

Universität
Rostock



Traditio et Innovatio

Aus der Professur für Wasserwirtschaft
der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät

**Entwicklung von realitätsnahen Prüfprozeduren für
Durchflussmessgeräte basierend auf realen
Verbrauchsprofilen**

”vom Praxis- zum Prüfprofil am Beispiel von Wasserzählern”

Dissertation

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

an der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Rostock

vorgelegt von Dipl.-Ing. Daniel Schumann aus Braunschweig

Braunschweig, den 05.12.2019

https://doi.org/10.18453/rosdok_id00003170

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Jens Tränckner, Universität Rostock,
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Professur für Wasserwirtschaft

Dr. Corinna Kroner, Physikalisch-Technische Bundesanstalt,
Abteilung 1 - Mechanik und Akustik, Fachbereich 1.5 - Flüssigkeiten

Prof. Dr.-Ing. André Lerch, Technische Universität Dresden,
Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft, Professur für Verfahrenstechnik in Hydrosystemen

Jahr der Einreichung: 2019

Jahr der Verteidigung: 2020

Kurzfassung

Der Einsatz von Durchflussmessgeräten in Bereichen des täglichen Lebens nimmt eine Schlüsselposition in der Metrologie ein. Eine besondere Herausforderung stellen dabei Durchflussmessungen dar, die in direktem Zusammenhang mit unserem Konsumverhalten stehen. Die gegenwärtig durch Regeln und Normen vorgegebenen und genutzten Prüfprozeduren für diese Durchflussmessgeräte differieren jedoch stark von der späteren Verwendung der Geräte. Um diese Diskrepanz zu verringern bzw. zu nivellieren ist es notwendig, neue, realitätsnahe Prüfprozeduren zu entwickeln.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Prüfprozedur am Beispiel von Wasserzählern erarbeitet, um Durchflussmessgeräte auf Basis empirisch ermittelter Daten repräsentativ, realitätsnah und statistisch gesichert zu prüfen. Diese Prüfprozedur setzt sich aus Prüfprofilen und einer Prüfstandstechnologie zusammen, die die Nachbildung dieser Profile ermöglicht.

Die Erstellung der Prüfprofile erfolgte auf Basis einer Wasserverbrauchsanalyse von 58 Wohngebäuden. Der entwickelte Algorithmus beruht auf einem empirisch ermittelten Vertrauensband, welches auftretende Durchflüsse und ihre jeweilige statistische Häufigkeit aller Datenreihen beinhaltet. Durch die Ziehung von Zufallszahlen über dieses Vertrauensband und der Kombination der ermittelten Durchflüsse mit der jeweiligen mittleren Dauer entsteht ein Prüfprofil. Dieses ist charakterisiert durch Null-Durchflüsse und unterschiedlich hohe Durchflussamplituden, welche innerhalb von $<1\text{ s}$ wechseln können. Die Nachbildung dieser dynamischen Lasten erfordert eine neuartige Prüfstandstechnologie, um diese Charakteristika abzubilden.

Die intermittierende Durchflusserzeugung auf den Prüfständen wird in der vorliegenden Arbeit mittels Kavitationsdüsen durchgeführt. Mit Hilfe dieser Technologie ist es möglich, unterschiedliche Durchflussamplituden innerhalb von $<100\text{ ms}$ reproduzierbar und stabil zu erzeugen. Die in der Arbeit vorgestellten Experimente wurden durchgeführt, um zum Einen die Erzeugung dieser dynamischen Lastwechsel, zum Anderen die Reaktion von Durchflussmessgeräten am Beispiel von Wasserzählern auf die intermittierenden Durchflüsse zu untersuchen.

Das Ergebnis der vorliegenden Arbeit ist eine Prüfprozedur, welche eine erste realitätsnahe Prüfung von Durchflussmessgeräten durchführbar macht. Das entwickelte Prinzip kann ebenfalls bei anderen Fluiden und Durchflussmessgeräten wie bspw. beim Kraftstoffverbrauch am Motor oder der Nutzung von Warm- und Heißwasser Anwendung finden.

Abstract

Using flowmeters in daily life occupies a key position in metrology. Flow measurements that are directly related to our consumption behavior represent a special challenge. However, the test procedures for these flowmeters currently prescribed and used by rules and standards differ tremendously on later use of those devices. In order to reduce this discrepancy, it is necessary to develop new, realistic test procedures.

This dissertation shows how a test procedure is developed by checking flowmeters on the basis of empirically determined data in a representative, realistic and statistically reliable manner. The whole procedure refers to examples of water meters. This test procedure consists of test profiles and a test rig technology enabling the simulation of these profiles. Test profiles were compiled based on a water consumption analysis of 58 residential buildings. The algorithm developed concerns an empirically determined confidence band, which includes the occurring flows and its respective statistical frequency of all data series. To create a test profile it is inevitable drawing random numbers on this confidence band and combining determined flows with its respective average duration. This is characterized by zero flow rates and different high flow amplitudes, which change within <1 s.

The intermittent flow generation on the test rig is carried out by means of cavitation nozzles. Due to this technology, different flow amplitudes within <100 ms can be generated in a reproducible and stable manner. All conducted experiments investigate the generation of these dynamic load changes as well as the reaction of flowmeters to the intermittent flows.

The central result of the present work is a test procedure, which enables first realistic tests of flowmeters. The developed principle can also be applied to other fluids and flowmeters as well, i.g. fuel consumption on motor engines or the use of warm and hot water.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Kurzzeichen		V
Verzeichnis der Symbole		VII
Verzeichnis der Abbildungen		XI
Verzeichnis der Tabellen		XVII
 1 Einleitung		 1
1.1 Problemstellung		1
1.2 Zielsetzung und Schwerpunkte der Arbeit		6
 2 Grundlagen		 7
2.1 Wasserverbrauch		7
2.1.1 Allgemein		7
2.1.2 Erfassung des häuslichen Wasserverbrauchs		10
2.2 Prüfung von Wasserzählern		13
2.2.1 Regeln und Normen		13
2.2.2 Grundlegende technische und metrologische Anforderungen		15
2.2.3 Verfahren zur Prüfung von Durchflussmessgeräten		18
2.2.4 Zusammenfassung zur Prüfung von Wasserzählern		24
2.3 Untersuchungen zum Zähler- und Verbrauchsverhalten		25
2.3.1 Überblick über durchgeführte Untersuchungen zum Zähler- und Verbrauchsverhalten		25
2.3.2 Ermittlung aktueller Wasserverbrauchsdaten - Vorläuferstudie		29
2.3.3 Analyse und Generierung von Wasserverbrauchsprofilen		32
2.3.4 Experimentelle Untersuchungen an Hauswasserzählern		34
 3 Kavitationsdüsen als Prüftechnologie für eine realitätsnahe Prüfung von Durchflussmessgeräten		 39
3.1 Einleitung		39

3.2	Grundlagen der Kavitation	39
3.3	Kavitierende Düsen	41
3.3.1	Funktionsweise	41
3.3.2	Numerische Untersuchungen	46
3.4	Anwendung von Kavitationsdüsen	48
3.4.1	Experimenteller Aufbau	48
3.4.2	Charakterisierung Kavitationsapparatur	50
4	Entwicklung eines Algorithmus zur Erstellung repräsentativer Durchflussprofile	57
4.1	Allgemein	57
4.2	Datenbasis	58
4.3	Transformation und Reduktion	59
4.4	Analyse der Verbrauchsdaten	60
4.4.1	Vorgehensweise und Zielstellung	60
4.4.2	Änderungsraten des Durchflusses	61
4.4.3	Null-Durchflüsse	62
4.4.4	Häufigkeit der Entnahmeereignisse	63
4.4.5	Regressionsanalyse der Datenreihen	66
4.4.6	Dauer der Entnahmeereignisse	68
4.5	Bildung von computergestützten Modellsequenzen	69
4.6	Zusammenfassung	75
5	Validierung des Prüfkongzeptes	77
5.1	Validierung des Algorithmus	77
5.2	Validierung der erarbeiteten Prüfprozedur	80
6	Realitätsnahe Prüfung von Wasserzählern	85
6.1	Allgemein	85
6.2	Versuchsaufbau	85
6.3	Generierung von Prüfprofilen	87
6.4	Ergebnisse der Prüfprofiluntersuchungen	91
6.4.1	Sequenz 1	91
6.4.2	Sequenz 2	96
6.4.3	Sequenz 3	99
6.4.4	Sequenz 4	101

6.5	Zusammenfassung und Diskussion der Profiluntersuchungen . .	105
7	Fazit und Ausblick	109
	Literaturverzeichnis	114
	Anhang	125
A	R-Skripte	127
A.1	Berechnung des C_i -Punktes	127
A.2	Kompressionsfunktion	129
A.3	Sigmoidfunktion	130
B	Detailergebnisse	135
B.1	Objektübersicht	135
B.2	Originäre Datenreihe	136
B.3	Durchflussprofil	136
B.4	Umweltparameter Sequenzuntersuchung	137
B.5	Ausreißertest nach Grubbs	137
B.5.1	Prüfling	137
B.5.2	Düsen	137
	Lebenslauf	139

Verzeichnis der Kurzzeichen

BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
DIN	Deutsches Institut für Normung
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
ECDF	Empirische kumulierte Verteilungsfunktion
EFG	Eichfehlergrenzen
ES	Einstrahlflügelradzähler
EMPIR	European Metrology Programme for Innovation and Research
EVA	Evaluation
EWZP	Experimentier- & Wasserzählerprüfstand
F	Falsch
GTC	Algorithmus „Generating Testprofiles for Calibration“
LDA	Laser-Doppler-Anemometrie
LDV	Laser-Doppler-Velozimetrie
MID	Measuring Instruments Directive
MPE	maximal zulässiger Fehler
MetroWaMet	Metrology for Real-World Domestic Water Metering
MS	Messstrecke
MK-MS	Messkapsel-Mehrstrahl-Flügelradzähler
NE	Nutzungseinheiten
OIML	Organisation Internationale de Métrologie Légale

PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
PIV	Particle Image Velocimetry
REF	Vergleichsgerät
T	Wahr
TZW	Technologiezentrum Wasser
VDDW	Verband der deutschen Wasser- und Wärmezähler Industrie e.V.
VFG	Verkehrsfehlergrenzen
WELMEC	European Cooperation in Legal Metrology
WVU	Wasserversorgungsunternehmen
WG	Arbeitsgruppe

Verzeichnis der Symbole

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	m^2	Querschnittsfläche
α_0	$^\circ$	Gesamtwinkel des Diffusors
α_1	$^\circ$	Gesamtwinkel des Einlass
β		Durchmesserverhältnis
c	$\frac{\text{g}}{\text{l}}$	Stoffmengenkonzentration
C		Durchflusskoeffizient
d	m	Durchmesser des Düsenhalses
D	m	innerer Rohrdurchmesser stromaufwärts
δ	m	Kavitationsgrenzschichtdicke
e_{EFG}	$\%$	Eichfehlergrenze
e	$\%$	Messabweichung
e_{p}	$\%$	Messabweichung Prüfling
$e_{\text{p}_{\text{kor}}}$	$\%$	korrigierte Messabweichung Prüfling
ϵ		Expansionszahl
e_{x}		Extremwerte Boxplot
e_{t}	$\%$	Messabweichung Düsen
f_{D_n}	Hz	Doppler-Frequenz der Einzelmessung
G		Prüfgröße
IQA		Interquartilsabstand

λ	m	Laserlicht-Wellenlänge
m	kg	Masse des Mediums
\dot{m}	$\frac{\text{kg}}{\text{h}}$	Massenstrom
M_0	kg	Masse
M_S	kg	Standardisierte Masse
N, n		Anzahl
Δp	Pa	Wirkdruck
p	Pa	Absoluter Druck
p_a	Pa	Atmosphärendruck
φ	°	halber Schnittwinkel der Laserstrahlen
p_v	Pa	Dampfdruck
P_1	Pa	Absoluter Druck stromaufwärts
P_2	Pa	Absoluter Druck stromabwärts
Q	$\frac{\text{l}}{\text{h}}$	Durchfluss
q_m	$\frac{\text{kg}}{\text{h}}$	Massenstrom
Q_{theo}	$\frac{\text{l}}{\text{h}}$	theoretischer Durchfluss
q_v	$\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$	Volumenstrom
r_i	mm	Düseneinlassradius
ρ_l	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Fluidichte
\tilde{s}		Standardabweichung
t	s	Zeit
ϑ	°C	Temperatur
V	l	Volumen

\dot{V}	$\frac{l}{h}$	Volumendurchfluss
\dot{V}_{max}	$\frac{l}{h}$	maximaler Volumendurchfluss
V_i	l	angezeigtes Volumen
V_a	l	Referenzvolumen
v_a	$\frac{m}{s}$	Strömungsgeschwindigkeit
$x_{0,75}$		oberes Quartil
$x_{0,25}$		unteres Quartil
\tilde{x}		Median
z_o		oberer Whisker
z_u		unterer Whisker

Verzeichnis der Abbildungen

1.1	Entnahmeprofil eines Einfamilienhaus über den Zeitraum von einer Woche unterteilt in einzelne Wochentage.	3
1.2	Wasserentnahmeprofil eines Mehrfamilienhauses über den Zeitraum von 24 Stunden.	4
2.1	Häuslicher Wasserverbrauch in Europa pro Einwohner und Tag, basierend auf den Daten des Statistischen Amts der Europäischen Union 2017. Grau hinterlegte Bereiche kennzeichnen Staaten, für die keine Daten vorliegen.	7
2.2	Mittlerer Wasserverbrauch der Bundesländer im Jahre 2016 (Statistisches Bundesamt, 2016a).	9
2.3	Trinkwasserverwendung im Haushalt 2015 (BDEW, 2017). . . .	10
2.4	Unterscheidung der Messgerätearten nach Messverfahren für den Hauswasserzählerbereich.	11
2.5	Eichfehlergrenzen der metrologischen Klassen gemäß OIML R49-1 (Beispiel einer experimentell ermittelten Fehlerkurve). .	17
2.6	Vereinfachte schematische Darstellung der Prüfverfahren für Durchflussmessgeräte (eigene Darstellung).	21
2.7	Testprofil eines Wasserzählers mit überlagerten Ereignissen von Waschmaschine, Händewaschen, Toilette, Duschen und Badewanne. (Wendt, 2010)	29
2.8	Wasserverbrauchsprognose von verschiedenen Institutionen. Inklusive der jährlichen BDEW-Wasserstatistik. (BDEW, 2017)	30
2.9	Beispielboxplot mit Whiskern und Extremwerten.	31
2.10	Gemessene Messabweichung (e) durch Nachlaufverhalten bei verschiedenen Entnahmedauern (t) und Durchflüssen (Q). (a) Einstrahl-Flügelradzählers $Q_{n1,5}$ (b) Einstrahl-Flügelradzählers $Q_{n2,5}$	37

2.11	Gemessene Messabweichung (e) durch Nachlaufverhalten bei verschiedenen Entnahmedauern (t) und Durchflüssen (Q). (a) - Messkapsel-Mehrstrahl- Flügelradzählers $Q_n1,5$ (b) Messkapsel-Mehrstrahl- Flügelradzählers $Q_n2,5$	37
3.1	Phasendiagramm von Reinstwasser mit C als kritischem Punkt und T_r als Tripelpunkt.	40
3.2	Schematische Darstellung einer Herschel-Venturi-Düse (grauer Bereich) inklusive des schematischen Verlaufs der Druck- und Geschwindigkeitskurven über die Düsengeometrie (Eigene Darstellung).	42
3.3	Schematischer Querschnitt des Düsenhalses bei kritischem Volumenstrom mit Kavitationsgrenzschichtdicke δ (Eigene Darstellung).	42
3.4	Mittels Gleichung 3.2 berechnete theoretische Abhängigkeiten der Düsengeometrie und des Druckes. (a) Theoretischer Durchfluss in Abhängigkeit vom Halsdurchmesser und Eingangsdruck. (b) Schematische Relation zwischen normiertem Durchfluss und absolutem Druckverhältnis mit dem Kavitationseinsatzpunkt c_i von 0,75.	44
3.5	Veränderung des Nachdrucks während des Betriebes einer Kavitationsdüse. Erfassung des Durchflusses mit einem magnetisch-induktiven Durchflussmessgerät.	45
3.6	Schematische Darstellung der getesteten Düsenformen. (a) Eine Venturi-Düse mit toroidalem Halsbereich angelehnt an ISO 9300. Dabei ist d der Halsdurchmesser, r_i der Einlassradius und α_o der Auslass- bzw. Diffusorwinkel. (b) Eine Herschel-Venturi-Düse, mit dem Einlasswinkel (α_i) und Diffusorwinkel (α_o).	47
3.7	Angelehnt an Brinkhorst: „Dimensionsloser Massenstrom vs. Druckverhältnis: ISO 9300 Venturi-Düse - Herschel-Venturi-Düse, vergrößert $P_2/P_{01} = 0,2 - 0,85$ “ (Brinkhorst, 2017).	48

3.8	Kavitationsapparatur der Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) mit sechs installierten Düsen und pneumatischem Verschlussystem. (a) Prüfstand mit I-Pneumatischem Verschlussystem, II-Auslassseite, III-Düsenhalter, IV-Einlassseite. (b) Anordnung der Düsen innerhalb des Prüfstandes.	49
3.9	Normierter Volumenstrom der installierten Düsen gegenüber dem vorherrschenden Druckverhältnis.	51
3.10	Residuen zwischen Messung und angepasster linearer Funktion ($\leq 0,6$) der Düsen gegenüber dem Druckverhältnis.	52
3.11	Temperaturabhängigkeit der Dichte der entnommenen Wasserprobe.	53
3.12	Messabweichung in % der berechneten und gravimetrisch ermittelten Durchflussskombinationen von zwei Düsen, basierend auf den Werten von Tabelle 3.1. (a) Matrixplot. (b) Darstellung der Wertepaare.	55
4.1	Aufteilung der untersuchten Objekte inkl. Anzahl der gemessenen Datenreihen (Martin et al., 2017).	59
4.2	Boxplot der Messzeiten der analysierten Objekte.	59
4.4	Boxplots der Dauer der Null-Durchflüsse für die jeweiligen Nutzungseinheiten. Auszug aus den Datenreihen.	62
4.5	Wahrscheinlichkeitsdichten von 3 Beispieldatenreihen mit einer Glättungsbandbreite von 16,65 l/h.	63
4.6	Kumulierte Verteilungsfunktion der 3 Beispieldatenreihen. . . .	64
4.7	Kumulierte Verteilungsfunktionen aller analysierten Datenreihen mit den Prüfpunkten: Q_1 : 25 l/h, Q_2 : 40 l/h, Q_3 : 4.000 l/h, Q_4 : 5.000 l/h.	65
4.8	Vertrauensband der Messobjekte mit der mittleren Verteilungsfunktion.	65
4.9	Beschreibung der ermittelten Datenreihen durch eine Weibull- und Tangens hyperbolicus-Funktion (Ausschnitt).	67
4.10	Residuen der Funktionsgleichungen zu der mittleren Verteilungsfunktion (Ausschnitt).	67
4.11	Wahrscheinlichkeitsdichten der Dauer der Durchflussereignisse. .	68
4.12	Mittlere Dauer der Durchflussereignisse.	69

4.13	Inversionsmethode bei diskreter Zufallsvariable (Waldmann und Helm, 2016).	70
4.14	Generiertes Durchflussprofil mittels gtc -Funktion.	73
4.15	Wiederholung der gtc -Funktion mit n=18 Durchflusspunkten und Darstellung der generierten Profile.	74
4.16	Programmablauf zur Erstellung stochastisch gesicherter Prüfprofile. GTC: Algorithmus „Generating Testprofiles for Calibration“ ECDF: Empirische kumulierte Verteilungsfunktion EVA: Evaluation T: Wahr F: Falsch	76
5.1	Evaluation der kumulierten Verteilung der Prüfprofile aus Abbildung 4.15.	77
5.2	Durch Simulation ermittelte mittlere Ausfallrate der Stichprobengröße.	78
5.3	Durch Simulation ermittelter Betrag der prozentualen Über- oder Unterschreitung des kumulierten Bandes.	79
5.4	Vereinfachter schematischer Aufbau des Experimentier- & Wasserzählerprüfstand (EWZP) mit LDV-Messung und Durchflussmessgerät.	81
5.5	Untersuchte Modellsequenz 1. Aufsteigendes Treppenprofil. . .	82
5.6	Durchflussverlauf des berechneten Volumenstroms mittels LDV-Messung.	83
5.7	Detaildurchflussverlauf der Abbildung 5.6 inklusive Soll-Durchfluss (rot). Links Schaltvorgang von Düsenkombination 56 auf 54 und rechts von Kombination 50 auf 46.	83
6.1	Vereinfachter schematischer Aufbau des EWZP mit Kavitationsdüsenapparatur und Prüfling.	86
6.2	Untersuchte Modellsequenzen 2. Absteigendes Treppenprofil. .	87
6.3	Untersuchte Modellsequenz 3. Beispielsequenz eines technischen Endverbrauchers.	89
6.4	Originäre Datenreihe (oben) mit Detailausschnitt (Mitte), welcher als Grundlage für Sequenz 4 (unten) dient.	90

6.5	Messabweichung des Volumens des Prüflings (e_{p_i}) zum theoretischen Volumen bei den einzelnen Düsenkombinationen der Sequenz 1 über der mittleren Durchflussamplitude der Kombination.	93
6.6	Gemessener Durchfluss des Prüflings und der theoretische durch Düsenkombination generierte Durchfluss bei Sequenz 1 inklusive der Düsenkombinationen über die Messzeit bei Wiederholung 1.	94
6.7	Residuen zwischen durch den Prüfling gemessenen und theoretischen Volumenstrom über die Messzeit der Sequenz 1 bei Wiederholung 1.	95
6.8	Exemplarische Detaildarstellung der Residuen von Düsenkombination 56 und 50 der Sequenz 1, Wiederholung 1.	95
6.9	Messabweichung des Volumens des Prüflings (e_{p_i}) zum theoretischen Volumen bei den einzelnen Düsenkombinationen der Sequenz 2 über der mittleren Durchflussamplitude der Kombination.	97
6.10	Gemessener Durchfluss des Prüflings und der theoretische durch Düsenkombination generierte Durchfluss bei Sequenz 2 inklusive der Düsenkombinationen über die Messzeit bei Wiederholung 1.	97
6.11	Residuen zwischen durch den Prüfling gemessenen und theoretischen Volumenstrom über die Messzeit der Sequenz 2 bei Wiederholung 1.	98
6.12	Exemplarische Detaildarstellung der Residuen von Düsenkombination 29 und 50 der Sequenz 2, Wiederholung 1.	98
6.13	Gemessener Durchfluss des Prüflings und der theoretische durch Düsenkombination generierte Durchfluss bei Sequenz 3 inklusive der Düsenkombinationen über die Messzeit bei Wdh. 1.	100
6.14	Residuen zwischen durch den Prüfling gemessenen und theoretischen Volumenstrom über die Messzeit der Sequenz 3 bei Wiederholung 1.	101
6.15	Messabweichung des Volumens des Prüflings (e_{p_i}) zum theoretischen Volumen bei den einzelnen Düsenkombinationen der Sequenz 4 über der mittleren Durchflussamplitude der Kombination.	102

6.16	Gemessener Durchfluss des Prüflings und der theoretische durch Düsenkombination generierte Durchfluss bei Sequenz 4 inklusive der Düsenkombinationen über die Messzeit bei Wiederholung 1.	103
6.17	Residuen zwischen durch den Prüfling gemessenen und theo- retischen Volumenstrom über die Messzeit der Sequenz 4 bei Wdh. 1. Graue Bereiche kennzeichnen Messzeiten mit Null- Durchfluss.	104
6.18	Detaildarstellung der Residuen des Prüflings zum theoretischen Volumenstrom über die Messzeit der Sequenz 4, Wdh. 1.	104
6.19	Alle ermittelten Messabweichungen der Düsenkombinationen für die Sequenzen über die jeweilige Messzeit.	106
6.20	Mittlere Messabweichungen der untersuchten Sequenzen mit Breite der Streuung als Balken.	107

Verzeichnis der Tabellen

2.1	Auszug der Wasserabgabe der öffentlichen Wasserversorgung in Deutschland an Endverbraucher (Statistisches Bundesamt, 2016b).	8
2.2	Durchflussraten und Messbereich von Wasserzählern (OIML R49-1,2,3:2013 , E).	15
2.3	Übersicht der Unterscheidungsmerkmale von Zählern, abhängig von ihrem Einsatzbereich.	16
2.4	Übersicht der getesteten Zähler mit MK - Messkapsel, ES - Einstrahlzähler, MS - Mehrstrahlzähler, RK - Ringkolbenzähler.	36
3.1	Ergebnisse der Einzelmessung der Kavitationsdüsen bei $\bar{P}_1 = 403 \pm 0,4 \text{ kPa}$ und $\bar{T} = 21,02 \pm 0,09^\circ\text{C}$. Die Temperatur ist der Mittelwert aus der Temperatur vor (T_1) und nach dem Prüfling (T_2).	54
4.1	Beispiel für eine komprimierte Datenreihe der Tabelle aus Anhang B.2.	60
4.2	Parameter der Regressionsfunktionen aus Gleichung 4.1 und Gleichung 4.2	66
4.3	Auszug der <code>root</code> -Datentabelle zur Generierung der Pseudozufallszahlen.	72
4.4	Wertetabelle des generierten Prüfprofils erstellt mittels <code>gtc</code> -Funktion.	73
6.1	Auswahl der binären Darstellung von einzelnen Düsenkombinationen.	88
6.2	Verwendete Düsen und korrespondierende Düsenkombinationen für die jeweiligen Sequenzen.	88
6.3	Messabweichungen e der Sequenz 1 gegenüber dem Referenzvolumen V_a	92
6.4	Messabweichungen e der Sequenz 2 gegenüber dem Referenzvolumen V_a	96

6.5	Messabweichungen der Sequenz 3 gegenüber dem Referenzvolumen V_a	99
6.6	Messabweichungen e der Düsenkombination der Sequenz 3 gegenüber dem theoretischen Volumen.	100
6.7	Messabweichungen e der Sequenz 4 gegenüber dem Referenzvolumen V_a	101

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Das wachsende Bedürfnis, umweltbewusst zu konsumieren und zu agieren, wirkt sich nicht nur auf wirtschaftliche Sektoren aus (Scholl et al., 2015), sondern schafft ebenfalls neuartige Ansprüche an die Metrologie. Hierbei nehmen korrekte und zuverlässige Mengen- und Durchflussmessungen von Flüssigkeiten eine wichtige Schlüsselstellung ein. Solche Messungen spielen in nahezu allen Bereichen des täglichen Lebens eine entscheidende Rolle und sind durch eine enorme Vielfalt in den Messbedingungen, Zielstellungen und technischen Realisierungsmöglichkeiten gekennzeichnet.

Eine besondere Herausforderung stellen dabei Durchflussmessungen dar, die in einem direkten Zusammenhang mit unserem Konsumverhalten stehen. So erfordert beispielsweise die korrekte Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs im Auto oder des Trinkwasserverbrauchs im Haushalt Messtechniken, die unter den speziellen Bedingungen ständig wechselnder Durchflüsse und Verbrauchsmengen zuverlässige, abrechnungssichere Messergebnisse liefern müssen.

Eine der weltweit wichtigsten Ressourcen ist das Trinkwasser. Der Umsatz liegt z. B. in Deutschland bei ca. 9,5 Mrd. € (2004). Die Verrechnung zwischen Konsumenten und Versorgungsunternehmen erfolgt mit Hilfe von ca. 48 Millionen im Netz installierten Wasserzählern. Jeder dieser Wasserzähler unterliegt vor seinem Einbau einer individuellen messtechnischen Prüfung, um die Richtigkeit der Zähleranzeigen sicherzustellen. Diese bilden die Grundlage für die entsprechende Rechnungsstellung zum jeweiligen Wasserverbrauch. Dies ist nicht nur in Deutschland, sondern auch in vielen anderen Ländern gesetzlich geregelt.

Die messtechnischen Anforderungen an die Wasserzähler und die zugehörigen Prüfprozeduren sind international festgeschrieben (2014/32/EU:2014-02) und abgestimmt (DIN EN ISO 4064:2014-11). Seit einigen Jahren rückt die

Kritik an den hier hinterlegten Prüfvorschriften in den Fokus. Die Bedingungen für die Prüfung der Wasserzähler unterscheiden sich grundlegend von denen der späteren Anwendung. Es werden in der hier vorliegenden Arbeit Voraussetzungen geschaffen diese Diskrepanz zu überprüfen.

In Abbildung 1.1 und 1.2 sind exemplarisch die Trinkwasserverbrauchsprofile eines Einfamilienhauses und eines Gebäudes mit 16 Nutzungseinheiten (NE) gegenübergestellt. Die Daten stammen aus dem DVGW-Forschungsprojekt von Martin et al. (2017). Rapide Durchflusswechsel mit verschiedenen Entnahmehäufigkeiten und unregelmäßigen Stillstandszeiten sind deutlich erkennbar. Das Profil in Abbildung 1.2 ist darüber hinaus das Ergebnis vieler Überlagerungen von gleichzeitigen Wasserentnahmen durch unterschiedliche Konsumenten. Das Verbrauchsverhalten bei beiden Profilen ist nicht grundsätzlich verschieden, lediglich die Anzahl an Entnahmeereignissen unterscheidet sich.

Gemäß den geltenden Richtlinien des DVGW Arbeitsblattes W 406 (DVGW, 2012) wird für die in Abbildung 1.1 und 1.2 dargestellten Wohnhäuser ein Zähler mit einer Nennbelastung $Q_3=4\text{ m}^3/\text{h}$ R 160 (OIML R49-1,2,3:2013 , E) verwendet, dessen Prüfpunkte bei 25 l/h, 40 l/h, und 4.000 l/h liegen. Die Nennbelastung spiegelt dabei die durchschnittliche Belastung wider, für die der Zähler unter normalen Betriebsbedingungen ausgelegt ist, wobei keine Definition von normalen Bedingungen hinterlegt ist. Die Nennbelastung bzw. Q_3 des eingesetzten Zählers ist zusätzlich in Abbildung 1.2 eingezeichnet. Die Ordinatensachse in Abbildung 1.1 reicht lediglich bis zu einem Viertel des Nenndurchflusses. Beide Grafiken verdeutlichen, dass reale Entnahmeprofile durch eine hohe Dynamik und Verschiedenartigkeit gekennzeichnet sind. Im Gegensatz dazu berücksichtigen die heutzutage angewandten Prüfprozeduren nur wenige standardisierte Messpunkte und werden grundsätzlich bei konstanten Durchfluss durchgeführt. Kritische Bereiche wie der An- und Nachlauf der Zähler werden nicht berücksichtigt.

Diese Diskrepanz zwischen existierenden Regeln und Normen und den real vorherrschenden Bedingungen ist historisch bedingt. Anfänglich wurden die Zähler im Stillstand vor Beginn und nach Beendigung der Messung abgelesen. Durch die technische Weiterentwicklung der Wasserzähler- und Prüfstandstechnologie wurde diese Praxis durch automatisierte Prüfprozeduren ersetzt.

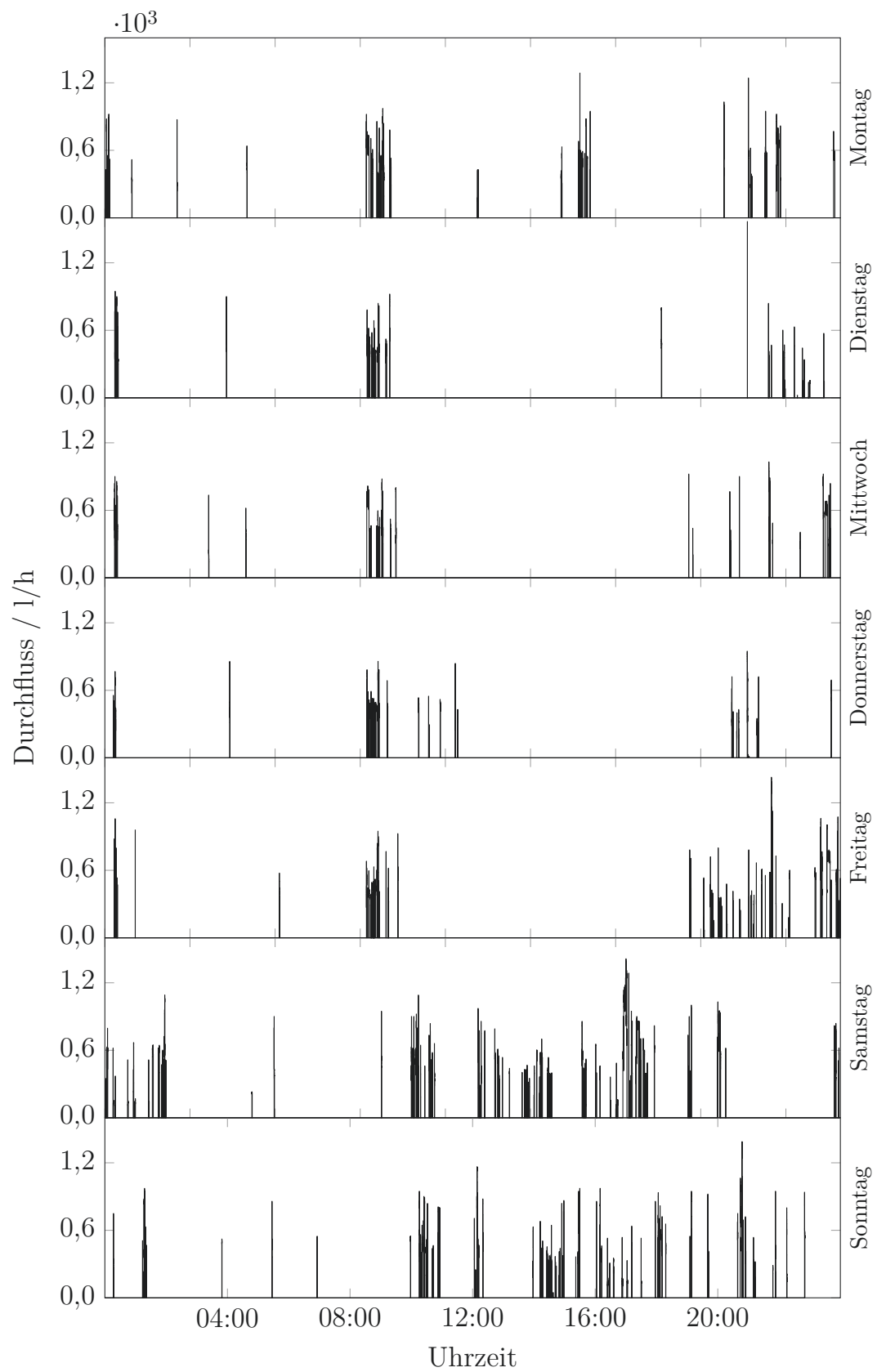


Abbildung 1.1: Entnahmeprofil eines Einfamilienhaus über den Zeitraum von einer Woche unterteilt in einzelne Wochentage.

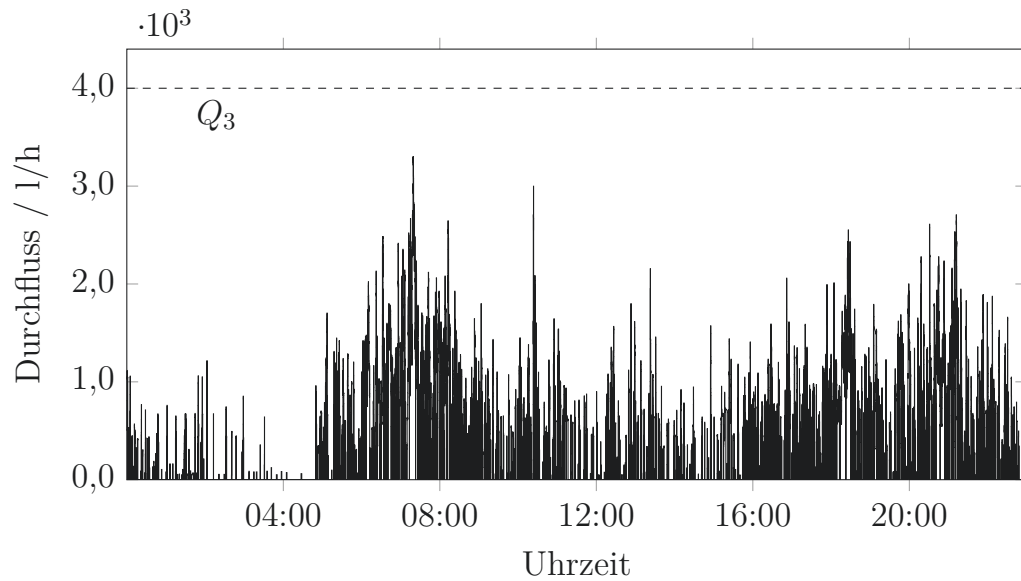


Abbildung 1.2: Wasserentnahmeprofil eines Mehrfamilienhauses über den Zeitraum von 24 Stunden.

Mittels moderner Prüfstände ist man theoretisch in der Lage, dynamische Prüfprozesse für Wasserzähler anzuwenden. Jedoch wird dies zum einen, mangels einheitlicher Basis für die Erstellung reproduzierbarer, realitätsnaher Prüfprofile und zum anderen aufgrund des hohen Maßes an Aufwand, welcher bisher nicht notwendig erschien, nicht angewendet.

Aufgrund des sich ändernden Verbrauchsverhaltens und Bedenken auf europäischer Ebene werden Veränderungen im Prüfprozess von Durchflussmessgeräten notwendig um eine verbrauchsgerechte Abrechnung des entnommenen Trinkwassers zu erreichen. Als Bedenken ist hier konkret der formelle Einwand der Tschechischen Republik gegen die EN ISO 4064 (European Commission, 2016) zu nennen. Dieser Einwand verdeutlicht, dass die Prüfprozeduren für Wasserzähler in den derzeit relevanten existierenden Dokumenten nicht den Bedingungen innerhalb der Verwendungszeit der Zähler entsprechen. Um Voraussetzungen zur Anpassung des Prüfprozesses zu schaffen, sind zwei wesentliche Schritte erforderlich:

1. Die Entwicklung neuartiger Prüfstandstechnologien, die die Prüfung eines Wasserzählers unter veränderlichen, also dynamischen Bedingungen ermöglichen und einen effizienten Durchlauf großer Mengen an Zählern auf Prüfständen gestatten.

2. Belastbare statistische Daten über das tatsächliche Trinkwasserverbrauchsverhalten, um repräsentative, praxisorientierte Prüfbedingungen zu ermitteln.

Beide Bedingungen sind derzeit noch nicht, bzw. nicht in ausreichendem Maße realisiert. Die Anpassung der international harmonisierten Empfehlungen zur Prüfung von Durchflussmessgeräten sind nur auf Basis wissenschaftlich-technischer fundierten und international anerkannten Ergebnissen möglich.

1.2 Zielsetzung und Schwerpunkte der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es, eine Grundlage zu schaffen, um Durchflussmessgeräte realitätsnah, objektiv und reproduzierbar zu prüfen. Die Entwicklung ist notwendig, um den Verbrauch von Flüssigkeiten genau und auf Basis eines vergleichbaren und einheitlichen Testverfahrens ermitteln zu können. Die Entwicklung allgemeingültiger, statistisch gesicherter, objektiver und reproduzierbarer Prüfprozeduren für Durchflussmessgeräte basiert in der hier vorliegenden Arbeit auf empirisch ermittelten Wasserverbräuchen in deutschen Haushalten und kann nach Abschluss der Arbeit auf weitere Durchflussmessgeräte ausgeweitet werden.

Die Erarbeitung der Prüfprozedur und Entwicklung eines entsprechenden Algorithmus am Beispiel von Wasserzählern erfordert die Bearbeitung folgender Fragen:

1. Wie hoch ist der aktuelle Wasserverbrauch in deutschen Haushalten gemessen an der durchgeflossenen Menge an Trinkwasser und der aufgetretenen Häufigkeit der Durchflüsse?
2. Wie lässt sich aus der Analyse des aktuellen Wasserverbrauchs ein Algorithmus ableiten, um statistisch gesicherte, realitätsnahe Prüfprofile zu erzeugen?
3. Wie können die stochastisch erzeugten Prüfprofile unter Laborbedingungen nachgebildet werden, um die Grundlage für eine realitätsnahe Prüfung von Wasserzählern zu schaffen?

Um diese Fragen zu beantworten, wird zunächst in Kapitel 2 der bisherige aktuelle Wissensstand analysiert und der bisherige Stand der Technik aufgearbeitet. Anschließend wird die Technologie zur intermittierenden Durchflusserzeugung mittels Kavitationsdüsen in Kapitel 3 erläutert. In Kapitel 4 wird die Entwicklung eines Algorithmus zur Erstellung statistisch gesicherter Prüfprofile beschrieben. Sowohl die Prüfstandstechnologie als auch der entwickelte Algorithmus werden in Kapitel 5 validiert. Erste Experimente mit intermittierenden Prüfprofilen und handelsüblichen Wasserzählern werden in Kapitel 6 vorgestellt. Anschließend werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst.

2 Grundlagen

2.1 Wasserverbrauch

2.1.1 Allgemein

Der allgemeine Wasserverbrauch auf Haushaltsebene ist ein komplexer Parameter. Es existieren nur vereinzelt Daten über den häuslichen Wasserverbrauch (Abbildung 2.1). Die Angaben schwanken beispielsweise zwischen 12 l/(EW·d) für Albanien und 527 l/(EW·d) für Island (Abbildung 2.1). Die Aktualität der Daten variiert zwischen 2009 und 2015 und sind nach keinem einheitlichen Standard erhoben. Die Diversität innerhalb Europas setzt sich auf nationaler Ebene fort und schlagen sich wahrscheinlich auch in der Verbrauchscharakteristika nieder.

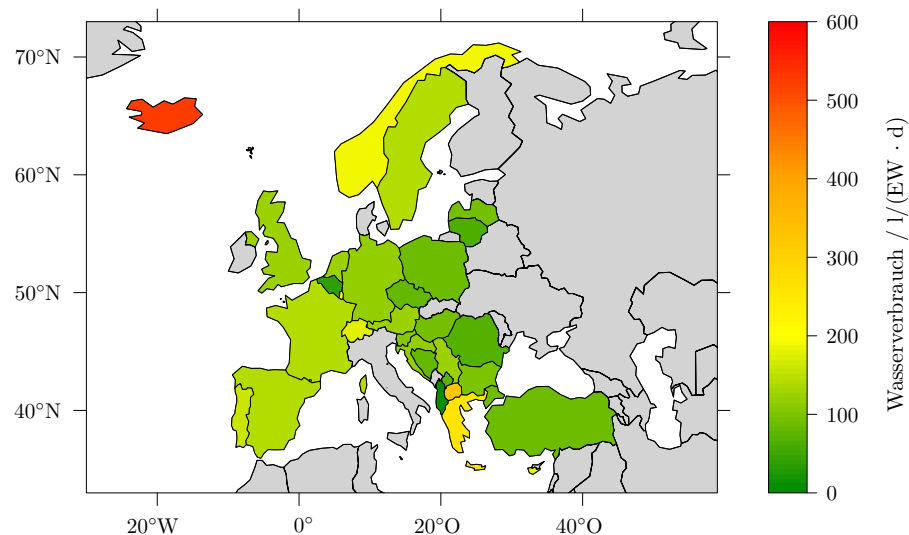


Abbildung 2.1: Häuslicher Wasserverbrauch in Europa pro Einwohner und Tag, basierend auf den Daten des Statistischen Amts der Europäischen Union 2017. Grau hinterlegte Bereiche kennzeichnen Staaten, für die keine Daten vorliegen.

Tabelle 2.1: Auszug der Wasserabgabe der öffentlichen Wasserversorgung in Deutschland an Endverbraucher (Statistisches Bundesamt, 2016b).

		1991	2013	2016
Gesamtwasserabgabe	Mio. m ³	5.747,9	4.467,7	4.639,0
Haushalt und Kleingewerbe	Mio. m ³	4.127,8	3.540,5	3.675,5
Tagesverbrauch pro Person	<i>l</i>	144	121	123

Für Deutschland erhebt das Statistische Bundesamt Daten der nationalen Wasserversorger in regelmäßigen Abständen. Ein Auszug ist in Tabelle 2.1 gezeigt. Seit 1991 ist die Gesamtwasserabgabe der öffentlichen Wasserversorgung um 22 % gesunken. Für Haushalte und Kleingewerbe ist eine Verringerung um 14 % zu verzeichnen. Die Abnahme des personenbezogenen Wasserverbrauchs ist u. a. auf den Einsatz von moderner Technik wie wassersparenden Armaturen und Haushaltsgeräten zurückzuführen. Des Weiteren wirkt sich der demografische Wandel und die Zunahme von Singlehaushalten negativ auf den Wasserverbrauch aus (Tietz, 2006). Im industriellen Sektor kam es zur Einsparung durch Wasserrecycling und Mehrfachnutzung. Die Differenz zwischen Gesamtwasserabgabe und Haushalt/Kleingewerbe ergibt sich aus dem Verbrauch von gewerblichen Unternehmen, dem Eigenverbrauch der Wasserwerke, Wasserverlusten und von sonstigen Abnehmern.

Auch auf Bundesebene sind deutliche Unterschiede in der Höhe des Wasserverbrauchs festzustellen (Abbildung 2.2). Hier weist Sachsen mit rund 86 l/d den geringsten Pro-Kopf-Verbrauch auf. Hamburg hingegen verzeichnet den höchsten mit ca. 138 l. Es ist ein deutliches West-Ost-Gefälle erkennbar. Ursache hierfür sind verschiedene Faktoren, die den Wasserverbrauch positiv oder negativ beeinflussen können. Martin et al. (2017) gliedern die Einflussfaktoren in vier Bereiche:

- Sozioökonomischer,
- Infrastruktureller,
- Klimatischer,
- Technologischer Bereich.

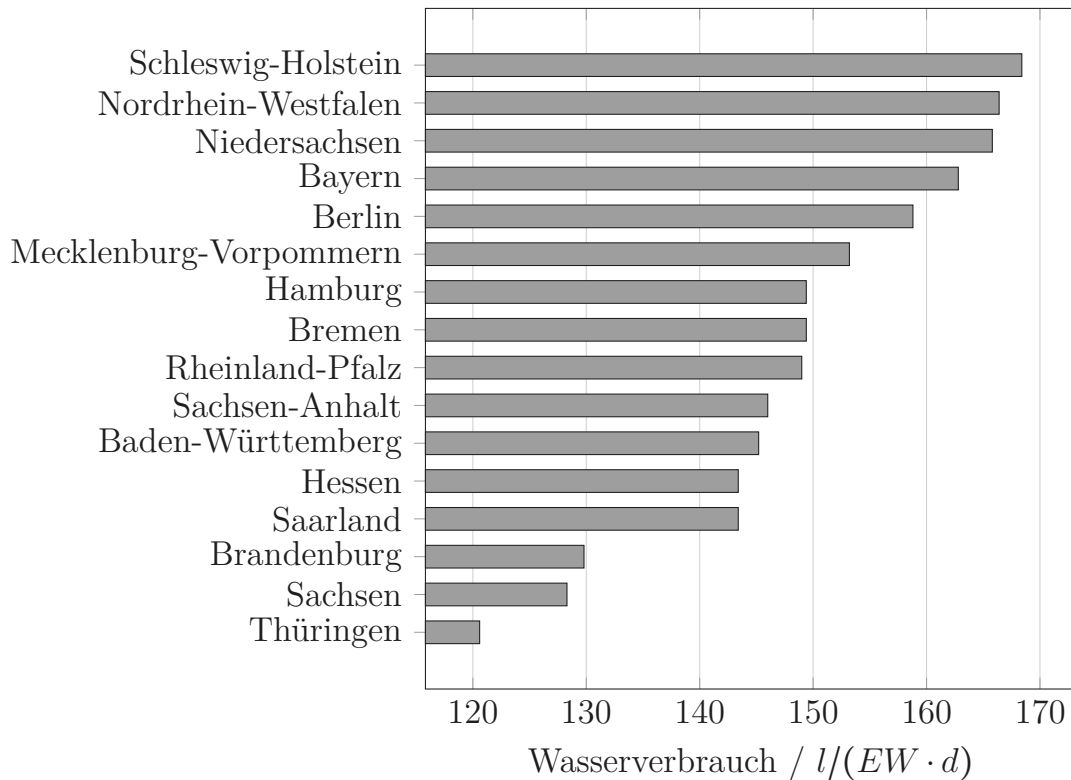


Abbildung 2.2: Mittlerer Wasserverbrauch der Bundesländer im Jahre 2016 (Statistisches Bundesamt, 2016a).

Weitere Informationen zum Wasserverbrauch liefert eine vom Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) durchgeführte Untersuchung aus dem Jahr 2015. Hier wird der Trinkwasserverbrauch eines Haushaltes prozentual in Teilbereiche aufgegliedert (Abbildung 2.3). Die vom BDEW durchgeführte Untersuchung zeigt, dass sich der häusliche Wasserverbrauch in sieben Teile, inklusive Kleingewerbe, gliedern lässt. Der sich daraus zusammensetzende Wasserverbrauch ist folglich für jeden Haushalt individuell. Eine rein statistische Aufteilung oder Generierung einer Wasserverbrauchskurve anhand mittlerer Durchführungsintervalle ist nicht zielführend und für die Messgeräteprüfung nicht anwendbar. Diesen Ansatz verwenden einzelne Modelle zur Generierung von Wasserverbrauchskurven, welche in Kapitel 2.3.3 kurz erläutert werden.

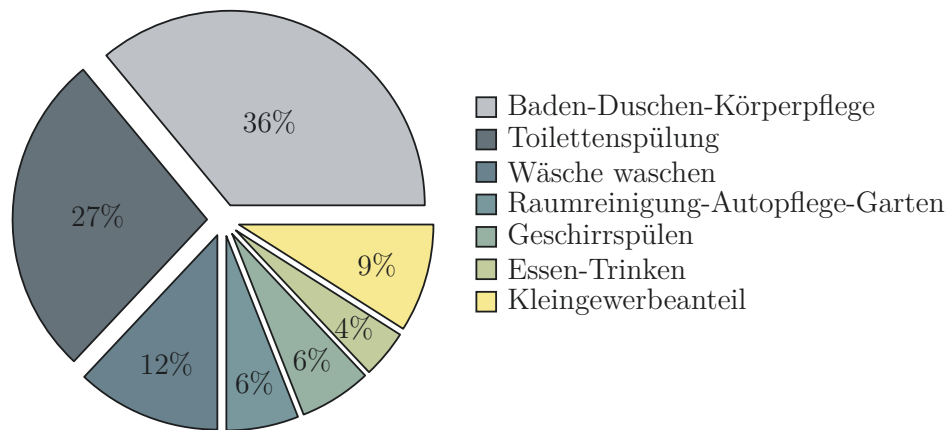


Abbildung 2.3: Trinkwasserverwendung im Haushalt 2015 (BDEW, 2017).

2.1.2 Erfassung des häuslichen Wasserverbrauchs

Der Trinkwasserverbrauch eines Haushaltes wird über das Volumen der entnommenen Wassermenge abgerechnet. Erfasst wird dieses mit Hilfe von Wasserzählern, die als „Geräte zur kontinuierlichen Messung, Speicherung und Anzeige des Volumens des den Messwertaufnehmer durchströmenden Wassers bei Betriebsbedingungen bestimmt sind“ (DIN EN ISO 4064:2014-11). Die Wasserzähler können nach unterschiedlichen Kriterien betrachtet werden:

- Messprinzip,
- Einsatzort und Größe,
- Betriebstemperatur,
- Ausführung.

Auf Haushaltsebene kommen vorwiegend zwei Messprinzipien zur Anwendung: mechanische und berührungslose (Abbildung 2.4).

Im klassischen Sinne der Messtechnik sind mechanische Zähler Messgeräte, die keine Hilfsenergie benötigen. Die Energie des strömenden Wassers wird direkt zur Fortschaltung des Zählwerkes, beispielsweise eines Rollenzählwerk, und/oder zur Speicherung verwendet. Berührungslose Zähler bedürfen einer Hilfsenergie, um das durchströmende Volumen zu messen und zu speichern. Dabei kann die Messung über verschiedene berührungslose Verfahren erfolgen, z. B. mittels Ultraschalllaufzeitmessung oder magnetisch-induktiv.

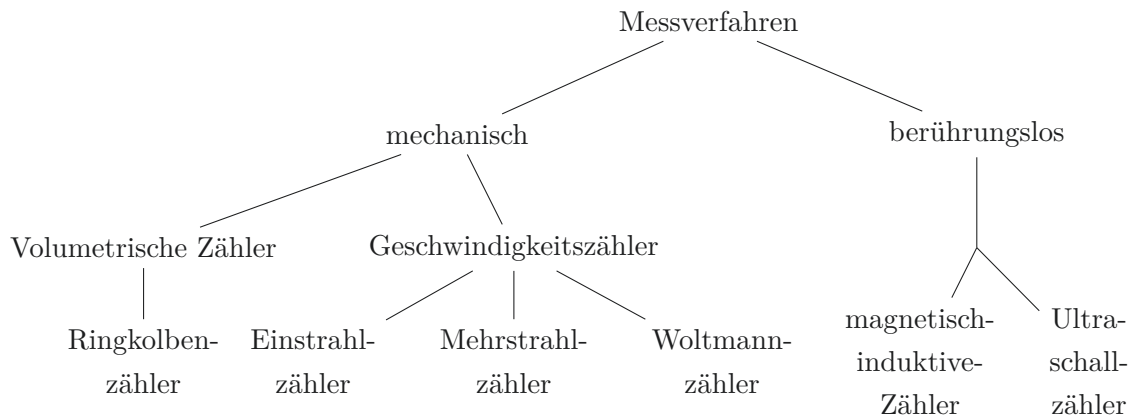


Abbildung 2.4: Unterscheidung der Messgerätearten nach Messverfahren für den Hauswasserzählerbereich.

Ein Großteil der in Deutschland verbauten Wasserzähler sind Ringkolben- sowie Ein- und Mehrstrahl-Flügelradzähler. Nach Klümper (2000) spielen elektronische Messgeräte für die Wassermessung in Gebäuden und Wohnungen, Stand 2000, keine Rolle. Grund dafür war der damals hohe technische Aufwand (Klümper, 2000). Heutzutage (Stand 2019) sind Geräte wie magnetisch-induktive- und Ultraschallwasserzähler aufgrund der sich rapide entwickelnden Technik und der günstigen Herstellungskosten auch in Haushalten und Wohnungen im Einsatz.

Volumetrische Zähler

Jedes Messverfahren besitzt unterschiedliche Eigenschaften. Bei einem Ringkolbenzähler beispielsweise entspricht jede Bewegung des Messelementes (des Kolbens) einem geometrisch genau definierten Volumen. Das volumetrische Messprinzip zeichnet sich durch eine hohe Messempfindlichkeit von wenigen Millilitern und sehr geringe Anlaufwerte aus. Die Anlaufwerte entsprechen dem Mindestdurchfluss, der den Kolben in Bewegung setzt, um die vorherrschenden Reibungskräfte zu überwinden. Diese Art von Zählern besitzt einen hohen Druckverlust (1 - 100 kPa, durchflussabhängig) und sich im Wasser befindliche Partikel können das Messverhalten des Zählers stören. Sind dem Zähler keinerlei Filterelemente vorgeschaltet, können im Wasser befindliche Fest- und Schwebstoffe in die Messkammer gelangen. Bei größeren Partikeln ($> 500 \mu m$), kann dies zu einer Verstopfung und damit zum Stillstand des

Zählers führen. Kleinere Partikel können zwischen das Messelement und die Gehäusekammer geraten, wodurch der Kolben blockiert bzw. das Gehäuse oder der Kolben beschädigt wird. Somit kann es zu Schleichverlusten kommen (Bargheer, 2005; Eff, 2012).

Geschwindigkeitszähler

Mechanische Geschwindigkeitszähler messen die Fließgeschwindigkeit des Wassers, aus der der Durchfluss und das durchflossene Volumen abgeleitet werden. Dabei wird ein Flügelrad durch den Wasserfluss angetrieben. Die Umdrehungen des Flügelrades sind direkt proportional zur Fließgeschwindigkeit des Wassers. Diese Art von Zählern sind robuste Konstruktionen mit guten Anlaufeigenschaften und geringerem Druckabfall. Das bedeutet, dass aufgrund ihrer Konstruktion schon geringe Fließgeschwindigkeiten von einigen Litern pro Stunde ausreichen, um das Flügelrad in Bewegung zu setzen. Demgegenüber steht jedoch eine einseitige Belastung des Flügelrades, was zu einer begrenzten Standfestigkeit führen kann (Eff, 2012).

In Verbindung mit der Verwendung von Flügelradzählern wurde das Nachlaufverhalten der Zähler stark kritisiert (Gendries, 2014; RTL, 2015). Aufgrund der Beschleunigung des Flügelrades durch die sich bewegende Wassersäule während einer Entnahme wird kinetische Energie auf das Flügelrad übertragen. Wird die Entnahme abrupt beendet, bewegt sich das Flügelrad aufgrund seiner kinetischen Energie weiter. Die direkt proportional geschaltete Bewegung überträgt sich auf das Zählwerk und der Zähler misst mehr Wasservolumen, als tatsächlich entnommen wurde. Darüber hinaus benötigt das Flügelrad eine Initialfließgeschwindigkeit, bei welcher der Zähler zu messen beginnt. Herrschen Fließgeschwindigkeiten vor, die kleiner sind als die Anlaufgeschwindigkeit, findet keine Übertragung auf das Zählwerk statt und der Zähler misst zu wenig. Diese Eigenschaften sind generell nicht zu verhindern, sie relativieren sich aber aufgrund von Gleichzeitigkeiten der Entnahmeereignisse. Das liegt daran, dass sowohl eine Verzögerung bei Beginn eines Ereignisses auftritt, als auch ein Nachlauf nach Beendigung des Ereignisses. Es kann jedoch grundsätzlich davon ausgegangen werden, „[...]dass bei üblichen Verbrauchsverhalten und

richtiger Zählerdimensionierung der durch den Nachlauf verursachte Messfehler innerhalb der zulässigen Fehlergrenzen bleibt.“ (Kreuzberg und Wien, 2015).

Berührungslose Messverfahren

Eine immer häufiger vorkommende Form von Messgeräten im häuslichen Bereich sind Zähler, die auf elektronischen Messverfahren wie Ultraschall oder magnetischer Induktion beruhen. Letzteres basiert auf dem Prinzip der Spannungsinduktion in einem Magnetfeld, wobei die induzierte Spannung proportional zur mittleren Strömungsgeschwindigkeit ist. Dieser Zähler benötigt allerdings eine Mindestleitfähigkeit von $20\ \mu\text{S}/\text{cm}$ und einen Mindestdurchfluss, der je nach Hersteller variieren kann (DVGW, 2001b). Durch dieses berührungslose Messverfahren ist der Zähler unempfindlich gegenüber sich im Wasser befindlichen Partikeln und weist einen vernachlässigbaren Druckverlust ($< 10\ \text{kPa}$) auf.

Dies trifft auch auf Ultraschallwasserzähler zu. Der Unterschied liegt jedoch im Messprinzip. Ultraschallwasserzähler basieren auf Differenzmessungen der Schalllaufzeit in der Prüfflüssigkeit. Aus der Laufzeitdifferenz zwischen ausgesendetem und empfangenem Signal können die mittlere Strömungsgeschwindigkeit und der Durchfluss entsprechend ermittelt werden.

2.2 Prüfung von Wasserzählern

2.2.1 Regeln und Normen

Es existiert eine Reihe von nationalen und internationalen Dokumenten, die die Prüfbedingungen und Anforderungen an Wasserzähler zur Erfassung des häuslichen Wasserverbrauchs festlegen bzw. empfehlen. Dabei sind Normen als anerkannte Regeln der Technik anzusehen. Die Anwendungspflicht ergibt sich unter anderem aus staatlichen Vorschriften, Verträgen oder anderen Rechtsgrundlagen (Kreuzberg und Wien, 2015). Mit dem Inkrafttreten der Europäischen Messgeräte-richtlinie 2004/22/EG in und der Ersetzung durch

2014/32/EU im Jahr haben sich die gesetzlichen Rahmenbedingungen für Herstellung, Inverkehrbringen und Verwendung von Messgeräten stark verändert (2014/32/EU:2014-02).

Die Einführung und Anwendung der „Measuring Instruments Directive (MID)“ ist geprägt durch die Verringerung staatlicher Eingriffe und die Stärkung der Eigenverantwortung der Hersteller. Mit der Liberalisierung des Zählermarktes wird das Ziel eines europäischen Binnenmarktes und der Aufhebung von Handelshemmnissen verfolgt. Die MID ist technologieunabhängig und legt nur die grundlegenden Anforderungen an Wasserzähler fest (Kreuzberg und Wien, 2015):

- Maximal zulässige Messabweichungen unter vorgegebenen Bedingungen,
- Reaktion auf Einfluss- und Störgrößen,
- Sicherheit gegen Manipulation an Hard- und Software,
- Anwendbarkeit für den jeweiligen Messzweck sowie
- Anzeige der abrechnungsrelevanten Messwerte.

Die MID verweist bezüglich der technischen Anforderungen auf harmonisierte Normen. Für Wasserzähler ist dies die DIN EN ISO 4064 (DIN EN ISO 4064:2014-11) und die vergleichbare Empfehlung OIML R49 (OIML R49-1,2,3:2013 , E). Diese Normen und Empfehlungen sind das Resultat von Bestrebungen, auf internationaler Ebene einheitliche Spezifikationen für Wasserzähler zu schaffen. Beispielhaft werden im Folgenden die Anforderungen innerhalb der OIML R49 näher erläutert. Die harmonisierte Empfehlung besteht aus folgenden Teilen:

Part 1: Metrological and technical requirements,

Part 2: Test methods,

Part 3: Test report format.

2.2.2 Grundlegende technische und metrologische Anforderungen

Teil 1 der R49 definiert grundlegende metrologische und technische Begriffe. Gemäß allgemeiner Definition ist ein Wasserzähler, „[...] ein Instrument zur kontinuierlichen Messung, Speicherung und Anzeige der Wassermenge, die bei Messbedingungen durch den Messumformer fließt[...]“. Der Zähler wird durch vier verschiedene Durchflüsse ($Q_1 - Q_4$) in seinen Betriebsbedingungen charakterisiert. Deren Berechnung nach OIML R49 ist in Tabelle 2.2 aufgeführt (OIML R49-1,2,3:2013 , E).

Tabelle 2.2: Durchflussraten und Messbereich von Wasserzählern (OIML R49-1,2,3:2013 , E).

Symbol	Erläuterung	Berechnung bzw. Auswahl
Q_3	Dauerdurchfluss: - definiert die Zählergröße und kann durch den Hersteller innerhalb einer Normzahlenreihe festgelegt werden	OIML R 49, Teil 1, Abschnitt 4.1.3
Q_4	Überlast-Durchfluss: - höchster Durchfluss, bei welchem der Zähler für kurze Zeit innerhalb der MPE betrieben werden kann	$Q_4 = 1,25 \cdot Q_3$
Q_2	Übergangsdurchfluss: - teilt den Durchflussbereich zwischen Q_3 und Q_1 in einen oberen und unteren Bereich - beide Bereiche sind durch unterschiedliche MPE charakterisiert	$Q_2 = 1,6 \cdot Q_1$
Q_1	Mindestdurchfluss: - geringster Durchfluss, bei dem der Zähler innerhalb der MPE arbeitet	$Q_1 = \frac{Q_3}{R}$
R	Messbereich des Zählers - Verhältnis von Q_3/Q_1	OIML R 49, Teil 1, Abschnitt 4.1.4

Zu den metrologischen Anforderungen zählen unter anderem der Messbereich R eines Zählers, die Genauigkeitsklasse und die maximal zulässigen Fehler (MPE). Diese werden im deutschen Sprachgebrauch auch als Eichfehlergrenzen (EFG) bezeichnet. Die EFG sind somit die maximalen Fehlerwerte, die bei der Bauartzulassung eines Wasserzählers nachzuweisen sind. Während des Einsatzes der Zähler innerhalb der Eichgültigkeitsdauer ist das doppelte der EFG einzuhalten, die sog. Verkehrsfehlergrenzen (VFG).

Es existieren zwei Genauigkeitsklassen mit unterschiedlichen EFG (Abbildung 2.5, Klasse 1 und 2), wobei im Hauswasserbereich grundsätzlich die Klasse 2 verwendet wird. Die dargestellten Fehlergrenzen gelten für Temperaturbereiche zwischen $0,1^\circ\text{C}$ und 30°C und beziehen sich im deutschsprachigen Raum auf Kaltwasserzähler. Kaltwasserzähler müssen, wie in Tabelle 2.3 aufgeführt, Eichfehlergrenzen von $\pm 5\%$ im unteren ($< Q_2$) und $\pm 2\%$ im oberen Belastungsbereich einhalten. Die dargestellte Fehlerkurve eines Wasserzählers dient hier lediglich als Beispiel. Dieser Kurvenverlauf tritt hauptsächlich bei mechanischen Zählern auf und ist durch den technischen Aufbau bedingt.

Tabelle 2.3: Übersicht der Unterscheidungsmerkmale von Zählern, abhängig von ihrem Einsatzbereich.

Zählertyp	Temperaturbereich	Eichfehlergrenzen	Eichfristen
	$\vartheta / ^\circ\text{C}$	$e_{\text{EFG}} / \%$	
Kaltwasserzähler	4 – 30	$\pm 5, \pm 2$	6 Jahre
Warmwasserzähler	30 – 90	$\pm 5, \pm 3$	5 Jahre
Heißwasser- bzw. Wärmezähler	$> 90^\circ\text{C}$		5 Jahre

Wird ein Zähler von einem Messgerätehersteller in Verkehr gebracht, muss dieser eine Konformitätsbewertung und Bauartzulassung erhalten. Die formalen und messtechnischen Anforderungen hierfür sind in der DIN EN ISO 4064 bzw. der OIML R49 enthalten. Neben den allgemein aufgeführten Testbedingungen (Temperatur, Druck, ...) der einzelnen Zählertypen und Bauteile, liegt der Fokus dieser Norm auf den Testprozeduren zur Überprüfung der Einhaltung der EFG für die Prüfdurchflüsse.

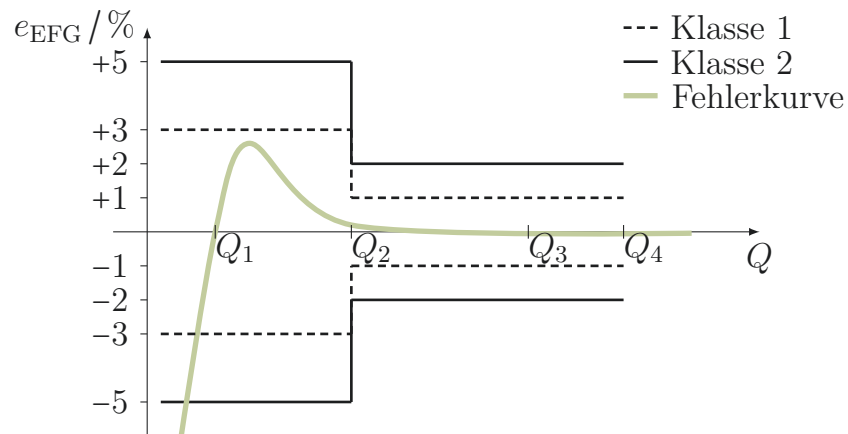


Abbildung 2.5: Eichfehlergrenzen der metrologischen Klassen gemäß OIML R49-1 (Beispiel einer experimentell ermittelten Fehlerkurve).

Zur Bestimmung der Messabweichungen und somit zur Beurteilung der Einhaltung von EFG eines Zählers wird der Quotient aus der Differenz von angezeigtem Volumen (V_i) und Referenzvolumen (V_a) zu V_a bestimmt und durch

$$e = \frac{(V_i - V_a)}{V_a} \cdot 100 \% \quad (2.1)$$

berechnet. Das Referenzvolumen wird hierbei durch ein geeignetes Normal ermittelt (Kapitel 2.2.3).

Während der Typprüfung ist sicherzustellen, dass der Zähler bei den nachfolgenden Durchflüssen die maximal zulässigen Fehler einhält (OIML R49-1,2,3:2013, E):

- a) Q_1 ,
- b) Q_2 ,
- c) $0,35 \cdot (Q_2 + Q_3)$,
- d) $0,7 \cdot (Q_2 + Q_3)$,
- e) Q_3 ,
- f) Q_4 .

Die ermittelten Messabweichungen bei den aufgeführten Prüfpunkten dürfen die EFG der jeweiligen Klasse nicht überschreiten. Um die Messrichtigkeit eines Zählers zu bestimmen, muss der Durchfluss „während der ganzen Prüfung mit gleichbleibendem, gewähltem Wert aufrechterhalten werden“ (OIML R49-1,2,3:2013 , E). Eine Schwankung des Durchflusses ist innerhalb der aufgeführten Grenzen zulässig:

- $\pm 2,5\%$ von Q_1 bis Q_2 ,
- $\pm 5,0\%$ von Q_2 bis Q_4 .

Ausschließlich bei der Typprüfung einer Bauart werden einmalig die Prüfpunkte (a - f) geprüft. Alle späteren Prüfungen erfolgen lediglich bei Q_1 , Q_2 und Q_3 . Die realen Einsatzbedingungen der Zähler variieren, wie bereits ausgeführt, stark gegenüber diesem starren statischen Prüfverfahren.

Es existieren aktuell (Stand Juli 2017) Bestrebungen bei internationalen Gremien wie der WELMEC WG13, diese nicht realitätsnahen Prüfungen von Wasserzählern hinsichtlich ihrer Angemessenheit zu überprüfen. Grundlage hierfür ist der formelle Einwand der Tschechischen Republik gegen die EN ISO 4064. Die Tschechische Republik verdeutlicht, dass die Prüfprozeduren für Wasserzähler in den derzeit relevanten existierenden Dokumenten nicht den Bedingungen innerhalb der Verwendungszeit der Zähler entsprechen. Es besteht das Risiko, dass Wasserzähler, die z. B. in Wohngebäuden eingesetzt werden, unter realen Bedingungen erheblich größere Messabweichungen aufweisen können als unter den vorgeschriebenen Prüfverfahren.

2.2.3 Verfahren zur Prüfung von Durchflussmessgeräten

Bei der Prüfung von Wasserzählern wird das vom Prüfling gemessene Volumen mit dem durch eine Referenzanlage mit höherer Genauigkeit gemessenen Volumen verglichen und eine Messabweichung bestimmt. Die Referenzanlage bezeichnet hierbei eine Apparatur zur direkten Realisierung der Einheit und kann in Primär- und Sekundärnormal unterschieden werden. Mit einer Referenzanlage ist es möglich, das Referenzvolumen zu bestimmen.

Ob es sich dabei um eine Kalibrierung oder eine Prüfung handelt, hängt vom jeweiligen Einsatzzweck des Messgerätes ab. Eine Kalibrierung ist definiert als „Tätigkeit, die unter festgelegten Bedingungen in einem ersten Schritt eine Beziehung zwischen den durch Normale zur Verfügung gestellten Größenwerten mit ihren Messunsicherheiten und dem entsprechenden Anzeigen mit ihren beigeordneten Messunsicherheiten herstellt und in einem zweiten Schritt diese Information verwendet, um eine Beziehung herzustellen, mit deren Hilfe ein Messergebnis aus einer Anzeige erhalten wird“ (Brinkmann, 2012).

Dies erfolgt mit Hilfe der zugehörigen Kalibrierhierarchie (Deutscher Kalibrierdienst, 1998). Im Fall des Wasserzählers besteht die Prüfung in der Ermittlung der Messabweichung des Gerätes unter durch u. a. in OIML R49-1,2,3:2013 (E) festgelegten Bedingungen. Eine Übersicht über die derzeit gebräuchlichsten Normalmessenanlagen für die Menge und den Durchfluss von Flüssigkeiten ist in Mathies und Wendt (2013) aufgeführt.

Die Bestimmung des Wasservolumens und die daraus resultierende Durchflussermittlung ist keine direkte Messung. Vielmehr ist es eine Kombination aus der Messung verschiedener Eingangsgrößen wie z. B. Masse, Temperatur, Dichte und Zeit. Wie in Pöschel (2001) geschildert, erfolgt diese „[...] elementweise Rückführung [...] durch den Vergleich mit einzelnen Normalgeräten und Messmitteln mit höheren Normalen der entsprechenden Maßeinheit“. Eine Übersicht der Rückführung ist unter Wendt et al. (2009) dargestellt. Je nach Anforderungsgrad an die Genauigkeit des Messgerätes kann dies durch Abschätzung von Erfahrungswerten oder experimentellen Messungen erfolgen (Baker, 1990). Die Messung des Durchflusses wird durch die Ableitung eines Massen- oder Volumenstroms über die Zeit bestimmt. Dabei wird ermittelt, wie lange das Fluid braucht, um durch den Messwertgeber zu fließen. Die Berechnung des Massenstroms q_m erfolgt durch

$$q_m = \dot{m} = \frac{dm}{dt}. \quad (2.2)$$

Wird zusätzlich die Fluidichte des Prüfmediums bestimmt, kann von einem Massen- in einen Volumenstrom anhand

$$\dot{m} = \rho_l \cdot \dot{V}, \quad (2.3)$$

$$Q = \dot{V} = \frac{dV}{dt} = v_A \cdot A \quad (2.4)$$

mit:

- ρ_l : Dichte des Mediums,
- \dot{V} : Volumenstrom,
- v_A : Strömungsgeschwindigkeit,
- A : Querschnittsfläche,

umgerechnet werden. Zusätzlich hängt der Volumenstrom mit der Strömungsgeschwindigkeit v_A und Querschnittsfläche A zusammen.

Die experimentelle Bestimmung auf nationaler und internationaler Ebene kann grundsätzlich in

- Gravimetrische Normalmesseinrichtungen,
- Volumetrische Normalmesseinrichtungen und
- Referenzzähler unterteilt werden.

Eine vereinfachte schematische Darstellung ist in Abbildung 2.6 aufgezeigt. Die Prüfverfahren werden im weiteren Verlauf näher erläutert.

Gravimetrische Normalmesseinrichtung

Die häufigste Form des Prüfverfahrens ist die Nutzung eines gravimetrischen Normals. Dabei wird das Fluid aus einem Hochbehälter oder mittels Pumpen aus einem Vorratsbehälter durch den Prüfling geleitet. Anschließend wird das Wasser innerhalb eines Tanks gesammelt, welcher sich auf einer Wägeeinrichtung befindet. Zum Startzeitpunkt der Messung wird das Fluid über eine Umschalteneinrichtung in den Wägebehälter geleitet. Ist die erforderliche bzw. geforderte Flüssigkeitsmenge am Ende der Messung im Tank, wird der Flüssigkeitsstrom wieder in den Vorratsbehälter umgelenkt.

Die Ermittlung der Masse kann statisch oder dynamisch erfolgen. Durch Erfassung des Waagenanfangs- (Tara) und Waagenendwertes wird die reale

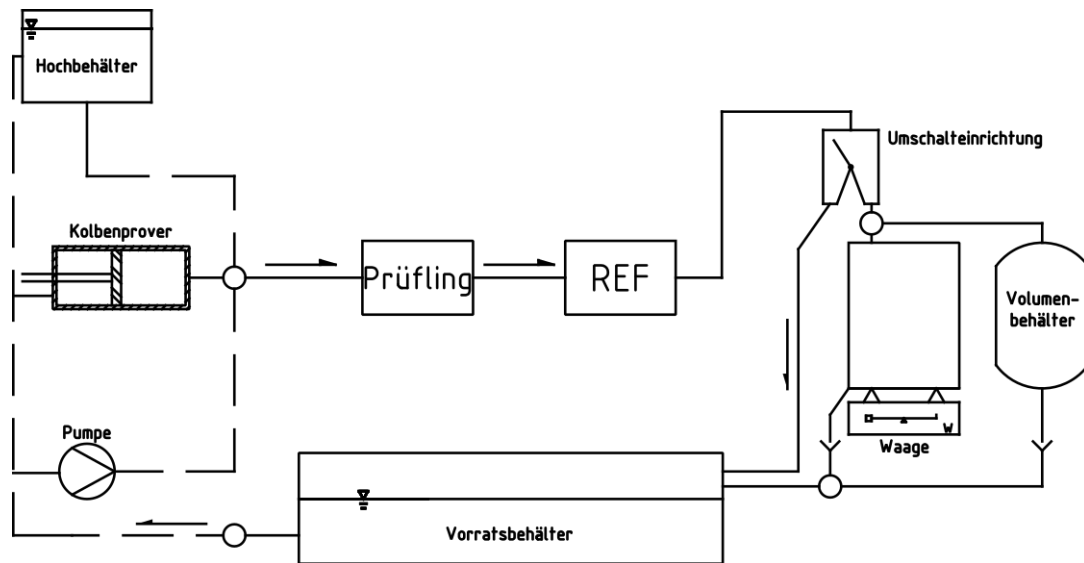


Abbildung 2.6: Vereinfachte schematische Darstellung der Prüfverfahren für Durchflussmessgeräte (eigene Darstellung).

Masse des sich im Wägebühler befindlichen Fluids bestimmt. Der Quotient aus der realen Masse und der Messzeit resultiert in den wahren Massenstrom. Bei dieser Berechnung werden verschiedene Korrekturen wie:

- die Verdunstung während der Messung,
- die Auftriebskorrektur des Wägebühlers und
- der Zeitfehler, verursacht durch die Umschaltvorrichtung

berücksichtigt. Bei dynamischen Wägebühlerverfahren wird der Messwert während der Befüllung kontinuierlich erfasst. Die Haupteinflussfaktoren der statischen Messungen sind durch die Umschaltvorrichtung bestimmt, wobei die dynamische Messung von der Übertragungsgeschwindigkeit des Wägewertes und der Empfindlichkeit der Waage abhängt. Darüber hinaus gibt es bei diesem Verfahren zwei Prüfarten: den stehenden und fliegenden Start-Stopp (Baker, 1990; Miller, 1996; Spitzer, 1996).

Volumetrische Normalmesseinrichtung

Die volumetrischen Normalmesseinrichtungen unterscheiden sich von den gravimetrischen Normalmesseinrichtungen in dem Punkt, dass als Normal ein defi-

nierter Volumenbehälter und keine Waage eingesetzt wird. Hierbei werden traditionell statische Methoden eingesetzt, da sie eine höhere Genauigkeit aufweisen. Das Verfahren zählt zu den ersten und einfachsten Methoden, Durchflussmengenmessgeräte wie z. B. Wasserzähler zu kalibrieren (Baker, 1990; Miller, 1996).

Die Messung der Flüssigkeitsmenge erfolgt hierbei durch das Ablesen des Anfangsniveau einer am Volumenmessgerät installierten Skala. Anschließend wird der Flüssigkeitsstrom durch eine Umschalteneinrichtung umgeleitet und die Füllung des Volumenbehälters beginnt. Erreicht der Füllstand das oberste Niveau, wird das Befüllen beendet. Anschließend wird das abgelesene Volumen mit dem angezeigten Volumen des Prüflings verglichen. Dabei werden systematische Messabweichungen laut DIN EN ISO 8316 korrigiert.

Als weiteres volumetrisches Messprinzip gilt der Kolbenprover. Er funktioniert nach dem Prinzip der Verdrängung von Flüssigkeit aus einem definierten Zylinder. Die Kolbenposition und die Messzeit werden während des Verdrängungsvorgangs durch Sensoren detektiert. Anhand eines getriggerten Start- und Stoppsignals werden die Impulse des Prüflings und die aktuelle Position des Kolbens erfasst. Das verdrängte Volumen wird mit dem angezeigten Volumen des Prüflings verglichen und die Messabweichung bestimmt (Baker, 1990; Miller, 1996).

Referenzzähler

Eine effektive Methode, Durchflussmessgeräte zu prüfen, ist der Einsatz von Referenzzählern (REF). Der Referenzzähler wird vor dem Vergleich mit dem Prüfling auf einem Primärnormal kalibriert und kann dann als Sekundärnormal eingesetzt werden. Ähnlich zu den vorher beschriebenen Verfahren wird die Anzeige des Referenzzählers mit der des Prüflings verglichen und so die Messgenauigkeit bestimmt (PTB, 1984). Es muss jedoch gewährleistet werden, dass Prüfling und Referenzzähler sich nicht gegenseitig beeinflussen, z. B. durch Pulsation, Drall oder Turbulenz. Referenzzähler müssen in geeigneten zeitlichen Abständen rekaliert werden (Baker, 1990; Miller, 1996; Spitzer, 1996).

Sonstige

Neben den vorangegangenen genannten Verfahren existieren weitere zur Prüfung von Durchflussmessgeräten, die an dieser Stelle kurz erläutert werden. Es können u. a. Druckverlustmessungen oder für höhere Durchflüsse $\geq 4000 \text{ m}^3/\text{h}$, sogenannte Tracer eingesetzt werden. Diese können Farbstoffe, Salze, Lösungen oder radioaktive Partikel sein.

Zwar nicht als Normal genutzte Verfahren, aber zur Überprüfung des Volumens und des Durchflusses, werden immer häufiger die Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) bzw. die Laser-Doppler-Velozimetrie (LDV) eingesetzt. Diese optischen Messverfahren nutzen den Dopplereffekt. Dabei wird ein Laser als Lichtquelle genutzt, der einen kohärenten monochromatischen Strahl erzeugt und punktuelle Messungen der Geschwindigkeit von im Wasser befindlichen Partikeln erlaubt. Der Laserstrahl wird geteilt und an einem gewünschten Punkt im Rohrquerschnitt refokussiert. In der Schnittstelle entsteht ein Interferenzstreifenmuster (Müller et al., 2007). Passieren im Fluid befindliche Partikel (Luftblasen, Streuteilchen oder andere Inhomogenitäten) das Messvolumen (sog. Burst), streut das Licht in diesem Hell-Dunkel-Muster und moduliert. Die detektierte Frequenz ist proportional zur Partikelgeschwindigkeit im Messpunkt (Wendt, 2011). Wiederholt man diese Ein-Punkt-Messung über den Rohrquerschnitt, kann ein Geschwindigkeitsprofil des Fluids aufgezeichnet werden.

Eine weitere Möglichkeit Durchflussmessgeräte zu prüfen, ist die Particle Image Velocimetry (PIV). Sie hat im Gegenteil zum LDV den Vorteil einer hohen räumlichen Auflösung und der gleichzeitigen Bestimmung aller drei Geschwindigkeitsrichtungen (Eichler et al., 2014). LDV- und PIV-Systeme werden hauptsächlich zur Bestimmung eines Geschwindigkeitsprofils in einem Rohrquerschnitt eingesetzt. Da die Messungen sehr zeitintensiv sind und die Ausstattung kostenintensiv ist, sind sie in der industriellen Praxis und der Haustechnik bisher wenig verbreitet.

2.2.4 Zusammenfassung zur Prüfung von Wasserzählern

Abschließend werden die wichtigsten Punkte der Prüfung von Wasserzählern noch einmal zusammengefasst. Die grundlegende internationale Norm ist die „Measurement Instrument Directive“ (2014/32/EU:2014-02) mit der harmonisierten Norm DIN EN ISO 4064 (DIN EN ISO 4064:2014-11) und der Empfehlung OIML R49 (OIML R49-1,2,3:2013 , E). In ihr sind alle technischen und metrologischen Anforderungen zusammengefasst. Die Prüfung der Wasserzähler an vier verschiedenen statischen Durchflusspunkten (Q_1 - Q_4) ist ein Kernpunkt dieses Dokumentes. Diese Durchflüsse dienen derzeit der Charakterisierung der Wasserzähler und können nach Tabelle 2.2 berechnet werden. Die in der OIML vorgeschriebenen Genauigkeitsklassen werden im deutschsprachigen Raum als Eichfehlergrenzen (EFG) bezeichnet. Diese bestimmen die maximalen Messabweichungen, die bei der Prüfung der Wasserzähler nicht überschritten werden dürfen. Es werden weitere Testbedingungen (Temperatur, Druck, ...) beschrieben, auf die an dieser Stelle nicht weiter eingegangen wird.

Die experimentelle Überprüfung der Wasserzähler, ob sie die jeweiligen EFG einhalten, kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen. Die gebräuchlichste Form der Prüfung ist die mittels einer gravimetrischen oder volumetrischen Normalmesseinrichtung. Dabei wird der Flüssigkeitsstrom durch den Prüfling geleitet und in einem entsprechenden Normal das durchflossene Wasser gesammelt und das Volumen ermittelt. Anschließend wird das durch die Normalmessenanlage ermittelte Volumen mit dem angezeigten Volumen des Wasserzählers verglichen und die Messabweichung bestimmt. Diese muss innerhalb der EFG liegen, damit der Zähler in Verkehr gebracht werden kann.

Alle angeführten Regeln und Normen schreiben die Prüfung der Wasserzähler an konstanten Durchflusspunkten vor. Die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Prüfverfahren haben ebenfalls die exakte Messung des Volumens und des Durchflusses bei konstanten Bedingungen gemein. Lediglich die dynamische Wägung ermöglicht es, Durchflusssequenzen in geeigneter Art und Weise über das kontinuierliche Messsignal der Waage zu bewerten und somit das Verhalten des Zählers bei dynamischen Lastwechseln zu ermitteln.

2.3 Untersuchungen zum Zähler- und Verbrauchsverhalten

2.3.1 Überblick über durchgeführte Untersuchungen zum Zähler- und Verbrauchsverhalten

Die Frage, ob und wie Wasserzähler unter realen Einsatzbedingungen richtig messen, ist kein Phänomen des 21. Jahrhunderts. Bereits in den frühen 1980er Jahren gab es ausführliche Untersuchungen zur Beurteilung von im Netz befindlichen Zählern. Die damalige Eichperiode von acht Jahren und die Eichfehlergrenzen von $\pm 5\%$ bzw. $\pm 2\%$ wurden in Frage gestellt und eine umfassende Untersuchung mit 30.000 Zählern durchgeführt. Grundlage war die Technische Richtlinie W 20 (PTB-Prüfregeln -W20:1982) der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB). Ziel war es, eine Vereinheitlichung der Prüfbedingungen und eine Langzeitbewertung von Kaltwasserzählern zu erhalten, um die Eichfrist der Zähler fundiert neu festzulegen.

Mitte der 1980er Jahre stellte Schulz (1985) fest, dass eine positive Verschiebung der Messabweichung von Eichfehlergrenzen hin zu Verkehrsfehlergrenzen stattfand. Verkehrsfehlergrenzen bezeichnen die maximal zulässigen Messabweichungen des Messgerätes während des Einsatzes innerhalb der Eichfristen (Tabelle 2.3) und betragen für Wasserzähler das Doppelte der EFG. Die ermittelte Messabweichung der Zähler korrelierte nicht mit der Verweilzeit im Netz (Alter des Wasserzählers), sondern mit der durchflossenen Wassermenge. Die Hauptursache der Messabweichung bildeten Ablagerungen innerhalb der Zähler. Diese bestanden hauptsächlich aus eisen- und manganhaltigen Anteilen, welche durch das Trinkwasser in den Zähler gelangten. Dabei hatten größere Zähler weniger Überschreitungen der Fehlergrenzen als kleinere. Jedoch war die Erfassung von kleineren Volumenströmen ($<1,5 \text{ m}^3/\text{h}$) für größere Zähler zur damaligen Zeit kaum bis überhaupt nicht möglich. Die Erkenntnis der Untersuchungen war, dass ein Stichprobenverfahren eingeführt werden sollte, um das Verhalten der Zähler im Netz zu überprüfen, ohne dass alle Zähler nach Ablauf der Eichfrist ausgebaut werden mussten. Es konnte bereits 1985 eine Korrelation zwischen der Wasserchemie und der Messbeständigkeit der Zähler festgestellt werden.

Beyer (1987) stützte sich in seinen Untersuchungen auf die Ergebnisse der W 20 und empfahl die Anhebung der Verkehrsfehlergrenzen auf 15 %. Er stellte ebenfalls fest, um „einen korrekten Nachweis zu bringen, müssten zu dem Einbauort jedes Zählers, [...], die Verbrauchsgewohnheiten festgestellt werden.“ Jedoch ließe sich das nur mit einem erheblichen Mehraufwand bewerkstelligen. Die wesentlichen Einflussgröße auf die Messabweichung wie Ablagerungen in Zählern, Fremdstoffe aus dem Versorgungsnetz und Einflüsse der Bauarten, wurden identifiziert. Im Gegensatz zu Schulz (1985) konnte kein erkennbarer Zusammenhang zwischen Wasserqualität und Verkehrsfehlergrenzenüberschreitung für das in diesem Fall sehr eingeschränkte Untersuchungsgebiet der Berliner Wasserbetriebe (BWB) festgestellt werden.

Ebenfalls in den 70er- und 80er-Jahren des 20. Jahrhunderts wurde eine umfangreiche Untersuchung des DVGW zur Ermittlung des Wasserbedarfs in der Bundesrepublik Deutschland durchgeführt (Fachausschuss DVGW, 1987). Ziel dieser Untersuchung war es, auf Grundlage der Messergebnisse des Wasserverbrauchs Bemessungsrichtlinien für die Dimensionierung von Rohrleitungen, Armaturen und Messgeräten zu erarbeiten. In einem Zeitraum von 10 Jahren wurden 85 Messobjekte mit bis zu 450 Bewohnern gemessen und analysiert. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Der Wasserverbrauch hängt weitgehend von der Anwesenheit von Menschen ab.
- Es existiert ein hyperbolischer Zusammenhang zwischen dem Spitzenwasserverbrauch und dem statistisch berechneten Wert „Einwohner pro Wohneinheit“.
- Der Ausstattungsgrad einer Wohnung hat Einfluss auf den Gesamtwasserverbrauch, aber nicht auf den Spitzenwasserverbrauch.
- Eine Dimensionierung der Anschlussleitung nach Anzahl der Wohneinheiten (2,5 Einwohner pro Wohneinheit) ist sinnvoll.
- Spitzenbelastungen betragen im Mittel nicht länger als 10 s/d.

Die Ergebnisse dieser Studie sind nachfolgend in diverse Regelwerke wie der DIN 1988, Teil 3, welche im Jahr 2006 durch die DIN EN 806-3:2006-07 (DIN

EN 806-3:2006-07) ersetzt wurde, sowie in die einschlägigen Regelwerke DVGW W 400-1 (DVGW, 2001a), W 406 (DVGW, 2012) und W 410 (DVGW, 2018) eingeflossen.

Die exakte Messung und damit auch Auslegung des Wasserzählers spielte in den folgenden Jahrzehnten eine entscheidende Rolle in der Wasserversorgung. Schachner (1995) z. B. belegte, dass es bei der Auslegung von Zählern nicht nur um die Sicherstellung der Versorgungssicherheit, sondern auch um die Detektierung von Leckagen oder Wasserverlusten geht. Diese verursachen in Summe einen erheblichen monetären Schaden, der durch Umlage auf die Wasserentgelte durch alle Verbraucher zu tragen ist. Durch zeitlich aufgelöste Messungen konnte ebenfalls festgestellt werden, dass der höchste Prozentsatz der Entnahmen im unteren Lastbereich des Zählers stattfand, d. h. weit unterhalb seines eigentlichen Dauerdurchflusses. Aus diesem Grund wurde der Einsatz von Zählern mit großem Messbereich empfohlen.

Mit Beginn des 21. Jahrhunderts wurden vermehrt Untersuchungen zu den Auswirkungen von Vorstörungen wie z. B. Rohrkrümmern, Verengungen etc. auf das Messverhalten von Wasserzählern untersucht. Adunka (Adunka, 2000; Adunka und Kolaczia, 1984), der diese Untersuchungen vor allem bei Warmwasser- bzw. Wärmezählern durchführte stellte fest, dass insbesondere bei Geschwindigkeitszählern eine Beeinflussung der Messgenauigkeit durch gestörte Strömungsprofile auftritt. Diese Untersuchungen gelten nicht nur für den Warmwasserbereich, sondern auch für den Kaltwasserbereich. Für den Bereich des Warmwassers wurde frühzeitig erkannt, dass Zähler wider den Praxisbedingungen kalibriert wurden (Adunka, 2006). Daraufhin wurden sog. Vorstörungsklassen eingeführt (OIML R49-1,2,3:2013 , E).

Ein weiterer Kritikpunkt an den zum damaligen Zeitpunkt (2000) bestehenden Regeln und Normen war die Dimensionierung und Empfehlungen des Einsatzes von Zählergrößen in spezifischen Gebäudegrößen. Hofmann (2005) monierte den Einsatz von überdimensionierten Zählern in Wohngebäuden aufgrund der höheren Grundpreise für die Zähler. Es wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt (Hofmann, 2005, 2006, 2008, 2009) und vereinzelt belegt, dass der zur Grundlage genommene Spitzendurchfluss an nur wenigen Tagen auftritt und die Dimensionierung eher anhand des Verbrauchsverhaltens durchgeführt werden sollte. Dabei sollte der Hauswasserzähler so klein wie möglich ausgelegt

werden, um auch Minder- bzw. Schleichmengen zu detektieren. Hofmann (2005) bestätigte ebenfalls die Ergebnisse von Schachner (1995), die bewiesen dass der überwiegende Betrieb eines Zählers im unteren Lastbereich stattfindet. Werden überdimensionierte Zähler in den Gebäudeanschlüssen verwendet, kommt es nachweislich bei intermittierendem Betrieb zu erhöhten Messabweichungen, die durch Nachlauf der Zähler begründet sind. Der Nachlauf tritt dabei nicht nur bei Stillständen auf, sondern auch bei Verringerung der Durchflüsse. Die Thematik der Zählerdimensionierung griff auch Stefanski (2013) in seiner Veröffentlichung auf und kam zu dem Schluss, dass die Ergebnisse des DVGW-Projektes aus den 1980er-Jahren die bis dato beste Datengrundlage zur Dimensionierung von Wasserzählern sind.

In einem von 2008 bis 2010 durchgeführten Forschungsprojekt von der PTB und dem Verband der deutschen Wasser- und Wärmezähler Industrie e.V. (VDDW) wurde die Frage nach dem „richtigen“ Einsatz von mechanischen Großwasserzählern bearbeitet. Hier wurde erstmals „das Problem des so genannten dynamischen Verhaltens mechanischer Wasserzähler in den allgemeinen Zusammenhang mit den realen Bedingungen“ (Wendt et al., 2007; Wendt, 2010) gebracht. Der Hintergrund war, dass bei Vor-Ort-Befundprüfungen der geforderte Durchfluss nicht erreicht wurde. Es wurde festgestellt, dass eine Einzelentnahme weit unterhalb des Dauerdurchflusses lag und selbst bei gleichzeitiger Öffnung aller Entnahmestellen meist nur 1.500 — 1.800 l/h erreicht werden konnten. Das hatte zur Folge, dass nicht nur eine Befundprüfung nicht realisierbar war, sondern dass auch der Dauerdurchfluss des Zählers nur sehr selten oder gar nicht erreicht wurde. Die in den Untersuchungen eingesetzten Zähler waren zu groß bemessen. Wendt et al. (2007) bestätigten ebenfalls, dass das Entnahmeverhalten zu deutlichen Falschanzeigen der Zähler führen kann. Sie kamen zu dem Schluss, dass es zu diesem Zeitpunkt nahezu unmöglich war, wiederholbare und vergleichbare Bedingungen realitätsnaher Entnahmen zu schaffen. Aus diesem Grund wurde ein Vorschlag erarbeitet, wie Wasserzähler realitätsnah zu prüfen wären (Abbildung 2.7).

Zwei grundlegende Voraussetzungen konnten jedoch für die Prüfung nicht erfüllt werden:

1. typische Verbrauchsmuster bzw. Ganglinien und
2. die Prüfmöglichkeiten, diese Variationen reproduzierbar nachzubilden.

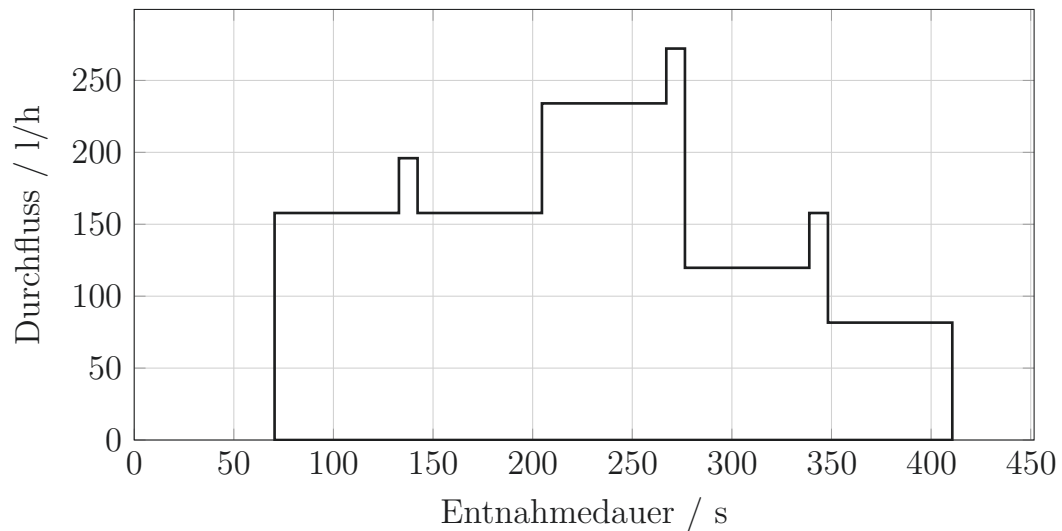


Abbildung 2.7: Testprofil eines Wasserzählers mit überlagerten Ereignissen von Waschmaschine, Händewaschen, Toilette, Duschen und Badewanne. (Wendt, 2010)

2.3.2 Ermittlung aktueller Wasserverbrauchsdaten - Vorläuferstudie

Der jährlich schwindende Wasserverbrauch (Abbildung 2.8) gab u. a. Anlass dazu, das Forschungsprojekt des DVGW aus den 80er-Jahren des 20. Jahrhunderts neu aufzulegen. Unter dem Titel: „Aktualisierung der Verbrauchsganglinien für Haushalte, Kleingewerbe und öffentliche Gebäude sowie Entwicklung eines Modells zur Simulation des Wasserbedarfs“ (Martin et al., 2017) wurde eine aktuelle Datenbasis des Wasserverbrauchs für Gesamtdeutschland geschaffen. Die diesem Projekt erhobenen Informationen sind die Grundlage für die in dieser Arbeit verwendeten Daten.

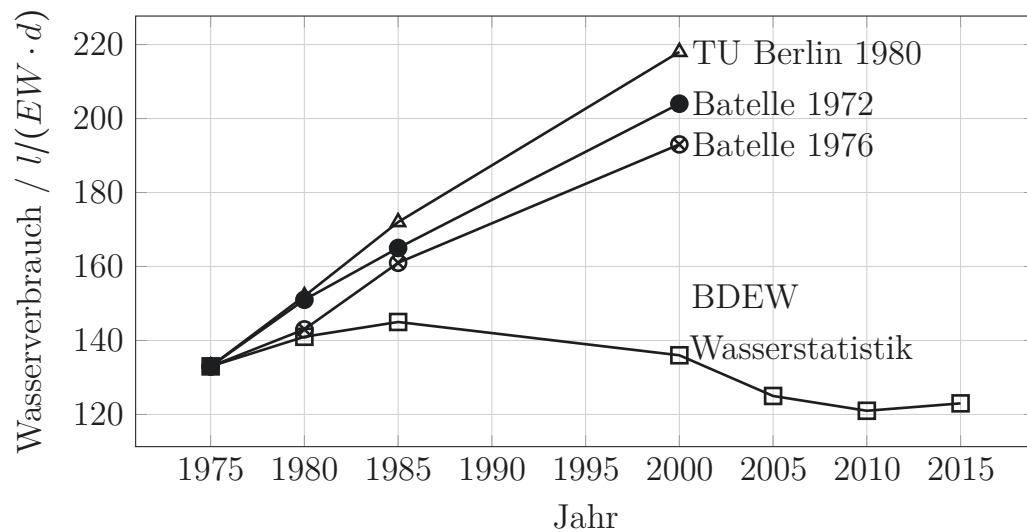


Abbildung 2.8: Wasserverbrauchsprognose von verschiedenen Institutionen. Inklusive der jährlichen BDEW-Wasserstatistik. (BDEW, 2017)

Ziel war es, auf Basis von hochaufgelösten Wasserverbrauchsmessungen in verschiedenen Regionen Deutschlands die Grundlage für eine Aktualisierung von Spitzendurchflusswerten zu schaffen und die Abhängigkeiten des Wasserverbrauchs zu identifizieren. Es wurden grundlegende Einflussfaktoren auf den Wasserverbrauch recherchiert und eine Messkampagne für 13 Städte entwickelt. Innerhalb dieser Städte wurde der Wasserverbrauch von insgesamt 211 Objekten erfasst. Hauptteil der Objekte waren Wohngebäude.

Die Auswahl der zu messenden Objekte innerhalb eines Wasserversorgungsbereiches stützte sich auf ein stochastisches Auswahlverfahren. Es handelte sich hierbei um ein mehrstufiges Verfahren, welchem grundlegende Daten der regionalen statistischen Ämter bzw. des statistischen Bundesamtes zu Grunde lagen.

In der ersten Stufe wurden repräsentative Postleitzahlgebiete eines Wasserversorgungsbereiches identifiziert. Dies geschah durch die Analyse der Einwohnerzahl, des Mietspiegels, der durchschnittlichen Haushaltsgröße und des Altersquotienten in einem Postleitzahlgebiet. Dabei fußte das Verfahren auf der grundlegenden Annahme, dass Siedlungsbereiche im Durchschnitt eine hohe Ähnlichkeit aufweisen. Auftretende Extremwerte (Abbildung 2.9, Wert: e_x) wurden aufgrund dieser Annahme eliminiert. Die übrig gebliebenen Postleitzahlgebiete teilten sich in drei Bereiche, welche durch einen Boxplot (Bei-

spielboxplot Abbildung 2.9) des Bevölkerungsstandes beschrieben werden, auf:

- oberer Auswahlbereich: oberes Quartil ($x_{0,75}$) bis oberer Whisker (z_o)
- Interquartilsauswahlbereich: Interquartilsabstand (IQA) zwischen $x_{0,75}$ und unteres Quartil ($x_{0,25}$)
- unterer Auswahlbereich: $x_{0,25}$ bis unterer Whisker (z_u)

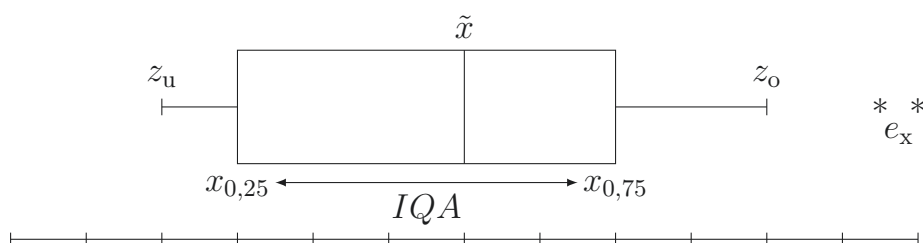


Abbildung 2.9: Beispielboxplot mit Whiskern und Extremwerten.

Allgemein wird die Länge von z_o und z_u wie folgt berechnet:

$$z_o = x_{0,75} + 1,5 \cdot IQA, \quad (2.5)$$

$$z_u = x_{0,25} - 1,5 \cdot IQA. \quad (2.6)$$

Anhand dieser Verteilung wurde eine zufällige Ziehung der einzusetzenden Messgeräte über die jeweiligen Postleitzahlgebiete durchgeführt. Aufgrund der beschriebenen Vorgehensweise konnte gewährleistet werden, dass es sich um eine hinreichend unabhängige Auswahlmethode handelte. Aufgrund dieser Annahme wurde geschlussfolgert, dass es sich um statistisch repräsentative Messobjekte handelt.

Die Datenaufzeichnung innerhalb der Messobjekte über den Messzeitraum erfolgte mittels Ultraschallwasserzähler. Der an einen Datenlogger angeschlossene Zähler registrierte mit einer Auflösung von 0,1 l/Impuls den aktuellen Wasserverbrauch. Dessen Impulse wurden äquidistant mit einer Auflösung von 1 s geloggt. Die Messungen der Datenreihen in den einzelnen Städten erfolgte nacheinander. Die saisonale Komponente des Wasserverbrauchs wurde somit auf ganz Deutschland gemittelt.

2.3.3 Analyse und Generierung von Wasserverbrauchsprofilen

Wenn über Verbrauchsprofile geschrieben wird, werden damit zumeist zeitlich aufgelöste Durchflussereignisse bezeichnet. Diese können genutzt werden, um Statistiken über das Verbrauchsverhalten zu erstellen (BDEW, 2017) oder saisonale Komponenten zu identifizieren. Für die Generierung von Verbrauchsprofilen lassen sich jedoch zwei Ansätze identifizieren, der Bottom-Up- und Top-Down-Ansatz. Bei dem Top-Down-Ansatz wird versucht, das Summenprofil aufzuschlüsseln und so einzelne Verbraucher zu identifizieren. Der Bottom-Up-Ansatz hingegen fasst charakteristische Verbraucher in einem Summenlastprofil additiv zusammen (Pflugradt, 2016). Des Weiteren lassen sich Verbrauchsprofile unter anderem durch stochastische Methoden, Markovketten oder verhaltensbasiert erstellen.

Alvisi et al. (2007) speicherten die Daten des Wasserverbrauchs über ein Jahr an Knotenpunkten und Häusern in einem Trinkwasserverteilungssystem in Nord-Italien. Die erhobenen Daten zeigten charakteristische Verläufe sowohl wöchentlich, täglich als auch stündlich. Es wurde ebenfalls festgestellt, dass sich das Entnahmeverhalten an Wochenenden mit denen in Ferienzeiten gleicht. Alvisi et al. (2007) nutzten die Ergebnisse ihrer Untersuchung, um ein Vorhersagemodell des Wasserverbrauchs zu erstellen. Das Modell besteht aus zwei Teilen: Zum einen das Tagesmodell, bei dem der durchschnittliche tägliche Wasserverbrauch in Verbindung mit saisonalen und persistenten Faktoren auf Basis einer Fourier-Transformation berechnet wird. Zum anderen der stündlichen Wasserverbrauchsprognose, welche ebenfalls aus einer periodischen und persistenten Komponente besteht. Diese setzt sich aus der Tagesprognose und dem mittleren stündlichen Wasserbedarfs des jeweiligen betrachteten Tages zusammen. Das Modell wird eingesetzt, um Leckagen zu identifizieren und gleichzeitig den Betrieb der öffentlichen Wasserversorgung durch Steuerung von Pumpen und Reservoirs zu optimieren.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgten McKenna et al. (2014). In deren Untersuchungen wurde der Wasserverbrauch über einen Zeitraum von einem Monat mit einer halbstündlichen Abtastrate in insgesamt 85 Gebäuden erfasst. Anhand dieser Daten wurden vier Wasserverbrauchsgruppen bzw. Klassen gebildet und

mittels eines Gaußschen Mischverteilungsmodells der tägliche Wasserbedarf berechnet.

Cheifetz et al. (2017) nutzten ebenfalls eine Einteilung in Verbrauchsklassen für ihre Analyse. Die Basis hierfür waren stündliche Wasserverbrauchsdaten von 10.233 Wasserzählern über einem Zeitraum von 15 Monaten. Für die Erstellung ihrer Profile und Cluster zerlegten sie die Daten mit Hilfe von Fouriertransformation in ein Frequenzspektrum und analysierten und extrahierten saisonale Komponenten. Dieses saisonale Muster wurden anschließend in Cluster und Profile unterteilt. Das Ergebnis waren acht verschiedene Cluster, die den Wasserverbrauch über eine Woche abbilden. Darauf aufbauend konnten tägliche Wasserverbrauchskurven in Abhängigkeit des Wochentages extrahiert werden.

Tränckner et al. (2011) nutzten einen anderen Ansatz. Ihr Ziel war es „[...] den Einfluss klimatischer Merkmale auf den Wasserverbrauch zu quantifizieren, um deren Einfluss bei der Prognose des Wasserbedarfs zu berücksichtigen [...]“. Dazu verwendeten sie die täglichen Wasserabgaben der Stadt Dresden über einen Zeitraum von sieben Jahren. Des Weiteren wurden die Temperatur, Globalstrahlung, relative Feuchte, Wind, Sonnenscheindauer, potenzielle Verdunstung und die theoretische Wasserbilanz als Einflussparameter für das Modell genutzt. Zur Anwendung kam unter anderem ein Regressionsmodell nach Billings und Jones (2011). Das Ergebnis war der prognostizierte monatliche Wasserverbrauch bis zum Jahr 2100, welcher vor allem die monatlichen Spitzenverbräuche der Sommermonate in den analysierten sieben Jahren gut ($r=0,85$) wiedergegeben hat.

Ein Bottom-Up-Ansatz wurde beispielsweise von Blokker (2010) durchgeführt. Die in dieser Arbeit entwickelten Verbrauchsprofile beruhen auf Kundenumfragen zur Nutzung einzelner Verbrauchsgeräte, deren Wasserverbrauch und zeitlicher Nutzung. Es wurden insgesamt 3200 Kunden befragt, welche über einen Zeitraum von einer Woche ein Wasserverbrauchstagebuch geführt hatten. Darin enthalten waren beispielsweise Angaben zur Häufigkeit von:

- Duschnutzung,
- Betätigung der Toilettenspülung,

- Durchführung des Abwaschs,
- Nutzung der Badewanne oder
- Reinigung der Wäsche.

Anhand der ermittelten Häufigkeitsverteilung der einzelnen Endverbraucher, gekoppelt mit Metaparametern wie Haushaltsgröße und -ausstattung, konnte eine Monte-Carlo-Simulation durchgeführt werden. Das Ergebnis ist ein Simulationsprogramm (SIMDEUM), welches den Tagesgang des Wasserverbrauchs eines Haushaltes abbildet.

Alle beschriebenen Veröffentlichungen haben gemein, dass sie Modelle beschreiben, mit dessen Hilfe es möglich ist, den täglichen Wasserverbrauch zu ermitteln, bzw. zu simulieren. Diese Betrachtung ist für die Nutzung von hydraulischen Modellen zur Simulation des Trinkwasserbedarfs oder der Anlagensteuerung von Trinkwasserverteilungssystemen aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen relevant. Jedoch sind diese Modellansätze für die Prüfung von Durchflussmessgeräten respektive Wasserzählern nicht dynamisch genug, bzw. würden eine extrem lange Messzeit für die realitätsnahe Prüfung von Wasserzählern erfordern. Zudem wurde bei durchgeführten Verbrauchsmessungen nie die Frage gestellt, ob die eingesetzten Messgeräte diesen dynamischen Prozess in ihrer Messrichtigkeit genau genug abbilden können.

Wendt (2010) hinterfragte als Erste, ob der eingesetzte Zähler die erforderlichen Verbrauchsprofile richtig misst. Sie führte erste Experimente mit Einzelergebnissen und stehendem Start-Stopp-Betrieb durch, um die Reaktion von Wasserzählern darauf zu untersuchen, welche nachfolgend detaillierter erläutert werden.

2.3.4 Experimentelle Untersuchungen an Hauswasserzählern

Vor dem Hintergrund, dass das DVGW-Projekt (Kapitel 2.3.2) im Jahr 2012 startete und erste Ergebnisse der PTB zugänglich waren, war die erste grundlegende Voraussetzung für die Entwicklung praxisnaher Prüfungen von Wasserzählern gegeben.

Vorausgehend wurden die Untersuchungen zum Nachlaufverhalten, die während eines Forschungsvorhabens von PTB und VDDW bezüglich der Großwasserzähler durchgeführt wurden, auf kleinere Hauswasserzähler ausgeweitet (Wendt, 2010). Es wurde das gleiche Untersuchungsprogramm, wie für $Q_n 15$ Zähler, mit folgenden Parametern:

- Messzeiten: 2, 5, 10, 20, 30 s,
- Durchflüsse: 300, 600, 900 l/h, 1,5; 2,5; 5 m³/h,
- Wiederholungen: 3,

verwendet. Die Untersuchungen wurden auf dem EWZP der PTB unter den zuvor genannten Messzeiten und Durchflüssen gemessen, sofern diese innerhalb der zulässigen Messbereiche der Zähler lagen. Aufgrund einer Maximalbelastung der Waage von 120 kg musste das Untersuchungsprogramm über eine entsprechende Anzahl von Einzelversuchen gemittelt werden, um gesicherte Massewerte zu erhalten. Bei dem kleinsten Durchfluss von 300 l/h und einer Messzeit von 2 s betrug das zu messende Volumen 0,166 l. Mit einer mittleren Dichte ρ von Wasser von 998,207 kg/m³ bei 20 °C ergibt sich ein Massewert von lediglich 0,166 kg. Diese geringe Masse entspricht lediglich 0,13 % des Messbereiches der Waage. Um eine ausreichende Masse für die Ermittlung der Messunsicherheit zu erhalten, wurden die Versuche teilweise 20 Mal wiederholt und somit die Messabweichung über die Gesamtwiederholungen gemittelt.

Die im Rahmen der Untersuchung getesteten Zähler sind in Tabelle 2.4 aufgelistet. Da das Nachlaufverhalten vor allem Flügelradzähler betrifft (Kapitel 2.1.2), werden die Ergebnisse dieser Zählerart genauer erläutert und die Ergebnisse der Einstrahlflügelradzähler und der Messkapsel-Mehrstrahl-Flügelradzähler in Abbildung 2.10 und 2.11 dargestellt.

Die gemessenen Messabweichungen der Zähler wurden zwischen den einzelnen Messpunkten interpoliert und als Oberflächendiagramm dargestellt. Für die Bestimmung der Messabweichung wurde der Mittelwert des absoluten Nachlaufs prozentual zur geprüften Menge betrachtet. Da die Messungen im stehenden Start-Stopp-Betrieb durchgeführt wurden, konnte der Nachlauf der Zähler mittels eines über dem Ziffernblatt installierten Kamerasystem erfasst

Tabelle 2.4: Übersicht der getesteten Zähler mit MK - Messkapsel, ES - Einstrahlzähler, MS - Mehrstrahlzähler, RK - Ringkolbenzähler.

Typ	Klasse	Größe	Q_{\min}/Q_t	Q_t/Q_2
MK-ES	A	1,5	0,06	0,15
ES	A	1,5	0,06	0,15
ES	B	1,5	0,03	0,12
NK-MS	B	1,5	0,03	0,12
MS	A	2,5	0,10	0,25
ES	B	2,5	0,05	0,20
MK-MS	B	2,5	0,05	0,20
RK	R80	4,0	0,05	0,08
MS	A	6,0	0,24	0,06
MS	A	6,0	0,24	0,60
MS	B	6,0	0,12	0,48

werden. Eine kontinuierliche Erfassung des Nachlaufs über die Messzeit war zu diesem Zeitpunkt nicht möglich.

Die Messungen sind insofern repräsentativ, als dass sie das gesamte Spektrum von möglichen Einzelentnahmen einschließt und somit von einem Durchschnittsnachlauf gesprochen werden kann. Deutlich ersichtlich ist eine Erhöhung der Messabweichung bei kurzen Entnahmezeiten ($t \leq 5$ s) und geringen Durchflüssen ($Q \leq 1$ m³/h). Die Messabweichung bei Einstrahlflügelradzähler der Größe $Q_n 1,5$ belief sich auf 35 % und bei der Größe $Q_n 2,5$ auf > 65 %.

Die Messkapsel-Mehrstrahl-Flügelradzähler zeigen ein tendenziell ähnliches Verhalten. Die Messabweichung ist bei der Größe $Q_n 1,5$ etwa 17 % und bei der Größe $Q_n 2,5$ etwa 28 %. Betrachtet man die einzelnen Zählergrößen, so sind die Messabweichungen der Messkapsel-Mehrstrahl-Flügelradzähler um etwa 50 % geringer als bei den Einstrahlflügelradzähler.

Die Untersuchungen der Mehrstrahlzähler der Größe $Q_n 6$ zeigen eine Verfünffachung der Messabweichung gegenüber $Q_n 2,5$, auf über 100 %. Allein die Ringkolbenzähler wiesen bei den Untersuchungen einen nicht detektierbaren Nachlauf auf.

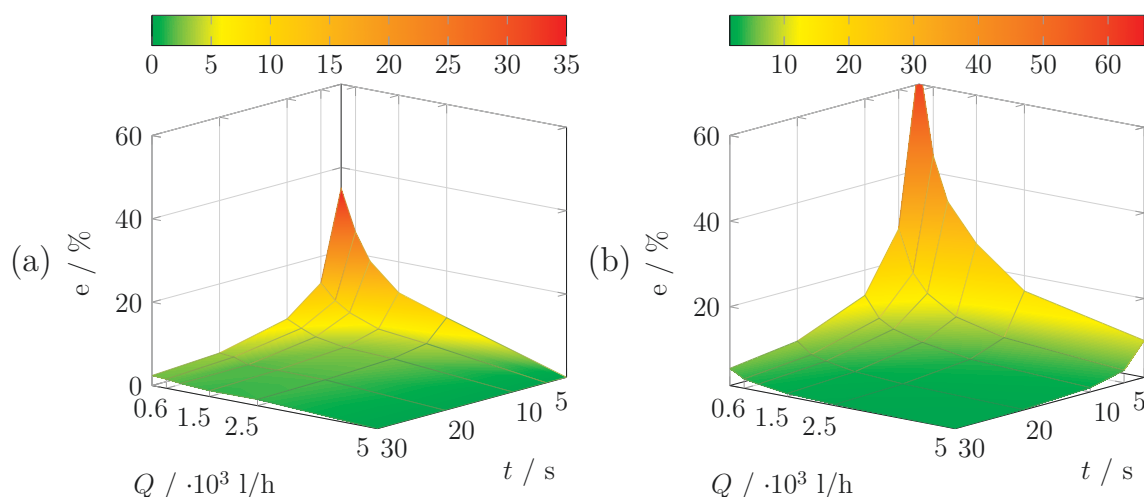


Abbildung 2.10: Gemessene Messabweichung (e) durch Nachlaufverhalten bei verschiedenen Entnahmedauern (t) und Durchflüssen (Q).

(a) Einstrahl-Flügelradzählers $Q_{n1,5}$

(b) Einstrahl-Flügelradzählers $Q_{n2,5}$

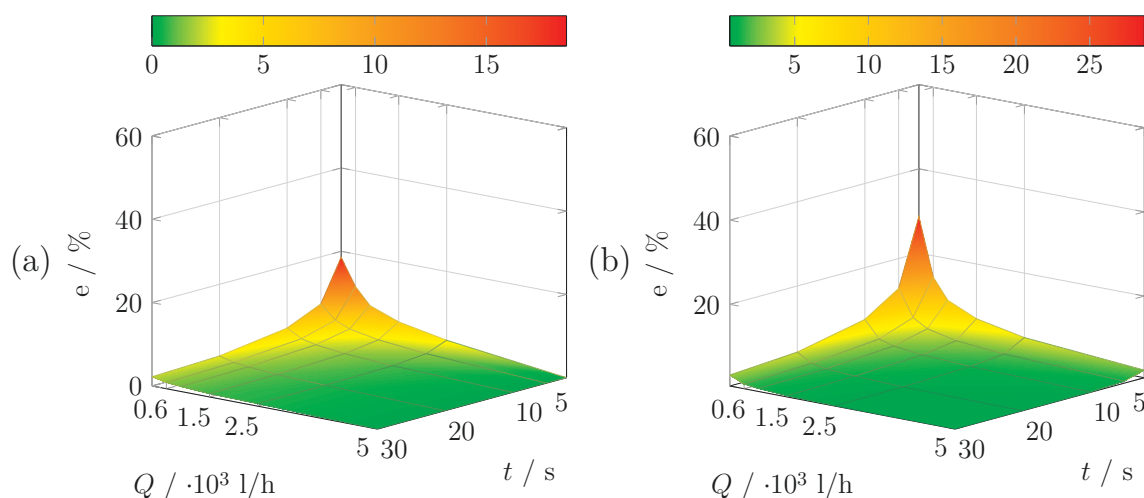


Abbildung 2.11: Gemessene Messabweichung (e) durch Nachlaufverhalten bei verschiedenen Entnahmedauern (t) und Durchflüssen (Q).

(a) Messkapsel-Mehrstrahl- Flügelradzählers $Q_{n1,5}$

(b) Messkapsel-Mehrstrahl- Flügelradzählers $Q_{n2,5}$

Zusammenfassend folgt, dass sich mit zunehmender Entnahmedauer und zunehmendem Durchfluss die Messabweichungen reduzieren. Die Untersuchungen zu Einzelentnahmen wurden mit einzelnen Zählern bestimmter Bauarten durchgeführt und lassen keine verallgemeinerte Schlussfolgerung, dass mit

zunehmender Zählergröße auch das Nachlaufverhalten beeinflusst werde, zu. Es ist ebenfalls fraglich, ob ein Austausch eines $Q_n 6$ gegen einen $Q_n 2,5$ den erwünschten Erfolg der Reduzierung der Messabweichung mit sich brächte. Im ungünstigsten Fall bewirkte dies lediglich eine Reduzierung von 100 % auf 80 % relative Messabweichung und läge somit immer noch über der achtfachen Verkehrsfehlergrenze von 10 % bzw. 4 %.

Um eine allgemeingültige Aussage über das Zählerverhalten bei dynamische Lasten treffen zu können, bedarf es, wie bereits in Kapitel 2.3.1 beschrieben, repräsentativer Verbrauchsmuster und der entsprechenden Prüfmöglichkeit. Datenreihen, aus denen statistisch gesichert Verbrauchsmuster abgeleitet werden können, wurden im Rahmen des DVGW-Projekts (Martin et al., 2017) bereit gestellt. Die dynamische Prüfung von Durchflussmessgeräten bedingt die Entwicklung einer neuartigen Prüftechnologie.

3 Kavitationsdüsen als Prüftechnologie für eine realitätsnahe Prüfung von Durchflussmessgeräten

3.1 Einleitung

Die dynamische Prüfung von Durchflussmessgeräten bedingt neben typischen Verbrauchsmustern bzw. Ganglinien die Entwicklung einer neuartigen Prüftechnologie. Mit deren Hilfe ist es möglich die Durchflussvariationen, reproduzierbar nachzubilden. Für die hier vorliegende Arbeit werden kavitierende Düsen bzw. Kavitationsdüsen verwendet. In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Kavitationsdüsen sowie deren Anwendung erläutert.

3.2 Grundlagen der Kavitation

Kavitation (lat.cavitas "Hohlraum") bedeutet im Allgemeinen die Bildung und Auflösung von mit Dampf gefüllten Hohlräumen (Kavitationsblasen) in einer Flüssigkeit (Ackeret, 1930). Am Beispiel von Wasser wird die Entstehung von Kavitation nachfolgend näher erläutert.

Unter Normalbedingungen (1013,3 hPa) verdampft Wasser bei 100 °C. Wird der Druck vermindert, erfolgt der Übergang in die gasförmige Phase schon bei geringerer Temperatur, z. B. bei einem Druck von 23,37 hPa bereits bei 20 °C. Den Absolutdruck, bei dem dieser Übergang stattfindet, bezeichnet man als Dampfdruck p_v . Abbildung 3.1 verdeutlicht am Beispiel für Wasser die beiden Möglichkeiten — Temperaturerhöhung und Druckreduzierung, die zur Unterschreitung der Siedepunktskurve und somit zum Übergang in die

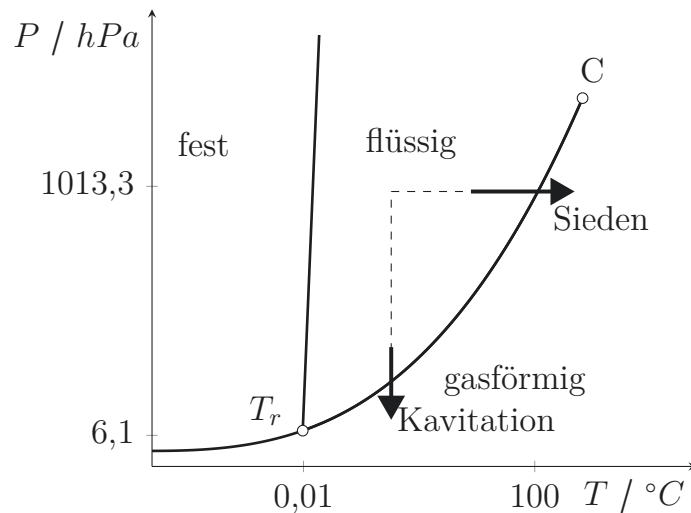


Abbildung 3.1: Phasendiagramm von Reinstwasser mit C als kritischem Punkt und T_r als Tripelpunkt.

gasförmige Phase führen. Geschieht dieser Übergang innerhalb von strömenden Flüssigkeiten, bilden sich Kavitationsblasen aus.

Innerhalb von Strömungsvorgängen erfolgt die Bildung von Kavitationsblasen üblicherweise so schnell, dass sich lokal starke mechanische Stöße ausbilden (Ackeret, 1930). Diese können sich materialzerstörend auf die umgebenden Wandungen auswirken. Die negativen Effekte der Kavitation sind in der Strömungslehre allgemein bekannt und haben eine wesentliche Bedeutung für:

- das Saugrohr von Pumpen,
- Turbinen- und Pumpenlaufräder,
- Heber,
- vertikale Fallrohre und -schächte und
- Schiffsschrauben.

Kavitation kann aber auch positiv genutzt werden. Bisherige Anwendungsgebiete liegen z. B. in der Automobilindustrie, der Medizintechnik, der Lebensmittelindustrie, der Wasserdesinfektion (Brennen, 2015; Beaudoin et al., 2004; Bhaskaracharya et al., 2009; Maslak und Weuster-Botz, 2011) aber auch in der Schifffahrts- und Rüstungsindustrie. Die Anwendung in den einzelnen Gebieten

ist vielfältig. Einerseits wird Kavitation in der Automobilindustrie genutzt, um Kraftstoff zu dimensionieren, andererseits wird die materialzerstörende Wirkung u. a. in der Medizintechnik eingesetzt, um Ablagerungen zu entfernen. Im Fall der Schifffahrts- und Rüstungsindustrie wird sog. Superkavitation verwendet, um die Fortbewegung von Unterwasserfahrzeugen zu beschleunigen (Zhao et al., 2006; Xiong et al., 2007; Kramper, 2018). Hierbei handelt es sich um den Einschluss von Objekten innerhalb von Kavitationsblasen.

Ein weiteres neueres Anwendungsgebiet von Kavitation ist die Nutzung von sog. kavitierenden Düsen bzw. Kavitationsdüsen als Durchflussmessgerät, Regelorgan und zur Erzeugung intermittierender Durchflussprofile.

3.3 Kavitierende Düsen

3.3.1 Funktionsweise

Die Nutzung von kritisch betriebenen Düsen in der Fluidmechanik als Regelorgan ist keine völlig neuartige Anwendung. Im Bereich der Gas-Durchflussmessung sind kritische Düsen bereits seit mehreren Jahrzehnten etabliert (Aschenbrenner, 1983). Sie sind als wiederholbares, langzeitstabiles und akkurates Messprinzip bekannt. Die Messunsicherheit der Düsen beträgt 0,05 % (Aschenbrenner, 1989). Die Kalibrierung mittels Düsen erfolgt mit einer Unsicherheit von $< 0,1$ % (Wright et al., 2007).

Kavitierende Düsen basieren auf dem gleichen physikalischen Prinzip wie die kritischen Düsen. Bei kritischen Düsen gleicht sich durch die Verengung des Querschnittes die Strömungsgeschwindigkeit der lokalen Schallgeschwindigkeit an, wodurch ein kritischer Massenstrom erreicht wird. Bei kavitierenden Düsen hingegen wird der statische Druck im engsten Querschnitt unter den Dampfdruck der Flüssigkeit abgesenkt, wodurch Kavitation initiiert wird (Abbildung 3.2). Die Bildung der Kavitation ist dabei wesentlich vom Verhältnis von Nachdruck zu Vordruck (P_2/P_1) und der Düsengeometrie abhängig. Kavitationsdüsen sind demnach den Wirkdruckmessgeräten zuzuordnen. Das Druckverhältnis, welches notwendig ist, um Kavitation zu initiieren, wird als kritisches Druckverhältnis bezeichnet.

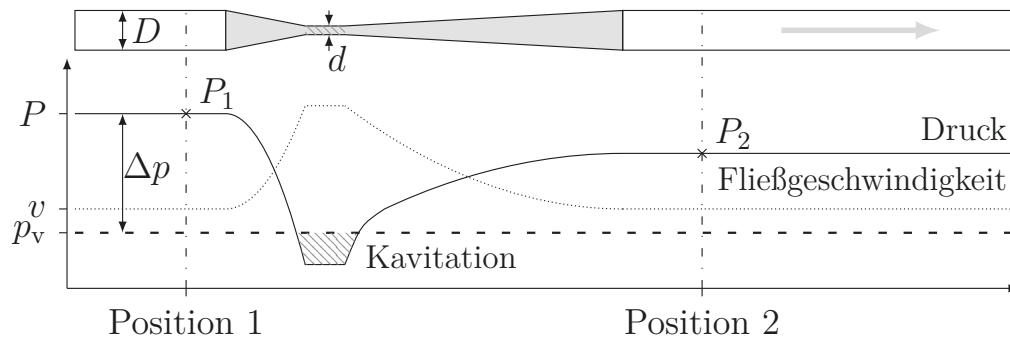


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung einer Herschel-Venturi-Düse (grauer Bereich) inklusive des schematischen Verlaufs der Druck- und Geschwindigkeitskurven über die Düsengeometrie (Eigene Darstellung).

Tritt ein Druckgefälle von $< 0,75 (P_2/P_1)$ zwischen Auslauf (Position 2, Abbildung 3.2) und Einlauf der Düse (Position 1, Abbildung 3.2) auf, wird der kritischer Volumenstrom innerhalb des Düsenhalses erreicht. Wird das Druckgefälle jedoch nicht erreicht und der Vordruck (P_1) nähert sich nicht dem Dampfdruck (p_v), funktioniert die Düse als Messblende und der Durchfluss kann nach Bernoulli berechnet werden. Das Erreichen des Druckverhältnisses führt zur Bildung einer zusammenhängenden Kavitationsblase im Düsenhals über die Länge des Düsenhalses. Die entstehende Kavitationsgrenzschicht (δ) limitiert den Querschnitt und begrenzt so definiert den Flüssigkeitsstrom (Abbildung 3.3).

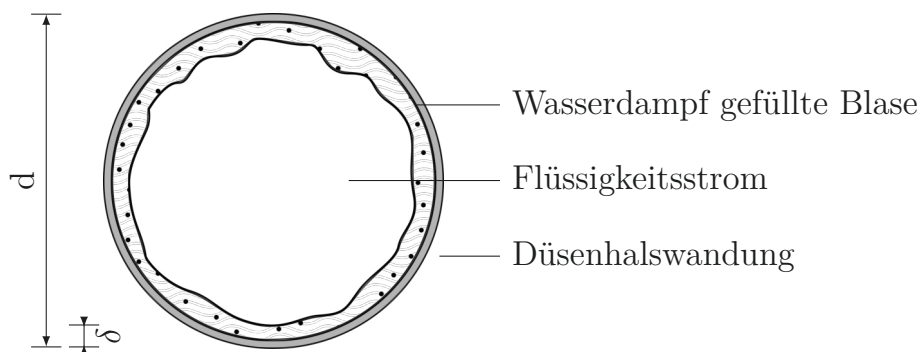


Abbildung 3.3: Schematischer Querschnitt des Düsenhalses bei kritischem Volumenstrom mit Kavitationsgrenzschichtdicke δ (Eigene Darstellung).

Ob Kavitation auftritt oder nicht, hängt auch maßgeblich von den Fluideigenschaften ab. Der Einfluss der Wasserqualität auf die Bildung von Kavitation wurde bereits seit den 1980er Jahren untersucht (z. B. 18th ITTC Cavitation Committee et al., 1978; Keller, 2001; Brinkhorst, 2017). Grundsätzlich wurde festgestellt, dass bei gleichem Aufbau, gleicher Strömungsgeschwindigkeit, gleichem Kavitationsangriffswinkel, aber veränderten Fluideigenschaften unterschiedliche Kavitationsprozesse wirksam werden. Beispielsweise beschleunigt eine Erhöhung der Partikelkonzentration in der Flüssigkeit die Entstehung von Kavitation. Eine gute Kenntnis des Zusammenspiels von Fluideigenschaften und Kavitationsprozess ist deshalb wichtig. Hierzu besteht weiterer Untersuchungsbedarf.

Unter idealen Bedingungen wie konstanter Dichte und Temperatur, konstantem Dampfdruck und konstanten anderen Fluideigenschaften ist der Volumenstrom Q eine quadratische Funktion des Düsenhalsdurchmessers d in Abhängigkeit vom Eingangsdruck P_1 (Abbildung 3.4 (a)). Der Volumenstrom berechnet sich entsprechend Gleichung 3.1 durch vorherige Berechnung des Massenstroms q_m mittels Gleichung 3.2 (DIN EN ISO 5167-4:2003-01).

$$Q = q_V = \frac{q_m}{\rho_1} \quad (3.1)$$

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \cdot \epsilon \cdot \frac{\pi}{4} d^2 \cdot \sqrt{2 \Delta p \rho_1}, \quad (3.2)$$

$$\beta = \frac{d}{D},$$

$$\Delta p = P_1 - p_v,$$

mit:

C : Durchflusskoeffizient, beschreibt Zusammenhang zwischen tatsächlichen und idealen Durchfluss

d : Düsenhalsdurchmesser,

D : innerer Rohrdurchmesser stromaufwärts,

β : Durchmesser Verhältnis,

ϵ : Expansionszahl, beschreibt Einfluss der Kompressibilität

Δp : Wirkdruck,

ρ_1 : Dichte des Fluids.

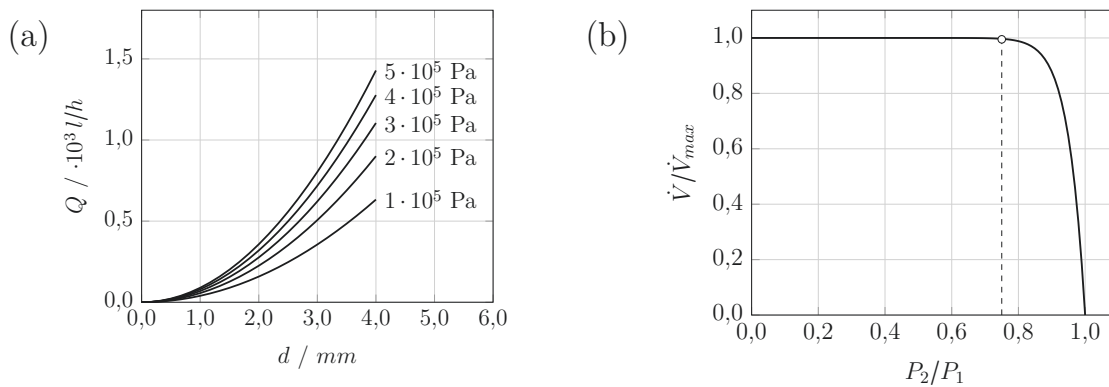


Abbildung 3.4: Mittels Gleichung 3.2 berechnete theoretische Abhängigkeiten der Düsengeometrie und des Druckes.

(a) Theoretischer Durchfluss in Abhängigkeit vom Halsdurchmesser und Eingangsdruck.

(b) Schematische Relation zwischen normiertem Durchfluss und absolutem Druckverhältnis mit dem Kavitationseinsatzpunkt c_i von 0,75.

Das notwendige kritische Druckverhältnis wird auch als Kavitationseinsatzpunkt c_i bezeichnet. Dieser Punkt kann durch numerische Untersuchungen oder Experimente bestimmt werden. In der schematischen Darstellung des normierten Volumenstroms zum Druckverhältnis in Abbildung 3.4 (b) liegt dieser bei 0,75 (P_2/P_1). In eigenen Untersuchungen hat sich das folgende Prozedere zur Ermittlung des Kavitationsbeginns als am besten geeignet erwiesen:

Vor der Düse ist innerhalb des Prüfstandes ein Durchflussmessgerät installiert, welches zur quantitativen und kontinuierlichen Erfassung des Durchflusses genutzt wird. Nachgeschaltet befindet sich ein Ventil, welches zu Beginn der Messung komplett geöffnet ist. Der Aufbau wird nun mit einem hydrostatischen Druck, welcher ein Vielfaches des Atmosphärendrucks betragen sollte, beaufschlagt. Es stellt sich ein konstanter Volumenstrom ein. Anschließend wird das sich im Nachlauf befindliche Ventil teilweise geschlossen. Gleichzeitig werden der Einlass- und Auslassdruck sowie die Durchflusswerte des vorgeschalteten Durchflussmessgerätes kontinuierlich erfasst.

Aufgrund der vorherrschenden Kavitation innerhalb des Düsenhalses kann ein stabiler Durchfluss erzeugt werden, der rapide bei Überschreitung des kritischen Druckverhältnisses einbricht. Der Kavitationseinsatzpunkt c_i ist dabei

individuell für jede Düse. Jedoch kann der Kavitationseinsatzpunkt durch sich ändernde Fluideigenschaften oder Oberflächengeometrien, z. B. Abrasion, für ein und dieselbe Düse in einer bisher nicht quantifizierbaren Größe variieren. Diese Einflüsse sind in weiteren Untersuchungen zu adressieren. Für die hier vorgestellten Arbeiten kann davon ausgegangen werden, dass die Kavitationsdüsen weit unterhalb des kritischen Druckverhältnisses betrieben wurden. Liegt das Druckverhältnis während des Betriebs unterhalb des in Abbildung 3.4 (b) dargestellten Wertes von 0,75 (P_2/P_1), ist der Durchfluss resistent gegenüber nachgeordneten Druckschwankungen und sehr stabil (Abbildung 3.5, $\tilde{s} = 7 \cdot 10^{-5} \text{ l/h}$).

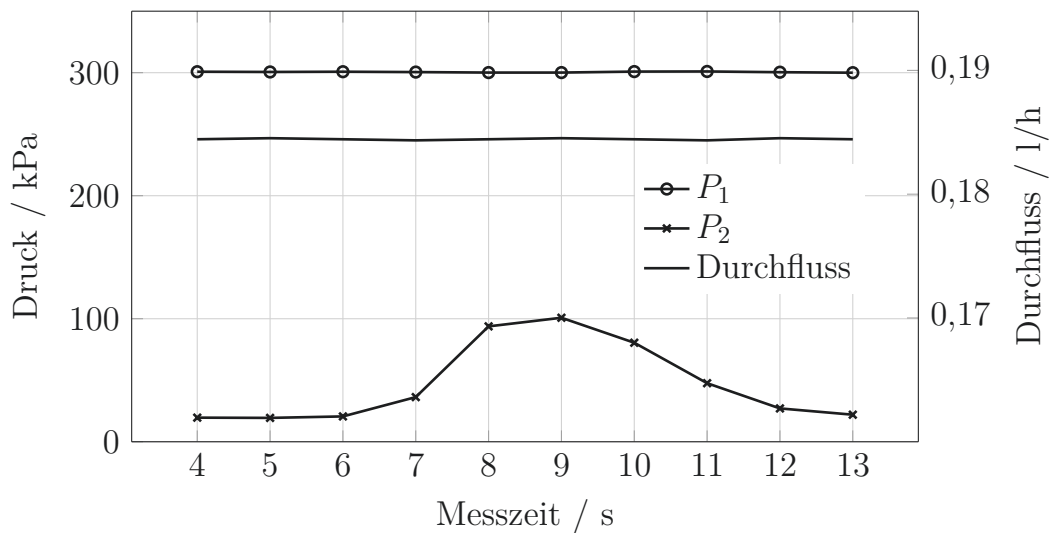


Abbildung 3.5: Veränderung des Nachdrucks während des Betriebes einer Kavitationsdüse. Erfassung des Durchflusses mit einem magnetisch-induktiven Durchflussmessgerät.

Die theoretischen Grundlagen zu kavitierenden Düsen wurden hauptsächlich von Ackeret (1930), Numachi (1936) wie auch Davis et al. (2007) gelegt. So führte Ackeret bereits im Jahr 1930 Experimente mit hydraulischen kavitierenden Düsen durch. 1936 untersuchte Numachi den Einfluss des Luftgehalts auf das Erscheinungsbild der Kavitation, und Davis et al. (2007) untersuchten das unterschiedliche Kavitationsverhalten von verschiedenen Fluiden auf die Durchflussbegrenzung. Weitere experimentelle Untersuchungen zum Einsatz von kavitierenden Venturi-Düsen als Durchflussregler und Durchflussmessgerät wurden unter anderem von Ghassemi und Fasih (2011) und Ashrafizadeh und

Ghassemi (2015) durchgeführt.

Die ersten experimentellen Versuche seitens der PTB (Wendt et al., 2011) wurden mit Düsen durchgeführt, deren Geometrie an die von kritischen Düsen nach DIN EN ISO 9300:2005-11 9300 angelehnt war. Parallel zur experimentellen Untersuchung wurde von Brinkhorst (2017) die Düsengeometrie numerisch evaluiert und optimiert.

3.3.2 Numerische Untersuchungen

Das Ziel der Arbeit von Brinkhorst (2017) war unter anderem, für Wasser die Effekte der Düsengeometrie auf die Kavitation für verschiedene Druckverhältnisse numerisch zu untersuchen. Da die toroidale Venturi-Düse nach ISO 9300 bereits im Gas-Bereich intensiv genutzt wird, war dies die erste numerisch von Brinkhorst untersuchte Düsengeometrie (Abbildung 3.6 (a)). Als zweite Geometrie wurde die von Numachi (1936) bereits untersuchte Herschel-Venturi-Geometrie genutzt. Diese Geometrie ist in Abbildung 3.6 (b) dargestellt. Beide Düsenformen sollten einen stabilen Massenstrom generieren. Alle in Brinkhorst (2017) realisierten Berechnungen wurden mit den gleichen Einlaufbedingungen wie:

- Einlassdruck ($4 \cdot 10^5$ Pa),
- Dampfdruck (2333,21 Pa),
- Temperatur (298 K) etc.,

durchgeführt (Brinkhorst et al., 2015). Der simulierte Düsendurchmesser betrug 11,2 mm. Detaillierte Informationen zum Simulationsmodell und der verwendeten Gleichungen können in Brinkhorst (2017) nachgelesen werden.

Die Simulationsergebnisse für die beiden Düsen zeigten wie erwartet einen stabilen Massendurchfluss. Beide Verlaufskurven ähnelten sich und bestätigten die Ergebnisse von Ghassemi und Fasih (2011) und Abdulaziz (2014). Auch die Ergebnisse von Brinkhorst (2017) ergaben einen konstanten Massendurchfluss bei einem Druckverhältnis kleiner als 0,8. Des Weiteren wurde nachgewiesen, dass die Herschel-Venturi-Düse bis zu einem höheren Druckverhältnis ($P_2/P_1 =$

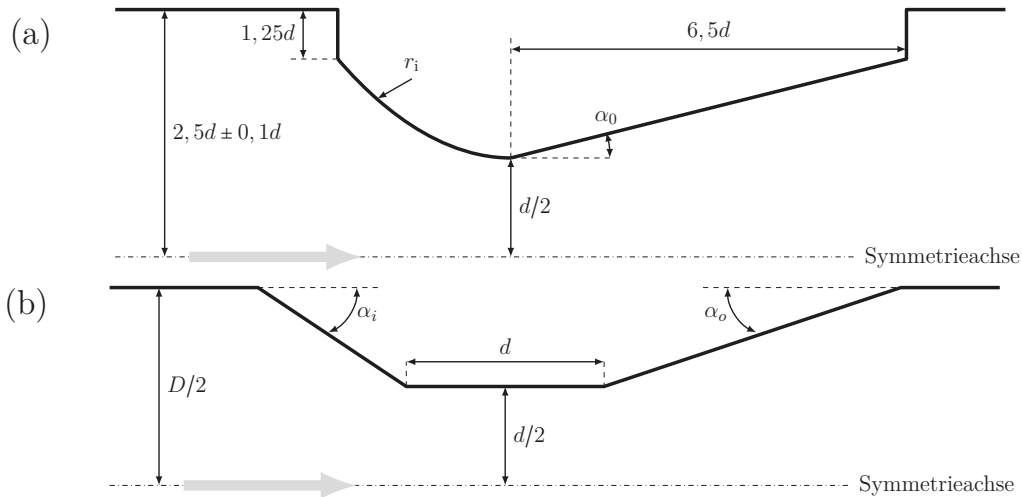


Abbildung 3.6: Schematische Darstellung der getesteten Düsenformen.

(a) Eine Venturi-Düse mit toroidalem Halsbereich angelehnt an ISO 9300. Dabei ist d der Halsdurchmesser, r_i der Einlassradius und α_0 der Auslass- bzw. Diffusorwinkel.

(b) Eine Herschel-Venturi-Düse, mit dem Einlasswinkel (α_i) und Diffusorwinkel (α_o).

0,8) einen konstanten Massendurchfluss erzeugt als die toroidale Venturi-Düse ($P_2/P_1 = 0,7$).

Nicht nur der höhere Einsatzbereich sondern auch die generierte Durchflussstabilität der beiden Düsen unterscheiden sich innerhalb der numerischen Simulation. Die aus Brinkhorst (2017) stammende Abbildung 3.7 zeigt die Standardabweichung des dimensionslosen Massendurchflusses für beide Düsengeometrien über dem Druckverhältnis in Prozent. Die maximale Streuung des Massendurchflusses ist bei der toroidalen Düse um ein Achtfaches höher als bei der Herschel-Venturi-Düse.

Die Ergebnisse der Simulationen bestätigen die Annahme, dass kritisch betriebene Düsen aus dem Gasbereich auch im Flüssigkeitsbereich anwendbar sind. Die um ein Vielfaches geringere Standardabweichung und der größere Wirkungsbereich waren ausschlaggebend für die Änderung der Geometrie von einer Venturi-Düse mit toroidalem Hals hin zu einer Herschel-Venturi-Düse für die experimentellen Untersuchungen mit Flüssigkeiten. Brinkhorst (2017) bezeichnet dies als die „[...] Überlegenheit der Herschel-Venturi-Rohrgeometrie [...]“. Die hohe Konstanz im Durchfluss führte er auf die geometrische Fixierung

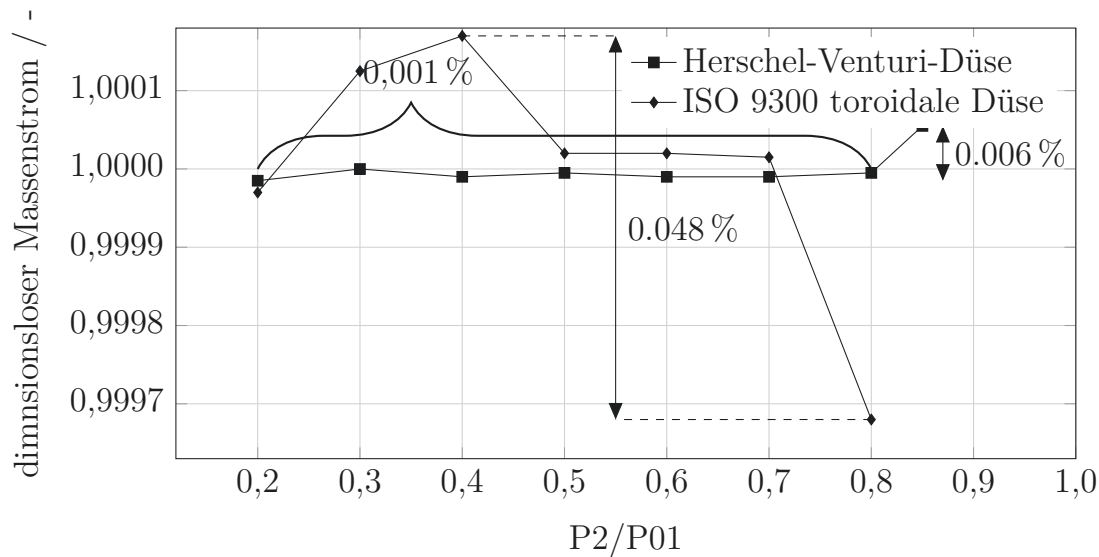


Abbildung 3.7: Angelehnt an Brinkhorst: „Dimensionsloser Massenstrom vs. Druckverhältnis: ISO 9300 Venturi-Düse - Herschel-Venturi-Düse, vergrößert $P_2/P_{01} = 0,2 - 0,85$ “ (Brinkhorst, 2017).

des Kavitationsbeginns am Übergang vom Düsen- zum Halsbereich zurück. Einen scharfkantigen Übergang sehen sowohl Brinkhorst, 2017 als auch andere Autoren (Yuan et al. (2001); Hsu (1972)) als nicht sinnvoll an, da es zu Strömungsablösungen kommen kann. Es werden ebenfalls Empfehlungen für den Kantenradius von ca. $d/R \approx 5,6$ gegeben. Die Simulationsergebnisse von Brinkhorst (2017) zeigen ebenfalls, dass in 2D-Simulationen die Dynamik der Kavitation nicht exakt wiedergegeben wird. Aufgrund des erheblich niedrigeren Rechenaufwandes eignen sie sich jedoch, um Tendenzen bei Geometrievariationen zu ermitteln.

3.4 Anwendung von Kavitationsdüsen

3.4.1 Experimenteller Aufbau

In Zusammenarbeit mit einer auf den Gasdurchfluss spezialisierten Firma entwickelte die PTB eine Apparatur zur Erzeugung intermittierender Durchflüsse (Wendt et al., 2011). Hierbei handelt es sich um eine mobile Apparatur, welche in eine bestehende Prüfstandsinfrastruktur integriert werden kann.

Innerhalb dieser Apparatur befinden sich sechs konzentrisch angeordnete Kavitationsdüsen (Abbildung 3.8 (b)). Die in einer Halterplatte installierten Düsen sind wechselbar und befinden sich an Position III (Abbildung 3.8 (a)). Mittels auslassseitig installierter pneumatischer Stempel (I) können die einzelnen Düsen geöffnet oder geschlossen und so seriell oder parallel betrieben werden (Wendt et al., 2011). Die Position der Stempel ermöglicht es ebenfalls, dass der durch die Pumpe bereitgestellte hydrostatische Druck stets einlassseitig anliegt. Dies ist für die spätere Verwendung des Prüfstandes wichtig, um wechselnde Durchflussniveaus zu erzeugen.

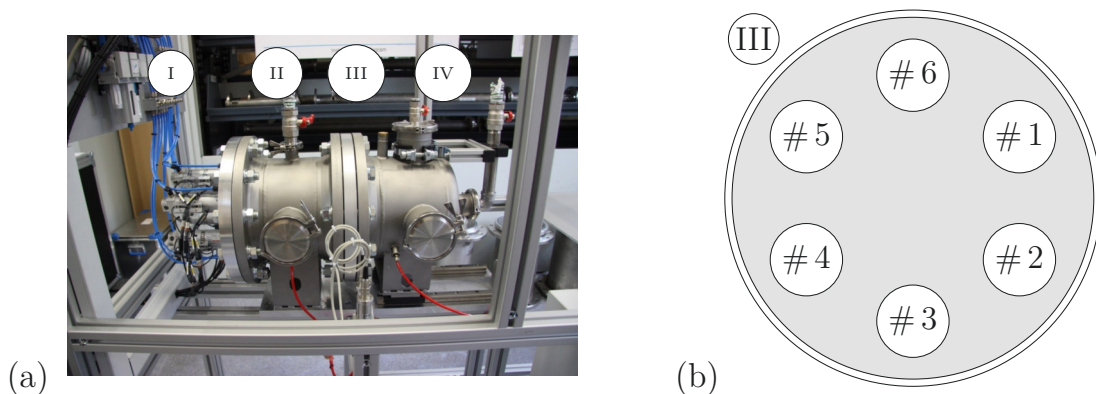


Abbildung 3.8: Kavitationsapparatur der PTB mit sechs installierten Düsen und pneumatischem Verschlussystem.

(a) Prüfstand mit I-Pneumatischem Verschlussystem, II-Auslassseite, III-Düsenhalter, IV-Einlassseite.

(b) Anordnung der Düsen innerhalb des Prüfstandes.

Die derzeit (Stand 2019) installierten Düsen haben einen Durchmesser von 1,13 mm bis zu 8,5 mm. Damit ist es möglich, einen Durchflussbereich von 0 l/h bis 5.500 l/h, sofern die Düsen seriell betrieben werden, abzudecken. Werden die Düsen parallel betrieben, kann ein Durchfluss von bis zu 10.000 l/h erreicht werden.

Im Gegensatz zu automatischen Ventilen oder drehzahlgeregelten Pumpen kommt es durch Öffnung bzw. Verschluss der Kavitationsdüsen zu einer schnellen Addition bzw. Subtraktion der Durchflüsse. Eine Durchflussänderung kann so, ersten Abschätzungen nach, in weniger als 100 ms auf ein stabiles Niveau erfolgen. Die Abschätzungen erfolgten auf Basis der technischen Umschaltzeit der pneumatischen Stempel. Grund dafür ist die Bildung bzw. Auflösung der

Kavitation innerhalb weniger Millisekunden. Die Erzeugung von schnellen reproduzierbaren Durchflussänderungen ist somit möglich.

Die in dieser Arbeit aufgeführten experimentellen Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf das Prozesswasser des EWZP der PTB, mit folgenden Parametern:

- mittlere Wassertemperatur 20°C,
- Gesamthärte von 3,4 °dH,
- pH-Wert von 8,63 und
- Silberpartikel ($c=0,024\text{ g/l}$).

Die Konzentration der Silberpartikel beträgt ca. 0,02 g/l und diese sind 10 - 30 µm groß. Die Silberpartikel werden genutzt, um LDV-Messungen durchzuführen. Die Durchführung der Untersuchungen mit Wasser, welches davon abweichende Eigenschaften aufweist, kann unter Umständen zu abweichenden Ergebnissen führen. Die Auswirkungen der Wassereigenschaften auf den Kavitationsprozess innerhalb der Kavitationsdüsen ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.

3.4.2 Charakterisierung Kavitationsapparatur

Detektion des Kavitationseinsatzpunktes

Die ersten für die hier vorliegende Arbeit realisierten Experimente mit der Apparatur wurden durchgeführt, um das notwendige kritische Druckverhältnis der installierten Düsen zu bestimmen und deren Durchflussstabilität zu bewerten (Wendt und Brinkhorst, 2015). Hierfür wurde das Verfahren aus Kapitel 3.3.1 verwendet. In Abbildung 3.9 sind die normierten Volumenströme während der Messung gegenüber dem Druckverhältnis (P_2/P_1) dargestellt. Erkennbar ist ein stabiler Durchfluss bis zu einem Verhältnis von ca. 0,75. Da bisher (Stand 2019) keinerlei mathematische Beschreibung zur Bestimmung des Kavitationseinsatzpunktes für experimentelle Untersuchungen existierte,

wurde im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit ein entsprechender Algorithmus entwickelt (Berechnungsskript A.1), der im Folgenden näher beschrieben wird.

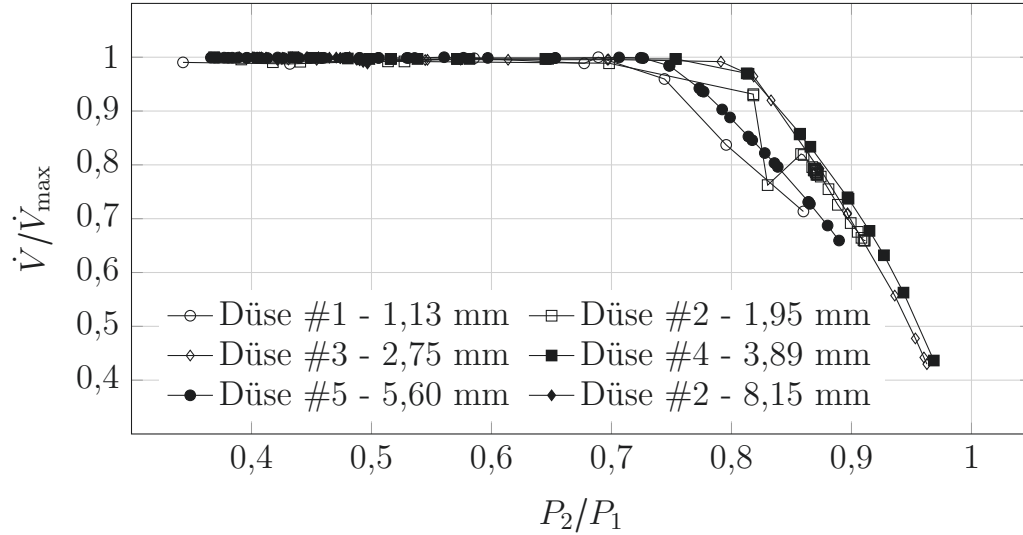


Abbildung 3.9: Normierter Volumenstrom der installierten Düsen gegenüber dem vorherrschenden Druckverhältnis.

Die normierte Durchflussdatenreihe wurde durch einen gleitenden Mittelwertfilter (n-ter Ordnung, $n=3$) geglättet. Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass sich ein stabiler Massenstrom unterhalb von 0,75 (P_2/P_1) ausbildet. Unter dieser Annahme wurde eine lineare Funktion für das Druckverhältnis $\leq 0,6$ bestimmt und die Residuen zur linearen Funktion der einzelnen Datenreihen für alle Druckverhältnisse $\leq 0,6$ berechnet (Abbildung 3.10).

Aufgrund des stabilen Massenstroms wurde eine maximal zulässige Schwankung von $\pm 1\%$ festgelegt. Die Datenreihen der Düsen wurden dahingehend untersucht, ab welchem Druckverhältnis das Vertrauensintervall von 1% erstmals überschritten wird. Bei der in Abbildung 3.10 gezeigten Analyse der Messungen mit den toroidalen Venturi-Düsen tritt dies bei Düse #2 beispielsweise ab einem Wert von 0,70 (P_2/P_1) auf. Das Druckverhältnis bei der Überschreitung des Intervalls der anderen Düsen ist in der Legende in Abbildung 3.10 aufgelistet. Bei der Analyse der Untersuchungen ist die Düse #6 gesondert zu betrachten. Düse #6 konnte nicht über das gesamte Druckverhältnis getestet werden, da der für die Kavitationsausbildung notwendige Druck innerhalb der Anlage nicht erreicht werden konnte. Die Düse #6 ist zu groß für den Betrieb

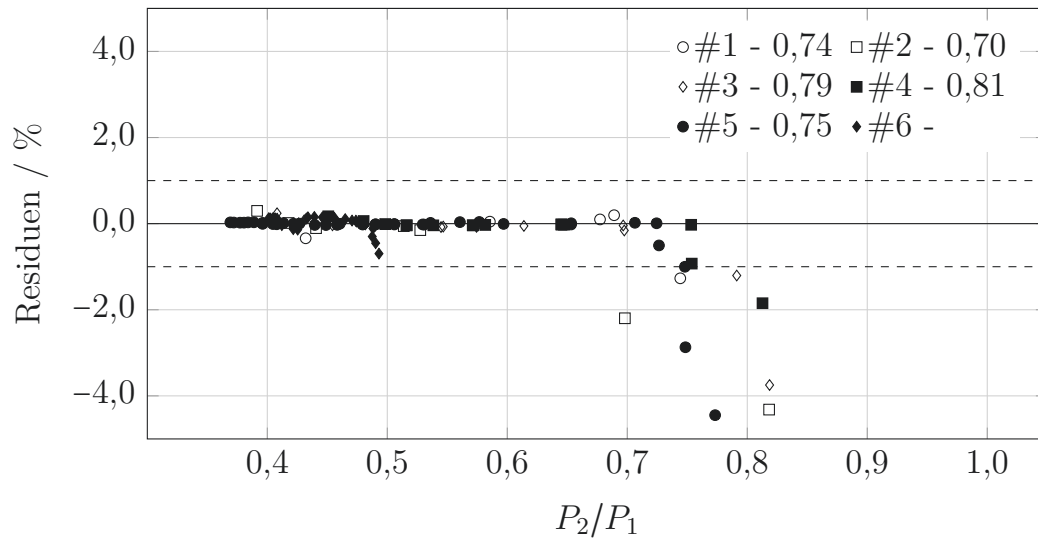


Abbildung 3.10: Residuen zwischen Messung und angepasster linearer Funktion ($\leq 0,6$) der Düsen gegenüber dem Druckverhältnis.

auf dem EWZP und dadurch nur bedingt anwendbar

Die Überlegungen zur theoretischen Funktionsweise einer kavitierenden Düse konnten durch die in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Experimente bestätigt werden. Gegenüber der numerischen Simulation ist der detektierte Kavitationseinsatzpunkt mit einem kritischen Druckverhältnis von ca. 0,7 (P_2/P_1) um 0,05 geringer. Alle Düsen zeichnen sich durch einen höchst stabilen Durchfluss ($\pm 0,0015\%$) aus.

Kalibrierung der Düsen

Nach der Detektion des Kavitationseinsatzpunktes wurden die Düsen auf dem EWZP mit Hilfe einer gravimetrischen Referenz kalibriert. Es wurde sichergestellt, dass während der Kalibrierung ein kritisches Druckverhältnis von $\leq 0,7$ (P_2/P_1) eingehalten wurde, so dass Kavitation sichergestellt war. Die Kalibrierung wurde im fliegenden Start-Stopp-Betrieb durchgeführt. Zum Startzeitpunkt der Messung wurde der im Kreislauf fließende Wasserstrom in ein Wägegefäß über eine Umschalteneinrichtung umgeleitet. Nach Ablauf einer definierten Messzeit wurde der Flüssigkeitsstrom abermals umgeleitet. Aufgrund der definierten Messzeit, der erfassten Wassermasse während der Messzeit und einer entnommenen Dichteprobe konnte der reale Volumenstrom

berechnet werden. Die Messungen erfolgten bei einem konstanten Vordruck ($P_1 = 400 \text{ kPa}$) und konstanter Temperatur ($T = 20^\circ\text{C}$). Die Bestimmung der Dichte erfolgte temperaturabhängig, so dass die aktuelle Dichte mit einer Unsicherheit von $0,00015\%$ entsprechend zur Temperatur bestimmt werden konnte (Abbildung 3.11).

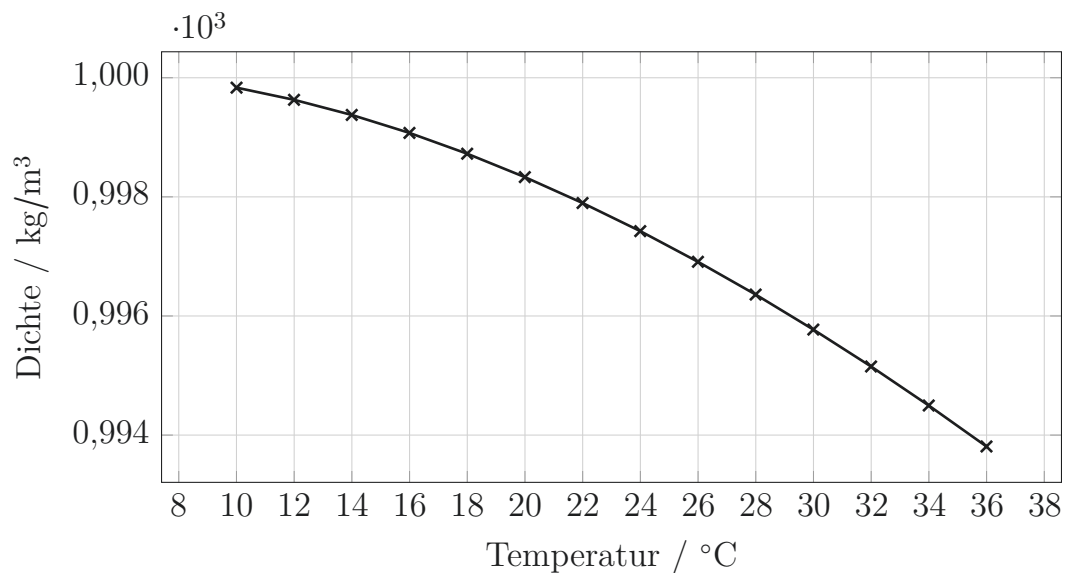


Abbildung 3.11: Temperaturabhängigkeit der Dichte der entnommenen Wasserprobe.

Der theoretische Volumenstrom Q_{theo} wurde nach Gleichung (3.2) unter der Annahme, dass der Durchflusskoeffizient und die Expansionszahl 1 sind, berechnet. Da keine weiteren Informationen vorliegen, wird diese Annahme getroffen. Dies bedarf weiterer Untersuchungen, es ist jedoch zu vermuten, dass beide Koeffizienten annähernd 1 sind. Die ermittelten Durchflüsse sind in Tabelle 3.1 dargestellt.

Die in Tabelle 3.1 aufgeführten Werte sind Mittelwerte aus fünf Wiederholungsmessungen je Kavitationsdüse. Zur Berechnung des theoretischen Durchflusses wird, aufgrund aktuell fehlender zuverlässiger Kenntnis des realen Innendurchmessers, der Nenndurchmesser der Düse verwendet. Es wurde eine mittlere Streuung der Messabweichung von $1,14\%$ bestimmt. Die Durchflussschwankungen innerhalb einer Messreihe betrugen im Mittel $0,0015\%$ vom mittleren Durchfluss. Die Abweichung vom gemessenen zum berechneten Durchfluss betrug im Mittel $1,27\%$. Gründe für diesen systematischen Unterschied zwischen

Tabelle 3.1: Ergebnisse der Einzelmessung der Kavitationsdüsen bei $\bar{P}_1 = 403 \pm 0,4 \text{ kPa}$ und $\bar{T} = 21,02 \pm 0,09^\circ\text{C}$. Die Temperatur ist der Mittelwert aus der Temperatur vor (T_1) und nach dem Prüfling (T_2).

Name	Durchmesser	Durchfluss		Abweichung
	nominell	Messung	Berechnung	
	d / mm	$Q / \text{l/h}$	$Q_{\text{theo}} / \text{l/h}$	
Düse #6	8,15	$5250,73 \pm 15,90$	5331,90	-1,52
Düse #5	5,60	$2489,03 \pm 3,56$	2513,53	-0,98
Düse #4	3,89	$1239,22 \pm 2,61$	1215,54	1,95
Düse #3	2,75	$619,30 \pm 0,20$	605,84	2,22
Düse #2	1,95	$312,64 \pm 0,04$	304,15	2,79
Düse #1	1,13	$104,72 \pm 0,19$	102,30	2,36

gemessenem und berechnetem Durchfluss sind u. a.:

- eine Abweichung vom realen zum nominellen geometrischen Durchmesser,
- die Wassereigenschaften (Partikelkonzentration, Dichte, ...) und
- ein noch nicht quantifizierbarer Effekt aufgrund des Vorhandenseins und Änderungen der Kavitationsgrenzschichtdicke δ .

Aufgrund des in Absatz 3.3.1 erläuterten quadratischen Zusammenhangs zwischen dem Volumenstrom und dem Halsdurchmesser können fertigungsbedingte Durchmesserabweichungen zu einer erheblichen Durchflussänderung führen. Ändert sich beispielsweise der nominelle Durchmesser einer 8,15 mm Düse um 0,01 mm, führt dies zu einer Durchflussänderung von 0,25 %. Diese Tatsache verdeutlicht die Notwendigkeit der Bestimmung der realen Düsengeometrie mit einer Genauigkeit von $\pm 1 \mu\text{m}$.

Verhalten der Düsen bei Parallelschaltung

Die geringen Durchflussschwankungen von 0,0015 % bei den in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen belegen das stabile Durchflussverhalten

für die einzelnen Düsen. Mit der Apparatur zur intermittierenden Durchfluss-erzeugung wurde das Durchflussverhalten der Düsen bei Parallelschaltung von einzelnen Kombinationen exemplarisch überprüft.

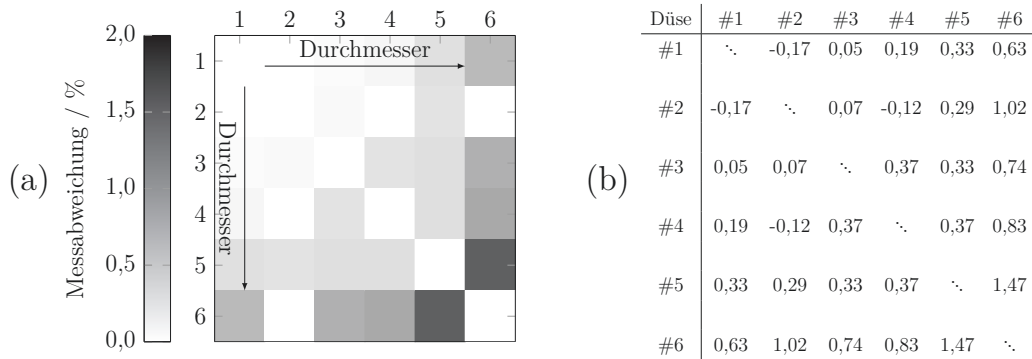


Abbildung 3.12: Messabweichung in % der berechneten und gravimetrisch ermittelten Durchflusskombinationen von zwei Düsen, basierend auf den Werten von Tabelle 3.1.

(a) Matrixplot.

(b) Darstellung der Wertepaare.

Hierbei wurde der Durchfluss der Kombinationen von Düsen, analog zu den Einzelmessungen aus Tabelle 3.1, gravimetrisch bestimmt. Zum Vergleich wurde der Durchfluss der Kombination aus den Einzelmessungen addiert und mit dem gemessenen Durchfluss der Kombination verglichen. Die berechneten Abweichungen sind in einer symmetrischen Matrix mit einer Null-Diagonalen in Tabelle 3.12 dargestellt.

Auffällig ist die zunehmende Messabweichung von bis zu 1,1 % für Kombinationen von Düsen mit größerem Halsdurchmesser. Schaltet man beispielsweise Düse #1 ($d = 1,13 \text{ mm}$) und Düse #3 ($d = 2,75 \text{ mm}$) zusammen, ergibt sich eine Abweichung von 0,05 %, bei einer Kombination von Düse #5 ($d = 5,60 \text{ mm}$) und Düse #6 ($d = 8,15 \text{ mm}$) hingegen eine Abweichung von 1,47 %. Eine Erklärung hierfür ist, dass es zu einem Druckverlust innerhalb der Rohrleitung aufgrund der zunehmenden Strömungsgeschwindigkeit kommt. Der Druckverlust beim Betrieb mit der Einzeldüse #6 liegt in der Größenordnung von ca. 10 kPa. Durch Hinzufügen der Düse #5 wird der Druckverlust verdoppelt. Des Weiteren besteht eine gewisse Wahrscheinlichkeit, dass mögliche Leckagen bei dem Verschluss der Düsen auftreten können. Die berechnete Abweichung des additiven Verhaltens der Düsen muss daher detaillierter untersucht wer-

den. Für die Untersuchungen des intermittierenden Betriebs wurde daher der Durchfluss der Kombinationen zuvor gravimetrisch bestimmt.

Die durchgeführten Untersuchungen bestätigen, dass die Kavitationsdüsen wesentliche Voraussetzungen wie:

- Wiederhol- und Reproduzierbarkeit der Messungen,
- Durchflussstabilität,
- schnelle Durchflusserzeugung,

für eine Messtechnikinfrastruktur, mit der Prüfprozesse nahe der Realität entwickelt und durchgeführt werden können, erfüllen.

4 Entwicklung eines Algorithmus zur Erstellung repräsentativer Durchflussprofile

4.1 Allgemein

Die technischen Voraussetzungen zur Prüfung von Wasserzählern unter realitätsnahen Bedingungen sind durch die Verwendung von Kavitationsdüsen erfüllt. Um eine dynamische Prüfung von Durchflussmessgeräten durchzuführen sind des Weiteren Prüfprofile notwendig. Die Profile müssen charakteristische Verbräuche realitätsnah abbilden, statistisch abgesichert und validiert sein. Anhand dieser Anforderungen wird eine Methodik entwickelt um Prüfprofile computergestützt zu generieren. Ein Prüfprofil kann als definierte Durchflussänderungen über eine bestimmte Messzeit, für die Prüfung von Durchflussmessgeräten, bezeichnet werden.

Die Datenbasis hierfür lieferte das DVGW-Forschungsprojekt von Martin et al. (2017). Wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben, wurde in 211 Objekten deutschlandweit verteilt der zeitliche Wasserverbrauch ermittelt. Auf Basis dieser Daten wurde der Algorithmus zur Erstellung stochastisch gesicherter Prüfprofile entwickelt. Da die verwendeten Zähler zuvor nicht dynamisch geprüft werden konnten, sind die Daten von Beginn an mit einer derzeit nicht näher spezifizierbaren Unsicherheit behaftet.

4.2 Datenbasis

Die 211 untersuchten Objekte teilen sich in Haushalte, Bildungseinrichtungen, Bürogebäude, Gesundheitseinrichtungen und Hotels auf (Abbildung 4.1). Bei der Entwicklung des analytischen Prüfkonzepthes wurden Objekte untersucht, die ähnliche Metaparameter aufweisen. Dazu zählen u. a. die eingesetzte Zählergröße und das Vorhandensein von Kleingewerbe.

Die insgesamt 179 untersuchten Wohngebäude setzen sich aus Ein-, Mehrfamilienhäusern und Wohnhausanlagen zusammen. In jedem dieser Objekte befand sich entweder ein Zähler der Größe $Q_3:4\text{ m}^3/\text{h}$, $Q_3:7,5\text{ m}^3/\text{h}$ oder $Q_3:10\text{ m}^3/\text{h}$. Die größte Gruppe sind 73 Wohngebäude, welche mit einem $Q_3:4\text{ m}^3/\text{h}$ R160 Wasserzähler gemessen wurden. Da die in Deutschland hauptsächlich verbauten Hauswasserzähler die Größe $Q_3:4\text{ m}^3/\text{h}$ haben wurde diese Gruppe für die Entwicklung des Algorithmus ausgewählt.

Diese Datengrundlage verringerte sich nochmals auf 58 Objekte, da sich bei der Analyse Fehler in 15 Datenreihen zeigten. Zum einen wiesen einige Objekte größere Verbrauchslücken von einigen Tagen auf, zum anderen wurden technisch nicht mögliche Durchflüsse festgestellt. Diese 15 fehlerhaften Datenreihen müssen von der Betrachtung im Folgenden ausgeschlossen werden, um eine Vergleichbarkeit der Datenreihen zu gewährleisten.

Bei den 58 Objekten traten große Unterschiede bezüglich Nutzungseinheiten und Messzeiten auf. Es gab sowohl Objekte mit einer Nutzungseinheit (NE) wie z. B. Einfamilienhäuser (1 NE) als auch mit mehreren NE wie Wohnhausanlagen (bis zu 44 NE). Die Messzeiten der Objekte lagen zwischen 23 und 84 Tagen. Die Detailmesszeiten sind in Anhang B.1 aufgelistet. Die Messzeit bei über 90 % der Objekte war ≥ 30 Tage. Daraus ergibt sich ein Median von 63 Tagen (Abbildung 4.2). Die in der hier vorliegenden Arbeit analysierte Datenreihen sind hinsichtlich Messzeit, periodischer Schwankungen und Nutzungseinheiten divers. Aufgrund dieser Diversität kann die Summe der Datenreihen als repräsentativ angesehen werden.

Die Rohdaten sind äquidistante Zeitreihen mit einer Auflösung von einer Sekunde. Es wurde der Durchfluss in Liter pro Sekunde aufgezeichnet. Aufgrund datenschutzrechtlicher Vereinbarungen sind weitere Metaparameter

der Objekte der PTB nicht bekannt. Für eine effiziente Analyse der Datenreihen wurden diese zunächst transformiert und komprimiert, was im folgenden Kapitel erläutert wird.

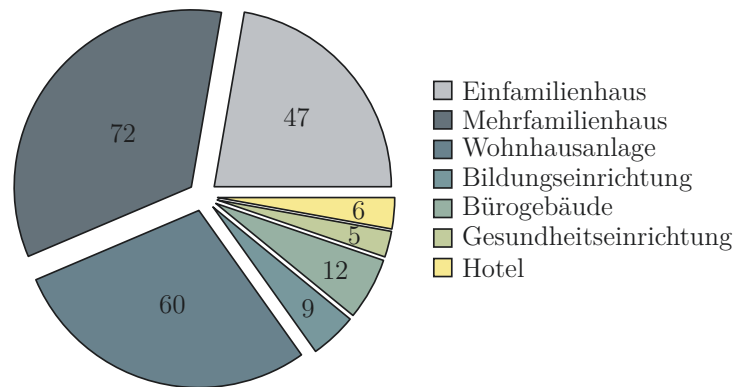


Abbildung 4.1: Aufteilung der untersuchten Objekte inkl. Anzahl der gemessenen Datenreihen (Martin et al., 2017).

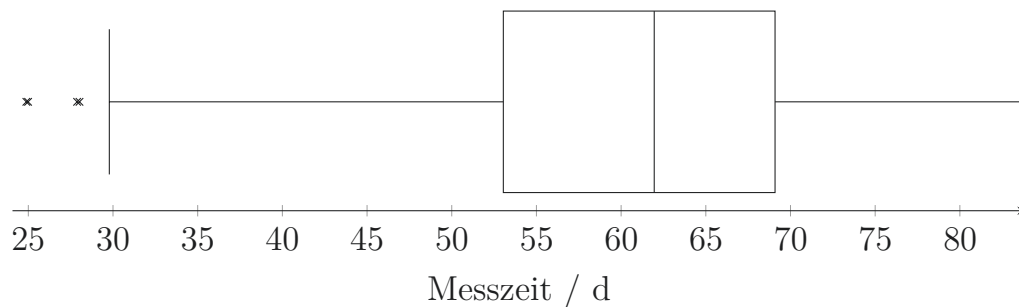


Abbildung 4.2: Boxplot der Messzeiten der analysierten Objekte.

4.3 Transformation und Reduktion

Die Bearbeitung und Verarbeitung der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Daten erfolgte mittels der statistischen Software R (Team, 2008) und der Frontend-GUI R-Studio (Team, 2015). Die vom DVGW TZW übergebenen Daten sind bereits verarbeitet und befinden sich in einem xts-Zeitreihenformat (Ryan und Ulrich, 2018). Dieses Zeitreihenformat enthält einen Durchflusswert für jede Sekunde des Messzeitraumes (Anhang B.2).

Die erste Stufe der Bearbeitung ist die Reduzierung der Datenmenge ohne Werteverlust. Dabei wird eine Lauflängenberechnung der Durchflussereignis-

se durchgeführt und mit dem entsprechenden Zeitstempel des Durchflusses, der Dauer des Durchflusses in Liter pro Stunde und des Wochentages als Datentabelle (Dowle und Srinivasan, 2018) abgespeichert (Anhang A.2). Nach Durchlaufen der Komprimierungsfunktion aus A.2 haben die Daten die in Tabelle 4.1 dargestellte Form. Diese Komprimierung führt zu einer Reduzierung des nötigen Speicherbedarfs auf ca. 1/10. Anschließend wurden die Datenreihen simultan ausgewertet.

Tabelle 4.1: Beispiel für eine komprimierte Datenreihe der Tabelle aus Anhang B.2.

Zeitstempel	Durchfluss	Dauer	Wochentag
	Q / l/h	t / s	
2016-02-11 09:44:57	536,4	1	Donnerstag
2016-02-11 09:44:58	514,8	1	Donnerstag
2016-02-11 09:44:59	529,2	1	Donnerstag
2016-02-11 09:45:00	536,4	1	Donnerstag
2016-02-11 09:45:01	554,4	1	Donnerstag
2016-02-11 09:45:02	567,0	2	Donnerstag
2016-02-11 09:45:04	0,0	6	Donnerstag
2016-02-11 09:45:10	270,0	2	Donnerstag

4.4 Analyse der Verbrauchsdaten

4.4.1 Vorgehensweise und Zielstellung

Die Analyse der Daten erfolgte ohne die Berücksichtigung der Metadaten wie bspw. des Wochentages oder des Datums. Der Fokus lag nicht auf der Identifizierung etwaiger saisonaler Schwankungen unterschiedlicher Auflösungen, sondern auf den Durchflussereignissen. Durchflussereignisse können durch folgende Parameter charakterisiert werden:

- die Durchflussänderungsraten,
- die Dauer von keinerlei Entnahmen (sog. Null-Durchflüsse),

- die Dauer der Durchflussereignisse und
- die Häufigkeit der auftretenden Durchflussereignisse bestimmter Amplitude.

Nachfolgend werden die Parameter und die Ergebnisse aus den Analysen näher erläutert. Die Ergebnisse bilden die Basis für die Entwicklung eines Algorithmus zur Erzeugung stochastisch gesicherter Prüfprofile.

4.4.2 Änderungsraten des Durchflusses

Für die Berechnung der Änderungsraten des Durchflusses wurden alle 9.832.218 Durchflussänderungen betrachtet. Es handelt sich hierbei um 887.010 Null-Durchfluss-Ereignisse und 887.009 Einzel- bzw. Multi-Amplituden-Ereignisse. Ein Beispiel für ein Multi-Amplituden-Ereignis ist in Abbildung 4.3 a) dargestellt. Diese Art Ereignis ist durch sich ändernde Durchflussamplituden ohne vorangegangenen Null-Durchfluss gekennzeichnet. Abbildung 4.3 b) zeigt die gesamten relativen Änderungsraten der betrachteten Objekte in $l/(h \cdot s)$. Erkennbar ist die hohe Anzahl (> 1 Million) von sehr kleinen Durchflussänderungen von $1 l/h$. Diese hohe Anzahl erklärt sich, wenn beispielsweise das Multi-Amplituden-Ereignis näher betrachtet wird.

Ab einer Durchflussdauer von 20 Sekunden treten nur geringe Durchflussschwankungen auf, welche auf die Messstabilität des Wasserzählers zurückgeführt werden können. Diese kurzzeitigen Schwankungen werden jedoch als Betrag in der Berechnung der relativen Änderung mit berücksichtigt. Das heißt, es treten sehr viele kleine Durchflussänderungen auf, welche bei der Berechnung der mittleren Dauer ausgemittelt werden.

Hauptsächlich treten Durchflussänderungen unterhalb von $2.000 l/h$ auf. In nur etwa 30 Fällen gibt es Durchflusssprünge, die größer als $4.000 l/h$ sind. Dies entspricht $0,003 \%$ der gesamten Durchflussänderungen. Das heißt, Durchflusserhöhungen von Null auf $> 4000 l/h$ sind bei den Messungen kaum aufgetreten.

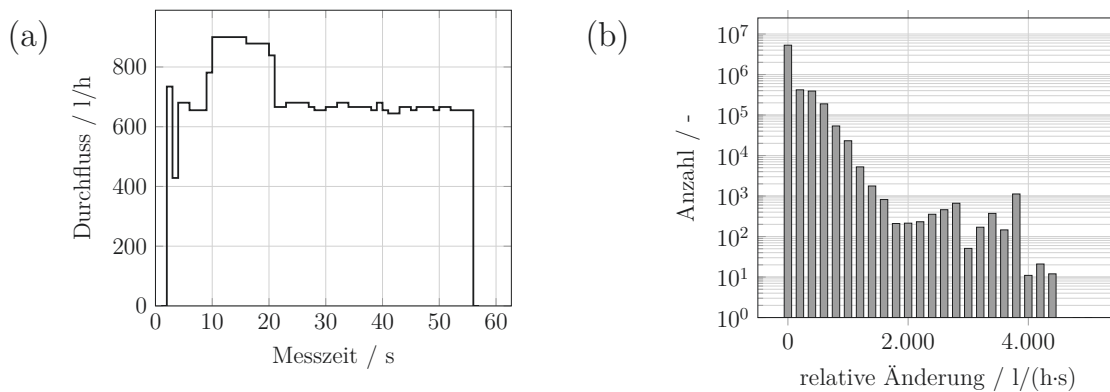


Abbildung 4.3: (a) Exemplarisches Multi-Amplituden-Ereignis.
(b) Relative Änderungsrate des Durchflusses über alle analysierten Datenreihen.

4.4.3 Null-Durchflüsse

Die Analyse der Null-Durchflüsse zeigt, dass mit steigenden Nutzungseinheiten eine Reduzierung der Dauer des Nulldurchflusses stattfindet (Abbildung 4.4). Diese Konsequenz folgt bedingtermaßen, da sich bei steigenden Nutzungseinheiten auch tendenziell mehr Bewohner im Gebäude befinden, und so die Anzahl gleichzeitiger Entnahmeereignisse steigt. Abbildung 4.4 zeigt einen Auszug der Ergebnisse der analysierten Datenreihen.

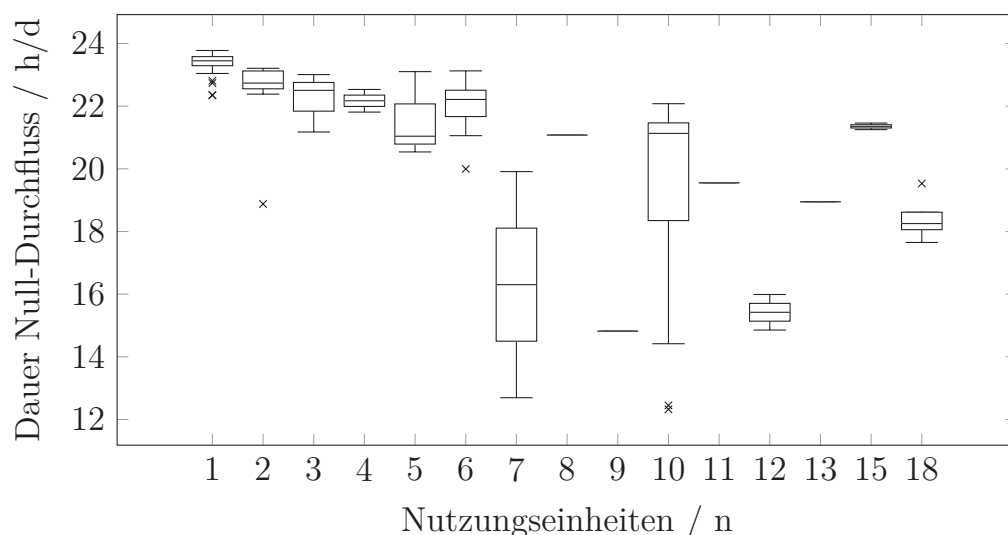


Abbildung 4.4: Boxplots der Dauer der Null-Durchflüsse für die jeweiligen Nutzungseinheiten. Auszug aus den Datenreihen.

4.4.4 Häufigkeit der Entnahmeereignisse

Die Basis für die Entwicklung des Algorithmus ist die Häufigkeit der auftretenden Durchflussereignisse. Dazu werden die Wahrscheinlichkeitsdichten der einzelnen Datenreihen berechnet und gegenübergestellt. Für die Berechnung der Wahrscheinlichkeitsdichten (Dichtefunktionen) muss eine Glättungsbandbreite bestimmt werden. Im ersten Schritt wird für jede Datenreihe eine ideale Bandbreite abgeschätzt und die Dichte berechnet. Diese ideale Bandbreite berechnet sich aus der Standardabweichung der Kernfunktion der Datenreihe (Team, 2008). Um eine Vergleichbarkeit für die Analyse herzustellen, wird der Median aus allen ermittelten Glättungsbandbreiten der Datenreihen als Bandbreite zur Berechnung verwendet. Dieser beträgt 16,65 l/h.

Abbildung 4.5 verdeutlicht die hohe Diversität der Daten anhand von 3 Beispieldatenreihen. Die Grafik untermauert ebenfalls, dass eine ausreichende Anzahl an Datenreihen sicherzustellen ist, um stochastisch gesicherte, repräsentative Prüfprofile zu erzeugen. Aufgrund der in Kapitel 4.2 beschriebenen Erläuterung ist in der vorliegenden Arbeit von einer statistisch sicheren Menge an Datenreihen auszugehen. Die Verläufe und Amplituden der Beispieldatenreihen sind verschieden. Es zeichnen sich jedoch gemeinsame Durchflussschwerpunkte ab, wie bspw. die Null-Durchflüsse und ein lokales Maximum bei ca. 147 l/h.

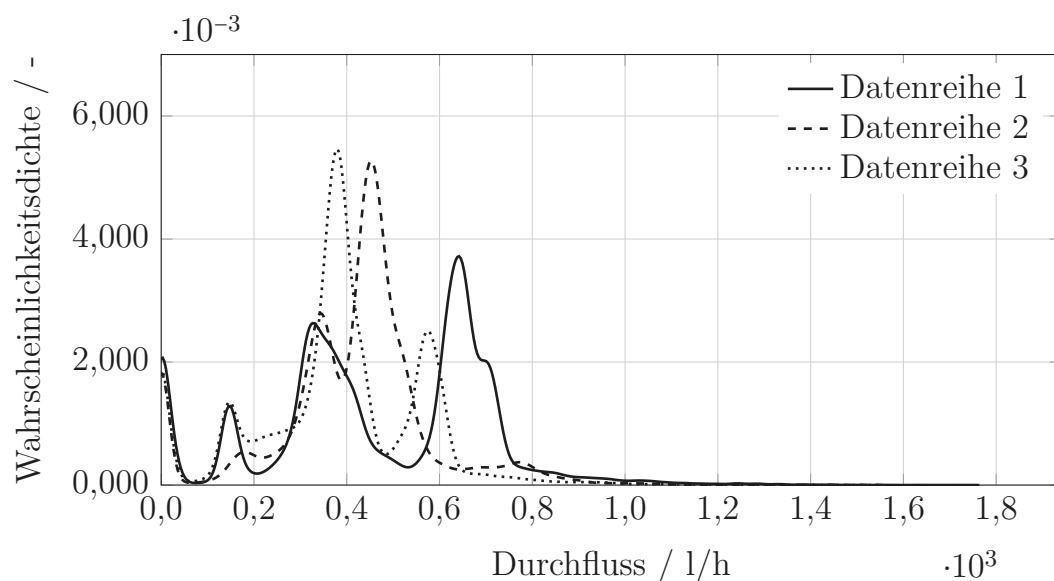


Abbildung 4.5: Wahrscheinlichkeitsdichten von 3 Beispieldatenreihen mit einer Glättungsbandbreite von 16,65 l/h.

Bei der Untersuchung der Wahrscheinlichkeitsdichten ist die kumulierte Verteilungsfunktion oder auch Summenfunktion ein zentrales Konzept. Aufgrund des Korrespondenzsatzes kann jeder Verteilungsfunktion eine Wahrscheinlichkeitsverteilung zugeordnet werden. Durch die Normierung der Verteilungsfunktion lassen sich unterschiedliche Wahrscheinlichkeitsdichten miteinander vergleichen. Da es sich um eine diskrete Verteilung handelt, ist die Darstellung der Ergebnisse als Treppenfunktion (Abbildung 4.6) notwendig.

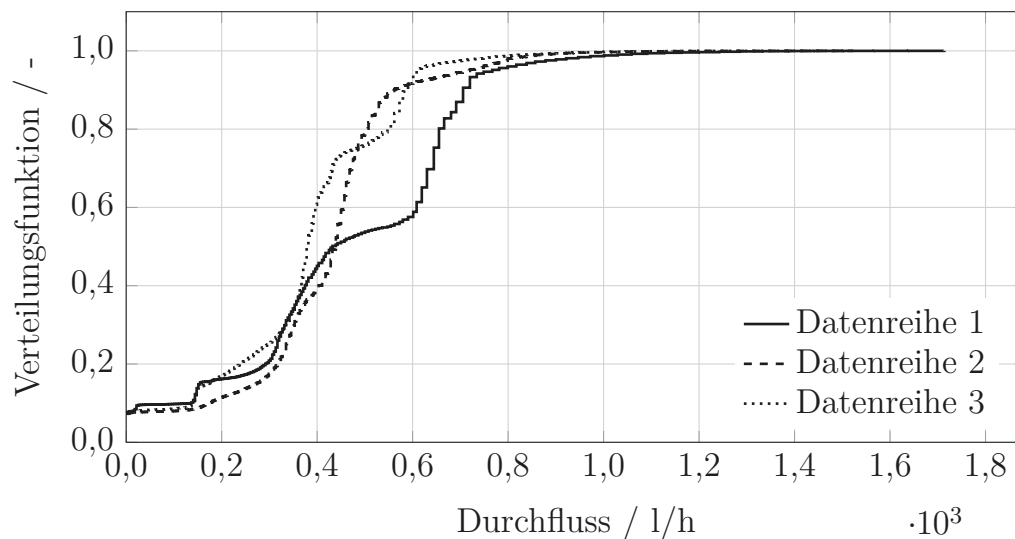


Abbildung 4.6: Kumulierte Verteilungsfunktion der 3 Beispieldatenreihen.

Die Abbildung 4.7 zeigt alle empirischen kumulativen Verteilungsfunktionen der analysierten Datenreihen. Zusätzlich sind die Prüfpunkte Q_1 bis Q_4 eingezeichnet. Es zeigt sich, dass 95 % aller Durchflüsse unterhalb von ca. 1.200 l/h auftreten und damit fernab des Nenndurchflusses von 4.000 l/h für $Q_3 : 4 \text{ m}^3/\text{h}$ R160 sind.

Aufgrund der Repräsentativität der Datenreihen wird davon ausgegangen, dass alle erfassten Durchflussänderungen realen Ereignissen entsprechen. Es wird ein Vertrauensband gewählt, welches alle Werte einschließt und somit die Grundgesamtheit repräsentiert. Die Grenzen des Vertrauensbandes werden durch die maximalen und minimalen Werte der Verteilungsfunktion für jeden einzelnen Durchflusspunkt beschrieben (Abbildung 4.8). Für eine etwaige spätere vereinfachte Verwendung der Daten in idealisierter Form wird die Beschreibung der Daten durch eine mathematische Funktion überprüft.

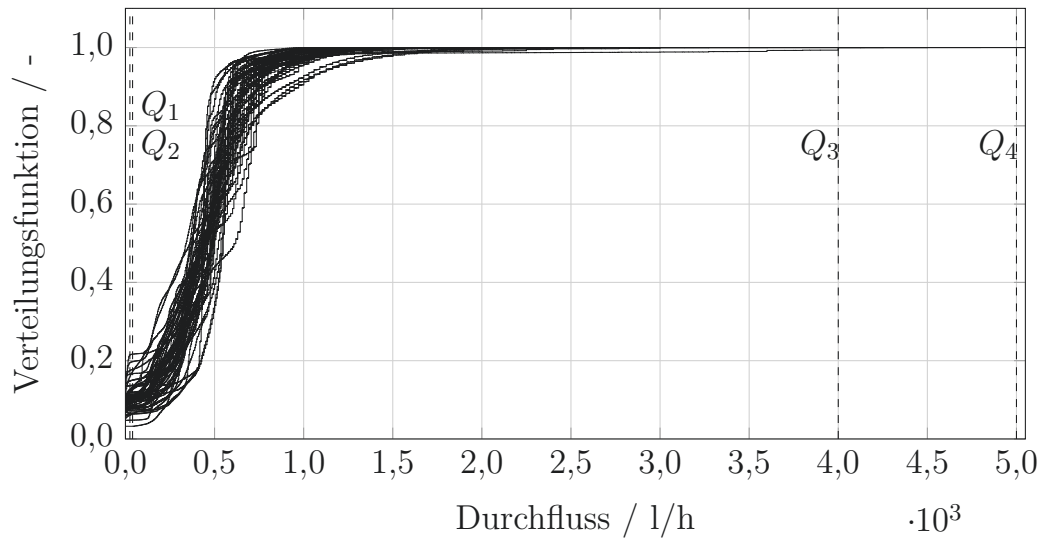


Abbildung 4.7: Kumulierte Verteilungsfunktionen aller analysierten Datenreihen mit den Prüfpunkten:
 Q_1 : 25 l/h, Q_2 : 40 l/h,
 Q_3 : 4.000 l/h, Q_4 : 5.000 l/h.

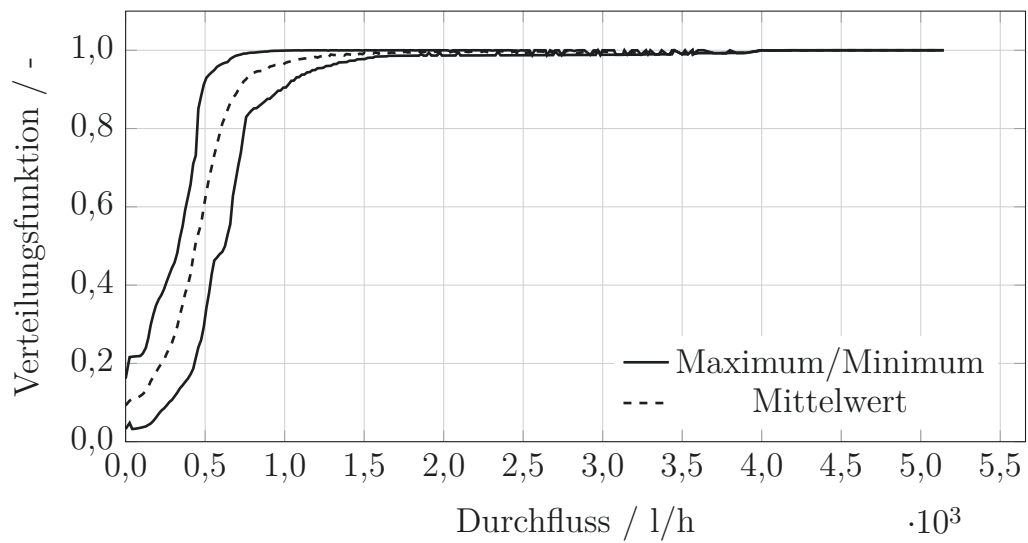


Abbildung 4.8: Vertrauensband der Messobjekte mit der mittleren Verteilungsfunktion.

4.4.5 Regressionsanalyse der Datenreihen

Die empirisch ermittelten Daten gleichen einer Sigmoidfunktion. Aus diesem Grund wurde die Beschreibung der Datenreihen durch zwei Arten dieses Funktionstyps getestet. Die Grundgleichungen der beiden Funktionen sind:

$$\text{Weibull : } f(x) = a - (a - b) \cdot e^{-(k \cdot x)^d}, \quad (4.1)$$

$$\text{Tangenshyperbolicus : } f(x) = a + b \cdot 0,5 \cdot \left[1 + \tanh\left(k \cdot \log\left(\frac{x}{d}\right)\right) \right] \quad (4.2)$$

mit den in Tabelle 4.2 aufgelisteten Parametern.

Tabelle 4.2: Parameter der Regressionsfunktionen aus Gleichung 4.1 und Gleichung 4.2

Parameter	Gleichung 4.1	Gleichung 4.2
a	0,9886294	0,1324540
b	0,1100667	0,8657230
k	6,8480423	2,2465983
d	2,8801072	0,1282940

Das Bestimmtheitsmaß beträgt 0,9993057 für die Weibull-Funktion und 0,9986701 für den Tangens hyperbolicus. Abbildung 4.9 zeigt beide Funktionen im Vergleich zur empirisch ermittelten Mittelwertkurve. Es wurde nur der Durchflussbereich $< 1200 \text{ l/h}$ abgebildet, da dies der hauptsächliche Durchflussbereich ist. Die Abbildung 4.10 zeigt die Residuen zur Mittelwertkurve ebenfalls für den Hauptdurchflussbereich.

Die Betrachtungen zeigen, dass die Verwendung einer beschreibenden Funktion für die weitere Vorgehensweise zur Folge hätte, dass eine Vielzahl an Durchflusswerten aufgrund der Idealisierung ausgeschlossen wird. Dies widerspricht der getroffenen Annahme, dass alle Durchflusswerte als repräsentativ angesehen werden müssen. Aus diesem Grund sind allein die empirisch ermittelten Daten die Basis des Algorithmus.

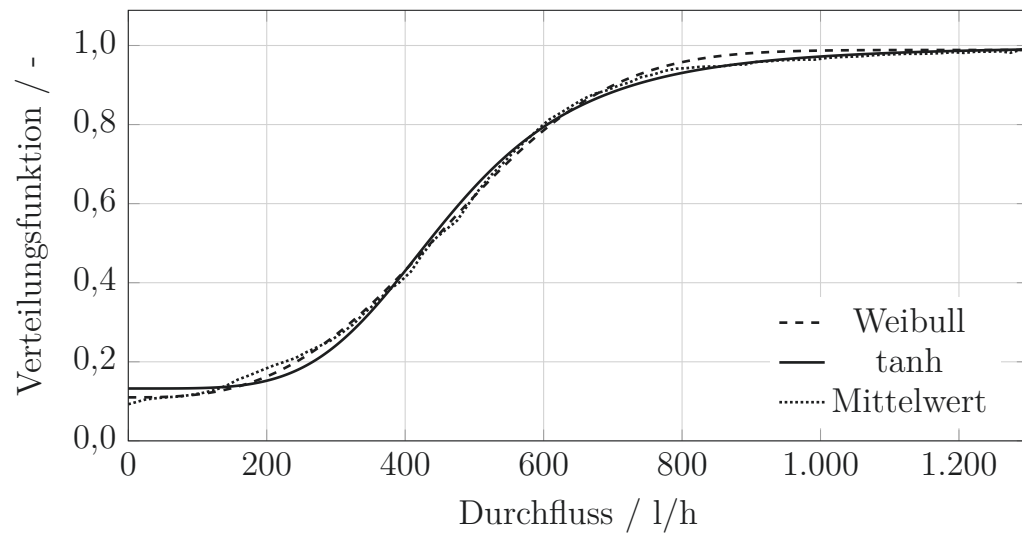


Abbildung 4.9: Beschreibung der ermittelten Datenreihen durch eine Weibull- und Tangens hyperbolicus-Funktion (Ausschnitt).

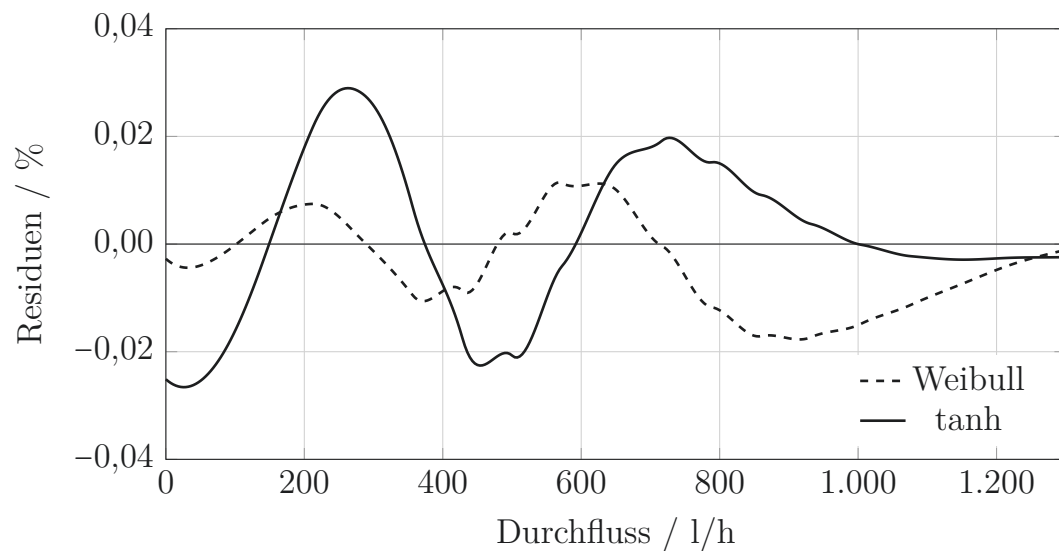


Abbildung 4.10: Residuen der Funktionsgleichungen zu der mittleren Verteilungsfunktion (Ausschnitt).

4.4.6 Dauer der Entnahmeereignisse

Analog zur Häufigkeit der Durchflussereignisse wurde auch die Dauer der Entnahmeereignisse mit der Klassenbreite aus Kapitel 4.4.4 analysiert. Dazu wurde der Durchfluss der Datenreihen insgesamt in 310 Intervalle unterteilt. Die Anzahl der Intervalle ergibt sich aus dem maximal aufgetretenen Durchfluss geteilt durch die Klassenbreite, was 309 Klassen entspricht. Zusätzlich wurde Null-Durchfluss als eigene Klasse gewertet. Anschließend wurde für jede Klasse die jeweilige Wahrscheinlichkeitsdichte berechnet und überprüft, ob eine Wahrscheinlichkeitsverteilung zugrunde lag. Dies war nicht der Fall.

Ohne die Einteilung in Klassen ergibt sich die in Abbildung 4.11 dargestellte Wahrscheinlichkeitsdichte. Ähnlich zu den Änderungsraten der Durchflüsse sind die zweithäufigsten Zeitspannen eine Sekunde lang. Das erklärt sich, wie in Abbildung 4.3 dargestellt, durch die Intervallzeit der Auflösung des Zählers und der Messstabilität des Wasserzählers. Es kann ebenfalls festgestellt werden, dass 99 % aller Ereignisse unterhalb von 50 Sekunden liegen.

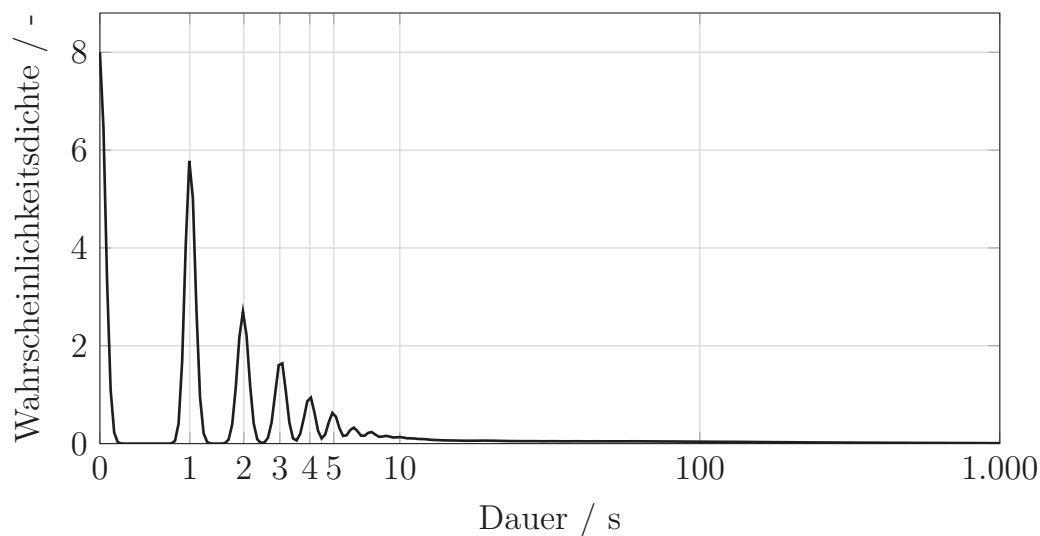


Abbildung 4.11: Wahrscheinlichkeitsdichten der Dauer der Durchflussereignisse.

Da sich keine Verteilung der Durchflussdauer ermitteln ließ, wurde für jeden auftretenden Durchflusswert die mittlere Dauer berechnet. Diese Mittelung der Datenreihen relativiert die kurzen Entnahmezeiten von einer Sekunde.

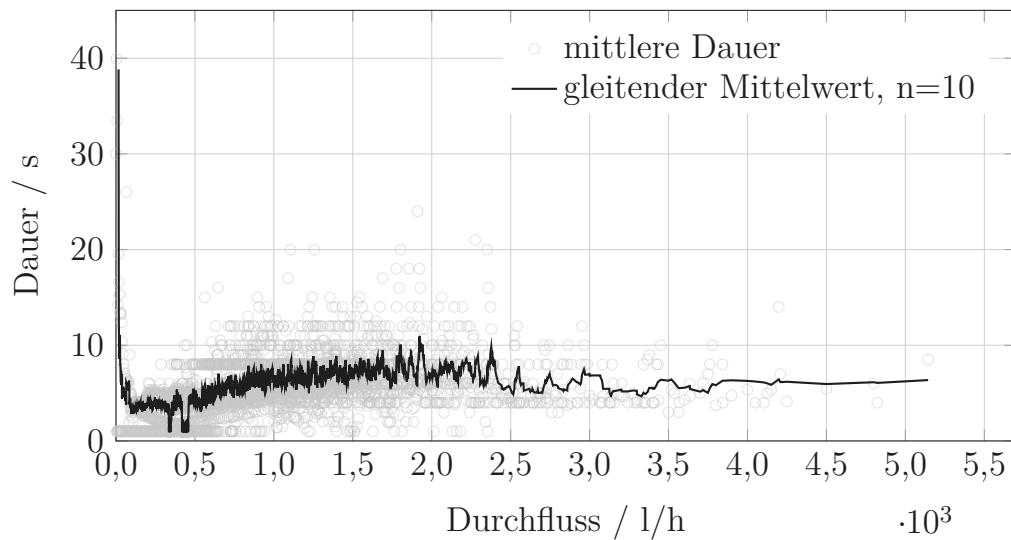


Abbildung 4.12: Mittlere Dauer der Durchflussereignisse.

Abbildung 4.12 zeigt die mittlere Dauer im Intervall von 3,6 l/h und einem gleitenden Mittelwert der Daten. Das Intervall von 3,6 l/h ergibt sich aus der maximalen Auflösung des Durchflusses innerhalb der Zeitreihen (0,001 l/s).

Die Berechnung der mittleren Dauer und die Erstellung des Vertrauensbandes ermöglichen es, computergestützt und stochastisch abgesichert Modellsequenzen zu entwickeln.

4.5 Bildung von computergestützten Modellsequenzen

Um eine stochastisch gesicherte Bildung von Durchflusssequenzen aus den analysierten Verbrauchsdaten zu erhalten, werden Zufallszahlen generiert. Die Erzeugung von Zufallszahlen ist eine zufällige Auswahl von Werten zwischen 0 und 1. Dabei werden bei der technischen Umsetzung der Zufälligkeit keine echten Zufallszahlen, sondern deterministische Zahlenfolgen verwendet (Waldmann und Helm, 2016). Diese Pseudozufallszahlen werden nach einem festen, reproduzierbaren Verfahren erzeugt. Somit kann es zu Mustern oder Dopplungen kommen (Heilman et al., 2019). Die Verwendung von Pseudozufallszahlen für die Generierung von Verschlüsselungen ist somit mangelhaft, jedoch für die Generierung von Durchflussereignissen hinreichend. Eine

mögliche Dopplung oder die Erzeugung von Mustern entspricht dem Wasserverbrauchsverhalten in einem Haushalt, da auch hier der Wasserverbrauch durch technische Entnahmeeinrichtungen begrenzt ist und somit Muster oder Dopplungen auftreten können.

Die Ziehung der Pseudozufallszahlen aus der in Abbildung 4.8 dargestellten Mittelwertkurve als Grundgesamtheit erfolgt auf Basis der Inversionsmethode. Diese Zufallsverteilung basiert auf der Zuordnung einer Zufallszahl z zu einer nichtgleichverteilten Zufallsvariable X , im konkreten Fall der Wahrscheinlichkeit des eintretenden Durchflusses (Waldmann und Helm, 2016). Es ist ein Simulationsverfahren, welches aus Zufallszahlen andere Wahrscheinlichkeitsverteilungen erzeugt und häufig bei diskreten Verteilungen angewandt wird. Die ermittelte mittlere empirische Verteilungsfunktion F der Zufallsvariable X (Durchfluss) ist eine monoton wachsende, diskrete Funktion. Ist z eine Zufallszahl zwischen 0 und 1 und X eine diskrete Zufallsvariable, welche die Werte $\{x_0, x_1, \dots, x_n\}$ annehmen kann, dann ist x_n der kleinste Wert von X für den Fall $F(x_n) \geq z$. Allgemein lässt sich die diskrete Verteilungsfunktion durch

$$F(x) = \sum_{j=1}^i p_j \quad \text{für} \quad x_i \leq x \leq x_{i+1}, i \in \{1, \dots, N\}, \quad (4.3)$$

beschreiben.

Abbildung 4.13 verdeutlicht diese Vorgehensweise. Dabei sind p_i die entsprechenden Wahrscheinlichkeiten der Durchflussereignisse x_i .

Für die Ermittlung der Zufallszahlen wird die in R hinterlegte `sample()` Funktion genutzt. Diese wird innerhalb einer eigens für die vorliegende Arbeit

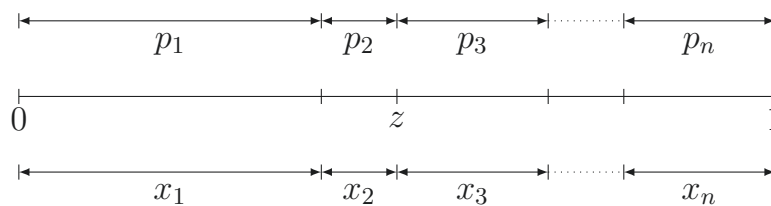


Abbildung 4.13: Inversionsmethode bei diskreter Zufallsvariable (Waldmann und Helm, 2016).

entwickelten Funktion aufgerufen. Dabei steht gtc für „generating testprofiles for calibration“.

```
gtc <- function(n="Stichprobengröße"){
  rdm <- data.table(
    time=rep(1:n, 1),
    meanProb =
      sample(
        x = root[,meanProb],
        size = n,
        replace = TRUE,
        prob = root[,single],
      )
  )
  basis <- join(rdm, root, by="meanProb")
  basis <- basis[,flow,meanProb]

  basis.dauer <- join(basis, dauer, by="flow")
  set( basis.dauer,
    i = NULL,
    "cumTime",
    cumsum(basis.dauer[,duration]))

  return(basis.dauer)
}
```

Der Funktion wird eine Stichprobengröße `n` übergeben, die der Anzahl an gewünschten Durchflussereignissen entspricht. Es wird innerhalb der Funktion eine Datentabelle erzeugt, bei der `time` eine Laufvariable für die Zeilenanzahl der Stichprobentabelle ist. Die Ziehung der Pseudozufallszahlen wird unter der Variable `meanProb` abgespeichert. Für die Pseudozufallszahlenziehung wird die kumulierte Summenfunktion der Häufigkeiten der Durchflussereignisse verwendet (Abbildung 4.8), welche als `root` bezeichnet wird. Die Indizierung der `root`-Datentabelle `meanProb` entspricht der mittleren Wahrscheinlichkeit der auftretenden Durchflüsse. Die Option `replace=TRUE` ermöglicht es, der Funktion Dopplungen von Zufallszahlen zuzulassen. Zusätzlich dazu wird der

Zufallsziehung eine Wichtung zugeordnet, die den Einzelwahrscheinlichkeiten der kumulierten Verteilungsfunktion entspricht. Ein Auszug aus der **root**-Tabelle ist in Tabelle 4.3 dargestellt.

Tabelle 4.3: Auszug der **root**-Datentabelle zur Generierung der Pseudozufallszahlen.

flow	meanProb	minProb	maxProb	single
l/s	%	%	%	%
0,000	0,1073282	0,04302572	0,1909130	0,107328185
0,001	0,1069481	0,04252008	0,1917760	0,000380095
0,002	0,1066257	0,04204778	0,1926974	0,000322389
0,003	0,1063606	0,04160868	0,1936767	0,000265060
0,004	0,1061525	0,04120265	0,1947134	0,000208108
0,005	0,1060010	0,04082956	0,1958068	0,000151530
0,006	0,1059057	0,04048930	0,1969565	0,000095330

Anschließend wird über die **join()**-Funktion die erstellte Datentabelle mit der mittleren Wahrscheinlichkeit der originären Tabelle verschnitten. Der gezogenen Stichprobe wird nun noch die mittlere Dauer der entsprechenden Durchflüsse mittels **join** zugeordnet. Die so entstandene Tabelle enthält **n**-Stichproben mit der mittleren Wahrscheinlichkeit **meanProb** und der mittleren Dauer der Ereignisse. Abschließend werden die Dauern der Stichproben mittels **cumsum()** kumuliert, um einen zeitabhängigen Verlauf der Durchflüsse zu erhalten. Das Ergebnis ist ein Durchflussprofil auf Basis der empirisch ermittelten Daten. Beispielhaft wurde die Funktion mit **n=18** durchgeführt und das Ergebnis in Abbildung 4.14 und die Wertepaare in Tabelle 4.4 dargestellt.

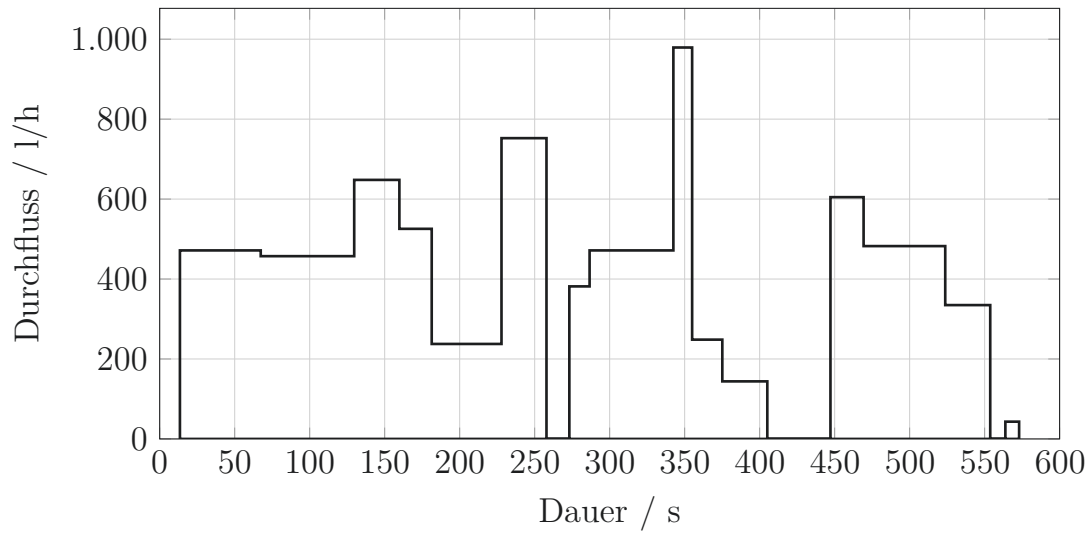


Abbildung 4.14: Generiertes Durchflussprofil mittels `gtc`-Funktion.

Tabelle 4.4: Wertetabelle des generierten Prüfprofils erstellt mittels `gtc`-Funktion.

n	flow	meanProb	duration	cumTime	n	flow	meanProb	duration	cumTime
-	l/h	%	s	s	-	l/h	%	s	s
1	471,6	0,5640	13,497	13,497	10	979,2	0,9705	55,858	342,487
2	457,2	0,5329	53,874	67,371	11	248,4	0,2110	12,511	354,998
3	648	0,8575	62,326	129,697	12	144	0,1351	20,121	375,119
4	525,6	0,6694	30,118	159,815	13	0,0	0,1073	30	405,119
5	237,6	0,2012	21,558	181,373	14	604,8	0,8029	42,095	447,214
6	752,4	0,9292	46,517	227,89	15	482,4	0,5869	22,095	469,309
7	0,0	0,1073	30	257,89	16	334,8	0,3136	54,432	523,741
8	381,6	0,3879	15,242	273,132	17	0,0	0,1073	30	553,741
9	471,6	0,5640	13,497	286,629	18	43,2	0,1064	10,092	563,833

Jede Ausführung des Algorithmus hat zur Folge, dass ein neues Profil erzeugt wird. Beispielhaft wurde dies mit einer Stichprobe von $n=18$ dreimal wiederholt. Die entsprechenden Profile sind in Abbildung 4.15 dargestellt.

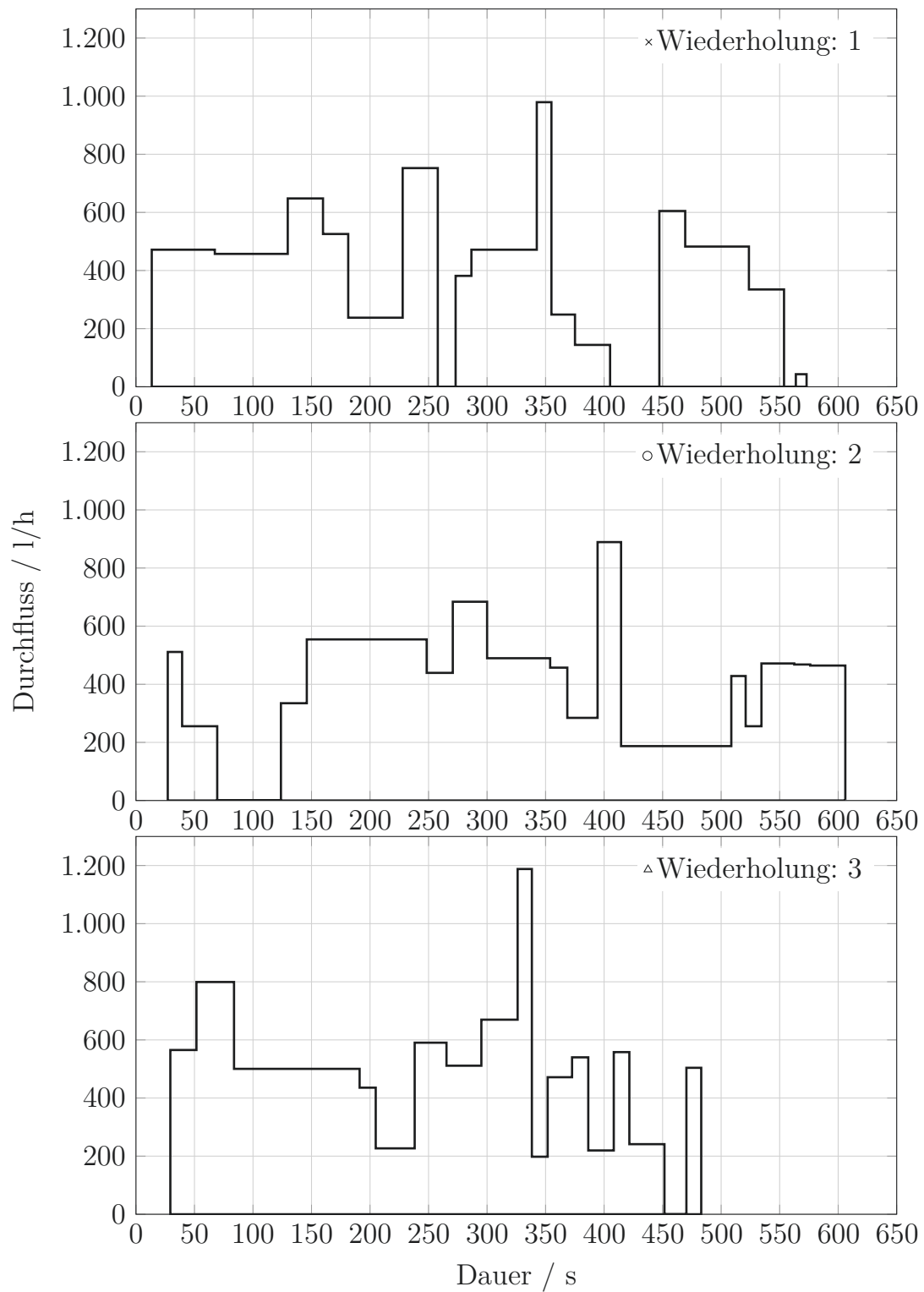


Abbildung 4.15: Wiederholung der gtc-Funktion mit $n=18$ Durchflusspunkten und Darstellung der generierten Profile.

4.6 Zusammenfassung

Die Daten des DVGW-Projektes zur Aktualisierung von Verbrauchsganglinien Martin et al. (2017) bilden die Grundlage der in der hier vorliegenden Arbeit entwickelten Algorithmus. Anhand der äquidistanten Zeitreihen lassen sich Grundanforderungen für die Erstellung stochastisch gesicherter Prüfprofile ableiten. Diese Anforderungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Es ist notwendig, dass eine statistisch sichere Menge an Datenreihen als Datenbasis zur Verfügung steht. Dabei ist die Einheitlichkeit der Objekte bei Metaparametern, wie z. B. Wasserzählergröße zu gewährleisten.
- Bei den aufzuzeichnenden Daten ist eine minimale zeitliche Auflösung von mindestens einer Sekunde unabdingbar. Es wird der Wasserverbrauch oder der Durchfluss gespeichert. Die Auflösung des zu erfassenden Durchflusses bzw. Volumens beträgt $\leq 100 \text{ ml/Impuls}$.
- Des Weiteren ist eine ausreichende lange Messzeit der Daten von ≥ 30 Tagen unumgänglich.

Sind alle angeführten Anforderungen erfüllt, ist die Datengrundlage für die Erstellung des Algorithmus zur Erzeugung stochastisch gesicherter Prüfprofile, für den in dieser Arbeit diskutierten Anwendungsfall bereitgestellt. Anschließend können mit der in Kapitel 4.4 beschriebenen Vorgehensweise die Daten analysiert werden. Abbildung 4.16 fasst die Vorgehensweise schematisch zusammen.

Grundlegendes Konzept ist die Erstellung der kumulierten Verteilungsfunktionen der Daten. Es entsteht ein empirisch ermitteltes Verteilungsband. Anschließend erfolgt die Ziehung von Zufallszahlen für das mittlere empirische Band (Abbildung 4.8). Die gewählte Stichprobengröße entspricht der Anzahl der gewünschten Durchflussereignisse des Profils. Die ermittelten zufälligen Durchflüsse werden mit der mittleren Dauer kombiniert.

Es wurde für den Null-Durchfluss eine zeitliche Limitierung von 30 s in den Algorithmus integriert. Diese Limitierung ist notwendig, um längere Perioden innerhalb des Prüfprofils mit Null-Durchfluss zu vermeiden, was zu unnötig

langen Prüfzeiten führen würde. Da erfahrungsgemäß alle im Markt befindlichen Durchflussmessgeräte in der Lage sind, spätestens nach 30 s keinen Durchfluss zu detektieren, wurde diese Zeitspanne gewählt.

Durch die Kombination aus zufällig ermittelten Durchflüssen mit der mittleren Dauer entsteht ein Prüfprofil, dessen Verteilungsfunktion innerhalb der betrachteten Verteilungsgrenzen liegen sollte. Diese Annahme wird im nachfolgenden Kapitel bestätigt.

Die Vorgehensweise, bei der Entwicklung des Algorithmus zur Erstellung repräsentativer Verbrauchsprofile, lässt sich grundsätzlich auf andere Anwendungen übertragen.

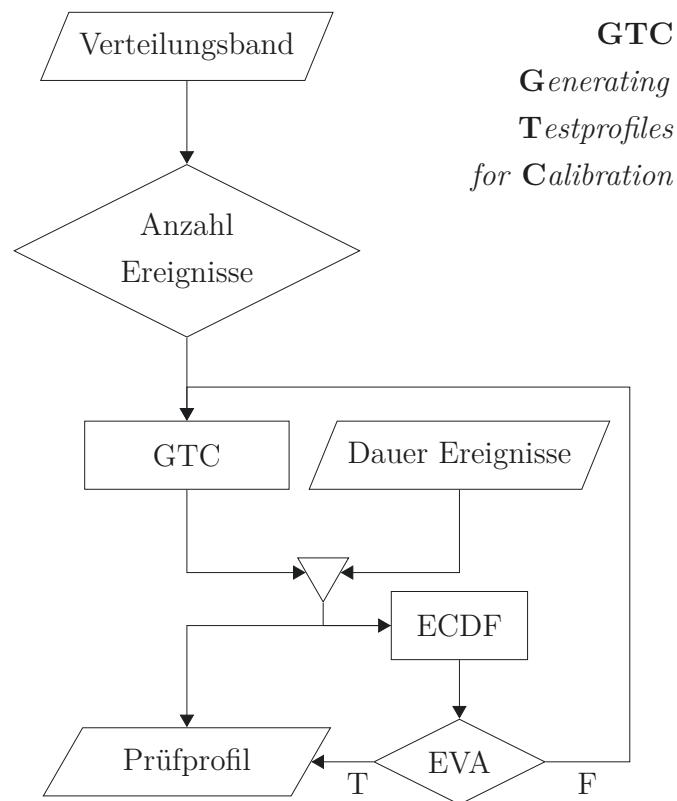


Abbildung 4.16: Programmablauf zur Erstellung stochastisch gesicherter Prüfprofile.

GTC: Algorithmus „Generating Testprofiles for Calibration“

ECDF: Empirische kumulierte Verteilungsfunktion

EVA: Evaluation

T: Wahr

F: Falsch

5 Validierung des Prüfkonzeptes

5.1 Validierung des Algorithmus

Die Ausführung des entwickelten Algorithmus ermöglicht die Erzeugung eines Prüfprofils, dessen Verteilung innerhalb des originären empirischen Bandes (Abbildung 4.8) liegen sollten. Zur Überprüfung dieser Anforderung wurden die Verteilungsfunktionen der in Kapitel 4.5 erstellten Profile erzeugt. Die ermittelten Verteilungsfunktionen sind durch Punkte in Abbildung 5.1 dargestellt. Erkennbar ist, dass sich insgesamt 51 von 54 Punkten innerhalb des Bandes befinden. Lediglich drei Durchflusspunkte liegen außerhalb des Vertrauensbandes. Davon sind zwei Punkte aus Wiederholung 1 und ein Punkt aus Wiederholung 2.

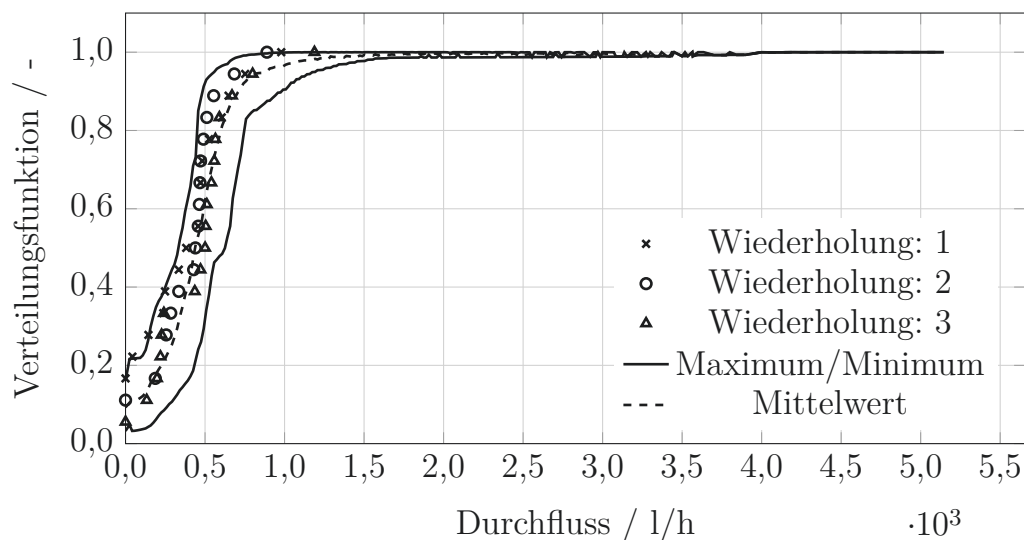


Abbildung 5.1: Evaluation der kumulierten Verteilung der Prüfprofile aus Abbildung 4.15.

Aufgrund der aufgetretenen Ausreißer wurde zur Evaluierung des gesamten Algorithmus eine Simulation durchgeführt. Es wurden Stichprobenziehungen

von $n=1$ bis $n=100$ 1.000 mal wiederholt und überprüft, ob die berechneten Verteilungspunkte innerhalb oder außerhalb des Bandes liegen. Bei der Berechnung wurde die mittlere Ausfallrate in Prozent über alle 1.000 Wiederholungen ermittelt. Das Ergebnis ist näherungsweise eine Potenzfunktion, die sich asymptotisch gegen Null bewegt (Abbildung 5.2).

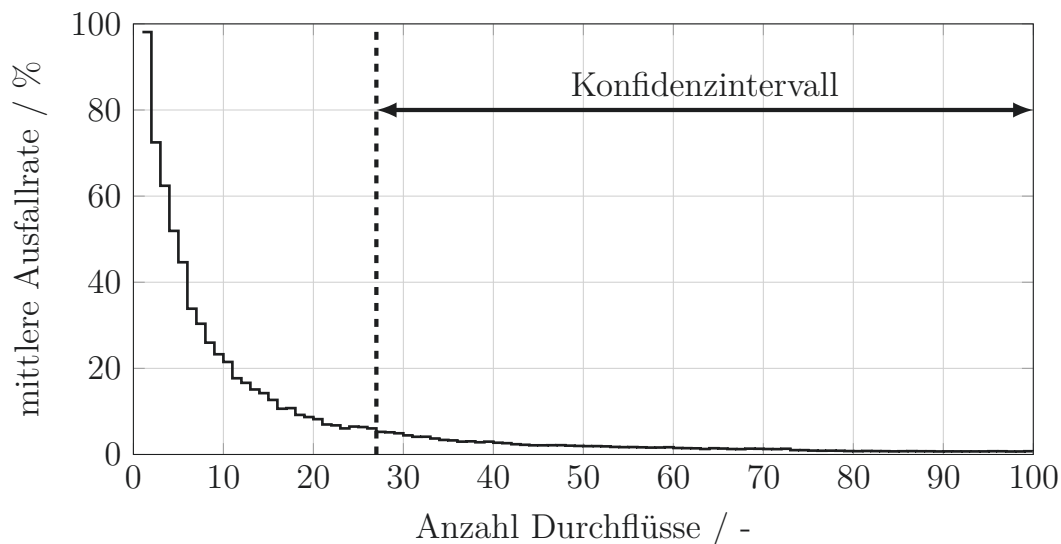


Abbildung 5.2: Durch Simulation ermittelte mittlere Ausfallrate der Stichprobengröße.

Ausgehend von dieser Funktion lässt sich ein Vertrauensintervall für die Durchführung des Algorithmus ableiten. Unter der Annahme, dass bei der Durchführung des Algorithmus ein Konfidenzintervall von 95 % eingehalten wird, sind somit mindestens 27 Durchflusspunkte nötig. Sinkt die Anzahl der zu ziehenden Durchflüsse unterhalb von 27, steigt die Unsicherheit, dass Durchflusspunkte des entstandenen Profils außerhalb der in Abbildung 4.8 dargestellten Grenzen liegen. Zur Analyse, in welchem Maß die Grenzen über- oder unterschritten werden, wurde die Simulation wiederholt. Das Ergebnis ist der Betrag der prozentualen Abweichung gegenüber der minimalen bzw. maximalen Verteilungsfunktion, dargestellt in Abbildung 5.3.

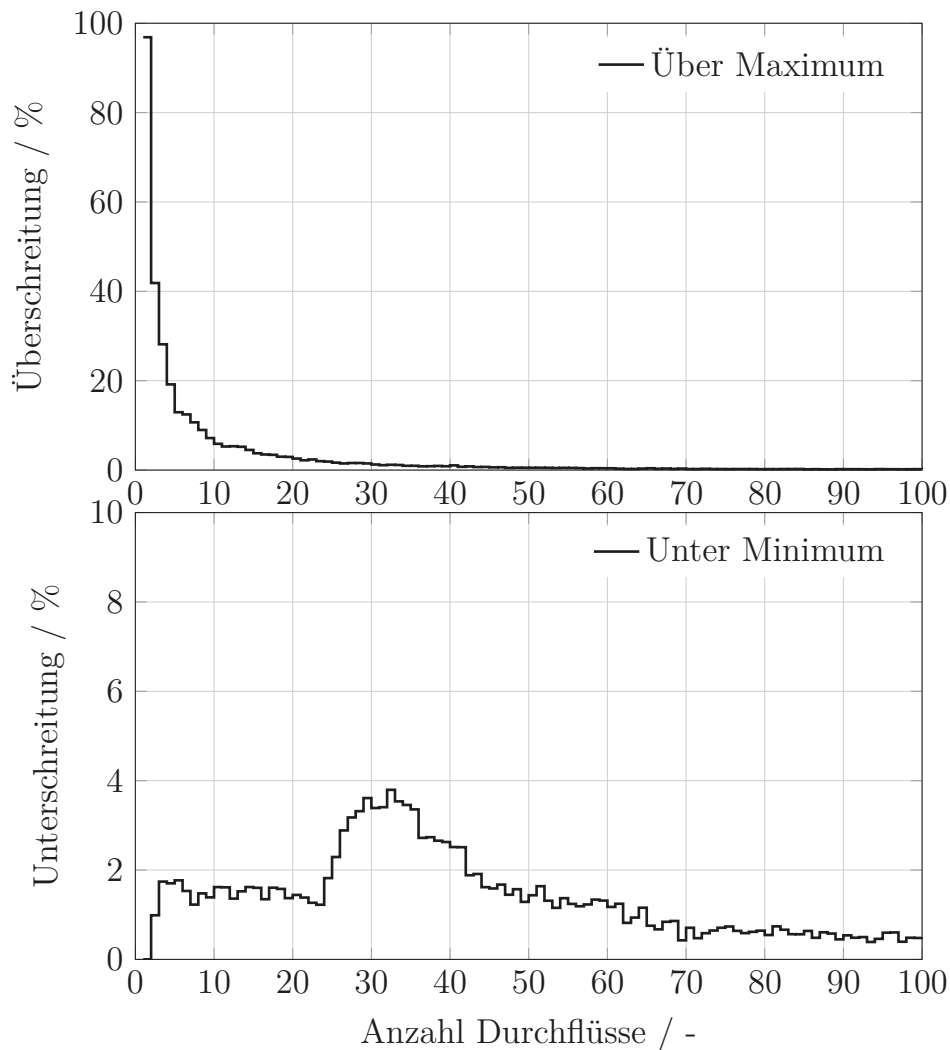


Abbildung 5.3: Durch Simulation ermittelter Betrag der prozentualen Über- oder Unterschreitung des kumulierten Bandes.

Es wurden zur besseren Darstellung unterschiedliche Skalen für die Über- oder Unterschreitungen verwendet. Erkennbar sind die deutlich höheren Ausfälle über dem maximalen Verteilungsband. Vor allem bei einer Ziehung der Stichprobe $n=1:4$ sind die Abweichungen $> 20\%$ oberhalb des maximalen Bandes. Treten Ausreißer unterhalb des minimalen Bandes auf, so sind sie nicht größer als 4%. Das bedeutet, wenn Ausreißer auftreten, liegen sie tendenziell über der maximalen Grenze des Verteilungsbandes und kommen häufiger vor als sie vorkommen dürften.

5.2 Validierung der erarbeiteten Prüfprozedur

Die durchgeführten Untersuchungen in Kapitel 3 belegen, dass Kavitationsdüsen zur intermittierenden Durchflusserzeugung geeignet sind. Der nächste Entwicklungsschritt der Prüfstandstechnologie ist die Nachbildung von Durchflussprofilen mittels Kavitationsdüsen auf einem Durchflussprüfstand. Ausschlaggebend für die Untersuchungen zur intermittierenden Durchflusserzeugung ist, in welcher Zeit sich die Durchflussänderung einstellt. Es ist zu überprüfen, ob die Änderung instantan oder zeitlich verzögert auftritt. Aus diesem Grund wurden zur Validierung der Technologie, Versuche mittels eines LDV-Systems durchgeführt.

Die LDV-Messung wurde als Ein-Punkt-Messung im Rohrmittelpunkt, wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben, realisiert. Es wird angenommen, dass dieser Punkt von möglichen Randströmungen unbeeinflusst ist und sich innerhalb laminarer Strömungsbedingungen befindet. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit (v_A) im Messpunkt kann durch Gleichung 5.1 (Müller et al., 2007) berechnet werden

$$v_A = \left(\sum_{n=1}^N \frac{\lambda}{2 \sin \varphi} \cdot f_{D_n} \right) \cdot \frac{1}{n} \quad (5.1)$$

mit:

- N, n : Anzahl der Ein-Punkt-Messungen,
- λ : Laserlicht-Wellenlänge,
- φ : halber Schnittwinkel der Laserstrahlen,
- f_{D_n} : Doppler-Frequenz der Einzelmessung.

Da die mittlere Strömungsgeschwindigkeit direkt proportional zum Volumenstrom ist, kann über

$$Q = v_A \cdot A \quad (5.2)$$

bei bekannter Querschnittfläche (A) der Volumenstrom (Q) errechnet werden.

Im Prüfwasser des EWZP befinden sich Silberpartikel, um die Burst-Rate des LDV-Systems zu erhöhen. Das Wasser weist eine Silberpartikelkonzentration von ca. 0,024 g/l auf. Der Versuchsaufbau der Validierung ist schematisch in Abbildung 5.4 dargestellt. Durchfluss und Eingangsdruck wurden während der

Versuche über eine drehzahlgezielte Pumpe gesteuert. Dazu wurde aus einem tieferliegenden Behälter das Wasser gepumpt und die Pumpendrehzahl angepasst, um den entsprechenden Eingangsdruck zu erhalten. Je nach Schaltung der Kavitationsapparatur konnten unterschiedliche Durchflussniveaus abhängig vom Eingangsdruck erreicht werden. Somit diente die Kavitationsapparatur als Regelorgan.

Ziel war es, zu überprüfen in welcher Zeit sich die Durchflussamplitude durch die Schaltung der Düsen verändert und somit eine quantitative Angabe über die Änderungsrate des Durchflusses zu erhalten. Das Öffnen und Schließen der pneumatischen Düsenstempel erfolgt dabei, wie in Kapitel 3.4.1 beschrieben, in ≤ 100 ms und wird als Schaltzeit bezeichnet.

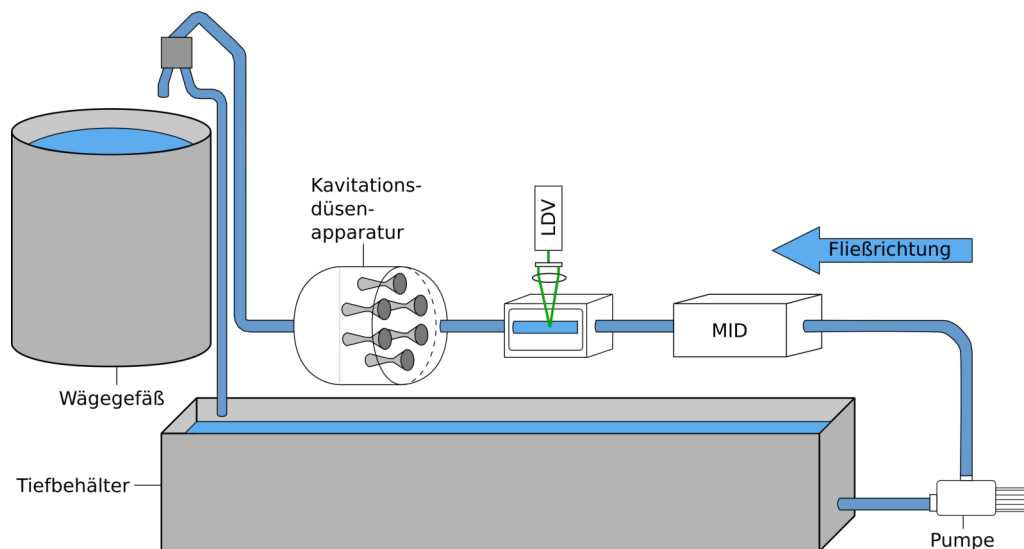


Abbildung 5.4: Vereinfachter schematischer Aufbau des EWZP mit LDV-Messung und Durchflussmessgerät.

Für die Validierung wurden vier verschiedene Durchflussprofile untersucht, welche jeweils fünfmal wiederholt wurden. Beispielhaft werden die Ergebnisse der Sequenz 1 näher erläutert. Sequenz 1 (Abbildung 5.5) ist ein Treppenprofil, dessen späterer Zweck es ist, die Reaktion des Prüflings auf sich schnell erhöhende Durchflüsse abzubilden. Die Gesamtmesszeit des Profils ist 320 s, inklusive acht verschiedener Durchflussstufen, deren Dauer jeweils 30 s beträgt.

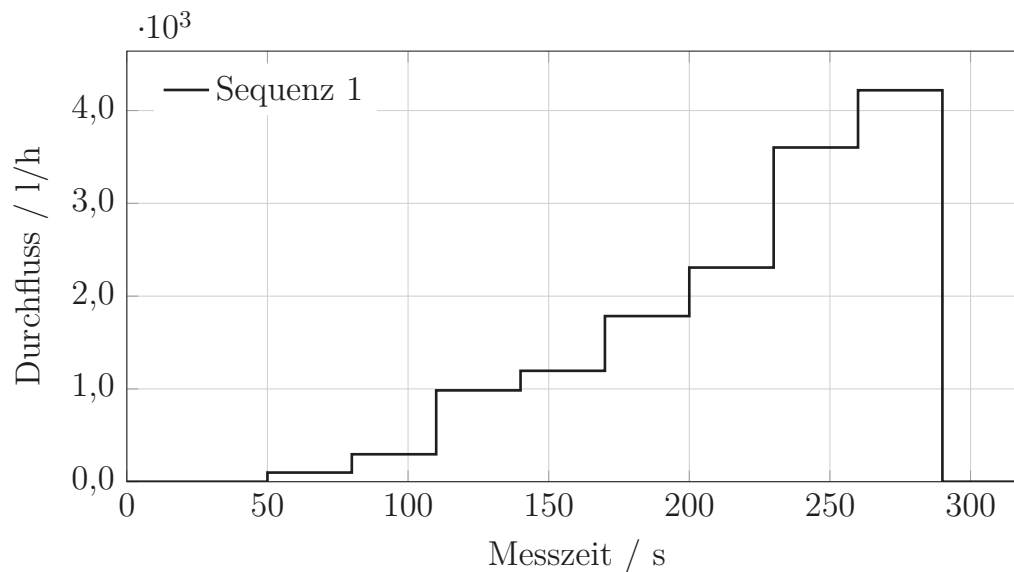


Abbildung 5.5: Untersuchte Modellsequenz 1. Aufsteigendes Treppenprofil.

Anhand der Durchführung der Untersuchungen konnte eine Wiederholbarkeit von $\pm 0,2121$ für die Profilerzeugung nachgewiesen werden. Die mittels LDV-System gemessene Messabweichung beträgt im Mittel $-0,022 \pm 0,10 \%$. Die Messabweichungen sind somit im Rahmen der erweiterten Messunsicherheit des Prüfstandes von $\pm 0,1 \%$ ($k=2$).

Ein weiterer wichtiger Parameter für die Untersuchungen ist, wie bereits zuvor erwähnt, die Änderung des Durchflusses über die Zeit. Aus diesem Grund ist der Durchflussverlauf der LDV-Messung in Abbildung 5.6 dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Ein-Punkt-LDV-Messung eine deutliche Streuung aufweist. Ursache hierfür könnte ein turbulenter Strömungsverlauf innerhalb des Messvolumens der Ein-Punkt-Messung sein, was im Gegensatz zur getroffenen Annahme steht und näher untersucht werden sollte. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die vorliegenden Daten dem Zweck der Arbeit genügen.

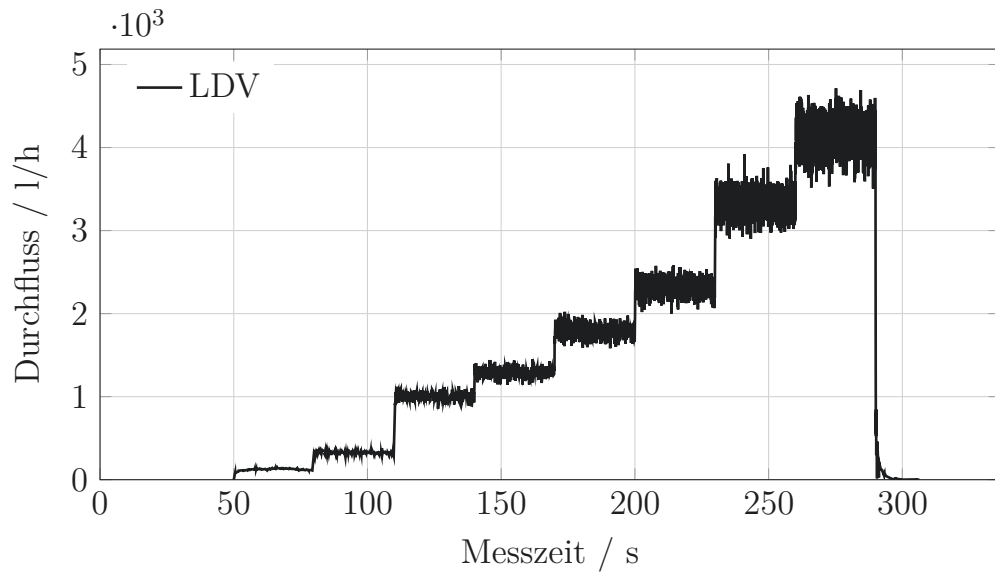


Abbildung 5.6: Durchflussverlauf des berechneten Volumenstroms mittels LDV-Messung.

Die Detailbetrachtung der Schaltvorgänge gibt näheren Aufschluss darüber, wie schnell sich der Durchfluss ändert. Zur Veranschaulichung wurden exemplarisch zwei Schaltvorgänge aus dem Durchflussverlauf extrahiert. Abbildung 5.7 zeigt den Schaltvorgang bei 140s (links) und 200s (rechts). Der Zeitpunkt des Schaltvorganges wurde durch die gepunktete Linie markiert.

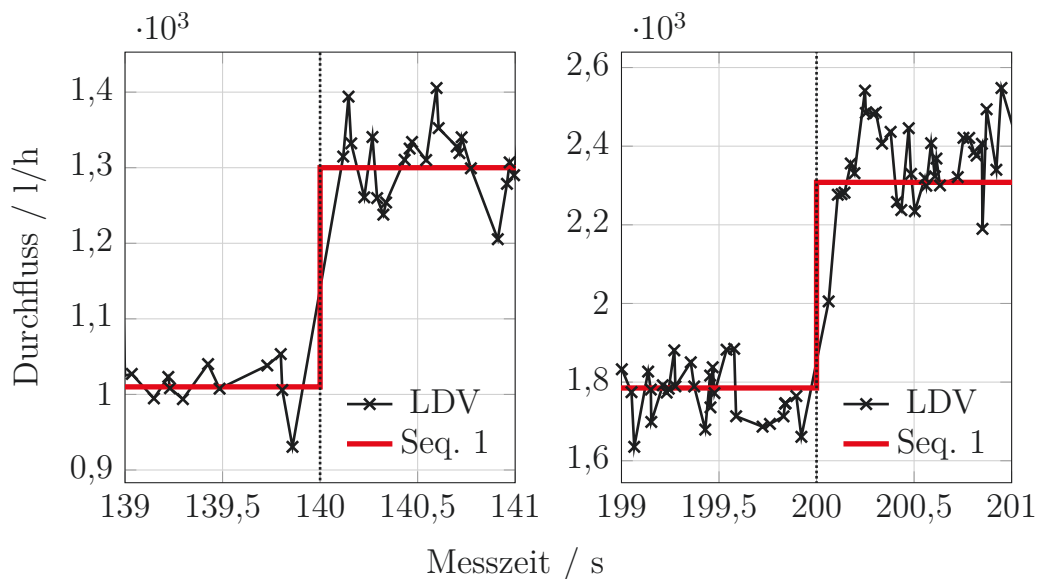


Abbildung 5.7: Detaildurchflussverlauf der Abbildung 5.6 inklusive Soll-Durchfluss (rot). Links Schaltvorgang von Düsenkombination 56 auf 54 und rechts von Kombination 50 auf 46.

Die Abbildung zeigt im Detail die Schwankung des Durchflusses. Diese beträgt im Mittel $\pm 4\%$ für die jeweilige Durchflussamplitude. Zudem ist erkennbar, dass die Datenerfassung des LDV-Systems nicht kontinuierlich ist. Die Ursache ist, dass ein Ausgangssignal nur erzeugt wird, wenn ein Partikel sich durch das Messvolumen des LDV-Systems bewegt. Anhand von Abbildung 5.7 ist ersichtlich, dass die Durchflussänderung zeitlich versetzt zum Schaltzeitpunkt auftritt. Diese Verzögerung lässt sich unter der Annahme, dass der Schaltbefehl instantan und der Schaltvorgang innerhalb von $\leq 100\text{ ms}$ erfolgt, berechnen. Der Schaltvorgang beinhaltet den mechanischen Verfahrensweg der Stempel sowie die Trägheit des Fluids.

Aus den kontinuierlichen Messergebnisse der LDV-Messung konnte eine Änderung des Durchflusses im Mittel innerhalb von 95 ms ermittelt werden. Die Analyse der weiteren Sequenzen belegte diese mittlere Durchflussverzögerung. Nachweislich lassen sich somit Durchflussänderungen durch den Einsatz von Kavitationsdüsen innerhalb von $\leq 100\text{ ms}$ erzeugen. Die Abschätzungen der Dauer der Durchflussänderung aus Kapitel 3.4.1 konnte hiermit bestätigt werden.

6 Realitätsnahe Prüfung von Wasserzählern

6.1 Allgemein

Die Grundvoraussetzungen für eine realitätsnahe Prüfung von Durchflussmessgeräten sind gegeben durch:

- Eine Prüfinfrastruktur, die es ermöglicht, schnell wechselnde Durchflüsse reproduzierbar zu erzeugen (Kapitel 5.2). Die Verwendung der in dieser Arbeit vorgestellten Kavitationsdüsen bietet sehr gute Voraussetzungen dafür.
- Die Generierung von stochastisch gesicherten Prüfprofilen auf der Basis empirisch ermittelter Verbrauchsdaten für Deutschland. Mit dem in Kapitel 4.5 beschriebenen Algorithmus können realitätsnahe Prüfprofile erzeugt werden. Die Nachbildung dieses Profils auf Prüfständen ermöglicht es, Wasserzähler realitätsnah zu prüfen und die Reaktion der Geräte auf einen dynamischen Betrieb zu ermitteln.

Die praktische Anwendung der entwickelten Prüfprozedur, also der Einsatz von Kavitationsdüsen und erstellter Prüfprofile, wurde durch eine Reihe von Experimenten auf dem EWZP überprüft. Ziel war es, reproduzierbar intermittierende Durchflüsse zu erzeugen und die Reaktion der Wasserzähler auf die Sequenzen zu erfassen. Nachfolgend wird eine Auswahl der durchgeführten Versuche beschrieben.

6.2 Versuchsaufbau

Für die Versuche wurden ein handelsüblicher Haushaltswasserzähler (Prüfling) und die Kavitationsdüsenapparatur in Reihe in dem EWZP eingebaut

(Abbildung 6.1). Bei dem Prüfling handelt es sich um einen Zähler der Größe $Q_3: 4 \text{ m}^3/\text{h R160}$. Durchfluss und Eingangsdruck wurden analog zu den Versuchen der Validierung (Kapitel 5.2) geregelt. Auch in während dieser Versuche diente die Kavitationsdüsenapparatur als Regelorgan.

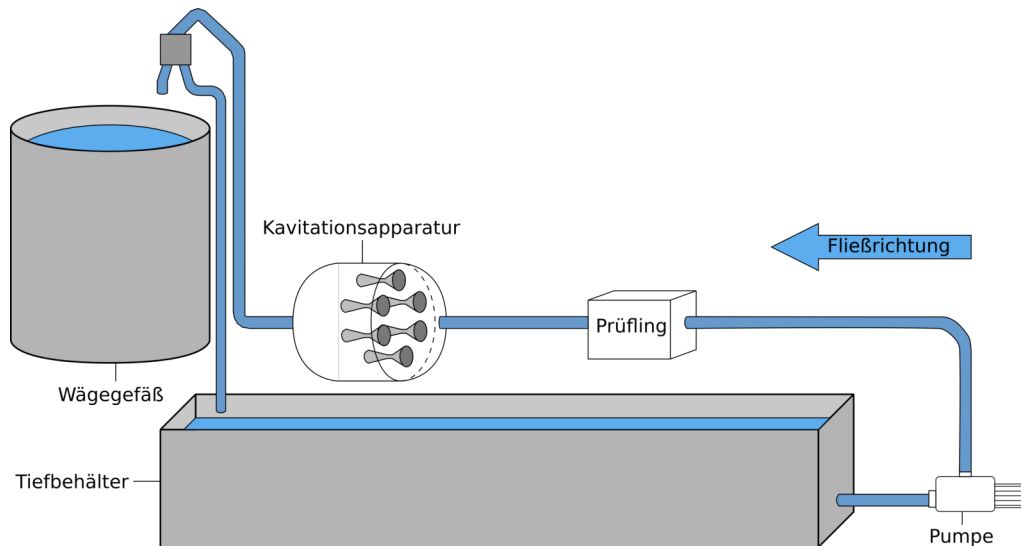


Abbildung 6.1: Vereinfachter schematischer Aufbau des EWZP mit Kavitationsdüsenapparatur und Prüfling.

Die Impulse des Prüflings wurden elektronisch erfasst. Der Impulswertigkeit des Prüflings betrug 10 Impulse pro Liter. Diese geringe Impulswertigkeit kann vor allem bei geringeren Durchflüssen ($< 1,000 \text{ l/h}$) dazu führen, dass eine Durchflussänderung vom Gerät verzögert detektiert wird. Diese für die Prüfung geringe Impulswertigkeit ist jedoch für einen handelsüblichen Hauswasserzähler typisch. Der Hauptwirkungsbereich des Prüflings wird durch seine Zählergröße und den R-Wert bestimmt und ist in diesem Fall $< 4,000 \text{ l/h}$. Die nachfolgend beschriebenen Profile bilden diesen Durchflussbereich ab.

Die aufgezeichneten Impulse des Prüflings wurden integriert und so das durchgeflossene Volumen für den Zähler ermittelt. Dieses Volumen wurde mit dem Referenzvolumen verglichen, welches analog zu der in Kapitel 3.4.2 beschriebenen Vorgehensweise bestimmt wurde.

6.3 Generierung von Prüfprofilen und exemplarische Untersuchung des Messverhaltens von Zählern

Im ersten Schritt wurden vier einfache Sequenzen generiert, mit denen im zweiten Schritt die Reaktion des Prüflings getestet werden sollte. Sequenz 1 (Abbildung 5.5) ist identisch zu der getesteten Sequenz in Kapitel 5.2. Die zweite generierte Sequenz ist das inverse Profil der Sequenz 1 (Abbildung 6.2). Dieses wurde erzeugt, um das Verhalten der Zähler bei schnell fallenden Durchflüssen aufzuzeigen. Die Durchflüsse entsprechen denen in Sequenz 1. Da eine Treppenstufe sowohl eine einzelne Düse, als auch eine Kombination aus mehreren Düsen sein kann, werden die Durchflussstufen nachfolgend als Düsenkombination bezeichnet.

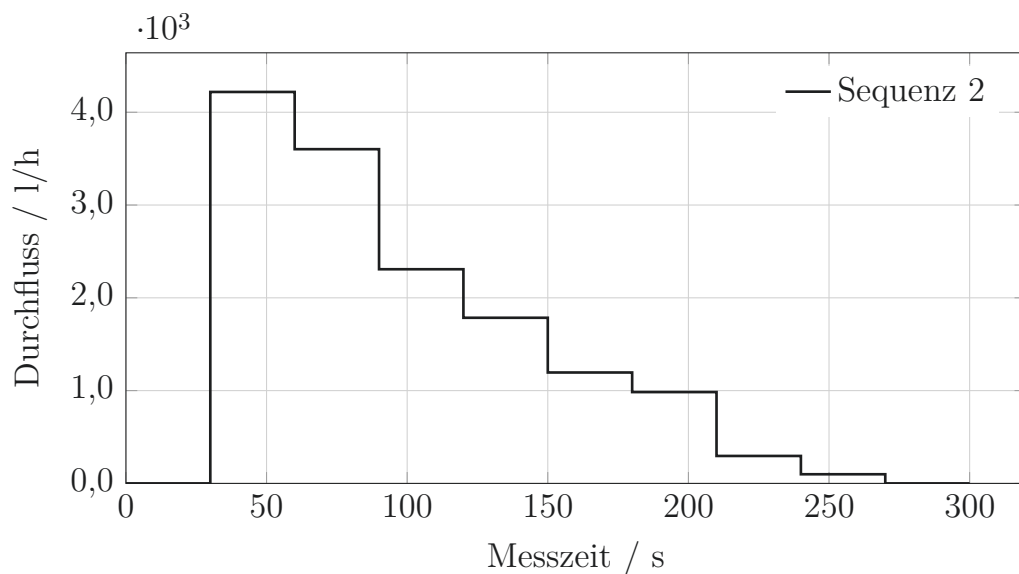


Abbildung 6.2: Untersuchte Modellsequenzen 2. Absteigendes Treppenprofil.

Die Düsenkombination ist ein eindeutiger Wert, welcher die eingesetzten Düsen zur Generierung des geforderten Durchflusses beschreibt. Insgesamt ergeben sich für den Aufbau 64 verschiedene Kombinationen. Jede Kombination wird dabei in eine binäre Zahl umgerechnet und beschreibt so den Schaltzustand der Kavitationsdüsenapparatur. Tabelle 6.1 zeigt eine Auswahl der binären Darstellung der Düsenkombinationen. Die Zahl „0“ steht für den Schaltzustand geschlossen und „1“ für geöffnet. Bei der gelisteten Düsenkombination 29 sind

Düse #6 und #2 geöffnet, alle weiteren geschlossen. Die in den untersuchten Sequenzen verwendeten Düsenkombinationen sind in Tabelle 6.2 aufgelistet.

Tabelle 6.1: Auswahl der binären Darstellung von einzelnen Düsenkombinationen.

Düsenkombination	Düse # Nr.					
	6	5	4	3	2	1
63	0	0	0	0	0	0
62	0	0	0	0	0	1
56	0	0	0	1	1	1
29	1	0	0	0	1	0

Tabelle 6.2: Verwendete Düsen und korrespondierende Düsenkombinationen für die jeweiligen Sequenzen.

Düsenkombination	Düse(n)	Sequenz
63	alle geschlossen	1, 2, 3, 4
62	Düse # 1	1, 2, 4
61	Düse # 2	1, 2, 4
60	Düse # 1, 2	4
59	Düse # 3	4
58	Düse # 1, 3	4
56	Düse # 1, 2, 3	1, 2, 3, 4
54	Düse # 1, 4	1, 2
50	Düse # 1, 3, 4	1, 2
46	Düse # 1, 5	1, 2
37	Düse # 2, 4, 5	1, 2
29	Düse # 2, 6	1, 2

Sequenz 3 (Abbildung 6.3) beschreibt das Wasserentnahmeprofil eines technischen Endverbrauchers wie z. B. einer Waschmaschine oder eines Geschirrspülers. Es zeichnet sich durch kurzzeitige, gleich hohe Entnahmen aus. Aufgrund der technischen Bauweise solcher Geräte werden durch die verwendeten Ventile nur zwei Durchflusszustände generiert: Durchfluss und kein Durchfluss.

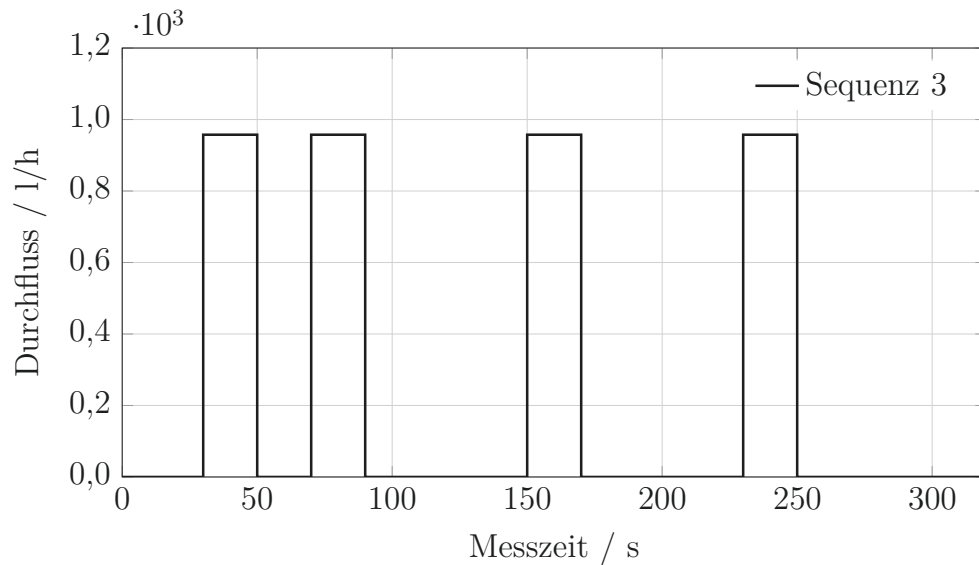


Abbildung 6.3: Untersuchte Modellsequenz 3. Beispielsequenz eines technischen Endverbrauchers.

Die Amplitude des Durchflusses richtet sich dabei nach den vorherrschenden Bedingungen wie Versorgungsdruck, Leitungsdimension des Anschlusses oder der Größe des verbauten Ventils.

Die vierte Sequenz ist die Nachbildung eines realen Entnahmeereignisses aus einem Wohnobjekt. Es wurde ein beliebiger Zeitraum der Datenreihe des Wohnobjektes extrahiert und exemplarisch nachgebildet. Abbildung 6.4 zeigt die gemessene Datenreihe eines Tages (oben) und den Detailzeitraum (Mitte), welcher genutzt wurde, um Sequenz 4 (unten) zu erzeugen. Es ist zu beachten, dass sich die Achseneinteilung Teildigramme unterscheidet. Die originäre Datenreihe und der Detailzeitraum zeigen den Durchflussverlauf über die Tageszeit mit unterschiedlichen maximalen Durchflussamplituden. Es handelt sich bei dieser Sequenz um eine Mischung aus Multi-Amplituden-Ereignis, Einzelentnahmen und Null-Durchflüssen.

Jede der vier Sequenzen wurde während der Versuchsreihe fünfmal gemessen. Die Umweltparameter der Untersuchungen sind in Anhang B.4 zusammengefasst aufgelistet. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden nachfolgend beschrieben. Bei der Beschreibung der Ergebnisse von Sequenz 1 wird die Vorgehensweise bei der Analyse beschrieben. Die Auswertungen der weiteren Sequenzen erfolgen analog zu Sequenz 1 und werden verkürzt erläutert.

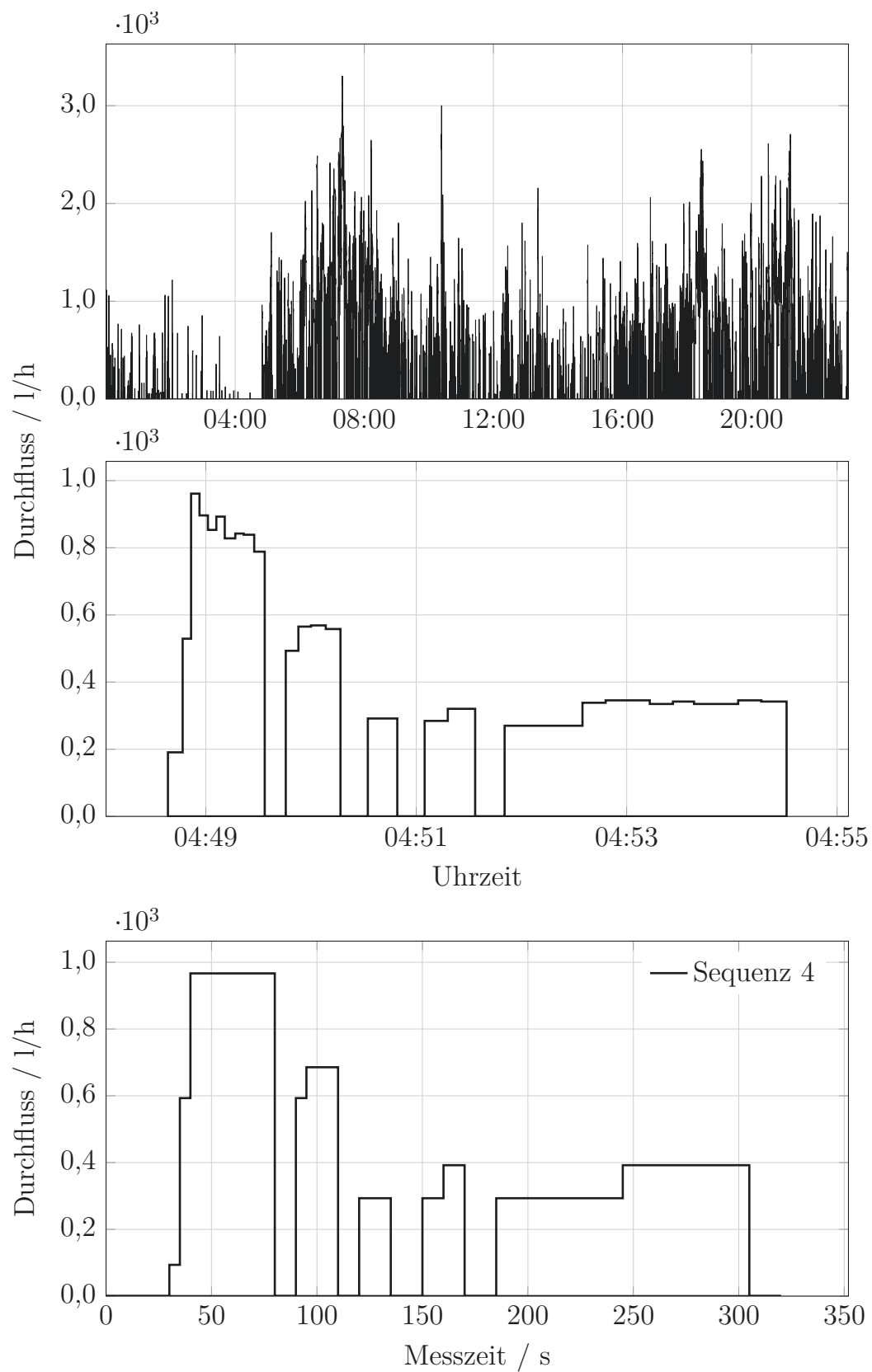


Abbildung 6.4: Originäre Datenreihe (oben) mit Detailausschnitt (Mitte), welcher als Grundlage für Sequenz 4 (unten) dient.

6.4 Ergebnisse der Prüfprofiluntersuchungen

6.4.1 Sequenz 1

Im ersten Schritt der Sequenzuntersuchung wurde das integrierte Volumen mit dem ermittelten Referenzvolumen (V_a) verglichen. Die Messabweichungen e der Wiederholungen sind in Tabelle 6.3 dargestellt. Das theoretische Volumen, welches zur Berechnung der Messabweichung der Düsen (e_t) aufgelistet ist, ergibt sich aus Gleichung 2.1 und der Erweiterung dieser Gleichung mit:

$$V_i = \sum_{i=1}^k \frac{q_{m_i}}{\rho_l} \cdot t_i, \quad (6.1)$$

mit:

k : Düsenkombination,

t_i : Messzeit der einzelnen Kombinationen,

ρ_l : Dichte des Fluids.

Der Prüfling zeigt Messabweichungen im negativen Bereich (Tabelle 6.3). Das bedeutet, dass das Gerät tendenziell weniger anzeigt, als durch die Referenz ermittelt wurde. Das theoretische Volumen ist demgegenüber im überwiegend positiven Bereich. Auffällig ist die hohe Abweichung bei Wiederholung 3. Da die Messabweichung des Prüflings und des theoretischen Volumens gegenüber den anderen Wiederholungen stark abweicht, kann hier von einer Fehlmessung ausgegangen werden. Dies bestätigt ein Ausreißertest nach Grubbs (Grubbs, 1950) mit einer kritischen Schranke von 95 % (Anhang B.5). Die genaue Ursache der hohen Messabweichung, im Vergleich zu den anderen Wiederholungen, konnte jedoch nicht identifiziert werden.

Wird Wiederholung 3 von der Gesamtbetrachtung ausgeschlossen, ergibt sich folgende mittlere Abweichung:

Prüfling: $-0,48 \pm 0,111$ %,

Düsen: $0,78 \pm 0,257$ %.

Da es sich bei dem Prüfling um einen handelsüblichen Haushaltswasserzähler handelt, wird zur Bewertung die Eichfehlergrenze (e_{EFG}) nach Klasse 2 aus

Tabelle 6.3: Messabweichungen e der Sequenz 1 gegenüber dem Referenzvolumen V_a .

Wiederholung	Volumen	Messabweichung	
		Prüfling	Düsen
n	V_a / l	$e_p / \%$	$e_t / \%$
1	119,90	-0,58	0,58
2	119,65	-0,55	0,96
3	119,57	-3,40	-2,50
4	119,55	-0,30	1,10
5	120,10	-0,50	0,48

Kapitel 2.2.2 herangezogen. Die generierten Durchflüsse liegen oberhalb von Q_2 und müssen innerhalb von $\pm 2\%$ liegen. Aufgrund der mittleren Gesamtabweichung des Prüflings erfüllt dieser somit die geforderten Eichfehlergrenzen.

Betrachtet man den Detailverlauf der Messung und die einzelnen Abweichungen bei den Kombinationen, ergibt sich ein differenzierteres Bild. Die kontinuierliche Erfassung des Wägesignals war technisch nicht möglich. Das durch den Prüfling gemessene Volumen für die jeweilige Düsenkombination ergibt sich durch die Summierung der Impulse für die Dauer der jeweiligen Kombination. Die Schaltzeit bestimmt den Beginn und das Ende der jeweiligen Düsenkombination. Das Vergleichsvolumen ergibt sich aus dem theoretischen Durchfluss der jeweiligen Düsenkombination multipliziert mit der Dauer der Kombination. Da das theoretische Volumen der gesamten Sequenz im Mittel um $0,78\%$ (Tabelle 6.3) gegenüber der Referenz abweicht, wird das für die Kombination berechnete theoretische Volumen um diesen Wert korrigiert. Die in Abbildung 6.5 dargestellten Messabweichungen sind die Abweichungen des Prüflings zum korrigierten theoretischen Volumen der jeweiligen Düsenkombination.

Die Abbildung verdeutlicht, dass die Messabweichung je nach Kombination sehr unterschiedlich ist. So sind vor allem hohe Abweichungen bei Düsenkombination 54 und 37 zu verzeichnen, was auf die extrem hohe unterschiedliche Durchflussamplitude zwischen theoretischem und durch den Prüfling gemessenen Durchfluss zurückzuführen ist (Abbildung 6.6).

Des Weiteren zeigt sich, dass $62,5\%$ der Messabweichungen der Durchfluss-

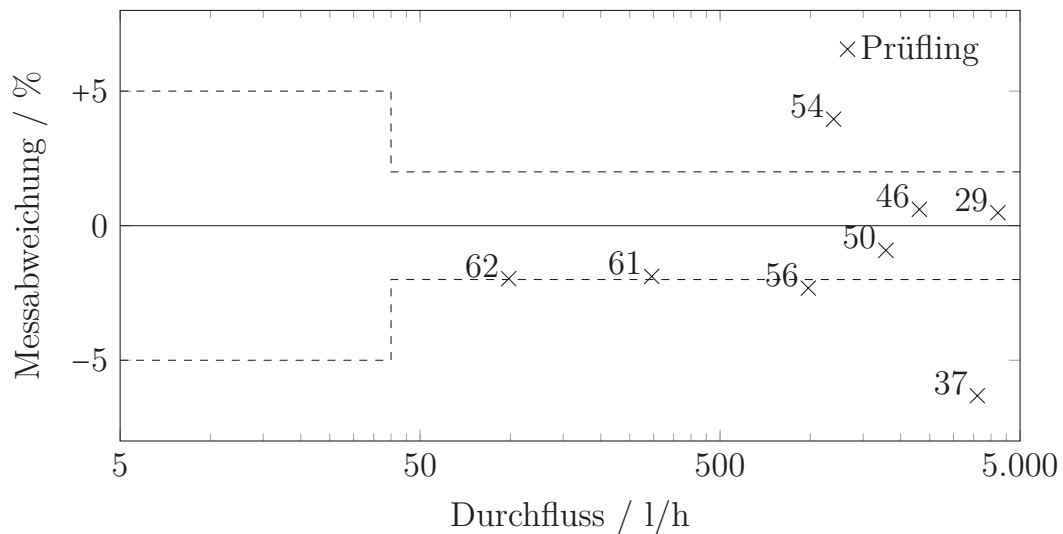


Abbildung 6.5: Messabweichung des Volumens des Prüflings (e_{pi}) zum theoretischen Volumen bei den einzelnen Düsenkombinationen der Sequenz 1 über der mittleren Durchflussamplitude der Kombination.

punkte innerhalb der Eichfehlergrenzen liegen. Werden die Kombinationen 37 und 54 von dieser Betrachtung ausgenommen, so sind 83 % der Werte innerhalb der Eichfehlergrenzen.

Exemplarisch ist der durch die Geräte gemessene Durchflussverlauf während Wiederholung 1 in Abbildung 6.6 dargestellt. Die Reaktion des Prüflings auf die sich ändernden Durchflussamplituden werden nachfolgend detaillierter analysiert. Es zeigen sich deutliche Instabilitäten von $\pm 4\%$ im Durchfluss vor allem in den höheren Durchflussbereichen ($> 3,000\text{ l/h}$) von Kombination 37 und 29. Zusätzlich sind Verzögerungen in der Detektion des Durchflusses durch den Prüfling zu verzeichnen, beispielsweise bei Düsenkombination 63 auf 62 (8 s). Anschließend kommt es zu einer kurzzeitigen Überhöhung des Durchflusses, was das summierte Gesamtvolumen dieser Düsenkombination wieder relativiert. Anhand von Abbildung 6.6 ist ebenfalls ersichtlich, dass der theoretische Volumenstrom bei Kombination 37 und 54 nicht erreicht wird. Die Ursachen hierfür konnten nicht näher identifiziert werden.

Wird der theoretische Durchfluss als Erwartungswert angenommen, lassen sich die Residuen des Prüflings über die Messzeit berechnen. Die Residuen sind in Abbildung 6.7 dargestellt. Nachfolgend wird zur besseren grafischen

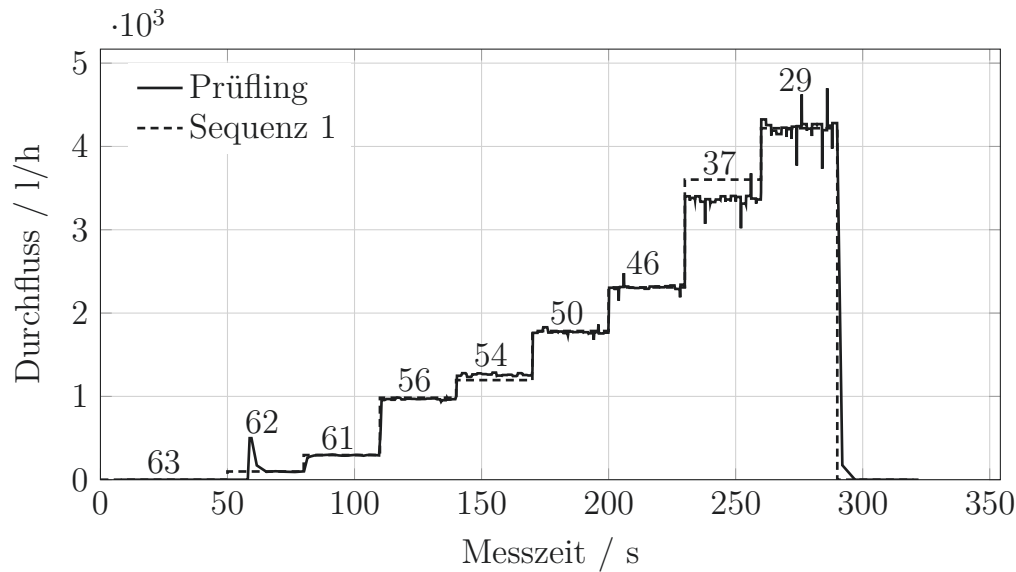


Abbildung 6.6: Gemessener Durchfluss des Prüflings und der theoretische durch Düsenkombination generierte Durchfluss bei Sequenz 1 inklusive der Düsenkombinationen über die Messzeit bei Wiederholung 1.

Veranschaulichung die Abbildung der Residuen auf $\pm 100\%$ begrenzt. Die Schaltvorgänge sind innerhalb der Grafik als gepunktete Linie eingezeichnet. Es ergeben sich zum Teil erhebliche lokale Abweichungen von bis zu 400% bei Kombination 62. Auffällig sind die hohen Residuen kurz nach den Schaltvorgängen. Die hohen negativen Residuen belegen eine verzögerte Detektion des Durchflusses durch den Prüfling. Exemplarisch wurden die Düsenkombinationen 56 und 50 als Detailbetrachtung in Abbildung 6.8 dargestellt.

Die Verzögerung des Durchflusses beträgt ca. 2 s bei Kombination 56 und ca. eine Sekunde bei Düsenkombination 50. Mit steigendem Durchfluss sinkt der zeitliche Versatz in der Detektion des Durchflusses.

Im Mittel tritt eine Verzögerung des Durchflusses von 1,07 s auf, die durch den Prüfling gemessen wurde. Der Durchfluss stabilisiert sich auf die erzeugte Amplitude im Mittel innerhalb von 1,35 s.

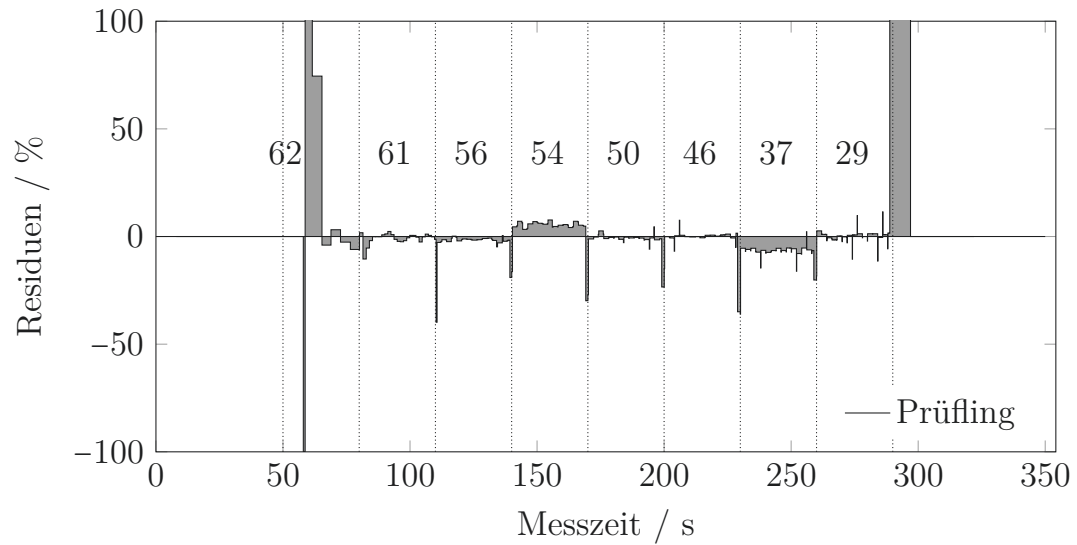


Abbildung 6.7: Residuen zwischen durch den Prüfling gemessenen und theoretischen Volumenstrom über die Messzeit der Sequenz 1 bei Wiederholung 1.

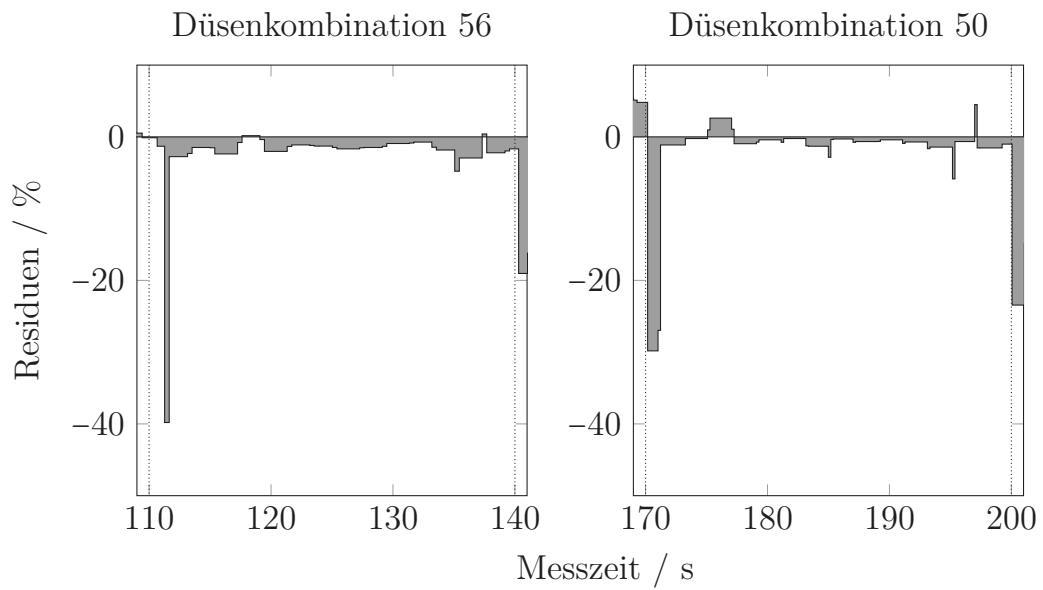


Abbildung 6.8: Exemplarische Detaildarstellung der Residuen von Düsenkombination 56 und 50 der Sequenz 1, Wiederholung 1.

6.4.2 Sequenz 2

Analog zu Sequenz 1 wurde das durch den Prüfling gemessene Volumen integriert und mit dem Referenzvolumen verglichen. Die Messabweichungen dieser Untersuchungen sind in Tabelle 6.4 dargestellt.

Tabelle 6.4: Messabweichungen e der Sequenz 2 gegenüber dem Referenzvolumen V_a .

Wiederholung	Volumen	Messabweichung	
		Prüfling	Düsen
n	V_a / l	$e_p / \%$	$e_t / \%$
1	120,10	-0,25	-0,89
2	120,09	-0,24	-0,77
3	119,85	-0,71	-0,59
4	120,02	-0,51	-0,71
5	120,03	-0,35	-0,72

Auch bei Sequenz 2 weist der Prüfling eine Messabweichung im negativen Bereich auf. Diese ist im Vergleich zu Sequenz 1 mit Mittel um 1,02 % geringer. Innerhalb der Wiederholungen treten keine Ausreißer auf, so dass alle Versuchsreihen bei der Auswertung berücksichtigt werden. Es ergibt sich eine mittlere Messabweichung von $-0,41 \pm 0,178 \%$ für den Prüfling und $-0,73 \pm 0,099 \%$ für das berechnete theoretische Volumen. Auch in diesem Fall erfüllt der Wasserzähler die Eichfehlergrenze von $\pm 2 \%$.

Die Detailbetrachtung der Düsenkombinationen zeigt, dass lediglich 50 % der Messabweichungen der Kombinationen innerhalb der Eichfehlergrenzen liegen. Wird der Durchflussverlauf exemplarisch für Wiederholung 1 betrachtet, zeigen sich für die Düsenkombination 37 und 54 Durchflussunterschiede ähnlicher Größenordnung wie bei Sequenz 1. Des Weiteren sind Instabilitäten im Durchfluss für die Düsenkombinationen 29, 37 und 46 zu verzeichnen. Diese liegen ähnlich zu Sequenz 1 bei $\pm 4 \%$. Bei der Schaltung von Düsenkombination 63 auf 29 reagiert der Prüfling träge, und es ergibt sich eine stufenweise Erhöhung der Durchflusswertes auf das Niveau von Kombination 29.

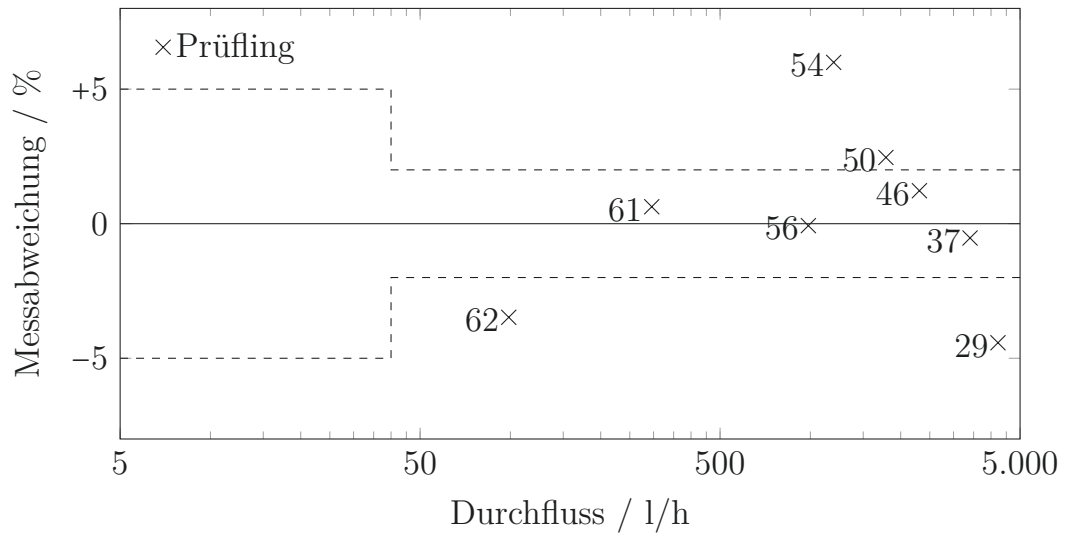


Abbildung 6.9: Messabweichung des Volumens des Prüflings (e_{pi}) zum theoretischen Volumen bei den einzelnen Düsenkombinationen der Sequenz 2 über der mittleren Durchflussamplitude der Kombination.

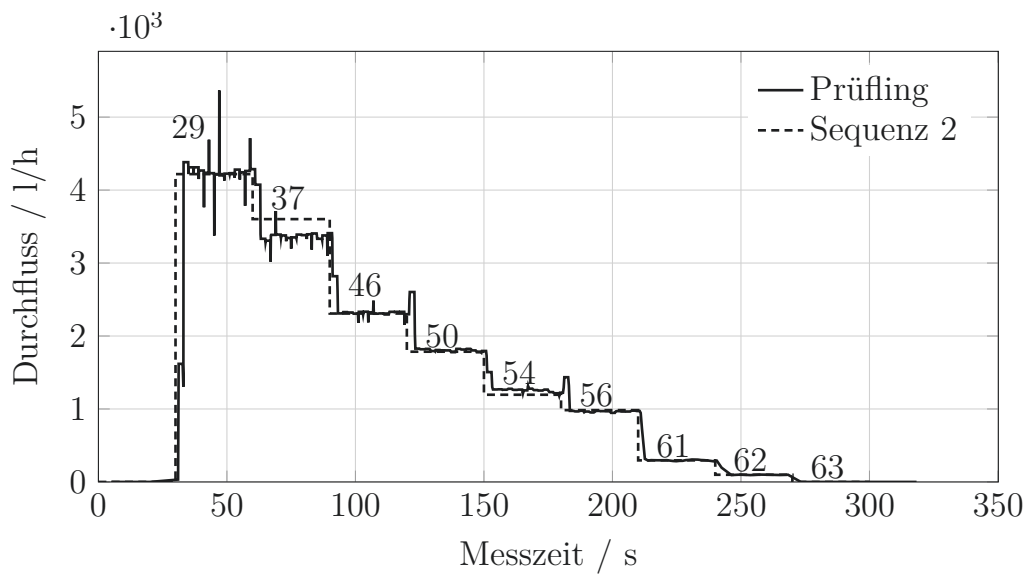


Abbildung 6.10: Gemessener Durchfluss des Prüflings und der theoretische durch Düsenkombination generierte Durchfluss bei Sequenz 2 inklusive der Düsenkombinationen über die Messzeit bei Wiederholung 1.

Die analog zu Sequenz 1 berechneten Residuen verdeutlichen diesen Effekt. Es zeigen sich bis auf Düsenkombination 29 deutliche Peaks in die positive Ordina-

natenrichtung von bis zu 150 %. Auch bei dieser Sequenz zeigt sich, dass nach jedem Schaltvorgang eine Überhöhung der Residuen auftritt. Exemplarisch werden im Folgenden die Kombinationen 29 und 50 detaillierter betrachtet.

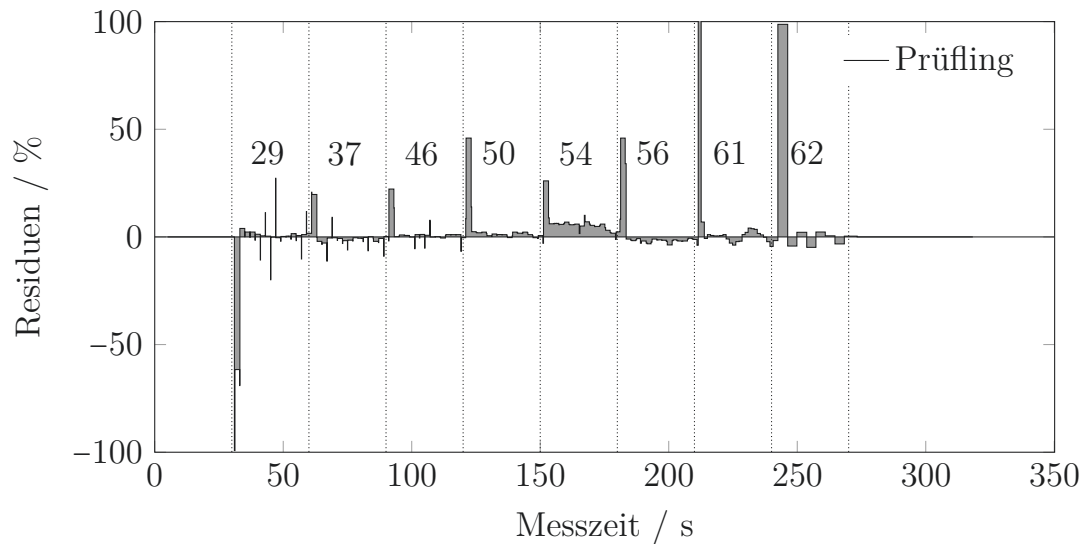


Abbildung 6.11: Residuen zwischen durch den Prüfling gemessenen und theoretischen Volumenstrom über die Messzeit der Sequenz 2 bei Wiederholung 1.

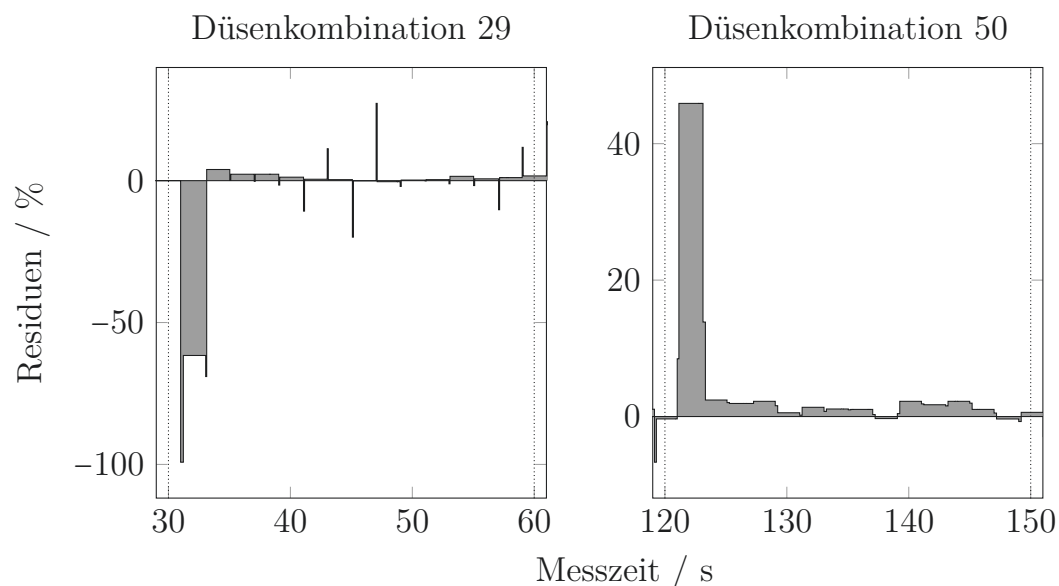


Abbildung 6.12: Exemplarische Detaildarstellung der Residuen von Düsenkombination 29 und 50 der Sequenz 2, Wiederholung 1.

Düsenkombination 29 zeigt eine deutliche Durchflussverzögerung von 1,22 s gegenüber dem nominellen Schaltvorgang. Nach ca. 3 s verringert sich die Amplitude im Mittel auf $\pm 4\%$ bis zum nächsten Schaltvorgang. Die mittlere Verzögerung der Detektion des Durchflusses beträgt 1,07 s. Nach weiteren 2,95 s verringert sich die Amplitude.

6.4.3 Sequenz 3

Die in Tabelle 6.5 dargestellten Messabweichungen zeigen, dass der Prüfling die geforderten Messabweichungen von $\pm 2\%$ nur während der Wiederholung 3 einhalten konnte.

Tabelle 6.5: Messabweichungen der Sequenz 3 gegenüber dem Referenzvolumen V_a .

Wiederholung	Volumen		Messabweichung	
	Referenz	Prüfling	Düsen	
n	V_a / l	$e_p / \%$	$e_t / \%$	
1	22,04	-3,82	-0,54	
2	22,10	-3,15	-0,70	
3	22,07	-0,34	-0,49	
4	22,04	-2,44	-0,43	
5	22,13	-3,73	-0,71	

Für die insgesamt fünf Wiederholungen ergibt sich eine mittlere Gesamtmessabweichung von:

Prüfling: $-2,70 \pm 1,278\%$,

Düsen: $-0,57 \pm 0,114\%$.

Betrachtet man den durch den Prüfling gemessenen Durchflussverlauf über die Messzeit (Abbildung 6.13), so zeigt sich der Grund für die höhere Messabweichung des Prüflings. Nach jeder Düsenkombination ist eine verzögerte Detektion der Durchflussänderung durch den Prüfling zu beobachten. Dies wird im allgemeinen als Nachlauf bezeichnet. Dieser Nachlauf bewirkt hohe Detailmessabweichungen des Prüflings bei den einzelnen Düsenkombinationen und

bestätigt die hohe Gesamtmessabweichung. Die Detailmessabweichungen des Prüflings der einzelnen Düsenkombinationen sind in Tabelle 6.6 aufgelistet.

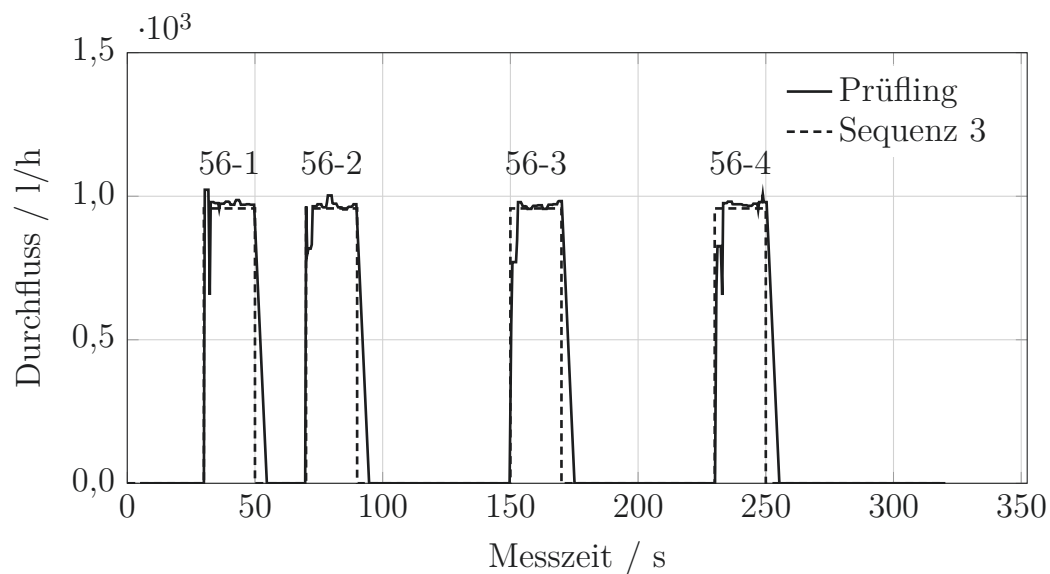


Abbildung 6.13: Gemessener Durchfluss des Prüflings und der theoretische durch Düsenkombination generierte Durchfluss bei Sequenz 3 inklusive der Düsenkombinationen über die Messzeit bei Wdh. 1.

Tabelle 6.6: Messabweichungen e der Düsenkombination der Sequenz 3 gegenüber dem theoretischen Volumen.

Düsenkombination	Prüfling
n	e_p / %
56-1	-7,58
56-2	-6,13
56-3	-6,50
56-4	-5,77

Die Analyse der Residuen der Sequenz zeigt neben den bereits von Sequenz 1 und 2 bekannten Überhöhungen während der Durchflusssteigerung einen erheblichen Nachlauf des Zählers für alle vier Ereignisse. Der Nachlauf der Zähler beträgt exakt 5s. Dies lässt vermuten, dass der Prüfling einen internen Algorithmus hat, welcher nach 5s, wenn keinerlei Durchflussänderung stattfindet,

berechnet, dass kein Durchfluss vorliegt. Da lediglich die Impulswertigkeit des Zählers bekannt ist, kann diese Vermutung nicht bestätigt werden.

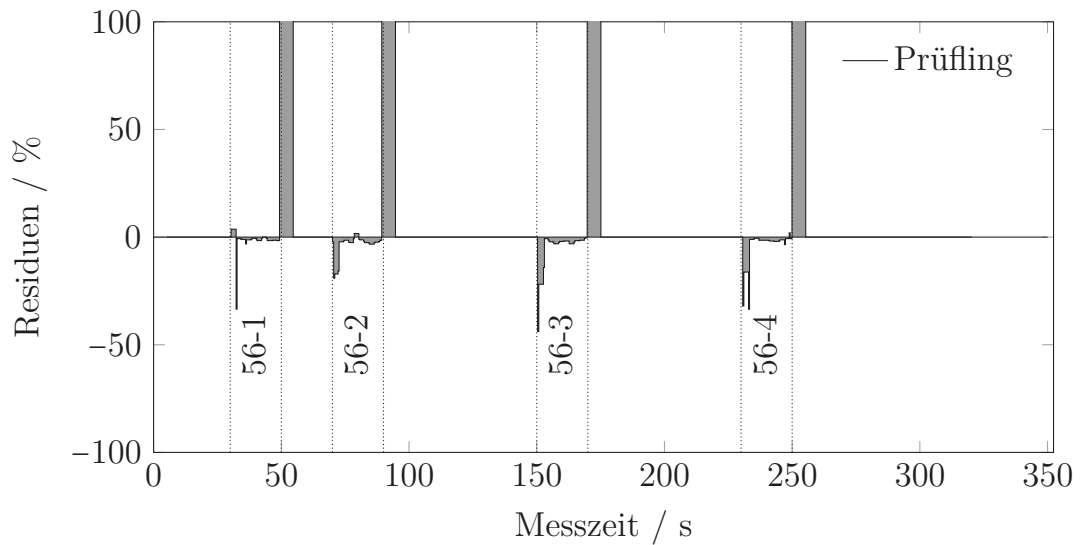


Abbildung 6.14: Residuen zwischen durch den Prüfling gemessenen und theoretischen Volumenstrom über die Messzeit der Sequenz 3 bei Wiederholung 1.

6.4.4 Sequenz 4

Die in Tabelle 6.7 aufgelisteten Messabweichungen der Wiederholungen zeigen, dass lediglich die erste Wiederholung außerhalb der Eichfehlergrenzen liegt. Alle weitere Versuche waren innerhalb von $\pm 2\%$.

Tabelle 6.7: Messabweichungen e der Sequenz 4 gegenüber dem Referenzvolumen V_a .

Wiederholung	Volumen	Messabweichung		
		Referenz	Prüfling	Düsen
n	V_a / l	$e_p / \%$	$e_t / \%$	
1	30,54	-2,10	-0,67	
2	30,48	-1,92	-0,44	
3	30,47	-1,88	-0,53	
4	30,50	-1,62	-0,45	
5	30,48	-1,90	-0,43	

Es ergeben sich die folgenden mittleren Messabweichungen:

Prüfling: $-1,88 \pm 0,152 \%$,

Düsen: $-0,50 \pm 0,088 \%$.

Wie auch in den vorangegangenen Sequenzuntersuchungen ist die mittlere Abweichung des Prüflings im negativen Bereich. Für die Detailbetrachtung der einzelnen Düsenkombinationen wurde auch bei dieser Sequenz die Messabweichung analog zu Sequenz 1 berechnet. Die Detailmessabweichungen sind in Abbildung 6.15 dargestellt. Zur besseren grafischen Darstellung wurde die Ordinatenachse auf -100% erweitert und eine Detaildarstellung für den Bereich von 280 l/h bis 400 l/h eingefügt. Wiederholt vorkommende Düsenkombinationen wurden in der Reihe des Auftretens nummeriert.

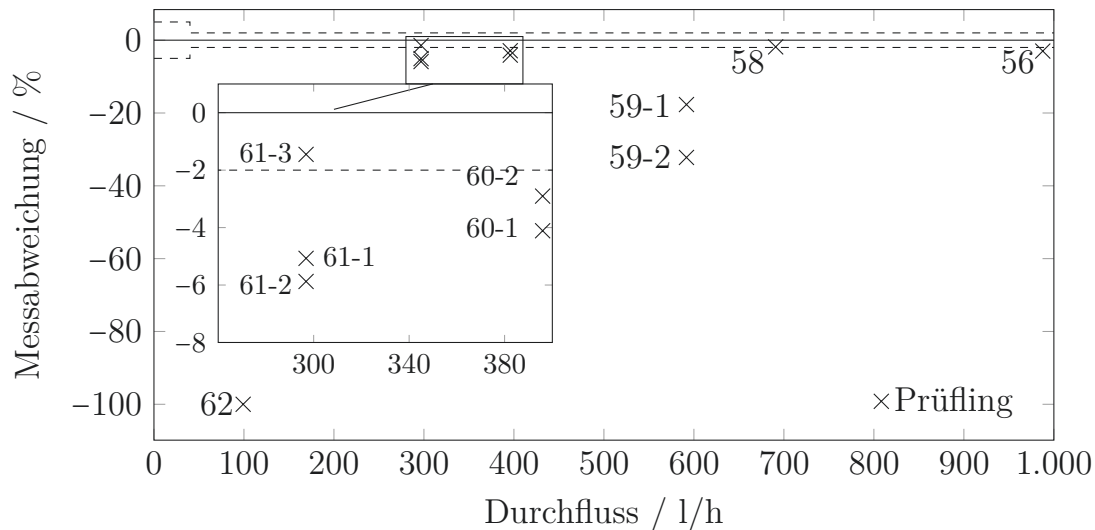


Abbildung 6.15: Messabweichung des Volumens des Prüflings (e_{p_i}) zum theoretischen Volumen bei den einzelnen Düsenkombinationen der Sequenz 4 über der mittleren Durchflussamplitude der Kombination.

Die Grafik verdeutlicht, dass lediglich für zwei Düsenkombinationen die Messabweichungen innerhalb der Eichfehlergrenzen liegen. Alle weiteren liegen außerhalb von $\pm 2 \%$ und haben zum Teil erhebliche Messabweichungen. Kombination 62 nimmt hier eine gesonderte Position ein, mit einer Messabweichung von -100% . Der Prüfling hat diese Durchflussänderung nicht gemessen. Kombination 61 wurde insgesamt drei Mal innerhalb des Profils geschaltet. Die

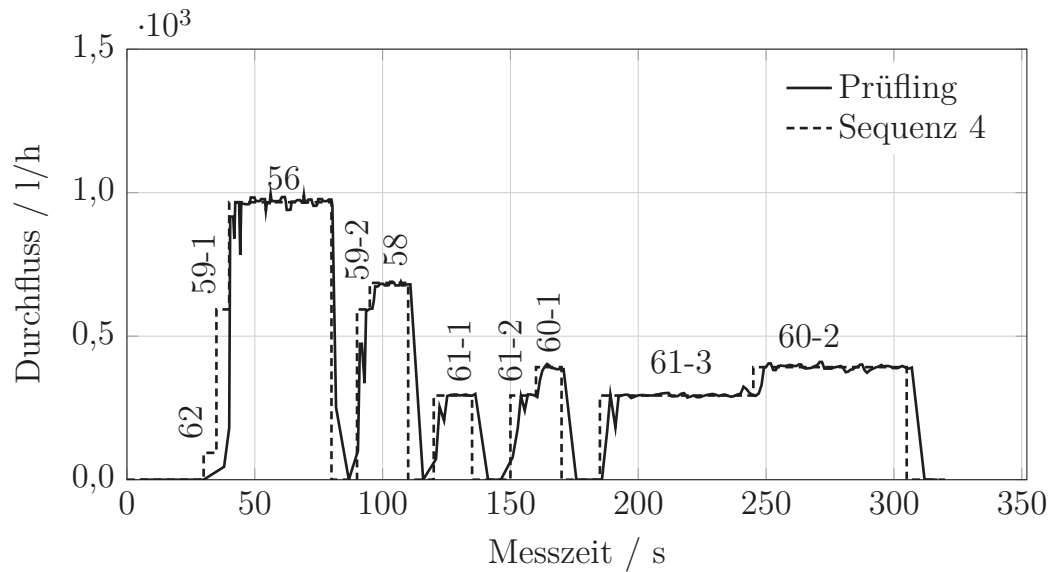


Abbildung 6.16: Gemessener Durchfluss des Prüflings und der theoretische durch Düsenkombination generierte Durchfluss bei Sequenz 4 inklusive der Düsenkombinationen über die Messzeit bei Wiederholung 1.

Messabweichungen zeigen eine Spanne von -6 % bis -1,7 %. Es konnte kein Zusammenhang zwischen der zeitlichen Abfolge des Auftretens und der Messabweichung der Düsenkombination identifiziert werden. Jeder Düsenkombination 61 ist ein Null-Durchfluss vorangegangen. Lediglich die Dauer der einzelnen Schaltungen unterscheiden sich. Die Messzeit der dritten Schaltung beträgt 60 s und die Messabweichung ist nur bei dieser Schaltung innerhalb der Eichfehlergrenzen. Die Dauer der ersten Schaltung ist 15 s und die Messzeit der zweiten Schaltung auf Düsenkombination 61 ist 10 s.

Des Weiteren zeigt sich ein ähnliches Nachlaufverhalten wie bei Sequenz 3. Auch in diesem Fall beträgt der Nachlauf exakt 5 s. Es treten ebenfalls zu Beginn der einzelnen Ereignisse teils erhebliche Durchflussüberhöhungen auf. Die Darstellung der Residuen der Sequenz 4 verdeutlicht dies. Abbildung 6.17 zeigt die Residuen des Prüflings gegenüber dem theoretischen Volumenstrom über die Messzeit. Zur besseren Visualisierung wurden in diesem Fall die Bereiche mit Null-Durchfluss grau hinterlegt. Im Mittel benötigt der Prüfling 2,6 s um den erwarteten Durchfluss abzubilden.

Exemplarisch wurde das Multiamplitudenereignis, welches zu Beginn der

Sequenz auftritt, näher betrachtet. Abbildung 6.18 verdeutlicht, dass der durch Kombination 62 erzeugte Durchfluss von ca. 100l/h nicht vom Prüfling detektiert wird. Erst bei der Schaltung auf Düsenkombination 59-1 detektiert der Prüfling eine Durchflussänderung. Die Erhöhung der Durchflussamplitude durch die Schaltung auf Kombination 56 wird nahezu simultan erfasst und weist im Mittel sehr geringe Residuen von $-2,4 \pm 2,6\%$ auf.

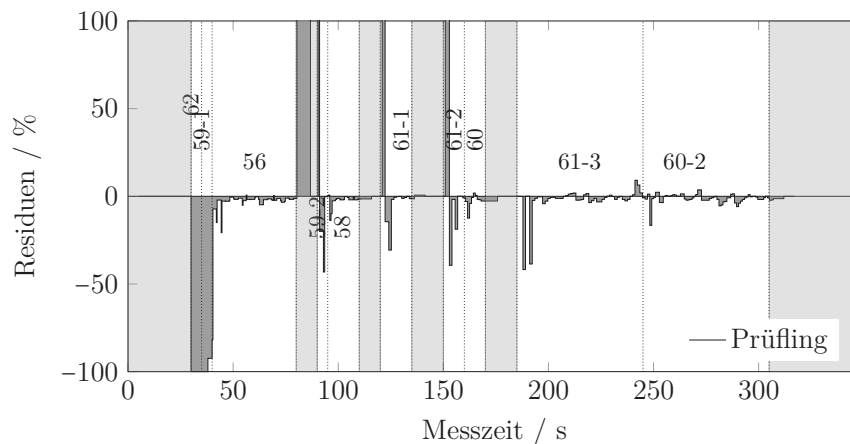


Abbildung 6.17: Residuen zwischen durch den Prüfling gemessenen und theoretischen Volumenstrom über die Messzeit der Sequenz 4 bei Wdh. 1. Graue Bereiche kennzeichnen Messzeiten mit Null-Durchfluss.

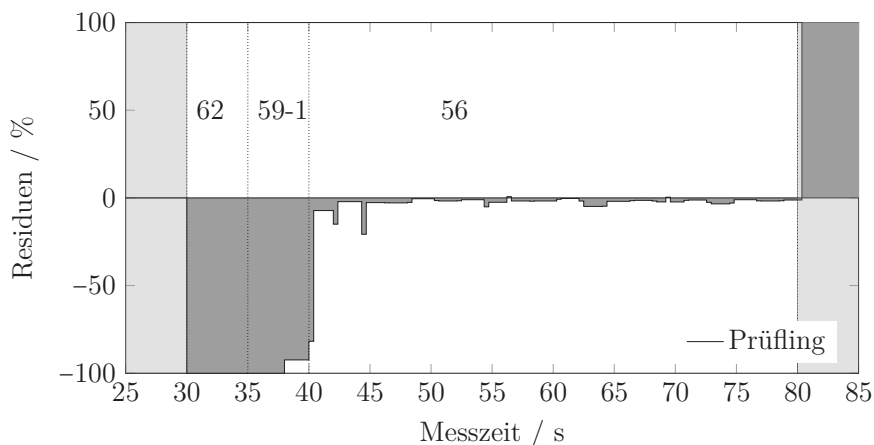


Abbildung 6.18: Detaildarstellung der Residuen des Prüflings zum theoretischen Volumenstrom über die Messzeit der Sequenz 4, Wdh. 1.

6.5 Zusammenfassung und Diskussion der Profiluntersuchungen

Abschließend werden die wichtigsten Erkenntnisse der Sequenzuntersuchungen zusammenfassend dargestellt. Die durchgeführten Untersuchungen sollten die Einsetzbarkeit von Kavitationsdüsen zur dynamischen Prüfung von Wasserzählern belegen und die Auswirkungen dynamischer Prüfprofile auf die Messrichtigkeit der Zähler ermitteln. Die beschriebenen Untersuchungen sind lediglich exemplarisch, da sie nur mit einem handelsüblichen Haushaltswasserzähler eines Messprinzips durchgeführt wurden.

Bei der Analyse der vier unterschiedlichen Sequenzen zeigt sich ein ähnliches Bild. Wird der Durchfluss von Null auf ein Durchflussniveau erhöht, kommt es mehrfach zu einer verzögerten und anschließend zur Erfassung einer überhöhten Durchflussamplitude (Amplitude 6.12). Bei allen Durchflüssen zeigt der Prüfling Durchflussinstabilitäten. Teilweise ist die Streuung vor allem im oberen Durchflussbereich ($> 3.000 \text{ l/h}$), deutlich erkennbar (Abbildung 6.10). Im Mittel beträgt die Streuung $\pm 4 \%$ der aktuellen mittleren Durchflussamplitude des Prüflings.

Des Weiteren ist ein deutlicher Nachlauf des Prüflings bei allen Sequenzen erkennbar. Dieser betrug exakt 5 s, was auf einen internen Softwarealgorithmus des Zählers schließen lässt. Bei kurzen Schaltzeiten von $\leq 5 \text{ s}$ wurde der nominelle Durchfluss vom Prüfling nicht immer erfasst. Beispielfür steht das Multi-Amplituden-Ereignis aus Sequenz 4. Bei diesem wurde Düsenkombination 62 gar nicht und Kombination 59-1 nur anteilig erfasst. Im realen Einsatzbetrieb bedeutet das, dass Wasser entnommen wird, welches aber nicht messtechnisch erfasst wird und somit nicht abgerechnet werden kann.

Die Detailanalyse der Sequenzen zeigt Auswirkungen auf die Messabweichung durch die Kombination folgende Einflussparameter:

- Durchflussamplitude,
- Messzeit,
- vorangegangener Durchflussamplitude.

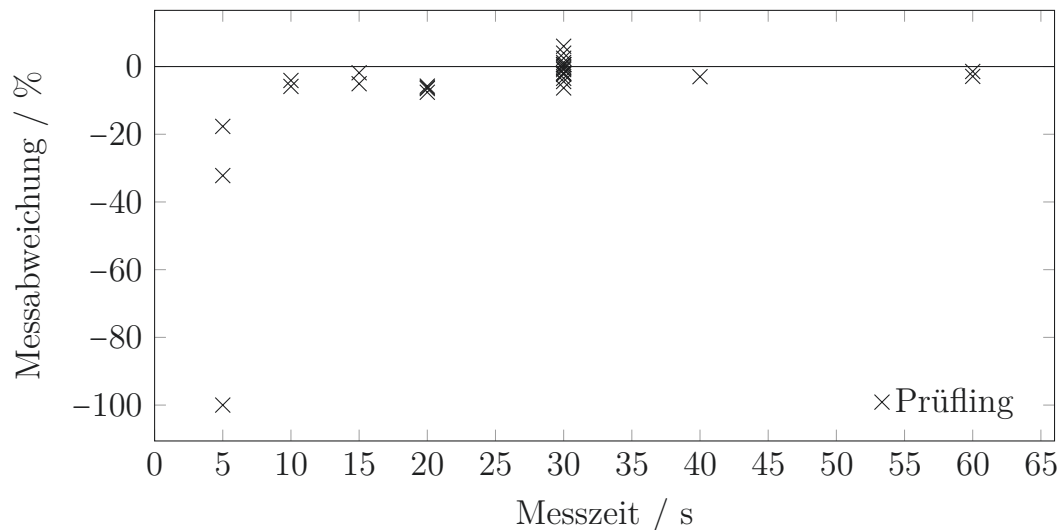


Abbildung 6.19: Alle ermittelten Messabweichungen der Düsenkombinationen für die Sequenzen über die jeweilige Messzeit.

Dies verdeutlicht Abbildung 6.19, in der die Messabweichung der durch Düsenkombination erzeugten Durchflüsse über die Messzeit aufgetragen ist. Bei einer Messzeit von 30 s zeigt sich diese Kombination der Einflussparameter sehr deutlich. Es tritt eine Spanne von ca. -7 % bis +7 % auf. Somit erhöht eine Kombination aus kurzen statischen Durchflüssen (≤ 5 s) und kurzen Null-Durchflussperioden (≤ 5 s) zwischen den Ereignissen für diesen Zählertyp die Messabweichung signifikant.

Dies lässt sich durch die geringe Impulswertigkeit des Prüflings begründen. Der verwendete Wasserzähler hat, wie bereits in Kapitel 6.2 erwähnt, eine Impulswertigkeit von 0,1 l/Impuls. Bei einer Durchflussamplitude von beispielsweise 100 l/h und einer Messzeit von 30 s müsste der Prüfling 8,3 Impulse ausgeben. Da immer nur ganzzahlige Impulse ausgegeben werden, ist bei diesem Szenario ein Fehler von -4 % zu erwarten.

Betrachtet man allerdings die Messabweichung des Prüflings über den gesamten Zeitraum der Sequenz, so zeigt sich ein anderes Bild. Abbildung 6.20 stellt alle Messabweichungen der Sequenzen inklusive der Streuung der Werte durch die Wiederholungen zusammenfassend dar.

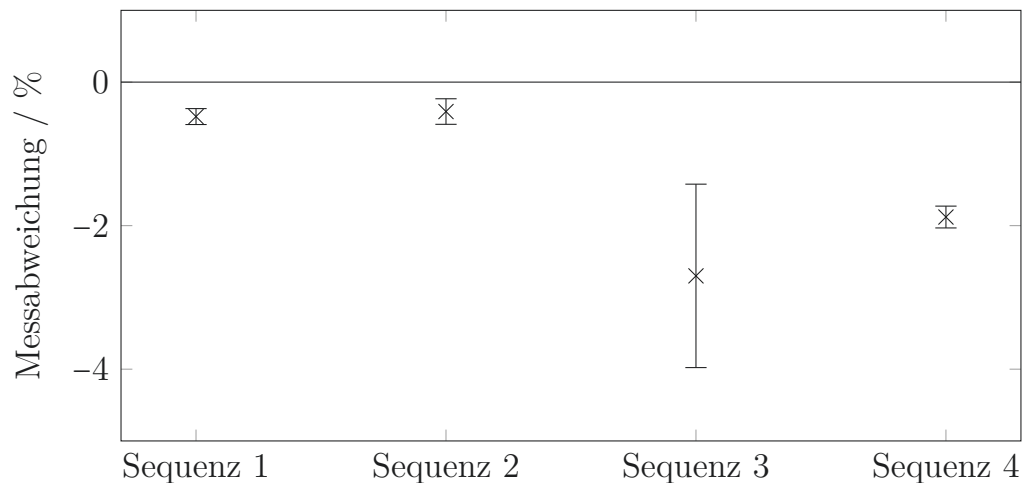


Abbildung 6.20: Mittlere Messabweichungen der untersuchten Sequenzen mit Breite der Streuung als Balken.

Sequenz 1 und das inverse Profil dazu, Sequenz 2, weisen sehr geringe mittlere Messabweichungen von $< -0,5\%$ auf. Sequenz 4 als Repräsentant eines realen Entnahmeprofiles hat ebenfalls geringe mittlere Messabweichungen von $< -2\%$. Lediglich für Sequenz 3, die Nachbildung eines technischen Endverbrauchers, ergeben sich deutliche Abweichungen gegenüber den anderen Sequenzen. Ursache hierfür kann die, wie bereits beschrieben, Kombination aus kurzen Entnahmen und Null-Durchflussereignissen sein. Betrachtet man Sequenz 4 als Nachbildung der Realität, kann davon ausgegangen werden, dass der Zähler im Betrieb die geforderten Fehlergrenzen einhält.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Überlegung, Durchflussmessgeräte mittels Kavitationsdüsen dynamisch zu prüfen, praktisch realisierbar ist und das Prüfprofil Auswirkungen auf die Messrichtigkeit des Wasserzählers hat.

7 Fazit und Ausblick

Der Einsatz von Durchflussmessgeräten in Bereichen des täglichen Lebens nimmt eine wichtige Schlüsselstellung in der Metrologie ein. Eine besondere Herausforderung stellen dabei Durchflussmessungen dar, die in einem direkten Zusammenhang mit unserem Konsumverhalten stehen. So erfordert beispielsweise die korrekte Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs im Auto oder des Trinkwasserverbrauchs im Haushalt Messtechniken, die unter den speziellen Bedingungen ständig wechselnder Durchflüsse und Verbrauchsmengen zuverlässige, abrechnungssichere Messergebnisse liefern müssen. Die Prüfung des Messverhaltens und der Messrichtigkeit der eingesetzten Durchflussmessgeräte unter diesen Bedingungen bedarf einer Anpassung der existierenden Prüfinfrastruktur und Prüfprozeduren.

Am Beispiel des Trinkwasserverbrauchs in Haushalten lässt sich diese notwendige Anpassung detaillierter beschreiben. Der Trinkwasserverbrauch in einem Haushalt wird durch Wasserzähler erfasst. Jeder dieser Zähler unterliegt einer individuellen messtechnischen Prüfung. Die Prüfprozeduren sind dabei international festgeschrieben und abgestimmt. Jedoch differiert die spätere Verwendung des Wasserzählers stark von den durch Regeln und Normen vorgegebenen Prüfbedingungen. Die realen Einsatzbedingungen sind gekennzeichnet durch schnelle Durchflusswechsel mit verschiedenen Entnahmedauern und unregelmäßigen Stillstandszeiten. Im Gegensatz dazu berücksichtigen die angewandten Prüfprozeduren lediglich wenige standardisierte Messpunkte und werden grundsätzlich bei konstant geregelter Durchfluss durchgeführt.

Das Ziel der Arbeit bestand darin, eine Grundlage zu schaffen, um Durchflussmessgeräte zukünftig realitätsnah, objektiv und reproduzierbar prüfen zu können. Es standen drei Fragen zur Erreichung dieses Ziels im Mittelpunkt der Arbeit. Nachfolgend werden diese Fragen und deren Beantwortung zusammenfassend erläutert.

1. Wie hoch ist der aktuelle Wasserverbrauch in deutschen Haushalten

gemessen an der durchgeflossenen Menge an Trinkwasser und der aufgetretenen Häufigkeit der Durchflüsse?

Die Grundlage für die Analyse des aktuellen Wasserverbrauchs bildeten die Daten des DVGW-Forschungsvorhabens „Aktualisierung der Verbrauchsganglinien für Haushalte, Kleingewerbe und öffentliche Gebäude sowie Entwicklung eines Modells zur Simulation des Wasserbedarfs“ (Martin et al., 2017). Es wurde der Durchfluss in Liter pro Sekunde in den genannten Gebäuden über einen Zeitraum von ≥ 30 Tagen aufgezeichnet. 58 Objekte wurden für diese Arbeit detaillierter untersucht. Die Analyse zeigte, dass 95 % aller Durchflüsse unterhalb von 1.200 l/h auftreten und damit fernab des Nenndurchflusses von 4.000 l/h für $Q_3:4 \text{ m}^3/\text{h}$ R160 liegen.

2. Wie lässt sich aus der Analyse des aktuellen Wasserverbrauchs ein Algorithmus ableiten, um statistisch gesicherte, realitätsnahe Prüfprofile zu erzeugen?

Die Anforderung zur Erzeugung von Prüfprofilen ist eine statistisch sichere Menge an Datenreihen. Diese statistisch sichere Menge definiert sich durch eine Datenbasis, die eine ausreichende Anzahl an Datenreihen beinhaltet und deren Einzeldatenreihen die in der Realität vorherrschenden Bedingungen abbildet. Die Einzeldatenreihen haben eine minimale zeitliche Auflösung des Wasserverbrauchs von mindestens einer Sekunde und eine Messzeit von ≥ 30 Tagen, um etwaige Schwankungen im Verbrauchsverhalten abbilden zu können. Sind diese Anforderungen erfüllt, kann durch die Erstellung der kumulierten Verteilungsfunktion des Wasserverbrauchs und der Bildung eines Verteilungsbandes die Erstellung statistisch sicherer Prüfprofile erfolgen. Es wird eine Ziehung von Zufallszahlen für das mittlere empirische Band durchgeführt. Die gewählte Stichprobengröße der Zufallsziehung entspricht der Anzahl der zu generierenden Durchflussereignisse. Die zufällig gezogenen Durchflüsse werden anschließend mit der mittleren Dauer der Ereignisse verknüpft. Die Kombination dieser beiden Parameter ist ein Prüfprofil, welches statistisch gesichert ist und reale Wasserverbräuche widerspiegelt.

3. Wie können die stochastisch erzeugten Prüfprofile unter Laborbedingungen nachgebildet werden, um die Grundlage für eine realitätsnahe Prüfung von Wasserzählern zu schaffen?

Alle derzeitig existierenden Regeln und Normen schreiben die Prüfung von Wasserzählern für konstante Durchflussspunkte vor. Die in der vorliegenden Arbeit dargestellten Prüfstandsinfrastrukturen sind auf statische Durchflüsse ausgelegt und haben die exakte Messung des Durchflusses bei konstanten Bedingungen gemein. Der Einsatz von Kavitationsdüsen ermöglicht es erstmals, sich schnell ändernde, reproduzierbare Durchflüsse zu erzeugen. Diese Technologie ist weltweit einzigartig. Durch die Erzeugung eines Druckunterschiedes zwischen Einlauf und Auslauf der Düse wird der Flüssigkeitsstrom stark beschleunigt, so dass sich der lokal vorherrschende Druck dem Dampfdruck annähert und Kavitation initiiert wird. Es entsteht eine zusammenhängende Kavitationsblase über dem Düsenhals. Dadurch wird der Düsenhalsquerschnitt zusätzlich verengt, so dass ein konstanter Volumenstrom erreicht wird. Durch Parallelschaltung einer oder mehrerer Düsen können unterschiedliche Durchflussamplituden nachweislich innerhalb von ≤ 100 ms reproduzierbar erzeugt werden.

Die Kombination des Algorithmus zur Erzeugung statistisch gesicherter Prüfprofile und die Nachbildung dieser Profile auf einem Prüfstand mittels Kavitationsdüsen ermöglicht es, Durchflussmessgeräte für variable Durchflüsse reproduzierbar zu prüfen. Die in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Experimente mit Wasserzählern belegen dies. Haupteinflussfaktoren auf die Messgenauigkeit der Geräte ist eine Kombination aus Durchflussamplitude, Messzeit und vorangegangener Durchflussamplitude. Anhand der durchgeführten Experimente lässt sich belegen, dass eine Beurteilung des Messverhaltens von Wasserzählern bei realitätsnahen Bedingungen, durch eine dynamische Prüfung möglich ist. Es handelt sich ausschließlich um exemplarische Untersuchungen, da die Experimente mit einem einzigen Messprinzip eines Haushaltswasserzählers durchgeführt wurden. Somit kann keine allgemein gültige Aussage für alle Messprinzipien von Wasserzählern getroffen werden.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit können genutzt werden, um eine erste Prüfung von Wasserzählern unter veränderlichen, dynamischen Bedingun-

gen mittels belastbarer, statistisch gesicherter Prüfprofile durchzuführen. Die Durchführung der Untersuchungen mit Wasser, das abweichende Eigenschaften aufweist, kann unter Umständen zu abweichenden Ergebnissen führen. Eine vollständige Antwort zu den Auswirkungen von Fluideigenschaften auf die Bildung der Kavitationsschicht und deren Grenzschichtdicke kann mit dieser Arbeit nicht gegeben werden. Es empfehlen sich weitere Untersuchungen dazu.

Das Prinzip der intermittierenden Durchflusserzeugung mittels Kavitationsdüsen kann ebenfalls bei anderen Fluiden Anwendung finden. Dazu zählen unter anderem Durchflussmessungen, die in direktem Zusammenhang mit unserem Konsumverhalten stehen wie bspw. der Kraftstoffverbrauch am Motor oder die Nutzung von Warm- und Heißwasser. Es empfehlen sich ebenfalls weitere Untersuchungen dazu.

Das in dieser Arbeit entwickelte Prüfkonzept wird (Stand 2019) in die industrielle Praxis überführt. Im Rahmen eines PTB eigenen Förderprogramms zum Transfer metrologischer Technologien (TransMeT) wurde ein Projekt zwischen dem VDDW und der PTB initiiert, welches den Titel „Prüfung von Wasserzählern unter realitätsnahen Bedingungen“, trägt. Gegenstand dieser Zusammenarbeit ist die Anwendung des entwickelten Prüfkonzeptes, bei dem das Verhalten von Wasserzählern realitätsnah unter dynamischen Lastwechsel getestet werden kann. Ein weiterer Zweck ist die Intensivierung der Forschung und Entwicklung auf dem genannten Gebiet und die spätere Umsetzung der Ergebnisse in innovative Produkte oder Dienstleistungen, sowie die Entwicklung eines Prototyp-Prüfstand in der Industrie für dynamische Lastwechsel auf Basis von Kavitationsdüsen.

Zurzeit (Stand 2019) wird ein europäisches Forschungsprojekt mit dem Titel „Metrology for Real-World Domestic Water Metering (MetroWaMet)“ durchgeführt. Innerhalb des Projektes wird der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz zur Extraktion stochastisch gesicherter Prüfprofile verwendet, um u. a. in einer Pilotstudie metrologische Infrastrukturen zu vergleichen. Mit Hilfe der entwickelten Prüfstände soll es möglich sein Wasserzähler unter realitätsnahen Bedingungen zu testen. Die PTB nimmt an dieser Pilotstudie teil und verwendet hierfür das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren zur dynamischen Durchflusserzeugung mittels Kavitationsdüsen. Das Projekt, welches

vom European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR) gefördert wird, bildet die Basis für einen harmonisierten europäischen Ansatz zur realitätsnahen Prüfung von Wasserzählern.

Literaturverzeichnis

- 18th ITTC Cavitation Committee et al.: Report of the cavitation committee, Proc. of 15th ITTC, Den Haag, 1978.
- 2004/22/EG:2006-03: Richtlinie 2004/22/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 31. März 2004 über Messgeräte, aufgehoben durch Richtlinie 2014/32/EU, 2006.
- 2014/32/EU:2014-02: Richtlinie 2014/32/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Messgeräten auf dem Markt (Neufassung), 2014.
- Abdulaziz, A.: Performance and image analysis of a cavitating process in a small type venturi, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 53, 40–48, 2014.
- Ackeret, J.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen über Hohlraumbildung (Kavitation) im Wasser, *Technische Mechanik und Thermodynamik*, S. 1–23, 1930.
- Adunka, F.: Beeinflussung der Messrichtigkeit von Durchflusssensoren durch gestörte Geschwindigkeitsverteilungen, 2000.
- Adunka, F.: Jahresmessfehler, http://ematem.org/Dokumente/200608/01_d_Seeon_adunka_jahresmessfehler.pdf, 2006.
- Adunka, F. und Kolaczia, W.: Zur Fehlerkurve der Flügelradzähler bei Flüssigkeiten mit hoher Viskosität, na, 1984.
- Alvisi, S., Franchini, M. und Marinelli, A.: A short-term, pattern-based model for water-demand forecasting, *Journal of Hydroinformatics*, 9, 39–50, doi: 10.2166/hydro.2006.016, 2007.
- Aschenbrenner, A.: The influence of humidity on the flowrate of air through critical flow nozzles, in: *Proceedings of FLOMEKO 1983, IMEKO Conference on Flow Measurement*, S. 71–74, 1983.

- Aschenbrenner, A.: Calibration of the New Test Rig For Large Gas Meter of PTB, 5th FLOMEKO, S. 11–22, 1989.
- Ashrafizadeh, S. M. und Ghassemi, H.: Experimental and numerical investigation on the performance of small-sized cavitating venturis, *Flow measurement and Instrumentation*, 42, 6–15, 2015.
- Baker, R.: Fluid flow measurement: R.A. Furness Longman (in association with the Institute of Measurement and Control), *Flow Measurement and Instrumentation*, 1, doi:10.1016/0955-5986(90)90020-8, 1990.
- Bargheer, K.: Wasserzähler Technik und gesetzliche Bestimmungen, Vol. PTB-MA-76 von *Mechanik und Akustik*, PTB, Berlin, 2005.
- BDEW: Trinkwasser (Daten/Grafiken): Kennzahlen und Grafiken, <https://www.bdew.de/wasser-abwasser/trinkwasserschutz/?typ=graphic&tags=trinkwasser>, besucht am: 2018-01-16, 2017.
- Beaudoin, J., Cadot, O., Aider, J., Gosse, K., Paranthoën, P., Hamelin, B., Tissier, M., Allano, D., Mutabazi, I., Gonzales, M. et al.: Cavitation as a complementary tool for automotive aerodynamics, *Experiments in fluids*, 37, 763–768, 2004.
- Beyer, K.: Überschreiten der Verkehrsfehlergrenzen bei gebrauchten Hauswasserzählern (Mehrstrahl-Flügerald-Nassläufer) und Versuche zu deren Beseitigung, *gwf Wasser | Abwasser*, 128, 165–173, 1987.
- Bhaskaracharya, R. K., Kentish, S. und Ashokkumar, M.: Selected applications of ultrasonics in food processing, *Food Engineering Reviews*, 1, 31, 2009.
- Billings, R. B. und Jones, C. V.: Forecasting urban water demand, *American Water Works Association*, 2011.
- Blokker, E. J. M.: Stochastic water demand modelling for a better understanding of hydraulics in water distribution networks, *Citeseer*, 2010.
- Brennen, C. E.: Cavitation in medicine, *Interface focus*, 5, 20150022, doi:10.1098/rsfs.2015.0022, 2015.
- Brinkhorst, S.: Numerische und experimentelle Untersuchung zur metrologischen Nutzung von kavitierenden Venturi-Düsen, *Universität Duisburg-Essen*, 2017.

- Brinkhorst, S., von Lavante, E. und Wendt, G.: Numerical investigation of cavitating Herschel Venturi-Tubes applied to liquid flow metering, *Flow Measurement and Instrumentation*, 43, 23–33, 2015.
- Brinkmann, B., Ed.: Internationales Wörterbuch der Metrologie: Grundlegende und allgemeine Begriffe und zugeordnete Benennungen (VIM) ; deutsch-englische Fassung ISO/IEC-Leitfaden 99:2007 = Vocabulaire international de métrologie = International vocabulary of metrology, Wissen Messwesen, Beuth, Berlin, 4. aufl., korr. fassung 2012 Ed., 2012.
- Cheifetz, N., Noumir, Z., Samé, A., Sandraz, A.-C., Féliers, C. und Heim, V.: Modeling and clustering water demand patterns from real-world smart meter data, *Drinking Water Engineering and Science*, 10, 75–82, doi:10.5194/dwes-10-75-2017, 2017.
- Davis, M. P., Dunn, P. F. und Thomas, F. O.: Jet Fuel Cavitation in a Converging Diverging Nozzle, in: 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting, S. 385–390, doi:10.1115/FEDSM2007-37108, 2007.
- Deutscher Kalibrierdienst: Richtlinie - Rückführung von Mess-und Prüfmittel auf nationale Normale, 1998.
- DIN EN 806-3:2006-07: Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Teil 3: Berechnung der Rohrrinnendurchmesser - Vereinfachtes Verfahren, 2006.
- DIN EN ISO 4064:2014-11: Wasserzähler zum Messen von kaltem Trinkwasser und heißem Wasser Teil 1-5, 2014.
- DIN EN ISO 5167-4:2003-01: Durchflussmessung von Fluiden mit Drosselgeräten in voll durchströmten Leitungen mit Kreisquerschnitt - Teil 4: Venturirohre, 2003.
- DIN EN ISO 9300:2005-11: Durchflussmessung von Gasen mit Venturidüsen bei kritischer Strömung (ISO 9300:2005), 2005.
- Dowle, M. und Srinivasan, A.: data.table: Extension of ‘data.frame’, <https://CRAN.R-project.org/package=data.table>, r package version 1.11.4, 2018.

- DVGW: Technische Regeln - Arbeitsblatt W400: Technische Regeln Wasser-
verteilungsanlagen (TRWV); Teil 1: Planung, 2001a.
- DVGW: Technische Regeln - Arbeitsblatt W420: Magnetisch-Induktive Durch-
flussmessgeräte (MID-Geräte), Anforderungen und Prüfungen, 2001b.
- DVGW: Technische Regeln - Arbeitsblatt W406: Volumen-und Durchflussmes-
sung von kaltem Trinkwasser in Druckrohrleitungen, 2012.
- DVGW: Technische Regeln - Arbeitsblatt W410: Wasserbedarf - Kennwerte
und Einflussgrößen, 2018.
- Eff, U.: Wasserzählergenauigkeit - Welcher Zähler misst richtig?, in: WAT -
Wasserfachliche Aussprachetagung, Dresden, 2012.
- Eichler, T., Straka, M., Fenske, H., Rose, J. und Lederer, T.: Verbindung
von Stereo-PIV und CFD zur Untersuchung eines Durchmessersprunges in
kleinem Rohrdurchmesser, tm - Technisches Messen, 81, doi:10.1515/tem
e-2014-1042, 2014.
- European Commission: Formal Objection against EN ISO 4064-1:2014 Water
meters for cold potable water and hot water - Part 1: Metrological and tech-
nical requirements (ISO 4064-1:2014), [https://ec.europa.eu/docsroom
/documents/17741/attachments/1/translations/en/renditions/pdf](https://ec.europa.eu/docsroom/documents/17741/attachments/1/translations/en/renditions/pdf),
2016.
- Fachausschuss DVGW: Ermittlung des Wasserbedarfs als Planungs-
grundlage zur Bemessung von Wasserversorgungsanlagen: DVGW-
Forschungsprogramm 02-WT 956: Schlussbericht Wohngebäude, 1987.
- Gendries, S.: ZDF-WISO fragt: Wasserzähler zu groß?, [http://www.
lebensraumwasser.com/?p=1982](http://www.lebensraumwasser.com/?p=1982), 2014.
- Ghassemi, H. und Fasih, H. F.: Application of small size cavitating venturi
as flow controller and flow meter, Flow Measurement and Instrumentation,
22, 406–412, 2011.
- Grubbs, F. E.: Sample criteria for testing outlying observations, The Annals
of Mathematical Statistics, 21, 27–58, 1950.

- Heilman, E., Narula, N., Tanzer, G., Lovejoy, J., Colavita, M., Virza, M. und Dryja, T.: Cryptanalysis of Curl-P and Other Attacks on the IOTA Cryptocurrency., IACR Cryptol. ePrint Arch., 2019, 344, 2019.
- Hofmann, G.: Dimensionierung von Wasserzählern für Wohngebäude, energie | wasser-praxis, S. 26–27, 2005.
- Hofmann, G.: Messungen an überdimensionierten Hauswasserzählern, energie | wasser-praxis, S. 26–29, 2006.
- Hofmann, G.: Messverhalten überdimensionierter Wasserzähler in Wohngebäuden, energie | wasser-praxis, S. 46–51, 2008.
- Hofmann, G.: Berechnungsformel für Hauswasserzähler in Wohngebäuden, energie | wasser-praxis, S. 27–31, 2009.
- Hsu, Y.: Review of critical flow rate, propagation of pressure pulse, and sonic velocity in two-phase media, na, 1972.
- Keller, A. P.: Cavitation Scale Effects-empirically found relations and the correlation of Cavitation Number and Hydrodynamic Coefficients, <http://resolver.caltech.edu/cav2001:lecture.001>, 2001.
- Klümper, T. H.: Wasserverwendung - Trinkwasser-Installation, Vol. 4 von *Lehr- und Handbuch Wasserversorgung*, Oldenbourg Industrieverl., München [u.a.], 2000.
- Kramper, G.: Superkavitation - wenn U-Boote schneller tauchen als Kampf-Jets fliegen können, <https://www.stern.de/digital/technik/superkavitation---wenn-u-boote-sich-so-schnell-wie-jets-bewegen-koennen-7919908.html>, besucht am: 2018-08-06, 2018.
- Kreuzberg, J. und Wien, J., Ed.: Handbuch der Heizkostenabrechnung, Werner, Köln, 9. Ed., 2015.
- Martin, T., Korth, A. und Schubert, K.: Aktualisierung der Verbrauchsganglinien für Haushalte, Kleingewerbe und öffentliche Gebäude sowie Entwicklung eines Modells zur Simulation des Wasserbedarfs: Abschlussbericht, <https://www.dvgw-regelwerk.de/plus/#technische-regel/dvgw-abschlussbericht-w-201510/7388b4>, 2017.

- Maslak, D. und Weuster-Botz, D.: Combination of hydrodynamic cavitation and chlorine dioxide for disinfection of water, *Engineering in Life Sciences*, 11, 350–358, 2011.
- Mathies, N. und Wendt, G.: Dynamische Flüssigkeitsmengen mit Coriolis-Durchflussmessgeräten: ASEAN - PTB training course on dynamic measuring system for liquid using Coriolis mass flowmeters, Singapore, 16 - 20 July 2012, Vol. 91 von *Wissenschaftliche Veröffentlichungen / Physikalisch-Technische Bundesanstalt*, Wirtschaftsverl. NW, Verl. für Neue Wiss, Bremerhaven, 2. Aufl. Ed., 2013.
- McKenna, S. A., Fusco, F. und Eck, B. J.: Water Demand Pattern Classification from Smart Meter Data, *Procedia Engineering*, 70, 1121–1130, doi:10.1016/j.proeng.2014.02.124, 2014.
- Miller, R. W.: Flow measurement engineering handbook, McGraw-Hill, New York, N.Y., 3rd Ed., 1996.
- Müller, U., Dues, M. und Baumann, H.: Vollflächige Erfassung von ungestörten und gestörten Geschwindigkeitsverteilungen in Rohrleitungen mittels der Laser-Doppler-Velocimetrie (Completely Detection of Disturbed and Undisturbed Flow Conditions in Pipes with Laser Doppler Velocimetry), *tm - Technisches Messen*, 74, 2007.
- Numachi, F.: Über die Kavitationsentstehung mit besonderem Bezug auf den Luftgehalt des Wassers, *Ingenieur-Archiv*, S. 396–409, doi:10.1007/BF02090428, 1936.
- OIML R49-1,2,3:2013 (E): Water meters for cold potable water and hot water, international Recommendation, 2013.
- Pflugradt, N. D.: Modellierung von Wasser und Energieverbräuchen in Haushalten, na, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-209036>, 2016.
- Pöschel, W.: Die Aufgaben eines Primärnormals zur Sicherung der Vergleichbarkeit der Kalibrierergebnisse in der Durchflussmesstechnik, 2001.

- PTB: Technische Richtlinie W2: Messgeräte für Trinkwasser - Volumen- und Durchflussmessgeräte als Gebrauchsnormale für die Prüfung von Wasserzählern, <https://intern.ptb.de/org/q/q3/gesMW/sp3-gwk/TR-W02.pdf>, 1984.
- PTB-Prüfregeln -W20:1982: Messgeräte für Wasser - Prüfungen an gebrauchten Hauswasserzählern, 1982.
- RTL: Gebühren-Abzocke mit Wasseruhren, <https://www.rtl.de/cms/gebuehren-abzocke-mit-wasseruhren-698723.html>, besucht am: 2018-17-07, 2015.
- Ryan, J. A. und Ulrich, J. M.: xts: eXtensible Time Series, <https://CRAN.R-project.org/package=xts>, r package version 0.10-2, 2018.
- Schachner, F.: Kriterien bei der Beurteilung des Kleinlastbereiches von Hauswasserzählern, gww - gas wasser wärme, S. 137–142, 1995.
- Scholl, G., Gossen, M., Holzhauer, B. und Schipperges, M.: Umweltbewusstsein in Deutschland 2014: Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage, 2015.
- Schulz, W.: Richtigkeitsprüfung an Kaltwasserzählern nach Ablauf der Eichgültigkeitsdauer, PTB-Mitteilung, S. 102–108, 1985.
- Spitzer, D. W.: Flow measurement: Practical guides for measurement and control, Practical guides for measurement and control, Instrument Soc. of America, Research Triangle Park, NC, 2. printing Ed., 1996.
- Statistisches Amt der Europäischen Union: Wasserstatistik - Statistics Explained, http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Water_statistics/de, besucht am: 2017-11-23, 2017.
- Statistisches Bundesamt: Umwelt: Wasserabgabe der öffentlichen Wasserversorgung, http://www.statistik-portal.de/Statistik-Portal/de_jb10_jahrtabu2.asp, besucht am 2017-11-22, 2016a.
- Statistisches Bundesamt: Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserentsorgung - Öffentliche Wasserversorgung- 2016, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Publikationen/Downloads-Wasserwirtschaft/>

- wasser-oeffentlich-2190211169004.pdf?__blob=publicationFile&v=6, besucht am: 2019-06-17, 2016b.
- Stefanski, F.: Dimensionierung von Wasserzählern für Wohngebäude, gwf Wasser | Abwasser, S. 52–57, http://ojs.di-verlag.de/index.php/gwf_wa/article/view/859, 2013.
- Team, R.: RStudio: Integrated Development Environment for R, RStudio, Inc., Boston, MA, <http://www.rstudio.com/>, 2015.
- Team, R. D. C.: R: A Language and Environment for Statistical Computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, <http://www.R-project.org>, ISBN 3-900051-07-0, 2008.
- Tietz, H.-P.: Auswirkungen des demographischen Wandels auf die Netzinfrastruktur, 2006.
- Tränckner, J., Koegst, T. und Nowack, M.: Auswirkungen des demografischen Wandels auf die Siedlungsentwässerung (DEMOWAS): Abschlussbericht, Techn. Univ., Fak. Forst, Geo-und Hydrowiss., Inst. für Siedlungs-und Industrierwasserwirtschaft, 2011.
- Waldmann, K.-H. und Helm, W. E.: Simulation stochastischer Systeme: Eine anwendungsorientierte Einführung, Springer-Verlag, 2016.
- Wendt, G.: Prüfung von Wasserzählern unter realen Einsatzbedingungen und Zählerdimensionierung, in: 6. EMATEM-Sommerschule, Kloster Seeon, Deutschland, 2010.
- Wendt, G.: Experimental investigation of liquid flows in different pipe configurations using improved LDA techniques, Vol. 56 von *International scientific colloquium / Ilmenau University of Technology*, Universitätsbibliothek Ilmenau, Ilmenau, 2011.
- Wendt, G. und Brinkhorst, S.: Simualtion Kavitationsdüsen, in: Erfahrungsaustausch FLOW, Braunschweig, 2015.
- Wendt, G., Fröhlich, H., Groth, H., Hahnewald, J., Malik, A. und Müller, A.: Transfornormale für strömendes Wasser: Teil A: Vor-Ort-Prüfung von Wasserzählern ; Teil B: Nasse Vermessung von Normalmessbehältern und

- Lagerbehältern, Vol. 82 von *PTB-Bericht MA, Mechanik und Akustik*, Wirtschaftsverl. NW, Verl. für Neue Wiss, Bremerhaven, 2007.
- Wendt, G., Engel, R. und Riedel, J.: Sicherstellung der Rückführbarkeit der Mengen- und Durchflussmessungen von Flüssigkeiten, PTB-Mitteilung, S. 23–27, 2009.
- Wendt, G., Mickan, B., Mathies, N. und Ehrler, A.: Flüssigkeitsmengenreferenzapparat und Verfahren zum Erzeugen eines Flüssigkeitsstroms definierter Stärke, 2011.
- Wright, J., Mikan, B., Paton, R., Park, K.-A., Nakao, S.-i., Chahine, K. und Arias, R.: CIPM key comparison for low-pressure gas flow: CCM. FF-K6, Metrologia, 44, 07 008–07 008, 2007.
- Xiong, Y., GAO, Y. und WANG, G.: Numerical Study of Drag Reduction Ability on Supercavitation Vehicle, Journal of Ballistics, 1, 014, 2007.
- Yuan, W., Sauer, J. und Schnerr, G. H.: Modeling and computation of unsteady cavitation flows in injection nozzles, Mécanique & industries, 2, 383–394, 2001.
- Zhao, W.-b., Shi, X.-f., Yi, Y. und HAN, X.-b.: Application of Hydoreactive Metal Fuel in Super-Cavitation Torpedo Propulsion System, Chinese Journal of Explosives and Propellants, 29, 53, 2006.

Anhang

A R-Skripte

A.1 Berechnung des C_i-Punktes

```
#### Berechnung der Wendepunkte der
      toroidalen Duesen CNT

## Setup ####
#Laden der Pakete
library(data.table)
library(ggplot2)

#Erstellen der Variablen
lst <- list()

## Einlesen der Daten ####
files <- list.files("./data/CNT_orig/") #
      Liste der Dateien

for(i in 1:length(files)){
  lst[[i]] <- fread(
    paste0(
      "P:/04.Promotion/06.▯Berechnungen/R-
        Kaviduesen/data/CNT_orig/",
      files[i]
    ))}

inFile <- do.call(rbind, lst) # Wandeln der
      Liste in Data.Table
#Namensgebung
names(inFile) <- c("nr", "press", "flow", "
      n.flow")
```

```
##Filter
#Filter von 2 Wert davor und danach
f2<-rep(1/3,3)

# Berechnung der Filterreihe
inFile[, filt:=filter(n.flow, f2, sides=2),
      nr]
inFile[, filt:=as.numeric(filt)] #
      Umstellung in Numerisch

#   Unterhalb von 0,6 stbailer Durchfluss,
#   deswegen Mittelwert und dann die
      Abweichung
#   zum Mittelwert

# Mittelwertberechnung
mw.dat<-inFile[press <=.6, mean(filt, na.rm
      = TRUE), nr]

# Zuordnung der Mittelwerte zu Data.table
for(i in 1:nrow(mw.dat)){
  inFile[nr==i, mw:=as.numeric(mw.dat[i, 2])]
}

# Berechnung der Abweichung zum MW Wert
inFile[, abw:=(filt -mw)/mw*100]

##Ergebnis
inFile[abw>=-5 & abw<=-1, first(press,1),
      nr]

##Plot der Residuen
```



```

ggplot(inFile, aes(press, abw, shape=factor
(nr)))+
  geom_point()+
  lims(y=c(-5,5))+
  theme_classic()+
  geom_hline(yintercept=-1, lty=2)+
  geom_hline(yintercept=1, lty=2)+
  labs(shape="Duesen",
        x="Druckverhaeltnis_/_P_2/P_1"
        ,
        y="Residuen_/_%"
  )

```

```

#####
# Speichern der Ergebnisdatei #
#####

```

```

write.csv(x = inFile,
file = "2018-08-10_inFile_residuen.csv",
row.names = FALSE,
quote = FALSE,
na = "")

```

A.2 Kompressionsfunktion

```

#Komprimierungsfunktion
# X Rohdatei als XTS
comp <- function(X) {
  # Aufbau einer Struktur:
  Zeit, Durchfluss, Dauer, Wochentag
  require(xts)
  require(data.table)
  if (is.xts(X) == FALSE) {

```

```
      stop("Uebergebarer Dateityp ist keine_XTS")
    }

    # roh<-as.data.table(X, keep.rownames =
      TRUE)
    roh <- data.table(time=as.POSIXct(index(X))
      ,
      flow=
      coredata
      (X))

    names(roh) <- c("time", "flow")
    roh[, count:=rleid(flow)]

    ds<-roh[,.(time=first(time),
      flow=mean(flow),
      duration=.N),
      by=count]
    ds<-ds[, count:=NULL]
    ds<- ds[, days:=weekdays(time)]

    return(ds)
  }
}
```

A.3 Sigmoidfunktion

```
# Weibull

# fitting code
fit.weibull <- nls(y~a-(a-b)*exp(-(k*x)^d),
```

```
                                start=list (a
                                =0.9,b=0.11,k
                                =6, d=2.8))
p2 <- predict(fit.weibull, root$flow)

g3 <- ggplot(
  root,
  aes(flow, meanProb, lty="empirisch_
    ermittelte_Kurve")
)+
geom_step()+
geom_line(
  data = root,
  aes(flow, p2, lty="Modellkurve")
)+
theme_classic()+
labs(
  x="Durchfluss_/_l/s",
  y="kumulative_Verteilungsfunktion",
  title = paste0("Weibull_f(x)_=_",
    as.character(fit.weibull$call$
      formula[3]))
)+
scale_linetype_manual(values = c
  (1,2), name="")+
theme(legend.position = c(0.9, 0.2)
)

g4 <- ggplot(root, aes(flow, residuals(fit.weibull)
  ))+
  geom_point(pch=4)+
  theme_classic()

multiplot(g3, g4)
```

```
summary(fit.weibull)

# TangensHyperbolicus

fit.tanh <- nls(
  y~a+b*0.5*(1+tanh(k*log(x/d))),
  start=list(a=0.13,b=0.86,k=5.17, d
    =0.12)
)
p3 <- predict(fit.tanh, root$flow)

g5 <- ggplot(
  root,
  aes(flow, meanProb, lty="empirisch_
    ermittelte_Kurve")
)+
  geom_step()+
  geom_line(data = root, aes(flow, p3
    , lty="Modellkurve"))+
  theme_classic()+
  labs(
    x="Durchfluss_/l/s",
    y="kumulative_
      Verteilungsfunktion",
    title = paste0("tanh_f(x)_="
      , as.character(fit.
        tanh$call$formula[3]))
  )+
  scale_linetype_manual(values = c(1,2), name="")+
  theme(legend.position = c(0.9, 0.2))

g6 <- ggplot(root, aes(flow, residuals(fit.tanh)))+
  geom_point(pch=4)+
  theme_classic()
```

```
multiplot(g5, g6)
```

```
summary(fit.tanh)
```

B Detailergebnisse

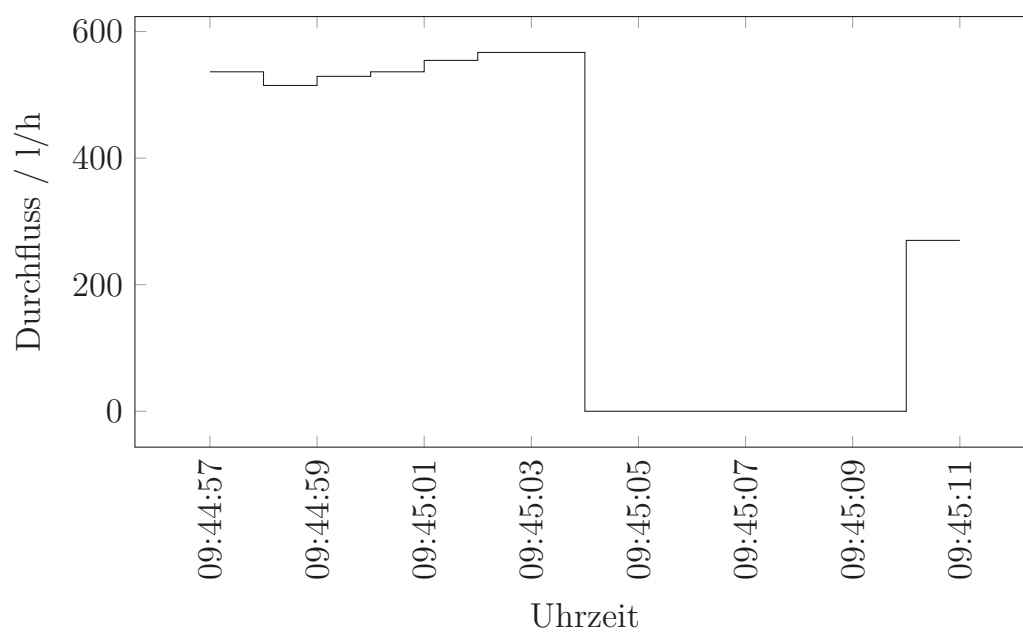
B.1 Objektübersicht

Nr.	ID	Messzeit / d	Nr.	ID	Messzeit / d
1	Objekt_01	77,93	30	Objekt_36	54,98
2	Objekt_02	66,03	31	Objekt_37	63,98
3	Objekt_03	58,49	32	Objekt_38	54,97
4	Objekt_04	54,97	33	Objekt_39	61,06
5	Objekt_05	54,94	34	Objekt_40	61,97
6	Objekt_06	57,07	35	Objekt_41	64,57
7	Objekt_08	24,07	36	Objekt_42	46,93
8	Objekt_09	73,84	37	Objekt_44	63,00
9	Objekt_10	54,99	38	Objekt_45	46,95
10	Objekt_11	35,01	39	Objekt_48	69,96
11	Objekt_13	24,88	40	Objekt_49	83,89
12	Objekt_14	29,78	41	Objekt_51	83,89
13	Objekt_16	24,99	42	Objekt_63	27,88
14	Objekt_17	71,28	43	Objekt_64	28,02
15	Objekt_19	51,16	44	Objekt_65	64,95
16	Objekt_20	55,10	45	Objekt_66	61,95
17	Objekt_21	55,13	46	Objekt_67	68,22
18	Objekt_22	32,72	47	Objekt_68	61,93
19	Objekt_23	73,06	48	Objekt_69	50,70
20	Objekt_25	72,04	49	Objekt_71	74,93
21	Objekt_26	32,16	50	Objekt_72	54,93
22	Objekt_27	66,96	51	Objekt_73	70,77
23	Objekt_28	70,82	52	Objekt_75	62,90
24	Objekt_29	35,00	53	Objekt_76	63,10
25	Objekt_30	70,94	54	Objekt_77	63,78
26	Objekt_32	62,03	55	Objekt_78	73,84
27	Objekt_33	55,99	56	Objekt_80	62,80
28	Objekt_34	55,95	57	Objekt_81	70,94
29	Objekt_35	62,85	58	Objekt_82	75,98

B.2 Originäre Datenreihe

Zeitstempel	Durchfluss Q / l/h
2016-02-11 09:44:57	536,4
2016-02-11 09:44:58	514,8
2016-02-11 09:44:59	529,2
2016-02-11 09:45:00	536,4
2016-02-11 09:45:01	554,4
2016-02-11 09:45:02	567,0
2016-02-11 09:45:03	567,0
2016-02-11 09:45:04	0,0
2016-02-11 09:45:05	0,0
2016-02-11 09:45:06	0,0
2016-02-11 09:45:07	0,0
2016-02-11 09:45:08	0,0
2016-02-11 09:45:09	0,0
2016-02-11 09:45:10	270,0
2016-02-11 09:45:11	270,0

B.3 Durchflussprofil



B.4 Umweltparameter Sequenzuntersuchung

Name	Temperatur °C	Druck kPa	Wasserdichte kg/m ³
Sequenz 1	20,15 ± 0,04	363 ± 1	998,50
Sequenz 2	19,86 ± 0,16	363 ± 1	998,55
Sequenz 3	20,13 ± 0,07	366 ± 1	998,50
Sequenz 4	19,92 ± 0,11	366 ± 1	998,53

B.5 Ausreißertest nach Grubbs

B.5.1 Prüfling

Zeile n / -	Messabweichung e_p / %	Prüfgröße G / -	Ausreißer
1	-0,58	0,3712	Ausreißer $P < 0,05$
2	-0,55	0,3941	
3	-3,40	1,7826	
4	-0,30	0,5850	
5	-0,50	0,4323	

B.5.2 Düsen

Zeile n / -	Messabweichung e_p / %	Prüfgröße G / -	Ausreißer
1	0,58	0,3062	Ausreißer $P < 0,05$
2	0,96	0,5614	
3	-2,50	1,7620	
4	1,10	0,6554	
5	0,48	0,2390	

Lebenslauf

Persönliche Angaben

Name	Daniel Schumann
Geburtsdatum	11.02.1986
Geburtsort	Karl-Marx-Stadt (Chemnitz)
Adresse	Riedestr. 14, 38102 Braunschweig



Beruflicher Werdegang

08/2019 - heute	Arbeitsgruppenleiter der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Fachbereich 1.5, Arbeitsgruppe 1.53 - Weitergabe Flüssigkeitsmenge <ul style="list-style-type: none">- Fachliche Leitung der Arbeitsgruppe 1.53 „Weitergabe Flüssigkeitsmenge“- Anpassung und Weiterentwicklung von Messeinrichtungen unter dynamischen Lasten
03/2015 - 08/2019	Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Fachbereich 1.5, Arbeitsgruppe 1.53 - Weitergabe Flüssigkeitsmenge <ul style="list-style-type: none">- Projektbearbeiter des Forschungsprojektes: „Messtechnische Sicherung der Messung des Kraftstoffverbrauchs unter realen Betriebsbedingungen“- Leitung des Arbeitspaktes zur Erstellung eines virtuellen Durchflussmessgerätes, EMPIR-Projekt „Metrology for real-world domestic water metering“- Erstellung von Messunsicherheitsbudgets- Dynamische Prüfung von Durchflussmessgeräten
03/2012 - 02/2015	Wissenschaftlicher Mitarbeiter beim DVGW Technologiezentrum Wasser, Außenstelle Dresden <ul style="list-style-type: none">- Projektbearbeiter des DVGW-Forschungsprojektes: „Aktualisierung der Verbrauchsganglinien für Haushalte, öffentliche Gebäude und Kleingewerbe sowie Entwicklung eines Modells zur Simulation des Wasserbedarfs“- Erstellung optimierter Spülpläne im Rahmen hydraulischer Modellierungen- Güteeinschätzung von Trinkwasserverteilungssystemen aufgrund von Ablagerungssituationen
04/2010 - 02/2012	Studentische Hilfskraft beim DVGW Technologiezentrum Wasser, Außenstelle Dresden
11/2009 - 03/2010	Trainee beim KWR – Watercycle Research Institute, Nieuwegein, Niederlande
09/2009 - 11/2009	Trainee an der Riga Technical University (RTU), Riga, Lettland
01/2005 - 09/2005	Zivildienst im Ev.-Luth.-Kindergarten Sankt Marien, Marienberg

Akademischer Werdegang

04/2016 - heute	Doktorand, Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Rostock - Titel der Promotion: „Entwicklung von realitätsnahen Prüfprozeduren für Durchflussmessgeräte basierend auf realen Verbräuchen“
10/2006 - 02/2012	Studium an der Technischen Universität Dresden - Studiengang: Wasserwirtschaft - Abschluss: Diplomingenieur für Wasserwirtschaft (Note 2,7)
10/2005 - 10/2006	Studium an der Technischen Universität Dresden - Studiengang: Lehramt Mathematik/Ethik - Philosophie für Mittelschule (o.A.)
09/1997 - 06/2004	Gymnasium Marienberg, Marienberg (Abiturnote 2,9)

Publikationen

12/2019	„Intermittierende Durchflusserzeugung unter Einsatz von Kavitationsdüsen“, Schumann D., Kroner C., Mickan B., Tränckner J., tm - Technisches Messen, 87,(1), 55-65
10/2019	„Entwicklung eines praxisorientierten und gesetzeskonformen Stichprobenverfahrens für Wasserzähler“, Kroner C., Schonlau H., Oldörp T., Schumann D., Liebig J., PTB-Bericht MA, Mechanik und Akustik vol 100
03/2019	„Kavitationsdüsen - Eine neue Technologie für die Durchflussmessung von Flüssigkeiten“, Schumann D., PTB-Mitteilungen 1/2019, Heft1: Metrologie im Fluss: Durchflussmessungen
03/2019	„Realitätsnahe Prüfung von Wasserzählern“, Schumann D., PTB-Mitteilungen 1/2019, Heft1: Metrologie im Fluss: Durchflussmessungen
03/2018	„Using Cavitation Metrologically“, Schumann D., Kroner C., 10th International Symposium for Fluid Flow Measurement, ISFFM 2018 Queretaro, Mexiko
10/2017	„Über das Messverhalten von Wasserzählern in kommunalen Versorgungsnetzen“, Wendt G., Schonlau H., Oldörp T., Schumann D., Jahn T., PTB-Bericht MA, Mechanik und Akustik vol 100
09/2016	„Developement of a calibration process for water meters close to real world conditions“, Schumann D., Wendt G., Tränckner J., 17th International Flow Measurement Conference, FLOMEKO 2016 Sydney, Australien

Zusatzqualifikationen

Sprachkenntnisse	Englisch - B2 Französisch - A1
IT	Microsoft Office (Excel, Word, Power Point) AutoCAD, ANSYS CFX, STANET, EPANET, Origin R - fortgeschritten L ^A T _E X- fortgeschritten
Interessen	Musik (Gitarre und Gesang), Reisen, Angeln, Filme