

Dissertation

Alexander Karl Friedrich Borchling

Evaluierung des Messverhaltens von elektronischen Wasserzählern unter realitätsnahen Bedingungen

ISSN 2941-1297
ISBN 978-3-944659-50-3

DOI 10.7795/110.20250721

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Dissertationen

PTB-Diss-18

Braunschweig, August 2025

Alexander Karl Friedrich Borchling

**Evaluierung des Messverhaltens von
elektronischen Wasserzählern unter
realitätsnahen Bedingungen**

ISSN 2941-1297

ISBN 978-3-944659-50-3

DOI 10.7795/110.20250721

Empfohlene Zitierweise/recommended citation

Borchling, A., 2025. *Evaluierung des Messverhaltens von elektronischen Wasserzählern unter realitätsnahen Bedingungen*. Dissertation, Universität Rostock.
Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt.
PTB-Bericht Diss-18. ISBN 978-3-944659-50-3.
Verfügbar unter: <https://doi.org/10.7795/110.20250721>

Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
ISNI: 0000 0001 2186 1887

Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

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

Aus der Professur für Wasserwirtschaft
der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät

**Evaluierung des Messverhaltens von elektronischen Wasserzählern unter
realitätsnahen Bedingungen**

Dissertation

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

an der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Rostock

vorgelegt von Alexander Karl Friedrich Borchling, M. Sc.
aus Hannover

Gutachter:

Prof. Dr. Jens Tränckner, Universität Rostock

Dr. Corinna Kroner, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig

Prof. Dr.-Ing. Silvio Beier, Universität Weimar

Jahr der Einreichung: 2024

Jahr der Verteidigung: 2025

Kurzfassung

Im Bereich Wasserzähler zeichnet sich aufgrund erwarteter Vorteile hinsichtlich Messbeständigkeit, abgedecktem Messbereich und zusätzlicher Funktionalitäten ein Trend zu elektronischen Modellen mit elektronischem Mess- und Zählwerk ab. Die Einbindung dieser elektronischen Zähler in normative Dokumente wurde bereits in Ansätzen realisiert. Dennoch besteht weiterer Klärungsbedarf, da sich diese Zähler in ihren Eigenschaften wesentlich von mechanischen unterscheiden. Vor diesem Hintergrund adressiert diese Arbeit zentrale Fragestellungen, um das Verständnis für elektronische Wasserzähler und deren unterschiedlichen Eigenschaften systematisch zu erweitern.

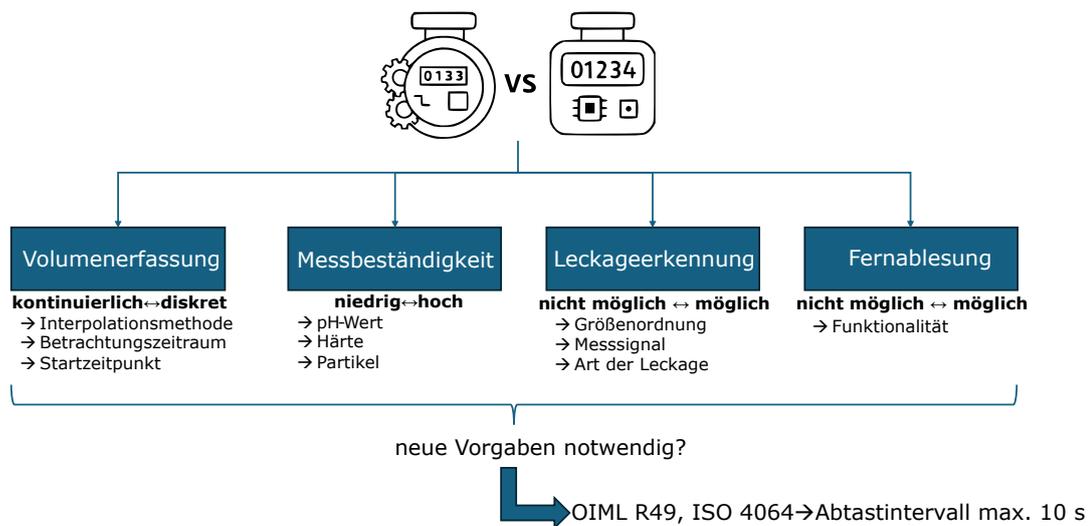
Hierzu zählt die diskrete Volumenmessung bei elektronischen Zählern. Es wurde untersucht, wie Abtastintervalle die Messgenauigkeit beeinflussen und welchen Effekt der Betrachtungszeitraum und Zeitpunkt der Messung sowie die Interpolationsmethode haben. Für die Untersuchungen wurden realitätsnahe Wasserverbrauchsdaten verwendet. Es zeigt sich, dass keine spezifischen Vorgaben hinsichtlich der Interpolationsmethode erforderlich sind. Die Vorgabe eines maximal zulässigen Abtastintervalls wird dagegen als notwendig erachtet. Ein Abtastintervall von maximal 10 Sekunden bei einem Betrachtungszeitraum von mehr als einem Monat ist für die klassische Verbrauchsabrechnung in Privathaushalten vorzusehen. Diese Empfehlung wurde zwischenzeitlich in internationale normative Dokumente aufgenommen.

Da eine höhere Messbeständigkeit bei elektronischen Wasserzählern erwartet wird, wurde der Einfluss von pH-Wert und Härte des Trinkwassers sowie Partikeln diesbezüglich untersucht. Mechanische Zähler zeigten in einigen Fällen eine zu elektronischen Geräten vergleichbare Beständigkeit. Als markanter erwiesen sich die herstellerabhängigen Einflüsse.

Hinsichtlich Zusatzfunktionen wurden Leckageerkennung und Fernablesung evaluiert. Leckagen über 1,5 l/h konnten meist ohne komplexe Algorithmen erkannt werden, woraus grundlegende Kriterien für die Leckageerkennung abgeleitet wurden. Die Fernablesefunktion funktionierte über den gesamten Untersuchungszeitraum von drei Jahren, wobei unterschiedliche Reichweiten zur Erfassung des Zählerstands erforderlich waren.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass elektronische Wasserzähler durch Zusatzfunktionen und die tendenziell bessere Messbeständigkeit Vorteile gegenüber mechanischen Modellen bieten. Jedoch gibt es auch mechanische Zähler, die eine gute Messbeständigkeit aufweisen und durch eine Zusatzeinrichtung auch erweiterte Funktionalitäten besitzen. Daher ist bei der Wahl des Wasserzählers eine Einzelfallbetrachtung notwendig.

Graphical Abstract



Abstract

The trend in water meters is shifting towards electronic models, which offer benefits in measurement stability, measurement range, and added functionalities. While these meters are partially included in normative documents, further clarification is needed as their characteristics differ significantly from mechanical meters. This study addresses critical issues to enhance understanding of electronic water meters.

This includes the discrete measurement of electronic meters. The effect of sampling intervals on the measurement accuracy for different observation periods and start times, as well as the interpolation method, was subjected to analysis. Realistic water consumption data were used for the investigations. It was found that there is no need to specify the interpolation method. However, the specification of a maximum permissible sampling interval is considered necessary. A maximum sampling interval of 10 seconds for a period of more than one month should be specified for conventional residential billing. This recommendation is now included in international standardisation documents.

As electronic water meters are expected to have a higher measurement stability, the influence of pH-value, hardness and particles, was investigated. In some cases, mechanical meters showed a resistance comparable to that of electronic meters. The influence of the manufacturer was more pronounced.

Leak detection and remote reading were evaluated as additional functions. Leaks of more than 1.5 l/h could be detected without complex algorithms. Basic criteria for leak detection were derived. The remote reading function worked throughout the three-year test period, with different ranges required to record the meter reading.

In summary, electronic water meters offer advantages over mechanical models because of their additional functions and potentially better measurement stability. However, there are also mechanical meters that have good stability and have extended functions thanks to an additional device. It is therefore necessary to consider each individual case when choosing a water meter.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	6
2.1 Wasserzähler	6
2.1.1 Mechanische Wasserzähler	7
2.1.2 Elektronische Wasserzähler	8
2.1.3 Überblick über Unterschiede zwischen mechanischen und elektronischen Wasserzählern	17
2.2 Leckageerkennung mittels Hauswasserzählern	19
2.2.1 Ansatz des minimalen Durchflusses	21
2.2.2 Datengestützte Bedarfsprognose (Data Driven Demand Forecast)	21
2.2.3 Analyse von Einzelverbräuchen (Flow Pattern Disaggregation)	22
2.2.4 Akustische Erkennung von Leckagen	22
2.3 Normative Vorgaben und Empfehlungen für Wasserzähler	23
2.3.1 Aktueller Stand der normativen Dokumente	23
2.3.2 Aktueller Stand der Weiterentwicklung der normativen Dokumente und Überblick über zukünftige Herausforderungen	26
3 Untersuchungen zur Erkennung von Leckagen mittels Hauswasserzählern	30
3.1 Veranlassung und Zielsetzung	30
3.2 Material und Methoden	31
3.2.1 Experimentier- und Wasserzählerprüfstand	31
3.2.2 Erzeugung von Leckagen	32
3.2.3 Erfassung von Impulsen	34
3.2.4 Messgeräte	34
3.2.5 Untersuchte Durchflüsse	35
3.2.6 Methode zur Charakterisierung der Leckagen	36

3.2.7	Methode zur Untersuchungen von Leckagen mittels Durchflussmessern	37
3.2.8	Methode zur Untersuchung von Leckagen mittels Hauswasserzählern	39
3.3	Ergebnisse und Diskussion	39
3.3.1	Charakterisierung der Leckagen	39
3.3.2	Vorversuch zur Auswirkung von Leckagen auf den erfassten Durchfluss von Durchflussmessern	40
3.3.3	Leckageerkennung mittels Hauswasserzählern	47
3.3.4	Zusammenfassung Leckageerkennung mittels Hauswasserzählern	54
3.4	Kriterien zur Erkennung von Leckagen mittels Hauswasserzählern . .	56
3.4.1	Voraussetzungen an die Leckage und den Durchfluss	57
3.4.2	Voraussetzungen an den Zähler	57

4 Auswirkungen von diskreten Messungen auf das mittels Hauswasserzählern erfasste Volumen 59

4.1	Veranlassung und Zielsetzung	59
4.2	Material und Methoden	62
4.2.1	Material für die theoretischen Betrachtungen	63
4.2.2	Material der experimentellen Untersuchungen	65
4.2.3	Methoden zur Untersuchung des Einflusses der Interpolationsart	68
4.2.4	Methoden zur Untersuchung des Einflusses des Betrachtungszeitraums	70
4.2.5	Methoden zur Untersuchung des Einflusses des Startzeitpunkts	71
4.2.6	Methoden zur stochastischen Untersuchung der Messabweichungen aller Einflussfaktoren	73
4.3	Ergebnisse und Diskussion	75
4.3.1	Einfluss der Interpolationsmethode	75
4.3.2	Einfluss des Betrachtungszeitraums	77
4.3.3	Einfluss des Startzeitpunkts der Abtastung	86
4.3.4	Stochastische Untersuchung der Messabweichung aufgrund des Abtastintervalls	93
4.3.5	Zwischenfazit	98
4.3.6	Experimentelle Überprüfung der Auswirkungen diskreter Messungen	98
4.3.7	Experimentellen Untersuchung	99
4.4	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Auswirkung des Abtastintervalls auf das erfasste Volumen	102

5	Auswirkung der Wasserqualität auf die Messrichtigkeit von Hauswasserzählern	105
5.1	Veranlassung und Zielsetzung	105
5.2	Material und Methoden	107
5.2.1	Wasserzähler	107
5.2.2	Testwasser	107
5.2.3	Infrastruktur	108
5.2.4	Durchflussprofile	109
5.2.5	Methode zur Untersuchung der Auswirkung der Wasserqualität auf die Messrichtigkeit	110
5.3	Ergebnisse zur Untersuchung der Auswirkung der Wasserqualität . . .	112
5.3.1	Neuwertige Zähler	112
5.3.2	Änderung der Messabweichung in Abhängigkeit vom pH-Wert	115
5.3.3	Variation der Gesamthärte	117
5.3.4	Variation der Partikelkonzentration und -größe	118
5.3.5	Kombinationen aus pH-Wert, Härte und Partikel	120
5.3.6	Stresstest	120
5.4	Zusammenfassung	121
6	Fernablesung unter realen Verbrauchsbedingungen	123
6.1	Veranlassung und Zielsetzung	123
6.2	Material und Methode	124
6.3	Ergebnisse	126
6.4	Zusammenfassung	136
7	Zusammenfassung und Ausblick	137
	Literaturverzeichnis	141
A	Anhang	147
A.1	Versuche zur Leckageerkennung	147
A.1.1	Vorversuche mittels Coriolis-Durchflussmesser	147
A.1.2	Turbine	151
A.2	Auswirkungen von diskreten Messungen	153
A.2.1	Fehlerverteilungen bei unterschiedlichen Betrachtungszeiträumen	153
A.2.2	Experimentelle Überprüfung von Wasserzählern unter realitätsnahen Bedingungen	161
A.3	Anhang Auswirkung Wasserqualität	162

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematische Darstellung des magnetisch-induktiven Messverfahrens.	10
2.2	Exemplarische Darstellung des zeitlichen Verlaufs eines Durchflusses.	12
2.3	Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Ultraschallzählers.	14
2.4	Verlauf der näherungsweise berechneten Schallgeschwindigkeit von Wasser und der daraus resultierende Strömungsgeschwindigkeit. . . .	16
2.5	Darstellung einer beispielhaften Fehlerkurve eines Hauswasserzählers und der einzuhaltenden Fehlergrenzen der Klasse 1 und 2.	25
2.6	Beispiele für realitätsnahe dynamische Prüfprofile.	27
3.1	Schematische Darstellung EWZP.	31
3.2	Stellschrauben zur Einstellung der Leckage vor der Kanüle.	33
3.3	Maximale Leckage bei unterschiedlichen Durchflüssen bei den Düsenkombinationen (DK) 61 und 17 in Abhängigkeit vom Druck.	40
3.4	Massesignal des Coriolis-Durchflussmessers bei maximal einstellbarer Leckage an Position A.	41
3.5	Massesignal des Coriolis-Durchflussmessers bei maximaler Leckage an Position B mit einem Abstand von 25 cm zwischen Messgerät und Leckage.	42
3.6	Geglättetes Durchflusssignal (gleitender Mittelwert über 250 Messpunkte) des Coriolis-Durchflussmessers bei kleinster realisierbaren Leckage an Position B.	43
3.7	Geglättetes Durchflusssignal (gleitender Mittelwert über 10000 und 30000 Messpunkte) des Coriolis-Durchflussmessers bei kleinster realisierbaren Leckage an Position B.	44
3.8	Einfluss der Entfernung zwischen Leckage und Coriolis-Durchflussmesser bei einer Leckage an Position B.	45
3.9	Geglättetes Durchflusssignal (gleitender Mittelwert über 250 Messpunkte) des Coriolis-Durchflussmessers bei einer Öffnungsdauer der Leckage an Position C von 420 s.	46
3.10	Differenz zwischen dem Durchflusses des Profils ohne Leckage und dem Profil mit geöffneter Leckage.	47

3.11	Messsignal des a) Ultraschall-Zählers von Hersteller A b) magnetisch-induktiven Zählers von Hersteller C und c) Ringkolbenzählers von Hersteller D bei Düsenkombination 61 und einer periodischen Leckage von 3 l/h.	49
3.12	Messsignal des a) magnetisch-induktiven Zählers von Hersteller C und b) Ringkolbenzählers von Hersteller D bei Düsenkombination 60 und einer periodischen Leckage von 3 l/h.	50
3.13	Messsignal des a) magnetisch-induktiven Zählers von Hersteller C und b) Ringkolbenzählers von Hersteller D bei Düsenkombination 32 und einer periodischen Leckage von 3 l/h.	51
3.14	Messsignal des a) magnetisch-induktiven Zählers von Hersteller C und b) Ringkolbenzählers von Hersteller D bei Düsenkombination 61 und einer periodischen Leckage von 1,5 l/h.	52
3.15	Geglättete Differenz des Durchflusses von Messung mit einer Leckage von 3 l/h zur Messung ohne Leckage des a) Ultraschallzählers (gleitendes Mittel über 5 Werte) b) magnetisch-induktiver Zählers (gleitendes Mittel über 50 Werte) c) Ringkolbenzähler (gleitendes Mittel über 20 Werte).	53
4.1	Beispiel für einen Füllzyklus einer Waschmaschine.	61
4.2	Vergleich zwischen realem Tagesprofil und dem modifiziertem Profil.	67
4.3	a) Schematische Darstellung des realen Durchflusses sowie des Durchflusses bei der Verwendung der gewählten Interpolationsarten. b) Reales sowie mittels Interpolationsarten bestimmtes Volumen.	69
4.4	a) Messabweichung aufgrund des Abtastintervalls infolge der linearen und Rechteckinterpolation. b) Differenz der Abweichung der linearen und Rechteckinterpolation.	76
4.5	Abweichung durch die Abtastung bei der Betrachtung des Profils des Einfamilienhauses über ein Jahr	78
4.6	Messabweichung in Abhängigkeit vom Abtastintervall bei einem Betrachtungszeitraum von a) einem Monat, b) drei Monaten, c) sechs Monaten, d) einem Jahr.	80
4.7	Messabweichung in Abhängigkeit vom Abtastintervall bei Verwendung eines a) einmonatigen b) dreimonatigen c) achtmonatigen Zeitraums (Mehrfamilienhaus).	82
4.8	a) Exemplarische Darstellung der Messabweichung in Abhängigkeit zur Anzahl der Profilwiederholungen des stochastischen Tagesprofils, b) Darstellung der maximalen Messabweichung bei Berücksichtigung aller untersuchten Abtastintervalle mit steigender Anzahl an Profilwiederholungen des stochastischen Tagesprofils.	84

4.9	a) Exemplarische Darstellung der Messabweichung in Abhängigkeit zur Anzahl der Profilwiederholungen des stochastischen Wochenprofils, b) Darstellung der maximalen Messabweichung bei Berücksichtigung aller untersuchten Abtastintervalle mit steigender Anzahl an Profilwiederholungen des stochastischen Wochenprofils.	85
4.10	a) Messabweichung durch die Abtastung des einjährigen Profils sowie die Messabweichungen der um 1 s, 2 s, 5 s und 10 s verschobenen Profile. b) Differenz zwischen der Messabweichung bei Verwendung des ursprünglichen Profils und der Messabweichung bei den verschobenen Profilen. c) Messabweichung durch die Abtastung des Ausgangsprofils sowie die Messabweichungen der um 3 Monate, 6 Monate und 9 Monate verschobenen Profile. d) Maximale Messabweichung unter Berücksichtigung aller betrachteten Startzeitpunkte.	88
4.11	Maximale Messabweichung in Abhängigkeit vom Abtastintervall unter Berücksichtigung von 120 verschiedenen Startzeitpunkten bei einer Betrachtungsdauer von acht Monaten des Mehrfamilienhauses. . .	89
4.12	a) Einfluss des Startzeitpunkts für das stochastische Tagesprofil bei Verschiebungen um 1801 s und 43341 s b) maximale Messabweichung aller betrachteter Startzeitpunkte für das stochastische Tagesprofil. .	91
4.13	Maximale Messabweichung aller betrachteter Startzeitpunkte des stochastischen Wochenprofils.	92
4.14	Verteilung der Messabweichungen bei einer Betrachtungsdauer von einem Jahr.	95
4.15	Verteilung der Messabweichungen bei einer Betrachtungsdauer von einer Woche.	96
4.16	Messabweichung der Zähler bei konstantem Durchfluss zu Beginn der Versuche.	99
4.17	Messabweichung der Wasserzähler bei der Erfassung des realitätsnahen Tagesprofils unter Nutzung des Impulsausgangs.	100
4.18	Mittels des von der Anzeige des Zählers ausgegebenen Volumens bestimmte Messabweichung bei der Messung des Tagesprofils.	101
4.19	a) Theoretisch auftretende Messabweichung aufgrund des Abtastintervalls bei 120 verschiedenen Startzeitpunkten und die durchschnittliche Abweichung b) Teil a) im Detail.	101
5.1	Übersicht der regionalen Wasserhärten in Deutschland, basierend auf Versorgerdaten.	106
5.2	Schema des kleinskaligen Modellnetzes der PTB.	109
5.3	Durchflussprofil zur Überprüfung der Auswirkung von verschiedenen Wasserqualitäten auf die Messrichtigkeit von Wasserzählern.	109

5.4	Messabweichungen der von Hersteller A untersuchten Ultraschallzähler sowie die mittlere Messabweichung. Zur besseren Beurteilung sind die einzelnen Messpunkte miteinander verbunden.	113
5.5	Auswertung der Nullmessung von neuwertigen Wasserzählern a) mittlere Messabweichung b) Standardabweichung.	114
5.7	Einfluss des pH-Werts auf die Messrichtigkeit bei doppelter Versuchsdauer.	116
5.6	Veränderung der Messabweichung im Vergleich zur Nullmessung aufgrund eines pH-Werts von a) 6,5 b) 7,7 c) 9,5.	117
5.8	Veränderung der Messabweichung im Vergleich zur Nullmessung aufgrund einer Gesamthärte von a) 1 mmol/l b) 2 mmol/l c) 3 mmol/l.	118
5.9	Veränderung der Messabweichung im Vergleich zur Nullmessung in Abhängigkeit von unterschiedlichen Partikelgrößen und Partikelkonzentrationen für verschiedene Zählertypen und Hersteller.	119
5.10	Veränderung der Messabweichung im Vergleich zur Nullmessung bei Verwendung von Leitungswasser nach Durchführung des Stresstests.	121
6.1	Schema der Einbausituation der Messnetzzähler.	125
6.2	Messabweichungen der Zähler von Hersteller A vor dem Einbau und nach Ende einer Einbauperiode.	131
6.3	Messabweichungen der Zähler von Hersteller B vor dem Einbau und nach Ende einer Einbauperiode.	132
6.4	Messabweichungen der Zähler von Hersteller C vor dem Einbau und nach Ende einer Einbauperiode.	133
6.5	Messabweichungen der Zähler von Hersteller D vor dem Einbau und nach Ende einer Einbauperiode.	134
6.6	Messabweichungen der Zähler von Hersteller G vor dem Einbau und nach Ende einer Einbauperiode.	135
A.1	Geglättetes Durchflusssignal (gleitender Mittelwert über 250 Messpunkte) des Coriolis-Durchflussmessers in Zusammenhang mit maximal realisierbarer Leckage an Position A bei einem nominalen Durchfluss von 575 l/h.	147
A.2	Geglättetes Durchflusssignal (gleitender Mittelwert über 250 Messpunkte) des Coriolis-Durchflussmessers in Zusammenhang mit maximal realisierbarer Leckage an Position A bei einem nominalen Durchfluss von 915 l/h.	148
A.3	Geglättetes Durchflusssignal (gleitender Mittelwert über 2500 Messpunkte) des Coriolis-Durchflussmessers in Zusammenhang mit einer Leckage (3 l/h) an Position B bei einem nominalen Durchfluss von 575 l/h.	148

A.4	Geglättetes Durchflusssignal (gleitender Mittelwert über 2000 Messpunkte) des Coriolis-Durchflussmessers in Zusammenhang mit einer Leckage (1,5 l/h) an Position B bei einem nominalen Durchfluss von 575 l/h.	149
A.5	Geglättetes Durchflusssignal (gleitender Mittelwert über 250 und 2500 Messpunkte) des Coriolis-Durchflussmessers in Zusammenhang mit einer Leckage (3 l/h) an Position C bei einem nominalen Durchfluss von 40 l/h.	149
A.6	Geglättetes Durchflusssignal (gleitender Mittelwert über 250 und 2500 Messpunkte) des Coriolis-Durchflussmessers in Zusammenhang mit einer Leckage (3 l/h) an Position C bei einem nominalen Durchfluss von 575 l/h.	150
A.7	Detailansicht: Geglättetes Durchflusssignal (gleitender Mittelwert über 2500 und 10000 Messpunkte) des Coriolis-Durchflussmessers in Zusammenhang mit einer Leckage (3 l/h) an Position C bei einem nominalen Durchfluss von 575 l/h.	150
A.8	Geglättetes Durchflusssignal (gleitender Mittelwert über 250 und 2500 Messpunkte) des Coriolis-Durchflussmessers in Zusammenhang mit einer Leckage (3 l/h) an Position C bei einem nominalen Durchfluss von 915 l/h.	151
A.9	Durchflusssignal und geglättetes Durchflusssignal (gleitender Mittelwert über 500 Messpunkte) der Turbine in Zusammenhang mit einer Leckage (1 l/h) an Position A bei einem nominalen Durchfluss von 85 l/h.	151
A.10	Geglättetes Durchflusssignal (gleitender Mittelwert über 250 und 2000 Messpunkte) der Turbine in Zusammenhang mit einer Leckage (3 l/h) an Position C bei einem nominalen Durchfluss von 85 l/h.	152
A.11	Geglättetes Durchflusssignal (gleitender Mittelwert über 250 und 2500 Messpunkte) der Turbine in Zusammenhang mit einer Leckage (3 l/h) an Position C bei einem nominalen Durchfluss von 575 l/h.	152
A.12	Fehlerverteilung bei einer Betrachtungsdauer von sechs Monaten. . .	153
A.13	Fehlerverteilung bei einer Betrachtungsdauer von drei Monaten. . .	154
A.14	Fehlerverteilung bei einer Betrachtungsdauer von einem Monat. . .	155
A.15	Fehlerverteilung bei einer Betrachtungsdauer von acht Monaten. . .	156
A.16	Fehlerverteilung bei einer Betrachtungsdauer von einem Monat. . .	157
A.17	Fehlerverteilung bei einer Betrachtungsdauer von drei Monaten. . .	158
A.18	Fehlerverteilung stochastisches Tagesprofil	159
A.19	Fehlerverteilung stochastisches Wochenprofil	160

Tabellenverzeichnis

2.1	Zusammenfassung der Unterschiede von elektronischen und vollständig mechanischen Wasserzählern.	17
2.2	Definition und Berechnungsvorschrift für Prüfpunkte zur Charakterisierung von Wasserzählern gemäß Richtlinie 2014/32/EU.	25
3.1	Übersicht über die verwendeten Hauswasserzähler.	35
3.2	Verwendete Düsenkombinationen und deren nominaler Durchfluss bei 4,14 bar Vordruck.	36
3.3	Dauer und nominale Durchflüsse von Durchflussprofil 1.	36
4.1	Übersicht über die verwendeten Wasserzähler.	65
4.2	Verwendete Düsen zur Umsetzung des modifizierten Tagesprofils.	67
4.3	Abtastintervalle, bei denen die Grenze der Messabweichung aus der ersten Zeile das erste Mal überschritten wird (Betrachtung des realen Profils eines Einfamilienhauses).	79
4.4	Übersicht über die Zeitpunkte, an denen die Messabweichung das erste Mal die Grenze aus der ersten Zeile überschreitet (Berücksichtigung aller betrachteten Startzeitpunkte und Betrachtungszeiträume des Profils eines Einfamilienhauses).	87
4.5	Übersicht über die Zeitpunkte, an denen die Messabweichung das erste Mal die Grenze aus der ersten Zeile überschreitet (Berücksichtigung aller betrachteten Startzeitpunkte und Betrachtungszeiträume des Profils eines Mehrfamilienhauses).	90
4.6	Übersicht über die Zeitpunkte, an denen die Messabweichung das erste Mal die Grenze aus der ersten Zeile überschreitet (Berücksichtigung aller betrachteten Startzeitpunkte und Betrachtungszeiträume des stochastischen Tagesprofils).	92
4.7	Übersicht über die Zeitpunkte, an denen die Messabweichung das erste Mal die Grenze aus der ersten Zeile überschreitet (Berücksichtigung aller betrachteten Startzeitpunkte und Betrachtungszeiträume des stochastischen Wochenprofils).	93
5.1	Zählerübersicht für die Wasserqualitätsexperimente.	107

5.2	Übersicht der experimentellen Versuchsreihen und Wasserparameter.	112
6.1	Übersicht der im Messnetz verbauten Wasserzählertypen.	125
6.2	Messprogramm zur Bestimmung der Fehlerkurve.	125
6.3	Maximale Differenzen der Messabweichung über den gesamten Betrachtungszeitraum.	129
A.1	Durchflusspunkte des entwickelten realitätsnahen Tagesprofils.	161
A.2	Zusammensetzung des Testwassers (TW) in Zusammenhang mit der Basislösung (BL) der Untersuchungen zur Auswirkung der Wasserqualität auf die Messgenauigkeit von Wasserzählern für die Variation des pH-Werts KRONER ET AL. (2022), (BÜKER ET AL., 2021).	162
A.3	Zusammensetzung des Testwassers (TW) in Zusammenhang mit der Basislösung (BL) der Untersuchungen zur Auswirkung der Wasserqualität auf die Messgenauigkeit von Wasserzählern für die Variation der Gesamthärte KRONER ET AL. (2022), (BÜKER ET AL., 2021).	163

Verzeichnis der Symbole

Symbol	SI-Einheit	Bedeutung
A	m^2	Querschnittsfläche
\vec{B}	T	magnetische Flussdichte
c_S	m/s	Schallgeschwindigkeit
D_i	m	Rohrinnendurchmesser
ϵ	%	Messabweichung
ϵ_{EFG}	%	Eichfehlergrenze
$\Delta\epsilon_{t_S}$	%	Differenz der Messabweichung
$\epsilon_{\text{Rechteck}_{t_S}}$	%	Messabweichung durch Rechtecksfunktion und t_S
$\epsilon_{\text{linear}_{t_S}}$	%	Messabweichung durch lineare Interpolation und t_S
ϵ_{max}	%	maximale Messabweichung
ϵ_{Anz}	%	Messabweichung bestimmt mittels der Anzeige
ϵ_{Imp}	%	Messabweichung bestimmt mittels Impulsausgang
$\Delta\epsilon$	%	Differenz der Messabweichung
ϵ_{nach}	%	Messabweichung nach dem Versuch
ϵ_{vor}	%	Messabweichung vor dem Versuch
ϵ_{min}	%	minimale Messabweichung
$\Delta\epsilon_{\text{max}}$	%	maximale Differenz der Messabweichung
ϕ	Wb	magnetischer Fluss
K	Pa	Kompressionsmodul
k		Proportionalitätsfaktor
k_i	Imp./l / Imp./kg	Impulswertigkeit
k_C	Imp./l / Imp./kg	Impulswertigkeit des Coriolis-Durchflussmessers
k_T	Imp./l / Imp./kg	Impulswertigkeit der Turbine
k_W	l/Imp	Impulswertigkeit des Wasserzählers
K_L	-	Löslichkeitskoeffizient
L	m	Weg
m	kg	Masse
\dot{m}	kg/s	Massestrom
Δm_{W4001}	kg	Massendifferenz der Waage W4001
n		Anzahl der Impulse
p	bar	Druck
ρ	kg/m^3	Dichte
$\dot{Q}_V(t)$	m^3/h	Volumendurchfluss
\dot{q}_{Leck}	l/h	Leckagestrom
Q_{nom}	l/h	nominaler Durchfluss
Q_{neu}	l/h	neu ermittelter Durchfluss
Q_1	l/h	Mindesdurchfluss

Q_2	l/h	Übergangsdurchfluss
Q_3	l/h	Dauerdurchfluss
Q_4	l/h	Überlastdurchfluss
\vec{s}	m^2	Weglänge
s_x	%	Standardabweichung
t	s	Zeit
Δt	s	Zeitdifferenz
Δt_R	s	Differenz der reziproken Laufzeiten
t_{vor}	s	Laufzeit des Ultraschallsignals mit der Strömung
$t_{\text{rück}}$	s	Laufzeit des Ultraschallsignals entgegen der Strömung
T	K	Temperatur
Δt	s	Zeitdifferenz
Δt_i	s	Impulsabstand
t_S	s	Abtastintervall
$U(\epsilon_{\text{labi}})$	%	erw. Messunsicherheit Messabweichung
U_{Ind}	V	induzierte Spannung
u_S	%	Messunsicherheit Referenzwert
\vec{v}_L	m/s	Geschwindigkeit des bewegten Leiters
$v_{\text{ström}}$	m/s	Strömungsgeschwindigkeit
V	m^3	Volumen
v_{vor}	m/s	Ausbreitungsgeschwindigkeit mit der Strömung
$v_{\text{rück}}$	m/s	Ausbreitungsgeschwindigkeit entgegen der Strömung
$V_{\text{Zähler}}$	m^3	Zählervolumen
V_{Referenz}	m^3	Referenzvolumen
$V_{t_S, \text{Rechteck}}$	l	ermitteltes Volumen mit t_S
V_{real}	l	tatächlich durch den Zähler geflossenes Volumen
V_{Ende}	m^3	Endvolumen
V_{Anz}	m^3	Volumen ermittelt mit der Zähleranzeige
V_{Start}	m^3	Startvolumen
V_{Imp}	m^3	Volumen ermittelt mittels Impulsausgang
V_{Funk}	m^3	Volumen ermittelt mittels Fernablesung
ΔV	m^3	Volumendifferenz
x_o		obere Grenze des Vertrauensintervalls
\bar{x}		Mittelwert des Datensatzes
z_o		Konstanten für Konfidenzintervall

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
BGBI	Bundesgesetzblatt
BMJV	Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz
DIN	Deutsches Institut für Normung
DK	Düsenkombination
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
EFG	Eichfehlergrenze
EMPIR	European Metrology Programme for Innovation and Research
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EWZP	Experimentier- und Wasserzählerprüfstand
MID	magnetisch induktiver Durchflussmesser
MID	Europäische Messgeräte-richtlinie
MNF	Minimum night flow
MPE	maximum permissible error
MetroWaMet	Metrology for Real-World Domestic Water Metering
OIML	Organisation Internationale de Métrologie Légale
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
TZW	Technologiezentrum Wasser
UBA	Umweltbundesamt
VDDW	Verband der deutschen Wasser- und Wärmezähler Industrie e.V.
VFG	Verkehrsfehlergrenzen

1 Einleitung

In den vergangenen Jahren gab es aufgrund technologischer Fortschritte und veränderter Rahmenbedingungen wesentliche Innovationen und Weiterentwicklungen im Bereich der Verbrauchserfassung mittels Wasserzählern. Der Einsatz moderner Technologien wie intelligenten Messsystemen (Smart Metering) und die Integration digitaler Infrastrukturen führen zu verbesserten Datenerfassungs- und -übertragungsmethoden sowie einer effizienteren Verwaltung und Auswertung von Verbrauchsdaten. Diese Entwicklungen tragen maßgeblich zur Optimierung des Wassermanagements und zur Anpassung an zukünftige Herausforderungen, die durch Ressourcenknappheit und Klimawandel entstehen, bei. Jahrzehntlang prägten jedoch mechanische Wasserzähler und die jährliche Ablesung vor Ort den Stand der Technik. Ultraschall- und magnetisch-induktive Wasserzähler, die häufig auch als statische oder elektronische Wasserzähler bezeichnet werden, gewinnen aufgrund der aktuellen Entwicklung im Wassersektor zunehmend an Bedeutung. Elektronischen Zählern wird eine hohe Präzision, ein großer Messbereich und eine lange Lebensdauer, da diese Zähler keine beweglichen mechanischen Komponenten besitzen, zugeschrieben. Elektronische Wasserzähler bieten darüber hinaus erweiterte Funktionalitäten, wie beispielsweise integrierte Leckageerkennungssysteme, die regelmäßige Anzeige von Verbrauchsdaten, Wassertemperatur und Spitzenverbräuchen. Zudem ermöglichen sie die Fernübertragung von Zählerständen mittels moderner Funktechnologie. Die Möglichkeit zur drahtlosen Fernablesung erhöht nicht nur die Effizienz der Datenerfassung, sondern bietet auch das Potenzial für eine verbesserte Überwachung und Steuerung des Wasserverbrauchs. Dies könnte insbesondere in großflächigen Versorgungsnetzen erhebliche Vorteile mit sich bringen. Es sei erwähnt, dass mechanische Zähler, insbesondere Ringkolbenzähler, in der Messqualität mithalten und es durch ein Zusatzmodul ebenfalls möglich ist, den Zählerstand aus der Ferne abzulesen. Dennoch wird in Fachkreisen prognostiziert, dass die Verbrauchserfassung mittels elektronischer Zählertypen zunehmen wird. Zudem wird die Digitalisierung in der Wasserversorgung immer mehr an Bedeutung gewinnen (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., 2022). Die zunehmende Verwendung von elektronischen Zählern hat dazu geführt, dass der Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) im Vorfeld der Bundestagswahl 2021 die Beseitigung rechtlicher Unsicherheiten im Zusammenhang mit Funkwasserzählern und die finanzielle Un-

terstützung ihres Einsatzes gefordert hat. Denn bislang wurde eine ganzheitliche Betrachtung sowohl der Messbeständigkeit als auch der Zusatzfunktionen von elektronischen Wasserzählern noch nicht vorgenommen.

Ein wesentlicher Schritt zur Klärung der bestehenden Unsicherheiten ist die Überarbeitung der bestehenden normativen Dokumente und Empfehlungen. Die gegenwärtig geltenden normativen Dokumente und Empfehlungen wurden auf der Grundlage von mechanischen Zählern entwickelt, die seit Jahrzehnten im Einsatz sind. Infolgedessen sind diese Dokumente und Empfehlungen auf den Einsatz mechanischer Zähler zugeschnitten. Durch den langjährigen Einsatz sind die Messeigenschaften mechanischer Zähler sowie deren Stärken und Schwächen im Vergleich zu elektronischen Zählern umfassend dokumentiert und analysiert. Mit dem zunehmenden Einsatz elektronischer Wasserzähler wächst jedoch das Verständnis für deren Messverhalten kontinuierlich. In den letzten Jahren wurden die normativen Vorgaben schrittweise um Regelungen erweitert, die elektronische Zähler berücksichtigen. Eine vollständige und systematische Adaption der Richtlinien, die den besonderen Anforderungen und Eigenschaften dieser modernen Technologien gerecht wird, ist jedoch noch nicht abgeschlossen.

Neben den normativen Dokumenten findet für Hauswasserzähler in Deutschland die Mess- und Eichverordnung Anwendung. Diese Verordnung schreibt derzeit eine Eichfrist von sechs Jahren für alle Wasserzählertypen vor (BGBL., 2014), (BMJV, 2021). Im europäischen Vergleich liegt Deutschland bei der Eichfrist von Kaltwasserzählern im Mittelfeld. Vielerorts wird jedoch für eine Verlängerung der Eichfrist von elektronischen Wasserzählern plädiert (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., 2024). Dies wird damit begründet, dass elektronische Zähler aufgrund des berührungslosen Messverfahrens eine hohe Messbeständigkeit aufweisen und somit weniger Alterserscheinungen haben sollten. Eine Verlängerung der Eichfrist für rein elektronische Wasserzähler hätte zur Folge, dass diese Zählertypen seltener ausgetauscht werden müssten. Dies würde Investitionen in elektronische Zähler, die im Vergleich zu mechanischen Zählern höhere Anschaffungskosten aufweisen, für Versorgungsunternehmen deutlich attraktiver machen. Längere Eichfristen könnten somit die Wirtschaftlichkeit dieser modernen Zähler erhöhen und deren Verbreitung fördern. Es ist daher von entscheidender Bedeutung, einen regulatorischen Rahmen zu schaffen, der für Versorger ökonomisch vorteilhaft ist. Da Versorger beim Zählerwechsel frei entscheiden können, welchen Wasserzählertyp sie in ihrem Netz einsetzen, könnte eine solche Anpassung der Eichfristen die Umstellung auf die elektronischen Zähler beschleunigen.

Seit einiger Zeit wird in Deutschland und Österreich eine solche zählerspezifische längere Eichfrist diskutiert. In 2020/21 forderte in Österreich das Bundesministe-

rium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort eine Verlängerung der Eichfristen für Ultraschallwasserzähler, die zu der Gruppe der elektronischen Wasserzähler gehören (Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort, 2021). Diese Verlängerung wurde bisher nicht umgesetzt und wird von der österreichischen Wirtschaftskammer kritisch gesehen (Wirtschaftskammer Österreich, 2021). Ein wesentlicher Grund für die derzeit vorherrschende skeptische Haltung gegenüber Ultraschallwasserzählern ist das Fehlen von hinreichendem Datenmaterial über deren Leistung nach Ablauf der Nacheichfrist. Bislang stehen keine umfangreichen und belastbaren Daten zur Verfügung, die Auskunft über das Langzeitverhalten und die Messgenauigkeit dieser Zähler nach mehreren Jahren im Einsatz geben.

Eine vergleichbare Situation zeigt sich auch in Deutschland, wo ebenso keine umfassenden Daten zu elektronischen Wasserzählern vorliegen. Elektronische Wasserzähler sind nicht flächendeckend über mehr als eine Eichfrist verbaut. Diese Lücke in der Datengrundlage erschwert eine fundierte Bewertung der Leistungsfähigkeit und erschwert potenzielle regulatorische Anpassungen, die eine breitere Akzeptanz dieser Zählertechnologie fördern könnten.

Die zunehmende Verbreitung elektronischer Wasserzähler und deren erweiterte Funktionalitäten machen eine umfassende messtechnische Bewertung ihrer Leistungsfähigkeit erforderlich. Im Fokus stehen dabei insbesondere die Analyse der Messgenauigkeit unter realitätsnahen Bedingungen sowie die Identifikation relevanter Einflussfaktoren. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse können zur Ableitung technischer Anforderungen beitragen, die zukünftig in normative Dokumente und Richtlinien einfließen sollten.

Die vorliegende Arbeit adressiert diese Herausforderungen, indem das Messverhalten elektronischer Hauswasserzähler systematisch untersucht und mit dem herkömmlichen mechanischen Zähler verglichen wird. Ziel ist es, die Leistungsfähigkeit elektronischer Systeme unter praxisnahen Randbedingungen zu bewerten und messtechnisch relevante Zusatzfunktionen zu analysieren.

Zu Beginn wird ein technischer Überblick über den aktuellen Stand der Wasserzählertechnologie gegeben. Dabei erfolgt eine strukturierte Gegenüberstellung der grundlegenden Funktionsprinzipien mechanischer und elektronischer Zähler sowie eine Analyse der bestehenden normativen Anforderungen.

Der anschließende experimentelle Untersuchungsteil ist in vier thematische Abschnitte gegliedert, in denen spezifische Fragestellungen systematisch bearbeitet werden:

Teil 1: Leckageerkennung

Dieser Abschnitt untersucht die Fähigkeit elektronischer Wasserzähler zur Detektion praxisrelevanter Leckageszenarien sowie die reproduzierbare Realisierung solcher Leckagen unter Laborbedingungen. Im Zentrum stehen folgende Forschungsfragen:

- Welche in der Praxis auftretenden Leckagen lassen sich mittels der zur Verfügung stehenden Infrastruktur reproduzierbar generieren und von welchen Parametern am Prüfstand hängt die Größe der Leckage ab?
- Sind Veränderungen im Durchfluss aufgrund von Leckagen mittels Durchflussmessern erkennbar, so dass prinzipiell die Möglichkeit besteht, dass diese Leckagen mittels Hauswasserzählern erkannt werden könnten?
- Können Leckagen unabhängig von ihrer Position relativ zum Zähler (vor oder nach dem Zähler) und deren Distanz zum Zähler durch konventionelle Hauswasserzähler zuverlässig detektiert werden?
- Welche Größenordnungen und -arten von Leckagen sind mit auf dem Markt erhältlichen Wasserzählern erfassbar?

Teil 2: Einfluss diskreter Messungen auf das erfasste Volumen

Hier wird untersucht, wie sich die zeitliche Diskretisierung der Messwerte auf die Volumenbestimmung auswirkt. Die Untersuchung erfolgt anhand folgender Fragestellungen:

- Inwiefern beeinflusst die Art der Interpolation die durch die Abtastung entstehende Messabweichung?
- Welchen Einfluss hat die Dauer des Betrachtungszeitraums auf die Messabweichung?
- Welche Auswirkung hat der Beginn der Abtastung auf die Messabweichung?

Teil 3: Einfluss der Wasserqualität

Dieser Abschnitt analysiert den Einfluss unterschiedlicher Wasserqualitäten auf das Messverhalten verschiedener Wasserzählertechnologien. Ziel ist es, die Sensitivität verschiedener Messprinzipien gegenüber verschiedenen Wasserparametern zu quantifizieren. Im Fokus stehen folgende Fragestellungen:

- Wie beeinflusst die Wasserqualität die Messrichtigkeit von Wasserzählern?

- Werden alle Typen von Wasserzählern gleichermaßen durch die Wasserqualität beeinflusst?

Teil 4: Funktion der Fernablesung

Abschließend wird die technische Leistungsfähigkeit der Fernablesung analysiert. Zwei zentrale Fragestellungen werden betrachtet:

- Inwieweit stimmen das über Fernablesung erfasste Volumen und das auf der Anzeige des Wasserzählers angezeigte Volumen überein?
- Wie zuverlässig ist die Fernablesung in der Praxis?

Im abschließenden Kapitel werden die zentralen Ergebnisse der Untersuchung zusammenfassend dargestellt. Zudem wird ein Ausblick auf weiterführende Fragestellungen und potenzielle Weiterentwicklungen im Bereich der elektronischen Wasserzähler gegeben.

2 Stand der Technik

Die Erfassung des im privaten Bereich verbrauchten Trinkwassers erfolgt in Deutschland mittels Hauswasserzählern. Zur Einführung in die im Rahmen der Dissertation durchgeführten Untersuchungen wird in diesem Abschnitt kurz der aktuelle Stand der Technik auf dem Gebiet der Wasserzählertechnologie erläutert. Dazu werden zunächst die in Europa geläufigen Typen von Hauswasserzählern erklärt. Hierbei liegt ein besonderes Augenmerk auf den elektronischen Wasserzählern, da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf diesem Zählertyp liegt. Im zweiten Teil dieses Kapitels wird ein kurzer Einblick in Verfahren zur Bestimmung der Messrichtigkeit von Wasserzählern gegeben. Außerdem werden die aktuellen Prüfverfahren von Haus-Kaltwasserzählern hinsichtlich sich geänderter Anforderungen und möglicher Anpassungen beleuchtet.

2.1 Wasserzähler

Zur präzisen Erfassung des Wasserverbrauchs und zur Gewährleistung einer korrekten Abrechnung ist in Deutschland gesetzlich vorgeschrieben, dass in jedem Wohngebäude Wasserzähler installiert werden. Ein Wasserzähler wird gemäß der europäischen Messgeräte Richtlinie 2014/32/EU (MID) wie folgt definiert: *Ein Wasserzähler ist ein Gerät, das für das Messen, Speichern und Anzeigen der Menge des den Messwertempfänger durchströmenden Wassers bei Betriebsbedingungen ausgelegt ist* (EUROPÄISCHES PARLAMENT, RAT DER EUROPÄISCHEN UNION, 2014). Neben Wasserzählern, die den Verbrauch in einem Haus erfassen, besteht zusätzlich die Möglichkeit, Wasserzähler für jede Wohneinheit zu verbauen (Wohnungswasserzähler). Der Einbau solcher Wohnungswasserzähler ist in der Bauordnung des jeweiligen Bundeslandes festgelegt. Mit Ausnahme von Bayern, Brandenburg und Sachsen-Anhalt sind in Deutschland aktuell in allen Neubauten Wohnungswasserzähler zu verbauen. Der Versorger der jeweiligen Region ist für die Wartung und den fristgerechten Austausch der Zähler verantwortlich. Die Verantwortung für die Auswahl des zu installierenden Wasserzählers (Typ und Dimensionierung) obliegt ebenfalls dem örtlichen Versorgungsunternehmen. Die Auswahl der Wasserzähler er-

folgt unter Berücksichtigung der Vorgaben des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches (DVGW). Der DVGW legt im Arbeitsblatt W 406 (DEUTSCHER VEREIN DES GAS UND WASSERFACHES, 2021) grundlegende Regeln zur Dimensionierung von Hauswasserzählern fest. Bevor jedoch ein Wasserzähler für die Abrechnung verwendet werden darf, muss dieser für den europäischen Markt zugelassen worden sein. Hierzu müssen Wasserzähler Voraussetzungen erfüllen, welche in der europäischen Messgeräte-richtlinie 2014/32/EU (EUROPÄISCHES PARLAMENT, RAT DER EUROPÄISCHEN UNION, 2014) dargelegt sind. Darüber hinaus gibt es internationale Standards und Empfehlungen wie die ISO 4064:2014 (DIN 4064-1:2014, 2012) und OIML R49:2013(E) (OIML R 49-1 2013 (E), 2013), deren Erfüllung vielfach in außereuropäischen Ländern gefordert wird. Die in diesen Dokumenten definierten Prüfverfahren können als Nachweis für die Erfüllung der in der Messgeräte-richtlinie spezifizierten Anforderungen an Wasserzähler herangezogen werden. Die Einhaltung der festgelegten Standards erfolgt unabhängig von der spezifischen Bauweise oder dem zugrunde liegenden Messprinzip des Wasserzählers. Durch diese einheitlichen Vorgaben wird gewährleistet, dass alle installierten Zähler die erforderlichen Kriterien hinsichtlich Genauigkeit und Zuverlässigkeit erfüllen, unabhängig von technischen Unterschieden zwischen verschiedenen Zählertypen und Herstellern.

Wasserzähler lassen sich in verschiedene Kategorien einteilen, wobei eine Klassifizierung beispielsweise anhand des zugrunde liegenden Messprinzips erfolgen kann. Dabei wird zwischen volumetrischen (z. B. Ringkolbenzählern), dynamischen (z. B. Flügelradzählern) und statischen Messprinzipien (z. B. magnetisch-induktiven Zählern oder Ultraschallzählern) unterschieden. Eine weitere Differenzierung ist auf Basis des Messwerks möglich. Volumetrische und dynamische Zähler gehören zu den mechanischen Wasserzählern, während statische Zähler der Kategorie der elektronischen Zähler zugeordnet werden.

2.1.1 Mechanische Wasserzähler

Mechanische Wasserzähler als reine Volumenzähler (Kolbenzähler) oder Turbinenradzähler (Umdrehungszähler) gehören zu den am meisten verbreiteten Zählertypen in Europa (MARTIN UND POHL, 2015). Die detaillierte Funktionsweise der verschiedenen mechanischen Zähler kann beispielsweise ALTENDORF (2006) oder ARREGUI ET AL. (2007) entnommen werden.

In Deutschland sind Mehrstrahl-Flügelradzähler und Ringkolbenzähler die bevorzugten Messtechnologien (DOUCET, 2019). Diese Zählertypen erfassen das durchströmte Volumen kontinuierlich mittels eines mechanischen Zählwerks, typischerweise in Form eines Rollenzählwerks. Dabei wird die Bewegung der mechanischen

Komponenten, wie das Flügelrad oder der Kolben, direkt in eine Zählbewegung umgesetzt, die das akkumulierte Volumen des durchströmenden Wassers anzeigt. Die beweglichen Komponenten der Wasserzähler unterliegen Reibungseffekten, die die Messgenauigkeit im Laufe der Zeit beeinträchtigen können. Partikel im Wasser können beispielsweise zu abrasivem Verschleiß der Messeinheit führen, was wiederum größere Messabweichungen zur Folge haben kann. Es besteht zudem das Risiko, dass sich Partikel im Messwerk des Zählers ablagern. Dies kann zu einer partiellen oder vollständigen Einschränkung der Funktionalität des Messwerks führen, wodurch eine Volumenbestimmung erheblich beeinträchtigt werden kann.

Die Ablesung des vom Zähler erfassten Volumens ist ohne Zusatzeinrichtung ausschließlich optisch am Zähler direkt möglich. Verschiedene mechanische Wasserzähler können jedoch mit zusätzlichen Modulen wie einem Funkmodul oder einem elektronischen Zählwerk nachgerüstet werden. Dabei ist allerdings zu beachten, dass der per Funk übermittelte Zählerstand gegenwärtig nur für Abrechnungszwecke verwendet werden darf. Metrologisch entspricht der per Funk übertragene Messwert einer Messwertwiederholung. Im Falle einer Divergenz zwischen dem aus der Ferne abgelesenen Zählerstand und dem direkt vom Zähler angezeigten Wert ist die optische Anzeige des Zählers immer rechtsverbindlich. Aus diesem Grund und aufgrund der Definition eines Wasserzählers per se muss es bei allen Zählern immer die Möglichkeit geben, den aktuellen Verbrauchsstand direkt am Wasserzähler abzulesen.

2.1.2 Elektronische Wasserzähler

Für die volumetrische Erfassung des durchströmenden Wassers werden bei elektronischen Wasserzählern primär zwei Messverfahren eingesetzt: das magnetisch-induktive Messverfahren sowie das Ultraschallverfahren. Beide Technologien erfordern eine interne Energiequelle zur Sicherstellung ihrer Funktionalität. Aus diesem Grund sind sowohl Ultraschall- als auch magnetisch-induktive Wasserzähler in der Regel mit einer fest verbauten Batterie ausgestattet. Diese Batterie muss während der gesamten Lebensdauer des Zählers eine kontinuierliche und zuverlässige Energieversorgung gewährleisten, um die präzise Messung und Anzeige des durchströmenden Volumens sicherzustellen. Die Lebensdauer der Batterien von elektronischen Zählern wird von Herstellern je nach Nutzung und Konfiguration mit bis zu 20 Jahren angegeben (KAMSTRUP A/S, 2021). Folglich ist die angegebene Lebensdauer der Batterie eines Zählers erheblich länger als die aktuell in Deutschland geltende Eichfrist von sechs Jahren. Ebenso ist die Lebensdauer der Batterie ausreichend, wenn, wie durch beispielsweise den BUNDESVERBAND DER ENERGIE- UND WASSERWIRTSCHAFT E.V. (2024) gefordert, Zähler länger im Netz verbaut bleiben sollten.

Neben der internen Batterie verfügen elektronische Wasserzähler über ein eingebautes Funkmodul. Durch dieses Modul besteht die Möglichkeit, neben der optischen Ablesung des Zählerstandes, den Zählerstand per Fernablesung („Drive by“, „Walk by“ oder zentral) zu erfassen. Die Fernablesung hat den Vorteil, dass die Versorger zum Erfassen der Verbrauchswerte am Ende einer Abrechnungsperiode nicht mehr direkten Zugang zum Zähler benötigen und eine stichtagsgenaue Abrechnung möglich wird. Dabei müssen jedoch die gleichen Anforderungen wie bei mechanischen Zählern mit Zusatzmodulen hinsichtlich der Verwendung der Messwerte berücksichtigt werden.

Zusätzlich zum Funkmodul ist in elektronischen Wasserzählern ein interner Messwertspeicher integriert. Dieser ermöglicht die regelmäßige Speicherung von Zwischenständen der Verbrauchswerte. Die Analyse der gespeicherten Daten ermöglicht es, potenzielle Rückschlüsse auf Veränderungen im Verbrauchsverhalten zu ziehen. So kann beispielsweise ein erhöhter Grundverbrauch identifiziert werden, der auf mögliche Leckagen hindeutet. Allerdings sind Abruf und Verwendung von Zwischenverbrauchswerten aus datenschutzrechtlichen Gründen derzeit nicht in allen Bundesländern Deutschlands gestattet. Es wird jedoch aktuell daran gearbeitet, dass auch dies in Zukunft möglich sein wird (UNABHÄNGIGEN DATENSCHUTZAUF SICHTSBEHÖRDEN DES BUNDES, 2024).

Neben dem erfassten Gesamtvolumen kann bei elektronischen Zählern auch der aktuelle Durchfluss direkt auf der Anzeige abgelesen werden. Darüber hinaus können auf dem Display des Zählers die von den Herstellern häufig beworbenen Alarm- und Warnmeldungen angezeigt werden. Hierzu zählt unter anderem die Warnung vor Lufteinschlüssen in der Rohrleitung, die die Messgenauigkeit beeinträchtigen können. Eine weitere wichtige Meldung ist die Warnung vor potenziellen Leckagen. Diese Funktionalität soll den Nutzern eine frühzeitige Identifikation selbst kleinster Leckagen ermöglichen, um präventiv größere Schäden durch austretendes Wasser zu vermeiden.

2.1.2.1 Magnetisch-induktive Wasserzähler

Zu der Gruppe der elektronischen Wasserzähler zählen die magnetisch-induktiven Wasserzähler. Das für diesen Zählertyp genutzte magnetisch-induktive Messverfahren wird seit vielen Jahren verwendet (ALTENDORF, 2006). Bei diesem Messverfahren wird nicht direkt das durch den Zähler geflossene Volumen gemessen, sondern dieses anhand der Strömungsgeschwindigkeit bestimmt. Die Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeit erfolgt auf Grundlage des Faradayschen Gesetzes (Gl. 2.1). Das Faradaysche Gesetz besagt, dass sich die Geschwindigkeit eines senkrecht zur

Magnetfeldrichtung bewegten Leiters anhand der am Ende des Leiters induzierten Spannung bestimmen lässt. Die Bestimmung der induzierten Spannung U_{Ind} erfolgt mittels des magnetischen Flusses ϕ , der magnetischen Flussdichte \vec{B} , der Fläche A , dem Rohrrinnendurchmesser D_i , der Wegstrecke \vec{s} , der Geschwindigkeit des bewegten Leiters \vec{v}_L sowie einem zählerspezifischen Proportionalitätsfaktor k_W . Im Falle des Wasserzählers ist der Leiter das leitfähige Wasser, welches sich senkrecht zum Magnetfeld bewegt. Hieraus folgt:

$$U_{\text{Ind}}(t) = \frac{d\phi}{dt} = \frac{d}{dt} \oint_A \vec{v}_L \times \vec{B} \cdot d\vec{s} = k_W \cdot B \cdot D_i \cdot v_L. \quad (2.1)$$

Das magnetisch-induktive Messprinzip ist schematisch in Abb. 2.1 dargestellt. Für eine fehlerfreie Funktion ist eine Mindestleitfähigkeit des Wassers von 0,1 mS/m erforderlich. Bei der Ausrichtung des Magnetfelds ist darauf zu achten, dass dieses senkrecht zur Durchflussrichtung ausgerichtet ist.

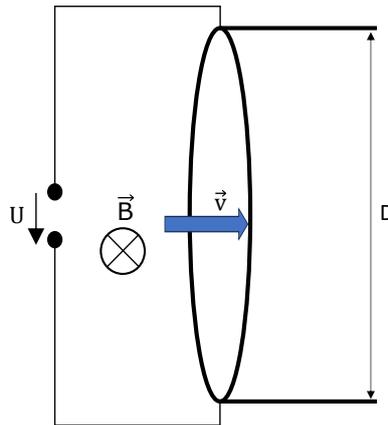


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des magnetisch-induktiven Messverfahrens.

Zur Erzeugung des Magnetfelds in handelsüblichen Wasserzählern werden Elektromagnete eingesetzt, die entweder ein alternierendes oder ein gepulstes Magnetfeld generieren. Die Verwendung gepulster Magnetfelder verkürzt jedoch aufgrund des höheren Energieverbrauchs durch das Wechselfeld die Lebensdauer der Batterie und somit des Zählers. Ein wechselndes Magnetfeld ist erforderlich, da bei der Verwendung von Dauermagneten elektrochemische Doppelschichtpotenziale entstehen. Diese Doppelschichtpotenziale unterliegen zeitlichen Veränderungen, was beispielsweise zu einer Verschiebung des Nullpunkts des Wasserzählers führen kann. Darüber hinaus überlagern diese Potenziale das Messsignal, was zu einer Beeinträchtigung der Messgenauigkeit führen kann. Durch Wechselfelder werden diese Schwankungen ausgeglichen (KRAUSE ET AL., 2008).

Das für Abrechnungszwecke verwendete Volumen, welches durch den Zähler geflossen ist, wird aus der induzierten Spannung berechnet. Hierzu wird aus dem Zu-

sammenhang aus Gl. 2.1 die Strömungsgeschwindigkeit v zum Zeitpunkt t wie folgt berechnet:

$$v(t) = \frac{U_{\text{Ind}}(t)}{k_{\text{W}} B D_{\text{i}}}. \quad (2.2)$$

Die Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit ist möglich, da das magnetische Feld im Zähler und der Rohrinne Durchmesser bekannt sind. Die induzierte Spannung wird direkt gemessen. Durch die Multiplikation der Strömungsgeschwindigkeit mit der Querschnittsfläche des Zählers ergibt sich der Volumenstrom $\dot{Q}_{\text{V}}(t)$:

$$\dot{Q}_{\text{V}}(t) = \frac{\pi}{4} D_{\text{i}}^2 v(t). \quad (2.3)$$

Demzufolge kann das Volumen V zwischen den betrachteten Zeitpunkten t_0 und t_1 wie folgt berechnet werden:

$$V = \int_{t_0}^{t_1} \dot{Q}_{\text{V}}(t) dt. \quad (2.4)$$

Stellt man den Durchfluss wie in Abb. 2.2 über die Zeit dar, so entspricht das gesamte durch den Zähler geflossene Volumen der Fläche unter der Kurve des Volumendurchflusses.

Die Bestimmung des Durchflusses erfolgt nicht kontinuierlich, sondern in Intervallen, die vom Hersteller festgelegt werden. Zur Ermittlung des durch den Zähler geflossenen Volumens werden interne Interpolationsmethoden verwendet, um das Volumen zwischen den Intervallen zu berechnen. Informationen über die spezifischen Interpolationsverfahren und weiteren Berechnungsmethoden, die von den Herstellern elektronischer Wasserzähler verwendet werden, sind jedoch nicht verfügbar.

Das berechnete Volumen wird auf der digitalen Anzeige des Zählers ausgegeben und optional in regelmäßigen Abständen im internen Speicher des Zählers gesichert. Je nach Hersteller und Modell können unterschiedlich viele Werte gespeichert werden. Bei beispielsweise einem magnetisch-induktiven Zähler, welcher auch in dieser Arbeit betrachtet wurde, ist eine Speicherung von bis zu 2880 Werten möglich. Die Speicherung von Zwischenverbrauchswerten ermöglicht es, mit minimalem zusätzlichem Aufwand Rückschlüsse auf Veränderungen im Verbrauchsverhalten zu ziehen. Ein weiterer Vorteil ist, dass in magnetisch-induktiven Wasserzählern keine beweglichen Teile verbaut sind. Das Fehlen beweglicher Teile bietet den Vorteil, dass nur ein geringer Verschleiß zu erwarten ist. Ablagerungen an der Innenwand oder eine Vergrößerung des Querschnitts durch Abrasion können auch bei elektronischen Zählern zu Alterungserscheinungen führen, da sich hierdurch der Innendurchmesser des Zählers verändert. Der Innendurchmesser des Zählers wird zur Volumenberech-

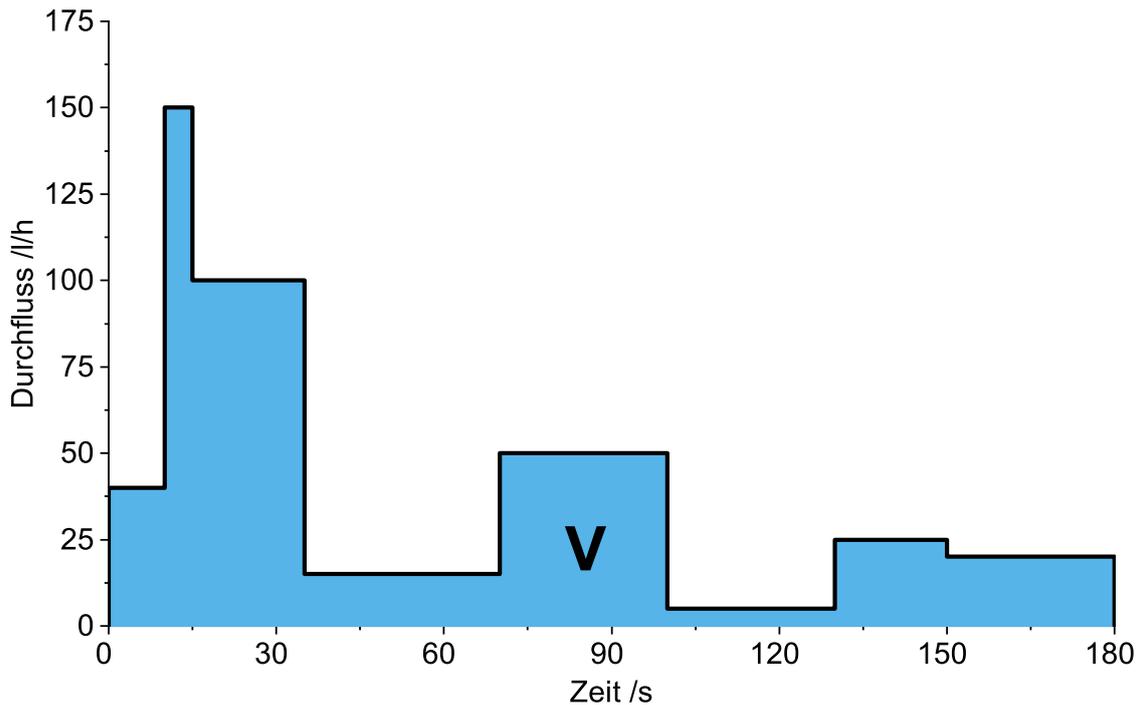


Abbildung 2.2: Exemplarische Darstellung des zeitlichen Verlaufs eines Durchflusses.

nung gemäß Gl. 2.3 verwendet. Angenommen, ein neuwertiger Zähler weist einen Kreisquerschnitt mit einem Durchmesser von 2 cm auf. Eine konstante Ablagerungsschicht von 0,5 mm an der Innenwand des Zählers führt folglich zu einer Abweichung zwischen der tatsächlichen Querschnittsfläche und der in den Berechnungen verwendeten Fläche. Diese Abweichung beträgt 9,75 %.

Ein weiterer Grund für Messabweichungen bei elektromagnetischen Zählern im Verlauf der Nutzungsdauer ist die Ablagerung von Mineralien an den Aufnahmeelektroden. Die Ablagerung von Mineralien verursacht einen lokalen Potentialunterschied an den Aufnahmeelektroden. Der lokale Potentialunterschied hat zur Folge, dass eine scheinbare Durchflussrate angenommen wird, die nicht die tatsächliche Durchflussgeschwindigkeit widerspiegelt (KNUDSEN, 2021). In welcher Größenordnung die fehlerbehaftete Durchflussgeschwindigkeit zu einem Fehler im berechneten Volumenwert führt, ist nicht bekannt.

Vorteile des magnetisch-induktiven Messverfahrens sind, dass keine Druckverluste durch Drosselgeräte oder Strömungskörper auftreten (CZICHOS, 2000). Das Verfahren ist zudem sehr robust gegen Dichte- und Temperaturschwankungen des Mediums (BONFIG, 2002), wobei diese Eigenschaft bei der Erfassung des Volumens von Trinkwasser im Haushalt eine eher geringe Bedeutung hat. Darüber hinaus ist das Messprinzip quasi unabhängig von der Viskosität des Mediums und feststoffbeladene Flüssigkeiten beeinflussen die Messung nicht. Das magnetisch-induktive Messver-

fahren erfordert, dass das durch den Zähler strömende Medium eine ausreichende elektrische Leitfähigkeit aufweist, um eine präzise Bestimmung des Durchflusses und des daraus resultierenden Volumens zu ermöglichen. Die erforderliche Mindestleitfähigkeit von 0,1 mS/m ist bei Leitungswasser in Deutschland (30 mS/m - 80 mS/m) gegeben. Destilliertes Wasser liegt im Grenzbereich (0,1 mS/m) (CZICHOS, 2000). Der in dieser Arbeit verwendete Zählertyp kann ab einer Leitfähigkeit des Mediums von 120 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (12 mS/m) die Strömungsgeschwindigkeit bestimmen. Für Trinkwasser in Europa ist bei einer Wassertemperatur von 20°C eine maximale Leitfähigkeit von 250 mS/m vorgeschrieben (EUROPÄISCHES PARLAMENT, RAT DER EUROPÄISCHEN UNION, 2020).

Zusätzlich zur ausreichenden Leitfähigkeit des Mediums ist eine vollständig mit Wasser gefüllte Rohrleitung erforderlich, um das Volumen korrekt zu bestimmen, da Lufteinschlüsse bei nur teilweise gefüllten Rohrleitungen zu Messfehlern führen können (FURNESS, 1989). Des Weiteren ist auf das Strömungsprofil zu achten, da magnetisch-induktive Zähler durch stromaufwärts gerichtete Strömungsstörungen geringfügig beeinträchtigt werden. Durch eine zusätzliche Einlaufstrecke vor dem Zähler können Störungen im Strömungsprofil reduziert werden, um eine Beeinträchtigung der Messqualität des Zählers zu vermeiden.

2.1.2.2 Ultraschall-Wasserzähler

Ein weiteres bei elektronischen Zählern genutztes Messverfahren basiert auf der Nutzung von Ultraschallwellen. Diese Ultraschallwellen werden durch piezoelektrische Kristalle erzeugt. Diese Kristalle sind in der Lage, Ultraschallwellen zu emittieren, wenn eine elektrische Spannung angelegt wird. Im umgekehrten Prozess generieren die Kristalle einen messbaren elektrischen Strom als Reaktion auf die Einwirkung von Ultraschallwellen. Somit können Piezokristalle sowohl als Sender als auch als Empfänger fungieren. Das Ultraschallverfahren ist ebenfalls ein diskretes Messverfahren, bei dem die Strömungsgeschwindigkeit typischerweise mittels des Laufzeitverfahrens bestimmt wird. Dieses Verfahren nutzt die Zeitdifferenz eines in zwei entgegengesetzte Richtungen ausgesandten Schallimpulses, die durch den Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit verursacht wird. Die Schallfrequenz liegt in einem Bereich zwischen 1 MHz und 5 MHz (FURNESS, 1989). Ein Beispiel für das Verfahren mit einem Sender-/Empfängerpaar ist in Abb. 2.3 dargestellt, wobei in diesem Fall der Sender auch als Empfänger und umgekehrt verwendet wird. Alternativ zum gezeigten Aufbau können auch zwei separate Sender-/Empfängerpaare eingesetzt werden. Zudem sind unterschiedliche Anordnungen der Reflektoren denkbar, um den spezifischen Anforderungen der Messung gerecht zu werden.

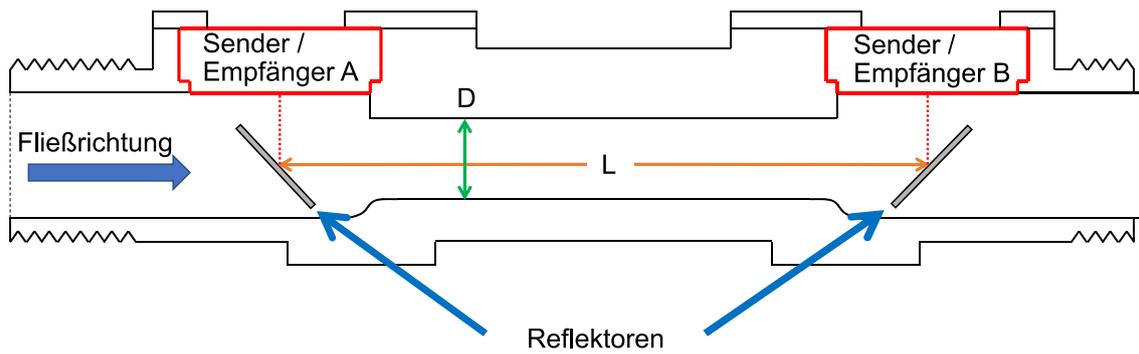


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Ultraschallzählers in Anlehnung an KAGA UND JOHGUCHI (2021).

Zur Berechnung des Volumens wird wie beim magnetisch-induktiven Verfahren die Strömungsgeschwindigkeit verwendet. Die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids $v_{\text{Ström}}$ kann mittels des Laufzeitverfahrens, welches unter anderem in der ISO 6416-2017-10 (DIN EN ISO 6416:2017-10, 2017) beschrieben ist, berechnet werden. Hierzu werden die reziproken Laufzeiten t_{vor} und $t_{\text{rück}}$ genutzt. Die Differenz der reziproken Laufzeit Δt_R lässt sich mittels des vom Schall zurückgelegten Wegs L und der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Ultraschallwellen mit der Strömung (v_{vor}) und entgegen der Strömung ($v_{\text{rück}}$) wie folgt berechnen:

$$\Delta t_R = L \cdot \left(\frac{1}{v_{\text{rück}}} - \frac{1}{v_{\text{vor}}} \right). \quad (2.5)$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Ultraschallwellen mit der Strömung setzt sich aus der Schallgeschwindigkeit c_S und der Strömungsgeschwindigkeit des Mediums $v_{\text{Ström}}$ zusammen:

$$v_{\text{vor}} = c_S + v_{\text{Ström}}. \quad (2.6)$$

Entgegengesetzt der Strömung wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls um die Strömungsgeschwindigkeit des Mediums verringert:

$$v_{\text{rück}} = c_S - v_{\text{Ström}}. \quad (2.7)$$

Hieraus folgt:

$$\Delta t_R = L \cdot \frac{2 \cdot v_{\text{Ström}}}{c_S^2 - v_{\text{Ström}}^2}. \quad (2.8)$$

Die von der Temperatur T des Mediums abhängige Schallgeschwindigkeit c_S kann über die Dichte ρ und den Kompressionsmodul K berechnet werden:

$$c_S(T) = \sqrt{\frac{K}{\rho}}. \quad (2.9)$$

Für Wasser ergibt sich unter Vernachlässigung des Salzgehalts und des Drucks eine Schallgeschwindigkeit von:

$$c_{S,\text{Wasser}}(T) \approx (1449 + 4,6T - 0,05T^2) \frac{m}{s}. \quad (2.10)$$

Unter der Annahme, dass das Quadrat der Schallgeschwindigkeit sehr viel größer ist als das Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit ($c_S^2 \gg v_{\text{Ström}}^2$), ergibt sich für die Strömungsgeschwindigkeit des Mediums:

$$v_{\text{Ström}} = \frac{\Delta t_R \cdot c_S^2}{2 \cdot L}. \quad (2.11)$$

Analog zum bereits erläuterten magnetisch-induktiven Wasserzähler wird durch die ermittelte Fließgeschwindigkeit das Volumen anhand von diskreten Messungen berechnet (siehe Gl. 2.3 und Gl. 2.4). Auch hier können Ablagerungen im Zähler zu einer fehlerhaften Volumenbestimmung führen, da eine Ablagerungsschicht zu einer verkürzten Wegstrecke der Ultraschallwelle führt. Bei einer angenommenen Lauflänge L von 1 cm und einer Ablagerungsschicht von insgesamt 0,01 cm würde dies zu einer Messabweichung von 1 % führen.

Der Abstand zwischen den einzelnen Messungen kann aufgrund des Messprinzips nur in einem größeren zeitlichen Abstand als bei magnetisch-induktiven Zählern erfolgen, da bei diesem Verfahren die Schallgeschwindigkeit verwendet wird. In welcher Größenordnung dieses Abtastintervall zu Messabweichungen führt, ist bisher nicht bekannt. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Messabweichungen bei einem kurzen Abtastintervall kleiner sind als bei einem längeren Abtastintervall. Das Abtastintervall für einen Ultraschall-Wasserzähler wird beispielsweise von einem der größten Netzbetreiber Baden-Württembergs mit zwei Sekunden angegeben. Zusätzlich zur Strömungsgeschwindigkeit erfassen die Geräte alle vier Sekunden die Wassertemperatur (BNNETZE GMBH, 2021). Grund für die Bestimmung der Wassertemperatur ist, dass das Ultraschall-Messverfahren von Temperatur- und Dichteschwankungen des Mediums beeinflusst wird. Durch die Bestimmung der Temperatur kann die Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit und infolgedessen auch des Volumens verbessert werden, da die in Gl. 2.11 verwendete Schallgeschwindigkeit

genauer bestimmt werden kann. Die Schallgeschwindigkeit beträgt gemäß Gl. 2.10 beispielsweise bei einer Wassertemperatur von 20 °C näherungsweise 1521 m/s und bei 40 °C 1553 m/s. Der Verlauf der nach Gl. 2.10 bestimmten Schallgeschwindigkeit ist in Abb. 2.4 dargestellt. Zusätzlich ist die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers unter der Annahme des zurückgelegten Wegs von 3 cm und einer Differenz der reziproken Laufzeiten von 0,01 $\mu\text{s}/\text{m}$ dargestellt. Darüber hinaus ist die prozentuale Abweichung zwischen der Strömungsgeschwindigkeit unter der Annahme einer konstanten Temperatur von 20 °C zur temperaturabhängigen Strömungsgeschwindigkeit dargestellt. Temperaturabhängige Geometrieänderungen des Wasserzählers können vernachlässigt werden.

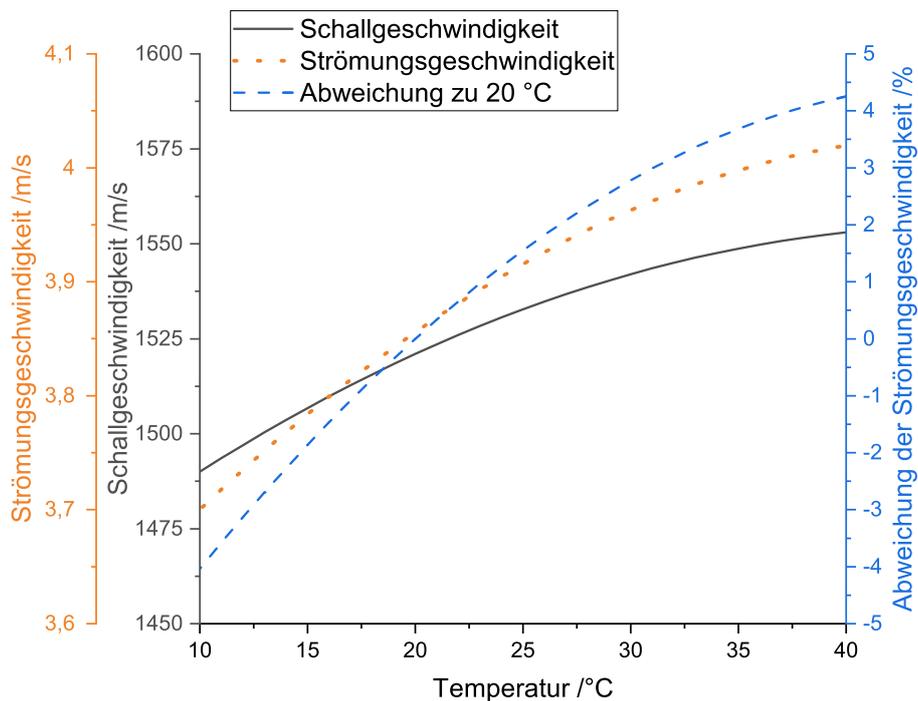


Abbildung 2.4: Verlauf der näherungsweise berechneten Schallgeschwindigkeit von Wasser und der daraus resultierende Strömungsgeschwindigkeit unter der Annahme von $L = 3 \text{ cm}$ und $\Delta t_R = 0,01 \mu\text{s}/\text{m}$. Zusätzlich ist die Abweichung von tatsächlicher Strömungsgeschwindigkeit zur Strömungsgeschwindigkeit unter der Annahme einer konstanten Temperatur von 20 °C dargestellt.

Gaseinschlüsse und unvollständig gefüllte Rohrleitungen beeinträchtigen die Messgenauigkeit von Ultraschallzählern in ähnlicher Weise wie bei magnetisch-induktiven Zählern. Die Messrichtigkeit des Zählers wird zudem mit der Zeit schlechter, da die Reflektoren des Zählers mit der Zeit erblinden. Dieser Alterungsprozess kann durch eine Erhöhung der Sendeleistung teilweise kompensiert werden. Bei der Installation dieses Zählertyps ist auf einen ordnungsgemäßen Potentialausgleich zu achten, da ein fehlender Ausgleich zu fehlgeleiteten elektrischen Strömen führen kann. Solche Ströme können einerseits den Zähler beschädigen und andererseits bei menschlicher Berührung gesundheitliche Schäden verursachen (DEUTSCHER VEREIN DES GAS- UND WASSERFACHES E.V., 2022).

2.1.3 Überblick über Unterschiede zwischen mechanischen und elektronischen Wasserzählern

Die zentralen Unterschiede zwischen elektronischen und mechanischen Wasserzählern (Messart, Messbereich und Preis) sind in Tab. 2.1 zusammengefasst.

Tabelle 2.1: Zusammenfassung der Unterschiede von elektronischen und vollständig mechanischen Wasserzählern.

	elektronischer Zähler	mechanischer Zähler
Messart	diskret	kontinuierlich
Messbereich	groß	klein
Justierbarkeit	ja	nein
Alarmmeldungen	ja	nein
Datenspeicherung	Speicherung von Verbrauchswerte während des gesamten Ablesezeitraums möglich	manuelle Ablesung
Preis	hoch (€€€)	niedrig (€)
Batterie	ja	nein

Messart: Elektronische Wasserzähler erfassen die Strömungsgeschwindigkeit diskret und bestimmen das durch den Zähler geflossene Volumen indirekt mittels Interpolationsverfahren. Die Volumenberechnung basiert daher auf der periodischen Messung der Strömungsgeschwindigkeit und nicht auf einer direkten Volumenerfassung. Mechanische Wasserzähler hingegen arbeiten kontinuierlich und erfassen das Volumen direkt. Beide Zählertypen verfügen über ein integriertes Zählwerk, das das ermittelte Volumen anzeigt. Bei mechanischen Zählern erfolgt die Anzeige des Volumens durch Zahlenrollen und bei elektronischen Zählern über ein digitales Display.

Messbereich: Der Einsatz elektronischer Zähler ermöglicht die Erfassung eines erweiterten Messspektrums. Dennoch weisen elektronische Zähler eine untere Durchflussgrenze auf, die durch das elektronische Rauschen bedingt ist. Bei niedrigen Durchflussraten kann das Rauschen die Signalerfassung beeinträchtigen, was entweder zu ungenauen Messungen oder zu einem unverhältnismäßig hohen Aufwand für die Signalextraktion führen kann.

Es ist jedoch nicht pauschal anzunehmen, dass elektronische Zähler stets einen größeren Messbereich bieten als mechanische Zähler. Der Messbereich eines Zählers wird durch den R-Wert definiert, welcher das Verhältnis des Dauerdurchflusses zum Minimaldurchfluss des Zählers beschreibt. Derzeit sind auf dem Markt elektronische Hauswasserzähler erhältlich, die einen R-Wert von bis zu 1600 aufweisen, während mechanische Zähler R-Werte von bis zu 800 erreichen.

Justierbarkeit: Elektronische Wasserzähler können einer Kalibrierung unterzogen werden, wodurch die Fehlerkurve um die Nulllinie der Messabweichung justiert werden kann. Dies ist insbesondere wichtig, um sicherzustellen, dass die Messergebnisse

weder systematisch eine der beteiligten Parteien – Verbraucher oder Versorger – bevorzugen noch benachteiligen.

Die Kalibrierung dieser Zähler ist notwendig, da Ultraschall- und elektromagnetische Zähler empfindlich auf Schwankungen im Niedriggeschwindigkeitsprofil der Flüssigkeit innerhalb des Rohrsystems reagieren. Diese Sensitivität kann insbesondere bei niedrigen Durchflussraten zu einer leichten Nichtlinearität der Messwerte führen. Daher ist eine präzise Justierung erforderlich, um Durchflusskorrekturen vorzunehmen und eine exakte Messung zu gewährleisten (KNUDSEN, 2021).

Alarmmeldungen: Elektronische Wasserzähler bieten die Möglichkeit zur frühzeitigen Detektion von Leckagen, indem sie sowohl den Versorger als auch den Verbraucher umgehend benachrichtigen können. Diese Fähigkeit zur Generierung von Alarm- und Warnmeldungen ist auch bei mechanischen Zählern durch den Einsatz eines Zusatzmoduls möglich.

Allerdings erfordert die Leckagedetektion bei mechanischen Zählern, dass diese einen Messbereich mit ausreichend niedrigen Durchflussraten abdecken. Dies ist jedoch nur in wenigen Fällen gegeben, da viele mechanische Zähler nicht für derart niedrige Durchflussraten ausgelegt sind. Daher ist die Effektivität der Leckagedetektion bei mechanischen Zählern im Vergleich zu elektronischen Zählern oft eingeschränkt.

Daten: Elektronische Wasserzähler bieten die Möglichkeit, den Verbrauch in regelmäßigen Intervallen zu speichern, was die Erzeugung detaillierter Informationen über Spitzen- und Durchschnittsverbrauch ermöglicht. Diese Funktionalität erlaubt eine umfassende Analyse des Wasserverbrauchs über verschiedene Zeiträume hinweg.

Im Gegensatz dazu liefern mechanische Zähler ohne integriertes Funkmodul ausschließlich das kumulierte Gesamtvolumen durch manuelle Ablesung. Durch die Nachrüstung eines Funkmoduls kann jedoch auch bei mechanischen Zählern die Erfassung von Zwischenverbrauchswerten realisiert werden, wodurch eine ähnliche detaillierte Verbrauchsanalyse wie bei elektronischen Zählern ermöglicht wird.

Preis: Die Produktionskosten für elektronische Wasserzähler sind erheblich höher im Vergleich zu denen von mechanischen Zählern. Dies liegt unter anderem daran, dass elektronische Wasserzähler zusätzliche Prüfungen erfordern, wie etwa die Überprüfung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV-Prüfung). Diese zusätzlichen Anforderungen tragen zu den höheren Kosten elektronischer Wasserzähler bei.

Zum Stand Mitte 2021 lagen die Kosten für klassische mechanische Wasserzähler bei etwa 20 € bis 30 €. Die Nachrüstung eines mechanischen Zählers mit einem Funkmodul belief sich auf etwa 50 €. Im Vergleich dazu bewegten sich die Preise

für elektronische Wasserzähler zwischen 170 € und 190 €. Die höheren Kosten für elektronische Zähler reflektieren die komplexere Technologie und die zusätzlichen Prüfanforderungen, die mit deren Herstellung verbunden sind.

Batterie: Um das durch den Zähler geflossene Volumen zu messen, ist eine kontinuierliche Stromversorgung des Zählers unerlässlich. Bei Hauswasserzählern erfolgt dies durch eine integrierte Batterie, deren einwandfreier Betrieb über die gesamte Nutzungsdauer des Zählers gewährleistet werden muss.

2.2 Leckageerkennung mittels Hauswasserzählern

Im Versorgungsnetz treten an verschiedenen Stellen Wasserverluste auf. Dabei wird zwischen realen (physischen) und scheinbaren (kommerziellen) Verlusten differenziert (DEUTSCHER VEREIN DES GAS UND WASSERFACHES (2017), (AL-WASHALI ET AL., 2019), (ETHEM KARADIREK, 2020). Reale Verluste werden durch Leckagen im Rohrleitungsnetz oder im Haushalt verursacht und sind demnach physische Verluste, bei denen das Wasser nicht genutzt werden kann. Leckagen im Rohrleitungsnetz können zum Beispiel an Rohrverbindungen oder durch Beschädigungen an der Wasserleitung verursacht werden. Typische Leckagen im Haushalt sind ein tropfender Wasserhahn oder ein undichter Spülkasten. Ein tropfender Wasserhahn verursacht bei einer Tropfenrate von einem Wassertropfen pro Sekunde circa einen Verlust von 17 l pro Tag. Bei einem undichten Spülkasten betragen die Verluste ca. 480 l pro Tag (AVACON WASSER GMBH, 2024).

Neben realen Verlusten existieren noch scheinbare Verluste. Bei diesen Verlusten wird das Wasser zwar genutzt, jedoch nicht von Messgeräten erfasst und somit auch nicht abgerechnet (AL-WASHALI ET AL., 2019). Die scheinbaren Verluste treten bei einem gut strukturierten Versorgungsnetz in den meisten Fällen aufgrund von Messungenauigkeiten der Zähler auf (ARREGUI ET AL., 2018). Das Wassernetz in Deutschland wies in der Vergangenheit sehr geringe Wasserverluste (ca. 10 %) (UMWELTBUNDESAMT, 2024) auf. Daher sind die Vorteile der Erkennung von Leckagen kleiner als in anderen Teilen der Welt. Laut Umweltbundesamt (UBA) haben sich die Wasserverluste über die letzten Jahre reduziert, trotzdem ist eine bessere Erkennung nach wie vor sinnvoll, um die Wasserverluste weiter zu minimieren.

Durch die Kenntnis über auftretende Wasserverluste können sowohl Verbraucher als auch Versorger rechtzeitig reagieren, um die Verluste zu minimieren. Hierdurch können Versorger und Verbraucher zum einen anfallende Kosten senken und zum anderen größere Schäden vermeiden, da durch die frühzeitige Entdeckung von Leckagen einem im schlimmsten Fall auftretenden Rohrbruch vorgebeugt werden kann.

Bislang existieren keine Studien, die sich auf die Wasserverluste in einzelnen Haushalten im europäischen Raum konzentrieren. Stattdessen beziehen sich die bisherigen Studien zur Erkennung von Leckagen auf sogenannte District Metered Areas (DMA) und auf die Erfassung des Wasserverbrauchs mittels Großwasserzählern (LUCIANI ET AL., 2019), (MUHAMMETOGLU ET AL., 2020), (MARZOLA ET AL., 2021). Bei diesen Studien steht die Erkennung von Leckagen im Versorgungsnetz im Vordergrund. Es zeigt sich, dass die Kosten für die Reparatur der Leckage sowie die Mehrkosten für den elektronischen Wasserzähler weniger als die Kosten für das in sechs Monaten aus der Leckage austretende Wasser betragen (MUHAMMETOGLU ET AL., 2020). Trotz immer genauer überwachter Versorgungsnetze ist seit einigen Jahren in Deutschland zu beobachten, dass die Kosten für Schäden durch Leitungswasser immer weiter ansteigen (SCHOLZEN, G., 2010), (BARKMANN, D., 2018), (RÖDL & PARTNER, 2020). Hierzu zählen zum einen Schäden durch unbemerkt ausgetretenes Leitungswasser als auch Rohrbrüche, welche durch eine frühzeitige Erkennung einer Leckage vermieden werden können. Daher kann diskutiert werden, ob es sich lohnt, analog zu den in den Studien verwendeten Großwasserzählern auch vermehrt auf intelligente Hauswasserzähler zu setzen, um dem Nutzer Warn- und Alarmmeldungen ausgeben zu können. Bisher existieren jedoch noch keine Veröffentlichungen über Kosteneinsparungen durch die frühzeitige Detektion von Leckage durch Hauswasserzähler.

Für die Detektion von Leckagen mittels Hauswasserzählern gibt es mehrere Möglichkeiten. Eine Literaturrecherche im Projekt MetroWaMet („Metrology for real-world domestic water meter“ (17IND13)) im Rahmen des European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR) (17IND13 METROWAMET, 2021) zeigt, dass für die Detektion von Leckagen folgende Ansätze zur Detektion von Leckagen genutzt werden:

- Methode des minimalen Durchflusses,
- Datengestützte Bedarfsprognose,
- Analyse von Einzelverbräuchen.

Neben den in der Recherche bereits aufgezeigten Methoden besteht zudem die Möglichkeit, Leckagen über ein akustisches Verfahren zu detektieren. Ebenso gibt es die Möglichkeit, anhand von hochauflösenden Drucksensoren Leckagen anhand von Druckänderungen in der Rohrleitung zu erkennen (LEVINAS ET AL., 2021). Die Detektion mittels hochauflösender Drucksensoren wird bislang jedoch nicht genutzt, da hierfür extra Sensoren verbaut werden müssten und dies mit einem unwirtschaftlichen Mehraufwand verbunden wäre. Nachfolgend werden daher nur kurz die zuvor genannten gängigen Ansätze zur Leckageerkennung vorgestellt.

2.2.1 Ansatz des minimalen Durchflusses

Anhand der vom elektronischen Zähler aufgezeichneten Verbrauchshistorie kann ein tägliches Verbrauchsprofil erstellt werden. Der Zeitraum des geringsten Verbrauchs wird als Minimum Night Flow (MNF) bezeichnet und tritt zwischen 02:00 Uhr und 04:00 Uhr auf (BRITTON ET AL., 2008), (AL-WASHALI ET AL., 2019). Dieser MNF wird vielfach für die Erkennung von Leckagen genutzt. Hierzu wird der zeitliche Verlauf des MNF aufgezeichnet und analysiert. Ein Hersteller von Wasserzählern gibt beispielsweise an, dass die Leckageerkennung den Verbraucher warnt, sobald dauerhaft ein Durchfluss von 0,5 % des für die Größe des Zählers angegebenen Dauerdurchflusses erkannt wird. Typische Werte für den Dauerdurchfluss eines Hauswasserzählers sind beispielsweise 2500 l/h respektive 4000 l/h. Bei diesen Zählern würde somit eine Leckagewarnung bei einem dauerhaften nächtlichen Durchfluss von 12,5 l/h bzw. 20 l/h ausgelöst werden. Folglich würde ein Wasserverlust aufgrund eines tropfenden Wasserhahns nicht erkannt werden. Ein undichter Spülkasten hingegen würde zu einer Leckagewarnung des Zählers führen. Eine genaue Lokalisierung der Leckage ist bei diesem Verfahren nicht möglich.

2.2.2 Datengestützte Bedarfsprognose (Data Driven Demand Forecast)

Dieser Ansatz basiert auf dem Vergleich von tatsächlichen Verbrauchswerten mit zu erwartenden Verbräuchen, welche beispielsweise unter Verwendung neuronaler Netze ermittelt werden können. Hierfür ist es notwendig, dass Verbrauchsdaten kontinuierlich erfasst werden. Dabei ist es wichtig, dass der durchschnittliche Verbrauch, die Dauer der Wasserentnahme und die maximale Abweichung zum erwarteten Verbrauch bestimmt werden (OREN UND STROH, 2013). Ein weiterer Ansatz ist die Bayessche Systemidentifikationsmethode, welche eine hohe Rechenleistung und somit einen erhöhten Energieverbrauch zur Folge hat. Da davon auszugehen ist, dass die Berechnungen im Zähler direkt stattfinden, würde die Art der Leckageerkennung zu einer verringerten Batterielaufzeit des Zählers führen. Des Weiteren werden Prognosemodelle mittels einer stochastischen Simulation verwendet. Weitere mögliche Ansätze zur Berechnung sind in 17IND13 METROWAMET (2021) zusammengefasst dargestellt.

2.2.3 Analyse von Einzelverbräuchen (Flow Pattern Disaggregation)

Diese Methode der Leckageerkennung basiert auf der Erstellung von einzelnen Verbrauchsmustern wie beispielsweise dem Verbrauch einer Waschmaschine oder einer Toilettenspülung. Mittels eines Algorithmus ist es möglich, aus einem Verbrauchsprofil, bei welchem sich die einzelnen Teilverbrauchsmuster überlagern, Teilverbräuche zu separieren und zu kategorisieren. Nicht kategorisierbare Verbräuche sind Verbräuche, die voraussichtlich nicht erwünscht sind und daher auf eine Leckage hindeuten können. Bei diesem Verfahren werden beispielsweise Entscheidungsbaum- oder Techniken des maschinellen Lernens eingesetzt.

2.2.4 Akustische Erkennung von Leckagen

Das akustische Verfahren ist eine weitere Möglichkeit, um Leckagen zu detektieren. Das generelle akustische Ortungsprinzip von Leckagen ist unabhängig vom Medium. Es beruht auf der Annahme, dass durch das Auftreten eines Risses, eines Lecks oder einer Beschädigung der Rohrleitung ein akustisches Signal erzeugt wird (LOTH ET AL., 2004).

Dieses Verfahren wird häufig bei der Ortung von Leckagen in Gaspipelines genutzt. Zum jetzigen Zeitpunkt verwenden nur wenige Hersteller von Hauswasserzählern dieses Verfahren. Das akustische Verfahren kann jedoch sehr gut mit Ultraschall-Wasserzählern kombiniert werden. Dabei wird durch den Zähler kontinuierlich der Lärmpegel (Rauschen) im Rohr aufgezeichnet. Durch einen Algorithmus können Störsignale herausgefiltert werden. Analog zur Erkennung von Leckagen mit Hilfe des MNFs wird bei diesem Verfahren der niedrigste Lärmpegel im Rohr bestimmt. Hierzu wird meistens ebenso auf den Zeitraum zwischen 02:00 Uhr und 04:00 Uhr zurückgegriffen. Sobald der kleinste Geräuschwert einen definierten Pegel übersteigt, weist dies auf eine Beschädigung der Rohrleitung hin (DUPONT, 2019).

Im Gegensatz zu Zählern, welche lediglich den MNF zur Leckageerkennung nutzen, können Zähler, bei denen das akustische Verfahren genutzt wird, Leckagen nicht nur nach dem Zähler, sondern bereits vor dem Zähler erkennen. Die Leckageerkennung vor dem Zähler hat zur Folge, dass nicht nur Schäden im Haus, sondern bereits in den Versorgungsleitungen erkannt werden können.

2.3 Normative Vorgaben und Empfehlungen für Wasserzähler

Wasserzähler, die in Europa zur Abrechnung oder als Messgerät verwendet werden sollen, müssen vor der Verwendung für den europäischen Markt zugelassen werden. Für die Herstellung, das Inverkehrbringen und die Verwendung von Verbrauchszählern auf dem europäischen Markt ist ausschließlich die europäische Messgeräterichtlinie 2014/32/EU (EUROPÄISCHES PARLAMENT, RAT DER EUROPÄISCHEN UNION, 2014) maßgebend.

Zusätzlich zur MID gibt es noch die OIML R49:2013(E) bzw. ISO 4064:2014, welche harmonisiert sind. Das Einhalten der Vorgaben aus der OIML R49:2013(E) bzw. ISO 4064:2014 ist vielfach wünschenswert, da diese Dokumente auch auf anderen, nicht-europäischen Märkten angewandt werden. Zudem können Tests aus diesen Dokumenten als Grundlage genommen werden, um im Rahmen der MID geforderte Nachweise zu erbringen.

Alle wesentlichen normativen Vorgaben und Empfehlungen für Wasserzähler wurden für klassische mechanische Zähler ausgelegt und beruhen im Wesentlichen auf Studien, die zum Teil mehr als 20 Jahre alt sind. Die Vorgaben wurden zwar teilweise an elektronische Zähler und den technischen Fortschritt adaptiert, jedoch gibt es immer noch einige Grauzonen bzw. Bereiche, die nicht auf den heutigen Stand der Technik, insbesondere auf elektronische Wasserzähler, anwendbar sind. Aus diesem Grund gilt es, die einschlägigen normativen Dokumente und Empfehlungen zu überprüfen und zu überarbeiten. Bei der Überarbeitung der Dokumente sind diese an den aktuellen Stand der Technik (z. B. größere Messbereiche, kleinere Durchflüsse und andere Messprinzipien) anzupassen. Mit einer erneuten Überarbeitung der normativen Dokumente wurde im Jahr 2022 begonnen. Aus den neu definierten Anforderungen und Empfehlungen resultieren auch neue Herausforderungen bei beispielsweise der Prüfstandstechnik. Um die neuen Herausforderungen aufzuzeigen, wird nachfolgend der aktuelle Stand der normativen Dokumente in Teilen beleuchtet und im Weiteren ein Ausblick auf zukünftige Herausforderungen gegeben.

2.3.1 Aktueller Stand der normativen Dokumente

In den normativen Dokumenten werden wichtige metrologische Anforderungen wie die Durchflusskennlinie, der Messbereich des Zählers (R) sowie die Fehlergrenzen (engl.: maximum permissible error (MPE)) festgelegt. Die maximal zulässige Messabweichung des Wasserzählers vor dem Inverkehrbringen wird als Fehlergrenze beim

Inverkehrbringen, ehemals Eichfehlergrenze (EFG), bezeichnet. Die Messabweichung eines Zählers kann entweder unter Zuhilfenahme einer gravimetrischen oder volumetrischen Referenz oder eines Referenzzählers bestimmt werden. Die Messabweichung ϵ wird durch den Quotienten der Differenz vom Zähler gemessenen Volumen ($V_{\text{Zähler}}$) und dem Referenzvolumen (V_{Referenz}) zum Referenzvolumen nach Gleichung 2.12 berechnet:

$$\epsilon = \frac{V_{\text{Zähler}} - V_{\text{Referenz}}}{V_{\text{Referenz}}} \cdot 100 \%. \quad (2.12)$$

Die Bestimmung der Messabweichung des Zählers erfolgt für die Baumusterprüfung an den vier definierten Durchflusspunkten Q_1 , Q_2 , Q_3 und Q_4 . Als Basis für die Berechnung dieser Durchflusspunkte dient grundsätzlich der vom Hersteller festgelegte Dauerdurchfluss Q_3 . In der MID werden allerdings keine Einschränkungen bezüglich des Durchflusses von Q_3 gemacht. Jedoch existieren Vorgaben zur Auswahl des Dauerdurchflusses in der OIML R49:2013(E) (OIML R 49-1 2013 (E), 2013), die auch im Arbeitsblatt W 406 (DEUTSCHER VEREIN DES GAS UND WASSERFACHES, 2021) zu finden sind. Diese Vorgaben werden von allen Herstellern angewendet. Eine Übersicht über die Vorgaben zur Berechnung und die Bedingungen der einzelnen Prüfpunkte ist in Tab. 2.2 zu finden.

Aus der Messabweichung an den vier definierten Durchflusspunkten ergibt sich die für jeden Zählertyp individuelle charakteristische Durchflusskennlinie. In Abb. 2.5 ist exemplarisch eine Fehlerkurve dargestellt. Die Messwerte der Fehlerkurve sind lediglich zur einfacheren Interpretation miteinander verbunden. Anhand der Fehlerkurve kann keine Aussage über die Messabweichung zwischen den Messpunkten getroffen werden. Es wird vermutet, dass im Zwischenbereich die Fehlergrenze ebenfalls eingehalten wird. Zusätzlich sind in Abb. 2.5 die zulässigen Fehlergrenzen beim Inverkehrbringen eingezeichnet. Diese Fehlergrenze beträgt nach OIML R49:2013(E) bzw. ISO 4064:2014 für Kaltwasserzähler der Genauigkeitsklasse 2 (Wassertemperatur $T_{\text{Wasser}} \leq 30 \text{ °C}$) zwischen Q_2 und $Q_4 \pm 2 \%$ und zwischen Q_1 und $Q_2 \pm 5 \%$. Die Verkehrsfehlergrenze, innerhalb der die Messabweichung des Wasserzählers zwingend zu jeder Zeit seines Betriebs liegen muss, ist in Deutschland doppelt so groß wie die Fehlergrenze beim Inverkehrbringen. Bei der Konformitätsbewertung von Wasserzählern werden neben den vier genannten Prüfpunkten zwei zusätzliche Prüfpunkte verwendet. Zum einen findet eine Überprüfung des Fehlers der Anzeige bei einem Durchfluss von $0,35(Q_2+Q_3)$ und zum anderen bei einem Durchfluss von $0,7(Q_2+Q_3)$ statt.

Tabelle 2.2: Definition und Berechnungsvorschrift für Prüfpunkte zur Charakterisierung von Wasserzählern gemäß Richtlinie 2014/32/EU (EUROPÄISCHES PARLAMENT, RAT DER EUROPÄISCHEN UNION, 2014).

Prüfpunkt	Definition	Berechnung / Bedingung
Q_1	Minstdurchfluss	$Q_3/Q_1 \geq 40$
Q_2	Übergangsdurchfluss	$Q_2 = 1,6 \cdot Q_1$
Q_3	Dauerdurchfluss	
Q_4	Überlastdurchfluss	$Q_4 = 1,25 \cdot Q_3$

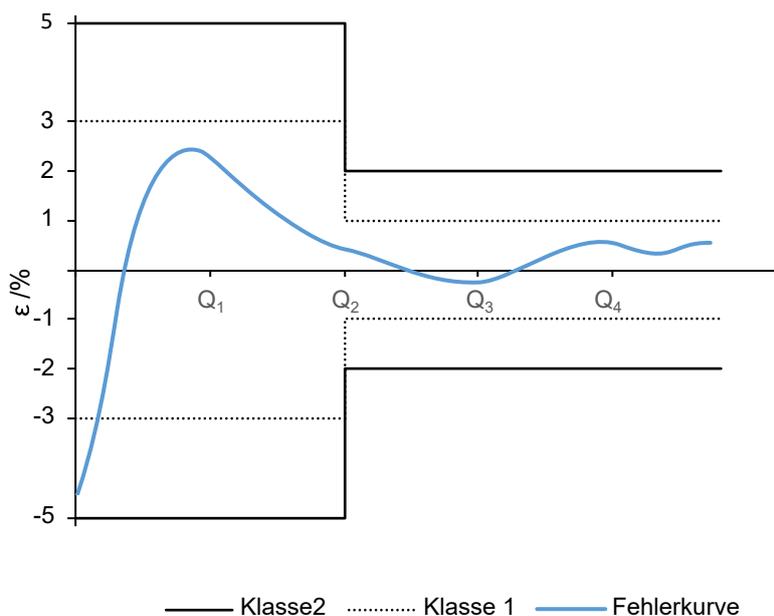


Abbildung 2.5: Darstellung einer beispielhaften Fehlerkurve eines Hauswasserzählers und der einzuhaltenden Fehlergrenzen der Klasse 1 und 2.

Neben der Einhaltung der Messrichtigkeit ist von den Herstellern vor dem Inverkehrbringen eines Zählers gemäß Messgeräte-Richtlinie unter anderem nachzuweisen, dass:

- trotz Störeinflüssen (z. B. elektromagnetische Störungen) die Messabweichungen weiterhin die vorgeschriebenen Fehlergrenzen einhalten und der Zähler nach dem Auftreten der Störung weiterhin innerhalb der zulässigen Fehlergrenze arbeitet.
- der Zähler ausreichend gegen die Manipulation an Hard- und Software geschützt ist.
- die Anzeige während der gesamten Lebensdauer des Zählers alle für die Abrechnung relevanten Messwerte ausgibt.
- der Zähler eine hinreichende Messbeständigkeit aufweist.

Für die jeweiligen Nachweise existieren keine genauen Vorgaben. Gemäß MID ist der Nachweis lediglich durch *die Durchführung einer geeigneten Prüfung* (EUROPÄISCHES PARLAMENT, RAT DER EUROPÄISCHEN UNION, 2014) zu erbringen. Tests zur Überprüfung von Zählern, die auch zum Nachweis im Rahmen der Konformitätsbewertung verwendet werden können, stehen unter anderem in der OIML R49:2013(E) Teil 2. Beispielsweise wird dort ein Belastungstest - so genannte Stress-tests - beschrieben. Hier wird u.a. der zu prüfende Wasserzähler u.a. 100 Stunden (für Wasserzähler mit einem Q_3 von kleiner als 16000 l/h) bei maximal zulässigem Durchfluss (Q_4) betrieben.

Ein weiterer dort beschriebener Test besteht aus zyklischen Beanspruchungen des Zählers. Nach den jeweiligen Tests darf die Messrichtigkeit des geprüften Zählers nicht die vorgegebenen Grenzwerte überschreiten.

2.3.2 Aktueller Stand der Weiterentwicklung der normativen Dokumente und Überblick über zukünftige Herausforderungen

Die normativen Dokumente werden in den kommenden Jahren umfassend dem aktuellen Stand der Technik angepasst. Hierzu sind in den vergangenen Jahren bereits Forschungsarbeiten absolviert worden. Im Rahmen der vorangegangenen Arbeiten konnten neue Herausforderungen bezüglich Prüfstandstechnik und Prüfverfahren bereits untersucht werden.

Nachstehend werden die wesentlichen Erkenntnisse aus den vorangegangenen Arbeiten erörtert. Hierbei wird getrennt voneinander zunächst auf die Prüfverfahren und im Anschluss auf die Prüfstandstechnik eingegangen.

Prüfverfahren

Bislang werden die Fehlerkurven der Zähler anhand der vier beschriebenen Messpunkte definiert und bei statischen Messungen bestimmt. Sollte die Messabweichung bei diesen Messungen im zulässigen Bereich liegen, wird davon ausgegangen, dass bei allen Durchflüssen der MPE nicht überschritten wird. Neue Zähler decken hierbei einen immer größeren Messbereich bis aktuell $R = 1600$ ab, wodurch die zu prüfenden Durchflusspunkte sehr weit auseinanderliegen. Viele Geräte, wie zum Beispiel Waschmaschinen, werden mit dem Ziel weiterentwickelt, energieeffizienter zu arbeiten. Hierzu zählt auch, dass neue Geräte möglichst wenig Wasser verbrauchen sollen. Hieraus resultieren beispielsweise kürzere Entnahmezeiten und -mengen. Infolgedessen werden Wasserzähler zunehmend stark wechselnden Verbräuchen ausgesetzt. Inwiefern dynamische Verbräuche die Messgenauigkeit des Zählers beeinflussen, kann

mit den bisherigen Prüfungen nicht ermittelt werden. Daher untersuchte SCHUMANN (2020) bereits den Unterschied zwischen statischen und dynamischen Prüfungen. SCHUMANN (2020) schlägt vor, Wasserzähler zukünftig nicht nur statisch, sondern ebenfalls dynamisch zu testen, da diese das reale Verbrauchsverhalten widerspiegelt. Eine realitätsnahe Prüfung hat den Vorteil, dass nachgewiesen werden kann, dass die Fehlergrenzen auch unter alltäglichen Betriebsbedingungen eingehalten werden.

Um den alltäglichen Verbrauch abbilden zu können, entwickelte SCHUMANN (2020) eine Methode, um realitätsnahe Prüfprofile zu erstellen. Diese realitätsnahen Prüfprofile spiegeln näherungsweise den tatsächlichen Verbrauch und somit die realen Betriebsbedingungen von Hauswasserzählern wider. In Abb. 2.6 sind Beispiele für dynamische Prüfprofile abgebildet, welche mittels des Algorithmus erstellt wurden.

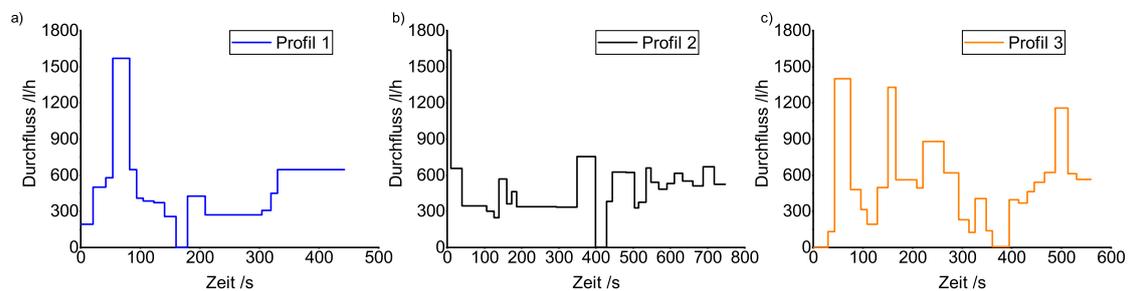


Abbildung 2.6: Beispiele für realitätsnahe dynamische Prüfprofile.

Essentiell für dynamische Prüfungen ist die exakte und reproduzierbare Umsetzung der Profile, welche mittels verschiedener Technologien erfolgen kann. Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts MetroWaMet wurden in einer Pilotstudie verschiedene Möglichkeiten zur Umsetzung der dynamischen Prüfung verglichen. Es wurden schnell schaltende Ventile, kritische Düsen oder Kolben zur Realisierung genutzt. Es zeigt sich, dass alle untersuchten Realisierungen unter Berücksichtigung der erweiterten Messunsicherheit verwendet werden können (WARNECKE ET AL., 2022). Die dynamische Prüfung bietet den Vorteil, dass nicht nur einzelne Messpunkte, sondern der vollständige Messbereich des Zählers überprüft wird. Die Untersuchungen von WARNECKE ET AL. (2021) zeigen für die exemplarisch betrachteten Wasserzähler, dass sowohl dynamische als auch statische Messungen zu vergleichbaren Ergebnissen führen.

Neben der realitätsnahen Überprüfung von Wasserzählern wird es in Zukunft auch notwendig sein, dass die vom Hersteller angegebenen Zusatzfunktionen überprüft werden können. Zusätzliche Funktionalitäten unterliegen nicht dem gesetzlichen Messwesen. Trotzdem ist auch hier ein Qualitätsnachweis anzustreben. Ein Beispiel für eine zu prüfende Zusatzfunktion ist die Warnung vor möglichen Leckagen. In DIN EN 14154-4 (2023) wird eine Methode zur Überprüfung der Zusatzfunktion der Leckageerkennung beschrieben. Bei der dort beschriebenen Überprüfung

der Zusatzfunktion wird im ersten Schritt der zu prüfende Wasserzähler bei einem konstanten Durchfluss, der vom Hersteller als Leckagedurchfluss definiert wird, für einen ebenfalls vom Hersteller definierten Zeitraum betrieben. Die Überprüfung gilt als bestanden, wenn eine Warnmeldung ausgegeben wird. Im zweiten Schritt wird der Zähler bei einer Durchflussrate, die größer als der definierte Leckagedurchfluss ist, betrieben. Dabei wird überprüft, ob keine Warnmeldung vom Zähler ausgegeben wird. Definitionen, welche Arten von Leckagen oder an welcher Position Leckagen prinzipiell erkannt werden können, existieren bislang nicht. Zudem gibt es keine Definitionen, ab welcher Größe der Leckage ein Zähler mit einem Warnsystem diese Leckagen zuverlässig erkennen muss. Hier wären Konkretisierungen wünschenswert.

Ein weiterer Bereich, in dem Vorgaben möglichst zeitnah nachgeschärft werden müssen, betrifft die Abtastrate von elektronischen Zählern. Wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, wird der Verbrauch bei elektronischen Wasserzählern anhand von diskreten Messwerten berechnet. Bei Messungen mit konstanten Durchflüssen hat die Abtastrate keine Auswirkungen auf die Messrichtigkeit des Zählers. Sobald jedoch sich ändernde Durchflüsse vorliegen, hat das Abtastintervall eine Auswirkung auf das vom Zähler erfasste Volumen. In welcher Größenordnung die zusätzlichen Messabweichungen liegen, ist zurzeit nicht bekannt. Daher gibt es bislang auch keine Vorgaben, in welcher Häufigkeit ein Messwert zur Bestimmung des Volumens genommen werden muss, um die Einhaltung der MPE sicherzustellen. Die Abtastrate ist bisher auch nicht verpflichtend bei der Zulassung neuer Zähler anzugeben, so dass Hersteller die Abtastrate nach eigenem Ermessen festlegen können. Es besteht hierbei die Gefahr, dass ein zu langes Abtastintervall vom Hersteller gewählt wird, um beispielsweise eine längere Lebensdauer der internen Batterie zu gewährleisten. Ein zu langes Abtastintervall könnte dazu führen, dass das durch den Zähler geflossene Volumen nicht mehr hinreichend korrekt bestimmt werden kann. Somit sollte in Zukunft ein maximal zulässiges Abtastintervall vorgegeben werden. Um für eine solche Vorgabe eine Grundlage zu schaffen, wurden im Rahmen dieser Arbeit die Auswirkungen des Abtastintervalls auf das erfasste Volumen betrachtet.

Prüfstandstechnik

Die Weiterentwicklung der Zählertechnologien hat neben neu zu definierenden oder zu ergänzenden Vorschriften auch neue Anforderungen an die Prüfstandstechnik zur Folge. Derzeit ist am Markt die klare Tendenz erkennbar, dass Wasserzähler mit immer größeren Messbereichen und somit kleineren Startdurchflüssen verwendet werden. Diese Tendenz stellt viele Prüfstellen vor Herausforderungen, da diese mit ihrer bisherigen messtechnischen Infrastruktur kleine Durchflüsse gar nicht oder nicht mit der vorgeschriebenen Güte realisieren können.

Diese Herausforderung an die Prüfstandstechnik wird zum Beispiel durch den Vergleich eines Zählers mit einem R-Wert von 80 und einem Zähler mit einem R-Wert von 400 deutlich. Beide Zähler haben in diesem Beispiel den gleichen Dauerdurchfluss von $Q_3 = 2500$ l/h. Beim Zähler mit einem R-Wert von 80 ist jedoch ein kleinerer Messbereich (31,25 l/h bis 3125 l/h) als bei einem Zähler mit einem R-Wert von 400 (6,25 l/h bis 3125 l/h) zu überprüfen. Zudem weisen elektronische Wasserzähler als Zusatzfunktion die Möglichkeit der Erkennung von Leckagen auf. Um diese Zusatzfunktion zu überprüfen, sind ebenfalls sehr kleine Durchflüsse erforderlich. Es werden daher immer genauere Regler zum Einstellen des Durchflusses benötigt, da das Toleranzfenster bei kleineren Durchflüssen ebenso kleiner wird. Zusätzlich zur genaueren Regelung ist eine höhere Genauigkeit der Referenzbestimmung notwendig. Sollte keine Anpassung der Genauigkeit der Referenz erfolgen, müssten die Prüfvolumen unabhängig vom Durchfluss gewählt werden. Hierdurch würde bei kleinen Durchflüssen die Messzeit, um das Referenzvolumen zu erreichen, stark ansteigen. In den normativen Dokumenten ist zur Bestimmung der Messabweichung eines Zählers allerdings eine maximale Prüfzeit von 90 min vorgegeben ((OIML R 49-1 2013 (E), 2013) (DIN 4064-1:2014, 2012). Um diese Vorgabe einzuhalten, ist es daher erforderlich, eine kleinere Referenzmenge zu nutzen. Die Berechnung für das minimal zu verwendende Prüfvolumen ist im DVGW-Informationspapier Wasser Nr. 114 zu finden (DEUTSCHER VEREIN DES GAS- UND WASSERFACHES E.V., 2022).

Zusätzlich zur Erhöhung der Genauigkeit der Referenz gibt es bei elektronischen Zählern die Möglichkeit, die Auflösung (höhere Abtastrate und höhere Auflösung der Anzeige) für den Zeitraum der Prüfung einzustellen. Auf diese Weise wird ein kleineres Prüfvolumen benötigt, um die Vorgabe bezüglich der maximalen Prüfzeit einzuhalten. Ein dauerhafter Betrieb im sogenannten Testmodus ist aufgrund des deutlich erhöhten Energieverbrauchs und der damit verbundenen verkürzten Lebensdauer der Batterie nicht möglich, da im Testmodus ein Betrieb über die gesamte Einbauzeit nicht gewährleistet werden kann.

3 Untersuchungen zur Erkennung von Leckagen mittels Hauswasserzählern

3.1 Veranlassung und Zielsetzung

Elektronische Wasserzähler sind mit zusätzlichen Funktionen ausgestattet, darunter intelligente Warn- und Alarmmeldungen, die unter anderem zur Erkennung von Leckagen dienen. Wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, können Zähler unter anderem anhand eines sich ändernden Verbrauchs Leckagen erkennen und eine entsprechende Warnmeldung ausgeben. Jedoch fehlen bislang umfassend publizierte Kriterien, die für eine verlässliche Leckageerkennung durch Wasserzähler notwendig sind. Vor diesem Hintergrund wird in diesem Abschnitt angestrebt, solche Kriterien und eine Infrastruktur zu entwickeln, um erste Untersuchungen mit Hauswasserzählern durchzuführen.

Die Zielsetzung orientiert sich an den folgenden Forschungsfragen:

- Welche in der Praxis auftretenden Leckagen lassen sich mittels der zur Verfügung stehenden Infrastruktur reproduzierbar generieren und von welchen Parametern am Prüfstand hängt die Größe der Leckage ab?
- Sind Veränderungen im Durchfluss aufgrund von Leckagen mittels Durchflussmessern erkennbar, so dass prinzipiell die Möglichkeit besteht, dass diese Leckagen mittels Hauswasserzählern erkannt werden könnten?
- Können Leckagen unabhängig von ihrer Position relativ zum Zähler (vor oder nach dem Zähler) und deren Distanz zum Zähler durch konventionelle Hauswasserzähler zuverlässig detektiert werden?
- Welche Größenordnungen und -arten von Leckagen sind mit auf dem Markt erhältlichen Wasserzählern erfassbar?

3.2 Material und Methoden

Zur Beantwortung der zuvor formulierten Forschungsfragen wurden Versuchsreihen mit verschiedenen Hauswasserzählern unter Verwendung der entwickelten Infrastruktur durchgeführt. Bei den Versuchen lag der Schwerpunkt auf dem Ansatz, dass Leckagen aufgrund eines sich ändernden Durchflusses erkannt werden können. Eine Überprüfung der anderen Ansätze zur Erkennung von Leckagen (siehe Abschnitt 2.2) fand im Rahmen dieser Arbeit nicht statt. Zudem wurde die Möglichkeit zur Detektion von Leckagen mittels eines Algorithmus und der Analyse von Einzelverbräuchen bereits im Rahmen des MetroWaMet-Projekts untersucht (MARTIN, 2021). Daher wurde dieser Ansatz ebenfalls nicht näher beleuchtet.

3.2.1 Experimentier- und Wasserzählerprüfstand

Für die Untersuchungen wurde auf den Experimentier- und Wasserzählerprüfstand (EWZP) der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig zurückgegriffen. Der vereinfachte schematische Aufbau des EWZP ist in Abb. 3.1 dargestellt. Die in der Abb. 3.1 eingezeichnete Kavitationsdüsenapparatur kann optional an der dargestellten Position in die Messleitung eingebaut werden. Im Standardbetrieb des Prüfstands ist die Kavitationsdüsenapparatur nicht angeschlossen. Die wesentlichen Komponenten des Prüfstands werden nachfolgend näher erläutert.

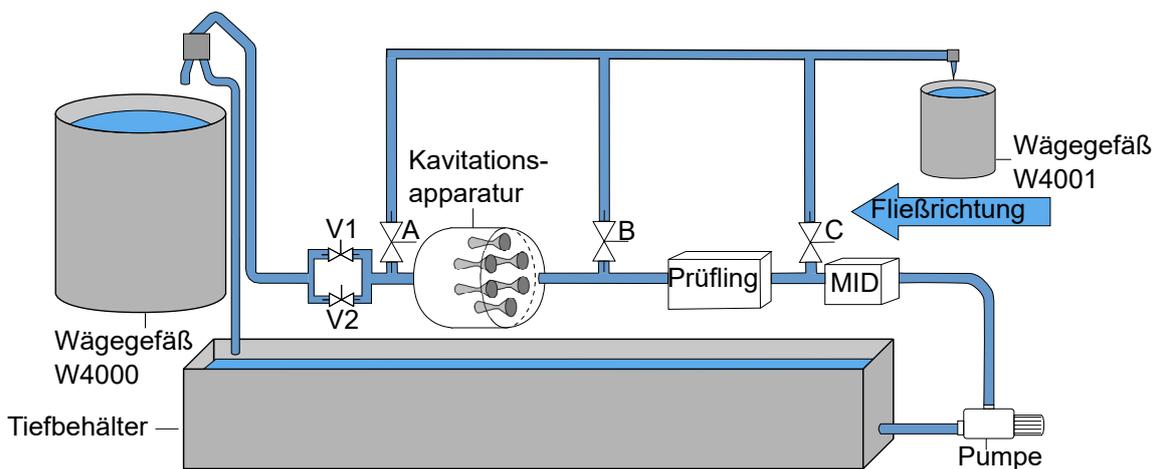


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung EWZP in Anlehnung an (Schumann, 2020).

Für die Untersuchungen war es zwingend erforderlich, einen definierten und reproduzierbaren Durchfluss einzustellen. Die Regelung des Durchflusses erfolgt am EWZP im Standardbetrieb zum einen durch die Einstellung der Drehzahl der Pumpe und zum anderen durch die Stellung der Gleitschieberventile V1 und V2. Zum Einstellen des gewünschten Durchflusses diente als Regelparameter zu Beginn dieser Arbeit

ein magnetisch-induktiver Durchflussmesser (MID). Aufgrund von Modernisierungsmaßnahmen wurde der magnetisch-induktive Durchflussmesser im Laufe der Arbeit durch einen Coriolis-Durchflussmesser ersetzt. Dieser Austausch hat keine Auswirkungen auf die Messergebnisse.

Neben konstanten Durchflüssen ist es auch möglich, sich ändernde Durchflüsse zu generieren. Für die Realisierung solcher dynamischen Durchflussprofile wird die bereits von SCHUMANN (2020) und WARNECKE (2024) verwendete Kavitationsdüsenapparatur genutzt. Im Gegensatz zur herkömmlichen Regelung des Durchflusses kann mit der Apparatur schnell zwischen verschiedenen Durchflüssen gewechselt werden, so dass die in Abschnitt 2.3 beschriebenen dynamischen Profile reproduzierbar umgesetzt werden können. Die Apparatur umfasst ein Reservoir an der Eingangsseite, von dem sechs Schläuche abzweigen. In jedem dieser abgehenden Stränge ist eine Halterung für zunächst eine Kavitationsdüse und im Anschluss ein Schrägsitzventil verbaut. Die sechs einzelnen Stränge werden in einem gemeinsamen Reservoir zusammengeführt. Die Düsen werden zur Erzeugung eines stabilen Durchflusses im kavitierenden Zustand betrieben. Damit die erwünschte und stabile Kavitation auftritt, ist eine minimale Druckdifferenz vom Druck vor der Kavitationsdüsenapparatur p_{vor} (p_1) zum Druck nach der Kavitationsdüsenapparatur p_{nach} (p_2) erforderlich. Das Druckverhältnis ($p_{\text{nach}}/p_{\text{vor}}$) soll nach SCHUMANN (2020) kleiner 0,75 sein, damit ein stabiler Durchfluss ($\pm 0,0015\%$) generiert wird. Bei der Verwendung der Kavitationsdüsenapparatur wird der Druck vor der Kavitationsdüsenapparatur p_{vor} als Regelparameter genutzt. Insgesamt existieren 64 verschiedene Düsenkombinationen. Dementsprechend können mit der Kavitationsdüsenapparatur 64 verschiedene Durchflüsse eingestellt werden. Die Zeit, bis sich bei einem Durchflusswechsel der neue Durchfluss stabil eingestellt hat (T_{95}), beträgt zwischen 0,17 s und 0,534 s (WARNECKE, 2024).

Zur Überprüfung des durch den Prüfling geflossenen Volumens wird eine gravimetrische Referenz (W4000) verwendet. Das Wägegefäß des EWZP besitzt ein nutzbares Gesamtvolumen von $V_{W4000} = 130$ L. Die Waage (Mettler Toledo KCC150) hat eine Auflösung von 1 g und eine Wiederholbarkeit von 0,5 g. Die Waagendrift beträgt 1 g/°C. Die Linearität der Waage beträgt ± 2 g. Das Wägesignal wird mit 1 Hz aufgezeichnet.

3.2.2 Erzeugung von Leckagen

Die Positionen zur Erzeugung von Leckagen (A, B oder C) sind in Abb. 3.1 dargestellt. Die Positionen A und B repräsentieren eine Leckage, die nach dem Hauswasserzähler auftritt, wie es etwa bei einem tropfenden Wasserhahn der Fall sein könnte.

Position C hingegen entspricht in der Praxis einer Leckage im Rohrleitungsnetz unmittelbar vor dem Zähler. Für die Erzeugung der Leckage wird an der jeweiligen Stelle ein y-Stück mit einem elektromagnetischen 4/2-Wegeventil in die Messleitung eingebaut. Hierdurch ist es möglich, zwischen dem Zustand „Leckage“ und „keine Leckage“ zu wechseln. Durch die Verwendung des elektromagnetischen Ventils ist es möglich, neben konstanten Leckagen auch zyklische Leckagen in Form einer Rechteckfunktion automatisiert zu erzeugen. An dem y-Stück ist ein Schlauch mit einem Durchmesser von 8 mm angeschlossen. An dessen Ende ist eine Kanüle montiert. Aus dieser Kanüle gelangt das Wasser in das Wägegefäß auf der Waage W4001. Vor der Kanüle sind zwei Stellschrauben verbaut. Mit diesen ist eine manuelle Einstellung der Ausprägung der Leckage möglich. Der Aufbau ist in Abb. 3.2 dargestellt.

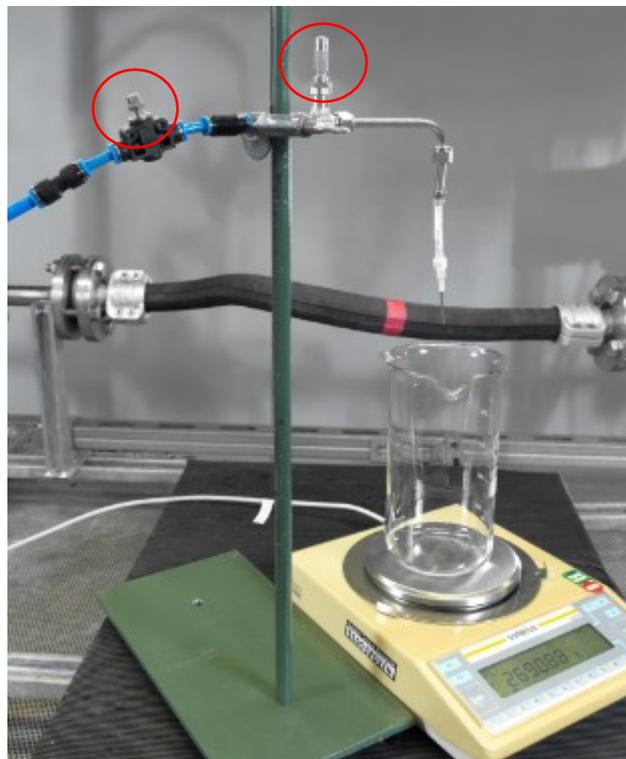


Abbildung 3.2: Stellschrauben zur Einstellung der Leckage vor der Kanüle.

Zur Bestimmung der Größe von künstlich erzeugten Leckageströmen \dot{q}_{Leck} wird diese zweite gravimetrische Referenz (W4001) verwendet. Der Wägewert wird mit 3 Hz aufgezeichnet. Die Waage (Sartorius LC3201D) hat eine Auflösung von 1 mg. Eine Bestimmung der Wiederholbarkeit, Linearität und Waagendrift wurde nicht durchgeführt. Für die Bestimmung der Masse des aus der Leckage austretenden Wassers wird die Waage W4001 mit einem Becherglas verwendet. Durch das maximale Fassungsvermögen des Becherglases von einem Liter wird die maximale Messzeit in Abhängigkeit zur eingestellten Leckage begrenzt.

3.2.3 Erfassung von Impulsen

Zur Bestimmung der Messabweichungen von Durchflussmessern werden volumen- bzw. massenproportionale Impulse genutzt. Diese Impulse werden am EWZP mittels Flukezählern (PM6881) erfasst. Hierzu wird bei Durchflussmessern (Turbine und Coriolis) der im Messgerät integrierte Strom- bzw. Impulsausgang verwendet. Über einen integrierten Impulsausgang verfügen ebenfalls einige elektronische Wasserzähler. Bei anderen elektronischen Wasserzählern können mittels eines optischen Kopfes die Impulse erfasst werden. Zur Erfassung von volumenproportionalen Impulsen werden bei mechanischen Wasserzählern Laser in Verbindung mit einem Lichtleiterverstärker (Keyence FS-N41C) genutzt. Mittels des Lasers wird der Anlaufstern des Wasserzählers abgetastet. Das hieraus entstehende Signal entspricht volumenproportionalen Impulsen, welche mit den Fluke-Zählern ebenfalls erfasst werden. Es ist zum einen eine Ermittlung der Gesamtzahl der Impulse als auch eine pulsgenaue Aufzeichnung möglich. Pulsgenaue Aufzeichnung bedeutet, dass der zeitliche Abstand zwischen jedem einzelnen Impuls gemessen wird. Mittels des zeitlichen Abstands zwischen den Impulsen Δt und der spezifischen Impulswertigkeit k_i des Messgeräts kann der Durchfluss \dot{m} berechnet werden durch:

$$\dot{m} = \frac{k_i}{\Delta t}. \quad (3.1)$$

Die Messzeit t des Versuchs ergibt sich aus der Summe der einzelnen Abstände zwischen den Impulsen Δt_i :

$$t = \sum \Delta t_i. \quad (3.2)$$

Der EWZP weist eine erweiterte Messunsicherheit von $U(\epsilon_{lab,i})$ ($k=2$) = 0,1 % auf. Bei der dynamischen Verwendung der Kavitationsdüsenapparatur beträgt die erweiterte Messunsicherheit ebenfalls 0,1 %.

3.2.4 Messgeräte

Für die ersten Untersuchungen wurde zum einen auf einen Coriolis-Durchflussmesser und zum anderen auf eine Turbine zurückgegriffen. Der Coriolis-Durchflussmesser hat einen vom Hersteller angegebenen Messbereich von 0 l/h bis 2000 l/h. Die Turbine weist einen kleineren Messbereich von 72 l/h bis 600 l/h auf. Diese Durchflussmesser wurden ausgewählt, da sie über eine sehr viel höhere Auflösung (höhere Sensitivität / Impulsrate) als Hauswasserzähler verfügen. Zur Erfassung des Durchflusses wurde beim Coriolis-Durchflussmesser der Impulsausgang verwendet. Bei der Turbine erfolgte die Erfassung des Durchflusses mittels des Stromausgangs. Dabei

beträgt die Impulswertigkeit der Turbine k_T 13625 Impulse pro Liter. Beim Coriolis-Durchflussmesser wurde der masseproportionale Impulsausgang mit einer Impulswertigkeit k_C von 10000 Impulsen pro Kilogramm genutzt. Die Verwendung der Turbine hat den Vorteil gegenüber dem Coriolis-Durchflussmesser, dass das Messsignal ungefiltert ausgegeben wird. Beim Coriolis-Durchflussmesser ist das Messsignal hingegen bereits durch unbekannte interne Berechnungen geglättet. Beim Coriolis-Durchflussmesser gibt es keine Möglichkeit, das Rohsignal abzugreifen.

Neben den zwei Durchflussmessern wurden zudem sowohl mechanische als auch elektronische Hauswasserzähler betrachtet. Bei elektronischen Wasserzählern erfolgt die Impulserfassung über den integrierten Impulsausgang. Bei mechanischen Zählern erfolgt die Erfassung des Durchflusses über Impulse, welche mittels der Laserabtastung (siehe Abschnitt 3.2.3) erzeugt wurden. Eine Übersicht über die verwendeten Hauswasserzähler ist in Tab. 3.1 gegeben.

Tabelle 3.1: Übersicht über die verwendeten Hauswasserzähler.

Zählerkennung	Hersteller	Messprinzip	Q_3 / l/h	R	Impulswertigkeit / Imp./l
U1	A	Ultraschall	2500	400	60
D1	C	mag.-ind.	4000	800	100
F1	C	Flügelrad	2500	80	147,638
R1	D	Ringkolben	2500	160	66,67

3.2.5 Untersuchte Durchflüsse

Bei den Versuchen wurden sowohl konstante Durchflüsse als auch Durchflussprofile untersucht. Bei den Untersuchungen mittels Coriolis-Durchflussmesser und Turbine wurden die nominalen Durchflüsse 37 l/h, 83 l/h, 575 l/h und 915 l/h untersucht. Diese Durchflusspunkte wurden mittels Kavitationsdüsen bei einem Druck vor den Düsen von 3 bar erzeugt.

Für die Untersuchungen an Hauswasserzählern wurden die Düsen, welche aufgrund der nachfolgenden dynamischen Prüfung bereits in der Kavitationsdüsenapparatur verbaut waren, genutzt. Hierbei wurden die Düsenkombinationen aus Tab. 3.2 verwendet. Aufgrund einer besseren Reproduzierbarkeit wurde bei den dynamischen Untersuchungen ein Vordruck von 4,14 bar verwendet. Durch die Verwendung des höheren Drucks kann zudem gewährleistet werden, dass stets Kavitation vorherrscht.

Bei den Untersuchungen von dynamischen Durchflüssen wurde das bereits in Abb. 2.6 dargestellte Durchflussprofil 1 aus dem MetroWaMet-Projekt verwendet. Die Dauer der einzelnen Durchflussstufen und der jeweilige nominale Durchfluss sind in Tab. 3.3 aufgelistet.

Tabelle 3.2: Verwendete Düsenkombinationen und deren nominaler Durchfluss bei 4,14 bar Vordruck.

Düsenkombination	nominaler Durchfluss $Q_{\text{nom}} / \text{l/h}$
61	45
60	230
32	1150
17	1400

Tabelle 3.3: Dauer und nominale Durchflüsse von Durchflussprofil 1.

Dauer des Durchflusses t / s	nominaler Durchfluss $Q_{\text{nom}} / \text{l/h}$
42	193
12	501
28	580
12	1570
11	645
18	410
18	387
19	372
19	258
30	0
95	425
15	269
11	307
93	451
20	645

3.2.6 Methode zur Charakterisierung der Leckagen

Im ersten Vorversuch wurden die am Prüfstand erzeugbaren Leckagen charakterisiert. Charakterisieren bedeutet in diesem Fall, zu evaluieren, in welchen Größenordnungen Leckagen am Prüfstand erzeugt werden können und ob eine reproduzierbare Erzeugung der Leckage möglich ist.

Da vermutet wurde, dass die Größe der Leckage von der Größe des Defekts der Rohrleitung, dem Druck an der Stelle der Leckage und vom Durchfluss abhängt, wurde untersucht, wie sich Druck und Durchfluss auf die Größe des Leckagestroms auswirken. Hierzu wurden die Leckage an Stelle A erzeugt und die beiden Stellschrauben vollständig geöffnet. Der Ort der Leckage ist in diesen Untersuchungen jedoch nicht von Bedeutung. Im ersten Schritt wurden zunächst der größte und der kleinste der gewählten Durchflusspunkte aus Tab. 3.2 untersucht. Für die Düsenkombinationen 61 und 17 wurde mittels der gravimetrischen Referenz W4001 bestimmt, wie viel Wasser innerhalb von einer Minute bei konstantem Druck aus der Leckage austritt.

Der jeweilige Leckagestrom \dot{q}_{Leck} lässt sich folglich über die Dauer der Öffnung der Leckage Δt und der Differenz der Masse am Ende der Messung zum Startwert Δm_{W4001} bestimmen durch:

$$\dot{q}_{\text{Leck}} = \frac{\Delta m_{\text{W4001}}}{\Delta t}. \quad (3.3)$$

Für die zwei ausgewählten Durchflüsse wurde der Druck an der Stelle der Leckage zwischen 0,5 bar und 5 bar in 0,5 bar Schritten variiert. Im Rahmen der Auswertung wurde für Wasser eine konstante Dichte von 1000 kg/m^3 angenommen. Hierdurch sind die Einheiten kg/h und l/h äquivalent zu verwenden. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird der Begriff l/h einheitlich verwendet, obwohl es sich präzise betrachtet um einen Massenstrom und nicht um einen Volumenstrom handelt.

Zusätzlich zur maximal einstellbaren Leckage $\dot{q}_{\text{Leck, max}}$ wurde untersucht, welche minimale Leckage sich in Abhängigkeit vom Druck einstellen lässt. Zur Bestimmung der minimalen Leckage $\dot{q}_{\text{Leck, min}}$ wurde analog zur Vorgehensweise bei der Bestimmung der maximalen Leckage verfahren. Es wurden lediglich die Stellschrauben so wenig wie möglich geöffnet. Schraube 1 wurde um ca. 10° geöffnet und Schraube 2 um 45° . Jede Messung zur Bestimmung der Größe des Leckagestroms wurde fünfmal wiederholt.

3.2.7 Methode zur Untersuchungen von Leckagen mittels Durchflussmessern

In diesem Vorversuch wurde untersucht, ob generell Durchflussänderungen aufgrund der Leckage messbar sind. Bei den Untersuchungen wurde ein Vordruck vor der Kavitationsdüsenapparatur von 3 bar verwendet. Aufgrund des Messbereiches der Turbine (72 l/h bis 600 l/h) wurde bei den Versuchen, bei denen die Turbine verwendet wurde, der untere Durchflusspunkt (37 l/h) nicht verwendet. Stattdessen wurde hier der nächstkleinere Durchflusspunkt (83 l/h) untersucht. Die Leckage wurde in den verschiedenen Teilversuchen nacheinander an den Positionen A, B und C erzeugt.

Im ersten Schritt wurde eine Leckage für 40 s geöffnet und im Anschluss 20 s geschlossen. Es wurden zwei unterschiedlich lange Zeiträume gewählt, um den jeweiligen Zeitraum eindeutig identifizieren zu können. Zudem wurde darauf geachtet, dass die Zeiten der geöffneten und geschlossenen Leckage nicht zu kurz sind. Im Rahmen einer Messung wurde die Leckage fünfmal geöffnet und fünfmal geschlossen. Jede Messung wurde fünfmal wiederholt. Während der gesamten Messzeit erfolgte eine pulsgenaue Aufzeichnung.

Eine grafische Auswertung wurde durchgeführt, indem der Verlauf des Durchflusses über die Messzeit hinweg dargestellt wurde. Hierbei wurde betrachtet, ob der Zeitraum der geöffneten Leckage mit einer Änderung des Durchflusses einhergeht und somit die Zeiträume der Leckage eindeutig identifizierbar sind. Sollte bei diesem Vorgehen kein Zeitraum einer Leckage erkennbar sein, wurde die Dauer der Öffnung der Leckage in zwei Schritten vergrößert. Im ersten Schritt wurde eine Öffnungsdauer von 120 s und Schließung von 60 s betrachtet. Sollte wiederum hierbei der Zeitraum der Leckage nicht erkennbar sein, wurde im nächsten Schritt die Öffnungsdauer der Leckage weiter verlängert. Aufgrund der maximalen Befüllung des Wägegefäßes wurde die Leckage je nach Durchflussspunkt für 300 s bzw. 420 s geöffnet. Nach dem Zeitraum der geöffneten Leckage folgte immer ein Zeitraum von 300 s mit geschlossener Leckage.

Es wurden Leckageströme \dot{q}_{Leck} von 0,1 l/h bis 3 l/h betrachtet. Es wurde bei jedem Teilversuch zunächst ein Leckagestrom von $\dot{q}_{\text{Leck}} \approx 3$ l/h betrachtet, da davon auszugehen ist, dass bei größeren Leckageströmen die Auswirkung der Leckage deutlicher sichtbar ist als bei kleinen Leckagen. Sollte bei einem Leckagestrom von 3 l/h keine Auswirkungen im Durchfluss erkennbar sein, wurde eine Messung bei maximal an der Position einstellbaren Leckage durchgeführt. Sollte bei maximaler erzeugbarer Leckage keine Veränderungen im Durchfluss feststellbar sein, wurde verzichtet, andere, kleinere Leckageströme an der gewählten Position der Leckage zu betrachten. Sollte hingegen ein Einfluss der Leckage auf den Durchfluss nachweisbar sein, wurde neben kleineren Leckageströmen (1,5 l/h und 0,1 l/h) zusätzlich die Entfernung zwischen Messgerät und Ort der Leckage vergrößert. Dabei wurde der Abstand von 25 cm auf 95 cm vergrößert. Die Vergrößerung des Abstands zwischen dem Messgerät und der Leckage wurde vorgenommen, um zu überprüfen, inwieweit eine größere Entfernung die Möglichkeit der Leckageerkennung beeinflusst. Diese Messungen wurden analog des oben beschriebenen Vorgehens durchgeführt.

Nachdem die Auswirkung von Leckagen an verschiedenen Positionen auf konstante Durchflüsse untersucht wurde, wurden im zweiten Teil dieser Versuchsreihe dynamische Durchflussprofile betrachtet. Auf Grundlage der im ersten Versuchsteil erlangten Erkenntnisse wurden ausschließlich die Positionen der Leckagen betrachtet, bei denen bei konstanten Durchflüssen eine Auswirkung auf den Durchfluss nachweisbar war. Als Basis der dynamischen Untersuchungen wurde das Durchflussprofil 1 aus Abb. 2.6 verwendet. Zunächst wurde das Durchflusssignal der Prüflinge unter Verwendung von Profil 1 ohne Leckage bestimmt. Im nächsten Schritt wurden die Messungen mit selbigem Profil nur mit konstanten Leckageströmen von 0,1 l/h, 1,5 l/h und 3 l/h über die gesamte Messdauer untersucht. Um zu evaluieren, inwiefern bei realitätsnahen Durchflussprofilen Leckagen erkennbar sind, wurde die Messung ohne Leckage mit der Messung mit Leckage verglichen. Hierzu wurde vom

zeitlichen Verlauf des vom Prüfling erfassten Durchflusses bei geöffneter Leckage der zeitliche Verlauf des Durchflusses der Messung ohne Leckage subtrahiert. Hieraus ergibt sich die Differenz des Durchflusses. Bei Bedarf wurde diese berechnete Differenz mittels des gleitenden Mittelwerts geglättet. Bei der dynamischen Betrachtung wurde aufgrund des zu kleinen Messbereichs der Turbine auf die Verwendung dieses verzichtet.

3.2.8 Methode zur Untersuchung von Leckagen mittels Hauswasserzählern

Neben den Untersuchungen mit Durchflussmessern wurden ebenso Untersuchungen mit auf dem Markt erhältlichen Hauswasserzählern durchgeführt. Hierzu wurden analog zu den vorherigen Versuchen und auf Basis der dort erlangten Erkenntnisse sowohl konstante Durchflüsse als auch ein Verbrauchsprofil untersucht. Im ersten Schritt wurden zunächst konstante Durchflüsse bei unterschiedlichen Leckagen betrachtet. Hierbei wurde analog zu den Messungen mittels Coriolis-Durchflussmesser vorgegangen. Während einer Messung bei konstantem Durchfluss wurde die Leckage bei verschiedenen Ausprägungen geöffnet und geschlossen. Neben konstanten Durchflüssen wurde ebenfalls das Profil 1 des MetroWaMet-Projekts betrachtet. Zunächst wurden fünf Messungen des Profils ohne Leckage durchgeführt. Im Anschluss erfolgten fünf Messungen bei einer Leckage von 3 l/h an Position B. Das Durchflusssignal des jeweiligen Zählers wurde ebenfalls pulsgenau erfasst. Analog zur Messung mittels Durchflussmesser wurde die Differenz des Durchflusses des Profils ohne Leckage und des Durchflusses des Profils mit Leckage gebildet. Für die Auswertung wurde das daraus entstehende Signal mittels des gleitenden Mittelwerts geglättet. Je nach Durchflussspunkt wurde das Signal über 250 Punkte bis hin zu 30000 Punkten geglättet. Der Leckagestrom wurde ebenfalls abhängig von der Größe geglättet.

3.3 Ergebnisse und Diskussion

3.3.1 Charakterisierung der Leckagen

Es wurde untersucht, in welcher Größenordnung sich Leckagen am EWZP erzeugen lassen und inwiefern diese vom Druck und Durchfluss an der Stelle der Leckage abhängen.

Es zeigt sich, dass durch die in Abb. 3.2 dargestellten Stellschrauben unabhängig vom Druck ein minimaler Leckagestrom $\dot{q}_{\text{Leck,min}} = 0,1 \text{ l/h}$ einstellen lässt. Der maximale Leckagestrom ist erwartungsgemäß abhängig vom im Bereich der Leckage vorherrschendem Druck. In Abb. 3.3 sind die maximal einstellbaren Leckagen bei den untersuchten Düsenkombinationen in Abhängigkeit vom Druck am Eingang der Messstrecke dargestellt. Der Druck war bei den Messungen im Bereich von 0,001 bar konstant. Anhand der zwei untersuchten Durchflüsse zeigt sich, dass die Größe des Leckagestroms abhängig vom Druck an der Stelle der Leckage ist. Der Durchfluss in der Messstrecke spielt entgegen der ursprünglichen Erwartungen keine Rolle. Aus den Untersuchungen folgt, dass sich am EWZP Leckagen zwischen $\dot{q}_{\text{Leck,min}} \approx 0,1 \text{ l/h}$ und $\dot{q}_{\text{Leck,max}} \approx 9,65 \text{ l/h}$ realisieren lassen. Die generierten Leckageströme sind zudem sehr gut reproduzierbar. Die auftretende Standardabweichung beträgt zwischen 0 l/h und 0,036 l/h.

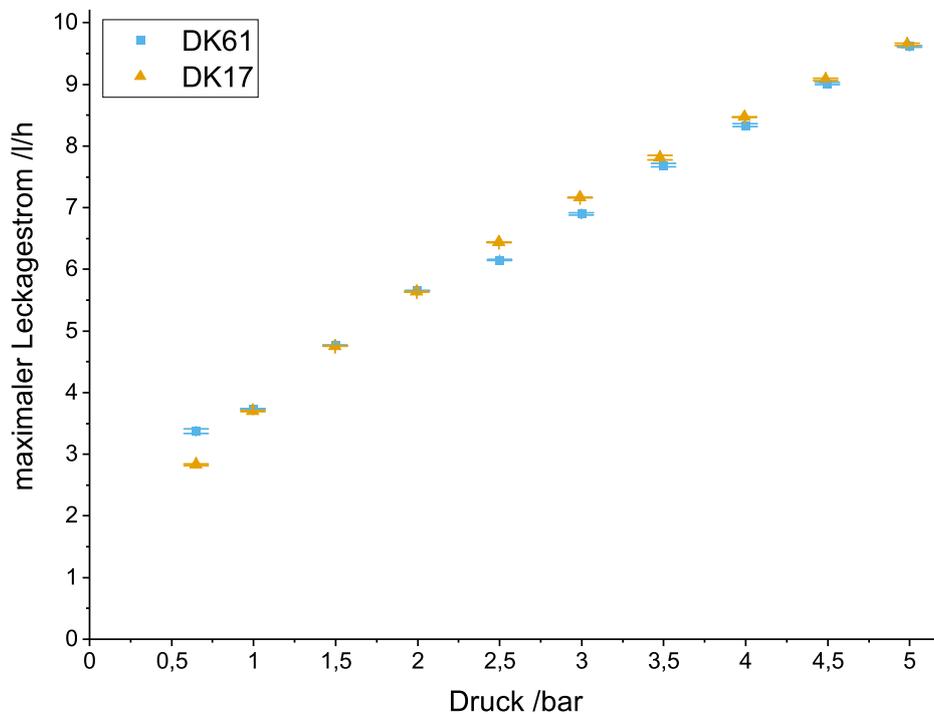


Abbildung 3.3: Maximale Leckage bei unterschiedlichen Durchflüssen bei den Düsenkombinationen (DK) 61 und 17 in Abhängigkeit vom Druck.

3.3.2 Vorversuch zur Auswirkung von Leckagen auf den erfassten Durchfluss von Durchflussmessern

Leckage an Position A bei konstantem Durchfluss

In dieser Versuchsreihe befindet sich die erzeugte Leckage hinter der Kavitationsdüsenapparatur. Hierbei wurde der zuvor bestimmt maximale Leckagestrom eingestellt.

Es zeigt sich, dass der nominale Durchfluss der Düse (37 l/h) kleiner ist als der tatsächlich sich einstellende Durchfluss von etwa 45,7 l/h. Ursache hierfür ist, dass der nominale Durchfluss mittels Nennmaß und Nenndruck bestimmt wurde. Aufgrund von Fertigungstoleranzen kommt es jedoch zu einer Diskrepanz zwischen tatsächlichem Durchmesser der Düse und dem Nennmaß. In Abb. 3.4 ist der mittels des Coriolis-Durchflussmessers ermittelte Durchfluss dargestellt. Zudem ist das geglättete Durchflusssignal dargestellt. Die Glättung des Durchflusssignals wurde mittels des gleitenden Mittelwerts über 250 Messwerte berechnet. Auf der zweiten y-Achse ist der periodische Leckagestrom dargestellt.

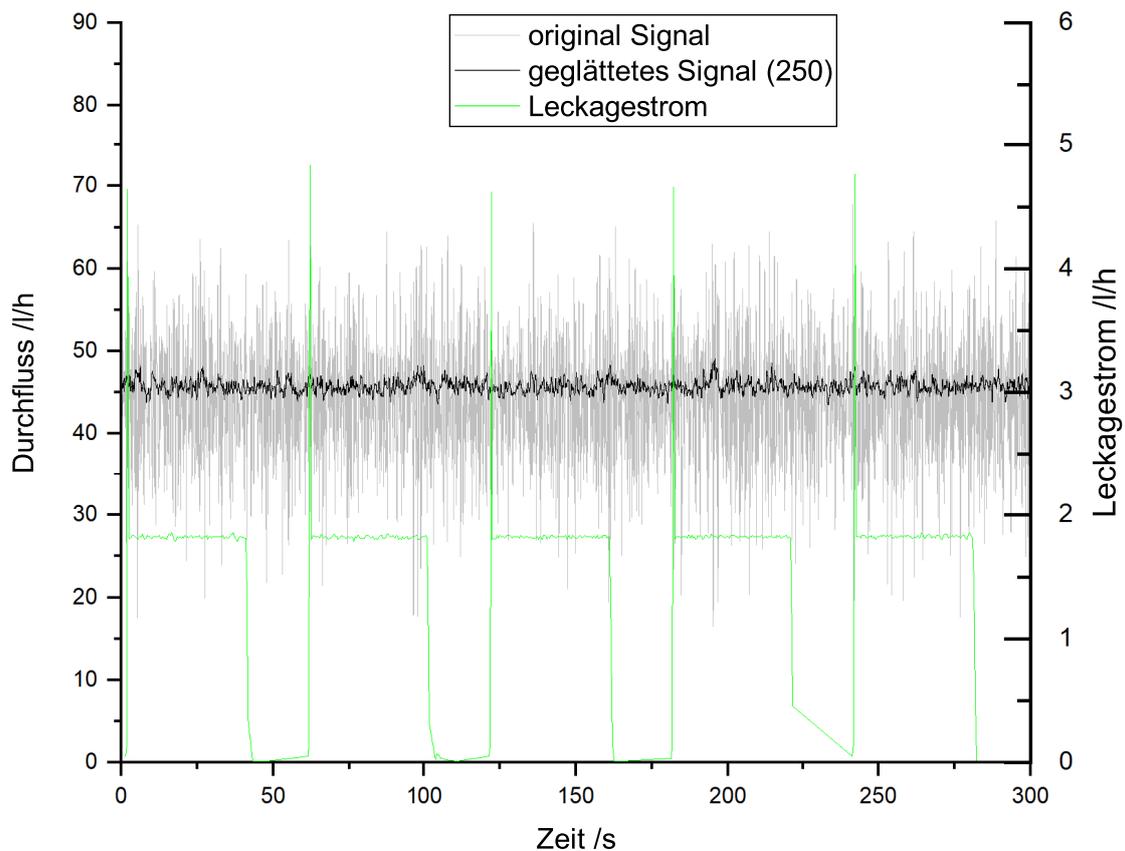


Abbildung 3.4: Massesignal des Coriolis-Durchflussmessers bei maximal einstellbarer Leckage an Position A.

Es zeigt sich, dass sich anhand des mit dem Coriolis-Durchflussmesser bestimmten Durchflusssignals kein Zeitraum einer Leckage detektieren lässt. Der Leckagestrom von ca. 1,5 l/h ist der bei diesem Aufbau unter dieser Düsenkombination maximal erzeugbare Leckagestrom. Bei den weiteren untersuchten Durchflusspunkten ließen sich Leckageströme von 3 l/h generieren. Trotz des höheren Leckagestroms zeigt sich, dass bei diesem Versuchsaufbau prinzipiell keine Zeiträume einer Leckage nachweisbar sind. Somit ist es mittels des Coriolis-Durchflussmessers nicht möglich, die Zeiträume der geöffneten Leckage zu detektieren, wenn die Leckage an Position A erzeugt wird. Eine mögliche Ursache hierfür ist, dass durch die Kavitationsdüsen-

apparatur zwischen Leckage und Durchflussmesser eine Art Dämpfungseffekt auftritt. Durch diesen Effekt ist es nicht möglich, dass sich Änderungen im Durchfluss aufgrund der Leckage einstellen bzw. sichtbar sind. Eine zweite mögliche Ursache ist, dass aufgrund interner Berechnungen ein bereits gefiltertes Signal vom Coriolis-Durchflussmesser ausgegeben wird. Aus diesem Grund wurde diese Messung anstelle des Coriolis-Durchflussmessers mit einer Turbine wiederholt. Es zeigt sich, dass ebenso keine Änderung im Durchflusssignal der Turbine aufgrund der Leckage erkennbar ist. Aufgrund dessen, dass mit den Durchflussmessern keine Zeiträume einer Leckage detektierbar sind, wurden keine weiteren Versuche mit Hauswasserzählern und einer Leckage an Position A durchgeführt.

Leckage an Position B bei konstantem Durchfluss im Abstand von 25 cm zum Messgerät

Bei diesem Versuchsaufbau wurde die Leckage 25 cm hinter dem Coriolis-Durchflussmesser bzw. der Turbine erzeugt. Diese Einbausituation spiegelt die Situation einer Leckage nach dem Wasserzähler beispielsweise in einem Haushalt wider. In Abb. 3.5 ist exemplarisch der mittels Coriolis-Durchflussmesser ermittelte zeitliche Verlauf des Durchflusses bei periodisch vorliegender maximaler Leckage dargestellt. Zudem ist auf der zweiten y-Achse der Leckagestrom aufgetragen.

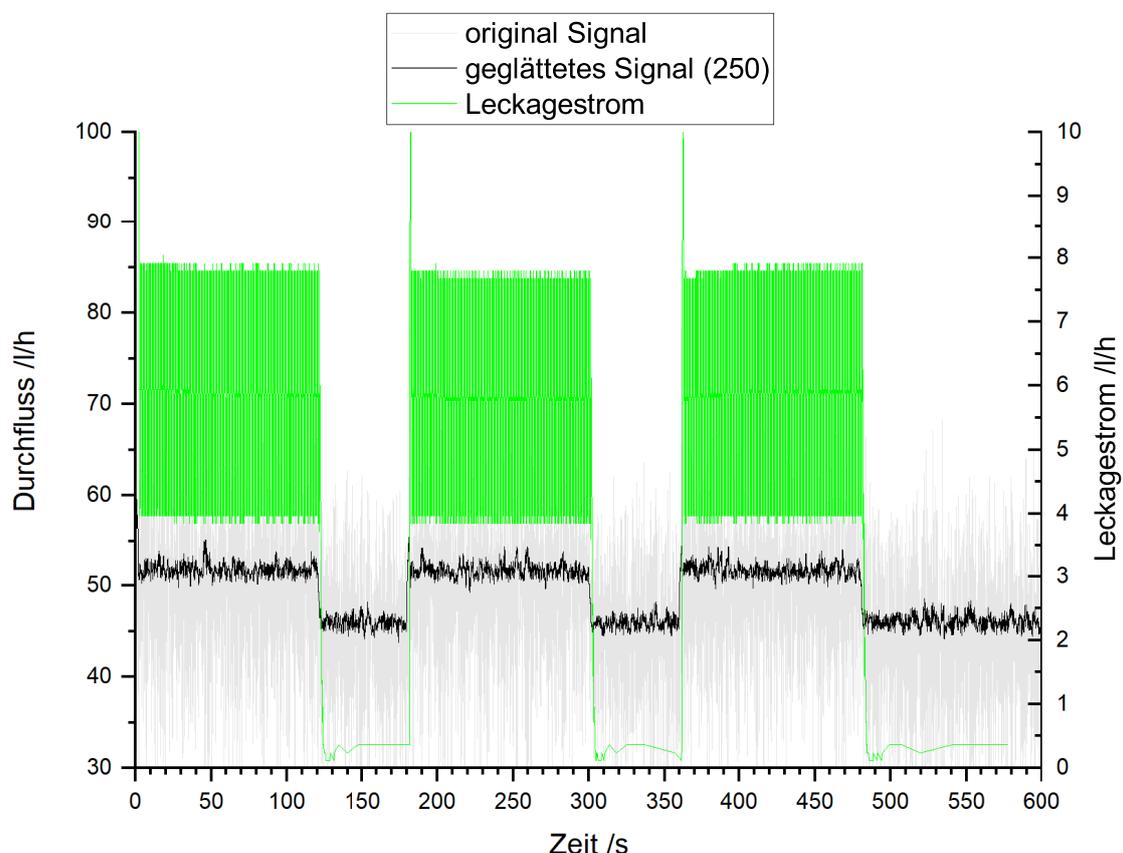


Abbildung 3.5: Massesignal des Coriolis-Durchflussmessers bei maximaler Leckage an Position B mit einem Abstand von 25 cm zwischen Messgerät und Leckage.

Es zeigt sich, dass die Zeiträume, bei denen eine Leckage vorliegt, anhand der Änderung des Durchflusssignals des Coriolis-Durchflussmessers erkennbar sind. Ebenso sind die Zeiträume, bei denen die Leckage geschlossen ist, klar identifizierbar. Gleiches gilt für einen Leckagestrom von 1,5 l/h. Bei einer periodischen Leckage (40 s geöffnet und 20 s geschlossen) von 0,1 l/h konnten bei keinem der untersuchten Durchflüsse die Zeiträume der geöffneten Leckage anhand des Massesignals des Coriolis-Durchflussmessers erkannt werden. Daher wurde zusätzlich ein längeres Intervall der geöffneten und geschlossenen Leckage untersucht. In Abb. 3.6 ist der mittels Coriolis-Durchflussmesser ermittelte Durchfluss bei minimaler periodischer Leckage dargestellt. Der Leckagestrom war in diesem Versuch 120 s geöffnet und 60 s geschlossen. Obwohl das Ventil nach 120 s geschlossen wurde, wurde ein Leckagestrom anhand des Waagensignals aufgezeichnet. Dieser sogenannte fiktive Leckagestrom ist darauf zurückzuführen, dass nach dem Schließen des Ventils ein Nachlauf auftritt, wodurch weiterhin Wasser in das Wägegefäß gelangt.

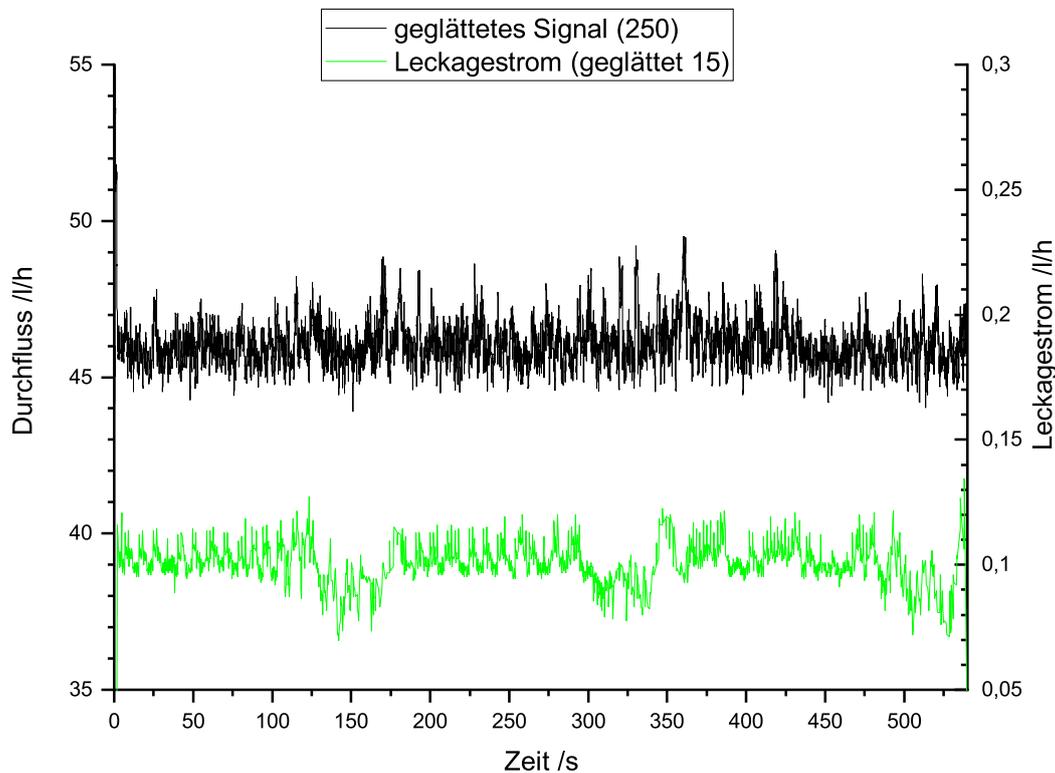


Abbildung 3.6: Geglättetes Durchflusssignal (gleitender Mittelwert über 250 Messpunkte) des Coriolis-Durchflussmessers bei kleinster realisierbaren Leckage an Position B.

Im Gegensatz zum Versuch bei Leckagen von 3 l/h und 1,5 l/h ist anhand des Durchflusssignals des Coriolis-Durchflussmessers kein Zeitraum einer Leckage bei minimaler Leckage eindeutig identifizierbar. Eine mögliche Ursache hierfür ist, dass die minimale Änderung des Durchflusses im Messrauschen untergeht. Aus diesem Grund wurde der Zeitraum der geöffneten und geschlossenen Leckage noch ein weiteres Mal vergrößert. Es wurde der Durchfluss über eine Messzeit von 600 s betrachtet.

Bei der Messung liegt in den ersten 300 s eine Leckage vor, welche im Anschluss geschlossen ist. Die Auswirkungen der Leckage lassen sich, wie in Abb. 3.7 dargestellt, erkennen. Die Fläche unter der Kurve entspricht dem Volumen, welches im betrachteten Zeitraum durch den Zähler geflossen ist. Dieses beträgt für den Zeitraum einer geöffneten Leckage 43,58 l und für den Zeitraum der geschlossenen Leckage 52,95 l.

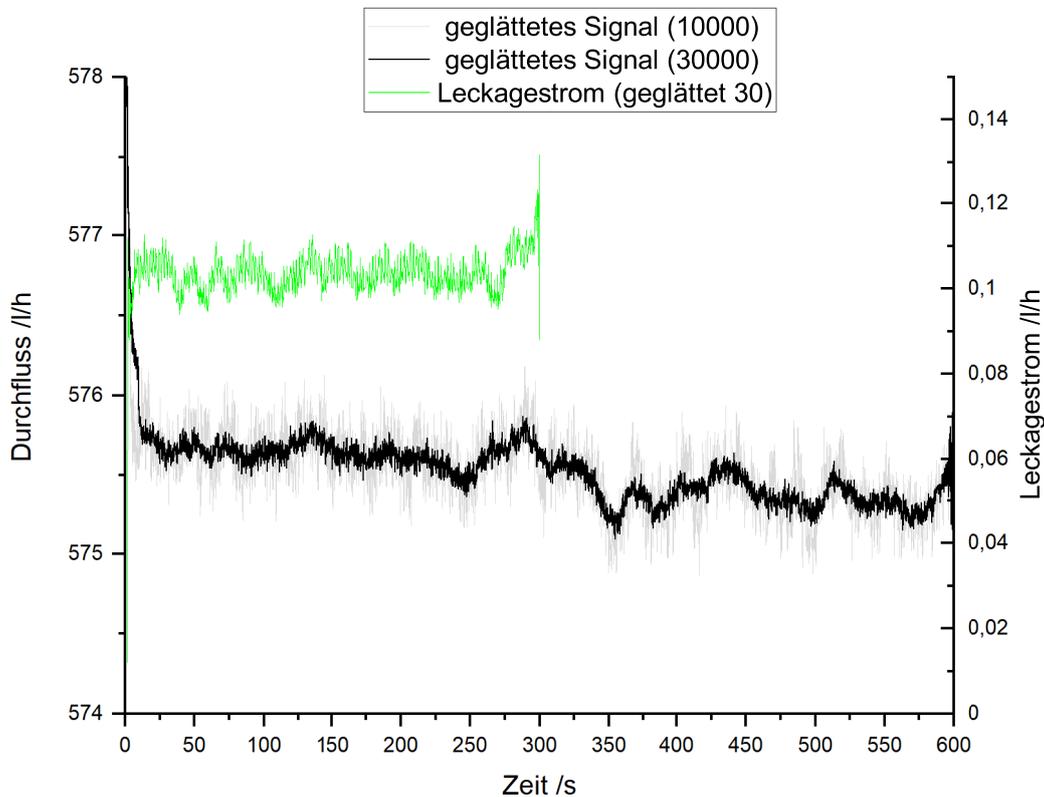


Abbildung 3.7: Geglättetes Durchflusssignal (gleitender Mittelwert über 10000 und 30000 Messpunkte) des Coriolis-Durchflussmessers bei kleinster realisierbaren Leckage an Position B.

Die kleinste einstellbare Leckage ist ebenfalls bei den anderen Durchflussspunkten nicht eindeutig identifizierbar. Selbiges zeigt sich bei den Messungen mit der Turbine. Hierdurch wird gezeigt, dass eine mögliche Filterung des Signals durch interne Berechnungen des Coriolis-Durchflussmessers nicht der Grund ist, dass minimale Leckageströme nicht deutlich erkennbar sind.

Leckage an Position B bei konstantem Durchfluss im Abstand von 95 cm zum Messgerät

In diesem Versuchsteil wurde der Abstand zwischen Messgerät und Leckage vergrößert, um zu untersuchen, ob die Entfernung zwischen Leckage und Messgerät einen Einfluss auf die Möglichkeit der Erkennung von Leckagen hat. Der Abstand wurde von 25 cm auf 95 cm vergrößert. In Abb. 3.8 ist beispielhaft sowohl der Leckagestrom als auch der mittels Coriolis-Durchflussmesser bestimmte Durchfluss bei den zwei untersuchten Entfernungen der Leckage dargestellt.

Aufgrund der Bildung des gleitenden Durchschnitts des Leckagestroms sind in der Abbildung keine klaren Flanken beim Leckagestrom erkennbar.

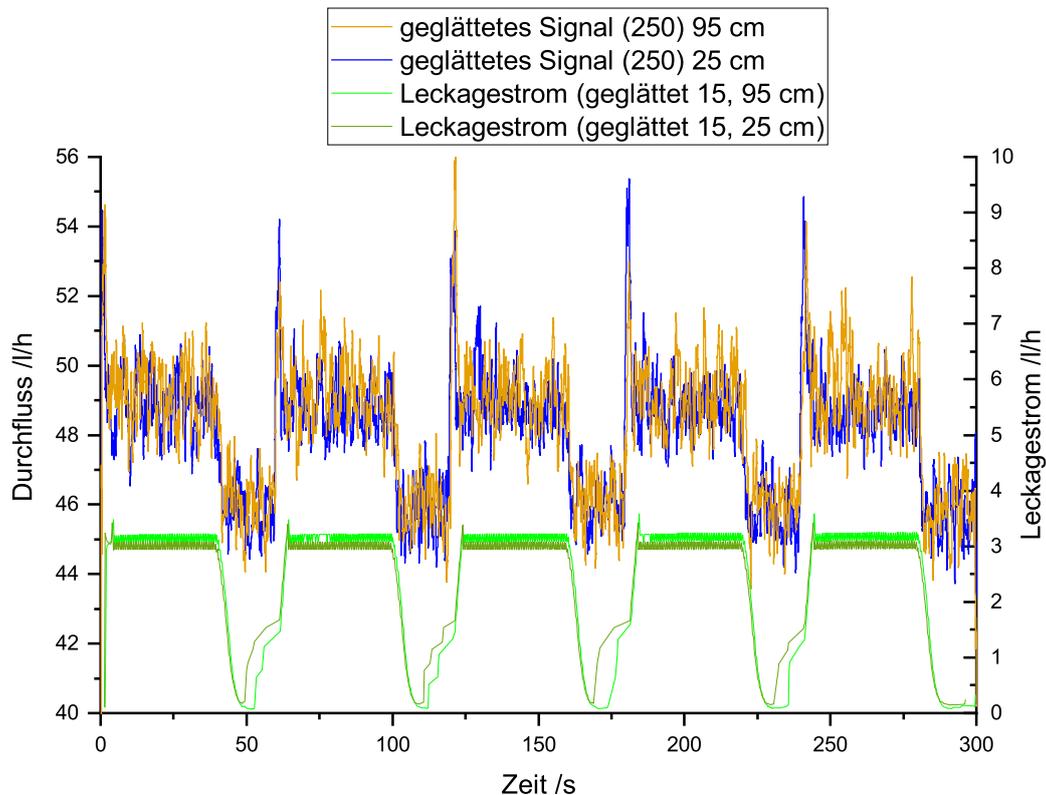


Abbildung 3.8: Einfluss der Entfernung zwischen Leckage und Coriolis-Durchflussmesser bei einer Leckage an Position B.

Es zeigt sich, dass die Entfernung keinen Einfluss auf die Änderung des Durchflusses aufgrund einer periodischen Leckage hat. Dies war zu erwarten, da die Rohrleitung vollständig mit Wasser gefüllt war und Wasser als nahezu inkompressibles Medium gilt.

Leckage an Position C bei konstantem Durchfluss im Abstand von 30 cm zum Messgerät

In dieser Versuchsreihe ist die Leckage 30 cm vor dem Coriolis-Durchflussmesser bzw. der Turbine verbaut. Dieser Aufbau spiegelt die Situation einer Leckage vor einem Hauswasserzähler wider. Bei maximaler periodischer Leckage lässt sich keine Änderung im Durchfluss erkennen. Um auszuschließen, dass die Änderung im Durchfluss sich erst nach einiger Zeit einstellt, wurde neben den zuvor verwendeten periodischen Leckagen die maximal einstellbare Leckage über 420 s erzeugt. Im Anschluss folgt ein Zeitraum von 300 s, in dem die Leckage geschlossen ist. Die Ergebnisse sind in Abb. 3.9 dargestellt.

Geglättetes Durchflusssignal (gleitender Mittelwert über 250 Messpunkte) des Coriolis-Durchflussmessers bei der kleinsten realisierbaren Leckage an Position B.

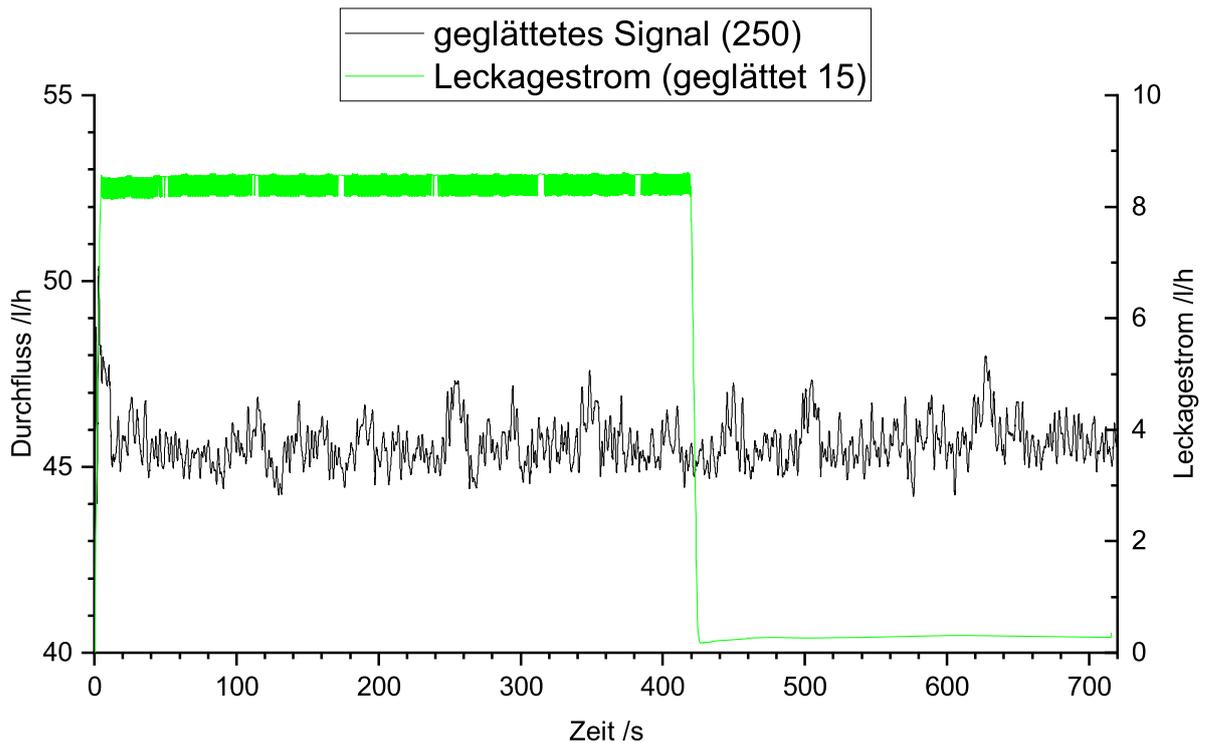


Abbildung 3.9: Geglättetes Durchflusssignal (gleitender Mittelwert über 250 Messpunkte) des Coriolis-Durchflussmessers bei einer Öffnungsdauer der Leckage an Position C von 420 s.

Wie bereits bei den Versuchen mit der periodischen Leckage lässt sich keine Änderung im Durchfluss beim Auftreten einer Leckage vor den Durchflussmessern erkennen. Da bei diesem Versuchsaufbau keine Leckage mittels der Durchflussmesser erkennbar war, wurde dieser Versuchsaufbau ebenfalls nicht für weitere Untersuchungen genutzt.

3.3.2.1 Leckageerkennung bei dynamischem Durchfluss

Da die vorherigen Untersuchungen mit konstantem Durchfluss gezeigt haben, dass eine Leckage an der Stelle B mittels Durchflussmessern nachweisbar ist, wurde für die Untersuchungen mit dynamischen Profilen die Leckage ausschließlich an der Position B erzeugt.

In Abb. 3.10 ist die Differenz des berechneten Durchflusses ohne Leckage zu mit Leckage dargestellt. Es zeigt sich, dass für alle Durchflussstufen des Profils ein um den Leckagestrom erhöhter Durchfluss detektiert wird. Lediglich bei dem Zeitpunkt des Nulldurchflusses ist keine Detektion des Leckagestroms möglich. Eine Ursache hierfür ist, dass der Leckagestrom von 3 l/h zu gering ist, um vom Durchflussmesser erkannt zu werden.

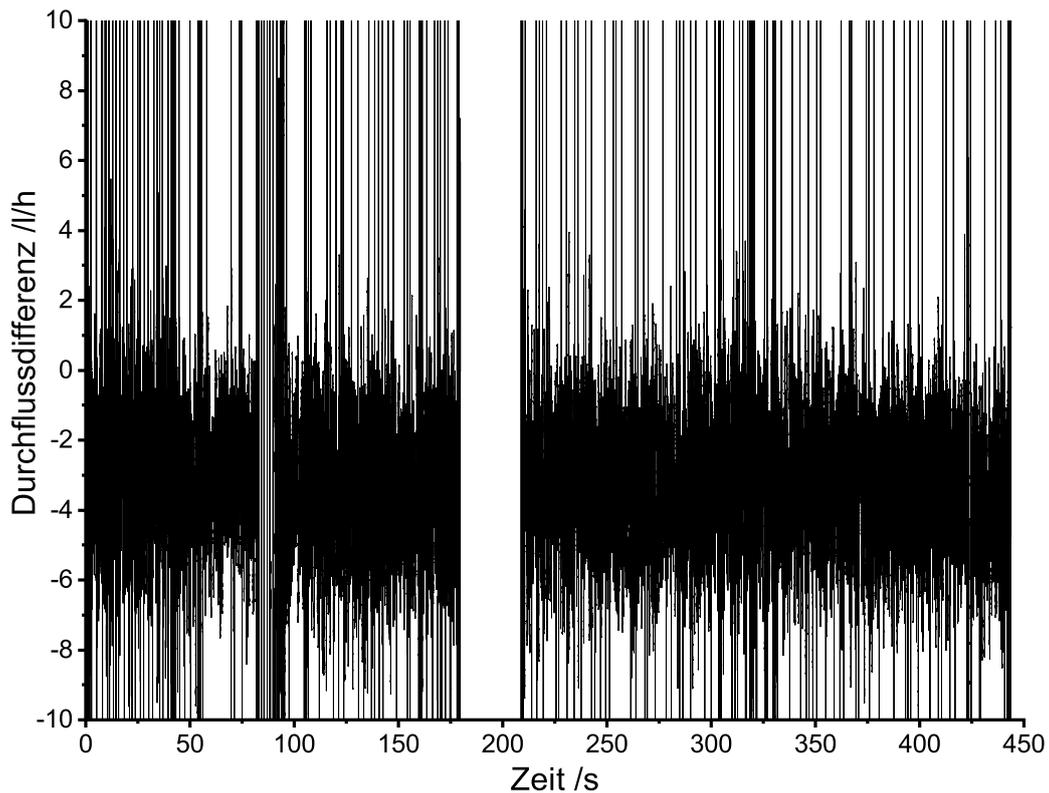


Abbildung 3.10: Differenz zwischen dem Durchflusses des Profils ohne Leckage und dem Profil mit geöffneter Leckage.

3.3.3 Leckageerkennung mittels Hauswasserzählern

3.3.3.1 Leckagen bei konstantem Durchfluss an Position B

Es wurden vier unterschiedliche Wasserzählertypen bei verschiedenen Durchflüssen und Leckageströmen untersucht. Im ersten Schritt wurde beim kleinsten gewählten Durchfluss die größte zu untersuchende Leckage betrachtet. In Abb. 3.11 ist der auf Basis der zählerspezifischen Impulsrate berechnete Durchfluss des Ultraschallzählers, des magnetisch-induktiven Zählers und des Ringkolbenzählers dargestellt. Auf der sekundären y-Achse ist der zeitliche Verlauf des Leckagestroms aufgetragen. Der Flügelradzähler zeigt analoges Verhalten wie der Ringkolbenzähler. Daher wird auf die Darstellung des Flügelradzählers verzichtet.

Anhand des Durchflusssignals des Ultraschallzählers von Hersteller A sind die Zeiträume der Leckage nicht erkennbar. Wie exemplarisch in Abb. 3.11a) dargestelltem Fall des kleinsten untersuchten Durchflusspunkts, lassen sich auch bei den anderen gewählten Durchflusspunkten keine Zeiträume mit geöffneter Leckage am Durchflussverlauf des Ultraschallzählers ausmachen. Das Messsignal des Ultraschallzählers weist ein sehr geringes Rauschen auf. Zudem kommt es in regelmäßigen Abständen zu einem kurzzeitigen Einbruch des Durchflusses, der jedoch nicht mit der erzeugten

Leckage zusammenhängt. Es wird davon ausgegangen, dass das ausgegebene Signal bereits zählerintern geglättet bzw. gefiltert wurde. Da die zählerinternen Berechnungen nicht zugänglich sind, können keine weiteren Aussagen über das Messsignal des Zählers getroffen werden.

Im Gegensatz zum Ultraschallzähler weist das Messsignal der anderen beiden Zählertypen ein Messrauschen auf. Dieses liegt im dargestellten Fall im Bereich mehrerer Liter. Die Zeiträume der Leckage sind jedoch im zeitlichen Verlauf des Durchflusses vom magnetisch-induktiven Zähler als auch vom Ringkolbenzähler klar erkennbar.

Bei einem Durchfluss von 230 l/h ist mittels des magnetisch-induktiven Zählers, des Ringkolbenzählers und des Flügelradzählers der Zeitraum der geöffneten Leckage erkennbar. Auffällig ist, dass das Messrauschen im Vergleich zum zuvor betrachteten Durchfluss deutlich zunimmt, so dass der Zeitraum der Leckage nur noch anhand des mittels des gleitenden Durchschnitts geglätteten Signals möglich ist. Bei einem bei Düsenkombination 32 (1150 l/h) und 17 (1400 l/h) vorliegendem Durchfluss ist jedoch kein Zeitraum mit geöffneter Leckage von 3 l/h erkennbar. Auch durch eine Bildung des gleitenden Durchschnitts des Durchflusses konnte der Zeitraum einer Leckage nicht nachgewiesen werden.

Da Leckagen von 3 l/h für Durchflüsse kleiner als 230 l/h nachweisbar waren, wurde für die Düsenkombinationen 61 und 60 kleinere Leckageströme von 1,5 l/h untersucht. Es zeigt sich, dass wie in Abb. 3.14 bei einem Grunddurchfluss von ca. 50 l/h die Zeiträume mit geöffneter Leckage anhand des Durchflussverlaufs erkennen lassen. Bei einem Durchfluss von mehr als 230 l/h sind die Zeiträume nicht mehr erkennbar.

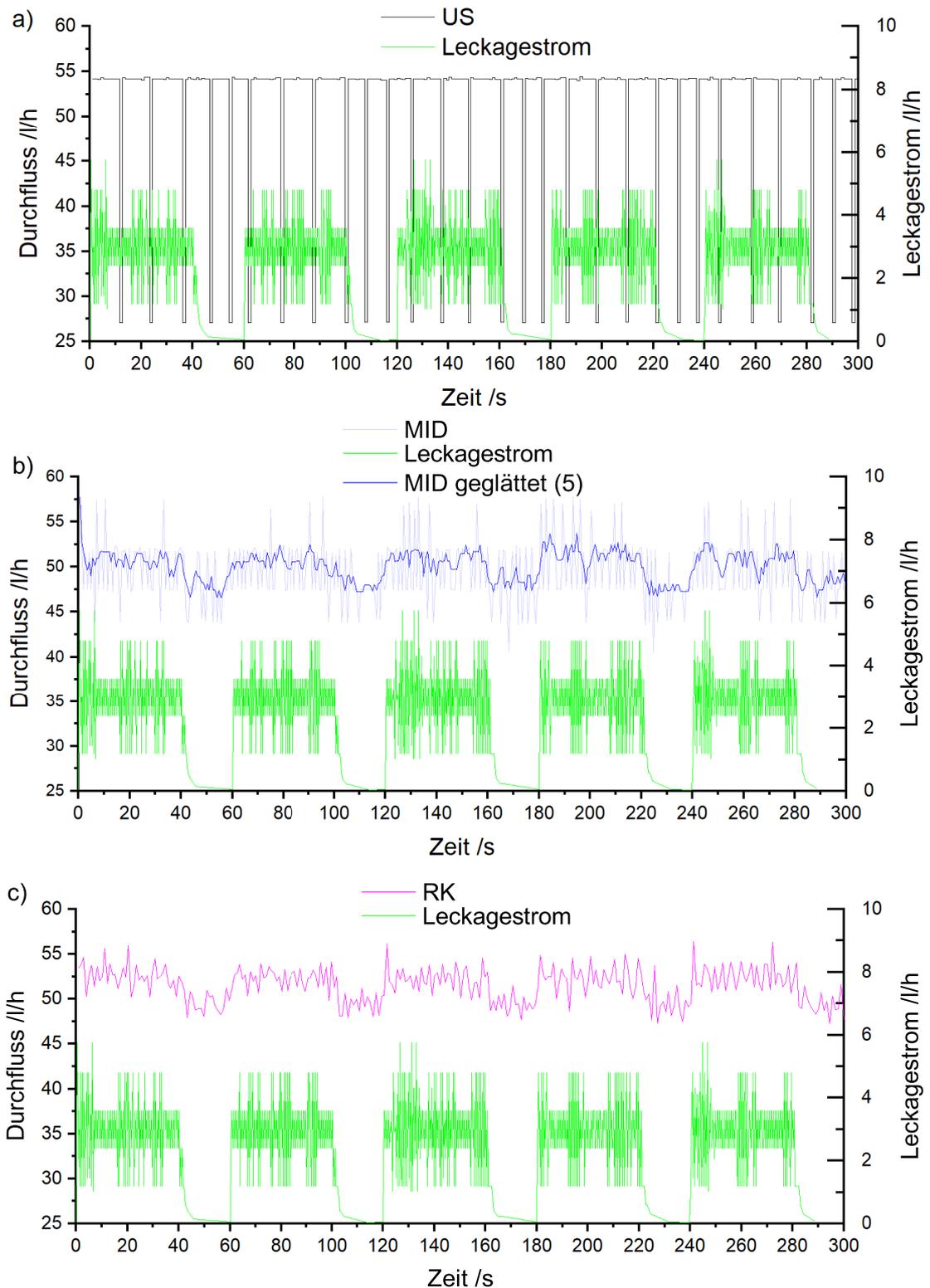


Abbildung 3.11: Messsignal des a) Ultraschall-Zählers von Hersteller A b) magnetisch-induktiven Zählers von Hersteller C und c) Ringkolbenzählers von Hersteller D bei Düsenkombination 61 und einer periodischen Leckage von 3 l/h.

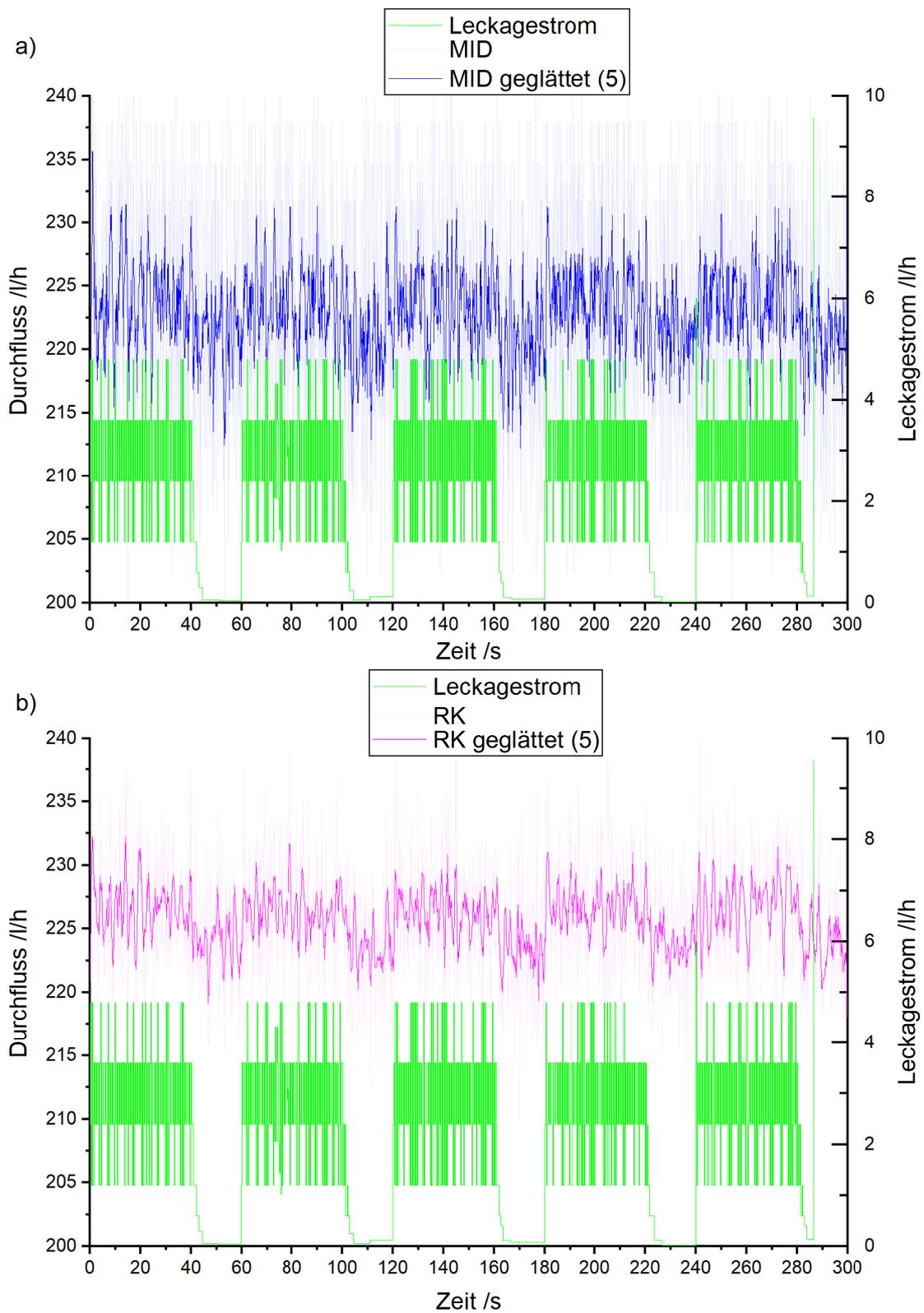


Abbildung 3.12: Messsignal des a) magnetisch-induktiven Zählers von Hersteller C und b) Ringkolbenzählers von Hersteller D bei Düsenkombination 60 und einer periodischen Leckage von 3 l/h.

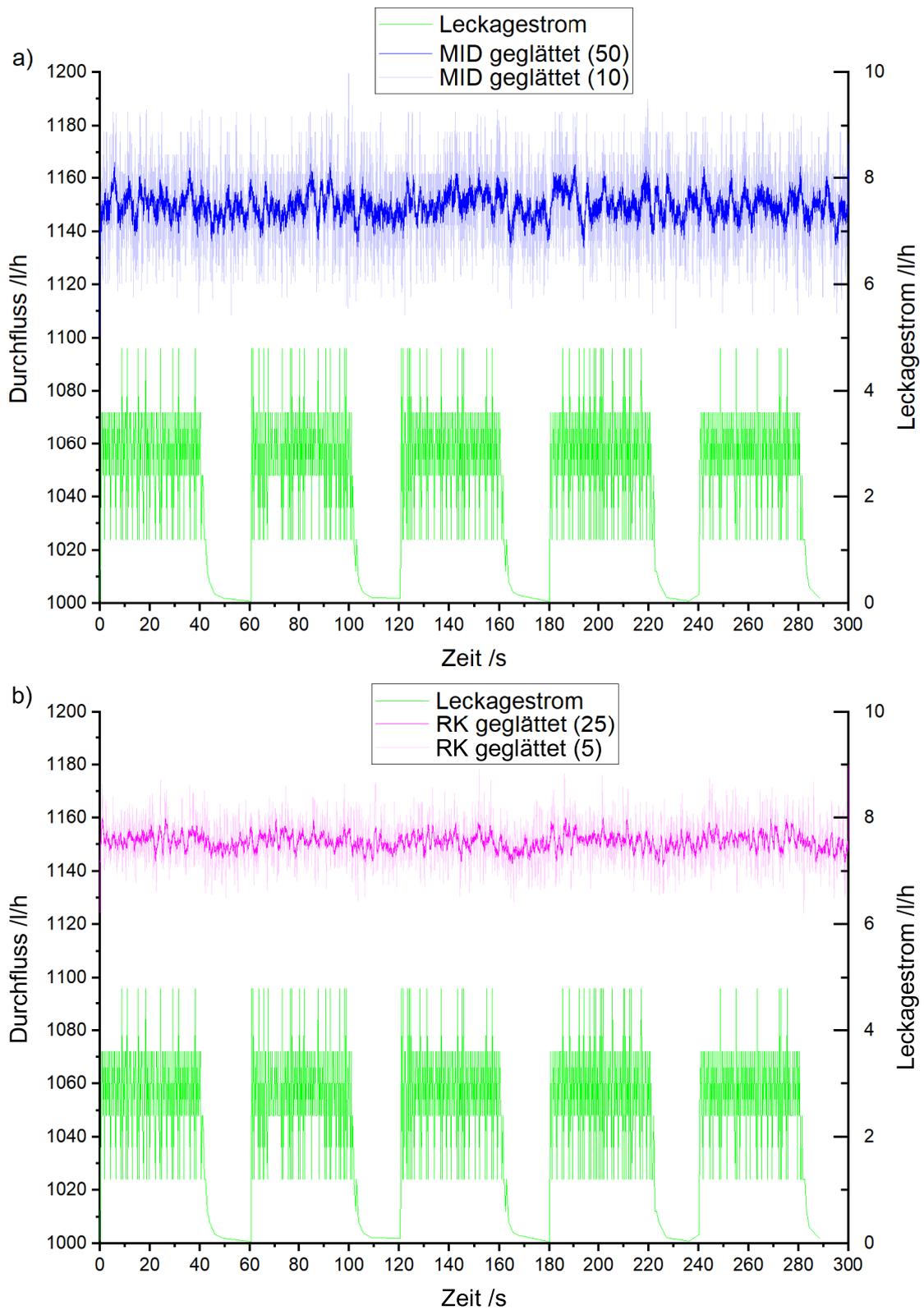


Abbildung 3.13: Messsignal des a) magnetisch-induktiven Zählers von Hersteller C und b) Ringkolbenzählers von Hersteller D bei Düsenkombination 32 und einer periodischen Leckage von 3 l/h.

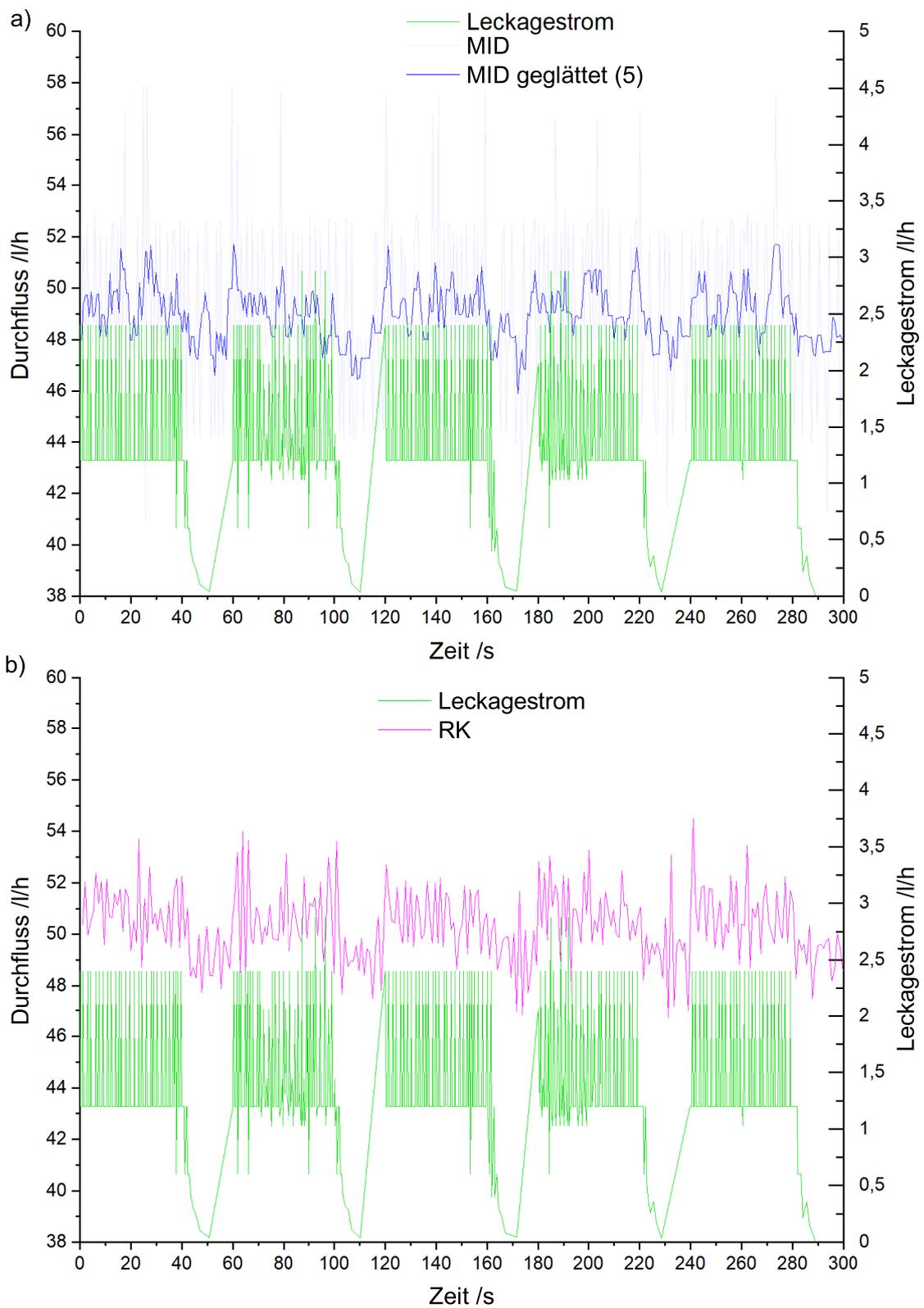


Abbildung 3.14: Messsignal des a) magnetisch-induktiven Zählers von Hersteller C und b) Ringkolbenzählers von Hersteller D bei Düsenkombination 61 und einer periodischen Leckage von 1,5 l/h.

3.3.3.2 Erkennung von Leckagen bei dynamischem Durchfluss

Analog zu den Untersuchungen von dynamischen Durchflussprofilen mit einem Coriolis-Durchflussmesser wurden Untersuchungen mit Wasserzählern durchgeführt. Hierbei wurden die gleichen Wasserzähler wie zuvor verwendet und ein Leckagestrom von 3 l/h betrachtet. Das jeweilige Messsignal des Wasserzählers ist in Abb. 3.15 dargestellt.

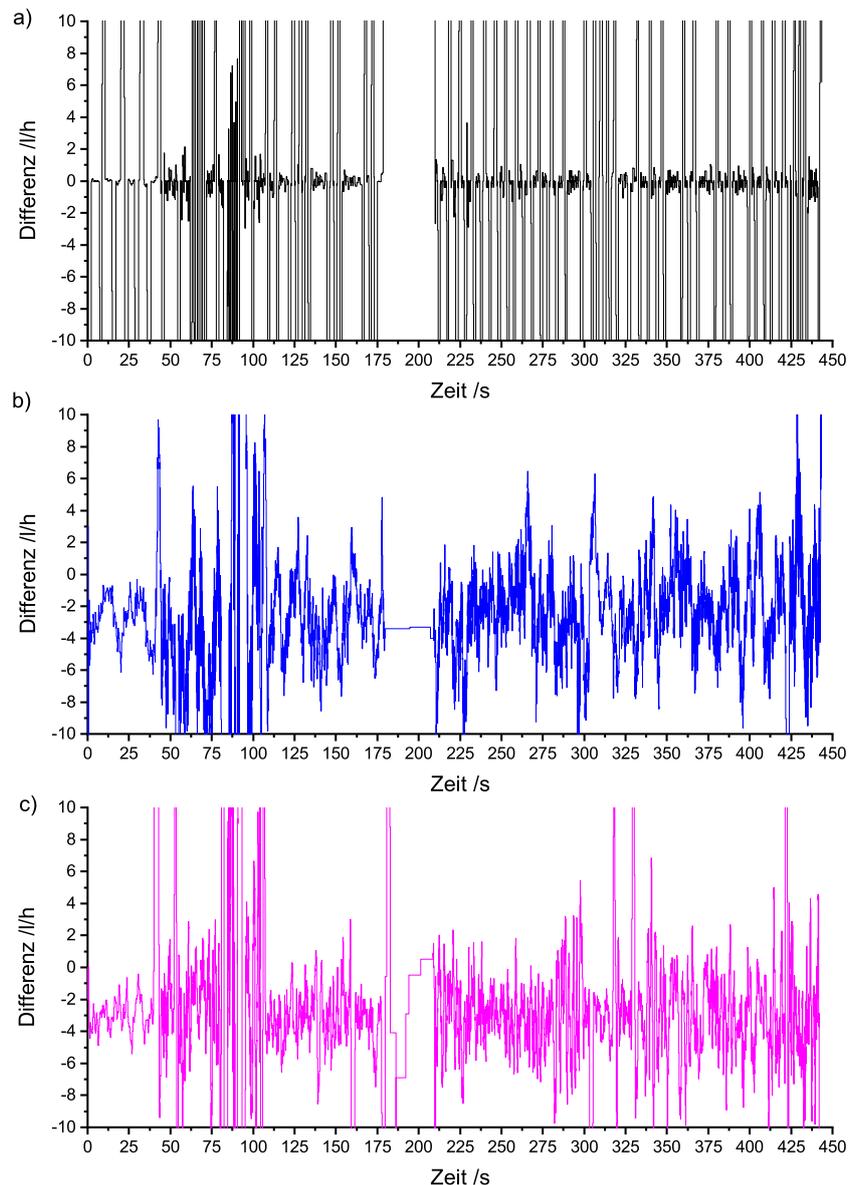


Abbildung 3.15: Geglättete Differenz des Durchflusses von Messung mit einer Leckage von 3 l/h zur Messung ohne Leckage des a) Ultraschallzählers (gleitendes Mittel über 5 Werte) b) magnetisch-induktiver Zähler (gleitendes Mittel über 50 Werte) c) Ringkolbenzähler (gleitendes Mittel über 20 Werte).

Dabei zeigt sich, dass mithilfe des Ultraschallzählers und des Vergleichs der Durchflussprofile ohne Leckage und mit Leckage aufgrund des Rauschens im Messsignal kei-

ne Leckage eindeutig detektiert werden kann. Aus den analog gebildeten Differenzen des magnetisch-induktiven Zählers und des Ringkolbenzählers wird eindeutig ersichtlich, dass eine Leckage aufgetreten ist. Wie bereits beim Coriolis-Durchflussmesser ist der Zeitraum des Nulldurchflusses nicht für die Erkennung einer Leckage geeignet. Die beim magnetisch-induktiven Zähler und Ringkolbenzähler dargestellte Differenz während des Nulldurchflusses zwischen 180 s und 210 s in Abb. 3.15b) und c) resultiert aus der jeweiligen Mittelwertbildung.

3.3.4 Zusammenfassung Leckageerkennung mittels Hauswasserzählern

Im Rahmen dieser Arbeit wurde über den Impulsausgang von Hauswasserzählern bzw. der optischen Abtastung des Anlaufsterns der Durchfluss des Zählers zeitgenau erfasst. Anhand des so erlangten Messsignals wurde überprüft, ob Leckagen anhand des Signals erkennbar sind. Zu diesem Zweck wurde eine Infrastruktur entwickelt, bei der zunächst untersucht wurde, welche Leckagen mit den verfügbaren Mitteln reproduzierbar erzeugt werden können. Dabei zeigte sich, dass es möglich ist, mit dem Aufbau sowohl konstante als auch periodische Leckagen zu erzeugen. Sowohl bei konstanten Durchflüssen als auch dynamischen Durchflussprofilen hängt die Größe der erzeugten Leckage vom Druck in der Messleitung und nicht vom vorherrschenden Durchfluss ab.

Im Rahmen einer weiterführenden Untersuchung wurde analysiert, inwiefern Veränderungen im Durchfluss, die durch Leckagen verursacht werden, mittels Durchflussmessern detektiert werden können. Ziel der Untersuchung war die Evaluierung des Potenzials von Hauswasserzählern zur Erkennung solcher Leckagen sowie die Prüfung der Zuverlässigkeit der Erkennung von Leckagen, unabhängig von ihrer Position relativ zum Zähler (vor oder nach dem Zähler) und ihrer Distanz zum Zähler.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigten, dass der Ort der Leckage einen erheblichen Einfluss darauf hat, ob die Leckage überhaupt durch Durchflussmesser detektiert werden kann. Befindet sich die Leckage hinter der Kavitationsdüsenapparatur, ist eine Detektion vermutlich aufgrund der durch die Kavitationsdüsenapparatur verursachten Dämpfungseffekte nicht möglich. Tritt die Leckage vor dem Durchflussmesser auf, lassen sich aus den gemessenen Durchflusswerten keine Rückschlüsse auf das Vorhandensein einer Leckage ziehen. Eine Detektion ist jedoch möglich, sofern sich die Leckage zwischen dem Durchflussmesser und der Kavitationsdüsenapparatur befindet. Die Größe der Leckage spielt eine entscheidende Rolle. Es konnte erwartungsgemäß festgestellt werden, dass sich eine Leckage umso leichter im Durchflusssignal des Messgeräts erkennen lässt, je größer sie ist. Im untersuchten Fall einer

Leckage von 0,1 l/h konnte selbst durch einen hochauflösenden Durchflussmesser keine zuverlässige Identifikation vorgenommen werden, da die durch die Leckage verursachte Veränderung des Durchflusses im Messrauschen unterging.

Weiterhin zeigte sich, dass Leckagen sowohl bei statischen als auch bei dynamischen Durchflussbedingungen erkannt werden können. Allerdings ist es bei dynamischen Durchflussprofilen nicht möglich, Leckagen während Phasen des Nulldurchflusses zu detektieren. Die untere Detektionsgrenze des Zählers ist daher von zentraler Bedeutung für die Leckageerkennung. Je niedriger diese Grenze, desto wahrscheinlicher ist es, dass Leckagen erkannt werden können.

Neben den Durchflussmessern wurden auch auf dem Markt erhältliche Hauswasserzähler untersucht, um die Forschungsfrage zu klären: Welche Größenordnungen und Arten von Leckagen können prinzipiell mit Wasserzählern erfasst werden?

Da sich in den vorhergehenden Untersuchungen mit Durchflussmessern zeigte, dass Leckagen ausschließlich an Position B (zwischen dem Durchflussmesser und der Kavitationsdüsenapparatur) nachweisbar waren, wurden die Untersuchungen mit Hauswasserzählern ebenfalls auf Leckagen an dieser Position beschränkt. Zudem stellte sich heraus, dass Leckagen mit einer Durchflussrate von weniger als 1,5 l/h von den Durchflussmessern nicht detektiert werden konnten. Daher konzentrierten sich die Experimente mit Hauswasserzählern auf Leckageströme von 1,5 l/h und höher.

Die Experimente ergaben, dass unabhängig vom verwendeten Durchfluss beim magnetisch-induktiven Wasserzähler und dem Ringkolbenzähler ein Messrauschen im Bereich von mehreren Litern pro Stunde vorliegt. Im Gegensatz dazu zeigt das Signal des Ultraschallzählers nahezu kein Rauschen.

Bei konstanten Durchflüssen stellte sich heraus, dass Leckagen im Durchflusssignal des untersuchten Ultraschallzählers nicht erkennbar sind. Dagegen ist eine Leckageerkennung bei konstantem Grunddurchfluss mittels des magnetisch-induktiven Zählers, des Ringkolbenzählers und des Flügelradzählers möglich. Durch die Bildung des gleitenden Durchschnitts lassen sich im Rohsignal dieser Zähler Zeiträume der geöffneten und geschlossenen Leckage eindeutig identifizieren. Dies ist jedoch nur bei Leckageströmen größer als 1,5 l/h und einem Grunddurchfluss kleiner als 230 l/h möglich. Bei höheren Durchflüssen von 1150 l/h und 1400 l/h sind keine Leckagezeiträume im Durchflusssignal erkennbar. Es ist denkbar, dass Leckagen auch bei höheren Durchflüssen mithilfe komplexer Algorithmen erkannt werden könnten, jedoch erfordert dies eine aufwendige Signalfilterung. Aufgrund der einfachen Bauweise von Wasserzählern und der Notwendigkeit, die Rechenleistung und den Energieverbrauch (Belastung der Batterie) gering zu halten, ist es unwahrscheinlich, dass solche komplexen Berechnungen in Wasserzählern implementiert werden.

Bei den dynamischen Messungen mit dem Profil 1 aus dem MetroWaMet-Projekt zeigte sich erneut, dass der Ultraschallzähler keine Leckage anhand des Messsignals des Impulsausgangs detektieren konnte. Im Gegensatz dazu ließ sich bei den anderen Zählern durch die Bildung der Differenz zwischen den Messungen ohne und mit Leckage ein klarer Unterschied feststellen, vorausgesetzt, es lag ein Durchfluss vor. In Zeiträumen des Nulldurchflusses traten hingegen keine Differenzen zwischen den gemessenen Profilen auf. Dies liegt vermutlich daran, dass die Leckage mit einer Durchflussrate von 3 l/h zu klein ist, um von den Zählern erkannt zu werden.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass die Signalqualität des Wasserzählers einen erheblichen Einfluss auf die Möglichkeit der Leckageerkennung hat. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass in den Untersuchungen unter anderem der Impulsausgang der Zähler verwendet wurde. Das für die Leckageerkennung relevante Messsignal kann sich dabei erheblich vom Signal des Impulsausgangs unterscheiden. Dies impliziert, dass, obwohl bei den durchgeführten Messungen mit dem Ultraschallzähler keine Leckagen nachgewiesen werden konnten, der Zähler selbst potenziell über eine funktionale Leckageerkennung verfügt, sofern ein anderes, intern generiertes Signal zur Analyse herangezogen wird. So könnte beispielsweise die Auswertung der induzierten Spannung beim magnetisch-induktiven Zähler oder die Analyse der Laufzeitverschiebung beim Ultraschallzähler zur Detektion von Leckagen herangezogen werden. Zudem zeigen die Ergebnisse, dass somit ein Nachweis der Leckagefunktion nicht zwingend mit dem Zählersignal erfolgen kann und somit eine Überprüfung am Prüfstand nicht immer möglich ist.

3.4 Kriterien zur Erkennung von Leckagen mittels Hauswasserzählern

Basierend auf den zuvor gewonnenen Erkenntnissen wurden spezifische Voraussetzungen formuliert, die erfüllt sein müssen, um eine zuverlässige Erkennung von Leckagen mithilfe von Hauswasserzählern zu ermöglichen. Diese Voraussetzungen berücksichtigen die Signalqualität, die Position der Leckage relativ zum Zähler, die Größe der Leckage sowie die Beschaffenheit des Durchflusses (statisch oder dynamisch).

3.4.1 Voraussetzungen an die Leckage und den Durchfluss

Für die Detektion von Leckagen spielen sowohl die Eigenschaften des Durchflusses als auch die des Leckagestroms eine entscheidende Rolle. Es hat sich gezeigt, dass eine Leckageerkennung bei allen untersuchten Zählern nur dann möglich ist, wenn ein Durchfluss vorhanden ist. Bei Nulldurchflüssen, wie beispielsweise im Profil 1 zwischen 179 s und 209 s, konnten keine Unterschiede im Durchflusssignal der Zähler festgestellt werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Sensitivität der verwendeten Zähler nicht ausreicht, um den Leckagestrom als alleinigen Durchfluss zu erkennen. Daher führt die Differenzbildung zwischen dem Profil ohne Leckage und dem Profil mit Leckage in diesem Zeitraum zu keinem validen Ergebnis. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass bei Leckagen, die größer als die untere Durchflussgrenze des Zählers sind, auch bei Nulldurchflüssen eine Erkennung möglich wäre.

Um Rückschlüsse auf das Vorhandensein einer Leckage ziehen zu können, muss entweder der Durchfluss ohne Leckage bekannt sein oder eine Änderung der Leckagerate bei konstantem Durchfluss auftreten. Ein konstanter Durchfluss bei sich ändernder Leckagerate ist in der Praxis jedoch sehr unwahrscheinlich. Daher ist es für die Leckageerkennung umso wichtiger, das typische Verbrauchsverhalten zu kennen.

Ein weiterer entscheidender Faktor ist der Ort der Leckage. Um Leckagen anhand des Durchflusssignals zuverlässig zu detektieren, ist es erforderlich, dass die Leckage nach dem Messgerät auftritt. Dies wurde durch die Versuchsreihen mit Leckagen an verschiedenen Positionen bestätigt. Bei einer Leckage vor dem Messgerät war keine Detektion möglich, während Leckagen an Position B erkannt werden konnten. Es ist außerdem wichtig, dass Einbauten zwischen Zähler und Leckage keine Dämpfungseffekte verursachen, da sonst, wie im Fall der Leckage nach der Kavitationsdüsenapparatur, keine Leckageerkennung anhand des Durchflusssignals möglich ist.

3.4.2 Voraussetzungen an den Zähler

Im regulären Betrieb eines Wasserzählers wird kein Impulssignal genutzt, wodurch keine zeitlich präzise Durchflussmessung erfolgt. Stattdessen werden lediglich die Volumenstände in festgelegten Intervallen gespeichert. Für die Detektion von Leckagen ist es jedoch zwingend erforderlich, dass die eingesetzten Messgeräte den aktuellen Volumenstand bzw. die Durchflussgeschwindigkeit mit einem Zeitstempel versehen. Nur durch diese zeitlich genaue Zuordnung ist es möglich, die erhobenen Daten zu vergleichen und somit Leckagen zu identifizieren. Dabei sind sowohl der Wochentag

als auch die Uhrzeit von Bedeutung, da diese Faktoren maßgeblich die durchschnittlichen Verbrauchsmuster beeinflussen, die als Referenz für die Beurteilung dienen, ob eine Leckage vorliegt.

In den durchgeführten Untersuchungen wurden Volumenströme betrachtet, wobei sich zeigte, dass die Änderung des Volumenstroms in etwa der Größenordnung der Leckage entspricht. Dies bedeutet, dass bei sehr kleinen Leckagen nur geringe Änderungen zu erwarten sind. Um diese kleinen Leckagen dennoch erkennen zu können, ist eine hohe Auflösung oder ein längerer Beobachtungszeitraum notwendig, der vom Zähler erfasst werden muss.

Zudem muss bei periodischen Leckagen, wie etwa einem tropfenden Wasserhahn, sichergestellt werden, dass die Abtastung oder Messwerverfassung nicht immer an der gleichen Stelle des zeitlichen Verlaufs der Leckage erfolgt. Dies kann durch Einhaltung des Nyquist-Abtasttheorems gewährleistet werden. Das Nyquist-Kriterium besagt, dass die Abtastfrequenz mindestens das Doppelte der Signalfrequenz betragen muss. Dadurch wird sichergestellt, dass auch periodische Leckagen zuverlässig erkannt werden können.

4 Auswirkungen von diskreten Messungen auf das mittels Hauswasserzählern erfasste Volumen

4.1 Veranlassung und Zielsetzung

Wie im Kapitel 2.1 beschrieben, wird u. a. bei Ultraschall-Wasserzählern anhand von Teilvolumina das gesamte durch den Zähler geflossene Volumen bestimmt. Die Messung der Strömungsgeschwindigkeit und damit die Berechnung des Volumens erfolgt nicht kontinuierlich, sondern in einem vom Hersteller festgelegten Abtastintervall. Zwischen den einzelnen Messpunkten wird der Durchfluss, der für die Berechnung des Gesamtvolumens benötigt wird, interpoliert. Bisher liegen weder Vorgaben noch Empfehlungen oder Veröffentlichungen vor, die festlegen, welche Art der Interpolation verwendet werden soll oder tatsächlich zur Anwendung kommt. Je nach Hersteller ist es möglich, dass unterschiedliche Interpolationsmethoden Anwendung finden und sich die Abtastintervalle je nach Hersteller stark unterscheiden. Es wird von allen Herstellern angestrebt, dass die Messung so selten wie möglich, jedoch so häufig wie nötig, erfolgt, da jede Messung und Berechnung mit einem Energieaufwand verbunden ist. Hierdurch wird sichergestellt, dass die Batterie des Zählers möglichst wenig belastet wird und der Energiebedarf des Zählers über die gesamte Lebensdauer des Zählers sichergestellt ist.

Im Rahmen der Sitzung der WELMEC WG13 „Water and Heat Meters“ im Juni 2021 wurde berichtet, dass in Europa zurzeit Zähler mit Abtastintervallen zwischen 0,1 s und 60 s eingesetzt werden (VAN DER WIEL ET AL., 2021). Bei den in Abschnitt 2.3 beschriebenen Prüfverfahren zur Bestimmung der Fehlergrenze hat das Abtastintervall und die Art der Interpolation keine Auswirkungen, da die Messabweichung bei konstanten Durchflüssen bestimmt wird. Wie sich allerdings das Abtastintervall auf die Messrichtigkeit von diskret messenden Zählern unter rea-

len Bedingungen auswirkt, ist bisher noch unklar. Bislang existieren keine Studien, in denen die Auswirkung des Abtastintervalls auf das erfasste Volumen und somit die Messrichtigkeit des Zählers betrachtet wird. Es liegen lediglich kleinere Studien vor, welche die Auswirkung der Abtastrate aufgreifen. So zeigt ARREGUI ET AL. (2020), dass bei elektronischen Wasserzählern das Abtastintervall eine Auswirkung auf das vom Zähler erfasste Volumen hat. Jedoch betrachtet er in seiner Studie nur kurze zyklische Wasserentnahmen, die keinen realen Verbrauch widerspiegeln. Zudem verwendet er in seiner Studie lediglich die Volumenanzeige des Zählers. Da in den Untersuchungen die elektronischen Wasserzähler nicht im Testmodus verwendet wurden, beträgt die Auflösung der Anzeige lediglich 1 l. Dies und die nicht realen Wasserentnahmen sind Fehlerquellen, deren Größenordnung nicht abgeschätzt werden kann. Somit sind auch keine fundierten Aussagen über die Auswirkung des Abtastintervalls möglich.

Eine theoretische Betrachtung wurde von HOLMES-HIGGIN (2019) durchgeführt. In der Studie wird das Beispiel eines Füllzyklus einer Waschmaschine betrachtet. Der von HOLMES-HIGGIN (2019) genutzte Füllzyklus ist in Abb. 4.1 dargestellt. Der Füllzyklus hat eine Gesamtdauer von 68 s. Der Wasserverbrauch eines Zyklus der Waschmaschine beträgt 3,35 l. In der Studie wurde untersucht, welchen Einfluss ein Abtastintervall von 4 s auf das von einem idealen Zähler erfasste Volumen hat. Neben dem originalen Profil wird die Auswirkung eines verschobenen Starts der Abtastung um 1 s, 2 s und 3 s untersucht. Die Betrachtung der Verschiebung des Startzeitpunkts spiegelt die in der Realität auftretenden Fälle wider. Die Messung des Zählers wird zwar im Allgemeinen in regelmäßigen Abständen durchgeführt, jedoch muss der Start des Verbrauchs nicht kongruent mit einer Bestimmung des Verbrauchs durch den Zähler sein. Da der erste Wasserverbrauch erst nach 3 s einsetzt, bleibt das insgesamt verbrauchte Volumen bei den betrachteten Verschiebungen gleich. In der Studie zeigt sich, dass abhängig vom Startzeitpunkt verschiedene Volumen vom Zähler erfasst werden. Je nach Startzeitpunkt beträgt das theoretisch erfasste Volumen zwischen 2,3 l und 4,2 l. Dies entspricht einer Abweichung zum tatsächlichen Verbrauch von -31,34 % bis hin zu +25,37 %. Diese Abweichung tritt zusätzlich zu den allgemeinen Messabweichungen des Zählers auf. In den normativen Vorgaben wird diese zusätzliche Abweichung nicht betrachtet.

Ein weiterer Faktor neben dem Start der Abtastung ist die Länge des Betrachtungszeitraums. Die Auswirkungen des Betrachtungszeitraums wurden von EFF (2021) untersucht. In der Studie wurden unter anderem drei Prüfprofile verwendet, die im Rahmen des MetroWaMet-Projekts entwickelt wurden. Die Profile sind in Abschnitt 2.3.2 in Abb. 2.6 dargestellt. Es wurden Abtastintervalle zwischen 2 s und 16 s betrachtet. Diese Abtastintervalle haben eine relative Messabweichung bei einem einzelnen Profil von bis zu -6 % zur Folge. Durch mehrmaliges Aneinanderreihen

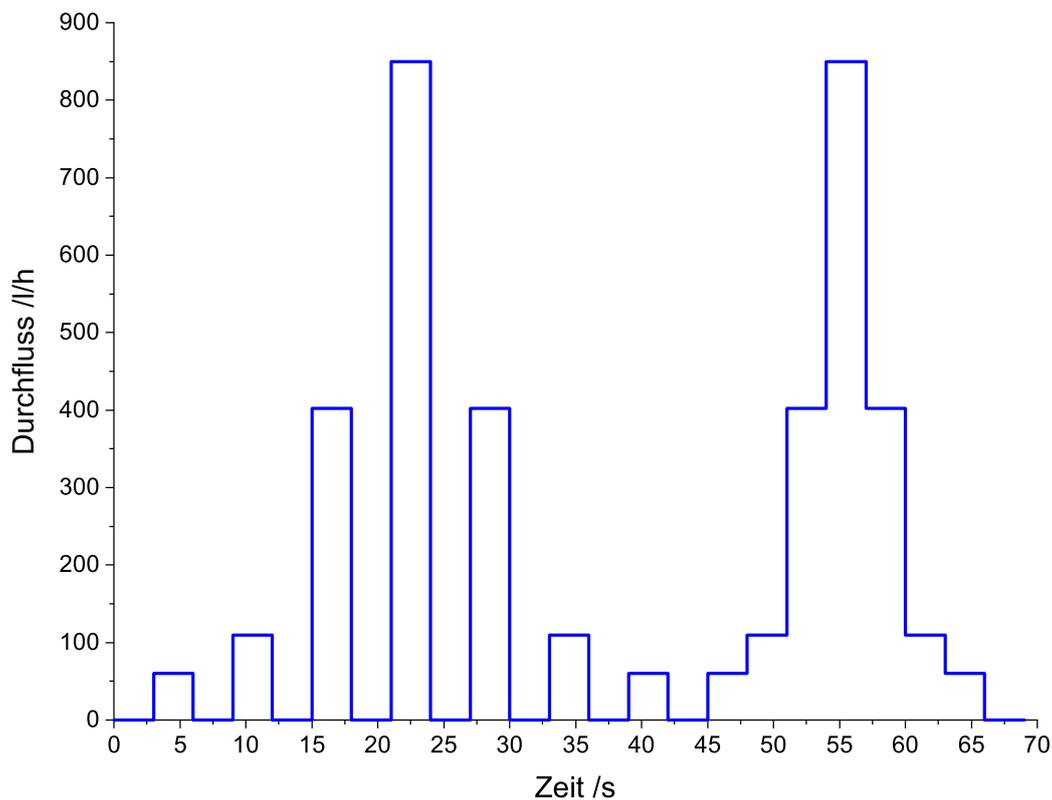


Abbildung 4.1: Beispiel für einen Füllzyklus einer Waschmaschine (HOLMES-HIGGIN, 2019).

des gleichen Profils zeigt EFF (2021), dass der Einfluss von Ausgleichseffekten größer wird, je öfter das Profil wiederholt wird. Nach ca. 100 Wiederholungen treten ausschließlich Messabweichungen kleiner als 0,5 % auf.

Diese beiden Studien sind ein guter Startpunkt für weitere Untersuchungen, da gezeigt wurde, dass der Start der Abtastung und die Dauer des Abtastintervalls einen wesentlichen Einfluss auf das erfasste Volumen haben. Für fundierte Aussagen über die tatsächlichen Auswirkungen des Abtastintervalls auf das erfasste Volumen von diskret messenden Zählern sind jedoch weitere Studien mit realen Verbrauchsdaten notwendig, da HOLMES-HIGGIN (2019) lediglich einen sehr kurzen Zeitraum betrachtet und der Füllzyklus einer Waschmaschine nicht den Gesamtverbrauch eines Haushalts abbildet. Die von EFF (2021) verwendeten Verbrauchsprofile basieren zwar auf gemessenen Daten, allerdings sind die Profile maximal 750 s lang und können somit lediglich für einen ersten Trend genutzt werden. Eine Aussage über die Auswirkung auf die Messrichtigkeit eines Zählers während beispielsweise eines einjährigen Abrechnungszeitraums unter realen Bedingungen ist nicht möglich. Um hierzu fundiertere Aussagen treffen zu können, werden nachfolgend Betrachtungen mit verschiedenen Datensätzen durchgeführt.

Hierbei werden im Wesentlichen drei Kernfragen näher beleuchtet:

1. Inwiefern beeinflusst die Art der Interpolation die durch die Abtastung entstehende Messabweichung?
2. Welchen Einfluss hat die Dauer des Betrachtungszeitraums auf die Messabweichung?
3. Welche Auswirkung hat der Beginn der Abtastung auf die Messabweichung?

Für die Klärung dieser drei Forschungsfragen wurden Untersuchungen unter Verwendung der nachfolgend näher erläuterten Materialien und Methoden durchgeführt. Unter der Berücksichtigung der Ergebnisse der Untersuchung zu den einzelnen Forschungsfragen findet zudem eine stochastische Auswertung der resultierenden Messabweichung statt. Zusätzlich zu den theoretischen Betrachtungen wurden handelsübliche elektronische Hauswasserzähler experimentell untersucht. Die dabei zu klärende Forschungsfrage ist:

- Ist der Einfluss des Abtastintervall bei am Markt erhältlichen Zählern nachweisbar?

Teile der Ergebnisse der theoretischen Betrachtungen zur Auswirkung des Abtastintervalls auf die Messabweichung sind in BORCHLING ET AL. (2022) veröffentlicht. Die Ergebnisse dieser Arbeit wurden als Diskussionsgrundlage genutzt, um einschlägige normative Dokumente zukünftig um Vorgaben für das Abtastintervall zu ergänzen.

4.2 Material und Methoden

Für die Untersuchungen zum Einfluss von diskreten Messungen auf die Messrichtigkeit von Hauswasserzählern wurden die Einflussfaktoren Interpolationsmethode, Betrachtungszeitraum und Start der Abtastung identifiziert. Diese Einflussfaktoren wurden mittels der nachfolgend dargestellten Materialien und Methoden untersucht. Zusätzlich fand eine erste experimentelle Überprüfung von elektronischen Wasserzählern unter realitätsnahen Bedingungen statt.

4.2.1 Material für die theoretischen Betrachtungen

Das Ziel der Arbeit ist, die Auswirkung des Abtastintervalls unter realen Bedingungen zu untersuchen. Somit sind möglichst realitätsnahe Verbrauchsprofile notwendig, um fundierte Aussagen über die Auswirkungen des Abtastintervalls auf die Messrichtigkeit von diskret messenden Wasserzählern treffen zu können. Für die Untersuchungen wurden zwei Arten von Datensätzen verwendet: Zum einen Verbrauchsprofile basierend auf Messungen in Deutschland und zum anderen stochastische Verbrauchsprofile, die mittels eines Algorithmus aus den gemessenen Verbrauchsprofilen abgeleitet wurden.

4.2.1.1 Verbrauchsprofile basierend auf Messungen in Deutschland

Dieser Datensatz besteht aus gemessenen Verbrauchsdaten, welche zwischen 2014 und 2016 im Rahmen einer DVGW-Studie (MARTIN ET AL., 2017) in Deutschland erfasst wurden. Für diese DVGW-Studie wurden die Wasserverbräuche in zwölf ausgewählten deutschen Städten über einen Zeitraum von zwei Jahren gemessen. In diesem Zeitraum wurde der Wasserverbrauch von insgesamt 211 Objekten des privaten und öffentlichen Wasserverbrauchs ermittelt. Aus den 211 betrachteten Objekten wurden für die hier durchgeführten Betrachtungen insgesamt 31 Verbrauchsverläufe von Einfamilienhäusern sowie 27 Mehrfamilienhäusern genutzt. Die in der Studie gemessenen Verbrauchsprofile decken einen Zeitraum von 23 Tagen bis hin zu 84 Tagen ab. Die Daten der Einfamilienhäuser wurden mit einem Ultraschall-Wasserzähler ($Q_3 = 4000 \text{ l/h R160}$) mit einer Frequenz von 1 Hz aufgezeichnet. Für die Mehrfamilienhäuser wurde aufgrund des höheren Wasserverbrauchs ein Ultraschallzähler mit größerem Messbereich ($Q_3 = 16000 \text{ l/h R160}$) bei gleicher Aufzeichnungsfrequenz verwendet. Das interne Abtastintervall der verwendeten Zähler ist nicht bekannt. Die Aufzeichnung der Daten mit einem Intervall von einer Sekunde hat zur Folge, dass bereits bei diesen Messungen unbekanntes Messabweichungen aufgrund der Abtastung vorhanden sind. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass diese lediglich geringfügig sind. Zudem sind die Fehlerkurven der Zähler nicht bekannt. Für die Betrachtungen in dieser Arbeit wurden daher die gemessenen Daten als realer, fehlerfreier Verbrauch definiert. Keines der Objekte wurde vollständig über ein Jahr betrachtet. Es liegen jedoch Verbrauchsdaten aus unterschiedlichen Einfamilienhäusern für jeden Monat vor. Aus diesen einzelnen Verbrauchsprofilen wurde ein Profil mit einer Dauer von einem Jahr zusammengesetzt. Das Zusammensetzen von Verbrauchsdaten verschiedener Objekte zu einem Profil ist aufgrund der geografisch und saisonal unabhängigen Wasserverbrauchscharakteristika (WARNECKE ET AL., 2022) möglich. Das zusammengesetzte Profil bildet somit näherungsweise

den jährlichen Wasserverbrauch eines Einfamilienhauses in Deutschland ab. Die bei den Untersuchungen erlangten Schlussfolgerungen können auf Nord- und Mitteleuropa übertragen werden, da in diesen Gebieten eine ähnliche Verbrauchscharakteristik vorliegt (WARNECKE, 2024). Für andere Teile der Welt ist dies nicht ohne Weiteres möglich, da sich dort das Verbrauchsverhalten stark unterscheiden kann.

Analog zum Einfamilienhaus wurden Verbrauchsdaten aus verschiedenen Mehrfamilienhäusern zusammengesetzt. Dabei liegen jedoch nur Verbrauchsdaten für insgesamt neun Monate vor. Der Wasserverbrauch im Januar, Februar und Juli wurde in keinem Mehrfamilienhaus gemessen. Daher wurde bei der Betrachtung des Mehrfamilienhauses zunächst ein neunmonatiger Zeitraum zugrundegelegt, bei welchem die betrachteten Monate chronologisch aneinander gereiht wurden. Dieser neunmonatige Zeitraum ist ausreichend, um die Auswirkungen des Abtastintervalls zu untersuchen.

4.2.1.2 Stochastische Profile basierend auf gemessenen Verbrauchsprofilen

Die im vorherigen Teil der Arbeit beschriebenen Verbrauchsdaten dürfen aus datenschutzrechtlichen Gründen nicht veröffentlicht werden. Daher stehen die Daten nur einem sehr stark eingeschränkten Nutzerkreis zur Verfügung. Die gemessenen Daten wurden daher anonymisiert, um eine Datenbasis zu schaffen, die für spätere Untersuchungen einem größeren Nutzerkreis zur Verfügung gestellt werden kann. Zum Anonymisieren der Daten wurde ein von SCHUMANN (2020) entwickelter Algorithmus verwendet. Dieser Algorithmus wurde ursprünglich entwickelt, um aus gemessenen Daten Verbrauchscharakteristiken abzuleiten und anhand dieser ein Prüfprofil zur realitätsnahen Prüfung von Wasserzählern zu erstellen. Durch die Anwendung des Algorithmus unter Berücksichtigung aller Verbrauchsprofile einer Objektklasse (Ein- oder Mehrfamilienhaus) wurden stochastische Profile berechnet: Zum einen ein Profil mit einer Länge von 86472 s (Tagesprofil) und zum anderen ein Profil mit einer Länge von 604920 s (Wochenprofil). Das Tagesprofil umfasst Durchflussdaten mit einer minimalen Durchflussdauer von 3 s und einer maximalen Dauer von 108,33 s. Das Wochenprofil hat ebenfalls eine maximale Durchflussdauer der Einzelverbräuche von 108,33 s, jedoch ein Minimum von 1 s. Der Vorteil der stochastischen Daten liegt darin, dass bei der Betrachtung nicht nur einzelne Objekte betrachtet werden, sondern die Verbrauchsdaten aller untersuchten Objekte bei der Berechnung des stochastischen Profils einfließen. Zudem sind die Verbrauchsdaten soweit anonymisiert, sodass die stochastischen Daten frei zur Verfügung gestellt werden können. Die öffentliche Zugänglichkeit hat den Vorteil, dass diese Daten von jedem genutzt werden können, um beispielsweise neuartige Zähler oder Messtechniken zu überprüfen oder miteinander zu vergleichen. Der Nachteil ist, dass mit dem Algorithmus zunächst nur ein Tagesprofil bzw. ein Wochenprofil erzeugt werden konnte. Für erste

Untersuchungen ist dies jedoch ausreichend, da es in diesem ersten Schritt gilt, zu überprüfen, inwiefern die Auswirkungen des Abtastintervalls nachweisbar sind.

4.2.2 Material der experimentellen Untersuchungen

Nachdem theoretische Betrachtungen zur Auswirkung des Abtastintervalls durchgeführt wurden, fand eine experimentelle Überprüfung an ausgewählten Wasserzählern statt. Für die Untersuchungen wurde der EWZP und die Kavitationsdüsenapparatur, welche in Abschnitt 3.2.1 beschrieben sind, verwendet. Es wurde auf elektronische Wasserzähler verschiedener Hersteller und Messprinzipien zurückgegriffen. Es wurden drei Ultraschallzähler (Z 78, Z 79 und Z 80) von Hersteller A genutzt. Des Weiteren wurde ein Ultraschallzähler der Firma B (U2) verwendet. Zudem wurden zwei Zähler, welche das magnetisch-induktive Verfahren nutzen (D3, D6), untersucht. Die Zähler D3 und D6 verfügen über einen sogenannten Testmodus. Dieser Testmodus wurde bei den Zählern aktiviert. Hierdurch werden volumenproportionale Impulse ausgegeben sowie die Auflösung der Anzeige um drei Stellen erhöht. Das Abtastintervall der Zähler ist nicht bekannt. Die Zähler besitzen einen nicht einstellbaren Impulsausgang mit Impulswertigkeiten zwischen 10 Imp/l und 100 Imp/l. Die verwendeten Zähler wurden vor dieser hier durchgeführten Versuchsreihe bereits für andere Experimente verwendet. Zu Beginn der Versuche waren daher bereits unterschiedliche Mengen Wasser durch die Zähler geflossen. In Tab. 4.1 sind die Zählerspezifikationen zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Übersicht über die verwendeten Wasserzähler.

Zähler	Messprinzip	Q_3 in l/h	R	Impulswertigkeit in Imp/l	Zählerstand in m ³
Z78	Ultraschall	2500	400	60	438,58
Z79	Ultraschall	2500	400	60	439,92
Z80	Ultraschall	2500	400	60	406,77
U2	Ultraschall	2500	400	10	1753,23
D3	mag.-ind.	2500	160	100	612,39
D6	mag.-ind.	2500	160	100	274,74

Da nicht bekannt ist, inwiefern die Messrichtigkeit durch die vorherigen Versuche beeinflusst wurde, wurde vor den Experimenten die Messabweichung für alle Zähler bei konstantem Durchfluss gemäß MID bestimmt. Nachdem die Messabweichung der Zähler bei konstantem Durchfluss ermittelt wurde, wurde die Messabweichung der Anzeige der Zähler sowie des Impulsausgangs unter Verwendung des für die Untersuchungen erstellten realitätsnahen Tagesprofils bestimmt.

Für die Untersuchungen wurde ein zufällig ausgewähltes Tagesprofil eines Einfamilienhauses aus den in Abschnitt 4.2.1.1 beschriebenen Datensätzen verwendet. Diese Auswahl basiert auf der Annahme, dass die Auswirkungen des Abtastintervalls bei kürzeren Profilen eher detektierbar sind als bei längeren Profilen. Das Gesamtvolumen des Profils beträgt 134,61 l. Die Dauer der einzelnen Durchflussspunkte liegt zwischen 1 s und 14135 s. Die Realisierung erfolgte mit der Kavitationsdüsenapparatur, die in Kapitel 3.2.1 beschrieben ist. Mit der Kavitationsdüsenapparatur können zwar Schaltzeiten kleiner als 1 s realisiert werden (WARNECKE, 2024). Es zeigte sich jedoch, dass für die Realisierung des Profils eine Mindestdauer von 10 s je Durchflussspunkt notwendig war, um ein reproduzierbares Profil zu erzeugen, da bei zu kurzen Durchflussspunkten Überschwinger und die Dämpfung des Systems zu leicht divergenten Profilen führten. Aus diesem Grund war es erforderlich, Durchflussspunkte mit einer Dauer von weniger als 10 s zusammenzufassen. Hierzu wurden im ersten Schritt aneinander angrenzende Durchflussspunkte, welche ungleich Null und kürzer als 10 s sind, zu einem neuen Durchflussspunkt Q_{neu} zusammengefasst. Dabei wurde die Summe aus den zusammenzufassenden Durchflüssen Q_i mit der jeweiligen Dauer t_i multipliziert und im Anschluss durch die Gesamtdauer der verwendeten Durchflüsse dividiert:

$$Q_{\text{neu}} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i \cdot t_i}{t_i}. \quad (4.1)$$

Im nächsten Schritt wurden ähnliche Durchflüsse weiter zusammengefasst, da bei der Verwendung der Kavitationsdüsenapparatur nur 63 Durchflüsse einstellbar sind. Hierfür wurden alle auftretenden Durchflüsse nach ihrer Größe sortiert und Durchflüsse mit einem Unterschied von kleiner als 10 l/h analog zu Gl. 4.1 zusammengefasst. Durch die Zusammenfassung ergeben sich die in Tab. A.1 aufgeführten Durchflussspunkte, welche mittels der Apparatur realisiert wurden.

Daraufhin fand die Auswahl der zu verwendeten Düsen statt. Da das Fassungsvermögen des Wägegefäßes des EWZP limitiert ist, wurden die Durchflüsse des Profils zunächst mit dem Faktor 0,8 skaliert. Im Anschluss wurden die für den jeweiligen Durchfluss geeignetsten Düsen ausgewählt.

Die zur Realisierung verwendeten Düsenkombinationen und Durchflüsse sind im Anhang in Tab. A.1 angegeben. Das originale Profil sowie das modifizierte Profil sind in Abb. 4.2 dargestellt.

Tabelle 4.2: Verwendete Düsen zur Umsetzung des modifizierten Tagesprofils.

Position	Düsendurchmesser in mm	Durchfluss bei 3 bar in l/h
1	0,2691	5
2	0,4169	12
3	0,5382	20
4	0,74	38
5	1,2	98
6	1,4	135

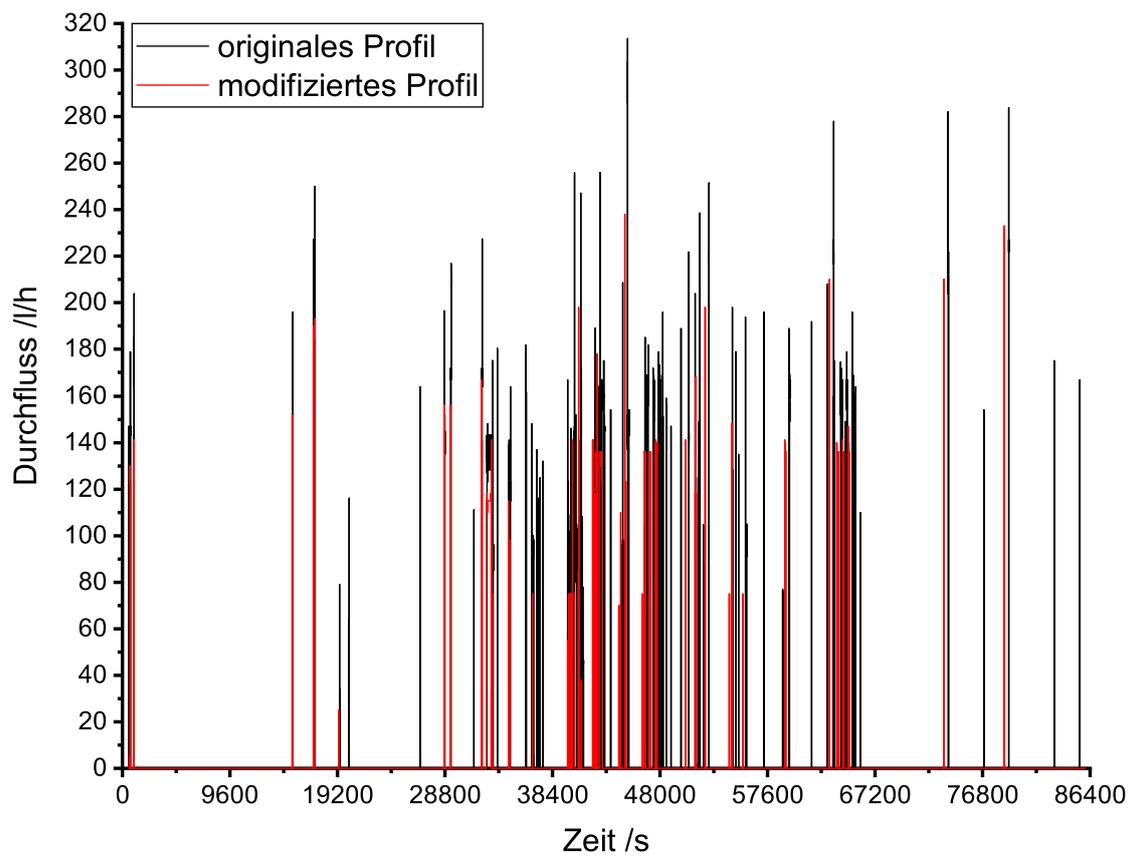


Abbildung 4.2: Vergleich zwischen realem Tagesprofil und dem modifiziertem Profil.

4.2.3 Methoden zur Untersuchung des Einflusses der Interpolationsart

Für die Untersuchungen wurde die lineare Interpolation und die Interpolation mittels Rechteckfunktion ausgewählt. Bei der Rechteckfunktion erfolgt die Annahme, dass der Volumenstrom zwischen zwei Messpunkten konstant ist. Hierbei wird die Annahme getroffen, dass der interpolierte Volumenstrom gleich dem Volumenstrom am vorherigen Messpunkt ist. Bei der linearen Interpolation werden die einzelnen Messpunkte linear miteinander verbunden. Die zwei betrachteten Interpolationsarten sind in Abb. 4.3 schematisch dargestellt. Bei der Darstellung erfolgt die Annahme, dass ein Messwert pro Zeitschritt ermittelt wird. In Abb. 4.3a ist einerseits der tatsächlich vorliegende Durchfluss dargestellt und andererseits der abhängig von der Interpolationsart angenommene Durchfluss. In Abb. 4.3b ist das reale Volumen sowie das mittels der jeweiligen Interpolation berechnete Volumen dargestellt. Das Volumen $V_{t_s, \text{Rechteck}}$, welches unter der Annahme einer Rechteckfunktion erfasst wird, wird berechnet durch:

$$V_{t_s, \text{Rechteck}} = \sum_{i=0}^t \dot{q}_i \cdot t_s. \quad (4.2)$$

Dabei entspricht t_s der Länge des Abtastintervalls und \dot{q}_i dem Durchfluss zum Zeitpunkt der Messwertnahme.

Das Volumen $V_{t_s, \text{linear}}$ wird mittels des Integrals der Funktion der linear verbundenen Messwerte berechnet. Das tatsächlich durch den Zähler geflossene Volumen V_{real} wird gemäß Gl. 4.3 bestimmt. Das berechnete Gesamtvolumen entspricht der Fläche unter der Kurve des Durchflusses und somit der Summe der Teilvolumina, welche durch die Verwendung des exakten Durchflusses \dot{q}_i und seiner Dauer t_i berechnet wird:

$$V_{\text{real}} = \sum_{i=0}^t \dot{q}_i \cdot t_i. \quad (4.3)$$

Es zeigt sich anhand des Beispiels, dass abhängig von der Interpolationsweise die Volumina voneinander abweichen. Diese Abweichung ϵ vom tatsächlich durch den Zähler geflossenen Volumen V_{real} ist definiert durch:

$$\epsilon = \frac{V_{t_s} - V_{\text{real}}}{V_{\text{real}}}. \quad (4.4)$$

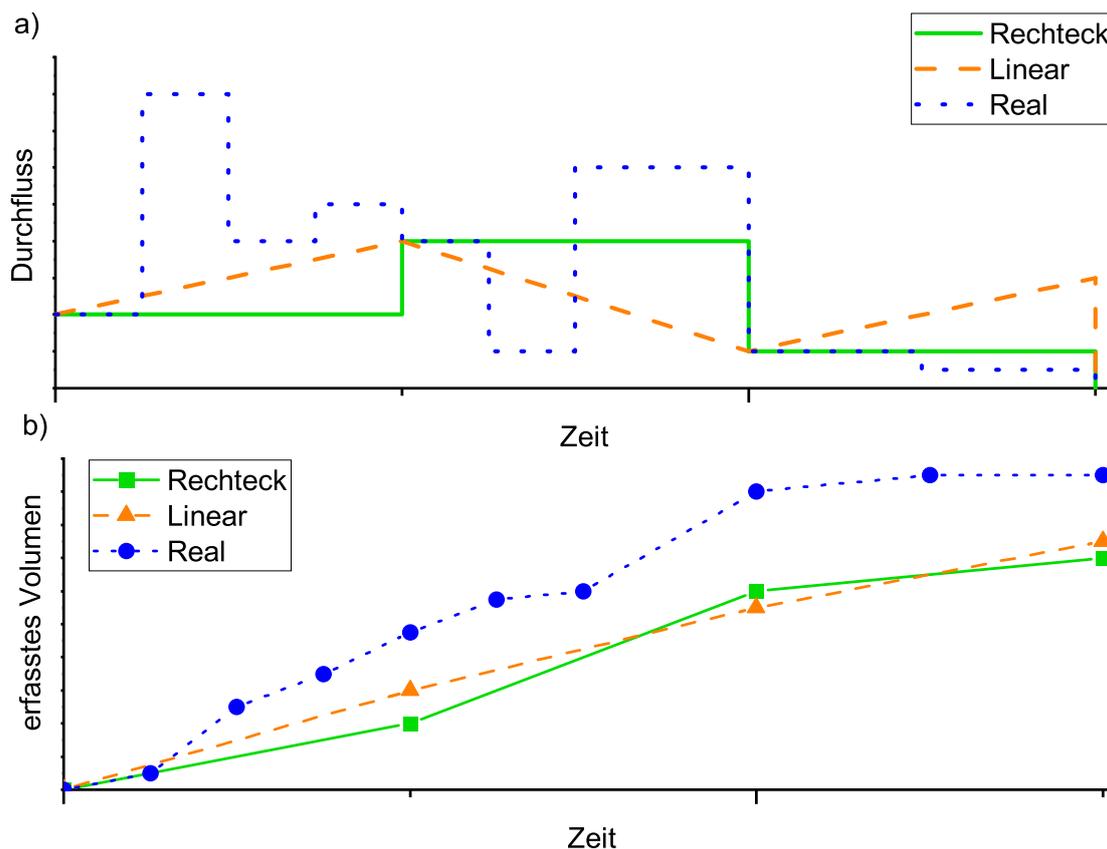


Abbildung 4.3: a) Schematische Darstellung des realen Durchflusses sowie des Durchflusses bei der Verwendung der gewählten Interpolationsarten. b) Reales sowie mittels Interpolationsarten bestimmtes Volumen.

Dabei entspricht V_{ts} dem Volumen, welches unter der Verwendung der jeweiligen Interpolation berechnet wird.

Die Berechnungen des Volumens unter Verwendung der Rechteckinterpolation wurden in ein Excel VBA-Skript umgesetzt. Mittels dieses Skripts wurde im ersten Schritt eine Zeitreihe mit der Schrittweite des frei wählbaren Abtastintervalls erzeugt. Jedem Zeitschritt wurde der zu diesem Zeitpunkt im verwendeten Datensatz vorliegende Durchfluss zugeordnet. Auf Basis dieser erzeugten Zeitreihe wurde im zweiten Teil des Skripts das unter der Annahme eines Rechteckprofils theoretisch erfasste Volumen bestimmt. Dieses berechnete theoretische Volumen wird im letzten Schritt genutzt, um die durch die Abtastung resultierende Messabweichung laut Gl. 4.4 zu berechnen. Das unter der Annahme der linearen Interpolation theoretisch erfasste Volumen wurde mit Hilfe von OriginPro 2022b (ORIGINLAB, 2022) berechnet. Hierzu wurde die gleiche Zeitreihe genutzt, die im ersten Schritt des Excel VBA-Skripts generiert wurde. Mittels OriginPro 2022b wurde das Integral unter der Durchflusskurve berechnet. Im nächsten Schritt erfolgte die Bestimmung der Messabweichung aufgrund des Abtastintervalls gemäß Gl. 4.4.

In Abb. 4.3b ist zu erkennen, dass bei jedem Zeitschritt die berechneten Volumina voneinander abweichen. Selbiges gilt somit für die durch das Volumen berechnete Messabweichung. Demzufolge weichen die Interpolationsarten um $\Delta\epsilon_{t_s}$ voneinander ab. Diese Differenz wird wie folgt berechnet:

$$\Delta\epsilon_{t_s} = |\epsilon_{\text{linear}_{t_s}}| - |\epsilon_{\text{Rechteck}_{t_s}}|. \quad (4.5)$$

Die Differenz der Abweichung zum tatsächlichen Volumen durch die jeweilige Interpolationsart wurde verwendet, um die zwei Arten der Interpolation zu vergleichen.

Für den Vergleich der Auswirkung auf das erfasste Gesamtvolumen durch die zwei verwendeten Interpolationsarten wurden bei der Betrachtung der Datensätze die Abtastintervalle 1 s, 5 s, 10 s, 30 s, 60 s, 90 s, 120 s, 150 s, 180 s, 210 s, 240 s, 270 s, 300 s und 600 s verwendet.

4.2.4 Methoden zur Untersuchung des Einflusses des Betrachtungszeitraums

Die in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Datensätze wurden verwendet, um den Einfluss der Dauer des Betrachtungszeitraums auf das erfasste Volumen zu evaluieren. Die Vorgehensweise bei den theoretischen Betrachtungen ist für beide Arten von Datensätzen verschieden. Daher wird das Vorgehen für den Datensatz basierend auf Messungen in Deutschland (nachfolgend auch als „reales Verbrauchsprofil“ bezeichnet) getrennt von der Vorgehensweise bei stochastischen Profilen beschrieben.

Verbrauchsprofile basierend auf Messungen in Deutschland

Bei der Untersuchung des realen Verbrauchsprofils wurden verschiedene Zeitspannen betrachtet. Diese verschiedenen Betrachtungszeiträume sind mit einem möglichen Ablesungszeitraum gleichzusetzen. In Deutschland beträgt der typische Ablesungszeitraum ein Jahr. Daher wurde ein Jahr als maximaler Betrachtungszeitraum gewählt. Zusätzlich wurde die Auswirkung von kürzeren Betrachtungszeiträumen betrachtet. Für das generierte Jahresprofil eines Einfamilienhauses wurden ergänzend die Zeiträume von einer Woche, einem Monat, einem Quartal und einem halben Jahr verwendet. Bei der Betrachtung von kürzeren Zeiträumen wurden alle Untereinheiten betrachtet. Das bedeutet, dass beim wöchentlichen Zeitraum alle 52 Wochenprofile und beim monatlichen Zeitraum alle 12 Monate separat betrachtet wurden. Analog dazu wurden alle vier Quartale sowie beide Halbjahre des realen Profils einzeln ausgewertet. Für jedes Profil eines Betrachtungszeitraums und jedes Abtastintervall zwischen 2 s und 120 s (in 1 s-Intervallen) wurden die jeweiligen Messabweichungen

chungen gemäß Gl. 4.4 berechnet. Die maximal auftretende Messabweichung aller untersuchten Fälle (beispielsweise vier Quartale oder zwölf Monate) ϵ_{\max} bestimmt, da Wasserzähler zu jeder Zeit in den gesetzlich vorgeschriebenen Fehlergrenzen das durch sie geflossene Volumen erfassen müssen. Die maximale Messabweichung wird berechnet durch:

$$\epsilon_{\max} = \max \left(\left| \frac{V_{ts} - V_{\text{real}}}{V_{\text{real}}} \right| \right). \quad (4.6)$$

Auf identische Weise wurde das neunmonatige Profil, welches aus den Daten der Mehrfamilienhäuser abgeleitet wurde, untersucht. Es wurden zunächst die Zeiträume neun Monate, drei Monate, ein Monat betrachtet. Es wurden beim dreimonatigen Zeitraum die Monate März, April, Mai - Juni, August, September - Oktober, November, Dezember, d. h. saisonal zusammengefasst. Analog zum Profil des Einfamilienhauses wurden die jeweiligen Messabweichungen bestimmt. Zudem wurde die maximale Messabweichung je Betrachtungszeitraum ermittelt.

Stochastische Profile basierend auf gemessenen Verbrauchsprofilen

Die stochastischen Profile weisen im Vergleich zu den realen Profilen eine vergleichsweise kurze Zeitspanne auf. Aus diesem Grund wurde für die stochastischen Profile kein kürzerer Betrachtungszeitraum als die Dauer des ursprünglichen Profils (ein Tag bzw. eine Woche) gewählt. Es wurde lediglich untersucht, welchen Effekt eine Verlängerung des Betrachtungszeitraums auf diese Profiltypen hat.

Für die Analyse eines längeren Betrachtungszeitraums wurden die stochastischen Tages- und Wochenprofile mehrfach hintereinander gereiht. Zur Vermeidung von zyklischen Verzerrungen, die durch die verwendeten Abtastintervalle entstehen könnten, wurde nach jeder Wiederholung des Profils eine Verschiebung um $1/120$ des Abtastintervalls vorgenommen. Das stochastische Tagesprofil wurde bis zu 120-mal wiederholt, während das stochastische Wochenprofil bis zu 20-mal hintereinander gereiht wurde.

4.2.5 Methoden zur Untersuchung des Einflusses des Startzeitpunkts

Hauswasserzähler werden nicht zu einem fest definierten Zeitpunkt im Jahr oder am Tag installiert. Folglich variiert der Beginn der Messungen abhängig von der Inbetriebnahme des jeweiligen Zählers. In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, wie unterschiedliche Startzeitpunkte die vom Zähler erfassten Volumina beeinflussen. Zur Beurteilung des Einflusses des Startzeitpunkts wurden sowohl reale Verbrauchsprofile als auch stochastische Profile herangezogen. Analog zu den Untersuchungen

bezüglich des Einflusses des Betrachtungszeitraums wurden beide Datensatztypen auf unterschiedliche Weise analysiert, um die Auswirkungen der variierenden Startzeitpunkte auf die Messergebnisse zu erfassen.

4.2.5.1 Verbrauchsprofile basierend auf Messungen in Deutschland

Im Rahmen dieser Arbeit wurden kleine Verschiebungen von wenigen Sekunden bis hin zu saisonalen Verschiebungen von mehreren Monaten betrachtet. Zunächst wurde der Einfluss des Startzeitpunkts der Abtastung zu unterschiedlichen Jahreszeiten untersucht. Hierbei wurde der Startzeitpunkt des Jahresprofils für das Einfamilienhaus in regelmäßigen Abständen von drei Monaten verschoben. Konkret bedeutet dies, dass die Abtastung statt am 01. Januar zu den Zeitpunkten 01. April, 01. Juli und 01. Oktober jeweils um 00:00 Uhr begann. Um sicherzustellen, dass das Gesamtvolumen über den betrachteten Zeitraum hinweg gleich bleibt, wurde der Zeitraum vor dem gewählten Startzeitpunkt an das Ende des Profils angefügt. Beispielsweise wurde anstelle des Zeitraums vom 01. Januar bis zum 31. Dezember der Zeitraum vom 01. April bis zum 31. März untersucht. Zusätzlich zu den saisonalen Verschiebungen wurden auch kleinere zeitliche Verschiebungen des Startzeitpunkts analysiert. Dies basiert auf der Erkenntnis von HOLMES-HIGGIN (2019), dass bereits kleine Startzeitpunktverschiebungen erhebliche Auswirkungen auf die Messabweichung haben können. Für diese Analyse wurde das Profil modifiziert, indem ein Zeitraum ohne Durchfluss vor dem Profil eingefügt und derselbe Zeitraum am Ende des Profils abgezogen wurde. Dieser Prozess wurde 120-mal wiederholt, wodurch insgesamt 120 verschiedene Startzeitpunkte betrachtet wurden. Die Untersuchung wurde sowohl für das Verbrauchsprofil eines Einfamilienhauses als auch für ein Mehrfamilienhaus durchgeführt. Die bereits verwendeten Betrachtungszeiträume, die von einer Woche bis zu einem Jahr reichten, wurden weiterhin verwendet. Wie bei den vorherigen Untersuchungen wurde die maximale Messabweichung aller Fälle als Bewertungsgrundlage herangezogen.

4.2.5.2 Stochastische Profile basierend auf gemessenen Verbrauchsprofilen

Wie beim realen Profil wurden bei den stochastischen Profilen sowohl kleine Verschiebungen von wenigen Sekunden als auch große Verschiebungen von mehreren Stunden betrachtet. Demzufolge wurde der Start der Abtastung beim stochastischen Tagesprofil um 1801 s und 43331 s verschoben. Beim stochastischen Wochenprofil wurde der Startzeitpunkt ebenfalls um 1801 s und 43331 s verschoben. Zusätzlich wurde der Start der Abtastung um 86399 s (ca. 24 h) verschoben. Zudem wurde analog zum realen Verbrauchsprofil der Startzeitpunkt um 1 s bis zu 120 s verscho-

ben. Als Bewertungskriterium für den Einfluss des Abtastintervalls wurde ebenfalls die maximal auftretende Abweichung in Abhängigkeit vom Profil genutzt.

4.2.6 Methoden zur stochastischen Untersuchung der Messabweichungen aller Einflussfaktoren

Durch die bisherigen Untersuchungen der stochastischen Profile und den auf direkt gemessenen Profilen wurde eine große Datenbasis der Messabweichung bei unterschiedlichen Betrachtungszeiträumen und Startzeitpunkten generiert. Diese Daten wurden genutzt, um das 99 % respektive 95 %-Konfidenzintervall der maximalen Messabweichung zu bestimmen. Bei der Betrachtung der Konfidenzintervalle sind die oberen Grenzen entscheidend, da in diesem Fall 99 % respektive 95 % der Messabweichungen kleiner als die berechnete Grenze sind. Die obere Grenze x_o berechnet sich mittels des Mittelwerts des Datensatzes \bar{x} , dem Standardfehler und einer Konfidenzintervall spezifischen Konstanten z_o . Der Standardfehler selbst ist das Verhältnis der Standardabweichung s_x zur Wurzel der Stichprobengröße n . Hieraus folgt für den Mittelwert:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (4.7)$$

Die dazugehörige Standardabweichung lässt sich wie folgt berechnen:

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (4.8)$$

Für das 95 %- Konfidenzintervall beträgt $z_o = 1,645$ und für das 99 %- Konfidenzintervall ist $z_o = 2,326$. Somit ergibt sich die obere Grenze des Konfidenzintervalls aus:

$$x_o = \bar{x} + z_o \cdot \frac{s_x}{\sqrt{n}}. \quad (4.9)$$

Die somit ermittelte obere Grenze kann zur Beurteilung genutzt werden. Zusätzlich wurde die Fehlerverteilung der Messabweichungen bestimmt. Hierzu wurden die Messabweichungen in Intervallen von 0,25 %-Schritten zusammengefasst.

4.2.6.1 Methode der Messungen des realitätsnahen Tagesprofils

Zur Überprüfung, ob ein Einfluss von diskreten Messungen bei elektronischen Zählern nachweisbar ist, wurden die Messabweichungen der ausgewählten Hauswasser-

zähler unter Verwendung des entwickelten realitätsnahen Tagesprofils bestimmt. Das Profil aus Abb. 4.2 wurde fünfmal wiederholt. Die während eines Profildurchlaufs ausgegebenen volumenproportionalen Impulse der Zähler wurden mittels der Impulserfassung des Prüfstands (vgl. Kapitel 3.2.1) erfasst. Mittels der Impulswertigkeit k_W des Zählers und der Anzahl der gemessenen Impulse n wurde das vom Impulsanfang des Zählers erfasste Volumen V_{Imp} (in Litern) bestimmt:

$$V_{\text{Imp}} = \frac{n}{k_W}. \quad (4.10)$$

Zusätzlich wurde das auf der Anzeige angegebene Volumen zu Beginn des Versuchs V_{Start} und nach Beendigung V_{Ende} abgelesen und hieraus das laut Anzeige durch den Zähler geflossene Volumen V_{Anz} (Kubikmeter) bestimmt:

$$V_{\text{Anz}} = V_{\text{Ende}} - V_{\text{Start}}. \quad (4.11)$$

Als gravimetrische Referenz dient die Waage W4000. Da sowohl der Impulsanfang der Zähler (Impulse pro Liter) als auch die Anzeige der Zähler (m^3) verwendet wurden, wurde das Referenzvolumen V_{Ref} , basierend auf der mittels der Waage bestimmten Masse, sowohl in Litern als auch in Kubikmetern berechnet. Hierbei wurden Verdunstungseffekte, Dichte sowie Auftriebseffekte berücksichtigt. Die Messabweichung des Zählers unter der Verwendung des Impulsanfangs ϵ_{Imp} lässt sich bestimmen durch:

$$\epsilon_{\text{Imp}} = \frac{V_{\text{Imp}} - V_{\text{Ref}}}{V_{\text{Ref}}}. \quad (4.12)$$

Ebenso wurde die Messabweichung der Anzeige ϵ_{Anz} bestimmt durch:

$$\epsilon_{\text{Anz}} = \frac{V_{\text{Anz}} - V_{\text{Ref}}}{V_{\text{Ref}}}. \quad (4.13)$$

Das generierte modifizierte Tagesprofil wurde mittels der bei den theoretischen Betrachtungen verwendeten Methoden untersucht, um die bei den Versuchen bestimmten Messabweichungen der Anzeige und des Impulsanfangs einzuordnen. Anhand der in Kapitel 4.2 beschriebenen Methoden wurde die theoretisch auftretende Messabweichung aufgrund der diskreten Messung bestimmt. Dabei wurden 120 verschiedene Startzeitpunkte berücksichtigt. Anhand dieser wurde die maximal auftretende Abweichung ermittelt und mit den experimentell ermittelten Messabweichungen verglichen.

4.3 Ergebnisse und Diskussion

Wie bereits im vorherigen Abschnitt werden die Ergebnisse im ersten Schritt nach theoretischer und experimenteller Untersuchung getrennt dargestellt. Zudem findet eine Unterteilung nach den Einflussfaktoren und den verwendeten Datensätzen statt.

4.3.1 Einfluss der Interpolationsmethode

Zur Bestimmung des durch den Zähler geflossenen Volumens anhand diskreter Messungen finden zählerintern Berechnungen statt. Da die Lebensdauer elektronischer Wasserzähler durch die integrierte Batterie begrenzt wird, wird davon ausgegangen, dass keine aufwendigen und datenintensiven Berechnungen zur Bestimmung des Volumens verwendet werden. Daher sind simple Interpolationen mit wenig Rechenaufwand am besten geeignet. Im Rahmen dieser Arbeit wurden aus diesem Grund zwei verschiedene Arten der Interpolation betrachtet: zum einen die lineare Interpolation und zum anderen die Interpolation mittels Rechteckfunktion. Es wurde untersucht, inwiefern die Art der Interpolation eine Auswirkung auf das erfasste Volumen hat und ob mittels einer der gewählten Interpolationen das Volumen genauer bestimmt werden kann. Für die Untersuchungen wurden die in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Datensätze verwendet. Es wurde die in Abschnitt 4.2.3 erklärte Methodik angewandt.

Hierbei ergeben sich aufgrund der Verwendung der Interpolationsansätze bei der Bestimmung des Volumens Bereiche der Über- und Unterregistrierung. Die Bereiche der Über- und Unterregistrierung sind unter der Annahme einer linearen bzw. Rechteckinterpolation unterschiedlich groß. Es ergeben sich somit abhängig von Abtastintervall und Interpolationsart unterschiedliche Abweichungen zwischen dem berechneten Volumen und dem tatsächlich durch den Zähler geflossenen Volumen. Diese Abweichungen sind in Abb. 4.4a) exemplarisch für das konstruierte Profil eines Einfamilienhauses mit der Länge von einem Jahr dargestellt. Zudem wird in Abb. 4.4b) der Betrag der Differenz der Messabweichungen $\Delta\epsilon_{t_s}$ dargestellt.

Aufgrund der in Abschnitt 4.2.3 gezeigten Abb. 4.3 ist zu erwarten, dass sich die durch die Rechteckinterpolation entstehende Messabweichung von der durch die lineare Interpolation entstehenden Abweichung unterscheidet. Es zeigt sich jedoch, dass sowohl die lineare Interpolation als auch die Rechteckinterpolation im untersuchten Bereich zu vergleichbaren Messabweichungen führen. So beträgt die maximale Differenz zwischen den Abweichungen durch die Interpolation 0,25 % bei einem Abtastintervall von 600 s. Die Differenz der Messabweichung zwischen den

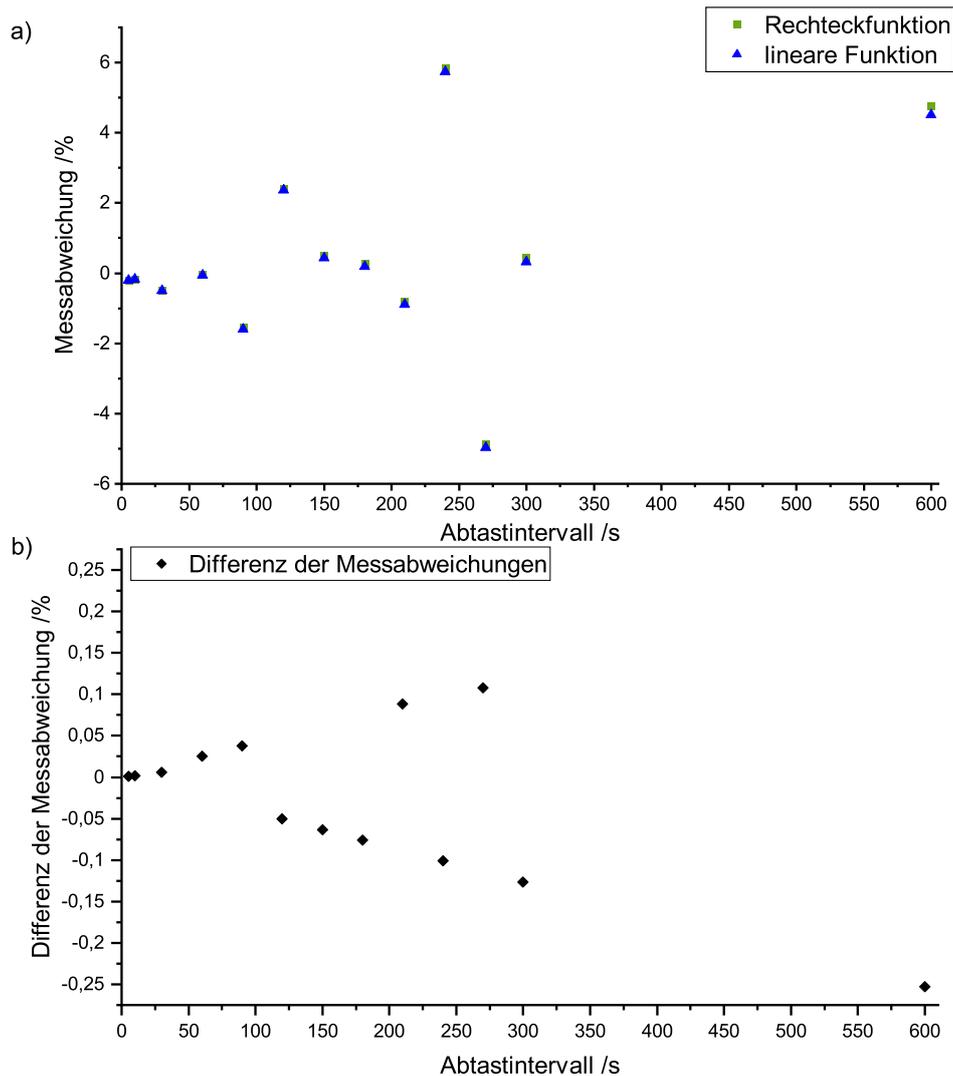


Abbildung 4.4: a) Messabweichung aufgrund des Abtastintervalls infolge der linearen und Rechteckinterpolation. b) Differenz der Abweichung der linearen und Rechteckinterpolation.

angewandten Interpolationsmethoden nimmt mit abnehmender Länge der Abtastintervalle kontinuierlich ab. Bei Abtastintervallen von weniger als 120 s unterschreitet der Betrag dieser Differenz durchgehend den Wert von 0,05 %. Da die Abtastung in einem äquidistanten Intervall erfolgt, kann die Newton-Cotes-Formel zur Berechnung angewendet werden. Der hierdurch entstehende Diskretisierungsfehler (in diesem Fall die Messabweichung) ist bei der Rechteckfunktion erster Ordnung. Dies bedeutet, dass der Fehler bei einer Verkürzung der Intervalllänge proportional zum Abtastintervall abnimmt (KUHLMANN, 2021). Der Diskretisierungsfehler der linearen Interpolation (Trapezregel) ist zweiter Ordnung. Dies erklärt, warum die Differenz der Messabweichung mit längeren Abtastintervallen zunehmend voneinander abweicht. Da abhängig vom Abtastintervall einmal die lineare Interpolation und ein anderes Mal die Rechteckinterpolation zu kleineren Abweichungen führt, kann keine der Interpolationsarten als vorrangig geeignet eingestuft werden.

Analoge Betrachtungen wurden sowohl für das stochastische Tages- als auch Wochenprofil durchgeführt. Hierbei zeigt sich ein vergleichbares Verhalten. Die Ursache für den nur geringfügigen Unterschied der Messabweichung der Rechteckinterpolation zu der der linearen Interpolation ist vermutlich, dass es sich bei der schematischen Darstellung in Abschnitt 4.2.3 nur um einen kurzen Zeitraum handelt und sich bei der Betrachtung eines längeren Zeitraums die Messabweichungen der beiden Interpolationsarten annähern. Das bedeutet demzufolge, dass sich die Größe der Bereiche der Über- und Unterregistrierung nahezu gleichen, sodass unabhängig von der verwendeten Interpolationsart vergleichbare Messabweichungen auftreten.

4.3.1.1 Zwischenfazit zum Einfluss der Interpolationsart

Bei dem Vergleich der beiden Interpolationsarten zeigt sich, dass die lineare Interpolation sowie die Verwendung einer Rechteckfunktion zu vergleichbaren Messabweichungen führen. Hieraus folgt, dass im Weiteren die Betrachtung einer Interpolationsmethode ausreichend ist. Für die weiteren Untersuchungen wurde aufgrund der schnelleren Berechnung auf die Verwendung einer Rechteckfunktion zurückgegriffen. Aufgrund der vorangegangenen Untersuchungen ist davon auszugehen, dass die Messabweichungen durch die lineare Interpolation zu vergleichbaren Ergebnissen führen.

4.3.2 Einfluss des Betrachtungszeitraums

Bereits anhand der Untersuchungen von EFF (2021) wird deutlich, dass der Betrachtungszeitraum einen erheblichen Einfluss auf das erfasste Volumen und einhergehend mit der resultierenden Messabweichung hat. EFF (2021) zeigt, dass längere Betrachtungszeiträume kleinere Messabweichungen zur Folge haben. Inwiefern sich der Betrachtungszeitraum auf die Messrichtigkeit von Hauswasserzählern unter realen Bedingungen auswirkt, wurde unter Verwendung der in Abschnitt 4.2.1 dargestellten Datensätze untersucht. Die für die Untersuchungen genutzten Methoden finden sich in Kapitel 4.2.4. Die Ergebnisse werden nachfolgend nach Art des Objekts und der Art des Datensatzes dargestellt.

4.3.2.1 Einfamilienhaus

Für das zusammengesetzte Verbrauchsprofil des Einfamilienhauses zeigt sich, dass bei allen untersuchten Betrachtungszeiträumen die entstehende Messabweichung nicht einseitig ist. Beispielhaft hierfür ist in Abb. 4.5 die Abweichung des theoretisch

erfassten Volumens eines Einfamilienhauses bei einer Betrachtungsdauer von einem Jahr dargestellt. Die Messabweichung schwankt zwischen -2,09 % und +2,47 %. Das nicht einseitige Auftreten der Messabweichung gilt ebenso für die anderen, kürzeren Betrachtungszeiträume.

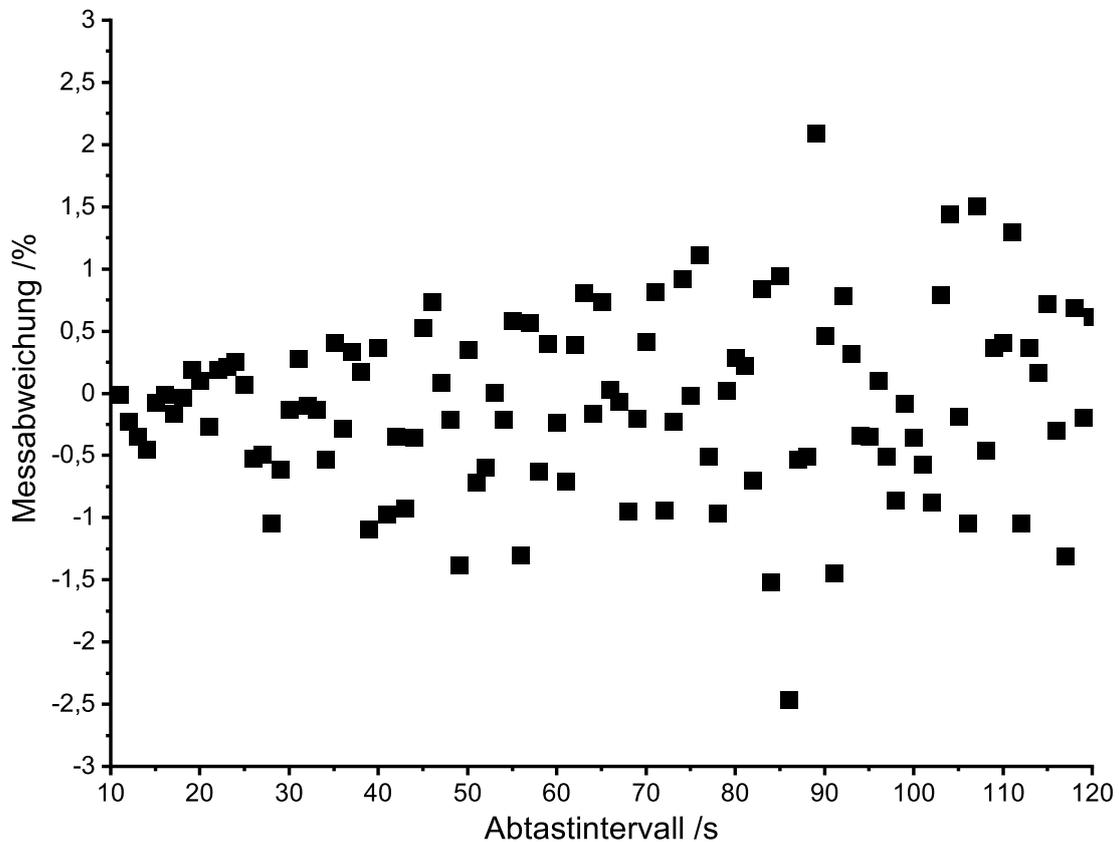


Abbildung 4.5: Abweichung durch die Abtastung bei der Betrachtung des Profils des Einfamilienhauses über ein Jahr

Da die Messabweichung nicht einseitig ist, wird in Abb. 4.6 lediglich der Betrag der Messabweichung dargestellt. Dies ist möglich, da bei der Beurteilung der Messrichtigkeit des Zählers irrelevant ist, welche Partei (Versorger / Verbraucher) bevorzugt bzw. benachteiligt wird. Voraussetzung ist, dass keine einseitige Messabweichung vorliegt.

Es gilt zu beachten, dass die einzelnen Diagramme verschieden skalierte y-Achsen haben. Zur einfacheren Interpretation der Ergebnisse ist die 2-% Fehlergrenze hervorgehoben.

Bei den Untersuchungen zeigt sich, dass mit längeren Abtastintervallen größere Messabweichungen auftreten. Dabei ist jedoch zu beachten, dass sich die Messabweichung durch eine Änderung des Abtastintervalls von lediglich einer Sekunde gravierend ändern kann. So tritt beispielsweise bei einem Betrachtungszeitraum von einem Jahr und einem Abtastintervall von 86 s eine Abweichung von 2,47 % auf. Bei einem

Abtastintervall von 85 s bei gleichem Betrachtungszeitraum beträgt der Unterschied - 0,95 %. Somit ändert sich nicht nur bei kleinen Änderungen des Abtastintervalls der Betrag der Messabweichung, sondern es kann sich auch das Vorzeichen der Messabweichung ändern. In Abb. 4.6 ist zusätzlich die lineare Regression der Messabweichung eingezeichnet. Die lineare Regression gibt den Verlauf der Messabweichung jedoch nur eingeschränkt wieder und soll nur als Orientierung dienen. Insbesondere bei einem Betrachtungszeitraum von einem Jahr beträgt das Maß der Bestimmtheit der linearen Regression lediglich 60,69 %. Dies kann insbesondere der Tatsache geschuldet sein, dass zunächst nur ein Profil mit einem Startzeitpunkt betrachtet wurde bzw. durch die Länge des Betrachtungszeitraums die Messabweichung stärker schwankt.

Zur weiteren Bewertung der einzelnen Abtastintervalle und deren Vergleich dienen die Grenzen 0,25 %, 0,5 %, 1 %, 1,5 % sowie 2 %. Die Abtastintervalle, bei denen diese Grenzen das erste Mal überschritten werden, sind in Tab. 4.3 aufgelistet.

Hierbei ist zu beachten, dass bei einem Jahr lediglich ein Startzeitpunkt untersucht wurde. Bei einem halben Jahr wurden beide Halbjahre des kompilierten Jahresprofils ausgewertet und die maximale Messabweichung bei der Verwendung des jeweiligen Abtastintervalls dargestellt. Analog wurden beim dreimonatigen Zeitraum vier Quartale, beim einmonatigen Zeitraum zwölf Monate, beim wöchentlichen Zeitraum 52 Wochen ausgewertet und jeweils die maximale Messabweichung ermittelt. Aus dieser Betrachtung folgt, dass die Abweichung der tatsächlich gemessenen Verbrauchsprofile stark durch den Betrachtungszeitraum beeinflusst wird. Bei kürzerem Betrachtungszeitraum treten eher größere Abweichungen auf. So wird beispielsweise die 1 %-Fehlergrenze bei einem Betrachtungszeitraum von drei Monaten bei einem Abtastintervall von 14 s erstmalig überschritten. Bei einem längeren Betrachtungszeitraum wie einem Jahr wird die 1 %-Fehlergrenze erst bei einem Abtastintervall von 28 s erstmalig überschritten.

Tabelle 4.3: Abtastintervalle, bei denen die Grenze der Messabweichung aus der ersten Zeile das erste Mal überschritten wird (Betrachtung des realen Profils eines Einfamilienhauses).

Betrachtungszeitraum	Messabweichung				
	>0,25 %	>0,5 %	>1 %	>1,5 %	>2 %
eine Woche	2 s	2 s	2 s	4 s	6 s
ein Monat	3 s	4 s	8 s	12 s	12 s
drei Monate	5 s	7 s	14 s	20 s	27 s
sechs Monate	9 s	12 s	27 s	38 s	43 s
ein Jahr	10 s	26 s	28 s	84 s	86 s

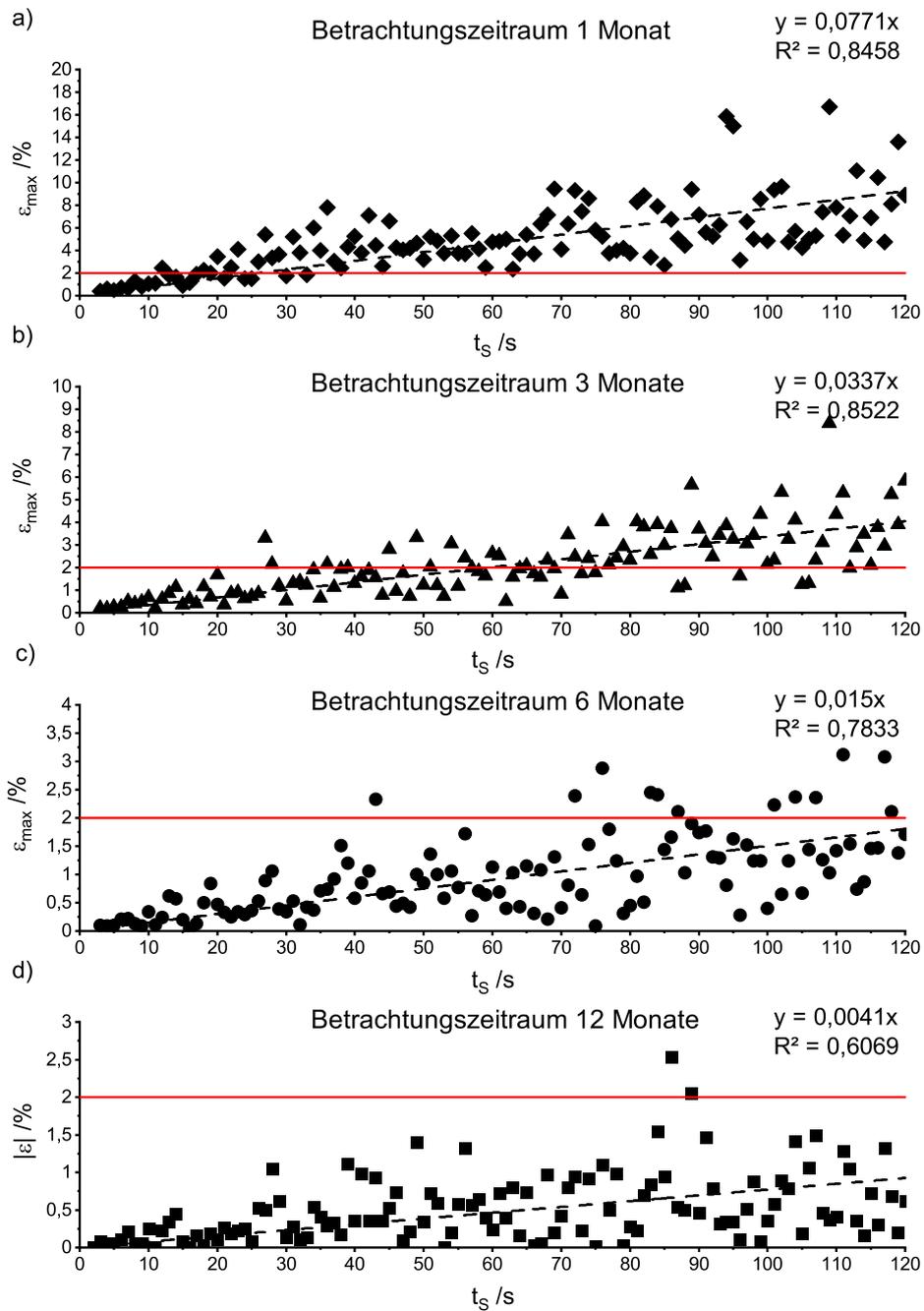


Abbildung 4.6: Messabweichung in Abhängigkeit vom Abtastintervall bei einem Betrachtungszeitraum von a) einem Monat, b) drei Monaten, c) sechs Monaten, d) einem Jahr.

4.3.2.2 Mehrfamilienhaus

Analog zu den Daten des Einfamilienhauses wurden die Daten für das Mehrfamilienhaus ausgewertet. Bei der Durchführung der Berechnung fiel auf, dass bei den Daten des Mehrfamilienhauses etwa viermal so viele Durchflusspunkte vorliegen wie beim Einfamilienhaus. Aus diesem Grund ist eine Berechnung für den insgesamt

zur Verfügung stehenden Zeitraum von neun Monaten nicht möglich, da das hierfür geschriebene Skript die große Anzahl an Daten nicht verarbeiten kann. Aufgrund der großen Datenanzahl kommt es zudem zu sehr langen Berechnungszeiten von teilweise mehreren Tagen. Daher wird neben dem einmonatigen und dreimonatigen Betrachtungszeitraum lediglich ein Zeitraum von acht Monaten (März, April, Mai, Juni, August, September, Oktober und November) betrachtet. Auf die Betrachtung von neun aneinandergereihten Monaten wird verzichtet.

Es zeigt sich, dass die entstehende Abweichung vom erfassten zum tatsächlichen Volumen aufgrund des Abtastintervalls mit längeren Betrachtungszeiträumen kleiner wird. In Abb. 4.7 sind die entstehenden Abweichungen dargestellt. Dabei wird die maximale Messabweichung für den einmonatigen Zeitraum gezeigt, die unter Berücksichtigung aller neun vorliegenden Monate entsteht. Der maximale prozentuale Unterschied im erfassten Volumen der dreimonatigen Zeiträume ist in Abb. 4.7 ebenso dargestellt wie die resultierende Abweichung bei der Betrachtung des achtmonatigen Zeitraums. Bei allen hier untersuchten Fällen wurde der Start der Abtastung mit dem Start des Profils gleichgesetzt.

Da davon ausgegangen werden kann, dass die Messabweichung durch die Abtastung bei Betrachtung eines neunmonatigen Zeitraums kleiner wird und die sich ergebene Messabweichung im Vergleich zum Einfamilienhaus bereits sehr gering ist, wurde auf die Neuprogrammierung des Skripts verzichtet.

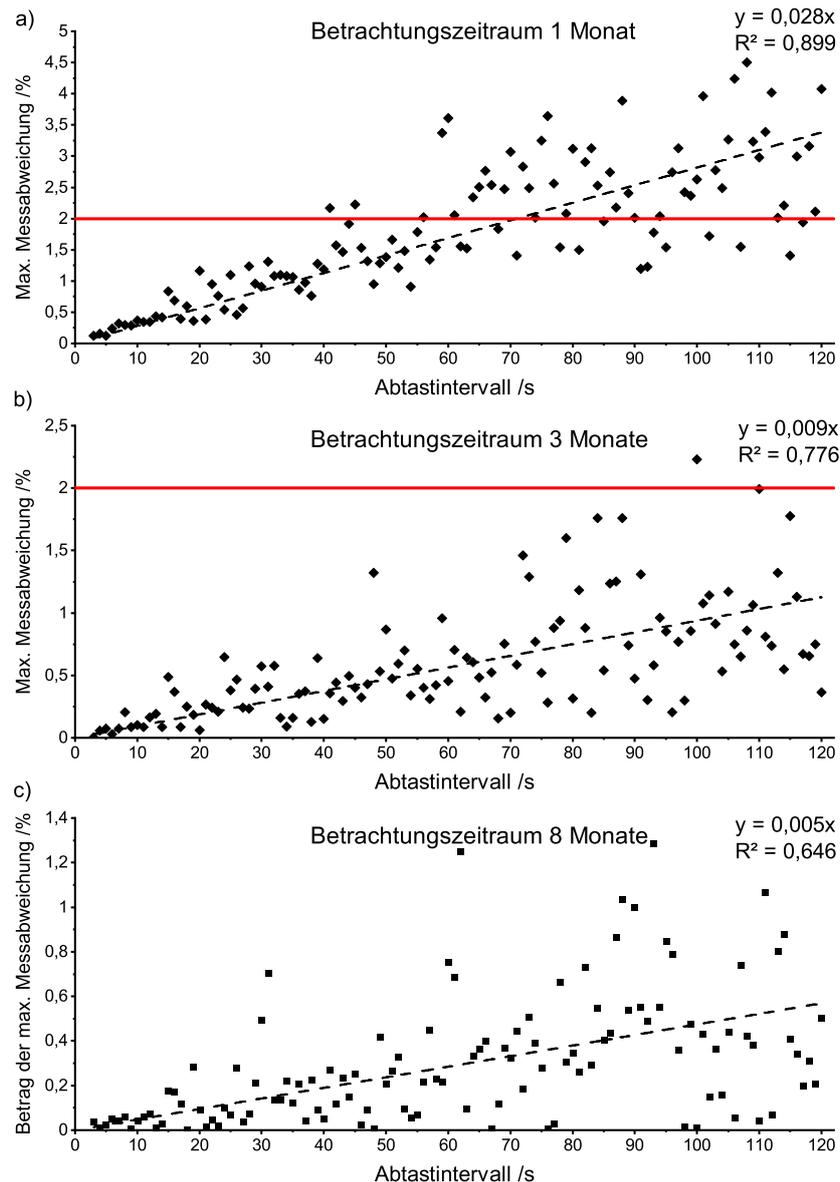


Abbildung 4.7: Messabweichung in Abhängigkeit vom Abtastintervall bei Verwendung eines a) einmonatigen b) dreimonatigen c) achtmonatigen Zeitraums (Mehrfamilienhaus).

4.3.2.3 Stochastisches Tagesprofil

In Abb. 4.8a ist exemplarisch die durch eine Abtastung entstehende Messabweichung im Intervall von 10 s, 30 s, 60 s, 90 s und 120 s in Abhängigkeit zu der Anzahl der Wiederholungen des Profils dargestellt. Es zeigt sich, dass für alle Abtastintervalle die resultierende Abweichung mit einer größeren Anzahl an Profilwiederholungen kleiner wird. Bei einem Abtastintervall von 120 s zeigt sich, dass die Messabweichung jedoch bei 72 Wiederholungen des Profils den kleinsten Wert (0,012 %) erreicht und anschließend wieder anwächst. Aus Abb. 4.8 wird deutlich, dass die Messabweichung aufgrund eines Abtastintervalls von 120 s gegen einen Wert von 0,2 % konvergiert. Grund hierfür kann sein, dass sich Ausgleichsvorgänge nicht konstant bemerkbar

machen, sondern auch Schwankungen unterliegen. Diese Schwankungen führen dazu, dass die Messabweichung bei einer weiteren Wiederholung nicht vorhersagbar ist. Es kann nicht pauschal davon ausgegangen werden, dass die Messabweichung bei einer steigenden Anzahl an Wiederholungen immer kleiner wird. Zudem ist es möglich, dass eine Verschiebung von $1/120$ des Abtastintervalls nicht ausreichend ist, um zyklische Effekte zu vermeiden. Um zyklische Effekte ausschließen zu können, wäre die Generierung von weiteren stochastischen Profilen notwendig. Für die Erzeugung weiterer Profile ist jedoch eine weitere Datenerhebung notwendig.

Um auszuschließen, dass die Konvergenz aufgrund der Verschiebung bei der Wiederholung der Profile auftritt, wurden zwei weitere Verschiebungsintervalle betrachtet. Es wurden zusätzlich Verschiebungen um $1/50$ und $1/20$ des Abtastintervalls analog des vorherigen Vorgehens untersucht. Die sich hierbei ergebenden Messabweichungen sind vergleichbar mit den vorherigen Ergebnissen bei einer Verschiebung um $1/120$ des Abtastintervalls. Die Messabweichung bei einem Abtastintervall von 120 s konvergiert ebenfalls gegen 0,2 %. Eine deutlich größere Verschiebung je Wiederholung wird nicht betrachtet, da eine deutlich größere Verschiebung bedeuten würde, dass nicht mehr die gleichen Profile aneinandergereiht werden, sondern Profile entstehen würden, welche dann jedoch nicht mehr einen Tagesverbrauch widerspiegeln würden. Tageszeitabhängige Charakteristika würden durch zu große Verschiebungen nicht mehr abgebildet werden.

Da der größte Unterschied zwischen berechnetem Volumen und tatsächlichem Volumen nicht zwangsläufig beim größten Abtastintervall auftreten muss, wird die maximal auftretende Abweichung aller Abtastintervalle zwischen 2 s und 120 s betrachtet. In Abb. 4.8b ist die größte Messabweichung bei Berücksichtigung aller Abtastintervalle dargestellt. Die größte Abweichung wird mit steigender Anzahl an Wiederholungen des Profils und einer Verschiebung um $1/120$ des Abtastintervalls kleiner. Da, wie in Abb. 4.8a gezeigt, die Messabweichung für ein Abtastintervall von 120 s gegen eine Abweichung von 0,2 % zu konvergieren scheint, konvergiert auch die maximale Messabweichung aller Abtastintervalle gegen diesen Wert.

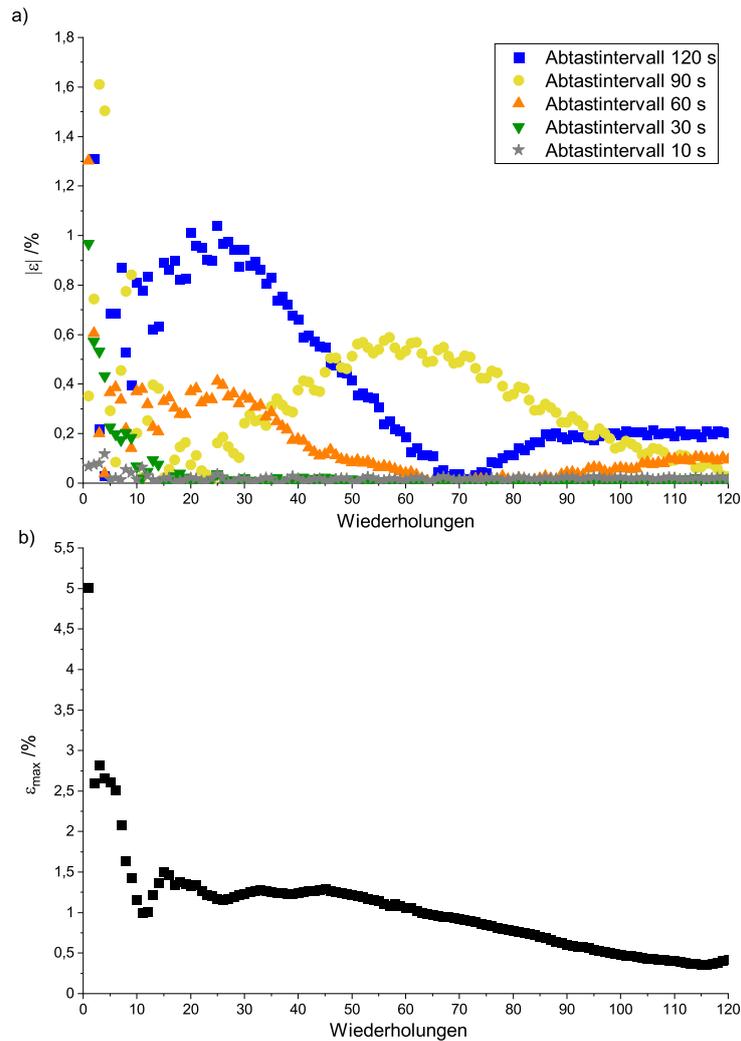


Abbildung 4.8: a) Exemplarische Darstellung der Messabweichung in Abhängigkeit zur Anzahl der Profilwiederholungen des stochastischen Tagesprofils, b) Darstellung der maximalen Messabweichung bei Berücksichtigung aller untersuchten Abtastintervalle mit steigender Anzahl an Profilwiederholungen des stochastischen Tagesprofils.

4.3.2.4 Stochastisches Wochenprofil

In Abb. 4.9a ist die Messabweichung in Abhängigkeit zur Anzahl der Profilwiederholungen exemplarisch für die Abtastintervalle 10 s, 30 s, 60 s, 90 s sowie 120 s dargestellt. Es zeigt sich, dass durch die mehrfache Wiederholung des stochastischen Wochenprofils die Messabweichung und somit auch der Einfluss der Abtastung tendenziell abnimmt. Allgemein kann jedoch nicht davon ausgegangen werden, dass nach jeder Wiederholung des Profils die Messabweichung kleiner ist als zuvor. Eine kurzzeitige ansteigende Messabweichung ist möglich. Dieser Anstieg der Messabweichung wird bei einem Abtastintervall von 120 s deutlich. Beim stochastischen Wochenprofil kommt es durch die Abtastung zu einem prozentualen Unterschied vom berechneten Volumen zum tatsächlichen Volumen von 0,3 %. Durch die mehrmalige

Wiederholung des Profils steigt die Messabweichung bis hin zu 28 Wiederholungen des Profils stetig auf 1,34 % an. Ab 29 Wiederholungen des Profils wird die Messabweichung stetig kleiner und beträgt nach 120 Wiederholungen noch 0,06 %. Die maximal resultierende Abweichung ist in Abb. 4.9b dargestellt. Wie bereits beim stochastischen Tagesprofil zeigt sich, dass die maximal resultierende Abweichung mit zunehmender Wiederholung kleiner wird. Die maximale Messabweichung beträgt nach 120 Wiederholungen 0,3 %.

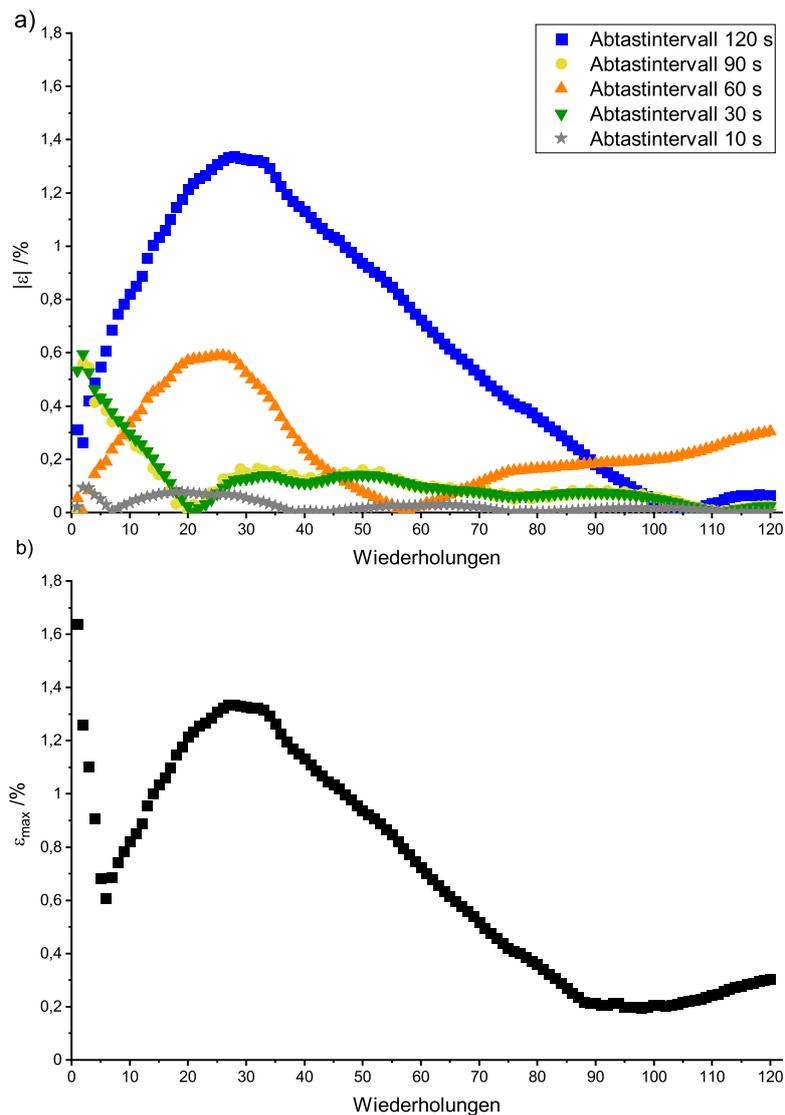


Abbildung 4.9: a) Exemplarische Darstellung der Messabweichung in Abhängigkeit zur Anzahl der Profilwiederholungen des stochastischen Wochenprofils, b) Darstellung der maximalen Messabweichung bei Berücksichtigung aller untersuchten Abtastintervalle mit steigender Anzahl an Profilwiederholungen des stochastischen Wochenprofils.

4.3.2.5 Zwischenfazit zum Einfluss des Betrachtungszeitraums

Die Untersuchungen zeigen, dass unabhängig vom betrachteten Datensatz eine Verlängerung des Beobachtungszeitraums mit einer Reduktion der Messabweichung in Folge der Abtastung korreliert. Daraus ergibt sich, dass zukünftige Vorgaben für ein maximal zulässiges Abtastintervall stets unter Berücksichtigung eines definierten maximalen Betrachtungszeitraums spezifiziert werden müssen.

4.3.3 Einfluss des Startzeitpunkts der Abtastung

Der Startzeitpunkt der Abtastung hat einen Einfluss auf das erfasste Volumen. Aus diesem Grund wurden neben unterschiedlichen Betrachtungszeiträumen auch verschiedene Startzeitpunkte der Abtastung für die verschiedenen Verbrauchsprofile untersucht. Wie bei der vorherigen Darstellung der Ergebnisse werden im Folgenden die Ergebnisse zur Untersuchung des Einflusses des Startzeitpunkts nach den untersuchten Profilen getrennt dargestellt und diskutiert.

4.3.3.1 Einfamilienhaus

Der Einfluss des Startzeitpunkts wurde bei den Profilen des Einfamilienhauses für alle Betrachtungszeiträume untersucht. Hierbei zeigt sich, dass bereits eine Verschiebung von wenigen Sekunden einen erheblichen Einfluss auf die durch die Abtastung entstehende Abweichung hat. Exemplarisch sind in Abb. 4.10a) Messabweichungen in Folge der Abtastung des Ausgangsprofils und des um 1 s, 2 s, 5 s und 10 s verschobenen Profils dargestellt. Insbesondere bei längeren Abtastintervallen ist erkennbar, dass der Startzeitpunkt einen großen Einfluss auf die Messabweichung hat. Beispielsweise wird dies bei einem Abtastintervall von 86 s deutlich. Bei diesem Abtastintervall entsteht bei dem um 2 s verschobenen Profil eine Messabweichung von $\epsilon = -2,54 \%$. Das gleiche Abtastintervall führt bei dem um 10 s verschobenen Profil zu einer deutlich anderen Abweichung von $\epsilon = 0,19 \%$. Der Startzeitpunkt der Abtastung hat bei längeren Abtastintervallen einen größeren Einfluss, dies wird in Abb. 4.10b) deutlich. In diesem Teil der Abbildung ist der Betrag der Differenz der Messabweichung bei Verwendung des originalen Profils und des jeweils verschobenen Profils dargestellt. Es zeigt sich, dass mit längeren Abtastintervallen die Spanne der Messabweichungen größer wird. Diese größere Streuung ist ein Zeichen dafür, dass der Einfluss des Startpunkts der Abtastung mit längeren Abtastintervallen größer wird.

Sowohl kleine Verschiebungen als auch der Start der Abtastung in einem ande-

ren Quartal haben einen Einfluss auf die resultierende Messabweichung. Dies ist in Abb. 4.10c) dargestellt. Das um drei Monate verschobene Jahresprofil weist bei einem Abtastintervall von 28 s eine Abweichung von $\epsilon = -1,31\%$ auf und das um neun Monate verschobene Profil bei gleichem Abtastintervall einen Unterschied von $\epsilon = 0,27\%$. Unter allen betrachteten Startzeitpunkten existiert kein idealer Startzeitpunkt, bei welchem zu jeder Zeit die geringste Messabweichung auftritt.

Der Startzeitpunkt des Jahresprofils wurde zwischen 1 s und 120 s variiert. Mit der Verschiebung um je drei Monate führt dies zu einer Datenbasis von 124 betrachteten Startzeitpunkten. In Abb. 4.10d) ist die maximale Messabweichung für alle Startzeitpunkte dargestellt. Zusätzlich sind die bereits zuvor verwendeten Grenzen (0,25 % bis 2 %) eingezeichnet.

Durch die Einbeziehung weiterer Startzeitpunkte wird das Bestimmtheitsmaß der linearen Regression der maximalen Messabweichung deutlich verbessert. Das Bestimmtheitsmaß der linearen Regression beträgt unter der Berücksichtigung der 124 Startzeitpunkte 95,43 % anstatt zuvor 60,7 %. Die Betrachtung weiterer Startzeitpunkte hat zudem zur Folge, dass die in Tab. 4.3 angegebenen Grenzen teilweise bereits bei kürzeren Abtastintervallen überschritten werden. In Tab. 4.4 sind die Abtastintervalle, bei denen die Grenzen bei der erweiterten Betrachtung zum ersten Mal überschritten werden, angegeben.

Tabelle 4.4: Übersicht über die Zeitpunkte, an denen die Messabweichung das erste Mal die Grenze aus der ersten Zeile überschreitet (Berücksichtigung aller betrachteten Startzeitpunkte und Betrachtungszeiträume des Profils eines Einfamilienhauses).

Betrachtungszeitraum	Messabweichung				
	>0,25 %	>0,5 %	>1 %	>1,5 %	>2 %
eine Woche	2 s	2 s	2 s	4 s	5 s
ein Monat	2 s	4 s	8 s	10 s	11 s
drei Monate	5 s	7 s	13 s	13 s	22 s
sechs Monate	7 s	13 s	26 s	36 s	43 s
ein Jahr	7 s	14 s	28 s	43 s	77 s

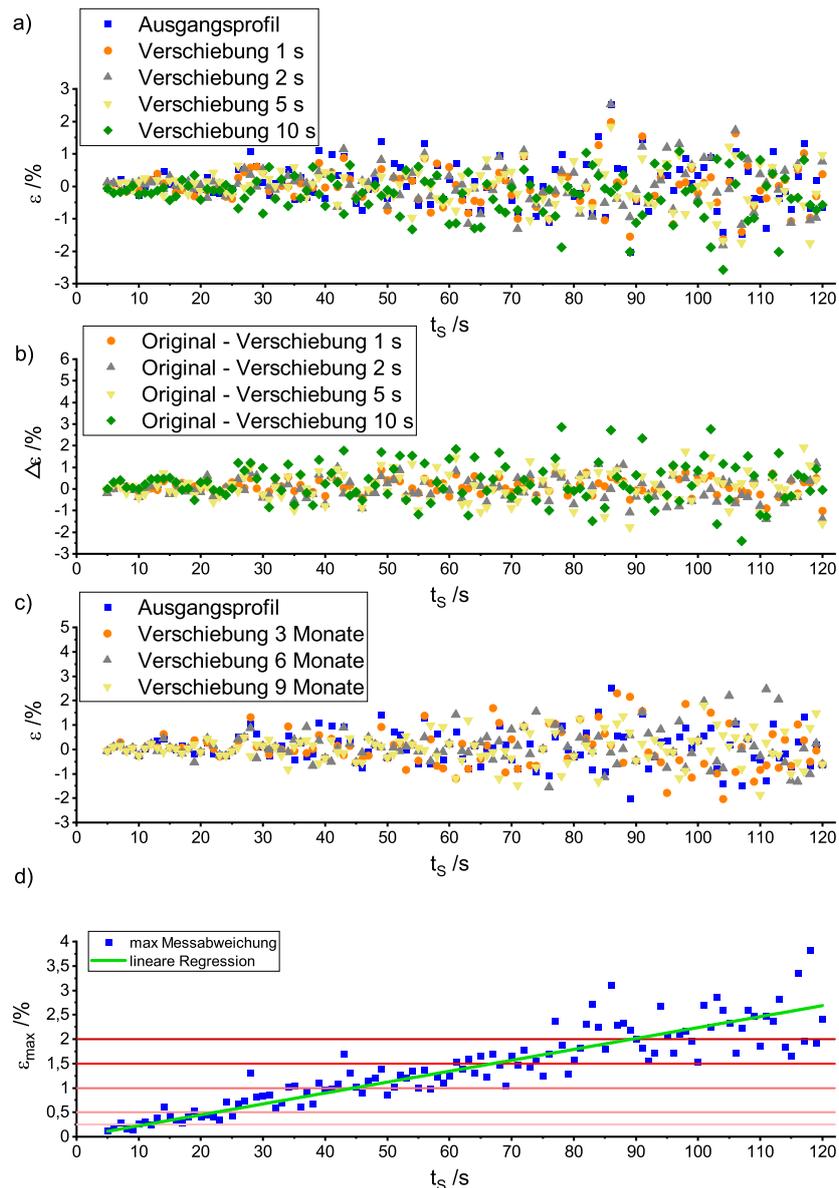


Abbildung 4.10: a) Messabweichung durch die Abtastung des einjährigen Profils sowie die Messabweichungen der um 1 s, 2 s, 5 s und 10 s verschobenen Profile. b) Differenz zwischen der Messabweichung bei Verwendung des ursprünglichen Profils und der Messabweichung bei den verschobenen Profilen. c) Messabweichung durch die Abtastung des Ausgangsprofils sowie die Messabweichungen der um drei Monate, sechs Monate und neun Monate verschobenen Profile. d) Maximale Messabweichung unter Berücksichtigung aller betrachteten Startzeitpunkte.

4.3.3.2 Mehrfamilienhaus

In diesem Teil der Arbeit wurde ebenfalls auf eine maximale Betrachtungsdauer von acht Monaten zurückgegriffen, da sich bei den vorangegangenen Untersuchungen gezeigt hat, dass die Auswirkungen des Abtastintervalls mit dem achtmonatigen Zeitraum sehr gut untersucht werden konnten.

Wie beim Einfamilienhaus wurden ebenfalls 120 verschiedenen Startzeitpunkte betrachtet und die maximale Messabweichung bestimmt. Hierbei zeigt sich, dass die Messabweichungen bei gleichem Betrachtungszeitraum und gleichem Abtastintervall deutlich kleiner sind als die Abweichungen bei dem Profil des Einfamilienhauses. Der Verlauf der maximalen Messabweichung bei einer Betrachtungsdauer von acht Monaten ist exemplarisch in Abb. 4.11 dargestellt. In Tab. 4.5 sind außerdem die Abtastintervalle angegeben, bei denen die Messabweichungen erstmals die festgelegten Grenzwerte überschreiten. Es zeigt sich, dass im Vergleich zum Einfamilienhaus die Grenzen erst bei deutlich längeren Abtastintervallen überschritten werden. So wird zum Beispiel für den dreimonatigen Zeitraum die 0,5 %-Grenze erst bei einem Abtastintervall von 15 s erstmalig überschritten. Beim Einfamilienhaus ist dieses bereits bei einem Abtastintervall von 7 s der Fall. Zudem treten, unter Berücksichtigung von Abtastintervallen bis zu 120 s, keine Messabweichungen größer als 1,5 % auf.

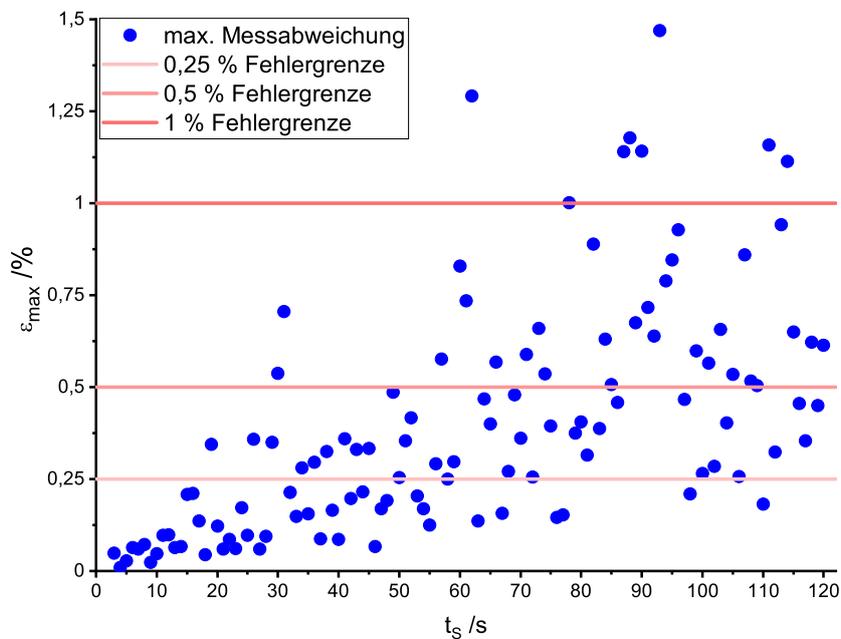


Abbildung 4.11: Maximale Messabweichung in Abhängigkeit vom Abtastintervall unter Berücksichtigung von 120 verschiedenen Startzeitpunkten bei einer Betrachtungsdauer von acht Monaten des Mehrfamilienhauses.

Eine mögliche Ursache hierfür besteht darin, dass das Durchflussprofil des Mehrfamilienhauses ein insgesamt größeres Volumen aufweist. Das Mehrfamilienhausprofil hat ein Volumen von 70,84 m³, wohingegen das Profil des Einfamilienhauses lediglich ein Volumen von 27,91 m³ besitzt. Eine weitere mögliche Ursache ist, dass bei dem Verbrauchsprofil für das Einfamilienhaus die durchschnittliche Dauer eines Durchflusses sehr viel kürzer ist als beim Mehrfamilienhaus. Das achtmonatige Verbrauchsprofil für das Mehrfamilienhaus weist einen durchschnittlichen Durchfluss von 10,81 l/h auf. Die durchschnittliche Dauer eines Durchflusspunkts beträgt

22,88 s. Beim einjährigen Verbrauchsprofils des Einfamilienhauses hingegen dauert ein Durchflussspunkt bei einem durchschnittlichen Verbrauch von 12,09 l/h im Durchschnitt 90,99 s.

Werden die Zeiträume ohne Durchfluss nicht betrachtet, weist das Mehrfamilienhaus einen durchschnittlichen Verbrauch von 12,17 l/h mit einer durchschnittlichen Dauer von 4,19 s auf. Beim einjährigen Profil des Einfamilienhauses beträgt ohne Einbeziehung der Nulldurchflüsse die durchschnittliche Entnahmezeit 2,5 s bei einem durchschnittlichen Durchfluss von 13,22 l/h. Die durchschnittliche Zeit der Nulldurchflüsse beim Mehrfamilienhaus beträgt 171,38 s und beim Einfamilienhaus 1035,67 s. Die durchschnittlich größere Dauer der Durchflussspunkte beim Profil des Mehrfamilienhauses führt vermutlich dazu, dass weniger Bereiche der Über- und Unterregistrierung des Volumens vorliegen. Infolgedessen wird die durch die Abtastung resultierende Abweichung insgesamt kleiner.

Eine zweite Ursache für die kleineren Messabweichungen könnte daran liegen, dass der durchschnittliche Unterschied zwischen zwei Durchflussspunkten beim Mehrfamilienhaus bei 23,25 l/h liegt und beim Einfamilienhaus hingegen bei 29,63 l/h. Die geringe Differenz zwischen den Durchflussspunkten könnte somit ebenfalls mit kleineren Bereichen der Über- bzw. Unterregistrierung einhergehen. Dies hätte ebenfalls eine geringere Messabweichung zur Folge.

Tabelle 4.5: Übersicht über die Zeitpunkte, an denen die Messabweichung das erste Mal die Grenze aus der ersten Zeile überschreitet (Berücksichtigung aller betrachteten Startzeitpunkte und Betrachtungszeiträume des Profils eines Mehrfamilienhauses).

Betrachtungszeitraum	Messabweichung				
	>0,25 %	>0,5 %	>1 %	>1,5 %	>2 %
ein Monat	6 s	10 s	15 s	25 s	40 s
drei Monate	13 s	15 s	48 s	79 s	84 s
acht Monate	19 s	30 s	62 s	-	-

4.3.3.3 Stochastisches Tagesprofil

Ebenso wie bei den aus gemessenen Daten abgeleiteten Profilen wurden verschiedene Startzeitpunkte bei den stochastischen Profilen untersucht. Exemplarisch ist in Abb. 4.12a die resultierende Messabweichung unter Verwendung des Ausgangsprofils bei einer Verschiebung um 1801 s und 43341 s dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass es wie bei den Profilen des Ein- und Mehrfamilienhauses bei gleichem Abtastintervall zu stark schwankenden Abweichungen kommt. Bei beispielsweise einem Abtastintervall von 87 s tritt eine Abweichung zwischen 5,34 % und -3,46 % auf. Ebenso wie bei den vorherigen Betrachtungen nimmt die Streuung mit längeren Abtastintervallen zu.

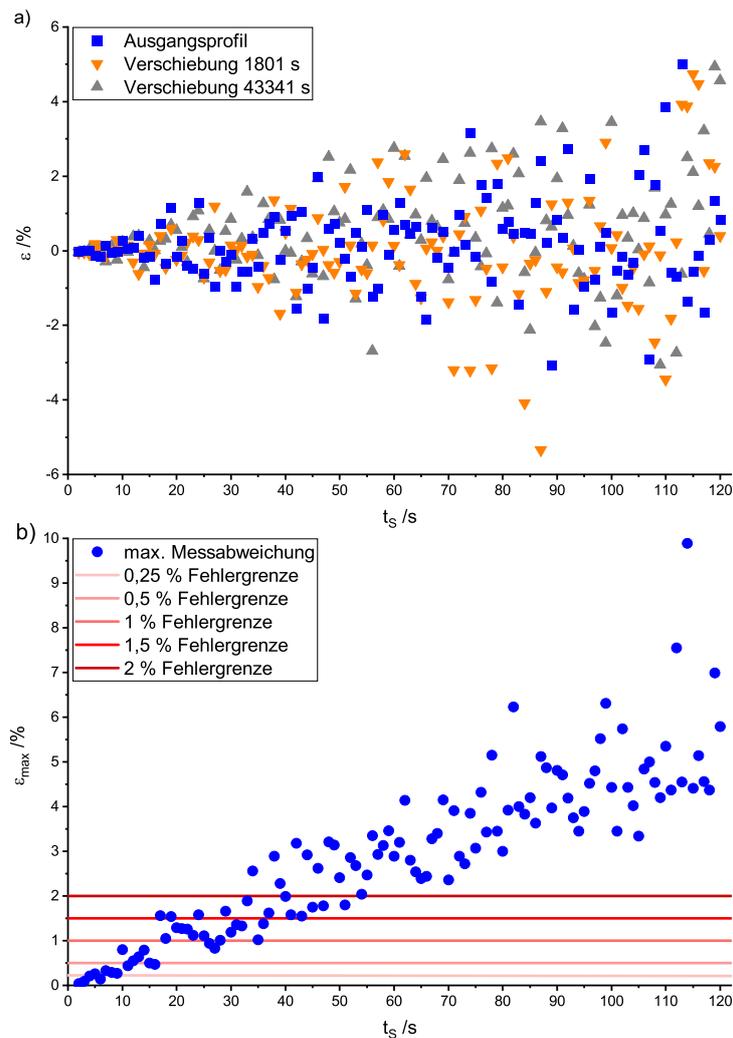


Abbildung 4.12: a) Einfluss des Startzeitpunkts für das stochastische Tagesprofil bei Verschiebungen um 1801 s und 43341 s b) maximale Messabweichung aller betrachteter Startzeitpunkte für das stochastische Tagesprofil.

Zusätzlich wurde der Startzeitpunkt um bis zu 120 s verschoben. Die Abtastintervalle, bei denen unter Berücksichtigung der 125 Fälle die gewählten Fehlergrenzen erstmalig überschritten werden, sind in Tab. 4.6 angegeben. Bei beispielsweise einem Abtastintervall von 10 s tritt erstmalig eine Messabweichung größer als 0,5 % auf. Bei einem Abtastintervall von 17 s ist die Messabweichung erstmalig größer als 1,5 %, ohne dass diese vorher größer als 1 % war. Daher ergibt sich für die 1 %-Grenze und 1,5 %-Grenze das gleiche Abtastintervall. Es kommt zudem vor, dass nach dem erstmaligen Überschreiten der jeweiligen Grenze die Messabweichung wieder kleiner wird.

Tabelle 4.6: Übersicht über die Zeitpunkte, an denen die Messabweichung das erste Mal die Grenze aus der ersten Zeile überschreitet (Berücksichtigung aller betrachteten Startzeitpunkte und Betrachtungszeiträume des stochastischen Tagesprofils).

Betrachtungszeitraum	Messabweichung				
	>0,25 %	>0,5 %	>1 %	>1,5 %	>2 %
ein Tag	5 s	10 s	17 s	17 s	34 s

4.3.3.4 Stochastisches Wochenprofil

Analog zu allen bisher untersuchten Profilen ist die Messabweichung aufgrund der Abtastung nicht einseitig ausgeprägt. Die maximale Messabweichung aller betrachteten Startzeitpunkte ist in Abb. 4.13 dargestellt.

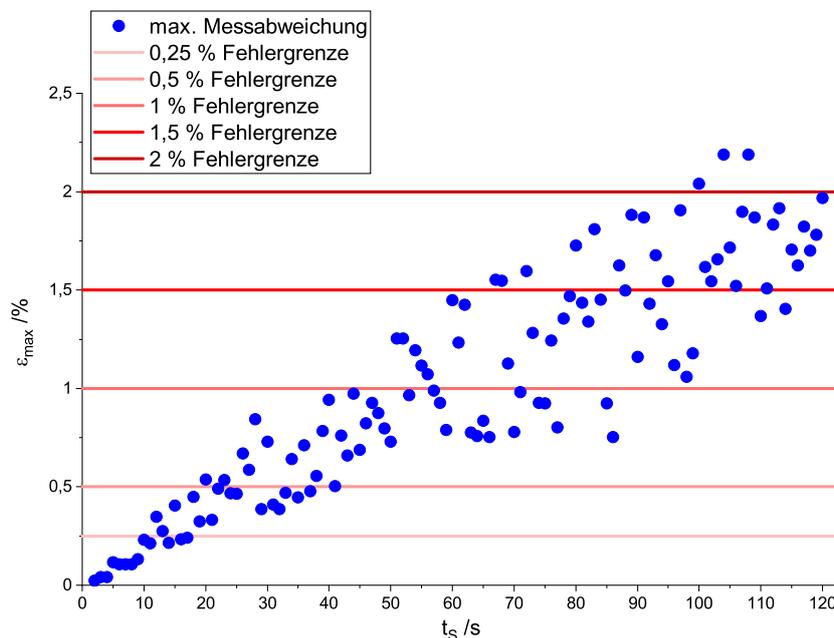


Abbildung 4.13: Maximale Messabweichung aller betrachteter Startzeitpunkte des stochastischen Wochenprofils.

Die Abweichung, die durch die Abtastung entsteht, wächst im Vergleich zum stochastischen Tagesprofil bei längeren Abtastintervallen langsamer an. Daher werden die bisher festgelegten Grenzwerte erst bei längeren Abtastintervallen überschritten. Die Abtastintervalle, bei denen die gewählte Grenze das erste Mal überschritten wird, sind in Tab. 4.7 angegeben. Die gewählten Grenzwerte der Messabweichung werden im Vergleich zum Profil für das Einfamilienhaus erst bei deutlich längeren Abtastintervallen erstmalig überschritten. So wird beispielsweise die 2 %-Grenze anstatt bei einem Abtastintervall von 5 s das erste Mal bei einem Abtastintervall von 100 s überschritten. Dies impliziert, dass Abtastintervalle, die auf der Grundlage eines stochastischen Modells festgelegt werden und eine akzeptable Messabweichung aufweisen, möglicherweise nicht für ein empirisch erfasstes Profil anwendbar sind und vice versa. Dies hat zur Folge, dass die stochastischen Profile nicht anstelle

von gemessenen Profilen verwendet werden können, wenn es beispielsweise um die Festlegung von maximal zulässigen Abtastintervallen geht. Um zum Beispiel die Tendenz des Einflusses neuer Technologien zu zeigen, können die stochastischen Profile nichtsdestotrotz genutzt werden.

Tabelle 4.7: Übersicht über die Zeitpunkte, an denen die Messabweichung das erste Mal die Grenze aus der ersten Zeile überschreitet (Berücksichtigung aller betrachteten Startzeitpunkte und Betrachtungszeiträume des stochastischen Wochenprofils).

Betrachtungszeitraum	Messabweichung				
	>0,25 %	>0,5 %	>1 %	>1,5 %	>2 %
eine Woche	12 s	20 s	51 s	67 s	100 s

4.3.3.5 Zwischenfazit zum Einfluss des Startzeitpunkts der Abtastung

Anhand der untersuchten Datensätze zeigt sich, dass je nach Startzeitpunkt der Abtastung unterschiedliche Messabweichungen auftreten. Es ist kein idealer Startzeitpunkt identifizierbar, zu welchem bei jedem Profil jederzeit die geringsten Messabweichungen auftreten. Bereits kleine Verschiebungen des Startzeitpunkts haben einen Einfluss auf die Messabweichung. Somit ist es für eine vollständige Beurteilung des Einflusses eines Abtastintervalls zwingend erforderlich, alle möglichen Startzeitpunkte zu betrachten.

4.3.4 Stochastische Untersuchung der Messabweichung aufgrund des Abtastintervalls

Bislang erfolgte eine Untersuchung der maximalen Messabweichung und bei welchem Abtastintervall die Messabweichung erstmalig definierte Grenzwerte überschreitet. Zwar muss jederzeit gewährleistet werden, dass ein Wasserzähler die gesetzlichen Vorgaben einhält, jedoch kann zur Festlegung eines maximal zulässigen Abtastintervalls ein 99 %- Konfidenzintervall oder ggf. auch ein 95 %- Konfidenzintervall hilfreich sein. Bei der Gesamtbeurteilung des Abtastintervalls darf jedoch die maximale Messabweichung nicht vernachlässigt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine stochastische Untersuchung unter der Verwendung der in 4.2.6 dargestellten Methoden für die beiden Arten von Datensätzen durchgeführt. Die Ergebnisse werden nachfolgend in Abhängigkeit vom Datensatz diskutiert.

4.3.4.1 Einfamilienhaus

Für die statistische Betrachtung der Messabweichung aufgrund des Abtastintervalls werden alle untersuchten Startzeitpunkte verwendet. Dadurch ergeben sich für einen Betrachtungszeitraum von einem Jahr 124 betrachtete Fälle, bei sechs Monaten 242 Fälle, bei drei Monaten 484 Fälle und bei einem Monat 1452 Fälle. In Abb. 4.14 und Abb. 4.15 sind für die Betrachtungszeiträume von einem Jahr und einer Woche die Fehlerverteilung für Abtastintervalle bis zu 30 s exemplarisch dargestellt. Zudem ist die durchschnittliche Messabweichung sowie die obere Grenze des 99 %-Konfidenzintervalls dargestellt. Die Fehlerverteilungen für die Betrachtungszeiträume von einem halben Jahr, einem Quartal und einem Monat sind im Anhang A.2.1 zu finden. Es zeigt sich, dass mit längeren Abtastintervallen die durchschnittliche Messabweichung größer wird und damit einhergehend ebenso die obere Grenze des 99 %-Vertrauensintervalls. Für einen Betrachtungszeitraum von einem Jahr treten bei einem Abtastintervall von 14 s das erste Mal Abweichungen über 0,5 % auf. Die obere Grenze des 99 %-Vertrauensintervalls beträgt für die dargestellten Abtastintervalle maximal 0,43 % bei einem Abtastintervall von 28 s. Dies bedeutet, dass bei einem Abtastintervall von 28 s 99 % der auftretenden Abweichungen kleiner als 0,43 % sind. Bei kürzeren Betrachtungszeiträumen wird die maximale obere Grenze des 99 %-Vertrauensintervalls größer. Bei einem Betrachtungszeitraum von sechs Monaten liegt die obere Grenze des 99 %-Konfidenzintervalls bei maximal 0,54 %, während sie sich für den Zeitraum von drei Monaten auf 0,74 % erhöht. Für einen Betrachtungszeitraum von einem Monat beträgt die obere Grenze 1,14 %, und bei einer Betrachtung von einer Woche steigt sie auf 2,06 %. Da die Differenz vom 99 %-Konfidenzintervall zum 95 %-Konfidenzintervall bei einem Abtastintervall von 120 s lediglich 0,05 % beträgt und mit kürzeren Abtastintervallen kleiner wird, wird im Rahmen dieser Arbeit auf die Darstellung des 95 %-Vertrauensintervalls verzichtet. Zusätzlich zur oberen Grenze des Konfidenzintervalls darf die maximale Messabweichung je Abtastintervall jedoch nicht vernachlässigt werden. Die maximale Messabweichung ist bei einem Betrachtungszeitraum von einem Jahr für Abtastintervalle kleiner als 30 s vernachlässigbar. Für Abtastintervalle kleiner als 30 s treten in keinem der untersuchten Fälle Messabweichungen größer als 1 % auf. Beim einwöchigen Zeitraum hingegen ist bei einem Abtastintervall von 5 s bereits die Messabweichung in 24 Fällen größer als 2 %. Diese Anzahl ist in Relation zu den 6171 Fällen zwar sehr gering (0,39 %), jedoch sollte dies bei einer Festlegung des Grenzwertes für ein maximal zulässiges Abtastintervall berücksichtigt werden.

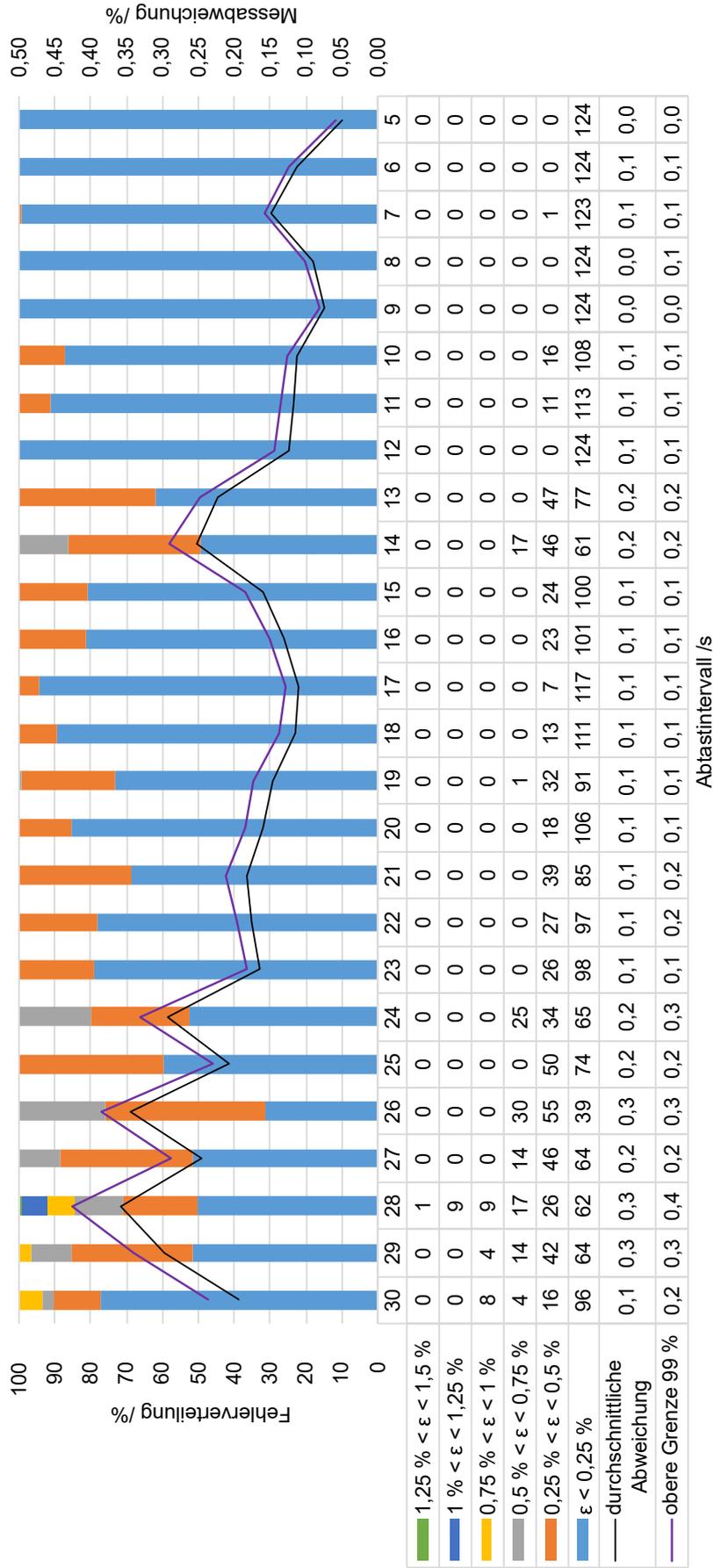


Abbildung 4.14: Verteilung der Messabweichungen bei einer Betrachtungsdauer von einem Jahr.

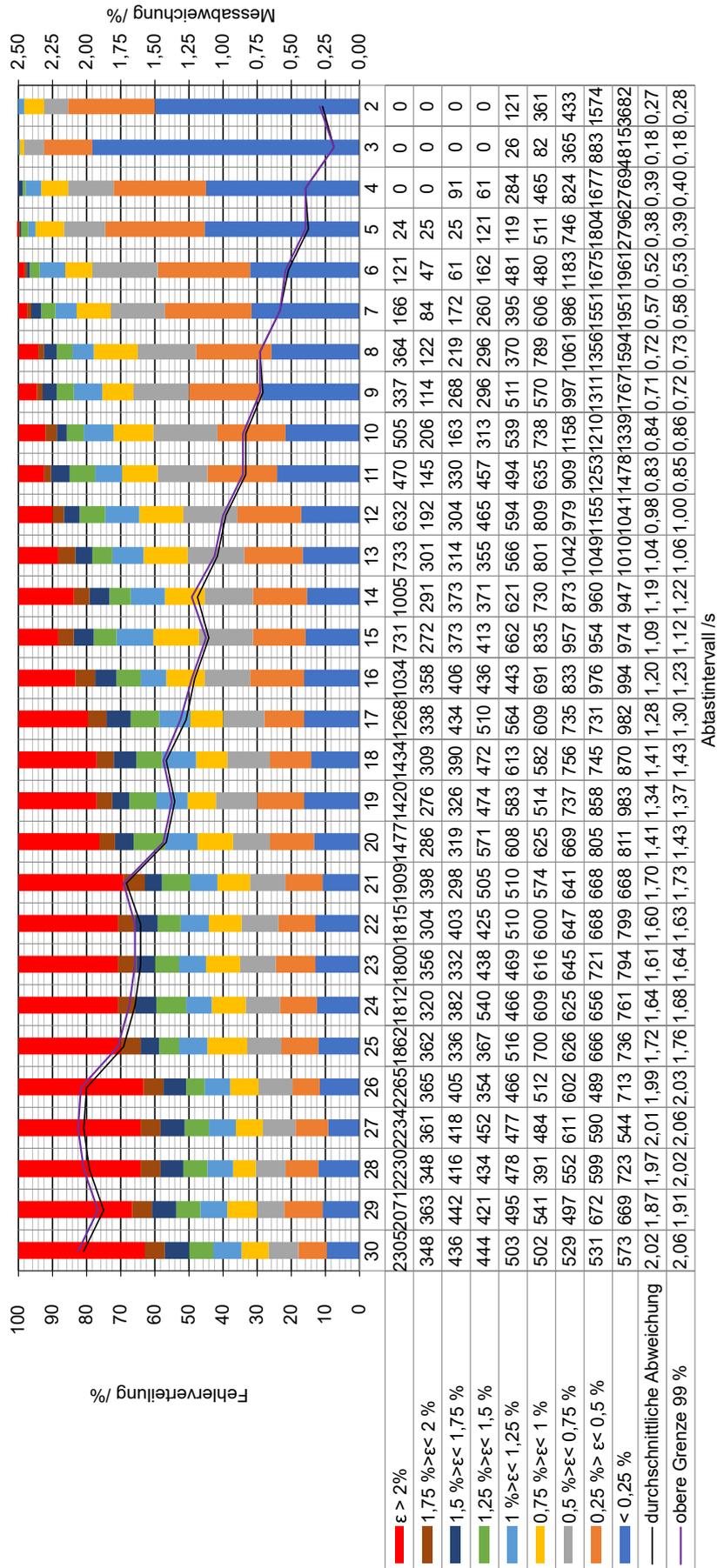


Abbildung 4.15: Verteilung der Messabweichungen bei einer Betrachtungsdauer von einer Woche.

4.3.4.2 Mehrfamilienhaus

Neben den Einfamilienhäusern wurde auch der Einfluss des Abtastintervalls bei Mehrfamilienhäusern betrachtet, so dass eine statistische Auswertung möglich ist. Hierbei wurden die 121 untersuchten Startzeitpunkte betrachtet. In den Abb. A.15, Abb. A.16 und A.17 im Anhang ist die durchschnittliche Messabweichung, die obere Grenze des 99 %-Konfidenzintervalls sowie die Fehlerverteilung bei einem Betrachtungszeitraum von acht Monaten, drei Monaten respektive einem Monat dargestellt. Bei der Verteilung der Messabweichungen zeigt sich, wie in Abschnitt 4.3.3.2 bereits erläutert, dass insgesamt kleinere Messabweichungen als beim Einfamilienhaus auftreten. Auffällig ist, dass wider Erwarten die maximale, durchschnittliche Abweichung des dreimonatigen Betrachtungszeitraums (0,32 %) kleiner ist als die des achtmonatigen Zeitraums (0,46 %). Die gesamte durchschnittliche Messabweichung für Abtastintervalle zwischen 3 s und 30 s hingegen ist, wie zu erwarten, für den achtmonatigen Zeitraum (0,09 %) kleiner als für den dreimonatigen Zeitraum (0,13 %).

Bei einer Betrachtungsdauer von einer Woche liegen bei einem Abtastintervall kleiner als 6 s ausschließlich Abweichungen von weniger als 0,25 % vor. Bei einem Abtastintervall von 15 s treten erstmals Abweichungen größer als 1 % auf. Beim achtmonatigen Zeitraum sind für Abtastintervalle kleiner als 19 s die Messabweichungen ausschließlich kleiner als 0,25 %.

4.3.4.3 Stochastisches Tagesprofil

Neben der durchschnittlichen Messabweichung und der oberen Grenze des 99 %-Konfidenzintervalls ist die Fehlerverteilung im Anhang in Abb. A.18 dargestellt.

Ebenso wie für die gemessenen Profile zeigt sich beim stochastischen Tagesprofil, dass neben der maximal auftretenden Abweichung auch die durchschnittliche Messabweichung kleiner wird. Einhergehend mit der Messabweichung wird ebenso die obere Grenze des 99 %-Vertrauensintervalls mit kürzeren Abtastintervallen kleiner. Für Abtastintervalle kleiner als 4 s treten ausschließlich Abweichungen im theoretisch erfassten Volumen von kleiner als 0,25 % auf. Eine Messabweichung von ausschließlich kleiner 1 % ist bei den untersuchten 121 Startzeitpunkten bei einem Abtastintervall von kleiner als 10 s gegeben.

4.3.4.4 Stochastisches Wochenprofil

Die durchschnittlichen Messabweichungen, die obere Grenze des 99 %-Konfidenzintervalls sowie die Fehlerverteilung des stochastischen Wochenprofils sind im Anhang in Abb. A.19 dargestellt.

Wie bei den zuvor untersuchten Profilen sinkt die durchschnittliche Messabweichung mit kürzer werdenden Abtastintervallen. Des Weiteren treten ab einem Abtastintervall von 11 s ausschließlich Abweichungen im erfassten Volumen von kleiner 0,25 % auf. Aufgrund des längeren Betrachtungszeitraums von einer Woche im Vergleich zu einem Tag ist zudem auch die obere Grenze des 99 %-Konfidenzintervalls beim stochastischen Wochenprofil kleiner als beim stochastischen Tagesprofil. Wie bereits bei der Darstellung der maximalen Messabweichung in Kapitel 4.3.3.4 zeigt sich, dass die Fehlerverteilung des stochastischen Wochenprofils nicht mit den Daten des wöchentlichen Betrachtungszeitraums des Einfamilienhauses vergleichbar ist. Demzufolge können die Datensätze nicht äquivalent genutzt werden.

4.3.5 Zwischenfazit

Bei der Untersuchungen der Verteilung der Messabweichungen bestätigt sich, dass bei einem längeren Abtastintervall die Messabweichung aufgrund der Abtastung zunimmt. Ebenso wird die obere Grenze des 99 %-Konfidenzintervalls größer. Basierend auf den Ergebnissen erscheint es empfehlenswert, zukünftig maximal zulässige Werte für das Abtastintervall in Abhängigkeit vom Betrachtungszeitraum festzulegen. Ein Abtastintervall von weniger als 10 Sekunden wird als angemessen erachtet, wenn der Betrachtungszeitraum mindestens einen Monat beträgt.

4.3.6 Experimentelle Überprüfung der Auswirkungen diskreter Messungen

Nach den theoretischen Untersuchungen zum Einfluss des Abtastintervalls werden in diesem Abschnitt die Messabweichungen handelsüblicher, diskret messender Hauswasserzähler untersucht. Hierzu wurde ein realitätsnahes Verbrauchsprofil mit der Dauer von 24 Stunden entwickelt und mittels der Infrastruktur aus Kapitel 3.2.1 realisiert. Ziel der vorliegenden Untersuchungen war es, erstens ein realitätsnahes Tagesverbrauchsprofil zu implementieren, um zukünftig Wasserzähler unter praxisnahen Bedingungen testen zu können. Zweitens sollte überprüft werden, ob bei handelsüblichen elektronischen Wasserzählern infolge der diskreten Messverfahren

Messabweichungen auftreten, die auf den Einfluss des Abtastintervalls zurückzuführen sind.

4.3.7 Experimentellen Untersuchung

In Abb. 4.16 sind die Messabweichungen der Zähler zum Start der Untersuchungen dargestellt. Die Messabweichungen der untersuchten Zähler zu Beginn der Versuchsreihe liegen im Bereich von -2,2 % bis +2,8 %. Die Unterschiede zwischen den Zählern eines Herstellers sind gering. Die Messabweichungen aller untersuchten Zähler liegen im Bereich der zulässigen Verkehrsfehlergrenzen (siehe 2.3).

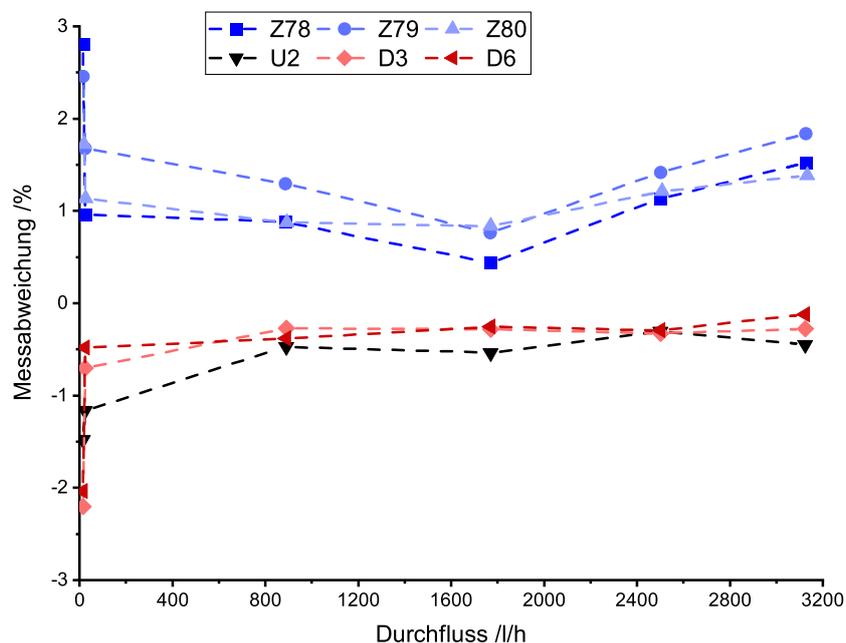


Abbildung 4.16: Messabweichung der Zähler bei konstantem Durchfluss zu Beginn der Versuche.

Bei der Durchführung der Versuche kam es zu fehlerhaften Impulserfassungen. Der Fehler in der Impulserfassung führt dazu, dass für die Zähler D3 und D6 lediglich drei Messungen vorliegen. In Abb. 4.17 sind die Messabweichungen der Zähler bei der Messung des zuvor ausgearbeiteten Tagesprofils dargestellt. Die Messabweichungen waren in der Größenordnung zu erwarten, da der maximale nominale Durchfluss des Profils 238 l/h und der kleinste nominale Durchfluss 5 l/h beträgt. Diese nominalen Durchflüsse liegen im unteren Bereich der Fehlerkurve in Abb. 4.16. Somit war davon auszugehen, dass auch die Messabweichungen bei den dynamischen Messungen in diesem Bereich liegen. Dies wurde anhand der Untersuchungen bestätigt. Aufgrund der gleichen Größenordnung der Messabweichung bei konstanter und dynamischer Messung kann davon ausgegangen werden, dass das von den Zählern verwendete Abtastintervall keinen nachweisbaren Einfluss auf die Messrichtigkeit des

Impulsausgangs des Zählers besitzt. Da für die Abrechnung die Anzeige des Zählers rechtlich bindend ist, wurde ebenfalls die Messrichtigkeit der Anzeige untersucht.

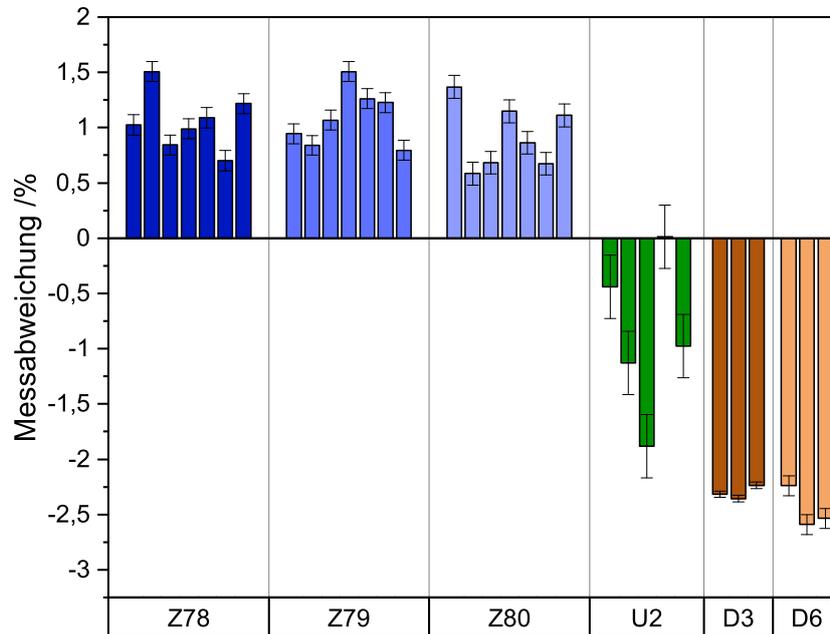


Abbildung 4.17: Messabweichung der Wasserzählern bei der Erfassung des realitätsnahen Tagesprofils unter Nutzung des Impulsausgangs.

In Abb. 4.18 sind die Messabweichungen zwischen der gravimetrischen Referenz und der Anzeige des jeweiligen Zählers dargestellt. Es zeigt sich bei der Messung des Tagesprofils, dass die Messabweichung (Anzeige) in der auf Basis der konstanten Messung erwarteten Größenordnung liegt. Folglich hat das Abtastintervall keine nachweisbaren Auswirkungen auf die Messrichtigkeit der Anzeige der untersuchten Zähler.

Bei der theoretischen Betrachtung des realitätsnahen Tagesprofils bezüglich der Auswirkung des Abtastintervalls auf die Messabweichung des Zählers ergeben sich Messabweichungen zwischen 26,75 % und -40,18 %. Der Betrag der Messabweichungen für Abtastintervalle bis zu 30 s ist in Abb. 4.19a) dargestellt. Der Mittelwert dieser mittleren Messabweichung ist Abb. 4.19b) zu entnehmen. Es zeigt sich, dass für Abtastintervalle bis zu 30 s Messabweichungen bis zu 9,4 % auftreten.

Bei einem Abtastintervall von 5 s wurden bei den 120 untersuchten Startzeitpunkten maximale Messabweichungen von bis zu 1,18 % festgestellt, während die durchschnittliche absolute Messabweichung im Mittel 0,78 % betrug. Die untersuchten Zähler weisen keine Veränderung der Messrichtigkeit in dieser Größenordnung zwischen Messungen mit konstantem und dynamischem Durchfluss auf.

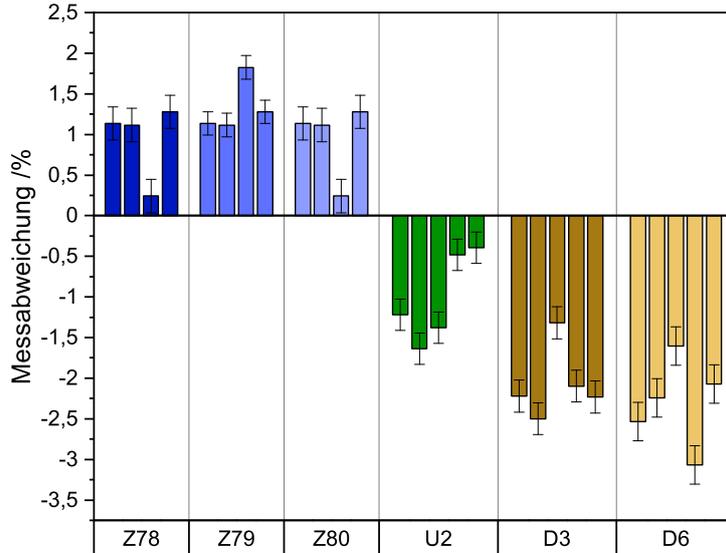


Abbildung 4.18: Mittels des von der Anzeige des Zählers ausgegebenen Volumens bestimmte Messabweichung bei der Messung des Tagesprofils.

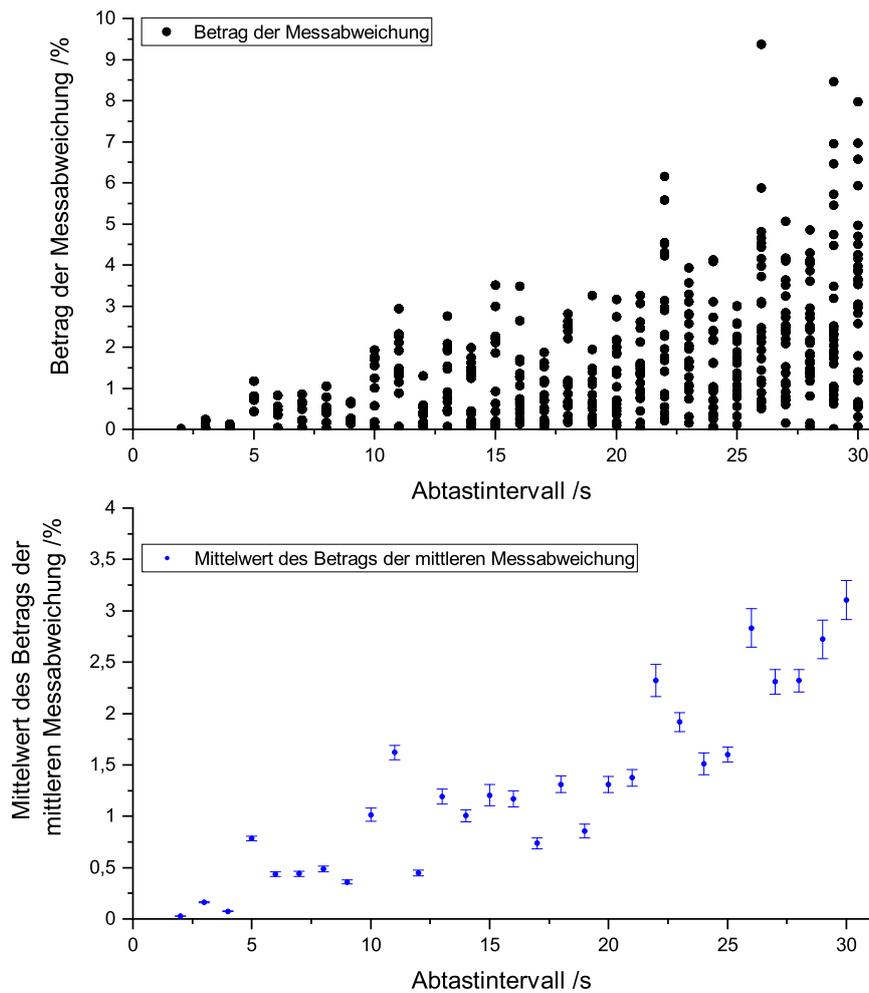


Abbildung 4.19: a) Theoretisch auftretende Messabweichung aufgrund des Abtastintervalls bei 120 verschiedenen Startzeitpunkten und die durchschnittliche Abweichung b) Teil a) im Detail.

4.3.7.1 Zwischenfazit

Die Messabweichung infolge der Abtastung ist eine zusätzliche Abweichung, welche bei Zählern mit langen Abtastintervallen bei der Verwendung eines dynamischen Verbrauchsprofils identifizierbar sein müsste. Bei nicht hinreichend kurzen Abtastintervallen wäre im Vergleich der Messabweichungen bei konstantem und dynamischen Durchfluss ein klarer Unterschied erkennbar. Da jedoch keine wesentlichen Unterschiede zwischen der Messabweichung bei konstantem und dynamischen Durchfluss erkennbar sind, kann davon ausgegangen werden, dass die Wasserzähler ein ausreichend kurzes Abtastintervall verwenden. Es wird vermutet, dass alle Zähler ein Abtastintervall kleiner als 5 s verwenden. Diese Annahme stimmt mit den wenigen Angaben in der Literatur, in der Abtastintervalle von 2 s angegeben werden (BNNETZE GMBH, 2021), überein. Hersteller geben hierzu keine weiteren Informationen preis.

4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Auswirkung des Abtastintervalls auf das erfasste Volumen

Die Bestimmung des durch einen elektronischen Wasserzähler geflossenen Volumens erfolgt indirekt mittels diskreter Messungen der Strömungsgeschwindigkeit. Für die Bestimmung des Volumens ist eine Interpolation zwischen den einzelnen Messwerten erforderlich. Die diskrete Messung von elektronischen Wasserzählern wirft die Frage auf, inwiefern die Messrichtigkeit von Hauswasserzählern unter realen Bedingungen durch diese diskreten Messungen beeinflusst wird. Aus diesem Grund wurden in dieser Arbeit zunächst theoretische Betrachtungen durchgeführt, um die Größenordnung der Messabweichung, die ausschließlich durch die diskrete Messung entsteht, zu eruieren.

Für die Betrachtung wurden die Einflussfaktoren Interpolationsart, Länge des Betrachtungszeitraums und Start der Abtastung ausgemacht. Diese Einflussfaktoren wurden anhand der definierten Forschungsfragen untersucht. Für die Untersuchungen wurden verschiedene Verbrauchsprofile verwendet. Zum einen wurden Verbräuche betrachtet, die aus Messungen in Deutschland stammen. Zum anderen wurden stochastische Verbrauchsprofile untersucht, welche auf Basis der Verbrauchsmessungen in Deutschland abgeleitet wurden.

Bezüglich der ersten Forschungsfrage - *Inwiefern beeinflusst die Art der Interpolation die durch die Abtastung entstehende Messabweichung?* - lässt sich festhalten, dass die zwei untersuchten Interpolationsarten zu vergleichbaren Ergebnissen führen. Sowohl die Rechteckinterpolation als auch die lineare Interpolation führen bei allen untersuchten Datensätzen zu vergleichbaren Ergebnissen. Es kann gefolgert werden, dass beide Interpolationsmethoden äquivalent angewendet werden können, sodass keine explizite Festlegung der verwendeten Interpolationsart erforderlich ist.

Die zweite Forschungsfrage lautete: *Welchen Einfluss hat die Dauer des Betrachtungszeitraums auf die Messabweichung?* Die Untersuchung sämtlicher betrachteter Profile verdeutlicht, dass die Dauer des Beobachtungszeitraums einen erheblichen Einfluss auf die Messabweichung hat. Zur Evaluierung der verschiedenen Abtastintervalle wurde die maximal auftretende Messabweichung als Bewertungsmaßstab herangezogen, da ein Zähler das Volumen unter allen Umständen korrekt erfassen muss. Wird die maximale Messabweichung als Kriterium zur Festlegung des Abtastintervalls herangezogen, beispielsweise zur Definition eines maximal zulässigen Abtastintervalls für elektronische Wasserzähler, ist die Berücksichtigung der Dauer des Beobachtungszeitraums, für den diese Vorgabe gilt, von zentraler Bedeutung. Bei beispielsweise einem Betrachtungszeitraum von einem Jahr des Einfamilienhauses treten bei einem Abtastintervall von 10 s erstmals Messabweichungen zwischen 0,25 % und 0,5 % auf. Beträgt der Betrachtungszeitraum hingegen eine Woche, treten bereits bei einem Abtastintervall von 2 s Messabweichungen bis zu 1 % auf. Ähnliches zeigt sich bei der Untersuchung der Daten der Mehrfamilienhäuser und den stochastisch generierten Profilen. Trotz des deutlich kürzeren Beobachtungszeitraums zeigen jedoch die stochastischen Profile geringere Abweichungen zwischen dem tatsächlichen und dem erfassten Volumen. Dies impliziert, dass stochastische Profile zwar für eine erste Abschätzung herangezogen werden können, jedoch zur präzisen Festlegung eines Abtastintervalls stets die empirisch gemessenen Verbrauchsprofile berücksichtigt werden sollten.

Die dritte zu klärende Fragestellung war: *Welche Auswirkung hat der Beginn der Abtastung auf die Messabweichung?* Es zeigt sich, dass bei keinem Datensatz und Betrachtungszeitraum ein idealer Startpunkt für die Abtastung existiert. Somit bedarf es keiner weiteren Vorgabe, wann die Abtastung des Zählers zu beginnen hat.

Zusätzlich zu den theoretischen Betrachtungen wurden auf dem Markt verfügbare elektronische Wasserzähler unter Verwendung eines entwickelten realitätsnahen Tagesprofils hinsichtlich ihrer Messabweichung überprüft.

Hierbei stand die Frage im Vordergrund: *Ist der Einfluss des Abtastintervall bei am Markt erhältlichen Zählern nachweisbar?* Die theoretischen Betrachtungen zeig-

ten, dass Ausgleichsvorgänge bei einem längeren Beobachtungszeitraum zu kleineren Messabweichungen führen. Daher wurde ein spezifisches, realitätsnahes Tagesprofil entwickelt. Die experimentelle Überprüfung aktuell auf dem Markt verfügbarer Hauswasserzähler anhand dieses Tagesprofils ergab keine Auffälligkeiten. Da kein erkennbarer Unterschied in der Messrichtigkeit der Zähler zwischen konstantem Durchfluss und dem Tagesprofil festgestellt wurde, kann angenommen werden, dass die untersuchten Zähler ein ausreichend kleines Abtastintervall verwenden. Zudem wurde durch die Messungen demonstriert, dass dynamische Profile grundsätzlich mit der entwickelten Infrastruktur realisierbar sind. Dies ermöglicht zukünftig auch eine Überprüfung der Messrichtigkeit unter realitätsnahen Bedingungen.

Für alle Untersuchungen zusammen lässt sich festhalten, dass die Messabweichung, die durch die Abtastung verursacht wird, einen zusätzlichen Einflussfaktor darstellt, der durch die in der Konformitätsbewertung vorgeschriebenen Prüfungen nicht abgeschätzt werden kann. Auf Basis der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen lässt sich ableiten, dass für Abtastintervalle kleiner als 10 s, die Messrichtigkeit des Zählers für Betrachtungszeiträume bis hinunter zu einem Monat akzeptabel ist, da die maximale Messabweichung kleiner als 1,5 % ist. Es gilt jedoch zu beachten, dass die anhand dieser Untersuchungen entwickelten Anforderungen zwar auf Grundlage von Wasserverbräuchen ausschließlich in Deutschland basieren, jedoch ist in Teilen Europas von vergleichbaren Verbrauchscharakteristiken auszugehen SCHUMANN ET AL. (2021). Für andere Regionen, die sich in ihrem Verbrauchsverhalten grundsätzlich von dem in Deutschland unterscheiden, sind weitere Untersuchungen notwendig. Zudem gilt es, diese Untersuchungen zu wiederholen, sobald sich das Verbrauchsverhalten in Deutschland bzw. Europa stark ändert.

Auf Grundlage der hier dargestellten Untersuchungen wurden in internationalen Normungsgremien spezifische Anforderungen definiert, die ein maximal zulässiges Abtastintervall von weniger als 10 s bei einem Ablesungszeitraum von einem Monat oder länger festlegen. Diese Vorgabe wurde in die überarbeitete Fassung der ISO 4064 und OIML R 49-1 2024 (E) (2024) aufgenommen.

5 Auswirkung der Wasserqualität auf die Messrichtigkeit von Hauswasserzählern

5.1 Veranlassung und Zielsetzung

Derzeit enthalten die normativen Dokumente nur wenige und teilweise vage Vorgaben bezüglich der Wasserqualität, die bei der Prüfung von Wasserzählern verwendet werden darf. Nach der OIML-Richtlinie R49 (2013) ist insbesondere sicherzustellen, dass das Prüfwasser frei von Stoffen ist, die den Wasserzähler beschädigen oder seine Funktion beeinträchtigen könnten. Darüber hinaus ist es erforderlich, dass während der Prüfung keine Luftblasen im System vorhanden sind (OIML R 49-1 2013 (E), 2013).

Es ist zudem wichtig, dass das Prüfwasser Eigenschaften aufweist, die mit denen des Wassers aus der örtlichen Wasserversorgung vergleichbar sind. In Deutschland variiert die Wasserqualität jedoch erheblich, wodurch die Eigenschaften des Wassers bei der Prüfung stark vom geographischen Standort der Prüfstelle abhängen können. Die im Feld eingesetzten Wasserzähler sind während ihrer gesamten Verwendungsdauer unterschiedlichen Wasserqualitäten ausgesetzt. Die potenziellen Auswirkungen dieser Variabilität auf die Messgenauigkeit wurden bislang nicht umfassend untersucht und stellen daher einen wichtigen Forschungsbedarf dar.

Besonders stark variieren die Härte und die pH-Werte des Trinkwassers in verschiedenen Regionen des Landes. Abbildung 5.1 illustriert beispielhaft die unterschiedlichen Wasserhärten in Deutschland. Zur Darstellung wurden öffentlich zugängliche Daten regionaler Versorgungsunternehmen aus dem Internet herangezogen. Hierbei war auffällig, dass bereits in einem Landkreis unterschiedliche Wasserhärten vorliegen können. In diesen Fällen wurde die mittlere Wasserhärte für die Darstellung verwendet.

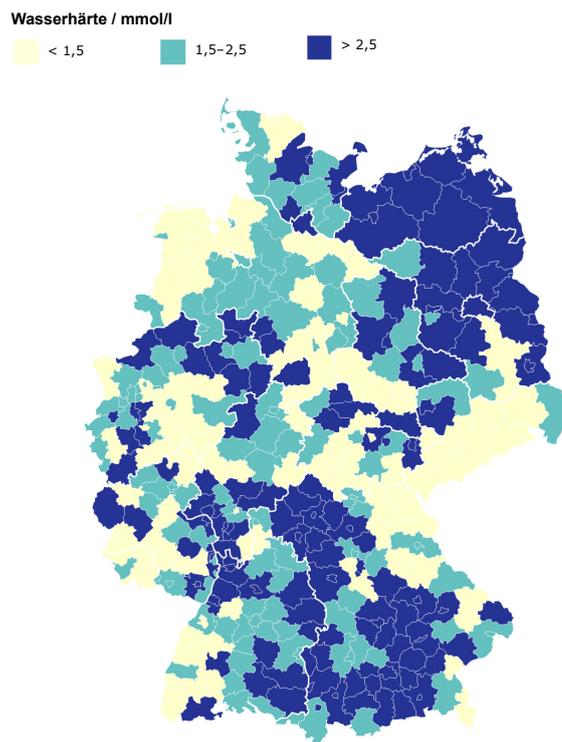


Abbildung 5.1: Übersicht der regionalen Wasserhärten in Deutschland, basierend auf Versorgerdaten.

Unabhängig von der Wasserqualität muss gewährleistet sein, dass Wasserzähler über das gesamte Spektrum der Wasserqualitäten hinweg stets das Volumen korrekt erfassen. Dies impliziert, dass sowohl mechanische als auch elektronische Wasserzähler während ihrer gesamten Nutzungsdauer die Messrichtigkeit innerhalb der definierten Fehlergrenzen, den sogenannten Verkehrsfehlergrenzen, aufrechterhalten müssen.

Aktuell sind die Auswirkungen der Wasserparameter wie pH-Wert, Gesamthärte und Partikelkonzentration auf die Messgenauigkeit von Hauswasserzählern unter realistischen Bedingungen noch unzureichend erforscht. Daher sind gezielte Untersuchungen erforderlich, die unterschiedliche Testwässer und Wasserzählertypen einbeziehen, um diese Effekte umfassend zu analysieren. In Fachkreisen wird allgemein angenommen, dass elektronische Wasserzähler tendenziell weniger von der Wasserqualität beeinflusst werden als mechanische Wasserzähler.

Vor diesem Hintergrund stellen sich folgende Forschungsfragen:

- Wie beeinflusst die Wasserqualität die Messrichtigkeit von Wasserzählern?
- Werden alle Typen von Wasserzählern gleichermaßen durch die Wasserqualität beeinflusst?

5.2 Material und Methoden

5.2.1 Wasserzähler

Für die Beantwortung der im einleitenden Abschnitt formulierten Forschungsfragen kamen sowohl mechanische als auch elektronische Wasserzähler zum Einsatz. Die Auswahl der untersuchten Wasserzähler orientierte sich an den häufigsten Bauformen und Größen, die derzeit am Markt verfügbar sind.

Die spezifischen Konfigurationen der eingesetzten Wasserzähler sind in Tabelle 5.1 dokumentiert. Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts wurden sowohl an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig als auch bei verschiedenen europäischen Projektpartnern Messungen durchgeführt. Dabei kamen Wasserzähler unterschiedlicher Hersteller und Bauformen sowohl bei der PTB als auch bei den internationalen Projektpartnern zum Einsatz. Insgesamt wurden 187 Wasserzähler in die Untersuchung einbezogen. Je Zählerart (Hersteller und Messprinzip) wurden zwischen 5 und 18 Zählern untersucht.

Tabelle 5.1: Zählerübersicht für die Wasserqualitätsexperimente.

Hersteller	Messprinzip	Q_3 in m^3/h	R
A	Ultraschall (US)	2,5	100
B	Ringkolben (RK)	2,5	160
B	Einstrahl Flügelrad (FR)	2,5	80
B	Mehrstrahl (MS)	2,5	100
B	Ultraschall (US)	2,5	160
C	magnetisch-induktiv (MID)	2,5	160
C	Ringkolben (RK)	2,5	160
C	Flügelrad (FR)	2,5	160
E	Flügelrad (FR)	2,5	160
F	Mehrstrahl Flügelrad (MFR)	2,5	160
F	Einstrahl Flügelrad (EFR)	2,5	160
F	Ultraschall (US)	2,5	250
G	Ringkolben (RK)	2,5	160
H	Flügelrad (FR)	2,5	160

5.2.2 Testwasser

Für die Vergleichbarkeit von Messungen an unterschiedlichen Instituten war es wichtig, dass die verwendeten Testwässer vergleichbare und reproduzierbare Eigenschaften aufweisen. Die Entwicklung der Testwässer wurde auf Basis einer europäischen Studie von BANKS ET AL. (2015) durchgeführt. Für die Testwässer wurde entschie-

den, das 25-%, 50-% und 75-% Quantil des pH-Werts und der absoluten Härte zu nutzen. Somit ergeben sich für die verwendeten Testwässer ein pH-Wert von 6,5, 7,5 und 9,5. Bei der Gesamthärte wurden Testwässer mit einer Härte von 1 mmol/l, 2 mmol/l, 3 mmol/l sowie 6 mmol/l betrachtet. Neben diesen zwei Faktoren wurde zudem der Einfluss von Partikeln im Wasser untersucht. Auf Basis der Untersuchungen von GAUTHIER ET AL. (1999), BARBEAU ET AL. (2005) und VREEBURG ET AL. (2008) wurden Partikelkonzentrationen von 2,8 mg/l, 6,2 mg/l, und 20 mg/l festgelegt. Zudem wurden zwei unterschiedliche Korngrößen (0-63 μm und 60-300 μm) für die Beimischung definiert. Für die Versuche wurde Quarzsand mit der jeweils definierten Korngröße verwendet. Im Rohrleitungsnetz sind zwar auch andere Partikel vorhanden, jedoch war es aus arbeitsschutztechnischen Gründen nicht möglich, Eisen- oder Bleipartikel zu verwenden.

Das jeweilige Testwasser wurde aus Basislösungen zusammengesetzt, um die gewünschten Parameter einzustellen. Die Zusammensetzung der Testwässer und der Basislösungen ist in Tab. A.2 und Tab. A.3 im Anhang zu finden.

5.2.3 Infrastruktur

Die Untersuchungen wurden sowohl an der PTB als auch bei europäischen Partnern durchgeführt. Dabei weisen die verwendeten Prüfstände eine erweiterte Messunsicherheit von $U(k=2) \leq 0.1\%$, $u_S = 0,01\%$ bis $1,7\%$ auf.

Für die Untersuchungen an der PTB wurde ein kleinskaliges Modellnetz (Abb. 5.2) aufgebaut. Dieses Modellnetz ermöglicht eine systematische Untersuchung der Auswirkungen unterschiedlicher Wasserqualitäten auf die Messgenauigkeit von Wasserzählern. Hierbei können die Wasserzähler sowohl variablen Verbrauchsprofilen als auch konstanten Durchflüssen unter verschiedenen Wasserqualitäten ausgesetzt werden. Für die Versuche wurde das jeweilige Testwasser sowie ggf. Quarzsand in den Vorratsbehälter gegeben und kontinuierlich durchmischt. Hierdurch wurde ein homogenes Testwasser gewährleistet. Der Vorratsbehälter verfügt über eine Kühlung, um während der gesamten Versuchsreihe eine gleichmäßige Temperatur des Wassers sicherzustellen. Dies dient der Vermeidung von Temperatureffekten, die die Versuchsergebnisse beeinflussen könnten. An den Stellen V001 bis V006 können Wasserzähler in das Modellnetz eingebaut werden. Dabei kann an der Position V005 der Zähler entweder vertikal oder horizontal eingebaut werden. An den anderen Positionen ist ein Einbau ausschließlich in horizontaler Lage möglich. Durch die Verwendung mechanischer Kugelhähne ist es möglich, nur ausgewählte Teile des Prüfstandes zu nutzen. Im Bedarfsfall ist es somit realisierbar, weniger als sechs Wasserzähler zeitgleich zu testen. Durch elektrisch betätigte Kugelhähne vor den Einbaupositionen

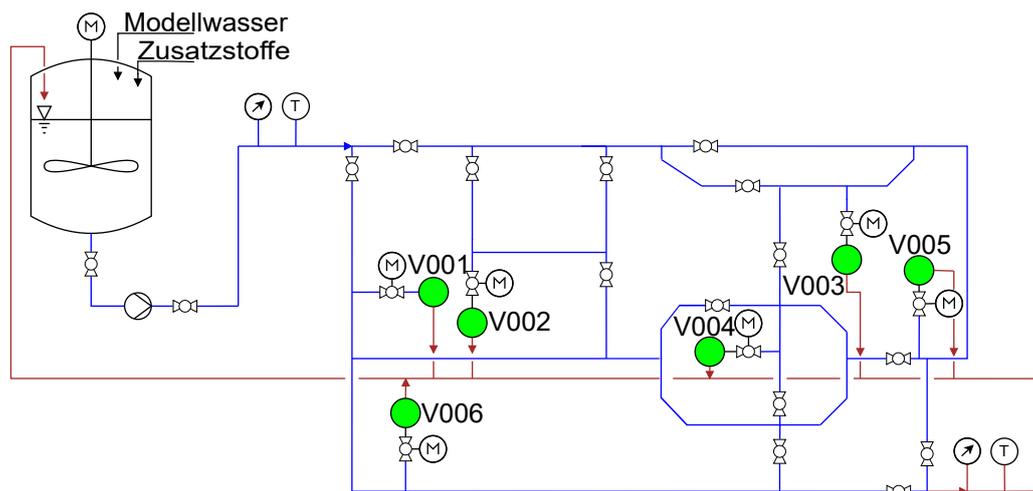


Abbildung 5.2: Schema des kleinskaligen Modellnetzes der PTB KRONER ET AL. (2022).

der Zähler ist die Umsetzung von dynamischen Profilen durchführbar.

Zur Bestimmung der Messrichtigkeit der Zähler zu Beginn und nach den Experimenten wurde das EWZP (siehe Kapitel 3.2.1 verwendet).

5.2.4 Durchflussprofile

In den Versuchsreihen wurde zum einen ein dynamisches Profil mit verschiedenen Durchflüssen und zum anderen ein konstanter Durchfluss betrachtet. In Abb. 5.3 ist das für die Versuche verwendete dynamische Durchflussprofil dargestellt.

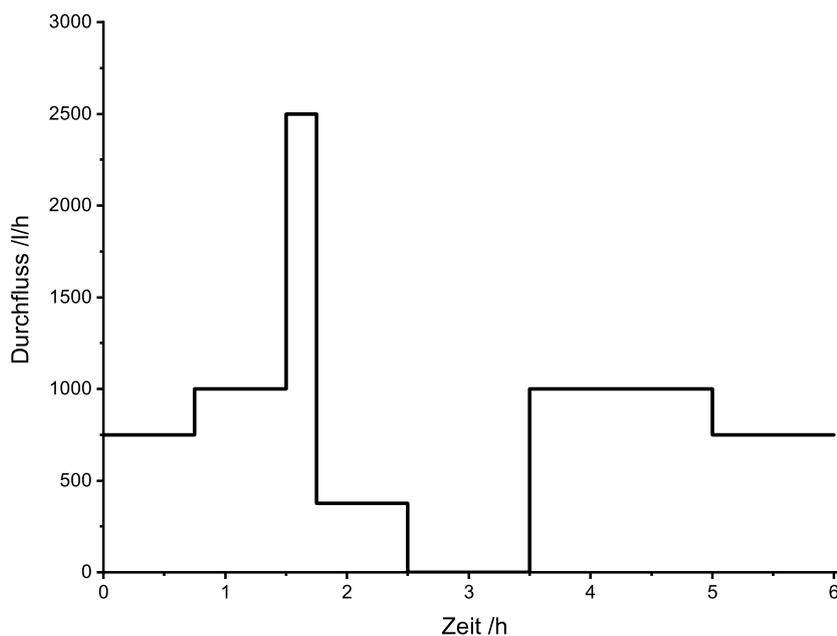


Abbildung 5.3: Durchflussprofil zur Überprüfung der Auswirkung von verschiedenen Wasserqualitäten auf die Messrichtigkeit von Wasserzählern.

Das Gesamtvolumen des dynamischen Profils beträgt je Profildurchlauf 4,47 m³. Für die durchgeführten Versuche wird das dynamische Profil 42 mal wiederholt. Somit ergibt sich ein Gesamtvolumen von 187,74 m³, welches im Laufe des Versuchs die Zähler durchströmt. Dies entspricht dem Volumen, das typischerweise über einen Zeitraum von sechs Jahren durch einen Hauswasserzähler mit der Größe $Q_3 = 2500$ l/h strömt. Dieser von WENDT ET AL. (2017) ermittelte Verbrauch kann auf Europa übertragen werden, da SCHUMANN ET AL. (2021) zeigt, dass das Verbrauchsverhalten in Nord- und Mitteleuropa ähnliche Charakteristika aufweist. Somit können die Ergebnisse aus dieser Arbeit auch auf Teile des europäischen Raums angewandt werden. Für bestimmte Versuchsteile wurde die Versuchsdauer verdoppelt, um potenzielle Effekte im Zusammenhang mit dem Durchfluss eines größeren Gesamtvolumens zu analysieren.

Für die Untersuchungen bei konstantem Durchfluss wurde der sogenannte Stresstest verwendet. Der Stresstest ist eine Prüfung, welche in der OIML R 49:2013(E) und ISO 4064:2014 beschrieben ist. Hierbei wird der Wasserzähler 100 Stunden konstant bei dem von der Größe des Zählers abhängigen Durchfluss Q_4 betrieben. Für die im Rahmen der Versuche verwendeten Wasserzähler entspricht dies einem Durchfluss von 3125 l/h. Somit wurden die untersuchten Wasserzähler in diesem Versuchsteil einem Gesamtvolumen von 312,5 m³ ausgesetzt. Ausgewählte Wasserzähler wurden darüber hinaus einem konstanten Durchfluss von 700 l/h ausgesetzt, bis ein Gesamtvolumen von 187,74 m³ erreicht wurde. Dies erfolgte, um potenzielle Unterschiede zwischen dem dynamischen Verbrauchsprofil und einer konstanten Belastung zu identifizieren und zu quantifizieren.

5.2.5 Methode zur Untersuchung der Auswirkung der Wasserqualität auf die Messrichtigkeit

Zur quantitativen Erfassung der Änderung der Messabweichung ist es unerlässlich, die Messabweichung aller Wasserzähler im neuwertigen Zustand zu bestimmen. Deshalb wurde vor der Durchführung der Tests mit unterschiedlichen Wasserqualitäten eine Fehlerkurve für jeden einzelnen Wasserzähler ermittelt, was als sogenannte Nullmessung bezeichnet wird. Diese Initialmessungen ermöglichen nicht nur die Feststellung der Messabweichung jedes Zählers im neuwertigen Zustand, sondern bieten auch die Möglichkeit, mögliche Unterschiede in der Messabweichung zwischen verschiedenen Wasserzählertypen und -herstellern zu untersuchen. Somit liefert die Nullmessung wertvolle Daten über die Ausgangsgenauigkeit und potenzielle Variabilität in der Leistungsfähigkeit der untersuchten Wasserzähler vor der Einwirkung der unterschiedlichen Wasserqualitäten.

Nach Abschluss der Nullmessung wurden die Wasserzähler den vorbereiteten Testwässern ausgesetzt. Während des gesamten Versuchsverlaufs wurden in regelmäßigen Intervallen Proben des Testwassers aus dem Modellnetz entnommen und überprüft, um die Stabilität der Wasserparameter über die gesamte Versuchsdauer hinweg sicherzustellen. Zur Bestimmung der Gesamthärte wurde nach Rücksprache mit Experten der PTB Braunschweig das Photometer der Firma Hanna Instruments (HI97735) verwendet, da es sich aufgrund seiner einfachen Handhabung gut zur Überwachung der Wasserhärte eignet. Die Bestimmung des pH-Werts erfolgte mittels des Multiparameter-Messgeräts pHenomenal MU6100L.

Die Versuche wurden gemäß den festgelegten Profilen durchgeführt. In ausgewählten Versuchsreihen wurde die Messdauer verdoppelt, um zu prüfen, ob sich bei längerer Messzeit größere Änderungen in der Messrichtigkeit der Zähler ergeben. Eine Übersicht der untersuchten Wasserqualitäten, der verwendeten Verbrauchsprofile sowie der Dauer der jeweiligen Versuche ist in Tabelle 5.2 dargestellt. Zusätzlich ist in der Tabelle die Calcitlösekapazität und der Sättigungsindex der jeweiligen Testwässer angegeben.

Die Calcitlösekapazität und der Sättigungsindex sind zentrale Kenngrößen zur Beurteilung der Kalklöse- bzw. Kalkausfällungstendenz von Wässern. Sie ermöglichen die Einschätzung, ob ein Wasser unter den gegebenen Bedingungen calcitaggressiv (kalklösend) oder calcitsättigend bis -übersättigt (kalkabscheidend) ist. Beide Parameter basieren auf dem chemischen Gleichgewicht zwischen Kalk ($CaCO_3$), gelöstem Kohlendioxid (CO_2), Kohlensäure (H_2CO_3), Bicarbonat (HCO_3^-) und Carbonat (CO_3^{2-}), das als Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht (KKG) bezeichnet wird. Der Sättigungsindex SI berechnet sich anhand 5.1 aus der Anzahl der freien Calciumionen Ca^{2+} , den freien Carbonationen CO_3^{2-} und der Löslichkeitskonstanten K_L .

Detaillierte Informationen zum KKG sowie zur Berechnung der Calcitlösekapazität und des Sättigungsindex finden sich unter anderem bei (*Wisotzky, 2012*).

$$SI_{Calcit} = \log\left(\frac{[Ca^{2+}][CO_3^{2-}]}{K_L}\right). \quad (5.1)$$

Die Calcitlösekapazität und der Sättigungsindex wurden unter Verwendung der Software aqion Version 8.5.14 (Aqion, 2024) berechnet. Die Berechnungen der Software beruhen auf PhreeqC mit dem internationalen Standarddatensatz waterq4f. Für die Berechnungen wurden die Ionenkonzentrationen aus den vorgegebenen Zusammensetzungen der jeweiligen Testwässer (Tab. A.2, Tab. A.3) verwendet.

Tabelle 5.2: Übersicht der experimentellen Versuchsreihen und Wasserparameter.

Versuch	untersuchter Parameter	pH-Wert	Gesamthärte in mmol/l	Partikelgröße in μm	Partikelkonzentration in mg/l	Calcitlösekapazität in mg/l	Sättigungsindex	Profil
1	Partikel	8,5	1	0-63	2,8	0,12	-1,4	Verbrauchsprofil
2	Partikel	8,5	1	0-63	6,2	0,12	-1,4	Verbrauchsprofil
3	Partikel	8,5	1	0-63	20	0,12	-1,4	Verbrauchsprofil
4	Partikel	8,5	1	60-300	2,8	0,12	-1,4	Verbrauchsprofil
5	Partikel	8,5	1	60-300	6,2	0,12	-1,4	Verbrauchsprofil
6	Partikel	8,5	1	60-300	20	0,12	-1,4	Verbrauchsprofil
7	Gesamthärte	8,5	2			0,384	-5,2	Verbrauchsprofil
8	Gesamthärte	8,5	3			0,52	-7,7	Verbrauchsprofil
9	pH-Wert	6,5	1			-1,85	107,1	Verbrauchsprofil
10	pH-Wert	7,7	1			-0,65	8,3	Verbrauchsprofil
11	pH-Wert	9,5	1			0,91	-21,6	Verbrauchsprofil
12	Gesamthärte	8,5	6			1,41	-95,7	Verbrauchsprofil
13	Gesamthärte	8,5	6			1,41	-95,7	Verbrauchsprofil
14	Gesamthärte	9,5	6			2,04	-187,7	(doppelte Messzeit) Stresstest
15	Gesamthärte und Partikel	9,5	6	50 % 0-160 50 % 0-63	6,2	2,04	-187,7	Verbrauchsprofil
16	Gesamthärte und Partikel	9,5	6	50 % 0-160 50 % 0-63	6,2	2,04	-187,7	Verlängerung V15
17	pH-Wert	7,7	1			-0,65	8,3	Verbrauchsprofil
18	pH-Wert	7,7	1			-0,65	8,3	Verbrauchsprofil (doppelte Messzeit)

Nachdem die Zähler den definierten Versuchsbedingungen ausgesetzt waren, wurde erneut die Fehlerkurve bestimmt. Zur weiteren Beurteilung des Einflusses der Wasserqualität auf die Messrichtigkeit des Zählers wird die Änderung der Messabweichung $\Delta\epsilon$ genutzt. Die Änderung $\Delta\epsilon$ ergibt sich aus der Differenz der Messabweichung nach dem Versuch ϵ_{nach} und vor dem Versuch ϵ_{vor} :

$$\Delta\epsilon = \epsilon_{\text{nach}} - \epsilon_{\text{vor}}. \quad (5.2)$$

5.3 Ergebnisse zur Untersuchung der Auswirkung der Wasserqualität

5.3.1 Neuwertige Zähler

Zu Beginn der Untersuchung wurden die Messabweichungen neuwertiger Wasserzähler erfasst. Als Beispiel für die Fehlerkurven sind in Abb. 5.4 die Fehlerkurven von 18 Ultraschallzählern des Herstellers A dargestellt. Die Messabweichungen aller 18 Zähler liegen innerhalb der zulässigen Verkehrsfehlergrenzen. Aufgrund des Fertigungsloses zeigt sich bereits eine Streuung in den Messabweichungen innerhalb der Zähler eines bestimmten Typs. Die durchschnittliche Standardabweichung der Messgenauigkeit über alle Durchflüsse der Ultraschallzähler von Hersteller A beträgt 0,32 %.

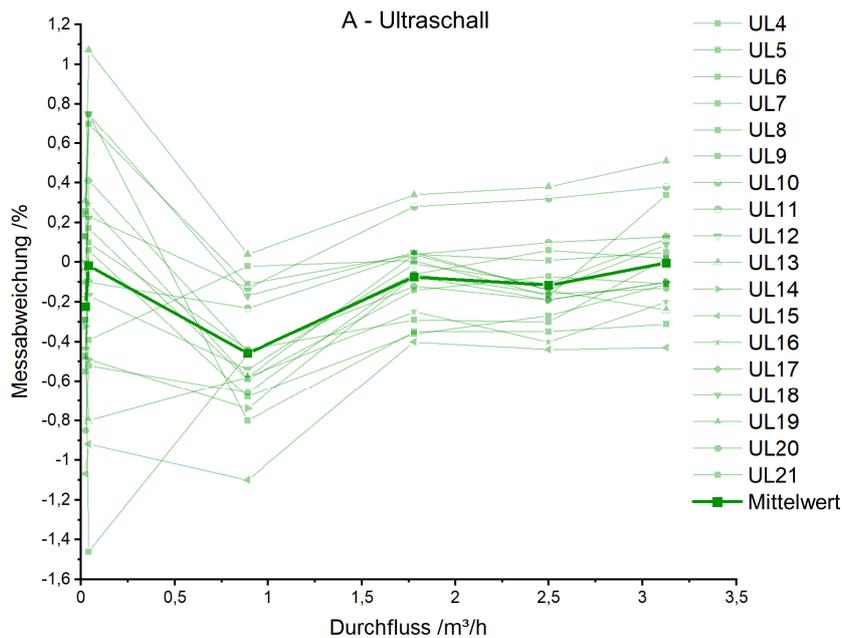


Abbildung 5.4: Messabweichungen der von Hersteller A untersuchten Ultraschallzähler sowie die mittlere Messabweichung. Zur besseren Beurteilung sind die einzelnen Messpunkte miteinander verbunden.

In Abb. 5.5a) ist die mittlere Messabweichung aller untersuchten Zähler nach Hersteller und Typ dargestellt. In Teil b) der Abb. 5.5 ist die dazugehörige Standardabweichung gezeigt. Es zeigt sich, dass die mittlere Messabweichung aller untersuchten Wasserzähler im Rahmen der normativen Vorgaben liegt. Es zeigt sich eine Tendenz, dass die Messabweichungen elektronischer Wasserzähler im unteren Bereich des Messbereichs geringer sind als die Messabweichungen mechanischer Zähler. Dennoch wurden in den Untersuchungen auch mechanische Wasserzähler betrachtet, die im unteren Messbereich Messabweichungen aufweisen, die mit denen elektronischer Wasserzähler vergleichbar sind. Daher lässt sich aufgrund dieser Untersuchungen nicht eindeutig ein Zählertyp als derjenige mit der geringsten Messabweichung identifizieren. Die Qualität des neuwertigen Zählers ist vielmehr abhängig vom Hersteller. Bei den Untersuchungen tritt für die Flügelradzähler von Hersteller H sowie für die Ultraschallzähler von Hersteller F eine unerwartet große Standardabweichung an jeweils einem Prüfpunkt auf. Eine mögliche Ursache für diese große Standardabweichung der Flügelradzähler könnte in der Art der Bestimmung der Messabweichung liegen. Die Bestimmung der Messabweichung der Flügelradzähler erfolgte durch die in Abschnitt 3.2.3 beschriebenen Abtastung mittels Laser. Eine mögliche Ursache kann daher sein, dass die Laser nicht richtig positioniert waren, so dass es zu einer nicht korrekten Erfassung der Volumenanzeige kam.

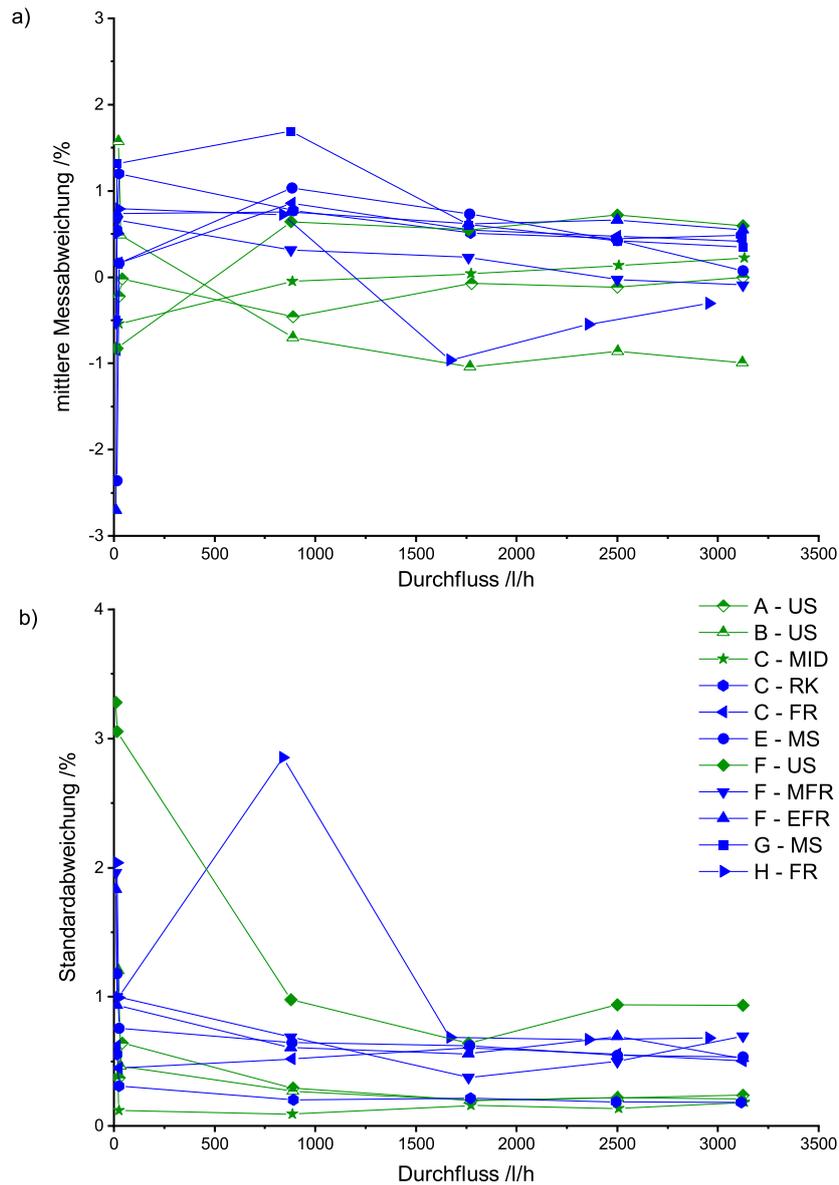


Abbildung 5.5: Auswertung der Nullmessung von neuwertigen Wasserzählern a) mittlere Messabweichung b) Standardabweichung.

Die Ultraschallzähler des Herstellers F weisen eine hohe Standardabweichung beim kleinsten betrachteten Durchflusspunkt auf. Die Bestimmung der Messabweichung der Ultraschallzähler von Hersteller F erfolgte bei einem europäischen Projektpartner über den elektronischen Impulsausgang des Zählers. Eine mögliche Erklärung für die unerwartet hohe Standardabweichung im unteren Durchflussbereich ist in diesem Fall, dass bei der Realisierung und Überprüfung kleiner Durchflüsse Probleme am Prüfstand auftraten. Dass der Wasserzähler selbst die Ursache für die hohe Standardabweichung im unteren Durchflussbereich ist, kann nicht ausgeschlossen werden. Jedoch wird aufgrund der Bauart nicht davon ausgegangen.

Anhand der aufgeführten Ergebnisse lässt sich ableiten, dass die Messrichtigkeit von neuwertigen Zählern abhängig von den drei Faktoren Typ, Hersteller und Charge ist. Es kann auf Basis der durchgeführten Untersuchungen keine Wasserzählertechnologie identifiziert werden, welche immer die kleinsten Messabweichungen aufweist.

5.3.2 Änderung der Messabweichung in Abhängigkeit vom pH-Wert

Verschiedene Zähler wurden Wasser mit einem pH-Wert von 6,5, 7,7 oder 9,5 ausgesetzt, um den Einfluss des pH-Werts auf die Messrichtigkeit zu evaluieren. Ein konstanter Durchfluss führte zu vergleichbaren Ergebnissen wie die Verwendung des dynamischen Verbrauchsprofils. Daher werden im Folgenden nur die Ergebnisse unter Verwendung des dynamischen Verbrauchsprofils dargestellt. In Abb. 5.6 ist die Differenz der Messabweichung $\Delta\epsilon$ zwischen Nullmessung und der Messabweichung nach dem Versuch mit dem dynamischen Profil dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass sich bei mechanischen als auch elektronischen Zählern die Messabweichung ändert. Hierbei verändert sich tendenziell die Messrichtigkeit von elektronischen Wasserzählern weniger als die von mechanischen. Jedoch existieren auch deutliche Änderungen der Messabweichung bei elektronischen Zählern. Es ist die Tendenz erkennbar, dass Zähler, die einem Wasser mit einem pH-Wert von 6,5 ausgesetzt waren, eine geringere Änderung in den Messabweichungen aufweisen. Es zeigt sich zudem, dass ein pH-Wert von 7,7 größere Auswirkungen auf die Messabweichung von Wasserzählern hat als ein pH-Wert von 9,5. Eine Ursache hierfür konnte nicht gefunden werden. Eine mögliche Erklärung, dass Kalkausscheidungen auftreten, kann nicht bestätigt werden, da das Testwasser einen pH-Wert aufweist, der kalklösend wirkt. Beim Testwasser mit einem pH-Wert von 9,5 ist eine Kalkausscheidung vorhanden, welche jedoch nicht zu einer größeren Änderung der Messrichtigkeit der Zähler führt. Dies wird bestätigt, da bei der visuellen Begutachtung der Zähler keine Kalkablagerungen erkennbar waren.

Die Auswirkungen des pH-Werts sind stark vom Zählerhersteller und Zählertyp abhängig. Die untersuchten magnetisch-induktiven Wasserzähler des Herstellers C zeigen im Mittel die geringsten Beeinflussungen durch den pH-Wert.

Zwei Ultraschall-Zähler des Herstellers A wurden dem zuvor als einflussreichsten pH-Wert ausgemachten pH-Wert von 7,7 zunächst einen Zyklus ausgesetzt. Um zu eruieren, ob sich die Messabweichung des Zählers weiter ändert, wurden Untersuchungen mit dem dynamischen Profil bis zum Erreichen des doppelten Gesamtvolumens durchgeführt. In Abb. 5.7 sind die Nullmessungen der Zähler sowie die Fehlerkurven nach dem jeweiligen Durchlauf dargestellt. Es zeigt sich, dass sich die Messgenau-

igkeit der Zähler im Verlauf der Messungen verändert. Die Differenz zwischen der Nullmessung und der Fehlerkurve nach dem ersten Profildurchlauf ist deutlich größer als die Differenz der Fehlerkurve nach dem ersten und zweiten Durchlauf des Profils. Diese Beobachtung lässt darauf schließen, dass der Einfluss der Wasserqualität bei neueren Zählern dieses Typs, die von diesem Hersteller stammen, zu Beginn ausgeprägter ist. Außerdem zeigt die Standardabweichung am kleinsten Durchflusspunkt nach jedem Testzyklus beim Zähler 4J eine zunehmende Tendenz. Die Standardabweichung beim kleinsten Durchflusspunkt beträgt bei der Nullmessung 0,26 %. Nachdem der Zähler einem pH-Wert von 7,7 für zwei Wochen ausgesetzt war, liegt die Standardabweichung beim gleichen Durchflusspunkt bei 0,44 %. Nach weiteren zwei Wochen beträgt die Standardabweichung 0,74 %. Um diese Erkenntnisse zu validieren und zu generalisieren, sind künftig weitere Untersuchungen erforderlich, insbesondere um vergleichbare Verhaltensweisen bei anderen Zählertypen zu analysieren.

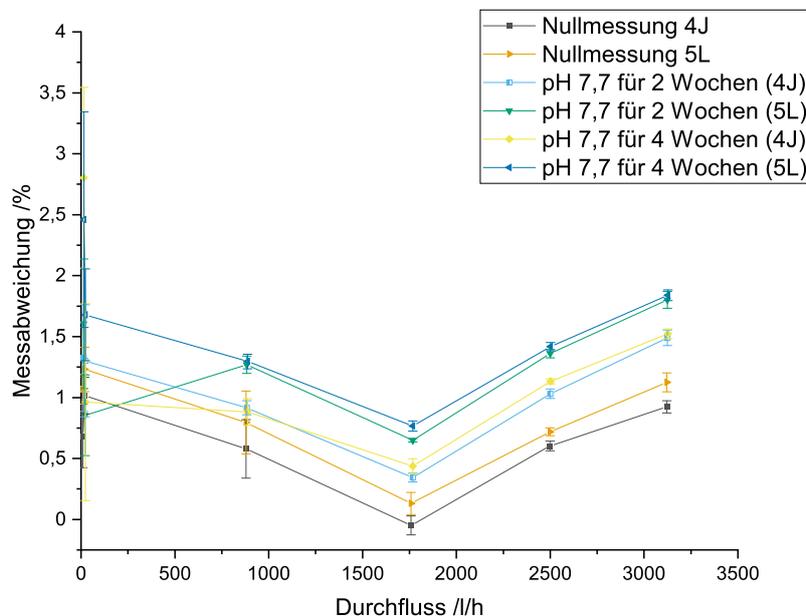


Abbildung 5.7: Einfluss des pH-Werts auf die Messrichtigkeit bei doppelter Versuchsdauer.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Änderung der Messabweichung stark vom Hersteller abhängt. Dieses Verhalten konnte bereits bei neuwertigen Zählern beobachtet werden. Sowohl elektronische als auch mechanische Zähler zeigen unterschiedliche Empfindlichkeiten gegenüber Testwässern mit variierenden pH-Werten. Es zeichnet sich eine Tendenz ab, dass die Messabweichungen am deutlichsten zunehmen, wenn Testwasser mit einem pH-Wert von 7,7 verwendet wird. Der Einfluss von Kalk konnte nicht vollständig ausgeschlossen werden, da das Testwasser mit einem pH-Wert von 7,7 einen positiven Sättigungsindex besitzt und somit leicht kalkabscheidend ist. In den Messleitungen, den Wasserzählern und im Vorratsbehälter

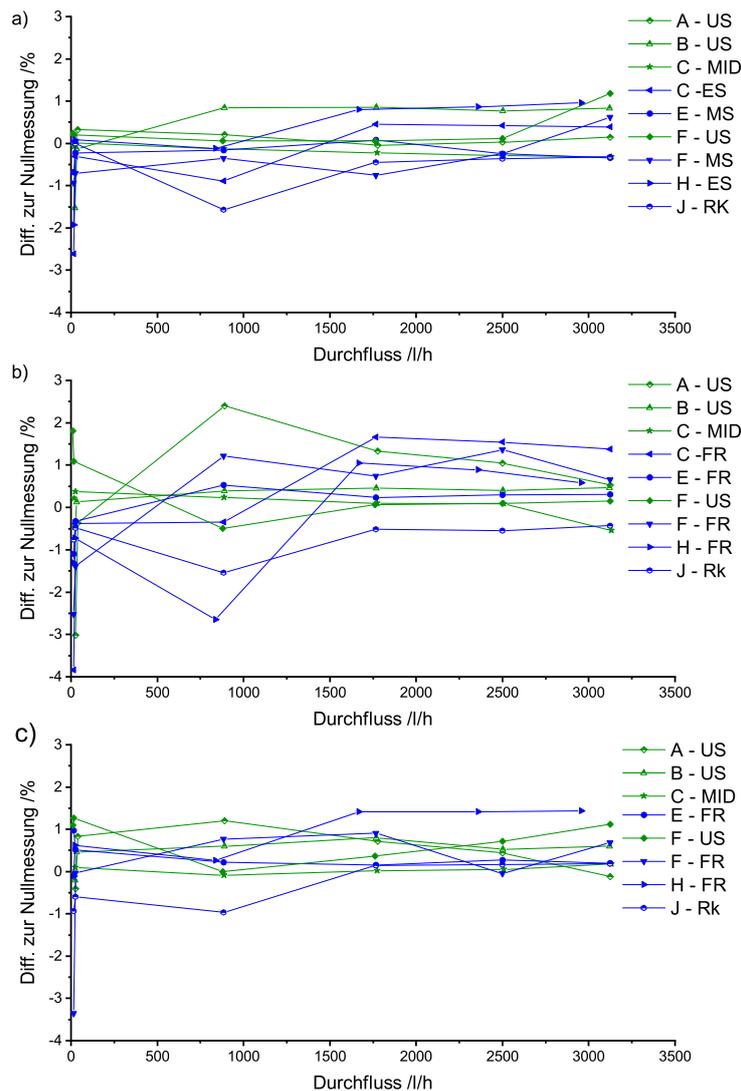


Abbildung 5.6: Veränderung der Messabweichung im Vergleich zur Nullmessung aufgrund eines pH-Werts von a) 6,5 b) 7,7 c) 9,5.

des Prüfstands konnten jedoch keine Anzeichen von Kalkablagerungen festgestellt werden. Dies deutet darauf hin, dass Ablagerungen im Zähler als Ursache für die beobachtete Änderung der Messabweichung unwahrscheinlich sind.

5.3.3 Variation der Gesamthärte

Sowohl mechanische als auch elektronische Zähler wurden Testwässern mit verschiedener Gesamthärte ausgesetzt. Unter der Verwendung des dynamischen Profils ändert sich die Messabweichung des Zählers im Vergleich zur Nullmessung, wie in Abb. 5.8 dargestellt.

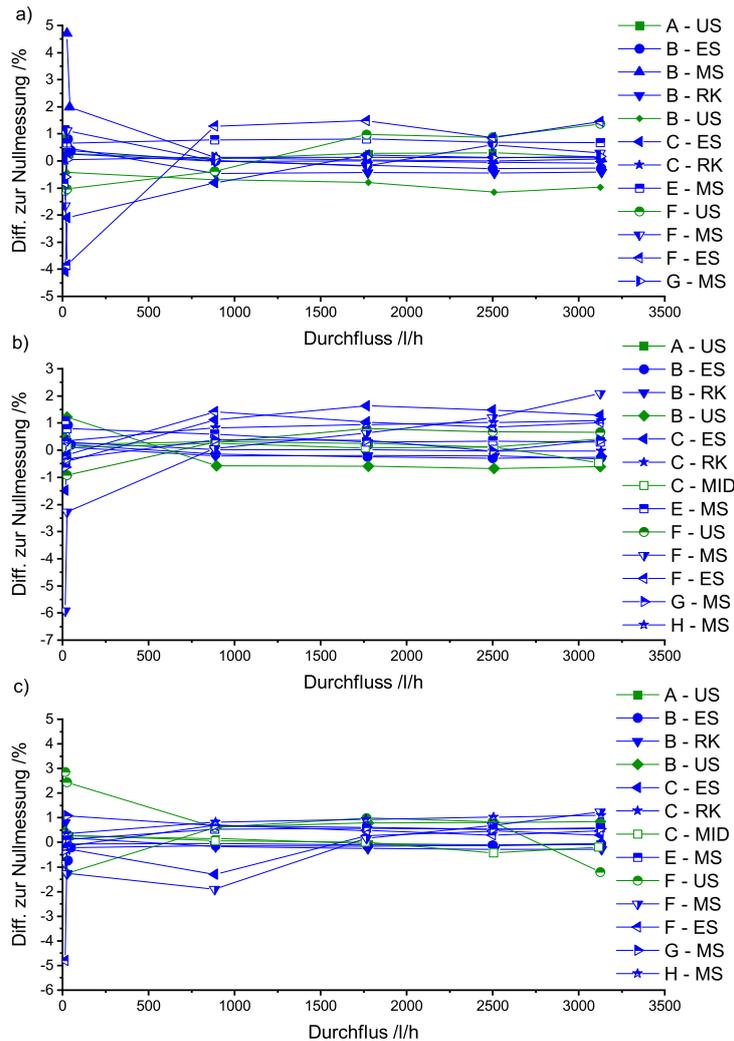


Abbildung 5.8: Veränderung der Messabweichung im Vergleich zur Nullmessung aufgrund einer Gesamthärte von a) 1 mmol/l b) 2 mmol/l c) 3 mmol/l.

Es zeigt sich, dass sowohl mechanische als auch elektronische Zähler nach den Versuchen eine geänderte Messabweichung aufweisen. Es zeigt sich eine nur schwache Tendenz, dass eine Wasserhärte von 3 mmol/l einen geringeren Einfluss auf die Zähler aufweist als eine Gesamthärte von 2 mmol/l. Dies lässt sich daran erkennen, dass die Streuung der Differenzen zur Nullmessung bei Zählern, die einem Wasser mit der Härte von 2 mmol/l ausgesetzt waren, größer ist. Insgesamt sind die Veränderungen aller untersuchten Zähler jedoch vernachlässigbar. Bei den Untersuchungen mit einem Testwasser mit einer Härte von 6 mmol/l gab es ebenfalls keine Auffälligkeiten.

5.3.4 Variation der Partikelkonzentration und -größe

An der PTB wurden Versuche mit Quarzsand durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Partikelgrößen und Konzentrationen verwendet. In Abb. 5.9 ist die Differenz

$\Delta\epsilon$ zwischen der Messabweichung nach dem Versuch und der Messabweichung der Nullmessung dargestellt. Es gilt zu beachten, dass aufgrund der zur Verfügung stehenden Anzahl an Wasserzählern lediglich zwei, teilweise auch nur ein Zähler eines Typs pro Versuch untersucht wurde. Daher sind die hier dargestellten Ergebnisse lediglich als eine Tendenz anzusehen. Um fundierte, statistisch gesicherte Aussagen treffen zu können, sind zukünftig weitere Untersuchungen mit einer größeren Anzahl an Zählern notwendig.

Anhand der bislang durchgeführten Untersuchungen zeigt sich jedoch bereits, dass die Messabweichung sowohl mechanischer als auch elektronischer Zähler durch die Partikel beeinflusst wird. Zu einer etwas größeren Änderung der Messabweichung führen tendenziell Partikel bei Zählern mit einem mechanischen Messprinzip. Diese größere Beeinflussung kann anhand der Flügelradzähler von Hersteller H ausgemacht werden, wobei diese Zähler nur bei einem Durchflusspunkt (900 l/h) eine stark abweichende Messabweichung zur Nullmessung aufweisen. Bei den anderen Durchflusspunkten weisen die gleichen Zähler keine besonders großen Abweichungen auf.

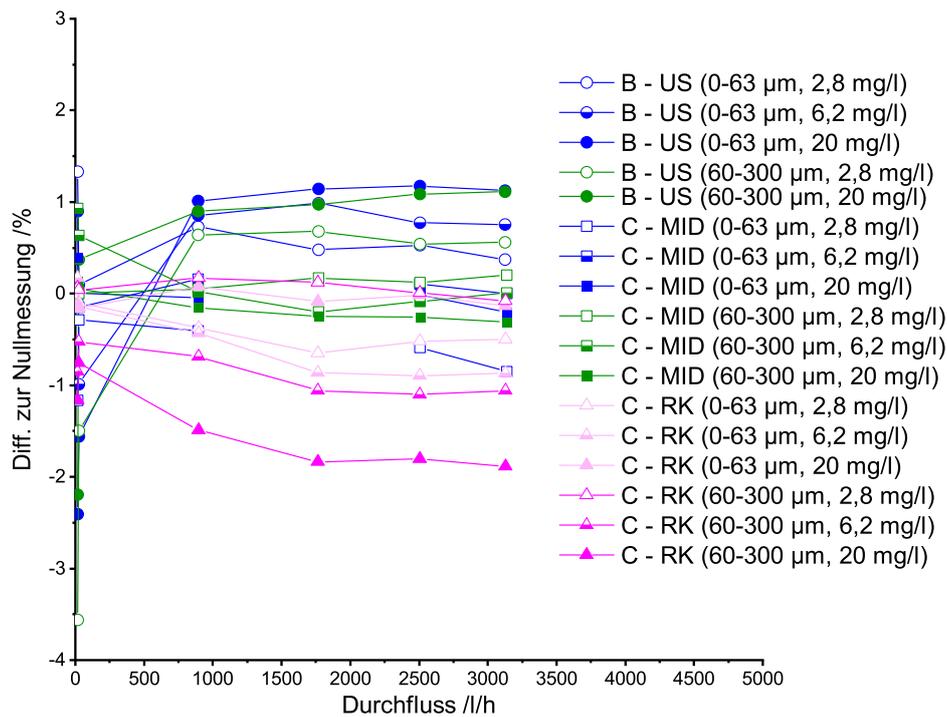


Abbildung 5.9: Veränderung der Messabweichung im Vergleich zur Nullmessung in Abhängigkeit von unterschiedlichen Partikelgrößen und Partikelkonzentrationen für verschiedene Zählertypen und Hersteller.

Die in vorangegangenen Untersuchungen dargestellten Ergebnisse deuten darauf hin, dass die erhöhte Messabweichung bei einem Durchfluss von 900 l/h möglicherweise auf Schwierigkeiten im Zusammenhang mit dem Prüfstand oder der Impulserfassung zurückzuführen ist.

Zusammenfassend zeigt sich, dass alle Typen von Hauswasserzählern, nachdem diese Testwässern mit unterschiedlichen Konzentrationen an Partikeln und Partikelgrößen ausgesetzt waren, eine veränderte Messabweichung im Vergleich zur Nullmessung aufweisen. Es zeigt sich für Durchflüsse größer als 900 l/h, dass Änderungen der Messabweichung zwischen -1,8 % und 1,1 % auftreten. Insbesondere bei den zwei kleinsten Durchflusspunkten treten größere Veränderungen von bis zu -3,5 % im Vergleich zur Nullmessung auf.

5.3.5 Kombinationen aus pH-Wert, Härte und Partikel

Neben der Einzelbetrachtung der Parameter pH-Wert, Gesamthärte und Partikel wurden auch Versuche mit unterschiedlichen Kombinationen dieser Parameter durchgeführt. In diesen Untersuchungen wurden keine Auffälligkeiten festgestellt. Die Änderungen der Messabweichungen der Wasserzähler lagen in derselben Größenordnung wie bei den vorangegangenen Untersuchungen. Dies deutet darauf hin, dass keine additive Wirkung auf die Messabweichungen durch die Kombination der Parameter aufgetreten ist.

5.3.6 Stresstest

Neben dem dynamischen Verbrauchsprofil wurden Zähler dem sogenannten Stresstest ausgesetzt. In Abb. 5.10 ist die Veränderung der Messabweichung im Vergleich zur Nullmessung dargestellt.

Es zeigt sich, dass aufgrund der dauerhaften Belastung der Zähler keine nennenswerten Veränderungen bezüglich der Messabweichung auftreten. Die Veränderung der Messabweichung nach dem Test zu vor dem Test ist bei den untersuchten elektronischen Zählern kleiner, wobei die Veränderungen allgemein in einer vernachlässigbaren Größenordnung liegen. Die Veränderungen der Messabweichungen fielen bei Versuchen mit präpariertem Wasser und realitätsnaher Belastung deutlicher aus als die Abweichungen, die im Rahmen des Stresstests beobachtet wurden.

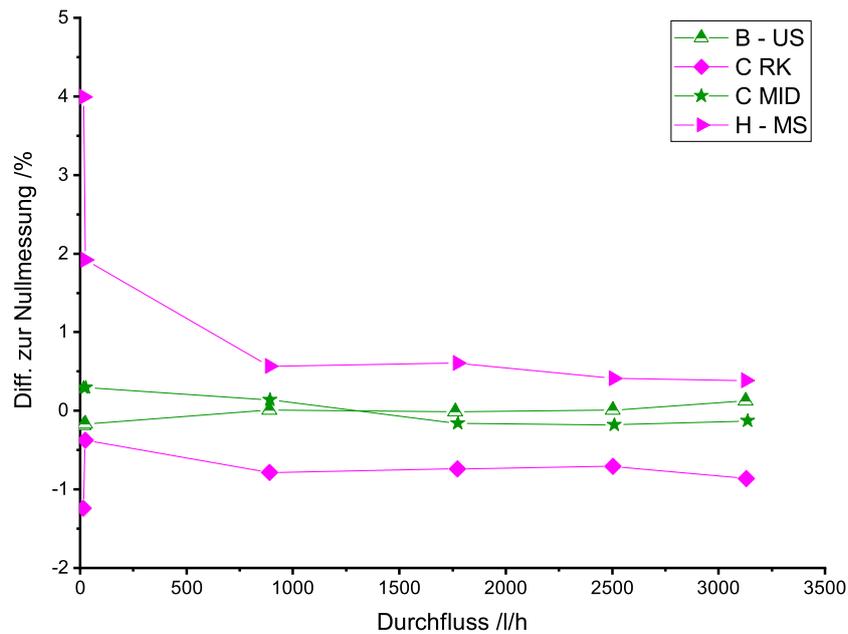


Abbildung 5.10: Veränderung der Messabweichung im Vergleich zur Nullmessung bei Verwendung von Leitungswasser nach Durchführung des Stresstests.

5.4 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt der Arbeit wurden kommerziell verfügbare Hauswasserzähler hinsichtlich ihrer Messabweichungen unter realitätsnahen und extremeren Wasserqualitäten untersucht. Hierfür wurde ein Testwasser entwickelt, um die Untersuchungen der Parameter Gesamthärte, pH-Wert sowie Partikelkonzentration und -größe unter vergleichbaren und reproduzierbaren Bedingungen in verschiedenen Instituten durchzuführen. Die Eigenschaften des Testwassers wurden so gestaltet, dass sie typisch europäischem Trinkwasser ähneln.

Vor den Tests mit den verschiedenen Wasserqualitäten wurden die Messabweichungen der neuwertigen Wasserzähler ermittelt, um eventuelle systematische Abweichungen festzustellen. Dabei zeigte sich, dass die Messabweichungen stark vom Hersteller und der Charge abhängen. Entgegen der allgemeinen Annahme zeigten elektronische Wasserzähler keine durchgängig geringeren Messabweichungen im Vergleich zu mechanischen Zählern. Die Messabweichungen variieren selbst bei identischen Modellen desselben Herstellers und liegen im Durchschnitt zwischen 0,18 % und 1,64 %, jedoch innerhalb der zulässigen Toleranzgrenzen.

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen wurden die Zähler verschiedenen Wasserqualitäten ausgesetzt. Hierfür wurden sowohl ein realitätsnahes dynamisches Testprofil als auch der Stresstest nach OIML R49 verwendet. Der Vergleich der Messabweichungen vor und nach den Versuchen zeigt, dass die Wasserqualität die Messge-

nauigkeit beeinflusst. Besonders auffällig ist, dass ein pH-Wert von 7,7 die stärksten Veränderungen in der Messgenauigkeit verursachte, während keine spezifische Gesamthärte nachweisbare Auswirkungen auf die Messgenauigkeit hatte. Sowohl realitätsnahe Verbrauchsprofile als auch Tests bei maximalem Durchfluss führten zu Änderungen der Messabweichungen. Die Veränderungen bei Zählern, die einer Kombination der Testwässer ausgesetzt waren, unterschieden sich nicht wesentlich von denen, die nur einem einzelnen Parameter ausgesetzt wurden, was darauf hindeutet, dass sich die Effekte der einzelnen Parameter nicht additiv verstärken.

Unabhängig vom Zählertyp oder Messprinzip wurden bei allen Zählern Veränderungen der Messabweichungen festgestellt, was darauf hinweist, dass jeder Zählertyp, unabhängig vom Hersteller, gewissen Alterungserscheinungen unterliegt. Dies verdeutlicht erneut die Abhängigkeit der Messgenauigkeit von der spezifischen Charge. Es wurde kein Wasserzähler identifiziert, der systematisch die geringsten Messabweichungen bzw. Änderungen der Messabweichung aufweist.

Anhand dieser Ergebnisse lässt sich bezüglich der ersten Forschungsfrage „*Wie beeinflusst die Wasserqualität die Messrichtigkeit von Wasserzählern?*“ feststellen, dass zwar eine Änderung der Messabweichung auftritt, diese jedoch nicht systematisch ist. Aufgrund der begrenzten Anzahl untersuchter Zähler wäre es jedoch sinnvoll, weiterführende Untersuchungen durchzuführen, um repräsentativere Ergebnisse zu erhalten.

In Bezug auf die zweite Forschungsfrage „*Werden alle Typen von Wasserzählern gleichermaßen durch die Wasserqualität beeinflusst?*“ zeigt sich, dass die Messrichtigkeit aller untersuchten Wasserzähler während des Betriebs beeinflusst wird. Es konnte jedoch kein Zählertyp identifiziert werden, der stets die geringste Veränderung der Messabweichung aufweist.

6 Fernablesung unter realen Verbrauchsbedingungen

6.1 Veranlassung und Zielsetzung

Als Zusatzfunktion wird seitens der Hersteller bei elektronischen Wasserzählern die Möglichkeit beworben, den aktuellen Zählerstand aus der Ferne abzulesen. Auch bei der Verwendung klassischer mechanischer Wasserzähler kann eine Fernablesung mittels einer entsprechenden Zusatzeinrichtung realisiert werden. Die Fernablesung stellt messtechnisch lediglich eine Messwertwiederholung des im Display des Wasserzählers angezeigten Verbrauchswerts dar und unterliegt daher keiner messtechnischen Überprüfung. Aus diesem Grund enthalten normative Dokumente sowie technische Empfehlungen derzeit keine spezifischen Anforderungen für Prüfungen, welche die Übereinstimmung des aus der Ferne abgelesenen Messwerts mit dem auf der Anzeige des Wasserzählers angezeigten Wert gewährleisten sollen. Es ist zwar anzunehmen, dass der Hersteller im Zuge des Inverkehrbringens seines Produkts einen Vergleich zwischen den Werten der Fernablesung und den Anzeigen des Zählers vornimmt. Eine gesetzliche Verpflichtung zur Vorlage entsprechender Ergebnisse und Nachweise besteht jedoch nicht. Der Hersteller gibt lediglich eine Selbsterklärung ab, dass die Werte übereinstimmen. Somit ergeben sich die folgenden Forschungsfragen:

- Inwieweit stimmen das über Fernablesung erfasste Volumen und das auf der Anzeige des Wasserzählers angezeigte Volumen überein?
- Wie zuverlässig ist die Fernablesung in der Praxis?

Im Kapitel 5 wurde der Einfluss der Wasserqualität auf die Messgenauigkeit von Wasserzählern unter kontrollierten Laborbedingungen analysiert. Zur Evaluierung der Funktionalität der Fernablesetechnologie wurden Wasserzähler im Versorgungsnetz der PTB installiert.

Im Rahmen einer ergänzenden Untersuchung wird in diesem Abschnitt geprüft, inwieweit sich die Messgenauigkeit von Wasserzählern über die Betriebsdauer hinweg verändert und ob unterschiedliche Zählertypen in gleichem Maße von potenziellen Veränderungen betroffen sind.

6.2 Material und Methode

Im Zuge der Evaluierung der Funktionalität der Fernablesung unter realitätsnahen Bedingungen wurden sowohl handelsübliche elektronische Wasserzähler als auch mechanische Wasserzähler mit Zusatzvorrichtungen im Erdgeschoss von fünf Gebäuden der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig installiert. Die Wasserzähler wurden am Eingang der Versorgungsleitung in das Gebäude verbaut. Die Verbausituation der Zähler ist schematisch in Abb. 6.1 dargestellt. Die Wasserzähler wurden in einer parallelen Anordnung installiert, da eine serielle Installation aufgrund der begrenzten Platzverhältnisse nicht umsetzbar war. Obwohl die parallele Anordnung der Zähler zu einer geringfügig unterschiedlichen Menge des durchfließenden Wassers führt, sind die Unterschiede so klein, dass sie vernachlässigt werden können. Darüber hinaus wurde nach einem Jahr die Reihenfolge der Zähler modifiziert, um den Effekt weiter zu minimieren und eine etwaige Verzerrung der Messergebnisse auszugleichen.

Die Installation sowie der fortlaufende Betrieb der Zähler ermöglichen eine exemplarische empirische Untersuchung der Verlässlichkeit der Funktion der Fernablesung unter praktischen Bedingungen. Als zusätzlicher Nutzen dieser Untersuchung konnte auch die Veränderung der Messgenauigkeit der verbauten Wasserzähler unter realen Verbrauchsbedingungen analysiert werden.

Für die Studie wurden die Zähler entsprechend den in Tab. 6.1 dargestellten Konfigurationen eingesetzt.

Zur Fernablesung der Zähler wurden die vom Hersteller bereitgestellten Module sowie die dazugehörige Software genutzt.

Tabelle 6.1: Übersicht der im Messnetz verbauten Wasserzählertypen.

Hersteller	Messprinzip	Nummer	Q_3 in l/h	R	Impulswertigkeit in Imp/l
A	Ultraschall	Z24 - Z28	4000	250	50
B	Ultraschall	Z19 - Z23	4000	160	1 & 400
C	mag.-ind.	Z11 - Z15	4000	160	50
D	Mehrstrahl trockenläufer	Z01 - Z05	4000	160	365
G	Mehrstahlnassläufer	Z06 - Z10	4000	160	48,5

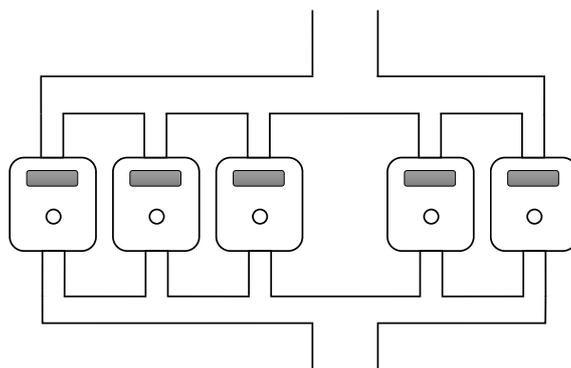


Abbildung 6.1: Schema der Einbausituation der Messnetzzähler.

Vor dem erstmaligen Einbau der Zähler wurde mittels des EWZP die Fehlerkurve gemäß ISO 4064:2014 bestimmt (DIN 4064-1:2014, 2012). Dafür wurde das Messprogramm aus Tab. 6.2 verwendet. Die Messpunkte entsprechen den geläufigen Prüfpunkten gemäß MID für Zähler mit einer Größe von $Q_3 = 4000$ l/h und R160. Der Zähler von Hersteller A hat einen anderen R-Wert und somit abweichende Prüfpunkte. Es wurde jedoch festgelegt, dass alle Wasserzähler einem einheitlichen Messprogramm unterzogen werden. Jede Messung wurde an einem Durchflusspunkt fünfmal wiederholt, und der Mittelwert dieser Messungen wurde zur Bestimmung der Messgenauigkeit herangezogen.

Im Anschluss an die Bestimmung der Fehlerkurve wurden die Zähler im Versorgungsnetz installiert und einmal pro Monat mittels der vom Hersteller zur Verfügung

Tabelle 6.2: Messprogramm zur Bestimmung der Fehlerkurve.

Messpunkt	Durchfluss in l/h	Messzeit in s
1	25	1800
2	40	1125
3	1414	254
4	2828	127
5	4000	90
6	5000	72

gestellten Software aus der Ferne abgelesen. Nach einer Verbauzeit von elf Monaten wurden die Zähler zur Überprüfung der Messrichtigkeit ausgebaut. Beim Ausbau wurde im ersten Schritt zunächst das aus der Ferne abgelesene Volumen V_{Funk} mit dem Volumen der Anzeige des Zählers V_{Anz} dokumentiert und miteinander verglichen. Die dabei auftretende Differenz ΔV wird genutzt, um etwaige Diskrepanzen zu identifizieren und zu quantifizieren. Die Differenz ist definiert durch:

$$\Delta V = V_{\text{Funk}} - V_{\text{Anz}}. \quad (6.1)$$

Im zweiten Schritt erfolgte eine erneute Überprüfung der Messrichtigkeit mittels der Bestimmung der Fehlerkurve gemäß ISO 4064:2014. Die Messabweichungen wurden mit den Messabweichungen des jeweiligen Zählers vor dem erstmaligen Einbau verglichen. Nach der Bestimmung der Fehlerkurve wurden die Zähler für eine weitere Periode im Versorgungsnetz verbaut und bis zum erneuten Ausbau monatlich ausgelesen.

Um die Messbeständigkeit der Zähler zu quantifizieren, wurde die Änderung der Messabweichung für jeden Durchflussspunkt herangezogen. Dabei wurde die Spanne der Messabweichungen betrachtet. Dies bedeutet, dass die größte Messabweichung ϵ_{max} und kleinste Messabweichung ϵ_{min} des gesamten Zeitraums für jeden Zähler bestimmt wurde. Im nächsten Schritt wurde der Betrag der Differenz $\Delta\epsilon$ der maximalen und minimalen Messabweichung gebildet:

$$\Delta\epsilon = |\epsilon_{\text{max}} - \epsilon_{\text{min}}| \quad (6.2)$$

Im letzten Schritt wurde die maximale Differenz $\Delta\epsilon_{\text{max}}$ eines Zählertyps bestimmt.

6.3 Ergebnisse

Im Rahmen der Untersuchung konnten vier vollständige Perioden erfasst und analysiert werden. Innerhalb des Untersuchungszeitraums kam es bei der Fernablesung des Zählers zu sporadischen Abstürzen einzelner Softwareprogramme. Als mögliche Ursache hierfür kann der normale Alterungsprozess der Geräte in Betracht gezogen werden. Außerdem konnte die Auslesesoftware auf den verwendeten Geräten nicht aktualisiert werden. Das bedeutet, dass möglicherweise schon zu Beginn der Untersuchungen Fehler in der Software vorhanden waren, die durch ein Update hätten behoben werden können. Es besteht die Möglichkeit, dass diese Fehler in der Software in Einzelfällen einen Absturz verursacht haben. Des Weiteren konnte be-

obachtet werden, dass die Auslesung bei niedrigen Außentemperaturen von unter 10 °C mit höherer Wahrscheinlichkeit zu Problemen führt als bei Temperaturen über 10 °C. Obgleich vereinzelte Softwareabstürze zu verzeichnen waren, konnten die Zählerstände aus der Ferne jederzeit abgelesen werden. Dabei wurde ersichtlich, dass die Reichweite der Fernablesung je nach Hersteller und Einbauort erheblich variiert. Teilweise konnten Werte aus mehreren hundert Metern Entfernung abgelesen werden, während bei anderen Herstellern eine deutlich geringere Entfernung von teilweise weniger als 10 m erforderlich war, um den Wert abzulesen. Zudem kam es bei Brandschutztüren zu einer geringeren Reichweite des Signals zur Auslesung. Sobald der Empfänger ein ausreichendes Signal des Zählers erfasst hatte, konnten die Verbrauchswerte innerhalb weniger Sekunden erfasst werden.

Die Überprüfung des aus der Ferne abgelesenen Verbrauchsstandes im Vergleich zur Zähleranzeige am Ende jeder Messperiode ergab, dass bei keinem der elektronischen Zähler eine Diskrepanz zwischen dem angezeigten Wert und dem aus der Ferne erfassten Zählerstand vorlag.

Bei den mechanischen Zählern mit Zusatzeinrichtung kam es zu geringfügigen Abweichungen. Dies ist damit zu begründen, dass nicht der Wert der Anzeige des Rollenzählwerks direkt wiederholt wird, sondern der Anlaufstern des Zählers über einen Reedkontakt erfasst wird. Bei den Zählern von Hersteller G konnte kein exakter Vergleich zwischen Anzeige und aus der Ferne abgelesenem Wert vorgenommen werden, da die zweite Nachkommastelle der Anzeige durch den Aufsatz der Zusatzeinrichtung für die Fernablesung verdeckt wird. Dieser Aufsatz ist fest mit dem Zähler verbunden und kann nicht zerstörungsfrei entfernt werden. Somit ist nur ein Vergleich bis zur ersten Nachkommastelle der Anzeige (100 l) möglich. Zudem wurden zwei Zähler dieses Typs während einer Einbauperiode fälschlicherweise entgegen der Durchflussrichtung eingebaut. Somit ist ein Vergleich der Anzeige nur von drei Zählern möglich. Bei der Überprüfung im Jahr 2022 ergab sich für die Zähler eine Diskrepanz von ΔV von weniger als $-0,1 \text{ m}^3$. Nach der vierten Einbauperiode beträgt die Diskrepanz ΔV von $-0,2 \text{ m}^3$, $-0,2 \text{ m}^3$ und $0,3 \text{ m}^3$. Dies entspricht einer prozentualen Abweichung zwischen $-0,13 \%$ und $0,09 \%$. Es besteht somit die Tendenz, dass die Diskrepanz zwischen der Anzeige und dem aus der Ferne abgelesenem Wert mit der Zeit zunimmt.

Die Übereinstimmung der Anzeige und des aus der Ferne abgelesenen Werts der Zähler von Hersteller D ergab keine Auffälligkeiten. Die Abweichung ΔV beträgt bei jeder Überprüfung zwischen $-0,001 \text{ m}^3$ und $0,003 \text{ m}^3$. In Bezug auf den Gesamtverbrauch nach der vierten Einbauperiode entspricht dies einer maximalen Abweichung von $0,001 \%$, welche als vernachlässigbar eingestuft werden kann.

Neben der Überprüfung der Zusatzfunktion wurde die Änderung der Messrichtigkeit der Zähler untersucht. Bei keinem Zähler konnte eine Abhängigkeit zwischen der Änderung der Messabweichung und dem Einbauort festgestellt werden.

Für die Zähler von Hersteller A zeigt sich, dass sich die Messrichtigkeit mit der Zeit ändert. Insgesamt sind die Messabweichungen aller Zähler über den gesamten Untersuchungszeitraum kleiner als $\pm 1\%$. Die Messabweichungen der fünf Zähler bei den vier Überprüfungen sind in Abb. 6.2 dargestellt.

Mit Ausnahme des Zählers Z28 lässt sich die Tendenz erkennen, dass sich die Messabweichung im Verlauf der Zeit zunehmend in positive Richtung verschiebt. Dies bedeutet, dass die Zähler mit der Zeit mehr Volumen erfassen.

Die Messabweichungen der Zähler von Hersteller B sind in Abb. 6.3 dargestellt. Es gilt zu beachten, dass aufgrund der fehlenden Technik und der nicht frei zugänglichen Bedienungsanleitungen zur Auslesung der Zähler im Testmodus in den Jahren 2020 bis 2023 lediglich der Impulsausgang der Zähler von Hersteller B verwendet wurde. Dieser weist eine sehr geringe Impulswertigkeit von 1 Imp-/l auf. Infolgedessen kam es zu großen Standardabweichungen von bis zu 5,9 %, da insbesondere bei den ersten zwei Durchflussspunkten lediglich eine kleine Referenzmenge verwendet werden konnte. Die Verwendung einer größeren Referenzmenge ist nicht zielführend, da dies zu deutlich verlängerten Messzeiten führt, wodurch andere Einflussfaktoren wie beispielsweise eine Drift der Waage, Verdunstung oder Temperaturschwankungen das Messergebnis verfälschen könnten.

Bei der Überprüfung im Jahr 2024 war es aufgrund neuer Erkenntnisse mit dem Umgang mit den Zählern möglich, die Zähler im Testmodus zu überprüfen. Dies führte dazu, dass eine sehr viel größere Impulswertigkeit von 400 Imp/l verwendet werden konnte. Dadurch wurde die Wiederholbarkeit der Messungen erheblich verbessert. Bei allen Messungen lagen die Standardabweichungen unter 0,15 %. Insgesamt weist der Zähler bei der letzten Überprüfung sehr geringe Messabweichungen von -1 % - 0,7 % auf. Allgemein ist keine systematische Verschiebung der Fehlerkurve erkennbar.

In Abb. 6.4 sind die Messabweichungen der Zähler von Hersteller C dargestellt. Im Vergleich zur Nullmessung werden die Messabweichungen nach der ersten Einbauperiode an allen Messpunkten größer. Auch nach der zweiten Periode (2022) ist eine Tendenz zu zunehmenden Messabweichungen erkennbar. Der Trend der konstant größer werdenden Messabweichung lässt sich nach der dritten Überprüfung im Jahr 2023 nicht bestätigen. Hier sind die Messabweichungen im Vergleich zu 2022 nahezu identisch oder teilweise etwas kleiner.

Auffällig bei diesem Zähler ist, dass die Messabweichungen bei der Nullmessung nicht einseitig sind. Ab der ersten Überprüfung 2021 weisen alle Zähler des Herstellers jedoch ausschließlich negative Messabweichungen auf. Dies bedeutet, dass alle Wasserzähler dieses Herstellers während der Überprüfungen von 2022 bis 2024 ein höheres Volumen erfassen als die Referenz anzeigt.

In Abb. 6.5 sind die Messabweichungen der fünf Wasserzähler von Hersteller D dargestellt. Es zeigt sich, dass sich die Messabweichung mit jeder Einbauperiode ändert. Die Messabweichungen am Messpunkt Q_1 der Zähler Z04 (6,5 %) und Z05 (8,65 %) liegen zu Beginn der Untersuchungen (2020) außerhalb der Eichfehlergrenze von 5 %. Bei den darauf folgenden Überprüfungen liegen die Messabweichungen dieser zwei Zähler jedoch im zulässigen Bereich der Verkehrsfehlergrenze. Zudem hat der Zähler Z01 im Jahr 2024 eine Messabweichung von -13,48 %, welche außerhalb der Verkehrsfehlergrenzen liegt. Selbiges zeigte sich im Jahr 2023 für den Zähler Z03 (-12,1 %). Dies bedeutet, dass die Zähler nicht die Vorgaben der MID hinsichtlich der Messrichtigkeit erfüllen.

Die Messabweichungen an den Prüfpunkten mit einem höheren Durchfluss als Q_2 liegen jederzeit im Bereich der Fehlergrenzen. Es konnte keine systematische Abhängigkeit zwischen der Messabweichung und der Verlängerung der Einbauzeit festgestellt werden.

In Abb. 6.6 sind die Messabweichungen der Zähler von Hersteller G dargestellt.

Der Zähler Z10 weist vor dem Einbau eine maximale Messabweichung von 5,05 % auf. Bei den darauf folgenden Überprüfungen liegen die Messabweichungen dieses Zählers jedoch wieder im Bereich der Fehlergrenzen. Nach der Überprüfung der Zähler im Jahr 2024 wurde bei einem Wasserzähler von Hersteller G ein defektes Rollenzählwerk festgestellt. Dieser Zähler wurde nicht mehr im Netz verbaut.

Die Messabweichungen aller Zähler zeigen über die Jahre eine Variation. In Tab. 6.3 ist die maximale Spannweite der Messabweichungen für die einzelnen Zählertypen über alle Messungen hinweg dargestellt.

Tabelle 6.3: Maximale Differenzen der Messabweichung über den gesamten Betrachtungszeitraum.

Hersteller	Typ	maximale Differenz in %
A	Ultraschall	1,46
B	Ultraschall	8,1
C	mag.-ind.	2,29
D	Mehrstrahl trockenläufer	15,59
G	Mehrstrahl nassläufer	7,27

Es zeigt sich, dass die Spannweite der Messabweichungen bei elektronischen Zählern

geringer ist als bei mechanischen Zählern. So weisen die elektronischen Zähler von Hersteller A und C lediglich eine maximale Differenz von 2,29 % auf. Die Ergebnisse vom Ultraschallzähler von Hersteller B passen nicht zu den Ergebnissen der anderen elektronischen Wasserzähler. Dies liegt jedoch an der geringen Impulswertigkeit bei den Messungen zwischen 2020 und 2023, was zu einer großen Streuung der Ergebnisse und folglich zu einer großen Differenz führt. Die mechanischen Zähler weisen hingegen eine maximale Differenz von 7,27 % respektive 15,59 % auf.

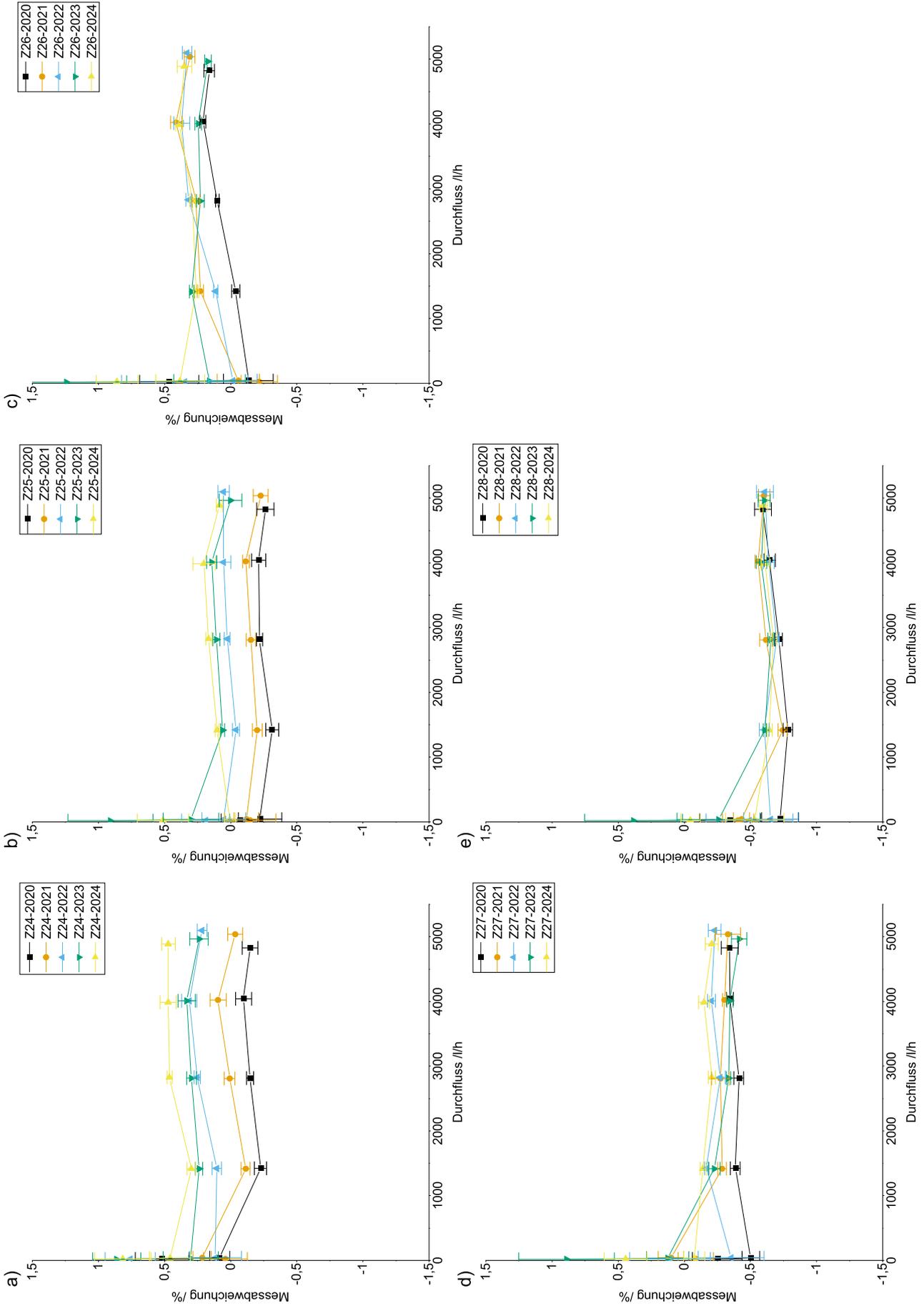


Abbildung 6.2: Messabweichungen der Zähler von Hersteller A vor dem Einbau und nach Ende einer Einbauperiode.

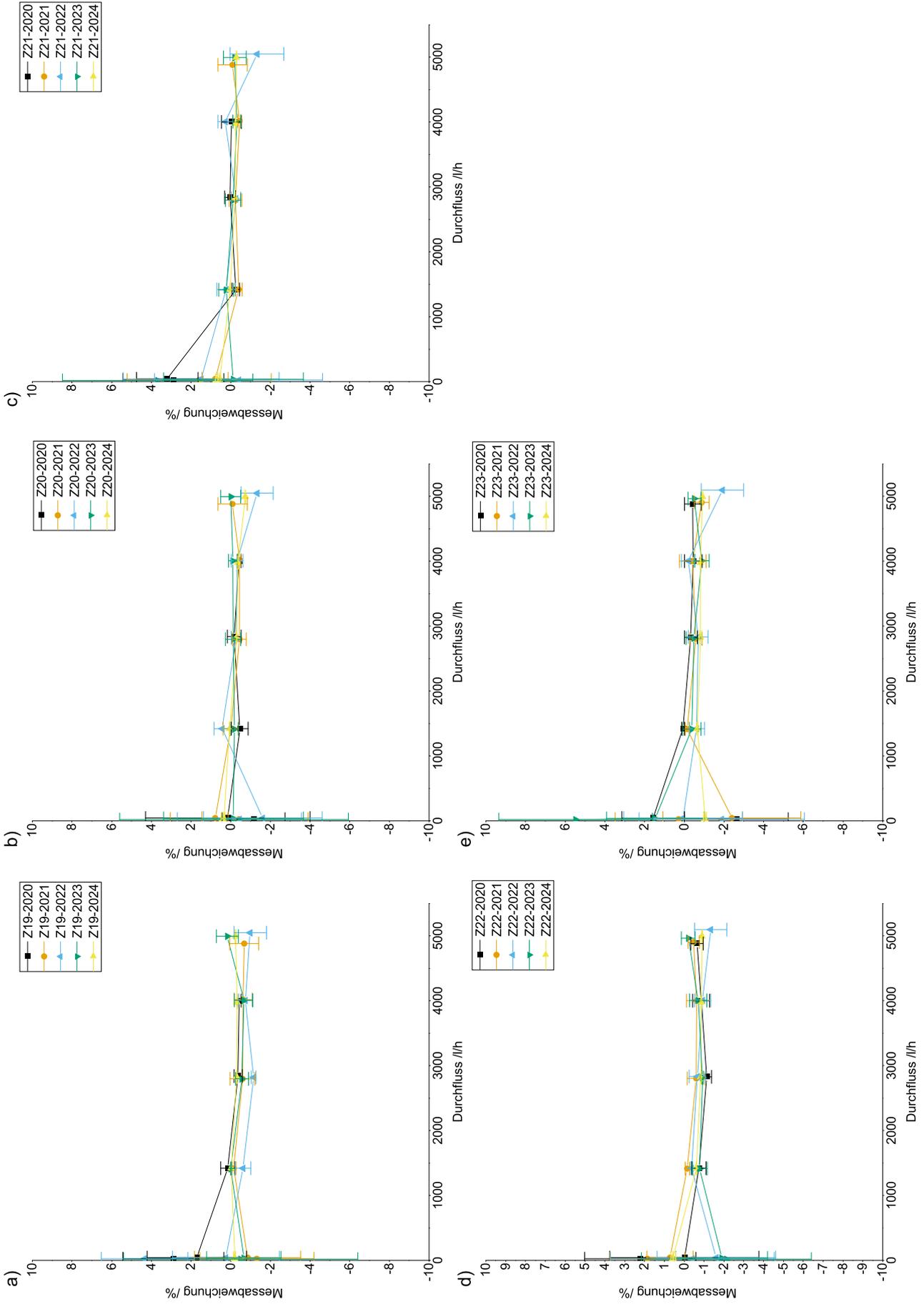


Abbildung 6.3: Messabweichungen der Zähler von Hersteller B vor dem Einbau und nach Ende einer Einbauperiode.

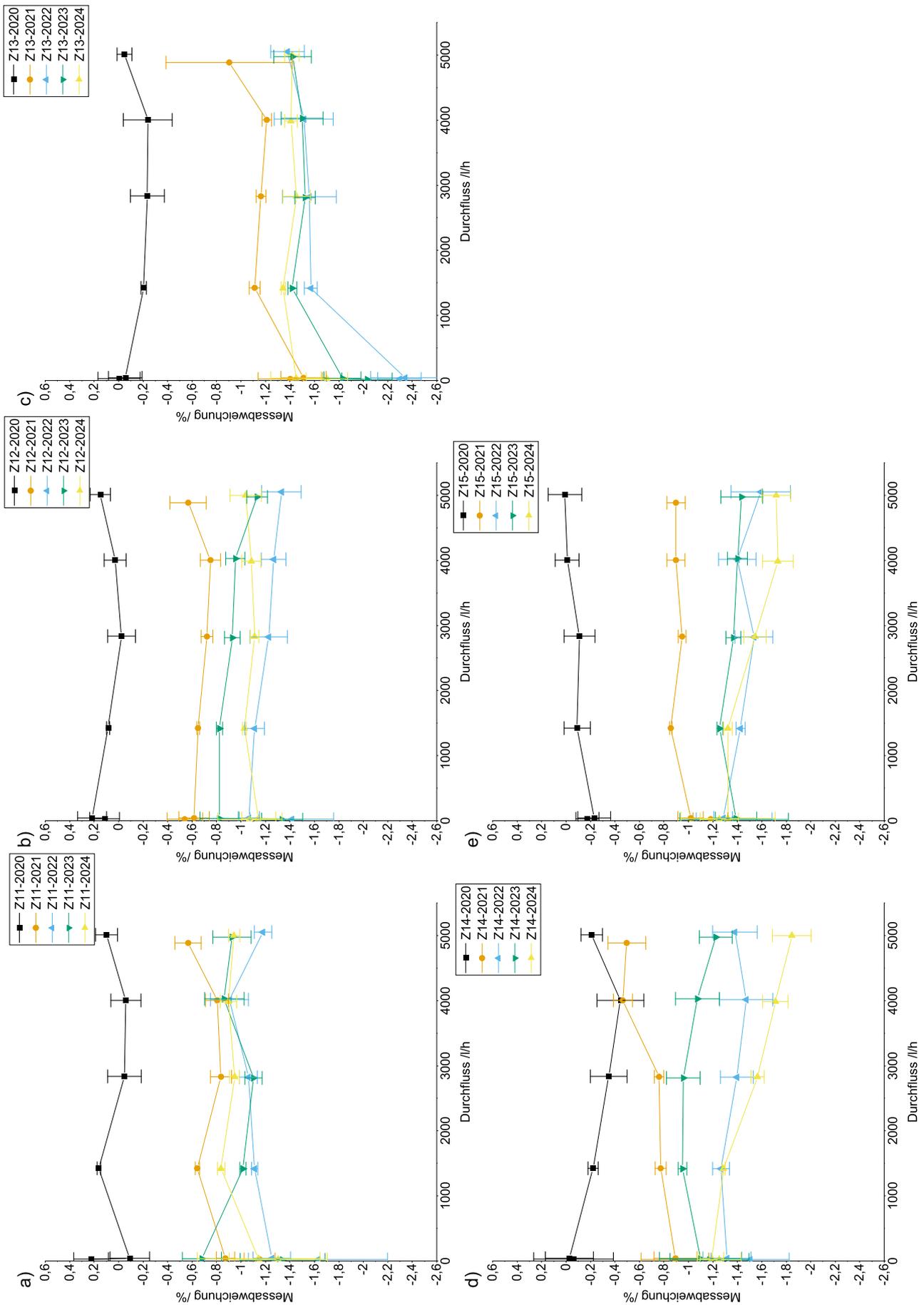


Abbildung 6.4: Messabweichungen der Zähler von Hersteller C vor dem Einbau und nach Ende einer Einbauperiode.

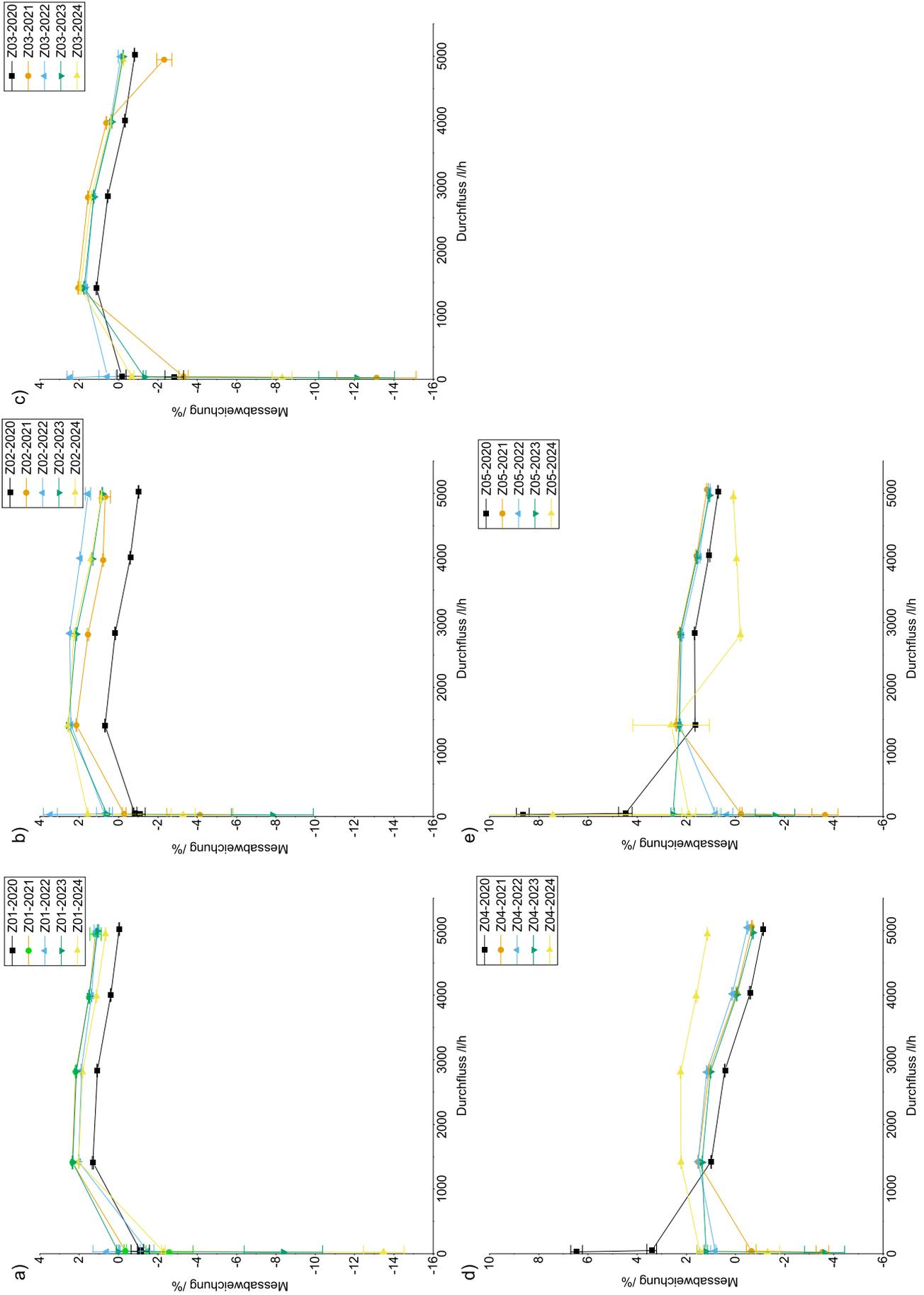


Abbildung 6.5: Messabweichungen der Zähler von Hersteller D vor dem Einbau und nach Ende einer Einbauperiode.

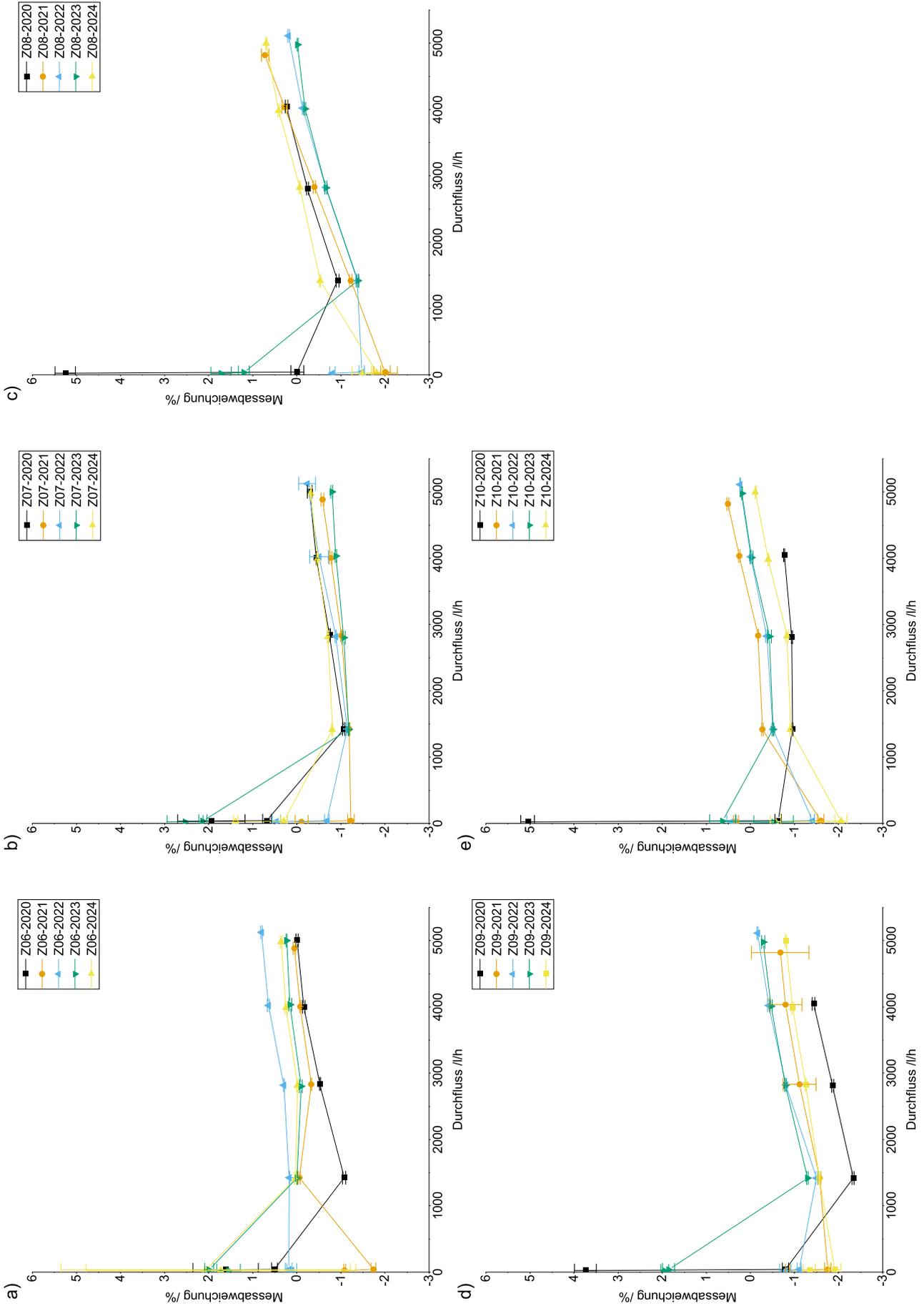


Abbildung 6.6: Messabweichungen der Zähler von Hersteller G vor dem Einbau und nach Ende einer Einbauperiode.

6.4 Zusammenfassung

Am Standort der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig wurden sowohl mechanische als auch elektronische Wasserzähler in fünf Gebäuden installiert. Die Zählerstände wurden in regelmäßigen Abständen durch Fernablesung erfasst. Trotz gelegentlicher Systemausfälle während der monatlichen Fernablesungen war es stets möglich, alle Zähler digital abzulesen. Bei den elektronischen Wasserzählern konnte keine Differenz zwischen dem Wert auf der Anzeige des Zählers und dem aus der Ferne abgelesenen Wert festgestellt werden. Bei den mechanischen Zählern mit Zusatzmodul wurde eine geringfügige Differenz zwischen dem Wert der Anzeige und dem aus der Ferne abgelesenen Wert festgestellt. Bei Hersteller D traten in allen Perioden Abweichungen von maximal 0,001 % auf und bei Hersteller G von 0,13 %.

Zusätzlich zur Überprüfung der Funktionalität der Fernablesung wurde die Veränderung der Messgenauigkeit der Zähler über verschiedene Einbauperioden hinweg analysiert. Es lässt sich feststellen, dass elektronische Zähler im Allgemeinen eine geringere Streuung der Messabweichungen über den gesamten Messbereich aufweisen. Darüber hinaus zeigen die Messabweichungen der elektronischen Zähler der Hersteller A und C eine systematische zeitliche Veränderung. Insbesondere bei den Zählern des Herstellers A ist eine Tendenz erkennbar, dass diese im Laufe der Zeit ein zunehmend höheres Volumen erfassen. Die Wasserzähler von Hersteller C weisen hingegen ein entgegengesetztes Verhalten auf. Bei den Wasserzählern von Hersteller B, D und G konnten keine systematischen Änderungen in der Messabweichung festgestellt werden. Bei den mechanischen Zählern wurden die größten Messabweichungen bestimmt. Teilweise lagen die Messabweichungen über den vorgegebenen Verkehrsfehlergrenzen.

Zum Zeitpunkt des Abschlusses dieser Arbeit waren die Zähler erst seit einer halben Eichperiode installiert. In Deutschland bleiben Wasserzähler üblicherweise mindestens sechs Jahre in Betrieb, was eine umfassende Bewertung ihrer Leistung über diesen Zeitraum erforderlich macht. Nur so lassen sich fundierte Aussagen über die Funktionalität der Fernablesung sowie die Langzeitstabilität und Messrichtigkeit der Zähler treffen. Daher werden die regelmäßigen Auslesungen sowie die jährlichen Überprüfungen weiterhin durchgeführt, um langfristige Daten zur Messgenauigkeit und Zuverlässigkeit der Zähler zu sammeln und zu analysieren.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die hier vorliegende Arbeit hat sich mit verschiedenen Fragestellungen bezüglich des Messverhaltens von elektronischen Hauswasserzählern beschäftigt.

Es wurden Forschungsfragen bezüglich der Möglichkeit der Erkennung von Leckagen mittels Hauswasserzählern untersucht. Hierzu wurden sowohl mechanische als auch elektronische Zähler verwendet. Es zeigt sich, dass unter bestimmten Voraussetzungen Leckagen mit jedem Zählertyp detektiert werden können. Die hierzu anzuwendenden Kriterien bezüglich der Art und des Ortes der Leckage sind in Abschnitt 3.4 aufgeführt. Es zeigt sich, dass insbesondere die Sensitivität des Zählers einen großen Einfluss auf die Möglichkeit der Erkennung von Leckagen hat.

Im weiteren Teil der Arbeit wurde der Einfluss von diskreten Messungen auf die Messrichtigkeit untersucht. Es wurde zunächst eine theoretische Betrachtung durchgeführt, bei welcher die Einflussfaktoren Interpolationsmethode, Betrachtungszeitraum und Start der Abtastung näher beleuchtet wurden. Hierbei zeigt sich, dass die zwei untersuchten Arten der Interpolation (Rechteck und linear) bei gleichem Abtastintervall zu vergleichbaren Ergebnissen führen. Beide Interpolationsarten weisen Bereiche der Unter- beziehungsweise Überregistrierung auf. Diese Bereiche sind nicht zwangsläufig gleich groß, wodurch eine Messabweichung des Zählers resultiert. Bei den betrachteten Profilen führen beide Interpolationsmethoden zu vergleichbaren Messabweichungen. Somit sind beide Arten gleichermaßen zur Ermittlung des durch den Zähler geflossenen Volumens geeignet.

Als weiterer Einflussfaktor wurde der Betrachtungszeitraum ausgemacht. Hierbei wurden Betrachtungszeiträume zwischen einem Tag und einem Jahr untersucht. Die Untersuchungen zeigten, dass die Länge des Betrachtungszeitraums einen erheblichen Einfluss auf die durch die Abtastung resultierende Messabweichung hat. Bei kurzen Betrachtungszeiträumen treten größere Messabweichungen auf als bei längeren. Dies lässt sich damit erklären, dass bei kurzen Betrachtungszeiträumen weniger Ausgleichsvorgänge stattfinden.

Als dritter Einflussfaktor wurde der Start der Abtastung untersucht. Hierbei zeigt sich, dass der Start der Abtastung einen erheblichen Einfluss auf die Messabweichung

hat. Es existiert jedoch bei keinem der Profile ein idealer Startzeitpunkt, bei welchem für jedes Abtastintervall die geringste Messabweichung auftritt.

Anhand der Untersuchungen lässt sich somit festhalten, dass das gewählte Abtastintervall und der Start der Abtastung einen erheblichen Einfluss auf die Messrichtigkeit von Hauswasserzählern unter realen Verbrauchsbedingungen haben. Als Empfehlung kann auf Basis der Untersuchungen bei einem Betrachtungszeitraum (Abrechnungszeitraum) von einem Jahr ein Abtastintervall von mindestens 10 s empfohlen werden. Mittels einer Vorgabe für eine Obergrenze des Abtastintervalls kann etwaigem Missbrauch - wie eine gezielte Wasserentnahme zwischen den Messzeitpunkten - entgegengetreten werden. Diese Empfehlung wurde bereits in einschlägigen Gremien auf europäischer Bühne diskutiert und ist in der überarbeiteten Fassung der ISO 4064 (2024) erstmals mit aufgenommen. Es ist jedoch möglich, dass sich die Charakteristik des Wasserverbrauchs in Europa zukünftig verändert. In diesem Fall wären neue Untersuchungen bezüglich des Einflusses des Abtastintervalls auf die Messrichtigkeit von Wasserzählern zu wiederholen und neu zu bewerten. Gleiches gilt, wenn Vorgaben für das Abtastintervall für Länder mit anderen Verbrauchscharakteristiken gemacht werden sollen.

In einem weiteren Teil der Arbeit wurde der Einfluss der Wasserqualität auf die Messbeständigkeit von Hauswasserzählern betrachtet und vorangehend die Messrichtigkeit neuwertiger Zähler untersucht. Bei der im ersten Schritt erfolgten Bestimmung der Fehlerkurve von neuwertigen Hauswasserzählern zeigt sich, dass die Messrichtigkeit eine starke Abhängigkeit vom Messprinzip und vom Hersteller und von der Charge aufweist. Im nächsten Schritt wurden die Zähler unterschiedlichen Wasserqualitäten unter Verwendung eines realen Verbrauchsprofils und einem Gesamtvolumen von 187,74 m³ ausgesetzt. Anhand dieser Untersuchungen zeigt sich, dass alle Zählertypen Alterungserscheinungen bei realem Betrieb unterliegen und im Laufe der Verwendung die Messabweichungen der Zähler sich ändern. Dabei haben die untersuchten Parameter pH-Wert, Gesamthärte sowie Partikelgröße und Partikelkonzentration unterschiedliche Einflüsse auf die Messrichtigkeit der Zähler. Keiner der untersuchten Wasserqualitäten beeinflusst die Zähler insofern, dass diese Messabweichungen außerhalb der in der MID vorgegebenen Maximalwerte aufweisen. Unter allen untersuchten Wasserqualitäten führt ein pH-Wert von 7,7 zu den größten Veränderungen der Messabweichung im Vergleich zur Nullmessung. Bei allen Versuchen lässt sich kein Messverfahren als Messverfahren ausmachen, welches stets am geringsten von der Wasserqualität beeinflusst wird. Es zeigt sich, wie bereits bei den Messabweichungen von neuwertigen Zählern, dass die Veränderungen der Messabweichungen infolge von unterschiedlichen Wasserqualitäten stark vom Hersteller und erst sekundär vom Messprinzip abhängig sind. Bei den Untersuchungen treten Änderungen der Messabweichung zwischen -4,6 % und 4,8 % auf. Im Rahmen

der Untersuchungen konnte nur eine geringe Anzahl an Wasserzählern untersucht werden. Daher wären weitere Untersuchungen mit einer größeren Anzahl an Zählern sinnvoll, um die hier erlangten Erkenntnisse zu untermauern. Zudem sollten weiterhin alle Wasserzähler, unabhängig vom Messprinzip, Messbeständigkeitsprüfungen unterzogen werden, bis es eine hinreichend aussagekräftige Datenbasis gibt.

Im letzten Teil der Arbeit wurde die Möglichkeit der Fernablesung untersucht. Hierzu wurde ein eigens für die Versuche eingerichtetes Messnetz auf dem Gelände der PTB genutzt. Die Zähler wurden in monatlichen Abständen aus der Ferne abgelesen und einmal im Jahr ausgebaut, um die Messrichtigkeit des Zählers zu überprüfen und den fernabgelesenen Zählerstand mit dem Zählerstand der Anzeige zu vergleichen. Hierbei zeigt sich, dass sich die Reichweite des Signals zur Fernablesung sehr stark herstellerspezifisch unterscheidet und der Einbauort ebenfalls eine Rolle spielt. Teilweise konnten Zähler aus mehreren hundert Metern abgelesen werden. Für die Fernablesung anderer Zähler war hingegen ein Abstand von unter 10 m erforderlich, welcher in der Praxis allerdings zu Problemen bzw. einem erheblichen Mehraufwand führen könnte. Zudem kam es bei kalten Außentemperaturen zu vereinzelt Abstürzen der Auslesesoftware, was jedoch auf Probleme eher bei der Hardware als bei der Software zurückzuführen ist. Es war über den gesamten Zeitraum möglich, den Zählerstand aus der Ferne abzulesen. Dabei ergab die jährliche Überprüfung des Zählerstands im Vergleich zur Anzeige keine Auffälligkeiten. Bei den elektronischen Zählern wurden keine Abweichungen festgestellt. Bei den mechanischen Zählern hingegen betrugen die Abweichungen maximal 0,13 % in Bezug auf das Gesamtvolumen des Zählers, was als vernachlässigbar angesehen werden kann.

Die Änderung der Messrichtigkeit der Zähler konnte als Nebenprodukt der Überprüfung der Fernablesung untersucht werden. Es zeigt sich, dass sich die Messrichtigkeit der Zähler nach jeder Einbauperiode ändert. Bei den Zählern von Hersteller B, D und G konnten keine systematischen Änderungen der Messabweichung nachgewiesen werden. Die Zähler von Hersteller A zeigen eine sehr stabile Messabweichung mit der leichten Tendenz der Verschiebung der Messabweichung. Die Messabweichungen der Zähler von Hersteller C werden nach der ersten und zweiten Einbauperiode systematisch größer. Diese größer werdende Messabweichung tritt jedoch nicht nach der dritten Einbauperiode auf. Nach der dritten Einbauperiode sind die Messabweichungen nahezu identisch mit der vorherigen bzw. etwas kleiner. Besonders auffällig ist jedoch, dass die Messabweichungen aller magnetisch-induktiven Zähler einseitig (negativ) sind. Die Zähler des Herstellers G halten nicht alle zu jederzeit die Verkehrsfehlergrenzen ein. Es ist jedoch nicht so, dass, wenn die Messabweichung einmal außerhalb der Verkehrsfehlergrenze lag, dies auch in den folgenden Jahren der Fall war.

Als abschließendes Fazit dieser Arbeit kann zusammengefasst werden, dass die hohen Erwartungen an elektronische Hauswasserzähler nicht vollständig erfüllt werden. Mechanische Hauswasserzähler zeigen nach dem Einsatz unterschiedlicher Wasserqualitäten teilweise vergleichbare Messabweichungen, was die Überlegenheit elektronischer Zähler in Bezug auf die Messgenauigkeit infrage stellt. Ein wesentlicher Vorteil der elektronischen Zähler liegt jedoch in den integrierten Alarm- und Warnmeldungen, die einen bedeutenden Mehrwert gegenüber den klassischen, rein mechanischen Zählern darstellen. Nichtsdestotrotz besteht die Möglichkeit, mechanische Zähler durch Zusatzmodule aufzurüsten, wodurch dieser Vorteil der elektronischen Zähler teilweise relativiert wird. Angesichts der zunehmenden Bedeutung der erweiterten Zusatzfunktionen in der Wasserzählertechnologie ist jedoch zu erwarten, dass sich elektronische Wasserzähler in den kommenden Jahren verstärkt auf dem Markt etablieren werden. Die kontinuierliche Weiterentwicklung und Integration neuer Funktionalitäten dürften dabei eine entscheidende Rolle spielen. Die Anschaffungskosten müssen für jeden spezifischen Anwendungsfall individuell betrachtet werden. Elektronische Zähler weisen zwar höhere Anschaffungskosten im Vergleich zu mechanischen Zählern auf, jedoch können diese durch Einsparungen bei den Personalkosten für das Ablesen der Zähler innerhalb kürzerer Zeit ausgeglichen werden.

Literaturverzeichnis

- 17IND13 Metrowamet (2021). Technical report describing the algorithms for the detection and evaluation of leakage. https://www.ptb.de/empir2018/index.php?eID=tx_securedownloads&p=239&u=0&g=0&t=1675769500&hash=65ae16f0f0581369e0da39d917c2f9f0f3c1180e&file=/fileadmin/documents/empir/MetroWaMet/Documents/17IND13_Metrowamet_D5_Accepted.pdf, Zugriff am 18.08.2022.
- AL-Washali, T., Sharma, S., AL-Nozaily, F., Haidera, M. und Kennedy, M. (2019). Modelling the leakage rate and reduction using minimum night flow analysis in an intermittent supply system, *Water* 11(1): 48.
- Altendorf, M. (2006). *Flow Handbook: A practical guide : measurement technologies - applications - solutions*, 3. Auflage, Endress+Hauser.
- Aqion (2024). <https://www.aqion.de/>, Zugriff am 20.11.2024.
- Arregui, F., Cabrera, E, J. und Cobacho, R. (2007). *Integrated water meter management*, IWA Publishing.
- Arregui, F., Gavara, F., Soriano, J. und Pastor-Jabaloyes, L. (2018). Performance analysis of ageing single-et water meters for measuring residential water consumption, *Water* 10(5): 612.
- Arregui, F. J., Pastor-Jabaloyes, L., Mercedes, A. V. und Gavara, F. J. (2020). Accuracy of solid-state residential water meters under intermittent flow conditions, *Sensors* 20(18).
- Avacon Wasser GmbH (2024). Ihr Wasserverbrauch. <https://www.avacon-wasser.de/content/dam/revumb/avacon-wasser/documents/formulare/abrechnung-und-z%C3%A4hlerstand/Info%20Wasserverbrauch2.pdf> Zugriff am 17.10.2024.
- Banks, D., Birke, M., Flem, B. und Reimann, C. (2015). Inorganic chemical quality of European tap water: 1. Distribution of parameters and regulatory compliance, *Appl. Geochem.* 59: 200–210.

- Barbeau, B., Gauthier, V., Julienne, K. und Carriere, A. (2005). Dead-end flushing of a distribution system: short and long-term effects on water quality, *Water Science & Technology Water Supply* 54: 371–383.
- Barkmann, D. (2018). Wohngebäudeversicherung: Leitungswasserschäden werden immer teurer. <https://avw-gruppe.de/artikel/wohngebaeudeversicherung-g-leitungswasserschaeden-werden-immer-teurer>, Zugriff am 06.02.2023.
- BGBI. (2014). Bundesgesetzblatt. vom 11. Dezember 2014 (BGBl. I S. 2010). Zuletzt geändert durch die Verordnung vom 29. Januar 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 27).
- BMJV (2021). Mess- und Eichverordnung vom 11. Dezember 2014 (BGBl. I S. 2010, 2011), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 29. Januar 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 27) geändert worden ist.).
- bnNETZE GmbH (2021). Wie funktioniert der Funkwasserzähler? <https://wasser.bnnetze.de/wasser-allgemein/wasserzaehler/funkwasserzaehler>, Zugriff am 10.06.2021.
- Bonfig, K. W. (2002). *Technische Durchflussmessung: Unter besonderer Berücksichtigung neuartiger Durchflussmeßverfahren*, 3. Auflage, Vulkan-Verlag.
- Borchling, A., Kroner, C. und Tränckner, J. (2022). Effect of the sampling interval on the measurement accuracy of electronic water meters under real consumption conditions, *Water Supply* .
- Britton, T., Cole, G., Stewart, R. und Wiskar, D. (2008). Remote diagnosis of leakage in residential households, *Water* 35: 56–60.
- Büker, O., Stolt, K., Kroner, C., Benkova, M., Pavlas, J. und Seypka, V. (2021). Investigations on the influence of total water hardness and pH value on the measurement accuracy of domestic cold water meters, *Water* 13(19): 2701.
- Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort (2021). <https://news.wko.at/news/oesterreich/erlaeuterung-entwurf-vo-verlaengerung-nacheichfrist-wasserza.pdf>, Zugriff am 15.12.2022.
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2024). Positionspapier zu weiteren notwendigen Änderungen im Mess- und Eichgesetz und in der Mess- und Eichverordnung.
- Czichos, H. (2000). *Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften*, Springer Berlin, Heidelberg. Hütte, 31. neubearbeitete und erweiterte Auflage, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (2022). Wasser Nr. 114: Elektronische Wasserzähler.
- Deutscher Verein des Gas und Wasserfaches (2017). *Technische Regel - Arbeitsblatt DVGW W 392 - Wasserverlust in Rohrnetzen; Ermittlung, Wasserbilanz, Kennzahlen, Überwachung*, DVGW-Regelwerk, DVGW, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V, Bonn.
- Deutscher Verein des Gas und Wasserfaches (2021). *Technische Regel - Arbeitsblatt DVGW W 406 (A) - Wasserzählermanagement*, DVGW-Regelwerk, DVGW, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V, Bonn.
- DIN 4064-1:2014 (2012). Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Physikalische und physikalisch-chemische Stoffkenngrößen (Gruppe C) - Teil 10: Berechnung der Calcitsättigung eines Wassers (C 10).
- DIN EN 14154-4 (2023). Wasserzähler - Teil 4: Zusätzliche Funktionalitäten; Deutsche Fassung EN 14154-4:2023.
- DIN EN ISO 6416:2017-10 (2017). Hydrometrie - Messung des Durchflusses mit dem Ultraschall-Laufzeitverfahren (Transit-time-/Time-of-flight-Verfahren).
- Doucet, D. (2019). MetroWaMet Advisory Board Meeting. Vortrag, MetroWaMet Workshop, Lyon, 12.11.2019.
- Dupont, S. (2019). Testen Sie Ihre Fähigkeiten zur Leckageerkennung. <https://www.kamstrup.com/de-de/blog/test-your-leak-detection-skills>, Zugriff am 18.08.2021.
- Eff, U. (2021). Elektronische Wasserzähler: Bauart, Portfoliomanagement, Präsentation. PTB Workshop zu elektronischen Wasserzählern, online, 15.09.2021.
- Ethem Karadirek, I. (2020). An experimental analysis on accuracy of customer water meters under various flow rates and water pressures, *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua* 69(1): 18–27.
- Europäisches Parlament, Rat der Europäischen Union (2014). Richtlinie 2014/32/EU zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung von Messgeräten auf dem Markt (Neufassung).
- Europäisches Parlament, Rat der Europäischen Union (2020). Richtlinie (EU) 2020/2184 über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch.
- Furness, R. A. (1989). *Fluid flow measurement*, Measurement and control technology series, Longman, Harlow.

- Gauthier, V., Gerard, B., Portal, J. M., Block, J. C. und Gatel, D. (1999). Organic matter as loose deposits in a drinking water distribution system, *Water Research*. 33 (4): 1014–1026.
- Holmes-Higgin, I. (2019). Real life challenges for water meters. Vortrag, MetroWater Workshop, Lyon, 12.11.2019.
- Kaga, Y. und Johguchi, K. (2021). A 180 nm CMOS smart ultrasonic water flow meter circuit for IoT smart society, *Japanese Journal of Applied Physics* 60(SB): SBBL05.
- Kamstrup A/S (2021). flowIQ® 2200: Moderner Hauswasserzähler mit akustischer Leckageerkennung. <https://www.kamstrup.com/de-de/wasserzaehlerloesungen/intelligente-wasserzaehler/meters/flowiq-2200>, Zugriff am: 14.06.2021.
- Knudsen, S. (2021). Ultraschallzähler versus elektromagnetische Zähler. <https://www.kamstrup.com/de-de/blog/ultrasonic-meters-vs-electromagnetic-meters>, Zugriff am 22.06.2021.
- Krause, J., Ott, T. und Stange, G. (2008). Der turbulente magnetische Durchflussmesser - Experimente und Large-Eddy-Simulationen, *tm - Technisches Messen* 75(11): 601–608.
- Kroner, C., Akselli, B., Benková, M., Borchling, A., Büker, O., Christoffersen, N., Pavlas, J., Schumann, D., Seypka, V., Ünsal, B. und Warnecke, H. (2022). Evaluation of the measurement performance of water meters depending on water quality, *Water Supply* 22 (4): 4700–4715.
- Kuhlmann, H. (2021). Numerische Methoden der Ingenieurwissenschaften. <https://www.fluid.tuwien.ac.at/HendrikKuhlmann?action=AttachFile&do=get&target=NumIng.web.pdf>, Zugriff am 22.11.2024.
- Levinas, D., Perelman, G. und Ostfeld, A. (2021). Water leak localization using high-resolution pressure sensors, *Water* 13(5): 591.
- Loth, J. L., Morris, G. J., Palmer, G. M., Guiler, R. und Browning, P. (2004). Acoustic detecting and locating gas pipe line infringement.
- Luciani, C., Casellato, F., Alvisi, S. und Franchini, M. (2019). Green smart technology for water (GST4Water): Water loss identification at user level by using smart metering systems, *Water* 11(3): 405.
- Martin, H. und Pohl, R. (2015). *Technische Hydromechanik 4: Hydraulische und numerische Modelle*, 3. Auflage, Beuth Verlag GmbH.

- Martin, T. (2021). Smart monitoring of small flow rates: Algorithms for leakage detection , Vortrag. MetroWaMet Dissemination Workshop, online, 15.09.2021.
- Martin, T., Korth, A. und Schubert, K. (2017). Aktualisierung der Verbrauchsganglinien für Haushalte, Kleingewerbe und öffentliche Gebäude sowie Entwicklung eines Modells zur Simulation des Wasserbedarfs. Abschlussbericht, DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., Bonn.
- Marzola, I., Alvisi, S. und Franchini, M. (2021). Analysis of MNF and FAVAD model for leakage characterization by exploiting smart-metered data: The case of the gorino ferrarese (FE-Italy) district, *Water* 13(5): 643.
- Muhammetoglu, A., Albayrak, Y., Bolbol, M., Enderoglu, S. und Muhammetoglu, H. (2020). Detection and assessment of post meter leakages in public places using smart water metering, *Water Resources Management* 34(9): 2989–3002.
- OIML R 49-1 2013 (E) (2013). Water meters for cold potable water and hot water.
- OIML R 49-1 2024 (E) (2024). Water meters for cold potable water and hot water.
- Oren, G. und Stroh, N. Y. (2013). Mathematical model for detection of leakage in domestic water supply systems by reading consumption from an analogue water meter, *International Journal of Environmental Science and Development* pp. 386–389.
- OriginLab (2022). <https://www.originlab.com>, Zugriff am 18.08.2022.
- Rödl & Partner (2020). Benchmarking große Wasserversorger. https://www.bdew.de/media/documents/220714_Benchmarking_Bericht_grosse_Wasserversorger_5_Runde.pdf, Zugriff am 25.03.2024.
- Scholzen, G. (2010). Leitungswasserschäden: Probleme ohne Ende?, *Schadenprisma* 03: 8–14.
- Schumann, D. (2020). *Entwicklung von realitätsnahen Prüfprozeduren für Durchflussmessgeräte basierend auf realen Verbrauchsprofilen*, Dissertation, Universität Rostock.
- Schumann, D., Kroner, C., Unsal, B., Haack, S., Christophersen, N., Benková, M. und Knotek, S. (2021). Measurement of water consumption for the development of a new test regime for domestic water meters, *Flow Measurement and Instrumentation* 79: 101963.
- Umweltbundesamt (2024). Öffentliche Wasserversorgung. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/wasserwirtschaft/oeffentliche-wasserversorgung>, Zugriff am 17.10.2024.

- unabhängigen Datenschutzaufsichtsbehörden des Bundes (2024). Datenverarbeitung im Zusammenhang mit funkbasierten Zählern . https://www.datenschutzkonferenz-online.de/media/oh/240816_DSK_OH_Datenverarbeitung_funkbasierte_Zaehler.pdf Zugriff am 17.10.2024.
- van der Wiel, M., Beumer, E., van Deursen, R. und Volmer, W. (2021). Sampling mode in water meters: contribution to WELMEC WG13, Vortrag. WELMEC WG13 Meeting, online 15.-16.06.2021.
- Vreeburg, J. H. G., Schippers, D., Verberk, J. Q. J. C. und Van Dijk, J. C. (2008). Impact of particles on sediment accumulation in a drinking water distribution system, *Water Research* 42 (16): 4233–4242.
- Warnecke, H. (2024). *Ermittlung der Bedingungen zum Einsatz von Kavitationsdüsen-Technologie als Durchflussregulatoren und zur reproduzierbaren Erzeugung dynamischer Durchflussprofile*, Dissertation, Universität Rostock.
- Warnecke, H., Kroner, C., Ogheard, F., Kondrup, J., Christoffersen, N., Benková, M., Büker, O., Haack, S., Huovinen, M. und Ünsal, B. (2022). New metrological capabilities for measurements of dynamic liquid flows, *Metrologia* 59: 025007.
- Warnecke, H., Kroner, C., Schumann, D. und Tränckner, J. (2021). Generation, validation and application of dynamic load profiles in flow measurement using cavitating Herschel–Venturi nozzles, *Flow Measurement and Instrumentation* 82.
- Wendt, G., Schumann, D., Hünemeyer, C., Oldörp, T. und Schonlau, H. (2017). Investigation of domestic water meters with regard to their measuring stability during installation in communal water supply networks, *OIML Bull.* 58 (4): 10–16.
- Wirtschaftskammer Österreich (2021). Verlängerung der Nacheichfrist für Wasserzähler; Stellungnahme. <https://www.wko.at/oe/news/16-ak-stellungnahme-wasserzaehler.pdf>, Zugriff am 27.03.2024.
- Wisotzky, F. (2012). *Angewandte Grundwasserchemie, Hydrogeologie und hydrogeochemische Modellierung*, Springer Berlin, Heidelberg.

A Anhang

A.1 Versuche zur Leckageerkennung

A.1.1 Vorversuche mittels Coriolis-Durchflussmesser

Leckage an Position A

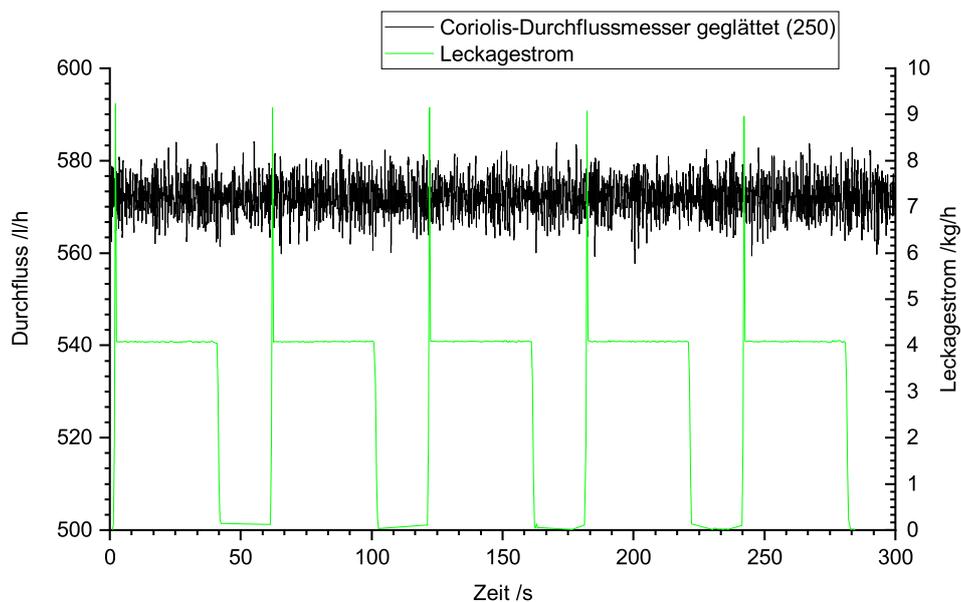


Abbildung A.1: Geglättetes Durchflusssignal (gleitender Mittelwert über 250 Messpunkte) des Coriolis-Durchflussmessers in Zusammenhang mit maximal realisierbarer Leckage an Position A bei einem nominalen Durchfluss von 575 l/h.

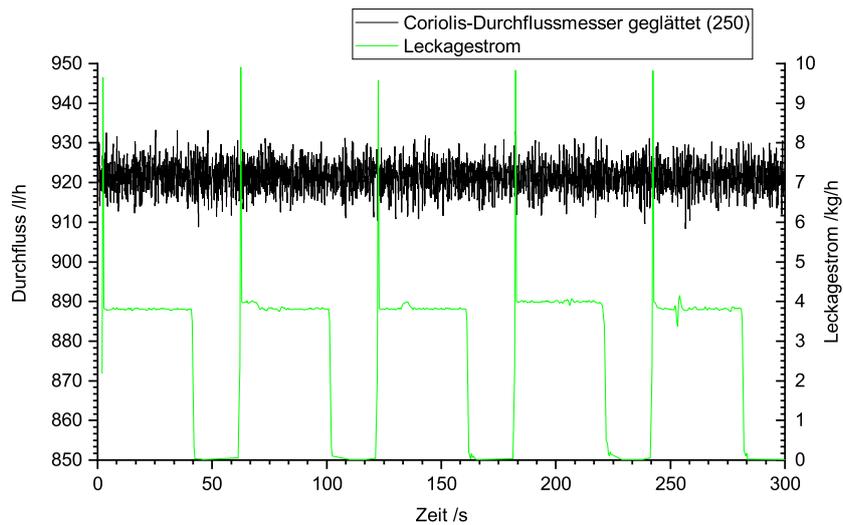


Abbildung A.2: Geglättetes Durchflusssignal (gleitender Mittelwert über 250 Messpunkte) des Coriolis-Durchflussmessers in Zusammenhang mit maximal realisierbarer Leckage an Position A bei einem nominalen Durchfluss von 915 l/h.

Leckage an Position B

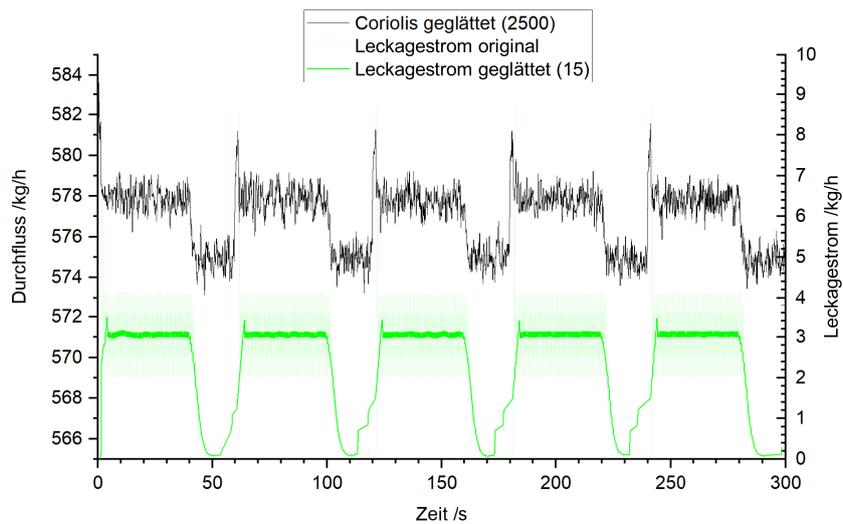


Abbildung A.3: Geglättetes Durchflusssignal (gleitender Mittelwert über 2500 Messpunkte) des Coriolis-Durchflussmessers in Zusammenhang mit einer Leckage (3 l/h) an Position B bei einem nominalen Durchfluss von 575 l/h.

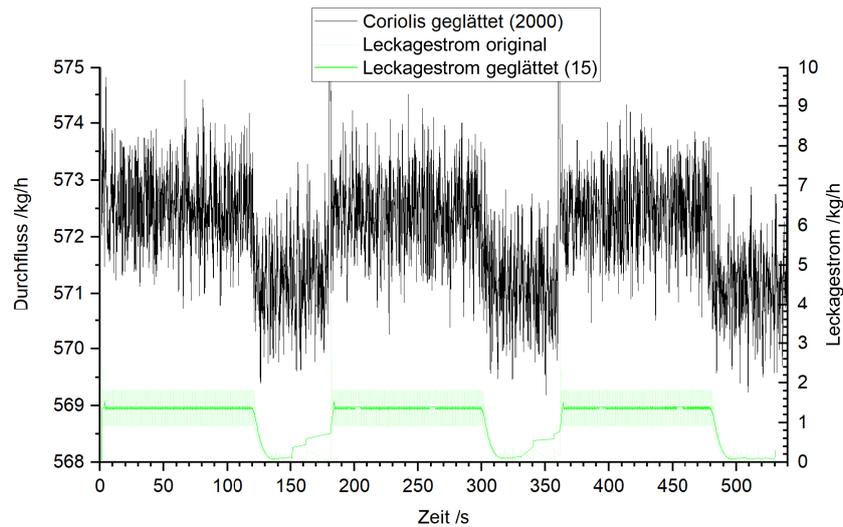


Abbildung A.4: Geglättetes Durchflusssignal (gleitender Mittelwert über 2000 Messpunkte) des Coriolis-Durchflussmessers in Zusammenhang mit einer Leckage (1,5 l/h) an Position B bei einem nominalen Durchfluss von 575 l/h.

Leckage an Position C

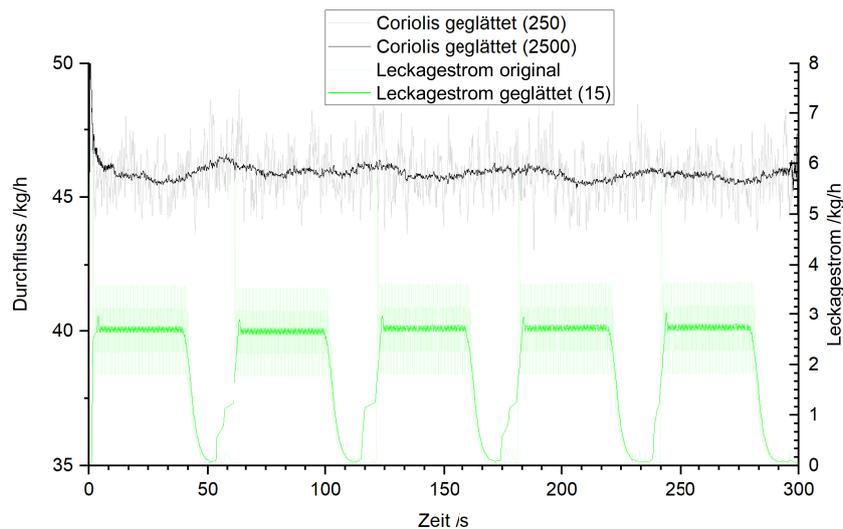


Abbildung A.5: Geglättetes Durchflusssignal (gleitender Mittelwert über 250 und 2500 Messpunkte) des Coriolis-Durchflussmessers in Zusammenhang mit einer Leckage (3 l/h) an Position C bei einem nominalen Durchfluss von 40 l/h.

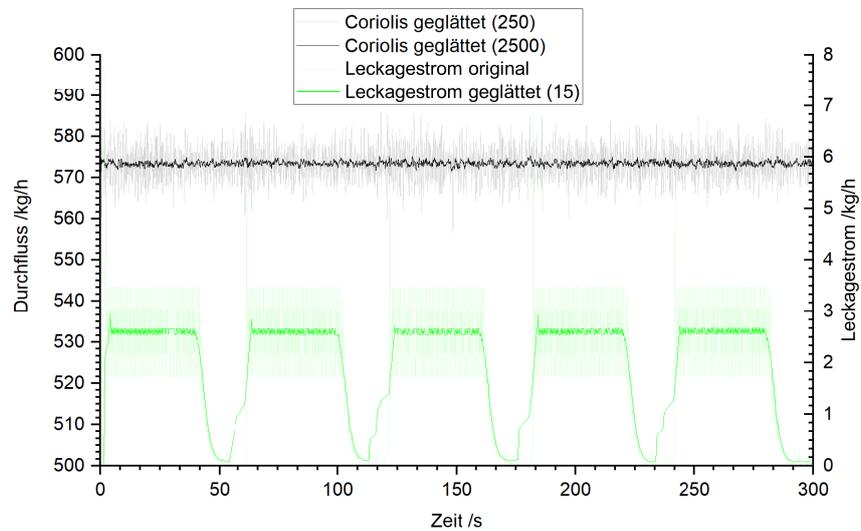


Abbildung A.6: Geglättetes Durchflusssignal (gleitender Mittelwert über 250 und 2500 Messpunkte) des Coriolis-Durchflussmessers in Zusammenhang mit einer Leckage (3 l/h) an Position C bei einem nominalen Durchfluss von 575 l/h.

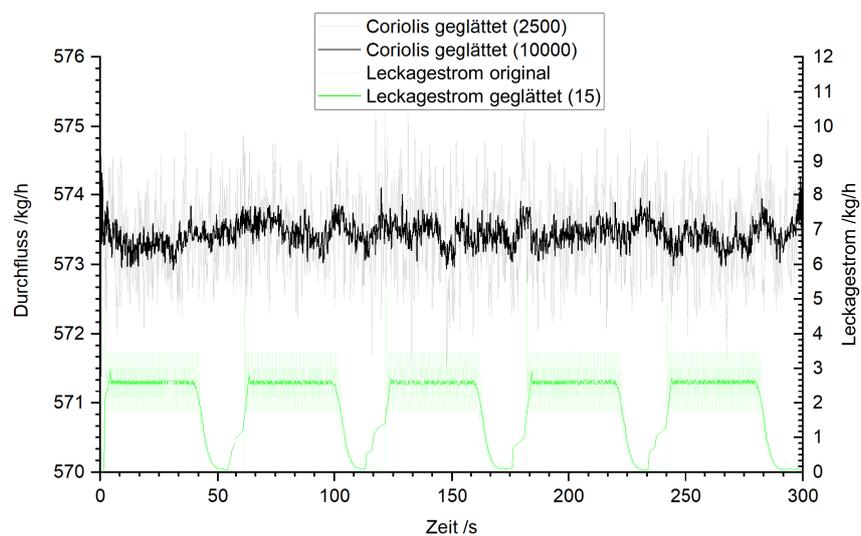


Abbildung A.7: Detailansicht: Geglättetes Durchflusssignal (gleitender Mittelwert über 2500 und 10000 Messpunkte) des Coriolis-Durchflussmessers in Zusammenhang mit einer Leckage (3 l/h) an Position C bei einem nominalen Durchfluss von 575 l/h.

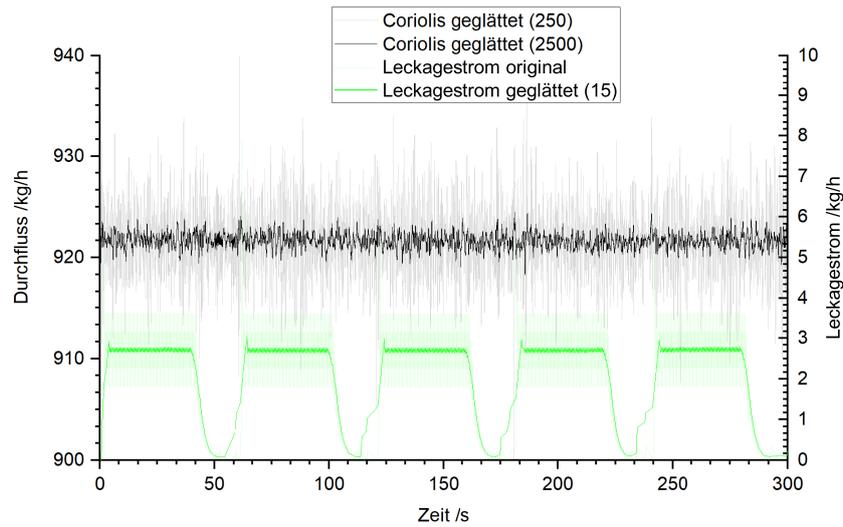


Abbildung A.8: Durchflusssignal des Coriolis-Durchflussmessers in Zusammenhang mit einer Leckage (3 l/h) an Position C bei einem nominalen Durchfluss von 915 l/h.

A.1.2 Turbine

Leckage an Position A

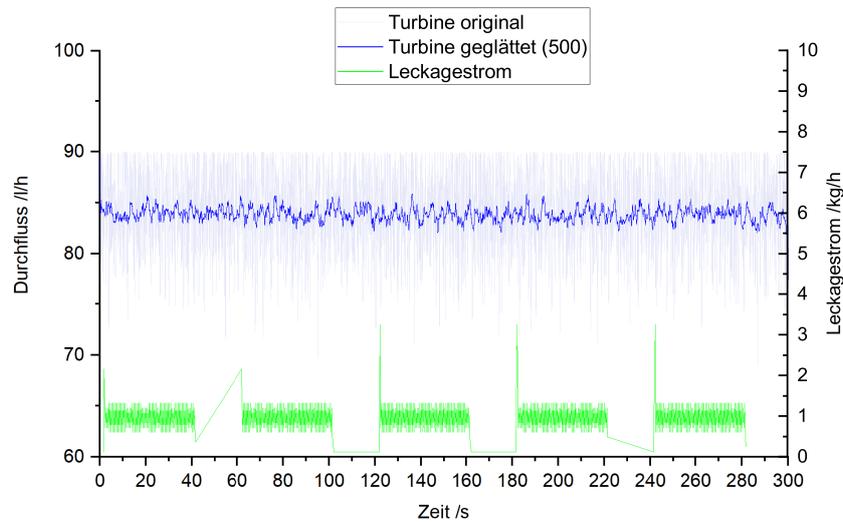


Abbildung A.9: Durchflusssignal und geglättetes Durchflusssignal (gleitender Mittelwert über 500 Messpunkte) der Turbine in Zusammenhang mit einer Leckage (1 l/h) an Position A bei einem nominalen Durchfluss von 85 l/h.

Leckage an Position C

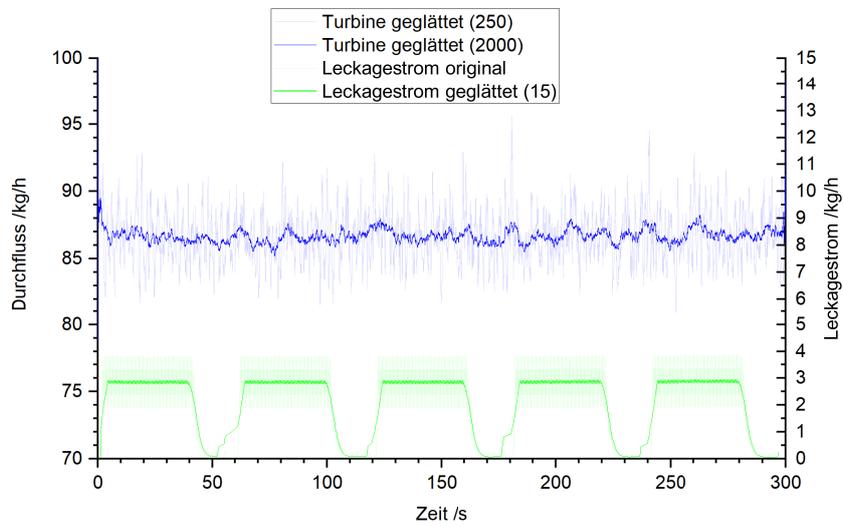


Abbildung A.10: Geglättetes Durchflusssignal (gleitender Mittelwert über 250 und 2000 Messpunkte) der Turbine in Zusammenhang mit einer Leckage (3 l/h) an Position C bei einem nominalen Durchfluss von 85 l/h.

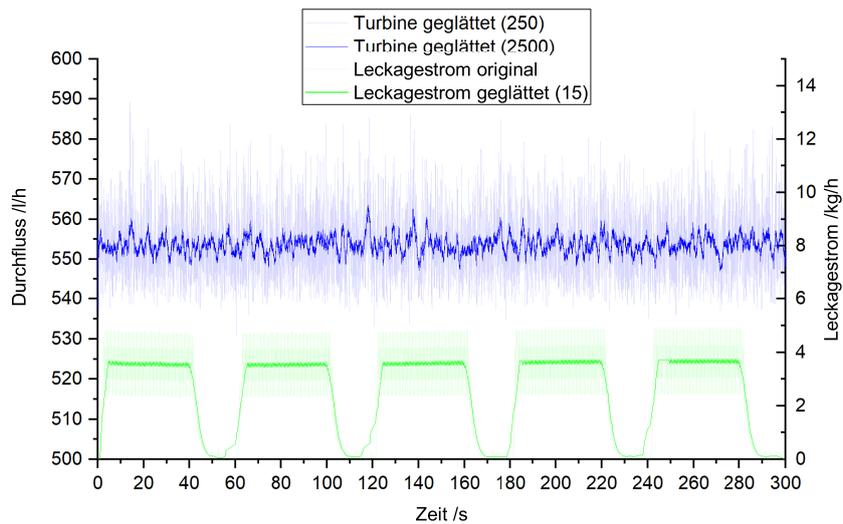


Abbildung A.11: Durchflusssignal der Turbine in Zusammenhang mit einer Leckage (3 l/h) an Position C bei einem nominalen Durchfluss von 575 l/h.

A.2 Auswirkungen von diskreten Messungen

A.2.1 Fehlerverteilungen bei unterschiedlichen Betrachtungszeiträumen

A.2.1.1 Einfamilienhaus

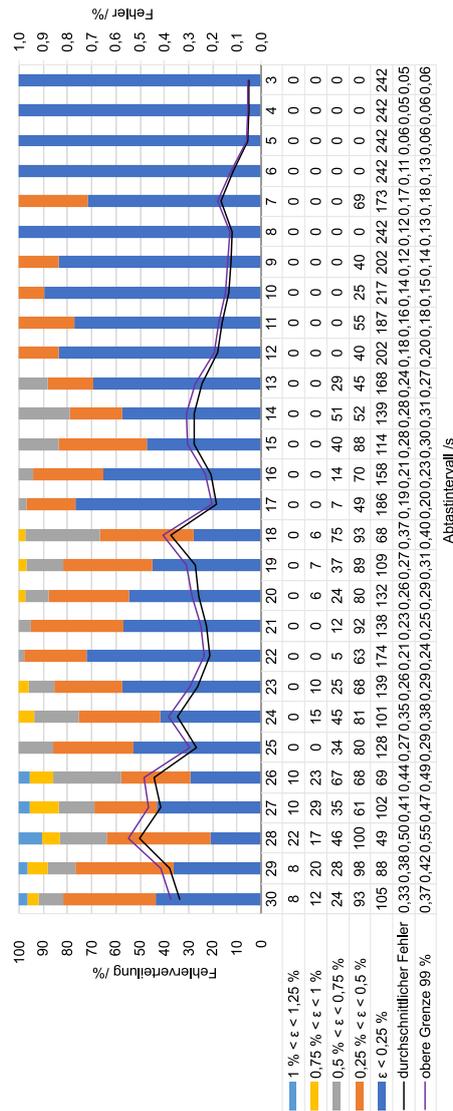


Abbildung A.12: Fehlerverteilung bei einer Betrachtungsdauer von sechs Monaten

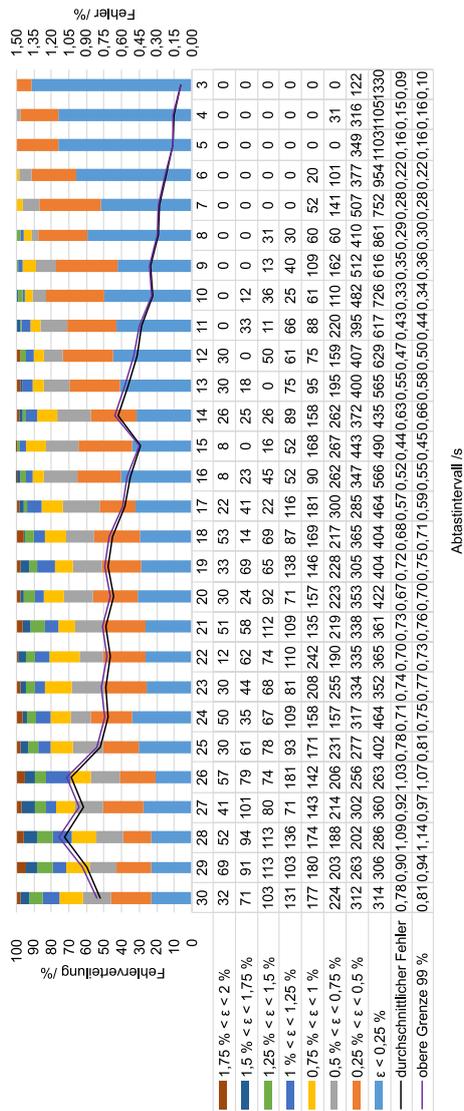


Abbildung A.14: Fehlerverteilung bei einer Betrachtungsdauer von einem Monat.

A.2.1.2 Mehrfamilienhaus

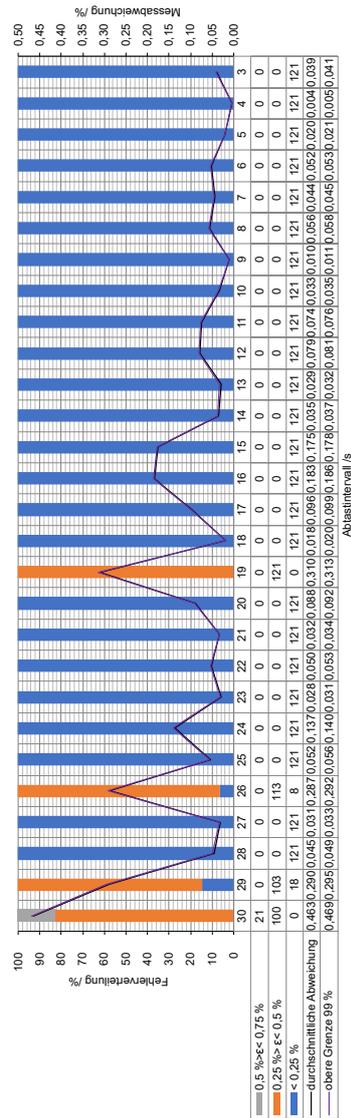


Abbildung A.15: Fehlerverteilung bei einer Betrachtungsdauer von acht Monaten.

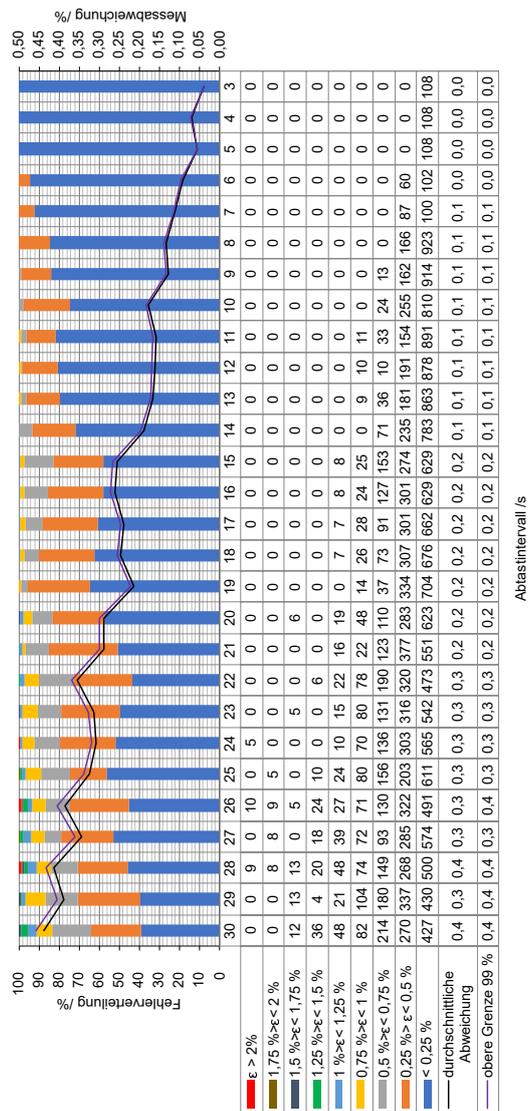


Abbildung A.16: Fehlerverteilung bei einer Betrachtungsdauer von einem Monat.

A.2.1.3 Stochastisches Tagesprofil

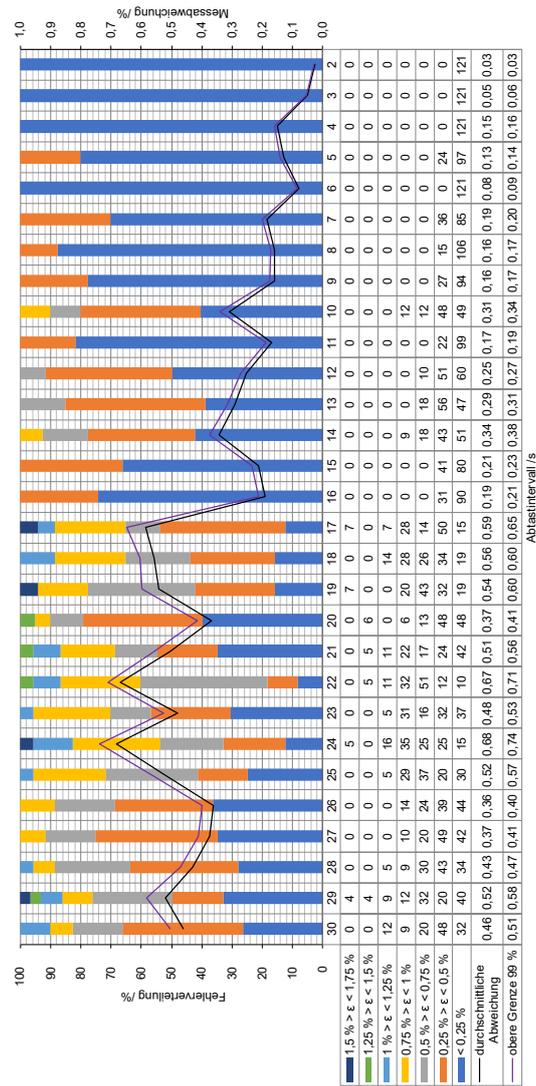


Abbildung A.18: Fehlerverteilung stochastisches Tagesprofil

A.2.1.4 Stochastisches Wochenprofil

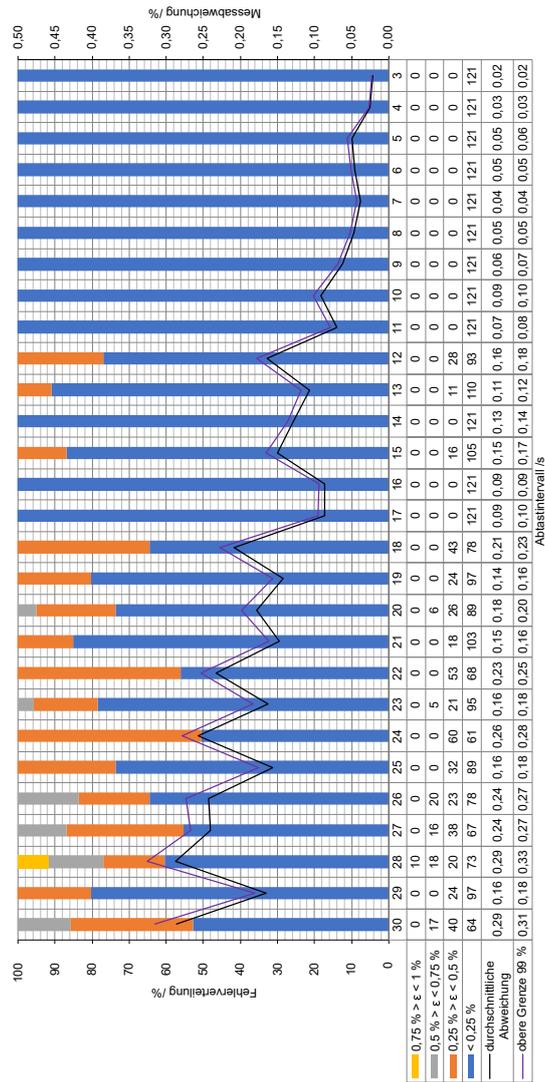


Abbildung A.19: Fehlerverteilung stochastisches Wochenprofil

A.2.2 Experimentelle Überprüfung von Wasserzählern unter realitätsnahen Bedingungen

Tabelle A.1: Durchflusspunkte des entwickelten realitätsnahen Tagesprofils.

Durchfluss Ursprungsprofil /l/h	reduzierte Durchflüsse /l/h	Düsenkombination
0	0	63
7	5	62
31	25	58
40	32	57
46	38	55
61	50	53
68	55	52
87	70	49
92	75	48
96	98	47
99	103	46
108	110	45
120	115	44
131	118	43
137	123	42
143	130	41
147	135	40
156	136	39
160	140	30
164	141	38
169	147	29
175	148	37
180	152	28
185	156	35
191	161	34
198	167	25
219	168	33
225	178	22
231	185	21
235	190	20
241	193	19
259	198	18
265	210	16
280	233	15
288	238	14

A.3 Anhang Auswirkung Wasserqualität

Tabelle A.2: Zusammensetzung des Testwassers (TW) in Zusammenhang mit der Basislösung (BL) der Untersuchungen zur Auswirkung der Wasserqualität auf die Messgenauigkeit von Wasserzählern für die Variation des pH-Werts KRONER ET AL. (2022), (BÜKER ET AL., 2021).

Name	chem. Zusammensetzung	Lösung (BL) /g/l	Ionen	Ionenkonzentration in BL /g/l	Anteil Lösung /ml(BL)/l(TW)	Testwasser Ionenkonzentration /mg/l
Calcium chloride dihydrate	$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	86,9	Ca^{2+}	86,9	0,5	21,0
Magnesium sulfate heptahydrate	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	77,9	Mg^{2+}	77,9	2	11,8
Sodium bicarbonate	$NaHCO_3$	67,2	HCO_3^-	67,2	2,5	60,7
Di-Sodium hydrogen phosphate dihydrate	$Na_2HPO_4 \cdot 2H_2O$		Na^+	137,0		15,4
Potassium dihydrogen phosphate	KH_2PO_4			137,0		122,0
Calcium chloride dihydrate	$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	86,9	Ca^{2+}	86,9	0,5	21,0
Magnesium sulfate heptahydrate	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	77,9	Mg^{2+}	77,9	2	11,8
Sodium bicarbonate	$NaHCO_3$	67,2	HCO_3^-	67,2	2,5	60,7
Di-Sodium hydrogen phosphate dihydrate	$Na_2HPO_4 \cdot 2H_2O$		Na^+	137,0		15,4
Potassium dihydrogen phosphate	KH_2PO_4			137,0		122,0
Calcium chloride dihydrate	$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	86,9	Ca^{2+}	86,9	0,5	21,0
Magnesium sulfate heptahydrate	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	77,9	Mg^{2+}	77,9	2	11,8
Sodium bicarbonate	$NaHCO_3$	67,2	HCO_3^-	67,2	2,5	60,7
Di-Sodium hydrogen phosphate dihydrate	$Na_2HPO_4 \cdot 2H_2O$		Na^+	137,0		15,4
Potassium dihydrogen phosphate	KH_2PO_4			137,0		122,0
Calcium chloride dihydrate	$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	86,9	Ca^{2+}	86,9	0,5	21,0
Magnesium sulfate heptahydrate	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	77,9	Mg^{2+}	77,9	2	11,8
Sodium bicarbonate	$NaHCO_3$	67,2	HCO_3^-	67,2	2,5	60,7
Di-Sodium hydrogen phosphate dihydrate	$Na_2HPO_4 \cdot 2H_2O$		Na^+	137,0		15,4
Potassium dihydrogen phosphate	KH_2PO_4			137,0		122,0
Calcium chloride dihydrate	$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	86,9	Ca^{2+}	86,9	0,5	21,0
Magnesium sulfate heptahydrate	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	77,9	Mg^{2+}	77,9	2	11,8
Sodium bicarbonate	$NaHCO_3$	67,2	HCO_3^-	67,2	2,5	60,7
Sodium hydroxide	$NaOH$	80 (-2 M)		80	0,17	46

Danksagung

Für die umfassende Unterstützung bei der Erstellung dieser Dissertation möchte ich allen Beteiligten meinen herzlichen Dank aussprechen.

Mein besonderer Dank gilt Frau Dr. habil. Corinna Kroner und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Tränckner für ihre engagierte Betreuung, den inspirierenden fachlichen Austausch und ihre wertvolle Unterstützung während meiner Promotionszeit. Ihre fachliche Anleitung, das entgegengebrachte Vertrauen und die stetige Motivation waren für mich von unschätzbarem Wert. Besonders ihre Expertise und ihr konstruktives Feedback haben maßgeblich zur Qualität und Ausrichtung meiner Arbeit beigetragen.

Ebenso möchte ich den Mitarbeitenden der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, insbesondere des Fachbereichs Flüssigkeiten, meinen großen Dank aussprechen. Ihre vielfältige Unterstützung, sei es durch technische Umsetzung oder andere Hilfestellungen, hat die Durchführung und Entwicklung dieser Arbeit maßgeblich erleichtert.

Nicht minder wichtig ist die Unterstützung durch meine Familie und Freunde. Eure Ermutigung, Geduld und das Verständnis, auch in stressreichen Phasen, haben mir die Kraft gegeben, nicht aufzugeben. Ein besonderer Dank gilt Marie, die stets ein offenes Ohr für mich hatte und mich in jeder Hinsicht bestärkt hat.

Abschließend möchte ich mich bei allen bedanken, die auf unterschiedliche Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Ohne euch wäre diese Dissertation nicht möglich gewesen.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich durch eigenhändige Unterschrift, die vorliegende Dissertation selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet zu haben. Die aus den Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Dissertation ist in dieser Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt worden.

Hannover,
Ort, Datum

Unterschrift

Alexander Karl Friedrich Borchling

Helgoländer Straße 2B | 30163 Hannover
T: 0177/6609611 | E: alex.borchling@gmx.de

Zur Person

Name	Alexander Karl Friedrich Borchling
Geburtsdatum	09.03.1991
Geburtsort	Hannover
Adresse	Helgoländer Str. 2B, 30163 Hannover



Beruflicher Werdegang

01.2021– Heute	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig Wissenschaftlicher Mitarbeiter
03.2020– 12.2020	Bertrandt AG, Tappenbeck Projektkoordinator
10.2018– 02.2020	Hankook Tire & Technology Co. Limited, Hannover Entwicklungsingenieur für Reifen
01.2017– 07.2017	Volkswagen AG, Wolfsburg Praktikum - Anfertigen der Studienarbeit in der Vorentwicklung
03.2016– 08.2016	Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach Praktikum als Entwicklungsingenieur (Sitzentwicklung)
03.2016– 08.2016	Daimler AG, Hamburg Praktikum als Planungsingenieur im Prototypenbau
08.2010– 09.2010	Maximator GmbH, Nordhausen Grundpraktikum in der Fertigung

Alexander Karl Friedrich Borchling

Helgoländer Straße 2B | 30163 Hannover
T: 0177/6609611 | E: alex.borchling@gmx.de

Akademischer Werdegang

06.2021 – heute	Promotionsstudium (Dr.-Ing.) Universität Rostock
10.2015 – 06.2018	Master of Science Maschinenbau Leibniz Universität Hannover Abschlussnote: 1,8
10.2010 – 03.2015	Bachelor of Science Maschinenbau Leibniz Universität, Hannover Abschlussnote: 3,3
07.2003 – 06.2010	Abitur Matthias-Claudius Gymnasium, 30989 Gehrden

Auslandsaufenthalt

09.2013 – 04.2014	LUT-University Auslandssemester in Lappeenranta, Finnland
-------------------	---

Zusatzqualifikationen

Sprachkenntnisse	Deutsch – Muttersprache Englisch – Fließend in Wort und Schrift
EDV-Kenntnisse	Microsoft Office – Sehr gute Kenntnisse Excel VBA – gute Kenntnisse ANSYS Workbench – Grundkenntnisse AutoCAD Mechanical – Grundkenntnisse Autodesk Inventor – Grundkenntnisse SAP ERP – Grundkenntnisse LabVIEW – Grundkenntnisse

Alexander Karl Friedrich Borchling

Helgoländer Straße 2B | 30163 Hannover
T: 0177/6609611 | E: alex.borchling@gmx.de

Publikationen

- 12/2024 **Intercomparison of flow facilities for dynamic flow changes based on WLTC and WHTC**, Alexander Borchling, Bissig Hugo, Noriyuki Furuichi, Corinna Kroner, Andrea Malengo, Lucio Postriotti, Raffaella Romeo, Kevin Romieu, Heiko Warnecke, Taiki Yoshida, 2024, PTB-Bericht M-8. ISBN 978-3-944659-40-4, DOI:10.7795/110.20241125
- 08/2024 **The use of coriolis meter as transfer standards in the field of fluid flow**, Enrico Frahm, Alexander Borchling, Chris Mills, 2024, 20th International Flow Measurement Conference 2024
- 08/2024 **Evaluation of influencing factors in the realisation of dynamic flow profiles with cavitation nozzles**
Alexander Borchling, Christian Franke, Corinna Kroner, Heiko Warnecke; 2024, 20th International Flow Measurement Conference 2024
- 08/2024 **Assesing the measurement performance of flow meers close to operating conditions**, Corinna Kroner, Alexander Borchling, Oliver Büker, Heiko Warnecke, 2024, 20th International Flow Measurement Conference 2024
- 06/2023 **Die Welt der Wasserzähler im Wandel**, Alexander Borchling, Corinna Kroner, Basak Akselli, Miroslava Benková, Oliver Büker, Nikki Christoffersen, Søren Haack, Veit Seypka, Heiko Warnecke, 01.06.2023, GWF, Wasser - Abwasser, 2023(6), 89–93 , Vulkan-Verlag GmbH
- 12/2022 **Effect of the sampling interval on the measurement accuracy of electronic water meters under real consumption conditions**, Alexander Borchling, Corinna Kroner, Jens Tränckner, 01.12.2022, Water Supply; 22 (12): 8405–8417. DOI: 10.2166/ws.2022.404
- 05/2022 **Overview of differences between electronic and mechanical domestic cold water meter**, Alexander Borchling, Corinna Kroner, 2022, 19th International Flow Measurement Conference 2022, DOI: 10.21014/tc9-2022.107

Alexander Karl Friedrich Borchling

Helgoländer Straße 2B | 30163 Hannover
T: 0177/6609611 | E: alex.borchling@gmx.de

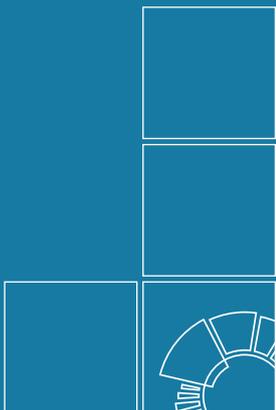
04/2022

Evaluation of the measurement performance of water meters depending on water quality, Corinna Kroner, Başak Akselli, Miroslava Benková, Alexander Borchling, Oliver Bükler, Nikki Christoffersen, Jan Pavlas, Daniel Schumann, Veit Seypka, Bülent Ünsal, Heiko Warnecke; 01.04.2022, Water Supply; 22 (4): 4700–4715. DOI: 10.2166/ws.2022.133

Interessen

Ehrenamt

Teamleiter im Volunteer Hannover 96, Trainer der 1. Herren, Spartenleitung Fußball und 2. Vorsitzender des MTV Lemmie



Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

ISNI: 0000 0001 2186 1887

Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Bundesallee 100

38116 Braunschweig

Telefon: (05 31) 592-93 21

Telefax: (05 31) 592-92 92

www.ptb.de