,5 \cdot (A_{ei} + A_{ei+1})} \quad (3.8)$$

Darin entspricht $l_{i \rightarrow i+1}$ der Entfernung zwischen den mittleren Strömungsgeschwindigkeiten des numerischen Strömungsquerschnittes i und $i+1$. A_{ei} und A_{ei+1} beschreiben die äquivalenten Flächen der berechneten Querschnitte i und $i+1$.

Die Berechnung ist für mehrere Volumenströme Q_j mit $j=1, 2, \dots, m$ zwischen Null und dem maximalen Volumenstrom durchzuführen. Daraus wird sodann der mittlere äquivalente Penstockfaktor F_e gebildet, der für die weitere Berechnung in der Druck/Zeit-Methode zu verwenden ist.

$$F_e = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m F_{eQj} \quad (3.9)$$

Die der Berechnung zu Grunde liegende Annahme ist, dass die Veränderungen der Geschwindigkeitsprofile sowohl im stationären als auch im instationären Betriebsfall gleich sind. Diese Annahme ist zulässig, sofern das Absperr- oder Regulierorgan "langsam" geschaltet und ein entsprechender Druckstoß vermieden wird.

Durch die Verwendung des mittleren äquivalenten Penstockfaktors F_e anstelle des geometrischen Penstockfaktors F kann die Genauigkeit der Druck/Zeit-Methode gesteigert werden. Ein Vergleich der Berechnung des Penstockfaktors unter Berücksichtigung der Geschwindigkeitsverteilung gegenüber einer bloßen Geometrieberücksichtigung liefert, beispielsweise für die in Abbildung 3.2 dargestellte Rohrleitungsgeometrie, im Mittel einen relativen Fehler von 0,45 % und führt somit zu einer Überschätzung des Volumenstroms in diesem Ausmaß. Der relative Fehler Δf ist bei kleinen Volumenströmen größer, nimmt mit zunehmenden Volumenströmen ab und berechnet sich mit nachstehender Gleichung:

$$\Delta f = \frac{F_e - F}{F} \quad (3.10)$$

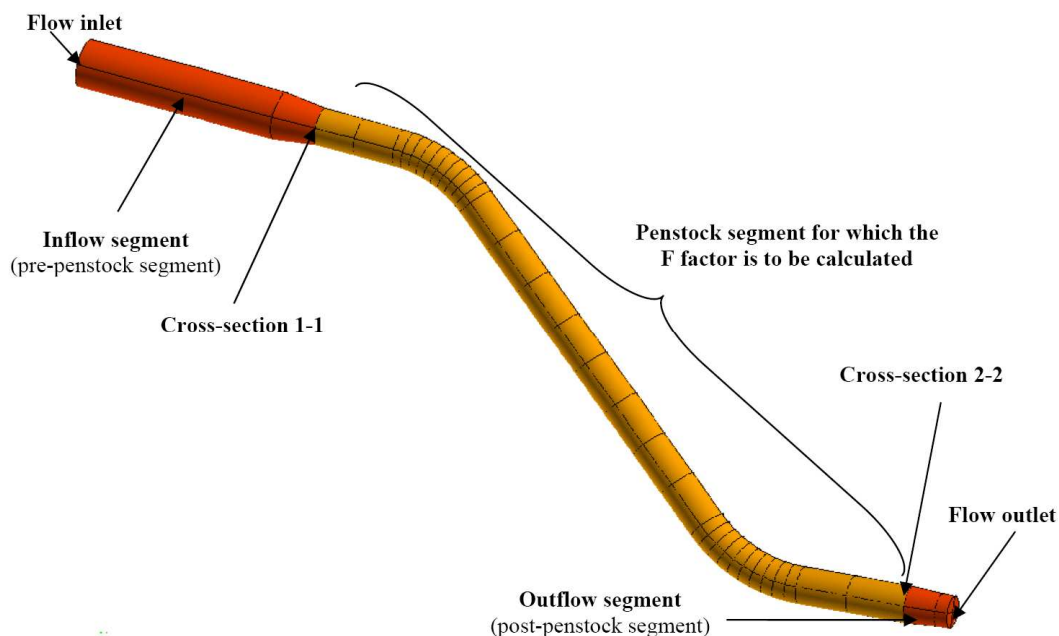


Abbildung 3.2: Beispielhaft untersuchte Rohrleitungsgeometrie [19]

3.2 Leckagevolumenstrom

Ein Leckagevolumenstrom tritt auf, wenn das zur Druck-Zeit-Messung eingesetzte Absperr- oder Regulierorgan im geschlossenen Zustand nicht vollständig dicht ist. Das ist durchwegs bei Maschinensätzen mit Leitapparat der Fall. Tritt ein Leckagevolumenstrom auf, ist es erforderlich, dessen Größe festzustellen. Dieser Schritt ist notwendig, um das vorläufige Ergebnis der Volumenstrommessung aus der Druck-Zeit-Messung zu korrigieren. Grundsätzlich kommen zur Bestimmung des Leckagevolumenstroms folgende Möglichkeiten in Betracht:

- Die volumetrische Feststellung des Leckagevolumenstroms bedingt ein dichtes Absperrorgan, beispielsweise am Beginn der Rohrleitung (Rohrbruchklappe). Durch die Verwendung eines Druckaufnehmers wird der statische Druck in der Rohrleitung erfasst und die ausschließlich vom Leckagevolumenstrom verursachte Veränderung des Pegelstandes aufgezeichnet. Die Steigung der Geraden in Abbildung 3.3 ist ein Maß für die Sinkgeschwindigkeit des Pegels in der Rohrleitung und ein Indikator für den Leckagevolumenstrom. [23]

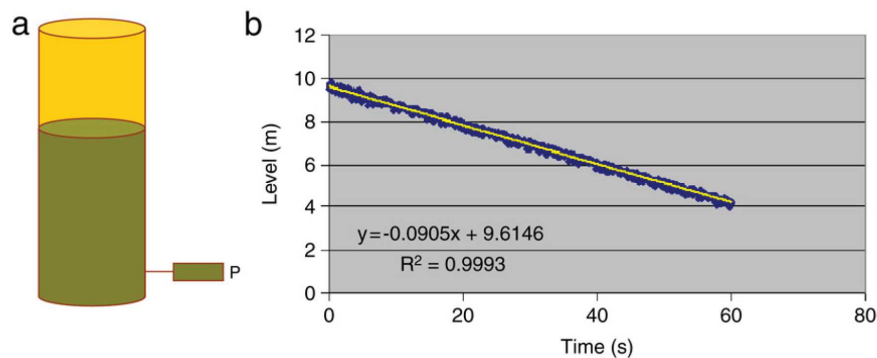


Abbildung 3.3: Leckagevolumenstrommessung in einer Rohrleitung [23]

- Eine weitere Möglichkeit zur Ermittlung des Leckagevolumenstroms besteht in der Messung des Durchflusses in einer Bypassleitung durch Einbau eines kleinen Durchflussmessgerätes (siehe Abbildung 3.4). Dieser Zugang ist nur zulässig, wenn sichergestellt ist, dass der Reibungseinfluss des Bypasses vernachlässigbar ist. [23] Um diese Messmethode anwenden zu können, muss sich der Bypass an einem dichten Absperrorgan, welches dem zu untersuchenden Regulierorgan vorgelagert ist, befinden.

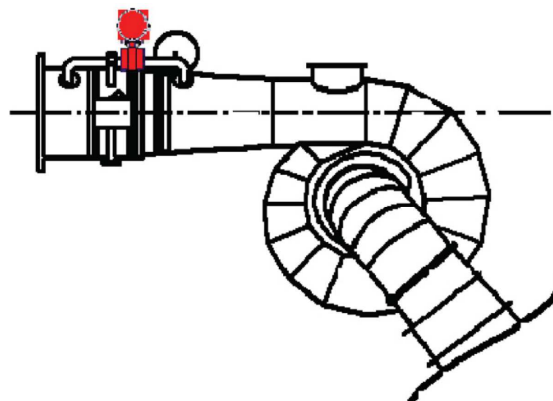


Abbildung 3.4: Leckagevolumenstrommessung in einem Bypass [23]

- Eine Feststellung des Leakagevolumenstroms mit Hilfe der Druck/Zeit-Methode [24] setzt voraus, dass vor dem undichten Regulierorgan ein dichtes Absperrorgan positioniert ist, wie beispielsweise eine Drosselklappe oder ein Kugelschieber. Der mit dem Schließen des Regulierorgans einhergehende Druckverlauf wird mittels der Druck-Zeit-Messung aufgenommen. Verbleibt zufolge der Undichtheit des Regulierorgans ein Leakagevolumenstrom, so kann dieser durch Schließen des vorgelagerten dichten Absperrorgans auf Null reduziert werden. Der daraus resultierende Druckverlauf wird ebenfalls mit der Druck-Zeit-Messung erfasst. Entsprechendes Aufintegrieren des gesamten Druckverlaufes liefert dann den vor Beginn des Schließens vorhandenen Volumenstrom (siehe Abbildung 3.5). [25]

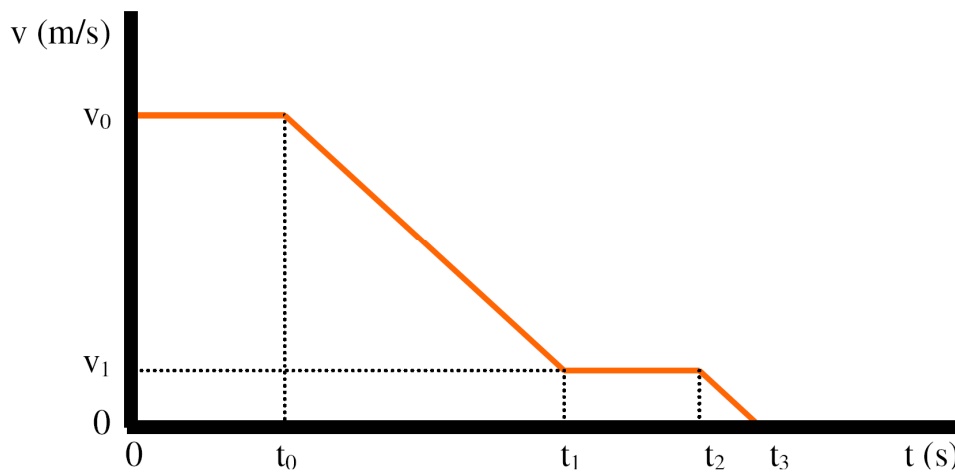


Abbildung 3.5: Zweistufige Geschwindigkeitsabnahme [25]

3.3 Reibungseinfluss

Die Anwendung der Druck/Zeit-Auswertung beruht auf der Annahme eines quasi-stationären Druckverlaufes während des Schließens des Absperr- oder Regulierorgans. Dabei stützt sich die Berechnung auf einem Reibungsbeiwert, der aus dem vor Beginn des Schließens vorherrschenden Volumenstrom, errechnet wird. Dieser Reibungsbeiwert wird sodann während des gesamten Schließvorganges als konstant betrachtet und gilt für raue Rohrleitungen auch in guter Näherung.

Das Schließen des Absperr- oder Regulierorgans verursacht jedoch tatsächlich einen instationären Vorgang. Um den Unterschied zwischen dem tatsächlichen Volumenstrom und dem nach der Druck/Zeit-Methode berechneten Durchfluss zu klären, wurde eine Studie durchgeführt und drei verschiedenen Reibungssituationen (konstant, quasi-stationär und instationär) untersucht. Im "konstanten" Fall wird der aus dem anfänglichen Volumenstrom erhaltene Reibungsbeiwert für das gesamte Berechnungsverfahren beibehalten. Der quasi-stationäre Reibungsbeiwert wird zu jedem Zeitpunkt aus dem tatsächlichen Volumenstrom aktualisiert. Der instationäre Reibungsbeiwert wird anhand eines numerischen Modells berechnet. Abbildung

3.6 zeigt das Studienergebnis der drei unterschiedlichen Reibungszustände in einer Rohrleitung. [26]

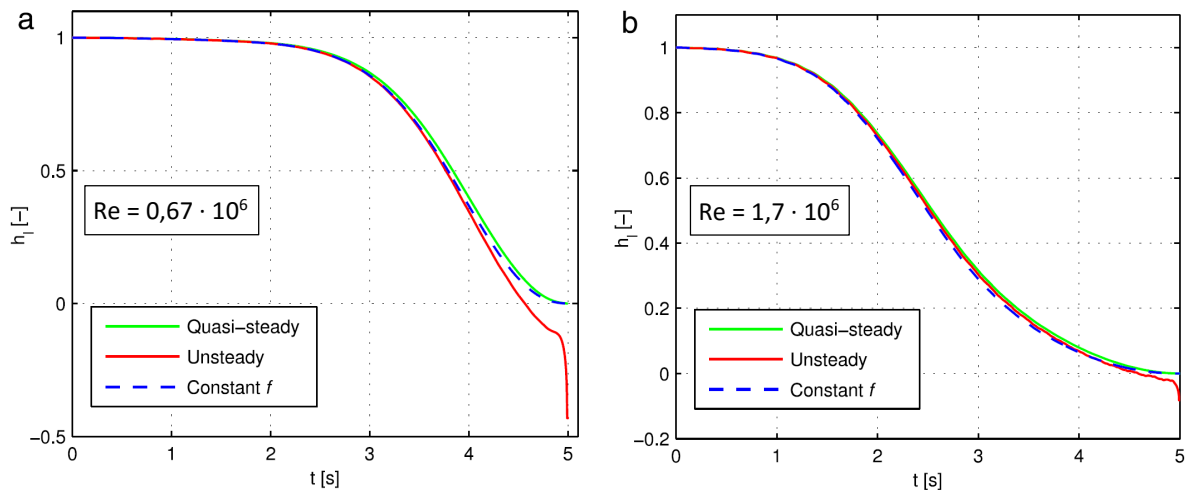


Abbildung 3.6: Druckverluste in einer Rohrleitung für drei unterschiedliche Reibungszustände [26]

In Abbildung 3.6 (Graphik a) ist das Verhalten für $Re = 0,67 \cdot 10^6$ und in Abbildung 3.6 (Graphik b) das Verhalten für $Re = 1,7 \cdot 10^6$ dargestellt.

Die Untersuchung beruht auf der Kombination von numerischen Simulationen und Laborexperimenten und führt zum Ergebnis, dass die Genauigkeit des Verfahrens auf Basis des instationären Reibungsbeiwertes im Vergleich mit einem konstanten Reibungsbeiwert um bis zu 0,4 % gesteigert werden kann. Der Unterschied der beiden Berechnungsmethoden folgt einem systematischen Fehler. Dieser wird aus der Abweichung vom Mittelwert mittels einer t-Verteilung bei einem Konfidenzniveau von 95 % errechnet. [26] Diese Ergebnisse beruhen auf einer von Jonsson an der NTNU durchgeführten Messreihe.

Das Ergebnis zeigt, dass die quasi-stationäre Berechnungsmethode uneingeschränkte Gültigkeit besitzt, dass aber hinsichtlich der instationären Reibungsbetrachtung noch Optimierungspotential gegeben ist.

3.4 Messunsicherheit

3.4.1 Systematische Messunsicherheit

Die systematische Messunsicherheit beschreibt jenen Messfehler, der sich bei einer wiederholt durchgeführten Messung einstellt. Die Abweichung vom tatsächlichen Wert ist jedoch nicht feststellbar. Die systematische Messunsicherheit weist stets einen konstanten Betrag mit einem bestimmten Vorzeichen auf. Das Ergebnis ist also eine immer zeitlich gleichlaufende Differenz zum wahren Wert. [27]

Die systematische Messunsicherheit beschreibt also jene Unsicherheit, die aus der Druck-Zeit-Messung herrührt. Als mögliche Grundlage wird auf die IEC 62006 Bezug genommen, die auf nachstehende Einflussfaktoren hinweist: [28]

- a) Geometrie des Triebwasserwegs
 - b) Stationäre Bedingungen
 - c) Instationäre Bedingungen
 - d) Messunsicherheit aus dynamischen Druckanteil
 - e) Messunsicherheit aus Reibungsanteil
 - f) Druckaufnehmer und Datenerfassung
 - g) Leckagevolumenstrom nach dem Schließen des Regulierorgans
- a) Die Ermittlung der systematischen Messunsicherheit resultierend aus der Geometrie des Triebwasserwegs erfolgt auf Grundlage der entsprechenden Konstruktionszeichnungen. Zu berücksichtigen ist dabei die Geometrie des gesamten Messbereichs. Tabelle 3-1 zeigt geometriebedingte Unsicherheitsfaktoren für unterschiedliche Rohrleitungssegmente.

Tabelle 3-1: Absolute Messunsicherheiten der Einzelsegmente einer Rohrleitung [28]

Rohrleitungssegment	Systematischer Fehler f_F [%]
Einlaufbauwerk (trichterförmig)	$\pm 5 - 20$
Rohrleitungsübergang rechteckig zu rund	± 1
Krümmen	± 1
Konus	$\pm 0,5$
Gerades Rohr	$\pm 0,3$

Die Berechnung des relativen Fehlers eines jeden Segments $\Delta f_{penst,i}$ erfolgt mit nachstehender Formel:

$$\Delta f_{penst,i} = \frac{F_i}{\sum_{n=1}^i F_n} \cdot f_{F_i} \quad (3.11)$$

F_i beschreibt den Penstockfaktor jedes einzelnen Segments i und F_n die Summe aller Penstockfaktoren n vom ersten bis zum i -ten Segment. Daraus errechnet sich der gesamte aus der Geometrie resultierende relative Fehler f_{penst} entsprechend folgender Gleichung:

$$f_{penst} = \sum_{i=1}^n \Delta f_{penst,i} \quad (3.12)$$

- b) Die Null-Kalibration ist zur Kontrolle des Offsets vor und nach jeder Messserie durchzuführen. Außerdem sind die Offsets nach jeder Messreihe zu vergleichen. Dazu existiert die systematische Messunsicherheit des Null-Drucks f_{sta} mit

$$f_{sta} = \pm 0,15 \% \quad (3.13)$$

und jene resultierend aus den Druckschwankungen entlang der Recoveryline vor dem Schließen f_{run} mit

$$f_{run} = \pm 0,35 \% \quad (3.14)$$

- c) Die instationären Bedingungen beziehen sich auf die Veränderung des Strömungsprofils während des Schließvorgang und berücksichtigen das Rauschen des Drucksignals, eventuell eingesetzte Filter und die Wahl der Integrationsgrenzen. Dessen systematische Messunsicherheit f_{PT} beträgt

$$f_{PT} = \pm 0,80 \% \quad (3.15)$$

- d) Die Veränderung des dynamischen Anteils beruht größtenteils auf der Veränderung des Geschwindigkeitsprofils während des Schließens und hat unter Umständen einen großen Einfluss auf das Ergebnis. Zur Berechnung der systematischen Messunsicherheit ist das Verhältnis vom dynamischen Druckanteil p_{dyn} zum maximalen Druckanstieg während des Schließens Δp_{max} entscheidend. Beträgt der dynamische Druckanteil p_{dyn} 20 % vom Maximaldruck Δp_{max} , liegt eine systematische Messunsicherheit von $f_{dyn} = \pm 1,0 \%$ vor. Weicht das Druckverhältnis davon ab, beträgt die systematische Messunsicherheit des dynamischen Druckanteils f_{dyn}

$$f_{dyn} = \pm \frac{p_{dyn}}{\Delta p_{max} \cdot 20} \cdot 100 \% \quad (3.16)$$

- e) Die systematische Messunsicherheit aus dem Reibungsanteil f_{fr} ist vom Verhältnis des Reibungsanteils p_{fr} zum maximalen Druckanstieg während des Schließens Δp_{max} abhängig. Beträgt das Druckverhältnis 20 %, so gilt für die systematische Messunsicherheit $f_{fr} = \pm 1,0 \%$. Weicht das Druckverhältnis davon ab, beträgt die systematische Messunsicherheit aus dem Reibungsanteil f_{fr}

$$f_{fr} = \pm \frac{p_{fr}}{\Delta p_{max} \cdot 20} \cdot 100 \% \quad (3.17)$$

- f) Die systematische Messunsicherheit des Druckaufnehmers und des Datenerfassungsgerätes f_{inst} setzt sich aus der Linearitätsabweichung, der Hysterese, dem temperaturbedingten Drift und dem dynamischen Verhalten zusammen und beträgt

$$f_{inst} = \pm 0,10 \% \quad (3.18)$$

- g) Die systematische Messunsicherheit resultierend aus dem nach dem Schließen des Regulierorgans vorherrschenden Leckagevolumenstrom f_{leak} beträgt

$$f_{leak} = \pm 0,20 \% \quad (3.19)$$

Unter Einbeziehung aller Einzelunsicherheiten f_i folgt schlussendlich die systematische Messunsicherheit f_{sys} .

$$f_{sys} = \sqrt{\sum_{i=1}^n f_i^2} \quad (3.20)$$

3.4.2 Zufällige Messunsicherheit

Die zufällige Messunsicherheit ergibt sich durch nicht beherrschbare Ereignisse, die während der Messung auftreten. Darüber hinaus sind diese Ereignisse auch nicht vorhersehbar. Das führt dazu, dass sich an ein und demselben Messpunkt unterschiedliche Ergebnisse einstellen, die einer Streuung unterliegen. [27]

Es besteht die Möglichkeit, die Unsicherheit statistisch zu berechnen. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass es sich um rein zufällige Fehler handelt und genügend Daten desselben Betriebspunktes zur Verfügung stehen. Die Berechnung erfolgt sodann mit einem Konfidenzniveau von 95 %. [4]

Zur Berechnung der zufälligen Messunsicherheit bietet die IEC 60193 eine entsprechende Anleitung. Diese setzt voraus, dass die im selben Betriebspunkt ermittelten Werte durch neuerliches Einstellen des Betriebspunktes erhalten werden. Im ersten Schritt erfolgt die Bestimmung des Mittelwertes \bar{Y} auf Basis der erhaltenen Messwerte Y_i einer Messreihe eines bestimmten Betriebspunktes.

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \quad (3.21)$$

Dabei beschreibt n die Anzahl der Messwerte je Betriebspunkt. In der Regel ist der genaue Wert der Standardabweichung beliebig gemessener Werte nicht bekannt. Daher hilft man sich, indem eine geschätzte Standardabweichung, die im Weiteren als Standardabweichung s_Y bezeichnet wird, berechnet wird.

$$s_Y = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{Y} - Y_i)^2}{n - 1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.22)$$

Der zufällige Fehler kann reduziert werden, indem so viele Messungen wie möglich im selben Betriebspunkt durchgeführt werden. Aus diesen Messwerten kann sodann der Mittelwert gebildet werden. Ist die Standardabweichung des Mittelwertes $s_{\bar{Y}}$ aus n unabhängigen Messungen um \sqrt{n} kleiner als die Standardabweichung des Mittelwertes, so ist der zufällige Fehler reduziert.

$$s_{\bar{Y}} = \frac{s_Y}{\sqrt{n}} \quad (3.23)$$

Ist die tatsächliche Standardverteilung bekannt, kann auf Basis dieser sowie auf Basis des gewählten Konfidenzniveaus die Unsicherheit ermittelt werden. Die tatsächliche Standardverteilung ist jedoch in der Regel nicht bekannt. Um dennoch die zufällige Unsicherheit eines Messverfahrens feststellen zu können, wird dazu auf die geschätzte Standardverteilung zurückgegriffen. Dieser Lösungsweg erfordert die Berechnung der Studenten-t-Verteilung t , die für eine geringe Anzahl an Messwerten Gültigkeit besitzt. Selbstredend ist, dass die mögliche Streuung bei einer kleinen Anzahl an Messwerten entsprechend groß ist. Die Basis der Studenten-t-Verteilung ist ein Konfidenzniveau von 95 %. Ihre Berechnung setzt die Ermittlung des Freiheitsgrades ν voraus.

$$\nu = n - 1 \quad (3.24)$$

Auf Basis dessen kann die Studenten-t-Verteilung direkt aus der im Anhang angeführten Tabelle 12-3 abgelesen werden. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, diese zufolge nachstehender Gleichung zu berechnen.

$$t = 1,96 + \frac{2,36}{\nu} + \frac{3,2}{\nu^2} + \frac{5,2}{\nu^{3,84}} \quad (3.25)$$

Daraus berechnet sich die absolute Streuung e_r entsprechend Gleichung (3.26).

$$e_r = \pm s_Y \cdot \frac{t}{\sqrt{n}} \quad (3.26)$$

Die zufällige Messunsicherheit f_{zuf} , die mit einer statistischen Wahrscheinlichkeit von 95 % auftritt, errechnet sich folgendermaßen:

$$f_{zuf} = \pm \frac{e_r}{\bar{Y}} \quad (3.27)$$

Jene Mittelwerte einer Messreihe, die die obigen Kriterien erfüllen, können akzeptiert werden.

3.4.3 Totale Messunsicherheit

Die Berechnung der totalen Messunsicherheit f_{tot} erfolgt unter Einbeziehung der systematischen und der zufälligen Messunsicherheit entsprechend Gleichung (3.28).

$$f_{tot} = \pm \sqrt{f_{sys}^2 + f_{zuf}^2} \quad (3.28)$$

4 Prüfstand

Zur Untersuchung der Druck/Zeit-Methode war die Planung und Errichtung eines Prüfstandes im Labor des Institutes für Hydraulische Strömungsmaschinen notwendig. Im Zuge der Konzeptionierung wurden neben den baulichen Gegebenheiten auch am Institut vorhandene Komponenten und Parameter, die die IEC 60041 vorsieht, berücksichtigt. Im Wesentlichen sollten folgende Rahmenbedingungen erfüllt werden:

- Einhaltung der Mindestlänge der Messstrecke im geraden Rohr von 10 m bzw. des Produktes aus Messlänge und maximaler Strömungsgeschwindigkeit von 50 m²/s
- Nutzung
 - des Höhenunterschieds von 6,9 m zwischen zwei Stockwerken
 - einer vorhandenen Tauchpumpe
 - und Adaptierung eines vorhandenen Oberwasser-Behälters

Abbildung 4.1 zeigt den schematischen Aufbau des Prüfstandes mit den für die Druck/Zeit-Messung relevanten Komponenten und messtechnische Einrichtungen.

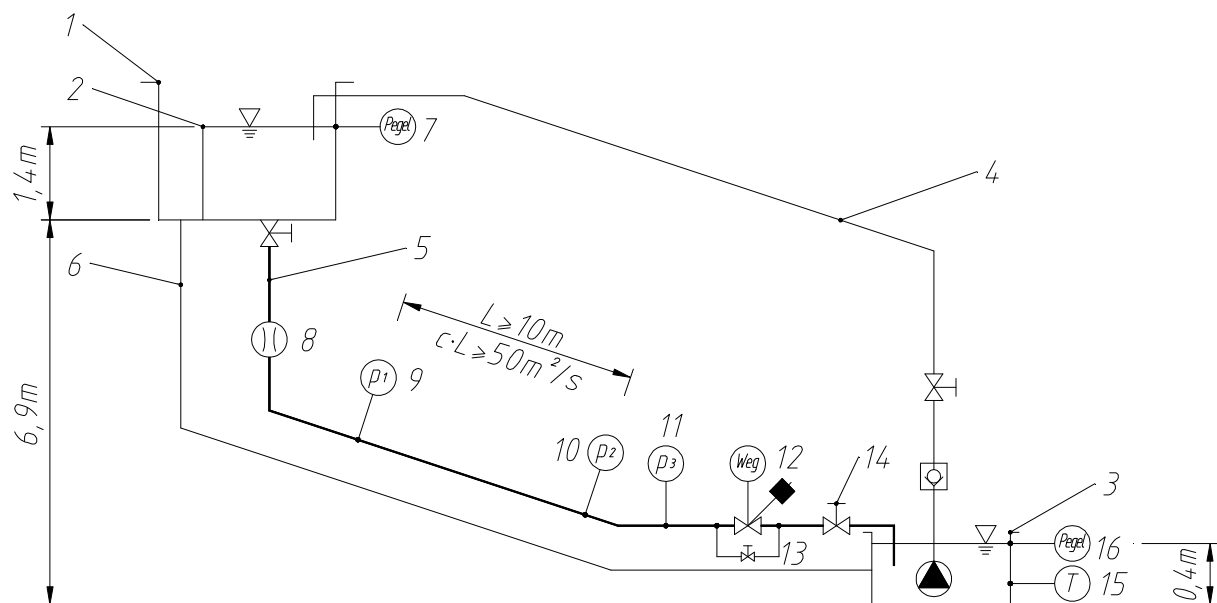


Abbildung 4.1: Schematischer Prüfstands Aufbau

1	...	Oberwasserbehälter	9	...	Druckmessebene p_1
2	...	Überlaufschwelle	10	...	Druckmessebene p_2
3	...	Unterwasserbehälter	11	...	Druckmessebene p_3
4	...	Pumpleitung mit Pumpe	12	...	Absperrschieber und Winkelgeber
5	...	Messleitung	13	...	Bypass
6	...	Überlaufleitung	14	...	Dotationsschieber
7	...	Pegelmessung OW	15	...	Temperaturmessung
8	...	Magnetisch-induktiver Durchflussmesser	16	...	Pegelmessung UW

Fotos des Prüfstandes sind im Anhang in den Abbildungen 12.1 bis 12.4 angeführt.

4.1 Aufbau

Der Prüfstand erstreckt sich über zwei Stockwerke und weist eine Bruttofallhöhe von 7,9 m auf. Im zweiten Obergeschoss befindet sich der Oberwasserbehälter. Aus diesem führen drei Rohrleitungen zum im Erdgeschoss positionierten Unterwasserbehälter.

Über den geodätischen Höhenunterschied wird in der Messleitung, welche drei Druckmессebenen aufweist, ein maximaler Volumenstrom von 28 l/s erzielt. Die Positionierung der Messebenen ermöglicht, dass drei Messvarianten (Messung im geraden Rohr, Messung über einen Krümmer, Messung gegen Oberwasser) gleichzeitig durchgeführt werden können. Die Leitung ist aus Stahl gefertigt und im Bereich der Messstrecke p_1 bis p_3 sowie der anschließenden Absperr- und Dotationsarmaturen in der Dimension DN 80 ausgeführt. Der obere Teil der Rohrleitung sowie das Endrohr sind zur Minimierung der hydraulischen Verluste in DN 100 gefertigt. Verschiedene Volumenströme werden mittels eines Keilschiebers eingestellt. Zur Verifizierung der Messergebnisse ist ein magnetisch-induktives Durchflussmessgerät eingebaut.

Die Förderung des Wassers in den OW-Behälter erfolgt mittels Tauchpumpe und einer PVC-U Rohrleitung der Dimension DN 100. Die Pumpe wird über einen Frequenzumformer versorgt, wird in Abhängigkeit des UW-Pegels drehzahlregelt betrieben und weist bei Nenndrehzahl eine Fördermenge von 30 l/s auf. Der Prüfstand wird dermaßen betrieben, dass die Fördermenge der Pumpe den jeweiligen Volumenstrom in der Messleitung geringfügig übersteigt. Das überschüssige Wasser fließt sodann über eine im OW-Behälter vorgesehene Überlaufschwelle und die PVC-U Rohrleitung der Dimension DN 65 in den UW-Behälter zurück. Dadurch ist sichergestellt, dass trotz eines kleinen OW-Behälters, der Pegelstand während der Versuchsabläufe weitestgehend konstant gehalten werden kann. Die Messung der Wassertemperatur erfolgt im UW-Behälter.

Die Abbildungen 4.2 bis 4.4 zeigen den Prüfstands Aufbau.

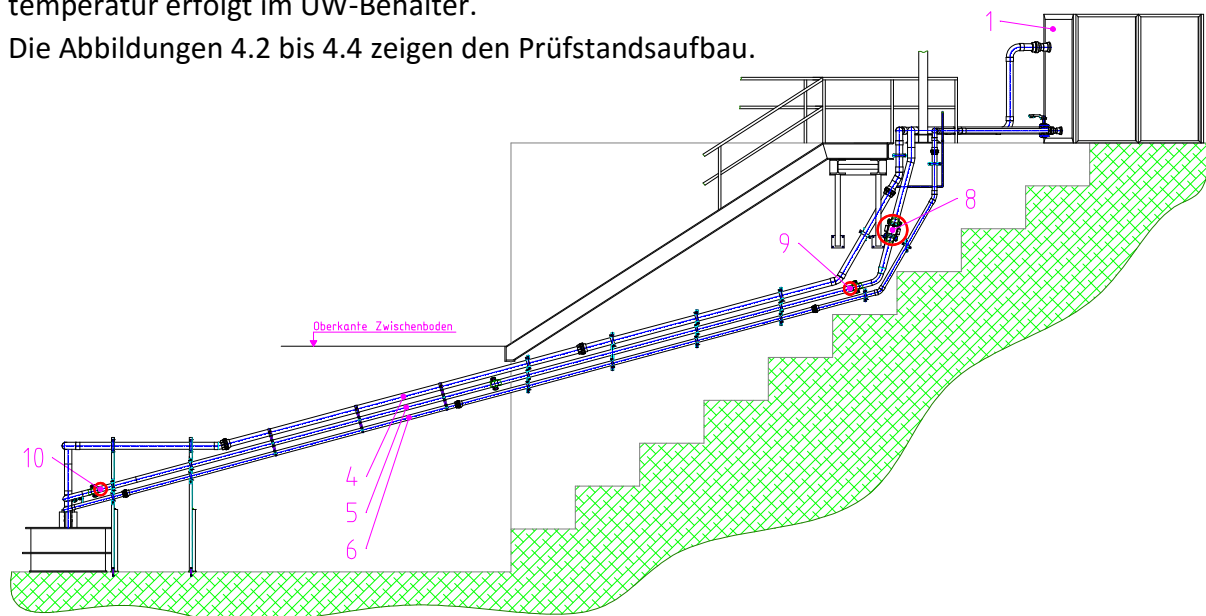


Abbildung 4.2: Projektionsansicht des Prüfstands

1 ...	Oberwasserbehälter	8 ...	Magnetisch-induktiver Durchflussmesser
4 ...	Pumpleitung mit Pumpe	9 ...	Druckmессebene p_1
5 ...	Messleitung	10 ...	Druckmессebene p_2
6 ...	Überlaufleitung		

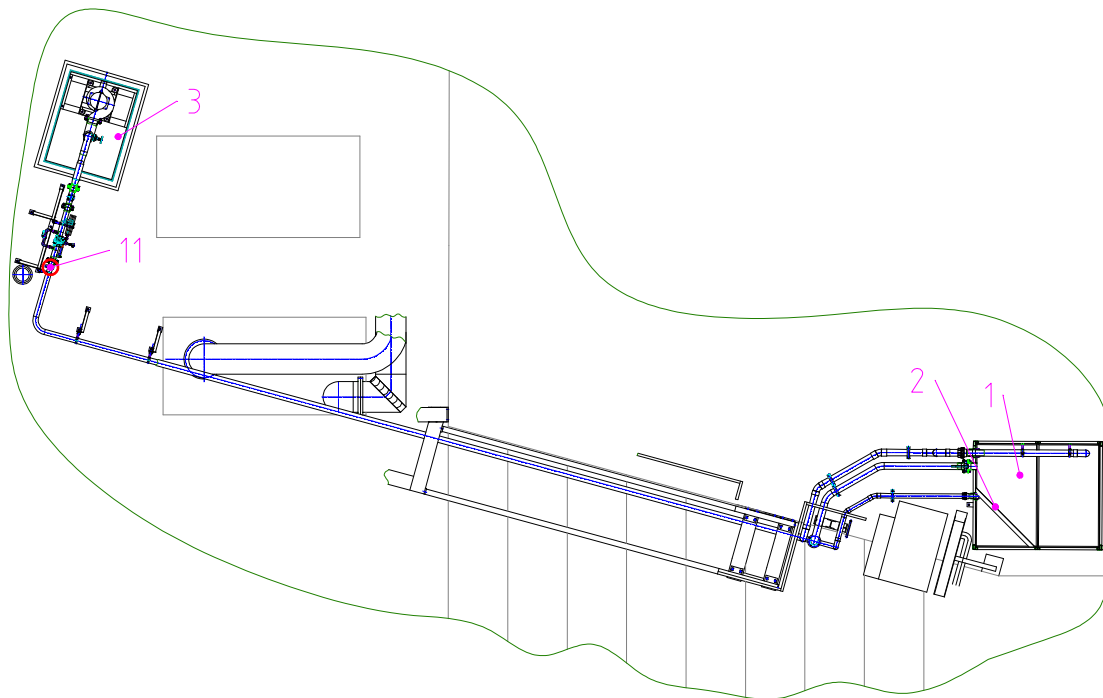


Abbildung 4.3: Grundriss des Prüfstands

- 1 ... Oberwasserbehälter
- 2 ... Überlaufschwelle
- 3 ... Unterwasserbehälter
- 11 ... Druckmessebene p_3

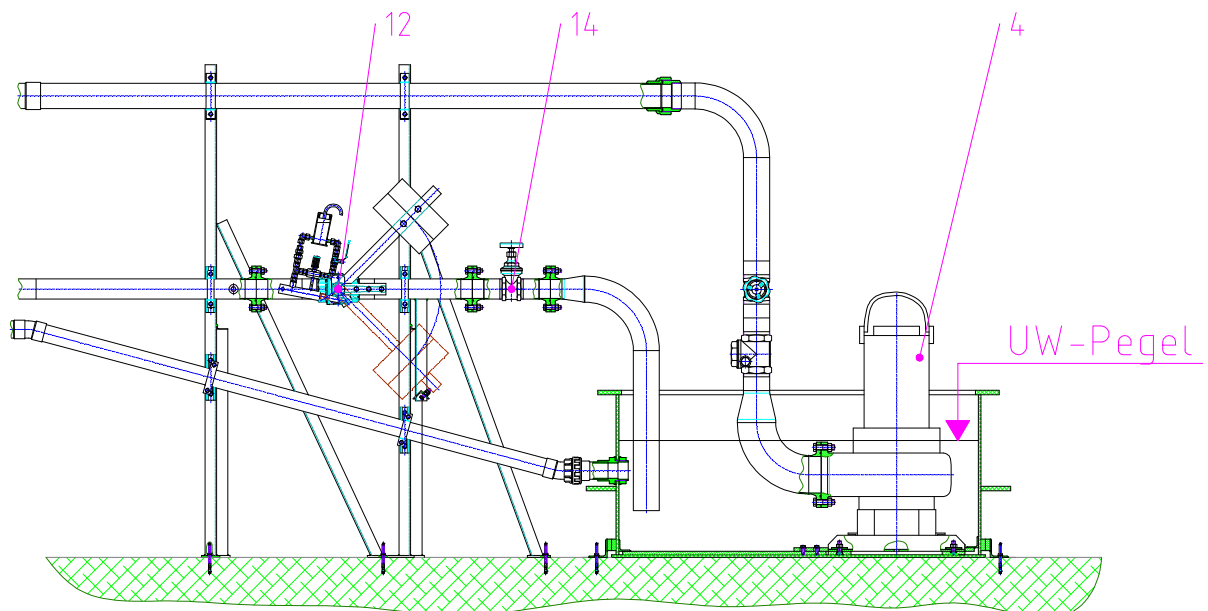


Abbildung 4.4: Anordnung im Bereich des UW-Behälters

- 4 ... Tauchpumpe
- 12 ... Kugelhahn mit Schließgewicht
- 14 ... Keilschieber zur Dotation

Als druckimpulserzeugendes Absperrorgan dient ein Kugelhahn (siehe Abbildung 4.5). Dieser wurde mit einem Schließgewichtsantrieb und einer Ölbremse ausgestattet, die sowohl das Halten in der Offenstellung als auch die variable Einstellung der Schließzeit gewährleistet. Dazu ist am Plungerzylinder eine Ölhydraulik angebaut. Deren Funktionsweise besteht darin, dass beim manuellen Öffnen des Schließgewichtes Öl aus dem Öltank und dem sich öffnenden Rückschlagventil in den Schließzylinder fließt. In Offenstellung hält das zwischen Rückschlagventil und Steuerungskugelhahn eingespernte Ölvolume die Position des Schließgewichtsantriebes. Der Schließvorgang erfolgt durch Öffnen des Steuerungskugelhahnes und des über das Drosselventil in den Tank rückfließenden Ölstroms. Über den Grad der Drosselung ist die Schließzeit des Schließgewichtsantriebes stufenlos einstellbar. Um auch Leckagevolumenstrommessungen durchführen zu können, ist am Kugelhahn eine Bypassleitung der Dimension DN 15 positioniert.

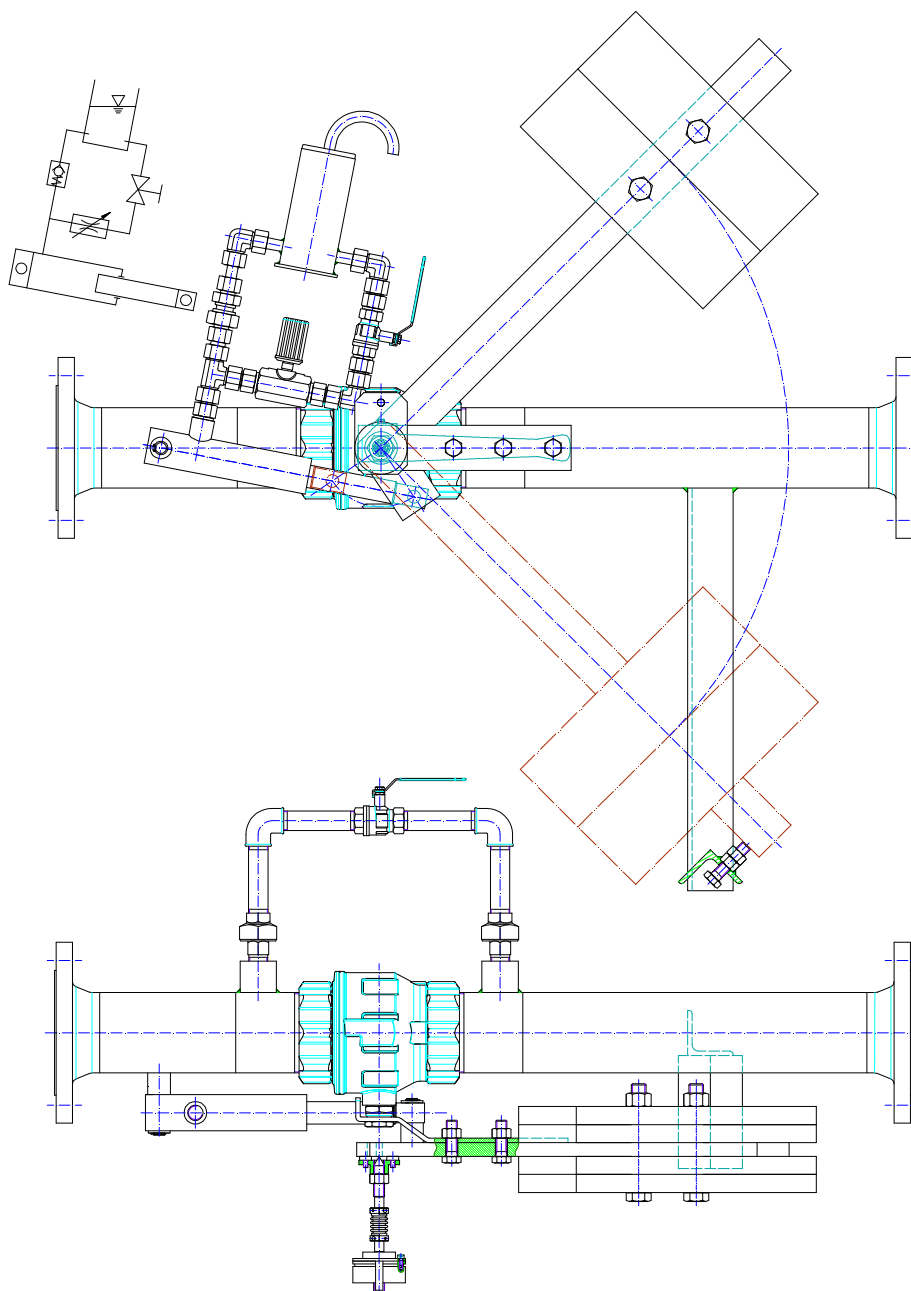


Abbildung 4.5: Kugelhahn mit Schließgewichtsantrieb und Ölbremse

4.2 Druckmessstellen

Für die Druckmessung sind in der Messleitung drei Messebenen vorgesehen. Jede Messebene ist mit zwei gegenüberliegenden, in der Horizontalachse positionierten, Messanschlüssen ausgestattet. Jeweils ein Messanschluss ist nach Norm (IEC 60041) gefertigt. Der zweite Messanschluss ist individuell ausgeführt und ermöglicht das zur Rohrwand bündige Anbringen des Druckaufnehmers. Die IEC 60041 empfiehlt, dass je Messebene zumindest zwei (besser 2x2) gegenüberliegende Messstellen zusammengefasst und gemeinsam gemessen werden. Da in der Praxis die Messanschlüsse in der gewünschten Anordnung (1x2 oder 2x2) als auch Gestaltung kaum anzutreffen sind, wird die Messreihe neben der Zusammenfassung von zwei Messstellen, wie es die Norm vorsieht, jeweils auch nur mit einem Messanschluss durchgeführt. Damit soll der Einfluss von unterschiedlichen Messanschlüssen auf das Messergebnis untersucht werden. Zur Messung wird jeweils ein Druckaufnehmer je Messebene eingesetzt. Abbildung 4.6 zeigt die Ausführung der Messebenen.

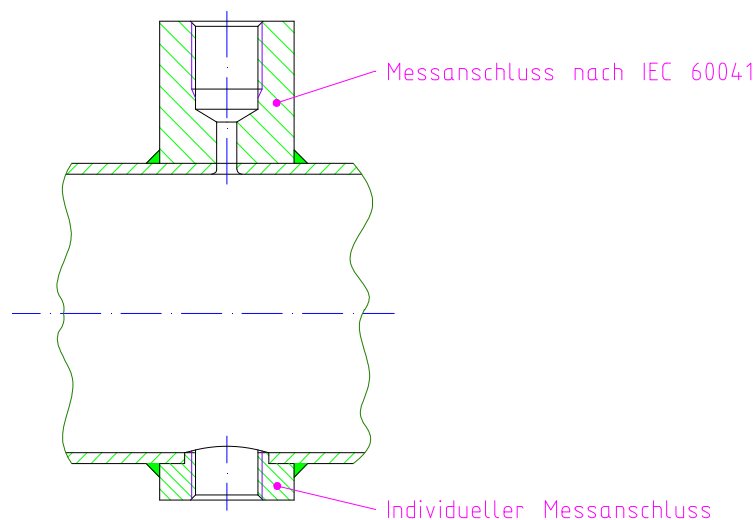


Abbildung 4.6: Ausführung der Druckmessstellen

5 Mess- und Auswertesystem

Das eingesetzte Mess- und Auswertesystem besteht aus Hardware- und Softwarekomponenten. Deren prinzipielle Verknüpfung einschließlich des Signal- bzw. Datenflusses ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

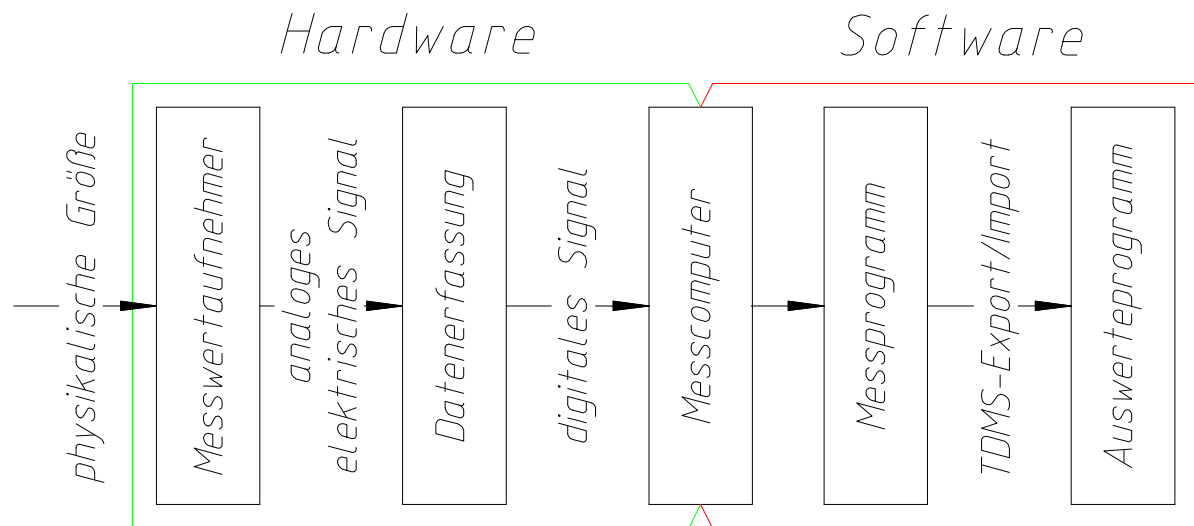


Abbildung 5.1: Aufbau des Mess- und Auswertesystems

Die einzelnen Komponenten des Mess- und Auswertesystems werden in den Abschnitten 5.1 und 5.2 detailliert beschrieben.

5.1 Hardware

Die Hardware gliedert sich in die Bereiche Messwertaufnehmer, Datenerfassung und Messcomputer. Die Messwertaufnehmer wandeln physikalische Größen (Druck, Pegelstand, Temperatur, Drehwinkel, Durchfluss) in analoge elektrische Strom- oder Spannungssignale um. Diese werden vom Datenerfassungsgerät aufgenommen, in digitale Signale umgeformt und an das Messprogramm des Messcomputers übertragen, visualisiert und gespeichert.

5.1.1 Messwertaufnehmer

5.1.1.1 Druckaufnehmer in der Rohrleitung

Zur Druckmessung in der Rohrleitung (Messstellen p_1 , p_2 , p_3) wird je ein piezoresistiver Drucktransmitter der Firma KELLER eingesetzt. Beim verwendeten Druckaufnehmertyp PAA-25 (siehe Abbildung 5.2) handelt es sich um einen Absolutdruckaufnehmer mit Nullpunkt bei Vakuum und einem Messbereich von 0 bis 10 bar.



Abbildung 5.2: Piezoresistiver Drucktransmitter KELLER PAA-25 [29]

Die Funktion des Drucktransmitters beruht auf der elastischen Verformung einer, mit dem Gehäuse frontbündigen, Silizium-Membrane. Durch Zuführung von Hilfsenergie wird die auftretende Verformung in ein analoges elektrisches Spannungssignal umgewandelt. [30]
Die Druckaufnehmer sind nicht beschleunigungskompensiert.

Tabelle 5-1: Spezifikationen des piezoresistiven Drucktransmitters PAA-25 [30]

Messbereich	0 – 10 bar
Signalausgang	0 – 10 V
Messgenauigkeit	± 0,2 % FS typ.
	± 0,5 % FS max.
Grenzfrequenz	1 kHz
Speisung	13 – 32 VDC
Einsatztemperatur	-40 – 100 °C

Vor Beginn der Messung ist jeder Druckaufnehmer zu kalibrieren und die daraus erhaltene Skalierungsvorschrift im Messprogramm zu hinterlegen.

5.1.1.2 Druckaufnehmer zur Pegelmessung

Zur Messung des Pegelstandes im Oberwasserbehälter wird der Druckmessumformer SITRANS P, Serie MPS von SIEMENS (siehe Abbildung 5.3) verwendet. Dieser weist ein Edelstahlgehäuse mit einem frontbündig eingebauten Piezowiderstandssensor, mit Messmembrane aus Edelstahl, auf. Die Verformung der Membrane ist dem hydrostatischen Druck und somit der Eintauchtiefe proportional, indem über ein im Anschlusskabel befindliches Entlüftungsröhr ein Druckausgleich mit dem atmosphärischen Druck erfolgt. Zum Schutz der Membrane vor Beschädigung ist diese von einer Schutzhaube umgeben. Der mit 24 VDC gespeiste Sensor weist einen Messbereich von 0 bis 10 m Wassersäule auf und liefert ein Stromsignal. Außerdem ist jeder Druckmessumformer für einen weiten Temperaturbereich kompensiert. [31]



Abbildung 5.3: Pegelmesssonde SIEMENS SITRANS P, Serie MPS [32]

Tabelle 5-2: Spezifikationen der Pegelmesssonde SITRANS P, Serie MPS [31]

Messbereich	0 – 10 mH ₂ O
Signalausgang	4 – 20 mA
Messgenauigkeit	0,3 % FS typ.
Speisung	10 – 36 VDC
Einsatztemperatur	-10 – 80 °C

5.1.1.3 Druckaufnehmer zur Luftdruckmessung

Die Messung des Luftdrucks erfolgt mit dem Absolutdruckaufnehmer 3051C der Firma ROSEMOUNT (siehe Abbildung 5.4). Das Messprinzip beruht auf der piezoresistiven Sensortechnologie.



Abbildung 5.4: Absolutdruckaufnehmer ROSEMOUNT 3051C [33]

Die Hauptkomponenten des Druckaufnehmers sind das Sensormodul und das Elektronikgehäuse. Das Sensormodul beinhaltet das mit Öl gefüllte Sensorsystem (bestehend aus Trennmembranen, Ölfüllung und Sensor) sowie die Sensorelektronik. Die Sensorelektronik besteht aus einem Temperatursensor, einem Speichermodul und dem Analog/Digital-Signalumwandler (A/D-Wandler).

Wenn die Trennmembranen mit Druck beaufschlagt werden, wird die mittlere Membrane durch das Öl ausgelenkt, was im Sensor eine Änderung des Spannungssignals zur Folge hat. Dieses Signal wird dann im A/D-Wandler zu einem digitalen Signal umgewandelt und im Mikroprozessor mit dem digitalen Signal vom Widerstandsthermometer der korrigierte Messumformerausgang berechnet. Dieses Signal wird dann im D/A-Wandler zu einem analogen 4 - 20 mA Signal umgesetzt und ausgegeben. [34]

Der verwendete Druckaufnehmer ist auf den Absolutdruckbereich von 0 bis 5 bar kalibriert.

Tabelle 5-3: Spezifikationen des Druckaufnehmers Rosemount 3051C [35]

Type	3051C A2A22A1CM5B4L4Q4
Messbereich	0 – 10,3 bar
Signalausgang	4 – 20 mA
Messgenauigkeit	± 0,15 % der Messspanne
Speisung	10,5 – 55 VDC
Einsatztemperatur	-40 – 85 °C

5.1.1.4 Temperatursensor

Zur Messung der Wassertemperatur im Unterwasserbehälter wird der Sensor CSIRF der Firma CORREGE SENSORS verwendet (siehe Abbildung 5.5). Das Messprinzip beruht auf dem eines Pt100 Widerstandsthermometers. Das vom Pt100 gelieferte Messsignal wird in der Eingangsstufe verstärkt und eine proportionale Spannung erzeugt. Diese Spannung wird sodann mittels Analog-Digital-Umsetzer in ein digitales Signal umgewandelt, im Mikrocontroller entsprechend der Sensorkennlinie und weiterer Vorschriften verarbeitet und im Digital-Analog-Umsetzer in ein analoges Stromsignal übergeführt und ausgegeben. [36]



Abbildung 5.5: Temperatursensor CORREGE SENSORS CSIRF

Tabelle 5-4: Spezifikationen des Kopfmessumformers SITRANS TH100 [36]

Messbereich	-200 – 850 °C
Signalausgang	4 – 20 mA
Messgenauigkeit	< 0,25 °C für die Messspanne < 250 °C
Speisung	8,5 – 36 VDC
Einsatztemperatur	-40 – 85 °C

5.1.1.5 Drehgeber

Zur Aufzeichnung des Schließweges beim Absperrorgan wird ein Drehgeber der Firma BOURNS verwendet. Das Funktionsprinzip des in Abbildung 5.6 dargestellten Drehgebers be-

ruht auf der berührungslosen Magnettechnologie und zeichnet sich durch eine geringe Hysterese bei gleichzeitig hoher Wiederholgenauigkeit aus. Der aktive Sensor wird mit 5 VDC gespeist, deckt einen Messbereich von 0 – 340° ab und gibt ein proportionales Spannungssignal aus. [37]



Abbildung 5.6: Drehgeber BOURNS AM S22U [38]

Tabelle 5-5: Spezifikationen des Drehgebers [37]

Type	AMS22U5AIBHBRL334
Messbereich	0 – 340°
Signalausgang	0,05 – 4,95 V
Messgenauigkeit	± 0,5 %
Speisung	5 VDC ± 10 %
Einsatztemperatur	-40 – 125 °C

5.1.1.6 Durchflussmessung

Zur Messung des Referenzdurchflusses in der Messleitung ist ein kalibriertes Messgerät höherer Genauigkeit erforderlich. Dazu ist das in Abbildung 5.7 dargestellte magnetisch-induktive Durchflussmessgerät FEP511-100 der Firma ABB mit der Dimension DN 100 / PN 16 eingesetzt. Die prinzipielle Funktionsweise des magnetisch-induktiven Durchflussmessgerätes ist in Abschnitt 1.1.2 beschrieben. Das Messgerät wird mit 220 VAC gespeist und liefert ein Stromsignal. Das Kalibrierzertifikat ist im Anhang beigelegt (siehe Abbildung 12.5).



Abbildung 5.7: Magnetisch-induktives Durchflussmessgerät ABB FEP511 [39]

Beim Planen des Einbauortes ist darauf zu achten, dass das Durchflussmessgerät nicht horizontal, sondern zumindest mit einer geringen Neigung eingebaut werden kann, um eine Entgasung sicherzustellen. Außerdem sind bei der Verwendung am Prüfstand gemäß EN 29104 / ISO 9104 die Anschlussbedingungen von 10 x DN an gerader Rohrlänge im Vorlauf und 5 x DN an gerader Rohrlänge im Nachlauf einzuhalten. [40]

Tabelle 5-6: Spezifikationen des magnetisch-induktiven Durchflussmessgeräts FEP511-100 [9]

Type	FEP511-100A1D1D2B0B1A0A1A1C2C
Messbereich	0 – 240 m³/h
Signalausgang	4 – 20 mA
Messgenauigkeit	0,2 %
Speisung	100 – 230 VAC, 50 Hz
Einsatztemperatur	-20 – 60 °C

5.1.2 Datenerfassungsgerät

Das verwendete Datenerfassungsgerät aus dem Hause NATIONAL INSTRUMENTS besteht im Wesentlichen aus dem Ethernet-Chassis CompactDAQ-9188 mit acht Steckplätzen zur Aufnahme von I/O-Modulen und je einem Strommodul NI 9203 und einem Spannungsmodul NI 9239 zur Erfassung aller für die Prüfstandsmessung relevanten Sensoren (8 Stück). Das Chassis bewerkstelligt die zeitliche Steuerung und Synchronisierung der I/O-Module und die Datenübertragung zwischen den Modulen und dem Messcomputer. Das Datenerfassungsgerät ist in einem Messkasten eingebaut und die externen Anschlüsse des Chassis und der Module an in der Gehäusewand des Messkastens positionierte Anschlussbuchsen verdrahtet. Sämtliche externe Anschlüsse des Messkastens (Netz, Ethernet, Sensoren) erfolgen über Steckerverbindungen an den Buchsen der Gehäusewand. Die Kabel der mit Hilfsenergie zu versorgenden Sensoren wurden mittels Zwischenklemmen, über die deren Spannungsversorgung erfolgt, an die Stecker angeschlossen. Abbildung 5.8 zeigt den Messkasten und das 24 VDC-Netzgerät.

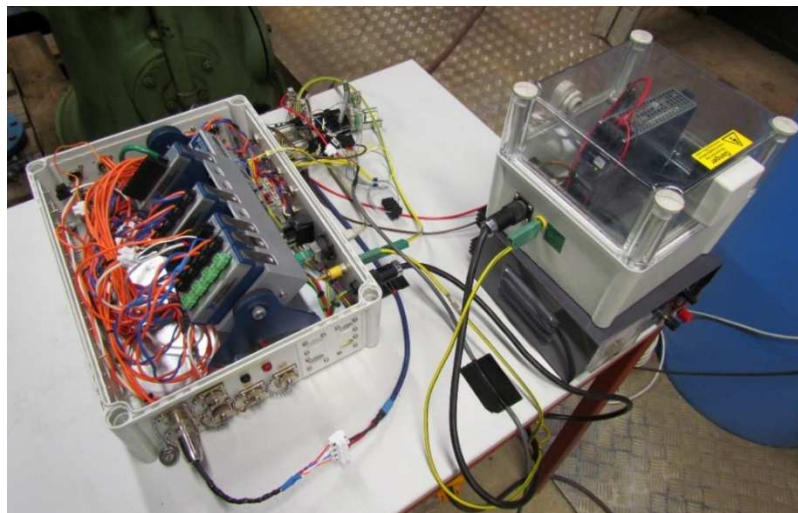


Abbildung 5.8: Messkasten mit Netzgerät

Bei der Inbetriebsetzung des Messsystems am Prüfstand waren, mit dem Einschalten des Frequenzumformers, an allen Messsignalen große Streuungen aufgetreten. Diese resultierten aus elektromagnetischen Feldern, die vom ungeschirmten Energiekabel zwischen Frequenzumformer und Tauchpumpe ausgingen. Trotz Schirmung der Messleitungen und gebündelter Verlegung konnten die Störsignale nicht reduziert werden. Abhilfe wurde durch Filterung der Messsignale mittels eines in die Software implementierten Tiefpassfilters geschaffen (siehe Abschnitt 5.2.1.2). Der elektromagnetische Einfluss konnte während der gesamten Versuchsdauer nicht beseitigt werden. Abbildung 5.9 zeigt den ungefilterten und gefilterten Verlauf des Absolutdrucksignals.

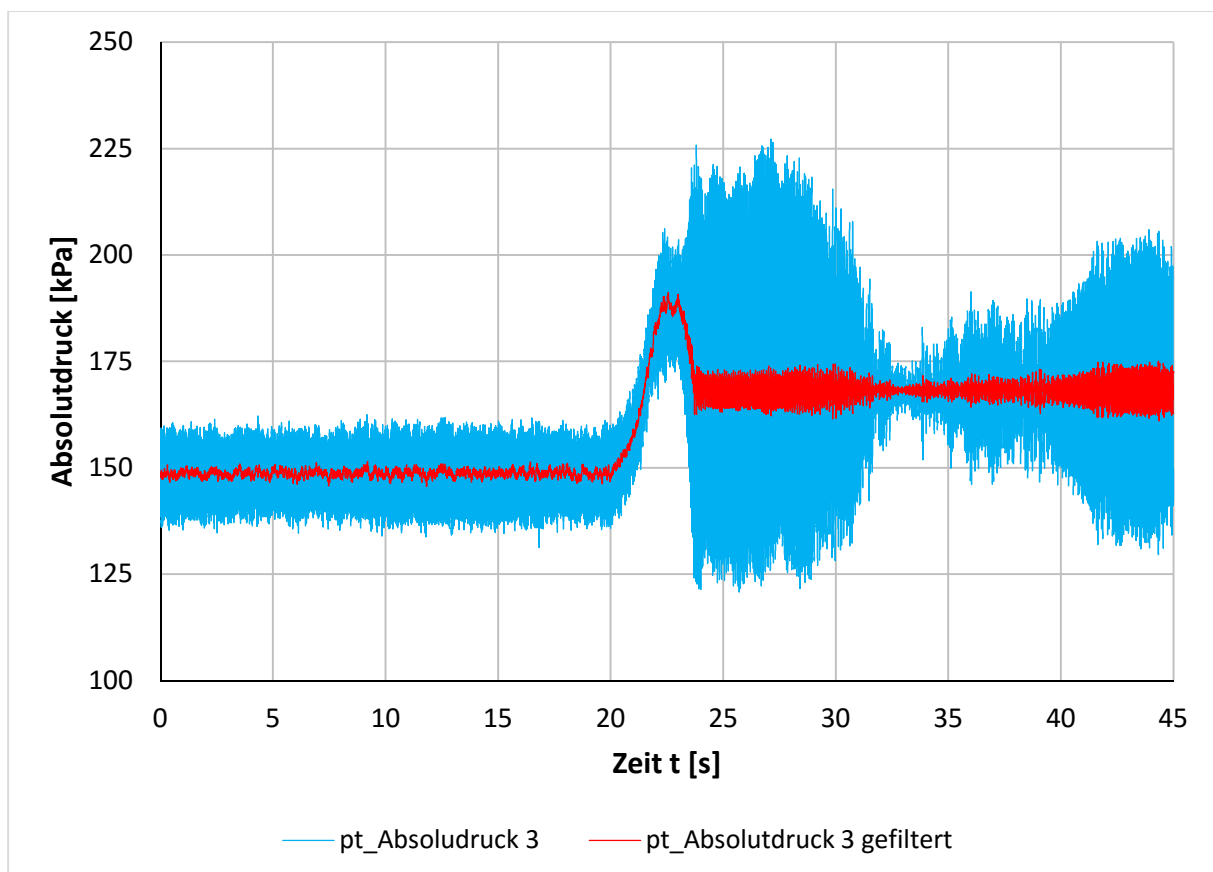


Abbildung 5.9: Durch elektromagnetisches Feld gestörtes und gefiltertes Messsignal

5.1.2.1 National Instruments CompactDAQ-9188

Das verwendete Datenerfassungsgerät cDAQ-9188 von NATIONAL INSTRUMENTS ist ein Ethernet-Chassis mit acht Steckplätzen (siehe Abbildung 5.10). Es ermöglicht die dezentrale und verteilte Messung von elektrischen und sensorischen Signalen. Ein Chassis erlaubt die Verarbeitung von unterschiedlichen physikalischen Größen. Die erfassbaren Signale können sowohl elektrischen, physikalischen, mechanischen als auch akustischen Ursprungs sein. Zur Erfassung der Signale werden verschiedene Module eingesetzt. Diese sind innerhalb des CompactDAQ-9188 beliebig steckbar und tauschbar. [41]



Abbildung 5.10: Datenerfassungsgerät NI cDAQ-9188 [42]

Die Datenübermittlung vom NI cDAQ-9188 zum Messcomputer wird durch ein Ethernet-Kabel sichergestellt. Ethernet-Kabel haben den Vorteil, dass die Datenübertragung auch über größere Distanzen ohne zusätzliche Switches oder Router sichergestellt werden kann und in der hohen Datenübertragungsgeschwindigkeit. Bei Anwendung in einem Gigabit-Ethernet-Netzwerk ist eine Bandbreite von 1000 Mbit/s erzielbar. Darüber hinaus kann das Gigabit-Ethernet-Netzwerk auch von mehreren cDAQ-Chassis gleichzeitig verwendet werden. [43]

Tabelle 5-7: Spezifikationen des Datenerfassungsgeräts cDAQ-9188 [43]

Timing-Genauigkeit	50 ppm der Abtastrate
Timing-Auflösung	12,5 ns
Speisung	9 – 30 VDC
Maximalleistung	15 W
Einsatztemperatur	-20 – 55 °C
Gebrauchsluftfeuchtigkeit	10 – 90 % relative Feuchte

5.1.2.2 Spannungseingangsmodul NI 9239

Das in Abbildung 5.11 dargestellte Spannungseingangsmodul 9239 der Serie C der Firma NATIONAL INSTRUMENTS ist ein analoges Eingangsmodul, das sich für den Einsatz im Compact-DAQ-Chassis eignet. Es verfügt über vier Kanäle, welche jeweils einen Messbereich von ± 10 V bei einer Auflösung von 24 Bit aufweisen. Damit können maximal 50 kS/s an Daten bei maximaler Abtastrate aufgenommen werden. Die Datenerfassung erfolgt an allen vier Kanälen simultan. [44] Die Kanäle sind isoliert, um das gesamte System inklusive Modul sowie den Prüfling vor Überspannungsspitzen zu schützen. Die Isolierung verhindert zusätzlich, dass auf Grund von Masseschleifen Messfehler entstehen. [45]

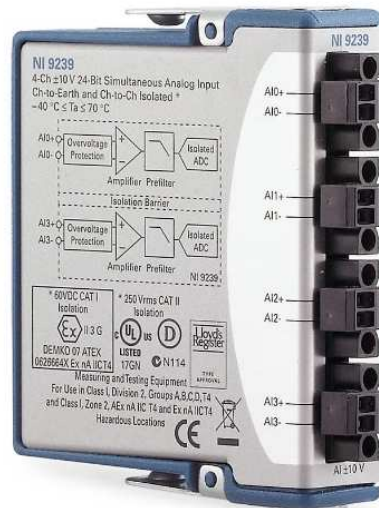


Abbildung 5.11: Spannungseingangsmodul NI 9239 [46]

Das NI 9239 verwendet analoge und digitale Filtertechnik, um jene Signale, die sich innerhalb des Bandes befinden, genau aufzulösen und jene, die sich außerhalb des Bandes befinden, herauszufiltern. Die Filter unterscheiden zwischen Signalen unterschiedlichen Frequenzbereichs. Die dabei wichtigsten zu berücksichtigenden Bandbreiten sind das Durchlassband, das Sperrband und die Anti-Imaging Bandbreite. [44]

Die Frequenz des Spannungseingangsmoduls NI 9293 wird durch eine Master-Zeitbasis f_M kontrolliert, die im Modul inkludiert ist und eine Frequenz von 12,8 MHz aufweist. Die verfügbare Datenerfassungsrate f_s für das NI 9239 berechnet sich zufolge nachstehender Formel: [44]

$$f_s = \frac{f_M}{\frac{256}{n}} \quad (5.1)$$

n entspricht einer ganzzahligen Zahl zwischen 1 und 31. Dadurch ergibt sich die minimale Abtastrate von 1613 S/s.

Tabelle 5-8: Spezifikationen des Spannungseingangsmoduls NI 9239 [44]

Anzahl der Kanäle	4
Auflösung	24 Bit
Minimale Datenerfassungsrate	1613 S/s
Maximale Datenerfassungsrate	50 kS/s pro Kanal
Signaleingänge	±10 VDC
Überspannungsschutz	±100 VDC
Verstärkungsfehler	±0,03 % FS typ.
Nullpunktfehler	±0,008 % FS typ.
Einsatztemperatur	-40 – 70 °C

Für die Abtastung der Messsignale ist die Anti-Aliasing-Frequenz zu beachten. Das ist jene Frequenz, ab der es zu keiner Überlappung der Teilspektren des Signals kommt. Somit gilt das

Shannon-Nyquist-Abtasttheorem. Dieses besagt, dass ein kontinuierliches Tiefpass-Signal mit einer Frequenz abgetastet werden muss, die mehr als doppelt so groß ist wie die höchste im Signal vorkommende Frequenz. Mehr als die doppelte Abtastfrequenz ist erforderlich, um zu vermeiden, dass die abgetasteten Signalpunkte stets derselben Position am fortlaufenden Signal entsprechen. Wird beispielsweise ein Sinussignal der Frequenz 1 kHz mit 2 kHz abgetastet, besteht bei ungünstiger Phasenlage die Gefahr, dass alle Abtaststellen mit der Nulllinie zusammenfallen. [47] Abbildung 5.12 zeigt die Anwendung des Shannon-Nyquist-Abtasttheorems. Die grün dargestellten Punkte erfüllen das Theorem, wohingegen die Abtastfrequenz der roten Punkte genau der doppelten Signalfrequenz und dem oben beschriebenen Extremfall der Phasenlage entspricht.

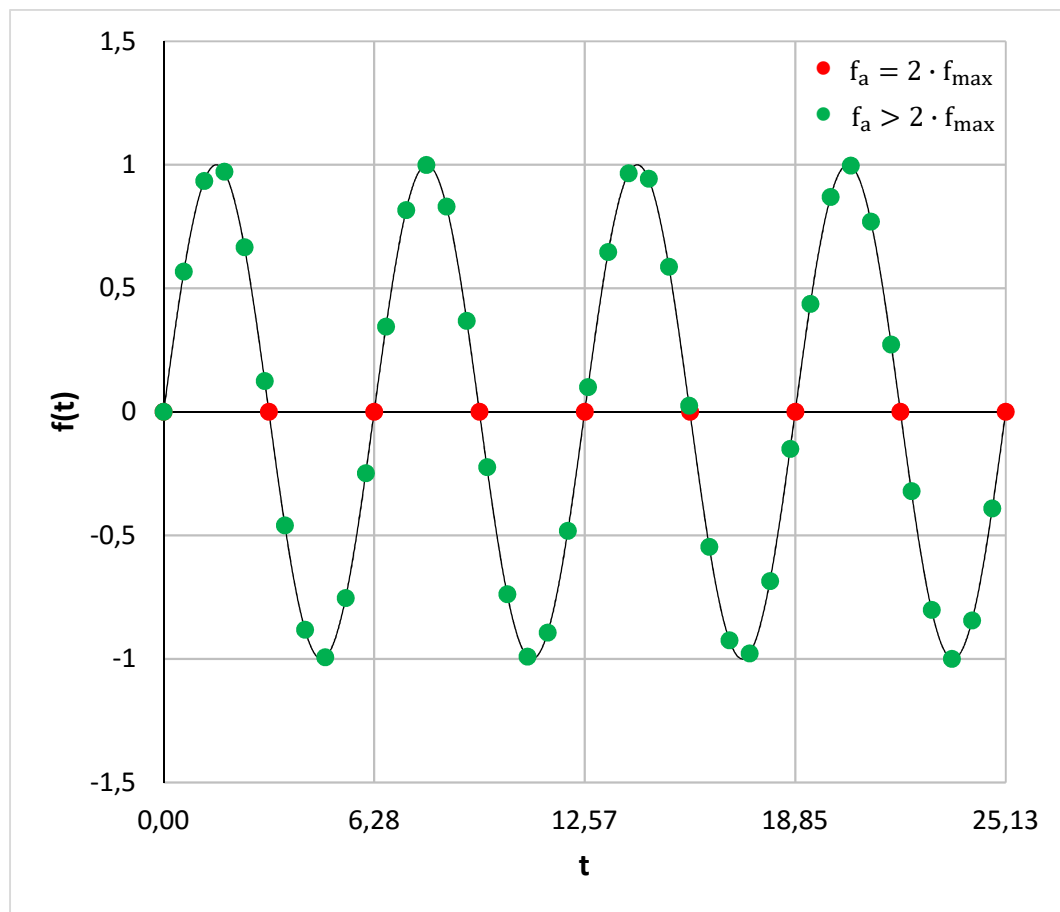


Abbildung 5.12: Anwendung des Shannon-Nyquist-Abtasttheorems

5.1.2.3 Stromeingangsmodul NI 9203

Das Stromeingangsmodul NI 9203 der C-Serie verfügt über acht analoge Stromeingänge, die jeweils einen programmierbaren Eingang aufweisen (siehe Abbildung 5.13). Das Eingangssignal kann in den Bereich von ± 20 mA, als auch in den Bereich von 0 bis 20 mA fallen. Das Modul verfügt über eine 16-Bit Auflösung, erlaubt eine maximale Abtastrate von 200 kS/s und ist vor transienten Signalen durch eine doppelte Isolierung geschützt. [48]



Abbildung 5.13: Stromeingangsmodul NI 9203 [49]

Das Stromeingangsmodul ist in das NI-CompactDAQ-Chassis eingesteckt, von dem aus das Timing des Moduls und die Datenübertragung an den Messcomputer gesteuert wird. [50]

Tabelle 5-9: Spezifikationen des Stromseingangsmoduls NI 9203 [48]

Anzahl der Kanäle	8
Auflösung	16 Bit
Maximale Datenerfassungsrate	25 kS/s pro Kanal
Signaleingang	± 20 mA bzw. 0 – 20 mA
Überspannungsschutz	± 30 VDC
Verstärkungsfehler	$\pm 0,20$ % FS typ.
Nullpunktfehler	$\pm 0,09$ % FS typ.
Einsatztemperatur	-40 – 70 °C

5.2 Software

Die Software gliedert sich in das Mess- und das Auswerteprogramm. Die vom Messprogramm erfassten Daten werden in einer TDMS-Datei ausgegeben, in das Auswerteprogramm eingelesen und in diesem verarbeitet.

5.2.1 Messprogramm

Zur Datenerfassung wurde das graphische Programmiersystem *LabVIEW* in der Version 2012 von NATIONAL INSTRUMENTS eingesetzt. Die Softwarebezeichnung LabVIEW steht für "Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench". Die Programmierung erfolgt in der Programmiersprache "G". Bezeichnend für diese Programmiersprache ist die Erstellung eines Blockschaltbildes über die Auswahl von verschiedenen graphischen Elementen, welche durch "Verdrahtung" miteinander verbunden werden und dadurch den Signalfluss bestimmen. Die Stärken des Programms liegen in der sehr schnellen Erstellung der graphischen Benutzeroberfläche durch Auswahl und Platzierung unterschiedlicher Objekte, wie zum Beispiel Graphen, Anzeigeelemente oder Schaltflächen innerhalb eines Fensters und dass mit der Erstellung der Benutzeroberfläche gleichzeitig die Objekte für das Blockschaltbild generiert werden. Das Programm spiegelt die Struktur einer Hierarchie von Softwaremodulen wieder, deren Einzelbestandteile interaktive Benutzeroberflächen, gesteuert von Blockschaltbildern, sind. [51] Als Grundlage für das Messprogramm wurde eine am Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen vorhandene Messsoftware herangezogen und an die Erfordernisse der Prüfstandmessung mit den vorgesehenen acht Sensoren angepasst. Das Messprogramm gliedert sich im Wesentlichen in die Hauptbestandteile Frontpanel und Blockdiagramm.

5.2.1.1 Frontpanel

Das Frontpanel ist die interaktive Benutzeroberfläche. Es weist zwei Fenster auf und ist in Abbildung 5.14 dargestellt.

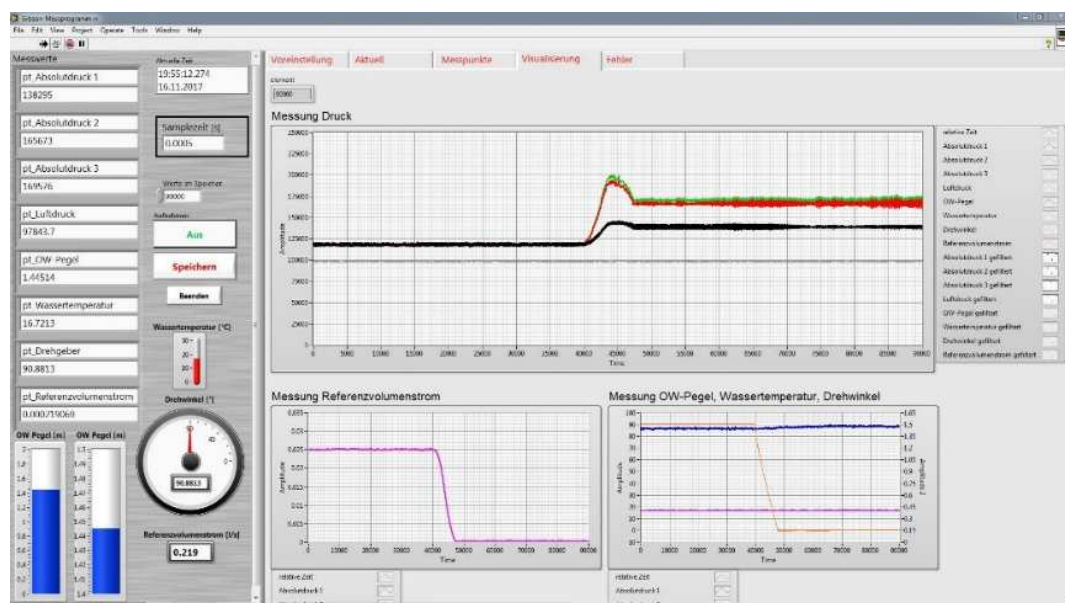


Abbildung 5.14: Frontpanel

Das linke Dialogfeld des Frontpanels beinhaltet die numerische Messwertanzeige der acht Sensoren und bestimmte graphische Anzeigeelemente, die Zeit- und Datumsangabe sowie Anzeige- und Eingabefelder und Schaltflächen, die zur Bedienung des Messprogramms erforderlich sind (siehe Abbildung 5.15).

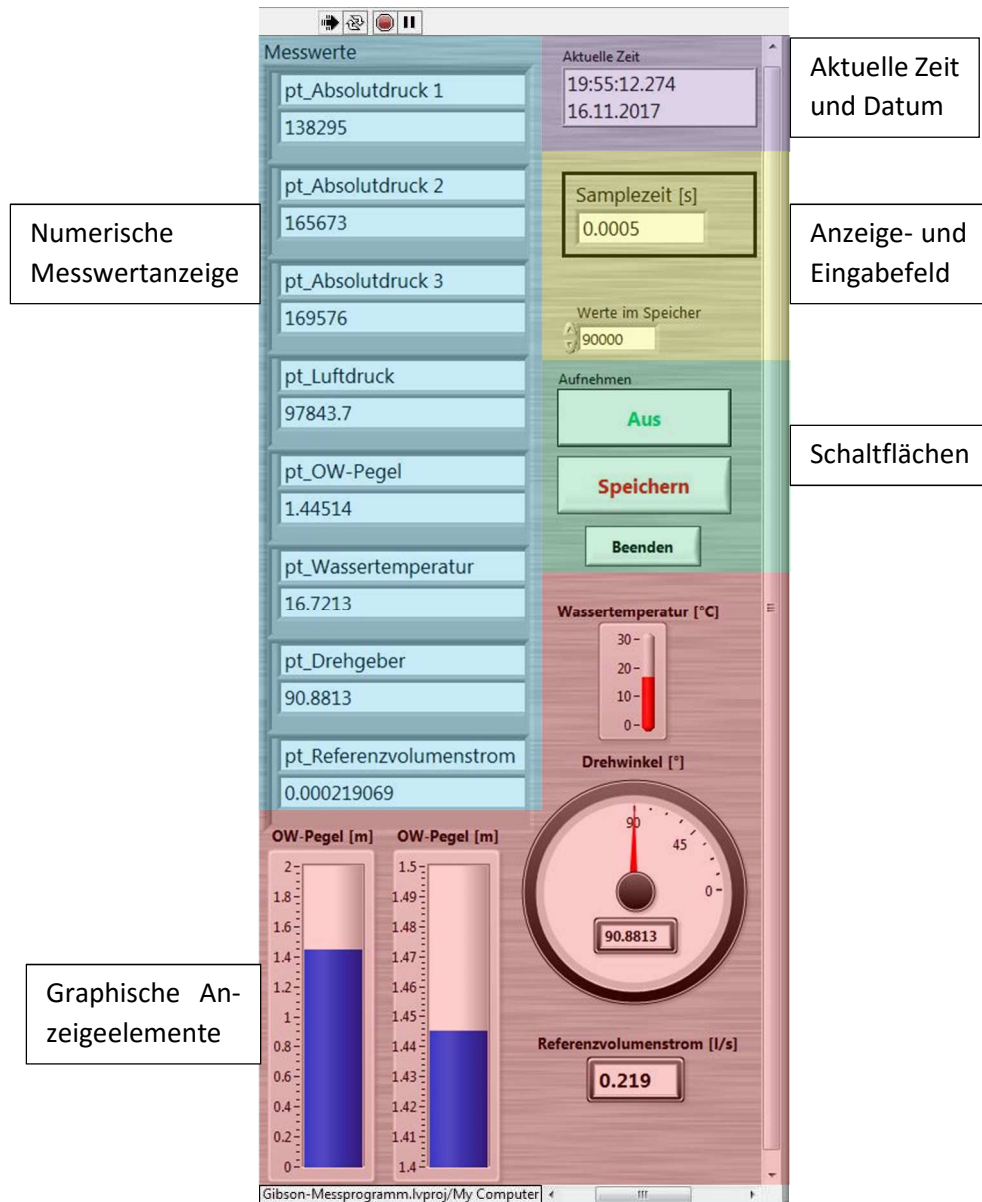


Abbildung 5.15: Linkes Dialogfeld des Frontpanels

Die im linken Frontpanel ausgegebenen graphischen und numerischen Messwerte sind Mittelwerte. Dazu werden die mit der eingestellten Abtastrate aufgezeichneten Messwerte zu Datenpaketen – in bestimmbarer Größe – zusammengefasst und gemittelt. Stimmen die Paketgröße und die Abtastrate in ihren Beträgen überein, so erfolgt die Bildung der Mittelwerte und die Ausgabe der Messwerte in Intervallen von einer Sekunde.

Die graphischen Anzeigeelemente veranschaulichen relevante Messwerte (Oberwasser-Pegel, Wassertemperatur, Drehwinkel des Absperrschiebers, Referenzvolumenstrom) und liefern eine bessere Übersichtlichkeit über den Messvorgang. Dies trifft besonders auf den Referenzvolumenstrom zu, der zum Einstellen verschiedener Betriebspunkte herangezogen wird.

Zur Koordinierung des Messablaufes stehen je ein Anzeige- und Eingabefeld zur Verfügung. Die Samplezeit entspricht dem Kehrwert der Abtastfrequenz und gibt den Zeitschritt der Messwertaufzeichnung wieder, die "Werte im Speicher" spiegeln die Anzahl der pro Sensor aufzeichnenbaren Datenpunkte. Das Produkt aus beiden Größen ergibt die Dauer der Messaufzeichnung. Die aktuelle Zeitangabe und das Datum vervollständigen die Anzeige im Frontpanel. Gestartet wird das Messprogramm mit dem Button "Run" in der Icon-Leiste. Mit dem Start werden die gemittelten Sensorwerte im Frontpanel angezeigt, aber noch keine Daten aufgezeichnet. Wird die Schaltfläche von "AUS" auf "AN" geschaltet, beginnt die Aufzeichnung der Messwerte. Dieser Status bleibt bis zum neuerlichen Umschalten auf "AUS" aufrecht. Mit der Schaltfläche "Speichern" werden die aufgezeichneten Messwerte in eine TDMS-Datei exportiert. Die Schaltfläche "Beenden" stoppt das Messprogramm.

Das rechte Dialogfeld des Frontpanels beinhaltet die Ein- und Ausgabepattform des Messprogramms und bietet die Möglichkeit zur Datenvisualisierung. Zur Handhabung stehen folgende Reiter zur Verfügung: Voreinstellung, Aktuell, Messpunkte, Visualisierung und Fehler.

Im Dialogfeld "Voreinstellung" werden die Adresse des Datenerfassungsgerätes, die Einstellung der Abtastrate und der Datenpaketgröße zur Mittelwertbildung sowie die Auswahl und Einstellung der Sensoren vorgenommen.

Abbildung 5.16 zeigt das Dialogfeld Voreinstellung.

Physikalische Größe	Messsignal	Physikalischer Kanal	Umskalierung	Messbereich
pt_Absolutdruck 1	Spannung	cDAQ-HFM02Mod7/ai0	pt_Absolutdruck_1_SN-156084	Minimal Wert: 0, Maximal Wert: 1E+6
pt_Absolutdruck 2	Spannung	cDAQ-HFM02Mod7/ai1	pt_Absolutdruck_2_SN-180790	Minimal Wert: 0, Maximal Wert: 1E+6
pt_Absolutdruck 3	Spannung	cDAQ-HFM02Mod7/ai2	pt_Absolutdruck_3_SN-180791	Minimal Wert: 0, Maximal Wert: 1E+6
pt_Luftdruck	Strom	cDAQ-HFM02Mod1/ai2	pt_Luftdruck	Minimal Wert: 0, Maximal Wert: 500000
pt_OW-Pegel	Strom	cDAQ-HFM02Mod1/ai0	pt_Pegelmesssonde	Minimal Wert: 0, Maximal Wert: 2
pt_Wassertemperatur	Strom	cDAQ-HFM02Mod1/ai1	pt_Wassertemperatur	Minimal Wert: 0, Maximal Wert: 35
pt_Drehgeber	Spannung	cDAQ-HFM02Mod1/ai2	pt_Drehgeber	Minimal Wert: 0, Maximal Wert: 90

Abbildung 5.16: Dialogfeld Voreinstellung

Jeder Sensor erfordert die Eingabe seines Namens, der Art des Messsignals, des physikalischen Kanals im Datenerfassungsgerät, der Skalierungsvorschrift und des Messbereiches. (siehe Abbildung 5.17).

Physikalische Größe
pt_Absolutdruck 1

Messsignal
Spannung

Physikalischer Kanal
cDAQ-HFM02Mod7/ai0

Umskalierung
pt_Absolutdruck_1_SN-156084

Messbereich

Minimal Wert
0

Maximal Wert
1E+6

Abbildung 5.17: Dialogfeld eines Sensors

Im Reiter "Aktuell" werden jeweils die aktuellen Messwerte einer Zeitperiode, die dem Quotienten aus der Anzahl der Messpunkte pro Paket und der Abtastrate entspricht, in einem Diagramm dargestellt. Das Diagramm stellt eine Lupenfunktion dar. Im Reiter "Messpunkte" werden die aufgezeichneten Messpunkte in tabellarischer Form und im Reiter "Visualisierung" anhand von Waveform-Graphen dargestellt. Abbildung 5.18 zeigt die Visualisierungsgraphen der aufgezeichneten Messwerte.

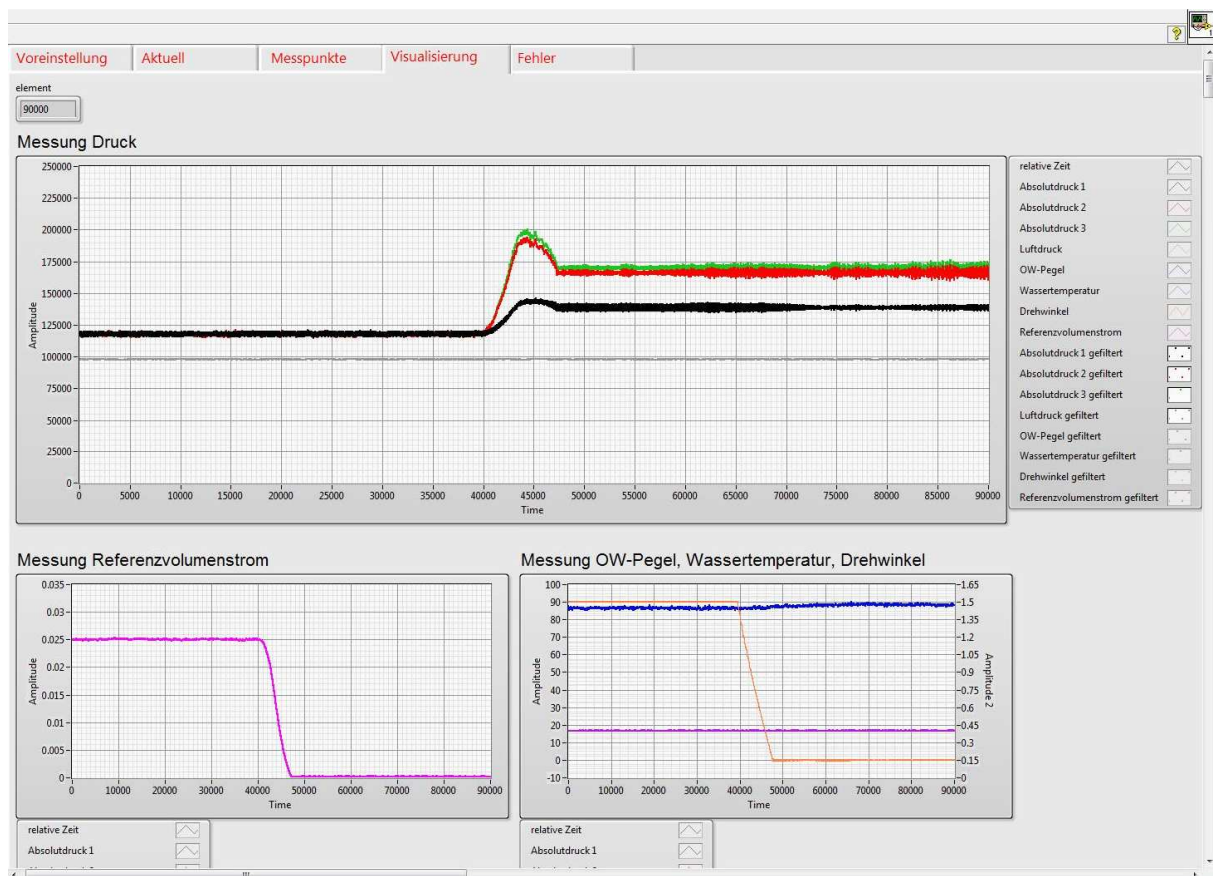


Abbildung 5.18: Graphen aufgezeichneter Messwerte

Treten im Ablauf des Programms Fehler auf, werden diese in Form einer Fehlermeldung im Reiter "Fehler" ausgegeben.

5.2.1.2 Blockdiagramm

Das Blockdiagramm enthält die Programmierlogik, d. h. das Steuerprogramm des tatsächlich auszuführenden Programms. Die Bestandteile des Blockdiagramms sind untergeordnete Programme (Sub-VIs), vordefinierte Funktionen, Konstanten und Ablaufstrukturen wie zum Beispiel Verzweigungen, Fallunterscheidungen und Schleifen. Das Steuerprogramm entsteht durch die Verbindung von VIs und elementaren Operatoren. Frontpanelobjekte haben korrespondierende Anschlüsse im Blockdiagramm, so dass Daten vom Benutzer an das Programm und umgekehrt übergeben werden. [51]

Das Messprogramm besteht aus den Programmblöcken Datenerfassung, Visualisierung sowie Datenausgabe und Speicherung. Datenerfassung, Visualisierung und Datenaufnahme laufen parallel ab. Die Speicherung und Umwandlung in eine TDMS-Datei erfolgt nach der Datenaufnahme.

Die am Frontpanel vorhandenen Anzeigeelemente sind im Visualisierungsblock eingebettet. Eine im Frontpanel nicht dargestellte Erweiterung stellt der eingebaute Tiefpassfilter dar. Dieser wurde erforderlich, um den Einfluss der den Messsignalen überlagerten Störsignale zu reduzieren.

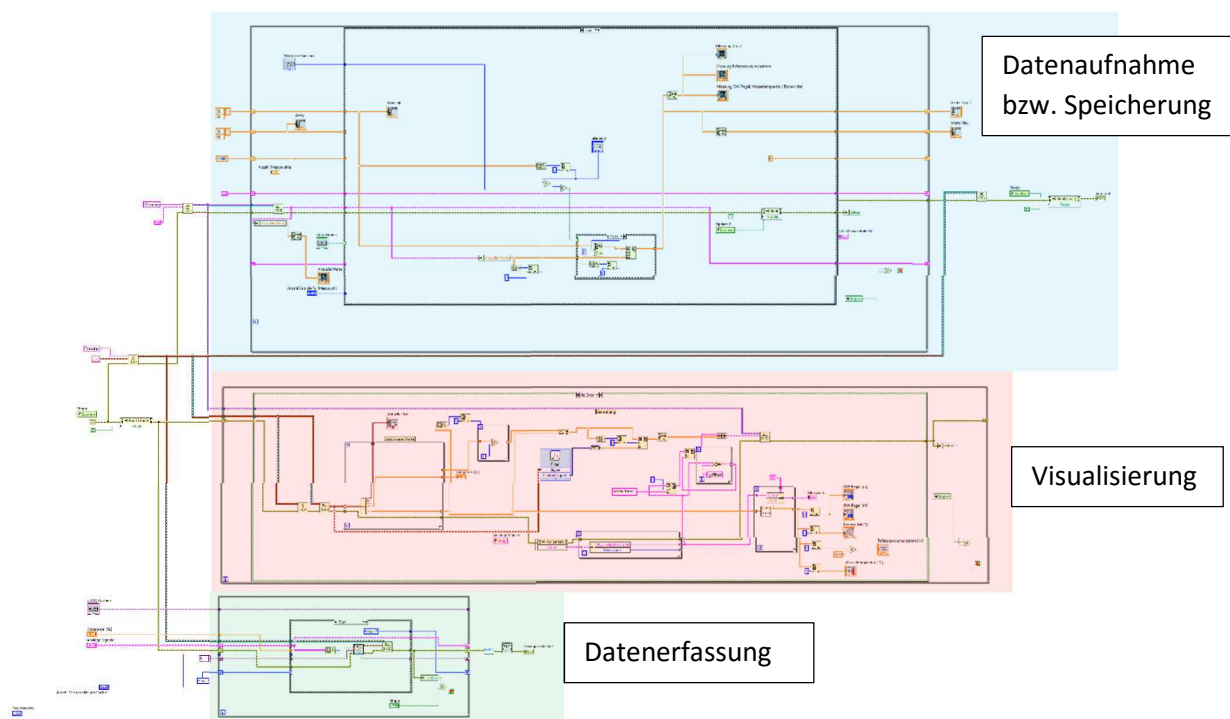


Abbildung 5.19: Blockdiagramm des Messprogramms

5.2.2 Auswerteprogramm

Das Auswerteprogramm wurde im Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel geschrieben und umfasst fünf Mappen: Messwerte, Rahmenbedingungen, Durchflussberechnung, Dichte nach IAPWS-IF97 und Erdbeschleunigung.

5.2.2.1 Übersicht

Die Mappe "Messwerte" beinhaltet alle während eines Messzyklus aufgenommenen Messwerte. Die Daten werden vom Messprogramm übernommen und über den TDMS-Importer in das Excel-Auswerteprogramm importiert.

In der Mappe "Rahmenbedingungen" erfolgt die Eingabe und die Berechnung wesentlicher für die Durchflussrechnung notwendiger Parameter. Diese umfassen die geodätische Höhenlage der Druckaufnehmer in den Messebenen, die physikalischen Daten des Wassers sowie die Berechnung des Penstockfaktors. Die Berechnung der Dichte und der Erdbeschleunigung erfolgt in den eigenständigen Mappen "Dichte nach IAPWS-IF97" und "Erdbeschleunigung". Die Berechnung des Volumenstroms wird in der Mappe "Durchflussberechnung" durchgeführt. Das Berechnungsprogramm ist dermaßen aufgebaut, dass die Berechnung sowohl für form- und flächengleiche als auch ungleiche Messquerschnitte durchgeführt werden kann.

5.2.2.2 Rahmenbedingungen

Zur Erfassung der geodätischen Höhenlagen der in den Messebenen positionierten Druckaufnehmer, ist eine exakte Nivellierung vorzunehmen. Abbildung 5.20 zeigt das zu Grunde liegende Nivellierungsschema.

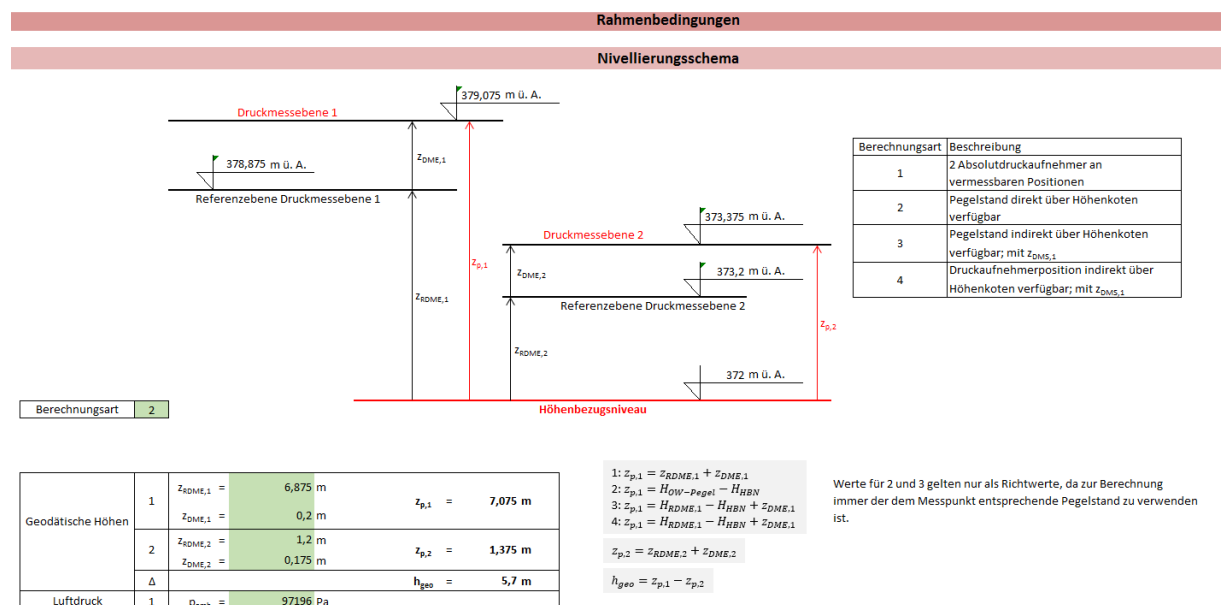


Abbildung 5.20: Nivellierungsschema

Grundlage dazu ist ein Höhenbezugsniveau, auf das sämtliche relevante Höhenangaben bezogen werden. Indem die Prüfstandmessung drei Messbereiche (Messung im geraden Rohr, Messung über einen Krümmer, Messung gegen Oberwasser) umfasste, wurden die geodätischen Höhenlagen der drei Druckaufnehmer in den Messebenen p_1 , p_2 und p_3 , die geodätische Höhe der Achse des Rohreinlaufes der Messleitung im Oberwasserbehälter sowie der Pegelmesssonde im Oberwasserbehälter aufgenommen und in tabellarischer Form hinterlegt. Die geodätische Höhendifferenz aus den zwei für die jeweilige Durchflussberechnung relevanten Höhenlagen der Messpunkte $z_{p,1}$ und $z_{p,2}$ berechnet sich nach Gleichung (5.2).

$$h_{geo} = z_{p,1} - z_{p,2} \quad (5.2)$$

Die Berechnung des Penstockfaktors F beruht ausschließlich auf der Geometrie der Rohrleitung innerhalb der Messstrecke und berechnet sich aus der Summe aller Rohrsegmentlängen L_i und deren Verhältnis zum jeweiligen Rohrsegmentquerschnitt A_i . Die Rohrsegmentlänge L_i kann für gerade Rohrleitungssegmente direkt eingegeben oder bei Bögen aus dem Krümmerradius R_i und dem Krümmerwinkel α_i mit Gleichung (5.3) berechnet werden.

$$L_i = 2 \cdot R_i \cdot \pi \cdot \frac{\alpha_i}{360^\circ} \quad (5.3)$$

Die Summe der einzelnen Rohrsegmentlängen L_i ergibt die zur Berechnung herangezogene Rohrleitungslänge L .

$$L = \sum_i L_i \quad (5.4)$$

Die Berechnung des Rohrsegmentquerschnittes A_i ist vom Querschnittsverlauf des Rohrsegmentes abhängig. Handelt es sich um einen gleichbleibenden Rohrleitungsquerschnitt, erfolgt dessen Berechnung in Abhängigkeit der Querschnittsform nach den Gleichungen (5.5) bzw. (5.6).

$$A_i = \frac{D_i^2 \cdot \pi}{4} \quad (5.5)$$

$$A_i = B_i \cdot H_i \quad (5.6)$$

D_i beschreibt den Rohrinne Durchmesser, B_i die Breite und H_i die Höhe eines rechteckigen Rohrquerschnittes.

Verändert sich hingegen die Querschnittsform oder die -dimension entlang des Rohrleitungssegments, ist die mittlere Querschnittsfläche $A_{\overline{12}}$ zu berechnen. Die Berechnung erfolgt dabei für Konen mit kreisrundem Querschnitt nach Gleichung (5.7) oder für rechteckigen Querschnitt nach Gleichung (5.8).

$$A_{12} = \left(\frac{D_1 + D_2}{2} \right)^2 \cdot \frac{\pi}{4} \quad (5.7)$$

$$A_{12} = \frac{B_1 + B_2}{2} \cdot \frac{H_1 + H_2}{2} \quad (5.8)$$

Ebenso werden Querschnittsübergänge mit veränderlicher Querschnittsform berücksichtigt. Gleichung (5.9) beschreibt den Übergang von kreisförmigen auf rechteckigen Querschnitt und Gleichung (5.10) den umgekehrten Übergang.

$$A_{12} = \frac{1}{2} \cdot \left(B_1 \cdot H_1 + \frac{D_2^2 \cdot \pi}{4} \right) \quad (5.9)$$

$$A_{12} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{D_1^2 \cdot \pi}{4} + B_2 \cdot H_2 \right) \quad (5.10)$$

Das Verhältnis aus Rohrsegmentlänge L_i und dem Rechenquerschnitt A_i ergibt nach Gleichung (5.11) den Penstockfaktor für das betrachtete Rohrsegment F_i .

$$F_i = \frac{L_i}{A_i} \quad (5.11)$$

Der für die Berechnung verwendete Penstockfaktor F ergibt sich aus der Summe der Penstockfaktoren der Rohrsegmente F_i .

$$F = \sum_i F_i \quad (5.12)$$

Die Dateneingabe zur Berechnung der physikalischen Größen – Dichte des Wassers und Erdbeschleunigung – erfolgt in der Mappe “Rahmenbedingungen”, die Berechnung aber in zwei eigenständigen Mappen.

Die Berechnung der Dichte wird, wie in Abschnitt 1.3.3 beschrieben, nach Gleichung (1.24) und den in Tabelle 12-2 angeführten Koeffizienten und Exponenten durchgeführt. Die Eingabe der Temperatur und des Absolutdruckes kann sowohl in SI-Einheiten (Pa, K) als auch in den Einheiten bar und °C erfolgen. Die Erdbeschleunigung berechnet sich nach Gleichung (1.17) und erfordert die Eingabe der Seehöhe und des Breitengrades.

5.2.2.3 Durchflussberechnung

Die Berechnung erfolgt in zwei Rechenschritten. Der erste Rechenschritt liefert eine Anfangslösung, an die im zweiten Schritt eine iterative Berechnung ansetzt.

5.2.2.3.1 Anfangslösung

Der Mappe "Messwerte" werden die Daten des der Berechnung zu Grunde gelegten Zeitbereiches entnommen und in die Mappe "Durchflussberechnung" eingefügt.

Die Berechnung des Differenzdruckes $\Delta p_{s,M}(t)$ aus den Messwerten ist von der Messanordnung abhängig und wird für die Messung in der Rohrleitung nach Gleichung (5.13) und für die Messung gegen den Oberwasserpegel nach Gleichung (5.14) durchgeführt.

$$\Delta p_{s,M}(t) = p_{abs,2} - p_{abs,1} - \varrho \cdot g \cdot h_{geo} \quad (5.13)$$

$$\Delta p_{s,M}(t) = p_{abs,2} - \varrho \cdot g \cdot z_{p,1}(t) - p_{amb} - \varrho \cdot g \cdot h_{geo} \quad (5.14)$$

Die Druckterme $p_{abs,1}$ und $p_{abs,2}$ entsprechen den in den Druckmessebenen aufgenommenen Absolutdrücken und der Term $\varrho \cdot g \cdot h_{geo}$ korrigiert die geodätische Höhendifferenz der Druckaufnehmer. Da es sich bei den verwendeten Drucktransmittern um Absolutdruckaufnehmer handelt, ist bei der Messung gegen den Oberwasserpegel der Luftdruck p_{amb} zu berücksichtigen. Bei dieser Messanordnung dient als zweite Druckmessebene der Eintritt in die Rohrleitung. Der dort vorherrschende Druck wird mit dem Term $\varrho \cdot g \cdot z_{p,1}(t)$ ausgedrückt. Der Verlauf des Differenzdruckes $\Delta p_{s,M}(t)$ wird in einem Druck-Zeit-Diagramm veranschaulicht. Anhand dessen erfolgt die Festlegung der Integrationsgrenzen t_0 und t_k sowie die Bestimmung der Grenzen des Schließvorganges T_1 und T_2 .

Im Druck-Zeit-Diagramm ist ersichtlich, dass der Differenzdruckverlauf – auf Grund des vor der Messung nicht durchgeführten Nullpunktgleichs der Druckaufnehmer – einen Offset aufweist. Die Korrektur erfolgt mittels des Druckoffsets Δp_{offset} , der aus dem Mittelwert des Differenzdruckes $\Delta p_{s,M}(t)$ im Bereich T_2 bis t_k gebildet wird.

Demzufolge wird der Druckverlauf $\Delta p_s(t)$, der der Volumenstromberechnung zu Grunde gelegt ist, für die Messung in der Rohrleitung nach Gleichung (5.15) und für die Messung gegen den Oberwasserpegel nach Gleichung (5.16) berechnet.

$$\Delta p_s(t) = p_{abs,2} - p_{abs,1} - \varrho \cdot g \cdot h_{geo} - \Delta p_{offset} \quad (5.15)$$

$$\Delta p_s(t) = p_{abs,2} - \varrho \cdot g \cdot z_{p,1}(t) - p_{amb} - \varrho \cdot g \cdot h_{geo} - \Delta p_{offset} \quad (5.16)$$

Abbildung 5.21 zeigt in der linken Graphik den Verlauf des aufgezeichneten Differenzdruckes $\Delta p_{s,M}(t)$ und in der rechten Graphik den auf den Nullpunkt korrigierten Differenzdruck $\Delta p_s(t)$.

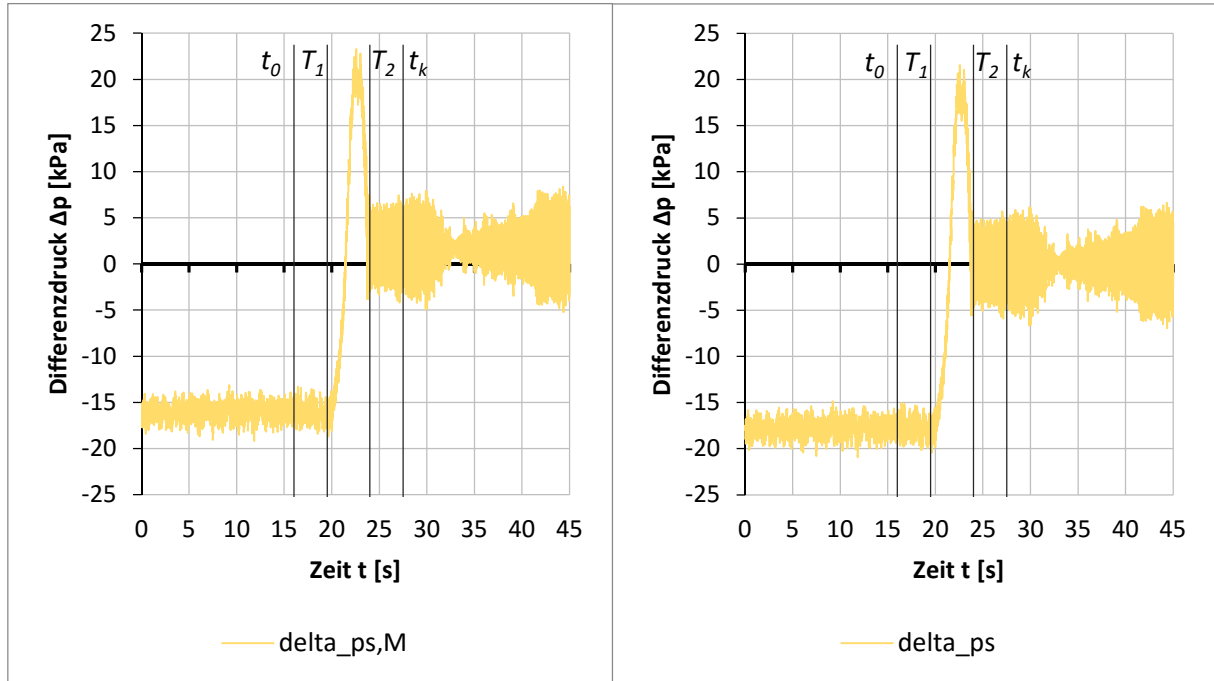


Abbildung 5.21: Differenzdruckverlauf ohne und mit Offset-Korrektur

Im ersten Berechnungsschritt wird der Verlauf der Reibungskurve (Recoveryline) im Bereich T_1 bis T_2 durch eine stückweise definierte Funktion $\Delta p_{Gerade}(t)$ – siehe Gleichung (5.17) – näherungsweise nachgebildet. Der gesamte Funktionssatz setzt sich aus zwei konstanten Funktionen und einer miteinander verbindenden Geraden zusammen. Als konstante Funktion im Bereich von t_0 bis T_1 gilt der Mittelwert $\Delta p_{s,mittel}$ des vor Beginn des Schließens vorherrschenden statischen Differenzdruckes. Im Bereich von T_2 bis t_k entspricht die Konstante dem Wert Null. Die verbindende Gerade befindet sich im Bereich T_1 bis T_2 .

$$\Delta p_{Gerade}(t) = \begin{cases} \Delta p_{s,mittel} & t_0 \leq t < T_1 \\ k_{Gerade} \cdot t + \Delta p_{s,mittel} & T_1 \leq t \leq T_2 \\ 0 & T_2 < t \leq t_k \end{cases} \quad (5.17)$$

Gleichung (5.18) beschreibt die Steigung der Geraden k_{Gerade} .

$$k_{Gerade} = \frac{\Delta p_{s,mittel}}{T_2 - T_1} \quad (5.18)$$

Aus Abbildung 5.22 ist der Verlauf des Differenzdruckes $\Delta p_s(t)$ sowie der näherungsweise nachgebildeten Recoveryline $\Delta p_{Gerade}(t)$ ersichtlich.

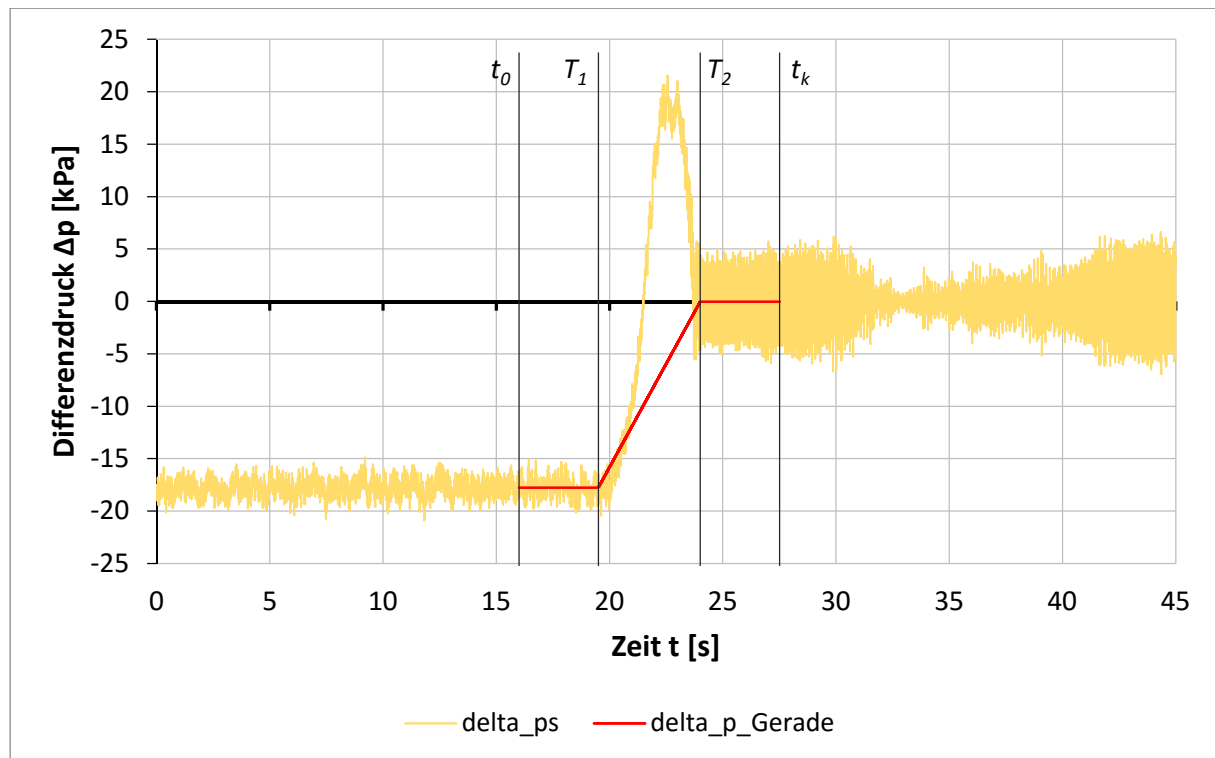


Abbildung 5.22: Druck-Zeit-Diagramm

In erster Näherung erfolgt die Berechnung des Volumenstroms nach der theoretischen Gleichung (5.19).

$$Q = \frac{1}{\rho \cdot F} \cdot \int_{t_0}^{t_k} [\Delta p_s(t) + \Delta p_{Gerade}(t)] dt \quad (5.19)$$

Der Differenzdruckverlauf $\Delta p_s(t)$ ist durch die aufgezeichneten Messwerte gegeben, die jedoch keiner mathematischen Funktion folgen. Daher ist die analytische Integration nicht durchführbar und die Auswahl eines geeigneten numerischen Integrationsverfahrens zu treffen. Prinzipiell stehen die Trapezregel, die Simpsonregel, die Simpsonregel 3/8 und die Bode-regel zur Auswahl. Auf Grund ihrer Einfachheit und der Möglichkeit für jeden Zeitschritt einen Rechenwert zu generieren, wird die Trapezregel, deren Genauigkeit bei kleiner werdender Zeitschrittweite Δt mit der zweiten Ordnung steigt, als die geeignetste Methode angesehen (siehe Tabelle 5-10).

Tabelle 5-10: Fehlerabschätzung der Trapezregel

Δt [s]	Größenordnung des Fehlers [-]
0,1	10^{-3}
0,01	10^{-5}
0,005	10^{-6}
0,001	10^{-7}

Die Trapezregel wird über den gesamten Berechnungsbereich von t_0 bis t_k angewendet. Der jeder Zeitschrittweite entsprechende Differenzdruck $dp_{s,i}$ wird nach Gleichung (5.20) berechnet.

$$dp_{s,i} = \frac{\Delta t}{2} \cdot [\Delta p_s(t_i) + \Delta p_s(t_{i+1})] \quad (5.20)$$

Für die angenommene Recoveryline $\Delta p_{Gerade}(t)$ ergibt sich für jede Zeitschrittweite Δt der Druckverlust $dp_{Gerade,i}$ nach Gleichung (5.21).

$$dp_{Gerade,i} = \frac{\Delta t}{2} \cdot [\Delta p_{Gerade}(t_i) + \Delta p_{Gerade}(t_{i+1})] \quad (5.21)$$

Die Zeitschrittweite Δt ist von der Abtastfrequenz abhängig und wird durch Gleichung (5.22) beschrieben.

$$\Delta t = t_{i+1} - t_i \quad (5.22)$$

Aus den berechneten Teildrücken $dp_{s,i}$ und $dp_{Gerade,i}$ wird mit Gleichung (5.23) für jeden Zeitschritt die Druckdifferenz dp_i gebildet. Diese entspricht der von beiden Kurven im Zeitschritt eingeschlossenen Fläche.

$$dp_i = dp_{s,i} - dp_{Gerade,i} \quad (5.23)$$

Die numerische Integration der Teildruckdifferenzen dp_i erfolgt nach Gleichung (5.24). Die Addition über den Rechenbereich führt zur Gesamtdruckdifferenz Δp_{Summe} .

$$\Delta p_{Summe} = \sum_{i=1}^n dp_i \quad (5.24)$$

Daraus ergibt sich der Volumenstrom vor dem Schließen der Armatur nach Gleichung (5.25).

$$Q = \frac{1}{\rho \cdot F} \cdot \Delta p_{Summe} \quad (5.25)$$

Da sich der gesamte Volumenstrom aus der Summe aller in den Zeitschritten vorherrschenden Teildruckdifferenzen dp_i zusammensetzt, entspricht jedes dp_i einem repräsentativen Teilvolumenstrom im jeweiligen Zeitschritt. Diese Gegebenheit erlaubt es, den Verlauf des Volumenstroms während des Schließvorgangs zu berechnen. Der sich aus der Teildruckdifferenz dp_i ergebende Volumenstrom dQ_i ergibt sich aus Gleichung (5.26).

$$dQ_i = \frac{1}{\rho \cdot F} \cdot dp_i \quad (5.26)$$

Um den Verlauf des Volumenstroms während des Schließvorganges $Q(t)$ zu berechnen, sind die bis zum Zeitpunkt t aufsummierten Volumenstromanteile $\sum_{t_0}^t dQ_i$ vom Volumenstrom Q zu subtrahieren.

$$Q(t) = Q - \sum_{t_0}^t dQ_i \quad (5.27)$$

5.2.2.3.2 Iterative Berechnung

Der zweite Berechnungsschritt stellt eine iterative Vorgehensweise dar, beruht auf der Anfangslösung und wird bis zum Erreichen der Abbruchbedingung durchgeführt. Der Verlauf der Recoveryline wird nunmehr aus den zuvor berechneten Verläufen des Volumenstroms während des Schließvorganges $Q(t)$ berechnet.

Das setzt die Kenntnis des Rohrreibungsbeiwertes k entlang der Messstrecke voraus. Dessen Berechnung erfordert die Ermittlung der vor dem Schließen vorherrschenden mittleren dynamischen Druckdifferenz $\Delta p_{d,mittel}$ und der mittleren statischen Druckdifferenz $\Delta p_{s,mittel}$.

Der Verlauf der dynamischen Druckdifferenz $\Delta p_d(t)$ wird als Funktion des Volumenstromverlaufs während des Schließvorganges $Q(t)$ nach Gleichung (5.28) berechnet.

$$\Delta p_d(t) = - \left(\frac{\varrho}{2 \cdot A_2^2} - \frac{\varrho}{2 \cdot A_1^2} \right) \cdot Q^2(t) \quad (5.28)$$

Die dynamische Druckdifferenz $\Delta p_d(t)$ findet in der Berechnung nur dann Anwendung, wenn die Messebenen unterschiedliche Strömungsquerschnitte A_1 und A_2 aufweisen. Die Messquerschnitte werden nach den Gleichungen (5.5) und (5.6) berechnet. Das negative Vorzeichen des rechten Terms beschreibt den Kurvenverlauf im Diagramm, der von einem negativen Differenzdruckwert gegen Null verläuft.

Unter Anwendung der Trapezregel erfolgt die numerische Integration der dynamischen Druckdifferenz $\Delta p_d(t)$ und führt nach Gleichung (5.29) auf die dynamischen Teildruckdifferenzen $dp_{d,i}$ der Zeitschritte.

$$dp_{d,i} = \frac{\Delta t}{2} \cdot [\Delta p_d(t_i) + \Delta p_d(t_{i+1})] \quad (5.29)$$

Die numerische Integration der den Zeitschritten zu Grunde liegenden dynamischen Teildruckdifferenzen $dp_{d,i}$ im Bereich von t_0 bis t_k führt nach Gleichung (5.30) auf die dynamische Gesamtdruckdifferenz $\Delta p_{d,Summe}$.

$$\Delta p_{d,Summe} = \sum_{i=1}^n dp_{d,i} \quad (5.30)$$

Indem der durch die Rohrreibung verursachte Druckverlust im stationären Betriebszustand in guter Näherung als konstant gilt, wird dieser als mittlerer Druckverlust $\Delta p_{v,mittel}$ über den Bereich von t_0 bis T_1 gebildet. Dazu ist die Mittelung der dynamischen Druckdifferenz $\Delta p_{d,mittel}$ als auch des Differenzdrucksignals $\Delta p_s(t)$ im selben Bereich erforderlich. Da das aus der Differenzdruckmessung herrührende mittlere Drucksignal $\Delta p_{s,mittel}$ sowohl die mittlere dynamische Druckdifferenz als auch den mittleren Druckverlust enthält, rechnet sich der mittlere Druckverlust $\Delta p_{v,mittel}$ nach Gleichung (5.31).

$$\Delta p_{v,mittel} = \Delta p_{s,mittel} - \Delta p_{d,mittel} \quad (5.31)$$

Aus dem mittleren Druckverlust wird die mittlere hydraulische Verlusthöhe $h_{v,mittel}$ in mH₂O nach Gleichung (5.32) berechnet.

$$h_{v,mittel} = \frac{\Delta p_{v,mittel}}{\rho \cdot g} \quad (5.32)$$

Aus der Gleichung der hydraulischen Verluste $h_{v,mittel}$

$$h_{v,mittel} = \zeta_v \cdot \frac{c^2}{2 \cdot g} \quad (5.33)$$

ergibt sich durch Einsetzen der Kontinuitätsgleichung

$$c = \frac{Q}{A} \quad (5.34)$$

und Umformung, der Verlustbeiwert der Messstrecke ζ_v nach Gleichung (5.35).

$$\zeta_v = \frac{2 \cdot g \cdot h_{v,mittel} \cdot A_2^2}{Q^2} \quad (5.35)$$

Der Verlustbeiwert ζ_v wird auf die Messebene zwei bezogen.

Wird der Druckverlust Δp_v aus den Höhenverlusten h_v nach Gleichung (5.36) berechnet

$$\Delta p_v = \rho \cdot g \cdot h_v \quad (5.36)$$

und für h_v die gemittelte hydraulische Verlusthöhe $h_{v,mittel}$ aus Gleichung (5.33) eingesetzt, ergibt sich durch Einsetzen der Kontinuitätsgleichung (5.34) der Druckverlust Δp_v nach Gleichung (5.37). Q ist der Volumenstrom vor Beginn des Schließvorganges.

$$\Delta p_v = \zeta_v \cdot \frac{\rho}{2 \cdot A_2^2} \cdot Q^2 \quad (5.37)$$

Die Vereinfachung obiger Gleichung führt nach Gleichung (5.38) zum Rohrreibungsbeiwert k :

$$k = \zeta_v \cdot \frac{\varrho}{2 \cdot A_2^2} \quad (5.38)$$

Aus dem während des Schließvorganges als konstant gesetzten Rohrreibungsbeiwertes ergibt sich der Verlauf des Druckverlustes $\Delta p_v(t)$ nach Gleichung (5.39).

$$\Delta p_v(t) = k \cdot Q^2(t) \quad (5.39)$$

Um den Kurvenverlauf vom negativen Differenzdruckwert gegen Null richtig abzubilden, wird die rechte Seite von Gleichung (5.39) mit einem negativen Vorzeichen versehen.

$$\Delta p_v(t) = -k \cdot Q^2(t) \quad (5.40)$$

Gleichung (5.40) wird im Bereich von t_0 bis t_k angewendet.

Die Anwendung der Trapezregel auf den Verlauf des Druckverlustes $\Delta p_v(t)$ liefert die Teil-druckverlustdifferenzen $dp_{v,i}$.

$$dp_{v,i} = \frac{\Delta t}{2} \cdot [\Delta p_v(t_i) + \Delta p_v(t_{i+1})] \quad (5.41)$$

Die Teildruckverlustdifferenzen $dp_{v,i}$ werden nach Gleichung (5.42) im Bereich von t_0 bis t_k durch Addition numerisch aufintegriert. Das Ergebnis dieser Addition ist die Gesamtdruckverlustdifferenz $\Delta p_{v,Summe}$.

$$\Delta p_{v,Summe} = \sum_{i=1}^n dp_{v,i} \quad (5.42)$$

Die Summe der Verläufe des dynamischen Differenzdruckes $\Delta p_d(t)$ und des Druckverlustes $\Delta p_v(t)$ ergeben nach Gleichung (5.43) den Verlauf der in Abbildung 5.23 dargestellten Recoveryline $\Delta p(t)$.

$$\Delta p(t) = \Delta p_d(t) + \Delta p_v(t) \quad (5.43)$$

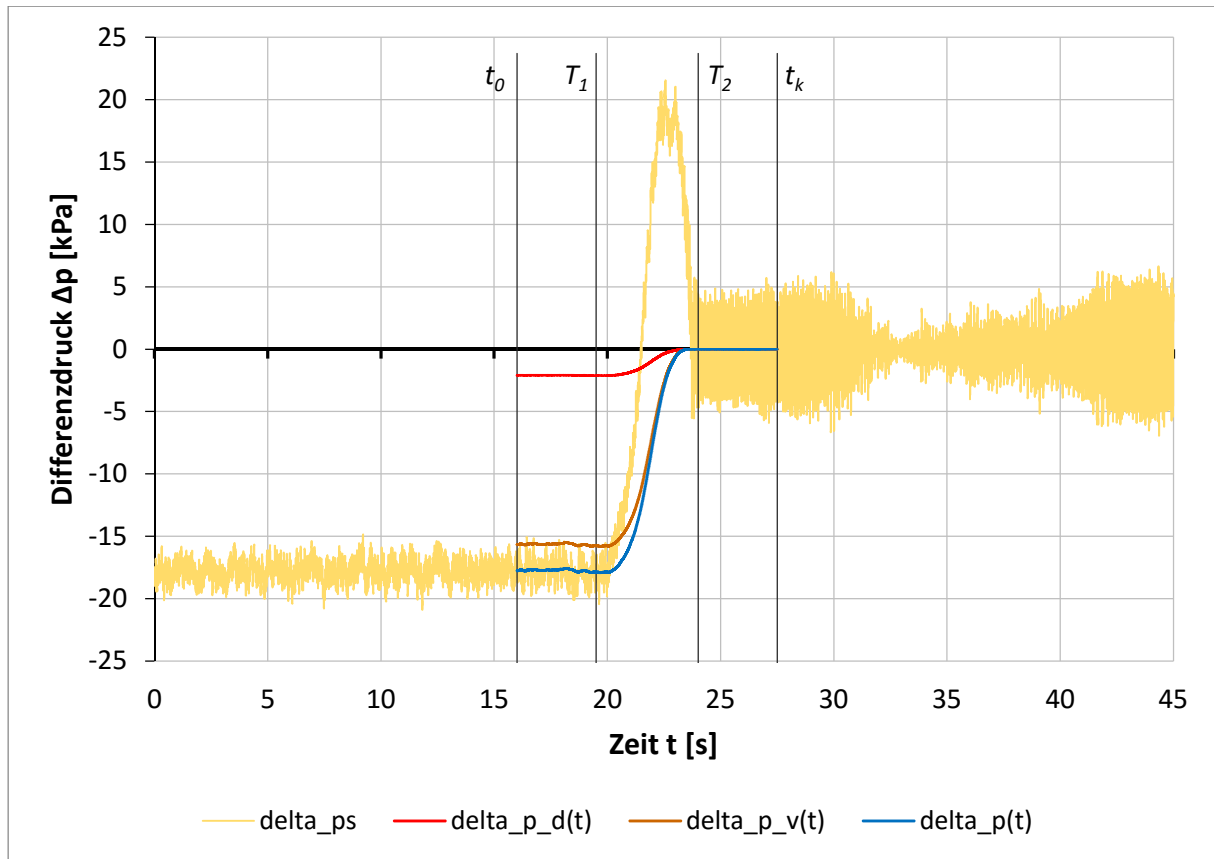


Abbildung 5.23: Zusammensetzung der Recoveryline

Die Berechnung des Volumenstroms Q erfolgt nach der theoretischen Gleichung (5.44).

$$Q = \frac{1}{\varrho \cdot F} \cdot \int_{t_0}^{t_k} [\Delta p_s(t) + \Delta p_d(t) + \Delta p_v(t)] dt \quad (5.44)$$

Die praktische Ausführung wird durch die numerische Integration der Druckverläufe durchgeführt. Dazu werden die Kurvenverläufe des Differenzdruckes und der Recoveryline zunächst getrennt aufsummiert. Die Berechnung des Differenzdruckes Δp_s erfolgt durch Addition der Teildifferenzdrücke $dp_{s,i}$ nach Gleichung (5.45).

$$\Delta p_s = \sum_{i=1}^n dp_{s,i} \quad (5.45)$$

Der Gesamtdifferenzdruck Δp_{Summe} wird aus der Summe der dynamischen Gesamtdruckdifferenz $\Delta p_{d,Summe}$ – Gleichung (5.30) – und der Gesamtverlustdruckdifferenz $\Delta p_{v,Summe}$ – Gleichung (5.42) – nach Gleichung (5.46) berechnet.

$$\Delta p_{Summe} = \Delta p_{d,Summe} + \Delta p_{v,Summe} \quad (5.46)$$

Die Berechnung des Volumenstroms Q erfolgt sodann entsprechend Gleichung (5.47).

$$Q = \frac{1}{\varrho \cdot F} \cdot (\Delta p_s + \Delta p_{\text{Summe}}) \quad (5.47)$$

Die Berechnung des Verlaufes des Volumenstroms während des Schließens $Q(t)$ erfolgt nach den Gleichungen (5.26) und (5.27).

Der berechnete Volumenstrom Q_i wird mit dem Volumenstrom der vorherigen Berechnung Q_{i-1} nach Gleichung (5.48) verglichen. Die Abbruchbedingung der Volumenstromberechnung ist erreicht, wenn sich die Beträge zweier aufeinanderfolgender Rechenergebnisse um maximal 0,1 % unterscheiden.

$$\frac{|Q_i - Q_{i-1}|}{Q_i} \leq 0,1\% \quad (5.48)$$

Aus Abbildung 5.24 sind der berechnete Verlauf der Recoveryline (grüne Linie) sowie die Anfangslösung und die Zwischenergebnisse von auszugswise zwei Iterationsschritten ersichtlich. Durch den in der Anfangslösung definierten geraden Verlauf der Recoveryline (rote Line) wird die Anzahl der zur Berechnung notwendigen Iterationsschritte wesentlich verringert.

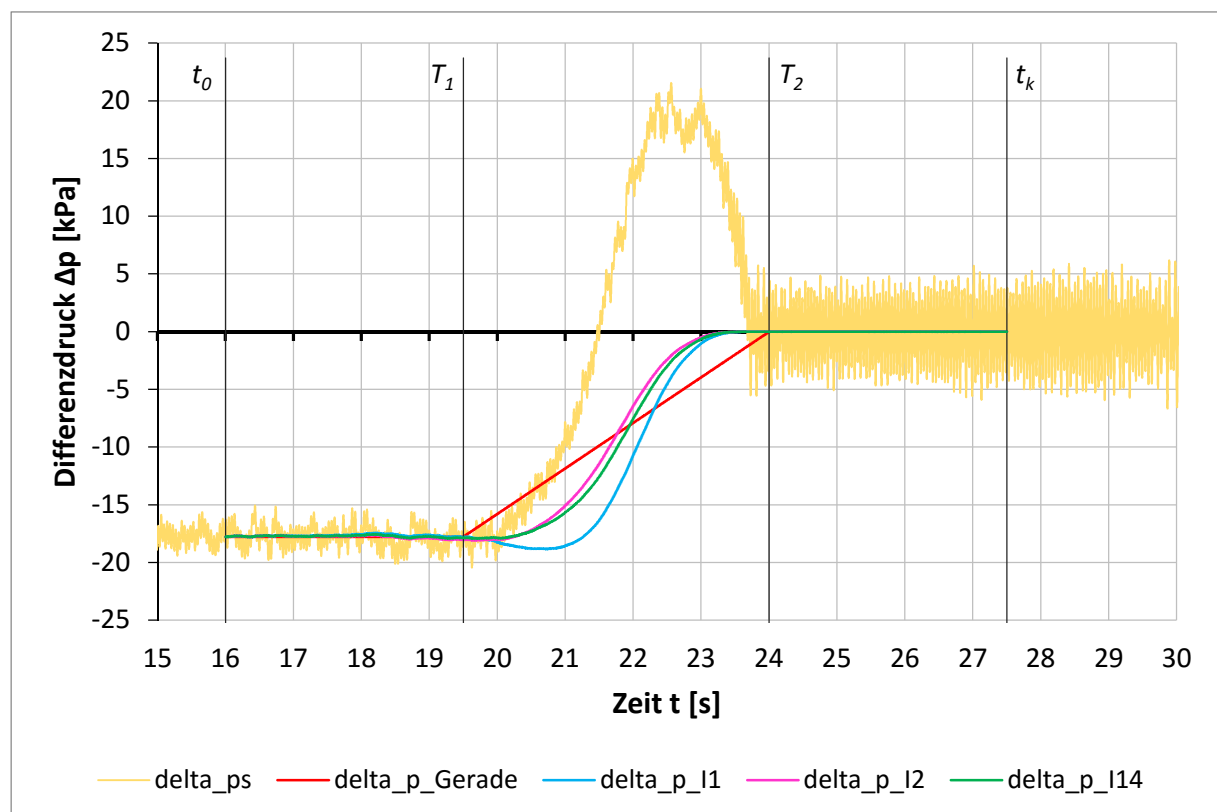
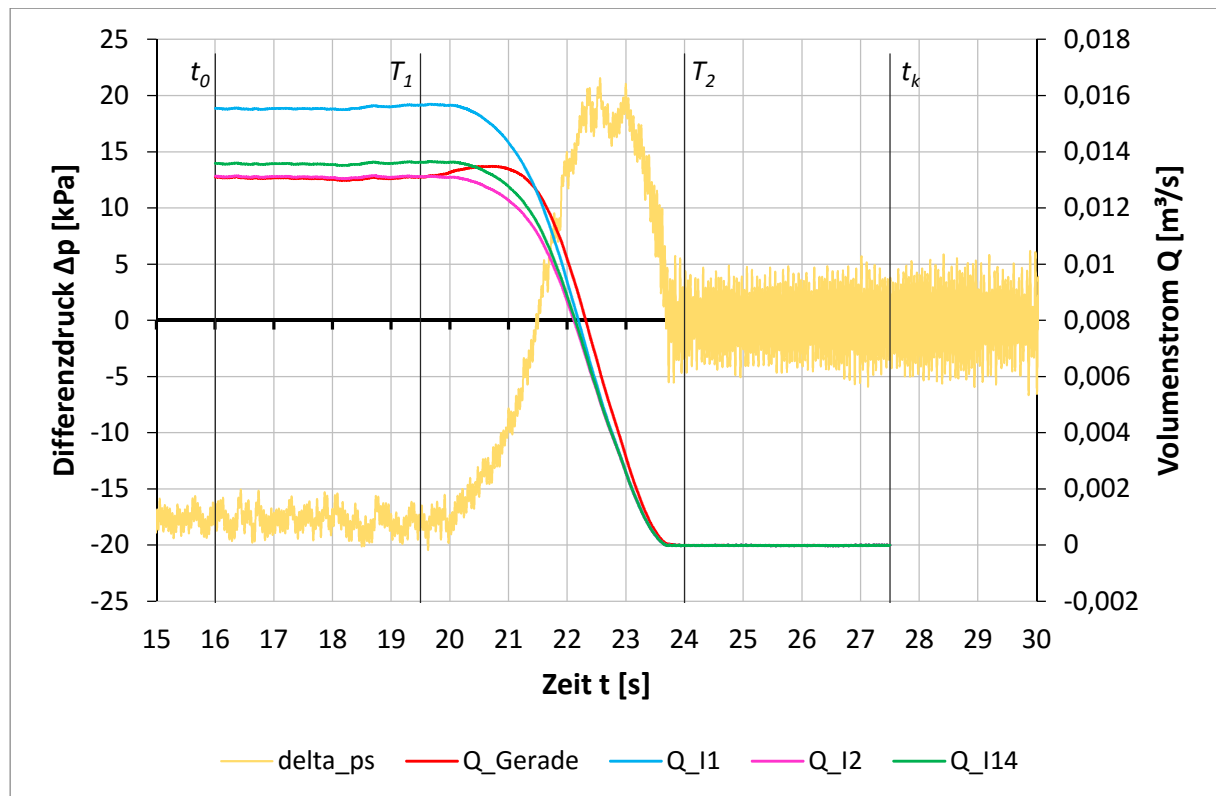
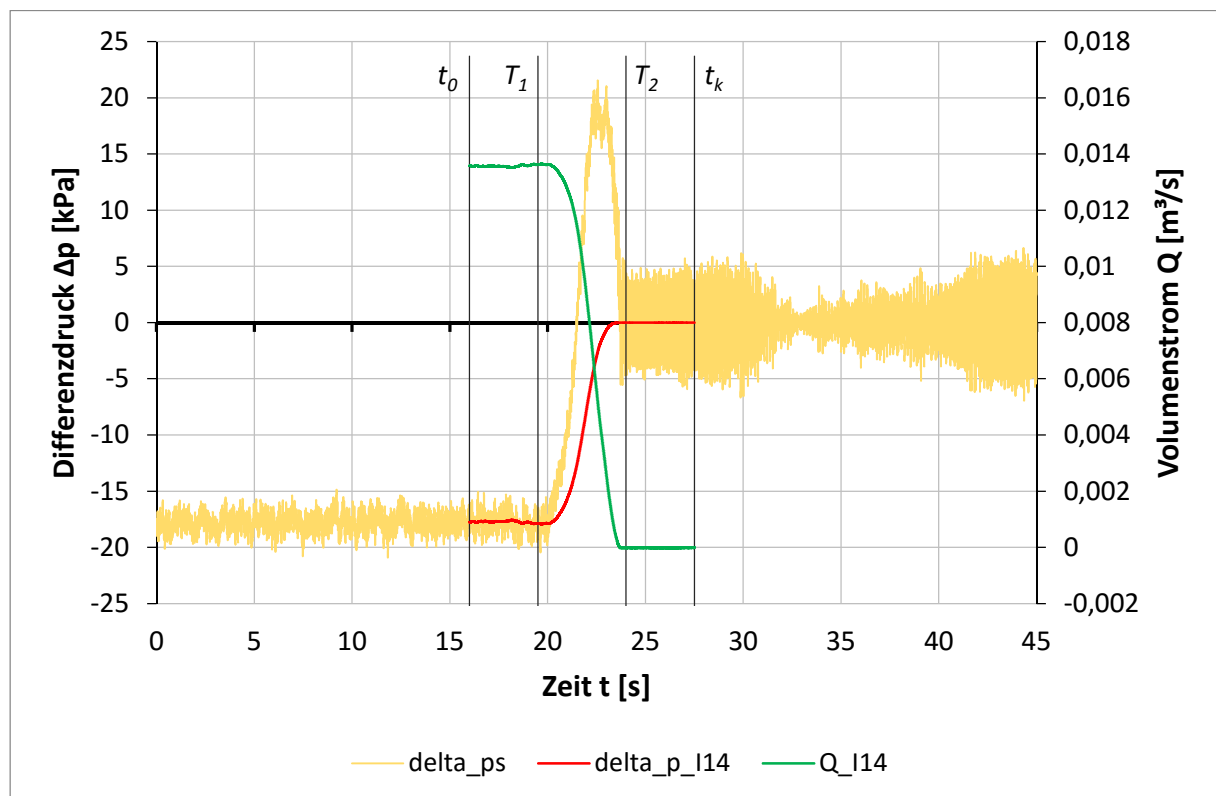


Abbildung 5.24: Iterative Berechnung der Recoveryline

Abbildung 5.25 zeigt das Ergebnis der Volumenstromrechnung mit auszugswise zwei Zwischenlösungen der Iterationsschritte. Der grüne Kurvenverlauf entspricht der Lösung. Die verwendeten Farben der Kurven entsprechen den jeweiligen Verläufen der Recoveryline in Abbildung 5.24.



Schlussendlich werden die Ergebnisse des jeweils letzten Iterationsschrittes im Diagramm der Druck-Zeit-Auswertung graphisch dargestellt (siehe Abbildung 5.26).



5.2.2.4 Berechnung der Messunsicherheit im Auswerteprogramm

Die totale Messunsicherheit wird für jeden Betriebspunkt berechnet und stützt sich auf die ermittelten Volumenströme. Die systematischen Messunsicherheit f_{sys} beschreibt jenen Messfehler, der sich bei einer wiederholt durchgeführten Messung einstellen kann und wird nach dem Formelapparat in Abschnitt 3.4.1 berechnet. Die zu berücksichtigenden und der Berechnung zu Grunde liegenden Einflussgrößen sind in Tabelle 5-11 zusammengefasst. Die systematische Messunsicherheitskomponente aus der Geometrie des Triebwasserweges f_{penst} beruht auf der in der Mappe „Rahmenbedingungen“ hinterlegten Rohrleitungsgeometrie und wird auf Basis der Gleichungen (3.11) und (3.12) berechnet.

Tabelle 5-11: Einflussgrößen auf die systematische Messunsicherheit

Geometrie des Triebwasserweges	f_{penst}
Stationäre Bedingungen	f_{sta}
	f_{run}
Instationäre Bedingungen	f_{PT}
Dynamischer Druckanteil	f_{dyn}
Reibungsanteil	f_{fr}
Leckagevolumenstrom nach Schließen des Absperr- oder Regulierorgans	f_{Qk}
Druckaufnehmer	f_p
Pegelmesssonde	f_z
Dichteberechnung	f_ρ

Die gesamte systematische Messunsicherheit f_{sys} wird nach Gleichung (3.20) aus den Einzelmessunsicherheiten f_i berechnet.

$$f_{sys} = \sqrt{\sum_{i=1}^n f_i^2} \quad (3.20)$$












Die zufällige Messunsicherheit f_{zuf} beschreibt die Messpunktstreuung und wird nach dem in Abschnitt 3.4.2 erläuterten Formelwerk berechnet. Aus den berechneten Messunsicherheiten ergibt sich die totale Messunsicherheit f_{tot} nach Gleichung (3.28).

$$f_{tot} = \pm \sqrt{f_{sys}^2 + f_{zuf}^2} \quad (3.28)$$

6 Prüfstandsmessung

Am Prüfstand wurde eine Reihe von Versuchen durchgeführt. Einerseits galt es, das anlässlich der Masterarbeit entwickelte Auswerteprogramm zu erproben und zu optimieren, als auch den Einfluss verschiedener Messstrecken und unterschiedlicher Varianten der Messanschlüsse für die Druckaufnehmer zu untersuchen. Im Einzelnen wurden drei verschiedene Messstrecken und drei unterschiedliche Messanschlussvarianten untersucht und die Ergebnisse der Volumenstromrechnung auf die Messwerte des magnetisch-induktiven Durchflussmessgerätes referenziert. Die Untersuchung erfolgte auch in Hinblick auf den Einfluss der Abtastfrequenz und unterschiedlicher Schließzeiten des druckimpulserzeugenden Absperrschiebers. Die Versuchsserie zur Simulation eines Leakagevolumenstroms wurde mittels Bypassleitung, als auch durch ein gestuftes Schließen des Absperrschiebers bewerkstelligt. Insgesamt wurden fünf Messserien mit je 30 Einzelversuchen und in der Folge neun Auswertevarianten durchgeführt. Die Aufnahme der Messwerte erfolgte mit einer Abtastfrequenz von 2000 Hz. Die Schließzeit des Kugelhahns wurde während der drei Messserien nicht verändert und so gewählt, dass der Druckstoß die halbe Fallhöhe nicht überschritt, was den Verhältnissen für Druckrohrleitungen in Wasserkraftwerken bis zu einer Fallhöhe von 50 m entspricht. Tabelle 6-1 gibt einen Überblick über die durchgeführten Messserien und die Auswertevarianten.

Tabelle 6-1: Messserien und Auswertevarianten

MESSSTRECKEN							
		$p_1 - p_2$ gerades Rohr		$p_1 - p_3$ über Krümmer	OW - p_3 gegen Oberwasser		
V O L U M E N S T R O M	M						IEC 60041
	E						individuell
	S						Ringleitung
		gestuftes Schließen	Bypassleitung				
		LECKAGEMESSUNG					

6.1 Verschiedene Messanschlüsse und Messstrecken

Der Einfluss verschiedener Messanschlüsse der Druckaufnehmer wurde anhand der folgenden Anschlussformen untersucht:

- Messanschluss nach Norm (siehe Abbildung 6.1)
- Individuell ausgeführter Messanschluss, um die Messmembrane bündig zur Rohrinnenwand zu positionieren (siehe Abbildung 6.2)
- Nutzung beider Messanschlüsse mittels einer Ringleitung (siehe Abbildung 6.3)



Abbildung 6.1: Messanschluss nach Norm



Abbildung 6.2: Individueller Messanschluss



Abbildung 6.3: Messanschluss mittels Ringleitung

Für jede Messanschlussart wurde eine Messserie durchgeführt und die Messdaten in allen Messebenen (p_1 , p_2 , p_3 , OW) aufgezeichnet. Tabelle 6-2 zeigt die volumetrische Stufung der je Messserie untersuchten sechs Betriebspunkte. Jeder Betriebspunkt wurde fünf Mal eingestellt und gemessen.

Tabelle 6-2: Übersicht über die gemessenen Betriebspunkte

Betriebspunkt	Volumenstrom Q [l/s]
1	5
2	10
3	15
4	20
5	25
6	27,5

Jede Messserie wurde für drei Messvarianten (Messung im geraden Rohr, Messung über einen Krümmer, Messung gegen Oberwasser) ausgewertet, die berechneten Volumenströme $Q_{p/t}$ entsprechend der Betriebspunkte gruppiert und in Relation zum Volumenstrom aus der Referenzmessung Q_{ref} gesetzt. Der Vergleich wurde durch Berechnung des relativen Fehlers Δf_r nach Gleichung (6.1) und des absoluten Fehlers Δf_a nach Gleichung (6.2) durchgeführt. Zur richtigen Darstellung in den Graphiken sind beide Gleichungen mit einem negativen Vorzeichen versehen.

$$\Delta f_r = -\frac{Q_{ref} - Q_{p/t}}{Q_{p/t}} \quad (6.1)$$

$$\Delta f_a = -(Q_{ref} - Q_{p/t}) \quad (6.2)$$

Die Mittelwertbildung aus den fünf (n) Messergebnissen je Betriebspunkt wird durch den relativen Fehler $\overline{\Delta f_r}$ und den absoluten Fehler $\overline{\Delta f_a}$ nach den Gleichungen (6.3) und (6.4) ausgedrückt und in Diagrammen dargestellt.

$$\overline{\Delta f_r} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta f_{r,i} \quad (6.3)$$

$$\overline{\Delta f_a} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta f_{a,i} \quad (6.4)$$

Zusätzlich wird für jeden Messpunkt die in Abschnitt 3.4 beschriebene totale Messunsicherheit ermittelt und den Ergebnissen der Durchflussrechnung gegenübergestellt.

6.1.1 Messanschluss nach Norm

Die Ergebnisse der Auswertung für die nach Norm ausgeführten Messanschlüsse sind in den Abbildungen 6.4 bis 6.8 dargestellt. Abbildung 6.4 zeigt die Messergebnisse der Messung im geraden Rohr.

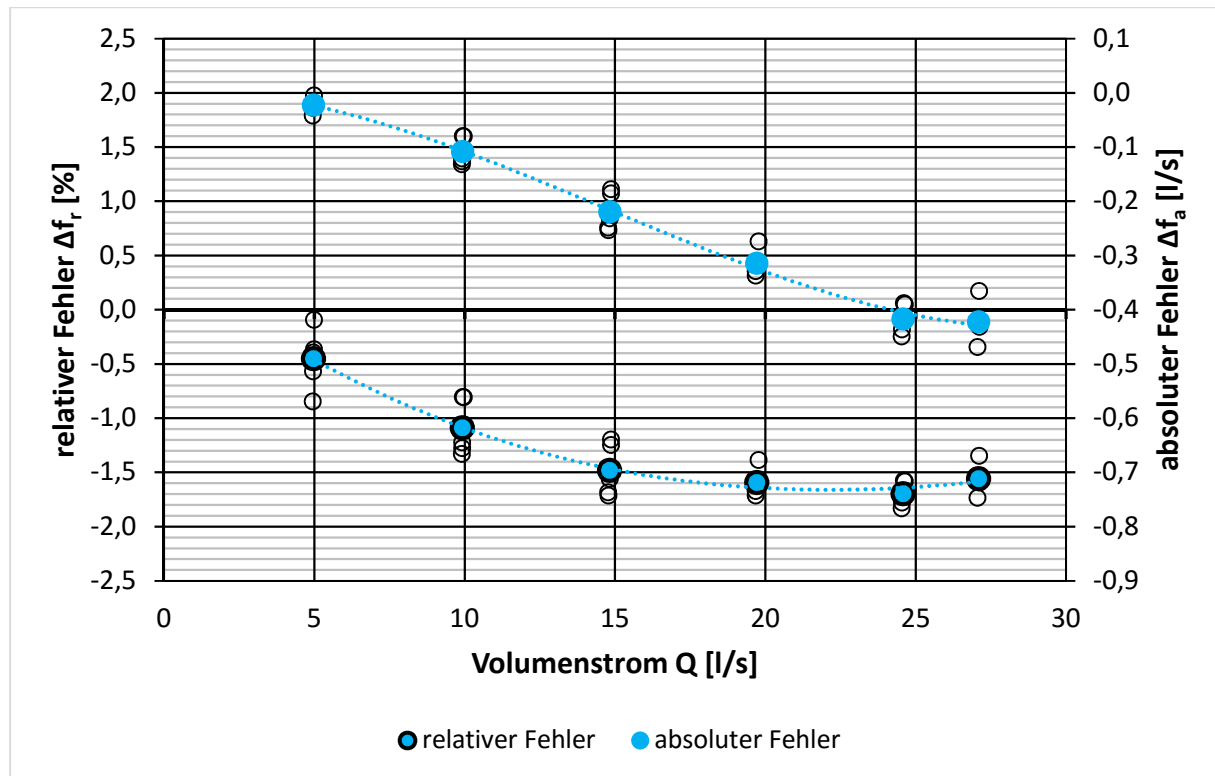


Abbildung 6.4: Messanschluss nach Norm, Messung im geraden Rohr

Bei der Messung im geraden Rohr steigt der relative Fehler von -0,45 % bei einem Volumenstrom von 5 l/s auf -1,56 % bei einem Volumenstrom von 27,5 l/s an. Der größte relative Fehler von -1,70 % tritt bei einem Volumenstrom von 25 l/s auf. Die maximale Streuung der Einzelmessungen beträgt 0,75 % bei einem Volumenstrom von 5 l/s. Die minimale Streuung beträgt 0,26 % bei einem Volumenstrom von 25 l/s. Der absolute Fehler folgt einer annähernd linearen Funktion. Er beträgt minimal -0,02 l/s bei einem Volumenstrom von 5 l/s und maximal -0,42 l/s bei einem Volumenstrom von 27,5 l/s.

Abbildung 6.5 zeigt die Messergebnisse der Messung über den Krümmer. Bei der Messung über den Krümmer steigt der relative Fehler von -0,44 % bei einem Volumenstrom von 5 l/s auf -1,53 % bei einem Volumenstrom von 27,5 l/s an. Der größte relative Fehler von -1,68 % tritt bei einem Volumenstrom von 25 l/s auf. Die maximale Streuung der Einzelmessungen beträgt 0,70 % bei einem Volumenstrom von 5 l/s. Die minimale Streuung beträgt 0,23 % bei einem Volumenstrom von 20 l/s. Der absolute Fehler folgt einer annähernd linearen Funktion. Er beträgt minimal -0,02 l/s bei einem Volumenstrom von 5 l/s und maximal jeweils -0,41 l/s bei den Volumenströmen von 25 l/s und 27,5 l/s.

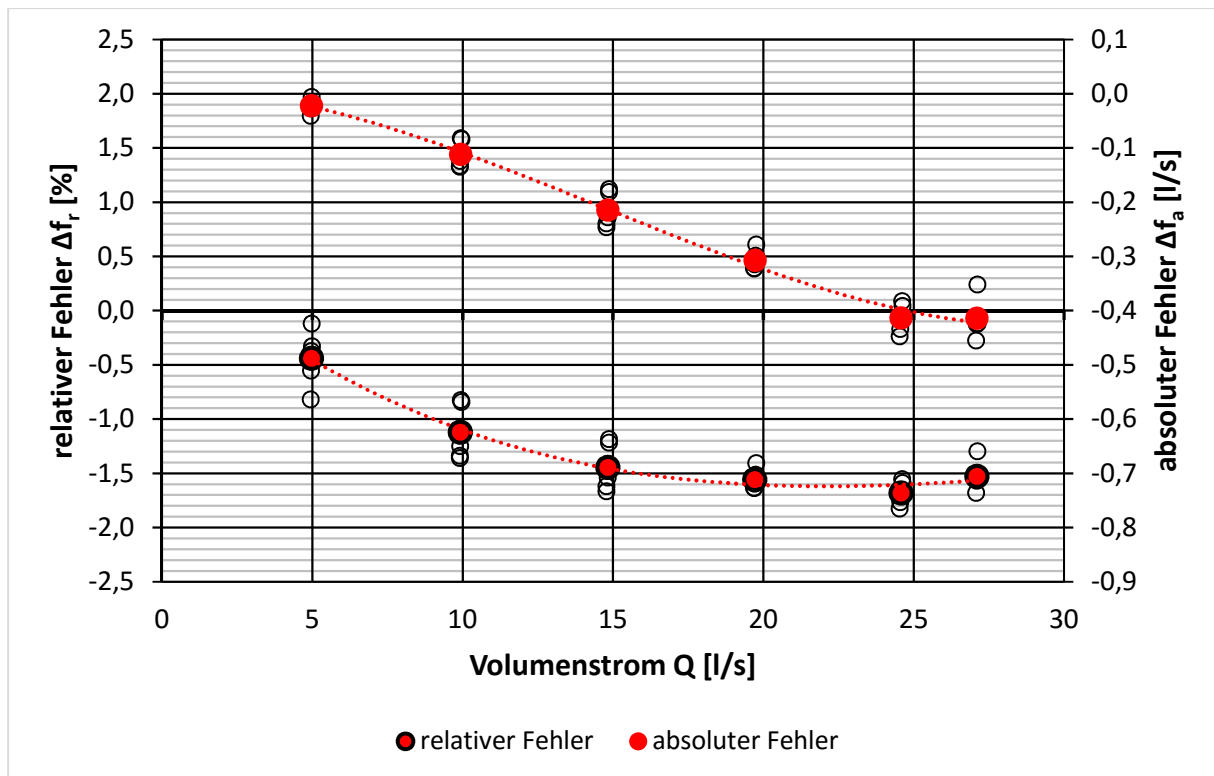


Abbildung 6.5: Messanschluss nach Norm, Messung über Krümmer

Abbildung 6.6 zeigt die Messergebnisse der Messung gegen den Oberwasserpegel.

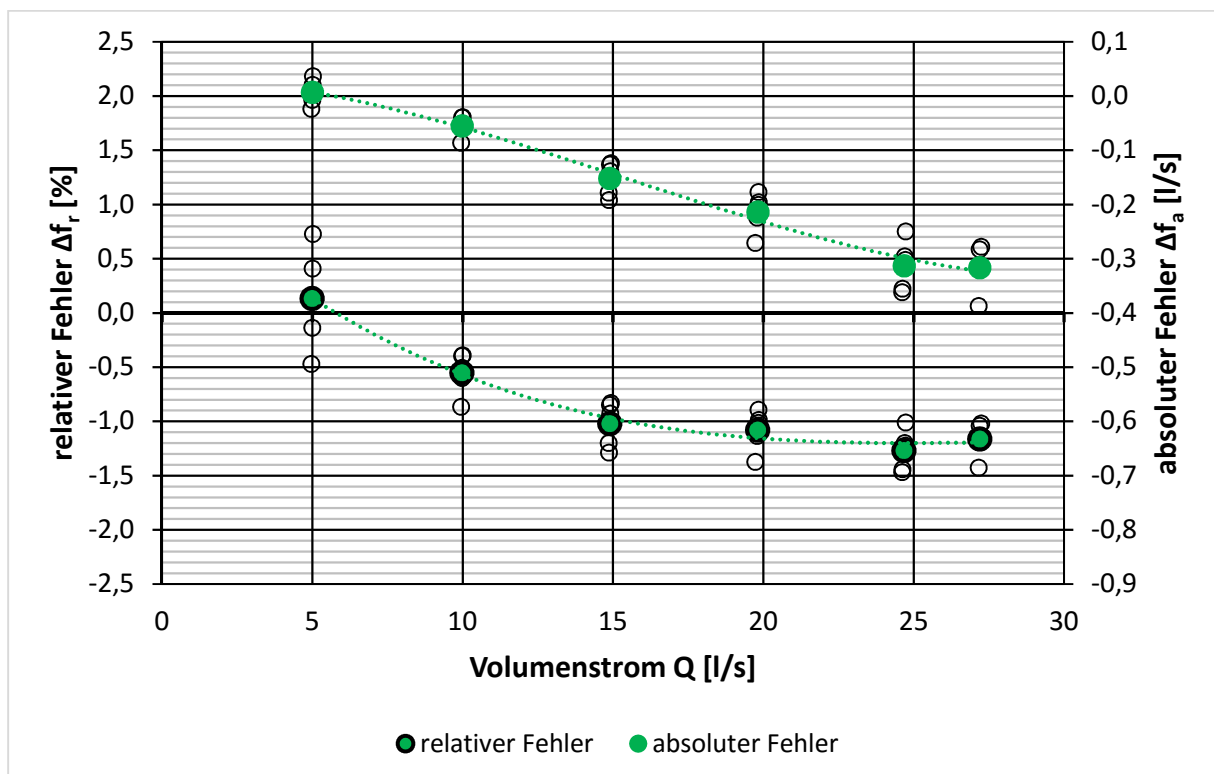


Abbildung 6.6: Messanschluss nach Norm, Messung gegen Oberwasser

Bei der Messung gegen den Oberwasserpegel steigt der relative Fehler von 0,13 % bei einem Volumenstrom von 5 l/s auf -1,16 % bei einem Volumenstrom von 27,5 l/s an. Der größte relative Fehler von -1,27 % tritt bei einem Volumenstrom von 25 l/s auf. Die maximale Streuung der Einzelmessungen beträgt -1,20 % bei einem Volumenstrom von 5 l/s. Die minimale Streuung beträgt 0,41 % bei einem Volumenstrom von 27,5 l/s. Der absolute Fehler folgt einer annähernd linearen Funktion. Er beträgt minimal 0,01 l/s bei einem Volumenstrom von 5 l/s und maximal -0,32 l/s bei einem Volumenstrom von 27,5 l/s.

Abbildung 6.7 zeigt die anhand der drei Messstrecken ermittelten Messergebnisse.

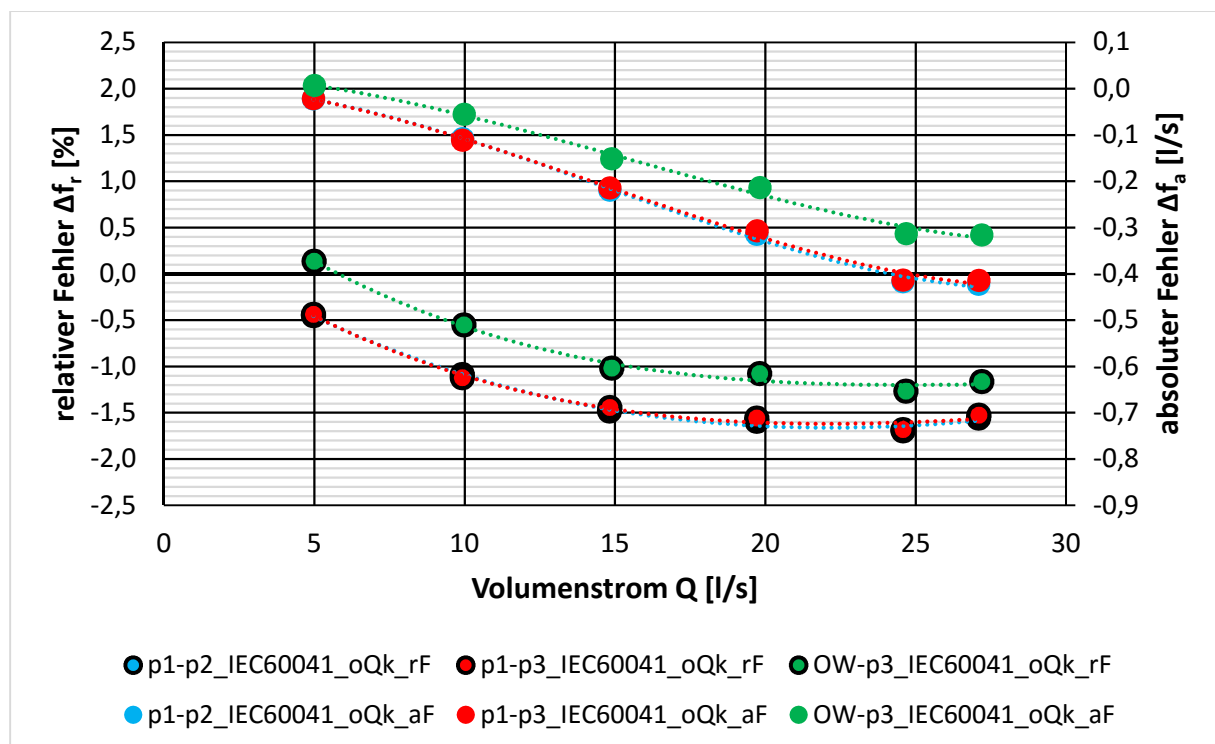


Abbildung 6.7: Messanschluss nach Norm

Die Resultate aus den Messungen im geraden Rohr und über den Krümmer sind nahezu ident. Der Ergebnisverlauf der Messung gegen den Oberwasserpegel liegt tendenziell um ca. 0,5 % besser. Die Fehlertoleranz gemäß IEC 60041 liegt für die Messung im geraden Rohr bei $\pm 2,0$ % und für die Messung über den Krümmer bzw. gegen Oberwasser bei $\pm 2,3$ %. Diese Toleranzen wurden bei den Messungen jeweils unterschritten.

Die den obigen Abbildungen zu Grunde liegenden Daten sind im Anhang in den Tabellen 12-4 bis 12-6 angeführt.

In Abbildung 6.8 sind die Messergebnisse den Ergebnissen der Fehlerrechnung aus Abschnitt 3.4 gegenübergestellt. Die dargestellten Kurvenverläufe der totalen Messunsicherheiten sind vor allem durch die Messunsicherheit aus dem Reibungs- und dem dynamischen Druckanteil dominiert. Gemäß der Fehlerrechnung entspricht ein 20 %iger Reibungsanteil einer Fehlerwahrscheinlichkeit von $f_{fr} = \pm 1$ % und ein 20 %iger Anteil des dynamischen Druckes einer

Fehlerwahrscheinlichkeit von $f_{dyn} = \pm 1 \%$. Bezüglich der Reibungsbedingungen erfüllt der Prüfstand die Anforderungen der Norm nicht, mussten doch bei dessen Konzeption zusätzliche Bedingungen ($L \geq 10 \text{ m}$, $c \cdot L \geq 50 \text{ m}^2/\text{s}$, Raumdargebot, Fallhöhe und Pumpendaten) berücksichtigt werden. Indem die Summe aus Reibungs- und dynamische Druckanteil bei $27,5 \text{ l/s}$ in Abhängigkeit von der Messstrecke zwischen 139% (Messung im geraden Rohr) und 211% (Messung gegen Oberwasser) liegt, ergibt sich eine totale Messunsicherheit von bis zu $\pm 9,35 \%$ für die Messung gegen Oberwasser. In Anbetracht der vor allem auf Grund der Reibungsverhältnisse hohen Messfehlerwahrscheinlichkeit überraschen die guten Ergebnisse der Messserie. In Bezug auf die gerechnete totale Messunsicherheit bei der Messung gegen Oberwasser wäre zu erwarten, dass auch die tatsächlichen Messergebnisse diesem Trend folgen. Die besseren Ergebnisse für die Messung gegen Oberwasser erklären sich möglicherweise dadurch, dass nur ein "vibrationsgeplagter" Druckaufnehmer in der Rohrleitung verwendet wird. Die tendenziellen Verläufe der totalen Messunsicherheiten decken sich mit den Messergebnissen.

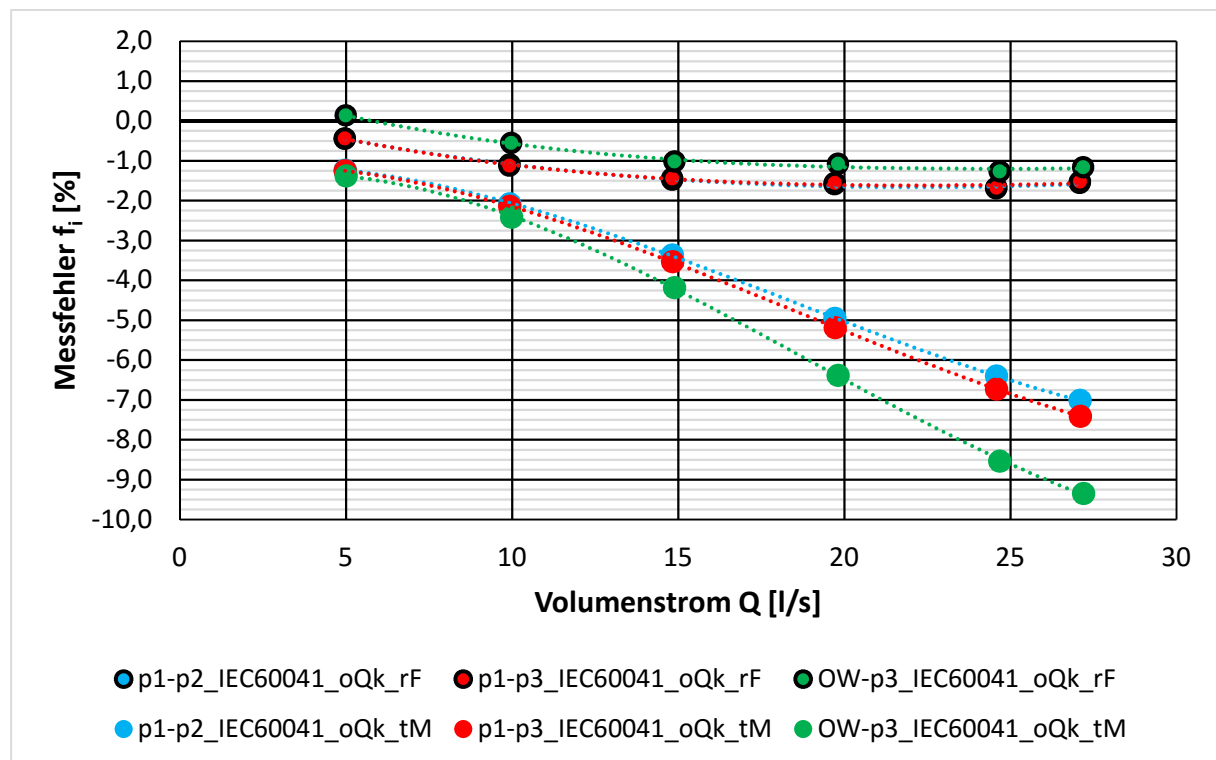


Abbildung 6.8: Vergleich der relativen Fehler mit der totalen Messunsicherheit; Messanschluss nach Norm

6.1.2 Individueller Messanschluss

Die Ergebnisse der Auswertung für die individuell ausgeführten Messanschlüsse sind in den Abbildungen 6.9 bis 6.13 dargestellt.

Abbildung 6.9 zeigt die Messergebnisse der Messung im geraden Rohr. Bei dieser steigt der relative Fehler von $-0,22 \%$ bei einem Volumenstrom von 5 l/s auf $-1,75 \%$ bei einem Volumenstrom von $27,5 \text{ l/s}$ an. Der größte relative Fehler von $-1,88 \%$ tritt bei einem Volumenstrom von 20 l/s auf. Die maximale Streuung der Einzelmessungen beträgt $0,62 \%$ bei einem Volumenstrom von 5 l/s . Die minimale Streuung beträgt $0,12 \%$ bei einem Volumenstrom von

25 l/s. Der absolute Fehler folgt einer annähernd linearen Funktion. Er beträgt minimal -0,01 l/s bei einem Volumenstrom von 5 l/s und maximal -0,47 l/s bei einem Volumenstrom von 27,5 l/s. Der bei einem Volumenstrom von 20 l/s grau dargestellte Messwert wird auf Grund seiner exponierten Lage aus der Analyse ausgeschieden.

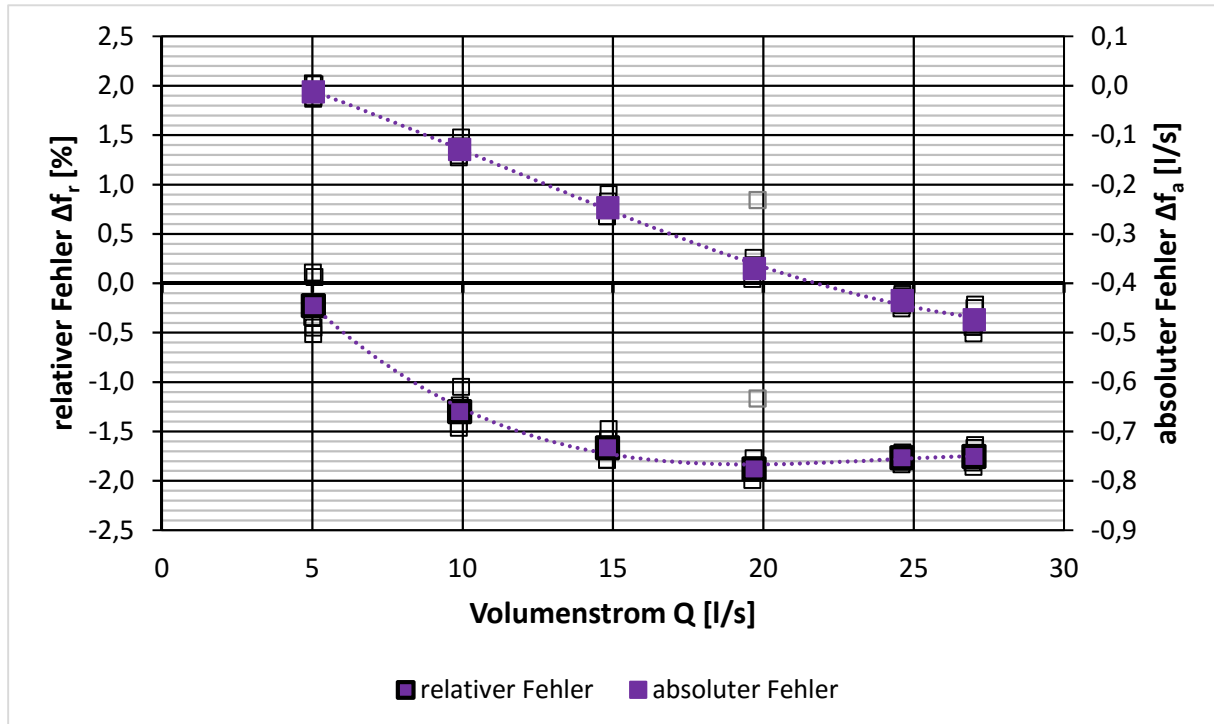


Abbildung 6.9: Individueller Messanschluss, Messung im geraden Rohr

Abbildung 6.10 zeigt die Messergebnisse der Messung über den Krümmer.

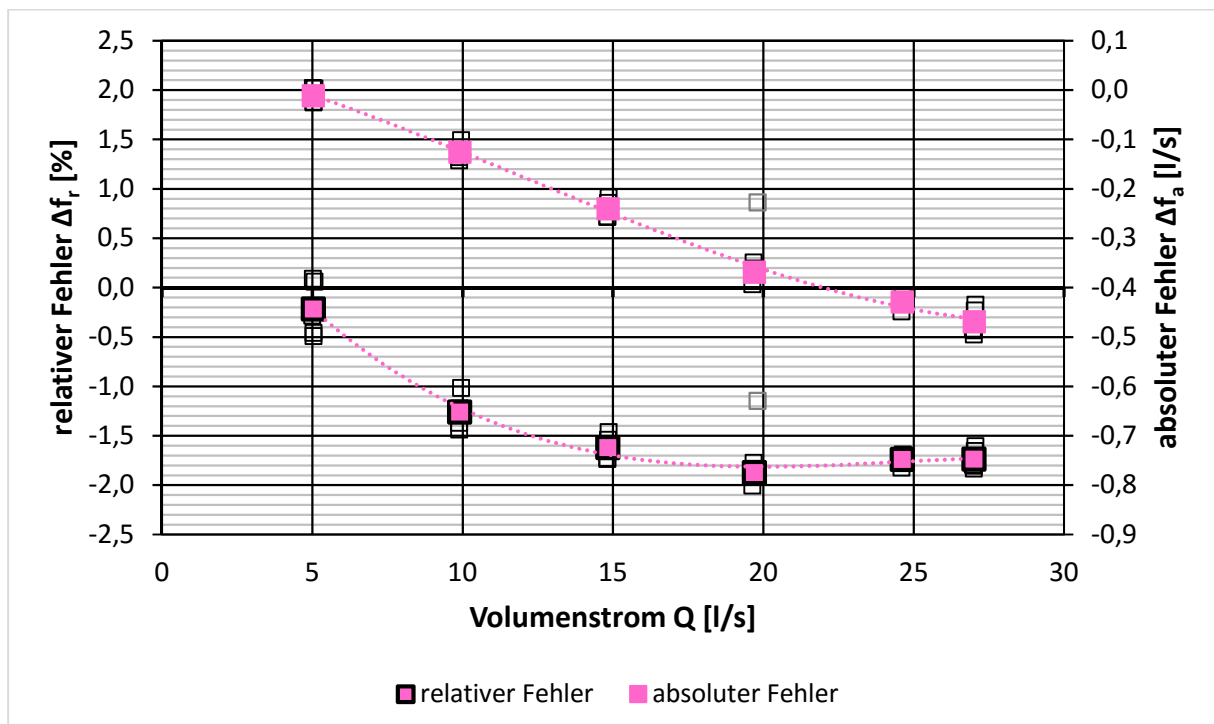


Abbildung 6.10: Individueller Messanschluss, Messung über Krümmer

Bei der Messung über den Krümmer steigt der relative Fehler von -0,21 % bei einem Volumenstrom von 5 l/s auf -1,74 % bei einem Volumenstrom von 27,5 l/s an. Der größte relative Fehler von -1,87 % tritt bei einem Volumenstrom von 20 l/s auf. Die maximale Streuung der Einzelmessungen beträgt 0,58 % bei einem Volumenstrom von 5 l/s. Die minimale Streuung beträgt 0,13 % bei einem Volumenstrom von 25 l/s. Der absolute Fehler folgt einer annähernd linearen Funktion. Er beträgt minimal -0,01 l/s bei einem Volumenstrom von 5 l/s und maximal -0,47 l/s bei einem Volumenstrom von 27,5 l/s. Der bei einem Volumenstrom von 20 l/s grau dargestellte Messwert wird auf Grund seiner exponierten Lage aus der Analyse ausgeschlossen.

Abbildung 6.11 zeigt die Ergebnisse der Messung gegen den Oberwasserpegel.

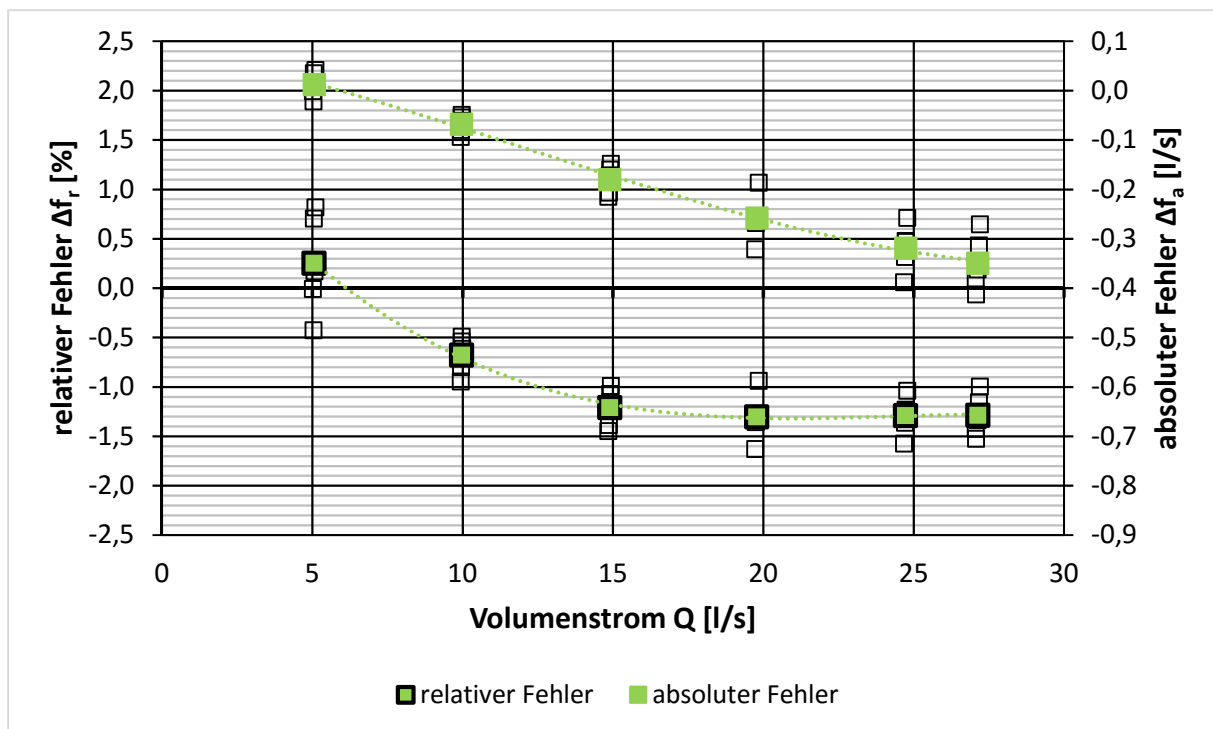


Abbildung 6.11: Individueller Messanschluss, Messung gegen Oberwasser

Bei der Messung gegen Oberwasser steigt der relative Fehler von 0,25 % bei einem Volumenstrom von 5 l/s auf -1,28 % bei einem Volumenstrom von 27,5 l/s an. Der größte relative Fehler von -1,30 % tritt bei einem Volumenstrom von 20 l/s auf. Die maximale Streuung der Einzelmessungen beträgt 1,25 % bei einem Volumenstrom von 5 l/s. Die minimale Streuung beträgt 0,45 % bei einem Volumenstrom von 10 l/s. Der absolute Fehler folgt einer annähernd linearen Funktion. Er beträgt minimal 0,01 l/s bei einem Volumenstrom von 5 l/s und maximal -0,35 l/s bei einem Volumenstrom von 27,5 l/s.

Abbildung 6.12 zeigt die anhand der drei Messstrecken ermittelten Messergebnisse. Die Resultate aus den Messungen im geraden Rohr und über den Krümmer sind nahezu ident. Der Ergebnisverlauf der Messung gegen den Oberwasserpegel liegt tendenziell um ca. 0,5 % besser. Die Fehlertoleranz gemäß IEC 60041 liegt für die Messung im geraden Rohr bei $\pm 2,0$ % und

für die Messung über den Krümmer bzw. gegen Oberwasser bei $\pm 2,3$ %. Diese Toleranzen wurden bei den Messungen jeweils unterschritten.

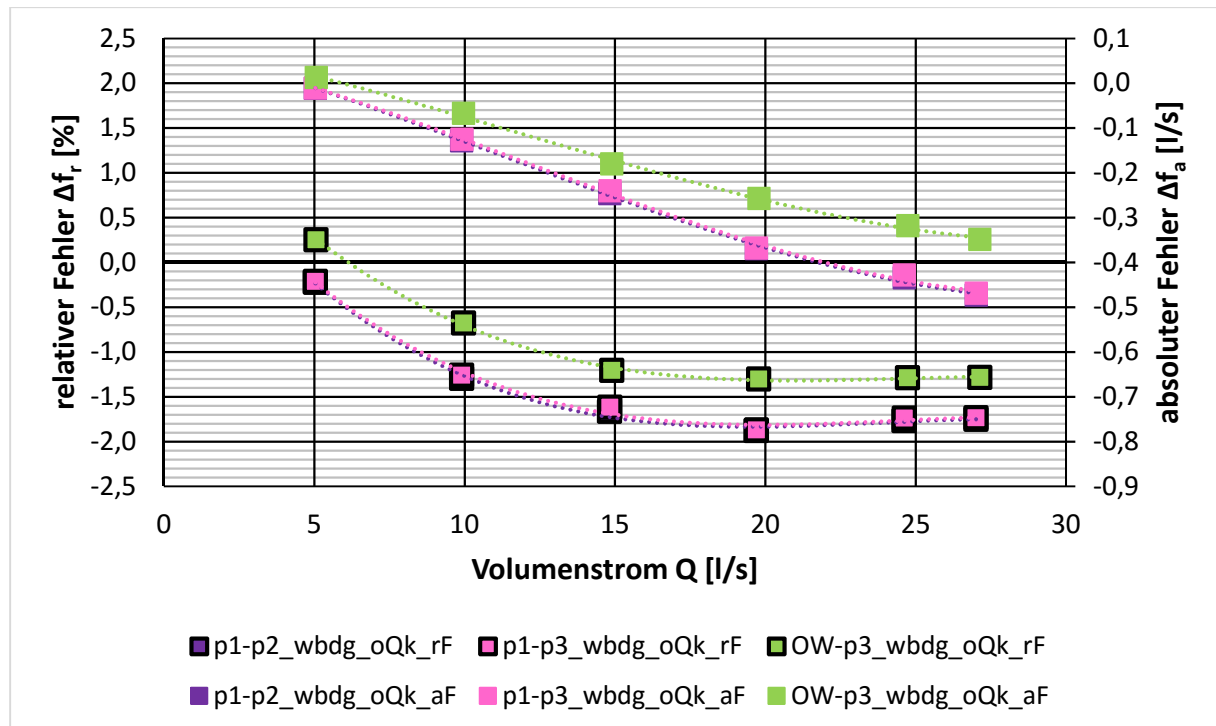


Abbildung 6.12: Individueller Messanschluss

Die den Abbildungen zu Grunde liegenden Auswertungsergebnisse sind im Anhang in den Tabellen 12-7 bis 12-9 angeführt.

In Abbildung 6.13 sind die Messergebnisse den Ergebnissen der Fehlerrechnung aus Abschnitt 3.4 gegenübergestellt. Die dargestellten Kurvenverläufe der totalen Messunsicherheiten sind vor allem durch die Messunsicherheit aus dem Reibungs- und dem dynamischen Druckanteil dominiert. Gemäß der Fehlerrechnung entspricht ein 20 %iger Reibungsanteil einer Fehlerwahrscheinlichkeit von $f_{fr} = \pm 1$ % und ein 20 %iger Anteil des dynamischen Druckes einer Fehlerwahrscheinlichkeit von $f_{dyn} = \pm 1$ %. Indem die Summe aus Reibungs- und dynamische Druckanteil bei 27,5 l/s in Abhängigkeit von der Messstrecke zwischen 132 % (Messung im geraden Rohr) und 195 % (Messung gegen Oberwasser) liegt, ergibt sich eine totale Messunsicherheit von bis zu $\pm 8,64$ % für die Messung gegen Oberwasser. In Anbetracht der vor allem auf Grund der Reibungsverhältnisse hohen Messfehlerwahrscheinlichkeit überraschen die guten Ergebnisse der Messserie. In Bezug auf die gerechnete totale Messunsicherheit bei der Messung gegen Oberwasser wäre zu erwarten, dass auch die tatsächlichen Messergebnisse diesem Trend folgen. Wie bereits erwähnt, erklären sich die besseren Ergebnisse für die Messung gegen Oberwasser möglicherweise dadurch, dass nur ein Druckaufnehmer in der Rohrleitung verwendet wird. Die tendenziellen Verläufe der totalen Messunsicherheiten decken sich mit den Messergebnissen.

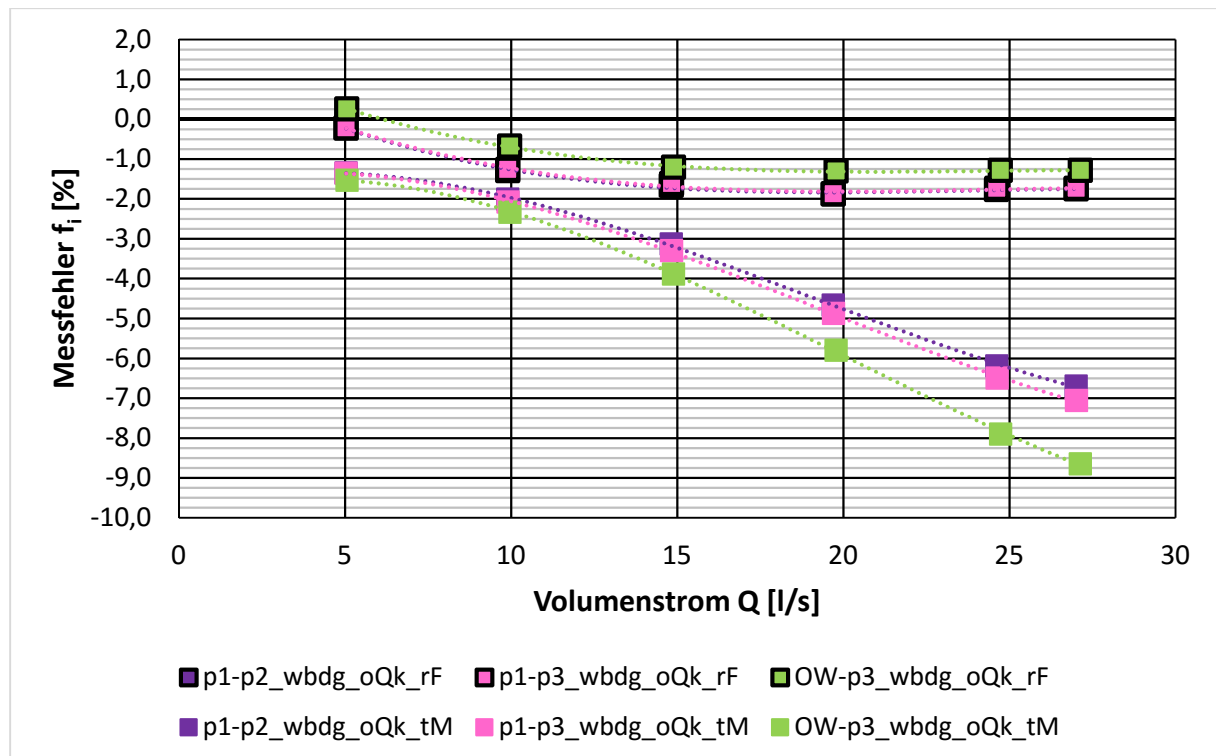


Abbildung 6.13: Vergleich der relativen Fehler mit der totalen Messunsicherheit; individueller Messanschluss

6.1.3 Messanschluss mittels Ringleitung

Die Ergebnisse der Auswertung für die Messanschlüsse mittels Ringleitung sind in den Abbildungen 6.14 bis 6.18 dargestellt. Abbildung 6.14 zeigt die Messergebnisse der Messung im geraden Rohr.

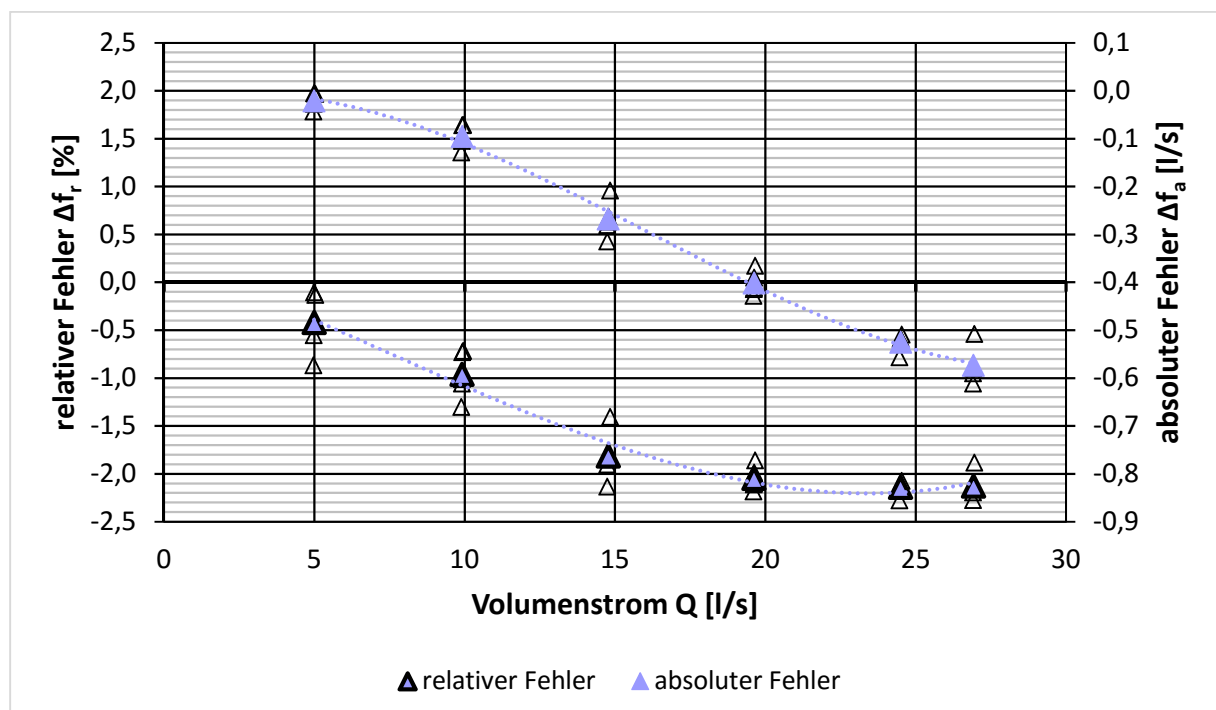


Abbildung 6.14: Messanschluss mittels Ringleitung, Messung im geraden Rohr

Bei der Messung im geraden Rohr steigt der relative Fehler von -0,42 % bei einem Volumenstrom von 5 l/s auf -2,13 % bei einem Volumenstrom von 27,5 l/s an. Der größte relative Fehler von -2,14 % tritt bei einem Volumenstrom von 25 l/s auf. Die maximale Streuung der Einzelmessungen beträgt 0,76 % bei einem Volumenstrom von 5 l/s. Die minimale Streuung beträgt 0,20 % bei einem Volumenstrom von 25 l/s. Der absolute Fehler folgt einer annähernd linearen Funktion. Er beträgt minimal -0,02 l/s bei einem Volumenstrom von 5 l/s und maximal -0,57 l/s bei einem Volumenstrom von 27,5 l/s.

Abbildung 6.15 zeigt die Messergebnisse der Messung über den Krümmer.

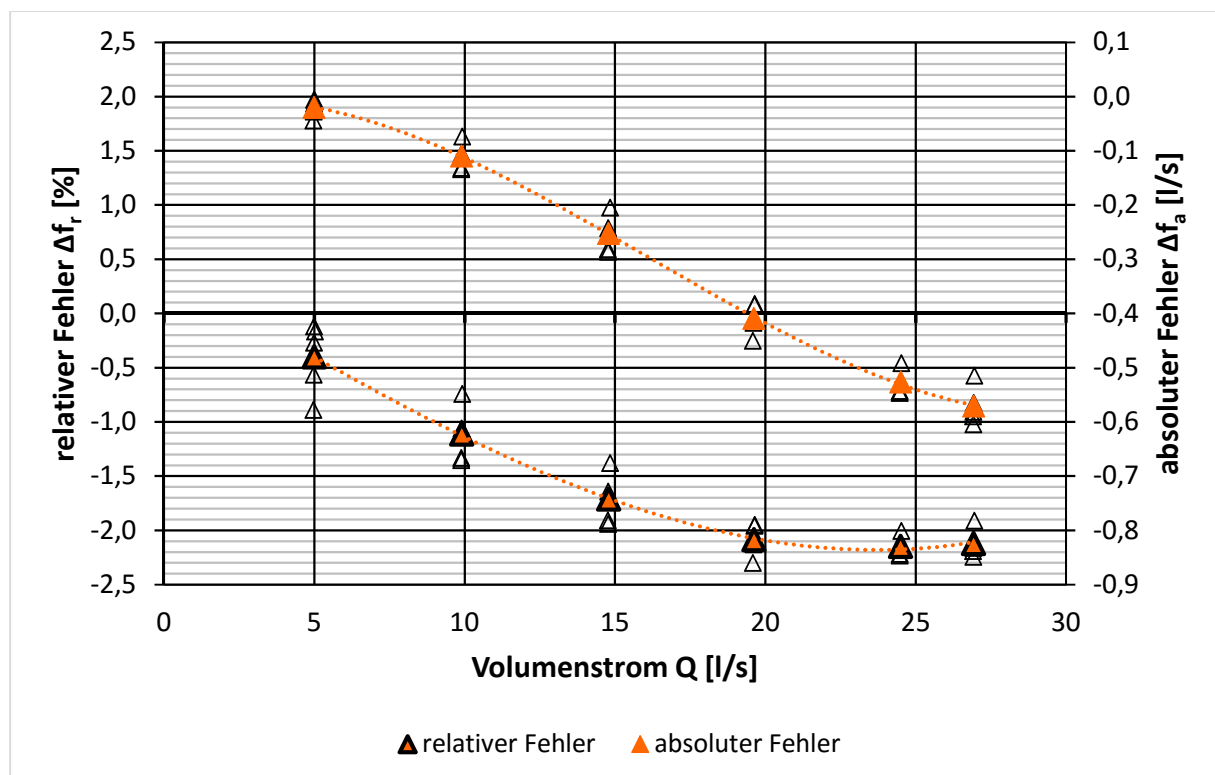


Abbildung 6.15: Messanschluss mittels Ringleitung, Messung über Krümmer

Bei der Messung über den Krümmer steigt der relative Fehler von -0,40 % bei einem Volumenstrom von 5 l/s auf -2,12 % bei einem Volumenstrom von 27,5 l/s an. Der größte relative Fehler von -2,15 % tritt bei einem Volumenstrom von 25 l/s auf. Die maximale Streuung der Einzelmessungen beträgt 0,77 % bei einem Volumenstrom von 5 l/s. Die minimale Streuung beträgt 0,23 % bei einem Volumenstrom von 25 l/s. Der absolute Fehler folgt einer annähernd linearen Funktion. Er beträgt minimal -0,02 l/s bei einem Volumenstrom von 5 l/s und maximal -0,57 l/s bei einem Volumenstrom von 27,5 l/s.

Abbildung 6.16 zeigt die Messergebnisse der Messung gegen Oberwasser. Bei dieser steigt der relative Fehler von -0,06 % bei einem Volumenstrom von 5 l/s auf -1,56 % bei einem Volumenstrom von 27,5 l/s an. Der größte relative Fehler von -1,62 % tritt bei einem Volumenstrom von 20 l/s auf. Die maximale Streuung der Einzelmessungen beträgt 0,78 % bei einem Volumenstrom von 5 l/s. Die minimale Streuung beträgt 0,37 % bei einem Volumenstrom von

25 l/s. Der absolute Fehler folgt einer annähernd linearen Funktion. Er beträgt minimal 0,00 l/s bei einem Volumenstrom von 5 l/s und maximal -0,42 l/s bei einem Volumenstrom von 27,5 l/s.

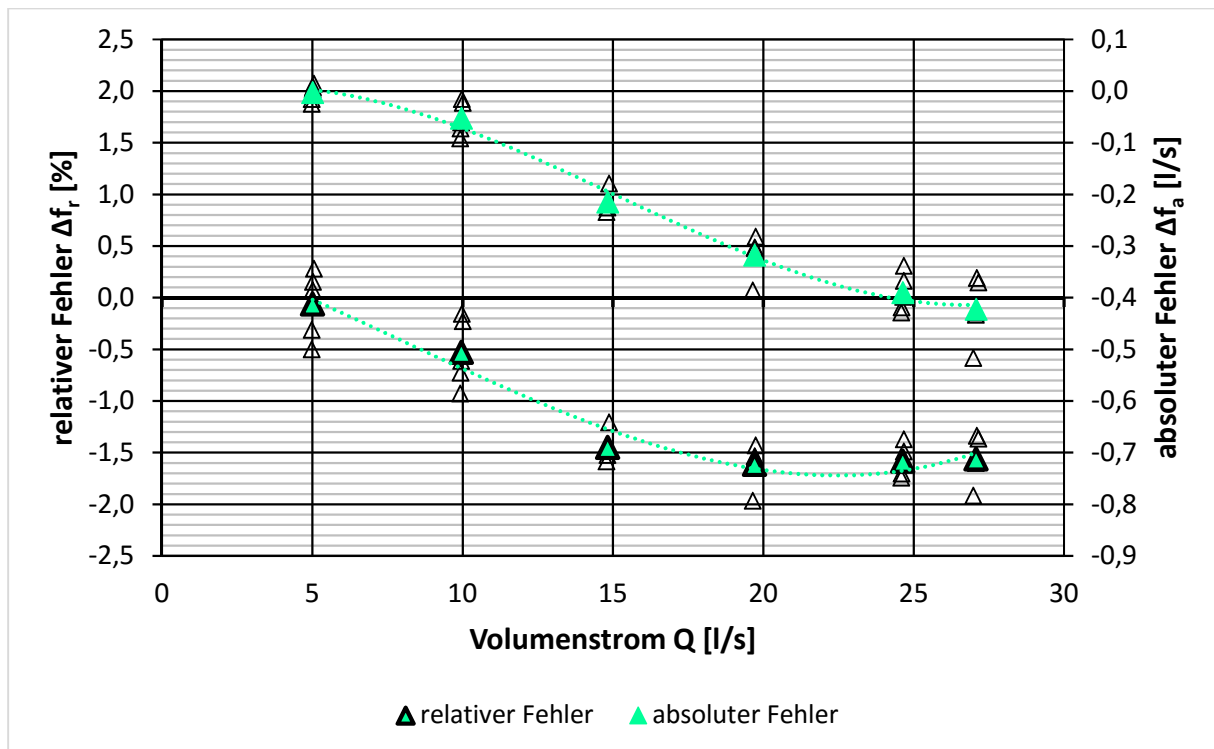


Abbildung 6.16: Messanschluss mittels Ringleitung, Messung gegen Oberwasser

Abbildung 6.17 zeigt die anhand der drei Messstrecken ermittelten Messergebnisse.

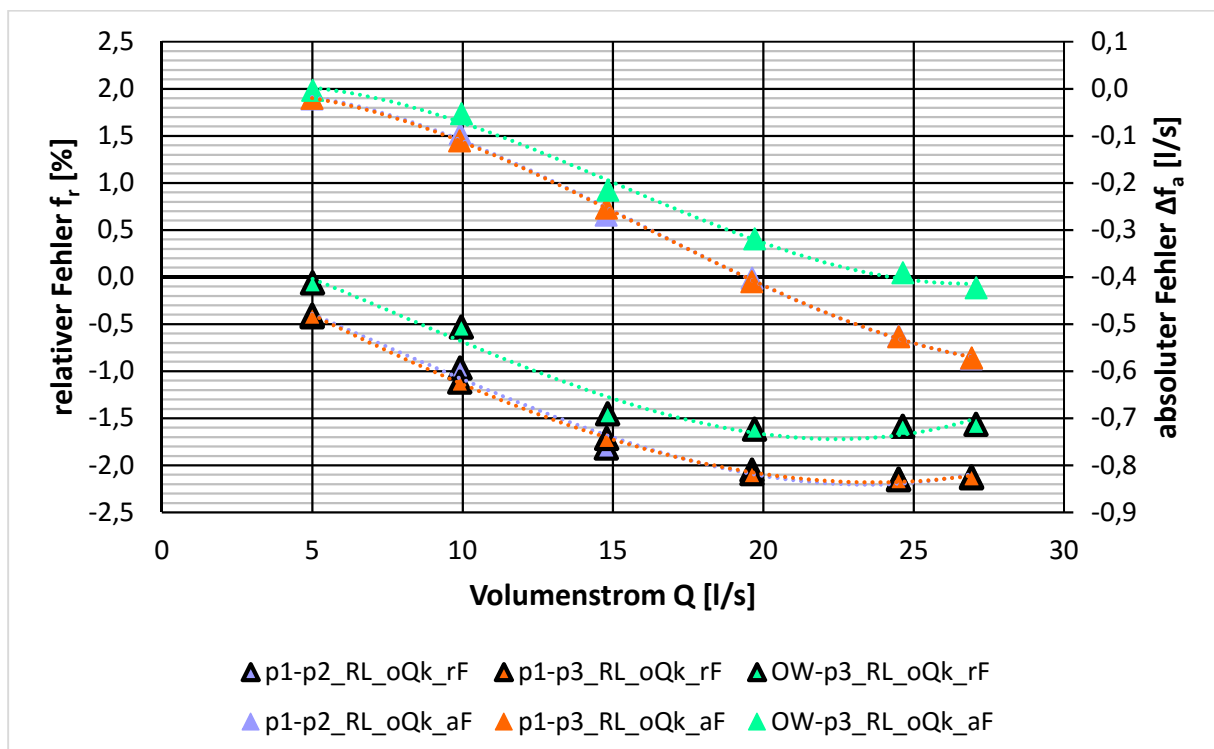


Abbildung 6.17: Messanschluss mittels Ringleitung

Die Resultate aus den Messungen im geraden Rohr und über den Krümmer sind nahezu ident. Der Ergebnisverlauf der Messung gegen den Oberwasserpegel liegt tendenziell um ca. 0,5 % besser. Die Fehlertoleranz gemäß IEC 60041 liegt für die Messung im geraden Rohr bei $\pm 2,0$ % und für die Messung über den Krümmer bzw. gegen Oberwasser bei $\pm 2,3$ %. Diese Toleranzen wurden, mit Ausnahme der Messung im geraden Rohr, jeweils unterschritten.

Die den Abbildungen zu Grunde liegenden Auswertungsergebnisse sind in den Tabellen 12-10 bis 12-12 des Anhangs beigelegt.

In Abbildung 6.18 sind die Messergebnisse den Ergebnissen der Fehlerrechnung aus Abschnitt 3.4 gegenübergestellt. Die dargestellten Kurvenverläufe der totalen Messunsicherheiten sind vor allem durch die Messunsicherheit aus dem Reibungs- und dem dynamischen Druckanteil dominiert. Gemäß der Fehlerrechnung entspricht ein 20 %iger Reibungsanteil einer Fehlerwahrscheinlichkeit von $f_{fr} = \pm 1$ % und ein 20 %iger Anteil des dynamischen Druckes einer Fehlerwahrscheinlichkeit von $f_{dyn} = \pm 1$ %. Indem die Summe aus Reibungs- und dynamische Druckanteil bei 27,5 l/s in Abhängigkeit von der Messstrecke zwischen 132 % (Messung im geraden Rohr) und 191 % (Messung gegen Oberwasser) liegt, ergibt sich eine totale Messunsicherheit von bis zu $\pm 8,46$ % für die Messung gegen Oberwasser. In Anbetracht der vor allem auf Grund der Reibungsverhältnisse hohen Messfehlerwahrscheinlichkeit überraschen die guten Ergebnisse der Messserie. In Bezug auf die gerechnete totale Messunsicherheit bei der Messung gegen Oberwasser wäre zu erwarten, dass auch die tatsächlichen Messergebnisse diesem Trend folgen. Die besseren Ergebnisse für die Messung gegen Oberwasser erklären sich, wie bereits erwähnt, möglicherweise dadurch, dass nur ein Druckaufnehmer in der Rohrleitung verwendet wird. Die tendenziellen Verläufe der totalen Messunsicherheiten decken sich mit den Messergebnissen.

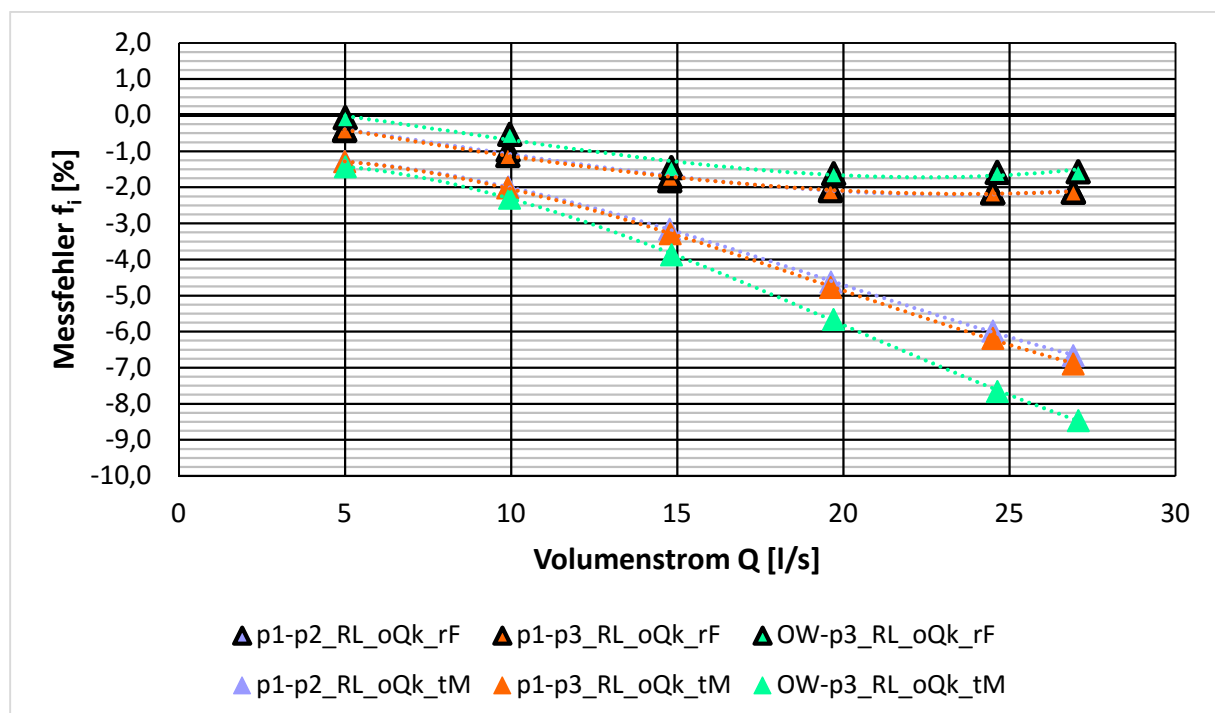


Abbildung 6.18: Vergleich der relativen Fehler mit der totalen Messunsicherheit; Messanschluss mittels Ringleitung

6.1.4 Einfluss der Messanschlüsse

In den Abbildungen 6.19 bis 6.21 sind die Messergebnisse der drei Messserien in Bezug auf den Einfluss der unterschiedlichen Messanschlüsse dargestellt.

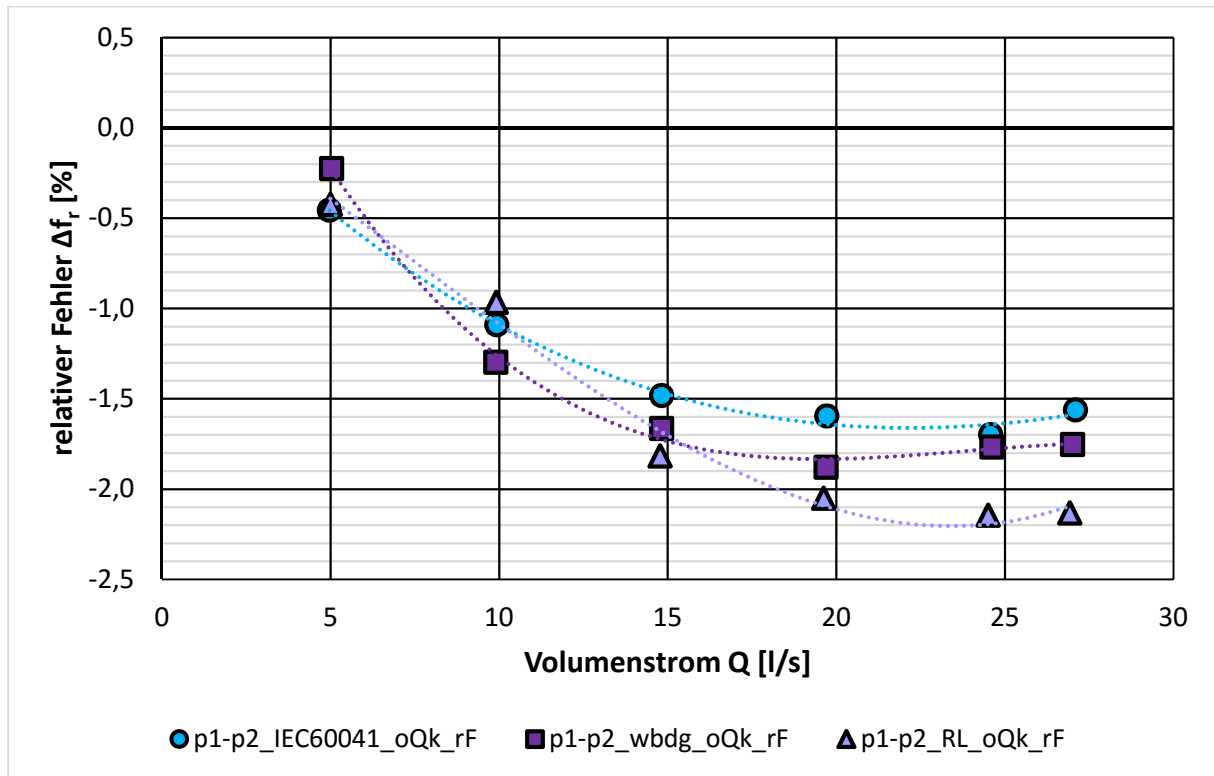


Abbildung 6.19: Messung im geraden Rohr

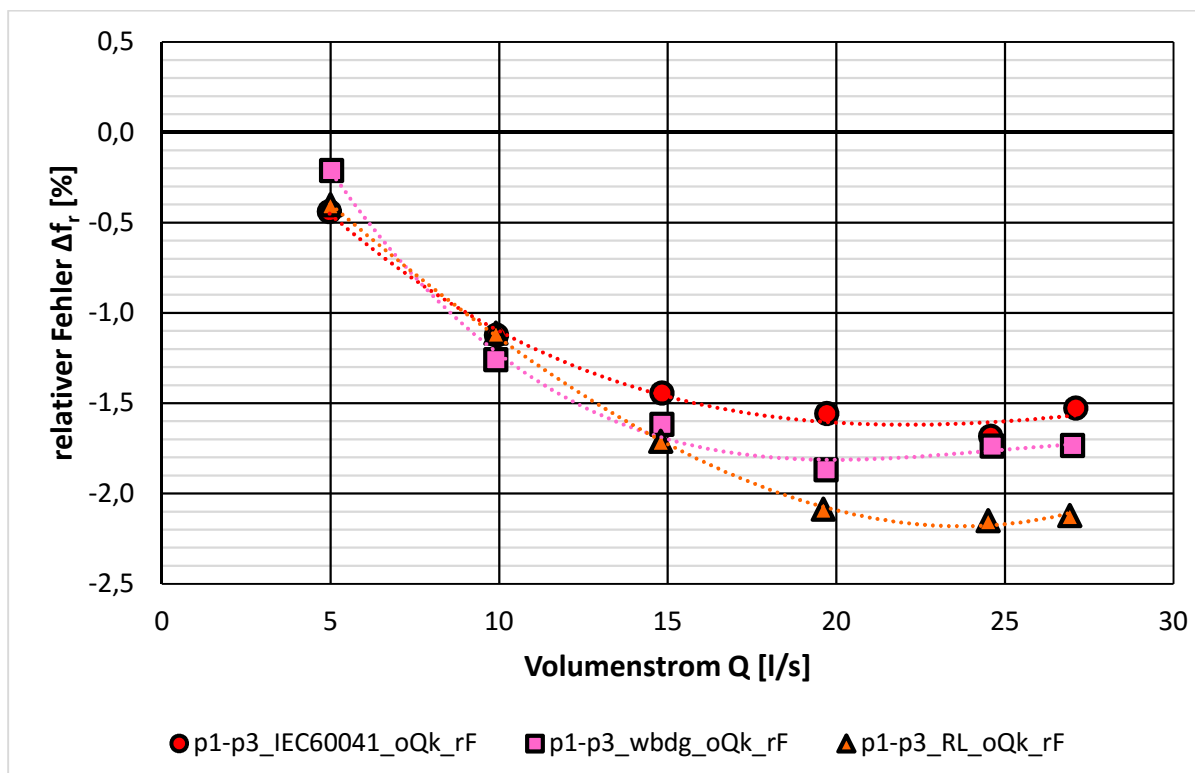


Abbildung 6.20: Messung über den Krümmer

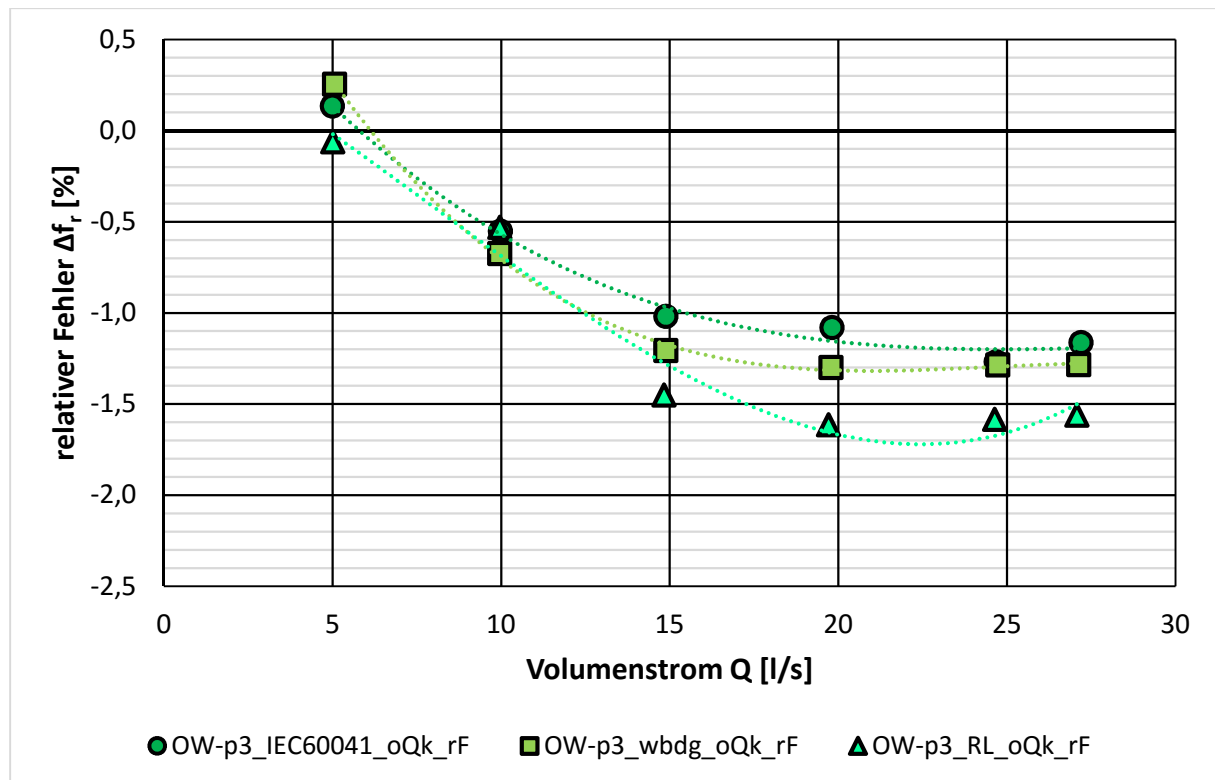


Abbildung 6.21: Messung gegen Oberwasser

In Abbildung 6.19 sind die Messergebnisse der Messung im geraden Rohr dargestellt. Der Verlauf der Messpunkte folgt weitestgehend demselben Trend. Die besten Ergebnisse, mit einem mittleren relativen Fehler von -1,31 %, liefert der normgerecht ausgeführte Messanschluss. Der individuell ausgeführte Messanschluss weist einen mittleren relativen Fehler von -1,43 % auf und liegt damit um 0,12 % schlechter als der Messanschluss nach IEC 60041. Der mittlere relative Fehler des Messanschlusses mittels Ringleitung beträgt -1,59 % und liefert somit um 0,28 % schlechtere Messergebnisse als der Messanschluss nach Norm.

In Abbildung 6.20 sind die Messergebnisse der Messung über den Krümmer dargestellt. Der Verlauf der Messpunkte folgt weitestgehend demselben Trend. Die besten Ergebnisse, mit einem mittleren relativen Fehler von -1,30 %, liefert der normgerecht ausgeführte Messanschluss. Der individuell ausgeführte Messanschluss weist einen mittleren relativen Fehler von -1,41 % auf und liegt damit um 0,11 % schlechter als der Messanschluss nach IEC 60041. Der mittlere relative Fehler des Messanschlusses mittels Ringleitung beträgt -1,60 % und liefert somit um 0,30 % schlechtere Messergebnisse als der Messanschluss nach Norm.

In Abbildung 6.21 sind die Messergebnisse der Messung gegen Oberwasser dargestellt. Der Verlauf der Messpunkte folgt weitestgehend demselben Trend. Die besten Ergebnisse, mit einem mittleren relativen Fehler von -0,82 %, liefert der normgerecht ausgeführte Messanschluss. Der individuell ausgeführte Messanschluss weist einen mittleren relativen Fehler von -0,92 % auf und liegt damit um 0,10 % schlechter als der Messanschluss nach IEC 60041. Der mittlere relative Fehler des Messanschlusses mittels Ringleitung beträgt -1,13 % und liefert somit um 0,31 % schlechtere Messergebnisse als der Messanschluss nach Norm.

Tabelle 6-3 gibt einen Überblick über die mittleren relativen Fehler der Auswertevarianten.

Tabelle 6-3: Mittelwerte der Messfehler der Auswertevarianten

MESSSTRECKEN				
relativer Fehler Δf_r [%] Mittelwert	$p_1 - p_2$ gerades Rohr	$p_1 - p_3$ über Krümmer	OW - p_3 gegen Oberwasser	M E S S A N S C H L U S S
	-1,31	-1,30	-0,82	IEC 60041
	-1,43	-1,41	-0,92	individuell
	-1,59	-1,60	-1,13	Ringleitung
	-1,44	-1,43	-0,96	Messstrecke

6.1.5 Einfluss der Messstrecken

Der Einfluss der Messstrecken auf die Messergebnisse der Prüfstandsmessung wurde durch Mittelwertbildung aus den relativen Fehlern der Einzelmessergebnisse berechnet und ist in der untersten Zeile der Tabelle 6-3 dargestellt. Der Vergleich zeigt, dass sich die Messergebnisse der Messung im geraden Rohr mit -1,44 % und über den Krümmer mit -1,43 % nahezu nicht unterscheiden und die Messung gegen Oberwasser mit einem mittleren relativen Fehler von -0,96 % um durchschnittlich 0,48 % bessere Ergebnisse liefern. Der geringe Unterschied der Messergebnisse der Messung im geraden Rohr sowie über den Krümmer, kann nicht so ohne Weiteres auf die Anlagenmessung übertragen werden, da der Einfluss einer größeren Anzahl von Krümmern durchaus andere Ergebnisse liefern kann.

6.1.6 Einfluss der Druckaufnehmer

Wie bereits erwähnt, wurden zur Aufzeichnung der Absolutdrücke nicht beschleunigungskompensierte Druckaufnehmer verwendet. Um die Empfindlichkeit der Druckaufnehmer darzustellen, wurde eine Aufzeichnung der Messsignale über einen Messzyklus durchgeführt. Dazu wurde der Kugelhahn bei geschlossenem Dotationsschieber und stillstehender Wassersäule geschlossen. Der aufgezeichnete, ungefilterte Signalverlauf ist in Abbildung 6.22 dargestellt und zeigt den sensiblen Verlauf der Absolutdrücke, der einzig durch das Schließen des Kugelhahnes im Ruhewasser verursacht wurde.

Eine Mittelwertbildung der Drucksignale vor (I), während (II) und nach dem Schließen (III) ist in Tabelle 6-4 dargestellt und zeigt die Konstanz der Messwerte unabhängig des Messwertverlaufes. Auf Grund der durchgeführten Analyse kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass ein Einfluss auf das dynamische Messsignal während der Messung besteht. Das dargestellte Phänomen wird, auf Grund anderer konstruktiver Gegebenheiten in der Praxis, für Anlagenmessungen ausgeschlossen.

Während des Betriebes des Prüfstandes traten erhebliche Vibrationen auf, über deren Auswirkungen auf die Absolutdrucksignale keine Aussage getroffen werden kann. Der Ausgangspunkt der Vibrationen war die Pumpe. Da die Pumpleitung nicht von der Messleitung entkoppelt ausgeführt wurde, fand eine Übertragung der Schwingungen auf die Absolutdruckaufnehmer statt. Dieses Verhalten tritt jedoch bei Anlagenmessungen nicht auf.

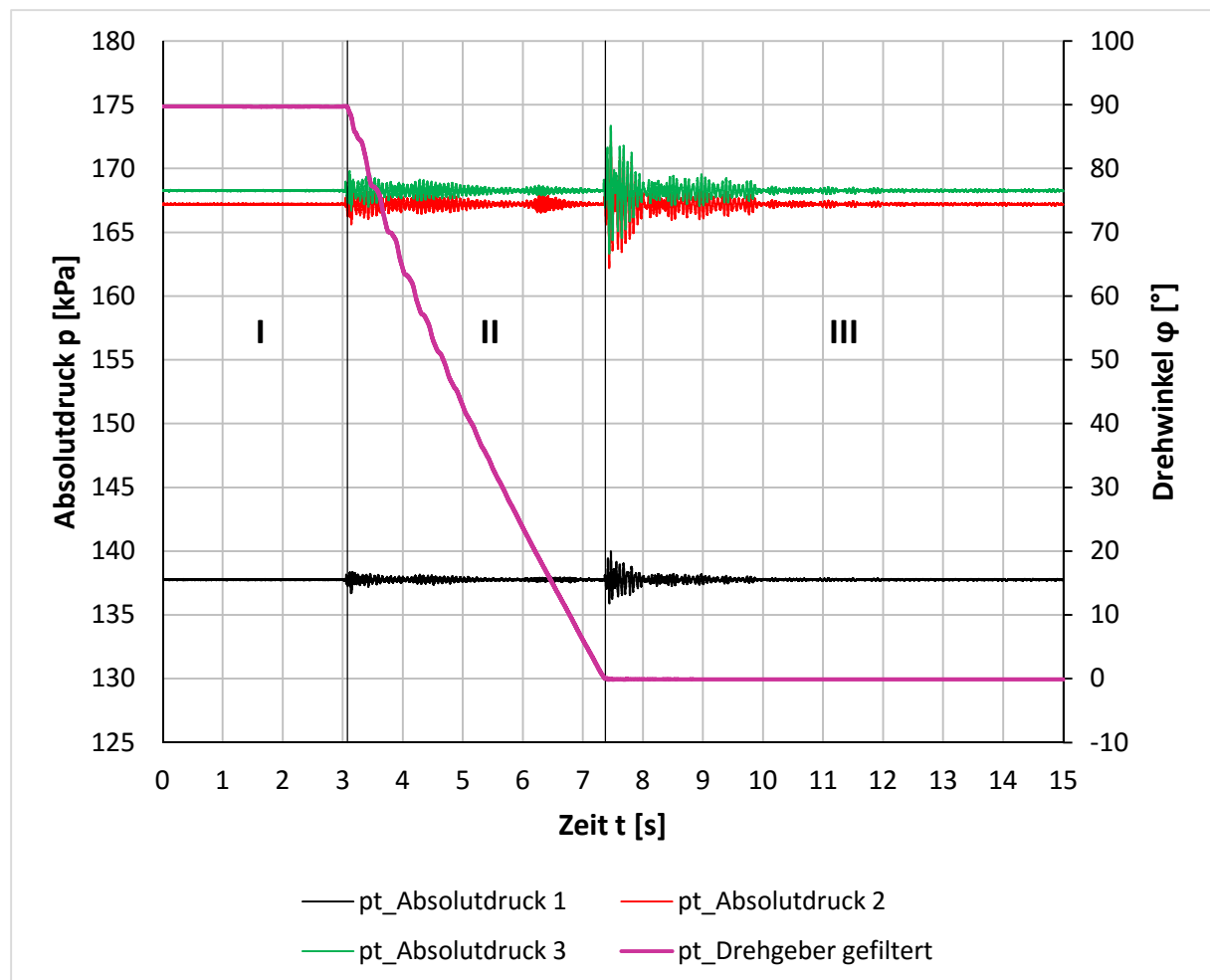


Abbildung 6.22: Schwingungsverhalten der Drucksignale während des Schließens

Tabelle 6-4: Mittelwerte der Absolutdrucksignale

Bereich	Absolutdruck 1 [Pa]	Absolutdruck 2 [Pa]	Absolutdruck 3 [Pa]
I	137764,390	167208,127	168265,844
II	137764,590	167207,905	168263,001
III	137762,132	167205,220	168265,016

6.1.7 Einfluss unterschiedlicher Abtastfrequenzen

Zur Untersuchung des Einflusses der Abtastfrequenz wurde eine Messserie mit den in Tabelle 6-5 angeführten Abtastfrequenzen durchgeführt. Die Messwerte der Abtastfrequenzen 2000 Hz und 5000 Hz wurden in eigenständige Messungen zu je fünf Einzelmessungen ermittelt. Da das Spannungseingangsmodul NI 9239 auf eine minimale Abtastfrequenz von 1613 Hz limitiert ist, wurden die Daten der Abtastfrequenzen von 100 Hz, 500 Hz und 1000 Hz aus den mit 2000 Hz abgetasteten Messungen generiert.

Tabelle 6-5: Untersuchte Abtastfrequenzen

Messpunkt	Abtastfrequenz f_a [Hz]
1	100
2	500
3	1000
4	2000
5	5000

Die Messserie erfolgte am individuell ausgeführten Messanschluss im geraden Rohr bei einem konstanten Volumenstrom von 15 l/s. Die Ergebnisse der Messung sind in Abbildung 6.23 dargestellt und zeigen, dass die Genauigkeit der Messsignale mit steigender Abtastfrequenz zunimmt. Der maximale relative Fehler von -1,99 % tritt bei einer Abtastfrequenz von 100 Hz auf und reduziert sich auf einen Wert von -1,62 % bei einer Abtastfrequenz von 5000 Hz. Bei einer Abtastfrequenz von 2000 Hz beträgt der relative Fehler -1,69 % und unterscheidet sich gegenüber der Abtastfrequenz von 5000 Hz um lediglich 0,07 %. Das größte Streuband besteht mit 0,78 % bei der Abtastfrequenz von 100 Hz und das kleinste Streuband liegt mit 0,36 % bei einer Abtastfrequenz von 2000 Hz vor. Die Differenz des relativen Fehlers bei einer Abtastfrequenz von 100 Hz zu jenem bei 5000 Hz beträgt 0,37 %.

Auf Grund des geringen Unterschiedes der relativen Messabweichungen bei den Abtastfrequenzen von 2000 Hz und 5000 Hz, wurde für die Durchführung der Prüfstandsmessungen eine Abtastfrequenz von 2000 Hz gewählt. Das führt zu einer erheblich geringeren aufgezeichneten Datenmenge und hat eine bedeutend verkürzte Auswertezeit der Volumenstromrechnung zur Folge. Die der Analyse zu Grunde gelegten Daten sind im Anhang in Tabelle 12-13 angeführt.

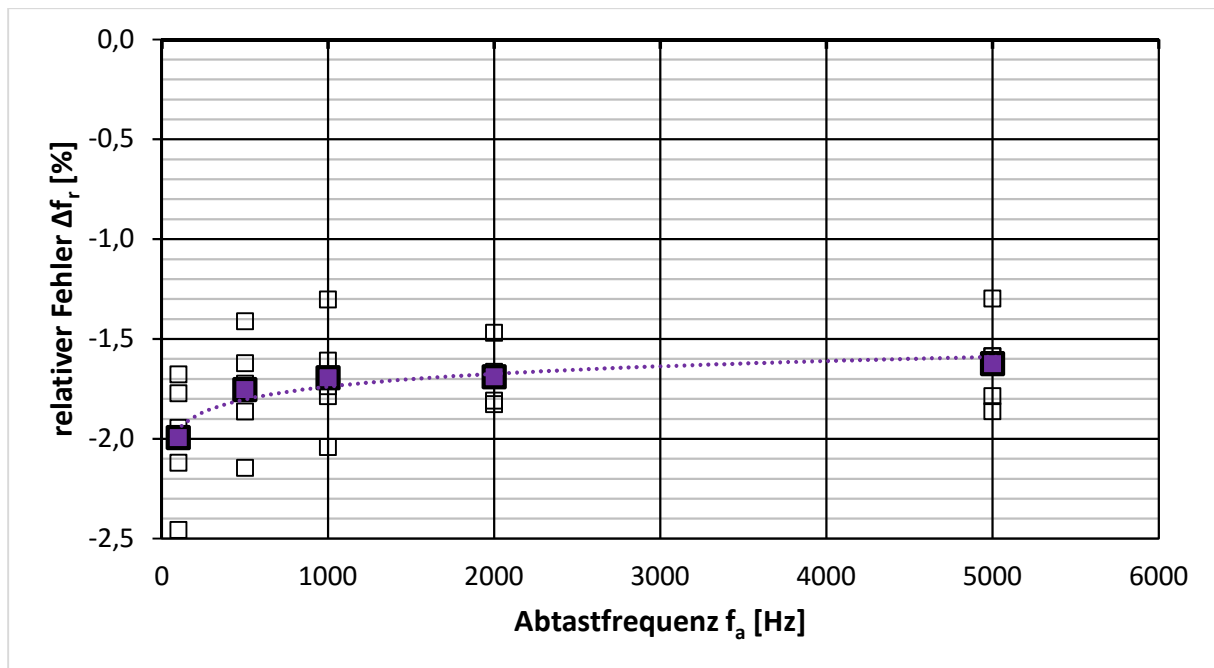


Abbildung 6.23: Relativer Fehler bei variabler Abtastfrequenz

6.1.8 Einfluss unterschiedlicher Schließzeiten

Die Untersuchung des Einflusses der Schließzeit auf die Genauigkeit des Messverfahrens wurde bei einem Volumenstrom von 25 l/s durchgeführt. Abbildung 6.24 zeigt einen weitestgehend linearen Zusammenhang zwischen dem relativen Fehler und der Schließzeit. Der relative Fehler steigt von -0,46 % bei einer Schließzeit von 1,1 s auf -3,34 % bei einer Schließzeit von 8,9 s an. Die Variation der Schließzeit vom kleinsten zum größten Wert, führt zu einer Differenz der relativen Fehler von 2,88 %.

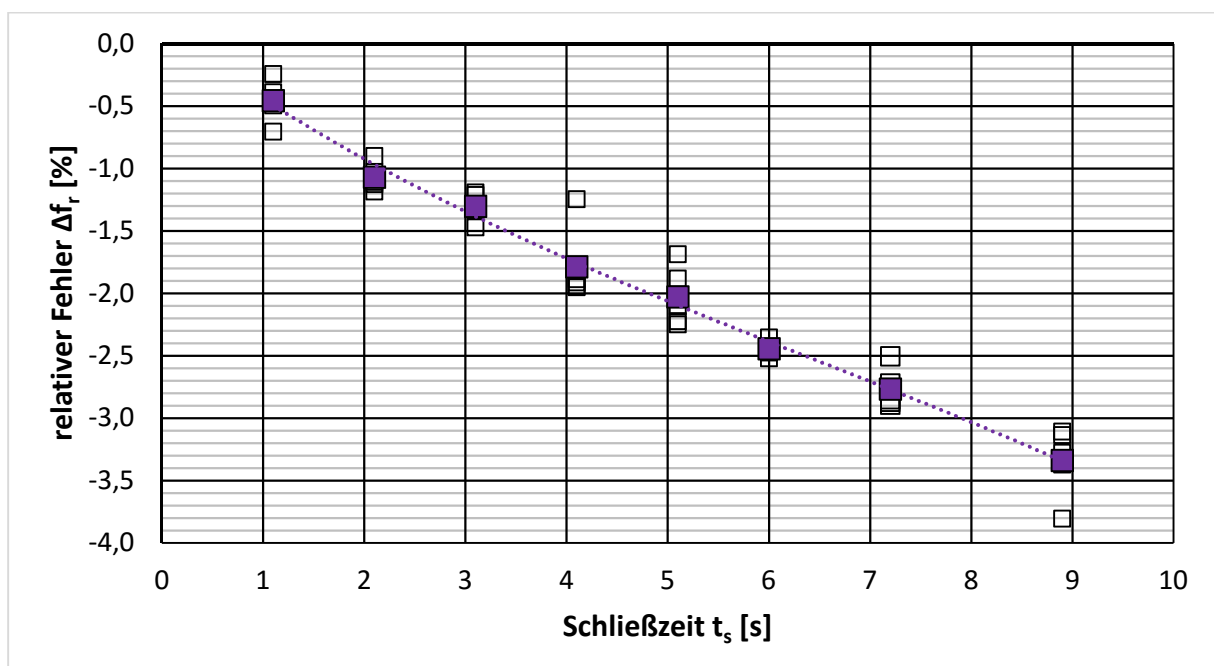


Abbildung 6.24: Relativer Fehler bei variablen Schließzeiten

Die Auswertung erfolgte anhand der an den individuell ausgeführten Messanschlüssen im geraden Rohr aufgezeichneten Messwerte. Die Schließzeit wurde von 1,1 s bis 8,9 s variiert und der Druckstoß in Messebene p_3 aufgezeichnet. Der Verlauf des relativen Fehlers zeigt, dass kürzere Schließzeiten geringere Fehlerquoten liefern, da der dabei auftretende Druckstoß ausgeprägter ist. Längere Schließzeiten bedeuten einen geringeren Druckstoß. Die während der Messung aufgezeichneten stochastischen Schwankungen des Absolutdruckes – bezogen auf die Größe des Druckstoßes – führen bei längeren Schließzeiten zu größeren relativen Fehlern bei der Integration des Differenzdrucksignales. Da in Wasserkraftwerken bis zu einer Fallhöhe von 50 m im Allgemeinen ein Druckstoß von bis zu 50 % der Fallhöhe zulässig ist, wird dieses Maß auch für die Prüfstandsmessung herangezogen. Daraus abgeleitet wurde für die Prüfstandsmessung eine Schließzeit von ca. 4 Sekunden gewählt. Tabelle 6-6 zeigt die Schließzeiten und die einhergehenden Druckstöße im Verhältnis zur Fallhöhe.

Tabelle 6-6: Untersuchte Schließzeiten

Schließzeit t_s [s]	Druckstoß im Verhältnis zur Fallhöhe [%]
1,1	227
2,1	97
3,1	59
4,1	39
5,1	32
6,0	23
7,2	20
8,9	14

Die der Abbildung zu Grunde liegenden Daten sind im Anhang in Tabelle 12-14 angeführt.

6.2 Messung mit Leckagevolumenstrom

Das Auswerteprogramm wurde auch hinsichtlich des Einflusses eines nach dem Schließen des Absperrorgans vorherrschenden Leckagevolumenstroms erprobt. Die Versuchsanordnung wurde in zweifacher Weise durchgeführt und erfolgte einerseits durch die Verwendung der Bypassleitung als auch durch ein zweistufiges Schließen des Absperrorgans.

6.2.1 Leckagevolumenstrom mittels Bypassleitung

Abbildung 6.25 zeigt den Absperrkugelhahn mit der Bypassleitung. Die Einstellung des Betriebspunktes erfolgte bei geöffneten Bypasskugelhahn. Nach dem Schließen des Absperrkugelhahnes stellte sich an der Bypassleitung ein Leckagevolumenstrom ein. Nach einer Zeitdauer von ca. fünf Sekunden wurde der Bypasskugelhahn geschlossen.



Abbildung 6.25: Absperrkugelhahn mit Bypassleitung

Die Messdaten wurden in der Messstrecke des geraden Rohres und anhand der normgerecht ausgeführten Messanschlüsse aufgenommen.

Die Berechnung des vor dem Schließen des Kugelhahnes vorherrschenden Volumenstroms wurde, wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, in zwei Schritten durchgeführt. Nach der Berechnung des Volumenstroms, der aus dem Druckverlauf des schließenden Absperrkugelhahnes resultierte, erfolgte im zweiten Schritt die Berechnung des Leakagevolumenstroms. Die Ergebnisse beider Berechnungen wurden addiert und ergaben den gesamten Volumenstrom. Der berechnete Leakagevolumenstrom betrug ca. 1 l/s

Abbildung 6.26 zeigt die Messergebnisse der Messung im geraden Rohr. Bei dieser steigt der relative Fehler von -1,31 % bei einem Volumenstrom von 5 l/s auf -3,47 % bei einem Volumenstrom von 27,5 l/s an. Der größte relative Fehler von -3,48 % tritt bei einem Volumenstrom von 20 l/s auf. Die maximale Streuung der Einzelmessungen beträgt 0,62 % bei einem Volumenstrom von 15 l/s. Die minimale Streuung beträgt 0,18 % bei einem Volumenstrom von 25 l/s. Der absolute Fehler folgt einer annähernd linearen Funktion. Er beträgt minimal -0,07 l/s bei einem Volumenstrom von 5 l/s und maximal -0,92 l/s bei einem Volumenstrom von 27,5 l/s. Die der Abbildung zu Grunde liegenden Daten sind in Tabelle 12-15 des Anhangs angeführt.

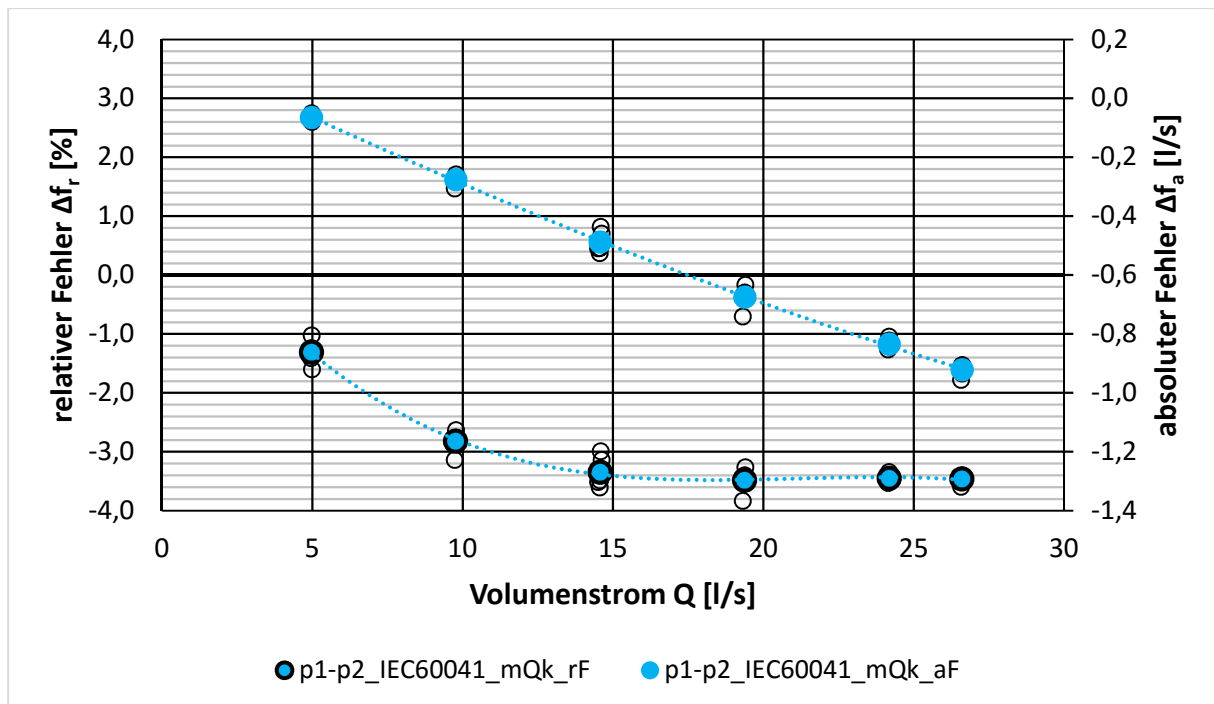


Abbildung 6.26: Messanschluss nach Norm, Messung im geraden Rohr, mit Leakagevolumenstrom

6.2.2 Leakagevolumenstrom durch abgesetztes Schließen

Um die Ergebnisse aus der ersten Messserie mit Leakagevolumenstrom zu verifizieren, wurde eine zweite Messserie mit einem verringerten Leakagevolumenstrom von ca. 0,8 l/s durchgeführt. Gemessen wurde wiederum in der Messstrecke des geraden Rohres und an den individuellen Messanschlüssen. Der Leakagevolumenstrom wurde erreicht, indem der Absperrkugelhahn vor dem Erreichen der Geschlossenstellung mittels eines eingeschobenen Zwischenanschlages gestoppt wurde. Nach einer Verweildauer von ca. fünf Sekunden wurde der Zwischenanschlag entfernt, sodass der Kugelhahn vollständig schließen konnte.



Abbildung 6.27: Zwischenanschlag des Schließgewichtes

Abbildung 6.28 zeigt die Messergebnisse der Messung im geraden Rohr. Bei dieser steigt der relative Fehler von -0,83 % bei einem Volumenstrom von 5 l/s auf -3,22 % bei einem Volumenstrom von 27,5 l/s an. Der größte relative Fehler tritt bei eben diesem Volumenstrom auf. Die maximale Streuung der Einzelmessungen beträgt 0,78 % bei einem Volumenstrom von 5 l/s. Die minimale Streuung beträgt 0,08 % bei einem Volumenstrom von 10 l/s. Der absolute Fehler folgt einer annähernd linearen Funktion. Er beträgt minimal -0,04 l/s bei einem Volumenstrom von 5 l/s und maximal -0,86 l/s bei einem Volumenstrom von 27,5 l/s. Die der Abbildung zu Grunde liegenden Daten sind in Tabelle 12-16 des Anhangs angeführt.

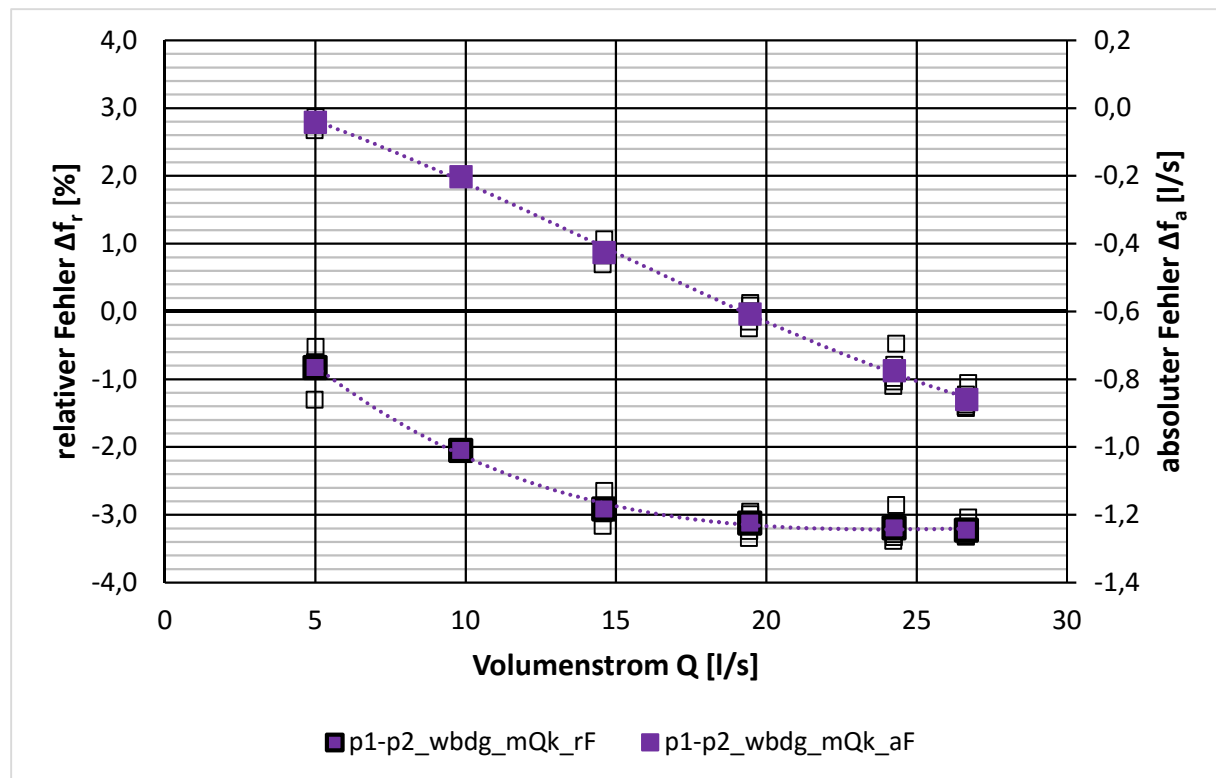


Abbildung 6.28: Individueller Messanschluss, Messung im geraden Rohr, mit Leckagevolumenstrom

6.2.3 Vergleich der Messergebnisse

Die Norm sieht zur Erreichung valider Ergebnisse einen maximalen Leckagevolumenstrom von 5 % des Nennvolumenstroms vor. Diese Bedingung wurde durch die bei den Messungen eingestellten Leckagevolumenströme von 1 l/s bzw. 0,8 l/s erfüllt. Abbildung 6.29 zeigt den Vergleich der beiden durchgeführten Messungen mit Leckagevolumenstrom.

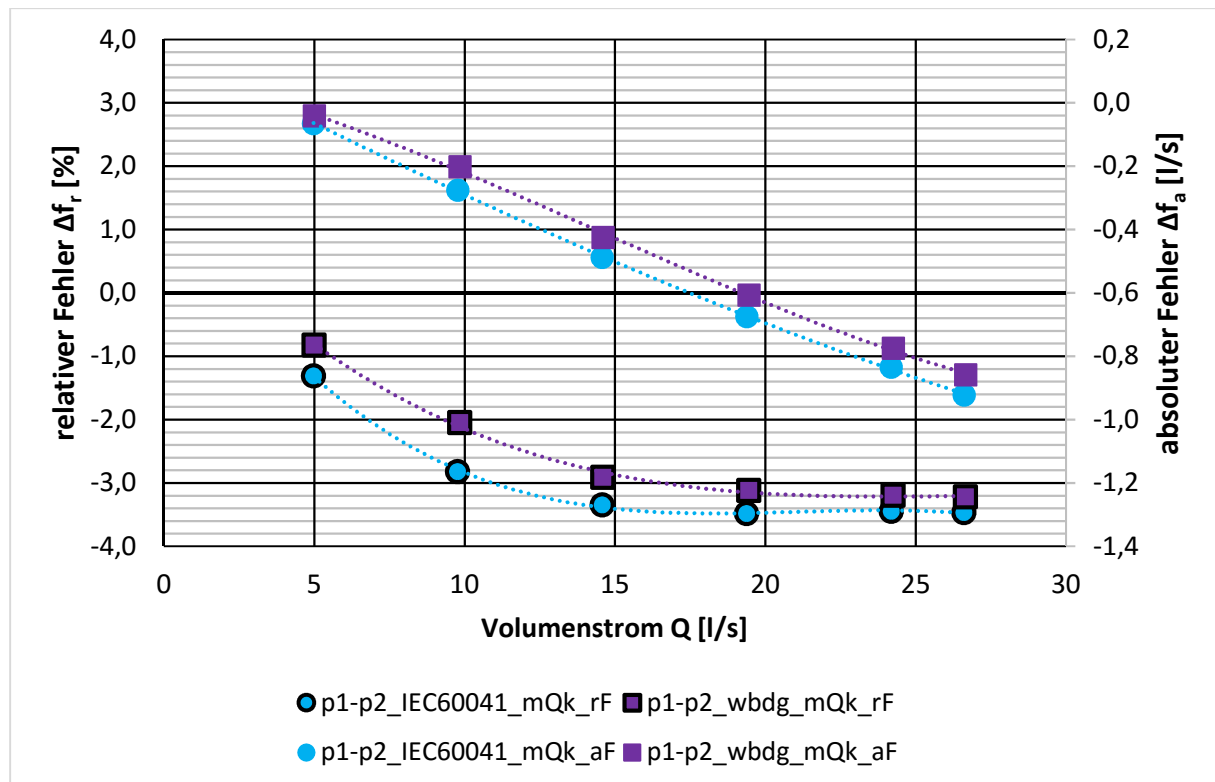


Abbildung 6.29: Vergleich der Messserien

Beide Fehlerverläufe überschreiten bei Volumenströmen von 10 l/s bis 27,5 l/s die laut Norm zulässige Toleranzgrenze von $\pm 2,0\%$. Die große Fehlerquote von bis zu $-3,5\%$ erklärt sich durch die Reibungsverhältnisse in der Messleitung. Wie bereits erwähnt, sollten gemäß der Norm IEC 60041 für die Druck/Zeit-Messung die Reibungsverluste in der Rohrleitung 20 % des maximalen Differenzdruckes nicht überschreiten. Indem der Reibungsanteil in der Messleitung DN 80 bei einem Volumenstrom von 10 l/s ca. 35 % bzw. bei 27,5 l/s ca. 131 % des Differenzdruckmaximums umfasst, relativiert sich der im Diagramm dargestellte relative Messfehlerverlauf für Volumenströme von 10 l/s bis 27,5 l/s. Zusätzlich liegt bei der Volumenstromrechnung mit Leckagevolumen auch ein systematischer Fehler vor. Für die Berechnung ist es erforderlich, dass der Druckverlauf nach dem Schließen mit der Nulllinie zusammenfällt. Liegt ein Leckagevolumenstrom vor, ist dies nicht der Fall. Zur Korrektur wird der gesamte Druckverlauf entsprechend eines Offsets verschoben. Das führt dazu, dass für den ersten Berechnungsgang die tatsächliche Reibungssituation unterschätzt wird und sich ein verminderter Volumenstrom ergibt.

7 Feldmessung

Das ausgearbeitete Mess- und Auswerteprogramm zur Bestimmung des Volumenstroms in rohrleitungsgebundenen Kraftwerken konnte im Rahmen der durchgeführten Prüfstandsversuche hinsichtlich der Funktionsfähigkeit und Messgenauigkeit ausführlich erprobt und optimiert werden.

Zusätzlich ist eine Feldmessung vorgesehen, um die Einsatztauglichkeit des erarbeiteten Mess- und Auswerteprogrammes weiter zu erproben. Die Durchführung dieser ist für das Frühjahr 2018 geplant und wird dank freundlicher Unterstützung des Bereichsleiters Erzeugung, Herrn Prok. Mag. Dipl.-Ing. Christian Rupp, der KELAG in einem ihrer Kraftwerke ermöglicht.

8 **Ausblick**

Zukünftig hin besteht die Möglichkeit Optimierungsmaßnahmen am Mess- und Auswertesystem zu ergreifen. Dazu zählt beispielsweise die in Abschnitt 3.1 beschriebene Ermittlung des Penstockfaktors auf Basis eines CFD-optimierten Verfahrens und der damit einhergehenden Steigerung der Messgenauigkeit.

Um die Rechenzeit zur Ermittlung der Volumenströme zu verkürzen, könnte das auf Excel basierte Auswerteprogramm in LabVIEW oder MATLAB übertragen und die Berechnung einem weiteren Automatisierungsschritt zugeführt werden. Eine wesentliche Ausbaustufe des Auswerteprogramms würde auch die Erweiterung auf eine Echtzeitmessfähigkeit darstellen. Damit könnten die Messdaten automatisiert in das Auswerteprogramm eingelesen und der Berechnung zugeführt werden.

In weiterer Folge ist eine Steigerung der Genauigkeit der Volumenstromrechnung durch eine instationäre Strömungsrechnung während der Impulsänderungsperiode möglich.

Um den Einfluss von anlagenspezifischen Vibrationen auf die Messwertsignale der Absolutdruckaufnehmer zu reduzieren, ist in Erwägung zu ziehen, für Kraftwerksmessungen beschleunigungskompensierte Absolutdruckaufnehmer einzusetzen.

Die Norm IEC 60041 unterliegt gegenwärtig einer generellen Überarbeitung und soll auch hinsichtlich der Druck/Zeit-Methode bis zum Jahre 2020 modifiziert werden. Bisherigen Veröffentlichungen zufolge solle auf Grund durchgeführter Untersuchungen die in der Norm bisweilen geforderten Bedingungen $L \geq 10 \text{ m}$ bzw. $c \cdot L \geq 50 \text{ m}^2/\text{s}$ um 20 % herabgesetzt werden.

Um die Zuverlässigkeit des entwickelten Auswerteprogrammes zu bestätigen, besteht der Bedarf einer Erprobung im Feld. Dabei ist zur Verifizierung der Messergebnisse eine Referenzmessung in Form einer thermodynamischen Wirkungsgradmessung oder einer akustischen Durchflussmessung (Clamp-on Verfahren) vorgesehen. Um Feldmessungen flexibel durchführen zu können, ist auch für Messungen über größere Distanzen Vorsorge zu treffen. Unabhängig von der vorhandenen Infrastruktur an Datenübertragungseinrichtungen, sollte es möglich sein, die Messdaten in den einzelnen Messebenen zeitsynchron und autark zu erfassen und zu speichern. Dazu bietet sich in erster Linie eine GPS-gestützte Zeitsynchronisation an. Eine Datenübermittlung via WLAN oder Leittechnik ist somit nicht mehr zwingend notwendig.

9 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1.1: Messverfahren zur Wirkungsgradermittlung	2
Abbildung 1.2: Laufzeitmessung in einer Rohrleitung [7].....	3
Abbildung 1.3: Einbau einer Ultraschall-Messstrecke.....	4
Abbildung 1.4: Prinzip der magnetisch-induktiven Durchflussmessung [10]	5
Abbildung 1.5: Schematische Darstellung eines Messflügels [3].....	6
Abbildung 1.6: Messaufbau zur Flügelmessung [12]	6
Abbildung 1.7: Anordnungsmöglichkeit der Druckmessstellen bei der Winter-Kennedy-Methode [15]	7
Abbildung 1.8: Diverse Versionen der Druck/Zeit-Methode [17].....	8
Abbildung 1.9: Impulsänderung im raumfesten Kontrollvolumen	9
Abbildung 1.10: Rohrleitungsabschnitt zur Erklärung des theoretischen Hintergrundes [19]	10
Abbildung 1.11: Erdbeschleunigung als Funktion des Breitengrades und der Seehöhe	13
Abbildung 1.12: Gruppen und Gültigkeitsbereich der IAPWS-IF97 [22].....	14
Abbildung 2.1: Beispiel eines Druck-Zeit-Diagramms; aufgezeichnet mit einem Quecksilber-Druckmesser [4]	19
Abbildung 2.2: Anordnung des Messaufbaus zur Druck-Zeit-Messung mittels der Methode der separaten Diagramme [4]	23
Abbildung 2.3: Konstruktive Gestaltung der Druckmessstelle [21]	26
Abbildung 3.1: Krümmersegment mit markiertem Berechnungsgebiet [19].....	30
Abbildung 3.2: Beispielhaft untersuchte Rohrleitungsgeometrie [19].....	32
Abbildung 3.3: Leckagevolumenstrommessung in einer Rohrleitung [23].....	33
Abbildung 3.4: Leckagevolumenstrommessung in einem Bypass [23].....	33
Abbildung 3.5: Zweistufige Geschwindigkeitsabnahme [25]	34
Abbildung 3.6: Druckverluste in einer Rohrleitung für drei unterschiedliche Reibungszustände [26]	35
Abbildung 4.1: Schematischer Prüfstands Aufbau	40
Abbildung 4.2: Projektionsansicht des Prüfstands.....	41
Abbildung 4.3: Grundriss des Prüfstands	42
Abbildung 4.4: Anordnung im Bereich des UW-Behälters.....	42
Abbildung 4.5: Kugelhahn mit Schließgewichtsantrieb und Ölbremse	43
Abbildung 4.6: Ausführung der Druckmessstellen.....	44
Abbildung 5.1: Aufbau des Mess- und Auswertesystems.....	45
Abbildung 5.2: Piezoresistiver Drucktransmitter KELLER PAA-25 [29]	46
Abbildung 5.3: Pegelmesssonde SIEMENS SITRANS P, Serie MPS [32].....	47
Abbildung 5.4: Absolutdruckaufnehmer ROSEMOUNT 3051C [33].....	47
Abbildung 5.5: Temperatursensor CORREGE SENSORS CSIRF	48
Abbildung 5.6: Drehgeber BOURNS AM S22U [38].....	49
Abbildung 5.7: Magnetisch-induktives Durchflussmessgerät ABB FEP511 [39].....	49
Abbildung 5.8: Messkasten mit Netzgerät.....	50
Abbildung 5.9: Durch elektromagnetisches Feld gestörtes und gefiltertes Messsignal.....	51
Abbildung 5.10: Datenerfassungsgerät NI cDAQ-9188 [42]	52
Abbildung 5.11: Spannungseingangsmodul NI 9239 [46]	53

Abbildung 5.12: Anwendung des Shannon-Nyquist-Abtasttheorems	54
Abbildung 5.13: Stromeingangsmodul NI 9203 [49]	55
Abbildung 5.14: Frontpanel	56
Abbildung 5.15: Linkes Dialogfeld des Frontpanels	57
Abbildung 5.16: Dialogfeld Voreinstellung	58
Abbildung 5.17: Dialogfeld eines Sensors	59
Abbildung 5.18: Graphen aufgezeichneter Messwerte	59
Abbildung 5.19: Blockdiagramm des Messprogramms	60
Abbildung 5.20: Nivellierungsschema	61
Abbildung 5.21: Differenzdruckverlauf ohne und mit Offset-Korrektur	65
Abbildung 5.22: Druck-Zeit-Diagramm	66
Abbildung 5.23: Zusammensetzung der Recoveryline	71
Abbildung 5.24: Iterative Berechnung der Recoveryline	72
Abbildung 5.25: Iterative Berechnung des Volumenstroms	73
Abbildung 5.26: Ergebnis der Druck-Zeit-Auswertung	73
Abbildung 6.1: Messanschluss nach Norm	76
Abbildung 6.2: Individueller Messanschluss	76
Abbildung 6.3: Messanschluss mittels Ringleitung	76
Abbildung 6.4: Messanschluss nach Norm, Messung im geraden Rohr	78
Abbildung 6.5: Messanschluss nach Norm, Messung über Krümmer	79
Abbildung 6.6: Messanschluss nach Norm, Messung gegen Oberwasser	79
Abbildung 6.7: Messanschluss nach Norm	80
Abbildung 6.8: Vergleich der relativen Fehler mit der totalen Messunsicherheit; Messanschluss nach Norm	81
Abbildung 6.9: Individueller Messanschluss, Messung im geraden Rohr	82
Abbildung 6.10: Individueller Messanschluss, Messung über Krümmer	82
Abbildung 6.11: Individueller Messanschluss, Messung gegen Oberwasser	83
Abbildung 6.12: Individueller Messanschluss	84
Abbildung 6.13: Vergleich der relativen Fehler mit der totalen Messunsicherheit; individueller Messanschluss	85
Abbildung 6.14: Messanschluss mittels Ringleitung, Messung im geraden Rohr	85
Abbildung 6.15: Messanschluss mittels Ringleitung, Messung über Krümmer	86
Abbildung 6.16: Messanschluss mittels Ringleitung, Messung gegen Oberwasser	87
Abbildung 6.17: Messanschluss mittels Ringleitung	87
Abbildung 6.18: Vergleich der relativen Fehler mit der totalen Messunsicherheit; Messanschluss mittels Ringleitung	88
Abbildung 6.19: Messung im geraden Rohr	89
Abbildung 6.20: Messung über den Krümmer	89
Abbildung 6.21: Messung gegen Oberwasser	90
Abbildung 6.22: Schwingungsverhalten der Drucksignale während des Schließens	92
Abbildung 6.23: Relativer Fehler bei variabler Abtastfrequenz	94
Abbildung 6.24: Relativer Fehler bei variablen Schließzeiten	94
Abbildung 6.25: Absperrkugelhahn mit Bypassleitung	96

Abbildung 6.26: Messanschluss nach Norm, Messung im geraden Rohr, mit Leckagevolumenstrom	97
Abbildung 6.27: Zwischenanschlag des Schließgewichtes.....	97
Abbildung 6.28: Individueller Messanschluss, Messung im geraden Rohr, mit Leckagevolumenstrom	98
Abbildung 6.29: Vergleich der Messserien	99
Abbildung 12.1: Oberwasserbehälter mit den drei Leitungen	125
Abbildung 12.2: Verlauf der Leitungen entlang der Laborwand.....	125
Abbildung 12.3: Unterwasserbehälter samt Pumpe, Leitungen und Messsystem.....	126
Abbildung 12.4: Absperrkugelhahn und Dotationsschieber.....	126
Abbildung 12.5: Kalibrationszertifikat magnetisch-induktives Durchflussmessgerät FEP511-100.....	127

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Messgenauigkeit unterschiedlicher Volumenstrommessverfahren.....	1
Tabelle 1-2: Äquivalente Bezeichnungen.....	12
Tabelle 2-1: Systematische Messunsicherheit der Pegelmessverfahren [4]	29
Tabelle 3-1: Absolute Messunsicherheiten der Einzelsegmente einer Rohrleitung [28]	36
Tabelle 5-1: Spezifikationen des piezoresistiven Drucktransmitters PAA-25 [30].....	46
Tabelle 5-2: Spezifikationen der Pegelmesssonde SITRANS P, Serie MPS [31].....	47
Tabelle 5-3: Spezifikationen des Druckaufnehmers Rosemount 3051C [35]	48
Tabelle 5-4: Spezifikationen des Kopfmessumformers SITRANS TH100 [36]	48
Tabelle 5-5: Spezifikationen des Drehgebers [37]	49
Tabelle 5-6: Spezifikationen des magnetisch-induktiven Durchflussmessgeräts FEP511-100 [9]	50
Tabelle 5-7: Spezifikationen des Datenerfassungsgeräts cDAQ-9188 [43].....	52
Tabelle 5-8: Spezifikationen des Spannungseingangsmoduls NI 9239 [44].....	53
Tabelle 5-9: Spezifikationen des Stromeingangsmoduls NI 9203 [48].....	55
Tabelle 5-10: Fehlerabschätzung der Trapezregel	66
Tabelle 5-11: Einflussgrößen auf die systematische Messunsicherheit	74
Tabelle 6-1: Messserien und Auswertevarianten	75
Tabelle 6-2: Übersicht über die gemessenen Betriebspunkte.....	77
Tabelle 6-3: Mittelwerte der Messfehler der Auswertevarianten.....	91
Tabelle 6-4: Mittelwerte der Absolutdrucksignale	92
Tabelle 6-5: Untersuchte Abtastfrequenzen.....	93
Tabelle 6-6: Untersuchte Schließzeiten	95
Tabelle 12-1: Koeffizienten zur Berechnung der Dichte nach Herbst und Rögner [4]	115
Tabelle 12-2: Numerische Werte der Koeffizienten und Exponenten der dimensionslosen Freien Enthalpie für Gruppe 1 nach IAPWS-IF97 [22].....	116
Tabelle 12-3: Werte der Studenten-t-Verteilung [21]	117
Tabelle 12-4: Messanschluss nach Norm, Messung im geraden Rohr	118
Tabelle 12-5: Messanschluss nach Norm, Messung über Krümmer.....	118
Tabelle 12-6: Messanschluss nach Norm, Messung gegen Oberwasser	119
Tabelle 12-7: Individueller Messanschluss, Messung im geraden Rohr	119
Tabelle 12-8: Individueller Messanschluss, Messung über Krümmer	120
Tabelle 12-9: Individueller Messanschluss, Messung gegen Oberwasser	120
Tabelle 12-10: Messanschluss mittels Ringleitung, Messung im geraden Rohr	121
Tabelle 12-11: Messanschluss mittels Ringleitung, Messung über Krümmer	121
Tabelle 12-12: Messanschluss mittels Ringleitung, Messung gegen Oberwasser.....	122
Tabelle 12-13: Individueller Messanschluss, Messung im geraden Rohr, variable Abtastfrequenz.....	122
Tabelle 12-14: Individueller Messanschluss, Messung im geraden Rohr, variable Schließzeit	123
Tabelle 12-15: Messanschluss nach Norm, Messung im gerade Rohr, mit Leckagevolumenstrom	124

Tabelle 12-16: Individueller Messanschluss, Messung im geraden Rohr, mit Leckagevolumenstrom	124
---	-----

11 Literaturverzeichnis

- [1] NICOLLE, J., PROULX, G., A new method for continuous efficiency measurement for hydraulic turbines, IREQ – Hydro-Québec Research Institute, Varennes, Kanada, 2010
- [2] CERVANTES, M., ANDRÉE, G., KLASON, P., SUNDSTRÖM, J., Flow Measurements in Low-Head Hydro Power Plants, Swedish Hydropower Centre – SVC, Stockholm, Schweden, 2012
- [3] MORGENSCHWEIS, G., Hydrometrie – Theorie und Praxis der Durchflussmessung in offenen Gerinnen, Springer, Berlin, Deutschland, 2010
- [4] IEC 60041, Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines, 3rd edition, Genf, Schweiz, 1991
- [5] HOFMANN, F., Grundlagen der Ultraschall-Durchflussmessung für den industriellen Einsatz, Duisburg, Deutschland, 2000
- [6] Quantum Hydrometrie GmbH, Bau und Betrieb von Ultraschall-Durchflussmessanlagen, Berlin, Deutschland, 2011
- [7] Acam-Messelectronic GmbH, Ultraschall-Durchflussmessung mit TDCs, Stutensee, Deutschland, 1999
- [8] Endress+Hauser Flowtec AG, Magnetisch-induktive Durchflussmessgeräte – Über 2 Millionen Mal im Einsatz, Reinach, Schweiz, 2016
- [9] ABB Automation Products GmbH, ProcessMaster FEP500 – Magnetisch-induktiver Durchflussmesser - Datenblatt, Baden-Dättwil, Schweiz, 2016
- [10] Wasserwerk Potsdam, [Online]. Verfügbar: <http://www.lenneschule.de/fachb/Wasserwerk/index.asp?wahl=4>. [Zugriff am 26.09.2017]
- [11] MEERWARTH K., Wasserkraftmaschinen – Einführung in Wesen, Bau und Berechnung von Wasserkraftmaschinen und Wasserkraftanlagen, 11. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, Deutschland, 1963
- [12] JABERG, H., GUGGENBERGER, M., Wirkungsgrad- und Anlagenmessung – Power-Point-Präsentation, Graz, Österreich, 2014
- [13] JABERG, H., Hydraulische Strömungsmaschinen – Vorlesungsskriptum, Graz, Österreich, 2016
- [14] BAIDAR, B., NICOLLE, J., TRIVEDI, C., CERVANTES, M.J., Winter-Kennedy method in hydraulic discharge measurement: Problems and Callenges, Luleå, Schweden, 2016
- [15] RAU, T., EISSNER, M., Experience with Winter-Kennedy coefficients on hydraulic identical units, Heidenheim, Deutschland, 2014

- [16] ADAMKOWSKI, A., Discharge Measurement Techniques in Hydropower Systems with Emphasis on the Pressure-Time Method, Institute of Fluid-Flow Machinery, Gdańsk, Polen, 2012
- [17] ADAMKOWSKI, A., Essential methods of SHP efficiency testing, Institute of Fluid Flow-Machinery, Gdańsk, Polen
- [18] BRENN, G., MEILE, W., Strömungslehre und Wärmeübertragung – Vorlesungsskriptum, Graz, Österreich, 2014
- [19] ADAMKOWSKI, A., KRZEMIANOWSKI, Z., JANICKI, W., Flow rate measurement using the pressure-time method in a hydropower plant curved penstock
- [20] JABERG, H., Instationäre Strömungen in Anlagen und Systemen – Vorlesungsskriptum, Graz, Österreich, 2014
- [21] IEC 60193, Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines – Model acceptance tests, 2nd edition, Genf, Schweiz, 1999
- [22] IAPWS-IF97, Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for Thermodynamic Properties of Water and Steam, Luzern, Schweiz, 2007
- [23] DA COSTA BORTONI, E., New developments in Gibson's method for flow measurement in hydro power plants, Electrical and Energy Systems Institute, Itajubá Federal University, Itajubá, Brasilien, 2008
- [24] ŠEVČÍK, P., Exact zero determination and integration termination for pressure-time method, OSC, Brunn, Tschechische Republik
- [25] DA COSTA BORTONI, E., On the Leakage Flow Measurement in Gibson Method Applied for Hydro Power Plants, Department of Electrical Engineering and Energy, Itajubá, Brasilien
- [26] JONSSON, P.P., RAMDAL, J., CERVANTES, M.J., Development of the Gibson method – Unsteady friction, Division of Fluid Mechanics, Luleå University of Technology, Luleå, Schweden, 2011
- [27] MÜHL, T., Einführung in die elektrische Messtechnik – Grundlagen, Messverfahren, Anwendungen, 4. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, Deutschland, 2014
- [28] IEC 62006, Hydraulic machines – Acceptance test of small hydroelectric installations, 1st edition, Genf, Schweiz, 2010
- [29] Keller PAA-25, [Online]. Verfügbar: <http://www.keller-druck.com/picts/hires/25ed.jpg>. [Zugriff am 03.11.2017]
- [30] Keller AG, Bedienungs- und Installationshinweise für piezoresistive Drucktransmitter & Pegelsonden, Winterthur, Schweiz, 2013
- [31] Siemens AG, Druckmessgerät SITRANS P – Serie MPS (Brunnensonde), Karlsruhe, Deutschland, 2009

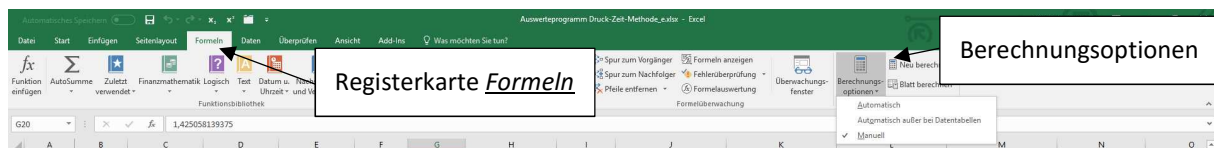
- [32] Siemens Sitrans P, Serie MPS, [Online]. Verfügbar: https://www.finecontrols.co.uk/image/cache/data/product-images/siemens/p_fi01_xx_05253j-max-1000w.jpg. [Zugriff am 03.11.2017]
- [33] Rosemount 3051C A2, [Online]. Verfügbar: http://www.emerson.com/resource/image/156838/portrait_ratio1x1/1024/1024/3db32af65571e4e81110122d410d5783/LN/prod-rmt-ps3051-coplanar-1.jpg. [Zugriff am 03.11.2017]
- [34] Emerson Process Management GmbH & Co. OHG, Rosemount Druckmessumformer 3051 – Betriebsanleitung, Wessling, Deutschland, 2014
- [35] Emerson Process Management GmbH & Co. OHG, Rosemount 3051 Druckmessumformer – Produktdatenblatt, Wessling, Deutschland, 2012
- [36] Siemens SITRANS TH100 (Pt100), [Online]. Verfügbar: <https://mall.industry.siemens.com/mall/de/ww/catalog/products/10029>. [Zugriff am 17.08.2017]
- [37] Bourns Inc., Datenblatt AM S22U, Kalifornien, USA
- [38] Bourns AM S22U, [Online]. Verfügbar: http://www.bourns.com/images/News/bourns_sc1175_ams22s_pr.jpg?sfvrsn=0. [Zugriff am 03.11.2017]
- [39] ABB FEP511, [Online]. Verfügbar: <http://abbcloud.blob.core.windows.net/public/images/813eb98d-ce5b-47ae-b068-3b7af6fe54d6/presentation.jpg>. [Zugriff am 03.11.2017]
- [40] ABB Automation Products GmbH, Magnetisch-induktiver Durchflussmesser ProcessMaster, HygienicMaster, FEX300, FEX500 - Betriebsanleitung, Baden-Dättwil, Schweiz, 2014
- [41] NI cDAQ-9188, Ethernet-Chassis mit 8 Steckplätzen für NI CompactDAQ, [Online]. Verfügbar: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/de/nid/208990>. [Zugriff am 18.08.2017]
- [42] NI cDAQ-9188, [Online]. Verfügbar: http://www.ni.com/cms/images/devzone/pub/Page_8_Fig1_Q3_2010_INL.png. [Zugriff am 23.11.2017]
- [43] National Instruments Corporation, NI CompactDAQ – Ethernet Data Acquisition System, USA, 2014
- [44] National Instruments, Datasheet NI 9239, USA, 2016
- [45] Messsystem NI 9239, Spannungsmodul mit 4 Kanälen und 50 kS/s für USB, Ethernet und Wireless, [Online]. Verfügbar: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/de/nid/209875>. [Zugriff am 05.10.2017]
- [46] NI 9239, [Online]. Verfügbar: [https://s7d5.scene7.com/is/image/ni/12181218?\\$ni-card-lg\\$](https://s7d5.scene7.com/is/image/ni/12181218?$ni-card-lg$). [Zugriff am 03.11.2017]
- [47] MEYER, M., Signalverarbeitung – Analoge und digitale Signale, Systeme und Filter, 7. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, Deutschland, 2014
- [48] National Instruments, Datasheet NI 9203, USA, 2015

- [49] NI 9203, [Online]. Verfügbar: [http://s7d5.scene7.com/is/image/ni/12010503_18204?\\$ni-card-md\\$](http://s7d5.scene7.com/is/image/ni/12010503_18204?$ni-card-md$). [Zugriff am 03.11.2017]
- [50] Messsystem NI 9203, Strommodul mit 8 Kanälen, 200 kS/s für USB, Ethernet, Wireless, [Online]. Verfügbar: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/de/nid/209884>. [Zugriff am 05.10.2017]
- [51] JAMAL, R., HAGESTEDT, A., LabVIEW – das Grundlagenbuch, 4. Auflage, Addison-Wesley, München, Deutschland, 2004

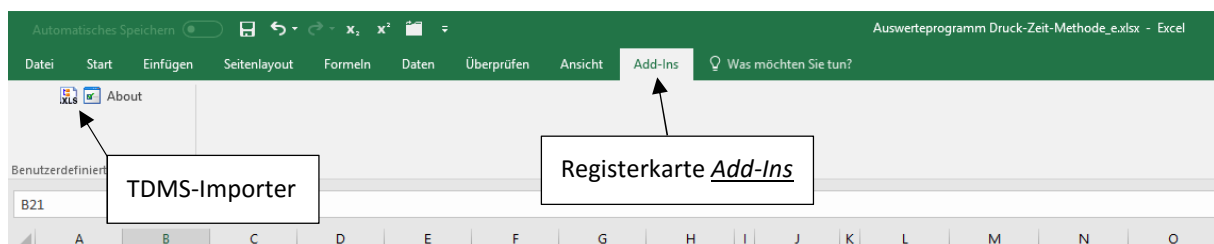
12 Anhang

12.1 Betriebsanleitung des Auswerteprogrammes

1. Microsoft Excel öffnen
2. Öffnen des Berechnungsprogrammes "Auswerteprogramm Druck-Zeit-Methode.xlsx"
3. Automatische Berechnung ggf. auf manuell umschalten
 - a. Registerkarte Formeln auswählen
 - b. Unter Berechnungsoptionen auf Manuell umschalten



4. TDMS-Datei öffnen
 - a. Registerkarte Add-Ins auswählen
 - b. TDMS-Importer öffnen
 - c. Datei auswählen
 - d. Datei öffnen



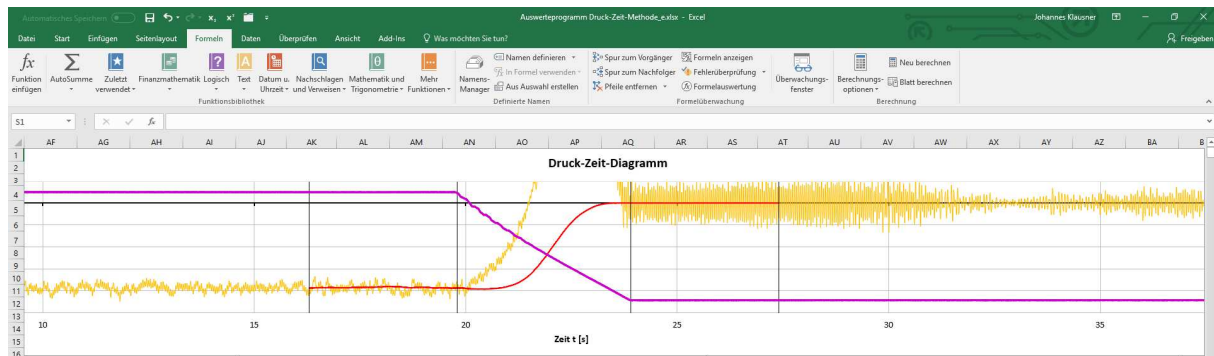
5. Messdaten importieren
 - a. Messdaten in der Mappe "Gesamt" kopieren
 - b. Einfügen der Messdaten in die zweite Spalte der Mappe "Messwerte" des Auswerteprogrammes
 - c. Erste Spalte – "Time": Anpassen der Zeit an die Messdauer
6. Rahmenbedingungen festlegen
 - a. Berechnungsart entsprechend der Vorgaben im Auswerteprogramm wählen
 - b. Eingabe der geodätischen Höhenlagen
 - c. Luftdruck in Abhängigkeit der Berechnungsart eingeben. Der verwendete Luftdruck entspricht dem Mittelwert des Luftdruckes während der Messdauer.
 - d. Eingabe der Dimensionen der Messquerschnitte
 - e. Eingabe der zur Berechnung der physikalischen Daten relevanten Parameter (Absolutdruck, Wassertemperatur, Breitengrad, Seehöhe). Der Absolutdruck und die Wassertemperatur entsprechen ihren Mittelwerten während der Messdauer.
 - f. Eingabe der Rohrleitungsgeometrie zur Berechnung des Penstockfaktors
7. Kopieren der für die Berechnung relevanten Daten aus der Mappe "Messwerte"
8. Einfügen der kopierten Daten in der Mappe "Durchflussberechnung"

-

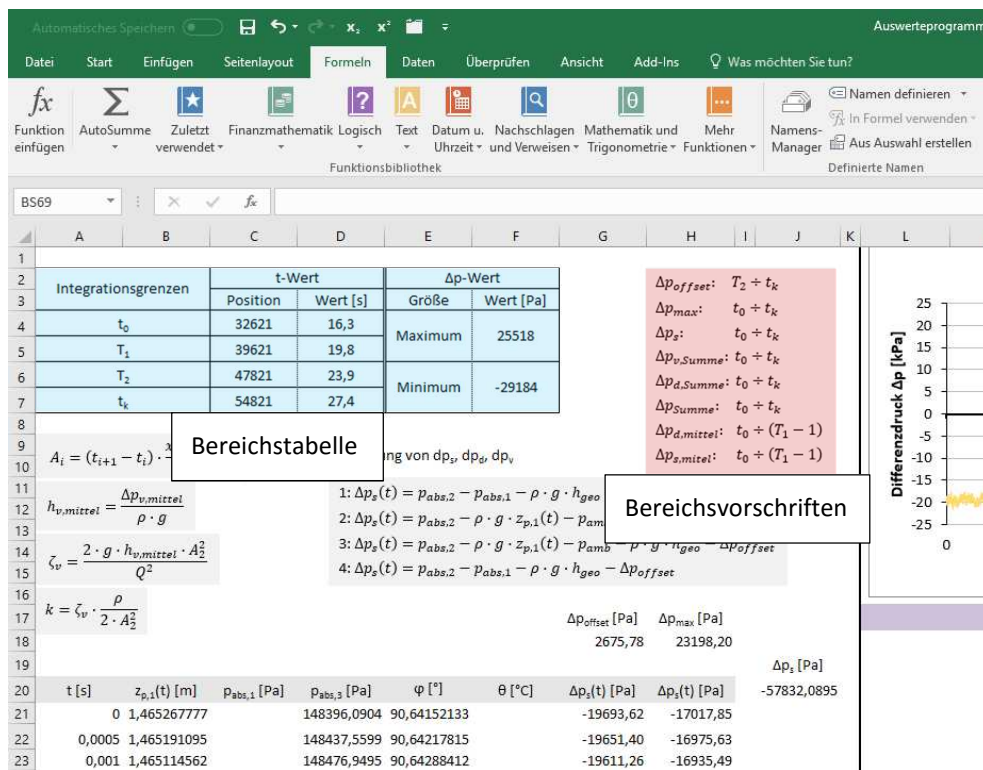
-
- The screenshot shows the Microsoft Excel interface with the 'Formeln' (Formulas) tab selected on the ribbon. The ribbon includes various options for working with formulas, such as 'Formeln anzeigen' (Show formulas), 'Formeln einfügen' (Insert formulas), 'Formeln löschen' (Delete formulas), and 'Formeln verschieben' (Move formulas). A red arrow points to the 'Neu berechnen' (Recalculate) button, which is used to recalculate the formulas in the selected range. The background of the spreadsheet shows a grid with columns labeled A through X and rows labeled 1 through 28.

-

11. Berechnung durchführen
12. Integrationsbereich ist angepasst



13. Berechnungsbereiche anhand der Bereichstabelle und der Bereichsvorschriften anpassen



- a. Bereichsvorschriften

$$\Delta p_{offset}: T_2 + t_k$$

$$\Delta p_{max}: t_0 + t_k$$

$$\Delta p_s: t_0 + t_k$$

$$\Delta p_{v,Summe}: t_0 + t_k$$

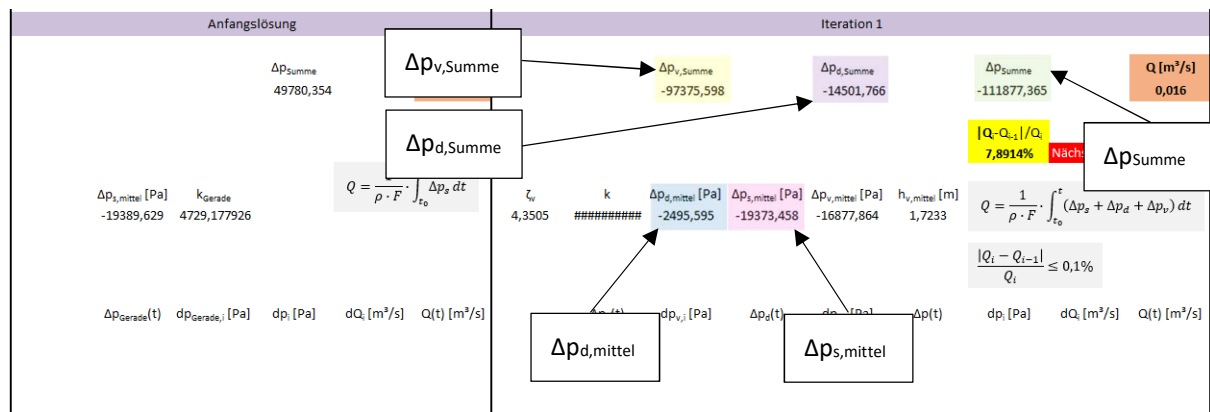
$$\Delta p_{d,Summe}: t_0 + t_k$$

$$\Delta p_{Summe}: t_0 + t_k$$

$$\Delta p_{d,mittel}: t_0 + (T_1 - 1)$$

$$\Delta p_{s,mittel}: t_0 + (T_1 - 1)$$

b. Anzunpassende Berechnungsbereiche



14. Berechnung durchführen
15. Kopieren des Berechnungsschrittes "Iteration 1" und nacheinander einfügen, bis die Abbruchbedingung erfüllt ist
16. Berechnung durchführen
17. Graphik "Druck-Zeit-Auswertung" an den letzten Iterationsschritt anpassen

12.2 Tabellen, Abbildungen und Zeichnungen

Tabelle 12-1: Koeffizienten zur Berechnung der Dichte nach Herbst und Rögner [4]

R _{ij} für den Temperaturbereich 0 °C bis 20 °C				
i	j = 0	j = 1	j = 2	j = 3
0	$0,4466741557 \cdot 10^{-4}$	$- 0,5594500697 \cdot 10^{-4}$	$0,3402591955 \cdot 10^{-5}$	$- 0,4136345187 \cdot 10^{-7}$
1	0,1010693802	$- 0,1513709263 \cdot 10^{-4}$	$0,1063798744 \cdot 10^{-5}$	$- 0,8146078995 \cdot 10^{-8}$
2	$- 0,5398392119 \cdot 10^{-5}$	$0,4672756685 \cdot 10^{-7}$	$- 0,1194765361 \cdot 10^{-8}$	$0,1366322053 \cdot 10^{-10}$
3	$0,7780118121 \cdot 10^{-9}$	$- 0,1619391322 \cdot 10^{-10}$	$0,5883547485 \cdot 10^{-12}$	$- 0,8754014287 \cdot 10^{-14}$

R _{ij} für den Temperaturbereich 20 °C bis 50 °C				
i	j = 0	j = 1	j = 2	j = 3
0	$- 0,4410355650 \cdot 10^{-4}$	$0,3052252898 \cdot 10^{-4}$	$0,9207848427 \cdot 10^{-6}$	$- 0,2590431198 \cdot 10^{-7}$
1	0,1011269892	$0,1763956234 \cdot 10^{-4}$	$0,5750340044 \cdot 10^{-9}$	$- 0,1923769978 \cdot 10^{-11}$
2	$- 0,4832441163 \cdot 10^{-5}$	$0,1533281704 \cdot 10^{-7}$	$- 0,3749721294 \cdot 10^{-9}$	$0,1322804180 \cdot 10^{-11}$
3	$0,6194433327 \cdot 10^{-9}$	$- 0,3164540431 \cdot 10^{-11}$	$0,6311389123 \cdot 10^{-13}$	$0,2469249342 \cdot 10^{-15}$

Tabelle 12-2: Numerische Werte der Koeffizienten und Exponenten der dimensionslosen Freien Enthalpie für Gruppe 1 nach IAPWS-IF97 [22]

i	I_i	J_i	n_i
1	0	-2	0,146 329 712 131 67
2	0	-1	- 0,845 481 871 691 14
3	0	0	- 0,375 636 036 720 40 · 10 ¹
4	0	1	0,338 551 691 683 85 · 10 ¹
5	0	2	- 0,957 919 633 878 72
6	0	3	0,157 720 385 132 28
7	0	4	- 0,166 164 171 995 01 · 10 ⁻¹
8	0	5	0,812 146 299 835 68 · 10 ⁻³
9	1	-9	0,283 190 801 238 04 · 10 ⁻³
10	1	-7	- 0,607 063 015 658 74 · 10 ⁻³
11	1	-1	- 0,189 900 682 184 19 · 10 ⁻¹
12	1	0	- 0,325 297 487 705 05 · 10 ⁻¹
13	1	1	- 0,218 417 171 754 14 · 10 ⁻¹
14	1	3	- 0,528 383 579 699 30 · 10 ⁻⁴
15	2	-3	- 0,471 843 210 732 67 · 10 ⁻³
16	2	0	- 0,300 017 807 930 26 · 10 ⁻³
17	2	1	0,476 613 939 069 87 · 10 ⁻⁴
18	2	3	- 0,441 418 453 308 46 · 10 ⁻⁵
19	2	17	- 0,726 949 962 975 94 · 10 ⁻¹⁵
20	3	-4	- 0,316 796 448 450 54 · 10 ⁻⁴
21	3	0	- 0,282 707 979 853 12 · 10 ⁻⁵
22	3	6	- 0,852 051 281 201 03 · 10 ⁻⁹
23	4	-5	- 0,224 252 819 080 00 · 10 ⁻⁵
24	4	-2	- 0,651 712 228 956 01 · 10 ⁻⁶
25	4	10	- 0,143 417 299 379 24 · 10 ⁻¹²
26	5	-8	- 0,405 169 968 601 17 · 10 ⁻⁶
27	8	-11	- 0,127 343 017 416 41 · 10 ⁻⁸
28	8	-6	- 0,174 248 712 306 34 · 10 ⁻⁹
29	21	-29	- 0,687 621 312 955 31 · 10 ⁻¹⁸
30	23	-31	0,144 783 078 285 21 · 10 ⁻¹⁹
31	29	-38	0,263 357 816 627 95 · 10 ⁻²²
32	30	-39	- 0,119 476 226 400 71 · 10 ⁻²²
33	31	-40	0,182 280 945 814 04 · 10 ⁻²³
34	32	-41	- 0,935 370 872 924 58 · 10 ⁻²⁵

Tabelle 12-3: Werte der Studenten-t-Verteilung [21]

Freiheitsgrad ν	Studenten-t-Verteilung	t/\sqrt{n}
1	12,706	8,984
2	4,303	2,484
3	3,182	1,591
4	2,776	1,241
5	2,571	1,050
6	2,447	0,925
7	2,365	0,836
8	2,306	0,769
9	2,262	0,715
10	2,228	0,672
11	2,201	0,635
12	2,179	0,604
13	2,160	0,577
14	2,145	0,554
15	2,131	0,533
20	2,086	0,455
30	2,042	0,367
60	2,000	0,256
∞	1,960	0

Tabelle 12-4: Messanschluss nach Norm, Messung im geraden Rohr

Messung	Q _{ref} [m³/s]	gefiltert Q _{g/h} [m³/s]	relativer Fehler [%]	Mittelwert [%]		absoluter Fehler [l/s]	Mittelwert [l/s]
2017-10-21_5.1_IEC60041_oQk	0,004989704	0,004970134	-0,39	-0,45	Minimum	-0,02	-0,02
2017-10-21_5.2_IEC60041_oQk	0,004991332	0,004986668	-0,09		-0,09	0,00	
2017-10-21_5.3_IEC60041_oQk	0,004985392	0,004957247	-0,57		0,75	-0,03	
2017-10-21_5.4_IEC60041_oQk	0,005007717	0,004989447	-0,37		Maximum	-0,02	
2017-10-21_5.5_IEC60041_oQk	0,004994578	0,004952608	-0,85	-1,09	-0,85	-0,04	-0,11
2017-10-21_10.1_IEC60041_oQk	0,010020747	0,009940781	-0,80		Minimum	-0,08	
2017-10-21_10.2_IEC60041_oQk	0,010048841	0,009968296	-0,81		-0,80	-0,08	
2017-10-21_10.3_IEC60041_oQk	0,010038802	0,009906857	-1,33		0,53	-0,13	
2017-10-21_10.4_IEC60041_oQk	0,010038163	0,009916713	-1,22	-1,48	Maximum	-0,12	-0,22
2017-10-21_10.5_IEC60041_oQk	0,010040543	0,00991377	-1,28		-1,33	-0,13	
2017-10-21_15.1_IEC60041_oQk	0,015024034	0,014775058	-1,69		Minimum	-0,25	
2017-10-21_15.2_IEC60041_oQk	0,01505611	0,014824706	-1,56		-1,20	-0,23	
2017-10-21_15.3_IEC60041_oQk	0,015031254	0,014777849	-1,71	-1,59	0,52	-0,25	-0,31
2017-10-21_15.4_IEC60041_oQk	0,015051012	0,014865661	-1,25		Maximum	-0,19	
2017-10-21_15.5_IEC60041_oQk	0,015048314	0,014870152	-1,20		-1,71	-0,18	
2017-10-21_20.1_IEC60041_oQk	0,020018965	0,019681516	-1,71		Minimum	-0,34	-0,42
2017-10-21_20.2_IEC60041_oQk	0,020007704	0,019678657	-1,67	-1,70	-1,39	-0,33	
2017-10-21_20.3_IEC60041_oQk	0,020040929	0,019726992	-1,59		0,33	-0,31	
2017-10-21_20.4_IEC60041_oQk	0,020023695	0,019706727	-1,61		Maximum	-0,32	
2017-10-21_20.5_IEC60041_oQk	0,020045959	0,019771576	-1,39	-1,56	-1,71	-0,27	-0,42
2017-10-21_25.1_IEC60041_oQk	0,024979576	0,024559138	-1,71		Minimum	-0,42	
2017-10-21_25.2_IEC60041_oQk	0,024980668	0,024544029	-1,78		-1,58	-0,44	
2017-10-21_25.3_IEC60041_oQk	0,025022822	0,024632689	-1,58		0,26	-0,39	
2017-10-21_25.4_IEC60041_oQk	0,024984688	0,024535124	-1,83	-1,56	Maximum	-0,45	-0,42
2017-10-21_25.5_IEC60041_oQk	0,0249947	0,024606788	-1,58		-1,83	-0,39	
2017-10-21_27.5.1_IEC60041_oQk	0,027470092	0,027104478	-1,35		Minimum	-0,37	-0,42
2017-10-21_27.5.2_IEC60041_oQk	0,027503193	0,027078105	-1,57		-1,35	-0,43	
2017-10-21_27.5.3_IEC60041_oQk	0,027526621	0,027057454	-1,73		0,39	-0,47	
2017-10-21_27.5.4_IEC60041_oQk	0,027516783	0,02709576	-1,55		Maximum	-0,42	
2017-10-21_27.5.5_IEC60041_oQk	0,027546968	0,027115291	-1,59		-1,73	-0,43	

Tabelle 12-5: Messanschluss nach Norm, Messung über Krümmer

Messung	Q _{ref} [m³/s]	gefiltert Q _{g/h} [m³/s]	relativer Fehler [%]	Mittelwert [%]		absoluter Fehler [l/s]	Mittelwert [l/s]
2017-10-21_5.1_IEC60041_oQk	0,004989704	0,004971108	-0,37	-0,44	Minimum	-0,02	-0,02
2017-10-21_5.2_IEC60041_oQk	0,004991332	0,004985314	-0,12		-0,12	-0,01	
2017-10-21_5.3_IEC60041_oQk	0,004985392	0,004957884	-0,55		0,70	-0,03	
2017-10-21_5.4_IEC60041_oQk	0,005007717	0,00499123	-0,33		Maximum	-0,02	
2017-10-21_5.5_IEC60041_oQk	0,004994578	0,004953966	-0,82	-1,12	-0,82	-0,04	-0,11
2017-10-21_10.1_IEC60041_oQk	0,010020747	0,009938804	-0,82		Minimum	-0,08	
2017-10-21_10.2_IEC60041_oQk	0,010048841	0,009964831	-0,84		-0,82	-0,08	
2017-10-21_10.3_IEC60041_oQk	0,010038802	0,009904295	-1,36		0,53	-0,13	
2017-10-21_10.4_IEC60041_oQk	0,010038163	0,009914325	-1,25	-1,45	Maximum	-0,12	-0,21
2017-10-21_10.5_IEC60041_oQk	0,010040543	0,009907773	-1,34		-1,36	-0,13	
2017-10-21_15.1_IEC60041_oQk	0,015024034	0,014784865	-1,62		Minimum	-0,24	
2017-10-21_15.2_IEC60041_oQk	0,01505611	0,014827902	-1,54		-1,18	-0,23	
2017-10-21_15.3_IEC60041_oQk	0,015031254	0,014784858	-1,67	-1,56	0,48	-0,25	-0,31
2017-10-21_15.4_IEC60041_oQk	0,015051012	0,014869871	-1,22		Maximum	-0,18	
2017-10-21_15.5_IEC60041_oQk	0,015048314	0,014872237	-1,18		-1,67	-0,18	
2017-10-21_20.1_IEC60041_oQk	0,020018965	0,019696405	-1,64		Minimum	-0,32	-0,41
2017-10-21_20.2_IEC60041_oQk	0,020007704	0,019685885	-1,63	-1,68	-1,41	-0,32	
2017-10-21_20.3_IEC60041_oQk	0,020040929	0,019742316	-1,51		0,23	-0,30	
2017-10-21_20.4_IEC60041_oQk	0,020023695	0,019709019	-1,60		Maximum	-0,31	
2017-10-21_20.5_IEC60041_oQk	0,020045959	0,019768124	-1,41	-1,53	-1,64	-0,28	-0,41
2017-10-21_25.1_IEC60041_oQk	0,024979576	0,024567711	-1,68		Minimum	-0,41	
2017-10-21_25.2_IEC60041_oQk	0,024980668	0,024532985	-1,82		-1,56	-0,45	
2017-10-21_25.3_IEC60041_oQk	0,025022822	0,024631546	-1,59		0,27	-0,39	
2017-10-21_25.4_IEC60041_oQk	0,024984688	0,024550661	-1,77	-1,56	Maximum	-0,43	-0,41
2017-10-21_25.5_IEC60041_oQk	0,0249947	0,024611937	-1,56		-1,82	-0,38	
2017-10-21_27.5.1_IEC60041_oQk	0,027470092	0,027118424	-1,30		Minimum	-0,35	
2017-10-21_27.5.2_IEC60041_oQk	0,027503193	0,027088767	-1,53		-1,30	-0,41	
2017-10-21_27.5.3_IEC60041_oQk	0,027526621	0,027071269	-1,68	-1,57	0,39	-0,46	-0,41
2017-10-21_27.5.4_IEC60041_oQk	0,027516783	0,027091663	-1,57		Maximum	-0,43	
2017-10-21_27.5.5_IEC60041_oQk	0,027546968	0,027123375	-1,56		-1,68	-0,42	

Tabelle 12-6: Messanschluss nach Norm, Messung gegen Oberwasser

Messung	Q _{ref} [m³/s]	gefiltert Q _{0/h} [m³/s]	relativer Fehler [%]	Mittelwert [%]		absoluter Fehler [l/s]	Mittelwert [l/s]
2017-10-21_5.1_IEC60041_oQk	0,004989052	0,005009495	0,41	0,13	Minimum	0,02	0,01
2017-10-21_5.2_IEC60041_oQk	0,004991193	0,005027747	0,73		0,73	0,04	
2017-10-21_5.3_IEC60041_oQk	0,004985085	0,004992257	0,14		-1,20	0,01	
2017-10-21_5.4_IEC60041_oQk	0,005007294	0,005000431	-0,14		Maximum	-0,01	
2017-10-21_5.5_IEC60041_oQk	0,004995266	0,00497186	-0,47	-0,55	-0,47	-0,02	-0,06
2017-10-21_10.1_IEC60041_oQk	0,010021058	0,009981567	-0,40		Minimum	-0,04	
2017-10-21_10.2_IEC60041_oQk	0,01004817	0,010008941	-0,39		-0,39	-0,04	
2017-10-21_10.3_IEC60041_oQk	0,010039269	0,009979434	-0,60		-0,47	-0,06	
2017-10-21_10.4_IEC60041_oQk	0,010037603	0,00998701	-0,51	-1,02	Maximum	-0,05	-0,15
2017-10-21_10.5_IEC60041_oQk	0,010041723	0,009955505	-0,87		-0,87	-0,09	
2017-10-21_15.1_IEC60041_oQk	0,015024578	0,014898069	-0,85		Minimum	-0,13	
2017-10-21_15.2_IEC60041_oQk	0,015056632	0,0148649515	-1,29		-0,83	-0,19	
2017-10-21_15.3_IEC60041_oQk	0,015031481	0,014853119	-1,20	-1,08	-0,46	-0,18	-0,21
2017-10-21_15.4_IEC60041_oQk	0,015051147	0,014927264	-0,83		Maximum	-0,12	
2017-10-21_15.5_IEC60041_oQk	0,015047578	0,014909083	-0,93		-1,29	-0,14	
2017-10-21_20.1_IEC60041_oQk	0,020018768	0,019841749	-0,89		Minimum	-0,18	
2017-10-21_20.2_IEC60041_oQk	0,020006812	0,019735683	-1,37	-1,27	-0,89	-0,27	-0,31
2017-10-21_20.3_IEC60041_oQk	0,020040426	0,019839494	-1,01		-0,48	-0,20	
2017-10-21_20.4_IEC60041_oQk	0,020022925	0,019798471	-1,13		Maximum	-0,22	
2017-10-21_20.5_IEC60041_oQk	0,020047399	0,019851452	-0,99		-1,37	-0,20	
2017-10-21_25.1_IEC60041_oQk	0,024979036	0,024729265	-1,01	-1,16	Minimum	-0,25	-0,32
2017-10-21_25.2_IEC60041_oQk	0,024980462	0,024625123	-1,44		-1,01	-0,36	
2017-10-21_25.3_IEC60041_oQk	0,025022567	0,024720341	-1,22		-0,46	-0,30	
2017-10-21_25.4_IEC60041_oQk	0,024983278	0,024621477	-1,47		Maximum	-0,36	
2017-10-21_25.5_IEC60041_oQk	0,024995489	0,024699504	-1,20	-1,16	-1,47	-0,30	-0,32
2017-10-21_27.5.1_IEC60041_oQk	0,027470402	0,027187891	-1,04		Minimum	-0,28	
2017-10-21_27.5.2_IEC60041_oQk	0,027502913	0,027184399	-1,17		-1,02	-0,32	
2017-10-21_27.5.3_IEC60041_oQk	0,027527325	0,027249253	-1,02		-0,41	-0,28	
2017-10-21_27.5.4_IEC60041_oQk	0,027517156	0,027202218	-1,16	-1,43	Maximum	-0,31	-0,39
2017-10-21_27.5.5_IEC60041_oQk	0,027546788	0,027159368	-1,43		-1,43	-0,39	

Tabelle 12-7: Individueller Messanschluss, Messung im geraden Rohr

Messung	Q _{ref} [m³/s]	gefiltert Q _{0/h} [m³/s]	relativer Fehler [%]	Mittelwert [%]		absoluter Fehler [l/s]	Mittelwert [l/s]
2017-10-24_5.1_wbdg_oQk	0,005064519	0,005038725	-0,51	-0,22	Minimum	-0,03	-0,01
2017-10-24_5.2_wbdg_oQk	0,005068103	0,005045507	-0,45		0,11	-0,02	
2017-10-24_5.3_wbdg_oQk	0,0050207	0,00500378	-0,34		0,62	-0,02	
2017-10-24_5.4_wbdg_oQk	0,005070133	0,00507349	0,07		Maximum	0,00	
2017-10-24_5.5_wbdg_oQk	0,005015102	0,005020688	0,11	-1,30	-0,51	0,01	-0,13
2017-10-24_10.1_wbdg_oQk	0,01005217	0,009948152	-1,05		Minimum	-0,10	
2017-10-24_10.2_wbdg_oQk	0,0100156	0,009885537	-1,32		-1,05	-0,13	
2017-10-24_10.3_wbdg_oQk	0,010022223	0,009881644	-1,42		0,42	-0,14	
2017-10-24_10.4_wbdg_oQk	0,010025334	0,009880969	-1,46	-1,66	Maximum	-0,14	-0,25
2017-10-24_10.5_wbdg_oQk	0,010033082	0,0099107	-1,23		-1,46	-0,12	
2017-10-24_15.1_wbdg_oQk	0,015076166	0,014824793	-1,70		Minimum	-0,25	
2017-10-24_15.2_wbdg_oQk	0,015074268	0,014855127	-1,48		-1,48	-0,22	
2017-10-24_15.3_wbdg_oQk	0,015069263	0,014835201	-1,58	-1,88	0,31	-0,23	-0,37
2017-10-24_15.4_wbdg_oQk	0,01506613	0,014802141	-1,78		Maximum	-0,26	
2017-10-24_15.5_wbdg_oQk	0,015068301	0,014804258	-1,78		-1,78	-0,26	
2017-10-24_20.1_wbdg_oQk	0,020056029	0,01968137	-1,90		Minimum	-0,37	
2017-10-24_20.2_wbdg_oQk	0,020029411	0,019681184	-1,77	-1,77	-1,17	-0,35	-0,43
2017-10-24_20.3_wbdg_oQk	0,020039439	0,019808012	-1,17		0,82	-0,23	
2017-10-24_20.4_wbdg_oQk	0,020024575	0,019633834	-1,99		Maximum	-0,39	
2017-10-24_20.5_wbdg_oQk	0,020049595	0,019686632	-1,84		-1,99	-0,36	
2017-10-24_25.1_wbdg_oQk	0,025050124	0,024618839	-1,75	-1,75	Minimum	-0,43	-0,47
2017-10-24_25.2_wbdg_oQk	0,025047982	0,024626868	-1,71		-1,71	-0,42	
2017-10-24_25.3_wbdg_oQk	0,025041465	0,024591208	-1,83		0,12	-0,45	
2017-10-24_25.4_wbdg_oQk	0,025044079	0,024618243	-1,73		Maximum	-0,43	
2017-10-24_25.5_wbdg_oQk	0,025064786	0,024620666	-1,80	-1,81	-1,83	-0,44	-0,47
2017-10-24_27.5.1_wbdg_oQk	0,027489572	0,027006452	-1,79		Minimum	-0,48	
2017-10-24_27.5.2_wbdg_oQk	0,027489171	0,027046317	-1,64		-1,64	-0,44	
2017-10-24_27.5.3_wbdg_oQk	0,027476674	0,027027059	-1,66		0,22	-0,45	
2017-10-24_27.5.4_wbdg_oQk	0,027492083	0,026991337	-1,86	-1,86	Maximum	-0,50	-0,49
2017-10-24_27.5.5_wbdg_oQk	0,027449807	0,026961668	-1,81		-1,86	-0,49	

Tabelle 12-8: Individueller Messanschluss, Messung über Krümmer

Messung	Q _{ref} [m³/s]	gefiltert Q _{0/h} [m³/s]	relativer Fehler [%]	Mittelwert [%]		absoluter Fehler [l/s]	Mittelwert [l/s]
2017-10-24_5.1_wbdg_oQk	0,005064519	0,005041609	-0,45	-0,21	Minimum	-0,02	-0,01
2017-10-24_5.2_wbdg_oQk	0,005068103	0,005043519	-0,49		0,09	-0,02	
2017-10-24_5.3_wbdg_oQk	0,0050207	0,005006608	-0,28		0,58	-0,01	
2017-10-24_5.4_wbdg_oQk	0,005070133	0,005073368	0,06		Maximum	0,00	
2017-10-24_5.5_wbdg_oQk	0,005015102	0,005019764	0,09	-1,26	-0,49	0,00	-0,12
2017-10-24_10.1_wbdg_oQk	0,01005217	0,009951328	-1,01		Minimum	-0,10	
2017-10-24_10.2_wbdg_oQk	0,0100156	0,009894714	-1,22		-1,01	-0,12	
2017-10-24_10.3_wbdg_oQk	0,010022223	0,009887052	-1,37		0,42	-0,14	
2017-10-24_10.4_wbdg_oQk	0,010025334	0,009883552	-1,43	-1,62	Maximum	-0,14	-0,24
2017-10-24_10.5_wbdg_oQk	0,010033082	0,009908376	-1,26		-1,43	-0,12	
2017-10-24_15.1_wbdg_oQk	0,015076166	0,014833289	-1,64		Minimum	-0,24	
2017-10-24_15.2_wbdg_oQk	0,015074268	0,014857347	-1,46		-1,46	-0,22	
2017-10-24_15.3_wbdg_oQk	0,015069263	0,014841125	-1,54	-1,87	0,27	-0,23	-0,37
2017-10-24_15.4_wbdg_oQk	0,01506613	0,014810944	-1,72		Maximum	-0,26	
2017-10-24_15.5_wbdg_oQk	0,015068301	0,014811509	-1,73		-1,73	-0,26	
2017-10-24_20.1_wbdg_oQk	0,020056029	0,019687951	-1,87		Minimum	-0,37	
2017-10-24_20.2_wbdg_oQk	0,020029411	0,019680517	-1,77	-1,74	-1,15	-0,35	-0,43
2017-10-24_20.3_wbdg_oQk	0,020039439	0,019811978	-1,15		0,85	-0,23	
2017-10-24_20.4_wbdg_oQk	0,020024575	0,019631628	-2,00		Maximum	-0,39	
2017-10-24_20.5_wbdg_oQk	0,020049595	0,019688566	-1,83		-2,00	-0,36	
2017-10-24_25.1_wbdg_oQk	0,025050124	0,024633085	-1,69	-1,74	Minimum	-0,42	-0,47
2017-10-24_25.2_wbdg_oQk	0,025047982	0,024632669	-1,69		-1,69	-0,42	
2017-10-24_25.3_wbdg_oQk	0,025041465	0,024593904	-1,82		0,13	-0,45	
2017-10-24_25.4_wbdg_oQk	0,025044079	0,024615413	-1,74		Maximum	-0,43	
2017-10-24_25.5_wbdg_oQk	0,025064786	0,024633231	-1,75	-1,74	-1,82	-0,43	-0,47
2017-10-24_27.5.1_wbdg_oQk	0,027489572	0,027003557	-1,80		Minimum	-0,49	
2017-10-24_27.5.2_wbdg_oQk	0,027489171	0,027055168	-1,60		-1,60	-0,43	
2017-10-24_27.5.3_wbdg_oQk	0,027476674	0,027030535	-1,65		0,23	-0,45	
2017-10-24_27.5.4_wbdg_oQk	0,027492083	0,026997681	-1,83	-1,79	Maximum	-0,49	-0,48
2017-10-24_27.5.5_wbdg_oQk	0,027449807	0,026967091	-1,79		-1,83	-0,48	

Tabelle 12-9: Individueller Messanschluss, Messung gegen Oberwasser

Messung	Q _{ref} [m³/s]	gefiltert Q _{0/h} [m³/s]	relativer Fehler [%]	Mittelwert [%]		absoluter Fehler [l/s]	Mittelwert [l/s]
2017-10-24_5.1_wbdg_oQk	0,005064372	0,005073185	0,17	0,25	Minimum	0,01	0,01
2017-10-24_5.2_wbdg_oQk	0,005067962	0,005109898	0,82		0,82	0,04	
2017-10-24_5.3_wbdg_oQk	0,005020952	0,005020581	-0,01		-1,25	0,00	
2017-10-24_5.4_wbdg_oQk	0,005070133	0,005048681	-0,42		Maximum	-0,02	
2017-10-24_5.5_wbdg_oQk	0,005015102	0,005050732	0,71	-0,68	-0,42	0,04	-0,07
2017-10-24_10.1_wbdg_oQk	0,01005217	0,009991117	-0,61		Minimum	-0,06	
2017-10-24_10.2_wbdg_oQk	0,0100156	0,009966928	-0,49		-0,49	-0,05	
2017-10-24_10.3_wbdg_oQk	0,010022223	0,00996855	-0,54		-0,45	-0,05	
2017-10-24_10.4_wbdg_oQk	0,010025334	0,009946032	-0,80	-1,21	Maximum	-0,08	-0,18
2017-10-24_10.5_wbdg_oQk	0,010033082	0,009939529	-0,94		-0,94	-0,09	
2017-10-24_15.1_wbdg_oQk	0,015076166	0,014904923	-1,15		Minimum	-0,17	
2017-10-24_15.2_wbdg_oQk	0,015074268	0,014926705	-0,99		-0,99	-0,15	
2017-10-24_15.3_wbdg_oQk	0,015069263	0,014863417	-1,38	-1,30	-0,46	-0,21	-0,26
2017-10-24_15.4_wbdg_oQk	0,01506613	0,014851593	-1,44		Maximum	-0,21	
2017-10-24_15.5_wbdg_oQk	0,015068301	0,014908863	-1,07		-1,44	-0,16	
2017-10-24_20.1_wbdg_oQk	0,020056029	0,019801853	-1,28		Minimum	-0,25	-0,32
2017-10-24_20.2_wbdg_oQk	0,020029411	0,019771445	-1,30	-1,29	-0,94	-0,26	
2017-10-24_20.3_wbdg_oQk	0,020039439	0,019853537	-0,94		-0,69	-0,19	
2017-10-24_20.4_wbdg_oQk	0,020024575	0,019757176	-1,35		Maximum	-0,27	
2017-10-24_20.5_wbdg_oQk	0,020049595	0,019728732	-1,63	-1,28	-1,63	-0,32	-0,35
2017-10-24_25.1_wbdg_oQk	0,025050124	0,024744244	-1,24		Minimum	-0,31	
2017-10-24_25.2_wbdg_oQk	0,025047982	0,02471185	-1,36		-1,04	-0,34	
2017-10-24_25.3_wbdg_oQk	0,025041465	0,024737396	-1,23		-0,53	-0,30	
2017-10-24_25.4_wbdg_oQk	0,025044079	0,024786946	-1,04	-1,42	Maximum	-0,26	-0,35
2017-10-24_25.5_wbdg_oQk	0,025064786	0,024677361	-1,57		-1,57	-0,39	
2017-10-24_27.5.1_wbdg_oQk	0,027489572	0,027127878	-1,33		Minimum	-0,36	
2017-10-24_27.5.2_wbdg_oQk	0,027489171	0,02717604	-1,15		-0,99	-0,31	
2017-10-24_27.5.3_wbdg_oQk	0,027476674	0,027206317	-0,99	-1,52	-0,53	-0,27	-0,35
2017-10-24_27.5.4_wbdg_oQk	0,027492083	0,027079938	-1,52		Maximum	-0,41	
2017-10-24_27.5.5_wbdg_oQk	0,027449807	0,027064855	-1,42		-1,52	-0,38	

Tabelle 12-10: Messanschluss mittels Ringleitung, Messung im geraden Rohr

Messung	Q _{ref} [m³/s]	gefiltert Q _{0/h} [m³/s]	relativer Fehler [%]	Mittelwert [%]		absoluter Fehler [l/s]	Mittelwert [l/s]
2017-11-20_5.1_RL_oQk	0,005008796	0,004986287	-0,45	-0,42	Minimum	-0,02	-0,02
2017-11-20_5.2_RL_oQk	0,004999842	0,004994542	-0,11		-0,11	-0,01	
2017-11-20_5.3_RL_oQk	0,005010195	0,00496714	-0,87		0,76	-0,04	
2017-11-20_5.4_RL_oQk	0,005035804	0,005029123	-0,13		Maximum	-0,01	
2017-11-20_5.5_RL_oQk	0,005012144	0,004984594	-0,55	-0,96	-0,87	-0,03	-0,10
2017-11-20_10.1_RL_oQk	0,010024479	0,009953028	-0,72		Minimum	-0,07	
2017-11-20_10.2_RL_oQk	0,00998911	0,009916672	-0,73		-0,72	-0,07	
2017-11-20_10.3_RL_oQk	0,010016173	0,009911196	-1,06		0,58	-0,10	
2017-11-20_10.4_RL_oQk	0,010013458	0,009884795	-1,30	-1,82	Maximum	-0,13	-0,27
2017-11-20_10.5_RL_oQk	0,010007123	0,009906933	-1,01		-1,30	-0,10	
2017-11-20_15.1_RL_oQk	0,015041138	0,014767784	-1,85		Minimum	-0,27	
2017-11-20_15.2_RL_oQk	0,015054909	0,014740174	-2,14		-1,40	-0,31	
2017-11-20_15.3_RL_oQk	0,015045033	0,014781514	-1,78	-2,05	0,73	-0,26	-0,40
2017-11-20_15.4_RL_oQk	0,015044096	0,014835662	-1,40		Maximum	-0,21	
2017-11-20_15.5_RL_oQk	0,015015975	0,01473544	-1,90		-2,14	-0,28	
2017-11-20_20.1_RL_oQk	0,020017646	0,019627215	-1,99		Minimum	-0,39	-0,53
2017-11-20_20.2_RL_oQk	0,02003498	0,019623469	-2,10	-2,14	-1,86	-0,41	
2017-11-20_20.3_RL_oQk	0,020031024	0,019602707	-2,18		0,32	-0,43	
2017-11-20_20.4_RL_oQk	0,020023714	0,019609487	-2,11		Maximum	-0,41	
2017-11-20_20.5_RL_oQk	0,020025409	0,019659553	-1,86	-2,13	-2,18	-0,37	-0,57
2017-11-20_25.1_RL_oQk	0,025033386	0,024511525	-2,13		Minimum	-0,52	
2017-11-20_25.2_RL_oQk	0,025014835	0,024457654	-2,28		-2,08	-0,56	
2017-11-20_25.3_RL_oQk	0,025017083	0,024498797	-2,12		0,20	-0,52	
2017-11-20_25.4_RL_oQk	0,025013166	0,024494285	-2,12	-2,13	Maximum	-0,52	-0,57
2017-11-20_25.5_RL_oQk	0,025042686	0,024533283	-2,08		-2,28	-0,51	
2017-11-20_27.5.1_RL_oQk	0,027493897	0,026914455	-2,15		Minimum	-0,58	
2017-11-20_27.5.2_RL_oQk	0,027519969	0,026907966	-2,27	-2,20	-1,89	-0,61	-0,57
2017-11-20_27.5.3_RL_oQk	0,027458288	0,026950199	-1,89		0,39	-0,51	
2017-11-20_27.5.4_RL_oQk	0,027496585	0,026919606	-2,14		Maximum	-0,58	
2017-11-20_27.5.5_RL_oQk	0,027494009	0,026903455	-2,20		-2,27	-0,59	

Tabelle 12-11: Messanschluss mittels Ringleitung, Messung über Krümmer

Messung	Q _{ref} [m³/s]	gefiltert Q _{0/h} [m³/s]	relativer Fehler [%]	Mittelwert [%]		absoluter Fehler [l/s]	Mittelwert [l/s]
2017-11-20_5.1_RL_oQk	0,005008796	0,004995311	-0,27	-0,40	Minimum	-0,01	-0,02
2017-11-20_5.2_RL_oQk	0,004999842	0,004993852	-0,12		-0,12	-0,01	
2017-11-20_5.3_RL_oQk	0,005010195	0,004965981	-0,89		0,77	-0,04	
2017-11-20_5.4_RL_oQk	0,005035804	0,005027394	-0,17		Maximum	-0,01	
2017-11-20_5.5_RL_oQk	0,005012144	0,004983897	-0,57	-1,11	-0,89	-0,03	-0,11
2017-11-20_10.1_RL_oQk	0,010024479	0,009890467	-1,35		Minimum	-0,13	
2017-11-20_10.2_RL_oQk	0,00998911	0,009915375	-0,74		-0,74	-0,07	
2017-11-20_10.3_RL_oQk	0,010016173	0,009909756	-1,07		0,61	-0,11	
2017-11-20_10.4_RL_oQk	0,010013458	0,009881785	-1,33	-1,71	Maximum	-0,13	-0,25
2017-11-20_10.5_RL_oQk	0,010007123	0,009901948	-1,06		-1,35	-0,11	
2017-11-20_15.1_RL_oQk	0,015041138	0,014759532	-1,91		Minimum	-0,28	
2017-11-20_15.2_RL_oQk	0,015054909	0,014768129	-1,94		-1,38	-0,29	
2017-11-20_15.3_RL_oQk	0,015045033	0,014795647	-1,69	-2,09	0,56	-0,25	-0,41
2017-11-20_15.4_RL_oQk	0,015044096	0,014839291	-1,38		Maximum	-0,20	
2017-11-20_15.5_RL_oQk	0,015015975	0,014773008	-1,64		-1,94	-0,24	
2017-11-20_20.1_RL_oQk	0,020017646	0,019632914	-1,96		Minimum	-0,38	-0,53
2017-11-20_20.2_RL_oQk	0,02003498	0,019623407	-2,10	-2,15	-1,95	-0,41	
2017-11-20_20.3_RL_oQk	0,020031024	0,019580546	-2,30		0,35	-0,45	
2017-11-20_20.4_RL_oQk	0,020023714	0,019605922	-2,13		Maximum	-0,42	
2017-11-20_20.5_RL_oQk	0,020025409	0,019642492	-1,95	-2,12	-2,30	-0,38	-0,57
2017-11-20_25.1_RL_oQk	0,025033386	0,024507308	-2,15		Minimum	-0,53	
2017-11-20_25.2_RL_oQk	0,025014835	0,024471569	-2,22		-2,01	-0,54	
2017-11-20_25.3_RL_oQk	0,025017083	0,024524944	-2,01		0,23	-0,49	
2017-11-20_25.4_RL_oQk	0,025013166	0,024466597	-2,23	-2,19	Maximum	-0,55	-0,57
2017-11-20_25.5_RL_oQk	0,025042686	0,024516718	-2,15		-2,23	-0,53	
2017-11-20_27.5.1_RL_oQk	0,027493897	0,026912159	-2,16		Minimum	-0,58	
2017-11-20_27.5.2_RL_oQk	0,027519969	0,026915303	-2,25	-2,25	-1,91	-0,60	-0,57
2017-11-20_27.5.3_RL_oQk	0,027458288	0,026943404	-1,91		0,34	-0,51	
2017-11-20_27.5.4_RL_oQk	0,027496585	0,026931437	-2,10		Maximum	-0,57	
2017-11-20_27.5.5_RL_oQk	0,027494009	0,026903936	-2,19		-2,25	-0,59	

Tabelle 12-12: Messanschluss mittels Ringleitung, Messung gegen Oberwasser

Messung	Q _{ref} [m³/s]	gefiltert Q _{0/t} [m³/s]	relativer Fehler [%]	Mittelwert [%]		absoluter Fehler [l/s]	Mittelwert [l/s]
2017-11-20_5.1_RL_oQk	0,005008796	0,005012413	0,07	-0,06	Minimum	0,00	0,00
2017-11-20_5.2_RL_oQk	0,004999842	0,004984265	-0,31		0,28	-0,02	
2017-11-20_5.3_RL_oQk	0,005010195	0,004985291	-0,50		0,78	-0,02	
2017-11-20_5.4_RL_oQk	0,005035804	0,00504991	0,28		Maximum	0,01	
2017-11-20_5.5_RL_oQk	0,005012144	0,005019817	0,15	-0,53	-0,50	0,01	-0,05
2017-11-20_10.1_RL_oQk	0,010024479	0,010001725	-0,23		Minimum	-0,02	
2017-11-20_10.2_RL_oQk	0,00998911	0,009973448	-0,16		-0,16	-0,02	
2017-11-20_10.3_RL_oQk	0,010016173	0,009955092	-0,61		0,77	-0,06	
2017-11-20_10.4_RL_oQk	0,010013458	0,009921462	-0,93	-1,45	Maximum	-0,09	-0,22
2017-11-20_10.5_RL_oQk	0,010007123	0,009934838	-0,73		-0,93	-0,07	
2017-11-20_15.1_RL_oQk	0,015041138	0,014822696	-1,47		Minimum	-0,22	
2017-11-20_15.2_RL_oQk	0,015054909	0,014836567	-1,47		-1,21	-0,22	
2017-11-20_15.3_RL_oQk	0,015045033	0,01481928	-1,52	-1,62	0,38	-0,23	-0,32
2017-11-20_15.4_RL_oQk	0,015044096	0,014864845	-1,21		Maximum	-0,18	
2017-11-20_15.5_RL_oQk	0,015015975	0,014781819	-1,58		-1,58	-0,23	
2017-11-20_20.1_RL_oQk	0,020017646	0,019714561	-1,54		Minimum	-0,30	-0,39
2017-11-20_20.2_RL_oQk	0,02003498	0,019719816	-1,60	-1,59	-1,43	-0,32	
2017-11-20_20.3_RL_oQk	0,020031024	0,019644859	-1,97		0,54	-0,39	
2017-11-20_20.4_RL_oQk	0,020023714	0,019719184	-1,54		Maximum	-0,30	
2017-11-20_20.5_RL_oQk	0,020025409	0,019743126	-1,43	-1,56	-1,97	-0,28	-0,42
2017-11-20_25.1_RL_oQk	0,025033386	0,024666135	-1,49		Minimum	-0,37	
2017-11-20_25.2_RL_oQk	0,025014835	0,02458603	-1,74		-1,37	-0,43	
2017-11-20_25.3_RL_oQk	0,025017083	0,024598103	-1,70		0,37	-0,42	
2017-11-20_25.4_RL_oQk	0,025013166	0,024674641	-1,37	-1,56	Maximum	-0,34	-0,42
2017-11-20_25.5_RL_oQk	0,025042686	0,024644	-1,62		-1,74	-0,40	
2017-11-20_27.5.1_RL_oQk	0,027493897	0,02706477	-1,59		Minimum	-0,43	
2017-11-20_27.5.2_RL_oQk	0,027519969	0,027149038	-1,37	-1,92	-1,34	-0,37	-0,42
2017-11-20_27.5.3_RL_oQk	0,027458288	0,027096005	-1,34		0,58	-0,36	
2017-11-20_27.5.4_RL_oQk	0,027496585	0,02706306	-1,60		Maximum	-0,43	
2017-11-20_27.5.5_RL_oQk	0,027494009	0,026976872	-1,92		-1,92	-0,52	

Tabelle 12-13: Individueller Messanschluss, Messung im geraden Rohr, variable Abtastfrequenz

Messung	Q _{ref} [m³/s]	gefiltert Q _{0/t} [m³/s]	relativer Fehler [%]	Mittelwert [%]		absoluter Fehler [l/s]	Mittelwert [l/s]
2017-11-10_15.100.1_wbdg_oQk_vfa	0,015055265	0,014694198	-2,46	-1,99	Minimum	-0,36	-0,29
2017-11-10_15.100.2_wbdg_oQk_vfa	0,015028285	0,01476652	-1,77		-1,68	-0,26	
2017-11-10_15.100.3_wbdg_oQk_vfa	0,015018484	0,014770675	-1,68		0,78	-0,25	
2017-11-10_15.100.4_wbdg_oQk_vfa	0,014999788	0,014713594	-1,95		Maximum	-0,29	
2017-11-10_15.100.5_wbdg_oQk_vfa	0,015016325	0,014704538	-2,12	-1,75	-2,46	-0,31	-0,26
2017-11-10_15.500.1_wbdg_oQk_vfa	0,015039638	0,014723754	-2,15		Minimum	-0,32	
2017-11-10_15.500.2_wbdg_oQk_vfa	0,015040026	0,014800031	-1,62		-1,41	-0,24	
2017-11-10_15.500.3_wbdg_oQk_vfa	0,015013705	0,014804689	-1,41		0,73	-0,21	
2017-11-10_15.500.4_wbdg_oQk_vfa	0,015004779	0,014750457	-1,72	-1,70	Maximum	-0,25	-0,25
2017-11-10_15.500.5_wbdg_oQk_vfa	0,015009231	0,014734687	-1,86		-2,15	-0,27	
2017-11-10_15.1000.1_wbdg_oQk_vfa	0,015029136	0,01472851	-2,04		Minimum	-0,30	
2017-11-10_15.1000.2_wbdg_oQk_vfa	0,015043505	0,014805192	-1,61		-1,30	-0,24	
2017-11-10_15.1000.3_wbdg_oQk_vfa	0,015008179	0,014815196	-1,30	-1,69	0,74	-0,19	-0,25
2017-11-10_15.1000.4_wbdg_oQk_vfa	0,015011137	0,014754829	-1,74		Maximum	-0,26	
2017-11-10_15.1000.5_wbdg_oQk_vfa	0,015001029	0,014737721	-1,79		-2,04	-0,26	
2017-11-10_15.2000.1_wbdg_oQk_vfa	0,015027399	0,014760332	-1,81		Minimum	-0,27	-0,25
2017-11-10_15.2000.2_wbdg_oQk_vfa	0,015041361	0,014771451	-1,83	-1,62	-1,47	-0,27	
2017-11-10_15.2000.3_wbdg_oQk_vfa	0,015013096	0,014795637	-1,47		0,36	-0,22	
2017-11-10_15.2000.4_wbdg_oQk_vfa	0,015009999	0,014762486	-1,68		Maximum	-0,25	
2017-11-10_15.2000.5_wbdg_oQk_vfa	0,015005943	0,014760171	-1,67	-1,62	-1,83	-0,25	-0,24
2017-11-10_15.5000.1_wbdg_oQk_vfa	0,015022447	0,014787954	-1,59		Minimum	-0,23	
2017-11-10_15.5000.2_wbdg_oQk_vfa	0,015043099	0,014768115	-1,86		-1,30	-0,27	
2017-11-10_15.5000.3_wbdg_oQk_vfa	0,014989144	0,014797153	-1,30		0,56	-0,19	
2017-11-10_15.5000.4_wbdg_oQk_vfa	0,015010807	0,014776198	-1,59		Maximum	-0,23	
2017-11-10_15.5000.5_wbdg_oQk_vfa	0,015015155	0,014751678	-1,79		-1,86	-0,26	

Tabelle 12-14: Individueller Messanschluss, Messung im geraden Rohr, variable Schließzeit

Messung	Q _{ref} [m³/s]	gefiltert Q _{0/h} [m³/s]	relativer Fehler [%]	Mittelwert [%]		absoluter Fehler [l/s]	Mittelwert [l/s]
2017-10-24_25.1.1_wbdg_oQk_vts	0,02511329	0,025001038	-0,45	-0,46	Minimum	-0,11	-0,11
2017-10-24_25.1.2_wbdg_oQk_vts	0,025128735	0,025005026	-0,49		-0,24	-0,12	
2017-24-10_25.1.3_wbdg_oQk_vts	0,025095515	0,024919875	-0,70		0,46	-0,18	
2017-24-10_25.1.4_wbdg_oQk_vts	0,025071763	0,025011262	-0,24		Maximum	-0,06	
2017-10-24_25.1.5_wbdg_oQk_vts	0,025081926	0,024984985	-0,39	-1,07	-0,70	-0,10	-0,27
2017-10-24_25.2.1_wbdg_oQk_vts	0,025074247	0,02485102	-0,90		Minimum	-0,22	
2017-10-24_25.2.2_wbdg_oQk_vts	0,025064497	0,024809845	-1,03		-0,90	-0,25	
2017-10-24_25.2.3_wbdg_oQk_vts	0,025097174	0,024817723	-1,13		0,29	-0,28	
2017-10-24_25.2.4_wbdg_oQk_vts	0,025094499	0,024800605	-1,19	-1,30	Maximum	-0,29	-0,32
2017-10-24_25.2.5_wbdg_oQk_vts	0,025080432	0,024805848	-1,11		-1,19	-0,27	
2017-10-24_25.3.1_wbdg_oQk_vts	0,02509285	0,024762825	-1,33		Minimum	-0,33	
2017-10-24_25.3.2_wbdg_oQk_vts	0,025066983	0,024766962	-1,21		-1,19	-0,30	
2017-10-24_25.3.3_wbdg_oQk_vts	0,025075149	0,024711463	-1,47	-1,79	0,28	-0,36	-0,44
2017-10-24_25.3.4_wbdg_oQk_vts	0,025066746	0,02477177	-1,19		Maximum	-0,29	
2017-10-24_25.3.5_wbdg_oQk_vts	0,025096555	0,024773725	-1,30		-1,47	-0,32	
2017-10-24_25.4.1_wbdg_oQk_vts	0,025120362	0,024639878	-1,95		Minimum	-0,48	-0,50
2017-10-24_25.4.2_wbdg_oQk_vts	0,025099898	0,024628982	-1,91	-2,03	-1,25	-0,47	
2017-10-24_25.4.3_wbdg_oQk_vts	0,025106386	0,024641308	-1,89		0,70	-0,47	
2017-10-24_25.4.4_wbdg_oQk_vts	0,025089559	0,024780949	-1,25		Maximum	-0,31	
2017-10-24_25.4.5_wbdg_oQk_vts	0,02511739	0,02463858	-1,94	-2,44	-1,95	-0,48	-0,60
2017-10-24_25.5.1_wbdg_oQk_vts	0,025092558	0,024676507	-1,69		Minimum	-0,42	
2017-10-24_25.5.2_wbdg_oQk_vts	0,025074125	0,024522928	-2,25		-1,69	-0,55	
2017-10-24_25.5.3_wbdg_oQk_vts	0,025063988	0,024601335	-1,88		0,56	-0,46	
2017-10-24_25.5.4_wbdg_oQk_vts	0,025096744	0,024551242	-2,22	-2,77	Maximum	-0,55	-0,68
2017-10-24_25.5.5_wbdg_oQk_vts	0,025071378	0,024554271	-2,11		-2,25	-0,52	
2017-10-24_25.6.1_wbdg_oQk_vts	0,025108777	0,024502651	-2,47		Minimum	-0,61	
2017-10-24_25.6.2_wbdg_oQk_vts	0,025081849	0,0244842699	-2,44		-2,35	-0,60	-0,81
2017-10-24_25.6.3_wbdg_oQk_vts	0,025082193	0,024505651	-2,35	-3,34	0,17	-0,58	
2017-10-24_25.6.4_wbdg_oQk_vts	0,025093474	0,0244767180	-2,52		Maximum	-0,62	
2017-10-24_25.6.5_wbdg_oQk_vts	0,025105551	0,024509044	-2,43		-2,52	-0,60	
2017-10-24_25.8.1_wbdg_oQk_vts	0,025076829	0,024381997	-2,85	-3,81	Minimum	-0,69	-0,81
2017-10-24_25.8.2_wbdg_oQk_vts	0,025071725	0,0244588652	-2,51		-2,51	-0,61	
2017-10-24_25.8.3_wbdg_oQk_vts	0,025074149	0,024409447	-2,72		0,39	-0,66	
2017-10-24_25.8.4_wbdg_oQk_vts	0,025072103	0,0243724489	-2,87		Maximum	-0,70	
2017-10-24_25.8.5_wbdg_oQk_vts	0,025084907	0,024380002	-2,89	-3,81	-2,89	-0,70	-0,81
2017-10-24_25.10.1_wbdg_oQk_vts	0,025034971	0,02424028	-3,28		Minimum	-0,79	
2017-10-24_25.10.2_wbdg_oQk_vts	0,025039114	0,0242846070	-3,11		-3,11	-0,75	
2017-10-24_25.10.3_wbdg_oQk_vts	0,025068696	0,024251162	-3,37		0,70	-0,82	
2017-10-24_25.10.4_wbdg_oQk_vts	0,025065354	0,0241463864	-3,81	-3,81	Maximum	-0,92	-0,81
2017-10-24_25.10.5_wbdg_oQk_vts	0,025053648	0,024292092	-3,13		-3,81	-0,76	

Tabelle 12-15: Messanschluss nach Norm, Messung im gerade Rohr, mit Leckagevolumenstrom

Messung	Q _{ref} [m³/s]	gefiltert Q _{g/f} [m³/s]		relativer Fehler [%]	Mittelwert [%]		absoluter Fehler [l/s]	Mittelwert [l/s]	
2017-10-23_5.1_IEC60041_mQk	0,005031596	0	0	0,004968669	-1,27	-1,31	Minimum	-0,06	-0,07
2017-10-23_5.2_IEC60041_mQk	0,005030277	0	0	0,004960308	-1,41		-1,03	-0,07	
2017-10-23_5.3_IEC60041_mQk	0,005034163	0	0	0,004972499	-1,24		0,58	-0,06	
2017-10-23_5.4_IEC60041_mQk	0,005028627	0	0	0,004977595	-1,03		Maximum	-0,05	
2017-10-23_5.5_IEC60041_mQk	0,005075206	0	0	0,004995128	-1,60		-1,60	-0,08	
2017-10-23_10.1_IEC60041_mQk	0,010037839	0	0,01	0,009767907	-2,76	-2,82	Minimum	-0,27	-0,28
2017-10-23_10.2_IEC60041_mQk	0,010040536	0	0,01	0,009766293	-2,81		-2,64	-0,27	
2017-10-23_10.3_IEC60041_mQk	0,010047178	0	0,01	0,009741613	-3,14		0,50	-0,31	
2017-10-23_10.4_IEC60041_mQk	0,010046972	0	0,01	0,009776662	-2,76		Maximum	-0,27	
2017-10-23_10.5_IEC60041_mQk	0,01003642	0	0,01	0,009778689	-2,64		-3,14	-0,26	
2017-10-23_15.1_IEC60041_mQk	0,015085377	0	0,01	0,014559989	-3,61	-3,35	Minimum	-0,53	-0,49
2017-10-23_15.2_IEC60041_mQk	0,015083178	0	0,01	0,014574608	-3,49		-2,99	-0,51	
2017-10-23_15.3_IEC60041_mQk	0,015085494	0	0,01	0,014626697	-3,14		0,62	-0,46	
2017-10-23_15.4_IEC60041_mQk	0,015017386	0	0,01	0,014507906	-3,51		Maximum	-0,51	
2017-10-23_15.5_IEC60041_mQk	0,015027482	0	0,01	0,014591196	-2,99		-3,61	-0,44	
2017-10-23_20.1_IEC60041_mQk	0,020044205	0	0,02	0,019385059	-3,40	-3,48	Minimum	-0,66	-0,68
2017-10-23_20.2_IEC60041_mQk	0,020056904	0	0,02	0,01939279	-3,42		-3,26	-0,66	
2017-10-23_20.3_IEC60041_mQk	0,020035668	0	0,02	0,019402325	-3,26		0,57	-0,63	
2017-10-23_20.4_IEC60041_mQk	0,020058534	0	0,02	0,019317849	-3,83		Maximum	-0,74	
2017-10-23_20.5_IEC60041_mQk	0,020056469	0	0,02	0,019378317	-3,50		-3,83	-0,68	
2017-10-23_25.1_IEC60041_mQk	0,025007048	0	0,02	0,024184975	-3,40	-3,45	Minimum	-0,82	-0,83
2017-10-23_25.2_IEC60041_mQk	0,025022501	0	0,02	0,024180121	-3,48		-3,35	-0,84	
2017-10-23_25.3_IEC60041_mQk	0,025004753	0	0,02	0,024151924	-3,53		0,18	-0,85	
2017-10-23_25.4_IEC60041_mQk	0,024994646	0	0,02	0,024184869	-3,35		Maximum	-0,81	
2017-10-23_25.5_IEC60041_mQk	0,025048608	0	0,02	0,024205376	-3,48		-3,53	-0,84	
2017-10-23_27.5.1_IEC60041_mQk	0,027519288	0	0,03	0,026612399	-3,41	-3,47	Minimum	-0,91	-0,92
2017-10-23_27.5.2_IEC60041_mQk	0,027520181	0	0,03	0,026614369	-3,40		-3,40	-0,91	
2017-10-23_27.5.3_IEC60041_mQk	0,027545714	0	0,03	0,026611894	-3,51		0,19	-0,93	
2017-10-23_27.5.4_IEC60041_mQk	0,027503605	0	0,03	0,026596941	-3,41		Maximum	-0,91	
2017-10-23_27.5.5_IEC60041_mQk	0,027529743	0	0,03	0,02657393	-3,60		-3,60	-0,96	

Tabelle 12-16: Individueller Messanschluss, Messung im geraden Rohr, mit Leckagevolumenstrom

Messung	Q _{ref} [m³/s]	gefiltert Q _{g/f} [m³/s]		relativer Fehler [%]	Mittelwert [%]		absoluter Fehler [l/s]	Mittelwert [l/s]	
2017-11-13_5.1_wbdg_mQk	0,005088175	0	0	0,005049399	-0,77	-0,83	Minimum	-0,04	-0,04
2017-11-13_5.2_wbdg_mQk	0,005035886	0	0	0,005009804	-0,52		-0,52	-0,03	
2017-11-13_5.3_wbdg_mQk	0,005012895	0	0	0,004973249	-0,80		0,78	-0,04	
2017-11-13_5.4_wbdg_mQk	0,005044718	0	0	0,004979943	-1,30		Maximum	-0,06	
2017-11-13_5.5_wbdg_mQk	0,005029997	0	0	0,00499271	-0,75		-1,30	-0,04	
2017-11-13_10.1_wbdg_mQk	0,010033054	0	0,01	0,009835174	-2,01	-2,05	Minimum	-0,20	-0,20
2017-11-13_10.2_wbdg_mQk	0,01003508	0	0,01	0,009833645	-2,05		-2,01	-0,20	
2017-11-13_10.3_wbdg_mQk	0,010015611	0	0,01	0,009810283	-2,09		0,08	-0,21	
2017-11-13_10.4_wbdg_mQk	0,010104157	0	0,01	0,009905016	-2,01		Maximum	-0,20	
2017-11-13_10.5_wbdg_mQk	0,010034187	0	0,01	0,009830195	-2,08		-2,09	-0,20	
2017-11-13_15.1_wbdg_mQk	0,015021125	0	0,01	0,014602929	-2,86	-2,91	Minimum	-0,42	-0,43
2017-11-13_15.2_wbdg_mQk	0,01505878	0	0,01	0,01463084	-2,92		-2,64	-0,43	
2017-11-13_15.3_wbdg_mQk	0,015003517	0	0,01	0,01461696	-2,64		0,52	-0,39	
2017-11-13_15.4_wbdg_mQk	0,015020733	0	0,01	0,014586855	-2,97		Maximum	-0,43	
2017-11-13_15.5_wbdg_mQk	0,015022152	0	0,01	0,014562047	-3,16		-3,16	-0,46	
2017-11-13_20.1_wbdg_mQk	0,020069597	0	0,02	0,019470217	-3,08	-3,12	Minimum	-0,60	-0,61
2017-11-13_20.2_wbdg_mQk	0,020044815	0	0,02	0,019470525	-2,95		-2,95	-0,57	
2017-11-13_20.3_wbdg_mQk	0,020043484	0	0,02	0,019461645	-2,99		0,39	-0,58	
2017-11-13_20.4_wbdg_mQk	0,020058949	0	0,02	0,019429916	-3,24		Maximum	-0,63	
2017-11-13_20.5_wbdg_mQk	0,020070002	0	0,02	0,019421252	-3,34		-3,34	-0,65	
2017-11-13_25.1_wbdg_mQk	0,025049957	0	0,02	0,0242442	-3,32	-3,19	Minimum	-0,81	-0,77
2017-11-13_25.2_wbdg_mQk	0,02501062	0	0,02	0,024253506	-3,12		-2,85	-0,76	
2017-11-13_25.3_wbdg_mQk	0,025027717	0	0,02	0,024232246	-3,28		0,53	-0,80	
2017-11-13_25.4_wbdg_mQk	0,025037967	0	0,02	0,024219054	-3,38		Maximum	-0,82	
2017-11-13_25.5_wbdg_mQk	0,025014948	0	0,02	0,024320851	-2,85		-3,38	-0,69	
2017-11-13_27.5.1_wbdg_mQk	0,027529147	0	0,03	0,026718321	-3,03	-3,22	Minimum	-0,81	-0,86
2017-11-13_27.5.2_wbdg_mQk	0,02748512	0	0,03	0,026640238	-3,17		-3,03	-0,84	
2017-11-13_27.5.3_wbdg_mQk	0,027508985	0	0,03	0,026628327	-3,31		0,29	-0,88	
2017-11-13_27.5.4_wbdg_mQk	0,027527899	0	0,03	0,0266544	-3,28		Maximum	-0,87	
2017-11-13_27.5.5_wbdg_mQk	0,027524351	0	0,03	0,026639757	-3,32		-3,32	-0,88	



Abbildung 12.1: Oberwasserbehälter mit den drei Leitungen



Abbildung 12.2: Verlauf der Leitungen entlang der Laborwand



Abbildung 12.3: Unterwasserbehälter samt Pumpe, Leitungen und Messsystem

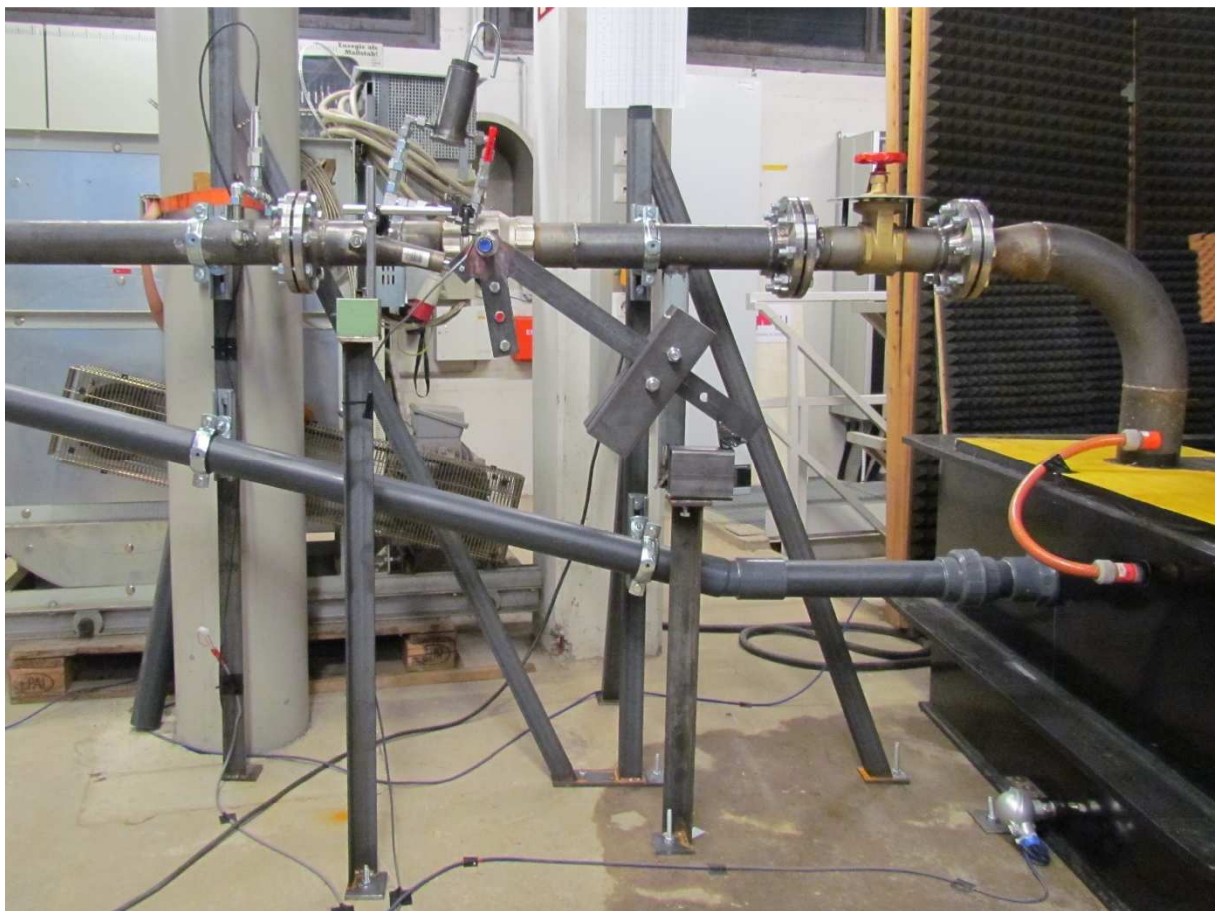


Abbildung 12.4: Absperrkugelhahn und Dotationsschieber

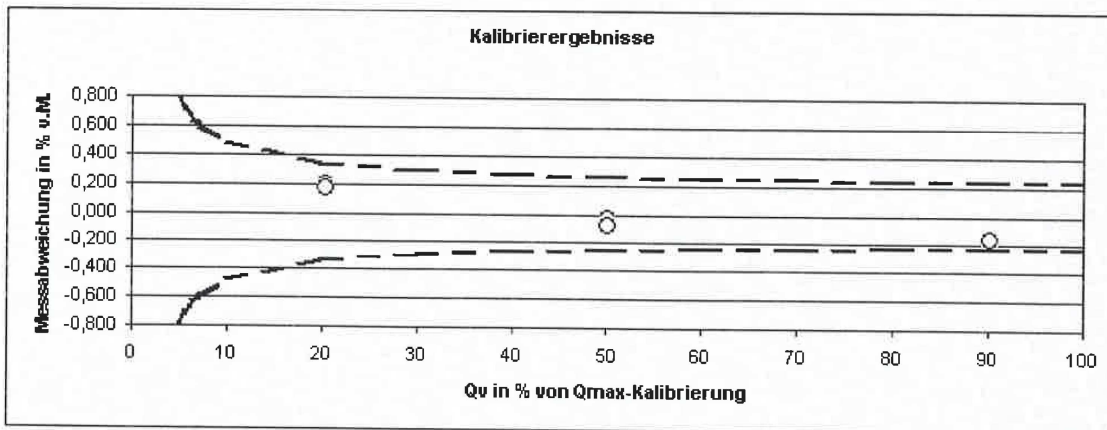


Kalibrierzertifikat

Kundenname:	-	Zertifikatsnummer:	243865437X001_100117
Kundenadresse:	-	Akkreditierung:	-
Tag-Nr.:	-	Kalibrierdatum:	10.01.2017
Gerätenummer:	MU:94981 Sensor:8580395	Kalibrierort:	Göttingen
Seriennummer:	243865437X001 / 001506	Prüfstand:	PS 0010
Modell:	Induktiver Durchflussmesser ProcessMaster500	Medium:	Wasser
Modellnummer:	FEP511	Aufnehmer Qmax:	240,0 m³/h
Nennweite (mm):	DN 100	Qmax-Kalibrierung:	168,0 m³/h
Prozessanschluss:	Flansche DIN PN 16	Kalibrierung:	Erhöhte Genauigkeit 0,2 %
Flanschmaterial:	Stahl	S-Faktor (Sz):	-0,6871 mm/s
Auskdg./Elektroden:	PTFE / Hastelloy C-4 (2.4610)	S-Faktor (Ss):	144,0400 %
Erregerfrequenz:	25 Hz	Genauigkeit:	+/- (0,20 % v.M. + 0,02 % v.E.)
Kundenmessbereich:	0 - 480 m³/h		

Nr.	Mediumstemp. °C	Messzeit (s)	Qv Soll (m³/h)	Qv Ist (m³/h)	Qv Soll in %	Messabw. in %
1	23,5	120,0	33,9318	34,0017	20,20	0,21
2	23,5	120,0	33,8858	33,9496	20,17	0,19
3	23,5	60,0	83,7430	83,7238	49,85	-0,02
4	23,5	60,0	83,6391	83,5810	49,79	-0,07
5	23,5	60,0	151,2232	150,9798	90,01	-0,16
6	23,6	60,0	151,1150	150,8684	89,95	-0,16
7	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-

Die o.a. Ergebnisse geben die Flüssigkeitskalibrierung unter Referenzbedingungen wieder.



Die bei der Kalibrierung ermittelten Messabweichungen liegen innerhalb der zulässigen Messabweichung. Dieses Kalibrierzertifikat dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI). Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.

Rev: 3.1.5

Geprüft durch: P. Gallrach

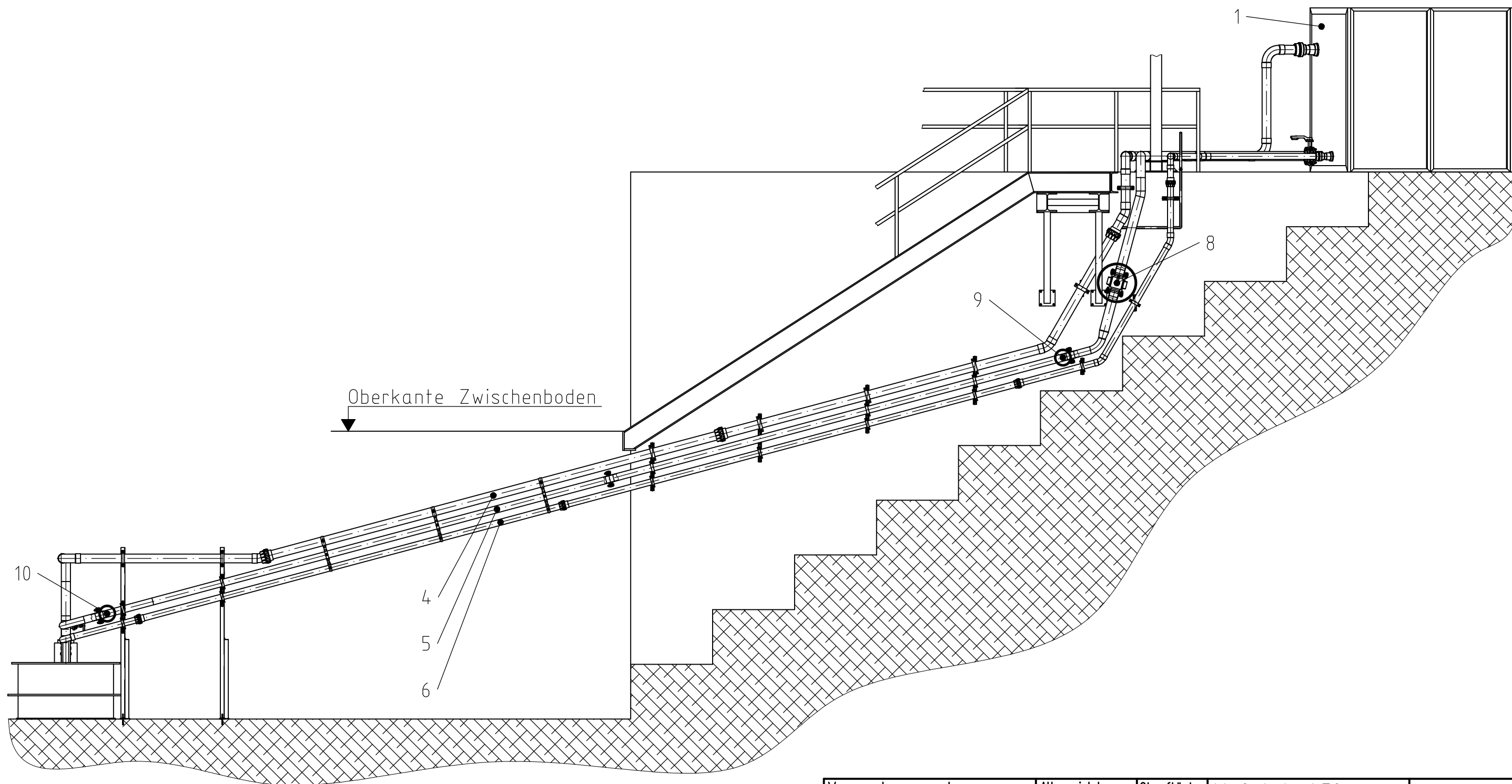
Datum: 10.01.2017


Dieses Zertifikat wurde automatisch erstellt und ist ohne Unterschrift gültig.

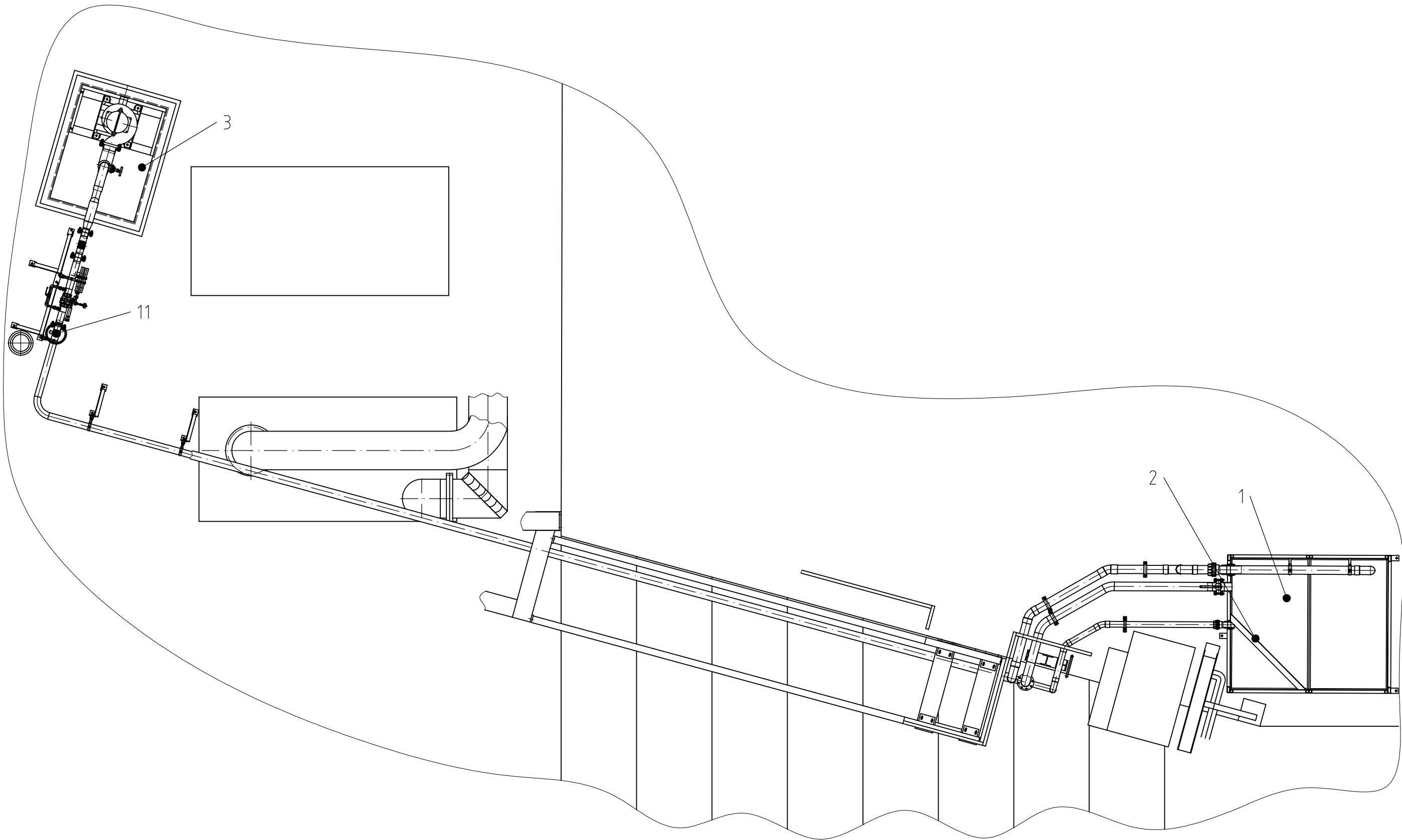
ABB Automation Products Dransfelder Str. 2 D-37070 Göttingen DEUTSCHLAND Tel: +49 (0) 551-9050 Fax: +49 (0) 551-905777 e-mail: flow@de.abb.com	ABB Limited Oldends Lane, Stonehouse Gloucestershire, GL 10 3TA ENGLAND Tel: +44 (0) 1453-826661 Fax: +44 (0) 1453-821121 e-mail: flow@gb.abb.com	ABB Automation Inc. 125 East County Line Rd Warminster, PA 18974 USA Tel: +1 215 674-6000 Fax: +1 215 674-6394 e-mail: Flow@US.abb.com	ABB Australia Party Ltd. Bapaume Rd Moorebank NSW 2170 AUSTRALIEN Tel: +61-2-9821-0111 Fax: +61-2-9821-0950 e-mail: Flow@au.abb.com	ABB Canada 3450 Harvester Road Burlington, ON L7N 3W5 KANADA Tel: +1 905 333 7571 Fax: +1 905 639 8639 e-mail: Flow@ca.abb.com	ABB Engineering Ltd. No. 4528, Kangxin Highway Pudong New District, Shanghai 201318 CHINA Tel: +86 (0) 21 50480101 Fax: +86 (0) 21 50483459 e-mail: Flow@cn.abb.com
--	---	--	---	--	---

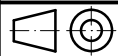
ABB Automation Products GmbH 37070 Göttingen Telefon 05 51/9 05-0 Telefax 05 51/90 57 77

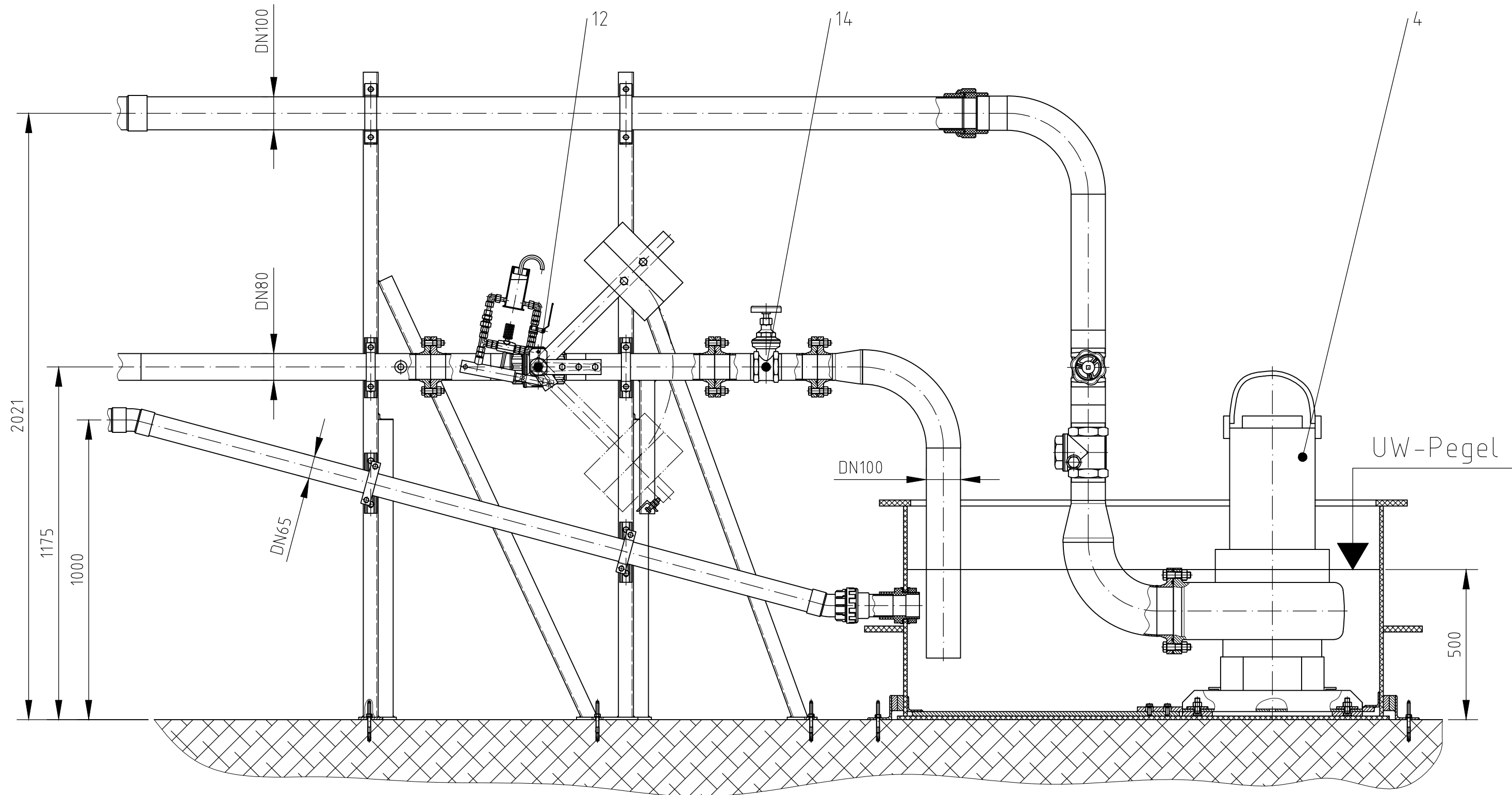
Abbildung 12.5: Kalibrationszertifikat magnetisch-induktives Durchflussmessgerät FEP511-100




Verwendungszweck				Allgemeintoleranz		Oberfläche ISO 1302		Maßstab 1:50	
				ISO 2768-mK					
					Datum	Name		Benennung Prüfstand A-A	
				Bearb.	14.08.2017	J. Klausner			
				Gepr.					
				Norm					
				Sondervermerke					
					TU Graz Graz University of Technology		Zeichnungsnummer: P.1		Blatt
									1
Zust	Änderung	Datum	Name						



Verwendungszweck				Allgemeintoleranz ISO 2768-mK		Oberfläche ISO 1302 		Maßstab 1:50			
					Datum	Name		Benennung Prüfstand GR			
				Bearb.	14.08.2017	J. Klausner					
				Gepr.							
				Norm							
				Sondervermerke							
				TU Graz Graz University of Technology				Zeichnungsnummer: P.2			Blatt 1
Zust	Änderung	Datum	Name								



Verwendungszweck				Allgemeintoleranz ISO 2768-mK		Oberfläche ISO 1302		Maßstab 1:13			
											
					Datum	Name		Benennung Prüfstand D-D			
				Bearb.	14.08.2017	J. Klausner					
				Gepr.							
				Norm							
				Sondervermerke							
					TU Graz Graz University of Technology				Zeichnungsnummer: P.3		Blatt
											1
Zust	Änderung	Datum	Name								