



Dissertation

Heiko Warnecke

Ermittlung der Bedingungen zum Einsatz von Kavitationsdüsen-Technologie als Durchflussregulator und zur reproduzierbaren Erzeugung dynamischer Durchflussprofile

DOI 10.7795/110.20240315

ISSN 2941-1297

ISBN 978-3-944659-34-3

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Dissertationen

PTB-Diss-5

Braunschweig, März 2024

Heiko Warnecke

**Ermittlung der Bedingungen zum Einsatz
von Kavitationsdüsen-Technologie als
Durchflussregulator und zur reproduzierbaren
Erzeugung dynamischer Durchflussprofile**

DOI 10.7795/110.20240315

ISSN 2941-1297

ISBN 978-3-944659-34-3

Empfohlene Zitierweise/recommended citation

Warnecke, H., 2024. *Ermittlung der Bedingungen zum Einsatz von Kavitationsdüsen-Technologie als Durchflussregulator und zur reproduzierbaren Erzeugung dynamischer Durchflussprofile*. Dissertation, Universität Rostock.

Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt.

PTB-Bericht Diss-5. ISBN 978-3-944659-34-3.

Verfügbar unter: <https://doi.org/10.7795/110.20240315>

Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

ISNI: 0000 0001 2186 1887

Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Bundesallee 100

38116 Braunschweig

Telefon: (05 31) 592-93 21

Telefax: (05 31) 592-92 92

www.ptb.de

Aus der Professur für Wasserwirtschaft
der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät

**Ermittlung der Bedingungen zum Einsatz von
Kavitationsdüsen-Technologie als Durchflussregulator und zur
reproduzierbaren Erzeugung dynamischer Durchflussprofile**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

an der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Rostock

vorgelegt von M.Sc. Heiko Warnecke
aus Suderburg

Rostock, den 03.04.2023

Gutachter:

Prof. Dr. Jens Tränckner, Universität Rostock

Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Wasserwirtschaft

Dr. Corinna Kroner, Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Abteilung 1 - Mechanik und Akustik, Fachbereich 1.5 - Flüssigkeiten

Prof. Dr. André Lerch, Technische Universität Dresden

Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft, Verfahrenstechnik in Hydrosystemen

Jahr der Einreichung: 2023

Jahr der Verteidigung: 2024

Kurzfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Prüfregime mit dynamischen Profilen für Durchfluss- und Volumenmessgeräte entwickelt, das auf Herschel-Venturi-Kavitationsdüsen als Regelungseinheit bei der Durchflussmessung von Flüssigkeiten basiert. Hintergrund der Entwicklung ist eine Diskrepanz zwischen realen Einsatzbedingungen der Messgeräte mit einer Vielzahl verschiedener Durchflüsse und, im Gegensatz dazu, die typische Prüfung von Durchfluss- und Volumenmessgeräten bei konstanten Durchflussbedingungen. Ziel der Arbeit war die Ableitung von Anforderungen und Evaluierungskriterien an eine messtechnische Infrastruktur, um reproduzierbare Profile zu erzeugen und das Messverhalten von Geräten entsprechend ihrer dynamischen Einsatzbedingungen prüfen zu können.

Die Ermittlung geometrischer Eigenschaften von Kavitationsdüsen und die Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Kavitationsausprägung sind für die Bewertung der Durchflussstabilität und die Bestimmung der Messunsicherheit notwendig. Neben der Oberflächengeometrie und der Kontur wurden Einflüsse des Flüssigkeitsdrucks stromaufwärts und stromabwärts der Kavitationsdüse, des Dampfdrucks sowie der Temperatur auf die Durchflussgenerierung untersucht. Mit den durchgeführten Arbeiten konnten die Einflussgrößen quantitativ beschrieben und Parameterbereiche, in denen eine stabile Kavitationsausprägung gesichert auftritt und Durchflussstabilität gegeben ist, definiert werden. Die Überwachung der Kavitationsausprägung mit einem Hydrophon und einem Körperschallaufnehmer wurde in diesem Kontext beschrieben und als Qualitätsüberwachung für den Kavitationsprozess vorgeschlagen.

Im zweiten Teil geht es um reproduzierbare Erzeugung dynamischer Profile die mittels magnetisch-induktivem Durchflussmessgerät, Coriolis-Durchflussmessgerät und gravimetrischer Referenz validiert und charakterisiert werden. In einem Ringvergleich wurde zum einen die Leistungsfähigkeit der Herschel-Venturi-Kavitationsdüsen gezeigt, zum anderen wurden grundlegende Kennparameter zur Auswertung von Ringvergleichen mit dynamischen Profilen ermittelt. Als Anwendungsbeispiel ist im letzten Kapitel beschrieben, wie die Messabweichung verschiedener Wasserzähler unter realitätsnahen dynamischen Lasten ermittelt und das neue Prüfregime erfolgreich in der Praxis getestet wurde. Außerdem wurden grundlegende Kenntnisse erarbeitet, die zur Übertragung der Technologie und des Verfahrens auf andere Anwendungsfälle herangezogen werden können. Damit steht ein Prüfstand mit Herschel-Venturi-Kavi-

tationsdüsen zur Verfügung, auf dem allgemein Durchfluss- und Volumenmessgeräte unter dynamischen Lasten auf ihre Messrichtigkeit hin untersucht werden können.

Abstract

A test regime with dynamic flow profiles for flow and volume meters was developed based on Herschel-Venturi cavitation nozzles as control device in liquid flow measurements. The background of the development is a discrepancy between the actual operating conditions of meters with varying flow rates and the typical testing of the devices at constant flows. The aim of this work is to derive requirements for a metrological infrastructure to reproducibly generate profiles to enable testing of flow and volume devices according to their dynamic operating conditions.

The characterisation of cavitation nozzles is necessary to evaluate the flow stability and to determine the measurement uncertainty. In addition to surface geometry and contour, influence of fluid pressure upstream and downstream of the cavitation nozzle, vapor pressure, and temperature influence on flow generation were investigated. It was possible to quantitatively describe the influencing factors and to define parameter ranges, in which stable cavitation and a constant flow rate is given. The monitoring of cavitation was described for the first time in this context with a hydrophone and a structure-borne sound transducer which is proposed as quality monitoring of the cavitation.

Dynamic profiles are reproducibly generated, validated and characterized via magnetic-inductive flowmeter, Coriolis flowmeter and gravimetric reference. In an intercomparison the performance of the Herschel Venturi cavitation nozzles was demonstrated and basic characteristic parameters for the evaluation of intercomparisons with dynamic profiles were determined. As an example the measurement deviation of various water meters was determined under realistic dynamic loads and the new test regime was successfully tested in practice. Basic knowledge was acquired to transfer the technology and the process to other applications. A test rig with Herschel Venturi cavitation nozzles is now available on which other flow and volumetric instruments can be tested for their measurement accuracy under dynamic loads.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen	III
Verzeichnis der Formelzeichen	V
Verzeichnis der Abbildungen	IX
Verzeichnis der Tabellen	XVII
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	6
2.1 Kavitation	7
2.1.1 Blasenbildung	7
2.1.2 Erscheinungsformen	10
2.1.3 Durchflussberechnung	12
2.1.4 Einflussfaktoren	14
2.2 Metrologische Infrastruktur	18
2.2.1 Prüfungen zur Durchflussmessung	18
2.2.2 Prüfverfahren: Anwendungsbeispiel Wasserzähler	21
3 Prüfstands Aufbau	25
4 Charakterisierung von Kavitationsdüsen	28
4.1 Geometrie der Herschel-Venturi-Düsen	30
4.1.1 Kanten- und Oberflächenstruktur	31
4.1.2 Optische Durchmesserbestimmung	32
4.1.3 Innengeometrie	34
4.1.4 Oberflächenkontur	35
4.2 Einfluss von Druck und Temperatur auf die Kavitation	38
4.2.1 Kontinuierliche Druckverhältnisänderung	39
4.2.2 Dampfdruckbestimmung	42
4.2.3 Temperaturvariation	44
4.2.4 Einfluss des Vordrucks auf den Durchfluss	47
4.3 Additivität parallel geschalteter Kavitationsdüsen	51
4.4 Akustischer Nachweis des Kavitationsbeginns	53
4.4.1 Wasserschallpegelmessung	54
4.4.2 Körperschallpegelmessung	55
4.5 Einfluss von Düsenreinigung auf den Durchfluss	57

4.6	Fazit	58
5	Prüfung unter realitätsnahen Bedingungen	60
5.1	Einfluss von Region und Jahreszeit auf das Verbrauchsprofil . . .	60
5.2	Erzeugung repräsentativer Durchflussprofile	62
5.3	Validierung und Wiederholbarkeit des Durchflussprofils	64
5.3.1	Ergebnisse zur Profilvalidierung	66
5.3.2	Ergebnisse zur Wiederholbarkeit der Profilerzeugung . . .	71
5.4	Fazit	73
6	Qualität der Profilerzeugung und Prüfstandsvergleich	75
6.1	Ringvergleich	75
6.2	Methoden	76
6.2.1	Transferstandard und Umgebungsbedingungen	76
6.2.2	Profilgenerierung	78
6.2.3	Standardauswertung	80
6.2.4	Aufzeichnung der Massestromdaten	82
6.2.5	Bestimmung von Kennparametern bei der Profilmessung	82
6.3	Ergebnisse	85
6.3.1	Standardauswertung	85
6.3.2	Ergebnisse aus den Massestromdaten	90
6.4	Fazit	96
7	Messverhalten von Wasserzählern unter dynamischen Durch-	
	flusswechseln	100
8	Zusammenfassende Schlussfolgerungen	103
9	Ausblick	108
	Literaturverzeichnis	109
	Anhang	117
A	Düsencharakterisierung	119
B	Auswertung des Ringvergleichs	129
C	Messabweichung der Wasserzähler: statisches und dynami-	
	sches Messregime	155

Verzeichnis der Abkürzungen

CETIAT	Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques
CMF	Coriolis Mass Flow Meter
CMI	Czech Metrology Institute
CFVN	Critical Flow Venturi Nozzle
DIN	Deutsches Institut für Normung
DN	Diamètre Nominal
DTI	Danish Technological Institute
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
EMPIR	European Metrology Programme for Innovation and Research
EN	Europäische Norm
EURAMET	European Association of National Metrology Institutes
EWZP	Experimentier- und Wasserzählerprüfstand
FFT	Fast-Fourier-Transformation
IEPE	Integrated Electronics Piezo-Electric
ISO	International Organization for Standardization
LDA	Laser-Doppler-Anemometrie
LDV	Laser-Doppler-Velozimetrie
MID(1)	Magnetisch-Induktives Durchflussmessgerät
MID(2)	Measuring Instruments Directive
NR	Nummer
OIML	Organisation Internationale de Métrologie Légale
PIV	Particle Image Velocimetry
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
REM	Rasterelektronenmikroskop

RISE	Research Institutes of Sweden
SAFEST	Sustainable Advanced Flow Meter Calibration for the Transport Sector
SE	Sekundärelektronen
SN	Seriennummer
TUBITAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
VTT	Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus

Verzeichnis der Formelzeichen

Symbol	Einheit	Beschreibung
a	$\frac{\text{l-bar}}{\text{h}}$	Regressionsparameter
A	m^2	Rohrquerschnittsfläche
b	l/h	Regressionsparameter
C		Durchflusskoeffizient
d	mm	Durchmesser
ε		Expansionszahl
$E_{n_{lab\ i}}$		Äquivalenzgrad
$\varepsilon_{lab\ i}$	$\%$	Messabweichung
ε_{RV}	$\%$	Referenzwert Messabweichung
f	Hz	Frequenz
F_C	N	Corioliskraft
g	$\frac{\text{m}^3}{\text{kg}\cdot\text{s}^2}$	Gravitationskonstante
h	m	geodätische Höhe
l	mm	Düsenhalslänge
L_P	dB	Schalldruckpegel
\dot{m}	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	theoretischer Massestrom
$\dot{m}_{\text{experimentell}}$	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	experimenteller Massestrom
n		Anzahl
N	μm	Länge
ν		Freiheitsgrad
p	bar	statischer Druck
p_2	bar	statischer Druck im Kavitationsdüsenhals
p_{Dampf}	bar	Dampfdruck

P_{nach}	bar	Absoluter Druck nach dem Messgerät/Nachdruck
P_{vor}	bar	Absoluter Druck vor dem Messgerät/Vordruck
Δp	bar	Wirkdruckdifferenz
P	bar	absoluter Druck
Q	l/h	Durchfluss
Q_1	l/h	Minstdurchfluss
Q_2	l/h	Übergangsdurchfluss
Q_3	l/h	Dauerdurchfluss
Q_4	l/h	Überlastdurchfluss
Q_{max}	l/h	maximaler Durchfluss
q_m	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	Massestrom
\bar{q}_m	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	mittlerer Massestrom
Q_{nach}	l/h	Durchfluss nach Reinigung gemessen
Q_{nom}	l/h	nominaler Durchfluss
Q_{vor}	l/h	Durchfluss vor Reinigung gemessen
q_V	l/h	Volumenstrom
\bar{q}_V	l/h	mittlerer Volumenstrom
R		Verhältnis aus Dauer- und Minstdurchfluss
R_a	μm	Mittenrauwert
ρ	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Dichte der Flüssigkeit
ρ_1	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Dichte der Flüssigkeit im Rohr
ρ_2	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Dichte der Flüssigkeit im Düsenhals
σ	l/h	Regressionsfunktion
T	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
t_{95}	s	Beruhigungszeit
T_M	s	Messzeit
$T_{Reservoir}$	$^{\circ}\text{C}$	Flüssigkeitstemperatur im Vorratsbehälter

$t_{Schaltzeit}$	s	Schaltzeit
Δt	s	Zeitintervall
U_a	$\frac{l \cdot \text{bar}}{h}$	absolute Unsicherheit Regressionsparameter
U_b	l/h	absolute Unsicherheit Regressionsparameter
u_{drift}	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	Drift Transfergerät
$U(\varepsilon_{lab i})$	%	erw. Messunsicherheit Messabweichung ($k = 2$)
$u(\varepsilon_{RV})$	%	Messunsicherheit Referenzwert
$U(\varepsilon_{RV})$	%	erw. Messunsicherheit Referenzwert ($k = 2$)
$U_{lab i}$	%	Messabweichung Transfergerät
U_{opt}	μm	Messfehler optische Durchmesserbestimmung
V	m^3	Volumen
v	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Betrag Strömungsgeschwindigkeit
\vec{v}	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Strömungsgeschwindigkeit
φ_e	°	Konuswinkel Einlass Düse
φ_d	°	Konuswinkel Diffusor Düse
$\chi(\nu)$		Erwartungswert Gaussverteilung
χ_{obs}		beobachteter Wert
x	μm	Position Profils Scanner
y	nm	Höhe Profils Scanner
$\langle y \rangle$	nm	mittlere Höhe Profils Scanner
$\vec{\omega}$	Hz	Kreisfrequenz

Verzeichnis der Abbildungen

1.1	Skizze; Längsschnitt einer Düse mit Geometrie nach ISO 9300:2005-11 und mit Herschel-Venturi-Geometrie	2
1.2	Kavitationsdüsenapparatur; links: Außenansicht; rechts: Sicht auf die Halter der Kavitationsdüsen	4
2.1	Phasendiagramm von Wasser nach FRANC und MICHEL (2005)	7
2.2	Phasendiagramm einer Flüssigkeit nach BRENNEN (2014) . . .	8
2.3	Charakteristische Ausprägungen von Kavitation nach FRANC (1995) ©EDP Sciences, 1995	11
2.4	Voll ausgebildete Kavitation in einer Herschel-Venturi-Düse . . .	12
2.5	Längsschnitt eines kreisförmigen Rohres und einer Düse mit Herschel-Venturi-Geometrie	13
2.6	Fließschema für das Beispiel einer gravimetrischen Normalmess-einrichtung nach PTB (2002)	19
2.7	Messprinzip Coriolis-Durchflussmessgerät (ENDRESS+HAUSER, 2021)	21
2.8	Eichfehlergrenzen und exemplarische Bestimmung der Messabweichung eines Wasserzählers	23
3.1	Experimentier- und Wasserzählerprüfstand	25
3.2	Fließschema des Experimentier- und Wasserzählerprüfstands der PTB mit Kavitationsdüsenapparat, angelehnt an PTB (2020) .	27
4.1	Herschel-Venturi-Düsen mit Halsdurchmesser d von 0,14 mm bis 2,6 mm, Maßstab in cm	30
4.2	REM: SE-Abbildung, Kavitationsdüse 2,6 mm Übersichtsbild Einlass; Vergrößerung: Kante Zylinder	32
4.3	Computertomographische Aufnahme der Düsengeometrie	36
4.4	Skizze Kavitationsdüse: Profilschans mit Blick in Durchflussrichtung	37
4.5	Profilschannermessung Kavitationsdüsenhals; Düse 2,6 mm Nr. 1 (XU et al., 2019)	37
4.6	Profilschannermessung Kavitationsdüsenhals; Düse 0,14 mm Nr. 3 und Nr. 4 (XU et al., 2019)	38

4.7	Bestimmung des Einsetzens der Kavitation, erfasst über die Durchflussmessung mit einem magnetisch-induktivem Durchflussmessgerät bei zwei verschiedenen Düsenhalsdurchmessern; A: 1,4 mm Nr. 2, B: 2,6 mm Nr. 2; 5 Wiederholungsmessungen	40
4.8	Temperaturabhängigkeit der Durchflussbegrenzung; Durchfluss gemessen mit dem MID über dem Druckverhältnis	41
4.9	Temperaturabhängigkeit des Dampfdrucks in Abhängigkeit der Reinheit der Flüssigkeit; Differenz zu Reinstwasser und Standardfehler	44
4.10	A: Massestrom (Waage) und Volumenstrom (MID), über der Temperatur aufgetragen; B: Druckverhältnis $P_{nach}/P_{vor} \approx 0,3$	45
4.11	Durchfluss in Abhängigkeit vom eingangsseitigen Druck p_{vor} ; Düsenhalsdurchmesser 2,6 mm	48
4.12	Durchfluss in Abhängigkeit vom eingangsseitigen Druck p_{vor} für zwei Düsen mit Düsenhalsdurchmesser 0,26 mm	49
4.13	Relative Abweichung des Durchflusses bei paralleler Schaltung im Vergleich zur Einzeldüsenmessung (WARNECKE et al., 2019)	53
4.14	Skizze Kavitationsdüsenapparatur mit Hydrophon	54
4.15	Schalldruckpegel für verschiedene relative Vordruckwerte	55
4.16	Links: Spektren eines Körperschallaufnehmers; Rechts: Bilder der Kavitationsausprägung: 1. Kavitation über den Düsenhals 2. Einsetzende Kavitation 3. Keine Kavitation	56
4.17	Relative Durchflussänderung $(Q_{nach} - Q_{vor})/Q_{vor}$ bei Reinigung für vier verschiedene Düsen über dem Vordruck; exemplarisch bei 2 bar die erweiterte Messunsicherheit	57
5.1	Histogramme der Verbrauchsprofile in Bezug auf Region und Saison; A: Aufteilung aller Einheiten in Ost und West; B: Häufigkeitsdiagramm von 2 Städten mit jeweils über 1 Mio. Einwohnern; C: Zwei Großstädte im Gebiet Ost im Vergleich zu zwei Großstädten im Gebiet West; D: Verbrauchsprofile getrennt betrachtet nach Sommer und Winter	61
5.2	A) Durchflussprofil Nr. 1 B) Durchflussprofil Nr. 2 und C) Durchflussprofil Nr. 3; realitätsnahe Prüfung von Wasserzählern	63
5.3	Validierung A) Profil Nr. 1; Umrechnung des Massestroms nach Wägesignal mit $\rho = 997,5448 \text{ kg/m}^3$ bei $T_{Fluid} = 23,69^\circ\text{C}$ B) Profil Nr. 2; Umrechnung des Massestroms nach Wägesignal mit $\rho = 997,5949 \text{ kg/m}^3$ bei $T_{Fluid} = 23,48^\circ\text{C}$ C) Profil Nr. 3; Umrechnung des Massestroms nach Wägesignal mit $\rho = 997,6830 \text{ kg/m}^3$ bei $T_{Fluid} = 23,11^\circ\text{C}$	67

5.4	Validierung eines erzeugten Profils mittels MID und Coriolis-Durchflussmessgerät; Umrechnung des Massestroms mit $\rho = 998,3426 \text{ kg/m}^3$ bei $T_{Fluid} = 20,17^\circ\text{C}$	68
5.5	Druckverlauf eines erzeugten Profils; Drucksensor vor und nach den Kavitationsdüsen; Unterbrechung der Ordinate	68
5.6	Validierung eines erzeugten Profils mittels MID und Coriolis-Durchflussmessgerät; Umrechnung des Massestroms mit $\rho = 998,3426 \text{ kg/m}^3$ bei $T_{Fluid} = 20,17^\circ\text{C}$, Ausschnitt aus Abbildung 5.4	69
5.7	Validierung eines erzeugten Profils mittels MID und Coriolis-Durchflussmessgerät; Umrechnung des Massestroms mit $\rho = 998,3426 \text{ kg/m}^3$ bei $T_{Fluid} = 20,17^\circ\text{C}$, Ausschnitt aus Abbildung 5.4	70
5.8	Standardabweichung des Durchflusses für Vordruckwerte von 3 bar, 3,5 bar und 4 bar, berechnet für jeweils 10 Profilerzeugungen und die jeweilige, lineare Regression der Daten	71
5.9	Standardabweichung des Durchflusses für Vordruckwerte von 3 bar, 3,5 bar und 4 bar, aufgetragen über der Temperatur des Mediums	72
5.10	5 Messungen des Durchflusses eines Profils mittels MID bei einem Vordruck von A) 3 bar und B) 4 bar	73
6.1	Transferstandard: Coriolis-Durchflussmessgerät, Transmitter, Temperatur- und Drucksensor	77
6.2	Durchflussprofil A) Nr. 1, B) Nr. 2 und C) Nr. 3 des Ringvergleichs	79
6.3	Messabweichung des Transferstandards bei Kalibrierung des teilnehmenden Labors entsprechend der drei gemessenen Profile	87
6.4	E_n für alle teilnehmenden Labore ohne DTI Profil 2; Ergebnisse sind konsistent	88
6.5	Messabweichung des Transferstandards unter dynamischem Prüfregime, Profil Nr. 1 der teilnehmenden Labore	88
6.6	Messabweichung des Transferstandards unter dynamischem Prüfregime, Profil Nr. 2 der teilnehmenden Labore	89
6.7	Messabweichung des Transferstandards unter dynamischem Prüfregime, Profil Nr. 3 der teilnehmenden Labore	89
6.8	Coriolis-Durchflussmessgerät Massestromdaten; abfallende Durchflussänderung, Maximalabschätzung; Durchflussprofil Nr. 2 (TUBITAK: Durchflussprofil Nr. 1)	92
6.9	Coriolis-Durchflussmessgerät Massestromdaten; ansteigende Durchflussänderung; Durchflussprofil Nr. 2 (TUBITAK: Durchflussprofil Nr. 1)	92

6.10	Wiederholbarkeit, Mittelwert der Residuen, Durchflussänderungsdauer für steigende und abfallende Durchflussraten und Abweichung der Gesamtmasse gemäß der Tabellen 6.12 und 6.13 für das Durchflussprofil Nr. 2 der teilnehmenden Labore und das Durchflussprofil Nr. 1 für TUBITAK alternativ	99
7.1	Messabweichung Ultraschallwasserzähler; $Q_3 = 4000 \text{ l/h}$ $R = 160$	101
A.1	Übersichtsbild REM; SE-Bild Düse Nr. 2,6-1	120
A.2	Detailaufnahme REM; SE-Bild; Kante Einlass Düse Nr. 2,6-1	120
A.3	Übersichtsbild Computertomographie Kavitationsdüse Nr. 2,6-2	121
A.4	Computertomographie Kavitationsdüse Nr. 2,6-2; Durchmesserbestimmung des Düsenhalses	121
A.5	Computertomographie Kavitationsdüse Nr. 2,6-2; Geometriebestimmung im Inneren, Düsenhalslänge und Konuswinkel im Einlass und im Diffusor	122
A.6	Computertomographie Kavitationsdüse Nr. 2,6-2; Geometriebestimmung im Inneren, Düsenhalslänge und Konuswinkel im Einlass und Diffusor	123
A.7	Übersichtsbild Computertomographie Kavitationsdüse Nr. 0,14-3	123
A.8	Computertomographie Kavitationsdüse Nr. 0,14-3; Durchmesserbestimmung des Düsenhalses	124
A.9	Computertomographie Kavitationsdüse Nr. 0,14-3; Geometriebestimmung im Inneren, Düsenhalslänge und Konuswinkel im Einlass und im Diffusor	124
A.10	Computertomographie Kavitationsdüse Nr. 0,14-3; Geometriebestimmung im Inneren, Düsenhalslänge und Konuswinkel im Einlass und Diffusor	125
A.11	Bestimmung des Einsetzens der Kavitation über die Durchflussmessung mit magnetisch-induktivem Durchflussmessgerät bei zwei verschiedenen Düsenhalsdurchmessern; A: 1,4 mm Nr. 1, B: 2,6 mm Nr. 1, C: 1,4 mm Nr. 3, D: 2,6 mm Nr. 3, E: 1,4 mm Nr. 4, F: 2,6 mm Nr. 4	126
B.1	Kontinuierlich aufgezeichnetes Messsignal (20 Hz) des Transferstandards des Ringvergleichs für n Wiederholungen; Massestromsignal (A,B), Druck (C,D) und Temperatur (E,F) in Abhängigkeit der Zeit; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 1) eines Instituts (CETIAT/CMI)	130

- B.2 Darstellung der Residuen als: (A,B) Liniendiagramm in Abhängigkeit der Zeit, (C,D) Punktdiagramm in Abhängigkeit des Durchflusses und (E,F) als Häufigkeitsverteilung; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 1) eines Instituts (CETIAT/-CMI) 131
- B.3 Kontinuierlich aufgezeichnetes Messsignal (20 Hz) des Transferstandards des Ringvergleichs für n Wiederholungen; Massestromsignal (A), Druck (C) und Temperatur (E) in Abhängigkeit der Zeit; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 1) eines Instituts (DTI) 132
- B.4 Darstellung der Residuen als: (A,B) Liniendiagramm in Abhängigkeit der Zeit, (C,D) Punktdiagramm in Abhängigkeit des Durchflusses und (E,F) als Häufigkeitsverteilung; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 1) eines Instituts (DTI) . . . 133
- B.5 Kontinuierlich aufgezeichnetes Messsignal (20 Hz) des Transferstandards des Ringvergleichs für n Wiederholungen; Massestromsignal (A,B), Druck (C,D) und Temperatur (E,F) in Abhängigkeit der Zeit; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 1) eines Instituts (PTB/RISE) 134
- B.6 Darstellung der Residuen als: (A,B) Liniendiagramm in Abhängigkeit der Zeit, (C,D) Punktdiagramm in Abhängigkeit des Durchflusses und (E,F) als Häufigkeitsverteilung; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 1) eines Instituts (PTB/RISE) 135
- B.7 Kontinuierlich aufgezeichnetes Messsignal (20 Hz) des Transferstandards des Ringvergleichs für n Wiederholungen; Massestromsignal (A,B), Druck (C,D) und Temperatur (E,F) in Abhängigkeit der Zeit; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 1) eines Instituts (TUBITAK/VTT) dar 136
- B.8 Darstellung der Residuen als: (A,B) Liniendiagramm in Abhängigkeit der Zeit, (C,D) Punktdiagramm in Abhängigkeit des Durchflusses und (E,F) als Häufigkeitsverteilung; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 1) eines Instituts (TUBITAK/-VTT) 137
- B.9 Kontinuierlich aufgezeichnetes Messsignal (20 Hz) des Transferstandards des Ringvergleichs für n Wiederholungen; Massestromsignal (A,B), Druck (C,D) und Temperatur (E,F) in Abhängigkeit der Zeit; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 2) eines Instituts (CETIAT/CMI) 138

B.10 Darstellung der Residuen als: (A,B) Liniendiagramm in Abhängigkeit der Zeit, (C,D) Punktdiagramm in Abhängigkeit des Durchflusses und (E,F) als Häufigkeitsverteilung; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 2) eines Instituts (CETIAT/-CMI) 139

B.11 Kontinuierlich aufgezeichnetes Messsignal (20 Hz) des Transferstandards des Ringvergleichs für n Wiederholungen; Massestromsignal (A), Druck (C) und Temperatur (E) in Abhängigkeit der Zeit; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 2) eines Instituts (DTI/FORCE) 140

B.12 Darstellung der Residuen als: (A,B) Liniendiagramm in Abhängigkeit der Zeit, (C,D) Punktdiagramm in Abhängigkeit des Durchflusses und (E,F) als Häufigkeitsverteilung; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 2) eines Instituts (DTI/FORCE) 141

B.13 Kontinuierlich aufgezeichnetes Messsignal (20 Hz) des Transferstandards des Ringvergleichs für n Wiederholungen; Massestromsignal (A,B), Druck (C,D) und Temperatur (E,F) in Abhängigkeit der Zeit; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 2) eines Instituts (PTB/RISE) 142

B.14 Darstellung der Residuen als: (A,B) Liniendiagramm in Abhängigkeit der Zeit, (C,D) Punktdiagramm in Abhängigkeit des Durchflusses und (E,F) als Häufigkeitsverteilung; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 2) eines Instituts (PTB/RISE) 143

B.15 Kontinuierlich aufgezeichnetes Messsignal (20 Hz) des Transferstandards des Ringvergleichs für n Wiederholungen; Massestromsignal (A,B), Druck (C,D) und Temperatur (E,F) in Abhängigkeit der Zeit; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 2) eines Instituts (VTT) dar 144

B.16 Darstellung der Residuen als: (A,B) Liniendiagramm in Abhängigkeit der Zeit, (C,D) Punktdiagramm in Abhängigkeit des Durchflusses und (E,F) als Häufigkeitsverteilung; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 2) eines Instituts (VTT) . . . 145

B.17 Kontinuierlich aufgezeichnetes Messsignal (20 Hz) des Transferstandards des Ringvergleichs für n Wiederholungen; Massestromsignal (A,B), Druck (C,D) und Temperatur (E,F) in Abhängigkeit der Zeit; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 3) eines Instituts (CETIAT/CMI) 146

B.18	Darstellung der Residuen als: (A,B) Liniendiagramm in Abhängigkeit der Zeit, (C,D) Punktdiagramm in Abhängigkeit des Durchflusses und (E,F) als Häufigkeitsverteilung; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 3) eines Instituts (CETIAT/-CMI)	147
B.19	Kontinuierlich aufgezeichnetes Messsignal (20 Hz) des Transferstandards des Ringvergleichs für n Wiederholungen; Massestromsignal (A), Druck (C) und Temperatur (E) in Abhängigkeit der Zeit; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 3) eines Instituts (DTI)	148
B.20	Darstellung der Residuen als: (A,B) Liniendiagramm in Abhängigkeit der Zeit, (C,D) Punktdiagramm in Abhängigkeit des Durchflusses und (E,F) als Häufigkeitsverteilung; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 3) eines Instituts (DTI)	149
B.21	Kontinuierlich aufgezeichnetes Messsignal (20 Hz) des Transferstandards des Ringvergleichs für n Wiederholungen; Massestromsignal (A,B), Druck (C,D) und Temperatur (E,F) in Abhängigkeit der Zeit; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 3) eines Instituts (PTB/RISE)	150
B.22	Darstellung der Residuen als: (A,B) Liniendiagramm in Abhängigkeit der Zeit, (C,D) Punktdiagramm in Abhängigkeit des Durchflusses und (E,F) als Häufigkeitsverteilung; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 3) eines Instituts (PTB/RISE)	151
B.23	Kontinuierlich aufgezeichnetes Messsignal (20 Hz) des Transferstandards des Ringvergleichs für n Wiederholungen; Massestromsignal (A,B), Druck (C,D) und Temperatur (E,F) in Abhängigkeit der Zeit; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 3) eines Instituts (VTT) dar	152
B.24	Darstellung der Residuen als: (A,B) Liniendiagramm in Abhängigkeit der Zeit, (C,D) Punktdiagramm in Abhängigkeit des Durchflusses und (E,F) als Häufigkeitsverteilung; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 3) eines Instituts (VTT)	153
C.1	Messabweichung Ultraschallwasserzähler; $Q_3 = 4000 \text{ l/h}$ $R = 800$	156
C.2	Messabweichung Ultraschallwasserzähler; $Q_3 = 2500 \text{ l/h}$ $R = 160$	157
C.3	Messabweichung magnetisch-induktiver Wasserzähler; Hersteller A; $Q_3 = 4000 \text{ l/h}$ $R = 160$	157
C.4	Messabweichung Mehrstrahlflügelradwasserzähler Nassläufer; Hersteller A; $Q_3 = 4000 \text{ l/h}$ $R = 80$	158

C.5	Messabweichung Mehrstrahlflügelradwasserzähler Nassläufer; Hersteller B; $Q_3 = 4000\text{ l/h}$ $R = 80$	158
C.6	Messabweichung Ringkolbenwasserzähler; Hersteller A; $Q_3 = 4000\text{ l/h}$ $R = 80$	159
C.7	Messabweichung Ringkolbenwasserzähler; Hersteller B; $Q_3 = 4000\text{ l/h}$ $R = 400$	159
C.8	Messabweichung Messkapselwasserzähler Hersteller A; $Q_3 = 1600\text{ l/h}$ $R = 40$	160
C.9	Messabweichung Messkapselwasserzähler Hersteller B; $Q_3 = 2500\text{ l/h}$ $R = 40$	160
C.10	Messabweichung Einstrahlflügelradwasserzähler Hersteller B; $Q_3 = 4000\text{ l/h}$ $R = 80$	161
C.11	Messabweichung Einstrahlflügelradwasserzähler Hersteller B; $Q_3 = 2500\text{ l/h}$ $R = 80$	161

Verzeichnis der Tabellen

2.1	Vorgeschriebene und zusätzliche Prüfpunkte am Beispiel eines Hauswasserzählers $Q_3 = 4000\text{ l/h}$ und $R = 160$	23
4.1	Zur Verfügung stehende Herschel-Venturi-Düsen von zwei Herstellern mit den vorgegebenen Düsenhalsdurchmessern	29
4.2	Düsenhalsdurchmesser, ermittelt durch optische Mikroskopie im Vergleich zur Herstellerangabe und der Berechnung mittels Durchflussmessung	33
4.3	Dimensionen der Düsen mit computertomographischer Analyse bestimmt	35
4.4	Durchfluss, Düsenauswahl und Druckabhängigkeit (WARNECKE et al., 2019)	49
5.1	Parameter der Regressionsanalyse für die Funktion $\sigma(p) = a \cdot p + b$	72
6.1	Teilnehmer des Ringvergleichs	77
6.2	CETIAT Messabweichung	85
6.3	CMI Messabweichung	86
6.4	DTI Messabweichung	86
6.5	FORCE Messabweichung	86
6.6	PTB Messabweichung	86
6.7	RISE Messabweichung	86
6.8	TUBITAK Messabweichung	87
6.9	VTT Messabweichung	87
6.10	Grad der Äquivalenz der teilnehmenden Labore (Teil 1)	87
6.11	Grad der Äquivalenz der teilnehmenden Labore (Teil 2)	88
6.12	Durchflussänderungsdauer; abfallender und steigender Durchfluss	94
6.13	Für die verschiedenen Durchflussprofile und teilnehmenden Labore: zusammengefasste Standardabweichungen der gemittelten Durchflussraten; Mittelwert der Residuen; relative Abweichung der gemessenen Gesamtmasse im Vergleich zur nominalen Gesamtmasse	96
A.1	Temperatur während der Durchflussmessung der Düsen mit 1,4 mm Halsdurchmesser	127
A.2	Temperatur während der Durchflussmessung der Düsen mit 2,6 mm Halsdurchmesser	128

C.1 Zur Verfügung stehende Hauswasserzähler 156

1 Einleitung

Kavitationsdüsen haben in ersten Untersuchungen mit Flüssigkeiten reproduzierbare und stabile Durchflüsse und schnelle Durchflusswechsel erzeugt (SCHUMANN und KRONER, 2018; SCHUMANN et al., 2016) und bieten damit eine vielversprechende Perspektive, zukünftig als Durchflussregulatoren eingesetzt zu werden. Zudem zeigen sie Potenzial, für die Erzeugung dynamischer Durchflusswechsel genutzt werden zu können. Im Gasbereich werden bereits seit längerer Zeit kritisch durchströmte Venturidüsen nach ISO 9300:2005-11 (Abbildung 1.1) erfolgreich in der Messtechnik verwendet. Ein Beispiel, für welches sich diese Technologie als hilfreich erweisen würde, ist die Überprüfung der Messrichtigkeit von Volumen- und Durchflussmessgeräten entsprechend realitätsnaher Verbräuche, für die es aktuell keine metrologische Infrastruktur gibt. Dieses Problem existiert unter anderem bei Wasserzählern, anhand derer die Eignung von Kavitationsdüsen mit dieser Arbeit demonstriert wird.

Die Bereitstellung sauberen Trinkwassers ist ein wesentlicher Versorgungsbestandteil, der zum heutigen hohen Lebensstandard beiträgt. Für die nahezu flächendeckende Verteilung in Deutschland und anderen Ländern sind daher zahlreiche Wasserzähler im Einsatz, die für eine korrekte Abrechnung der Kosten für die Versorgung mit Trinkwasser installiert sind. Die Durchflussmengen sind in der Realität sehr dynamisch und zeigen unterschiedlichste Muster, die Zähler werden jedoch bei konstanten Durchflüssen entsprechend internationaler Empfehlungen wie OIML R49:2013(E) oder ISO 4064:2014-11 getestet. Zum Beispiel werden bei der Konformitätsbewertung von Wasserzählern bestimmte Durchflüsse eingestellt und das Messverhalten in festgelegten Punkten statisch geprüft. Messabweichungen, die beim Start des Durchflusses entstehen, beim Wechsel zwischen den Punkten auftreten oder durch den Stopp des Durchflusses entstehen, bleiben unberücksichtigt. Zwar können dabei die Messwerte der jeweiligen Prüfpunkte den gesetzlichen Anforderungen entsprechen, der Fehler während der Laufzeit eines Zählers aber davon abweichen. Hier am anschaulichen Beispiel des Wasserzählers dargestellt, gibt es allgemein bei Durchfluss- und Volumenmessgeräten auch in anderen Anwendungen eine Diskrepanz zwischen der statischen Prüfung und den häufig dynamischen Einsatzbedingungen.

Seit vielen Jahrzehnten werden verschiedenste Zählertypen neu oder weiterentwickelt, neue Materialien eingesetzt sowie die Fertigungsprozesse verändert. Neben den klassischen Einstrahl- und Mehrstrahlflügelradzählern wer-

den in Deutschland zum Beispiel Ringkolbenzähler sowie Ultraschall- oder magnetisch-induktive Zähler verwendet. Das Messprinzip ist je nach Bauart unterschiedlich. Bei Ringkolbenzählern ist die Messung volumetrisch, bei den Ultraschallzählern nutzt man Geschwindigkeitsmessungen und bei Flügelradzählern wird die Proportionalität zwischen den Umdrehungen des Flügelrades und des Durchflusses genutzt. Das führt zu spezifischen Messabweichungen je nach Bauart. Dabei besteht gerade bei kurzzeitigen Verbräuchen die Möglichkeit, dass zum Beispiel durch Nachlauf in Flügelradzählern Abweichungen der Zähleranzeige im Vergleich zum tatsächlichen Durchfluss auftreten. Dieses Phänomen wird für den Hauswasserverbrauch zum Teil in den Medien öffentlichkeitswirksam diskutiert (GENDRIES, 2014; NIEHAVES, 2023). Bisher gab es aufgrund fehlender metrologischer Infrastruktur keine umfassenden Untersuchungen zum Verhalten verschiedener Wasserzähler bei der Beanspruchung durch ein typisches Verbrauchsprofil. Auch für andere Volumen- und Durchflussmessgeräte gab es dazu keine Untersuchungen.

Die Übertragung der kritisch betriebenen Düsen vom Gas in den Flüssigkeitsbereich ist grundsätzlich möglich. Numerische Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Änderung der Geometrie in Herschel-Venturi-Form zu einem stabileren Durchfluss führt (BRINKHORST, 2017). Mit einer durchsichtigen Herschel-Venturi-Düse ($d \approx 25 \text{ mm}$) konnte über eine High-Speed-Kamera die Kavitationsausprägung beschrieben und in Korrelation zum Durchfluss gesetzt werden (BRINKHORST et al., 2016). Neben einzelnen exemplarischen Untersuchungen wurden, bezogen auf die Durchflussmessung, bisher ausschließlich Experimente mit toroidalen Düsen entsprechend der ISO 9300:2005-11 durchgeführt (SCHUMANN, 2020). Für den Flüssigkeitsbereich gab es noch keine umfassenden Untersuchungen zum Einsatz von kavitierenden Düsen und speziell zu den Umgebungsbedingungen bei der Anwendung.

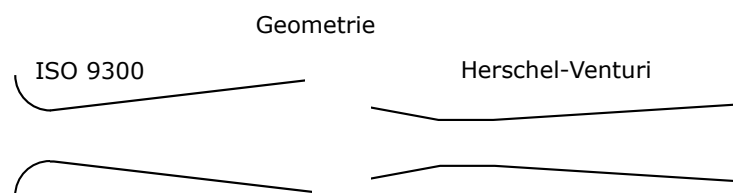


Abbildung 1.1: Skizze; Längsschnitt einer Düse mit Geometrie nach ISO 9300:2005-11 und mit Herschel-Venturi-Geometrie

Ein weiterer, nur in ASHRAFIZADEH und GHASSEMI (2015) ansatzweise untersuchter Punkt ist die Skalierung der Kavitation und der Durchflussmessung auf kleine Durchflussmengen. Die Untersuchungen in der allgemeinen Literatur wurden bei Durchmessern im Düsenhals in der Größenordnung von

einem Zentimeter durchgeführt und entsprechen damit einem Durchfluss von 5000 l/h. Bei dieser Größenordnung waren Kavitationsphänomene gut sichtbar (RUDOLFA et al., 2014; OCHOTERENA et al., 2010). Die für die hier exemplarisch betrachteten Haushaltswasserzähler häufigen Durchflussmengen lagen jedoch eine Größenordnung (ca. 500 l/h) darunter.

Ein wesentlicher Bestandteil einer realitätsnahen Prüfung eines Hauswasserzählers ist ein repräsentatives Verbrauchsprofil. Die Erzeugung statistisch gesicherter Verbrauchsprofile ist das Ergebnis der Arbeiten in SCHUMANN (2020), wobei die Datenbasis aus MARTIN et al. (2017) dazu verwendet wurde. Um die Datenbasis regional und absolut zu vergrößern, wurde in der Studie SCHUMANN et al. (2021) die bisher verwendete Datenbasis um Verbrauchsprofile aus anderen europäischen Ländern erweitert und diese mit dem Ergebnis verglichen, dass die Verbrauchsprofile für die betrachteten Regionen ähnlich waren. Diese Datensätze sind umfangreich und können für die Erzeugung von repräsentativen Verbrauchsprofilen verwendet werden.

Unter dem Stichwort „realitätsnahe Prüfung von Wasserzählern“ gab es weitere Untersuchungen in Europa (FONTANAZZA et al., 2015; ARREGUI et al., 2018; KARADIREK, 2020), die sich auf stichprobenartige Messungen von Verbrauchsdaten bezogen. In diesen Beiträgen wurden verschiedene Effekte untersucht, die einen Einfluss auf die Messrichtigkeit von Wasserzählern haben könnten, basieren aber teilweise nur auf Einzelbeispielen, sodass die Aussagekraft der Ergebnisse gering ist. Bei den Untersuchungen in ARREGUI et al. (2018) wurden verschiedene häufig auftretende Durchflussbereiche untersucht; in keinem der Beispiele wurde jedoch der Einfluss eines dynamischen Verbrauchsverhaltens auf die Messrichtigkeit eines Wasserzählers betrachtet.

Im Gegensatz zu einem konstant eingestellten Durchfluss gab es Versuche mit zyklisch schwankendem Durchfluss, also sogenannten intermittierenden Bedingungen. Dazu gab es ebenfalls Untersuchungen (CHADWICK et al., 2019; ARREGUI et al., 2020), die sich mit der Messrichtigkeit von Wasserzählern unter intermittierenden Bedingungen befasst haben. Derartige Bedingungen wurden teilweise mit toriodalen Kavitationsdüsen erzeugt (SCHUMANN et al., 2020). Diese Analysen stellen jedoch einen Extremfall dar und sind somit nicht repräsentativ für Verbrauchsprofile in der Realität. Die dort gefunden mehreren 10 % Messabweichung sind somit keine belastbare Aussage für eine realitätsnahe Prüfung, sondern zeigen, dass ein neuer Versuchsaufbau notwendig ist.

Ein weiterer Punkt, der bei den bisherigen Untersuchungen noch nicht betrachtet wurde, ist die reproduzierbare Erzeugung der statistisch gesicherten Profile. Die Profilerzeugung mit Herschel-Venturi-Kavitationsdüsen ist durch

die stabile Durchflusserzeugung theoretisch sehr gut, wurde aber in der Praxis bisher noch nicht umgesetzt. Andere Ansätze der Realisierung dynamischer Profile auf einem Prüfstand sind Ventile (OGHEARD, 2019) oder die Implementierung von Lochplatten (BÜKER et al., 2021), die zwar schon praktisch umgesetzt wurden, aber trotzdem noch in der Entwicklung sind.

Um mittels kritisch durchströmter, kavitierender Düsen dynamische Profile zu realisieren, wurde vor einigen Jahren ein Prototyp für einen Wasserzählerprüfstand in der PTB entwickelt. Der Prototyp bestand aus einer Apparatur, die in Abbildung 1.2 links dargestellt ist. Die in dieser Arbeit betrachtete Neuerung bestand aus sechs Herschel-Venturi-Düsen, die unterschiedliche Durchmesser besitzen und in den in Abbildung 1.2 rechts gezeigten Halter eingebaut wurden. Mit pneumatisch gesteuerten Ventilen ließen sich die Düsen individuell öffnen und schließen und damit verschiedene Durchflüsse ohne lange Einlaufzeit einstellen.



Abbildung 1.2: Kavitationsdüsenapparatur; links: Außenansicht; rechts: Sicht auf die Halter der Kavitationsdüsen

Auf dem Prüfstand mit der neuen Apparatur sollten als Anwendungsbeispiel Wasserzähler mit einem realitätsnahen Prüfregime durch reproduzierbare Verbrauchsprofile getestet und die Messrichtigkeit unter dynamischen Bedingungen überprüft werden. Dazu musste eine reproduzierbare Erzeugung dynamischer Profile mit kavitierenden Herschel-Venturi-Düsen als Grundlage für ein realitätsnahes Prüfregime gewährleistet sein. Daraus ergeben sich die Fragen, welche Faktoren Einfluss auf die Kavitation und damit auf den von den Düsen generierten Durchfluss haben und unter welchen Bedingungen sicher ein stabiler Durchfluss erzeugt wird. Im Detail sollen die folgenden Fragestellungen in dieser Arbeit behandelt werden:

1. Wie lässt sich die reale Kontur einer Düse mit Herschel-Venturi-Geometrie ermitteln, und gibt es einen Einfluss der Geometrie auf die Kavitationsausprägung und damit auf den Durchfluss?

-
2. Wie groß ist der Einfluss von Effekten durch Umgebungs- und Flüssigkeitsbedingungen auf den Durchfluss durch die Kavitation, und kann die Kavitationsausprägung selbst überprüft werden?
 3. Wie können Durchflussprofile mit Herschel-Venturi-Düsen reproduzierbar erzeugt werden, und wie kann diese Profilerzeugung validiert werden?
 4. Wie schneidet die Kavitationsdüsen-Technologie im Vergleich zu anderen Methoden der Profilerzeugung ab?

Mit der Beantwortung dieser Fragen kann ein Prüfregime mit dynamischen Profilen allgemein in der Praxis umgesetzt werden. Diese Arbeit soll damit auch ein Beitrag zur Überarbeitung einschlägiger gesetzlicher Regelwerke und Normen sein, die für Wasserzähler aktuell stattfindet.

Beim Anwendungsbeispiel Wasser gab es bereits erste Untersuchungen, die sich mit dem Thema befassen haben. Darauf aufbauend lassen sich grundlegende Kenntnisse zu dem Thema erarbeiten, die in Zukunft auch für Untersuchungen mit anderen Medien genutzt werden können. Da Durchfluss- und Volumenmessgeräte in einer Vielzahl von Anwendungen mit variablen Durchflüssen eingesetzt werden, ergibt sich ein weites Feld an Möglichkeiten für den Einsatz von Kavitationsdüsen über die hier gezeigten Beispiele hinaus.

2 Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen zum Thema Kavitation und deren Anwendung in der Metrologie erläutert. Dazu wird zunächst näher auf die physikalischen Grundlagen eingegangen, speziell auf die Bildung und Eigenschaften von zweiphasigen Gemischen aus Flüssigkeiten und Gasen. Im besonderen Fall der Kavitation wird die Gasblasenbildung in Flüssigkeiten betrachtet, welche für das Verständnis der im folgenden dargestellten Arbeiten von Bedeutung ist.

In der Literatur gibt es Veröffentlichungen verschiedenster Forschungsrichtungen, in denen das Kavitationsverhalten in Venturidüsen untersucht wird. Ein Anwendungsbeispiel ist der Einspritzvorgang im Verbrennungsmotor, zu welchem es zahlreiche Veröffentlichungen gibt, zum Beispiel BRUNHART et al. (2020) oder TOMOV et al. (2015). In diesem Zusammenhang gab es weitere grundlegende Untersuchungen, die sich mit anderen Nutzungen von kavitierenden Venturi-Düsen befasst (DANLOS et al., 2014; KOZÁK et al., 2018; SOYAMA, 2020) und Einflussfaktoren auf den Kavitationsprozess (z.B. Wandrauigkeit) untersucht haben. In FRENKEL (1955) wurde der Einfluss verschiedener Reinheiten von Flüssigkeiten auf die Kavitation untersucht; in KELLER (2001) der Einfluss der Viskosität, der Grad der Turbulenz und weitere Parameter. Außerdem werden Venturidüsen auch in der Landwirtschaft zur wassersparenden Beregung in wasserarmen Gegenden eingesetzt (XU et al., 2014), sodass sich insgesamt ein breites Spektrum an möglichen Anwendungen ergibt. Dabei variieren die Geometrie der Düsen, die eingesetzten Medien, die Druck- und Temperaturbereiche und weitere Parameter je nach Anwendung stark. Der Fokus der Ausführungen im folgenden Kapitel ist auf Kavitationsuntersuchungen, die für das Anwendungsbeispiel der Durchflussmessung von Wasser relevant sind, ausgerichtet. Nach der Betrachtung des Zustandswechsels von flüssig zu gasförmig werden die makroskopischen Ausprägungen von Kavitation im Allgemeinen erläutert. Danach erfolgt eine genauere Darstellung für die Herschel-Venturi-Geometrie und wie sich der Durchfluss damit bestimmen bzw. einstellen lässt. Daran anschließend werden die in der Literatur diskutierten Einflussfaktoren der Kavitation vorgestellt. Zuletzt wird der aktuelle Stand der Prüfstandstechnik im Bereich der Durchflussmessung erläutert und Prozesse am Anwendungsbeispiel der Wasserzählerprüfung dargestellt.

2.1 Kavitation

Der Begriff Kavitation beschreibt allgemein Hohlräume (lateinisch *cavitas*) in Flüssigkeiten. Als Kavitation wird sowohl die Bildung neuer Hohlräume als auch das Wachstum mikroskopisch kleiner Hohlräume bezeichnet. Zum Verständnis des Prozesses der Kavitation ist das Druck-Temperatur-Phasendiagramm von Wasser in Abbildung 2.1 dargestellt. In einer Rohrströmung wird Kavitation durch eine Druckreduzierung über eine Querschnittsverkleinerung erzeugt, sodass sich der Zustand des Fluids in diesem Bereich von flüssig zu gasförmig verändert. Physikalisch betrachtet entspricht Kavitation dem Sieden, bei welchem es zum Phasenübergang kommt, wobei der Siedevorgang durch eine Temperaturerhöhung charakterisiert ist. Bei Kavitation bleibt die Temperatur in erster Näherung konstant und die Zustandsänderung wird über eine Änderung des Druckes erzeugt; es handelt sich um einen isothermen Vorgang. Das führt zu unterschiedlichen Randbedingungen in experimentellen Untersuchungen. Zum Beispiel müssen Temperaturgradienten beim Sieden und Druckverteilungen bei Kavitation in strömenden Flüssigkeiten berücksichtigt werden. Die Mechanismen der Blasenbildung und grundsätzlich der Wechsel des Aggregatzustands sind dagegen bei der Kavitation und dem Sieden analog.

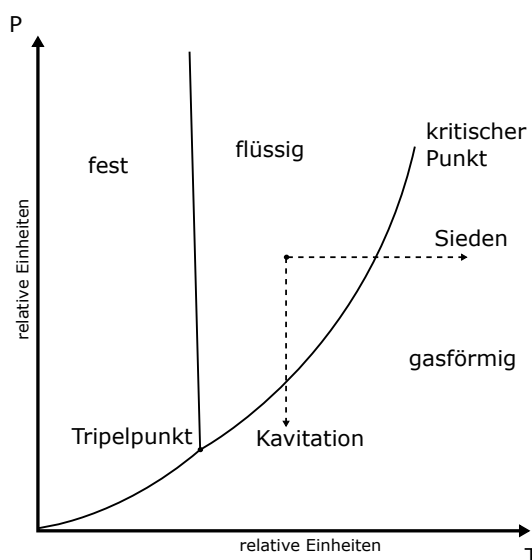


Abbildung 2.1: Phasendiagramm von Wasser nach FRANC und MICHEL (2005)

2.1.1 Blasenbildung

Um den Prozess der Kavitation in ihren unterschiedlichen Erscheinungsformen zu verstehen, sollen die Grundlagen des Phasenwechsels und der Keimbil-

derung kurz erläutert werden. Die dargestellten Informationen sind eine für das Verständnis der Arbeit erforderliche Zusammenfassung des Themas. Weitere Erläuterungen sind zum Beispiel in DEBENEDETTI (1996) oder FRENKEL (1955) zu finden.

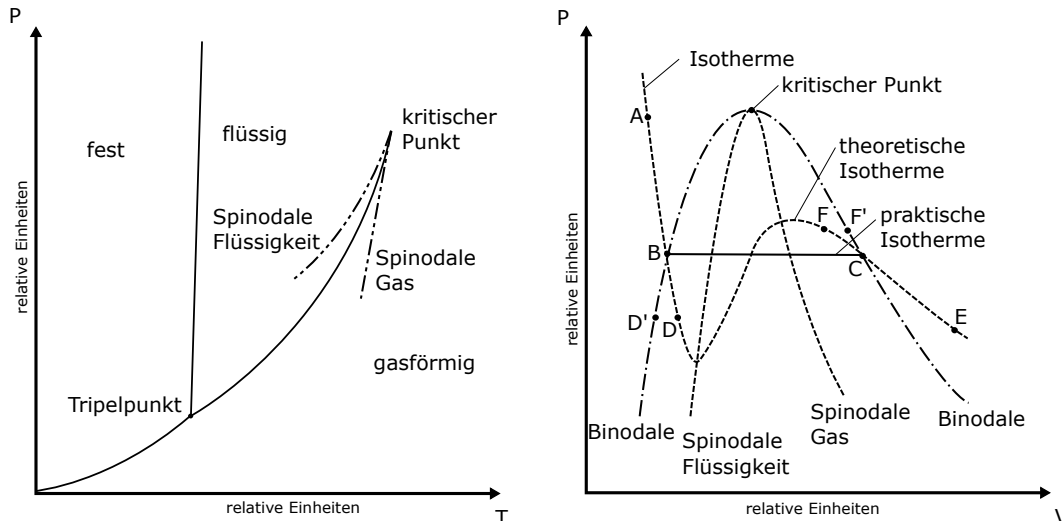


Abbildung 2.2: Phasendiagramm einer Flüssigkeit nach BRENNEN (2014)

Der Dampfdruck $p_{Dampf}(T)$ eines Fluids ist bei einem Einkomponenten-System eine Funktion der Temperatur und wird über das thermodynamische Gleichgewicht der gasförmigen und der flüssigen Phase des Stoffes definiert. Im typischen Phasendiagramm, wie in Abbildung 2.2 dargestellt, ist der Druck p über der Temperatur T beziehungsweise über dem Volumen V aufgetragen. In dieser Darstellung sind Zustände eingetragen, die sich im jeweiligen thermodynamischen Gleichgewicht bilden. Der Tripelpunkt ist dabei der Punkt, an dem die drei möglichen Zustände fest, flüssig und gasförmig koexistieren. Entlang der Sättigungskurve (Binodale) bis zum kritischen Punkt befinden sich die flüssige und die gasförmige Phase im Gleichgewicht. Oberhalb des kritischen Punkts gehen die beiden Phasen fließend ineinander über; der Übergang entlang einer Isothermen ist stetig. Im Gegensatz dazu gibt es unterhalb des kritischen Punkts eine Unstetigkeit, sodass bei einem Wechsel von flüssig zu gasförmig, wie er bei Kavitation stattfindet, oder anders herum beide Phasen gleichzeitig auftreten. Der Phasenwechsel erfolgt dabei nicht entlang der theoretischen Isothermen, sondern wie in Abbildung 2.2 dargestellt, entlang der Linie von Zustand B nach Zustand C bzw. in umgekehrter Richtung. In dem Diagramm ist weiterhin die Spinodale der flüssigen Phase als Linie der Maxima der theoretischen Isothermen und außerdem die entsprechende Spinodale der Gasphase als Linie der Minima der theoretischen Isothermen dargestellt. Innerhalb der Bereiche zwischen den Spinodalen und der Binodale können Zustände erreicht werden, bei denen es nicht zu einer Entmischung kommt, sondern ein instabiler

Zwischenzustand einer Phase existiert. Wird zum Beispiel der Druck innerhalb einer Flüssigkeit entlang der Isothermen vom Zustand A weiter als Zustand B reduziert, und es sind nicht genügend Keime vorhanden, folgt die Flüssigkeit dem Verlauf entlang der theoretischen Isothermen und geht in einen metastabilen Zustand D über. Der Zustand D kann auch vom Zustand D' aus durch eine Erhöhung der Temperatur bei konstantem Druck erreicht werden und wird dann als überhitzte Flüssigkeit bezeichnet. Dieser Zustand, bei dem sogenannte Zugspannungen in der Flüssigkeit auftreten, bleibt solange bestehen, bis Unreinheiten dazu führen, dass das System in einen stabilen gasförmigen Zustand wie E übergeht. Analog zum Wechsel von der flüssigen Phase zur Gasphase kann ein System im Ausgangszustand E durch Erhöhung des Drucks über den Punkt C hinaus in einen metastabilen Zustand wie F gebracht werden. Eine genügende Anzahl von Keimen sowie die Größe der Keime sind wie bei der überhitzten Flüssigkeit ausschlaggebend, wie lange der metastabile Zustand des unterkühlten Gases bestehen bleibt.

Keime in Flüssigkeiten können typischerweise auf zwei verschiedene Ursprungsformen zurückgeführt werden. Zum einen entstehen mikroskopisch kleine Hohlräume durch thermische Fluktuationen, die als Keime unter geeigneten Wachstumsbedingungen makroskopische Blasen ergeben. Diese Form wird als homogene Keimbildung bezeichnet. Zum anderen gibt es in den meisten technischen Anwendungen zusätzliche Störstellen in der Flüssigkeit. Das können zum Beispiel echt gelöste Partikel oder die Behälterwände sein. Findet das Gasblasenwachstum an diesen Stellen statt, wird die Keimbildung als heterogen bezeichnet.

Entsprechend der Betrachtungsweise einer idealen Flüssigkeit tritt Blasenwachstum nur durch homogene Keimbildung auf. Dabei kommen in realen Systemen immer beide Formen mit unterschiedlichen Gewichtungen vor. Experimentell lassen sich die unterschiedlichen Formen der Keimbildung kaum unterscheiden, da Kolloide makroskopisch dasselbe Erscheinungsbild ergeben können wie durch thermische Fluktuation erzeugte Hohlräume. Für die Praxis ist der Gehalt an gelöstem Gas in einer Flüssigkeit relevant, da dieses als Mikrobläschen am Rand der Flüssigkeit oder frei gelöst als Keim vorhanden sein kann. In Wasser gelangt bei den meisten technischen Anwendungen allein durch die umgebende Luft immer ein Anteil Gas in die Flüssigkeit, der sich nicht mit einfachen Mitteln entfernen lässt (CRUM, 1982). Eine tiefere Beschreibung der Thermodynamik der homogenen Keimbildung der Kavitation wurde von Gibbs verfasst (GIBBS, 1906). Einen weiteren Überblick geben die Arbeiten von FRENKEL (1955), SKRIPOV (1974) und BRENNEN (2014), in denen die thermodynamischen Hintergründe erläutert werden. Es wird im Folgenden

davon ausgegangen, dass ausreichend Kavitationskeime vorhanden sind und Kavitation auftritt, sobald der Dampfdruck unterschritten wird.

2.1.2 Erscheinungsformen

Im Durchflussbereich spielt neben dem Einsetzen der Kavitation vor allem die makroskopische Ausprägung eine wesentliche Rolle. Mit ausreichend vorhandenen Keimen kommt es durch eine strömungsbedingte Reduzierung des Flüssigkeitsdruckes zu verschiedenen sichtbaren Erscheinungsformen der Kavitation. Diese unterscheiden sich nicht grundsätzlich voneinander, sondern gehen fließend ineinander über, sind jedoch aufgrund der charakteristischen Ausprägungen phänomenologisch differenziert. Dabei wird in der Literatur klassisch zwischen Schicht-, Wolken- und Blasen kavitation sowie Wirbel- und Superkavitation unterschieden (FRANC, 1995; SAUER, 2000; UTTURKAR et al., 2005; BRINKHORST, 2017). In verschiedenen Anwendungsgebieten wird diese Einteilung noch detaillierter gegliedert und weitere Zustände separat betrachtet (D'AGOSTINO und SALVETTI, 2008). Im Folgenden sind die für diese Arbeit wichtigsten Formen der Kavitation erläutert und in Abbildung 2.3 dargestellt.

(a) Blasen kavitation

Diese Art der Kavitation tritt auf, wenn der Dampfdruck in der Flüssigkeit nur punktuell an einzelnen Störstellen unterschritten wird und sich dadurch einzelne Blasen bilden können. Die Größe und Dichte der Blasen hängt dabei von den jeweiligen Strömungsbedingungen ab.

(b) Wolken kavitation

Bei dieser Ausprägung der Kavitation bilden sich in einer Strömung regelmäßig Wolken, die nicht stabil sind und durch einen sogenannten re-entrant jet von der erzeugenden Oberfläche abgelöst werden. Dadurch ist diese Art der Kavitation mit starker Vibration und Lärm verbunden und führt zu Erosionserscheinungen.

(c) Schicht kavitation

Bei dieser phänomenologischen Ausprägung ist die Kavitation in einer Strömung an der Kante fixiert. Im Gegensatz zu der Wolken kavitation löst sich die Schicht nicht von der Oberfläche und bleibt makroskopisch betrachtet stationär.

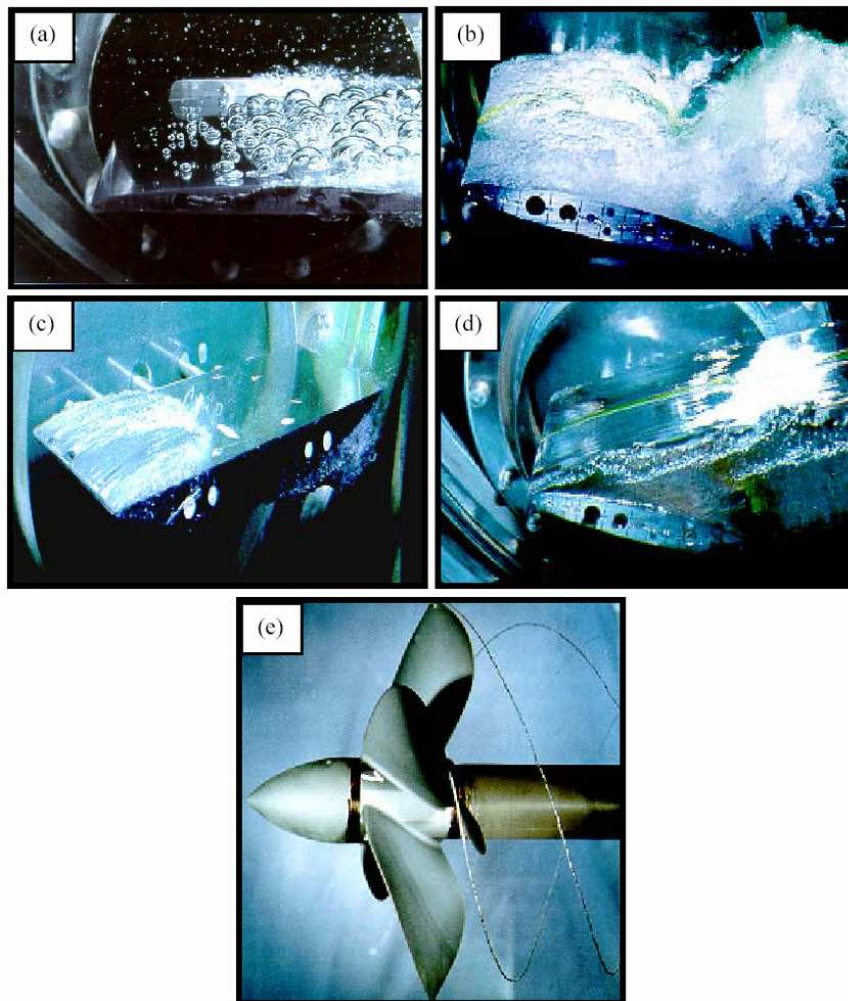


Abbildung 2.3: Charakteristische Ausprägungen von Kavitation nach FRANC (1995) ©EDP Sciences, 1995

(d) Superkavitation

Dieser Typ tritt bei einer scharfen, großflächigen Trennung zwischen flüssig und gasförmig auf. Bei Superkavitation sind die Druckunterschiede im Fluid maximal.

(e) Wirbelkavitation

Bei der Wirbelkavitation wird die Kavitationsblase meistens durch ein Rotorblatt erzeugt und bleibt, wie in der Abbildung 2.3 sichtbar, durch stabile Strömungsbedingungen erhalten.

Bei einer Herschel-Venturi-Düse treten vor allem die in Abbildung 2.3 (a) - (d) gezeigten Ausprägungen von Kavitation auf. Welche Erscheinungsform vorkommt, ist abhängig vom Druck, der über die Strömungsgeschwindigkeit mit dem Durchfluss zusammenhängt, was in Abschnitt 2.1.3 näher erläutert wird.

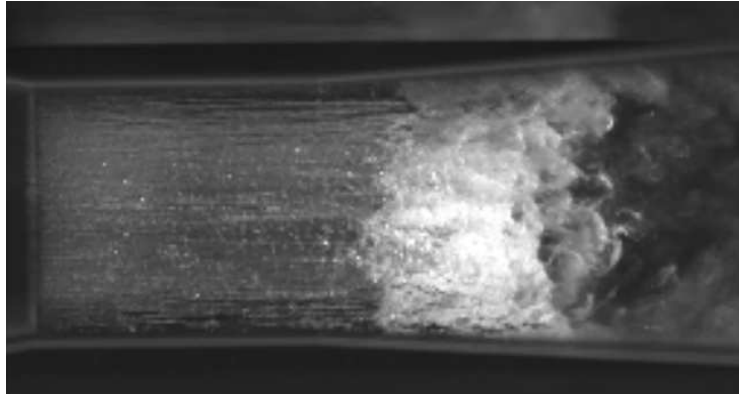


Abbildung 2.4: Voll ausgebildete Kavitation in einer Herschel-Venturi-Düse

In Abbildung 2.4 ist die Kavitation in einer Herschel-Venturi-Düse nach der Geometrie in Abbildung 2.5 sichtbar, bei einem Flüssigkeitsstrom der von links nach rechts verläuft. Die Abbildung wurde mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen. Die Kavitation beginnt am Düsenhalsanfang, ist dann über den engsten Querschnitt stabil und löst sich im Diffusor wieder auf. Der Kavitationsanfang ist bei der Herschel-Venturi-Düse an der Kante des Konus am Einlass fixiert, sodass sich eine größere Stabilität im Durchfluss im Vergleich zu Düsen mit einem Torus als Einlass (siehe Abbildung 1.1) ergibt. Bei der Herschel-Venturi-Geometrie bildet sich bei Kavitationsbedingungen im Düsenhals eine hohlzylinderförmige Kavitationsschicht entlang der inneren Wand aus, die teilweise bis in den Diffusor stabil ist.

2.1.3 Durchflussberechnung

Wie bei anderen Wirkdruckmessgeräten, zum Beispiel Messblenden, funktioniert das Prinzip der Durchflussgenerierung bei kavitierenden Herschel-Venturi-Düsen über eine Rückführung auf den Druck. In Abbildung 2.5 ist die verwendete Düsengeometrie dargestellt, deren Parameter im kommenden Abschnitt erläutert werden. Unter der Annahme einer stationären und reibungsfreien Strömung eines inkompressiblen Fluids gilt die Energieerhaltung in einer Strömung, die durch die Bernoulli-Gleichung beschrieben werden kann:

$$\rho \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + p = \textit{konstant}. \quad (2.1)$$

Dabei bezeichnet $\rho \cdot g \cdot h$ den geodätischen Druck, der aufgrund der horizontal verlaufenden Messstrecke als konstant angenommen wird, $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$ den dynamischen Druck und p den statischen Druck. Die Parameter Druck p ,

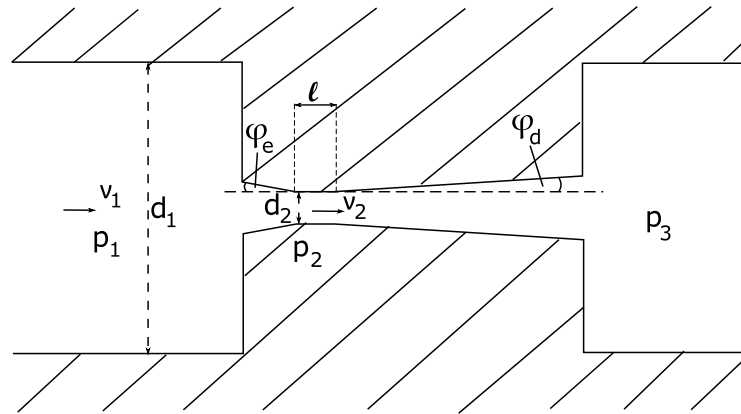


Abbildung 2.5: Längsschnitt eines kreisförmigen Rohres und einer Düse mit Herschel-Venturi-Geometrie

Geschwindigkeit v , Dichte ρ und Durchmesser d stromaufwärts der Düse werden mit dem Index „1“ bzw. „vor“ bezeichnet. Dieselben Parameter werden im Düsenhalsbereich nach Abbildung 2.5 mit dem Index „2“ bezeichnet und der Druck stromabwärts der Düse mit „ p_3 “ bzw. „ p_{nach} “. Weiterhin sind in der Abbildung 2.5 die Düsenhalslänge l , der Winkel des Einlasskonus φ_e und der Winkel des Auslasskonus φ_d eingezeichnet. Mit den Bezeichnungen ergibt sich die Bernoulli-Gleichung zu

$$p_1 + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho \cdot v_2^2}{2}. \quad (2.2)$$

Weiterhin ist der Massestrom \dot{m} über die Düse $\dot{m} = \text{konstant}$, sodass sich

$$\dot{m} = v_1 \cdot A_1 \cdot \rho_1 = v_2 \cdot A_2 \cdot \rho_2 \quad (2.3)$$

ergibt. Stellt man diese Gleichung nach der Geschwindigkeit v_1 um, erhält man $v_1 = v_2 \cdot (d_2/d_1)^2 \cdot (\rho_2/\rho_1)$. Aus Gleichung 2.3 ergibt sich die Geschwindigkeit in der Düse zu $v_2 = \dot{m}/A_2 \cdot (\rho_1/\rho_2)$. Diese beiden Terme, in Gleichung 2.1 eingesetzt, ergeben

$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\dot{m}}{A_2} \right)^2 \left[\frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_1} \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^4 \right]. \quad (2.4)$$

Umgestellt nach dem Massestrom \dot{m} bei gleichbleibenden Abmessungen d_1 und d_2 ist der Durchfluss eine Funktion der Druckdifferenz $\Delta p = p_1 - p_{Dampf}$:

$$\dot{m} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_1} \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^4}} \cdot A_2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p}. \quad (2.5)$$

Unter der Annahme von Inkompressibilität, also einer konstanten Dichte der Flüssigkeit $\rho = \rho_1 = \rho_2$, vereinfacht sich die Formel zu

$$\dot{m} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4}} \cdot A_2 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p}. \quad (2.6)$$

Bei einer kavitierenden Herschel-Venturi-Düse ist der Druck p_2 im Düsenhals gerade der Dampfdruck der Flüssigkeit p_{Dampf} , sodass $\Delta p = p_1 - p_{Dampf}$ ist. In der Praxis wird zusätzlich ein Durchflusskoeffizient C definiert, um Reibungsverluste zu berücksichtigen (ISO 5167-4:2003), und eine Expansionszahl ε , um die Kompressibilität des Mediums mit einzubeziehen (SCHADE et al., 2022). Damit lässt sich der Massestrom q_m durch eine Herschel-Venturi-Düse nach

$$q_m = \dot{m}_{experimentell} = \frac{C}{\sqrt{1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4}} \cdot \varepsilon \cdot A_2 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot (p_1 - p_{Dampf})} \quad (2.7)$$

berechnen. Hier kann durch ε auch berücksichtigt werden, dass die Dichte des Mediums im Düsenhals über den Querschnitt nicht konstant ist. Es wird angenommen, dass die Flüssigkeit aufgrund des verwendeten Temperatur- und Druckbereichs als inkompressibel betrachtet werden kann. Die getroffenen Annahmen gelten für Wasser und müssen bei der Verwendung anderer Medien angepasst werden, da sich zum Beispiel die Kompressibilität ändert.

2.1.4 Einflussfaktoren

Die Ausführungen in Kapitel 2.1.3 zeigen, dass der Durchfluss einer Düse neben dem Druck wesentlich vom Querschnitt an der engsten Stelle, dem Düsenhals, abhängt. Aufgrund des großen Einflusses der geometrischen Parameter, auch auf die Kavitation, gab es sowohl numerische als auch experimentelle Untersuchungen, die sich mit diesem Thema befasst haben. Durch die verschiedenen Anwendungen variierte der Fokus der Untersuchungen zu den geometrischen Veränderungen deutlich. Neben der Geometrie waren vor allem der Druck und die Temperatur die in der Literatur häufig untersuchten Parameter.

ISO-9300-Geometrie

In der Gasdurchflussmessung werden kritisch durchströmte Venturi-Düsen (CF-VN) nach ISO 9300:2005-11 verwendet, deren Geometrie in Abbildung 1.1 links dargestellt ist. Dazu gibt es zahlreiche Veröffentlichungen die sich mit dem Durchfluss und den Einflussfaktoren auf den Durchfluss befassen haben (ISHIBASHI, 2002; LIM et al., 2011; VON LAVANTE et al., 2013; LAMBERT et al., 2019) und von denen die für diese Arbeit relevanten Untersuchungen folgend erläutert werden. Der Phasenübergang (Kondensation) im Auslasskonus tritt bei der Durchflussmessung von Gasen ebenfalls auf, ist allerdings aufgrund negativer Effekte auf die Durchflussmessung hier nicht gewünscht (DING et al., 2015). Diese Düsengeometrie wurde auch mit Flüssigkeiten untersucht und der Durchfluss in Abhängigkeit vom Düsenhalsdurchmesser bestimmt (SCHUMANN, 2020). Dabei wurde festgestellt, dass der Durchfluss den theoretisch zu erwartenden Werten entspricht, mit der Einschränkung, dass der Wirkungsquerschnitt um die Kavitationsschichtdicke reduziert ist.

Konvergent-divergente Düsen

Als weitere häufig verwendete Bauform werden Einspritzdüsen verwendet, die im einfachsten geometrischen Fall aus einem Zylinder bestehen (DESANTES et al., 2003). Durch eine gleichmäßige Kavitation über den gesamten Querschnitt in derartigen Düsen soll eine große Streuung der Flüssigkeit stromabwärts der Düse erreicht werden, um den Verbrennungsvorgang im Motor zu optimieren. Als Variation wird eine Bauform verwendet, die aus einem Einlasskonus und einem Auslasskonus besteht und als konvergent-divergente Düse bezeichnet wird. In LI et al. (2019) wurde der Winkel des Auslasskonus φ_d zwischen $5^\circ < \varphi_d < 90^\circ$ variiert und gezeigt, dass ein möglichst kleiner Winkel für das Einsetzen der Kavitation vorteilhaft ist. Am Anwendungsbeispiel der Dieselmotor-Einspritzdüse wurde in SALVADOR et al. (2017) sowohl der Einlass- als auch der Auslasswinkel zwischen $2,5^\circ < \varphi < 4,5^\circ$ variiert und gezeigt, dass Kavitation eher bei $\varphi_d = 4,5^\circ$ auftrat als bei kleineren Winkeln. In dem Beispiel tritt bei kleinen Winkeln φ_e Kavitation direkt am Beginn des Einlasskonus auf, was negative Auswirkungen auf die Langzeitstabilität in der Anwendung hätte.

Herschel-Venturi-Düse

Bei der Herschel-Venturi-Düse handelt es sich um eine Geometrie mit Einlasskonus, zylindrischem Halsbereich und Auslasskonus entsprechend der Zeich-

nung 2.5. Erste Untersuchungen wurden bereits von NUMACHI et al. (1962) durchgeführt und beschäftigten sich mit dem Einfluss der Kavitation auf den Durchfluss. Hier wurde der Zusammenhang zwischen dem Druck stromaufwärts und dem dadurch begrenzten Durchfluss festgestellt und der Einfluss der Kantenrundung im zylindrischen Düsenhalsbereich auf den Durchfluss untersucht. Weitere Untersuchungen dazu wurden von YOON und AHN (2015); TANG et al. (2019) und BERMEJO et al. (2021) durchgeführt und bestätigen die Ergebnisse aus dem vorigen Abschnitt, dass eine geringere Steigung am Auslasskonus für die Kavitation vorteilhaft ist. Basierend auf den bisherigen Arbeiten zu dem Thema werden die Düsenhalbwinkel zu $\varphi_e = 10,5^\circ$ und $\varphi_d = 3,5^\circ$ bestimmt, mit denen die experimentellen Untersuchungen durchgeführt werden sollen.

In weiteren Untersuchungen von ASHRAFIZADEH und GHASSEMI (2015) wurde neben dem Winkel am Auslasskonus auch die Länge des zylindrischen Düsenhalsbereichs variiert und der Einfluss auf den Durchfluss untersucht. Eine Vergrößerung der Länge l führt demnach zu einer Reduzierung des kritischen Druckverhältnisses, bei welchem Kavitation in der Düse einsetzt. Im Zusammenhang von Blenden wurde in GÜNTHER et al. (2010) die Kavitationsausprägung in 3 verschiedene Bereiche eingeteilt: Bei einem Länge-Durchmesser-Verhältnis $l/d_2 < 3$ bildet sich eine ringförmige Kavitationsblase um den Flüssigkeitsstrom, bei $3 < l/d_2 < 12$ kommt es am Ende des engsten Querschnitts zum Wandkontakt der Flüssigkeit und bei $l/d_2 > 12$ ist das Ende des engsten Querschnitts mit einer dispersen Zweiphasenströmung gefüllt. Die strahlförmige Kavitation bei kleineren Verhältnissen l/d_2 wurde auch von CHEN et al. (2018) bestätigt. In NOURI et al. (2012) wurden ebenfalls Düsen mit verschiedenen l/d_2 -Werten untersucht und ein Einfluss auf die Kavitation am Düsenhalsende festgestellt. Wie bei den Winkeln am Einlass und Auslass wird sich an den Ergebnissen der Literatur orientiert und ein Verhältnis $l/d_2 = 1$ angestrebt, um Kavitation in diesem definierten Bereich stabil zu erzeugen.

Weitere Untersuchungen von SIMPSON und RANADE (2018) beschäftigten sich mit dem Einfluss der Geometrie auf die Kavitation, in diesem Beispiel die Rundung der Kante am Einlass. Die Ergebnisse von BRINKHORST (2017) und NUMACHI et al. (1962) stützen die Aussage, dass eine schärfere eingangseitige Kante die Kavitation fixiert, was sowohl numerisch als auch experimentell untersucht wurde. Mit der Verwendung der Herschel-Venturi-Geometrie in den Untersuchungen sollte daher im Vergleich zur Geometrie nach ISO 9300 eine stabilere Kavitationsblasenbildung erreicht werden. Auch Grate oder die Oberflächenrauigkeit haben einen Einfluss auf die Kavitation (CHANG et al., 2006). Grate führen demnach zu zusätzlichen Turbulenzen, aber nicht

zum Verschwinden der Kavitation. Die Oberflächenrauigkeit wurde in der Untersuchung ins Verhältnis zum Düsendurchmesser gesetzt und ein Umschlag der Kavitationserscheinungsform bei Werten von 0,005 beschrieben. In LI et al. (2016) wurde die Beeinflussung der Kavitation durch Oberflächen mit R_a -Werten zwischen $0,8 \mu\text{m}$ und $25 \mu\text{m}$ untersucht. Die Ergebnisse zeigen zwar, dass es einen Einfluss gibt, dieser aber auch vom Eingangsdruck der Düse abhängt und nicht linear ist. Durch die Erkenntnis, dass sich die Kavitation mit der Oberflächenrauigkeit verändert, ist anzunehmen, dass es auch einen Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf die Durchflussmessung gibt.

Temperatur

Neben den geometrischen Parametern ist die Temperatur ein wichtiger Faktor, der einen Einfluss auf die Kavitation in einer Düse hat. Allgemein zeigen mehrere Untersuchungen, dass bei steigender Temperatur durch eine Erhöhung des Dampfdruckes die Kavitation begünstigt wird (ALEIFERIS et al., 2010; NOURI et al., 2012; OHIRA et al., 2012; CHEN et al., 2017, 2019). Der untersuchte Temperaturbereich in Venturi-Düsen reichte dabei von flüssigem Helium und -271°C in ISHIMOTO und KAMIJO (2003) bis zu flüssigem Blei und 500°C in BOKOV et al. (2013). Diese Ergebnisse bestätigen die Übertragbarkeit der Kavitation in Düsen auch für andere Flüssigkeiten und Temperaturbereiche, liefern aber keine Antworten auf die Fragen, ob und wie sich der Durchfluss mit der Temperatur ändert.

Druck

In vielen der in den vorigen Abschnitten genannten Veröffentlichungen wurde die Kavitation in einer Düse aufgrund ihrer Druckabhängigkeit nach dem Druck stromaufwärts der Düse charakterisiert. Wegen der individuellen Eigenschaften jeder gefertigten Düse lässt sich daraus keine verbindliche Aussage zur Kavitation oder dem Durchfluss einer Düse aus Literatur und Theorie ableiten. Bekannt ist, dass ein kritisches Druckverhältnis erreicht sein muss, um den Dampfdruck der Flüssigkeit in der Düse zu unterschreiten, damit Kavitation einsetzen kann. Diese Aussage ergibt sich zum einen aus den theoretischen Betrachtungen (s. Kapitel 2.1.3), zum anderen aus experimentellen (z. B. GHASSEMI und FASIH (2011)) oder numerischen (z.B. DAI et al. (2019)) Untersuchungen in der Literatur.

2.2 Metrologische Infrastruktur

Die Messung des Durchflusses und des Volumens von strömenden Flüssigkeiten ist in vielen technischen Anwendungen wichtig, die in allen Bereichen der Gesellschaft eingesetzt werden - von der Verbrauchsmessung des Trinkwassers bis zur Dosierung von Flüssigkeiten in der Medizin. Grundsätzlich gibt es mehrere Möglichkeiten, den Durchfluss in einer geschlossenen Leitung zu messen. Dazu gibt es eine Vielzahl von unterschiedlichen Durchfluss- und Volummessgeräten, mit denen der Durchfluss ermittelt werden kann. Um diese Werte der Messgeräte auf eine Referenz zurückzuführen, gibt es Prüfstände zur Durchflussbestimmung mit einer höheren Genauigkeit. Die Beschreibung der für diese Arbeit wichtigen Prozeduren sowie Beiträge zur Messunsicherheit des Messwertes sollen im Folgenden erläutert werden.

2.2.1 Prüfungen zur Durchflussmessung

Damit die Kalibrierung eines Volumenzählers oder Durchflussmessgerätes auf verschiedenen Prüfständen vergleichbar ist, werden Normale verwendet und neben der Verwendung einer Referenz auf ein nationales Normal, das Primärnormal, zurückgeführt. Weiterhin werden Vergleichsmessungen, zum Beispiel internationale Ringvergleiche, durchgeführt. Rückführung für Durchflussmessprüfstände heißt, dass die verwendeten Normale und Messmittel entweder durch Kalibrierungen auf die jeweiligen Primärnormale zurückgeführt werden, die in diesem Fall aus Volumen, Masse, Dichte, Temperatur und Zeit bestehen, oder auf ein Primärnormal des Durchflusses zurückgeführt werden, das eine höhere Genauigkeit besitzt. Im letzten Fall erfolgt die Rückführung über Vergleichsmessungen mit einem geeigneten Transfornormal.

Neben der Rückführung ist eine Messunsicherheitsanalyse, verbunden mit der Aufstellung eines Messunsicherheitsbudgets, notwendig, um zum Beispiel den Einfluss von Schwankungen der Umgebungsbedingungen auf die Kalibrierung zu berücksichtigen. Um geringe Messunsicherheiten und eine Rückführbarkeit zu gewährleisten, sind die technischen Anforderungen an einen Prüfstand entsprechend hoch. Die Messgröße Durchfluss wird über das Volumen bzw. die Masse einer strömenden Flüssigkeit pro Zeit definiert; beim Volumenstrom

$$q_V = \dot{V}(t) = \frac{dV(t)}{dt} \quad (2.8)$$

und beim Massestrom

$$q_m = \dot{m}(t) = \frac{dm(t)}{dt}. \quad (2.9)$$

Wird das Volumen als Referenz auf einem Prüfstand mit dem Wert des Prüflings verglichen, wird der Aufbau als volumetrische Normalmesseinrichtung bezeichnet. Bei der Masse wird die Bezeichnung gravimetrische Normalmesseinrichtung verwendet. Neben diesen beiden Verfahren besteht außerdem die Möglichkeit, ein Messgerät auf einen Referenzzähler mit einer höheren Genauigkeit zurückzuführen. Bei der Verwendung einer gravimetrischen Referenz lassen sich im Vergleich zum Referenzzähler kleinere Messunsicherheiten realisieren.

Gravimetrisch

Bei der Mengenmessung auf einer gravimetrischen Normalmesseinrichtung erfolgt die Messung der Masse über eine Waage. Die wesentlichen Hauptkomponenten sind ein Vorratsbehälter, eine geregelte Pumpe, ein Regelventil, eine Umschaltklappe (Diverter), eine Temperaturmessstelle und ein Wägesystem (Abbildung 2.6). Als optionales Element kann weiterhin ein Hochbehälter installiert sein.

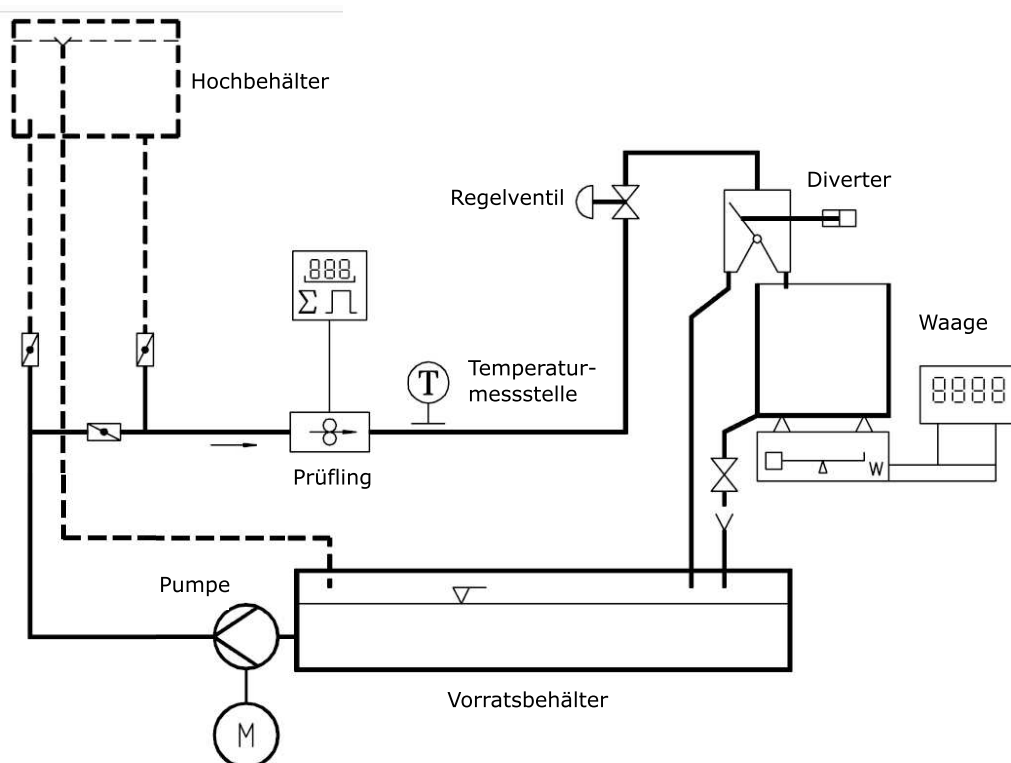


Abbildung 2.6: Fließschema für das Beispiel einer gravimetrischen Normalmesseinrichtung nach PTB (2002)

Mit diesem Aufbau ergeben sich für den Betrieb des Prüfstands zwei Modi: Stehend-Start-Stopp- und Fliegend-Start-Stopp-Betrieb. Aufgrund der höheren Genauigkeit werden Prüfstände vielfach nur im fliegenden Start-Stopp-Betrieb verwendet. Dabei wird die Flüssigkeit im sogenannten Pumpen-Direktbetrieb vom Vorratsbehälter in die Messstrecke gepumpt und anschließend über eine Umschaltklappe (Diverter) zunächst wieder in den Vorratsbehälter geleitet. Nach dem Erreichen stabiler Messbedingungen wird mit dem Umschalten des Diverters der Messvorgang gestartet und der Flüssigkeitsstrom in den Wägebehälter geleitet. Nach Ablauf einer definierten Zeit schaltet der Diverter wieder zurück und die Flüssigkeit strömt wieder in den Vorratsbehälter. Die im Wägebehälter befindliche Masse wird dann mit der vom Prüfling erfassten Masse verglichen, woraus eine Messabweichung berechnet werden kann. Über die tatsächliche Messzeit kann nach Gleichung 2.9 auch der Durchfluss berechnet und miteinander verglichen bzw. rückgeführt werden. Die an der PTB betriebenen Prüfstände haben eine Gesamtmessunsicherheit ($k = 2$) zwischen 0,02 % und 0,2 %.

Volumetrisch

Bei einem Prüfstand mit volumetrischer Referenz wird die Durchflussmessung auf ein Volumen rückgeführt. Die Messung des Volumens kann über einen Kolbenprober in einer Führung mit genau bekannten geometrischen Abmessungen erfolgen. Weiterhin kann die Bestimmung des Volumens auch über einen Behälter mit definiertem Volumen oder durch eine Füllstandsmessung im Behälter erfolgen. Über die Erfassung der Zeit wird daraus der Durchfluss berechnet. Die Messung der Volumendurchflussmenge mit einem Kolbenprober hat den Vorteil, dass das System bidirektional betrieben werden kann (MATHIES und WENDT, 2012).

Bei der Messung des Volumens mit einem Kolbenprober wird der Verfahrensweg des Kolbens durch Wegmarken erfasst. Diese Strecke wird dann über den Kolbendurchmesser in ein Volumen umgerechnet und über die Zeit der Volumendurchfluss bestimmt. Die erweiterte Gesamtmessunsicherheit ($k = 2$) für volumetrische Systeme liegt in der Größenordnung von 0,1 % (PRAKOSA et al., 2015).

Durchflussmessgeräte

Die bisher beschriebene Durchflussmessung wird auf Prüfständen durchgeführt und erfolgt durch Ermittlung über die jeweiligen Primärnormale. Im Gegensatz

dazu gibt es weitere Messprinzipien der Durchflussmessung, die im Rahmen dieser Arbeit relevant sind und eingesetzt werden.

Magnetische Induktion: Sowohl als Volumenzähler wie auch als Durchflussmessgeräte können Sensoren mit magnetisch-induktivem Messprinzip verwendet werden. Dabei wird ein Magnetfeld senkrecht zur Durchflussrichtung erzeugt und durch freie Ladungsträger im Medium eine Spannung induziert. Der magnetische Fluss wird konstant gehalten, sodass die Spannung proportional zur Strömungsgeschwindigkeit und damit dem Durchfluss ist. Voraussetzung dieses Verfahrens ist eine bestimmte elektrische Mindestleitfähigkeit des Mediums.

Coriolis-Durchflussmessgerät: Bei dieser Methode der Durchflussmessung wird der namensgebende Coriolis-Effekt zur Durchflussbestimmung verwendet. Ein Rohrbogen wird, wie in Abbildung 2.7 gezeigt, in Schwingung mit der Frequenz $\vec{\omega}$ versetzt. Wird das Rohr durch die Flüssigkeit mit der Geschwindigkeit \vec{v} durchströmt, ergibt sich die Corioliskraft F_C als Kreuzprodukt zu $F_C = 2 \cdot m \cdot (\vec{v} \times \vec{\omega})$. Dadurch entsteht bei dem Messaufbau eine Schaukelbewegung des Rohrbogens, die durch einen Sensor vor und einen Sensor nach der Schwingungserzeugung als Phasendifferenz aufgenommen wird und proportional zum Durchfluss ist. Da die Frequenz temperaturabhängig ist, wird ein Temperatursensor in dem Messgerät verbaut und der Einfluss der Temperatur rechnerisch kompensiert. Coriolis-Durchflussmessgeräte zeichnen sich durch eine hohe Messgenauigkeit aus und können sowohl mit Flüssigkeiten als auch mit Gasen verwendet werden. Durch eine Bestimmung der Dichte kann sowohl der Massenstrom als auch der Volumenstrom ausgegeben werden.

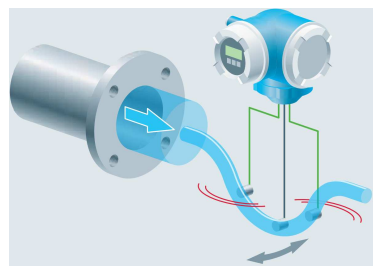


Abbildung 2.7: Messprinzip Coriolis-Durchflussmessgerät
(ENDRESS+HAUSER, 2021)

2.2.2 Prüfverfahren: Anwendungsbeispiel Wasserzähler

Um die Abweichung von einem Volumenzähler oder Durchflussmessgerät zu einer Referenz zu ermitteln, wird die Messabweichung bestimmt. Für das hier

betrachtete Fallbeispiel der Wasserzähler werden für die Prüfung je nach Anwendungsfall und Land die Empfehlungen der OIML R49:2013(E) bzw. die Vorgaben der ISO 4064:2014-11 oder der MID 2014/32/EU:2014-02 herangezogen. Daraus ergeben sich grundlegende technische und metrologische Anforderungen an die zur Prüfung eines Wasserzählers vorgesehene messtechnische Infrastruktur. Vor dem Inverkehrbringen soll ein Zähler bei mindestens vier verschiedenen Durchflüssen in seinen Betriebsbedingungen charakterisiert werden. Die vier Durchflusspunkte werden mit Q_1 bis Q_4 bezeichnet, sind in der Durchflussrate steigend und wie folgt definiert (Abbildung 2.8): Q_1 ist der Minstdurchfluss, den ein Zähler mit der vorgegebenen Eichfehlergrenze messen können muss, Q_2 ist der Übergangsdurchfluss, der den gesamten vom Zähler abgedeckten Durchflussbereich in zwei Genauigkeitsbereiche einteilt, Q_3 ist der Dauerdurchfluss, auf den der Zähler im Betrieb ausgelegt ist, und Q_4 ist der Überlastdurchfluss, bei welchem der Zähler für kurze Zeit innerhalb der Eichfehlergrenze arbeiten können muss. Der Messbereich des Zählers wird über den R-Wert angegeben, ist das Verhältnis zwischen Dauerdurchfluss Q_3 und Minstdurchfluss Q_1 und wird wie folgt berechnet:

$$R = \frac{Q_3}{Q_1}. \quad (2.10)$$

Innerhalb des Durchflussbereichs Q_1 bis Q_4 hat der Zähler einen maximal zulässigen Fehler, der nicht überschritten werden darf. Im Bereich von Q_1 bis Q_2 ist eine Abweichung von bis zu $\pm 5\%$ für Zähler, die in Verkehr gebracht werden sollen, zulässig; im Bereich von Q_2 bis Q_4 ist eine Abweichung von maximal $\pm 2\%$. Um den Fehler zu bestimmen, wird die Messabweichung mittels einer geeigneten Referenzanlage, wie eingangs beschrieben, ermittelt. Die Messabweichung e ergibt sich aus der Differenz des ermittelten Volumens, einmal dem des Zählers $V_{\text{Zähler}}$ und einmal dem der Referenz V_{Referenz} und wird üblicherweise in % angegeben:

$$e = \frac{V_{\text{Zähler}} - V_{\text{Referenz}}}{V_{\text{Referenz}}}. \quad (2.11)$$

Bei dieser Prüfung wird der gewählte Durchfluss während der Messung konstant gehalten. Wird eine gravimetrische Referenz verwendet, wird die Masse über die Dichte des Mediums in ein Volumen umgerechnet. Die Dichte kann dabei entweder durch eine Messung in der Messstrecke oder in der Regel über eine separate Dichtemessung bestimmt werden.

Um eine realitätsnahe Prüfung von Wasserzählern durchführen zu können, ist es zunächst notwendig zu wissen, welche Durchflussraten in der Realität

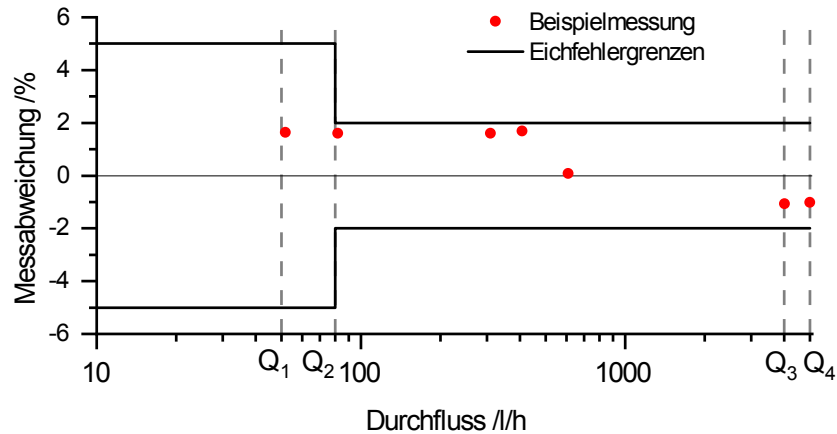


Abbildung 2.8: Eichfehlergrenzen und exemplarische Bestimmung der Messabweichung eines Wasserzählers

auftreten. Die Prüfung der Messrichtigkeit bei häufig auftretenden Durchflussraten ist von KARADIREK (2020) und ARREGUI et al. (2018) exemplarisch durchgeführt worden. Eine dementsprechende Prüfung ist realitätsnäher, ohne den Umbau eines Prüfstands möglich und wurde zu Vergleichszwecken auch für die hier untersuchten Wasserzähler durchgeführt (WARNECKE et al., 2021). Die zusätzlichen Prüfpunkte sind die Quantile der in SCHUMANN et al. (2021) dargestellten Verteilungsfunktion des Wasserverbrauchs und daher mit 25, 50 und 75 indiziert. Für einen Wasserzähler mit $Q_3 = 4000 \text{ l/h}$ und $R = 160$ ergeben sich dadurch beispielsweise folgende in Tabelle 2.1 aufgeführte Prüfpunkte.

Tabelle 2.1: Vorgeschriebene und zusätzliche Prüfpunkte am Beispiel eines Hauswasserzählers $Q_3 = 4000 \text{ l/h}$ und $R = 160$

Bisher vorgeschriebene Prüfpunkte	
Q_1	25 l/h
Q_2	40 l/h
Q_3	4000 l/h
Q_4	5000 l/h
Zusätzliche Prüfpunkte	
Q_{25}	300 l/h
Q_{50}	400 l/h
Q_{75}	600 l/h

Die Ergebnisse sind als Beispielmessung exemplarisch in Abbildung 2.8 und für die in dieser Arbeit verwendeten Wasserzähler im Anhang C vollständig dargestellt. Alle betrachteten Zähler erfüllen bei der statischen Prüfung im All-

gemeinen die gesetzlichen Anforderungen an die Eichfehlergrenzen bei Wasserzählern. Das gilt in der Regel sowohl für die bisherigen Prüfpunkte sowie für die neuen, zusätzlichen Prüfpunkte. Es besteht bei der Messabweichung kein statistisch signifikanter Unterschied zu den Fehlergrenzen. Signifikant bezieht sich in dieser Arbeit auf ein Vertrauensintervall von 2σ , wird bei einer Normalverteilung nach Gauß verwendet und ist in MIEKE (2014) tiefer gehender erläutert. Das bedeutet, dass das Ergebnis mit einer Wahrscheinlichkeit von 95,45 % innerhalb der Vertrauensgrenzen liegt. Im Vergleich zu der klassischen Prüfung werden durch die Erweiterung um die zusätzlichen Prüfpunkte die in der Realität häufig auftretenden Durchflüsse berücksichtigt. Die erweiterte Prüfung ist damit realitätsnäher, das dynamische Verbrauchsverhalten ist damit aber nicht abgebildet.

3 Prüfstandsaufbau

Zur Durchflusserzeugung und -messung gibt es, wie in Kapitel 1 beschrieben, mehrere Möglichkeiten. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Experimente zur Durchflussbestimmung basieren auf dem gravimetrischen Messprinzip und wurden auf einem etablierten Prüfstand in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) durchgeführt, der ausführlich charakterisiert ist. Für die Erzeugung und Messung von Durchflüssen wurde die DN25-Messstrecke des Experimentier- und Wasserzählerprüfstands (EWZP) im Fachbereich 1.5 „Flüssigkeiten“ verwendet (Abbildung 3.1). Die als Referenz verwendete Waage hat einen Messbereich bis 125 kg.



Abbildung 3.1: Experimentier- und Wasserzählerprüfstand

Der Durchfluss wird standardmäßig durch eine Pumpe erzeugt und liegt für die genutzte Messstrecke zwischen 50 l/h und 35.000 l/h . Der Prüfstand kann für Durchflussmessungen bei Flüssigkeitstemperaturen im Bereich von 10 °C bis 35 °C eingesetzt werden. Zu Überwachungszwecken sind vor der Messstrecke ein Durchflussmessgerät, ein Drucksensor und ein Temperatursensor installiert worden. Das Durchflussmessgerät war ein ADMAG AE magnetisch-induktiv der Firma Yokogawa mit der Nennweite DN25 und dem Messbereich von 0 l/h - 10.000 l/h . Die Temperatursensoren waren Rosemount Pt100-Sensoren der Genauigkeitsklasse 1/10 B und die Drucksensoren waren vom Typ Cerabar S

mit einem Messbereich von 0 *bar* bis 10 *bar* und einer erweiterten Messunsicherheit von 0,5 %. Zwei weitere Temperatur- und Drucksensoren sind stromabwärts installiert worden. Mit einem Differenzdruckmessgerät wurde der Druckabfall über dem Prüfling gemessen. Die erweiterte Messunsicherheit des Prüfstandes beträgt bei einer konventionellen stationären Messung $\pm 0,1 \%$ ($k = 2$). Die Temperaturstabilität wird durch einen separaten Kühlkreislauf gewährleistet und beträgt $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Die Messungen wurden standardmäßig und wie folgt beschrieben durchgeführt. In einem ersten Schritt wurde die Prüfflüssigkeit Wasser mit einer konstanten Durchflussrate durch das System geleitet, um stabile Messbedingungen zu erreichen. Ein Teil des Durchflusses wurde dann von diesem Kreislauf über einen Bypass in die Messstrecke umgeleitet, in der einer oder mehrere Prüflinge installiert waren. Bei mechanischen Zählern wurden die Messungen mit Hilfe von Abtastköpfen durchgeführt, bei elektronischen Zählern wurde deren Impulsausgang direkt verwendet. Die Umrechnung zwischen Volumen und Masse erfolgte über die Dichte, die durch eine separate Messung mit einem Biegeschwinger DMA 5000 der Firma Anton Paar ermittelt wurde. Die Genauigkeit der Dichtemessung beträgt nach ANTON PAAR GMBH (2015) $0,000005 \text{ kg/m}^3$ bei einer Unsicherheit der Temperatur von $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$. Nach dem Prüfling wurde das Wasser über einen Diverter, der sowohl mit Stehend- als auch Fliegend-Start-Stopp betrieben werden kann, in das Wägegefäß geleitet.

Für die Erzeugung der dynamischen Durchflussprofile wurde die in Abbildung 1.2 links gezeigte Kavitationsdüsenapparatur in den Prüfstand integriert. Um dynamische Durchflussprofile zu erzeugen, wurden die jeweils benötigten Düsen geöffnet. Dadurch ergibt sich ein Durchflussbereich bis 2000 l/h , der mit der Apparatur abgedeckt wurde. Der gesamte Aufbau ist als Fließschema in Abbildung 3.2 zusammenfassend dargestellt.

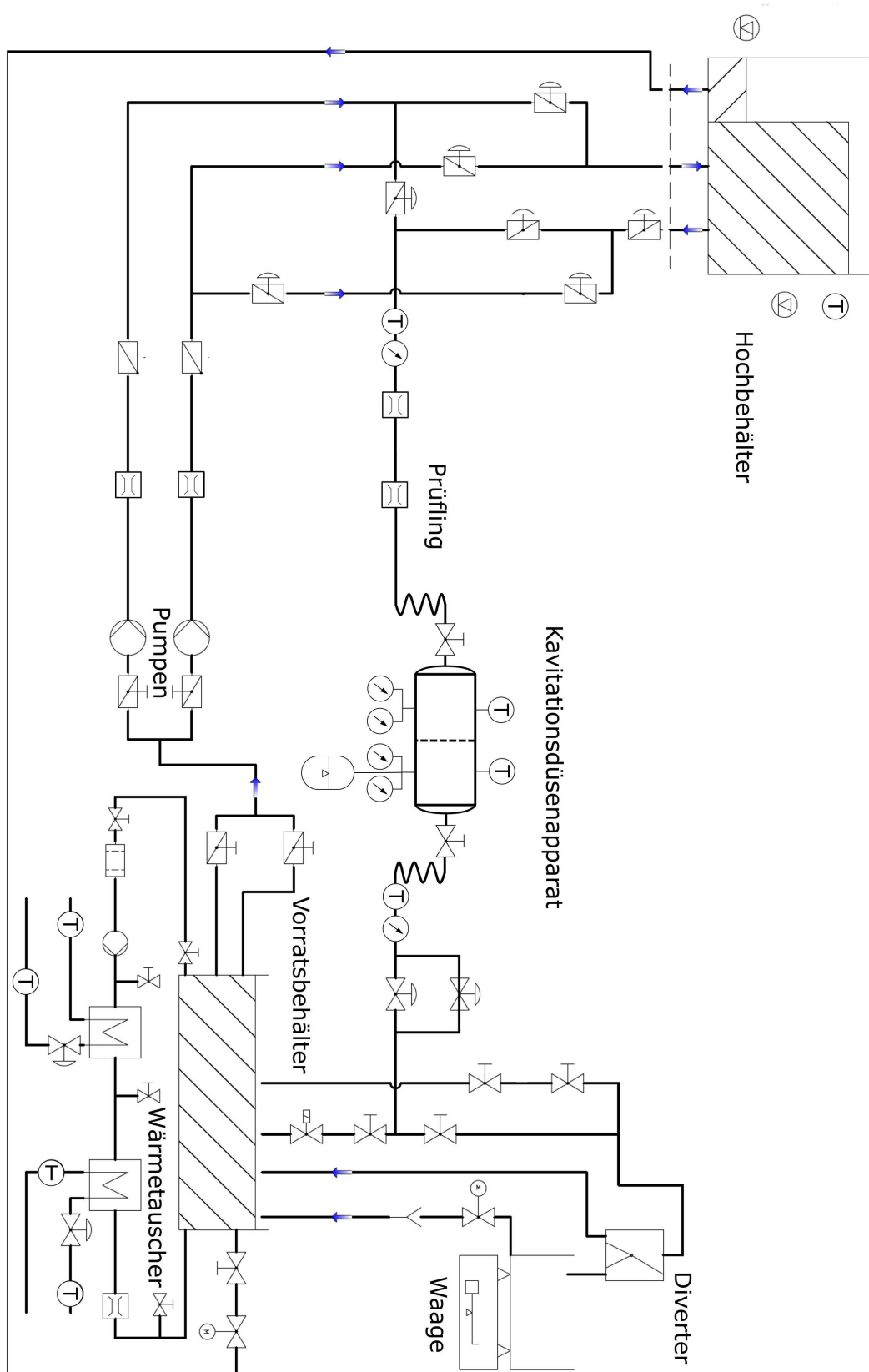


Abbildung 3.2: Fließschema des Experimentier- und Wasserzählerprüfstands der PTB mit Kavitationsdüsenapparat, angelehnt an PTB (2020)

4 Charakterisierung von Kavitationsdüsen

Kavitationsdüsen werden zur Realisierung dynamischer Lastwechsel verwendet, weil mit ihnen schnelle Durchflussänderungen und sich schnell stabilisierende Durchflussraten in der Größenordnung < 1 s mit hoher Reproduzierbarkeit erzeugen lassen. Der Durchfluss einer Düse, die im kavitierenden Zustand betrieben wird, hängt wesentlich von der Geometrie der Düse, den Druck- und Temperaturverhältnissen und dem Betriebsmedium ab. Mit den zu dem Thema erarbeiteten Ergebnissen sowie Veröffentlichungen anderer Arbeitsgruppen ließen sich bisher keine eindeutigen Aussagen dazu machen, wo die Grenzen der Einsatzbedingungen von Kavitationsdüsen liegen. Die von SCHUMANN (2020) durchgeführten Experimente wurden mit Venturi-Düsen mit toroidalem Halsbereich durchgeführt. Die Ausprägung der Kavitation bei Durchflussmessungen mit der Herschel-Venturi-Geometrie wurde zwar von BRINKHORST (2017) simuliert, ist unter experimentellen Bedingungen für Düsendurchmesser $d < 10$ mm jedoch unbekannt. Offen sind außerdem die Fragen, welchen Einfluss die Temperatur und der Druck in der Kavitationdüse und damit unter anderem der Dampfdruck auf die Durchflussmessung haben und wie sich allgemein nachweisen lässt, ob Kavitation während einer Messung vorhanden ist, um einen stabilen Durchfluss zu gewährleisten.

Mit Bezug auf die eingangs erwähnten Fragestellungen werden die Kavitationsdüsen im folgenden Kapitel in vier Unterkapiteln umfangreich charakterisiert. Im ersten Abschnitt wird die Geometrie untersucht, da es dazu bisher keine Untersuchungen gab, und um Einflüsse auf den Durchfluss festzustellen. Im zweiten Abschnitt wird zur Bestimmung der Betriebsbedingungen von Kavitationsdüsen vor allem der Druck und die Temperatur variiert, um den Einfluss auf den Durchfluss sowohl qualitativ als auch quantitativ zu ermitteln. Im nächsten Abschnitt wird darauf aufbauend der parallele Betrieb der Düsen untersucht, da hier der Druck des Mediums und die Position des Drucksensors einen bisher nicht weiter untersuchten Einflussfaktor darstellen. Im vierten Abschnitt wird die Schallemission von Kavitationsdüsen betrachtet, um eine vom Durchfluss unabhängige Validierungsmethode der Kavitationsausprägung durch die akustische Erfassung des Kavitationsbeginns aufzuzeigen. Als Abschluss dieses Kapitels wird in einem fünften Unterkapitel die Frage geklärt,

Tabelle 4.1: Zur Verfügung stehende Herschel-Venturi-Düsen von zwei Herstellern mit den vorgegebenen Düsenhalsdurchmessern

Hersteller Frey		Hersteller PTB	
Durchmesser <i>/mm</i>	Anzahl	Durchmesser <i>/mm</i>	Anzahl
0,14	4	1,2	2
0,2153	3	1,8	2
0,2691	3	2,2	2
0,3404	3	2,6	2
0,4169	3	3,0	2
0,5382	3	4,0	2
0,6913	3		
0,74	4		
1,4	4		
2,6	4		

ob die im Betrieb häufig auftretende Reinigung einen Einfluss auf die Durchflussmessung hat und inwieweit dies zukünftig berücksichtigt werden muss.

Für die Experimente standen die in Tabelle 4.1 aufgelisteten Düsen zur Verfügung. Die aufgeführten Durchmesser entsprechen der Vorgabe. Düsen gleichen Durchmessers wurden jeweils laufend nummeriert, sodass zum Beispiel die beiden Düsen mit 1,2 *mm* Durchmesser im Düsenhals als 1,2-1 und als 1,2-2 bezeichnet wurden. Die in der linken Spalte der Tabelle aufgeführten Düsen sind in zwei Chargen von der Firma Frey gefertigt worden und die auf der rechten Seite der Tabelle vom wissenschaftlichen Gerätebau der PTB. Bereits nach ersten Betrachtungen wurde festgestellt, dass die vorgegebenen Toleranzen von 0,1 μm bei der ersten Charge der Düsen von Firma Frey (linke Spalte Tabelle 4.1) nicht erfüllt werden konnten. Dadurch wurden bei allen weiteren Düsen die Toleranzen und auch die Bezeichnungen nicht mehr so detailliert angegeben. Mit der Untersuchung von Düsen verschiedener Produzenten lassen sich später Rückschlüsse ziehen, ob sich Unterschiede im Kavitationsverhalten aufgrund der Herstellungsfirma ergeben. Durch die Herstellung mehrerer Düsen mit dem gleichen vorgegebenen Durchmesser lässt sich durch geeignete Messungen die Reproduzierbarkeit der Fertigung bewerten.

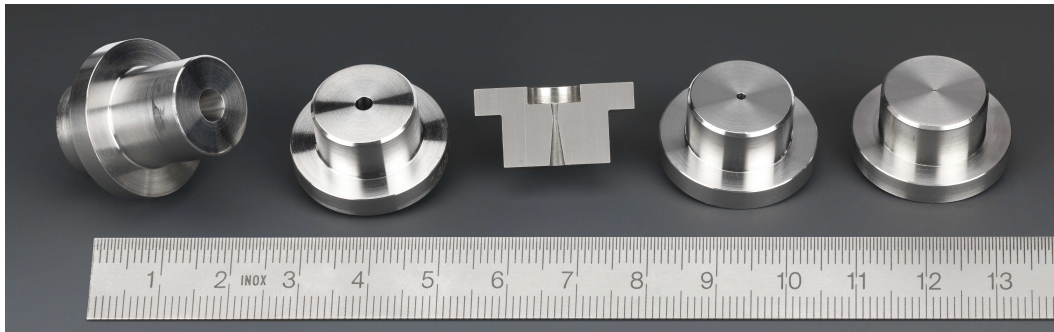


Abbildung 4.1: Herschel-Venturi-Düsen mit Halsdurchmesser d von $0,14\text{ mm}$ bis $2,6\text{ mm}$, Maßstab in cm

4.1 Geometrie der Herschel-Venturi-Düsen

Um den Einfluss der Geometrie auf den Durchfluss untersuchen zu können, wurden die Herschel-Venturi-Düsen vor den Durchflussmessungen mit verschiedenen Verfahren untersucht. Damit sollten grundsätzliche Charakterisierungsmöglichkeiten aufgezeigt werden und die Basis für spätere Untersuchungen, beispielsweise zu Abnutzungserscheinungen, gelegt werden, um die Langzeitstabilität der Düsen zu beurteilen. Für die verwendeten Düsen gab es bisher keine Darstellungen zur Untersuchung der Geometrie im Detail. Die Herstellerangaben der Düsenhalsdurchmesser beruhen auf Schätzungen mittels Durchlichtmikroskopie und sind somit subjektive Beschreibungen ohne Messunsicherheit und Konfidenzintervall, sodass diese Werte nur als Richtwerte betrachtet werden können. Neben der klassischen Mikroskopie und der Bestimmung des Düsenhalsdurchmessers mittels Durchflussmengenmessung wurden die Verfahren Computertomographie, Rasterelektronenmikroskopie und ein Profils Scanner eingesetzt. Es wurden dabei die jeweiligen Standardverfahren benutzt, sodass auf tiefergehende technische Ausführungen verzichtet wird. Die unterschiedlichen Verfahren boten die Möglichkeit, jeweils verschiedene geometrische Parameter der Herschel-Venturi-Düsen zu bestimmen.

Für eine erste Übersicht und Einordnung der Größenordnung ist in Abbildung 4.1 eine Auswahl der betrachteten Düsen mit einem Maßstab in cm dargestellt. Die Düsen hatten laut Vorgabe im Düsenhals Durchmesser von $0,14\text{ mm}$, $0,74\text{ mm}$, $1,4\text{ mm}$ und $2,6\text{ mm}$, wobei die zur Darstellung der Innengeometrie im Querschnitt gezeigte Düse laut Hersteller einen Durchmesser $d = 1,4\text{ mm}$ hatte. Anhand des Querschnittes in der Abbildung kann man den charakteristischen Aufbau einer Herschel-Venturi-Düse erkennen. Für eine Beschreibung und Vermessung der Geometrie waren Verfahren mit einer Auflösung im μm -Bereich notwendig.

4.1.1 Kanten- und Oberflächenstruktur

Für eine hochauflösende Bildgebung der Düsengeometrie wurden die Düsen vom Fachbereich 5.5 der PTB im Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht. Damit sollen Informationen über die bisher unbekannte Struktur der Oberfläche und der Kante im Inneren der Düse gewonnen werden.

Methoden

Bei der Rasterelektronenmikroskopie wird durch einen Elektronenstrahl Material einer Probe angeregt und es kommt durch die Wechselwirkung zu verschiedenen Strahlungen. Bei dem verwendeten Verfahren findet die Bildgebung durch das Signal der Sekundärelektronen (SE) statt. Diese Elektronen sind durch eine geringe Energie gekennzeichnet und stammen aus dem oberen *nm*-Bereich der Probe, sodass im wesentlichen die Topographie der Probe abgebildet wird.

Ergebnisse

Aus dem SE-Signal werden Übersichtsabbildungen erstellt und die Kante am Einlass des Zylinders detailliert abgebildet (Abbildung 4.2; Anhang A Abbildung A.1/A.2). Beide Übersichtsbilder zeigen auf der nicht für die Strömung relevanten Außenseite der Kavitationsdüse Kerben, die bei der Fertigung oder Handhabung entstehen, und eine gleichmäßig glatte Oberfläche im Inneren der Düse. Auch die Abbildung 4.2 rechts mit einer Vergrößerung um einen Faktor 1000 zeigt eine gleichmäßige Oberfläche im Inneren der Düse. Die Detailaufnahme der Kante in Abbildung A.2 im Anhang bestätigt die glatte Struktur der Oberfläche und dass es keine größeren Kontraste in der Abbildung der Oberfläche gibt. Die Kanten sowohl am Einlass des Konus als auch im Düsenhals sind gleichmäßig und lassen keine Auffälligkeiten erkennen. Die beiden Detailaufnahmen zeigen bei detaillierter Betrachtung auf der gesamten Oberfläche eine feine Strukturierung. Diese Struktur ist wahrscheinlich durch die Herstellung beim Drehen und bei der weiteren Bearbeitung entstanden.

Mit dem Verfahren am REM kann die Oberfläche sehr hochaufgelöst abgebildet werden und damit ein Bild der Kante erzeugt werden, die im Betrieb entscheidend für das Einsetzen der Kavitation im Düsenhals ist. Größere Abweichungen der Geometrie von der Zylinder- und Konusform und Veränderungen der Oberfläche in der Größenordnung μm lassen sich mit diesem Verfahren qualitativ beschreiben. Die Auswahl der betrachteten Kavitationsdüsen haben alle

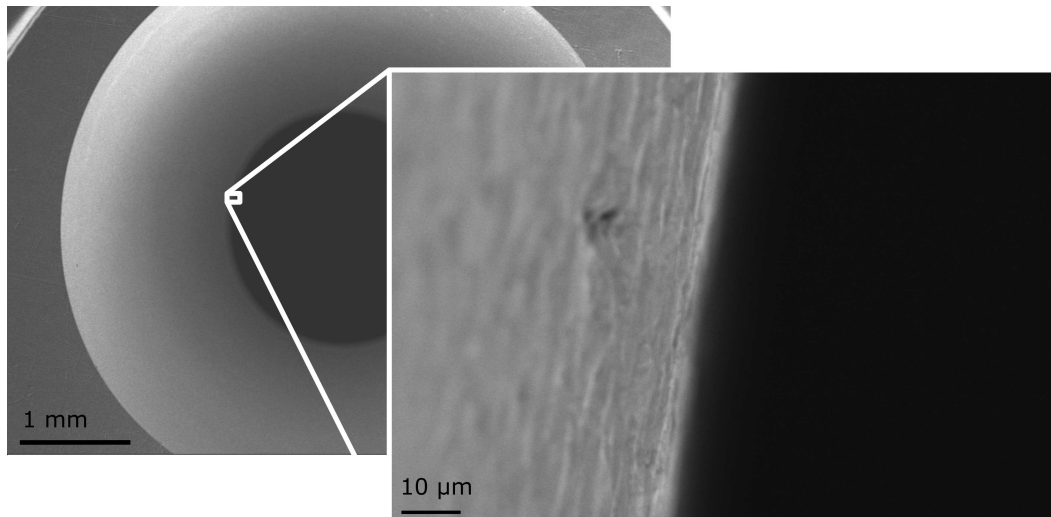


Abbildung 4.2: REM: SE-Abbildung, Kavitationsdüse 2,6 mm Übersichtsbild Einlass; Vergrößerung: Kante Zylinder

eine gleichmäßige, kreisförmige Öffnung und eine glatte Oberfläche. Für die Durchflussmessung ist die Kavitationsausprägung und damit die Geometrie ausschlaggebend. Letztere sorgt für ein gleichmäßiges Einsetzen der Kavitation an der hier sichtbaren Kante am Einlass des Düsenhalses. Für die Betrachtung von Material- und Geometrieänderungen im μm -Bereich bei der Benutzung einer Kavitationsdüse ist das REM sehr gut geeignet. Für eine standardmäßige Bestimmung des Durchmessers oder die genaue Untersuchung der Oberfläche im Inneren des Zylinders wäre dieses Verfahren jedoch zu aufwändig.

4.1.2 Optische Durchmesserbestimmung

Das Durchlichtmikroskop im Fachbereich 1.5 der PTB wurde dazu verwendet, den Durchmesser des zylindrischen Düsenhalsbereichs zu bestimmen, der nach Gleichung 2.6 über den Querschnitt den Durchfluss bestimmt. Das Ziel war es, mit einem zerstörungsfreien Verfahren und einer technisch einfachen Umsetzung detaillierte Informationen über die Innengeometrie der Düse zu bekommen.

Methoden

Die Untersuchungen wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit durchgeführt, zusammen mit der Methode in KAY (2019) detaillierter dargestellt und im Kontext weiterer Charakterisierungsmöglichkeiten von Kavitationsdüsen verglichen. Basis der Untersuchung ist die Aufnahme von Kontrastunterschieden

Tabelle 4.2: Düsenhalsdurchmesser, ermittelt durch optische Mikroskopie im Vergleich zur Herstellerangabe und der Berechnung mittels Durchflussmessung

	Nr.	Durchmesser		
		Hersteller	Mikroskop	Durchflussmessung
Messfehler		n.A.	0,001 mm	0,1 % ($k=2$)
	0,74-1	0,7390 mm	0,737 mm	0,7156 mm
	0,6913-2	0,6891 mm	0,684 mm	0,6503 mm
	0,5382-3	0,5329 mm	0,532 mm	0,5269 mm
	0,4169-2	0,4179 mm	0,417 mm	0,3971 mm
	0,3404-3	0,3389 mm	0,338 mm	0,3332 mm
	0,2691-3	0,2698 mm	0,268 mm	0,2537 mm
	0,2153-3	0,2141 mm	0,214 mm	0,2057 mm

mittels einer Kamera. Über die Korrelation der Kontraste in verschiedenen Fokusebenen des Mikroskops wurde so der Punkt des engsten Querschnitts im Düsenhals bestimmt.

Ergebnisse

Die Ergebnisse für die Durchmesserbestimmung des Kavitationsdüsenhalses mit dem Mikroskop sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst. Außerdem sind die Angaben des Herstellers sowie der sich aus einer Durchflussmessung ergebende Durchmesser in der Tabelle angegeben. Der mit dem Mikroskop ermittelte Durchmesser stimmt mit den Angaben des Herstellers überein und ist für alle Düsen systematisch größer als der aus der Durchflussmessung ermittelte Durchmesser. Die Differenz entsteht durch eine Reduzierung des effektiven Strömungsquerschnitts des Flüssigkeitsstroms durch die Kavitationsschicht, die durch diese Analyseverfahren auf eine Größenordnung von $2 \mu\text{m}$ geschätzt wurde (KAY, 2019).

Die Methode der Durchlichtmikroskopie und die hier durchgeführte anschließende Auswertung sind für die Bestimmung des Durchmessers des Düsenhalses geeignet und lassen in Kombination mit der Durchflussmessung eine Abschätzung der Kavitationsschichtdicke zu. Die Voraussetzung ist, dass der Zylinder des Düsenhalses axial ausgerichtet ist, da ansonsten keine scharfe Kante zur Durchmesserbestimmung sichtbar ist. Auch kann für das Verfahren keine standardmäßige Messunsicherheit angegeben werden, da in die Positionierung wie

auch in die Auswertung der Abbildungen mehrere subjektive Einschätzungen eingehen, die nicht quantifizierbar sind (MICKAN et al., 2018). Die Messung des Durchmessers über Bilder in 10 verschiedenen Fokusebenen erlaubt die grobe Abschätzung eines absoluten Gesamtfehlers von $U_{opt} = 1 \mu m$.

4.1.3 Innengeometrie

Mit der im Abschnitt 4.1.2 vorgestellten Methode lassen sich zweidimensionale Informationen zum Beispiel über den inneren Durchmesser der Kavitationsdüse herausfinden. Um den Prozess der Kavitation in der Herschel-Venturi-Düse zu verstehen und die Einflussfaktoren auf den Durchfluss zu diskutieren, ist aber auch die Kenntnis der dreidimensionalen Düsengeometrie hilfreich. Mittels Computertomographie soll exemplarisch eine dreidimensionale Darstellung der Innengeometrie einer Kavitationsdüse erfolgen und der Einfluss auf den Durchfluss evaluiert werden.

Methoden

Bei diesem Verfahren wird aus dem Absorptionsverhalten von Röntgenstrahlung des untersuchten Materials mit einem Computer im Schnittbildverfahren eine dreidimensionale Darstellung des Objektes erstellt. Die Aufnahmen wurden im Fachbereich 5.3 der PTB durchgeführt, wobei aufgrund der starken Absorption des Materials der Kavitationsdüsen zur Darstellung der inneren Struktur äußeres Material entfernt werden musste, sodass die Düse später nicht mehr standardmäßig zur Durchflussmessung einsetzbar war.

Ergebnisse

In Abbildung 4.3 ist die innere Geometrie für eine Düse mit $2,6 \text{ mm}$ Durchmesser des Düsenhalses gezeigt. Anhand der im Anhang A dargestellten Schnitte sind die geometrischen Parameter von zwei Düsen ermittelt worden und in Tabelle 4.3 zusammengefasst.

Die Abbildungen zeigen, dass mit Computertomographie detaillierte Aufnahmen der Innengeometrie möglich sind. Es wurde festgestellt, dass die Winkel φ_e und φ_d den erwarteten Werten von $\varphi_e(\text{Soll}) = 10,5^\circ$ und $\varphi_d(\text{Soll}) = 3,5^\circ$ entsprechen. Bei dem Verhältnis der Düsenhalslänge zum Durchmesser l/d liegt der Wert der kleineren Kavitationsdüse Nr. 0,14-3 mit 2,57 deutlich über der Vorgabe von $l/d(\text{Soll}) = 1$. Da die Düsenhalslänge im Verhältnis

Tabelle 4.3: Dimensionen der Düsen mit computertomographischer Analyse bestimmt

Düse Nr.	Durchmesser	Länge	Konuswinkel		Verhältnis
	d /mm	l /mm	Einlass φ_e /°	Diffusor φ_d /°	l/d
2,6-2	$2,57 \pm 0,04$	$2,63 \pm 0,05$	10,61	3,56	1,02
0,14-3	$0,139 \pm 0,008$	$0,357 \pm 0,002$	10,15	3,01	2,57

zum Durchmesser einen maßgeblichen Einfluss auf die Ausbildung der Kavitationsschicht im Inneren der Düse hat, sollten mit einem weiteren, zerstörungsfreien Verfahren diese Maße für die anderen eingesetzten Düsen überprüft werden.

4.1.4 Oberflächenkontur

Für eine weitere Charakterisierung der Kavitationsdüsen wurde vom Fachbereich 5.1 der PTB ein Profils Scanner verwendet, um die Oberflächenprofile im Inneren der Düse zu bestimmen. Dieses Verfahren wurde bei der Charakterisierung von mit Gas kritisch durchströmten Düsen bereits erfolgreich eingesetzt (XU et al., 2015). Mit dem Profils Scanner ließ sich auch für die verwendete Herschel-Venturi-Düsengeometrie die Länge des Düsenhalses und die Rundung der Kanten bestimmen sowie die Rauigkeit in der Düse ermitteln. In Kombination mit der Durchmesserbestimmung mittels eines Mikroskops ist damit die Möglichkeit gegeben, zerstörungsfrei das Verhältnis zwischen Durchmesser und Länge des Düsenhalsbereichs abzuschätzen. Allgemein ist mit dieser Methode eine rückgeführte Charakterisierung der Innengeometrie möglich, die entscheidend für die Ausbildung der Kavitation und damit für den Durchfluss ist.

Methoden

Es wurden exemplarisch drei Kavitationsdüsen untersucht (XU et al., 2019), eine mit 2,6 mm Durchmesser und zwei kleinere mit 0,14 mm Durchmesser im Düsenhals. Bei der größeren Düse wurden vier um 90° versetzte Profile, bei den kleineren Düsen jeweils ein Profil, aufgenommen. Die Lage der Profilmessungen ist in Abbildung 4.4 dargestellt, wobei die Blickrichtung in der Skizze der

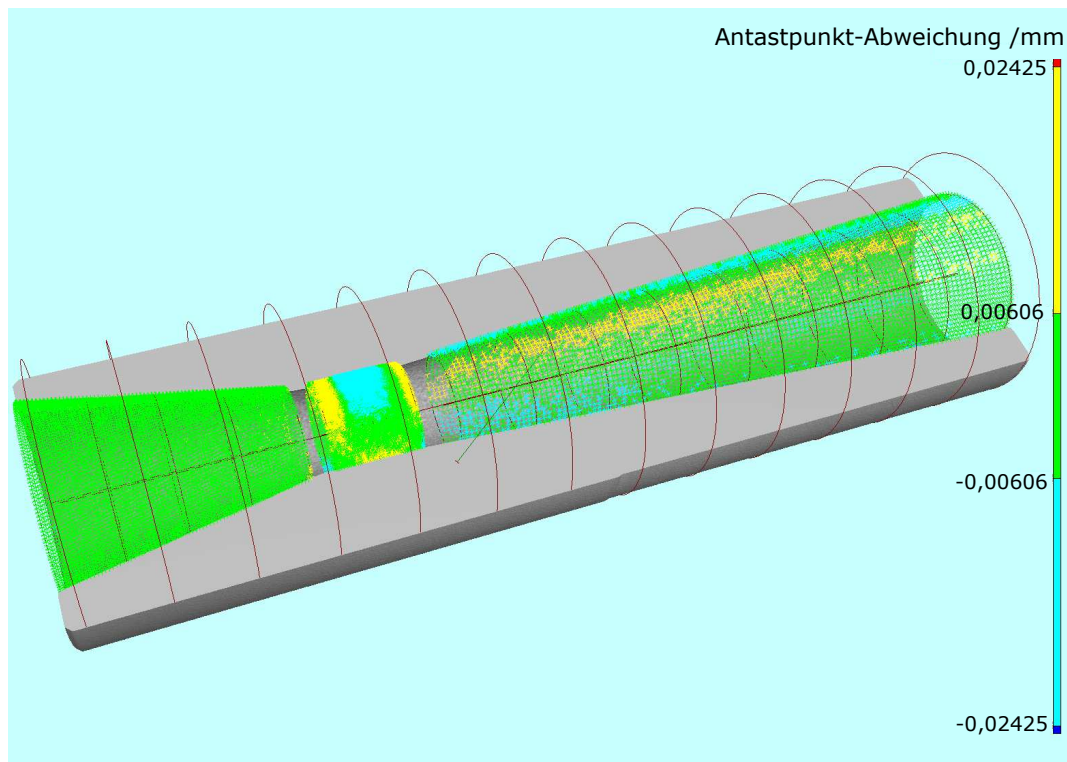


Abbildung 4.3: Computertomographische Aufnahme der Düsengeometrie

Durchflussrichtung im Prüfstand entspricht. Die Auflösung des Profilsanners liegt bei 1 nm in der Höhe und bei $3,5\text{ nm}$ in X-Position.

Der Mittenrauwert R_a dient als Maß für die Rauigkeit und wurde nach

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |y(x_n) - \langle y \rangle| \quad (4.1)$$

berechnet. Über die Länge N wurde die Differenz der Höhe der Oberfläche $y(x_n)$ zum Mittelwert $\langle y \rangle$ aufsummiert und anschließend durch die Länge N geteilt.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Profilmessungen sind in den Abbildungen 4.5 und 4.6 gezeigt. Es ist zu beachten, dass die x- und die y-Achsen unterschiedlich skaliert sind.

Die Messungen zeigen, dass die Düsenhalslänge der größeren Düse mit $l \approx 2,6\text{ mm}$ dem Durchmesser von $d = 2,6\text{ mm}$ entspricht, wobei eine scharfe Kante, besonders auf der rechten Seite, im Einlass nicht vorhanden ist. Für

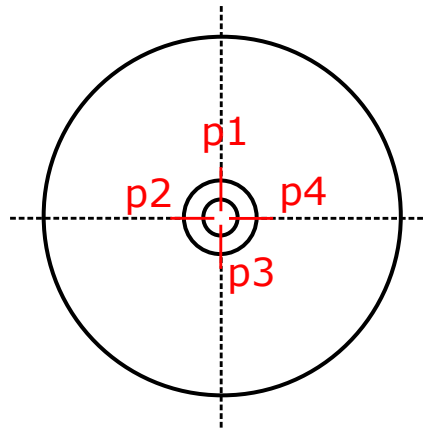


Abbildung 4.4: Skizze Kavitationsdüse: Profilsensoren mit Blick in Durchflussrichtung

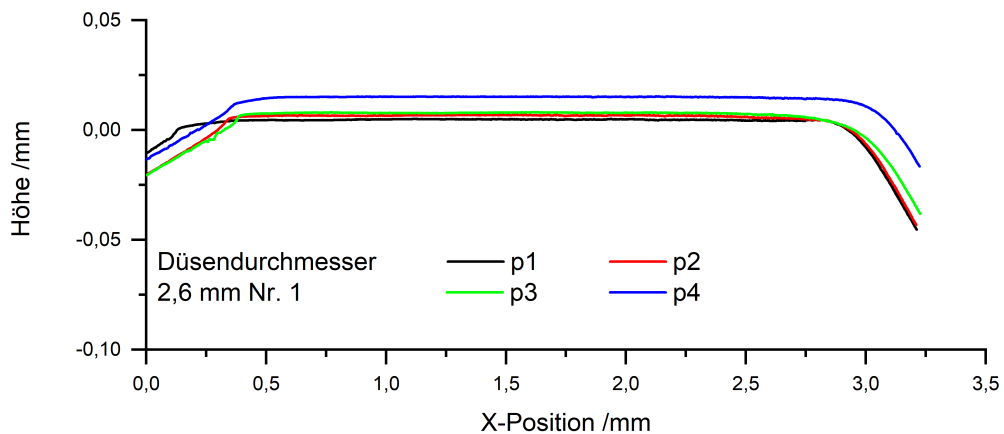


Abbildung 4.5: Profilschannermessung Kavitationsdüsenhals; Düse 2,6 mm Nr. 1 (XU et al., 2019)

diese Düse entspricht das Verhältnis $l/d \approx 1$ dem erwarteten Wert. Bei den kleineren Düsen sind die Kanten deutlicher zu erkennen, wobei wegen des geringen Querschnittes nur eine Profilorientierung messbar war. Die Düsenhalslänge für die kleine Düse mit der Bezeichnung 0,14 mm Nr. 4 beträgt $l_{0,14-4} \approx 0,35 \text{ mm}$ und die Düsenhalslänge der Düse 0,14 mm Nr. 3 beträgt $l_{0,14-3} \approx 0,31 \text{ mm}$. Damit bestätigen diese Werte die Ergebnisse aus Kapitel 4.1.3, dass das Verhältnis l/d der Düsen mit 0,14 mm nominalem Durchmesser deutlich größer als 1 ist, was bei der Auswertung der Durchflussmessung zu berücksichtigen ist und einen Einfluss auf die Ausbildung der Kavitations-schicht haben kann.

Für den Profilschann im Bereich von 0,2 mm bis 0,4 mm beträgt der R_a -Wert für die Düse 0,14-3 $R_a(0,14-3) = 0,06 \mu\text{m}$ und für die Düse 0,14-4 $R_a(0,14-4) = 0,15 \mu\text{m}$. Die Fläche entspricht damit der Rauheitsklasse einer feingeschliffenen Oberfläche. Die R_a -Werte der vier Profilmessungen zwischen 1 mm und

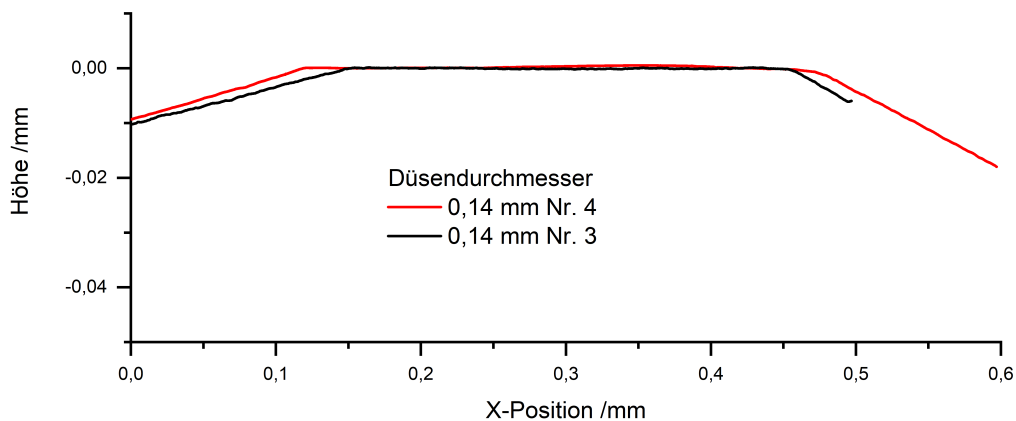


Abbildung 4.6: Profilsclannermessung Kavitationsdüsenhals; Düse 0,14 mm Nr. 3 und Nr. 4 (XU et al., 2019)

2 mm bei der Düse 2,6-1 betragen $R_a(p1) = 0,064 \mu\text{m}$, $R_a(p2) = 0,183 \mu\text{m}$, $R_a(p3) = 0,090 \mu\text{m}$ und $R_a(p4) = 0,053 \mu\text{m}$. Die Werte der Rauigkeitsmessungen liegen alle in der gleichen Größenordnung und entsprechen bei den untersuchten Düsen einer feingeschliffenen Oberfläche. Durch die gleiche Oberflächengüte sind keine auf die Rauigkeit zurückzuführenden Unterschiede im Durchfluss der Herschel-Venturi-Düsen zu erwarten. Im Gegensatz dazu sollte das Verhältnis l/d bei der Auswertung der Durchflussuntersuchungen berücksichtigt werden.

4.2 Einfluss von Druck und Temperatur auf die Kavitation

Neben der geometrischen Charakterisierung ist die Beschreibung der Druckverhältnisse im Zusammenhang mit der Ausprägung der Kavitation obligatorisch, um den von den Düsen generierten Durchfluss zu verstehen. Wie eingangs erwähnt, wurden Düsen mit toroidem Einlass von SCHUMANN (2020) experimentell untersucht und die Herschel-Venturi-Geometrie von BRINKHORST (2017) numerisch evaluiert. In diesen Arbeiten wurden exemplarisch einzelne Experimente durchgeführt, um zum Beispiel die grundsätzliche Entwicklung der Kavitationsschicht mit den numerischen Ergebnissen zu vergleichen oder den Einsatzpunkt der Kavitation in Abhängigkeit vom Druckverhältnis für verschiedene Düsenhalsdurchmesser zu bestimmen. Umfassende Untersuchungen zu den Druckverhältnissen, den Einfluss des Dampfdruckes und Wechselwirkungen mit der Temperatur auf die Kavitation und damit auf den Durchfluss gab es bisher nicht.

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurden umfangreiche Parameterstudien zum Druck und zur Temperatur durchgeführt sowie die Auswirkungen auf den Durchfluss untersucht. Dazu wurde als Prüfstands Aufbau der in Kapitel 3 dargestellte Prüfstand verwendet. Die Ergebnisse ermöglichen ein vertiefendes Verständnis der Kavitationsausbildung im Inneren einer Herschel-Venturi-Düse für das Medium Wasser.

4.2.1 Kontinuierliche Druckverhältnisänderung

Ein entscheidender Parameter bei der Verwendung von Kavitationsdüsen ist das kritische Druckverhältnis, das relevant für die Ausbildung der Kavitationsblase ist. Wenn die Länge der Kavitationsblase größer oder gleich der Länge des Düsenhalses ist, stellt sich ein Durchflussbegrenzungseffekt ein und der Durchfluss ist stabil. Der Durchfluss hängt von der Länge der Kavitationsblase und damit vom Druckverhältnis über der Düse ab. Im Gegensatz zu den experimentellen Arbeiten von BRINKHORST (2017), bei denen der Wert des Durchflussmessgerätes manuell abgelesen wurde, oder von SCHUMANN (2020), bei denen der Durchfluss je Messpunkt über 20 Minuten gemittelt wurde, stand bei den hier gezeigten Untersuchungen die Dynamik in Bezug auf die Profilerzeugung im Vordergrund.

Methoden

Zur Untersuchung wurde der Durchfluss mit dem magnetisch-induktiven Durchflussmessgerät (MID) ADMAG AE DN25 der Firma Yokogawa mit einer Frequenz von ca. 3 Hz kontinuierlich aufgezeichnet, der Vordruck konstant auf $p_{vor} = 4 \text{ bar}$ mit einer Toleranz von $\Delta p = 0,01 \text{ bar}$ eingestellt und der Nachdruck p_{nach} über ein Ventil schrittweise erhöht. Es wurde eine Temperatur im Bereich $T = 20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ mit einer Stabilität von $\Delta T = 0,1^\circ\text{C}$ während einer Messung angestrebt. Als Maß wurde der normierte Durchfluss als Quotient aus dem tatsächlichen Durchfluss Q und dem gemessenen Maximaldurchfluss Q_{max} der jeweiligen Kavitationsdüse verwendet. Dabei wurde experimentell untersucht, bei welchem Druckverhältnis von Nachdruck zu Vordruck sich der normierte Durchfluss signifikant ($Q/Q_{max} < 0,95$) verändert.

Ergebnisse

Der normierte Durchfluss ist in Abbildung 4.7 dargestellt, wobei die Schwankungen im Wesentlichen auf die Unsicherheit des MID-Signals zurückzuführen

sind. Legt man $Q/Q_{max} < 0,95$ als Stabilitätskriterium zugrunde, lässt sich anhand der Abbildung 4.7 A eine Spanne des kritischen Druckverhältnisses von $0,74 < P_{nach}/P_{vor} < 0,83$ für die Kavitationsdüse 1,4 mm Nr. 2 und eine Spanne von $0,79 < P_{nach}/P_{vor} < 0,82$ für die Kavitationsdüse 2,6 mm Nr. 2 aus Abbildung 4.7 B bestimmen. Bei kleineren Druckverhältnissen entspricht der Durchfluss dem stabilen, durch die Kavitation begrenzten Durchfluss; bei größeren Druckverhältnissen tritt keine Kavitation auf und der Durchfluss ist abhängig vom Druckverhältnis.

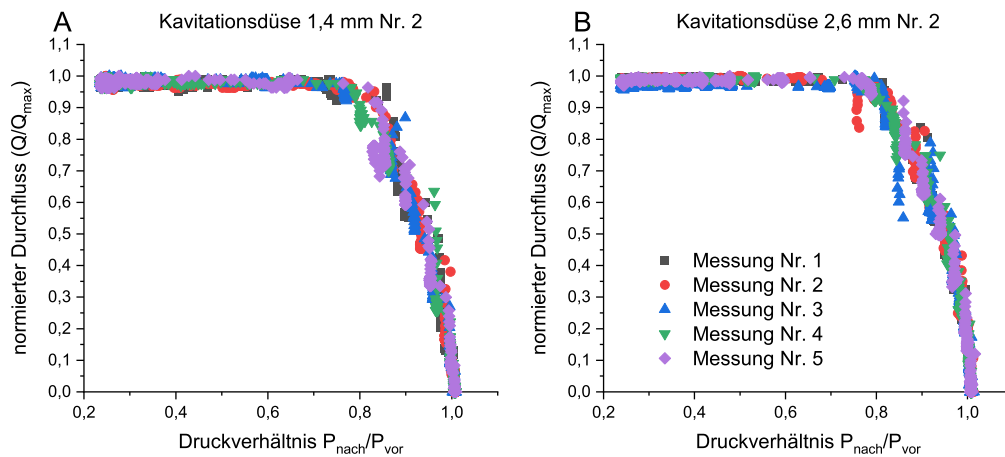


Abbildung 4.7: Bestimmung des Einsetzens der Kavitation, erfasst über die Durchflussmessung mit einem magnetisch-induktivem Durchflussmessgerät bei zwei verschiedenen Düsenhalsdurchmessern; A: 1,4 mm Nr. 2, B: 2,6 mm Nr. 2; 5 Wiederholungsmessungen

Im Vergleich zu der Spanne des kritischen Druckverhältnisses, die in SCHUMANN (2020) über mehrere Düsen bestimmt wurde ($0,7 < P_{nach}/P_{vor} < 0,81$) liegt die Spanne, die mit der hier verwendeten Methode ermittelt wurde, in derselben Größenordnung. Mit den Untersuchungen im Bereich der Abtastung von 3 Hz konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass die Kavitation nicht nur im zeitlichen Mittel einen stabilen Durchfluss erzeugt, sondern dieser erwartungsgemäß auch bei höherer zeitlicher Auflösung stabil ist.

Bei der entsprechenden Auswertung sechs weiterer Düsen (siehe Anhang A Abbildung A.11) fällt auf, dass der maximale Durchfluss nicht im Bereich der Durchflussbegrenzung mit Kavitation liegt, sondern teilweise im Bereich des kritischen Druckverhältnisses von $P_{nach}/P_{vor} \approx 0,75$. Mit einem normierten Durchfluss von $Q/Q_{max} \approx 0,85$ wich die Messung Nr. 1 von Kavitationsdüse 2,6 mm Nr. 1 als Extremum signifikant von den anderen Durchflussmessungen ab. Auch war der Durchfluss durch die Kavitation bei dieser Messung nur bis zu einem Druckverhältnis von $P_{nach}/P_{vor} < 0,44$ stabil. Um diese Abweichung zu

verstehen, sollte die Durchflussmessung in Abhängigkeit von der Temperatur betrachtet und untersucht werden.

Im Anhang A in Tabelle A.1 und Tabelle A.2 sind die Temperaturdaten während einer Messung zusammengefasst. Die Daten zeigen, dass die Temperatur des Prüfmediums während der ersten Messung zwischen $21,46\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $33,39\text{ }^{\circ}\text{C}$ variierte. Bei den Düsen mit einem Halsdurchmesser von $2,6\text{ mm}$ lag die Temperatur allgemein zwischen $22,00\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $25,88\text{ }^{\circ}\text{C}$, die Temperatur der ersten Messung lag mit $28,66\text{ }^{\circ}\text{C}$ deutlich höher. Um den Einfluss der Temperatur auf den Durchfluss zu verdeutlichen, ist die erste Durchflussmessung der Düse $2,6\text{ mm}$ Nr. 1 zusammen mit der fünften Messung derselben Düse in Abbildung 4.8 gezeigt.

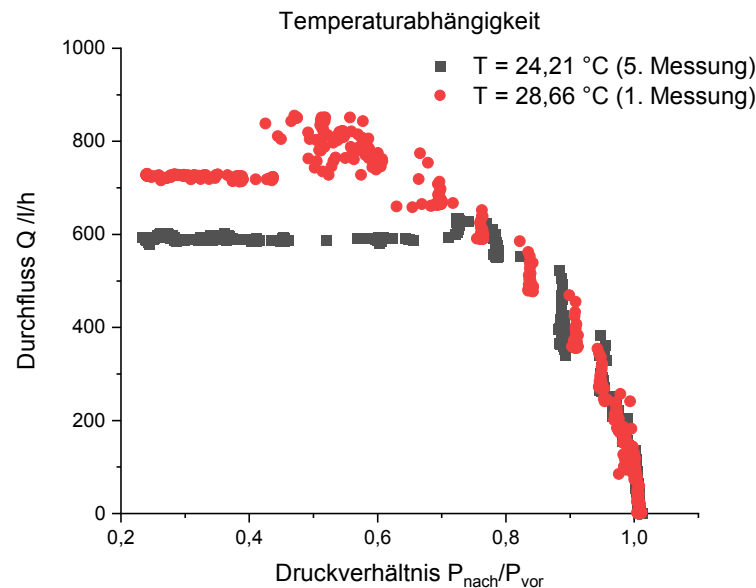


Abbildung 4.8: Temperaturabhängigkeit der Durchflussbegrenzung; Durchfluss gemessen mit dem MID über dem Druckverhältnis

In Abbildung 4.8 ist der Durchfluss Q über dem Druckverhältnis P_{nach}/P_{vor} aufgetragen. Beide Datenreihen sind für $P_{nach}/P_{vor} > 0,75$ ähnlich, in diesem Bereich tritt keine Kavitation auf, und der Durchfluss ist unabhängig von der Temperatur. Die erste Durchflussmessung bei $T = 28,66\text{ }^{\circ}\text{C}$ deutet darauf hin, dass bei der Messung für $P_{nach}/P_{vor} > 0,44$ keine Durchflussbegrenzung durch Kavitation aufgetreten ist. Bei dieser Messung liegt der Durchfluss im Bereich $P_{nach}/P_{vor} < 0,44$ stabil bei $Q_{T28} = 723,8\text{ l/h} \pm 0,4\text{ l/h}$ und damit deutlich über dem Durchfluss $Q_{T24} = 590,3\text{ l/h} \pm 0,3\text{ l/h}$ bei $T = 24,21\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dieser Unterschied tritt auf, obwohl sich der Druck vor der Düse $p_{vor/T24} = 4,0018\text{ bar}$ bei der Messung mit $T = 24,21\text{ }^{\circ}\text{C}$ nicht deutlich von dem Druck von $p_{vor/T28} = 4,0025\text{ bar}$ bei der Messung mit $T = 28,66\text{ }^{\circ}\text{C}$ unterscheidet.

Die Untersuchung bestätigt wie zu erwarten, dass der Durchfluss während der Begrenzung durch Kavitation von der Temperatur abhängt. Die Größenordnung der Durchflussdifferenz deutet darauf hin, dass sich die Temperatur über den Dampfdruck wesentlich auf den Kavitationszustand auswirkt.

Eine weitere Auffälligkeit, die in Abbildung 4.8 sichtbar ist, ist eine temperaturabhängige Erhöhung des Durchflusses über die Begrenzung durch Kavitation hinaus. Bei der Messung mit $T = 24,21\text{ }^{\circ}\text{C}$ trat ein Zustand mit einem deutlich höheren Durchfluss bei Druckverhältnissen von $0,72 < P_{nach}/P_{vor} < 0,78$ auf, bei der Messung mit $T = 28,66\text{ }^{\circ}\text{C}$ zwischen $0,42 < P_{nach}/P_{vor} < 0,70$ mit einem Maximaldurchfluss von bis zu 855 l/h . Gegenüber dem stabil begrenzten Durchfluss mit Kavitation bei $T = 24,21\text{ }^{\circ}\text{C}$ bedeutet das eine Abweichung im Durchfluss von 44 %. Dieses oder ein ähnliches Phänomen wurde von AHMED et al. (2017) ebenfalls beobachtet und dort als metastabiler Zustand beim Übergang vom Durchfluss ohne Kavitation zum Durchfluss mit Kavitation beschrieben. Die Ergebnisse weisen auf einen temperaturabhängigen Effekt auf den Durchfluss hin, der in Zusammenhang mit der Ausprägung der Kavitation steht.

Zwischenfazit

Bei der Bestimmung des Durchflusses in Abhängigkeit vom Druckverhältnis kam es bei dem verwendeten Versuchsaufbau mit einer Erhöhung der Temperatur des Wassers zu einer Durchflusserhöhung. Außerdem reduzierte eine höhere Temperatur um $\Delta T = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ den Bereich einer stabilen Durchflussbegrenzung mit Kavitation auf Druckverhältnisse $P_{nach}/P_{vor} < 0,44$. Der Zustand der Kavitationsausprägung und damit der Durchflussbegrenzung hängt neben dem Druckverhältnis also wesentlich von der Temperatur der untersuchten Flüssigkeit ab. Folglich ist bei der Verwendung von Kavitationsdüsen und der Bewertung des Kavitationszustandes die Beurteilung der Temperatur ebenso relevant wie die Betrachtung des Druckverhältnisses. Wie groß der Einfluss der Temperatur auf den Dampfdruck und den Durchfluss ist, wurde im Folgenden untersucht.

4.2.2 Dampfdruckbestimmung

Der Dampfdruck ist für jede Flüssigkeit unterschiedlich, temperaturabhängig und hat einen wesentlichen Einfluss auf das Einsetzen der Kavitation. Allgemein lässt sich der Durchfluss einer Düse bei einem inkompressiblen Medium über den Druck berechnen, wobei der Druck im Inneren einer kavitieren-

den Düse gleich dem Dampfdruck der Flüssigkeit ist. Der Dampfdruck für Reinstwasser ist bekannt (IAPWS, 2019) und wurde daher im ersten Schritt als Referenz bei der Berechnung des Durchflusses verwendet. In den Prüfständen wurde als Medium Prozesswasser verwendet, das einen geringeren Reinheitsgrad besitzt. Zu klären war daher, wie sich der Dampfdruck zwischen Reinstwasser und Prozesswässern unterscheidet, d. h. ob es einen relevanten Unterschied gibt, aus dem das Erfordernis resultiert, für jedes Prozessmedium die spezifische Dampfdruckkurve zu ermitteln.

Methoden

Der Dampfdruck wurde mit dem Dampfdruckmessgerät Eravap der Firma Eralytic gemessen, welches mit Reinstwasser kalibriert wurde. Die Auflösung des Messgerätes liegt bei 0,1 *mbar*. Neben Reinstwasser und Prozesswasser von zwei verschiedenen Prüfständen wurde als weitere Probe Leitungswasser, entnommen an der PTB, untersucht.

Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.9 dargestellt. Im Temperaturbereich zwischen 5 °C und 40 °C liegt der Unterschied des Dampfdruckes von Reinstwasser und Leitungswasser unterhalb der Auflösung des Dampfdruckmessgerätes. Für die Messungen von Prozesswässern des Prüfstands in der PTB und an einem zweiten Prüfstand eines externen Prüflabors beträgt der Unterschied für den Dampfdruck zu Reinstwasser 0,5 *mbar*. Diese Differenz ist bei der für die Wiederholbarkeit angegebenen Unsicherheit des Dampfdruckmessgerätes von 1,5 *mbar* (ERALYTICS GMBH, 2019) nicht signifikant.

Um den Einfluss der Differenz des Dampfdruckes auf den Durchfluss zu berechnen, wurde anhand eines Beispiels die Veränderung des Durchflusses für verschiedene Einflussfaktoren durchgerechnet. Unter der Annahme einer Düse mit einem Halsdurchmesser von 0,74 *mm* und einem Rohrdurchmesser vor der Düse von 25 *mm* ergibt sich durch die Reinheit des Prüfmediums eine Veränderung im Durchfluss von 0,005 %. Eine Erhöhung der Temperatur um 3 °C entspricht einer Dampfdruckänderung von 5 *mbar*. Daraus ergibt sich eine um den Faktor 10 größere Veränderung im Durchfluss von 0,05 %. Dieser Betrag ist im Vergleich zur erweiterten Messunsicherheit des verwendeten Prüfstands EWZP ($k=2$) von 0,1 % nicht zu vernachlässigen. Ein weiterer Fall in einer möglichen späteren Anwendung stellt ein erhöhter Salzgehalt des Mediums und damit

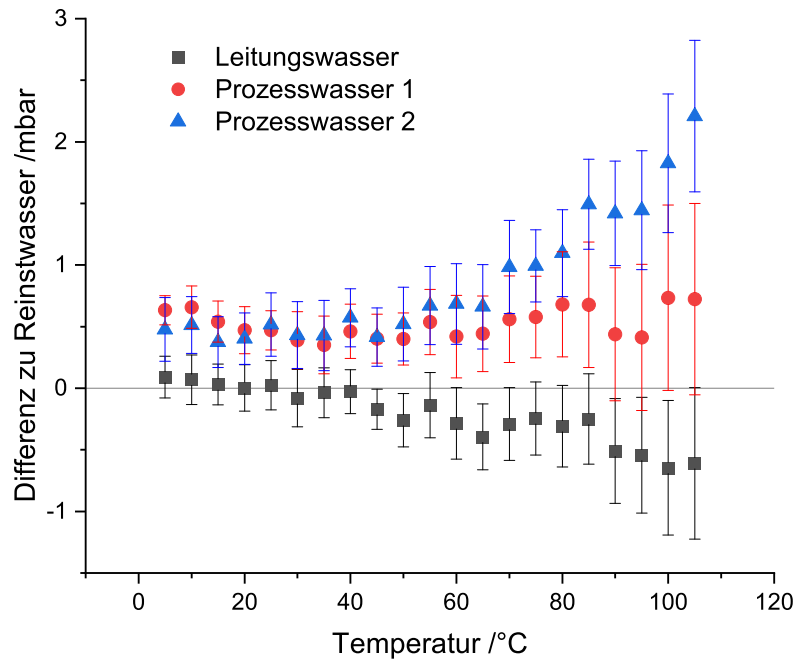


Abbildung 4.9: Temperaturabhängigkeit des Dampfdrucks in Abhängigkeit der Reinheit der Flüssigkeit; Differenz zu Reinstwasser und Standardfehler

eine Dampfdruckerniedrigung dar. Bei einer 2%-igen Lösung sinkt der Dampfdruck um $0,32 \text{ mbar}$, wodurch sich der Durchfluss um $0,003 \%$ verändert. Der Einfluss der Salinität und der Reinheit der Flüssigkeit auf den Dampfdruck sind vergleichbar. Entscheidend für den Durchfluss ist die Temperatur, die den Dampfdruck bestimmt und über das Druckverhältnis von Vordruck p_{vor} zu Dampfdruck p_{Dampf} mit dem Durchfluss zusammenhängt. Die Unterschiede in der Durchflussmessung in Abhängigkeit von der Temperatur (44 %, Kapitel 4.2.1), lassen sich mit der Temperaturabhängigkeit des Dampfdruckes nicht erklären. Die Unterschiede des Durchflusses aufgrund von Änderungen des Dampfdruckes durch die Salinität und die Reinheit der Flüssigkeit können bei der späteren Anwendung der Düsen vernachlässigt werden, der Einfluss durch die Temperatur ist nicht zu vernachlässigen.

4.2.3 Temperaturvariation

Wie die Untersuchungen in den Kapiteln 4.2.1 und 4.2.2 gezeigt haben, ist der Durchfluss durch eine Kavitationsdüse wesentlich von der Temperatur abhängig. Es gab zwar Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit des Durchflusses für verschiedene Medien und diverse Düsengeometrien in Bezug auf Einspritzdüsen beim Motorbau, jedoch ließen sich diese Untersuchungen wegen

wesentlicher Unterschiede in den Betriebsparametern (freier Auslass, $p_{vor} \approx 1000 \text{ bar}$, etc.) nur eingeschränkt mit den hier durchgeführten Experimenten vergleichen. Daher wurde die Temperatur des Prüfstandsmediums im für die Durchflussmessung relevanten Bereich variiert, der Durchfluss für verschiedene Temperaturen gemessen und so der Einfluss der Temperatur quantifiziert.

Methoden

Als experimenteller Aufbau wurde der EWZP (PTB) verwendet und eine Düse in die Messstrecke in einen Düsenhalter integriert. Der Durchfluss wurde über das Wägesignal und über den MID zu Beginn der Messstrecke mit einer zeitlichen Mittelwertbildung über 5 Minuten je Messpunkt bestimmt. Das Reservoir mit einem Volumen von $V \approx 3 \text{ m}^3$ wurde über den Wärmetauscher zunächst auf $T_{Reservoir} \approx 40^\circ\text{C}$ erwärmt, der Wärmetauscher danach abgeschaltet und der Durchfluss während der Abkühlung aufgezeichnet. Nach weiteren ca. 24 Stunden wurde bei einer Temperatur von $T_{Reservoir} \approx 30^\circ\text{C}$ der Wärmetauscher zur Kühlung eingeschaltet und die Temperatur über erneute 24 Stunden auf $T_{Reservoir} \approx 20,4^\circ\text{C}$ (Raumtemperatur) abgesenkt.

Ergebnisse

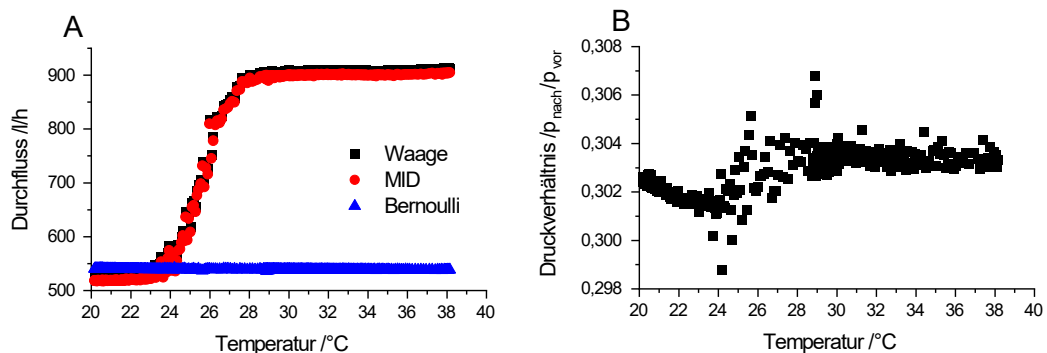


Abbildung 4.10: A: Massestrom (Waage) und Volumenstrom (MID), über der Temperatur aufgetragen; B: Druckverhältnis $P_{nach}/P_{vor} \approx 0,3$

Die Ergebnisse der Durchflussmessung sind in Abbildung 4.10 A sowie das berechnete Druckverhältnis über der Temperatur in Abbildung 4.10 B dargestellt. Der Durchfluss ist unterhalb von $T = 23^\circ\text{C}$ stabil, steigt dann bis zu einer Temperatur von $T = 29^\circ\text{C}$ an und erreicht dann wieder ein konstantes Niveau. Dieser Verlauf stimmt für die unabhängig voneinander durchgeführten

Messungen zwischen der gravimetrischen Referenz und dem magnetisch-induktiven Messgerät überein. Das Druckverhältnis liegt zwischen 0,298 und 0,308, steigt mit zunehmendem Durchfluss um 0,001 und ist im Bereich $T < 23^\circ\text{C}$ stabil.

Berechnet man den Durchfluss mit den gemessenen Druckwerten nach Bernoulli, kommt man auf einen Durchfluss zwischen $536\text{ l/h} < Q < 542\text{ l/h}$, welcher mit den experimentell ermittelten Durchflusswerten $518\text{ l/h} < q_V < 542\text{ l/h}$ bei $T < 23^\circ\text{C}$ übereinstimmt. Die Abweichung von ca. 2 % in diesem Bereich lässt sich durch die Einschnürung des Flüssigkeitsstromes durch die Kavitationschicht erklären. Oberhalb von $T = 23^\circ\text{C}$ weicht der gemessene Durchfluss erkennbar von dem nach Bernoulli berechneten Wert ab. Die Abweichungen von bis zu 70 % bei $T > 23^\circ\text{C}$ bestätigen die in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Messungen und die Annahme, dass die Durchflussbegrenzung durch Kavitation bei höheren Temperaturen nicht stabil ist. Oberhalb der Temperatur $T = 29^\circ\text{C}$ ist das Durchflussniveau konstant, anhand des Druckverhältnisses, in Abbildung 4.10 B dargestellt, wird jedoch sichtbar, dass der Zustand nicht so stabil ist, wie bei Temperaturen $T < 23^\circ\text{C}$. Die Annahme, dass es sich nicht um einen stabilen Zustand handelt, wurde durch wiederholte Durchführung der Experimente bestätigt. Neben der Veränderung der Druck- und Durchflusswerte mit steigender Temperatur weist eine Veränderung des akustisch wahrnehmbaren Rauschens in Abhängigkeit von der Temperatur bei der Experimentdurchführung auf eine Veränderung der Kavitationsausbildung hin.

Zwischenfazit

Mit den gemessenen Werten wird der Einfluss der Temperatur bei einem festen Druckverhältnis $P_{\text{nach}}/P_{\text{vor}} \approx 0,3$ quantifiziert. Die gemessenen Durchflusswerte bei höherer Temperatur lassen sich nicht mit den von Bernoulli getroffenen Annahmen beschreiben. Es tritt somit oberhalb einer Temperatur von 23°C ein Zustand in der Kavitationsdüse auf, der sich von dem Zustand der Schichtkavitation und der entsprechenden Durchflussbegrenzung wesentlich unterscheidet. Aus der Massenerhaltung des Flüssigkeitsstromes lässt sich der höhere Durchfluss mit einer größeren Geschwindigkeit im Düsenhals erklären. Die Kavitationsausprägung hat dabei einen wesentlichen Einfluss, der sich mit den genutzten, undurchsichtigen Düsen nicht näher untersuchen lässt. Für den Einsatz der Herschel-Venturi-Düsen mit Kavitation bedeuten die Ergebnisse eine begrenzende Temperatur T_{max} des Fluids, um einen stabilen Durchfluss zu generieren. Diese Temperatur wurde aus den Untersuchungen exemplarisch bei Wasser zu $T_{\text{max}} = 23^\circ\text{C}$ bestimmt. Andere Flüssigkeitseigenschaften können

zu Abweichungen der Kavitationsausprägung und damit der Maximaltemperatur führen, was bei der Übertragung der Ergebnisse auf andere Flüssigkeiten berücksichtigt werden sollte.

4.2.4 Einfluss des Vordrucks auf den Durchfluss

Wie die bisherigen Untersuchungen gezeigt haben, hängt die Ausprägung der Kavitation neben der Temperatur auch vom Druck vor der Düse ab. Bei der späteren Anwendung zur Profilerzeugung muss sichergestellt sein, dass die Erscheinungsform der Kavitation und damit der Durchfluss durch die Kavitationsdüse stabil eingestellt und reproduzierbar ist. In SCHUMANN (2020) wurde eine Abweichung zwischen dem theoretischen Durchfluss und den experimentellen Werten zwischen $-1,52\%$ und $+2,79\%$ für toroidale Kavitationsdüsen festgestellt, was die Notwendigkeit der experimentellen Charakterisierung der Herschel-Venturi-Kavitationsdüsen vor dem Einsatz zur Profilerzeugung verdeutlicht.

Methoden

Nach den Untersuchungen zum Einfluss des Druckverhältnisses und der Temperatur auf den Durchfluss sollte der Vordruck variiert und die Auswirkung auf den Durchfluss analysiert werden. Dazu wurden die Kavitationsdüsen in die Düsenhalter eingesetzt, das Ventil hinter der Kavitationsdüse vollständig geöffnet, der Vordruck durch die drehzahlgeregelte Pumpe eingestellt und der Durchfluss mit der gravimetrischen Referenz des Prüfstands und einem MID gemessen. Die Durchflussmengen für die einzelnen Düsen mit Durchmessern bis $2,6\text{ mm}$ deckten einen Bereich von 1 l/h bis 600 l/h ab und sollten bei einer Flüssigkeitstemperatur nahe der Umgebungstemperatur von $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ mit einer maximalen Abweichung von $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ gemessen werden. Die mittlere Abweichung der Temperatur innerhalb einer Messung sollte $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ betragen.

Für eine Berechnung des von mehreren Düsen erzeugten Durchflusses in Kapitel 4.3 war es außerdem wichtig, den Zusammenhang zwischen Durchfluss und Vordruck für jede einzelne Düse zu kennen, da höhere Durchflüsse (z. B. 1000 l/h) einen relevanten Druckabfall ($0,06\text{ bar}$) verursachen. Zur Beschreibung des Verhältnisses zwischen Durchfluss und Vordruck wurde eine Regressionsgerade an die Messdaten angepasst. Die Steigung b der Regressionsgeraden wurde aus den experimentellen Daten der Durchflussmessung bestimmt.

Ergebnisse

Die Ergebnisse sind exemplarisch für zwei verschiedene Düsen mit 2,6 mm Durchmesser in Abbildung 4.11 dargestellt.

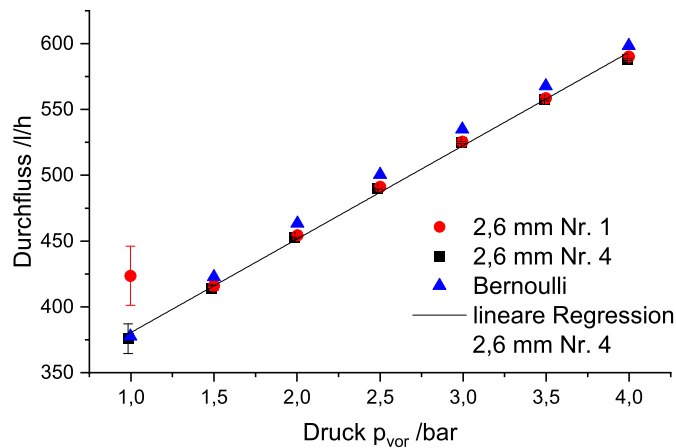


Abbildung 4.11: Durchfluss in Abhängigkeit vom eingangsseitigen Druck p_{vor} ; Düsenhalsdurchmesser 2,6 mm

Für den Druck $p_{vor} \geq 1,5 \text{ bar}$ liegen die experimentell ermittelten Durchflusswerte durch die Kavitationsschicht systematisch etwa 1 % unter den nach Bernoulli berechneten Werten. Diese Tendenz ist bei über 30 verschiedenen Düsen reproduzierbar zu beobachten. Anhand des Beispiels in Abbildung 4.11 kann man erkennen, dass bei geringem Vordruck eine Erhöhung des Durchflusses auftritt. Bei einem relativen Druck von $p_{vor} = 1 \text{ bar}$ wird ein Durchfluss von 424 l/h gemessen, der ca. 12 % über dem theoretisch zu erwartenden Wert liegt. Wie bei den in Kapitel 4.2.3 beschriebenen Änderungen der Kavitationsausprägung kommt es hier zu einer Änderung des Durchflusses aufgrund der Kavitation. In diesem Fall ist das Druckverhältnis zwar noch mit 0,6 in einem Bereich, in dem bei den anderen Düsen der Durchfluss durch die Kavitation begrenzt wird, aufgrund von Unterschieden in der Geometrie und Varianzen in der Düsenfertigung ist die Durchflussbegrenzung aber offensichtlich nicht mehr stabil. Die Instabilität zeigt sich in der Abbildung auch in einer deutlich größeren Standardabweichung des Messpunktes. Eine Düse mit 0,26 mm Durchmesser zeigt eine ähnliche Tendenz und wird ausführlicher untersucht.

In der Abbildung 4.12 ist der Durchfluss durch zwei Düsen mit 0,26 mm Durchmesser über dem Vordruck p_{vor} dargestellt. Der gemessene Durchfluss lässt sich anhand der Steigung der Düse Nr. 2 in zwei Bereiche einteilen: einen Bereich $p_{vor} \geq 3 \text{ bar}$, bei dem der Durchfluss durch die Kavitation begrenzt wird und das Durchflussverhalten dem der anderen Düsen entspricht, und einen

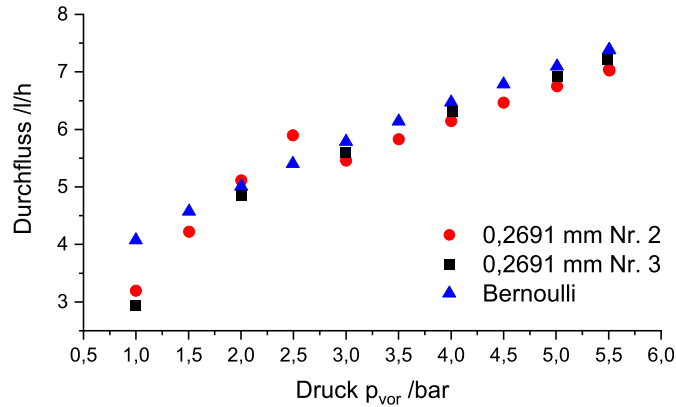


Abbildung 4.12: Durchfluss in Abhängigkeit vom eingangsseitigen Druck p_{vor} für zwei Düsen mit Düsenhalsdurchmesser 0,26 mm

Tabelle 4.4: Durchfluss, Düsenauswahl und Druckabhängigkeit (WARNECKE et al., 2019)

	Durchmesser d /mm	Vordruck p bar	Durchfluss Q l/h	Steigung b l/h/bar
Messfehler	0,001 mm	0,01 bar	0,1 % ($k=2$)	
	0,740	3,999	42,69	$5,4 \pm 0,2$
	0,738	3,996	42,65	$5,4 \pm 0,2$
	1,396	4,005	151,80	$19,2 \pm 0,4$
	1,397	4,005	152,40	$19,5 \pm 0,5$
	1,393	4,004	154,50	$19,5 \pm 0,5$
	2,601	4,013	527,80	$71,0 \pm 1,4$

Bereich $p_{vor} < 2,5 \text{ bar}$, in dem sich die Kavitation trotz eines theoretisch ausreichenden Druckverhältnisses von $P_{nach}/P_{vor} > 0,34$ nicht vollständig ausbildet. Die Kavitationsdüse Nr. 3 mit 0,26 mm Durchmesser zeigt die typische Abhängigkeit des Durchflusses vom Vordruck. Die Kavitationsdüse Nr. 2 mit 0,26 mm zeigt bei den Durchflussmessreihen Abweichungen im Vergleich zu anderen Düsen gleichen Durchmessers. Die Unterschiede können auf Abweichungen in der Düsengeometrie bzw. bei der Herstellung zurückgeführt werden. Es wird damit deutlich, dass sich das Messverhalten von einzelnen Düsen unterscheiden kann und eine experimentelle Charakterisierung vor der Benutzung sinnvoll ist.

Ein Beispiel für die Regression des Durchflusses von Düse 2,6 mm Nr. 4 ist in Abbildung 4.11 dargestellt. Für eine Auswahl von sechs Düsen sind die Werte in Tabelle 4.4 zusammengefasst und quantifizieren die oben erwähnte Durch-

flussabhängigkeit des Vordrucks für diese Düsen. Es gibt keinen signifikanten Unterschied in der Korrelation zwischen Vordruck und Durchfluss für Düsen mit gleichem Durchmesser. Zwischen den Durchflüssen von Düsen mit unterschiedlichem Durchmesser und der Steigung b besteht ein linearer Zusammenhang.

4.3 Additivität parallel geschalteter Kavitationsdüsen

Zur Realisierung eines höheren Durchflusses sollten Herschel-Venturi-Kavitationsdüsen kombiniert, also parallel, betrieben werden. Erste Versuche von SCHUMANN (2020) mit toroidalen Kavitationsdüsen haben eine Differenz von bis zu 1,47 % bei der Addition der Durchflussmengen zweier einzelner Düsen im Vergleich zur Parallelschaltung ergeben. Mit den dort durchgeführten Untersuchungen konnte der Durchfluss nicht auf Basis der Messungen einzelner Düsen sondern experimentell für jede Düsenkombination bestimmt werden. Druckverluste durch die Rohre wurden bisher nicht betrachtet und es wurden weitere Untersuchungen des additiven Verhaltens von Düsen empfohlen (SCHUMANN, 2020). Mit der Installation zusätzlicher Drucksensoren direkt vor und hinter den Düsen und der Berücksichtigung der Druckabhängigkeit der Düsen, die im vorherigen Kapitel erläutert wurde, sollte die Durchflussdifferenz näher untersucht werden. Dabei wurde neben der Betrachtung in Bezug auf die Druckabhängigkeit auch die Anzahl der parallel betriebenen Düsen von zwei (SCHUMANN, 2020) auf sechs erweitert. Die Durchflussmengen in Abhängigkeit vom Vordruck wurden zunächst für die einzelnen Düsen über die Regressionsgeraden beschrieben und dann über die gemessenen Druckwerte bei der Parallelschaltung miteinander verglichen. Diese Berechnungen wurden in WARNECKE et al. (2019) veröffentlicht und hier zusammenfassend dargestellt. Mit diesen Arbeiten soll sich der Durchfluss einer Düsenkombination zukünftig über die Durchflussmessungen der einzelnen Düsen unter Berücksichtigung der tatsächlichen Druckverhältnisse berechnen und einstellen lassen.

Methoden

Die wesentliche Funktion der Kavitationsdüsenapparatur besteht in der gleichzeitigen Verwendung mehrerer Düsen, um den Bereich der erzeugten Durchflüsse auf den kombinierten Durchfluss von mehreren Düsen zu erweitern. Für die Experimente wurden sechs Düsen mit einem vorgegebenen Halsdurchmesser von 0,74 mm, 1,4 mm und 2,6 mm ausgewählt und in die Kavitationsdüsenapparatur eingesetzt. Durch die Verwendung verschiedener Düsen mit dem gleichen vorgegebenen Durchmesser konnte die Reproduzierbarkeit der Düsenherstellung beurteilt werden. Da der Drucksensor im Einzeldüsenhalter näher an der Düse angebracht war als im Kavitationsdüsenapparat, wurde der Zusammenhang zwischen Vordruck und Durchfluss im Einzeldüsenhalter untersucht.

Um die unterschiedlichen Einbaubedingungen zu berücksichtigen, wurde die Charakterisierung der Einzeldüsen in der Kavitationsdüsenapparatur wiederholt. Da die Position der Drucksensoren im Prüfstand ca. 70 mm weiter stromaufwärts lag als im Einzeldüsenhalter, weisen die Durchflusswerte einen messbaren Unterschied auf. Mit dem in der Apparatur ermittelten Durchfluss bei einem Vordruck von $4 \pm 0,01 \text{ bar}$ wurde der theoretische Durchfluss von zwei oder mehr Düsen als Summe $Q_{theo,j}$ der einzelnen Durchflüsse Q_i um den Druckabfall bei höheren Durchflüssen korrigiert. Der Durchfluss wurde nach Gleichung 4.2 berechnet:

$$Q_{theo,j} = \sum_i (Q_i + (p_j - p_i) \cdot b_i). \quad (4.2)$$

Dabei war b_i die Abhängigkeit des Durchflusses vom Druck der einzelnen Düsen, p_i der Vordruck bei der Einzeldüsenmessung und p_j der Vordruck beim kombinierten Betrieb. Zur einfacheren Umsetzung wurde eine lineare Korrektur durchgeführt, obwohl sich aus der Theorie eine Abhängigkeit des Durchflusses zur Quadratwurzel der Druckdifferenz ergibt.

Ergebnisse

Die Ergebnisse für die gleichzeitig kavitierenden Düsen sind in Abbildung 4.13 als relative Abweichung der gemessenen und der berechneten Durchflussmengen dargestellt.

Der Durchfluss weicht bei der Kombination der Düsen nicht mehr als 0,1 % von dem berechneten Durchfluss ab. Mit Ausnahme von zwei Messungen ist die Abweichung negativ, liegt aber innerhalb des Fehlers. Dies könnte auf einen weiteren Druckverlust zwischen dem Drucksensor und dem Düsenhalter hinweisen, der in den Berechnungen nicht berücksichtigt wird. Mit der Messung des Durchflusses, der durch die einzelnen Düsen erzeugt wird, und der Messung des Druckes direkt vor den Kavitationsdüsen lässt sich der Durchfluss der Düsenkombinationen bestimmen. Über die verschiedenen Kombinationen der sechs verwendeten Düsen mit 3 verschiedenen Durchmessern lassen sich so beispielsweise 64 verschiedene Durchflusswerte bestimmen. Die angegebenen Fehler berücksichtigen sowohl die Gesamtunsicherheit des Prüfstands (0,1 %) als auch die Standardabweichung der Messungen. Dieses Ergebnis zeigt, dass der Durchfluss der Düsenkombinationen anhand der Durchflussmengen von Einzeldüsen berechnet werden kann, wenn der Vordruck direkt vor den Kavitationsdüsen und die Korrelation zwischen dem Vordruck und dem Durchfluss bekannt sind. Berücksichtigt man den Druckverlust in Abhängigkeit von der

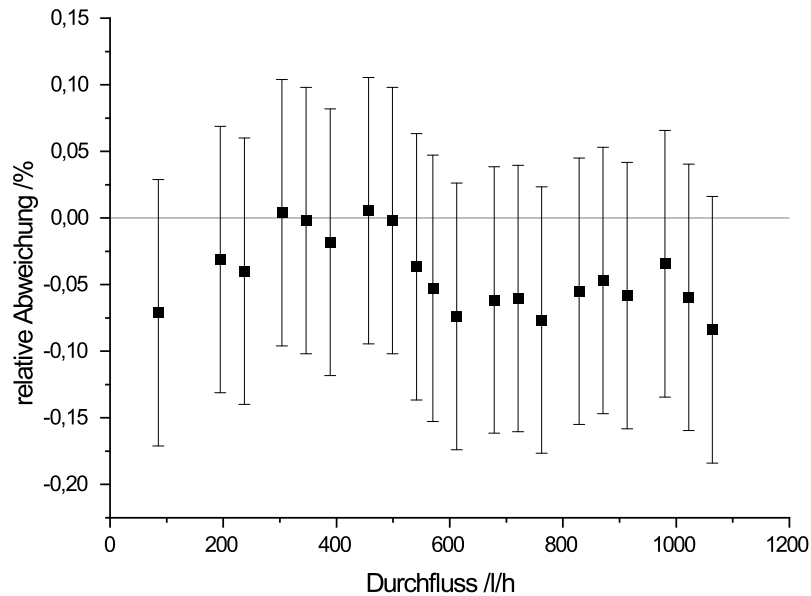


Abbildung 4.13: Relative Abweichung des Durchflusses bei paralleler Schaltung im Vergleich zur Einzeldüsenmessung (WARNECKE et al., 2019)

Durchflussmenge, kann der Durchfluss einer Düsenkombination durch die Positionierung des Druckreglers direkt vor den Kavitationsdüsen eingestellt werden. Diese Anpassung wurde für die weiteren Messungen umgesetzt, da sich die Berechnung des Durchflusses dadurch um mehr als eine Größenordnung verbessert. Die Ergebnisse in diesem Kapitel liefern somit einen großen Beitrag zur Beantwortung der Frage, welchen Einfluss der Druck auf den Durchfluss hat und wie dieser künftig eingestellt werden kann.

4.4 Akustischer Nachweis des Kavitationsbeginns

Wie sich in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt hat, ist es für den Nachweis einer stabilen Durchflusserzeugung mittels Kavitationsdüsen vorteilhaft, eine Information über den momentanen Zustand im Inneren einer Düse zu erhalten. Da Kavitation auch in der Akustik untersucht wird, wurden zwei verschiedene Verfahren, Wasser- und Körperschallpegelmessung, verwendet, um die Signale während einer Durchflussmessung aufzunehmen und den Zustand der Kavitationsausprägung zuzuordnen.

4.4.1 Wasserschallpegelmessung

Mit der Wasserschallpegelmessung soll erreicht werden, dass bei der späteren Kavitationsdüsenanwendung anhand des Spektrums der Kavitationsnachweis erbracht wird und direkt auf den Kavitationszustand geschlossen werden kann.

Methoden

Ein Hydrophon wurde in der Kavitationsdüsenapparatur installiert (Abbildung 4.14), um festzustellen, wann Kavitation im Inneren der Düse auftritt und wann nicht.

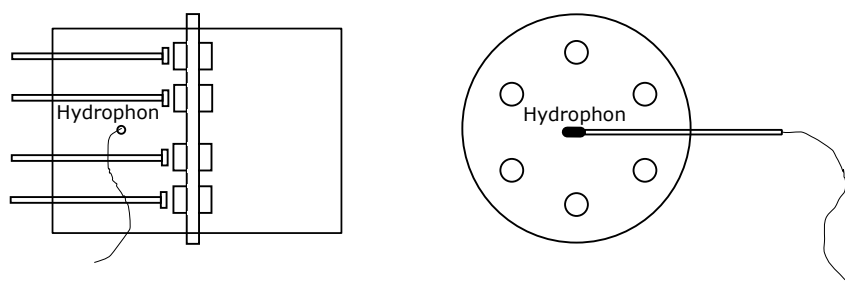


Abbildung 4.14: Skizze Kavitationsdüsenapparatur mit Hydrophon

Das Hydrophon besteht aus einem Druckaufnehmer, der mit einem Oszilloskop verbunden ist. Über eine Fast-Fourier-Transformation (FFT) wurde der Schalldruckpegel abhängig von der Frequenz ermittelt. Die FFT wurde jeweils für ein Zeitfenster von zwei Sekunden durchgeführt. Der Schalldruckpegel wurde bei vielen verschiedenen Vordruckeinstellungen bestimmt, wovon exemplarisch vier Spektren bei einem Vordruck $p_{vor} = 0,5 \text{ bar}$, 1 bar , 2 bar und 5 bar ausgewählt wurden, um die unterschiedlichen Spektren darzustellen.

Ergebnisse

In Abbildung 4.15 sind die Ergebnisse der Messungen des Schallpegels einer Düse mit $2,6 \text{ mm}$ im Durchmesser mittels Hydrophon zusammengefasst. Die Aufnahme des Pegels bei $0,49 \text{ bar}$ Vordruck entspricht dem Zustand ohne Kavitation. Der Schalldruck ergibt sich in diesem Fall durch die Schwingungen der Apparatur, des Prüfstandsbaus sowie des Gesamtsystems. Bei $0,98 \text{ bar}$ Vordruck steigt der Schalldruckpegel um ca. 30 dBV an. Es ist je ein Peak bei 170 Hz , 230 Hz und bei 6700 Hz sichtbar. Mit zunehmendem Vordruck werden die Peaks größer. Mögliche Ursachen für die Peaks können Ablösefrequenzen der Kavitationsblasen oder charakteristische Längen der Düsen sein,

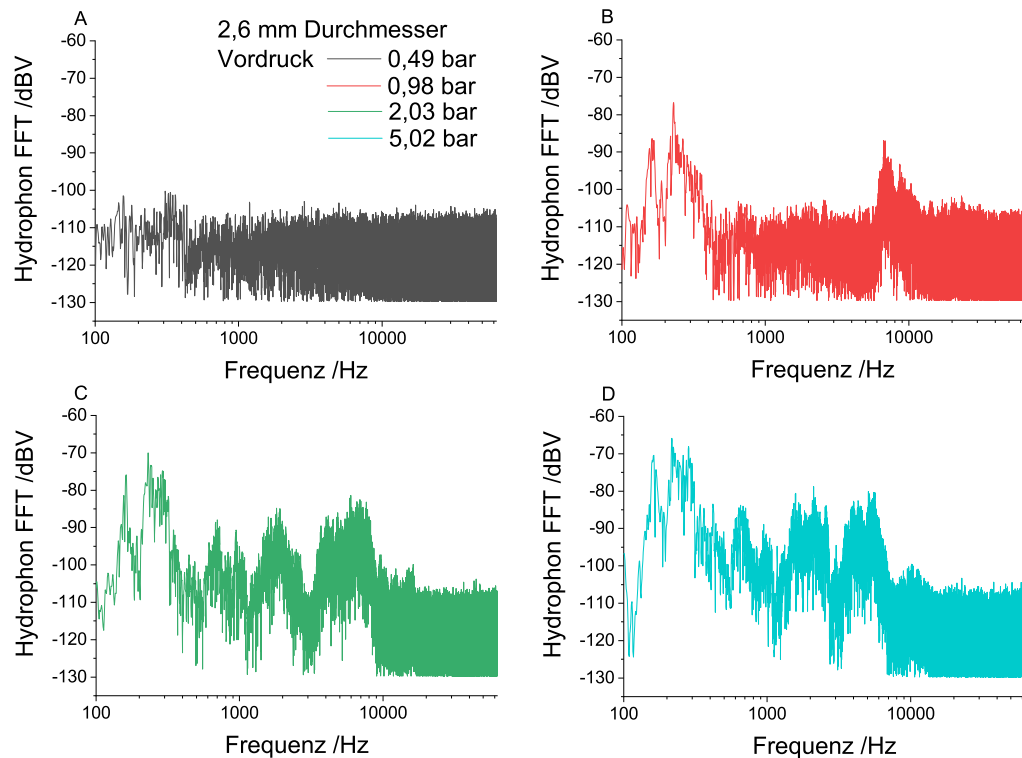


Abbildung 4.15: Schalldruckpegel für verschiedene relative Vordruckwerte

die zu Schwingungen der Flüssigkeit oder des Aufbaus führen. Die Differenz zwischen dem Schalldruckpegel beim Auftreten der Kavitation und ohne Kavitation beträgt bis zu 40 *dBV*. Anhand der Amplitude der Schwingung ließe sich zeitabhängig ein Überwachungsparameter für die Kavitationsausprägung einführen.

4.4.2 Körperschallpegelmessung

Mit der Durchführung der Experimente zur Wasserschallpegelmessung stellt sich die Frage, ob die akustischen Signale auch ohne die Einbringung eines Messgerätes in den Flüssigkeitsstrom durch ein indirektes Verfahren messbar sind. Ziel ist dabei der Nachweis der Kavitation und die Erfassung des Kavitationszustandes über die Signale eines Körperschallaufnehmers ohne Störung der Flüssigkeitsströmung.

Methoden

Dazu wurde in Zusammenarbeit mit der Abteilung 1.6 Schall der PTB der IEPE-Beschleunigungsaufnehmer Endevco 27A12 SN10131 von außen an einer durchsichtigen Einzeldüse aus Plexiglas installiert und das Signal bei ver-

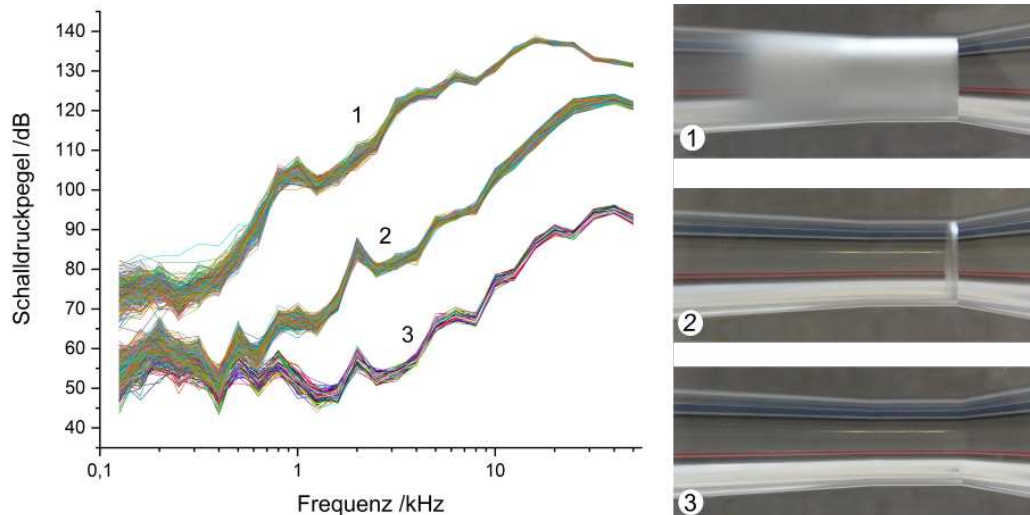


Abbildung 4.16: Links: Spektren eines Körperschallaufnehmers; Rechts: Bilder der Kavitationsausprägung: 1. Kavitation über den Düsenhals 2. Einsetzende Kavitation 3. Keine Kavitation

schiedenen Kavitationsausprägungen aufgezeichnet. Im ersten Test wurde mit 3 bar Vordruck ein Durchfluss eingestellt und die Messposition von Hand variiert. Der Körperschallaufnehmer zeigte für verschiedene Positionen unterschiedliche Frequenzgänge, wobei die Position am Übergang vom Diffusor zur Rohrmessstrecke das deutlichste Signal lieferte, sodass der Körperschallaufnehmer hier mit einer Rohrschelle für die Aufzeichnungen fest installiert wurde. Bei der weiteren Charakterisierung wurde der Vordruck konstant auf 3 bar eingestellt und dann ein Ventil am Ende der Messstrecke schrittweise geöffnet. Währenddessen wurde jeweils für 15 s der Schalldruckpegel L_P aufgezeichnet und ein Bild mit einer Spiegelreflexkamera aufgenommen.

Ergebnisse

Die Ergebnisse für die drei festgestellten, unterschiedlichen Kavitationszustände sind in Abbildung 4.16, in 27 Frequenzbändern aufgeteilt, dargestellt. Links in der Abbildung sieht man, dass der Schalldruckpegel bei voll ausgeprägter Kavitation über den Düsenhals hinaus (1) bis zu 60 dB oberhalb des Signals ohne Kavitation (3) liegt. Bei der Aufnahme einsetzender Kavitation am Düsenhalsanfang (2) stimmt der Schalldruckpegel bei Frequenzen $f < 0,5\text{ kHz}$ mit dem Pegel ohne Kavitation überein, bei höheren Frequenzen $f > 1\text{ kHz}$ liegt der Pegel etwa 20 dB über dem Pegel, der ohne Kavitationsausprägung gemessen wurde. Die Unterschiede im Spektrum sind für die verschiedenen Zustände der Kavitation klar erkennbar und lassen sich eindeutig zuordnen. Der Schalldruck hängt von den Druckverhältnissen in der Düse ab, sodass die Druckänderung

bei Kavitation deutlich im Pegel sichtbar ist. Die Pegeländerung geht auf die Anzahl der Kavitationsblasen zurück: wird die Schicht der Kavitationsblasen größer, steigt der Schalldruckpegel.

4.5 Einfluss von Düsenreinigung auf den Durchfluss

Die bei der Charakterisierung eingesetzten Düsen werden in regelmäßigen Abständen im Ultraschallbad gereinigt, um Änderungen des Durchflusses aufgrund von Verunreinigungen auszuschließen. Dadurch besteht jedoch prinzipiell die Möglichkeit, dass sich der Durchfluss durch die Reinigung einer Düse verändert und nach jeder Reinigung eine experimentelle Bestimmung des Durchflusses für jede Düse durchgeführt werden müsste. Daher wurde untersucht, inwieweit sich der Durchfluss durch eine Reinigung der Düsen verändert, um den Aufwand in späteren Anwendungen einschätzen zu können.

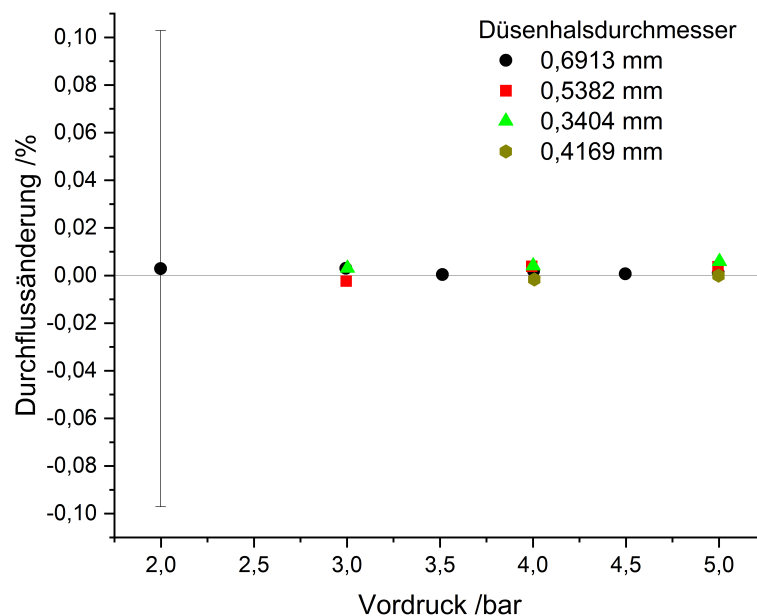


Abbildung 4.17: Relative Durchflussänderung $(Q_{nach} - Q_{vor})/Q_{vor}$ bei Reinigung für vier verschiedene Düsen über dem Vordruck; exemplarisch bei 2 bar die erweiterte Messunsicherheit

Die Reinigungen wurden insgesamt bei sechs verschiedenen Düsen mehrfach durchgeführt. Vor und nach der Reinigung wurde der Durchfluss jeder Düse

bestimmt (Q_{vor} und Q_{nach}) und die relative Durchflussänderung bezogen auf die Durchflussmessung vor der Reinigung ermittelt.

Die Ergebnisse sind für eine Messreihe und vier verschiedene Düsen in Abbildung 4.17 als Durchflussänderung über dem Vordruck dargestellt. Die maximale Durchflussänderung beträgt 0,01 %, ist eine Größenordnung kleiner als die erweiterte Messunsicherheit des Prüfstands und nicht signifikant verschieden von Null. Durch die Reinigung der Düsen hat sich somit keine Veränderung im Durchfluss ergeben, was die Stabilität der Durchflusserzeugung mittels Kavitationsdüsen bestätigt.

4.6 Fazit

Aus den vorangegangenen Untersuchungen ergeben sich bestimmte Anforderungen an die messtechnische Infrastruktur bei der Durchflussregulierung mittels Kavitationsdüsen auf dem Prüfstand.

Um mit Kavitationsdüsen stabile Durchflüsse zu erzeugen, ist ein Druckverhältnis von Nachdruck zu Vordruck von $P_{nach}/P_{vor} < 0,7$ bei der Benutzung von Herschel-Venturi-Düsen notwendig. Die Temperatur hat einen wesentlichen Einfluss auf die Kavitationsausprägung und beeinflusst damit auch die Durchflussmenge. Hohe Temperaturen oberhalb von $T_{max} = 23^\circ C$ führen zu einer Erhöhung des Durchflusses, weshalb eine Stabilisierung der Temperatur am Prüfstand unterhalb dieses Wertes wichtig ist. Berechnungen des Dampfdruckes in Abhängigkeit von Temperatur, Reinheit und Salinität haben ergeben, dass die Temperatur auch über den Dampfdruck zu einer Durchflussänderung bei Kavitationsdüsen führt. Einflüsse der Reinheit und der Salinität können bei der Durchflussmessung vernachlässigt werden.

Weiterhin ist für die Durchflussbegrenzung der Nachweis der Kavitation zu erbringen. Dazu haben sich die drei folgenden Verfahren als geeignet erwiesen, von denen mindestens eines während der Durchflusserzeugung einzusetzen ist:

1. Körperschallaufnehmer: Durch die Anbringung eines Sensors auf der Außenseite des Kavitationsdüsenapparates kann die Kavitation in den Düsen nachgewiesen werden. Bei der Handhabung des Sensors während des Betriebs hat sich gezeigt, dass das Signal auf der Austrittsseite der Kavitationsdüsen stärker ist als auf der Eintrittsseite.
2. Hydrophon: Durch Schallwellenmessungen in der Flüssigkeit hinter den Kavitationsdüsen lässt sich eindeutig und in Echtzeit der Kavitationszustand überwachen.

3. Visualisierung: Mit geeigneten Fenstern im Kavitationsdüsenapparat bzw. durchsichtigen Düsen und Haltern lässt sich der Kavitationsprozess beobachten und somit die Durchflussbegrenzung bestätigen.

5 Prüfung unter realitätsnahen Bedingungen

Neben der Betrachtung der Kavitationsdüsen als Technologie zur Durchflussbegrenzung und damit zur Profilerzeugung ist die Entwicklung eines adäquaten Prüfregimes notwendig, um eine Prüfung von Haushaltswasserzählern unter realitätsnahen, dynamischen Lastwechseln zu realisieren. Im Abschnitt 4 wurde dazu der Einfluss relevanter physikalischer Zustandsgrößen auf die Durchflussenerzeugung untersucht und einzuhaltende Wertebereiche abgeleitet. Bisher wurden Profile verwendet, die Verbrauchsprofilen in Haushalten entsprechen und statistisch abgesichert sind (SCHUMANN, 2020). Die Profile wurden unter der Annahme erstellt, dass durch die Verwendung aller Daten aus der Studie MARTIN et al. (2017) repräsentative Profile entstehen. Inwieweit es Unterschiede in der Datenbasis gibt, die auf regionales oder saisonales Verhalten zurückzuführen sind, wurde zunächst nicht betrachtet.

In SCHUMANN et al. (2021) konnte gezeigt werden, dass die Verbrauchsprofile verschiedener Regionen innerhalb Europas grundsätzlich vergleichbar sind und in dieser Hinsicht in ihrer Gesamtheit bei der Profilerzeugung verwendet werden können. Diese Untersuchungen wurden im Folgenden auf Unterschiede in der Bevölkerungsdichte hin ergänzt, sowie unterschiedliche Regionen innerhalb eines Landes untersucht.

5.1 Einfluss von Region und Jahreszeit auf das Verbrauchsprofil

Um abzuklären, ob mehrere charakteristische Verbrauchsprofile für eine dynamische Prüfprozedur benötigt werden, wurde untersucht, inwieweit geografische und saisonale Unterschiede im Verbrauch bestehen.

Methoden

Dazu wurden die Verbrauchsprofile für sechs Großstädte in Ostdeutschland summarisch betrachtet und mit den Verbrauchsprofilen in sechs Großstädten

in Westdeutschland verglichen. Außerdem wurden die Unterschiede der Verbrauchsprofile zwischen den Millionenstädten Hamburg und Berlin untersucht. Als drittes wurde zusammenfassend der Vergleich zwischen den Verbrauchsdaten in Leipzig und Halle (bezeichnet mit Großstadt Ost) und den Daten in Düsseldorf und Gelsenkirchen (bezeichnet mit Großstadt West) durchgeführt. Zuletzt wurden die Histogramme der Durchflussraten im Sommer der Verteilung im Winter gegenübergestellt.

Ergebnisse

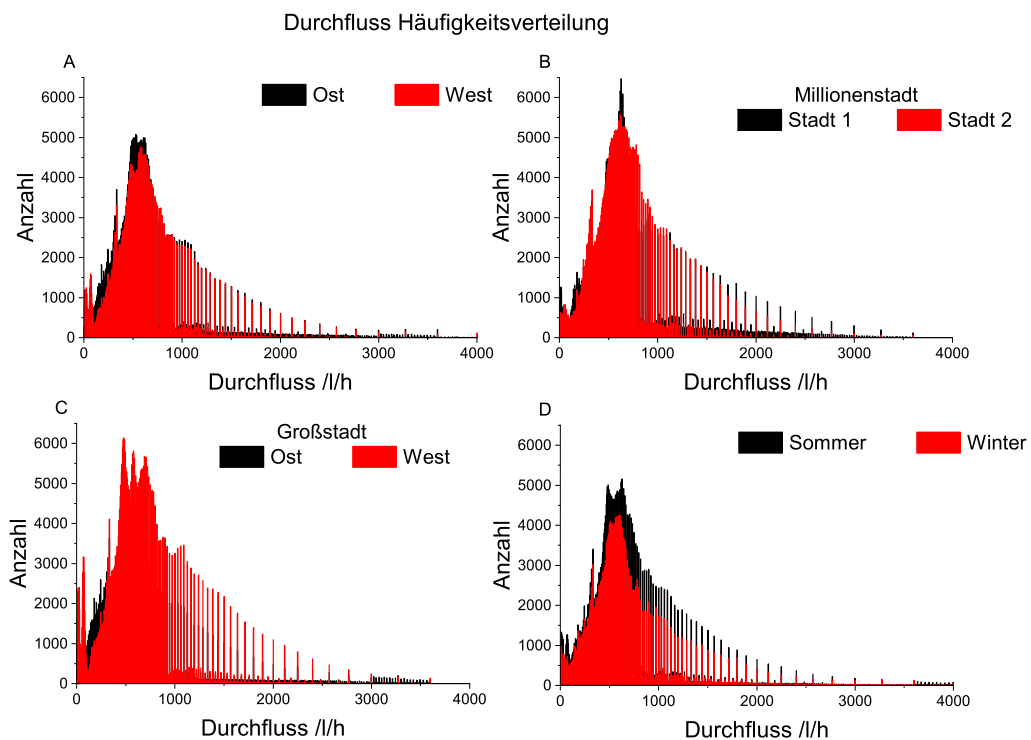


Abbildung 5.1: Histogramme der Verbrauchsprofile in Bezug auf Region und Saison; A: Aufteilung aller Einheiten in Ost und West; B: Häufigkeitsdiagramm von 2 Städten mit jeweils über 1 Mio. Einwohnern; C: Zwei Großstädte im Gebiet Ost im Vergleich zu zwei Großstädten im Gebiet West; D: Verbrauchsprofile getrennt betrachtet nach Sommer und Winter

Die Ergebnisse sind exemplarisch in Abbildung 5.1 dargestellt. Bei der Betrachtung aller Verteilungen in Abbildung 5.1 sieht man, dass Durchflussraten unter 1000 l/h am häufigsten auftreten. Für die Diagramme in Abbildung 5.1 A, B und C stimmen die beiden jeweils verglichenen zwei Häufigkeitsverteilungen überein. Diesen Daten entsprechend gibt es keine großen Unterschiede im Verbrauchsverhalten in verschiedenen geografischen Einheiten. Der Vergleich in

Abbildung 5.1 D zeigt erwartungsgemäß eine Tendenz erhöhten Wasserverbrauchs im Sommer. Es können somit, auf den vorhandenen Daten basierend, repräsentative Profile erzeugt werden.

5.2 Erzeugung repräsentativer Durchflussprofile

Die folgend beschriebenen Prozesse und Parameter sind das Ergebnis zahlreicher Experimente, die im Rahmen der Dissertation durchgeführt wurden und bei der Durchführung am Prüfstand vorteilhaft waren. Daraus ergab sich ein Ablauf, dessen Reihenfolge hier aufgeführt ist:

1. Profilerzeugung: Zur Erarbeitung des dynamischen Prüfregimes wurden anhand der gesamten Datenbasis drei repräsentative Testprofile (Abbildung 5.2) für die Zählerklasse $Q_3 = 2500 \text{ l/h}$ nach dem von SCHUMANN (2020) entwickelten Algorithmus erzeugt. Die Testprofile haben einen Durchflussbereich von 0 l/h bis 1100 l/h und eine Dauer zwischen 663 s und 850 s . Durch die Erzeugung drei verschiedener Profile ist eine breitere Validierung des Prüfregimes und der zugehörigen Infrastruktur in der Anwendung möglich. Auch wenn für die Darstellung des Verbrauchs nur ein repräsentatives Profil nötig ist, kann mit mehreren Profilen überprüft werden, ob ein Wechsel im Verbrauchsverhalten auch mit Kavitationsdüsen realisiert werden kann.
2. Düsenauswahl: Zur Erzeugung der Profile standen die von der Firma Frey produzierten Kavitationsdüsen zur Verfügung. Um den gesamten Durchflussbereich der Profile abzudecken, wurden die in Tabelle 4.4 charakterisierten Düsen verwendet. Das hatte den Vorteil, dass eine ausführliche Charakterisierung durchgeführt wurde und mit dieser Düsenauswahl alle in Abbildung 5.2 gezeigten Profile auf dem Prüfstand realisiert werden konnten. Für jeden Durchflusspunkt wurde die Düsenkombination festgelegt, die zu Beginn des Durchflusses einzustellen war. Diese Information wurde zusammen mit der Dauer des Durchflusses in der Steuerung des Prüfstands hinterlegt. Außerdem wurde die Reihenfolge der Durchflusspunkte in der Steuerung abgespeichert, um die Profile zu realisieren.
3. Dichtigkeitsprüfung: Vor jeder Messreihe der Profile wurden die Stempel auf ihre Dichtigkeit hin überprüft. Dazu wurde mit der Pumpe ein Flüssigkeitsdruck von mindestens 4 bar in der Messstrecke erzeugt und alle Stempel der Kavitationsdüsenapparatur geschlossen. Anschließend

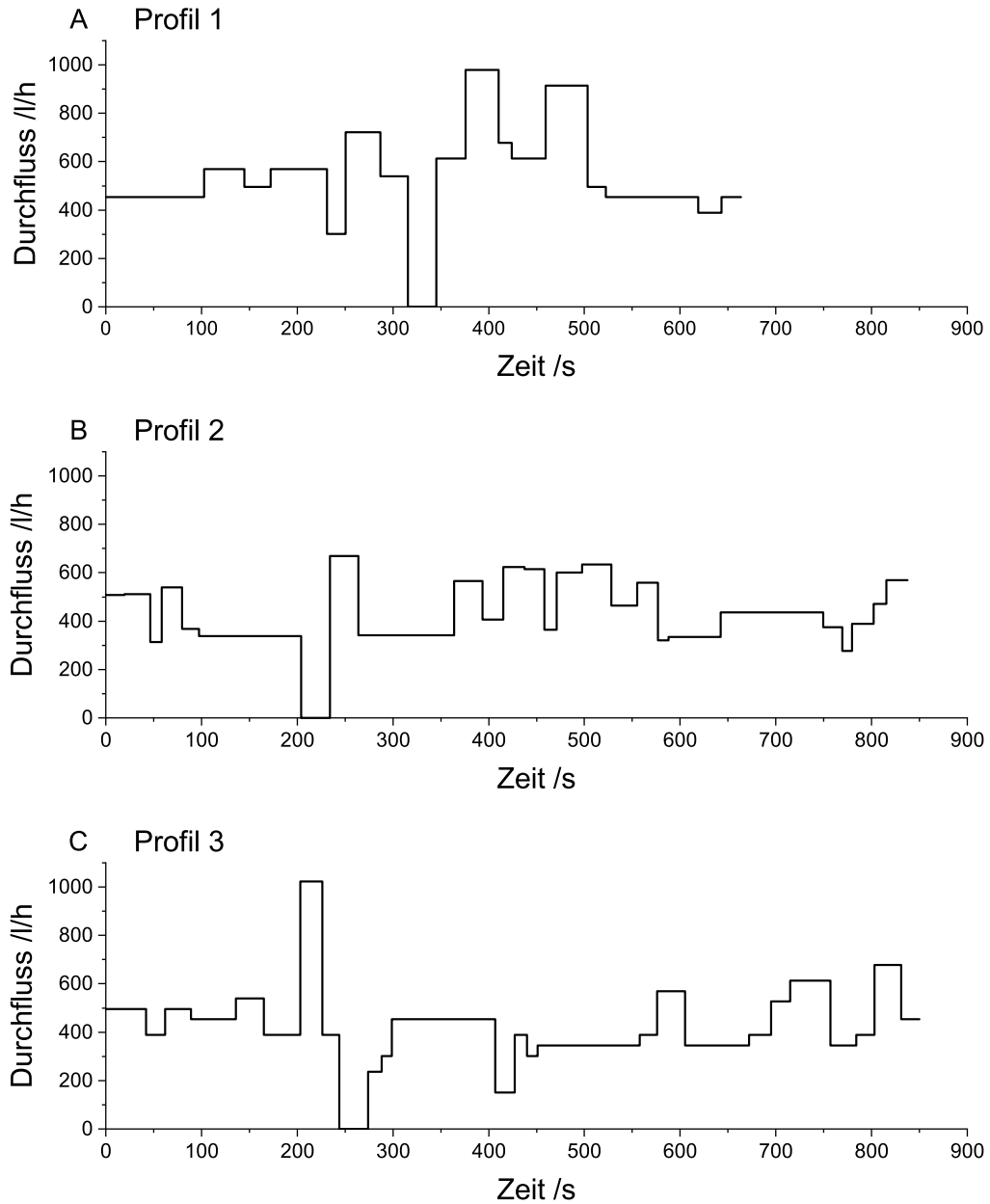


Abbildung 5.2: A) Durchflussprofil Nr. 1 B) Durchflussprofil Nr. 2 und C) Durchflussprofil Nr. 3; realitätsnahe Prüfung von Wasserzählern

wurde für mindestens 5 Minuten der Durchfluss gegen die Referenz bestimmt und die Profilerzeugung begonnen, wenn der Durchfluss bei geschlossenen Stempeln Null war.

4. Entlüftung: Um eine möglichst stabile Durchflusserzeugung zu gewährleisten, wurde eine Entlüftung der Messstrecke wiederholt durchgeführt. Eine gründliche Entlüftung war notwendig, da sich die Dämpfung des Systems durch Luftansammlungen veränderte und dadurch die Reproduzierbarkeit reduziert wurde. Vor jeder Messreihe wurden an mehreren Stellen in der Messstrecke Kugelhähne geöffnet, sodass gesammeltes Gas in die Atmosphäre entweichen konnte. Außerdem wurden vor jeder einzelnen Profilrealisierung alle Düsen geöffnet und über ein automatisch geschaltetes Ventil Gas nach außen geleitet.
5. Dämpfungseinstellung: Zusätzlich war ein Druckausgleichsgefäß über einen Kugelhahn mit dem Volumen vor den Kavitationsdüsen verbunden, sodass über die Einstellung des Druckes im Ausgleichsgefäß die Dämpfung der Profilübergänge angepasst werden konnte. Wenn der Druck im Ausgleichsbehälter ca. zwei Drittel des Flüssigkeitsdruckes in der Messstrecke beträgt, ist die Dämpfung maximal.
6. Druckregelung: Nach diesen Vorbereitungen wurde die Düsenkombination dem ersten Durchflusspunkt entsprechend mit den Stempeln geschaltet und der Druck über einen Regler zunächst auf einen Vordruck von $p_{vor} = 3 \text{ bar}$ eingestellt. Die Regelung bezieht sich auf den Drucksensor stromaufwärts der Düsen in der Kavitationsdüsenapparatur. Sobald der Druck über 60 s bei $p_{vor} = 3 \text{ bar} \pm 0,1 \text{ bar}$ lag, schwenkte der Diverter den Flüssigkeitsstrom auf das Wägegefäß um und die Durchflusspunkte des Profils wurden entsprechend der Voreinstellungen realisiert.
7. Datenaufzeichnung: Wegen der Dynamik war es für die spätere Auswertung vorteilhaft, die Parameter des Prüfstands während der Realisierung kontinuierlich aufzuzeichnen. Dazu wurden alle Sensoren der Messstrecke, des Kavitationsdüsenprüfstands und das Signal der Waage mit einer Frequenz von $f = 20 \text{ Hz}$ in einer Datei für jedes Profil abgespeichert.

5.3 Validierung und Wiederholbarkeit des Durchflussprofils

Für eine stabile Durchflusserzeugung bei einem Profil spielen zwei Punkte eine wesentliche Rolle: Erstens sollte während der Zeiten konstanten Durch-

flusses Stabilität gegeben sein. Zweitens sollte der Wechsel zwischen den Durchflusspunkten möglichst schnell, aber ohne starke Schwingungen erfolgen. Um diese Anforderungen zu erfüllen, wurden zur Durchflussstabilisierung Herschel-Venturi-Kavitationsdüsen verwendet, welche mittels pneumatischen Stempeln geöffnet und geschlossen wurden. Bisher wurde noch nicht untersucht, wie sich der Durchfluss beim Einsatz von Kavitationsdüsen zur Erzeugung dynamischer Prüfprofile verhält und unter welchen Bedingungen eine reproduzierbare Profilerzeugung möglich ist. Außerdem sollten Verfahren eingesetzt werden, die in Echtzeit Informationen zum Durchfluss liefern und standardmäßig im Prüfstand eingebaut sind. Die Methoden, sowie die Validierung mittels Coriolis-Durchflussmessgerät sind im Folgenden beschrieben. Anschließend wurden zunächst die Durchflussdaten bezüglich der Realisierung ausgewertet und dann die Ergebnisse zur Wiederholbarkeit dargestellt.

Methoden

Im Folgenden wird näher auf die Technologie der Kavitationsdüsen bei der Profilerzeugung eingegangen und beschrieben, wie dazu verschiedene Validierungsverfahren eingesetzt wurden. Um Artefakte bei der Validierung auszuschließen, wurden die Durchflussmessungen mit unterschiedlichen Technologien durchgeführt. Ohne weiteren technischen Aufwand ließen sich die Signale eines fest vor der Messstrecke installierten magnetisch-induktiven Durchflussmessgerätes auswerten, sowie die Signale der gravimetrischen Referenz analysieren.

Am Prüfstand vorhandene Validierungsmöglichkeiten: Für eine erste qualitative Validierung der realisierten Testprofile wurde ein magnetisch-induktives Durchflussmessgerät (MID) verwendet. Außerdem wurde das Signal der Waage zur Bewertung der Profilrealisierung genutzt. Die Ableitung der Masse nach der Zeit ergibt den Massestrom, welcher über 5 s gemittelt wurde, um Schwankungen aufgrund der dynamischen Messung auszugleichen. Anschließend wurde der Massestrom über die Dichte in einen Volumenstrom umgerechnet, um die Daten mit dem nominal vorgegebenen Profil und dem durch das MID gemessenen Volumenstrom zu vergleichen.

Hochauflösende Durchflussvalidierung: In CLARK et al. (2006) wurde die zeitliche Auflösung von Coriolis-Durchflussmessgeräten untersucht und in der Größenordnung von Millisekunden nachgewiesen. Dort wurde auch bestätigt, dass es bei der Auslesung des Primärsignals keine Artefakte aufgrund von Dämpfung oder Filterung gibt. Zur weiteren Untersuchung wurde hinter dem

MID ein Coriolis-Durchflussmessgerät (Auflösung: 1 g/Impuls) in die Messstrecke des Prüfstands eingebaut und die vom Coriolis-Durchflussmessgerät ausgehenden Impulse gezählt. Durch eine kontinuierliche Aufzeichnung der Intervalle zwischen den Impulsen ließ sich mit diesen beiden Informationen der Durchfluss während eines Profildurchlaufs als Ableitung der Masse nach der Zeit berechnen. Die Zeit ergibt sich dabei aus der Summe der Impulsintervalle und ermöglicht eine zeitliche Auflösung beim höchsten Durchfluss im Bereich von $\Delta t \approx 2 \text{ ms}$.

Wiederholbarkeit der Profilerzeugung: Als Maß für die Wiederholbarkeit wurde der Waagenendwert nach einem Profildurchlauf auf die Waage betrachtet. Die Wiederholbarkeit wurde anhand eines Langzeitversuchs untersucht, bei dem die Profile Nr. 1 bis Nr. 3 dreißig mal bei jeweils drei verschiedenen Vordruckeinstellungen gemessen wurden. Dafür wurde das Signal der gravimetrischen Referenz ausgewertet und die Daten der verschiedenen Profildurchläufe miteinander verglichen. Für die Betrachtung der Standardabweichung dieser 270 Profilmessungen wurden der mittlere Durchflusswert und die Standardabweichung für jeweils 10 Messungen berechnet. Zur Untersuchung des Einflusses des Druckverhältnisses auf die Wiederholbarkeit wurde der eingestellte Vordruck von $p_{vor} = 3 \text{ bar}$, $3,5 \text{ bar}$ und 4 bar separat betrachtet.

5.3.1 Ergebnisse zur Profilvalidierung

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Abbildung 5.3 dargestellt und zeigen, dass die gemessenen Werte grundsätzlich mit der Vorgabe übereinstimmen. Das Signal des Durchflusses, welches über den Wägewert ermittelt wird, variiert etwas mehr als das Signal des MID, was auf das Auftreffen des Massestroms auf die Waage und den damit verbundenen Impulsübertrag zurückzuführen ist. Bei allen Durchflusspunkten stimmt der Durchfluss qualitativ mit dem nominalen Durchfluss überein. Aufgrund der Mittelwertbildung bei der Durchflussberechnung aus den Daten der Waage und des MID ist die zeitliche Auflösung in dieser Analyse auf fünf Sekunden begrenzt. In den Abbildungen ist außerdem sichtbar, dass die Dauer der Durchflussraten der jeweils vorgegebenen entspricht.

Neben den Übereinstimmungen sind in Abbildung 5.3 B bei $t = 440 \text{ s}$ und bei 5.3 C bei den letzten Durchflusspunkten kleine Spitzen im Signal des MID und der Waage sichtbar. Diese Spitzen treten zu Beginn eines Durchflusspunktes auf und können mit dem Coriolis-Durchflussmessgerät mit einer höheren Auflösung untersucht werden. Die Daten des Coriolis-Durchflussmessgeräts und des MIDs sind dazu vergleichend in Abbildung 5.4 für Profil Nr. 3 aus Kapitel

6.2 dargestellt. Aufgrund des Nulldurchflusses als ersten Durchflusspunkt gibt das Coriolis-Durchflussmessgerät erst mit Beginn des zweiten Durchflusspunktes Impulse aus. Dieser Versatz wird durch die Verschiebung um die Zeit des ersten Durchflusspunktes in Höhe von 30 Sekunden berücksichtigt.

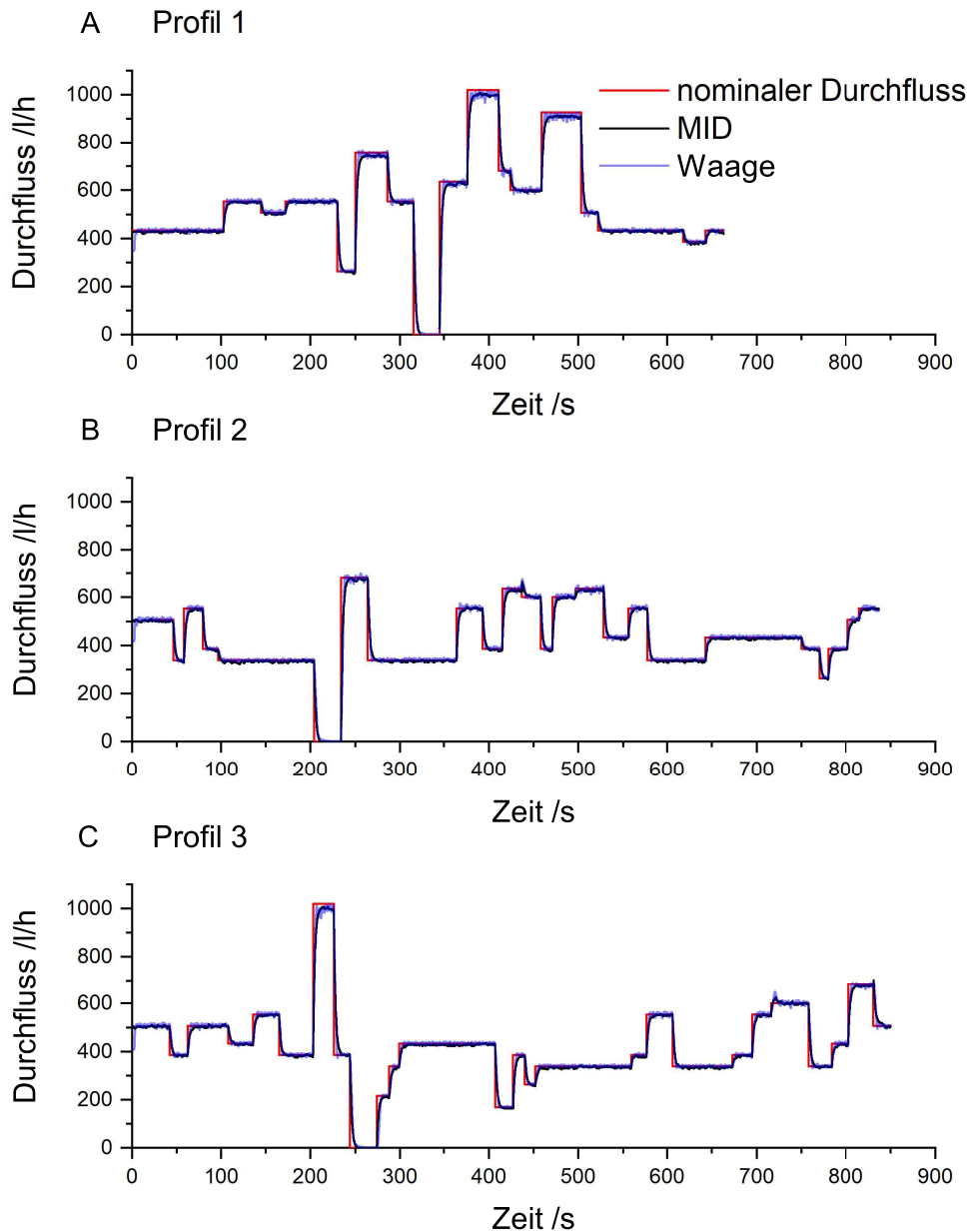


Abbildung 5.3: Validierung A) Profil Nr. 1; Umrechnung des Massestroms nach Wägesignal mit $\rho = 997,5448 \text{ kg/m}^3$ bei $T_{Fluid} = 23,69^\circ\text{C}$ B) Profil Nr. 2; Umrechnung des Massestroms nach Wägesignal mit $\rho = 997,5949 \text{ kg/m}^3$ bei $T_{Fluid} = 23,48^\circ\text{C}$ C) Profil Nr. 3; Umrechnung des Massestroms nach Wägesignal mit $\rho = 997,6830 \text{ kg/m}^3$ bei $T_{Fluid} = 23,11^\circ\text{C}$

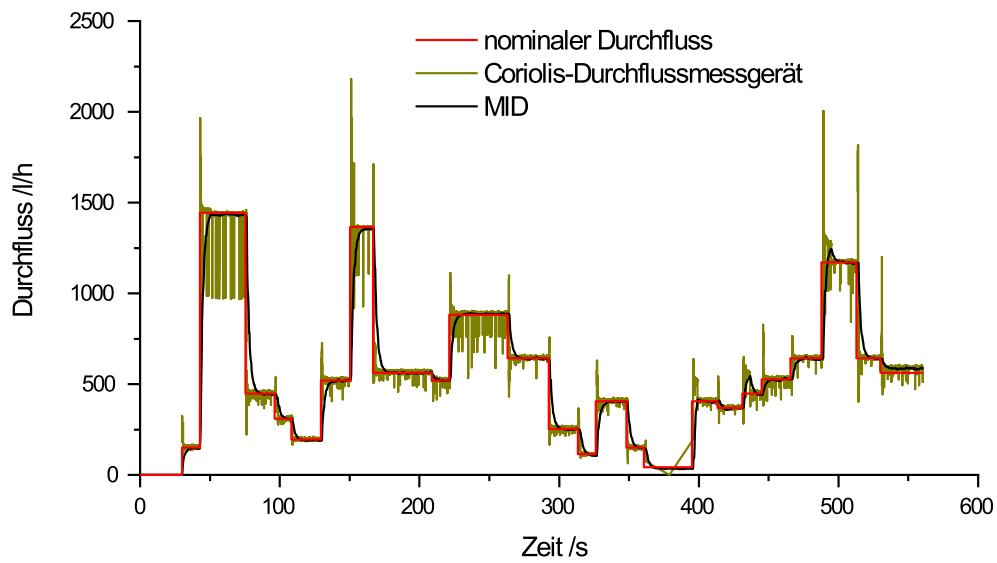


Abbildung 5.4: Validierung eines erzeugten Profils mittels MID und Coriolis-Durchflussmessgerät; Umrechnung des Massestroms mit $\rho = 998,3426 \text{ kg/m}^3$ bei $T_{Fluid} = 20,17^\circ\text{C}$

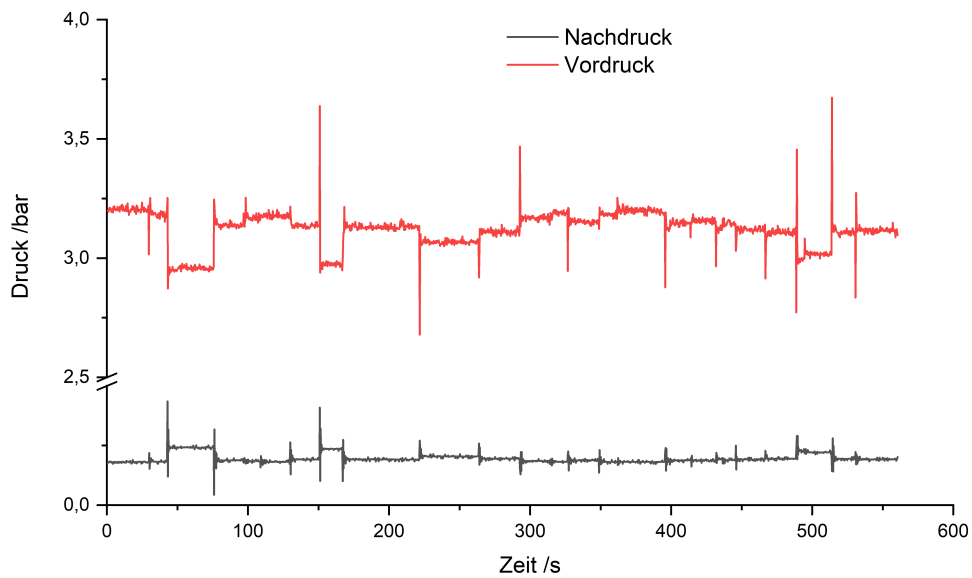


Abbildung 5.5: Druckverlauf eines erzeugten Profils; Drucksensor vor und nach den Kavitationsdüsen; Unterbrechung der Ordinate

In der Darstellung 5.4 ist ein Überschwingen zu Beginn jedes Durchflusspunktes sowie zahlreiche Abweichungen im Durchfluss hin zu kleineren Durchflussraten während der Profilmessung sichtbar. Um herauszufinden, ob es sich dabei um Artefakte aus der Berechnung des Signals des Coriolis-Durchflussmessgeräts oder um tatsächliche Schwingungen im Durchfluss handelt, wird der Druckverlauf detailliert betrachtet. In Abbildung 5.5 ist der Druck eines vor und eines nach den Kavitationsdüsen installierten Drucksensors dargestellt und über die Zeit aufgetragen. Die Daten werden mit einer Frequenz $f = 20 \text{ Hz}$ aufgezeichnet und haben damit eine zeitliche Auflösung von $\Delta t = 50 \text{ ms}$. Die Darstellung zeigt, dass die im Durchfluss vorkommenden und in Abbildung 5.4 sichtbaren Schwingungen zu Beginn einer Durchflussrate auch bei den beiden Drucksensoren auftreten. Die Abweichungen während eines Durchflusspunktes sind im Druckverlauf nicht sichtbar und daher vermutlich ein Artefakt des Signals des Coriolis-Durchflussmessgeräts. Diese Annahme wird dadurch gestützt, dass die Abweichung während eines Durchflusspunktes im Signal des Coriolis-Durchflussmessgeräts stets in derselben Größenordnung auftritt und damit auf die Erzeugung der Impulse innerhalb des Coriolis-Durchflussmessgeräts zurückgeht.

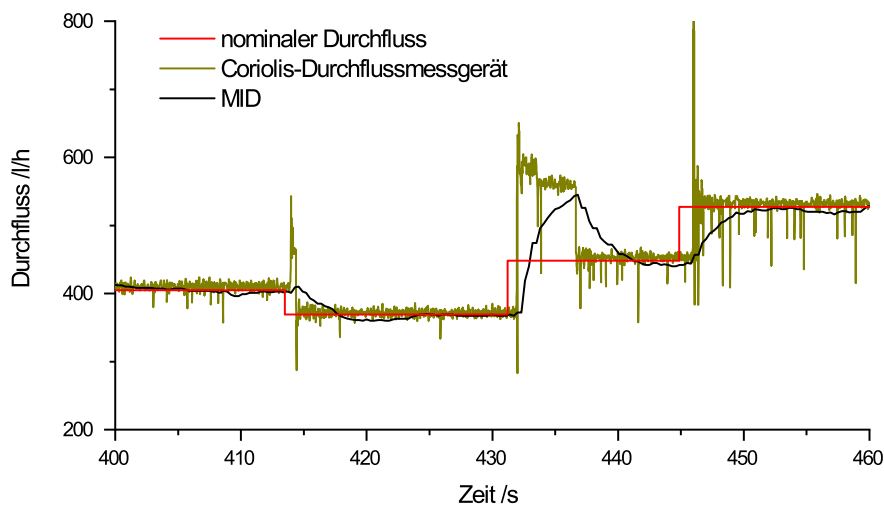


Abbildung 5.6: Validierung eines erzeugten Profils mittels MID und Coriolis-Durchflussmessgerät; Umrechnung des Massestroms mit $\rho = 998,3426 \text{ kg/m}^3$ bei $T_{\text{Fluid}} = 20,17^\circ\text{C}$, Ausschnitt aus Abbildung 5.4

Anhand der Übersichtsgrafik 5.4 sieht man bei genauerer Betrachtung, dass es zwei verschiedene Arten des Überschwingens beim Signal des Coriolis-Durchflussmessgeräts zu Beginn der Durchflusspunkte gibt. Erstens tritt eine Erhöhung des Durchflusses von bis zu 30 % über dem nominalen Durchfluss über mehrere Sekunden auf (Sekunde 434). Zweitens tritt eine Spitze von über

70 % bei Sekunde 489 des Profils mit einer Dauer unterhalb einer Sekunde auf. Diese beiden Phänomene sind in Abbildung 5.6 und 5.7 vergrößert dargestellt und zeigen wesentliche Abweichungen des gemessenen Profils von den nominalen Durchflusswerten. Auch sieht man in dieser Darstellung zwischen dem nominalen Durchfluss und dem MID sowie dem Coriolis-Durchflussmessgerät einen zeitlichen Versatz, welcher auf die Reaktionszeit des Prüfstands und den Schaltvorgang der Stempel zum Öffnen und Schließen der Kavitationsdüsen zurückzuführen ist.

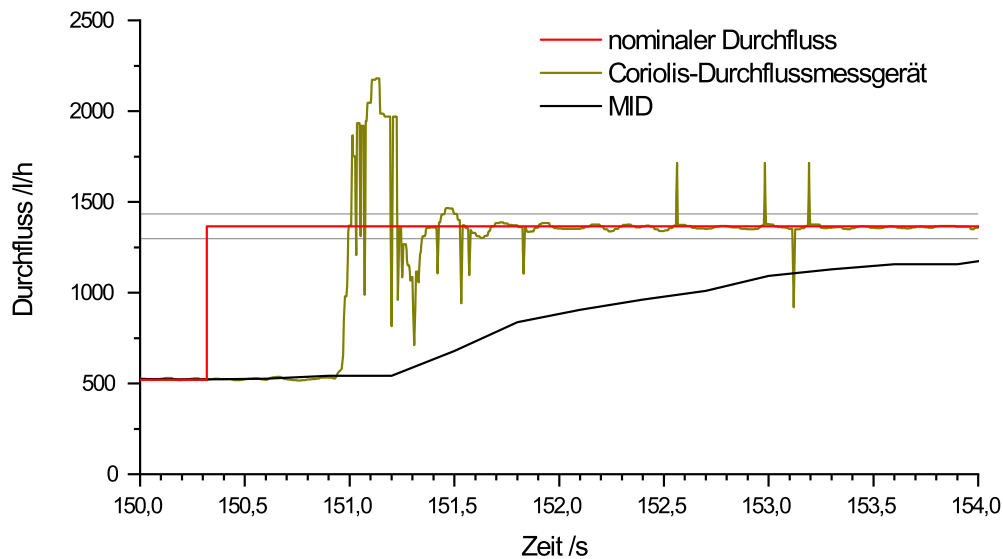


Abbildung 5.7: Validierung eines erzeugten Profils mittels MID und Coriolis-Durchflussmessgerät; Umrechnung des Massestroms mit $\rho = 998,3426 \text{ kg/m}^3$ bei $T_{Fluid} = 20,17^\circ\text{C}$, Ausschnitt aus Abbildung 5.4

In Abbildung 5.6 ist ein 60-Sekunden-Abschnitt eines Profils sowie die mittels MID und Coriolis-Durchflussmessgerät ermittelten Durchflusswerte abgebildet. Bei dem Wechsel des Durchflusspunktes ab Sekunde 431 liegt der Durchfluss zunächst für 2 s stabil bei ca. 586 l/h , fällt danach für 4 s auf 563 l/h und erreicht nach 6 s den Sollwert von 448 l/h . Dieser zeitliche Verzug entsteht durch die verzögert einsetzende Kavitation, was auch bei der Profilerzeugung akustisch wahrnehmbar ist. Anhand der Druckmessung (Abbildung 5.5) in der direkten Umgebung der Düse kann für diese Profilerzeugung ein Druckverhältnis von Nachdruck zu Vordruck von maximal 0,5 über den gesamten Zeitraum nachgewiesen werden, was nach bisheriger Einschätzung zur stabilen Kavitationsausbildung als ausreichend bewertet wurde (SCHUMANN, 2020).

In Abbildung 5.7 ist eine Spitze mit einer Durchflusshöhe von $Q_{max} = 2177 \text{ l/h}$ sichtbar, die damit ca. 59 % oberhalb der nominalen Durchflussrate von $Q_{nom} =$

1365 l/h liegt. Diese Überschwingung des Durchflusses dauert ca. 200 ms und schwingt danach in die andere Richtung. Die Berechnung der Beruhigungszeit t_{95} , also der Dauer, bis die Schwingung des Durchflusses innerhalb von $\pm 5\%$ der nächsten nominalen Durchflussrate bleibt, ergibt eine Zeit von $t_{95} = 0,534$ s für diesen Durchflusswechsel und den verwendeten Aufbau. Diese Zeit ist eine exemplarische Maximalabschätzung für die Dauer, bis ein Durchfluss nach einem Wechsel stabil ist, da es sich um den maximalen Durchflusswechsel während der Erzeugung des Profils handelt.

5.3.2 Ergebnisse zur Wiederholbarkeit der Profilerzeugung

Wie bei Messungen mit einem konstanten Durchfluss besteht auch bei einem dynamischen Prüfregime eine hohe Anforderung an die Reproduzierbarkeit. Als Maß für die Wiederholbarkeit wird im folgenden Abschnitt die Standardabweichung bestimmt und in Bezug auf die den Durchfluss beeinflussenden Faktoren, speziell auf Druck und Temperatur, untersucht. Mit den Auswertungen sollen die Einflussfaktoren auf die Profilerzeugung sowohl qualitativ als auch quantitativ evaluiert werden. Im zweiten Schritt werden hieraus Anforderungen an die messtechnische Infrastruktur sowie das Prüfregime abgeleitet.

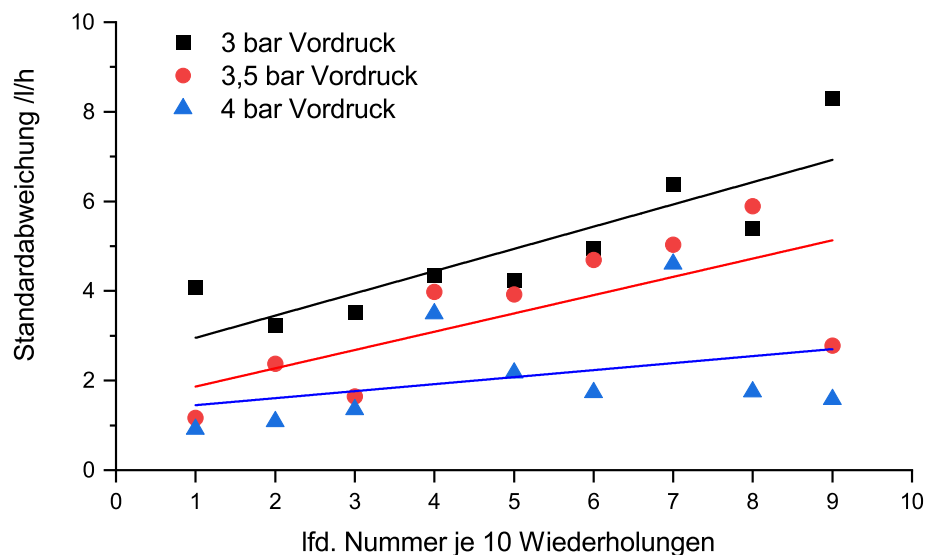


Abbildung 5.8: Standardabweichung des Durchflusses für Vordruckwerte von 3 bar, 3,5 bar und 4 bar, berechnet für jeweils 10 Profilerzeugungen und die jeweilige, lineare Regression der Daten

Aus Abbildung 5.8 und Tabelle 5.1 wird ersichtlich, dass die Standardabweichung des Durchflusses mit steigendem Vordruck sinkt. Die Standardabweichung

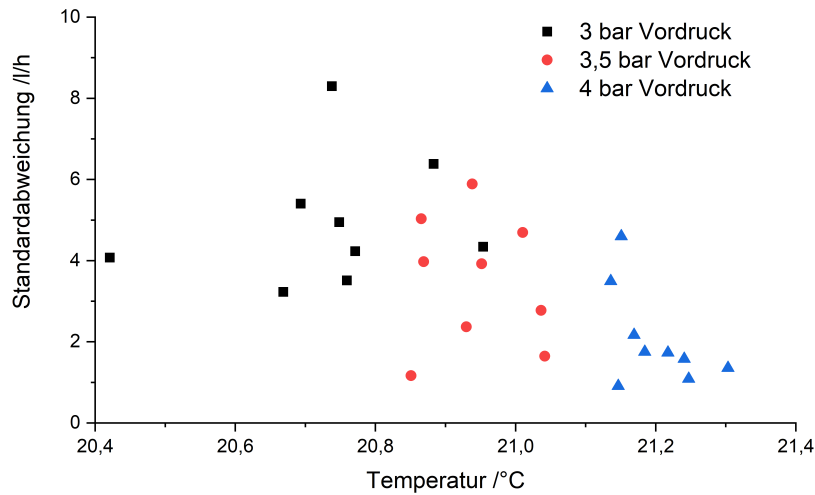


Abbildung 5.9: Standardabweichung des Durchflusses für Vordruckwerte von 3 bar , 3,5 bar und 4 bar, aufgetragen über der Temperatur des Mediums

chung wird mit der Zeit größer, wobei die Steigung aus der Regressionsanalyse $a = 0,16 \text{ l/h/bar}$ bei 4 bar Vordruck kleiner ist als bei 3 bar. Um die Ursache für die Steigung der Standardabweichung zu erklären, wird diese mit der Anzahl der Wiederholungen über der Flüssigkeitstemperatur für die drei verschiedenen Druckstufen in Abbildung 5.9 aufgetragen. In der Abbildung sieht man eine Korrelation zwischen Druck und Temperatur; das heißt, die Temperatur steigt mit zunehmendem Druck. Eine mögliche Erklärung dafür ist ein gestiegener Wärmeeintrag der Pumpe bei 4 bar Vordruck im Vergleich zu 3 bar, bei gleichbleibender Kühlleistung. Eine weitere Möglichkeit könnte ein höherer Wärmeeintrag in der Kavitationsdüse sein, in der der Vordruck der Pumpe in Reibung und damit in Wärme umgesetzt wird. Eine Korrelation zwischen der Standardabweichung und der Temperatur ist nicht offensichtlich.

Tabelle 5.1: Parameter der Regressionsanalyse für die Funktion $\sigma(p) = a \cdot p + b$

Druck bar	a l/h/bar	U_a l/h/bar	b l/h	U_b l/h	R^2
3	0,50	0,11	2,46	0,64	0,73
3,5	0,41	0,16	1,46	0,89	0,49
4	0,16	0,16	1,29	0,88	0,13

Da der Vordruck über das Druckverhältnis einen wesentlichen Einfluss auf den Kavitationsbeginn im Düsenhals und damit auf den Durchfluss hat, sollte bei dem Signal des MID ebenfalls ein Unterschied im Durchfluss der erzeugten Profile sichtbar sein. Dazu werden aus der Messreihe des Langzeitversuchs die

Durchflusswerte von fünf Wiederholungen des Profils Nr. 1 bei 3 bar und bei 4 bar in Abbildung 5.10 dargestellt, um die Auswirkungen der Druckveränderung auf den Durchfluss zu visualisieren. Die Reproduzierbarkeit, ist bei 4 bar deutlich erhöht im Vergleich zu den Messungen bei 3 bar.

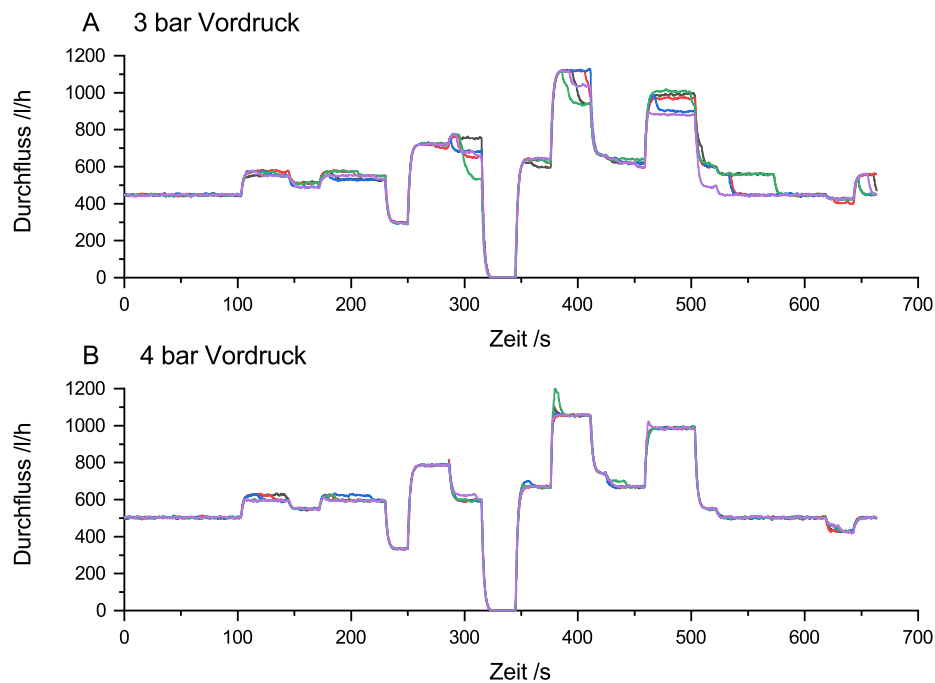


Abbildung 5.10: 5 Messungen des Durchflusses eines Profils mittels MID bei einem Vordruck von A) 3 bar und B) 4 bar

Aus den Untersuchungen in diesem Abschnitt 5.3.2 geht hervor, dass die hier auftretenden Schwankungen im Durchfluss zu Beginn eines Durchflusses aufgrund der ausbleibenden Kavitation entstehen. Die Profilerzeugung bei 4 bar relativem Vordruck führt zu einer deutlich stabileren Durchflusserzeugung mit einer über 50 % reduzierten Standardabweichung durch schneller einsetzende Kavitation zu Beginn der Durchflussniveaus. Die Reproduzierbarkeit wird durch einen höheren Vordruck deutlich verbessert und liegt nach der in Kapitel 6.2.4 neu eingeführten Definition in einer Größenordnung von 1 l/h.

5.4 Fazit

Die Auswertung verschiedener Verbrauchsganglinien hat gezeigt, dass eine Differenzierung in regionale oder in saisonale Gruppen nicht erforderlich ist. Die vollständige Datenbasis kann vor diesem Hintergrund als Grundlage für die Erzeugung von Referenzprofilen verwendet werden. Bei der Profilerzeugung

haben die Beobachtungen gezeigt, dass eine Überwachung und Aufzeichnung des Durchflusses zur Validierung umgesetzt werden sollte. Zum Beispiel konnten so Leckagen in der Kavitationsdüsenapparatur rechtzeitig erkannt und behoben werden. Anhand der Daten, die mit der Waage, dem magnetisch-induktiven Messgerät und dem Coriolis-Durchflussmessgerät aufgezeichnet werden, konnten die Durchflussraten während der Profilerzeugung validiert werden und es hat sich gezeigt, dass auch die Dauer der Durchflussrate mit der Dauer der vorgegebenen Durchflussrate übereinstimmt. Es werden außerdem mit dem Coriolis-Durchflussmessgerät zwei Effekte festgestellt, die zu Abweichungen am Beginn einer Durchflussstufe führen. Zum einen verzögert einsetzende Kavitation die Ausbildung des Durchflusses, zum anderen tritt Überschwingen im Durchfluss durch den schnellen Wechsel der Kavitationsdüsen mittels Schließung und Öffnung der pneumatischen Stempel auf. Die verzögert auftretende Kavitation ist so nicht akzeptabel, da dadurch auch die Reproduzierbarkeit geringer wird (Kapitel 5.3.2), lässt sich aber über die Druckverhältnisse verändern. Das Überschwingen ist systembedingt und wird durch die Dämpfung beeinflusst. Wenig Dämpfung ist für die geforderten schnellen Durchflusswechsel erforderlich und lässt sich über Ausgleichsbehälter einstellen. Die Auswertungen haben außerdem gezeigt, dass das dynamische Kavitationsverhalten bei Profilen von den bisherigen statischen Messungen abweicht. In der Profilerzeugung ist ein Druckverhältnis von $P_{nach}/P_{vor} < 0,3$ über die Kavitationsdüsen anzustreben, da dadurch die Reproduzierbarkeit erkennbar erhöht wird. Aus den Ergebnissen in Kombination mit den praktischen Arbeiten haben sich außerdem Prozesse ergeben, die für eine Messung von Vorteil sind und bei der Festlegung einer Prüfprozedur (Kapitel 7) berücksichtigt werden können.

6 Qualität der Profilerzeugung und Prüfstandsvergleich

In den vorangegangenen Kapiteln wurden Betriebsbedingungen und Einflussfaktoren bestimmt, unter denen Kavitationsdüsen einen Durchfluss reproduzierbar erzeugen. Dazu wurde die Herschel-Venturi-Düsengeometrie verwendet, Parameter wie Druck und Temperatur variiert und der Einfluss auf den Durchfluss und dessen Stabilität dargestellt. Es hat sich gezeigt, dass Temperaturstabilität gegeben sein muss, um die Kavitationsausprägung und damit den Durchfluss stabil zu halten. Weiterhin wurden mit den Düsen dynamische Durchflussprofile erzeugt und diese mittels magnetisch-induktivem und Coriolis-Durchflussmessgerät validiert. Vor allem der Druck direkt vor den Kavitationsdüsen hat einen wesentlichen Einfluss auf die Erzeugung eines dynamischen Profils. Ein Vergleich der Kavitationsdüsenteknologie mit anderen Profilerzeugungsmethoden, sowie die Validierung der dynamischen Durchflussprofile mit einem unabhängigen Messgerät hat bisher noch nicht stattgefunden.

6.1 Ringvergleich

Aufgrund der gestiegenen Anforderungen an einen Durchflussprüfstand, auch realitätsnahe dynamische Durchflusswechsel abbilden zu können, wurden in einem gemeinsamen europäischen Forschungsprojekt verschiedene Prüfstände entwickelt und im Rahmen einer EURAMET-Pilotstudie (EURAMET-Projekt 1506) erstmals miteinander verglichen. Nachfolgend werden die Ergebnisse des Ringvergleichs vorgestellt (WARNECKE et al., 2022), bei dem der Prüfstand mit Kavitationsdüsenapparat mit den Prüfständen anderer nationaler Metrologieinstitute und designierter Institute verglichen wurde. Diese Vergleichsmessung lieferte Informationen zur Profilerzeugung von Kavitationsdüsen im Vergleich zu anderen Profilerzeugungsmethoden, etwa durch Kolbenprober und drehzahlgeregelte Pumpen- beziehungsweise Ventilsteuerung.

Zur Auswertung eines Ringvergleichs gibt es verschiedene Parameter, die bei der Analyse verwendet werden, um Prüfstände mittels eines Transferstandards miteinander zu vergleichen. Bisher gab es keine Empfehlungen zur Auswertung eines Ringvergleichs mit dynamischen Profilen; die Auswertung der Messungen

nach bisherigen Schemata für Durchflussmessungen konnte aufgrund veränderter Anforderungen nicht einfach übertragen werden. Die durchgeführten Berechnungen erlauben Rückschlüsse auf die Wiederholbarkeit der Profilerzeugung oder auf die Abweichung vom vorgegebenen Profil und stellen einen wesentlichen Teil der Auswertung des Ringvergleichs mit dynamischen Profilen dar. Mit den genutzten Auswertungsverfahren, die im Folgenden vorgestellt werden, wird hier eine Möglichkeit aufgezeigt, Prüfstände für dynamische Profile miteinander zu vergleichen. Mit etablierten Methoden, wie zum Beispiel dem Verfahren nach COX (2002) zur Bestimmung des Referenzwertes und des Grades der Äquivalenz, wurden in Zusammenarbeit mit dem CETIAT die bisherigen Auswertemethoden angewendet. Darüber hinaus wurden im Rahmen dieser Dissertation neue Parameter zur Ringvergleichsauswertung erarbeitet und angewendet und sind hier ausführlich dargestellt. Aufgrund des dynamischen Durchflussregimes sind die bei der Kalibrierung des Transferstandards kontinuierlich aufgezeichneten Massestromdaten zur Evaluation der Prüfstände betrachtet, sowie daraus Kennparameter berechnet worden.

6.2 Methoden

Vor dem Ringvergleich wurde ein technisches Protokoll festgelegt, nach welchem ein Transferstandard auf den neu entwickelten Prüfständen zu kalibrieren ist. Da es sich dabei um neue Methodenentwicklung handelt, ist dieser Teil ausführlich dargestellt und die Schritte der Datenerfassung sowie die Auswertemethoden sind hier einzeln erläutert.

6.2.1 Transferstandard und Umgebungsbedingungen

Der Transferstandard (Abbildung 6.1) bestand aus einem Coriolis-Durchflussmessgerät Emerson MicroMotion Elite CMFS040M mit einem Transmitter 5700, einem Drucksensor Keller PR23 und einem Temperatursensor Pt100 Class B HART und wurde von den in Tabelle 6.1 aufgeführten, acht verschiedenen Laboren kalibriert. Jedes Labor hatte zwei Wochen Zeit für die Messungen und den Transport zum nächsten Labor. Die Messungen wurden im September 2020 im Durchflusslabor des CETIAT in Frankreich begonnen und dort im Februar 2021 mit einer erneuten Messung beendet. Da es sich bei dem Primärsignal des Coriolis-Durchflussmessgerätes um den Massestrom handelt und die Masse auch bei dem Ringvergleich der Vergleichswert ist, wird

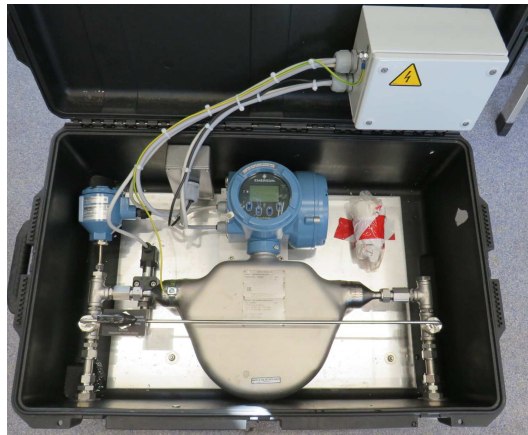


Abbildung 6.1: Transferstandard: Coriolis-Durchflussmessgerät, Transmitter, Temperatur- und Drucksensor

zusätzlich zu den Profildarstellungen des Volumenstrom bei den Auswertungen in Bezug auf den Ringvergleich der Massestrom im Folgenden dargestellt.

Tabelle 6.1: Teilnehmer des Ringvergleichs

Institut	Land	Technologie
1 CETIAT	Frankreich	Ventile
2 PTB	Deutschland	Kavitationsdüsen
3 FORCE	Dänemark	Ventile
4 CMI	Tschechien	Kolbenprober
5 RISE	Schweden	Kolbenprober/Lochblenden
6 DTI	Dänemark	Ventile
7 VTT	Finnland	Ventile
8 TUBITAK	Türkei	Ventile
9 CETIAT	Frankreich	Ventile

Zum technischen Protokoll gehörte unter anderem die Festlegung der Umgebungsbedingungen, die bei der Messung einzuhalten waren, um eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu gewährleisten. Die Bedingungen waren eine Wasser- und Umgebungstemperatur von $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, eine relative Luftfeuchtigkeit von 30 % - 80 % und ein Atmosphärendruck zwischen 860 *mbar* - 1060 *mbar*. Diese Bedingungen wurden ausgewählt, da sie sich bei bisherigen Ringvergleichsmessungen im Durchflussbereich als geeignet erwiesen haben. Der Transferstandard wurde bei allen Laboren über den Impulsausgang mit der Datenaufzeichnung des Prüfstands verbunden. Während der Kalibrierung wurden der Massestrom, der Druck und die Mediumstemperatur im Transferstandard mit einer Frequenz von 20 *Hz* auf dem mitgeführten Laptop mithilfe der Software Modcom aufgezeichnet. Außerdem wurden die Impulse des Coriolis-

Durchflussmessgeräts und weitere relevante Parameter wie das Signal der gravimetrischen Referenz mit der Datenaufzeichnung des Prüfstands aufgenommen.

6.2.2 Profilerzeugung

Für die Kalibrierung des Transferstandards wurden erneut drei Profile nach dem bereits beschriebenen Algorithmus (SCHUMANN, 2020) und der Datenbasis (MARTIN et al., 2017) erzeugt (Abbildung 6.2), von denen mindestens ein Profil jeweils fünf mal gemessen werden sollte.

Zusätzlich zu der Vorgabe statistisch gesicherter Durchflussprofile ergaben sich durch die ausgewählten Profile entsprechende der Start und Enddurchflussraten und der Gesamtvolumen zusätzliche Anforderungen an die messtechnische Infrastruktur. Das erste Profil startete und endete bei einem mittleren Durchfluss und hatte ein Gesamtvolumen von ungefähr 50 L; das zweite Profil hatte zu Beginn eine hohe Durchflussrate und endete bei einem mittleren Durchfluss von 500 l/h und 100 L Gesamtvolumen; das dritte Profil fing mit einem Nulldurchfluss an und endet bei einem mittleren Durchfluss, das Gesamtvolumen dieses Profils lag bei 80 L. Der maximal einzustellende Durchflusswechsel betrug 1000 l/h, wobei insgesamt Durchflussraten von 0 l/h bis 1638 l/h abgebildet werden mussten. Die Dauer der Profile lag im Bereich zwischen 443 s und 748 s. Als Anforderung an die Dauer des Durchflusswechsels wurde sich an den in der Realität auftretenden Zeiten beim Wasserverbrauch im Haushalt orientiert, die bei 100 ms bis 300 ms liegen (ÜNSAL et al., 2019).

Nach der Kalibrierung des Transferstandards mit dem dynamischen Prüfregime sollte von jedem Teilnehmer des Ringvergleichs eine Messung bei 0 l/h zur Feststellung der Nullpunktstabilität des Coriolis-Durchflussmessgerätes durchgeführt werden.

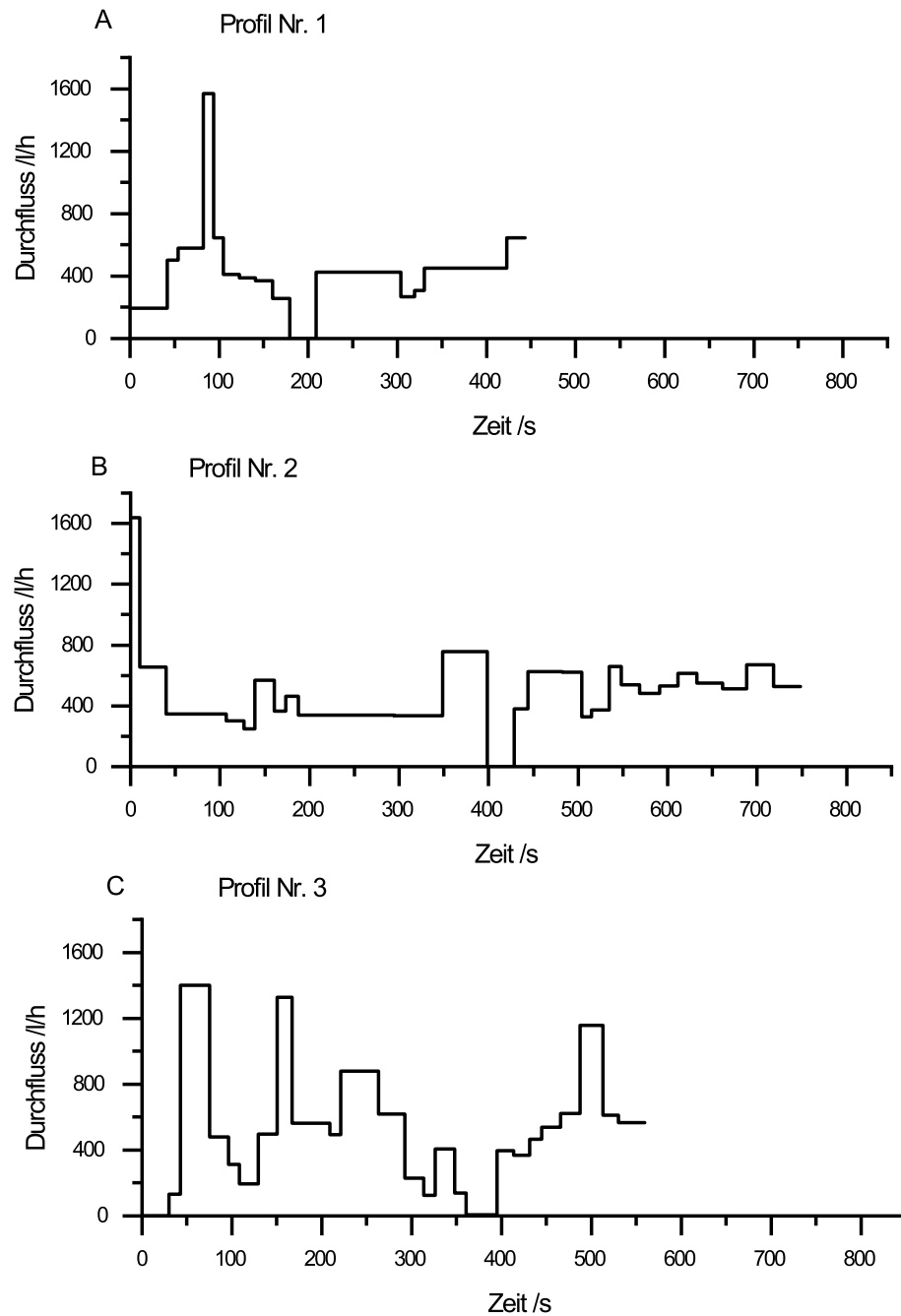


Abbildung 6.2: Durchflussprofil A) Nr. 1, B) Nr. 2 und C) Nr. 3 des Ringvergleichs

6.2.3 Standardauswertung

Bei einem Ringvergleich werden durch die Kalibrierung eines Transferstandards auf verschiedenen Prüfständen Informationen zur Messgenauigkeit der jeweiligen Prüfstände ins Verhältnis gesetzt. Dazu werden eines oder mehrere Kriterien benötigt, die bei dem Vergleich zur Auswertung betrachtet werden. In der Regel wird gemäß COX (2002) aus den Messungen aller beteiligten Labore ein Referenzwert ermittelt und der Grad der Äquivalenz bestimmt, was als standardmäßige Auswertung bezeichnet wurde und in diesem Fall vom CETI-AT durchgeführt wurde. Für einen Prüfstandsvergleich mit dynamischen Profilen ist diese Auswertung ein erster Anhaltspunkt, aber nicht ausreichend, weil zum Beispiel Aussagen zur tatsächlichen Realisierung der Profildurchflussraten oder zum Umschaltverhalten der jeweiligen Prüfstände relevant sind, aber in einer Standardauswertung keine Berücksichtigung finden.

Der Referenzwert wurde für die Durchflussprofile einzeln bestimmt und diese Ergebnisse je Profil miteinander verglichen. Nach dem Verfahren von COX (2002) wurde ein χ^2 -Test zur Konsistenzprüfung der Laborergebnisse verwendet. Um zu beurteilen, ob die Ergebnisse vergleichbar sind, wurde der Äquivalenzgrad $E_{n_{labi}}$ verwendet, der definiert ist als

$$E_{n_{labi}} = \left| \frac{\varepsilon_{labi} - \varepsilon_{RV}}{(U^2(\varepsilon_{labi}) - U^2(\varepsilon_{RV}))^{\frac{1}{2}}} \right|, \quad (6.1)$$

wobei in diesem Fall ε_{labi} die Messabweichung von Labor i für ein bestimmtes Profil, ε_{RV} der Referenzwert für die Messabweichung ist und $U(\varepsilon_{labi})$ und $U(\varepsilon_{RV})$ die erweiterten Unsicherheiten ($k=2$) dieser Werte sind. Die erweiterte Unsicherheit beinhaltet die Unsicherheit der Referenz der Prüfstände und die Wiederholbarkeit. Letztere ist definiert als die Standardabweichung der einzelnen Messabweichungen für ein gegebenes Durchflussprofil.

Um die Drift des Transferstandards zu berücksichtigen, wurde die Unsicherheit $U(\varepsilon_{labi})$ wie folgt bestimmt:

$$U(\varepsilon_{labi}) = 2 \cdot \left(\left(\frac{U_{labi}}{2} \right)^2 + u_{drift}^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (6.2)$$

wobei U_{labi} in den Tabellen 6.2 bis 6.9 angegeben ist und u_{drift} , entsprechend der Messung laut Protokoll, zu $u_{drift} = 0,014\%$ berechnet wurde.

Der berechnete Wert E_n ist positiv und wurde in drei Kategorien eingeteilt: Die Ergebnisse eines Labors für einen bestimmten Durchflusspunkt sind konsistent

(bestanden), wenn $E_n \leq 1$, oder inkonsistent (nicht bestanden), wenn $E_n > 1, 2$ ist. Für Werte im Bereich $1 < E_n \leq 1.2$ wurde eine Warnstufe definiert, bei der dem jeweiligen Labor empfohlen wurde, Verfahren und Methodik zu überprüfen.

Der Referenzwert ist der mit der Unsicherheit der Prüfstände gewichtete Mittelwert der Messabweichung und wurde wie folgt ermittelt:

$$\varepsilon_{RV} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_{lab i}}{U^2(\varepsilon_{lab i})}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{U^2(\varepsilon_{lab i})}}, \quad (6.3)$$

wobei n die Anzahl der teilnehmenden Labore ist. Die Unsicherheit des Referenzwerts ergibt sich aus:

$$u(\varepsilon_{RV}) = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{U^2(\varepsilon_{lab i})} \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (6.4)$$

Abschließend wurde mit dem χ^2 -Test geprüft, ob die ermittelten Messabweichungen und zugehörigen Unsicherheiten unter der Annahme einer Gauß-Verteilung zu erwarten waren. War dies der Fall, konnte der Referenzwert akzeptiert werden. Der χ^2 -Test ist wie folgt definiert:

$$\chi_{obs}^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\varepsilon_{lab i} - \varepsilon_{RV}}{u(\varepsilon_{lab i})} \right)^2. \quad (6.5)$$

Man beachte, dass hier $u(\varepsilon_{lab i})$ die Standardunsicherheit ($k=1$) ist. Die Messabweichung für ein Profil wurde nur akzeptiert, wenn die Wahrscheinlichkeit von $(\chi^2(\nu) > \chi_{obs}^2) < 0,05$ mit $\chi(\nu)$ als Erwartungswert der Gauß-Verteilung und einer Anzahl an Freiheitsgraden von $\nu = n - 1$ ist.

Unter der Verwendung der Excel-Funktion CHIINV(Wahrscheinlichkeit, Freiheitsgrad: $\nu = n - 1$) kann dies für eine konsistente Menge wie folgt umgeschrieben werden:

$$\chi_{obs}^2 < CHIINV(0,05; n - 1). \quad (6.6)$$

Wenn der beobachtete Wert χ_{obs}^2 mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % um den Erwartungswert der Gauß-Verteilung $\chi^2(\nu)$ lag, wurde der Referenzwert akzeptiert. Wenn nicht, wurde das Ergebnis mit dem größten Beitrag zu χ_{obs}^2 verworfen und der Test mit reduziertem Freiheitsgrad wiederholt.

6.2.4 Aufzeichnung der Massestromdaten

Mit dem dynamischen Testregime ging dieser Ringvergleich über den Rahmen bisheriger Ringvergleiche in der Durchflussmessung hinaus. Um Aussagen zu der Art und Qualität der Profilerzeugung machen zu können, wäre eine ausschließliche Betrachtung der Messabweichung und des Äquivalenzgrads ungenügend. Durch die Aufzeichnung der Parameter Druck, Temperatur und Durchfluss mit dem Transferstandard mit einer Frequenz von 20 Hz wurde eine gute Grundlage geschaffen, um neben der Messabweichung weitere Parameter zwischen den Prüfständen zu vergleichen. Im Kontext der Prüfstandsbeschreibungen wurden die Ergebnisse teilweise in WARNECKE et al. (2022) dargestellt und nachfolgend im Hinblick auf die Kavitationsdüsenteknologie untersucht.

Die Aufzeichnung der Daten erfolgte in allen Laboren mit der Software Modcom, wurde vor einer Messung manuell gestartet und für alle Labore identisch als csv-Datei gespeichert. Es wurden die Profildaten detailliert analysiert, die den Daten entsprachen, die zur Berechnung des E_n -Wertes verwendet wurden. Die betrachteten Rohdaten bestanden dabei aus den mit einem Zeitstempel aufgezeichneten Durchflusswerten des Coriolis-Durchflussmessgeräts sowie den Druck- und Temperaturwerten der Sensoren des Transferstandards. Darauf aufbauend wurden im Rahmen dieser Dissertation Berechnungen und Darstellungen zu Residuen und deren Häufigkeitsverteilung sowie die Bestimmung und Analyse neuer Kennparameter durchgeführt, die in Anhang B bzw. auszugsweise im folgenden Abschnitt aufgeführt sind.

6.2.5 Bestimmung von Kennparametern bei der Profilmessung

Um die Erkenntnisse der Standardauswertung zu erweitern und die Daten aller teilnehmenden Labore miteinander vergleichen zu können, wurden fünf Parameter als Kennparameter festgelegt:

1. Als erster Kennparameter wurde die sich aus den Durchflussprofilwiederholungen ergebende Standardabweichung für jedes Durchflussprofil berechnet und anschließend der Mittelwert der Standardabweichung für ein Durchflussprofil als Maß für die Wiederholbarkeit abgeleitet.
2. Weiterhin wurde der Mittelwert der Residuen als Abweichung des gemessenen und des Solldurchflussprofils ermittelt. Anhand dessen kann man sehen, wie gut ein Durchflussprofil im Durchschnitt mit der Spezifikation

übereinstimmt. Positive Werte bedeuten, dass der tatsächliche Durchfluss im Durchschnitt höher als der Sollwert war, und negative Werte, dass der Durchfluss im Durchschnitt niedriger war.

3. Als Kennzahl für die Schaltzeit (abfallend) wurde die Dauer definiert, bis der Durchfluss das nächste Niveau erreicht hatte, beispielhaft gemessen an einem Durchflusswechsel. Der zweite Durchfluss war geringer als der erste. In diesem Beispiel ist die Dauer ein maximaler Schätzwert, da es sich um die größte Durchflussänderung im dynamischen Durchflussprofil handelt.
4. Die vierte Kennzahl entspricht der Schaltzeit (steigend) wobei die Dauer der Durchflussänderung für das Fallbeispiel eines Durchflussanstiegs von Null auf ca. 400 l/h betrachtet wurde.
5. Der fünfte Kennparameter betrifft die Abweichung der gemessenen Gesamtmasse von der theoretischen Gesamtmasse des Durchflussprofils. Dazu wurde die von der entsprechenden Referenz ermittelte Masse verwendet und das Volumen des Soll-Durchflussprofils mit der Dichte von Wasser bei 20 °C (998,38 kg/m³) und bei 9 °C (999,97 kg/m³) für die Daten des VTT-Prüfstandes umgerechnet.

Die ersten beiden Parameter sind über die Berechnung des mittleren Profils miteinander verknüpft, die anderen Parameter hängen nicht direkt voneinander ab. Wie die Parameterberechnung bei dem durchgeführten Ringvergleich angewendet wurde, ist im Einzelfall folgend näher erläutert.

Durchflussdaten und deren Standardabweichung: Die Daten sind aufgrund der manuell gestarteten Aufzeichnung der Profile zeitlich nicht synchronisiert. In einem ersten Schritt wurde daher der Zeitpunkt der ersten Durchflussänderung für die Durchflussprofile Nr. 1 und Nr. 2 und der Zeitpunkt der zweiten Durchflussänderung für das Durchflussprofil Nr. 3 synchronisiert. Diese Zeitsynchronisation wurde auf die Temperatur- und Druckmessungen übertragen. Außerdem verwendeten CMI und RISE Kolbenprober mit einem geringeren Kapazitätswolumen als das Volumen des Durchflussprofils Nr. 2 und Nr. 3. Daher wurden bei RISE diese Durchflussprofile in zwei Abschnitte und bei CMI alle Durchflussprofile in mehrere Abschnitte aufgeteilt und die Teilprofile einzeln gemessen. Die Zeiten zwischen den Durchflussprofilteilen wurden bei der Betrachtung der Massedaten herausgeschnitten, sodass alle Durchflussprofile auf der Basis einer gemeinsamen, einheitlichen Zeitskala verglichen werden konnten, beginnend mit Null am Anfang jeder Wiederholung und jedes Durchflussprofils. Aus den Wiederholungen wurde dann ein mittleres

Profil für jedes Profil und Institut berechnet und die zugehörige Standardabweichung ermittelt.

Residuen der Durchflusswerte: Für die Berechnung der Residuen wurden die Wiederholungen eines Profils über das arithmetische Mittel des Massestroms zu einem mittleren Profil zusammengefasst. Basierend auf diesen gemittelten Durchflussprofilen wurden die Residuen als Differenz zwischen dem gemittelten Profil und dem Profil mit den Nenndurchflüssen berechnet. Diese Werte wurden über dem Durchfluss für jedes Profil und Institut dargestellt.

Als weitere Darstellungsform zur quantitativen Auswertung sind Histogramme der Residuen mit einer Klasseneinteilung von 10 kg/h erstellt worden. Die Ordinate ist logarithmisch eingeteilt und gibt an, wie oft eine Durchflussdifferenz einer bestimmten Klasse während des Durchflussprofils auftrat.

Betrachtung der Durchflusswechsel: Ein wichtiger Punkt bei der Erzeugung von dynamischen Profilen ist der Durchflusswechsel, wenn also über einen Schaltvorgang eine Änderung im Durchfluss bewirkt wird. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zum bisherigen statischen Prüfregime, bei dem Durchflussänderungen möglichst auszuschließen waren, nun aber Teil der Prüfprozedur sind. Aus diesem Grund war es notwendig, sich die Umschaltvorgänge und damit den Durchfluss beim Wechsel näher anzuschauen, zu charakterisieren und im Vergleich der verschiedenen Prüfstände und Technologien einzuordnen. Betrachtet man die Durchflussänderungen innerhalb eines Durchflussprofils eines teilnehmenden Labors (Anhang B), so sehen diese ähnlich aus. Daher wurde angenommen, dass jeder Durchflusswechsel charakteristisch für den jeweils betrachteten Prüfstand ist. Zur weiteren Analyse wurde einer dieser Übergänge für eine Durchflussabnahme und einer für eine Durchflusszunahme näher untersucht, um die Prüfstände diesbezüglich zu charakterisieren.

Da es bei dieser Analyse lediglich darum ging, eine Größenordnung für die Dauer des Durchflusswechsels abzuschätzen und die verschiedenen Prüfstände in dieser Hinsicht miteinander zu vergleichen, war die Betrachtung von zwei beispielhaften Durchflussänderungen, einer abfallenden und einer zunehmenden, ausreichend. Aufgrund der teilweise starken Oszillation des Durchflusssignals lässt sich über die in Kapitel 5.3.1 verwendete Beruhigungszeit t_{95} kein für alle Labore sinnvoller Vergleichswert bilden. Eine weitere, häufig in der Messtechnik verwendete Methode ist die Bestimmung der Anstiegs- und Fallzeiten, bis 90 % des Sollwertes erreicht sind. Allerdings wurde der Sollwert $\pm 10\%$ teilweise nicht erreicht, sodass auch diese Berechnung keine sinnvoll vergleichbare Zeit für den Umschaltvorgang der hier betrachteten Profile der Prüfstände liefert.

Mit der folgenden Berechnung wurde nun eine Zeit $t_{Schaltzeit}$ als Maß für die Änderungsdauer ermittelt. Mit dieser Methode wird die Dauer bis zum erstmaligen Erreichen der nächsten Durchflussrate angegeben und noch keine Information über die Stabilität des Durchflusses auf dem nächsten Niveau gewonnen. Als quantitative Analyse wurde die erste Ableitung mit einem gleitenden Mittelwert über 10 Werte (0,5 s) bestimmt, entsprechend der Nullpunkte der zweiten Ableitung die Zeit zwischen den Wendepunkten der Ausgangsfunktion bei der Durchflussänderung ermittelt und um die Zeit der Mittlung von einer halben Sekunde reduziert.

6.3 Ergebnisse

6.3.1 Standardauswertung

Die folgenden Tabellen 6.2 bis 6.9 zeigen die Laborergebnisse und die zugehörigen Unsicherheiten zusammen mit dem Grad der Äquivalenz für die jeweiligen Profile. Das vom Transferstandard erfasste Gesamtvolumen wurde gegen das von der Referenz des jeweiligen Prüfstands gemessene Gesamtvolumen ausgewertet. Die Messungen der drei Durchflussprofile wurden aufgrund ihrer unterschiedlichen Charakteristika separat ausgewertet und sind in Abbildung 6.3 dargestellt. Von FORCE wurde Profil Nr. 2 und von TUBITAK Profil Nr. 1 realisiert, alle anderen Institute haben alle drei Profile erzeugt.

Die Abbildungen 6.5, 6.6 und 6.7 zeigen die Messabweichung des Transferstandards zur Referenz des teilnehmenden Labors und den dazugehörigen Fehler für die drei gemessenen Profile zusammen mit dem Referenzwert, welcher als rote Linie eingezeichnet ist und der zugehörigen Unsicherheit, die als gestrichelte rote Linie dargestellt ist. Die relativen Fehler stimmen für die drei verschiedenen Profile innerhalb einer Spanne von -0,1 % bis 0,2 % überein.

Tabelle 6.2: CETIAT Messabweichung

Profil Nr.	Messabweichung /%	$U(k=2)$ /%	Temperatur /°C	Druck /bar
1	0,17	0,20	21,42	1,12
2	0,05	0,10	21,94	1,13
3	-0,06	0,18	21,95	1,21

Tabelle 6.3: CMI Messabweichung

Profil Nr.	Messabweichung /%	$U(k=2)$ /%	Temperatur /°C	Druck /bar
1	0,08	0,16	21,43	0,24
2	0,07	0,22	23,01	0,25
3	-0,04	0,16	20,40	0,32

Tabelle 6.4: DTI Messabweichung

Profil Nr.	Messabweichung /%	$U(k=2)$ /%	Temperatur /°C	Druck /bar
1	0,10	0,11	22,44	2,92
2	-0,26	0,11	22,56	2,91
3	0,01	0,15	22,06	2,91

Tabelle 6.5: FORCE Messabweichung

Profil Nr.	Messabweichung /%	$U(k=2)$ /%	Temperatur /°C	Druck /bar
2	0,04	0,10	20,16	3,08

Tabelle 6.6: PTB Messabweichung

Profil Nr.	Messabweichung /%	$U(k=2)$ /%	Temperatur /°C	Druck /bar
1	-0,02	0,10	21,21	4,11
2	-0,06	0,10	20,79	4,09
3	0,01	0,10	21,02	4,21

Tabelle 6.7: RISE Messabweichung

Profil Nr.	Messabweichung /%	$U(k=2)$ /%	Temperatur /°C	Druck /bar
1	0,11	0,10	20,05	4,01
2	0,08	0,10	20,05	3,89
3	0,06	0,10	20,02	3,88

Tabelle 6.8: TUBITAK Messabweichung

Profil Nr.	Messabweichung /%	$U(k=2)$ /%	Temperatur /°C	Druck /bar
1	0,06	0,33	19,80	5,93

Tabelle 6.9: VTT Messabweichung

Profil Nr.	Messabweichung /%	$U(k=2)$ /%	Temperatur /°C	Druck /bar
1	0,16	0,40	9,04	3,99
2	0,09	0,28	8,68	3,98
3	0,14	0,28	8,61	4,00

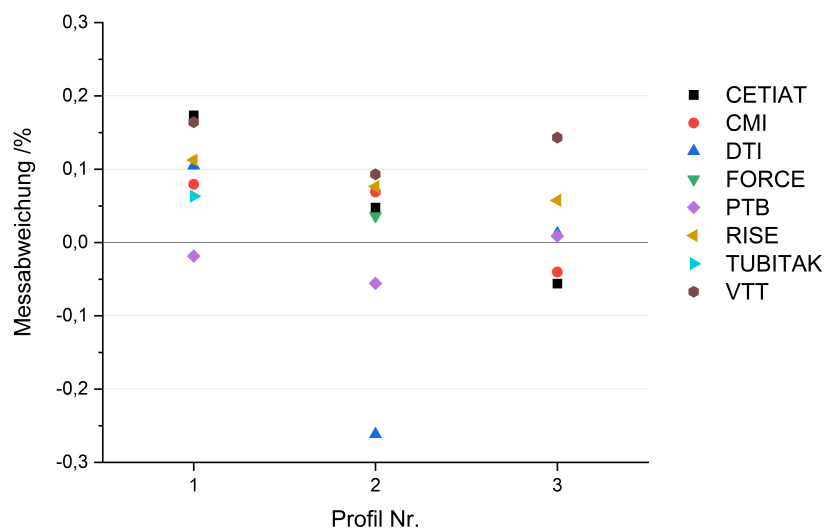


Abbildung 6.3: Messabweichung des Transferstandards bei Kalibrierung des teilnehmenden Labors entsprechend der drei gemessenen Profile

Tabelle 6.10: Grad der Äquivalenz der teilnehmenden Labore (Teil 1)

	CETIAT		CMI		DTI		FORCE	
	$U(k=2)$ /%	E_n	$U(k=2)$ /%	E_n	$U(k=2)$ /%	E_n	$U(k=2)$ /%	E_n
Profil Nr. 1	0,20	0,51	0,16	0,03	0,11	0,29		
Profil Nr. 2	0,10	0,19	0,22	0,18			0,10	0,06
Profil Nr. 3	0,18	0,42	0,16	0,38	0,15	0,04		

Tabelle 6.11: Grad der Äquivalenz der teilnehmenden Labore (Teil 2)

	PTB		RISE		TUBITAK		VTT	
	$U(k=2)$	E_n	$U(k=2)$	E_n	$U(k=2)$	E_n	$U(k=2)$	E_n
	/%		/%		/%		/%	
Profil Nr. 1	0,10	1,04	0,10	0,42	0,33	0,04	0,40	0,23
Profil Nr. 2	0,10	0,93	0,10	0,50			0,28	0,23
Profil Nr. 3	0,10	0,10	0,10	0,45			0,28	0,46

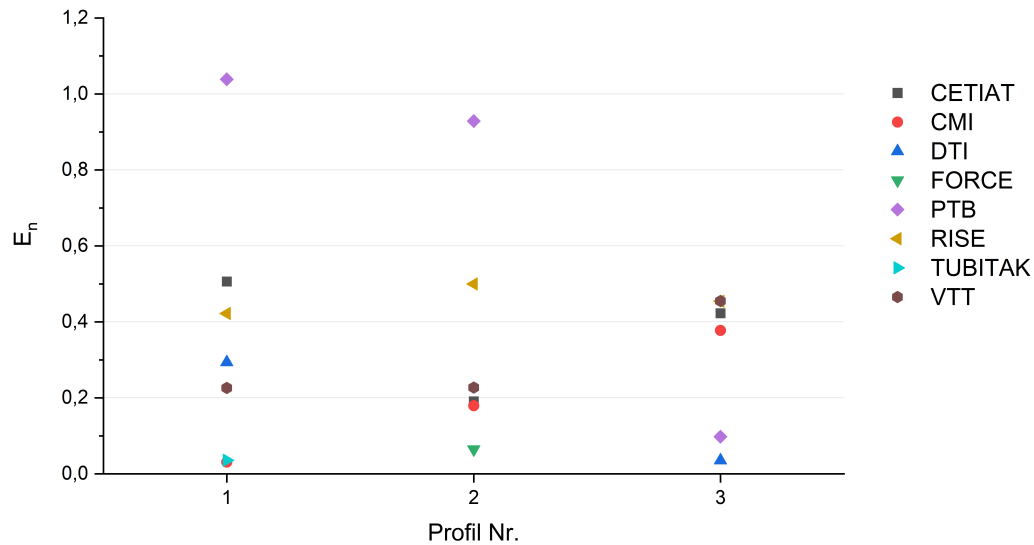


Abbildung 6.4: E_n für alle teilnehmenden Labore ohne DTI Profil 2; Ergebnisse sind konsistent

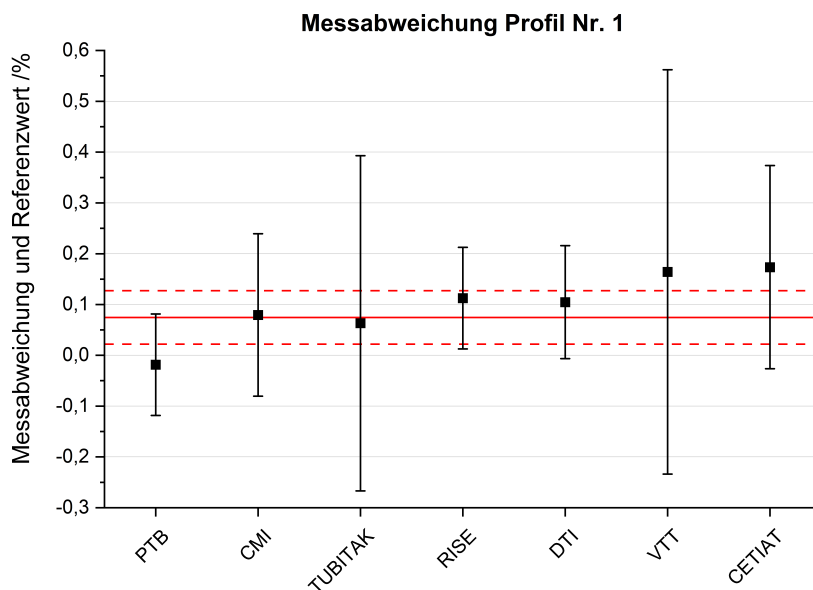


Abbildung 6.5: Messabweichung des Transferstandards unter dynamischem Prüfregime, Profil Nr. 1 der teilnehmenden Labore

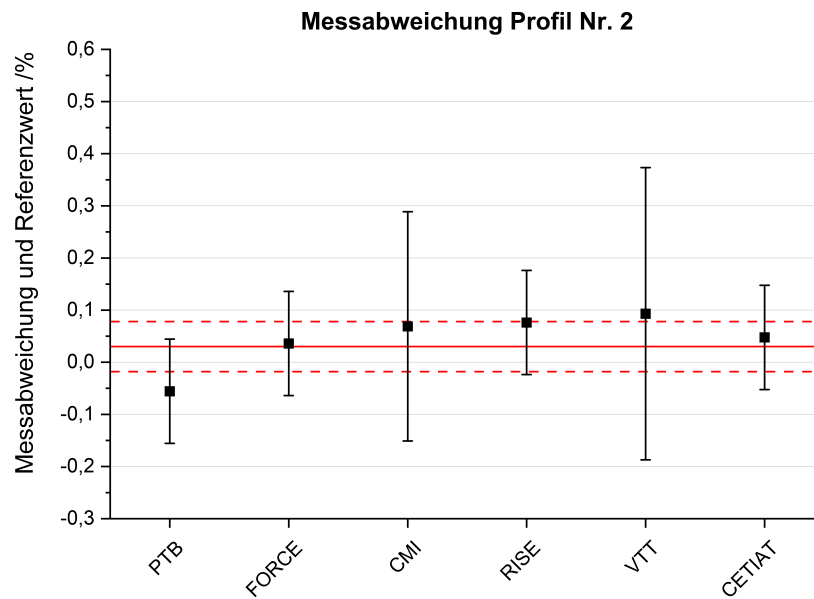


Abbildung 6.6: Messabweichung des Transferstandards unter dynamischem Prüfregime, Profil Nr. 2 der teilnehmenden Labore

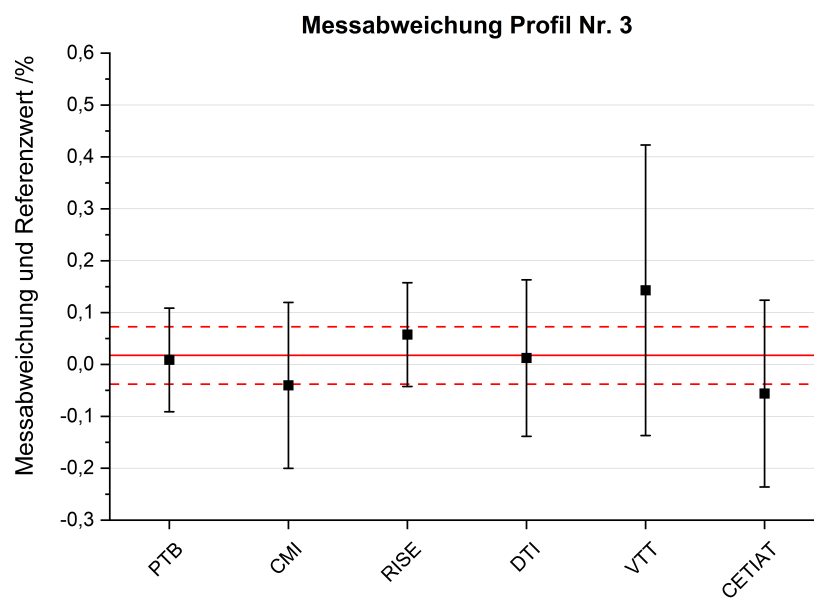


Abbildung 6.7: Messabweichung des Transferstandards unter dynamischem Prüfregime, Profil Nr. 3 der teilnehmenden Labore

6.3.2 Ergebnisse aus den Massestromdaten

Die Ergebnisse für die fünf Kennparameter sind in Tabelle 6.12 und Tabelle 6.13 einzeln für die teilnehmenden Labore aufgelistet und in Abbildung 6.10 zusammenfassend dargestellt.

Durchflussdaten und deren Standardabweichung: Die aufgezeichneten Massestromdaten werden mit den vorgegebenen Daten der nominalen Durchflussprofile (Anhang B, Diagramm A und B) verglichen. Der Vergleich gibt einen ersten Eindruck von der Qualität, mit der die Durchflussprofile auf den verschiedenen Prüfständen realisiert werden, und liefert interessante Informationen über die Charakteristiken der verschiedenen Technologien, die zur Erzeugung der Durchflussprofile verwendet werden. Bei der Umsetzung mit Ventilen kommt es bei den Prüfständen von DTI und VTT an einzelnen Durchflusspunkten zu intermittierendem Schwingen durch die Steuerung, sodass Schwankungen im Durchfluss um den Nominalwert sichtbar werden. Ähnliches tritt bei den anderen ventilgesteuerten Prüfständen (CETIAT, FORCE und TUBITAK) sowie am Prüfstand der PTB auf. Hier kommt es zu regelmäßigen, gleichmäßig erhöhten oder verringerten Durchflusswerten gegenüber dem vorgegebenen Durchflussprofil (s. Kapitel 5.3.1). Bei der Betrachtung der Zeitskala fällt für den CMI-Prüfstand eine zeitliche Streckung des Durchflussprofils gegenüber der Spezifikation auf. Diese Merkmale treten unabhängig vom betrachteten Durchflussprofil und für alle Wiederholungen auf. Grundsätzlich verdeutlichen die Diagramme, dass alle Prüfstände der Pilotstudie in der Lage sind, dynamische Lastwechsel entsprechend eines vorgegebenen Profils zu erzeugen.

Residuen der Durchflusswerte: Anhand der Betrachtung der Residuen lassen sich Abweichungen zwischen dem realisierten und dem vorgegebenen Profil identifizieren. Die Abbildungen in der ersten Zeile in Anhang B (ungerade Seiten) zeigen die Residuen aller Ringvergleichsteilnehmer über die synchronisierte Messzeit, die zweite Zeile zeigt die Residuen in Abhängigkeit von der Durchflussrate.

Zusätzlich zu konstanten Abweichungen im Durchfluss bei bestimmten Durchflussraten zeigen die Abbildungen Unterschiede bei den Übergängen zwischen zwei Durchflusswerten. Bei Durchflussänderungen tritt an den Prüfständen am DTI und am FORCE tendenziell ein positives und eher einseitiges Überschwingen auf. Beim PTB-Prüfstand ist nach dem Wechsel der Durchflusspunkte

ebenfalls ein Überschwingen vorhanden, das durch das Einsetzen der Kavitation erklärt werden kann. In allen Realisierungen ist sowohl ein negatives als auch ein positives Überschwingen sichtbar, da die Durchflusswerte nominal einem Stufenprofil und damit einer momentanen Durchflussänderung entsprechen, die in der Praxis aufgrund der Trägheit der Flüssigkeit und der Dauer von Schaltvorgängen nicht umgesetzt werden kann. Bei der Hälfte der Prüfstände treten in den Residuen Abweichungen von Null in der Größenordnung von 100 l/h auf. Die Residuen der Durchflussprofile, die mit Kavitationsdüsen erzeugt werden, schwanken um 0, das heißt, die realisierten Profile entsprechen im Mittel den Vorgaben.

Mit den Diagrammen in Anhang B Zeile 3 lassen sich die Abweichungen der realisierten Profile von der Vorgabe qualitativ beschreiben. Im Durchschnitt stimmen alle realisierten Durchflussprofile gut mit den nominalen Durchflussprofilen überein, sodass der Hauptpeak der Residuen um Null liegt. Je schmaler und höher dieser Peak ist, desto näher liegt das gemittelte Durchflussprofil am nominalen Durchflussprofil. Auf diese Weise kann die Gesamtqualität der Durchflussprofilgenerierung für jedes Labor dargestellt und verglichen werden. Die Anzahl der Residuen im Hauptpeak variiert für die teilnehmenden Labore zwischen 1200 und 7500 in einer Klasse. Die Breite des Hauptpeaks variiert um eine Größenordnung, wobei das Minimum im Bereich der Klassengröße von 10 kg/h und das Maximum bei ungefähr 100 kg/h liegt. Die bei FORCE, PTB, RISE und TUBITAK realisierten Profile zeigen bei der Betrachtung der Histogramme der Residuen bei Null einen relativ schmalen Peak gegenüber den anderen Laboren. Am schmalsten ist der Peak bei RISE; die Institute FORCE, PTB und TUBITAK haben eine Peakbreite, die etwa um Faktor zwei größer ist. Im Vergleich dieser drei Institute bestand nur an der PTB mit den Kavitationsdüsen die Möglichkeit, alle drei Profile zu realisieren.

Betrachtung der Durchflusswechsel: Welche Auswirkungen die unterschiedlichen Realisierungen auf den Durchfluss beim Umschalten haben, wird in diesem Abschnitt näher erläutert. Als Beispiel und Maximalabschätzung ist die erste Durchflussänderung im Durchflussprofil Nr. 2 für sieben der teilnehmenden Labore vergrößert in Abbildung 6.8 dargestellt. Eine vergleichbare Änderung aus dem Durchflussprofil Nr. 1, generiert am TUBITAK, ist in der Abbildung ergänzt.

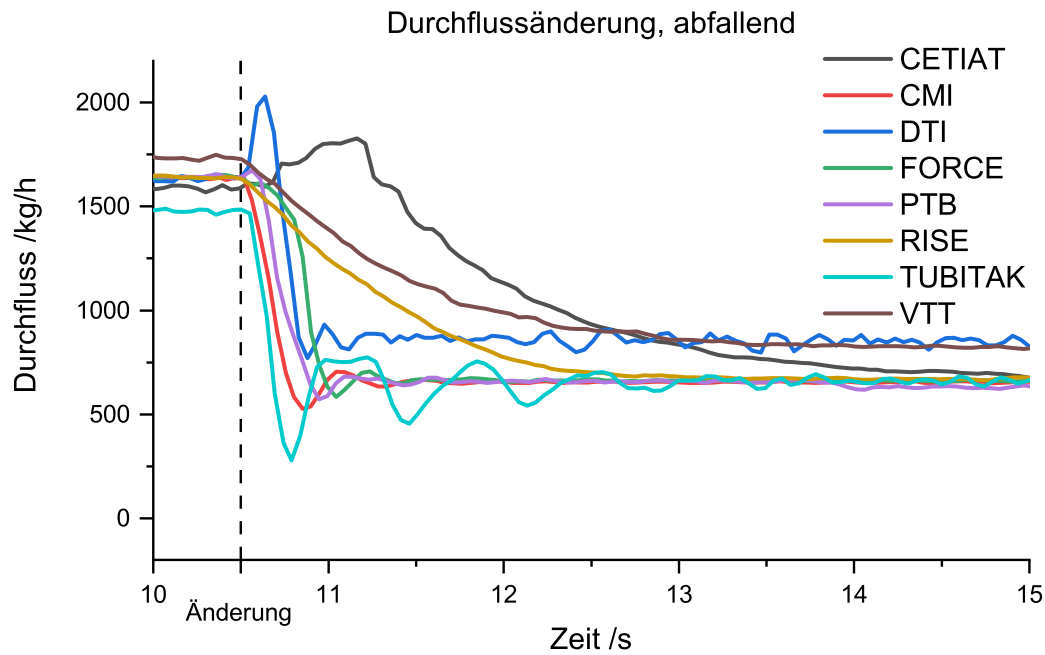


Abbildung 6.8: Coriolis-Durchflussmessgerät Massestromdaten; abfallende Durchflussänderung, Maximalabschätzung; Durchflussprofil Nr. 2 (TUBITAK: Durchflussprofil Nr. 1)

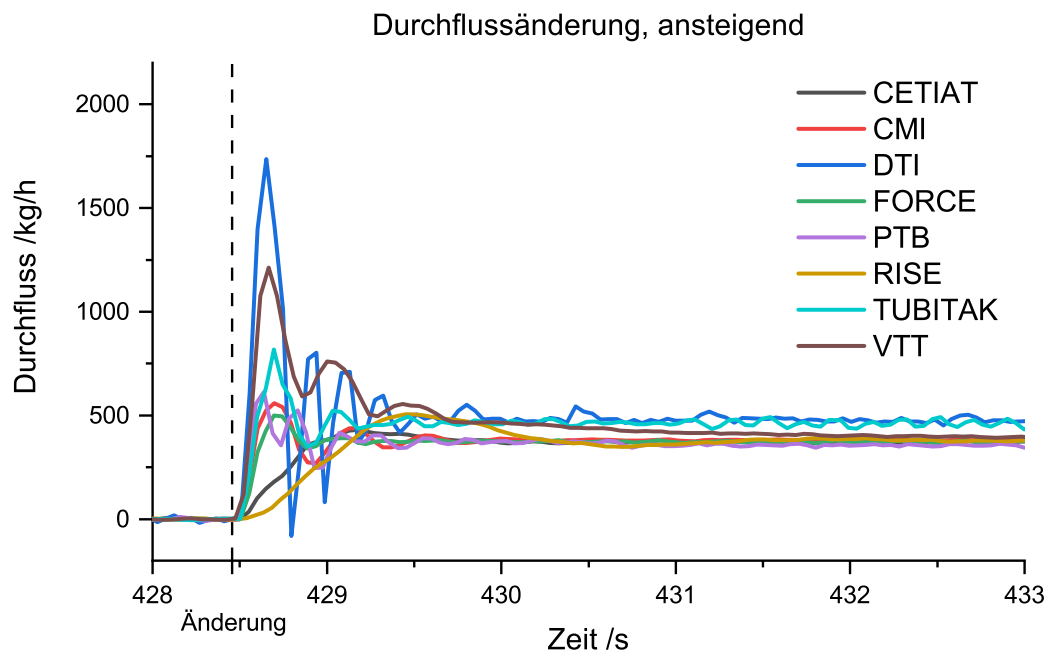


Abbildung 6.9: Coriolis-Durchflussmessgerät Massestromdaten; ansteigende Durchflussänderung; Durchflussprofil Nr. 2 (TUBITAK: Durchflussprofil Nr. 1)

Der Zeitpunkt des Beginns der Änderung des Durchflusses ist der Zeitstempel der Synchronisation der Durchflussprofile und wird in Abbildung 6.8 als

gestrichelte Linie dargestellt. Es wird die Ausgabe der Massedaten des Coriolis-Durchflussmessgeräts als Antwort auf den Durchflusswechsel betrachtet. Durch die Synchronisation werden die Unterschiede in der Reaktionszeit der Schaltungen sowohl bei der Elektronik als auch bei den Ventilen sichtbar. Zusätzlich zu dem Beispiel einer Durchflussabnahme wird das Massestromsignal des Coriolis-Durchflussmessgeräts beim Wechsel von einem Nulldurchfluss zu einem höheren Durchfluss betrachtet (Abbildung 6.9).

Aus den Abbildungen 6.8 und 6.9 ist ersichtlich, dass die Änderung zwischen zwei Durchflussraten bei den Prüfständen unterschiedlich lange dauert. Die Berechnungsmethode führt dazu, dass Schwingungen mit einer Periodendauer $T < 0,5\text{ s}$ geglättet werden, sodass die Messunsicherheit mindestens $0,5\text{ s}$ beträgt. Während der Wechsel bei CETIAT, RISE und VTT mehr als eine Sekunde dauert, bis das Signal des Coriolis-Durchflussmessgeräts auf dem nächsten Durchflussniveau ist, dauert es bei den Prüfständen der anderen Labore weniger als eine Sekunde. Dieser Unterschied ist mit Betrachtung der Messunsicherheit bei der Berechnung signifikant und wird durch eine unterschiedlich starke Dämpfung der Prüfstandssysteme auf die Flüssigkeit verursacht. Die Prüfstände mit einer langen Umschaltedauer zeigen aufgrund der stärkeren Dämpfung kein Überschwingen am Ende der Umschaltung. Im Gegensatz dazu führt die schnelle Umschaltung mit geringerer Dämpfung, die z. B. mit dem TUBITAK-Prüfstand realisiert wird, zu einem Schwingen des Durchflusssignals. Ein weiterer möglicher Grund für die Unterschiede im Massestromsignal ist der unterschiedliche Abstand zwischen der Durchflusserzeugung und dem Transfernromal auf den verschiedenen Prüfständen. Liegt zum Beispiel eine weite Strecke zwischen dem Ventil, das den Massestrom regelt, und dem Durchflussmessgerät, wird eine durch das Ventil erzeugte Schwingung bis zum Transfergerät stärker reduziert, als wenn das Ventil direkt vor dem Durchflussmessgerät eingebaut ist. Das mit dem Kavitationsdüsenprüfstand realisierte Profil liegt bei der Dämpfung im mittleren Bereich und erreicht durch die pneumatische Steuerung die kürzesten Umschaltzeiten. Verhältnismäßig große Flüssigkeitsvolumen vor und hinter den Kavitationsdüsen sorgen für ein geringes Überschwingen bei einer schnellen Schaltung im Vergleich zu den anderen Realisierungsmöglichkeiten.

Ein weiterer sichtbarer Effekt bei einer abfallenden Durchflussänderung ist ein positives Überschwingen des Massestromsignals, das für die Prüfstände DTI und CETIAT zu Beginn des Umschaltprozesses beobachtet wird. Beim Wechsel zu einem höheren Durchfluss kommt es bei allen Prüfständen zum Überschwingen, wie in Abbildung 6.9 zu sehen ist. Betrachtet man die absoluten Werte in Tabelle 6.12, so sind die Zeiten für eine abfallende Stufe geringer als für

eine zunehmende Stufe, was darauf zurückzuführen ist, dass die Werte für eine abfallende Durchflussänderung eine Maximalabschätzung darstellen und die Analyse für einen Durchflussanstieg im mittleren Bereich bis 500 l/h stattfindet. Die Zeit bis zum nächsten Durchfluss bei VTT ist nach dem Nulldurchfluss bei der steigenden Änderung um mehr als den Faktor 10 kleiner als bei der abfallenden Änderung. Das bedeutet, dass die Zeit der Durchflussänderung nicht einheitlich für einen Prüfstand zusammengefasst werden kann, sondern eine getrennte Betrachtung zwischen abfallendem und ansteigendem Wechsel sinnvoll ist.

Tabelle 6.12: Durchflussänderungsdauer; abfallender und steigender Durchfluss

Institut	Dauer Durchflussänderung abfallend /s	Dauer Durchflussänderung ansteigend /s
CETIAT	4,53	0,79
CMI	0,36	0,27
DTI	0,60	0,17
FORCE	0,65	0,22
PTB	0,36	0,17
RISE	2,91	0,84
TUBITAK	0,27	0,36
VTT	3,91	0,17

Im Allgemeinen liegt die Dauer für Durchflussänderungen im Bereich zwischen 0,17 s und 5 s und damit in dem Bereich, der auch in der tatsächlichen Verbrauchsmessung auftritt. Je nach Prüfstand variiert die Dauer der Änderung, wobei die Zeit im Wesentlichen durch den im System vorgegebenen Druck bestimmt wird. Der Druck, dargestellt in Anhang B in der zweiten Zeile (gerade Seiten), ist bei den pumpengeregelten Prüfständen im Mittel verringert. Diese Prüfstände sind durch eine längere Dauer beim Durchflusswechsel charakterisiert. Am CETIAT ist der Druck $p < 1 \text{ bar}$, bei DTI, FORCE, PTB und VTT liegt der Druck im mittleren Bereich von 3 bar - 4 bar und bei TUBITAK liegt der Druck bei $p \approx 6 \text{ bar}$. Für die Änderung nach dem Nulldurchfluss liegen alle Prüfstände mit der verwendeten Berechnungsmethode im Bereich von 0,17 s bis 0,84 s.

Neben der Schnelligkeit der Durchflusswechsel kann man in Abbildung 6.9 sehen, dass die Stabilität der erzeugten Durchflussraten für die verschiedenen Prüfstände variiert. Der Massestrom am Coriolis-Durchflussmessgerät schwankt

bei den am DTI und am TUBITAK gemessenen Durchflussprofilen stärker als bei den anderen Prüfständen, was auch in den Diagrammen in Anhang B sichtbar und in Abbildung 6.10 über die Standardabweichung detaillierter dargestellt ist.

Die Betrachtung der Durchflussänderung zeigt, wie schon die Untersuchungen in Abschnitt 6.3.2, dass die Realisierung der Durchflussprofile individuell von der jeweiligen Umsetzung abhängt. Alle Prüfstände erzeugen bei einer steigenden Änderung des Durchflusses ein Überschwingen in unterschiedlicher Ausprägung bezogen auf die Amplitude, Dämpfung und Frequenz. Die Betrachtung des ansteigenden Durchflusswechsels zeigt, dass die Kavitationsdüsentechologie mit 0,17 s Dauer die schnellste Umschaltzeit bei einem vergleichsweise geringen Überschwingen am Coriolis-Durchflussmessgerät liefert. Bei der Betrachtung von Abbildung 6.8 fällt auf, dass das Massestromsignal bei RISE und VTT kein Überschwingen zeigt und eine längere Zeit vergeht, bis der nächste Durchfluss stabil erreicht ist. Nach der verwendeten Berechnungsmethode der Umschaltzeit liegt der Wert von 0,36 s für die Zeit, mit der der Kavitationsdüsenapparat auf den nächsten Durchfluss umschaltet, in der gleichen Größenordnung wie die in Abschnitt 5.3.1 berechnete Beruhigungszeit von $t_{95} = 0,534 \text{ s}$. Der Unterschied entsteht durch die bei der Berücksichtigung der Beruhigungszeit benötigte Zeit bis die Schwingung unterhalb von $\pm 5\%$ des Sollwertes der nächsten Durchflussstufe liegt. Im Vergleich der Prüfstände wird ausschließlich bei TUBITAK eine schnellere Umschaltzeit erreicht. In Bezug auf die Geschwindigkeit und unter dem Anspruch eines möglichst geringen Überschwingens lassen sich die Durchflussprofile mit Kavitationsdüsen am besten realisieren. Wird die Realisierung mit dem Schwerpunkt eines möglichst geringen Überschwingens bewertet, schneidet die Technologie der Blenden in Kombination mit dem Kolbenprober bei RISE und die Durchflussprofilerzeugung mit Ventilen am VTT am besten ab. Das Durchflusssignal des Coriolis-Durchflussmessgeräts zeigt, dass die Erzeugung der Durchflussprofile eher von der individuellen Schwerpunktsetzung und Realisierung des Labors abhängt als von der Erzeugungstechnologie. Betrachtet man die Durchflusswechsel, lassen sich grundsätzlich mit allen Technologien Durchflussprofile generieren, deren Kennparameter im Abschnitt 6.2.5 definiert worden und in der folgenden Tabelle 6.13 zusammengefasst sind.

Tabelle 6.13: Für die verschiedenen Durchflussprofile und teilnehmenden Labore: zusammengefasste Standardabweichungen der gemittelten Durchflussraten; Mittelwert der Residuen; relative Abweichung der gemessenen Gesamtmasse im Vergleich zur nominalen Gesamtmasse

Institut	Profil Nr.	Wiederholbarkeit /kg/h	Mittelwert der Residuen /kg/h	Abweichung Gesamtmasse /%
CETIAT	1	6,70	10,82	2,81
CETIAT	2	4,65	-54,56	-10,79
CETIAT	3	4,60	3,81	1,05
CMI	1	4,73	-10,71	4,75
CMI	2	8,04	-5,07	4,93
CMI	3	11,52	4,89	5,63
DTI	1	63,63	152,32	37,96
DTI	2	41,99	131,56	28,72
DTI	3	47,95	146,48	27,79
FORCE	2	6,95	10,23	2,55
PTB	1	7,66	6,44	1,89
PTB	2	7,68	-5,22	-0,34
PTB	3	8,98	5,57	1,32
RISE	1	4,79	2,22	1,67
RISE	2	5,42	1,46	1,46
RISE	3	6,37	5,40	2,10
TUBITAK	1	13,34	15,77	3,43
VTT	1	19,38	-36,87	-8,79
VTT	2	4,19	-9,37	-1,94
VTT	3	3,21	10,49	1,83

6.4 Fazit

Anhand der Daten im Anhang B lässt sich durch die vergleichbare Aufzeichnung beurteilen, wie gut ein Profil mit Kavitationsdüsen (Diagramm B.5 A) im Vergleich zu anderen Technologien erzeugt werden kann. Ein Vorteil der Kavitationsdüsenapparatur ist die schnelle Umschaltung auf den nächsten Durchfluss. Weiterhin treten bei der Profilerzeugung mit Kavitationsdüsen keine überlagernden Schwingungen auf, sondern der Durchfluss bleibt während einer

Stufe stabil. Zu Beginn eines Durchflusses tritt teilweise die in Kapitel 5.3.1 beschriebene Erhöhung durch verzögert einsetzende Kavitation auf, die zu einer Abweichung vom nominalen Durchflusswert führt. Jeder Durchfluss lässt sich im Rahmen der zeitlichen Auflösung von 50 ms reproduzierbar erzeugen, sodass kein Versatz zwischen dem Beginn des Durchflusses und der zeitlichen Vorgabe entsteht. Im qualitativen Vergleich der Durchflusswerte des Transferstandards lässt sich ein Profil mit Kavitationsdüsen überdurchschnittlich gut erzeugen.

Die Darstellung der Histogramme unterstreicht die Aussagen aus dem Abschnitt 6.3.2, dass die Hälfte der Institute (FORCE, PTB, RISE und TUBITAK) Profile realisiert hat, die der Vorgabe entsprechen. Mit Blick auf die verwendete Technologie lassen sich Durchflussprofile am besten mit Blenden oder Kavitationsdüsen erzeugen. Die Erzeugung von Profilen mit Ventilen ist grundsätzlich möglich und hängt stark von der individuellen Umsetzung des jeweiligen Labors ab.

Die Wiederholbarkeit variiert im Bereich von 3,21 kg/h bis 63,63 kg/h , wobei Werte über 15 kg/h auf die Übersteuerung der Ventile bei der Realisierung zurückzuführen sind. Gleiches gilt für den Mittelwert der Residuen, der generell zwischen - 54,56 kg/h und + 15,77 kg/h schwankt, mit Ausreißern von bis zu + 152,32 kg/h . Die Gesamtmasse weicht zwischen - 10,79 % und + 37,96 % vom Nenndurchflussprofil ab. Dieser Wertebereich ist auch im Diagramm in Abbildung 6.10 sichtbar, wobei zu beachten ist, dass die Achsen für den Mittelwert der Residuen und die Abweichung der Gesamtmasse in der Mitte des Diagramms Werte kleiner als Null haben.

Diese detaillierten Untersuchungen bestätigen die Leistungsfähigkeit der in der Pilotstudie eingesetzten Prüfstände mit ihren unterschiedlichen Technologien zur Realisierung von dynamischen Durchflussprofilen. Darüber hinaus geben die fünf ermittelten Kennparameter einen Einblick zur Qualität, mit der die vorgegebenen Durchflussprofile jeweils realisiert werden. Dies ist für zukünftige Messungen über die hier betrachtete Anwendung hinaus besonders wichtig, speziell wenn es darum geht, Anforderungen an die Qualität der Realisierung festzulegen, die bei einer Messung eines dynamischen Profils erfüllt sein müssen.

Die Ergebnisse in Tabelle 6.13 zeigen, dass die Werte der Wiederholbarkeit bei der Profilrealisierung am RISE minimal sind und auch der Mittelwert der Residuen für die Realisierung von Durchflussprofil Nr. 1 und Nr. 2 beim RISE (Blenden und Kolbenprober) minimal ist. Der Betrag der Abweichung der Gesamtmasse ist, über alle Profilrealisierungen betrachtet, für den Prüfstand

mit Kavitationsdüsen an der PTB minimal. Der Einsatz von Durchflussstabilisatoren (Kavitationsdüsen/Blenden) ermöglicht eine sehr gute Reproduzierbarkeit von Durchflussprofilen und geringe Abweichungen von den einzustellenden Sollwerten bei den Durchflussraten. Der Vergleich der Qualität der Profilerzeugung unter Berücksichtigung aller Kennparameter zeigt, dass der Einsatz einer Zusatzapparatur mit Kavitationsdüsen oder Blenden bei der Generierung von Durchflussprofilen der Realisierung mit Ventilen vorzuziehen ist.

Allgemein zeigt sich bei kolbengesteuerten Systemen (CMI/RISE) eine größere Stabilität der Durchflüsse im Vergleich zu pumpengesteuerten Prüfständen. An der Kavitationsdüsenapparatur wird die pumpengesteuerte Durchflusserzeugung durch die Kavitationsdüsen wesentlich stabilisiert, sodass die Stabilität mit der des kolbengesteuerten Prüfstands des CMI vergleichbar ist.

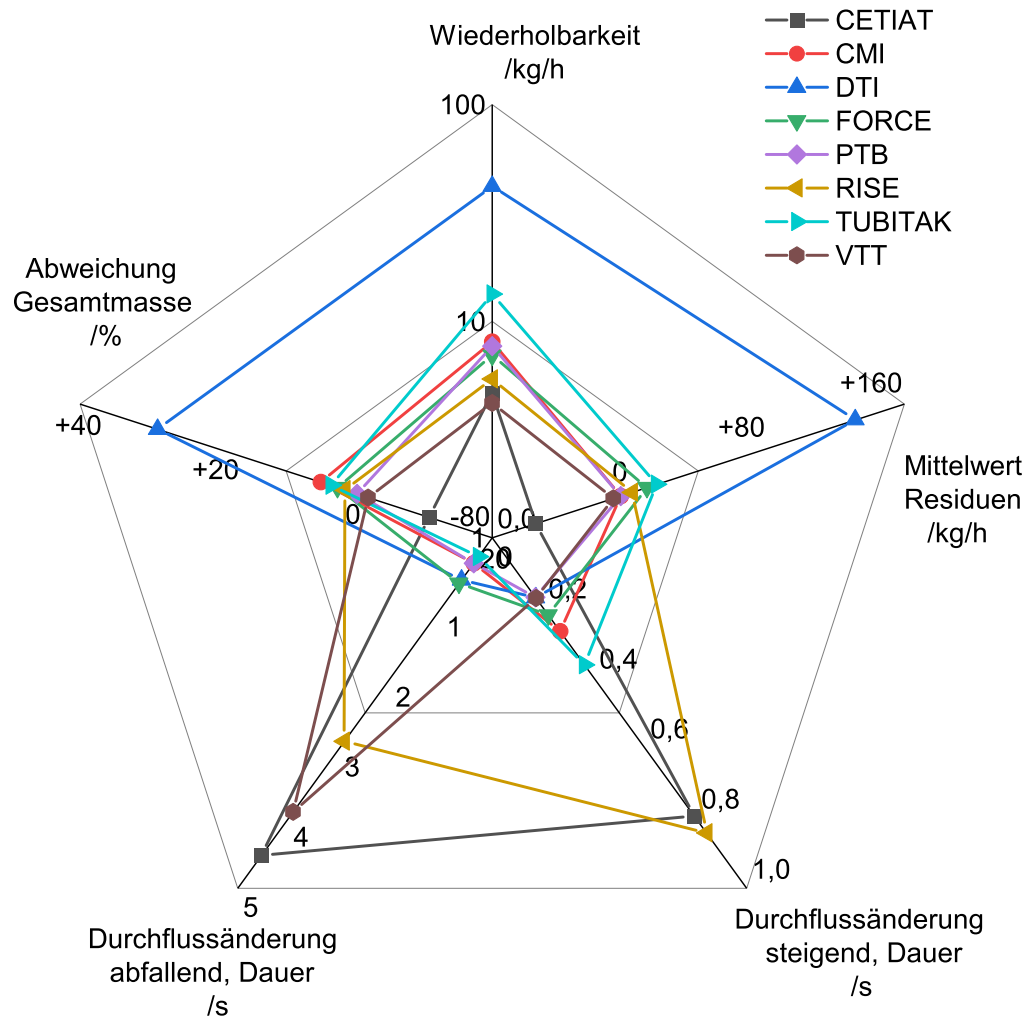


Abbildung 6.10: Wiederholbarkeit, Mittelwert der Residuen, Durchflussänderungsdauer für steigende und abfallende Durchflussraten und Abweichung der Gesamtmasse gemäß der Tabellen 6.12 und 6.13 für das Durchflussprofil Nr. 2 der teilnehmenden Labore und das Durchflussprofil Nr. 1 für TUBITAK alternativ

7 Messverhalten von Wasserzählern unter dynamischen Durchflusswechseln

Nach der reproduzierbaren Realisierung von Durchflussprofilen sowie der Betrachtung verschiedener Einflussfaktoren auf die Durchflussmessung ist das Ziel im letzten Schritt, die praktische Anwendung zu testen. Dazu war es notwendig ein Prüfregime festzulegen, nach welchem Durchfluss- und Volumenmessgeräte unter dynamischen Lastwechseln geprüft werden konnten. Bisher gab es keine Empfehlungen, Arbeiten oder Veröffentlichungen zur Prüfprozedur unter dynamischen Durchflusswechseln mit Kavitationsdüsen.

Methoden

In Bezug auf die praktische Anwendung wurde ein Prüfregime zur Bestimmung der Messrichtigkeit von Wasserzählern unter realitätsnahen dynamischen Durchflusswechseln definiert. Anschließend wurden verschiedene Wasserzählertypen (Tabelle C.1) anhand des neuen Prüfregimes exemplarisch getestet und die Ergebnisse mit dem Messverhalten der Zähler bei einer statischen, das heißt klassischen, Prüfung verglichen.

Zur Überprüfung der Messrichtigkeit von Wasserzählern wurden drei baugleiche Zähler in Reihe in die Messstrecke des EWZP eingebaut. Im Anschluss an die Messstrecke wurde die Kavitationsdüsenapparatur zur Erzeugung der in Abbildung 5.2 definierten Durchflussprofile eingebaut. Jedes Profil wurde fünfmal realisiert und jeweils die Messabweichung des Zählers zur gravimetrischen Referenz ermittelt. Die Messabweichung des Wasserzählers in Bezug auf ein Profil ergibt sich als arithmetischer Mittelwert der fünf Wiederholungen. Für die Auswertung wurde das über die gravimetrische Referenz bestimmte Volumen mit dem durch die Impulse der Wasserzähler gezählten Volumen während eines Profildurchgangs verglichen, wobei die Impulswertigkeit nach Herstellerangabe angenommen wurde. Wie bei der Prüfung entsprechend dem klassischen Prüfregime wurden die Impulse bei den Ultraschallwasserzählern über

den Impulsausgang aufgenommen; bei den magnetisch-induktiven Wasserzählern über einen optischen Kopf; bei den mechanischen Zählern wurde der Anlaufstern mit einem Laser abgetastet. Die Umgebungsbedingungen bei den Messungen waren: eine Temperatur von $18^{\circ}\text{C} \pm 4^{\circ}\text{C}$, eine relative Luftfeuchtigkeit von 15 % - 55 % und ein Atmosphärendruck von 990 mbar - 1020 mbar.

Ergebnisse

Die Messabweichung ist exemplarisch in Abbildung 7.1 unter „dynamisch“ für Ultraschallwasserzähler dargestellt und für verschiedene Wasserzählertypen vollständig in Anhang C in Abbildung C.1 bis Abbildung C.11 zu finden. Die Messabweichung ist jeweils über dem mittleren Durchfluss des Profils aufgetragen. Zum Vergleich ist in den Abbildungen auch das Messverhalten der Zähler bei den bisherigen, statischen Prüfpunkten und den in Kapitel 2.2.2 vorgeschlagenen, neuen statischen Prüfpunkten eingetragen.

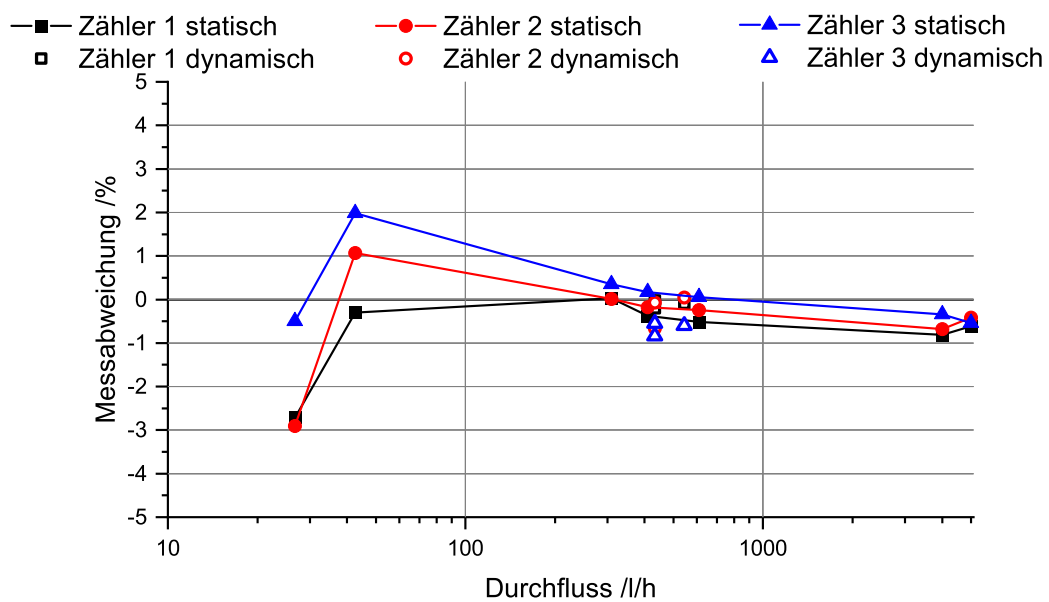


Abbildung 7.1: Messabweichung Ultraschallwasserzähler; $Q_3 = 4000\text{ l/h}$ $R = 160$

Sowohl bei der statischen Prüfung mit den bisherigen und den neuen zusätzlichen Prüfpunkten als auch bei der dynamischen Prüfung liegt die Messabweichung der betrachteten Wasserzähler in der Regel innerhalb der Eichfehlergrenzen.

Fazit

Beim Vergleich der Prüfprozeduren hat sich gezeigt, dass die Prüfung durch die neue Prüfprozedur mit jetzt ca. 10 Minuten Messzeit deutlich kürzer ist. Außerdem wird bei der Volumenprüfung mit den dynamischen Durchflusswechseln eine größere Zahl von Durchflusspunkten im Vergleich zur statischen Prüfung berücksichtigt. Ein wesentlicher Vorteil der neu entwickelten Prüfprozedur ist, im Gegensatz zu der statischen Prüfung, dass das Verbrauchsverhalten eines Konsumenten bei der Prüfung abbildet wird und die Messrichtigkeit der Verbrauchszähler belastbar nachgewiesen werden kann.

8 Zusammenfassende Schlussfolgerungen

Durchfluss- und Volumenmessgeräte sind an vielen Prozessen in der Industrie, der Forschung und im häuslichen Alltag beteiligt. Dabei weichen die häufig dynamischen Durchflüsse in der Anwendung von den Überprüfungen mit konstanten Durchflussbedingungen ab. Um dem zu begegnen bedarf es einer Anpassung der bisherigen Prüfprozeduren und des Aufbaus einer dazugehörigen messtechnischen Infrastruktur. Weiterhin müssen die Bedingungen beim Betrieb der Prüfstände bekannt sein und ein Rahmen dafür festgelegt werden. Mit Kavitationsdüsen sollten dazu reproduzierbar dynamische Durchflussprofile erzeugt und die Bedingungen ermittelt werden, unter denen die Kavitationsdüsen zur Durchflussregulierung eingesetzt werden können. Dazu wurde ein Prüfstandsprototyp entwickelt, mit verschiedenen Herschel-Venturi-Düsen in einer Apparatur bestückt und anschließend umfangreich untersucht. Als konkretes Anwendungsbeispiel sollte eine Prüfprozedur für Wasserzähler getestet werden, um hier an einem Beispiel die Umsetzbarkeit zu zeigen.

Um zunächst die Frage nach der tatsächlichen Düsengeometrie zu klären, wurden die Düsen mit voneinander unabhängigen Messverfahren untersucht. Mit einer Digitalkamera und einem Rasterelektronenmikroskop lassen sich Abbildungen der Oberfläche zur Beurteilung von größeren Anomalien der Geometrie erstellen. Mit einem Mikroskop lässt sich durch ein technisch einfaches Verfahren der Durchmesser an der engsten Stelle der Kavitationsdüse bestimmen, der im Vergleich mit dem aus der Durchflussmessung berechneten Durchmesser eine Abschätzung der Kavitationsschichtdicke zulässt. Für spätere, vergleichende Wiederholungsmessungen ist das Verfahren gut, da die Düse jederzeit erneut mit relativ geringem technischen Aufwand vermessen werden kann. Darüber hinausgehende Geometrieinformationen, die einen Einfluss auf die Ausbildung der Kavitation haben, wie die Winkel von Einlass- und Auslasskegel, oder die Düsenhalslänge lassen sich gut mit Computertomographie abbilden. Dabei muss allerdings Material der Düse entfernt werden um eine ausreichende Signalstärke zu bekommen, sodass die Kavitationsdüsen anschließend nicht mehr wie bisher verwendet werden können, was in einer Anwendung nicht praktikabel ist. Mit einem Profils Scanner konnte die Düsenhalslänge und die Oberflächenrauigkeit der Herschel-Venturi-Düsen bestimmt werden. Das Verfahren konnte aufgrund der kleinen Durchmesser und dem begrenzten

Platz im Düseninneren nur exemplarisch durchgeführt werden und ist für eine Standardanwendung nicht geeignet. Damit lässt sich die eingangs gestellte erste Frage beantworten, dass vor allem der Durchmesser einen Einfluss auf den Durchfluss hat. Außerdem werden mit den ermittelten Geometrieinformationen die Parameter bestätigt, die entsprechend der Simulation von BRINKHORST (2017) für eine Stabilisierung der Kavitation und damit des Durchflusses sorgen.

Die Kavitationsausprägung wurde durch die Variation von Druck und Temperatur untersucht, wobei sich die Variation sowohl auf den Druck vor als auch nach der Kavitationsdüse bezieht. Anhand der Veränderung des Nachdrucks p_{nach} konnte die Durchflussbegrenzung für das Druckverhältnis $p_{nach}/p_{vor} < 0,7$ gezeigt werden. Mit der Betrachtung des Dampfdruckes in Abhängigkeit der Reinheit der Flüssigkeit und der Temperatur konnte dessen Einfluss auf den Durchfluss quantifiziert werden. Die experimentellen Untersuchungen haben Tendenzen bei der Messung des Dampfdruckes für verschiedene Wasserproben ergeben, die wegen der hohen Gesamtmessunsicherheit des Dampfdruckmessgerätes nicht signifikant sind. Der theoretische Einfluss von Verunreinigungen oder Salinität auf den Durchfluss durch den Dampfdruck ist im Vergleich zur Abhängigkeit des Dampfdruckes von der Temperatur vernachlässigbar. Für die Berechnungen des Durchflusses einer Düse ist die Betrachtung des Dampfdruckes von Reinstwasser ausreichend. Mit Blick auf eine spätere, praktische und verbreitete Anwendung des dynamischen Prüfverfahrens wäre eine prüfstandsabhängige Dampfdruckbestimmung des Mediums nachteilig, da sie zusätzlichen Aufwand bedeuten würde.

Neben der Begrenzung durch ein maximales Druckverhältnis ist beim Betrieb der Kavitationsdüse als Regelungseinheit eine bestimmte Temperatur T_{max} nicht zu überschreiten, um im Bereich der Durchflussbegrenzung durch voll ausgebildete Kavitation zu bleiben. Aus den Ergebnissen ergibt sich für Wasser eine Temperatur von $T_{max} = 23^{\circ}\text{C}$ und eine Temperaturstabilität von $0,1^{\circ}\text{C}$, die während einer Messung eingehalten werden sollte, um einen stabilen Durchfluss zu erzeugen.

Die Messungen zum Vordruck haben gezeigt, dass bei einer Verringerung des Vordrucks auf $p_{vor} = 2\text{ bar}$ ein Druckverhältnis von 0,6 teilweise nicht ausreicht, um stabile Durchflüsse zu erzeugen. Der Wert des kritischen Druckverhältnisses sollte zukünftig zusätzlich über die Variation des Vordruckes ermittelt werden, um sicherzustellen, dass Kavitation mit der Durchflussbegrenzung auftritt. Weiterhin konnte über die Charakterisierung der Durchflussmengen über den Vordruck und dessen Berücksichtigung die Bestimmung des Durchflusses bei der Addition der Kavitationsdüsen von 1,47 % auf unter 0,1 %

verbessert werden. Diese Verbesserung ist insbesondere in Bezug auf einen zusätzlichen Druckverlust in der Kavitationsdüsenapparatur bei der Profilerzeugung zu berücksichtigen und zeigt, dass die Druckmessung zur Durchflussbestimmung räumlich möglichst nah an der Kavitationsdüse stattfinden sollte.

Mittels Hydrophon und Körperschallaufnehmer konnte anhand des Energiepegels ein Parameter aufgezeigt werden, mit welchem der Zustand der Kavitation in der Düse überprüft werden kann. Die aufgenommenen Spektren zeigen verschiedene charakteristische Peaks, die sich möglicherweise den Zuständen der Kavitation direkt zuordnen lassen und die über die Frequenzen Rückschlüsse auf charakteristische Größen wie den Strömungsquerschnitt erlauben. Mit dem Vergleich der Durchflussmessungen lässt sich der Zustand eines erhöhten Schallenergiepegels der voll ausgebildeten Kavitation mit Durchflussbegrenzung zuordnen. Somit lässt sich ein Hydrophon zur Beurteilung nutzen, ob Kavitation bei einem Durchfluss auftritt, unabhängig von einer Betrachtung der Parameter Durchfluss, Druck und Düsendurchmesser. Mit den durchgeführten Experimenten konnte gezeigt werden, dass auch mittels Körperschallaufnehmern und der Auswertung der akustischen Signale die Ausprägung der Kavitation beschrieben werden kann. Somit steht ein Verfahren zur strömungsmäßig störungsfreien Validierung des Kavitationszustands zur Verfügung. Die Methode lässt sich auch auf undurchsichtige Düsen übertragen und ist daher allgemein für Kavitationsdüsen geeignet. Die Untersuchungen wurden exemplarisch durchgeführt, sodass sich hier weitere Untersuchungen empfehlen, um zum Beispiel die Frequenzen in Bezug auf verschiedene Kavitationausprägungen oder charakteristische Längen der Kavitationsdüsen zu analysieren.

Mit diesen Betrachtungen konnte die zweite eingangs erwähnte Frage beantwortet werden und der Einfluss von Umgebungs- und Flüssigkeitsbedingungen auf den Durchfluss quantifiziert, sowie die Kavitationsausprägung durch akustische Verfahren überprüft werden.

Aufbauend auf der Bestimmung der Randbedingungen, bei denen Kavitationsdüsen verwendet werden können, wurden die Grundlagen für den Aufbau eines dynamischen Prüfregimes untersucht. Die zur Profilerzeugung genutzte Datenbasis an Wasserverbrauchsmessungen wurde auf regionale und saisonale Unterschiede untersucht, um festzustellen, ob bei der Profilerzeugung in bestimmten Gruppen separate Betrachtungen notwendig sind. Es hat sich gezeigt, dass es keine deutlichen Unterschiede bei der Datenbasis in Bezug auf diese Parameter gibt, sodass ein Profil als repräsentativ für das Wasserverhalten in Deutschland angenommen werden kann. Somit wurde ein Profil auf einem Prüfstand für statische Durchflussmessungen durch die Integration

der Kavitationsdüsenapparatur erzeugt und mit drei unabhängigen Methoden validiert. Mittels magnetisch-induktivem Durchflussmessgerät und dem Signal der gravimetrischen Prüfstandsreferenz konnte gezeigt werden, dass das Profil der Vorgabe entspricht. Mit einem Coriolis-Durchflussmessgerät konnte darüber hinaus zeitlich hochaufgelöst der Wechsel zwischen zwei Durchflüssen untersucht werden. Die Auflösung beträgt $< 1\text{ ms}$ und zeigt, dass es beim Wechsel des Durchflusses zu einem Überschwingen kommt. Zum einen gibt es eine charakteristische Schwingung, die bis zu einer Sekunde dauert und auf die pneumatisch gesteuerten Stempel zurückzuführen ist, zum anderen tritt ein Versatz des Durchflusses aufgrund verspätet einsetzender Kavitation ein, der durch ungünstige Betriebsbedingungen (z.B. zu geringe Druckdifferenz) verursacht wird. Eine Erhöhung des Vordrucks senkt dadurch die Standardabweichung des Durchflusses bei der Profilerzeugung und führt zu einer besseren Reproduzierbarkeit. Die Standardabweichung des Durchflusses bei einer wiederholten Generierung eines Profils ist als Qualitätskriterium und Maß für die Reproduzierbarkeit sehr gut geeignet. Bei der Realisierung von Profilen mit Kavitationsdüsen stellt sich die Stabilisierung des Durchflusses durch Kavitation als wesentlicher Vorteil heraus, wohingegen die verspätet einsetzende Kavitation und das Überschwingen vernachlässigt werden können. Mit diesen Untersuchungen konnte auch die dritte Fragestellung beantwortet werden, dass Durchflussprofile mit einer Kavitationsdüsenapparatur mit Herschel-Venturi-Düsen reproduzierbar erzeugt werden können und dies sowohl mit einem magnetisch-induktiven oder Coriolis-Durchflussmessgerät, als auch mit einer gravimetrischen Referenz validiert werden kann.

Durch einen internationalen Ringvergleich konnte die letzte eingangs gestellte Frage geklärt werden, wie die aufgebaute metrologische Infrastruktur für dynamische Durchflusserzeugung mit Kavitationsdüsen im Vergleich zu anderen Technologien abschneidet. Bei dem Vergleich wurden Profile unter anderem mit Ventilen und mit einem Kolbenprober erzeugt und die Ergebnisse über ein Transferdurchflussmessgerät miteinander verglichen. Grundsätzlich lassen sich mit allen verwendeten Technologien Profile erzeugen, wobei die Messabweichung des Transfergerätes zum Prüfstand zwischen $-0,1\%$ und $0,2\%$ liegt, was die gute Übereinstimmung bestätigt. Zur Auswertung dynamischer Messungen zum Vergleich verschiedener Prüfstände wurden im Rahmen dieser Dissertation zusätzliche Kennparameter definiert und bei der Auswertung des Ringvergleichs berücksichtigt. Diese Analyse zeigt, dass grundsätzlich alle verwendeten Technologien geeignet sind, Profile zu generieren, allerdings unabhängig von der Erzeugung zur besseren Reproduzierbarkeit eine Stabilisierung durch Kavitationsdüsen oder Blenden vorteilhaft ist. Auch bei der Übereinstimmung der

realisierten Profile mit der Vorgabe schneiden Kavitationsdüsen im Vergleich überdurchschnittlich gut ab.

Als Anwendungsbeispiel wurde ein Prüfregime für Wasserzähler definiert, mit welchem diese unter dynamischen Durchflusswechseln entsprechend den real auftretenden Durchflüssen geprüft werden können. Zur Umsetzbarkeit wurde das Messverhalten verschiedenster Wasserzählertechnologien unter dynamischen Lasten exemplarisch untersucht, auch um Unterschiede zur bisherigen Prüfprozedur zu erläutern. Alle untersuchten Wasserzähler konnten durch die mit Kavitationsdüsen erzeugten, reproduzierbaren Profile unter realitätsnahen Bedingungen auf ihre Messrichtigkeit geprüft werden. Die Umsetzung des Prüfregimes hat zu einer Verkürzung der Messzeit geführt und ist durch den einfachen Einbau der Kavitationsdüsenapparatur in den Prüfstand möglich gewesen. Die Prüfung hat somit unter realitätsnahen Bedingungen stattgefunden und unterscheidet sich damit erheblich von der bisherigen Prüfung, die dynamische Durchflusswechsel nicht berücksichtigt. Die neue Prüfprozedur ist zur Prüfung von Wasserzählern unter realitätsnahen Bedingungen geeignet und kann in Kombination mit einer Kavitationsdüsenapparatur auf bestehenden Prüfständen in der Industrie und Forschung umgesetzt werden.

9 Ausblick

Im Rahmen dieser Dissertation konnte das Verständnis für den Kavitationsprozess vertieft und der Einfluss von verschiedenen Parametern wie Geometrie, Oberflächenstruktur, Druck und Temperatur auf den Durchfluss ausführlich untersucht werden. Neben den Parameterstudien haben sich aus der Handhabung mit dem Kavitationsdüsenapparat im Rahmen dieser Arbeit technische Verbesserungen bei der Benutzung ergeben, die in einem Neubau zukünftig berücksichtigt werden. So wurde zum Beispiel ein Sichtfenster in den bestehenden Behälter integriert, um die düsenaustrittsseitige Kavitation visuell zu beurteilen. Weiterhin hat die wiederholte Öffnung und Schließung der Düsen mit Stempeln zu einem Verlust der Dichtungen an den Stempeln geführt und Leckagen verursacht. Durch pneumatisch gesteuerte Schrägsitzventile wurde bei ähnlichen Schaltzeiten die Dichtigkeit deutlich verbessert. Das fortschrittliche Prüfregime unter realitätsnahen, dynamischen Lasten, der vergleichsweise einfache Einbau der Kavitationsdüsenapparatur und die in dieser Arbeit durchgeführte Ermittlung der Betriebsparameter hat zu vermehrten Anfragen verschiedener Unternehmen aus der Industrie nach der Kavitationsdüsentechologie geführt. Mit dem entwickelten dynamischen Messregime steht eine Methode zur Verfügung, um diese Prüfung auch auf andere Messgeräte als Wasserzähler auszuweiten.

Weiterhin wird seit September 2021 ein EMPIR-Forschungsprojekt 20IND13 „Sustainable advanced flow meter calibration for the transport sector“ SAFEST zur nachhaltigen und verbesserten Durchflussmesserkalibrierung im Transportsektor durchgeführt. Für diese Untersuchungen wird von der PTB zur reproduzierbaren Durchflusserzeugung das entwickelte Prüfregime mit Kavitationsdüsen verwendet. Ziel des Projektes ist es, ähnlich der hier durchgeführten Betrachtung von Wasserzählern, das Messverhalten von Durchflussmessgeräten im Bereich des Kraftstoffverbrauchs im Motor realitätsnah zu ermitteln. Dabei kann auf das Wissen bezüglich grundsätzlicher Charakteristiken bei der Profilerzeugung durch Kaviationsdüsen zugegriffen werden. Allerdings sind die Größenordnungen der Düsendurchmesser im Bereich $d \approx 0,1 \text{ mm}$ eine Größenordnung kleiner als bei der bisherigen Profilerzeugung, sodass hier weitere Untersuchungen erforderlich sind. Für die Umsetzung von Profilen der Kraftstoffzuführung sind aufgrund der verschiedenen Flüssigkeiten zudem weitere Untersuchungen zum Thema Kavitationsausprägung bei Flüssigkeiten außer Wasser, insbesondere auch Flüssigkeitsgemische, notwendig.

Literaturverzeichnis

- 2014/32/EU:2014-02: Directive 2014/32/EU of the European Parliament and of the Council of 26 February 2014 on the harmonisation of the laws of the Member States relating to the making available on the market of measuring instruments (recast).
- AHMED, Z., BECK, B. T. und HOSNI, M. H. (2017). The effect of temperature on water cavitation phenomena in converging-diverging nozzle flow, *ASME 2017 Fluids Engineering Division Summer Meeting*, Waikoloa, Hawaii.
- ALEIFERIS, P. G., SERRAS-PEREIRA, J., AUGOYE, A., DAVIES, T., CRACKNELL, R. und RICHARDSON, D. (2010). Effect of fuel temperature on in-nozzle cavitation and spray formation of liquid hydrocarbons and alcohols from a real-size optical injector for direct-injection spark-ignition engines, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53(21-22): 4588–4606.
- ANTON PAAR GMBH (2015). *Density and Concentration Meters Generation M*. Bedienungsanleitung.
- ARREGUI, F. J., GAVARA, F. J., SORIANO, J. und PASTOR-JABALOYES, L. (2018). Performance analysis of ageing single-jet water meters for measuring residential water consumption, *Water* 10(5): 612.
- ARREGUI, F. J., PASTOR-JABALOYES, L., MERCEDES, A. V. und GAVARA, F. J. (2020). Accuracy of solid-state residential water meters under intermittent flow conditions, *Sensors* 69(1): 5339.
- ASHRAFIZADEH, S. M. und GHASSEMI, H. (2015). Experimental and numerical investigation on the performance of small-sized cavitating venturis, *Flow Measurement and Instrumentation* 42: 6–15.
- BERMEJO, D., ESCALER, X. und RUÍZ-MANSILLA, R. (2021). Experimental investigation of a cavitating venturi and its application to flow metering, *Flow Measurement and Instrumentation* 78: 101868.
- BOKOV, P. A., BEZNOSOV, A. V., LVOV, A. V., IARMONOV, M. V. und BOKOVA, T. A. (2013). The study of cavitation characteristics of a heavy liquid-metal coolant, *International Conference on Nuclear Engineering*, Vol. 6, Chengdu, China.

- BRENNEN, C. (2014). *Cavitation and Bubble Dynamics*, Oxford University Press, Oxford.
- BRINKHORST, S. (2017). *Numerische und experimentelle Untersuchung zur metrologischen Nutzung von kavitierenden Venturi-Düsen*, Dissertation, Universität Duisburg-Essen.
- BRINKHORST, S., VON LAVANTE, E. und WENDT, G. (2016). Experimental and numerical investigation of the cavitation-induced choked flow in a herschel venturi-tube, *Flow Measurement and Instrumentation* 54: 56–67.
- BRUNHART, M., SOTERIOU, C., GAVAISES, M., KRATHANASSIS, I., KOUKOUVINIS, P., JAHANGIR, S. und POELMA, C. (2020). Investigation of cavitation and vapor shedding mechanisms in a venturi nozzle, *Physics of Fluids* 32(8): 083306.
- BÜKER, O., STOLT, K., LINDSTRÖM, K., WENNERGREN, P., PENTTINEN, O. und MATTIASSON, K. (2021). A unique test facility for calibration of domestic flow meters under dynamic flow conditions, *Flow Measurement and Instrumentation* 79: 101934.
- CHADWICK, J. R., BARFUSS, S. L. und JOHNSON, M. C. (2019). Accuracy of residential water meters in response to short, intermittent flows, *AWWA Water Science* 1(1): e1010.
- CHANG, J.-g., HUANG, S.-B. und LIN, C.-M. (2006). Effects of inlet surface roughness, texture, and nozzle material on cavitation, *Atomization and sprays* 16(3): 299–318.
- CHEN, T., CHEN, H., LIANG, W., HUANG, B. und XIANG, L. (2019). Experimental investigation of liquid nitrogen cavitating flows in converging-diverging nozzle with special emphasis on thermal transition, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 132: 618–630.
- CHEN, Z., HE, Z., SHANG, W., DUAN, L., ZHOU, H., GUO, G. und GUAN, W. (2018). Experimental study on the effect of nozzle geometry on string cavitation in real-size optical diesel nozzles and spray characteristics, *Fuel* 232: 562–571.
- CHEN, Z., YAO, A., YAO, C., YIN, Z., XU, H., GENG, P., DOU, Z., HU, J., WU, T. und MA, M. (2017). Effect of fuel temperature on the methanol spray and nozzle internal flow, *Applied Thermal Engineering* 114: 673–684.
- CLARK, C., ZAMORA, M., CHEESEWRIGHT, R. und HENRY, M. (2006). The dynamic performance of a new ultra-fast response coriolis flow meter, *Flow Measurement and Instrumentation* 17(6): 391–398.

- COX, M. G. (2002). The evaluation of key comparison data, *Metrologia* 39(6): 589–595.
- CRUM, L. (1982). Nucleation and stabilization of microbubbles in liquids, *Flow Turbulence and Combustion* 38: 101–115.
- D'AGOSTINO, L. und SALVETTI, M. V. (2008). *Fluid dynamics of cavitation and cavitating turbopumps*, Springer Science & Business Media, Berlin/Heidelberg.
- DAI, X., WANG, Z., LIU, F., WANG, C., SUN, Q. und XU, C. (2019). Simulation of throttling effect on cavitation for nozzle internal flow, *Fuel* 243: 277–287.
- DANLOS, A., MEHAL, J.-E., RAVELET, F., COUTIER-DELGOSHA, O. und BAKIR, F. (2014). Study of the Cavitating Instability on a Grooved Venturi Profile, *Journal of Fluids Engineering* 136(10): 101302.
- DEBENEDETTI, P. G. (1996). *Metastable liquids: concepts and principles*, Princeton Univ. Press, Princeton.
- DESANTES, J. M., PAYRI, R., SALVADOR, F. J. und GIMENO, J. (2003). Measurements of spray momentum for the study of cavitation in diesel injection nozzles, *SAE paper* 01: 0703.
- DIN EN ISO 4064:2014-11: Water meters for cold potable water and hot water.
- DIN EN ISO 9300:2005-11: Measurement of gas flow by means of critical flow venturi nozzles.
- DING, H.-b., WANG, C. und CHEN, C. (2015). Effect of carrier gas pressure on vapor condensation and mass flow-rate in sonic nozzle, *Journal of Central South University* 22(12): 4864–4871.
- ENDRESS+HAUSER (2021). *Durchflussmesstechnik für Flüssigkeiten, Gase und Dampf*. Bedienungsanleitung.
- ERALYTICS GMBH (2019). *User Manual eravap: Vapor Pressure Tester*. Bedienungsanleitung.
- FONTANAZZA, C. M., NOTARO, V., PULEO, V. und FRENI, G. (2015). The apparent losses due to metering errors: a proactive approach to predict losses and schedule maintenance, *Urban Water Journal* 12(3): 229–239.
- FRANC, J.-P. (1995). *La cavitation: mécanismes physiques et aspects industriels*, EDP Sciences, Les Ulis.

- FRANC, J.-P. und MICHEL, J.-M. (2005). *Fundamentals of Cavitation*, Springer Science+Business Media B.V., Berlin/Heidelberg.
- FRENKEL, J. (1955). *Kinetic theory of liquids*, Oxford at the Clarendon press, Oxford.
- GENDRIES, S. (2014). <https://www.lebensraumwasser.com/zdf-wiso-fragt-wasserzahler-zu-gros/>. Datum des Zugriffs: 23.03.2023.
- GHASSEMI, H. und FASIH, H. F. (2011). Application of small size cavitating venturi as flow controller and flow meter, *Flow Measurement and Instrumentation* 22(5): 406–412.
- GIBBS, J. (1906). *The scientific papers*, Longmans, Green, and co., London.
- GÜNTHER, A., ROSSMEISSL, M. und WIRTH, K. E. (2010). Discharge characteristics of the atomization of superheated liquids, *ILASS – Europe 2010*, Brno, Czech Republic.
- IAPWS (2019). www.iapws.org. Datum des Zugriffs: 04.09.2019.
- ISHIBASHI, M. (2002). Super-fine structure in the critical flow-rate of critical flow venturi nozzles, *Fluids Engineering Division Summer Meeting*, Vol. 36150, Montreal, Quebec, Canada, S. 105–114.
- ISHIMOTO, J. und KAMIJO, K. (2003). Numerical analysis of cavitating flow of liquid helium in a converging-diverging nozzle , *Journal of Fluids Engineering* 125(5): 749–757.
- ISO 5167-4:2003: Durchflussmessung von Fluiden mit Drosselgeräten in voll durchströmten Leitungen mit Kreisquerschnitt - Teil 4: Venturirohre.
- KARADIREK, E. (2020). An experimental analysis on accuracy of customer water meters under various flow rates and water pressures, *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua* 20(18): 18–27.
- KAY, R. (2019). *Ähnlichkeit des Verhaltens von Kavitationsdüsen bei verschiedenen Fluiden*, Bachelorarbeit, TU Berlin.
- KELLER, A. (2001). Cavitation scale effects - empirically found relations and the correlation of cavitation number and hydrodynamic coefficients, *CAV 2001: Fourth International Symposium on Cavitation*, California Institute of Technology, Pasadena, California, USA.
- KOZÁK, J., RUDOLF, P., HUDEC, M., ŠTEFAN, D. und FORMAN, M. (2018). Numerical and experimental investigation of the cavitating flow within venturi tube, *Journal of Fluids Engineering* 141(4). 041101.

- LAMBERT, M. A., MAURY, R., VALIÈRE, J.-C., FOUCAULT, E. und LEHNASCH, G. (2019). Experimental and numerical investigations on the shape and roughness of cylindrical critical flow venturi nozzles (cfvn), *CIM 2019*, EDP Sciences, Paris, France, S. 17003.
- LI, D., KANG, Y., WANG, X., DING, X. und FANG, Z. (2016). Effects of nozzle inner surface roughness on the cavitation erosion characteristics of high speed submerged jets, *Experimental Thermal and Fluid Science* 74: 444–452.
- LI, M., BUSSONNIÈRE, A., BRONSON, M., XU, Z. und LIU, Q. (2019). Study of venturi tube geometry on the hydrodynamic cavitation for the generation of microbubbles, *Minerals Engineering* 132: 268–274.
- LIM, J. M., YOON, B. H., OH, Y. K. und PARK, K.-A. (2011). The humidity effect on air flow rates in a critical flow venturi nozzle, *Flow Measurement and Instrumentation* 22(5): 402–405.
- MARTIN, T., KORTH, A. und SCHUBERT, K. (2017). *Aktualisierung der Verbrauchsganglinien für Haushalte, Kleingewerbe und öffentliche Gebäude sowie Entwicklung eines Modells zur Simulation des Wasserbedarfs: Abschlussbericht zum DVGW-Forschungsvorhaben W-10-01-11*, Veröffentlichungen aus dem Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe, TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser.
- MATHIES, N. und WENDT, G. (2012). *Dynamische Flüssigkeitsmessung mit Coriolis-Durchflussmessgeräten*, Vol. 91, Fachverlag NW in Carl Ed. Schünemann KG, Bremen.
- MICKAN, B., KUO, C.-Y. und XU, M. (2018). Systematic investigations of cylindrical nozzles acc. iso 9300 down to throat diameters of 125 μm , *ISFFM*, Queretaro, Mexico.
- MIEKE, S. (2014). Erweiterte messunsicherheit, *Berechnung der Messunsicherheit – Empfehlungen für die Praxis*, PTB, Berlin, Deutschland, S. 27.
- NIEHAVES, M. (2023). <https://www.zdf.de/verbraucher/wiso/wiso-vom-27-februar-2023-100.html>. Datum des Zugriffs: 23.03.2023.
- NOURI, J., MACKENZIE, S., GASKELL, C. und DHUNPUT, A. (2012). Effect of viscosity, temperature and nozzle length-to-diameter ratio on internal flow and cavitation in a multi-hole injector, in IMechE (ed.), *Fuel Systems for IC Engines*, Woodhead Publishing, Sawston, Cambridge, S. 265–278.
- NUMACHI, F., KOBAYASHI, R. und KAMIYAMA, S. (1962). Effect of cavitation on the accuracy of herschel-type venturi tubes, *Journal of Basic Engineering* 84(3): 351–360.

- OCHOTERENA, R., LI, P., VERA-HERNÁNDEZ, M. und ANDERSSON, S. (2010). Influence of cavitation on atomisation at low pressures using up-scaled and transparent nozzles, *ILASS - Europe 2010*, Brno, Czech Republic.
- OGHEARD, F. (2019). Development of a dynamic gravimetric calibration method for liquid water flow metering, in Array (ed.), *CIM 2019*, Paris, France, S. 17001.
- OHIRA, K., NAKAYAMA, T. und NAGAI, T. (2012). Cavitation flow instability of subcooled liquid nitrogen in converging–diverging nozzles, *Cryogenics* 52(1): 35–44.
- OIML R49-1,2,3:2013(E): Water meters for cold potable water and hot water.
- PRAKOSA, J., EKA, N., BERNARDUS, H. S. und HAFID, H. (2015). Volume measurement of piston prover cylinder by gravimetric method for validation of water flowrate traceability at metrology lipi, *IMEKO 2015*, Prague, Czech Republic.
- PTB (2002). *Hydrodynamisches Prüffeld Funktionsbeschreibung*, Physikalisch-Technische Bundesanstalt. Arbeitsanweisung.
- PTB (2020). *Prüfung von Wasserzählern mit dem gravimetrischen Prüfverfahren*. Arbeitsanweisung.
- RUDOLFA, P., HUDEC, M., GRÍGER, M. und ŠTEFAN, D. (2014). Characterization of the cavitating flow in converging-diverging nozzle based on experimental investigations, *EPJ Web of Conferences* 67: 6.
- SALVADOR, F., JARAMILLO, D., ROMERO, J.-V. und ROSELLÓ, M.-D. (2017). Using a homogeneous equilibrium model for the study of the inner nozzle flow and cavitation pattern in convergent–divergent nozzles of diesel injectors, *Journal of Computational and Applied Mathematics* 309: 630–641.
- SAUER, J. (2000). *Instationär kavitierende Strömungen : ein neues Modell, basierend auf Front Capturing (VoF) und Blasendynamik*, Dissertation, Universität Karlsruhe.
- SCHADE, H., KUNZ, E., KAMEIER, F. und PASCHEREIT, C. O. (2022). *Strömungslehre*, De Gruyter Studium, 5. Auflage, De Gruyter, Berlin.
- SCHUMANN, D. (2020). *Entwicklung von realitätsnahen Prüfprozeduren für Durchflussmessgeräte basierend auf realen Verbrauchsprofilen*, Dissertation, Universität Rostock.

- SCHUMANN, D., KRONER, C., MICKAN, B. und TRÄNCKNER, J. (2020). Intermittierende Durchflusserzeugung unter Einsatz von Kavitationsdüsen, *tm - Technisches Messen* 87(1): 55–65.
- SCHUMANN, D., KRONER, C., ÜNSAL, B., HAACK, S., KONDRUP, J. B., CHRISTOPHERSEN, N., BENKOVÁ, M. und KNOTEK, S. (2021). Measurements of water consumption for the development of new test regimes for domestic water meters, *Flow Measurement and Instrumentation* 79: 101963.
- SCHUMANN, D. und KRONER, C. (2018). Using cavitation metrologically, *ISFFM*, Queretaro, Mexico.
- SCHUMANN, D., WENDT, G. und TRÄNCKNER, J. (2016). Development of a calibration process for water meters close to real world conditions, *FLOMEKO 2016*, Sydney, Australia.
- SIMPSON, A. und RANADE, V. V. (2018). Modelling of hydrodynamic cavitation with orifice: Influence of different orifice designs, *Chemical Engineering Research and Design* 136: 698–711.
- SKRIPOV, V. (1974). *Metastable liquids*, New York; Chichester:Wiley; Jerusalem; London: Israel Program for Scientific Translations.
- SOYAMA, H. (2020). Cavitation peening: A review, *Metals* 10(2): 270.
- TANG, P., JUÁREZ, J. M. und LI, H. (2019). Investigation on the effect of structural parameters on cavitation characteristics for the venturi tube using the cfd method, *Water* 11(10).
- TOMOV, P., DANLOS, A., KHELLADI, S., RAVELET, F., SARRAF, C. und BAKIR, F. (2015). Pod study of aerated cavitation in a venturi nozzle, *Journal of Physics: Conference Series* 1: 012171.
- ÜNSAL, B., AKSELLI, B., SACI, S. und AKSEL, E. (2019). Initial results on the flow dynamics of household water consumption, *FLOMEKO 2019*, Lisboa, Portugal.
- UTTURKAR, Y., THAKUR, S. und SHYY, W. (2005). Computational modeling of thermodynamic effects in cryogenic cavitation, *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit - Meeting Papers*, Reno, Nevada, USA.
- VON LAVANTE, E., KAYA, H., WINZÖSCH, F. und BRINKHORST, S. (2013). Detailed study of flow structure in cfvn and its effects on the flow rate, *FLOMEKO 2013*, Paris, France, S. 5.

- WARNECKE, H., KRONER, C., OGHEARD, F., KONDRUP, J. B., CHRISTOFFERSEN, N., BENKOVÁ, M., BÜKER, O., HAACK, S., HUOVINEN, M. und ÜNSAL, B. (2022). New metrological capabilities for measurements of dynamic liquid flows, *Metrologia* 59(2): 025007.
- WARNECKE, H., KRONER, C., SCHUMANN, D. und TRÄNCKNER, J. (2019). Cavitating Herschel Venturi nozzle test rig, *FLOMEKO 2019*, Lisboa, Portugal.
- WARNECKE, H., KRONER, C., SCHUMANN, D. und TRÄNCKNER, J. (2021). Generation, validation and application of dynamic load profiles in flow measurement using cavitating herschel–venturi nozzles, *Flow Measurement and Instrumentation* 82: 102068.
- XU, M., KAUTH, F., MICKAN, B. und BRAND, U. (2015). Traceable profile and roughness measurements inside micro sonic nozzles with the profilscanner, in Array (ed.), *CIM 2015*, Paris, France, S. 13004.
- XU, M., KRONER, C., SCHUMANN, D. und BRAND, U. (2019). Measuring the inner profile of cavitation nozzles with profilscanner, *NanoScale*, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig.
- XU, Y., CHEN, Y., HE, J. und YAN, H. (2014). Detection of Cavitation in a Venturi Injector With a Combined Method of Strain Gauges and Numerical Simulation, *Journal of Fluids Engineering* 136(8). 081302.
- YOON, W. und AHN, K. (2015). An experimental study on flow characteristics of cavitation venturi, *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers* 19: 1–7.

Anhang

A Düsencharakterisierung

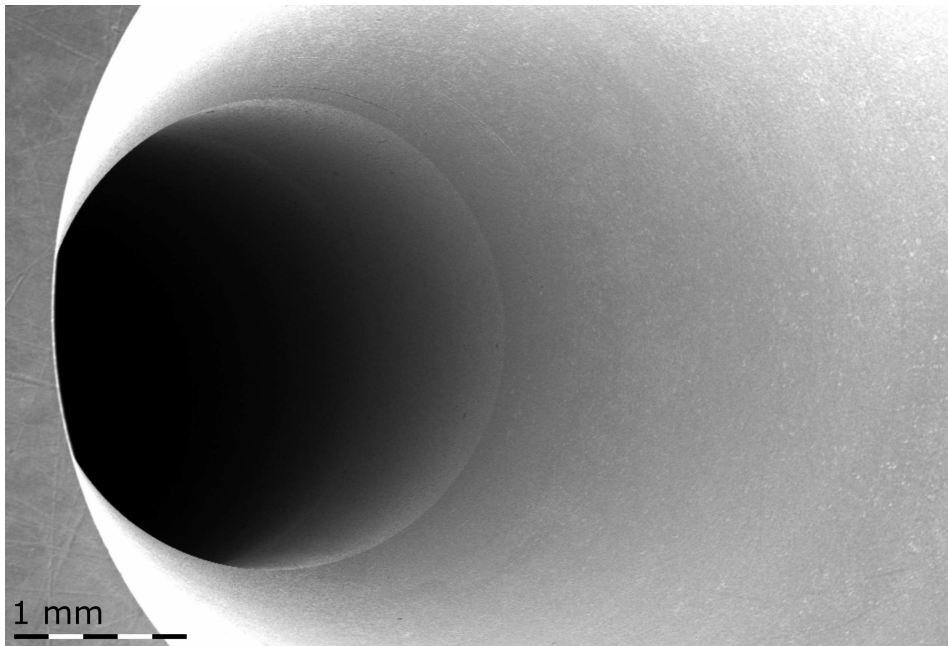


Abbildung A.1: Übersichtsbild REM; SE-Bild Düse Nr. 2,6-1



Abbildung A.2: Detailaufnahme REM; SE-Bild; Kante Einlass Düse Nr. 2,6-1

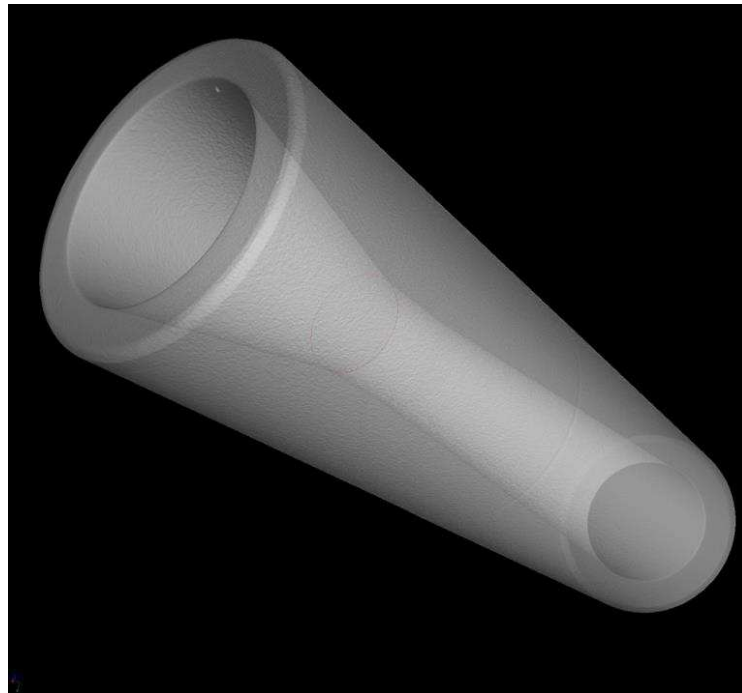


Abbildung A.3: Übersichtsbild Computertomographie Kavitationsdüse Nr. 2,6-2

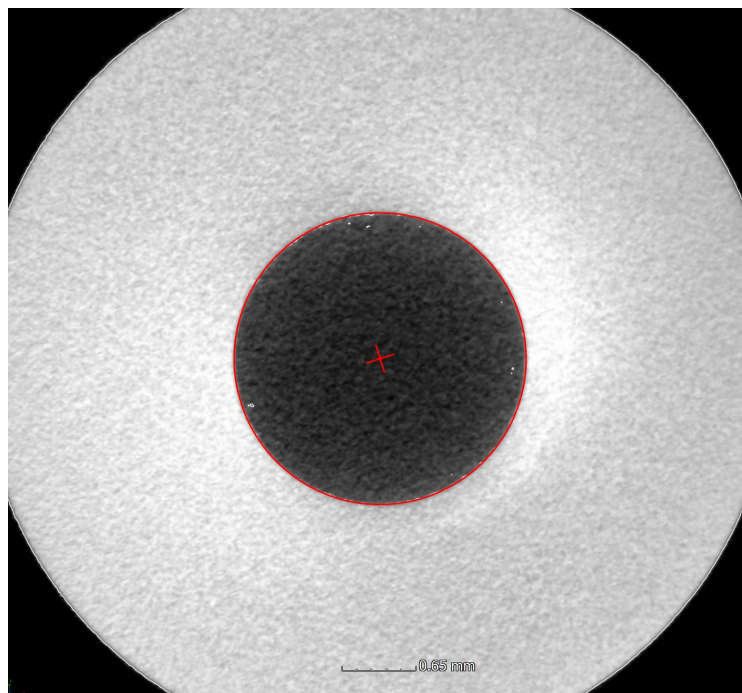


Abbildung A.4: Computertomographie Kavitationsdüse Nr. 2,6-2; Durchmesserbestimmung des Düsenhalses

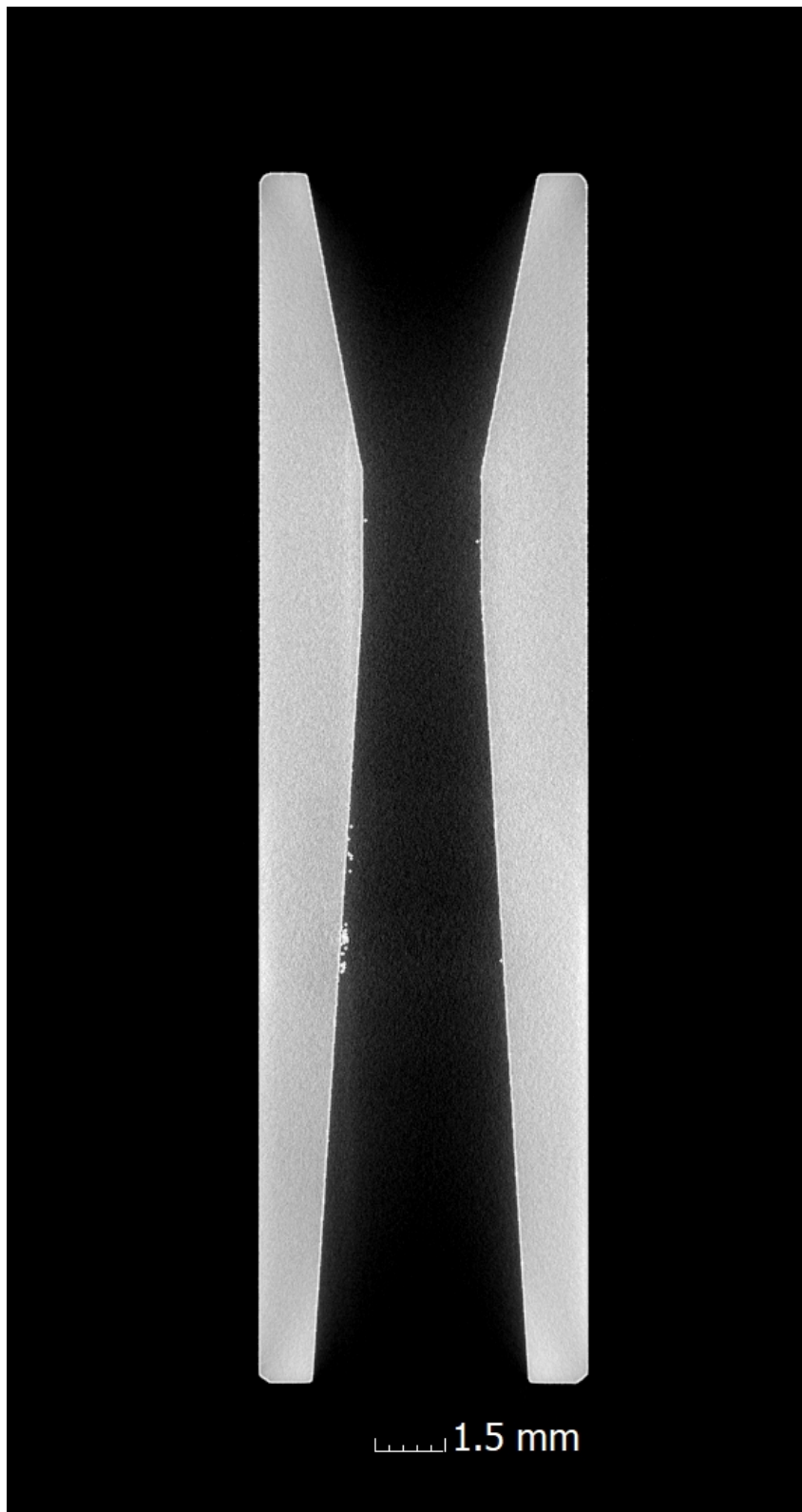


Abbildung A.5: Computertomographie Kavitationsdüse Nr. 2,6-2;
Geometriebestimmung im Inneren, Düsenhalslänge und
Konuswinkel im Einlass und im Diffusor

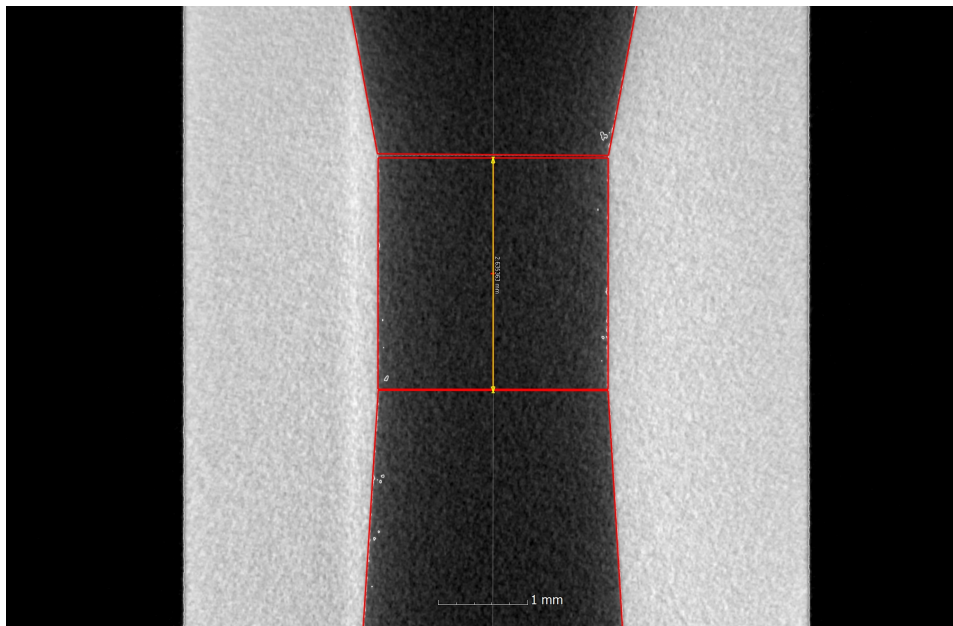


Abbildung A.6: Computertomographie Kavitationsdüse Nr. 2,6-2;
Geometriebestimmung im Inneren, Düsenhalslänge und
Konuswinkel im Einlass und Diffusor

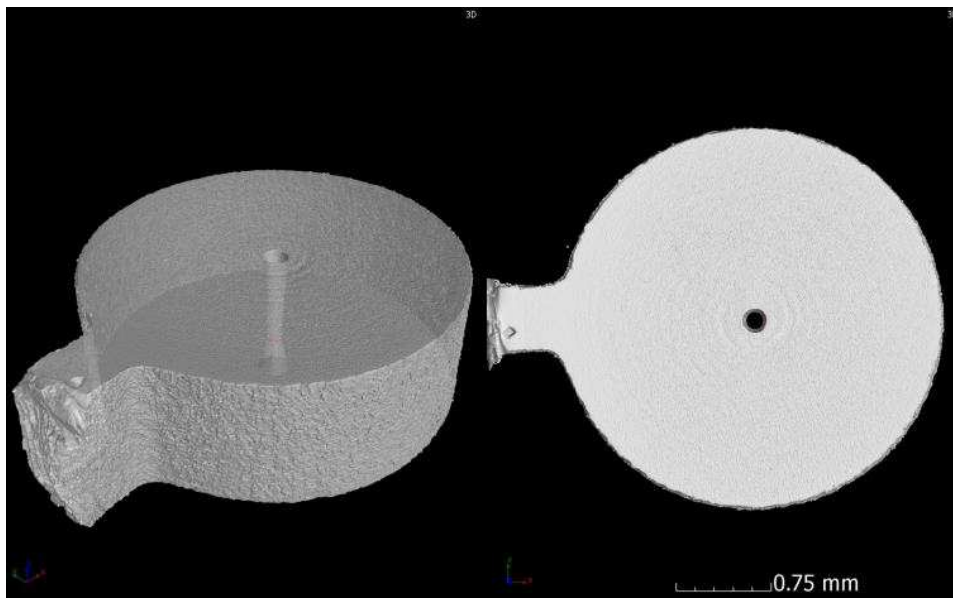


Abbildung A.7: Übersichtsbild Computertomographie Kavitationsdüse Nr.
0,14-3

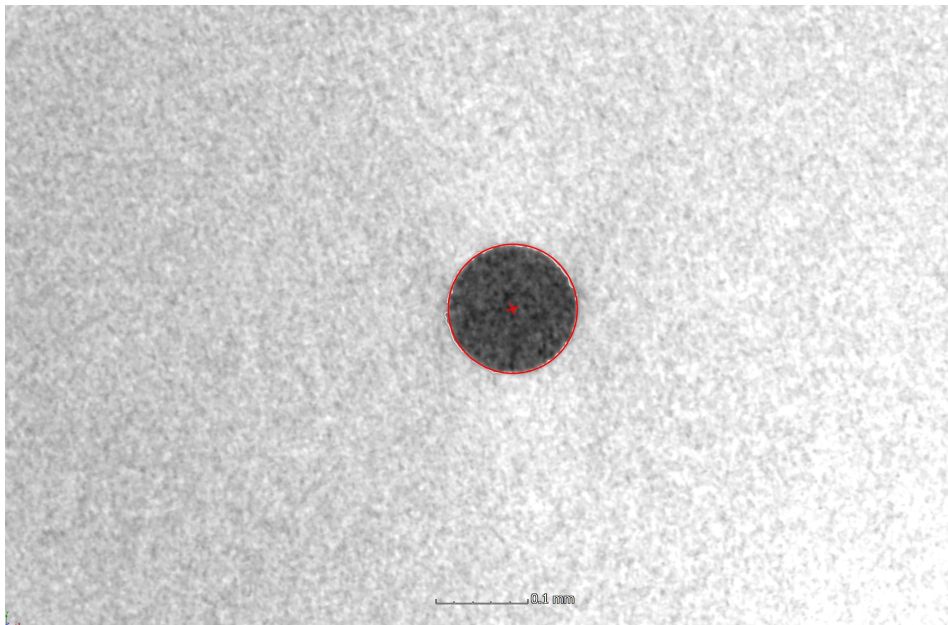


Abbildung A.8: Computertomographie Kavitationsdüse Nr. 0,14-3; Durchmesserbestimmung des Düsenhalses

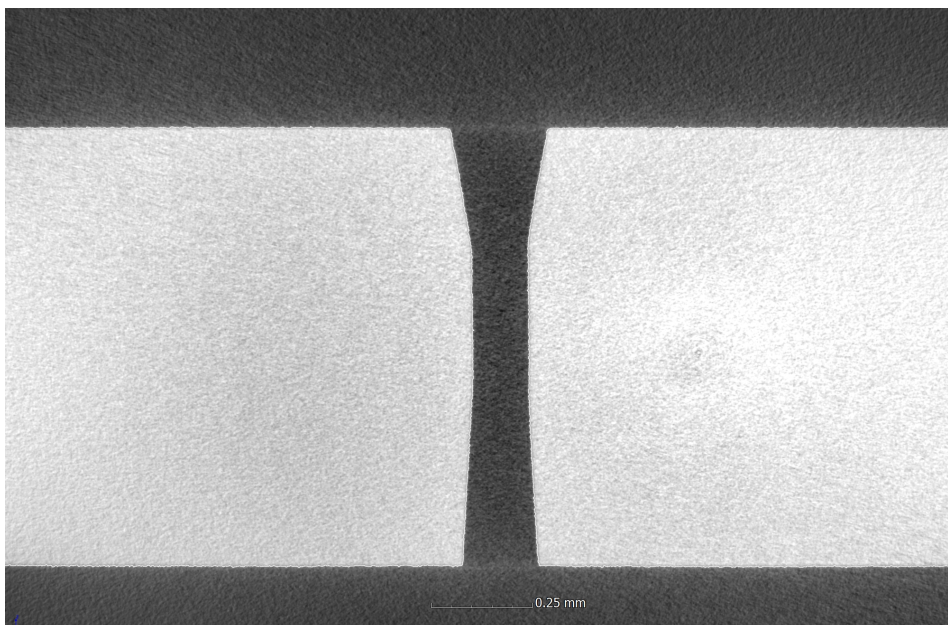


Abbildung A.9: Computertomographie Kavitationsdüse Nr. 0,14-3; Geometriebestimmung im Inneren, Düsenhalslänge und Konuswinkel im Einlass und im Diffusor

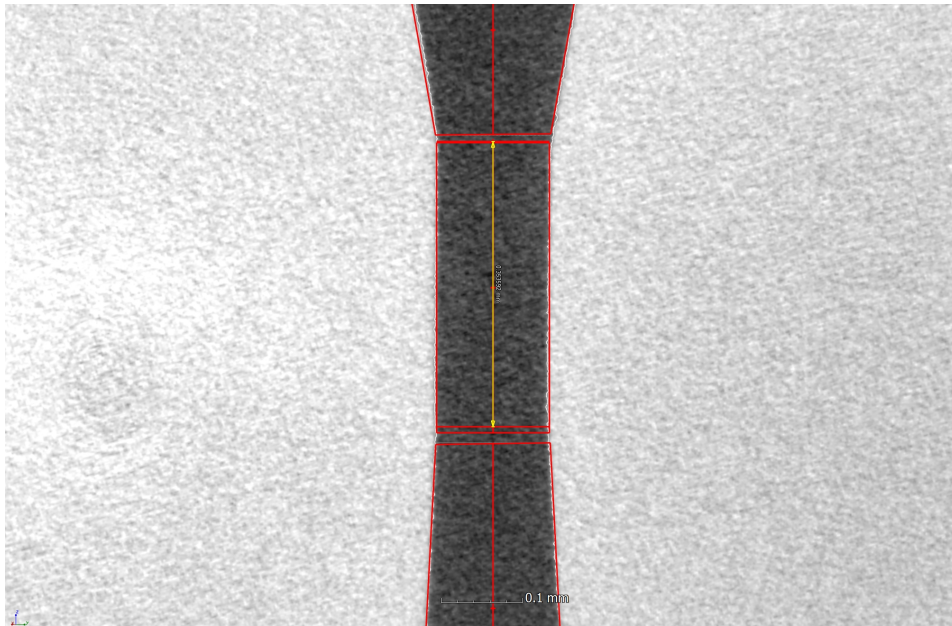


Abbildung A.10: Computertomographie Kavitationsdüse Nr. 0,14-3;
Geometriebestimmung im Inneren, Düsenhalslänge und
Konuswinkel im Einlass und Diffusor

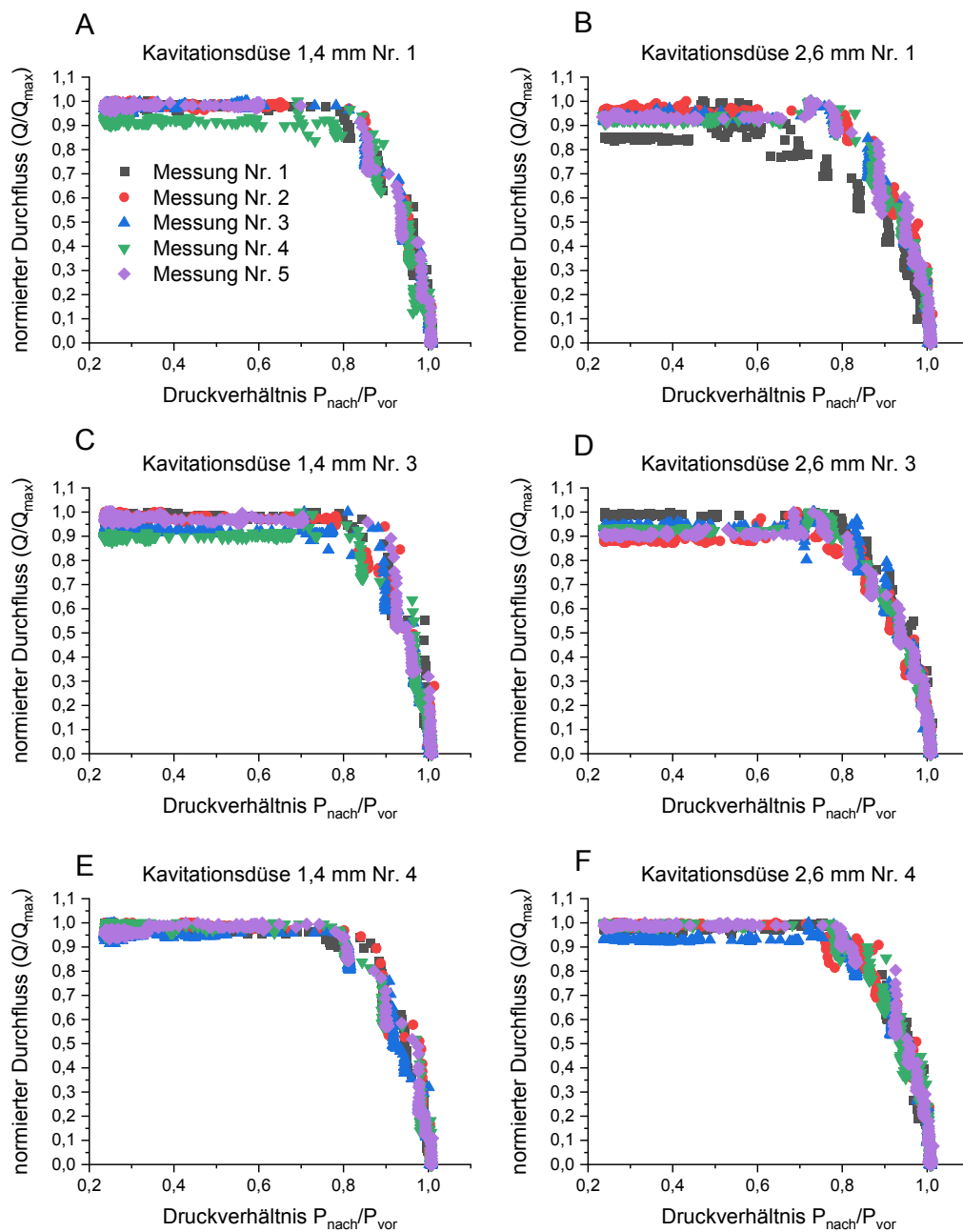


Abbildung A.11: Bestimmung des Einsetzens der Kavitation über die Durchflussmessung mit magnetisch-induktivem Durchflussmessgerät bei zwei verschiedenen Düsenhalsdurchmessern; A: 1,4 mm Nr. 1, B: 2,6 mm Nr. 1, C: 1,4 mm Nr. 3, D: 2,6 mm Nr. 3, E: 1,4 mm Nr. 4, F: 2,6 mm Nr. 4

Tabelle A.1: Temperatur während der Durchflussmessung der Düsen mit
1,4 mm Halsdurchmesser

Messung Nr.	Temperatur			
	Mittelwert °C	Standard- abweichung °C	Minimum °C	Maximum °C
1,4-1 Messung Nr. 1	28,5502	0,06123	28,46	28,675
1,4-1 Messung Nr. 2	28,67667	0,04983	28,6	28,756
1,4-1 Messung Nr. 3	28,84991	0,05552	28,776	28,953
1,4-1 Messung Nr. 4	28,88599	0,06263	28,771	28,976
1,4-1 Messung Nr. 5	28,89303	0,06764	28,788	28,98
1,4-2 Messung Nr. 1	27,93053	0,09795	27,755	28,024
1,4-2 Messung Nr. 2	27,74881	0,0805	27,589	27,836
1,4-2 Messung Nr. 3	27,60521	0,08934	27,43	27,688
1,4-2 Messung Nr. 4	27,66989	0,10011	27,5	27,813
1,4-2 Messung Nr. 5	28,18277	0,19857	27,776	28,428
1,4-3 Messung Nr. 1	28,57313	0,07262	28,44	28,672
1,4-3 Messung Nr. 2	28,54207	0,05	28,462	28,642
1,4-3 Messung Nr. 3	28,61832	0,08006	28,483	28,71
1,4-3 Messung Nr. 4	28,55104	0,08005	28,407	28,663
1,4-3 Messung Nr. 5	28,54753	0,04931	28,474	28,629
1,4-4 Messung Nr. 1	28,60426	0,04769	28,513	28,692
1,4-4 Messung Nr. 2	28,70217	0,04563	28,603	28,813
1,4-4 Messung Nr. 3	21,86197	0,0599	21,793	21,958
1,4-4 Messung Nr. 4	21,85708	0,32346	21,456	22,266
1,4-4 Messung Nr. 5	23,27181	0,6003	22,314	24,064

Tabelle A.2: Temperatur während der Durchflussmessung der Düsen mit 2,6 mm Halsdurchmesser

Messung Nr.	Temperatur			
	Mittelwert °C	Standard- abweichung °C	Minimum °C	Maximum °C
2,6-1 Messung Nr. 1	28,66019	1,96727	27,113	33,389
2,6-1 Messung Nr. 2	25,45509	0,48408	24,625	25,878
2,6-1 Messung Nr. 3	24,71191	0,46642	23,898	25,188
2,6-1 Messung Nr. 4	24,17656	0,56364	23,678	25,61
2,6-1 Messung Nr. 5	24,20611	0,53161	23,714	25,105
2,6-2 Messung Nr. 1	23,96749	0,22592	23,519	24,517
2,6-2 Messung Nr. 2	24,38645	0,40977	23,377	25,068
2,6-2 Messung Nr. 3	23,85249	0,4906	23,057	24,288
2,6-2 Messung Nr. 4	23,86855	0,71301	23,301	25,445
2,6-2 Messung Nr. 5	23,3054	0,63184	22,532	24,006
2,6-3 Messung Nr. 1	23,2979	0,28393	22,562	23,627
2,6-3 Messung Nr. 2	22,81589	0,2446	22,439	23,447
2,6-3 Messung Nr. 3	22,9372	0,29021	22,501	23,728
2,6-3 Messung Nr. 4	23,0048	0,30154	22,462	23,641
2,6-3 Messung Nr. 5	22,9264	0,34957	22,443	23,856
2,6-4 Messung Nr. 1	22,30254	0,25128	21,995	23,003
2,6-4 Messung Nr. 2	23,83937	0,53144	22,933	24,487
2,6-4 Messung Nr. 3	23,12637	0,19108	22,977	23,673
2,6-4 Messung Nr. 4	23,88926	0,40984	23,183	24,392
2,6-4 Messung Nr. 5	23,00251	0,1637	22,773	23,469

B Auswertung des Ringvergleichs

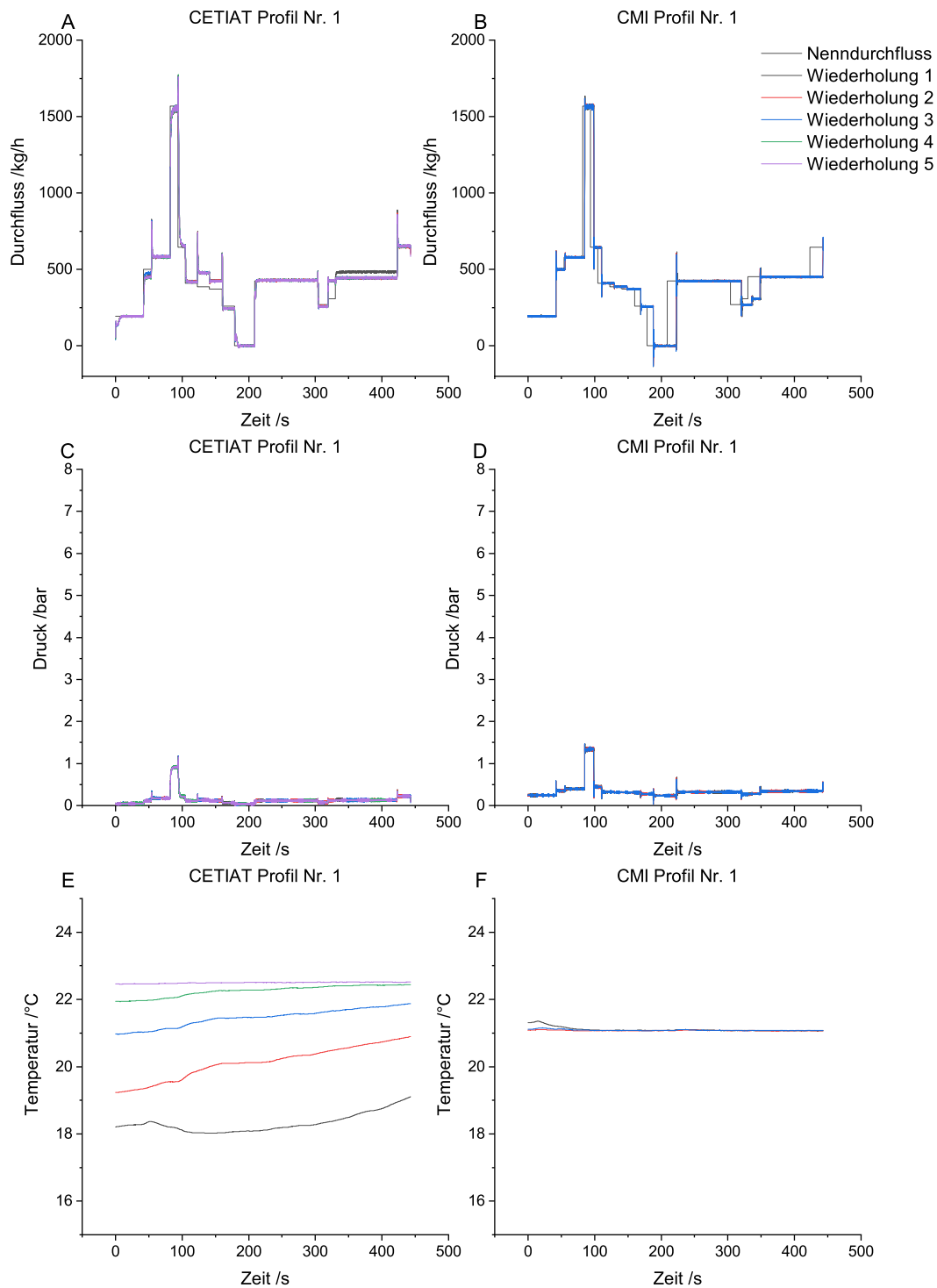


Abbildung B.1: Kontinuierlich aufgezeichnetes Messsignal (20 Hz) des Transferstandards des Ringvergleichs für n Wiederholungen; Massestromsignal (A,B), Druck (C,D) und Temperatur (E,F) in Abhängigkeit der Zeit; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 1) eines Instituts (CETIAT/CMI)

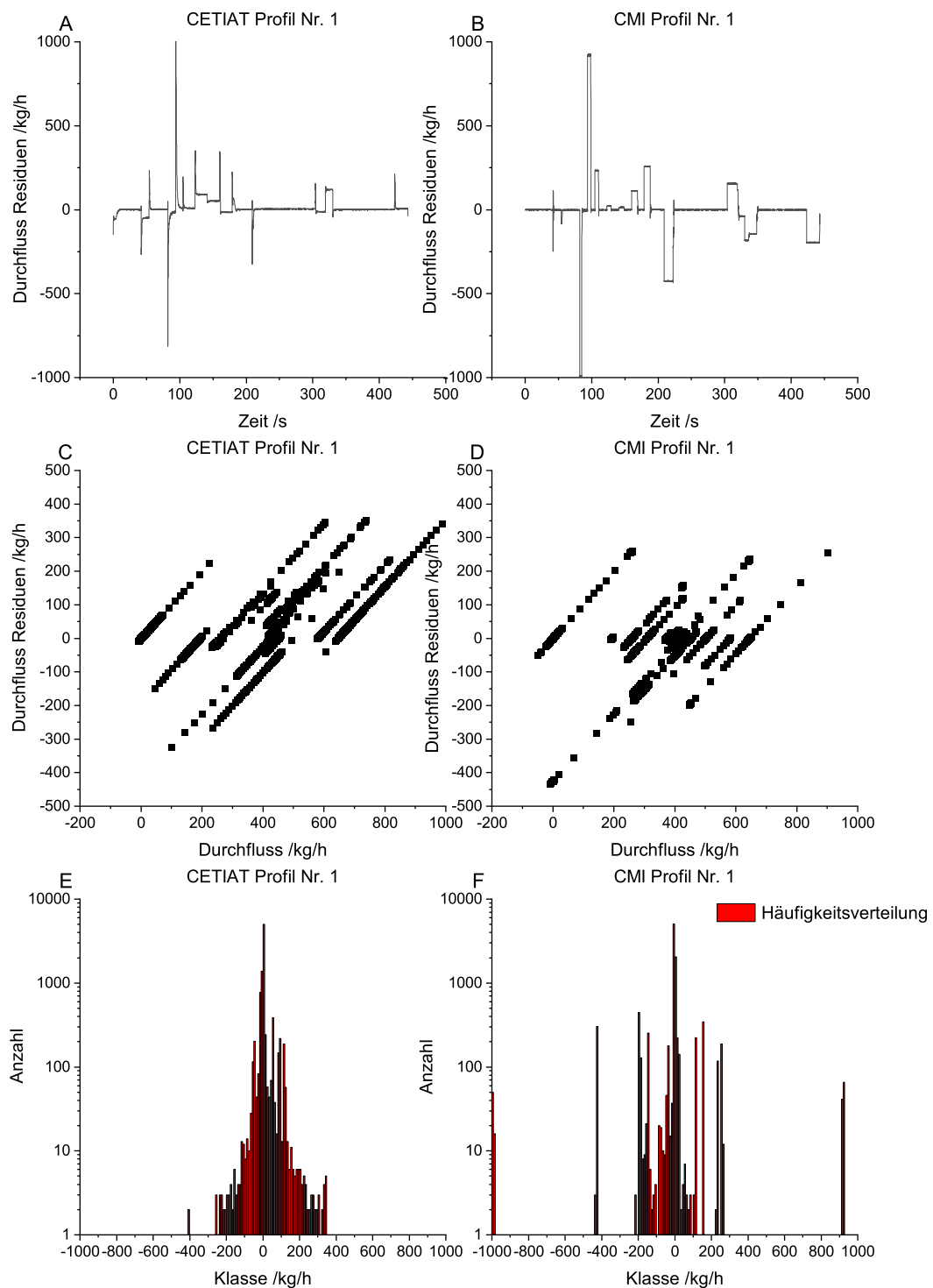


Abbildung B.2: Darstellung der Residuen als: (A,B) Liniendiagramm in Abhängigkeit der Zeit, (C,D) Punktdiagramm in Abhängigkeit des Durchflusses und (E,F) als Häufigkeitsverteilung; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 1) eines Instituts (CETIAT/CMI)

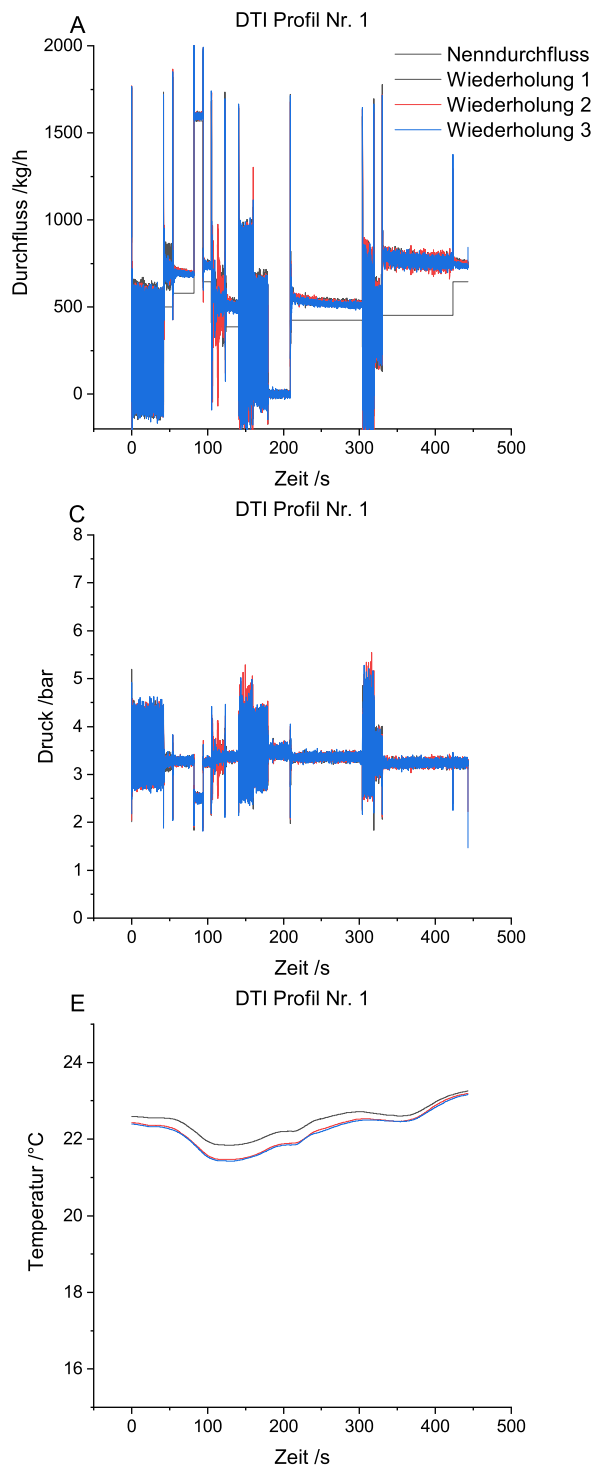


Abbildung B.3: Kontinuierlich aufgezeichnetes Messsignal (20 Hz) des Transferstandards des Ringvergleichs für n Wiederholungen; Massestromsignal (A), Druck (C) und Temperatur (E) in Abhängigkeit der Zeit; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 1) eines Instituts (DTI)

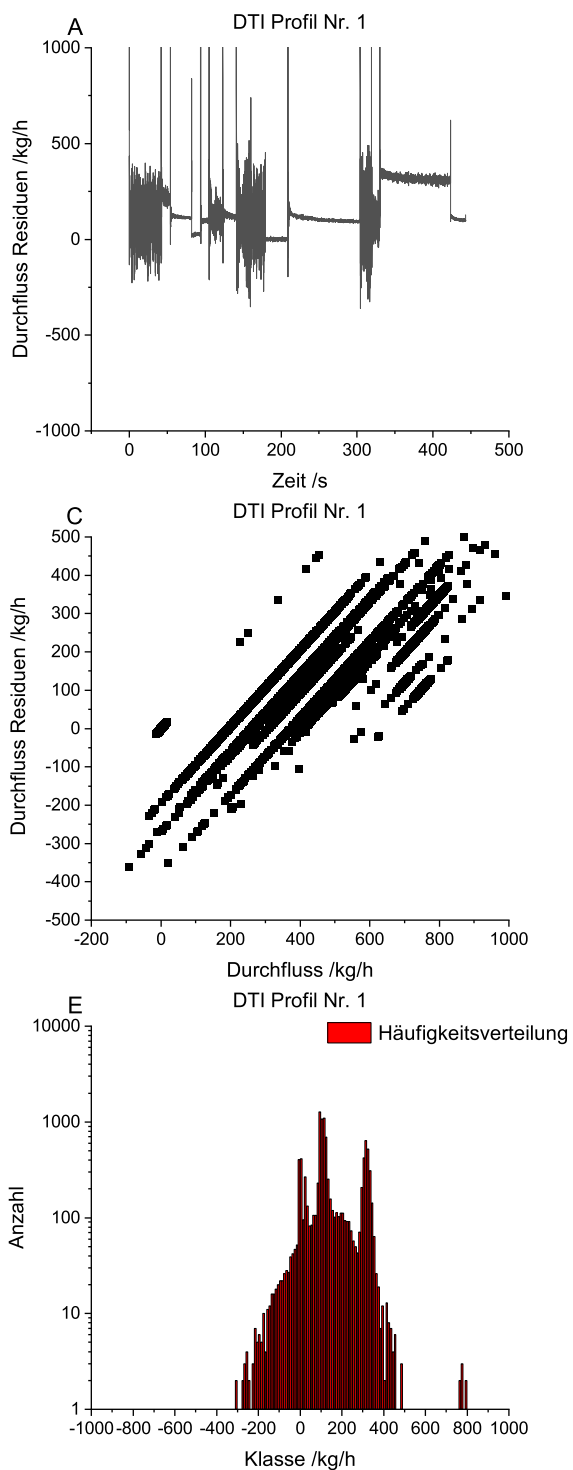


Abbildung B.4: Darstellung der Residuen als: (A,B) Liniendiagramm in Abhängigkeit der Zeit, (C,D) Punktdiagramm in Abhängigkeit des Durchflusses und (E,F) als Häufigkeitsverteilung; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 1) eines Instituts (DTI)

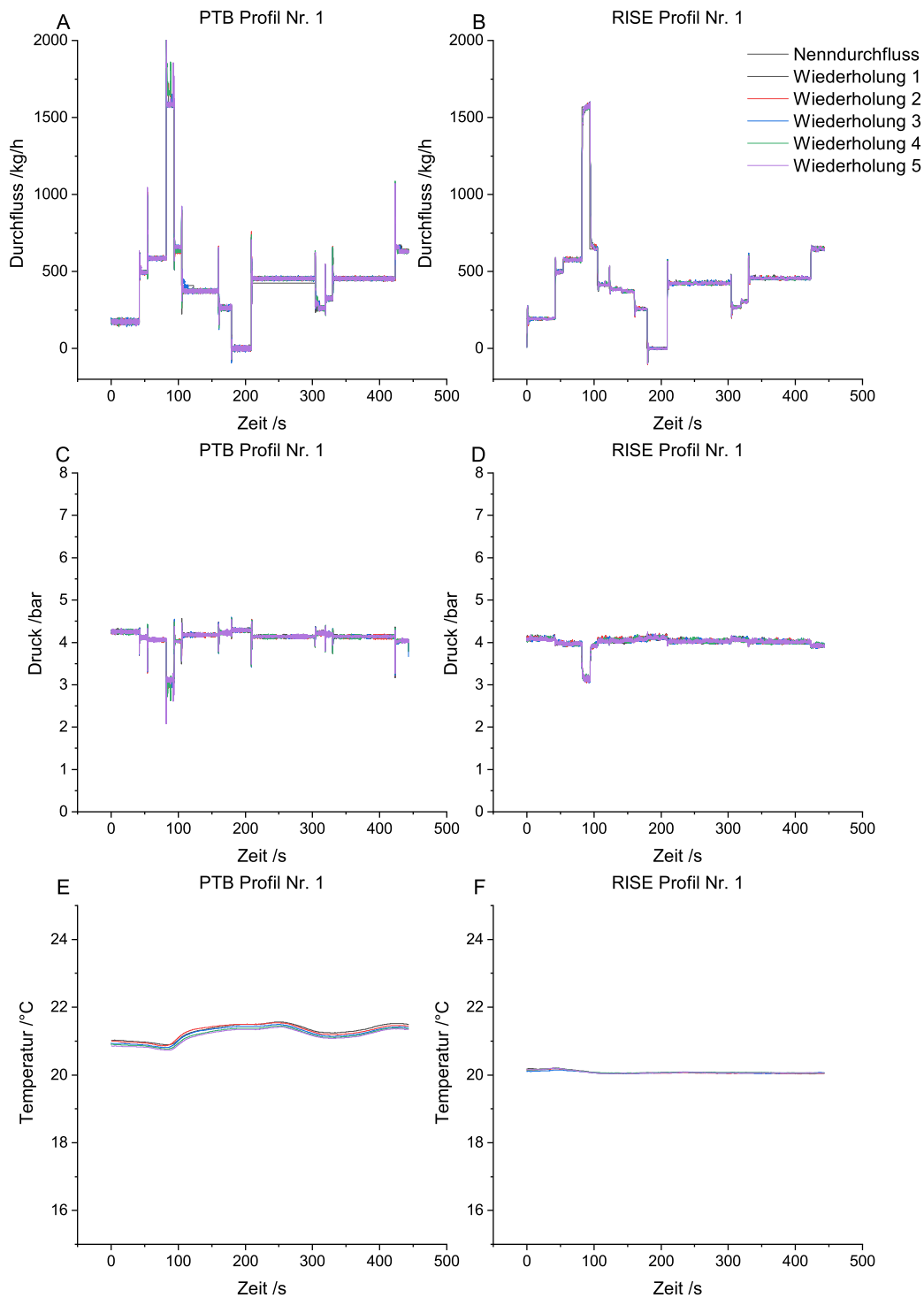


Abbildung B.5: Kontinuierlich aufgezeichnetes Messsignal (20 Hz) des Transferstandards des Ringvergleichs für n Wiederholungen; Massestromsignal (A,B), Druck (C,D) und Temperatur (E,F) in Abhängigkeit der Zeit; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 1) eines Instituts (PTB/RISE)

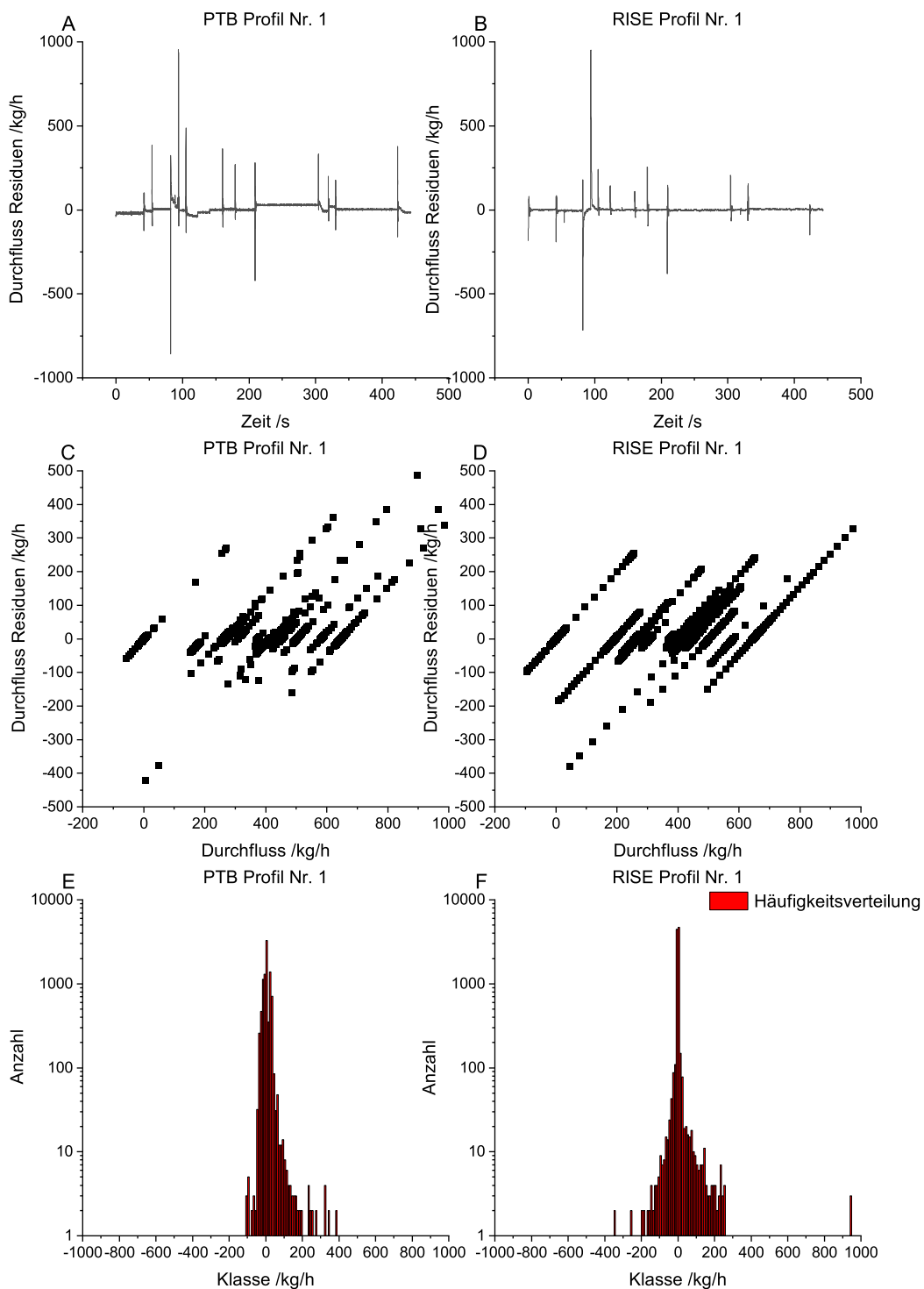


Abbildung B.6: Darstellung der Residuen als: (A,B) Liniendiagramm in Abhängigkeit der Zeit, (C,D) Punktdiagramm in Abhängigkeit des Durchflusses und (E,F) als Häufigkeitsverteilung; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 1) eines Instituts (PTB/RISE)

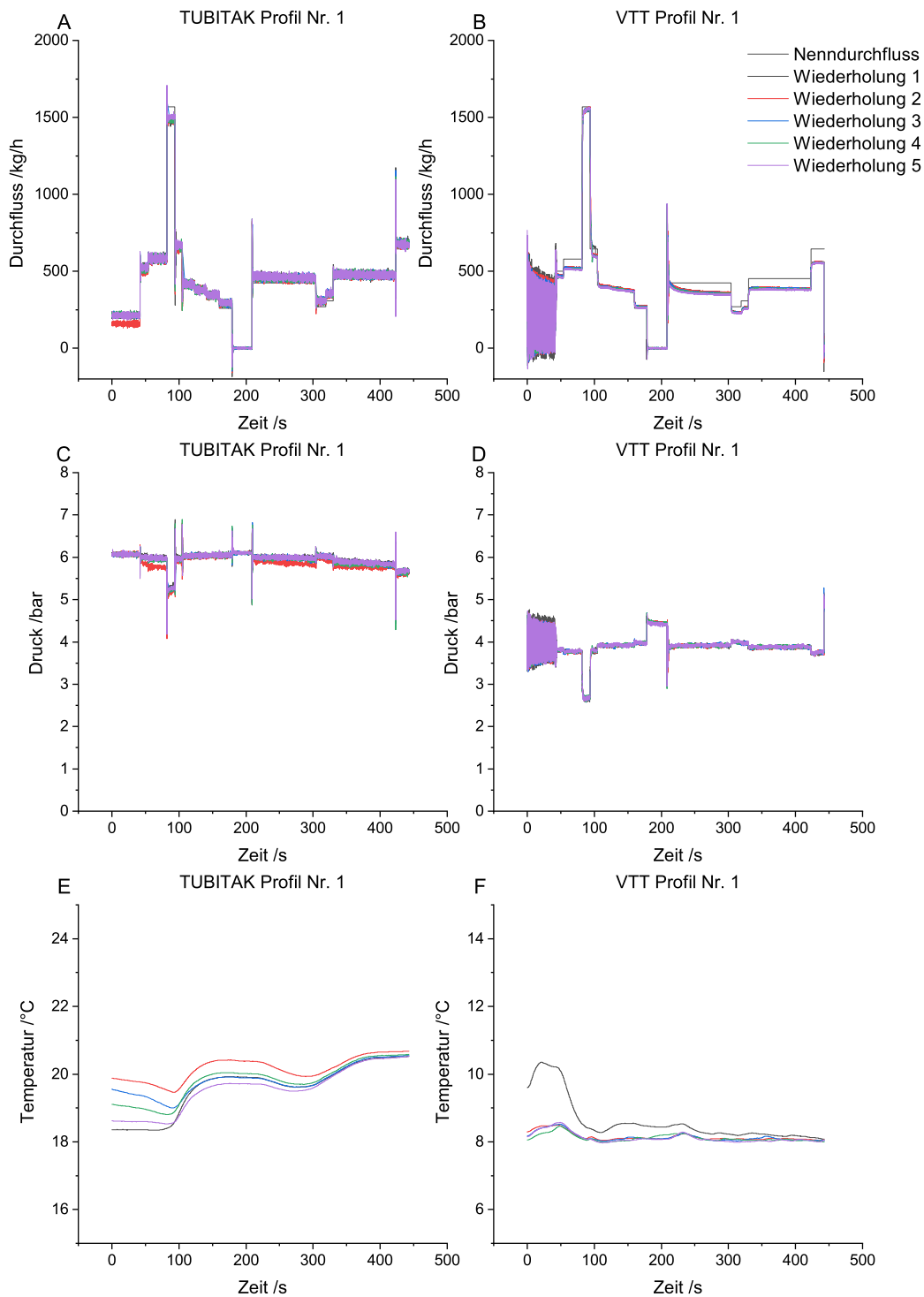


Abbildung B.7: Kontinuierlich aufgezeichnetes Messsignal (20 Hz) des Transferstandards des Ringvergleichs für n Wiederholungen; Massestromsignal (A,B), Druck (C,D) und Temperatur (E,F) in Abhängigkeit der Zeit; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 1) eines Instituts (TUBITAK/VTT) dar

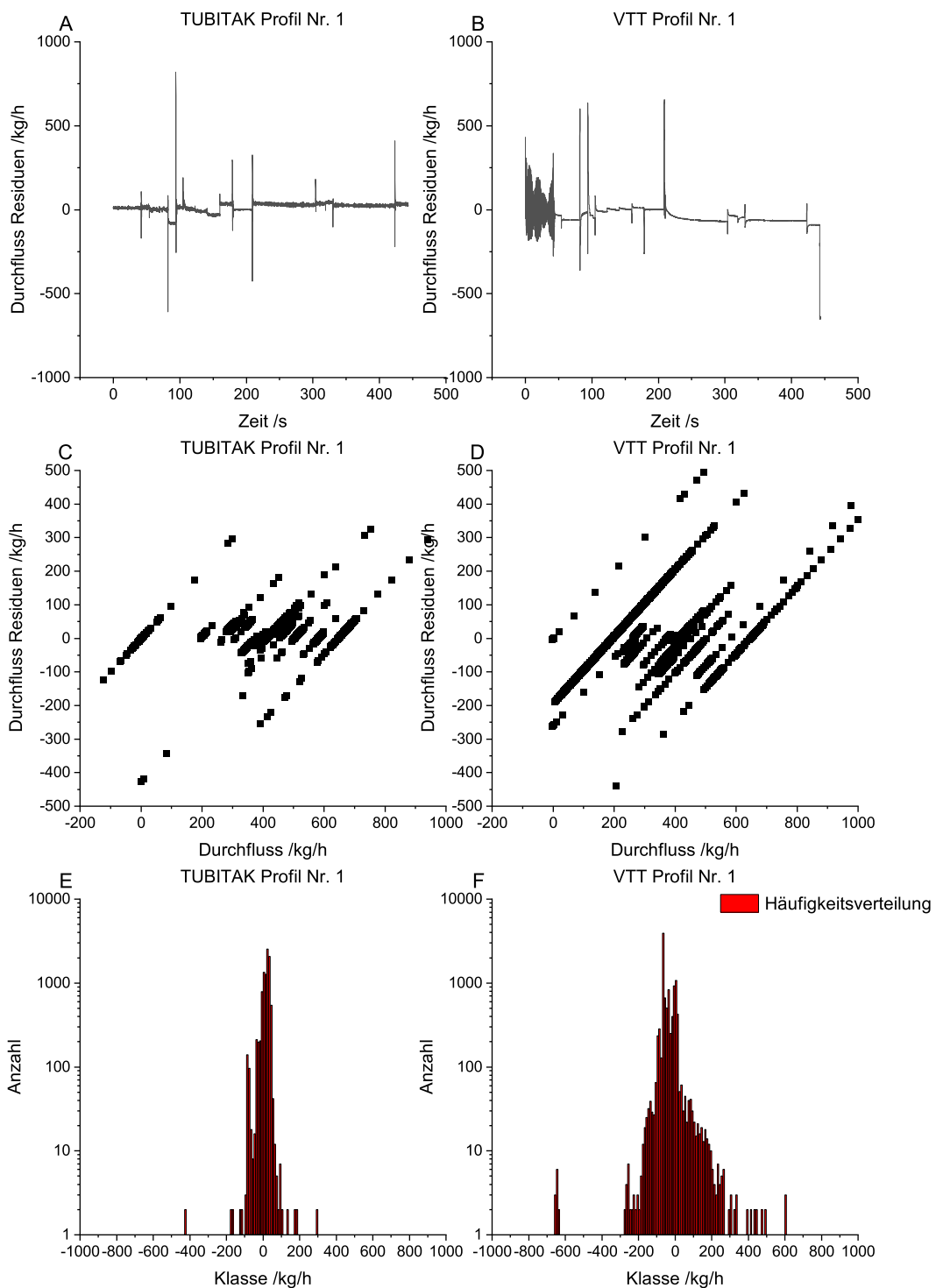


Abbildung B.8: Darstellung der Residuen als: (A,B) Liniendiagramm in Abhängigkeit der Zeit, (C,D) Punktdiagramm in Abhängigkeit des Durchflusses und (E,F) als Häufigkeitsverteilung; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 1) eines Instituts (TUBITAK/VTT)

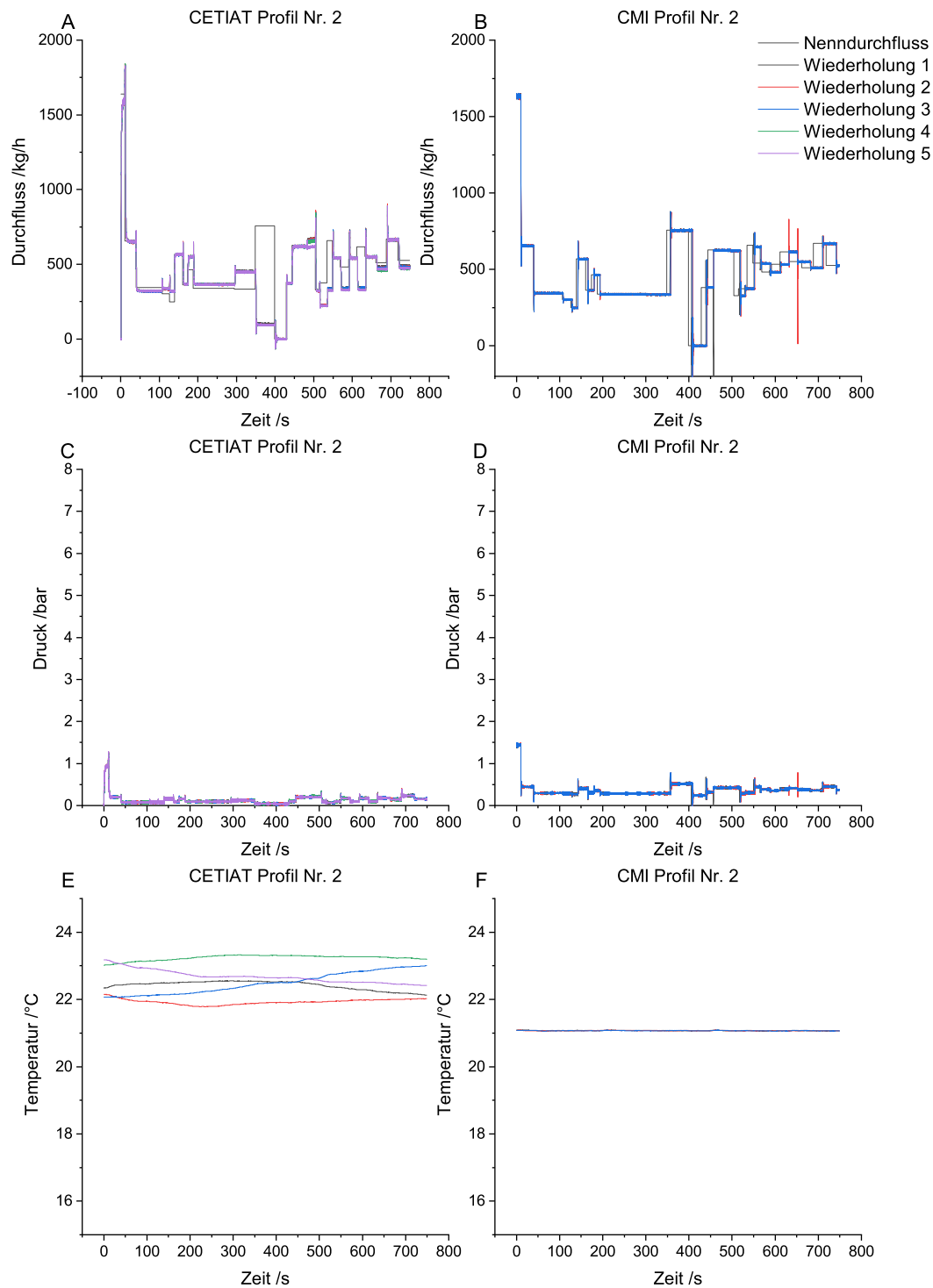


Abbildung B.9: Kontinuierlich aufgezeichnetes Messsignal (20 Hz) des Transferstandards des Ringvergleichs für n Wiederholungen; Massestromsignal (A,B), Druck (C,D) und Temperatur (E,F) in Abhängigkeit der Zeit; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 2) eines Instituts (CETIAT/CMI)

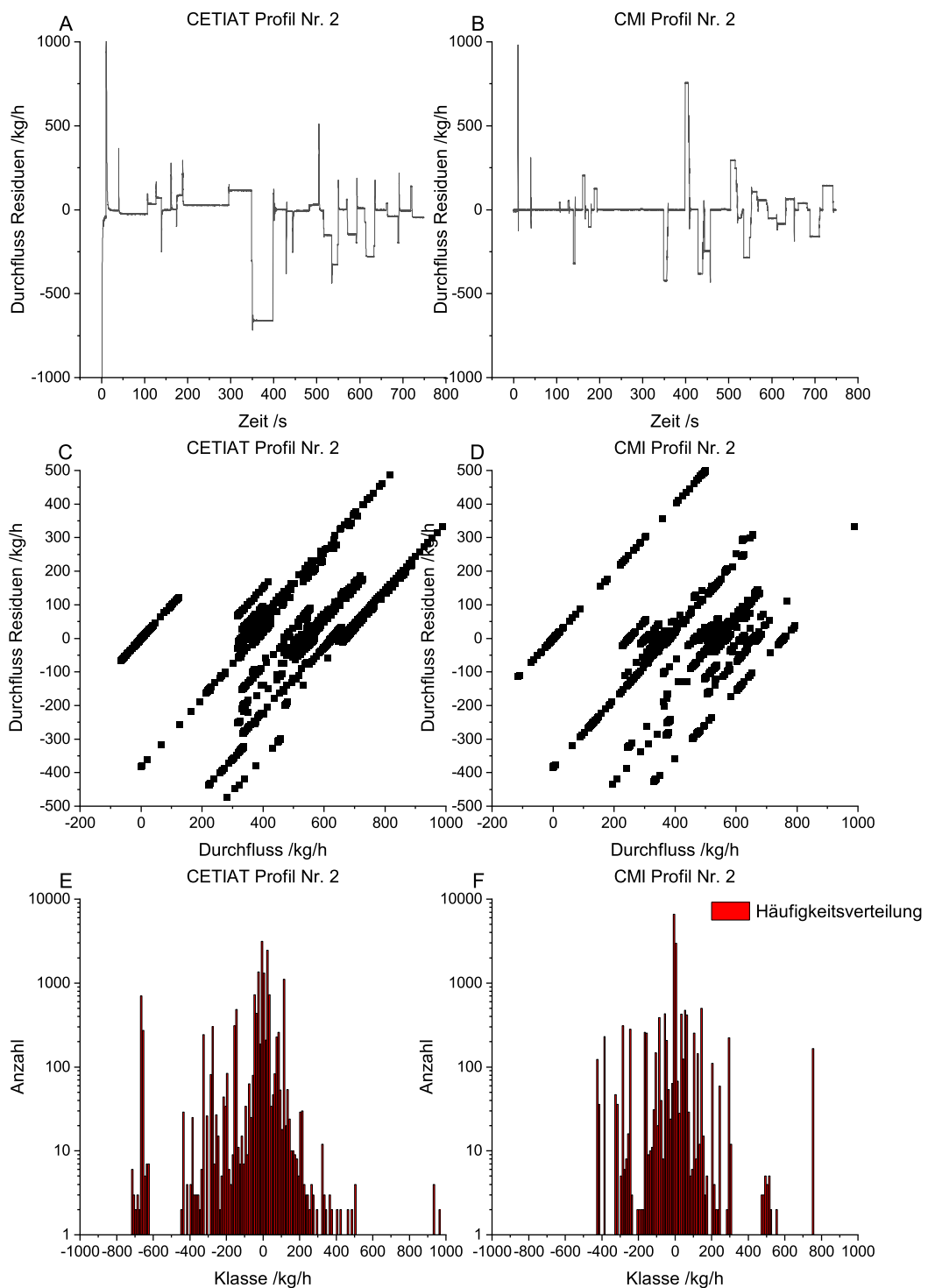


Abbildung B.10: Darstellung der Residuen als: (A,B) Liniendiagramm in Abhängigkeit der Zeit, (C,D) Punktdiagramm in Abhängigkeit des Durchflusses und (E,F) als Häufigkeitsverteilung; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 2) eines Instituts (CETIAT/CMI)

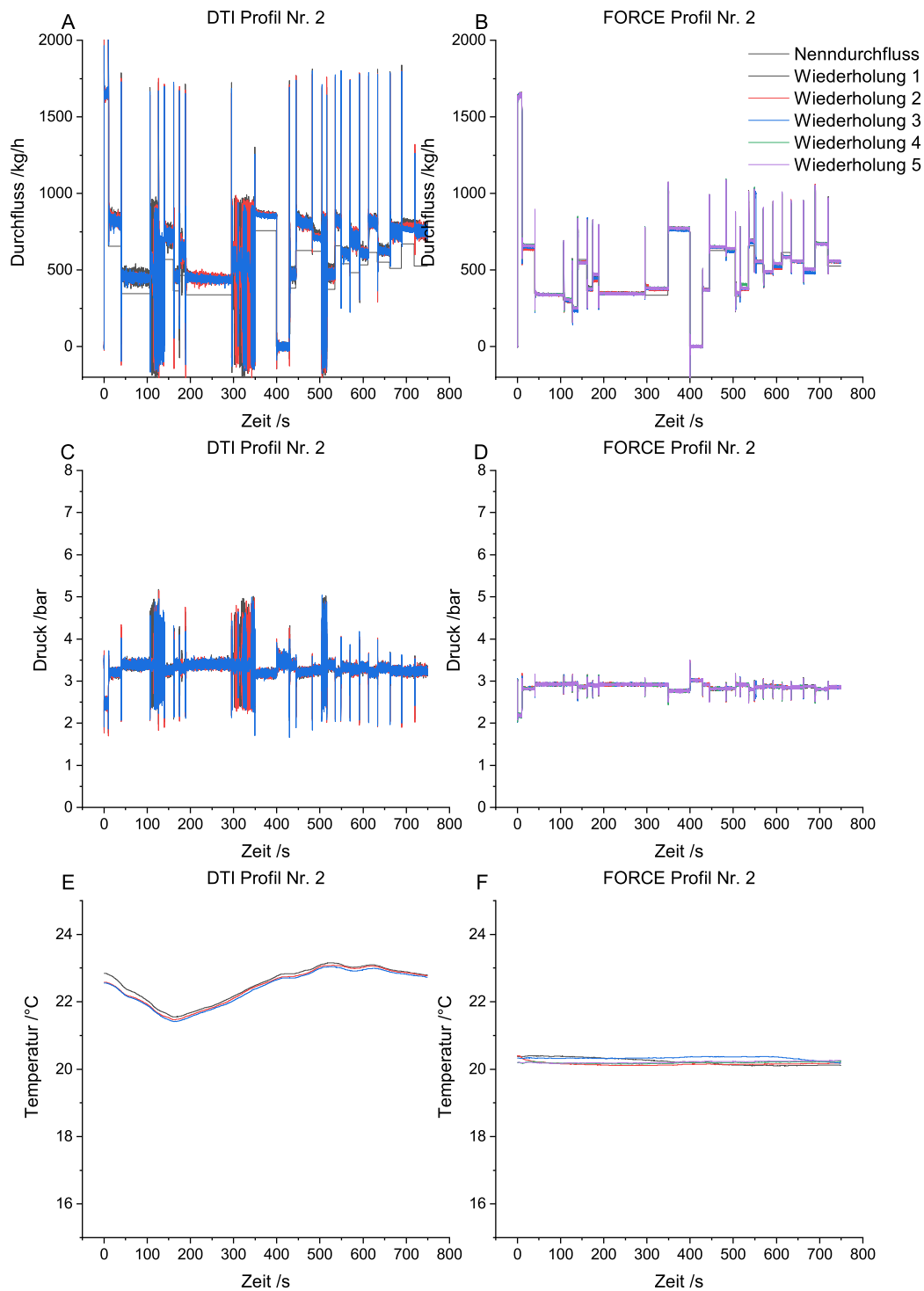


Abbildung B.11: Kontinuierlich aufgezeichnetes Messsignal (20 Hz) des Transferstandards des Ringvergleichs für n Wiederholungen; Massestromsignal (A), Druck (C) und Temperatur (E) in Abhängigkeit der Zeit; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 2) eines Instituts (DTI/FORCE)

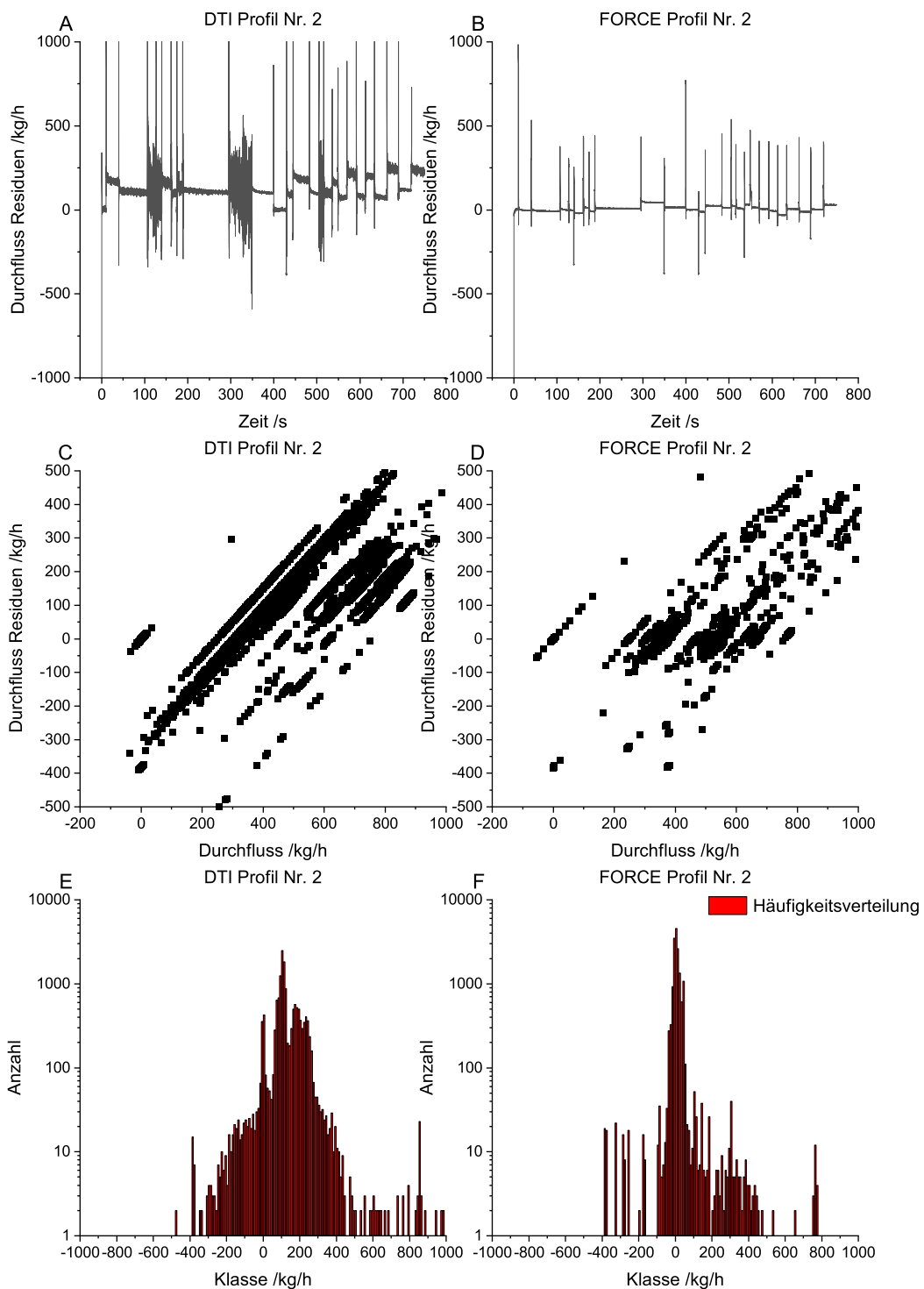


Abbildung B.12: Darstellung der Residuen als: (A,B) Liniendiagramm in Abhängigkeit der Zeit, (C,D) Punktdiagramm in Abhängigkeit des Durchflusses und (E,F) als Häufigkeitsverteilung; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 2) eines Instituts (DTI/FORCE)

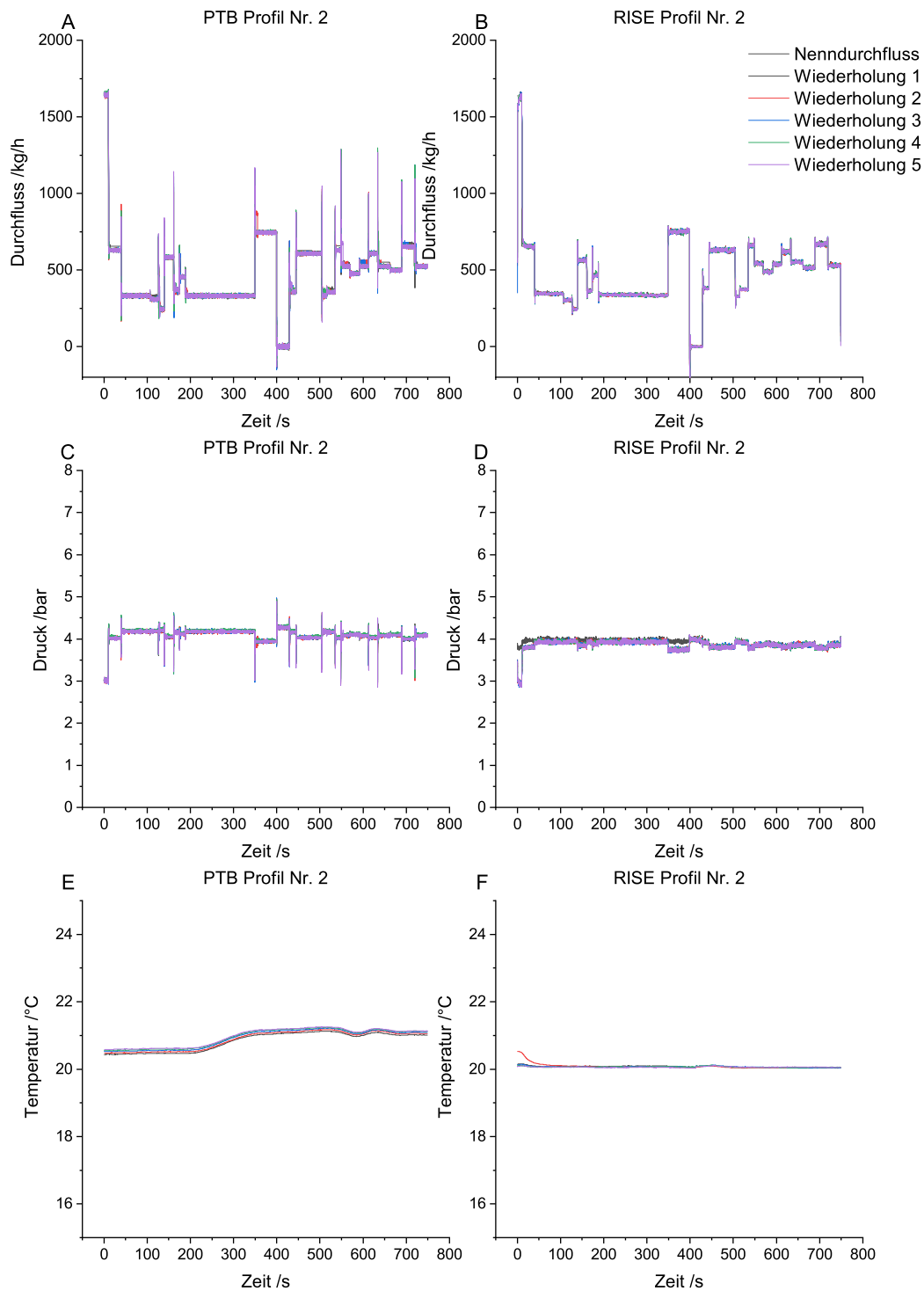


Abbildung B.13: Kontinuierlich aufgezeichnetes Messsignal (20 Hz) des Transferstandards des Ringvergleichs für n Wiederholungen; Massestromsignal (A,B), Druck (C,D) und Temperatur (E,F) in Abhängigkeit der Zeit; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 2) eines Instituts (PTB/RISE)

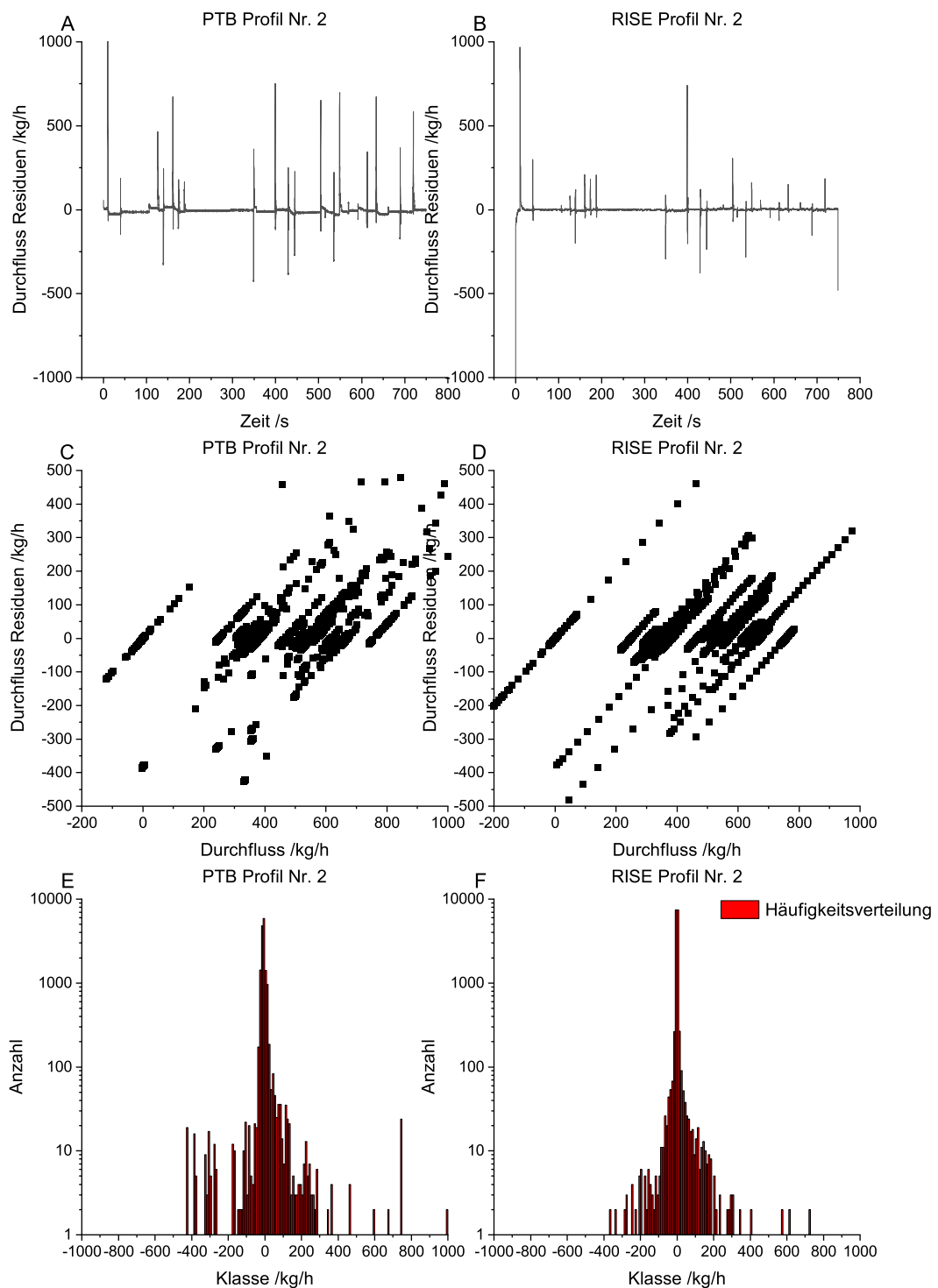


Abbildung B.14: Darstellung der Residuen als: (A,B) Liniendiagramm in Abhängigkeit der Zeit, (C,D) Punktdiagramm in Abhängigkeit des Durchflusses und (E,F) als Häufigkeitsverteilung; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 2) eines Instituts (PTB/RISE)

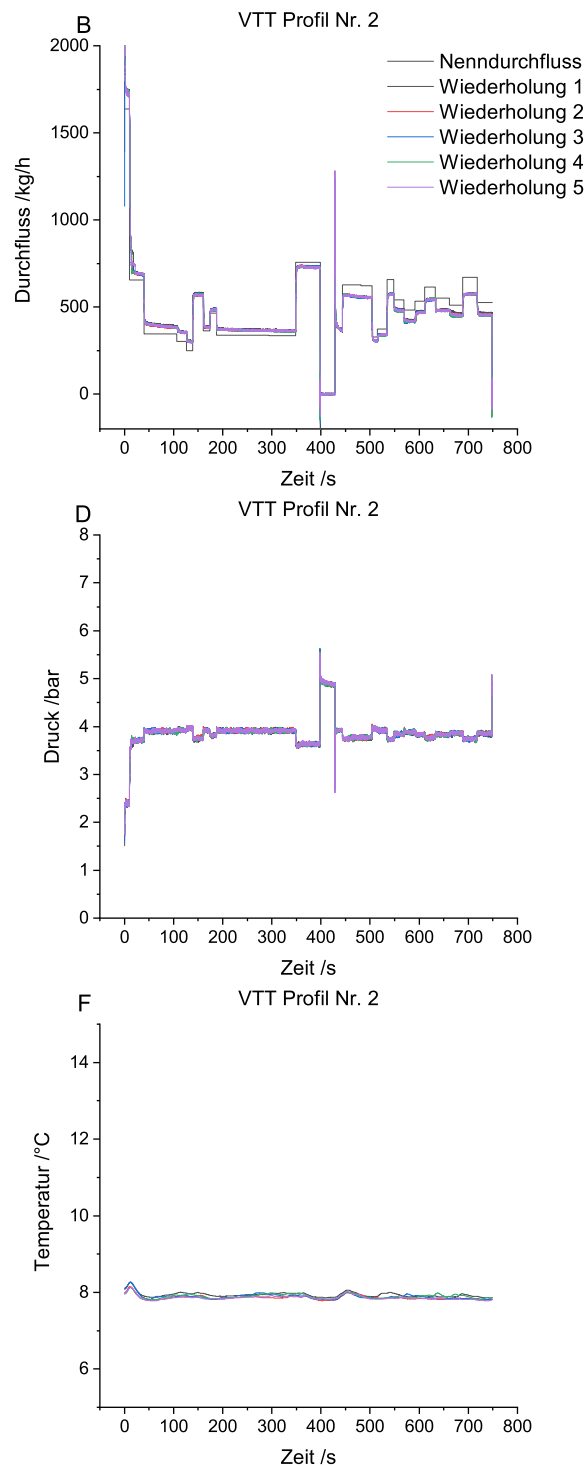


Abbildung B.15: Kontinuierlich aufgezeichnetes Messsignal (20 Hz) des Transferstandards des Ringvergleichs für n Wiederholungen; Massestromsignal (A,B), Druck (C,D) und Temperatur (E,F) in Abhängigkeit der Zeit; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 2) eines Instituts (VTT) dar

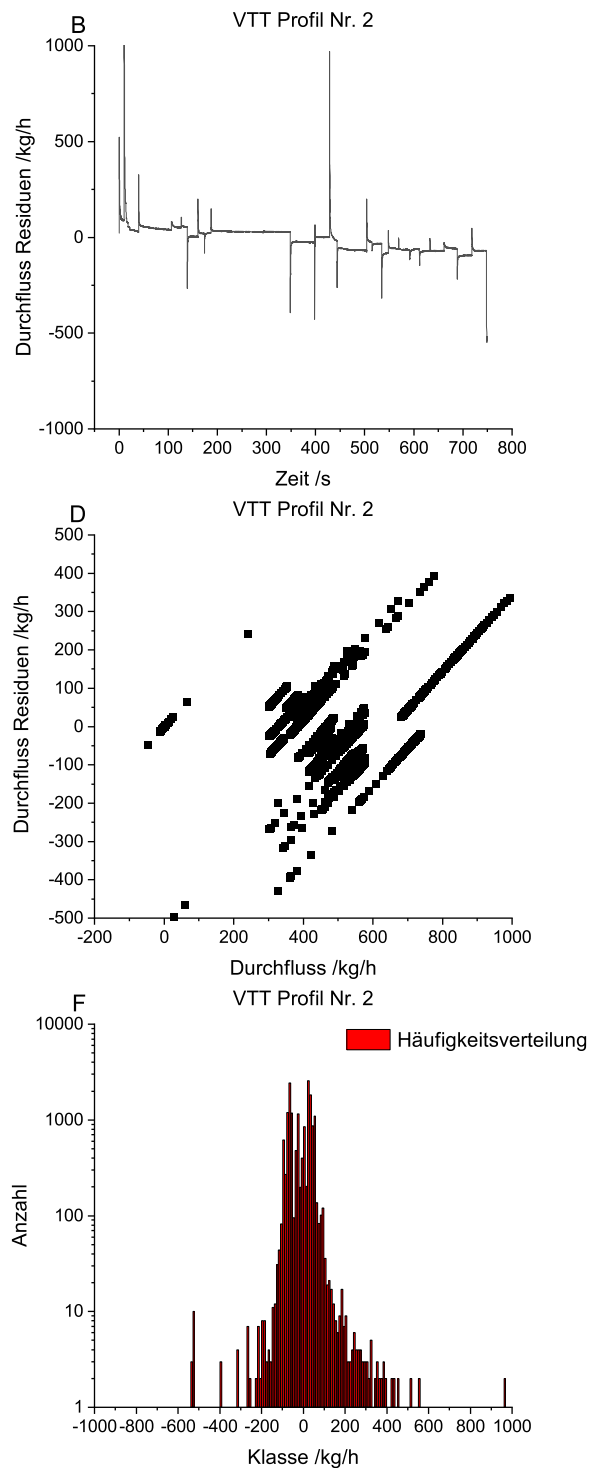


Abbildung B.16: Darstellung der Residuen als: (A,B) Liniendiagramm in Abhängigkeit der Zeit, (C,D) Punktdiagramm in Abhängigkeit des Durchflusses und (E,F) als Häufigkeitsverteilung; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 2) eines Instituts (VTT)

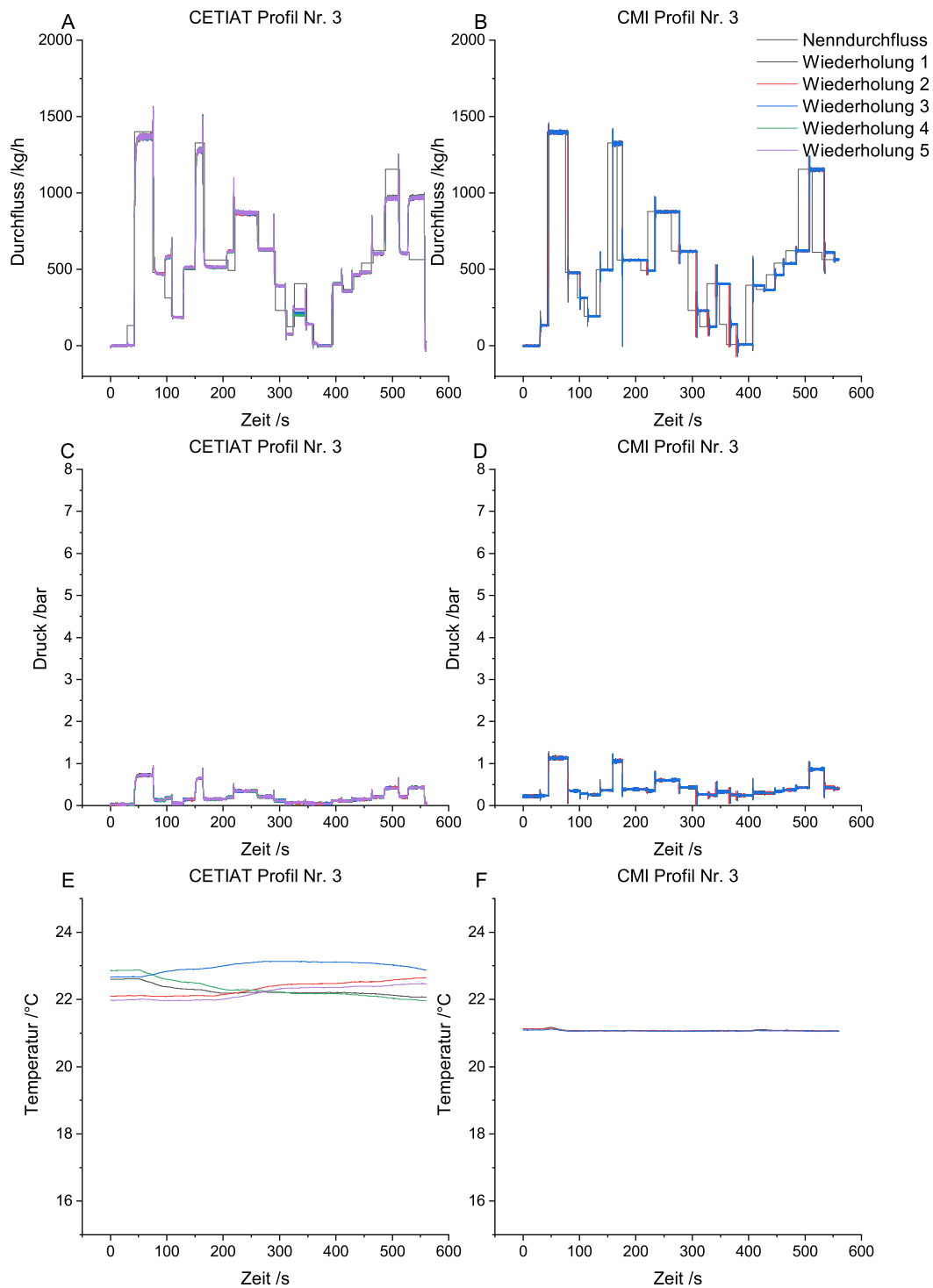


Abbildung B.17: Kontinuierlich aufgezeichnetes Messsignal (20 Hz) des Transferstandards des Ringvergleichs für n Wiederholungen; Massestromsignal (A,B), Druck (C,D) und Temperatur (E,F) in Abhängigkeit der Zeit; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 3) eines Instituts (CETIAT/CMI)

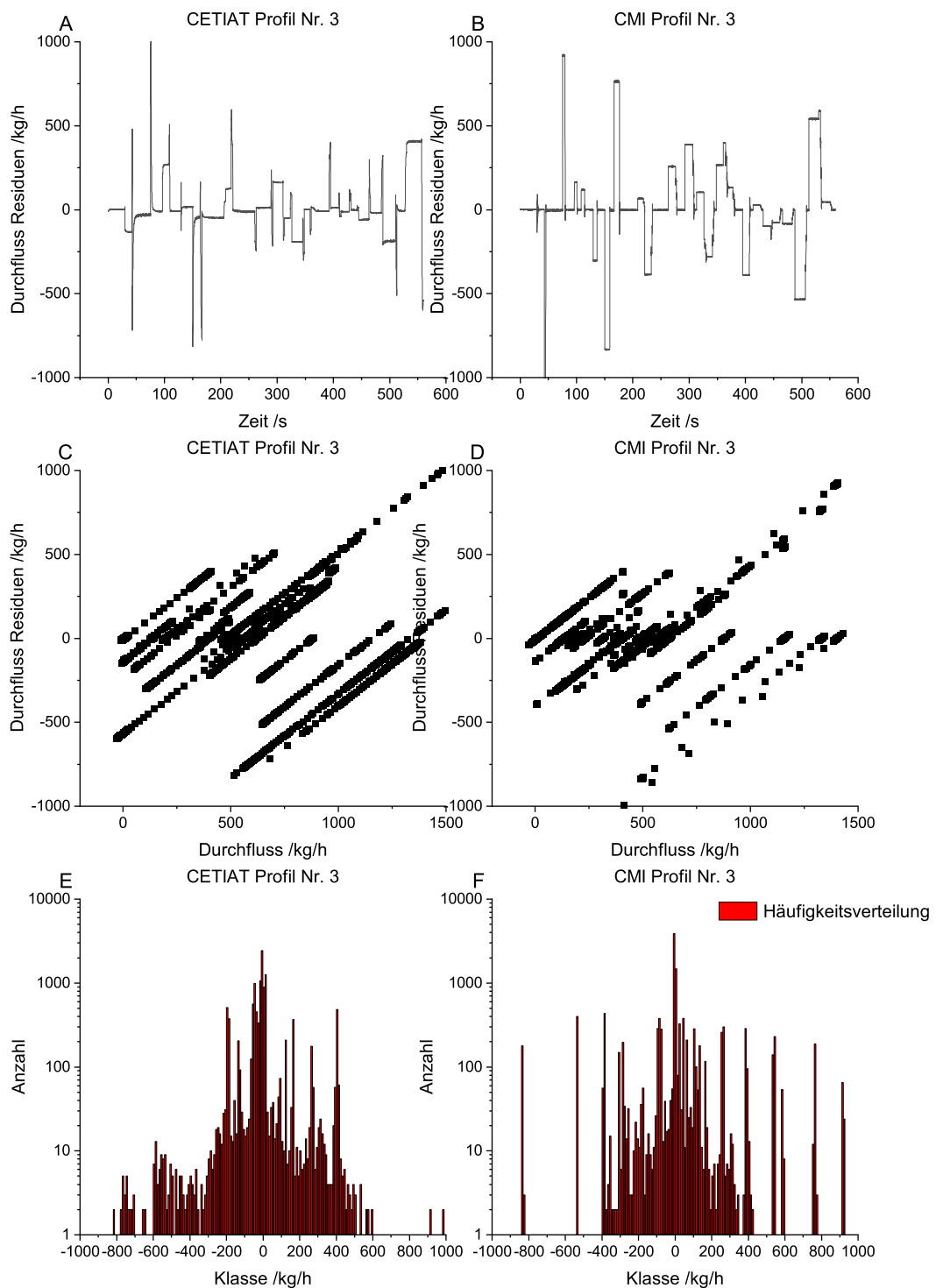


Abbildung B.18: Darstellung der Residuen als: (A,B) Liniendiagramm in Abhängigkeit der Zeit, (C,D) Punktdiagramm in Abhängigkeit des Durchflusses und (E,F) als Häufigkeitsverteilung; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 3) eines Instituts (CETIAT/CMI)

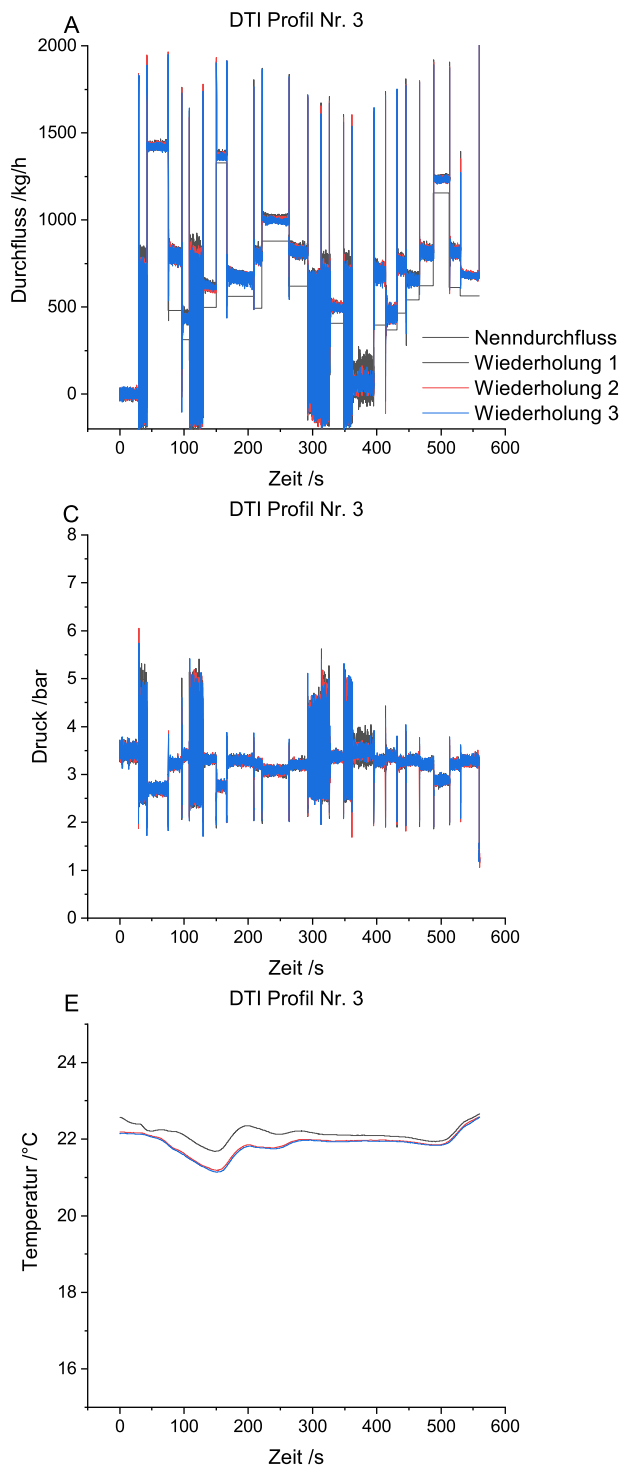


Abbildung B.19: Kontinuierlich aufgezeichnetes Messsignal (20 Hz) des Transferstandards des Ringvergleichs für n Wiederholungen; Massestromsignal (A), Druck (C) und Temperatur (E) in Abhängigkeit der Zeit; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 3) eines Instituts (DTI)

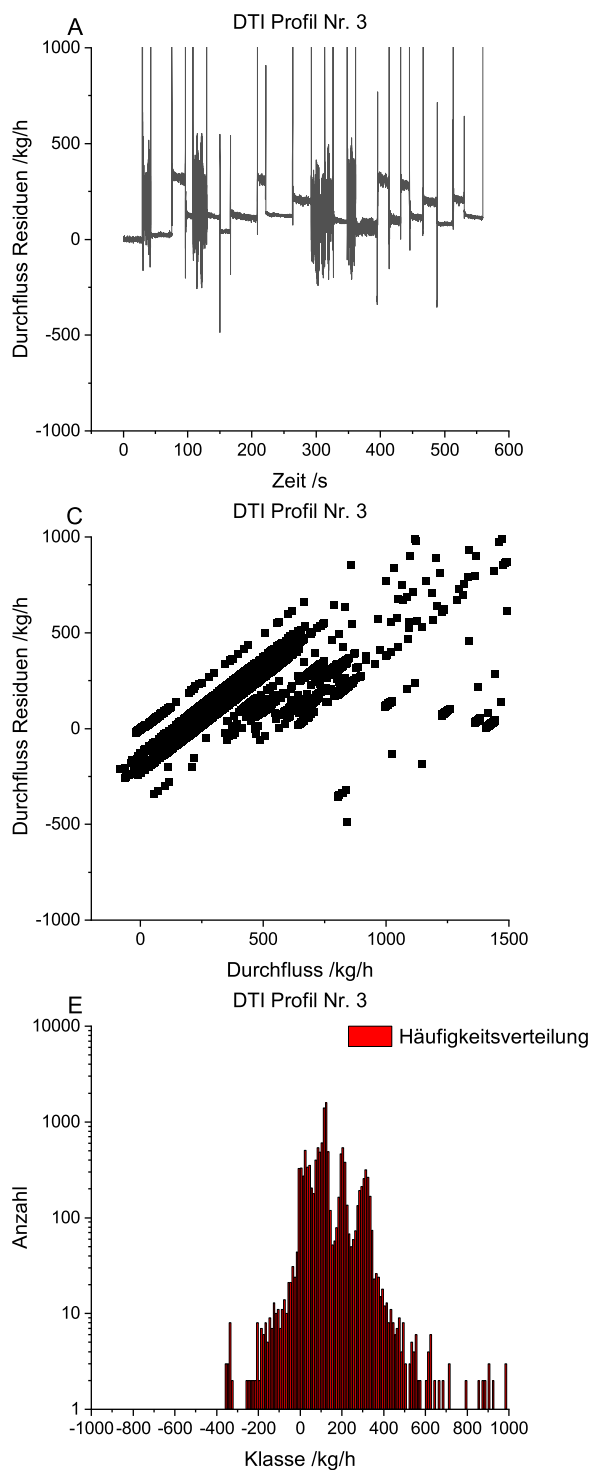


Abbildung B.20: Darstellung der Residuen als: (A,B) Liniendiagramm in Abhängigkeit der Zeit, (C,D) Punktdiagramm in Abhängigkeit des Durchflusses und (E,F) als Häufigkeitsverteilung; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 3) eines Instituts (DTI)

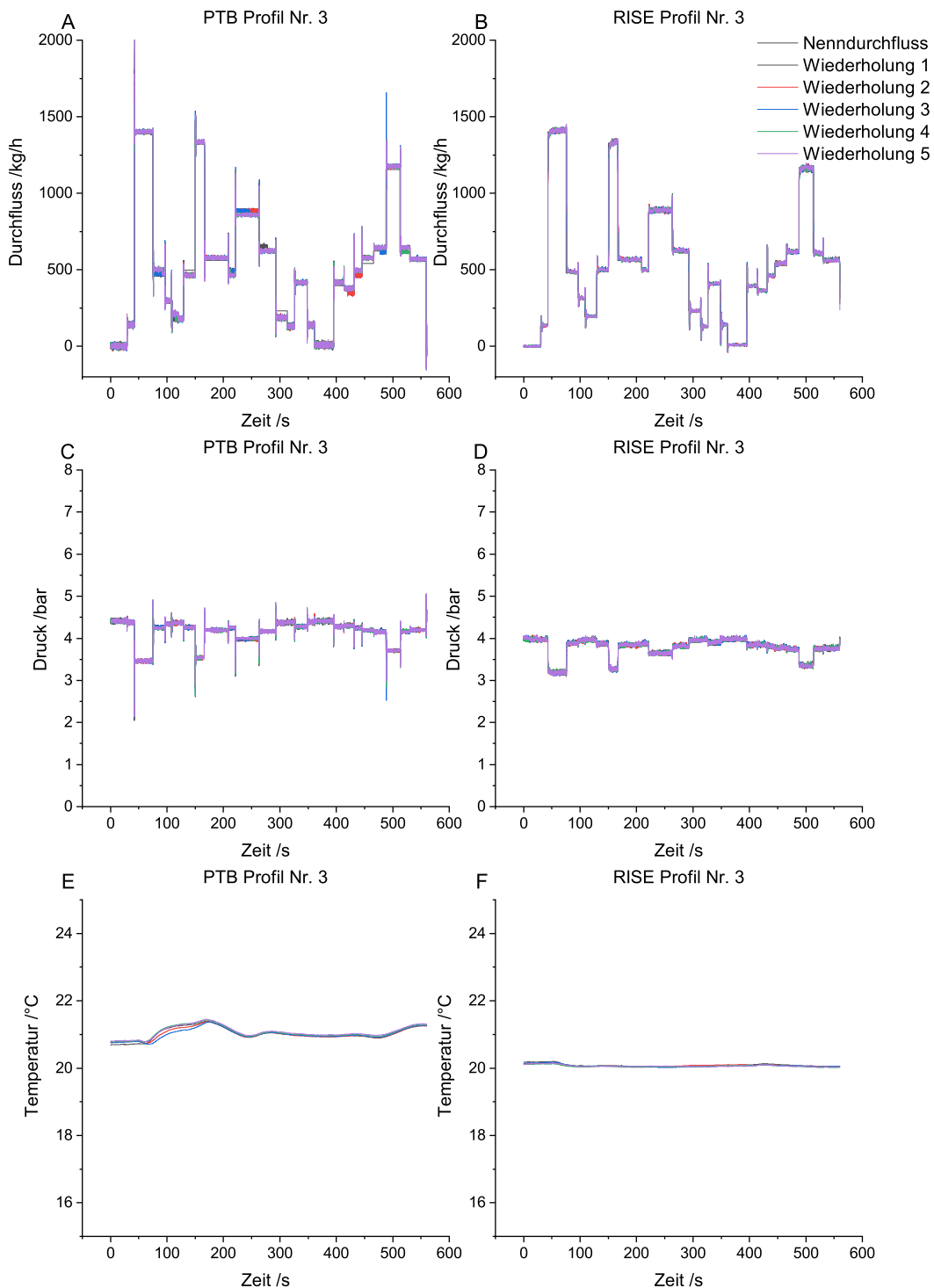


Abbildung B.21: Kontinuierlich aufgezeichnetes Messsignal (20 Hz) des Transferstandards des Ringvergleichs für n Wiederholungen; Massestromsignal (A,B), Druck (C,D) und Temperatur (E,F) in Abhängigkeit der Zeit; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 3) eines Instituts (PTB/RISE)

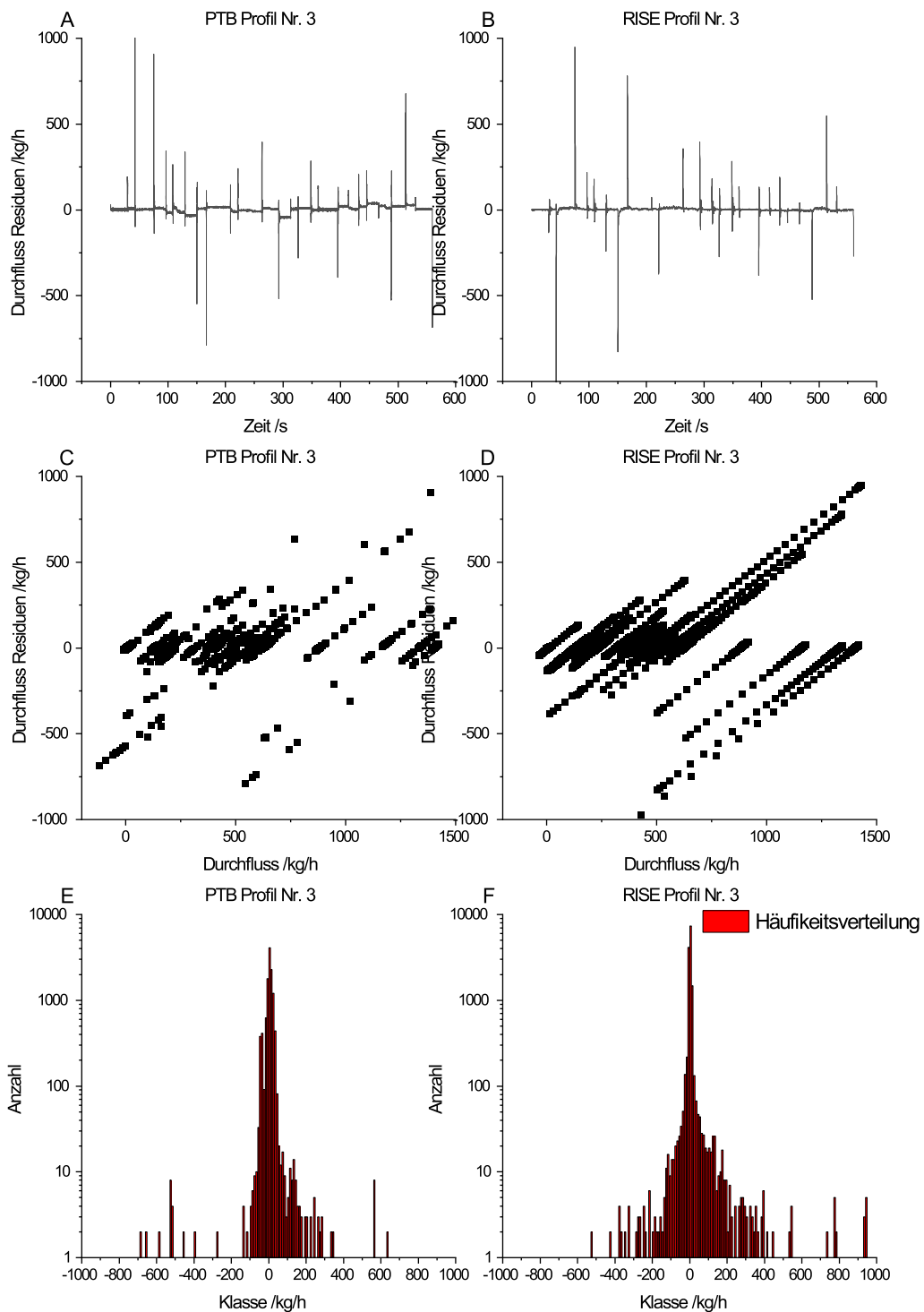


Abbildung B.22: Darstellung der Residuen als: (A,B) Liniendiagramm in Abhängigkeit der Zeit, (C,D) Punktdiagramm in Abhängigkeit des Durchflusses und (E,F) als Häufigkeitsverteilung; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 3) eines Instituts (PTB/RISE)

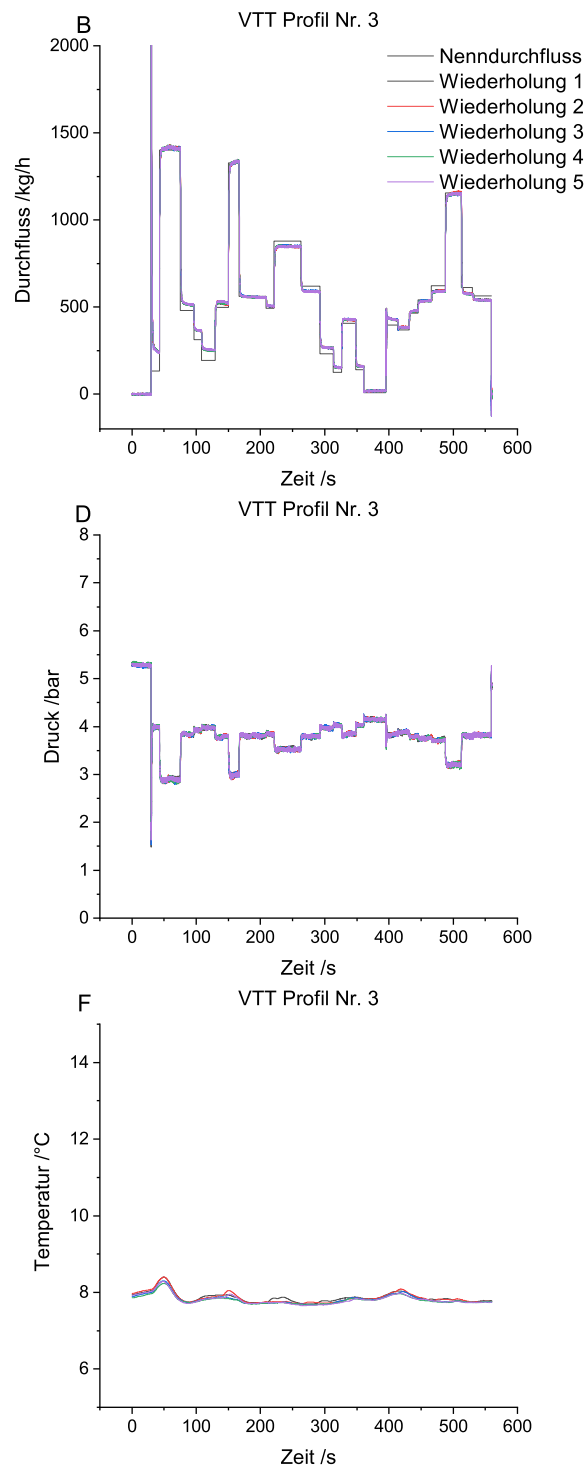


Abbildung B.23: Kontinuierlich aufgezeichnetes Messsignal (20 Hz) des Transferstandards des Ringvergleichs für n Wiederholungen; Massestromsignal (A,B), Druck (C,D) und Temperatur (E,F) in Abhängigkeit der Zeit; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 3) eines Instituts (VTT) dar

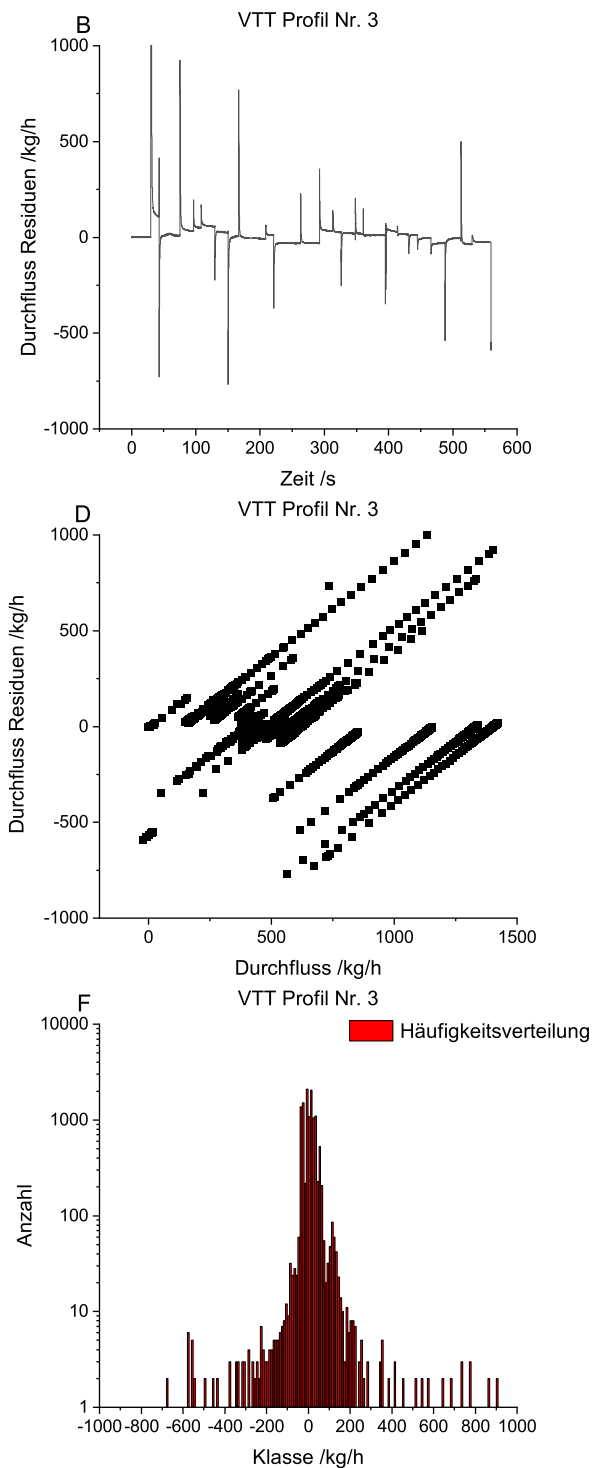


Abbildung B.24: Darstellung der Residuen als: (A,B) Liniendiagramm in Abhängigkeit der Zeit, (C,D) Punktdiagramm in Abhängigkeit des Durchflusses und (E,F) als Häufigkeitsverteilung; jede Spalte zeigt Messungen eines Profils (Nr. 3) eines Instituts (VTT)

C Messabweichung der
Wassermähler: statisches und
dynamisches Messregime

Tabelle C.1: Zur Verfügung stehende Hauswasserzähler

Typ	Hersteller	Anzahl n	Dimensionierung	
			Q_3 /l/h	R
Einstrahl trockenläufer	A	3	2500	80
	A	3	4000	80
Nassläufer	A	3	4000	80
	B	3	4000	80
Ringkolbenzähler	B	3	4000	80
	A	3	4000	400
Magn.-induktive Zähler	B	3	4000	800
Messkapselzähler	B	3	1600	40
	A	3	2500	40
Ultraschallzähler	C	3	2500	160
	C	3	4000	160
	C	3	4000	800

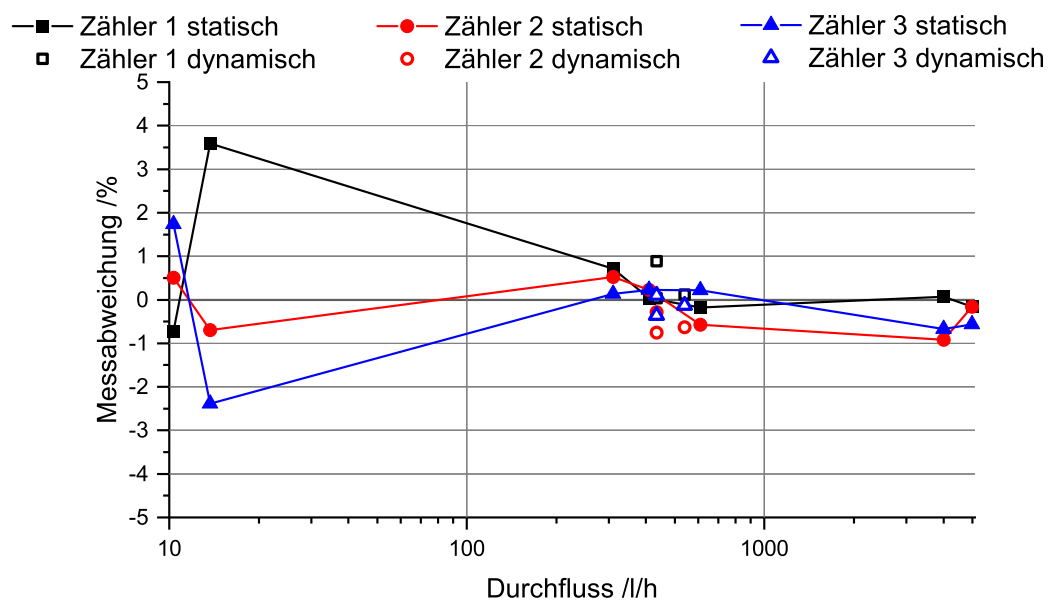


Abbildung C.1: Messabweichung Ultraschallwasserzähler; $Q_3 = 4000 \text{ l/h}$
 $R = 800$

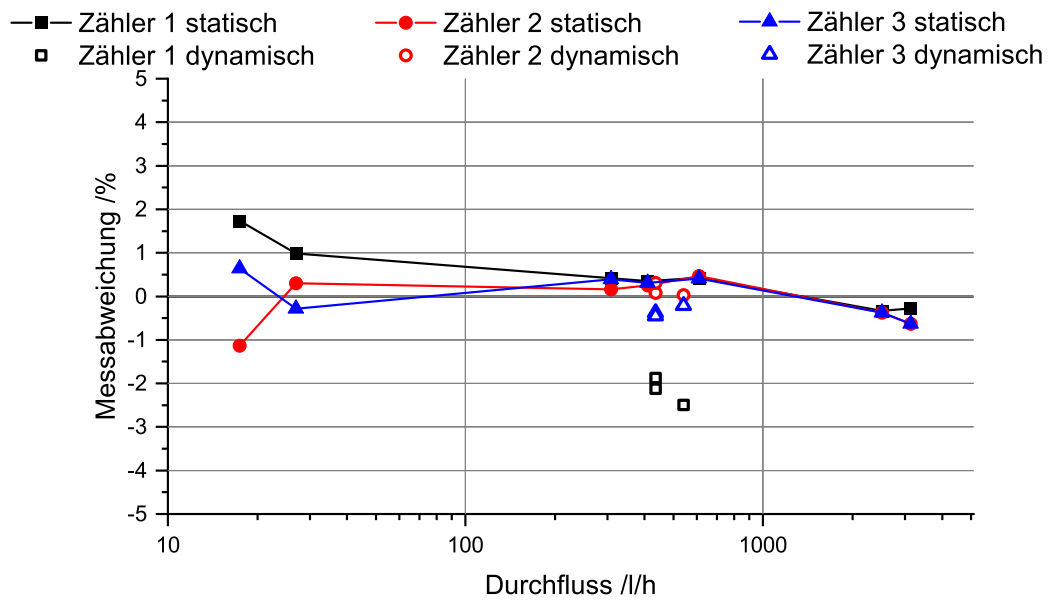


Abbildung C.2: Messabweichung Ultraschallwasserzähler; $Q_3 = 2500 \text{ l/h}$
 $R = 160$

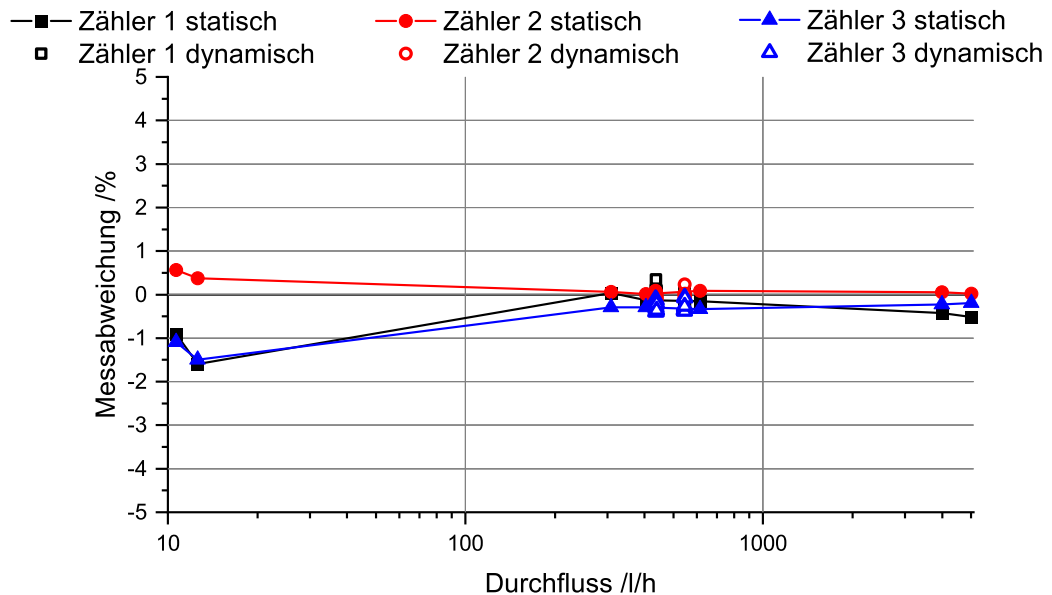


Abbildung C.3: Messabweichung magnetisch-induktiver Wasserzähler; Hersteller A; $Q_3 = 4000 \text{ l/h}$ $R = 160$

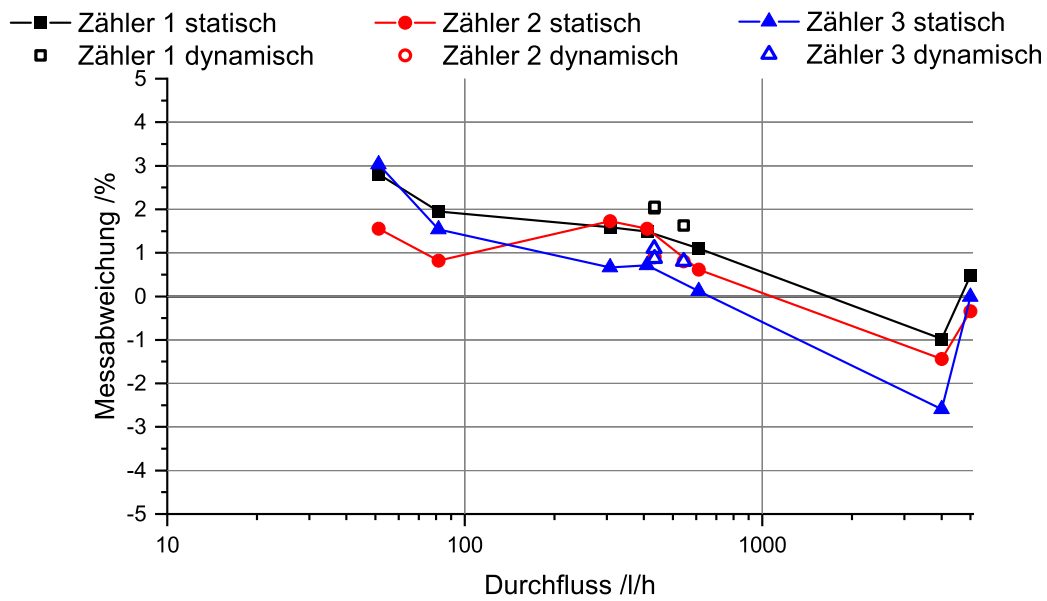


Abbildung C.4: Messabweichung Mehrstrahlflügelradwasserzähler Nassläufer; Hersteller A; $Q_3 = 4000 \text{ l/h}$ $R = 80$

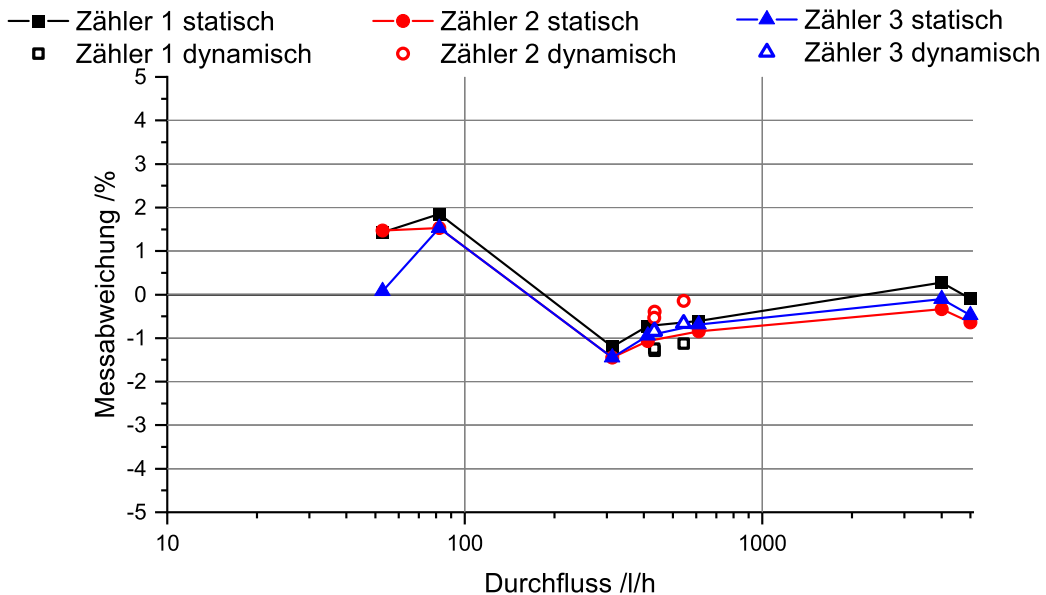


Abbildung C.5: Messabweichung Mehrstrahlflügelradwasserzähler Nassläufer; Hersteller B; $Q_3 = 4000 \text{ l/h}$ $R = 80$

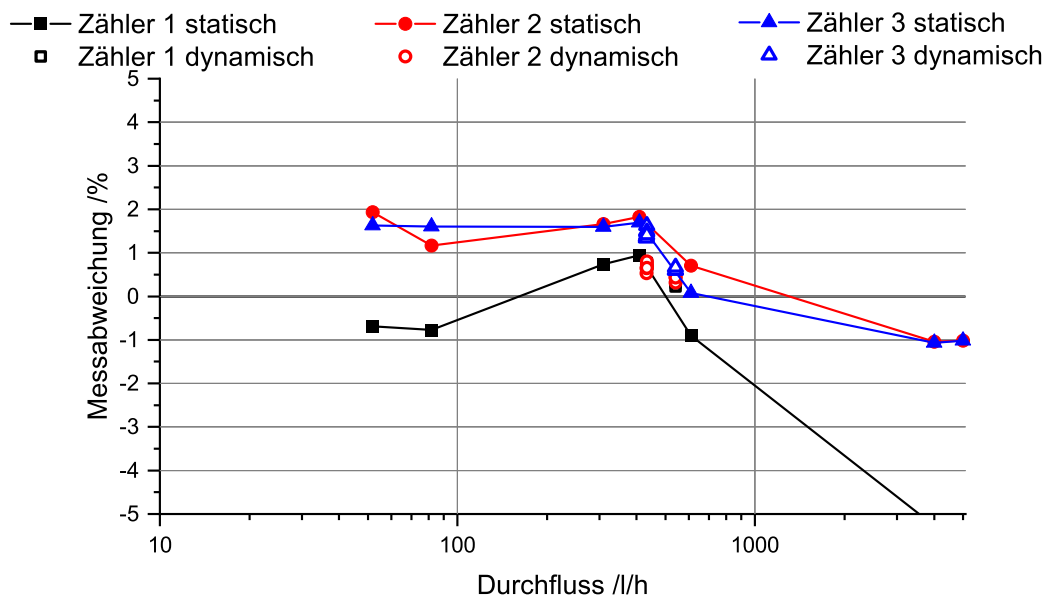


Abbildung C.6: Messabweichung Ringkolbenwasserzähler; Hersteller A;
 $Q_3 = 4000 \text{ l/h}$ $R = 80$

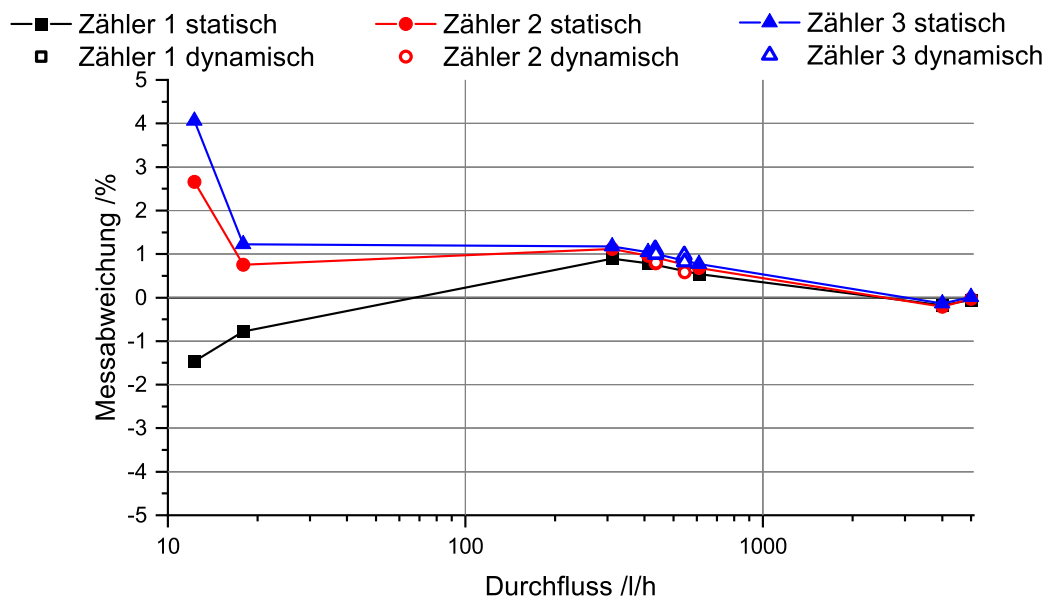


Abbildung C.7: Messabweichung Ringkolbenwasserzähler; Hersteller B;
 $Q_3 = 4000 \text{ l/h}$ $R = 400$

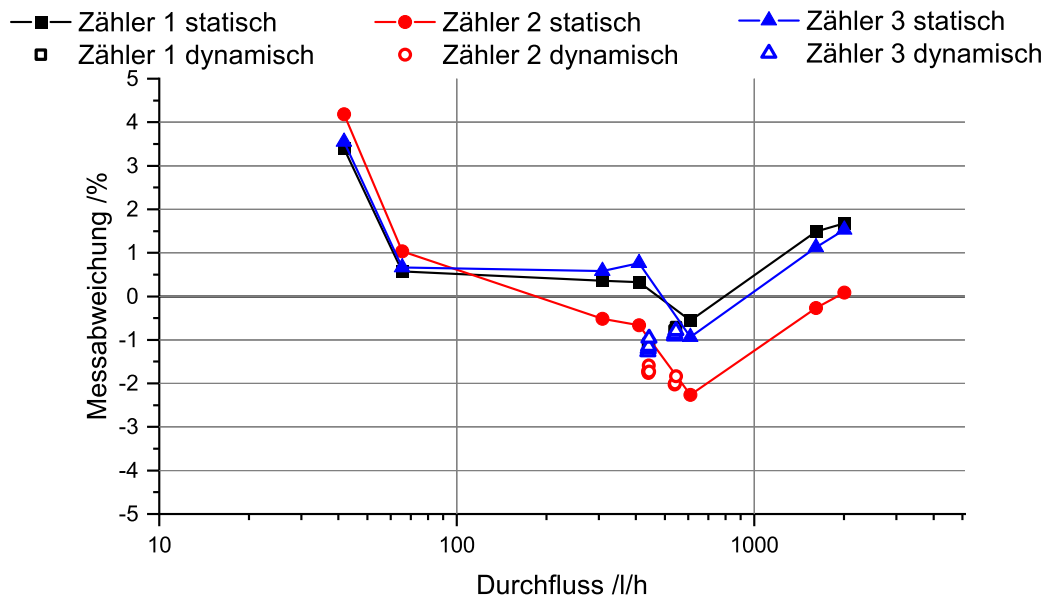


Abbildung C.8: Messabweichung Messkapselwasserzähler Hersteller A;
 $Q_3 = 1600 \text{ l/h}$ $R = 40$

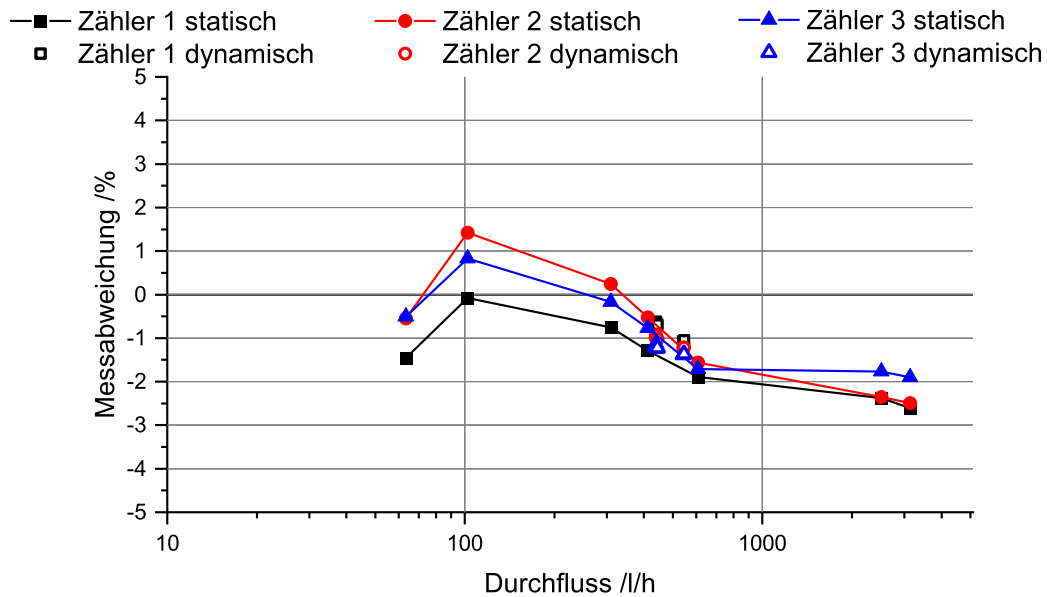


Abbildung C.9: Messabweichung Messkapselwasserzähler Hersteller B;
 $Q_3 = 2500 \text{ l/h}$ $R = 40$

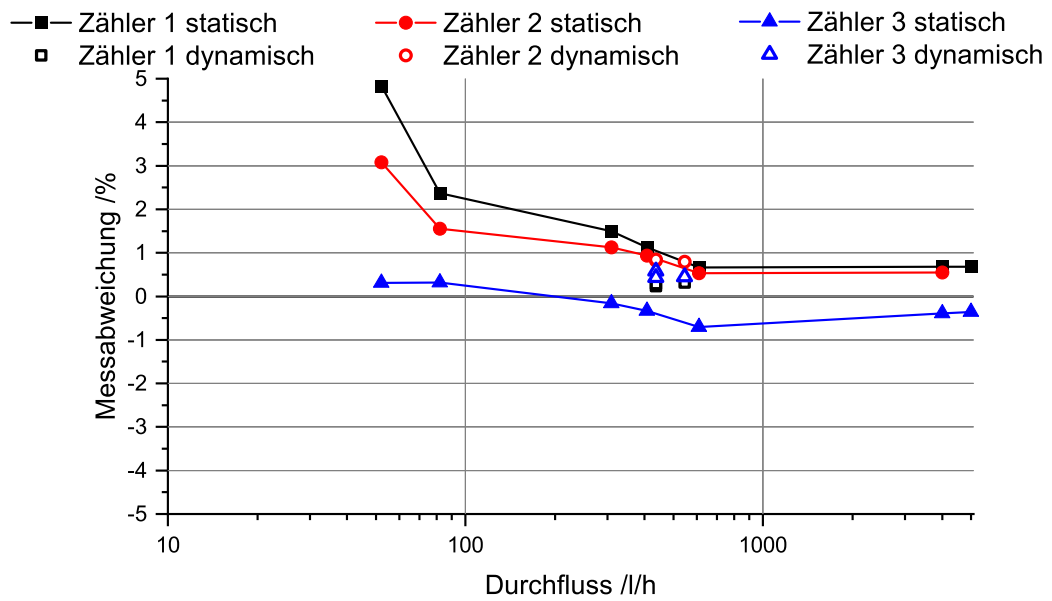


Abbildung C.10: Messabweichung Einstrahlflügelradwasserzähler Hersteller B;
 $Q_3 = 4000 \text{ l/h}$ $R = 80$

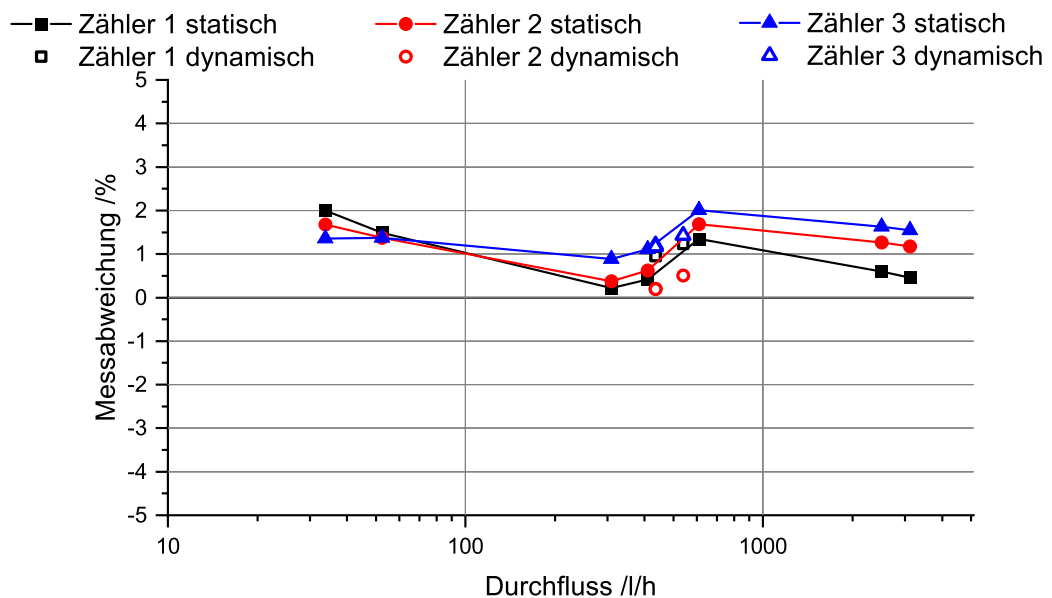


Abbildung C.11: Messabweichung Einstrahlflügelradwasserzähler Hersteller B;
 $Q_3 = 2500 \text{ l/h}$ $R = 80$

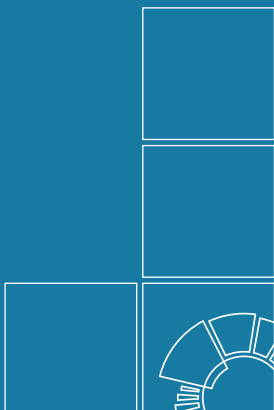
Danksagung

Für die vielfältige Unterstützung der Dissertation möchte ich mich an dieser Stelle bei allen Beteiligten herzlich bedanken.

Besonderer Dank gilt zunächst Frau Dr. habil. Corinna Kroner und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Tränckner für die Betreuung, den fachlichen Austausch und die allgemeine Unterstützung während der Promotion. Im speziellen möchte ich mich für die konstruktiven Diskussionen und den wissenschaftlichen Austausch bedanken, der die Arbeit wesentlich voran gebracht hat.

Darüber hinaus gilt großer Dank den in vielerlei Hinsicht beteiligten Personen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, besonders des Fachbereichs Flüssigkeiten, die durch diverse Hilfen, zum Beispiel durch die technische Umsetzung bei der Durchführung zahlreicher Experimente, an der Dissertation mitgewirkt haben.

Neben meinen Freunden, Verbindungen und Bekannten danke ich vor allem meiner Familie, hervorgehoben meine Frau Lisa und unsere Kinder, die mich in allen Belangen unterstützt und verständnisvoll begleitet haben.



Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
ISNI: 0000 0001 2186 1887

Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Telefon: (05 31) 592-93 21
Telefax: (05 31) 592-92 92
www.ptb.de