

AGFW / PTB
Forschungsprojekt
zum Thema

**„Störeinflüsse von Komponenten
der Hausstationen auf Wärmehähler“**

14. Dezember 2020

Projektpartner:

- AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.
- PTB - Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Abbestraße 2 -12, 10587 Berlin, Fachbereich 7.5 Wärme und Vakuum

Autoren:

- Dipl.-Chem. Ulrike Wagner; AGFW e.V.
- Dipl.-Phys. Erwin Ruoff; WSG Essen GmbH
- Dr.-Ing. Jürgen Rose; PTB
- Dipl.-Ing. Fenske, PTB
- B. Eng. Marcus Muchow
- Dr.-Ing. Thomas Eichler, PTB
- Dipl.-Ing. (FH) Martin Straka, PTB

Projektlaufzeit: Teil 1: 2013 bis 2017, Teil 2: 2019 bis 2020

Zeitraum der Untersuchung: 07/2014 bis 11/2017 mit Pause in 2016/2017 unter anderem wegen Baumaßnahmen rund um die PTB.

Baujahr der Durchflusssensoren: 2011

Inhalt

Zusammenfassung	3
1 Einleitung/Ausgangspunkt	4
2 Untersuchungsumfang	5
2.1 Prüflinge	5
2.2 Prüfbedingungen und Prüfprogramm	5
2.3 Störeinflüsse	5
2.4 Zusatzuntersuchung	7
3 Beschreibung der Störeinflüsse	8
3.1 Störeinfluss 1: Änderung der Rohrgeometrie durch Nennweitensprünge	8
3.1.1 Prüfprogramm	8
3.2 Untersuchungen des Störeinflusses 2: „Kegelsitzventil mit unterschiedlicher Öffnungsweite“	9
3.2.1 Prüfprogramm Kegelsitzventil	9
4 Messaufbau	10
5 Voruntersuchungen	11
5.1 Einfluss des Ausgangrohrdurchmessers im Vergleich zum Prüfstandsrohrdurchmesser	11
5.2 Einfluss der Pumpendrehzahl auf die Messstabilität	12
6 Auswertemethodik	15
6.1 Messstabilität der Ergebnisse.....	15
6.2 Auswertemethodik der Messreihen	15
6.3 Fehlergrenzen und Bewertung:	16
6.4 Eingangsmessungen	16
6.5 Zeitverhalten	21
7 Auswertung der Messergebnisse	22
7.1 Kantensprünge von 12 mm und 18 mm auf „DN 15“ des Durchflusssensors	22
7.1.1 Kantensprung 18 mm	22

7.1.2	Kantensprung 12 mm	23
7.1.3	Fazit für die Störgröße Kantensprung	23
7.2	Störgröße Kegelsitzventil	23
7.2.1	Fazit zur Störgröße Kegelsitzventil.....	25
8	Grenzen der Vergleichbarkeit der Bauarten untereinander und der Störuntersuchungen in einer Bauart.....	26
9	Fazit.....	28
10	Beurteilung der Vorgaben für Zähler gemäß FW 218 - vakant	30
11	Laseroptische und numerische Untersuchung der Durchmessersprünge – erweiterter Forschungsauftrag.....	31
11.1	Einleitung	31
11.2	Versuchsaufbau und Strömungsprofilaufnahmen mit Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV)	31
11.2.1	Durchführung der Messung	32
11.2.2	Ergebnisse	33
11.3	Ergänzende Untersuchungen mit Hilfe der numerischen Strömungsmechanik (CFD)	36
11.3.1	Numerisches Setup	36
11.3.2	Ergebnisse des Sprungs von 12 mm auf 17.5 mm	36
11.3.3	Ergebnisse anderer Sprünge	37
11.4	Schlussfolgerung	38
	Literaturverzeichnis	39
	Anhang A Einzelergebnisse der Prüfungen	40
	Anhang B Anhängigkeit vom Regelungsverhalten der Pumpe.....	57

Zusammenfassung

Der Entwicklung „messtechnisch robuster“ Wärmezähler, die unter unterschiedlichen Feldeinsatzbedingungen eine hohe und gleichbleibende Messgenauigkeit besitzen, kommt in der globalisierten Handelswelt eine große Bedeutung zu.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes zwischen dem AGFW und dem Fachbereich 7.5 der PTB wurde der IST-Stand der rohrgeometrischen Einflüsse verschiedener in Fernwärmekom-paktstationen häufig vorkommender Störgrößen auf das Wärmezählerteilgerät Durchfluss-sensor untersucht:

- Kantensprung mit Rohrgrößenänderung, Aufweitung und Verengung sowie
- Öffnung eines Kegelsitzventils

Hierfür wurden 4 Bauarten (Baujahr 2011) eines Ultraschall-Durchflusssensors mit der Nenn-größe $0,6 q_p$ untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Messabweichungen der Durchflusssensoren auf die Störeinflüsse mehrheitlich, im Rahmen der Wiederholpräzision liegen und $<1/3$ der MPE betragen. Allerdings fanden sich auch bei einigen Zählertypen nicht erwartete Empfindlichkeiten im un-teren Durchflussbereich gegenüber der Regelung der Prüfstandarmatur Pumpe.

Allgemein war ein Trend zu stabileren Messergebnissen zu erkennen, wenn der Störkörper kurz vor dem Durchflusssensor sitzt.

Zukünftige Entwicklungen bei Durchflusssensoren sollten deshalb auf die Generierung gezielter Strömungskonditionierer hinarbeiten, die direkt vor Eintritt in den Durchflusssensor platziert werden und die Messstabilität erhöhen.

Begleitend wurden laseroptische Messungen und CFD-Simulationen zu den Störeinflüssen des Kantensprungs Aufweitung und Verengung untersucht. Dabei zeigte sich, dass im Extremfall Totwasserbereiche (Ablösegebiete) mit einer Ausdehnung von 2 Rohrdurchmessern entstehen. Dadurch wird das Strömungsprofil stark beeinflusst. Die Zähler hingegen reagierten mehrheitlich nicht auf diese Strömungsprofilveränderung.

1 Einleitung/Ausgangspunkt

In der Praxis liegt in Fernwärmekomplettstationen der Einbauort des Wärmehäufigerätteilgerätes Durchflusssensor oft in der Nähe (≤ 10 DN) von Armaturen, die als mögliche Störgröße auf das Strömungsprofil wirken und das Messergebnis der Durchflusssmessung beeinflussen können. Auf dem Prüfstand bleiben diese Messabweichungen dementsprechend unerkannt. Befundprüfungen und Voruntersuchungen führten zu diesen Vermutungen, da die Wärmehäufigerät im eingebauten Zustand der Hausstation andere Werte zeigen als auf dem Prüfstand. Aufgrund dessen wurde ein Forschungsprogramm zwischen AGFW und PTB initiiert, das dies untersuchen sollte.

Das AGFW-Gremium EK „Wärmehäufigerät“ hatte die Aufgabe, die Ist-Situation in den Hausstationen zu analysieren und aus den möglichen Störgrößen die wichtigsten zu benennen und für die Untersuchung festzulegen. Die PTB wurde beauftragt auf Ihrem Prüfstand die Prüfscenarien zu entwickeln und durchzuführen und über laseroptische Messungen und CFD-Simulationen zu unterstützen.

Vier in der Branche häufig verwendete Bauarten wurden durch die Hersteller für den Test zur Verfügung gestellt. Die Darstellung der Ergebnisse wird auf Wunsch der Hersteller anonymisiert.

Die Diskussion des Themas in den AGFW-Gremien ergab folgendes Bild der Praxis in Fernwärmekomplettstationen:

- » das dominierende Messprinzip ist der Ultraschall-Durchflusssensor
- » als Baugröße dominieren in der Praxis Durchflusssensoren mit $0,6 q_p$ und $1,5 q_p$ Nenndurchfluss
- » als Messtemperatur wird als durchschnittliche Rücklaufstemperatur in FW-Netzen 50 °C festgelegt.
- » als wesentliche Störungen werden Kantensprünge und nicht vollständig geöffnete Ventile gesehen.

2 Untersuchungsumfang

2.1 Prüflinge

Für die Untersuchung wurden Ultraschall-Durchflusssensoren mit der Nenngröße 0,6 q_p mit DN 15 Anschluss für den PTB-Prüfstand ausgewählt.

Vier Bauarten verschiedener Hersteller wurden getestet - von jeder Bauart waren zunächst vier Prüflinge im Einsatz, von denen zwei für die Prüfungen verwendet wurden.

Eine fünfte Bauart musste nach kurzer Zeit aus dem Programm genommen werden, weil sich im Prüfstandswasser aufgrund einer vorangegangenen Untersuchung Silberionen befanden, die das Innenrohr des Zählertyps angegriffen haben und die Messergebnisse beeinflussten. Alle anderen Bauarten wurden nicht beeinflusst.

2.2 Prüfbedingungen und Prüfprogramm

Die Prüfungen wurden auf dem **PTB-Prüfstand „Haushaltszählerprüfstand“** durchgeführt.

Folgende Prüfbedingungen galten für alle Untersuchungen im Prüfprogramm:

- Temperatur: 50 °C
- Ein Zähler jeder Bauart wird nacheinander mit allen Störeinflüssen konfrontiert
- Ein zweiter Zähler gleicher Bauart wird als Vergleichszähler beständig mit ungestörtem Profil zeitlich parallel und in Reihe gemessen, um die Messbeständigkeit des Zählers und das Alterungsverhalten während der Prüfungen zu verfolgen
- 10 Wiederholmessungen pro Durchflusspunkt
- Die Messabweichungen der Prüflinge wurden gegen Waage gemessen

Alle weiteren Bedingungen für das Prüfprogramm wurden differenziert nach Störgröße festgelegt.

2.3 Störeinflüsse

Als systematische Störeinflüsse auf die Messgenauigkeit und Stabilität von Durchflusssensoren vor dem Hintergrund feldtypischer Verrohrungs- und Armaturensituationen in Fernwärmekompaktstationen wurden für die Untersuchung festgelegt:

1) Rohrgeometrische Einflüsse von Nennweitemsprüngen zum Durchflusssensor mit Nennweite DN 15:

- Nennweitemsprung von 12mm auf den Durchflusssensor (Aufweitung)
- Nennweitemsprung von 18mm auf den Durchflusssensor (Verengung)

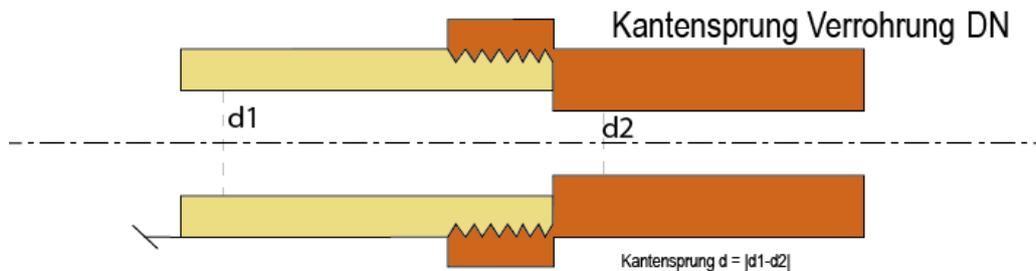


Abbildung 1: Schematische Darstellung Kantensprung je nach Anordnung von d_1 nach d_2 (Verengung – 18 mm Kantensprung) bzw. umgekehrter Einbau von d_2 nach d_1 (Aufweitung – 12 mm Kantensprung)

2) Sitz sowie Öffnungsgrad von Kegelsitzventilen

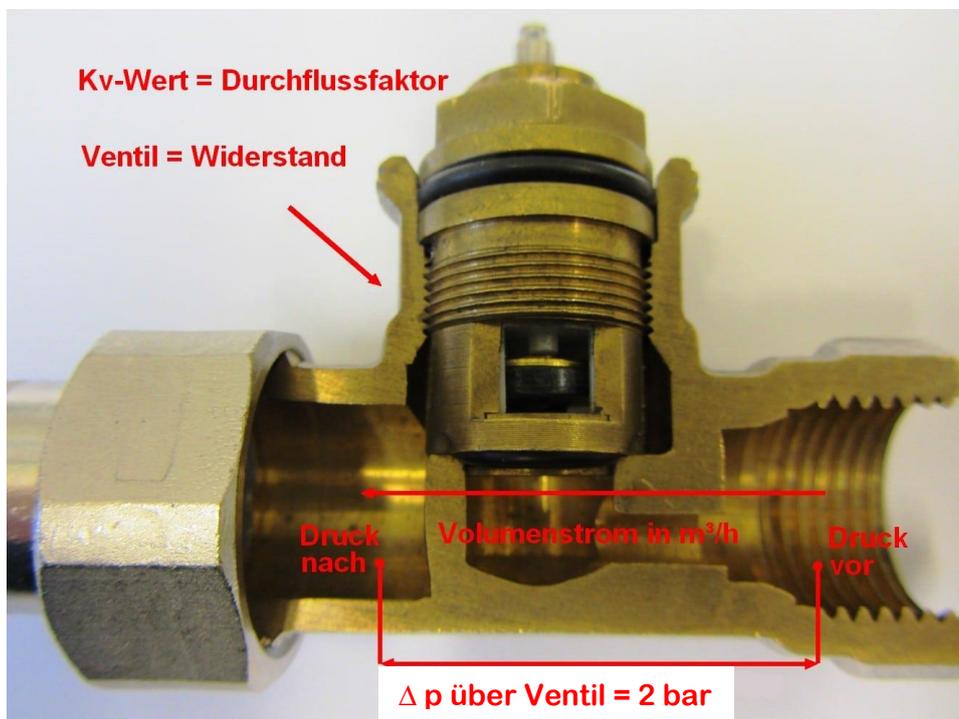


Abbildung 2: Kegelsitzventil

Von der Untersuchung ausgeschlossen wurden alle Störungen, die auf fehlerhafte Montage oder Bedienung zurückzuführen sind, wie z.B. nicht voll geöffnete Kugelhähne.

2.4 Zusatzuntersuchung

Zusätzlich wurde für die Untersuchung der Messabweichungen in Folge eines Durchmesser-sprungs von 12 mm auf 17,46 mm (PTB-Prüfstand) eine Strömungsprofiluntersuchung durch-geführt. Diese erfolgte mit Laser PIV und CFD-Berechnungen. (s. Kap. 11)

3 Beschreibung der Störeinflüsse

3.1 Störeinfluss 1: Änderung der Rohrgeometrie durch Nennweitensprünge

Eine Nennweitenangabe wie die normative Angabe „DN 15“ bedeutet wegen unterschiedlicher Rohrwandstärken mit spezifischen Toleranzen nur eine *ungefähre* Angabe des Innendurchmessers in Millimetern. Unter Berücksichtigung der ebenso genormten Verrohrung der Heizungsanlagen resultieren im Übergang unweigerlich abrupte kleinere Nennweitensprünge [1].

Im Forschungsprojekt galt es diese Nennweitensprünge zu untersuchen. Hierfür wurden zwei Kantensprünge definiert:

- » **Kantensprung 18 mm (Verengung) und**
- » **Kantensprung 12 mm (Aufweitung)**

3.1.1 Prüfprogramm

Folgendes Prüfprogramm wurde für die Störgröße Nennweitensprung für 18 mm und 12 mm Innenrohrdurchmesser durchgeführt:

- » Volumenströme: 6 l/h ($\equiv 0,01 q_p$), 60 l/h ($\equiv 0,1 q_p$), 600 l/h ($\equiv q_p$), 1200 l/h ($\equiv q_s$)
- » Temperatur: 50 °C
- » Strömung vor dem Kantensprung: 100 D = ungestörter Vorlauf
- » Ein Zähler gleicher Bauart wird beständig mit ungestörtem Profil parallel gemessen
- » 10 Wiederholmessungen pro Durchflussspunkt
- » Wiederholende Messkampagne mit variabler und konstanter Pumpendrehzahl bei auffälligen Zählern an bestimmten Durchflusssmesspunkten
- » Die Messabweichungen der Prüflinge wurden gegen Waage gemessen

Weiterhin trat durch eine verrutschte Dichtung bei einer Bauart ein zusätzlicher Fehler auf. Dies bewirkt eine zusätzliche Verengung des Innenrohrdurchmessers. Diese durchaus in der Praxis vorkommende Störung kann in diesem FP nicht ausgewertet werden, weil es sich um einen nicht definierten Störeinfluss handelt.

3.2 Untersuchungen des Störeinflusses 2: „Kegelsitzventil mit unterschiedlicher Öffnungsweite“

In Fernwärmekomplettstationen sind die vorhandenen Ventile aufgrund von Leistungsregulierungen. Des Weiteren beeinflussen Ventile, insbesondere Kegelsitzventile aufgrund der statischen und dynamischen Drucks das Strömungsprofil. Wie die Erfahrung zeigt, gilt dies bei Sitz des Ventils vor dem Durchflusssensor. Da nicht klar war, ob die Beeinflussung auch bei Einbau der Störgröße NACH dem Durchflusssensor stattfindet, wurde diese Situation mit untersucht.

Verwendet wurde ein Kegelsitzventil von Samson (Stellventil 3222k) und der Druckverlust wurde festgelegt auf 2 bar. Bei diesem Ventil führt der Druckverlust von 2 bar zu einer 50%igen Öffnung des Ventils.

Untersucht wurden die Ventilöffnung 100% und 50%. Bei der Öffnung auf 50% wird erwartet, dass aufgrund des inneren Aufbaus des Ventils (ähnlich eines Woltmanzählers mit senkrechter Achse –Typ WS) durch die Reduzierung des Durchflusses eine Beschleunigung der Strömung erfolgt.

Es wird untersucht, ob die damit einhergehenden Änderungen im Strömungsprofil einen Einfluss auf die Messergebnisse von Wärmezähler haben. Sie werden wie in der Praxis sowohl vor als auch nach dem Durchflusssensor platziert in kurzem (2 D) und sehr großem (10 D) Abstand.

3.2.1 Prüfprogramm Kegelsitzventil

Folgendes Prüfprogramm wurde für die Störgröße 2 „Kegelsitzventil vor und nach einem Durchflusssensor“ durchgeführt:

- » Volumenstrom 1: 600 l/h (= q_p) mit 100% Öffnung des Kegelsitzventils
- » Volumenstrom 2: 60 l/h (= 0,1 q_p) mit 50% Öffnung (def. Druckverlust ($\Delta P = 2$ bar),
- » Temperatur: 50 °C
- » Einbaupositionen:
 - » - 10 D und 2 D vor dem Durchflusssensor
 - » - 10 D und 2 D hinter dem Durchflusssensor
- » Ein Zähler gleicher Bauart wird beständig mit ungestörtem Profil zeitlich parallel und in Reihe gemessen
- » 10 Wiederholmessungen pro Durchflusspunkt
- » Wiederholende Messkampagne mit variabler und konstanter Pumpendrehzahl bei auffälligen Zählern an bestimmten Durchflussmesspunkten
- » Die Messabweichungen der Prüflinge wurden gegen Waage gemessen

4 Messaufbau

Abbildung 3 zeigt den bei der PTB eingerichteten gravimetrischen Messaufbau. Hierzu wurde die Prüfanlage für kleine Durchflusssensoren an den Messauftrag durch umfangreiche Bau- maßnahmen angepasst, so dass ausreichend Freiraum für Einbauten von Störkörpern sowie ungestörte Zulauf- längen zur Verfügung steht.

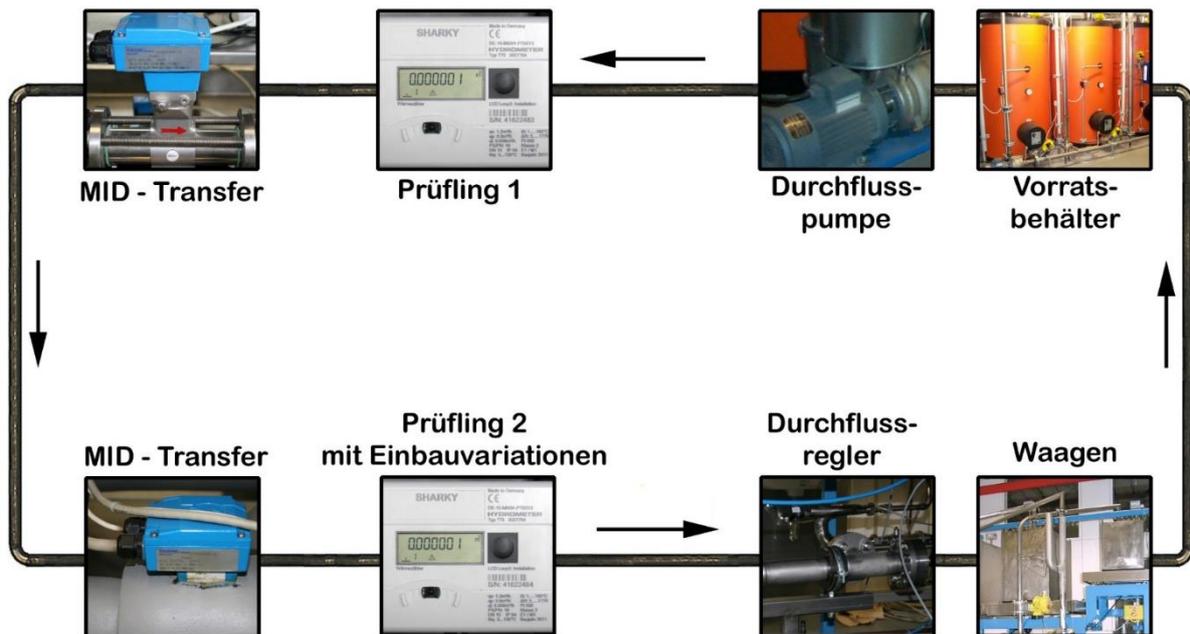


Abbildung 3: Messanordnung

Aus Untersuchungen zum Stand der Technik [2] ist bekannt, dass Einflüsse aus gestörten Strömungsprofilen im Prozentbereich der relativen Messabweichungen von Durchflusssensoren (Fehlerkurven) liegen. Zur Abklärung des während der Untersuchungen zu erwartenden Alterungsverhaltens der Durchflusssensoren (Messbeständigkeit [3]) wurde ein Zähler gleicher Bauart mit ungestörtem Strömungsprofil bzgl. seiner Messstabilität beobachtet (s. Abbildung 3, Prüfling 1).

5 Voruntersuchungen

5.1 Einfluss des Ausgangrohrdurchmessers im Vergleich zum Prüfstandsrohrdurchmesser

Die zum Untersuchungsprogramm gehörenden marktrelevanten Wärmezähler europäischer Hersteller besitzen zwar sämtlich die Nennweite DN 15, maßliche Kontrollen an den Zählern zeigten jedoch eine große Spannweite ihrer Innendurchmesser zwischen 17,56 mm und 19,95 mm. Dem gegenüber beträgt der lichte Innendurchmesser der in der PTB eingesetzten Messanlage max. 17,46 mm.

Alle Daten sind in Tabelle 1 dargestellt. Hierbei zeigen die Werte unter Spalte 3 „Spannweite Innendurchmesser“ einerseits die Spannweite x-y-Innendurchmesser der Verrohrung der Messanlage PTB bzw. die x-y-Innenrohereingänge der untersuchten Zählerbauarten. Die Spalte 4 „Diff. Ø“ zeigt die Spannweite größter Abweichung zwischen minimalem und maximalem Innenrohrdurchmesser. In Spalte 5 „Diff. PTB“ ist die Differenz größter Abweichung zwischen Größtwert Verrohrung Messanlage PTB und Größtwert Zählerbauart dargestellt.

Tabelle 1: Maßhaltigkeit der untersuchten Zählerbauarten im Vergleich zur Verrohrung der Messanlage PTB

DN 15 Außengewinde	Durchfluss	Spannweite Innendurchmesser		Differenz Ø	Diff. PTB
	q _p (m ³ /h)	min (mm)	max (mm)	(mm)	(mm)
Anlage PTB		17,43	17,46	0,03	
Zähler 4	0,6	17,58	17,59	0,03	-0,13
		17,56	17,57		
		17,57	17,58		
Zähler 1	0,6	18,98	19,03	0,09	-1,58
		19,02	19,04		
		18,95	19,03		
Zähler 2	0,6	19,00	19,01	0,04	-1,55
		18,97	19,01		
		18,98	19,00		
Zähler 3	0,6	19,72	19,95	0,36	-2,49
		19,63	19,89		
		19,59	19,86		

Aus der Vermessung der Innendurchmesser folgt, dass lediglich eine Wärmezählerausführung aller untersuchten Hersteller dem Innenmaß der Anlage nahekommt (Zähler 4, Tabelle 1). Bei allen anderen Zählerbauarten ist bereits für den ungestörten Fall ein Kantensprung zwischen Verrohrung des Prüfstands und der Zählerbauart vorhanden.

Da jedoch der relative Messfehler der Geräte nicht genau bei 0 eingestellt ist, kann keine Betrachtung über den bereits vorhandenen Einfluss des vorgegebenen Kantensprungs zum tatsächlich ungestörten Fall stattfinden. Also wird hier als ungestörter Fall der unumgängliche Kantensprung zwischen Prüfstand und Wärmezähler definiert.

Im „ungestörten Fall“ bedeutet dies für alle Zähler eine minimale Aufweitung von der PTB Verrohrung auf den DFS.

Da jedoch die DN aller Zähler nur einen minimalen Unterschied zum im Vorfeld mit 18 mm festgelegten Kantensprung bedeuten, sind hier kaum Veränderungen zu erwarten. Allerdings bedeutet der Kantensprung 18mm damit für Zähler 4 eine minimale Verengung auf die DN des DFS und für Zähler 1 bis 3 eine minimale Aufweitung auf den DFS.

Die Auswertung der Eingangsmessungen der Zähler auf Auffälligkeiten hinsichtlich der Ausgangsverrohrung geben keinen Hinweis darauf, dass diese Unterschiede in der Ausgangsverrohrung einen Einfluss auf das Messergebnis haben. Zähler 4 und Zähler 3 liegen am weitesten auseinander in Ihren DN, die Ergebnisse der Eingangsmessungen liegen jedoch vergleichbar messstabil – im Gegensatz zu den Zähler 1 und 2

Die Messfehler werden also nicht größer entsprechend den Differenzen der Zähler-Verrohrung zum Störer. Es lässt sich also kein Rückschluss ziehen bei diesen geringen Unterschieden.

Folglich kann aus den Differenzen im Innendurchmesser kein Einfluss auf die Messgenauigkeit abgeleitet werden.

5.2 Einfluss der Pumpendrehzahl auf die Messstabilität

Während der Voruntersuchungen zeigte sich, dass Ultraschall-Durchflusssensoren auf bestimmte Drehzahlen der Umwälzpumpe der Messanlage mit systematischen Verlagerungen ihrer relativen Messabweichung reagierten (bezeichnet als „longitudinales Druckstoß-Fehlverhalten“ in Folge innerer US-Resonanzeffekte). Dies wurde exemplarisch an Zähler 1 und 3 untersucht. Die größten Empfindlichkeiten zeigten sich dabei im laminar- zu turbulenten Durchflussübergangsbereich mit einer Spannweite relativer Messabweichungen bis 2,5 %.

Eine Überprüfung der Messabweichungen bei unterschiedlichen Frequenzen ergab, dass im Übergang vom laminaren zum turbulenten Bereich Fehlersprünge auftraten (s. Abbildung 4).

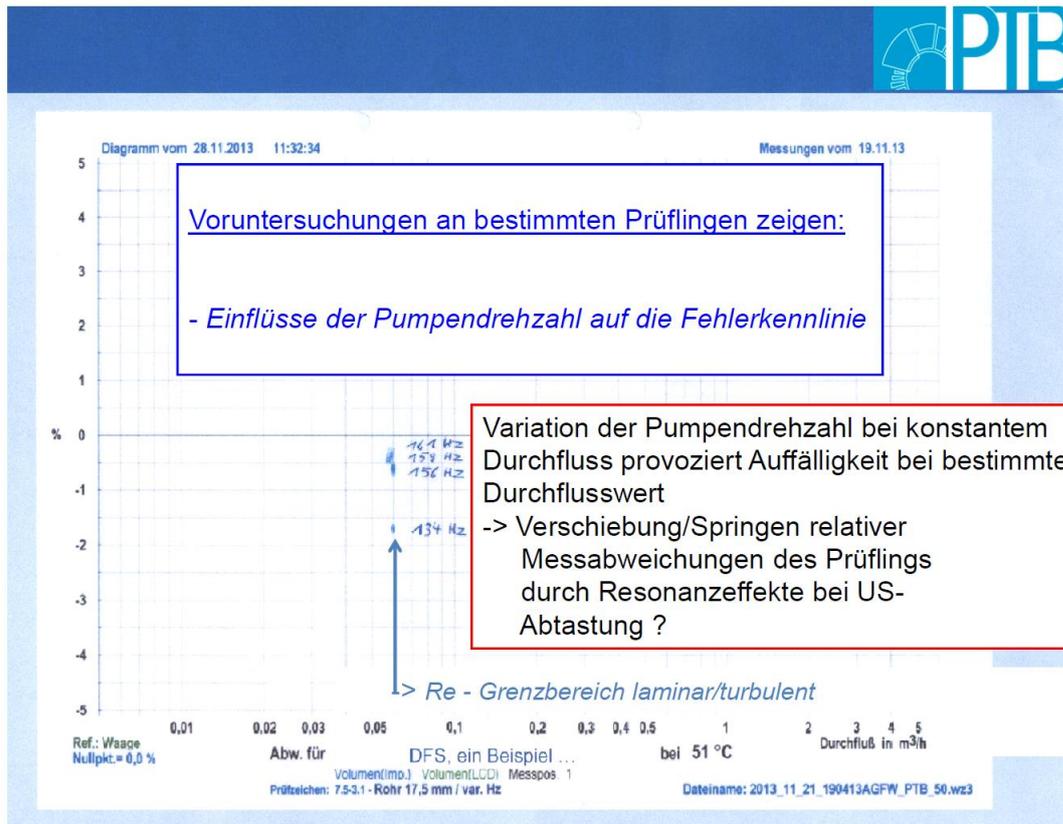


Abbildung 4: Einfluss der Pumpendrehzahl im Übergangsbereich von laminar zu turbulent auf die Messabweichung

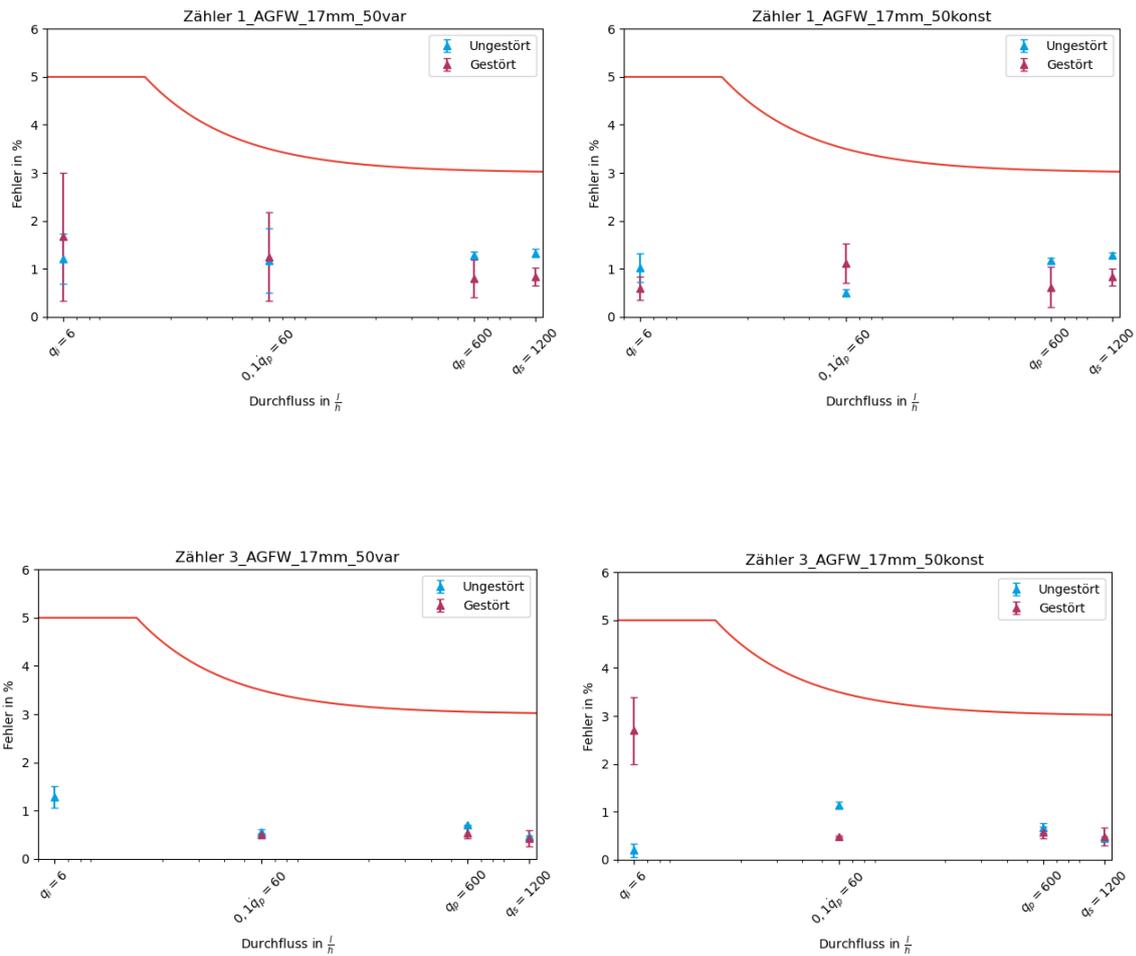
Die Messungen wurden daraufhin exemplarisch für die Bauarten 1 und 3 wiederholt und die Durchflussregelung so verändert, dass gleiche Durchflüsse auch bei konstanter Drehzahl der Pumpe unter spezifischen differentiellen Absperrungen der Prüfstrecke am Ein- und Ausgang entstanden.

Hierbei wurde darauf geachtet, dass die Durchflussgeschwindigkeit immer oberhalb der Ausgasungsgrenze lag, so dass es zu keinen Kavitationen kommen konnte.

In den nachfolgenden Graphiken werden die Messabweichungen bei variabler Pumpendrehzahl im Vergleich zur konstanten Drehzahl gezeigt, um die Abweichungen zu zeigen.

Besonders im minimalen Durchflussbereich bei q_i sind bei manchen Zählern große Abweichungen sichtbar. Der relative Fehler verschiebt sich und die Streuweite vergrößert sich. Diese Herstellertypen reagieren empfindlich gegenüber der drehzahlgeregelten Pumpe.

Der Einfluss musste somit behoben werden, um nicht die Störeinfluss zu überlagern.



**Abbildung 5: linke Abb. mit Drehzahlregelung der Pumpe,
rechte Abb. mit konstanter Drehzahl**

Zwischenresultat:

Die Hersteller sollten das Problem weitergehend untersuchen.

In Kompaktstationen wird bei der Programmierung der Regelung nicht auf die eventuelle Beeinflussung des Durchflusssensors durch variable Pumpenfrequenzen geachtet. Hier wird allein auf die Vermeidung von Druckstößen und dadurch möglichen Ausgasungen, die zu Kavitationen führen, geachtet.

6 Auswertemethodik

6.1 Messstabilität der Ergebnisse

Die Auswertung der Ergebnisse wird mit dem Ziel verfolgt, ob ein Störer einen Einfluss auf die Messgenauigkeit hat und in welcher relativen Größenordnung dieser liegt.

Die Voruntersuchungen zeigten, dass Verlagerungen der relativen Messabweichungen durch gestörte Strömungsprofile in der Größenordnung der Wiederholpräzision der Zähler auftreten. Somit entstand die Notwendigkeit, weitere Einflüsse zur Messgenauigkeit der Zähler zu untersuchen, um strömungsprofilbedingte Einflüsse überhaupt erkennen zu können.

Grundvoraussetzungen hierfür sind:

- Die Kenntnis des relativen Fehlers des Zählers der später im gestörten Zustand gemessen wird.
- Die Kenntnis über das Alterungsverhalten des betrachteten Zählers.

Erreicht wird dies durch Eingangsmessungen im ungestörten Zustand sowie dem Mitlaufen eines bauartgleichen Zählers während der Messreihen. Letzteres erlaubt auch die Beobachtung der Alterung.

6.2 Auswertemethodik der Messreihen

Mit der Verifizierung der Stabilität des Messverhaltens über die Zeit und in Verbindung mit den Ergebnissen der Eingangsmessung wird folgende Auswertemethodik der Messreihen angewendet:

Von den gemessenen Messwerten wird der Betrag gebildet und anschließend gemittelt. Über die Betragswerte des Fehlers wird die Streuung ermittelt.

Begründung:

Nach der Feststellung des relativen Fehlers des Gerätes und des Alterungsverhaltens interessiert jetzt der Einfluss der Störung auf den relativen Fehler des Messgerätes.

Hier interessiert die Abweichung vom Normalverhalten des Zählers. Deshalb werden auch die Abweichungen als Betrag des Fehlers ausgewertet, da es um die Störung an und für sich geht und sich die Fehler nicht aufgrund von Abweichungen in den positiven wie negativen Bereich ausgleichen können sollen.

Diese Fehlerbetrachtung weicht von der üblichen Fehlerbetrachtung für Eichung etc. negative und positive Abweichungen können sich hier bei der Mittelung nicht ausgleichen.

6.3 Fehlergrenzen und Bewertung:

Die verwendeten Messgeräte sind teilweise in Klasse 3 und in Klasse 2 geeicht. Zur einheitlichen Betrachtung werden deshalb die Eichfehlergrenzen der Klasse 3 angelegt.

Zur Bewertung, ob eine Störung maßgeblichen Einfluss hat, wird $1/3$ MPE herangezogen. Gleichzeitig wird für jede Bauart die Streuung des Mittelwertes in Bezug zur Differenz der Störung zur ungestörten Messung gesehen.

Eine negative Bewertung erhält der Zähler damit bei:

Tabelle 2: Bewertung der Ergebnisse

Durchfluss	> 1/3 MPE
$q_i = 6 \text{ l/h}$	> 1,67 %
$0,1 q_p = 60 \text{ l/h}$	> 1,17 %
$q_p = 600 \text{ l/h}$	> 1,02 %
$2q_p = 1.200 \text{ l/h}$	> 1,01 %

6.4 Eingangsmessungen

Im Folgenden werden die Eingangsmessungen der betrachteten Zähler dargestellt. Der Zähler welcher im weiteren Verlauf mit der Störung beaufschlagt wird, wird als ‚Störzähler‘, der mitlaufende bauartgleiche ungestörte Zähler als ‚Vergleichszähler‘ bezeichnet. Die Diagramme werden halblogarithmisch dargestellt. Neben dem Mittelwert des Fehlers wird die Streuung des Fehlers angegeben.

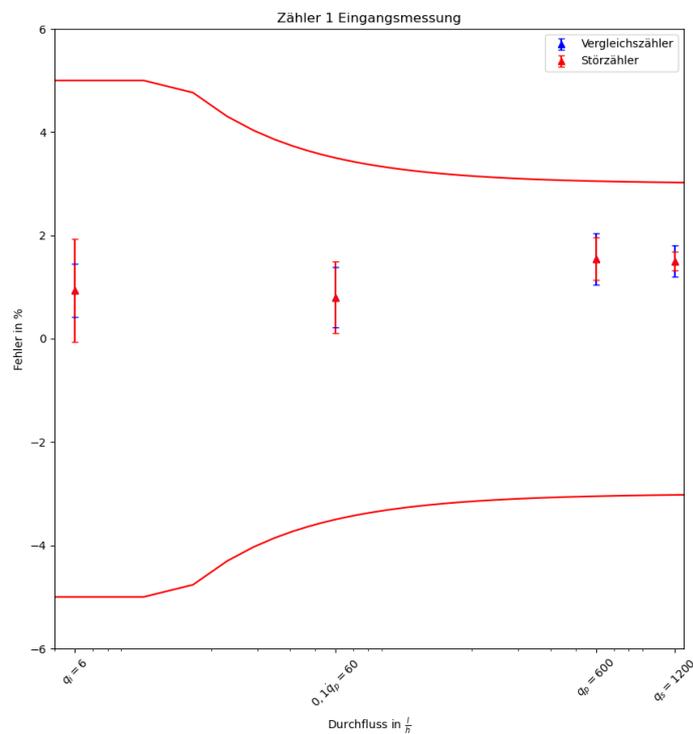


Abbildung 6: Eingangsmessungen Zähler 1

Bewertung Zähler 1:

Störzähler und Vergleichszähler haben in allen 4 Prüfpunkten ein nahezu identisches Verhalten. Nur im Prüfpunkt $q_i = 6$ l/h liegt bei beiden Zählern ein sichtbarer Unterschied in der Streuung des Mittelwertes vor.

Folglich ist schon in der noch ungestörten Ausgangssituation eine Schwankung der Messergebnisse zu sehen, die dann bei der Betrachtung der Störeinflüsse mit berücksichtigt werden muss.

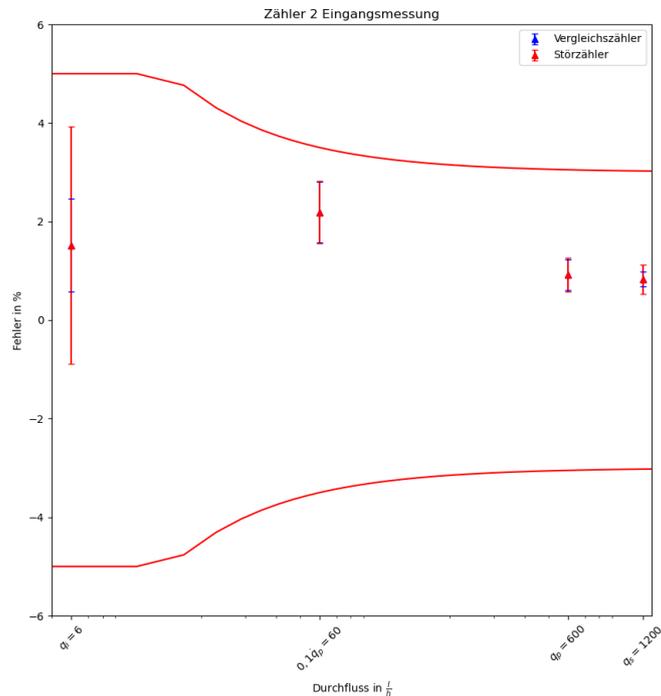


Abbildung 7: Eingangsmessung Zähler 2

Bewertung Zähler 2:

Störzähler und Vergleichszähler haben in allen 4 Prüfpunkten ein nahezu identisches Verhalten. Nur im Prüfpunkt 6 l/h liegt bei beiden Zählern ein sichtbarer Unterschied in der Streuung des Mittelwertes vor. Diese Störung liegt bereits in der Eingangsmessung beim „Störzähler“ außerhalb 1/3 MPE. Folglich ist schon in der noch ungestörten Ausgangssituation eine Schwankung der Messergebnisse zu sehen, die dann bei der Betrachtung der Störeinflüsse mit berücksichtigt werden muss.

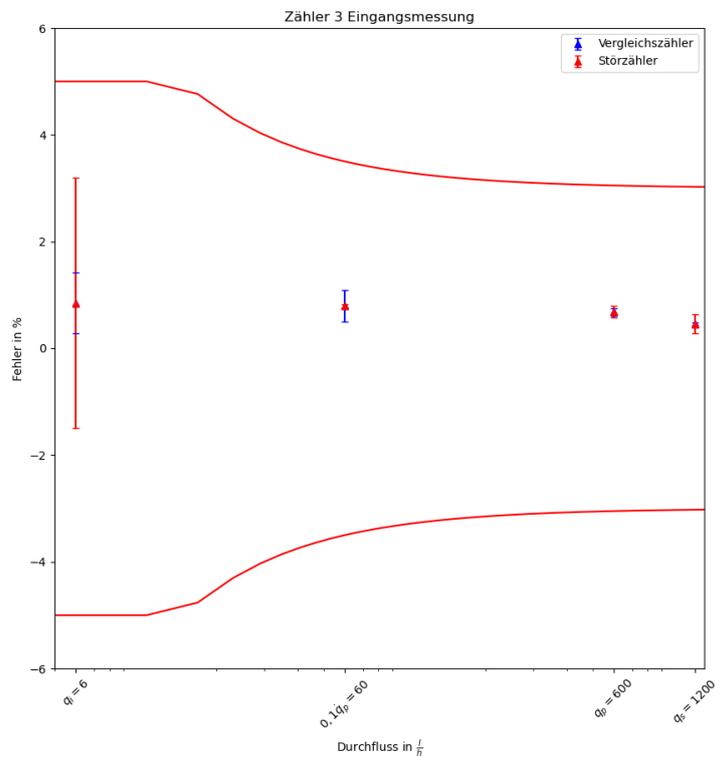


Abbildung 8: Eingangsmessungen Zähler 3

Bewertung Zähler 3:

Störzähler und Vergleichszähler haben in allen 4 Prüfpunkten ein nahezu identisches Verhalten. Nur im Prüfpunkt 6 l/h liegt bei beiden Zählern ein sichtbarer Unterschied in der Streuung des Mittelwertes vor. Diese Störung liegt bereits in der Eingangsmessung beim „Störzähler“ außerhalb 1/3 MPE. Folglich ist schon in der noch ungestörten Ausgangssituation eine große Schwankung der Messergebnisse zu sehen, die dann bei der Betrachtung der Störeinflüsse mit berücksichtigt werden muss.

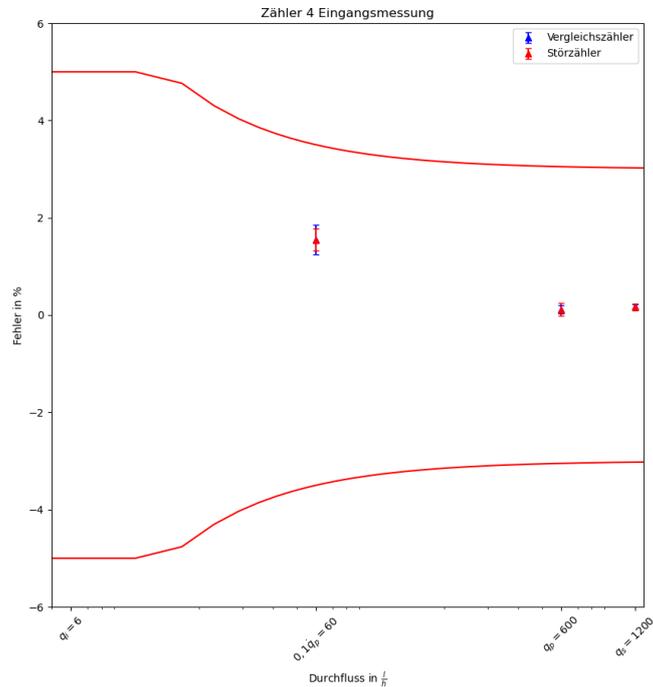


Abbildung 9: Eingangsmessungen Zähler 4

Bewertung Zähler 4:

Störzähler und Vergleichszähler haben in allen 4 Prüfpunkten ein nahezu identisches Verhalten. Für den Prüfpunkt 6 l/h liegen allerdings keine Messwerte vor. Die Werte waren nicht auswertbar. Es lag eine Fehlmessung vor.

Insgesamt zeigen die Eingangsmessungen, dass Vergleichszähler und Störzähler jeweils eine hohe Übereinstimmung haben. Auffällig ist weiterhin, dass - sofern gemessen - im Prüfpunkt q_i eine höhere Streuung des Störzählers vorliegt auch wenn dieser nicht gestört ist. Das lässt darauf schließen, dass Zähler generell im q_i – Punkt eine so hohe Störempfindlichkeit aufweisen, dass selbst geringste Störungen einen Einfluss auf die Wiederholstabilität nehmen.

6.5 Zeitverhalten

Das Zeitverhalten der Zähler wurde in den Messreihen über das Alterungsverhalten der Vergleichszähler ermittelt. Dabei wird ein gleiches Alterungsverhalten der bauartgleichen Zähler unterstellt. Ebenso wird angenommen, dass sich das Alterungsverhalten der Zähler nicht durch die Störungen beeinflusst wird!

Die folgenden Grafiken stellen die Mittelwerte des Vergleichszählers aller Messreihen sowie deren Streuung dar. Eine geringe Streuung deutet auf ein geringes Alterungsverhalten hin.

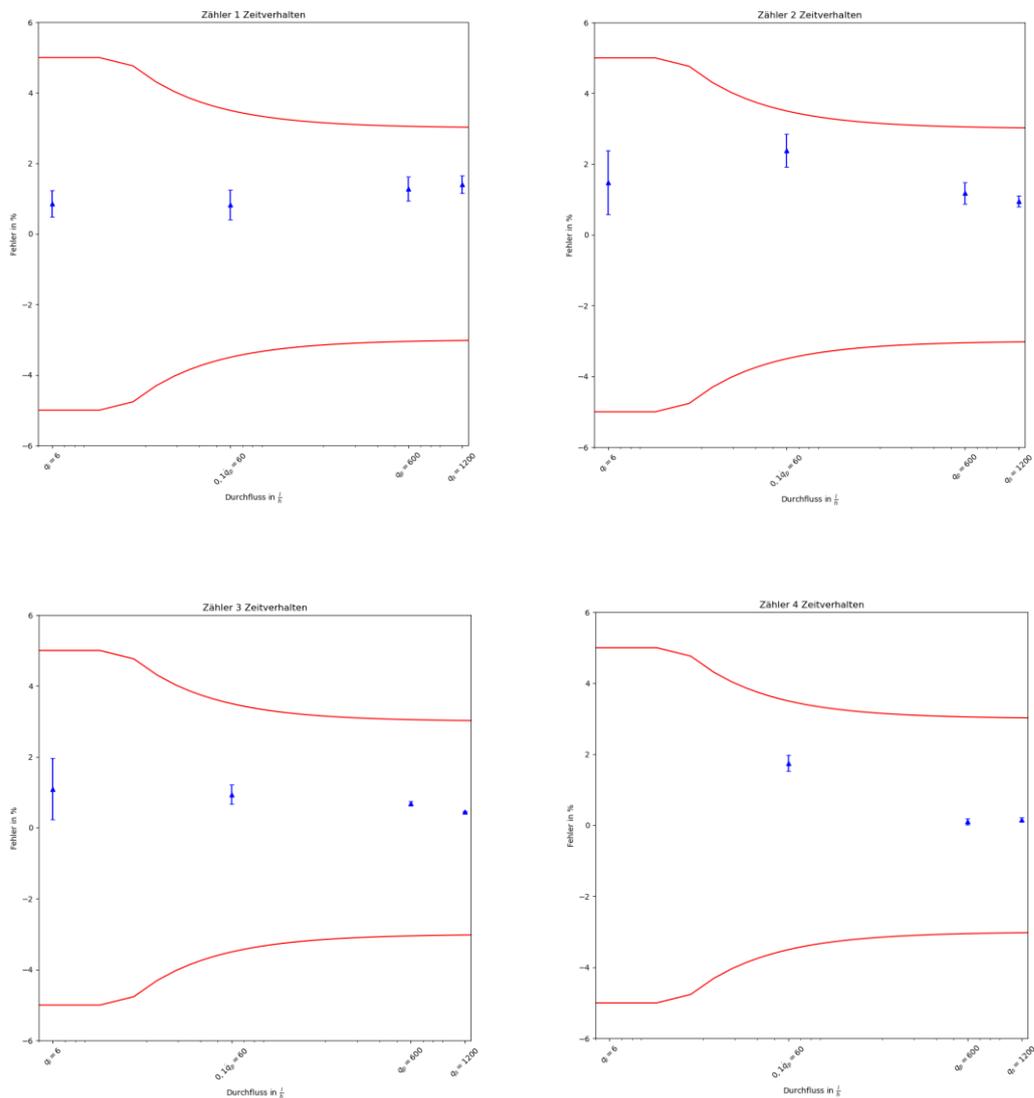


Abbildung 10: Alterungsverhalten aller Bauarten

Im Vergleich mit der Eingangsmessung sowie im Verhalten der Streuung über die Zeit lässt sich nur ein geringes Alterungsverhalten des Zählers ableiten.

7 Auswertung der Messergebnisse

7.1 Kantensprünge von 12 mm und 18 mm auf „DN 15“ des Durchflusssensors

Die Ergebnisse des Kantensprungs zeigen kein einheitliches Verhalten der Zählerbauarten auf die Störung. Tabelle 3 zeigt die Ergebnisbewertung beider Kantensprünge für alle Zählerbauarten. Für den Vergleich müssen immer die bereits während der Eingangsmessung vorhandenen Differenzen zwischen Vergleichs- und Störzähler im ungestörten Fall herangezogen werden.

Tabelle 3: Vergleich der Bauarten aller Hersteller zum Kantensprung

Störung / Bauart	12 mm				18 mm			
	q_i	$0,1q_p$	q_p	$2q_p$	q_i	$0,1 q_p$	Q_p	$2q_p$
Zähler 1	+ / 0	- / -	- / -	- / -	0 / -	0 / +	0 / -	0 / -
Zähler 2	+ / +	+ / +	0 / +	0 / -	Kein Ergebnis	0 / -	0 / 0	0 / -
Zähler 3	- / 0	0 / +	0 / +	0 / +	- / -	0 / +	0 / 0	0 / +
Zähler 4	Kein Ergebnis	0 / -	0 / +	0 / 0	Kein Ergebnis	- / -	- / -	0 / 0

Legende:

X/Y: X = Bewertung Differenz zw. Gestört und ungestörtem Zähler, Y = Bewertung zur Differenz des gestörten Zählers der Eingangsmessung

„-“ bedeutet Abweichung zu **größerem** Fehler bzw. Verschlechterung zur Eingangsmessung,

„-“ bedeutet Differenz **größer 1/3 MPE** bzw. Verschlechterung zur Eingangsmessung über 1/3 MPE,

„+“ bedeutet **Verbesserung** des Fehlers bzw. Verbesserung zur Eingangsmessung,

„+“ bedeutet Differenz **größer 1/3 MPE** bzw. Verbesserung zur Eingangsmessung über 1/3 MPE,

„0“ bedeutet gleichbleibend bis minimale Veränderung

7.1.1 Kantensprung 18 mm

Der Kantensprung von 18 mm auf die DN des Durchflusssensors hat unterschiedliche Auswirkungen auf die Bauarten.

Von der Ausgangsverrohrungssituation der Zähler aus bedeutet es für Zähler 4 eine minimale Verengung, für die drei anderen Zähler eine minimale Aufweitung.

Bei Zähler 4 zeigt durch den Kantensprung bei $0,1q_p$ und q_p eine leichte Verschlechterung der Ergebnisse im Vergleich zur Eingangsmessung.

Bei Zähler 1 und 3 zeigen sich keine Veränderungen durch den Kantensprung.

Die Messfehler werden also nicht größer entsprechend den Differenzen der Zähler-Verrohrung zum Störer. Es lässt sich also keine Rückschlüsse auf die Richtung der Nennweitenveränderung ziehen bei diesen geringen Unterschieden.

Folglich kann aus den Differenzen im Innendurchmesser kein Einfluss auf die Messgenauigkeit abgeleitet werden.

7.1.2 Kantensprung 12 mm

Die Aufweitung des Rohrdurchmessers von 12 mm auf den DN des DFS, Kantensprung 12 mm, zeigt auf Zähler 2 bis 4 nur einen geringen Einfluss und sogar einen Trend zu einer Verbesserung des rel. Fehlers durch die Störung. Nur Zähler 1 zeigt eine deutliche Verschlechterung des rel. Fehlers oberhalb 1/3 MPE.

Es lässt sich schlussfolgern, dass sich im Allgemeinen kein großer Einfluss eines Kantensprungs innerhalb der Toleranzen der Nennweite (hier DN 15) auf die Durchflusssensoren ableiten lässt (trotz der Ergebnisse aus Kap.11).

7.1.3 Fazit für die Störgröße Kantensprung

Die Zählerbauarten reagieren unterschiedlich auf den Kantensprung, aber bis auf Zähler 1 im Kantensprung 12 mm ist der Einfluss des Kantensprungs nicht relevant. Die PIV-Messungen (s. aus Kap.11) zeigen hingegen, dass eine Störung vorhanden ist, aber nur Zähler 1 reagiert hierauf.

Dem entgegen bringt die Aufweitung des Rohrdurchmessers bei Kantensprung 12 mm einen leichten Trend zur Verbesserung des relativen Messfehlers!

Von den über die Rohrinne Durchmesser bereits im ungestörten Fall vorhandenen minimalen Kantensprüngen hätte Zähler 4 am unempfindlichsten reagieren müssen und Zähler 3 am meisten. Das war nicht der Fall. Ähnliche Ergebnisse zeigte der Kantensprung 18 mm. Es kann somit kein allgemeiner Rückschluss bei kleinen Kantensprüngen gezogen werden. Die Beeinflussung ist nicht ableitbar.

7.2 Störgröße Kegelsitzventil

Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 dargestellt. Zum einen wird die Differenz zwischen Vergleichszähler und Störzähler bewertet, zum anderen die ungestörte Eingangsmessung des Störzählers im Vergleich zur Störung bewertet (wie beim Kantensprung).

Störung / Bauart	vor dem DS 100% Öffnung 2D Abstand		vor 50% 2D		vor 100% 10D		vor 50% 10D	nach 100% 2D			nach 50% 2D		nach 100% 10D		nach 50% 10D
	60 l/h: 0/+	600l/h: -/-	6l/h: +/-	60l/h: 0/+	60l/h: +/-	600l/h: 0/-		6l/h: 0/0	60l/h: +/-	600l/h: 0/0	6l/h: 0/0	60l/h: +/-	60l/h: -/+	600l/h: +/-	60l/h: 0/+
Zähler 1	60 l/h: 0/+	600l/h: -/-	6l/h: +/-	60l/h: 0/+	60l/h: +/-	600l/h: 0/-	60l/h: +/-	6l/h: 0/0	60l/h: +/-	600l/h: 0/0	6l/h: 0/0	60l/h: +/-	60l/h: -/+	600l/h: +/-	60l/h: 0/+
Zähler 2	60l/h: +/-	600l/h: 0/0	60l/h: 0/-		60l/h: +/-	600l/h: 0/+	60l/h: +/-	60l/h: +/-		600l/h: +/-	60l/h: 0/0		60l/h: 0/0	600l/h: 0/0	60l/h: 0/0
Zähler 3	60l/h: 0/0	600l/h: 0/-	60l/h: 0/-		60l/h: +/-	600l/h: 0/0	60l/h: 0/-	60l/h: +/-		600l/h: 0/0	60l/h: +/-		60l/h: 0/0	600l/h: 0/0	60l/h: +/-
Zähler 4	60l/h: +/-	600l/h: 0/0	60l/h: 0/+		60l/h: +/-	600l/h: -/-	60l/h: +/-	60l/h: +/-		600l/h: 0/0	60l/h: 0/-		60l/h: +/-	600l/h: 0/0	60l/h: 0/0

Tabelle 4: Bewertung der Störung durch das Kegelsitzventil über alle Bauarten

Gesamteindruck der Einflüsse durch den Störer Kegelsitzventil:

Auffälligkeiten und starke Abweichungen gibt es nur bei Zähler 1 und 4: Für Zähler 1 bei 100% Öffnung des Ventils und 2 D vor DFS bei 600l/h (qp) in den negativen Bereich (rel. Messabweichung wird größer).

Und bei Zähler 4 weicht das Messergebnis bei 100% Öffnung und 2D vor DFS stark ab, jedoch in den positiven Bereich. Hier gibt es auch starke Abweichungen bei 100% und 50% Öffnung in den positiven Bereich bei 60l/h (0,1qp), das heißt die rel. Messabweichung wird geringer, aber für 100% in 10D vor DFS verschlechtert sich die rel. Messabweichung.

7.2.1 Fazit zur Störgröße Kegelsitzventil

Das Kegelsitzventil hat überwiegend keine bis hin zu einem positiven Einfluss auf den relativen Fehler des DS, das heißt durch Einbau eines Kegelsitzventils auch in kurzer Distanz wird die relative Messabweichung des Störzählers geringer bis hin zu 0%, und die Stabilität der Messergebnisse erhöht.

Der erwartete Unterschied des Einflusses der 50% Öffnung des Kegelsitzventils zur 100% Öffnung konnte nicht gefunden werden. Im Vergleich zum vollgeöffneten Ventil kommt es bei 50% Öffnung zu einer Beschleunigung und in Folge zu einer ausgleichenden Konditionierung des Strömungsprofils, das im Vergleich zu einer 100% Öffnung zu einer Verbesserung der rel. Messabweichung führen müsste. Dies trat nicht ein.

Des Weiteren trat aufgrund der Strömungsprofilverwerfung bei der 100% Öffnung des Ventils eine Verbesserung der rel. Messabweichung (hin zur Nulllinie) ein. Allerdings gilt dies nur für $0.1 q_p$. Bei q_p verschlechterte sich die rel. Messabweichung zwar nicht zum Vergleichszähler, aber im Vergleich zur Eingangsmessung des Störzählers. Am extremsten zeigt sich dieses Verhalten bei Zähler 4 in 10D vor dem DFS und abgeschwächt wieder in 2D vor dem DFS.

8 Grenzen der Vergleichbarkeit der Bauarten untereinander und der Störuntersuchungen in einer Bauart

Die Eingangsmessungen der einzelnen Bauarten zeigen, dass der relative Fehler der ungestörten Messung für jede Bauart anders liegt (siehe Abbildung 11), so dass kein Vergleich der relativen Fehler sowie der Streuung über alle Bauarten zur Ermittlung eines Gesamtfehlers möglich ist.

Die Bandbreite des relativen Messfehlers erlaubt nur die Bewertung der Differenz zwischen ungestört und gestört einer Bauart, aber keine Aussagen über die Änderung der Lage und der Streubreite zwischen zwei Bauarten.

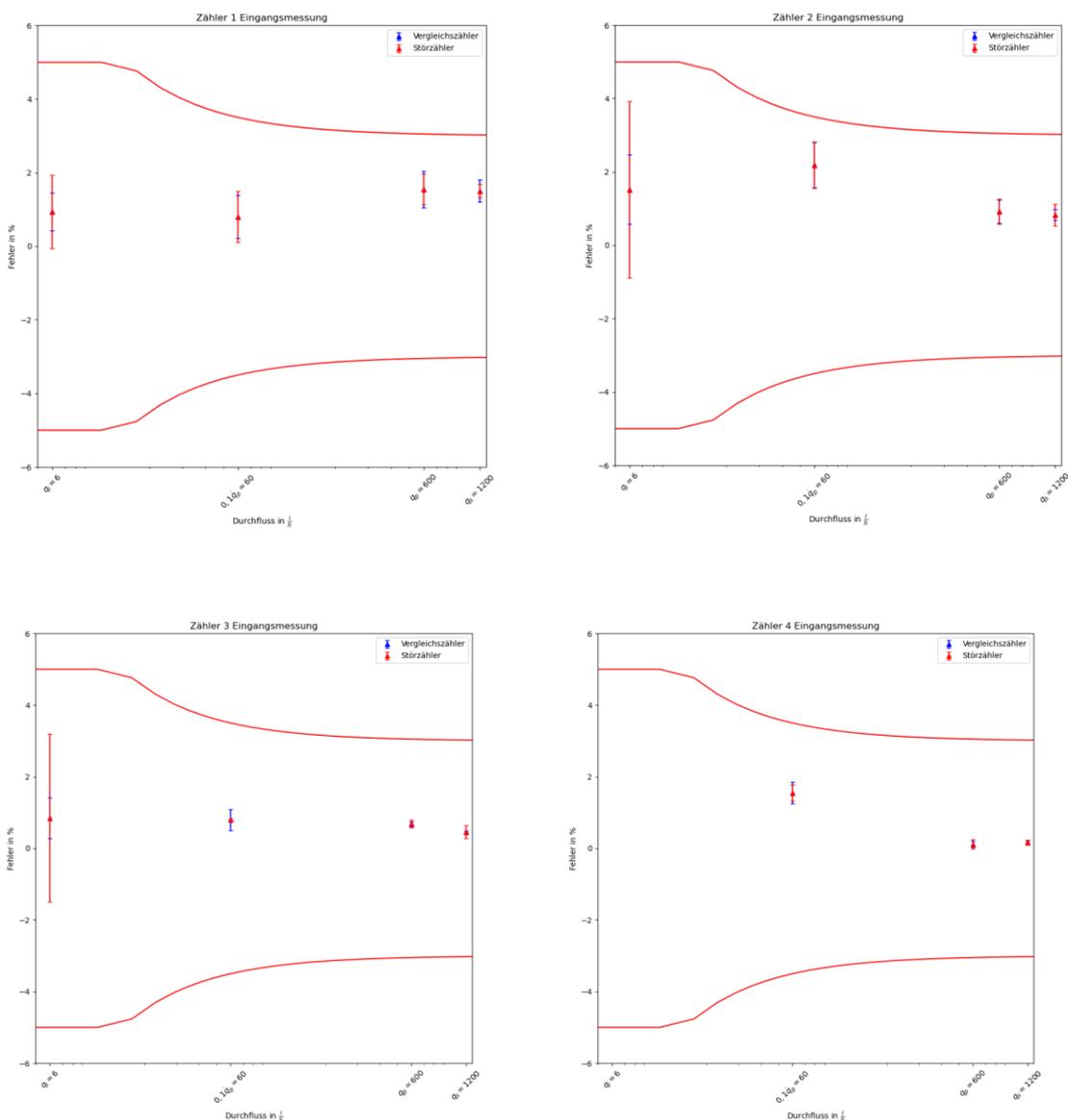


Abbildung 11: Übersicht aller Eingangsmessungen

Des Weiteren ist in einer Bauart kein Vergleich bzw. keine Bewertung unterschiedlicher Störeignisse untereinander möglich. Wie der Vergleich in Abbildung 12 zeigt, liegt der relative Fehler bei Hersteller 2 bei Kantensprung 12 mm auch beim ungestörten Zähler anders als bei Ventil 50% Öffnung. Die relativen Fehler der ungestörten Zähler wandern ebenso wie die Streuweite sich ändert im jeweiligen Einzelversuch.

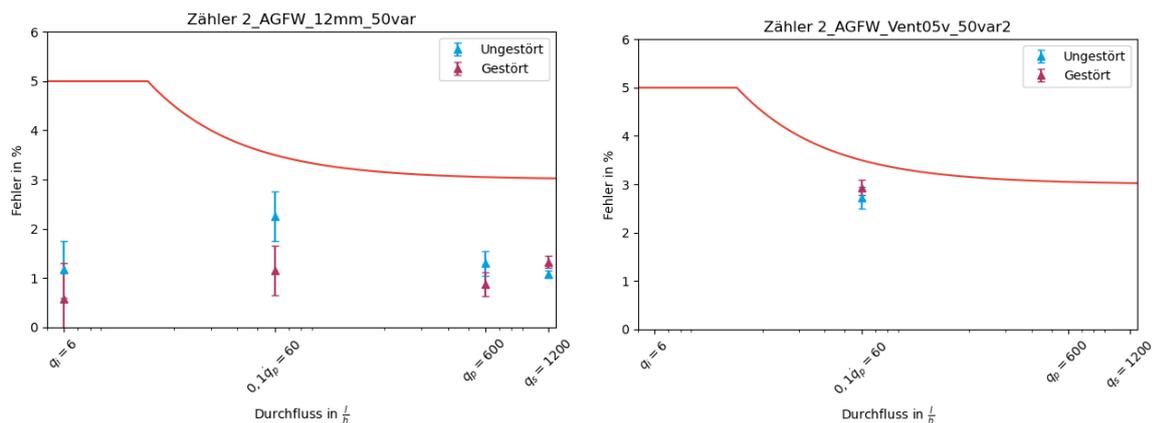


Abbildung 12: Grenzen der Vergleichbarkeit der Fehler der Zähler gleicher Bauart / eines Herstellers

In der Auswertung wurden deshalb die Ergebnisse innerhalb einer Messung zwischen gestörtem und ungestörtem Zähler immer auch in Bezug gesetzt zum Vergleich der Eingangsmessung des gestörten Zählers mit den Ergebnissen des Zählers mit Störung.

Die Ergebnisse zeigten ein einheitliches Bild, so dass auf die Ergebnisse vertraut werden kann.

9 Fazit

Die Ergebnisse zeigen, dass die hier untersuchten Bauarten von Durchflusssensoren bei genauer Messung und Eichung – also nach Erfüllung der Sorgfaltspflicht – nur gering beeinflusst werden durch Kantensprünge und vor- oder nachgeschaltete Kegelsitzventile.

Alle Ergebnisse dieses Forschungsprojektes beziehen sich auf Ultraschallgeräte mit Nenn-durchfluss $0,6\text{m}^3/\text{h}$ und die hier untersuchten vier Bauarten. Ebenso gilt es zu berücksichtigen, dass nur zwei Störgrößen untersucht wurden.

Eine Verallgemeinerung auf alle Bauarten von Durchflusssensoren und auf alle Störgrößen (Armaturen in Hausstationen) ist noch nicht möglich, so dass auch die Vorgaben der FW 218 nicht verändert werden.

Für die Störgröße Kantensprung zeigen die PIV-Messungen einen großen Einfluss auf die Strömung. Von den untersuchten Bauarten der Durchflusssensoren reagiert jedoch nur eine mit der Verschlechterung der Messstabilität darauf, aber kein Gerät liegt außerhalb der MPE. Daraus ist zu sehen, dass die DFS offensichtlich mehrheitlich unempfindlich gegenüber der Störgröße Kantensprung sind.

Weiterhin zeigen die Ergebnisse für das Kegelsitzventil deutlich, dass eine Störung kurz vor dem DFS mehrheitlich zu einer Verbesserung der relativen Messabweichung führt. Offensichtlich wird das Strömungsprofil i.d.R. durch zusätzliche Armaturen direkt vor dem DFS turbulenter und das verbessert die Messrichtigkeit der Zähler.

Es ist zu schlussfolgern, dass eine Störung kurz vor dem DFS eine höhere Messstabilität des DFS hervorrufen kann. Deshalb könnte ein Strömungskonditionierer direkt vor dem DFS alle vorherigen Einflüsse reduzieren und damit zu stabileren Messergebnissen führen. Die Einflüsse der Hausstation wären durch diese Vorgehensweise relativiert.

Diese Aussage wird unterstützt durch jüngere Zulassungsuntersuchungen der PTB an Durchflusssensoren mit vorgesetzten Strömungskonditionieren, die stabilere Messergebnisse zeigen.

Es wird der Anschein erweckt, dass die Hausstationen keine besonderen Vorgaben bei Einsatz von kleinen Durchflusssensoren mit Nenndurchfluss $0,6\text{m}^3/\text{h}$ benötigen. Allerdings zeigten die Voruntersuchungen eine generelle Empfindlichkeit der Durchflusssensoren durch variable Pumpenfrequenzen. Darauf kann in Kompaktstationen bei der Programmierung der Regelung keine Rücksicht genommen werden. Diese Störungen sind nicht zu vermeiden. Durch

vorgesetzte Strömungskonditionierer wäre jedoch auch dieses Problem zu minimieren. Weitergehende Untersuchungen der Hersteller können dies für die untersuchten Bauarten untermauern.

Ziel des Forschungsprojektes war es, die Abhängigkeit des DFS vom ankommenden Strömungsprofil zu zeigen. Dies ist dahingehend gelungen, dass die untersuchten Bauarten durchaus beeinflusst werden, aber nicht unbedingt negativ hinsichtlich der Messrichtigkeit.

Die zukünftige Entwicklung der Zähler sollte zum Einsatz von Strömungskonditionierern führen, um einbaurobuste Durchflusssensoren zum Einsatz in Kompaktstationen zu schaffen.

Die aktuellen Zulassungen von Durchflusssensoren zeigen bereits diesen Trend.

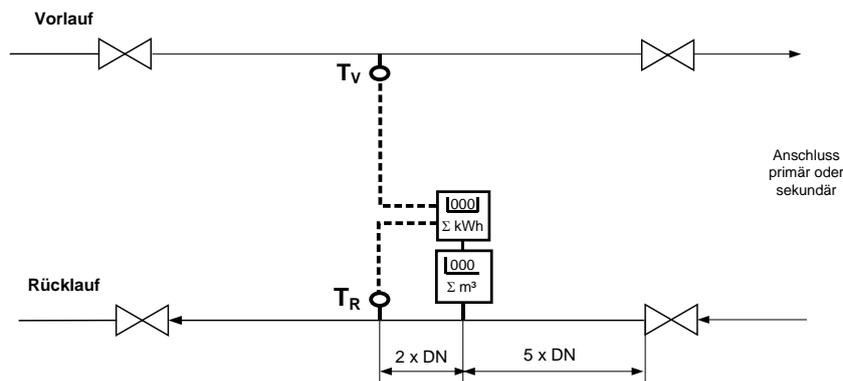
Abschließend ist zu sagen, dass die unterschiedlichen Untersuchungen im Bereich der Störeinflüsse auf Wärmezähler mit den vorliegenden Ergebnissen zu vergleichen, wie z.B. die jüngsten Untersuchungen der Fa Kamstrup zu diesem Thema sowie die Ergebnisse des E-MATEM Projektes von Hr. Rademacher der MIC-Cert GmbH zu Zählern mit q_p 1,5 m³/h.

10 Beurteilung der Vorgaben für Zähler gemäß FW 218 - vakant

Die FW 218 empfiehlt Folgendes:

Auszug aus der FW 218: Abschnitt 4.21 Vorgaben für Durchflusssensoren

“...Zur Erzielung und Sicherung einer hohen Messqualität wird für alle Durchflusssensoren eine gerade Beruhigungsstrecke von mindestens 5 x DN vor und mindestens 2 x DN nach dem Durchflusssensor empfohlen.



Der Rücklaufftemperaturfühler kann auch im Durchflusssensor integriert sein.

Abbildung 13— empfohlene Beruhigungsstrecken für Durchflusssensoren von Wärmehählern

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens stehen den Empfehlungen der FW 218 scheinbar entgegen, da kein gravierender Einfluss der Störgrößen feststellbar war.

Dem ist entgegenzuhalten, dass man nicht aufgrund von 2 Störgrößen und 4 Bauarten von Durchflusssensoren aus nur einem Messprinzip Ultraschall und einer Baugröße keine allgemeinen Rückschlüsse auf die Gesamtheit der Störeinflüsse und Bauarten von Durchflusssensoren schließen.

Es ist jedoch zu schlussfolgern, dass die untersuchten Bauarten in diesen Durchflussbereichen mehrheitlich gute, messstabile Ergebnisse liefern, die von den untersuchten Störeinflüssen nur gering beeinträchtigt werden.

Um allgemeine Aussagen zu treffen und Rückschlüsse auf die gesamte Wärmehählbranche zu ziehen, müssen Untersuchungen an weiteren Bauarten und allen Messprinzipien sowie unterschiedlicher Nenngößen durchgeführt werden.

11 Laseroptische und numerische Untersuchung der Durchmesser- sprünge – erweiterter Forschungsauftrag

11.1 Einleitung

Im Folgenden wird der Strömungszustand in einer geschlossenen Rohrleitung der Dimension DN 15 nach einer Änderung des Rohrdurchmessers (Sprung) anhand von Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV)-Messungen und Computational Fluid Dynamics (CFD)-Simulationen untersucht. Der experimentell untersuchte Kantensprung wird durch einen Übergang zweier Rohrleitungsstücke von 12 mm auf 17,5 mm Innenrohrdurchmesser realisiert. Mit Hilfe der CFD werden zudem Sprünge von 17,3 mm und 18 mm auf 17,5 mm untersucht. Hierbei sollen die Auswirkungen auf die Strömung nachgewiesen werden. Mittels der Ergebnisse ist es möglich, das Messverhalten realer Zähler im Allgemeinen besser einzuschätzen. SPIV eignet sich als schnelles und präzises Messverfahren zur zeitlich und räumlich hochaufgelösten Ermittlung von 3D-Geschwindigkeitsverteilungen in Rohrleitungen. CFD bietet die Möglichkeit, Strömungszustände abweichend vom Messort zu analysieren.

11.2 Versuchsaufbau und Strömungsprofilaufnahmen mit Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV)

Ziel dieser Untersuchung ist die Visualisierung der gestörten Strömungsprofile beginnend am jeweiligen Eingang der Wärmezähler bis zum Abklingen der Störung. Hierzu wird ein kommerzielles SPIV-System verwendet (Abbildung 14). Es ermöglicht die eingriffsfreie Messung des Strömungsprofils.

In die Rohrleitung wird ein spezieller optischer Zugang mit einem kalibrierten Präzisionsglasrohr mit einem Innendurchmesser von 17,5 mm eingebaut, der eine Messmöglichkeit für das SPIV-System gewährleistet. Vor dem optischen Zugang werden zwei unterschiedliche Rohrstrecken installiert. Eine entspricht exakt dem Innendurchmesser des Glasrohres des optischen Zugangs und stellt den ungestörten Fall dar. Die andere verfügt über einen Innendurchmesser von 12 mm, was am Übergang zwischen Rohr und optischem Zugang einen Sprung im Rohrdurchmesser und somit einen gestörten Zustand darstellt. In beiden Fällen sind die Rohrstrecken stromaufwärts mindestens 100 D (Rohrdurchmesser) lang, was einer Strecke von etwa 1,8 m entspricht. So kann ein voll ausgebildetes Strömungsprofil als Einlassbedingung gewährleistet werden.



Abbildung 14: Messaufbau mit SPIV-System und optischem Zugang

11.2.1 Durchführung der Messung

Aus optischen Gründen war es nicht möglich, den optischen Zugang thermisch zu isolieren. Daher kam es innerhalb dieses Bereichs zu Temperatureffekten, die sich im Strömungsprofil niedergeschlagen haben, was sich insbesondere bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten (laminarer Fall) bemerkbar machte. Aufgrund der Konvektion wanderten die höheren Geschwindigkeitsbereiche nach oben. Abbildung 15 zeigt die Unterschiede im Strömungsprofil bei unterschiedlichen Temperaturen bei einem eingestellten Durchfluss von 6 l/h. Bei 20 °C weist das Strömungsprofil eine Symmetrie zur Rohrmitte auf, die bei 50 °C deutlich verletzt wird. Aufgrund dieses zusätzlichen Effektes mussten die SPIV-Messungen und CFD-Berechnungen bei 20 °C (anstatt 50 °C ± 5K wie bei der Konformitätsbewertung und Eichung üblich) durchgeführt werden.

Dabei wurden zwei Effekte untersucht. In einem ersten Schritt wurden die Strömungsprofile bei den Durchflüssen 6 l/h, 60 l/h, 600 l/h und 1200 l/h in einem Abstand von 6,5 D zum Sprung untersucht. Dabei ist es möglich, den Einfluss der Reynolds-Zahl zu bestimmen. In einem

zweiten Schritt wurde bei einem konstanten Durchfluss von 1200 l/h die Strömungsprofilentwicklung in den Abständen von 0 D bis 6,5 D zum Sprung untersucht, um das Abklingen der Störung zu beurteilen. Zur besseren Einordnung der Ergebnisse werden allerdings zunächst ungestörte Messungen als Referenz durchgeführt.

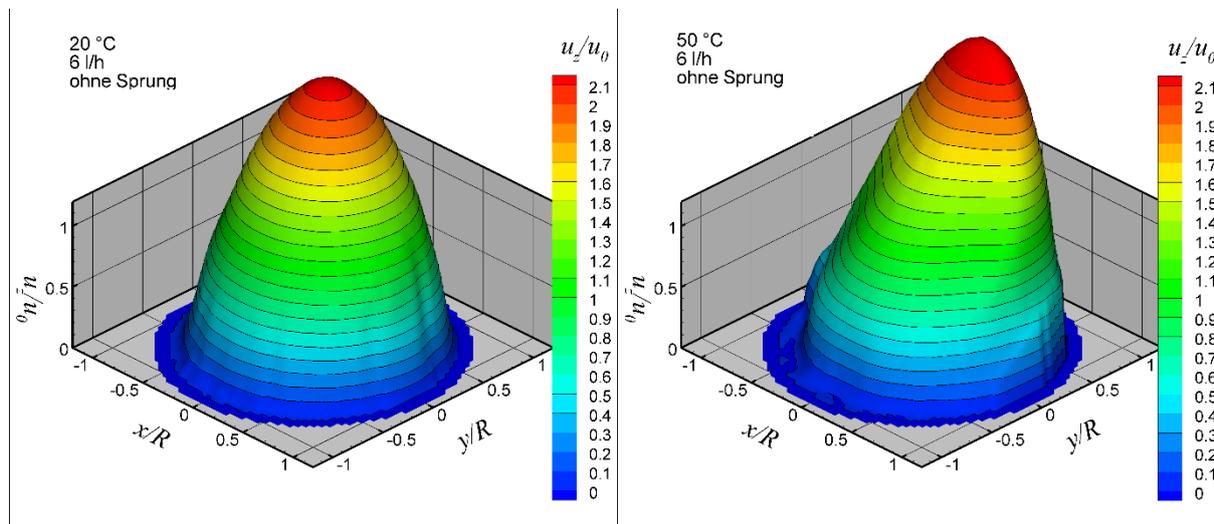


Abbildung 15: Temperatureinfluss aufgrund fehlender Wärmedämmung im optischen Zugang. Die y-Achse ist die vertikale Achse. Der Geschwindigkeitsschwerpunkt beim Profil rechts befindet sich dementsprechend oben.

11.2.2 Ergebnisse

In den nachfolgenden Ergebnissen ist jeweils die normierte axiale Strömungsgeschwindigkeit u_z/u_0 dargestellt. Die ungestörten Messungen sind in Abbildung 16 dargestellt. Deutlich zu erkennen sind die Unterschiede zwischen dem laminarem Zustand bei 6 l/h und 60 l/h (Abbildung 16 oben) und dem turbulenten Zustand bei 600 l/h und 1200 l/h (Abbildung 16 unten). Entsprechend der Theorie besitzen die laminaren Profile die Form einer Parabel und besitzen eine Geschwindigkeit in der Rohrmittle von 2 m/s. Bei den turbulenten Strömungsprofilen sind die Geschwindigkeitsgradienten im Wandbereich größer und die Rohrmittengeschwindigkeit deutlich geringer.

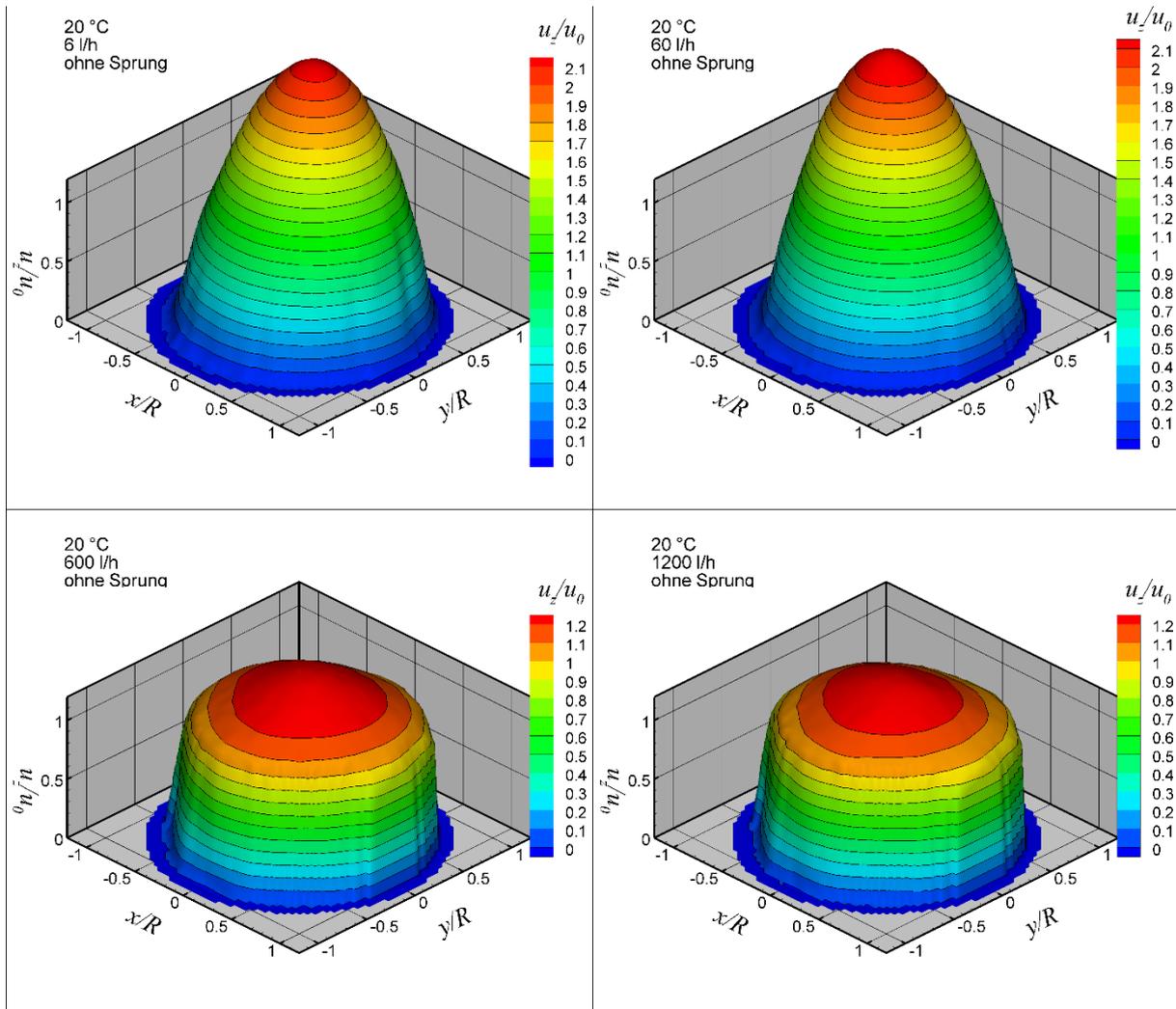


Abbildung 16: Ungestörte Strömungsprofile bei unterschiedlichen Durchflüssen

In Abbildung 17 sind die Strömungsprofile an einer festen Position von 6,5 D hinter dem Durchmessersprung von 12 mm auf 17,5 mm bei unterschiedlichen Durchflüssen dargestellt. Im Vergleich zum Referenzfall werden insbesondere im laminaren Fall deutlich höhere Strömungsgeschwindigkeiten im Zentrum der Strömung erreicht. Bei den turbulenten Profilen ist der Einfluss der Störung nur noch sehr schwach nachzuweisen. Aufgrund der Turbulenz findet hier eine deutlich stärkere Durchmischung der Strömung statt, was zu einer Vergleichmäßigung des Geschwindigkeitsprofils führt.

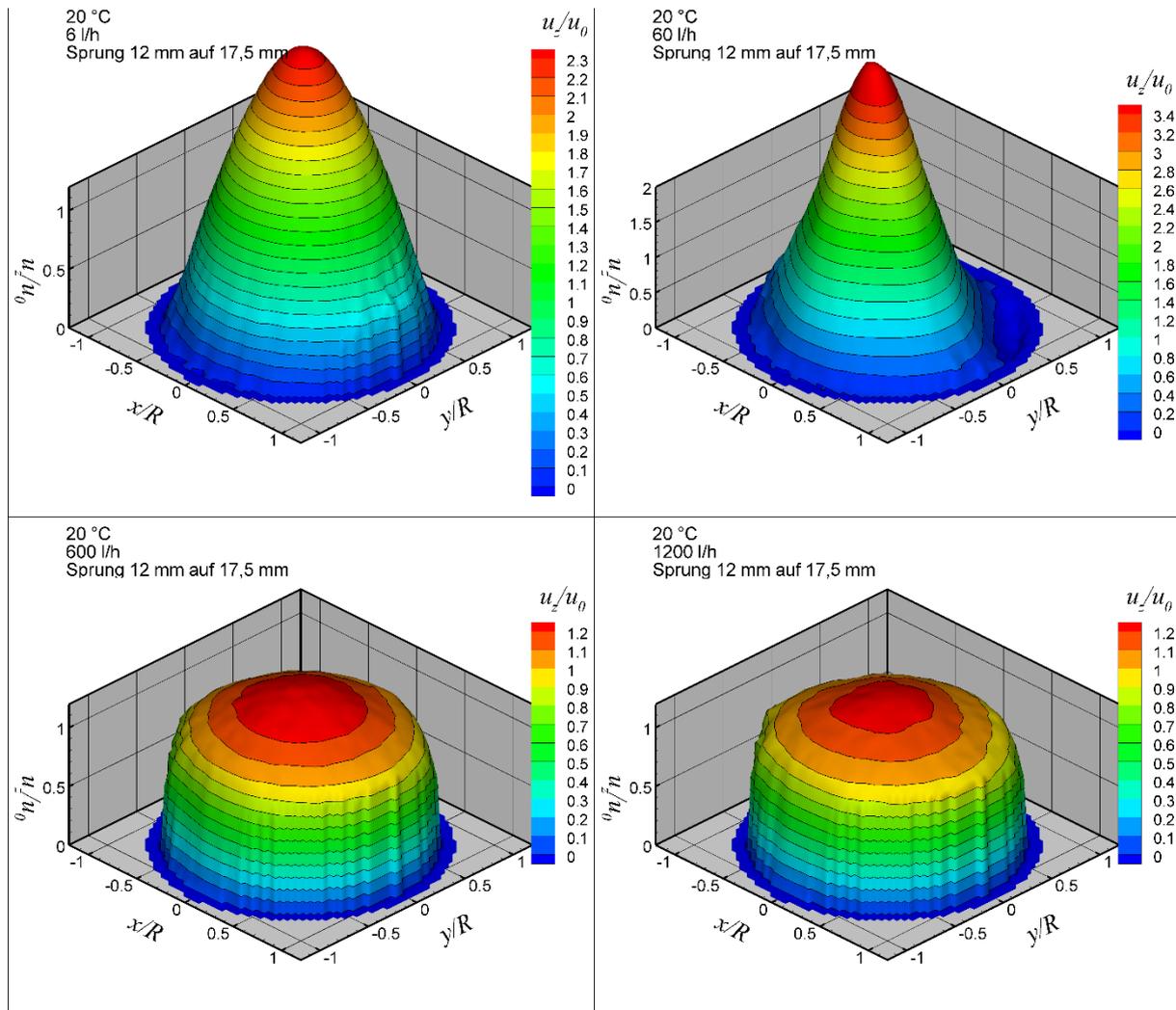


Abbildung 17: Strömungsprofile in einem Abstand von 6,5 D zum Durchmessersprung bei unterschiedlichen Durchflüssen

In einer weiteren Untersuchung wird die Strömungsentwicklung bei einem Durchfluss von 1200 l/h in verschiedenen Abständen zum Durchmessersprung gemessen. Die in Abbildung 18 dargestellten Ergebnisse zeigen, wie die Turbulenz das Strömungsprofil ausbildet. Bis zu einem Abstand von 3,5 D ist der Einfluss des Sprunges deutlich zu sehen und äußert sich in einer zugespitzten Ausprägung mit sehr hohen Geschwindigkeiten im Zentrum der Strömung. Ab einem Abstand von 6,5 D liegt Ausbildungsgrad vor, die mit dem voll ausgebildeten Profil in Abbildung 16 vergleichbar ist.

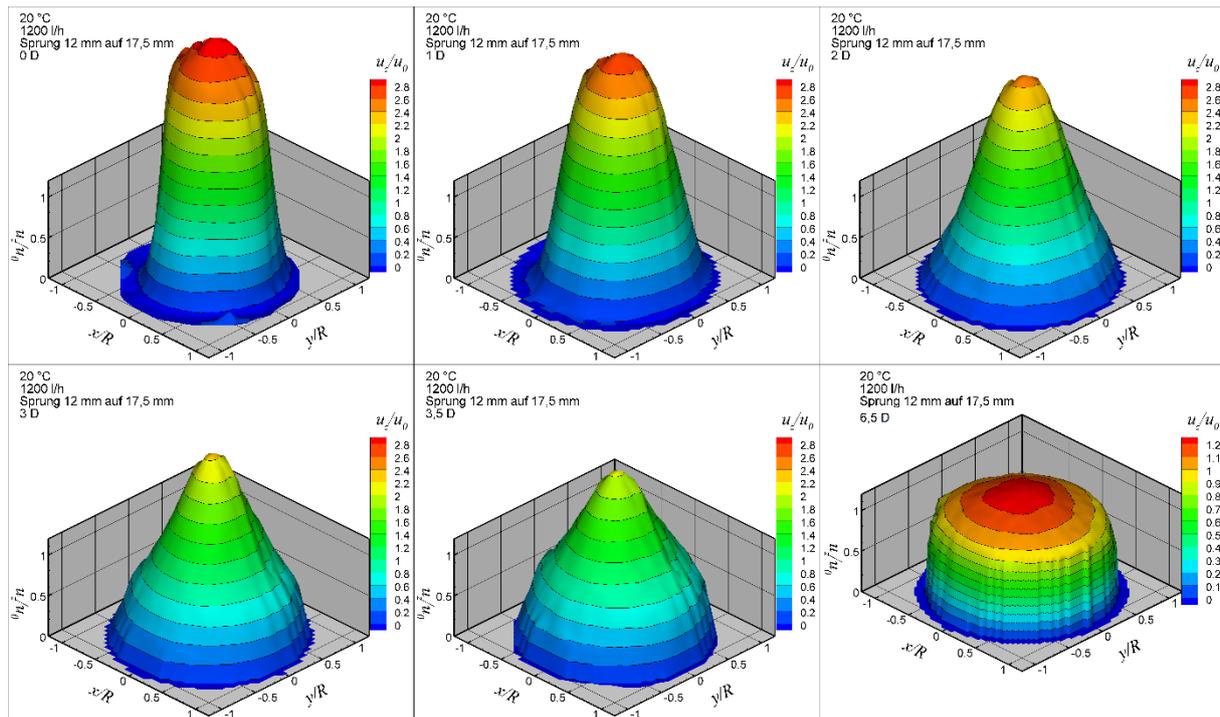


Abbildung 18: Strömungsprofile bei einem Durchfluss von 1200 l/h in verschiedenen Abständen zum Durchmessersprung

11.3 Ergänzende Untersuchungen mit Hilfe der numerischen Strömungsmechanik (CFD)

11.3.1 Numerisches Setup

Für die CFD-Simulationen wurde an der PTB ein HPC-Cluster mit 48 Prozessoren sowie die kommerzielle Software ANSYS CFX v15.0 genutzt. Die turbulente Strömung mit einer Durchflussrate von 1200 l/h wurde stationär mit dem auf den Reynolds-averaged-Navier-Stokes (RANS)-Gleichungen basierenden Wilcox- k - ω -Turbulenzmodell berechnet. Die laminare Strömung bei 6 l/h konnte ohne Turbulenzmodell berechnet werden. Das Rechengitter hat eine Größe von ca. einer Millionen Hexaeder-Elementen und wurde mit der Software ANSYS ICEM CFD 15.0 erstellt. Es besteht aus zwei aneinandergereihten strukturierten O-Gittern mit einer Länge von 50 D stromaufwärts und 50 D stromabwärts des Durchmessersprungs. Im Einlass wurde ein zuvor berechnetes voll ausgebildetes turbulentes Strömungsprofil als Randbedingung verwendet. Die Simulationen konvergierten nach ca. 1000 Iterationen, wobei die mittleren Residuen aller berechneten Größen einen Wert von 10^{-15} unterschritten.

11.3.2 Ergebnisse des Sprungs von 12 mm auf 17,5 mm

Die Simulationen zeigen sowohl für die laminare Strömung bei 6 l/h als auch die turbulente Strömung bei 1200 l/h ein großes Ablösegebiet. In Abbildung 19 ist eine Seitenansicht des

Sprungs im Bereich zwischen ca. 0 D und 3.5 D dargestellt. Man kann erkennen, dass die hohe Mittengeschwindigkeit aus dem kleineren Rohr (ca. 4 m/s) nach dem Eintritt in das größere Rohr nur langsam absinkt. Außerdem löst die Strömung an der Kante ab und es entsteht ein Totwassergebiet (Ablösegebiet), das im turbulenten Fall nach ca. 2 D abklingt. Im Falle der (nicht dargestellten) laminaren Strömung hat das Ablösegebiet eine Größe von ungefähr 3 D, befindet sich demnach also schon im Bereich des Durchflusssensors. Durch das Ablösegebiet wird die Strömung quasi eingeschnürt. Daher ist das Strömungsprofil im nun folgenden Rohrabschnitt im Vergleich zum voll ausgebildeten Profil zugespitzt (Vgl. Abbildung 18). Eine Verteilung des Volumenstromes auf dem gesamten Rohrquerschnitt wird dabei zunächst unterbunden. Nach dem Sprung sinkt die Mittengeschwindigkeit in der turbulenten Strömung nach 10 D und in der laminaren Strömung nach 20 D auf einen minimalen Wert ab. Im Fall der turbulenten Strömung unterschreitet dieser Wert sogar den des voll ausgebildeten Profils. Es folgt eine Erhöhung der Mittengeschwindigkeit auf einen stabilen Wert nach ungefähr 40 D. Die laminare Strömung ist bereits nach 20 D voll ausgebildet. Die Störung hält also deutlich länger an, als dies anhand der SPIV-Messdaten bestimmt werden konnte. Allerdings ist der größte Einfluss auf die Strömung im Bereich unter 7 D anzuordnen.

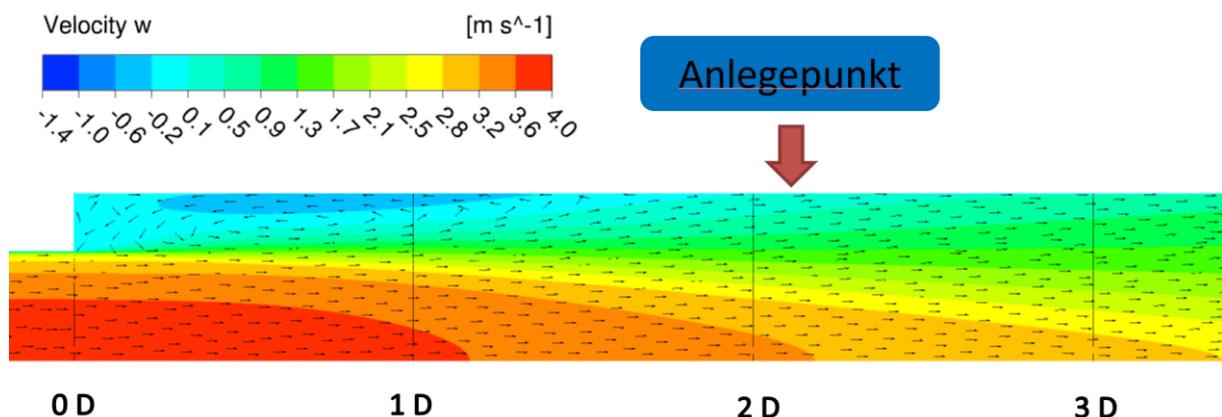


Abbildung 19: Seitenansicht des Durchmessersprungs von 12 mm auf 17,5 mm im Bereich zwischen ca. 0 D und 3.5 D. Dargestellt ist die axiale Geschwindigkeitskomponente. Der Durchfluss beträgt 1200 l/h.

11.3.3 Ergebnisse anderer Sprünge

Für die Sprünge von 17,3 mm und 18 mm auf 17,5 mm können in der Simulation nur sehr geringe Auswirkungen auf das Strömungsprofil beobachtet werden. Deren Wirkung auf den Zähler sind in der Realität sicherlich klein gegen andere Effekte wie etwa Toleranzen in der Rohrgeometrie. Gerade beim Übergang von 18 mm zu 17,5 mm löst die Strömung in der Simulation nur ganz leicht ab und es kommt innerhalb von 0,1 D zur Ausbildung einer stabilen Grenzschicht.

11.4 Schlussfolgerung

Die SPIV-Messdaten und CFD-Berechnungen zeigen einen deutlichen Einfluss des Durchmessersprunges von 12 mm auf 17,5 mm auf das Strömungsprofil bis zu einer Entfernung von ca. 7 D. Die genaue Form des Profils hängt dabei von der Reynolds-Zahl ab (Vgl. Abbildung 17), unterscheidet sich aber insbesondere nach dem Übergang von einer laminaren zu einer turbulenten Strömung (Reynolds-Zahl größer ca. 2300). An der Kante bei 0 D löst die Strömung ab und es entstehen Ablösegebiete in der Größenordnung von 2-3 D. Der für Durchflusssensoren relevante Messbereich liegt im Abstand von ca. 3 D zum Kantensprung. Es ist im laminaren Fall also möglich, dass der Zähler vom Ablösegebiet beeinflusst wird. Im Gegensatz dazu wurde bei den kleineren Sprüngen von jeweils 17,3 mm und 18 mm auf 17,5 mm nur ein vernachlässigbar kleiner Einfluss auf die Strömungsentwicklung festgestellt.

Abbildung 18 zeigt ganz deutlich, dass das Strömungsprofil nach dem Sprung von 12 mm auf 17,5 mm im Vergleich zum voll ausgebildeten Zustand eine zugespitzte Form aufweist und dementsprechend höhere Mittengeschwindigkeiten besitzt. Zumindest aus strömungstechnischer Sicht sind damit deutliche Einflüsse nachgewiesen. Inwiefern dieser Einfluss sich auf unterschiedliche Zähler auswirkt, hängt vom jeweiligen Messprinzip und der Strömungslenkung innerhalb des Messgerätes ab. Es ist denkbar, dass der Einfluss auf andere Zähler, die hier nicht untersucht wurden, viel größer ist.

Sowohl das Ablösegebiet als auch die Erhöhung der Mittengeschwindigkeit können je nach Bauart zu einer Verschiebung des Messfehlers in beide Richtungen führen. Warum die Höhe des Messfehlers bei den hier untersuchten Zählern teilweise kleiner wurde, lässt sich aber allein anhand der Strömungsprofile im Einzelnen nicht genau erklären.

Literaturverzeichnis

- [1] R. Herz: Grundlagen der Rohrleitungs- und Apparatechnik.
Vulkan-Verlag Essen 2014

- [2] N. Mathies, G. Wendt, J. Rose, B. Mickan, R. Schupp:
Mengen- und Durchflussmessung strömender Medien: Begrifflichkeiten und
Definitionen. Tm-Technisches Messen 79 (2012) 2, S.120 bis 128.
Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München ISSN 0171-8096

- [3] F. Adunka: Handbuch der Wärmeverbrauchsmessung:
Grundlagen - Methoden – Problem,
Vulkan-Verlag Essen 2011

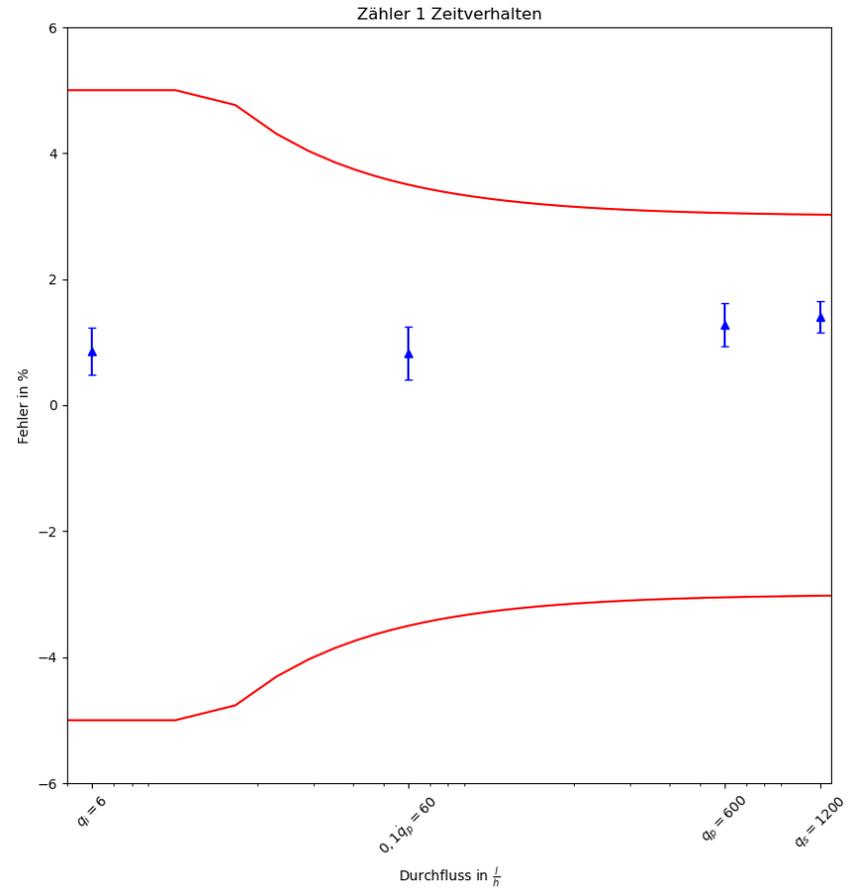
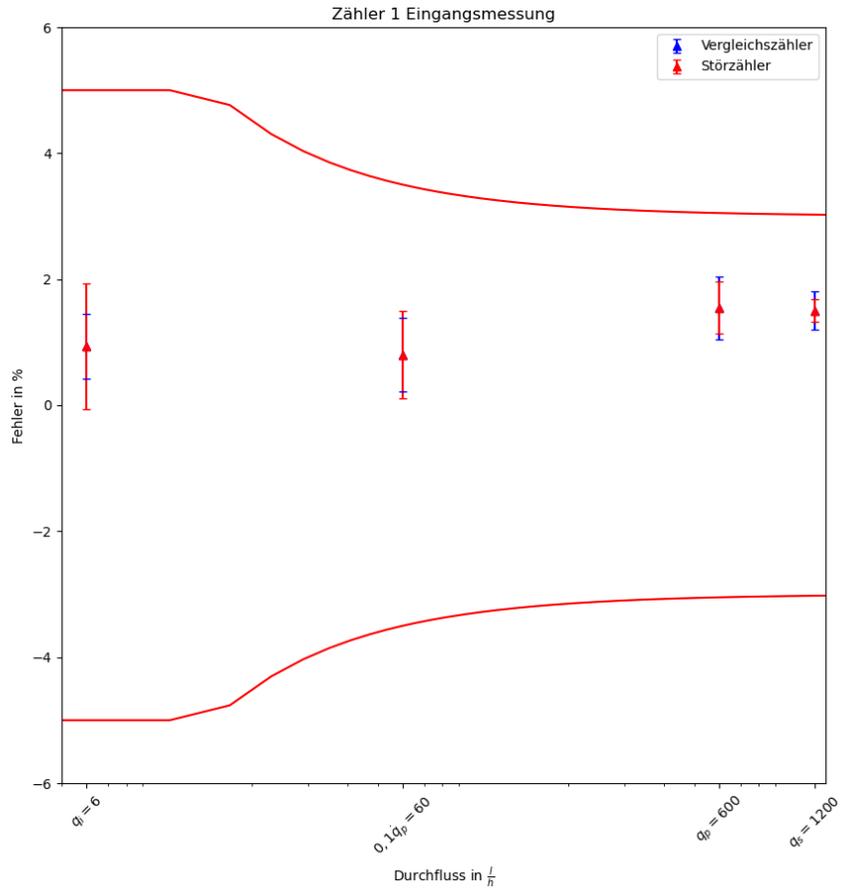
Anhang A Einzelergebnisse der Zähler

A 1: Benennung der Graphiken

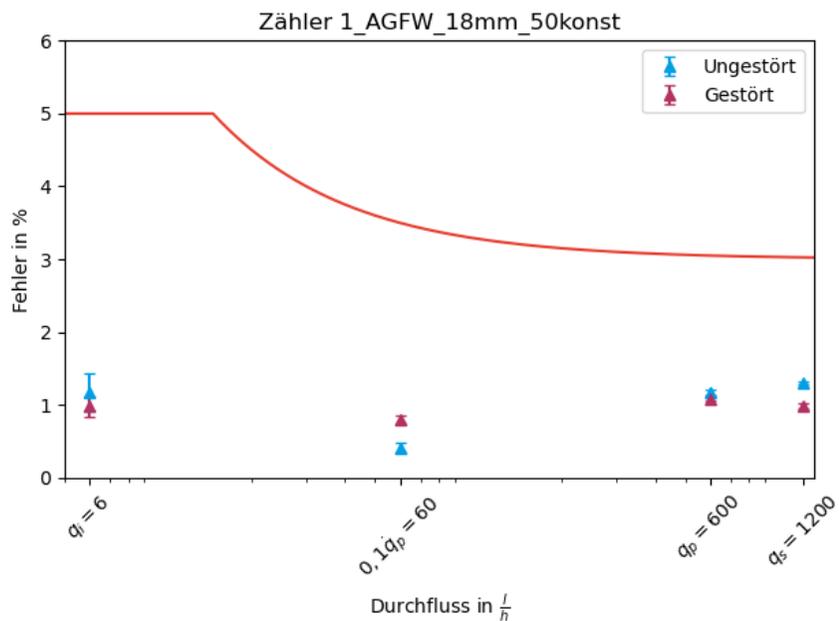
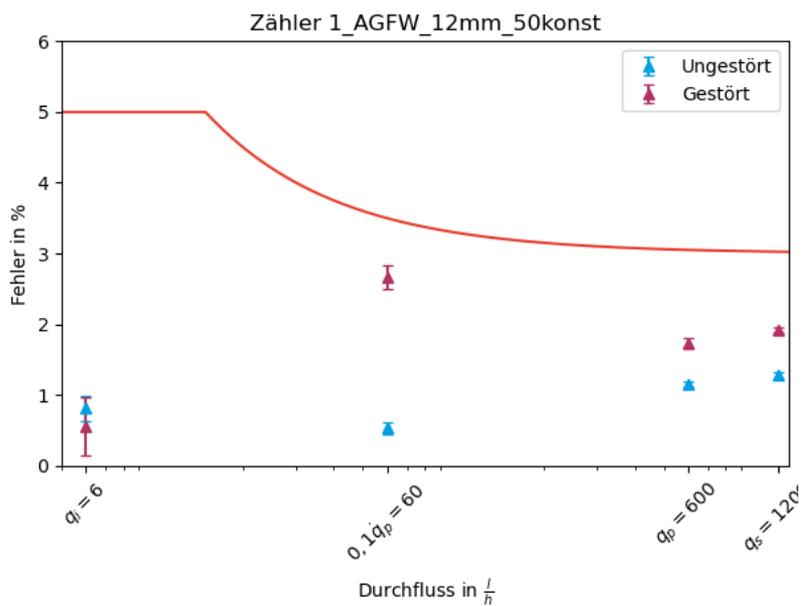
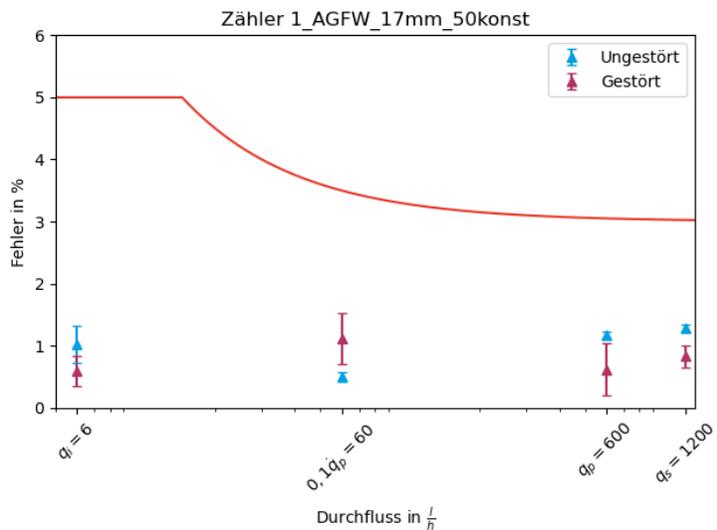
Dateibezeichnung	Interpretation
AGFW_12mm_50konst.wz3	12mm Kantensprung bei 50°C gemessen und konstanter Pumpendrehzahl
AGFW_17mm_50konst.wz3	= Eingangsmessung ! bei 50°C gemessen und konstanter Pumpendrehzahl (17mm bedeutet keine Störung)
AGFW_18mm_50konst.wz3	18mm Kantensprung bei 50°C gemessen und konstanter Pumpendrehzahl
AGFW_Vent05r_50konst10.wz3	Kegelsitzventil 50% Öffnung und Anordnung nach dem DFS_50°C gemessen und konst. P. mit 10D Abstand
AGFW_Vent05r_50konst2.wz3	Kegelsitzventil 50% Öffnung und Anordnung nach dem DFS_50°C gemessen und konst. P. mit 2D Abstand
AGFW_Vent05v_50konst10.wz3	Kegelsitzventil 50% Öffnung und Anordnung VOR dem DFS_50°C gemessen und konst. P. mit 10D Abstand
AGFW_Vent05v_50konst2.wz3	Kegelsitzventil 50% Öffnung und Anordnung VOR dem DFS_50°C gemessen und konst. P. mit 2D Abstand
AGFW_Vent10r_50konst10.wz3	Kegelsitzventil 100% Öffnung und Anordnung nach dem DFS_50°C gemessen und konst. P. mit 10D Abstand
AGFW_Vent10r_50konst2.wz3	Kegelsitzventil 100% Öffnung und Anordnung nach dem DFS_50°C gemessen und konst. P. mit 2D Abstand
AGFW_Vent10v_50konst10.wz3	Kegelsitzventil 100% Öffnung und Anordnung VOR dem DFS_50°C gemessen und konst. P. mit 10D Abstand
AGFW_Vent10v_50konst2.wz3	Kegelsitzventil 100% Öffnung und Anordnung VOR dem DFS_50°C gemessen und konst. P. mit 2D Abstand

A 2 Ergebnisse Zähler 1

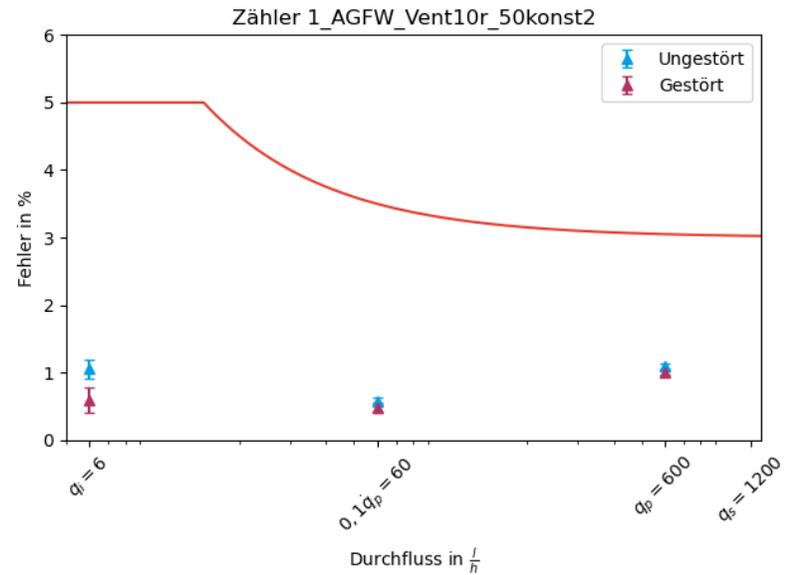
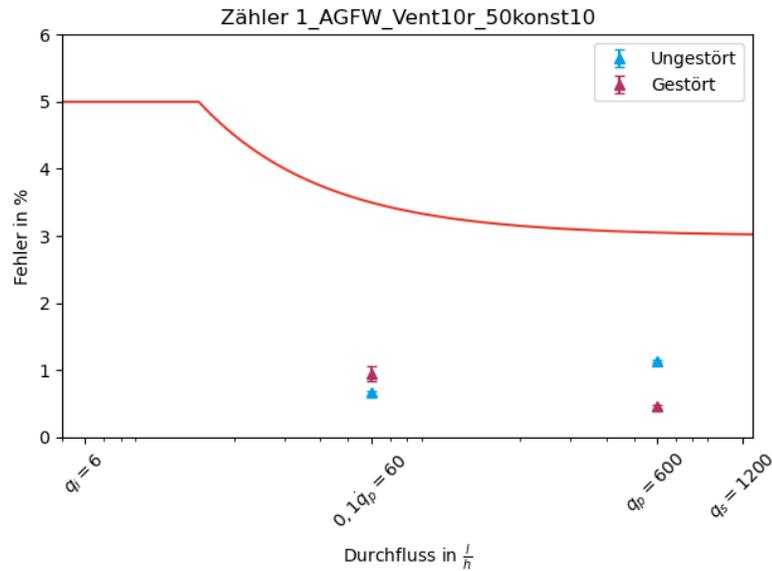
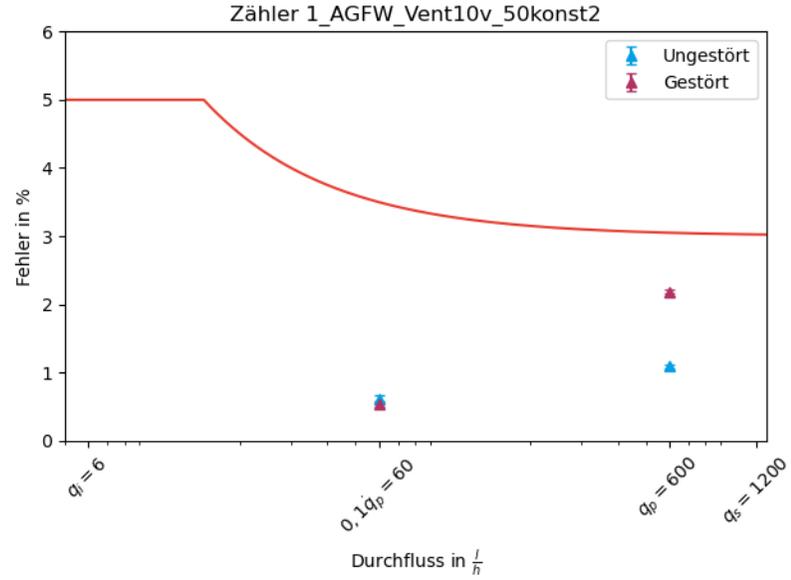
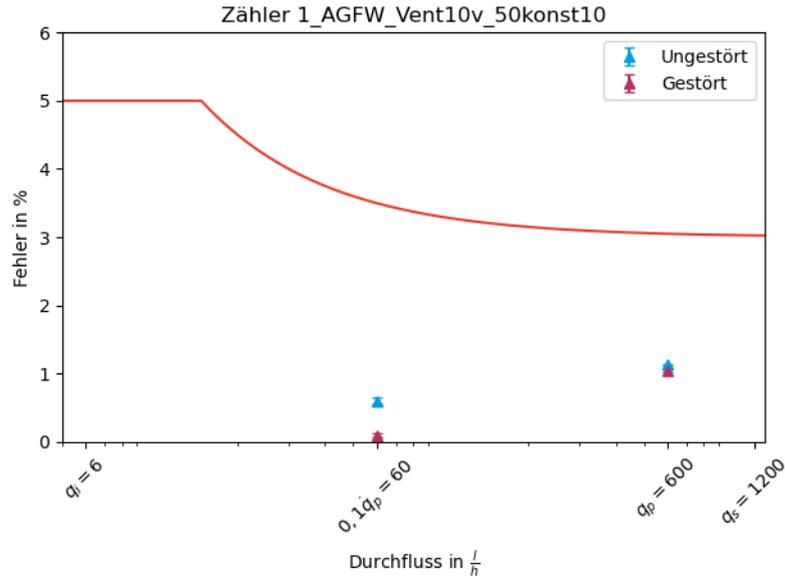
A 2.1 Eingangsmessung beider Zähler und Alterungsverhalten ungestörter Zähler



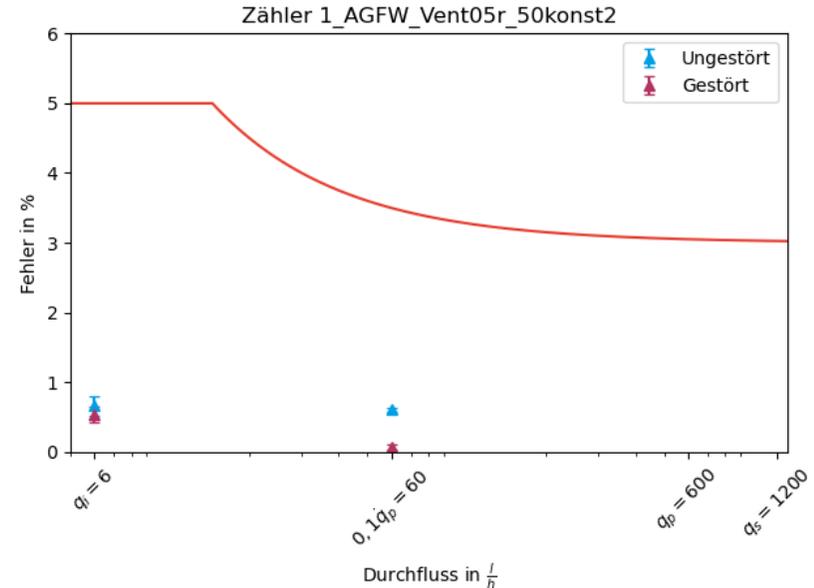
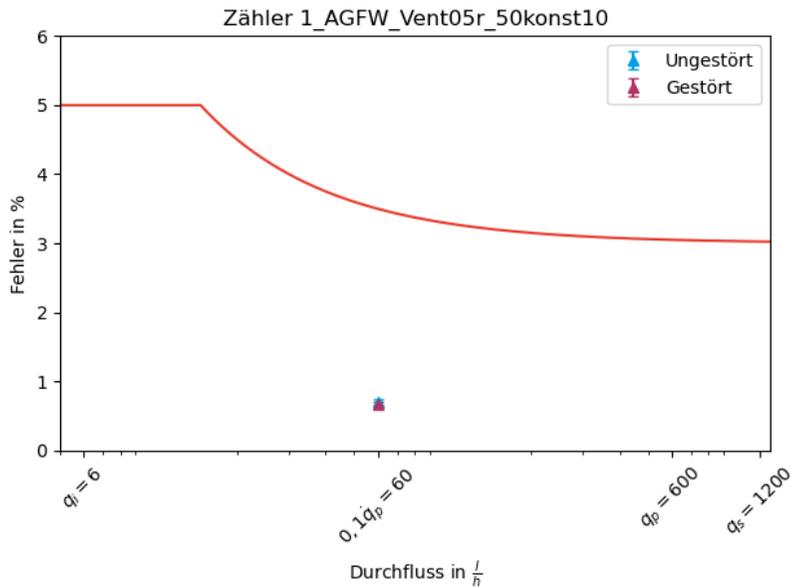
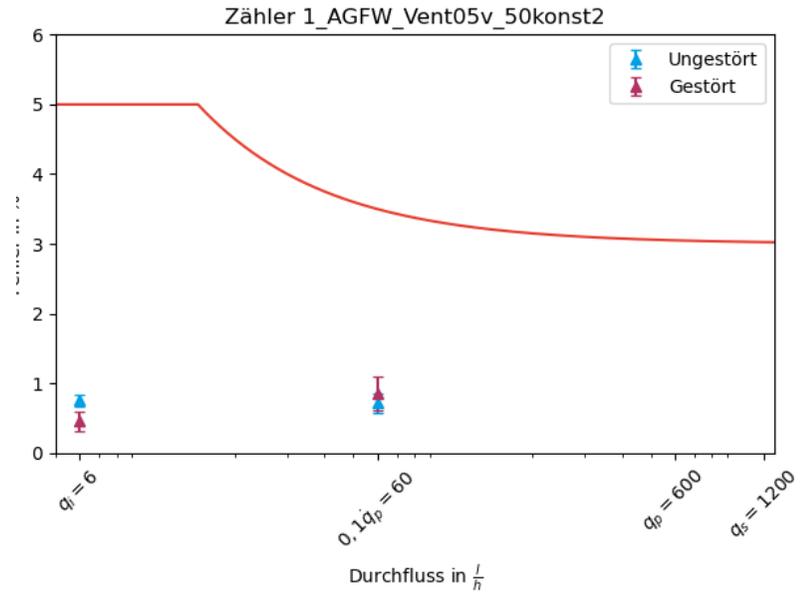
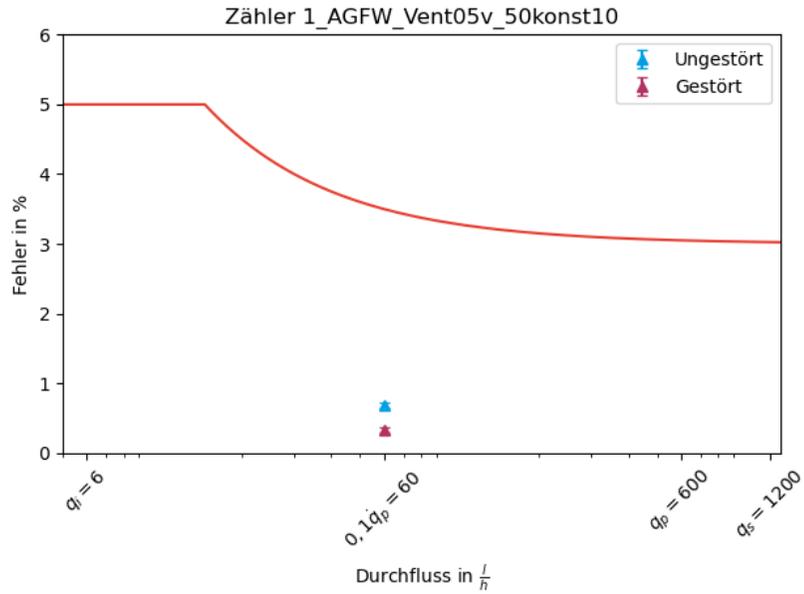
A 2.2 Störeinfluss Kantensprung



A 2.3 Störeinfluss Kegelsitzventil

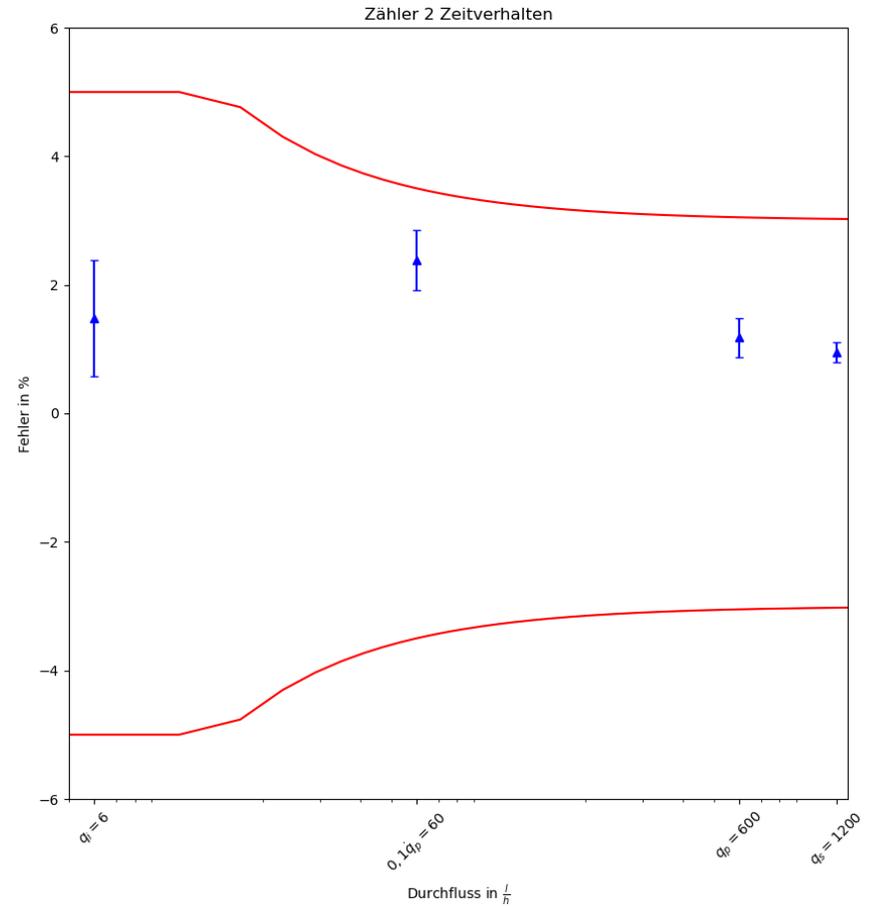
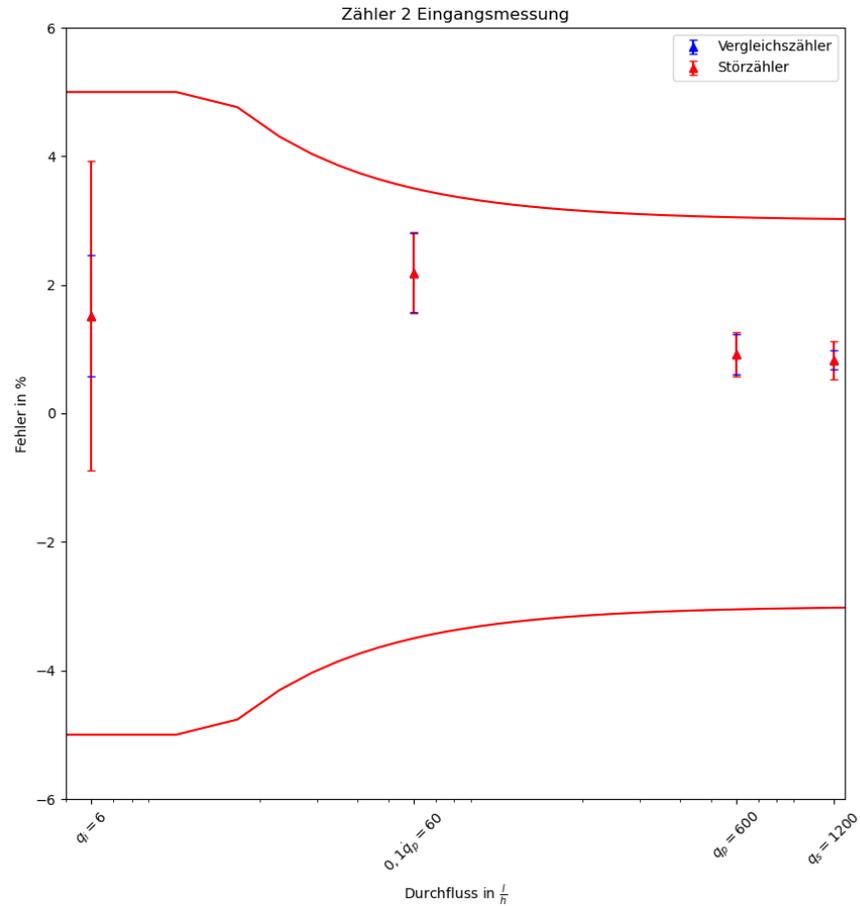


weiter A 2.3 Störeinfluss Kegelsitzventil

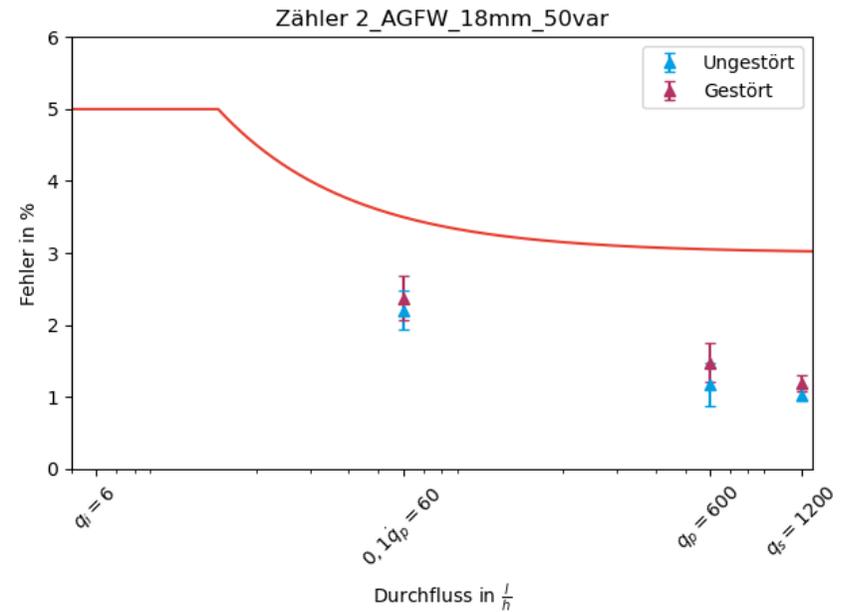
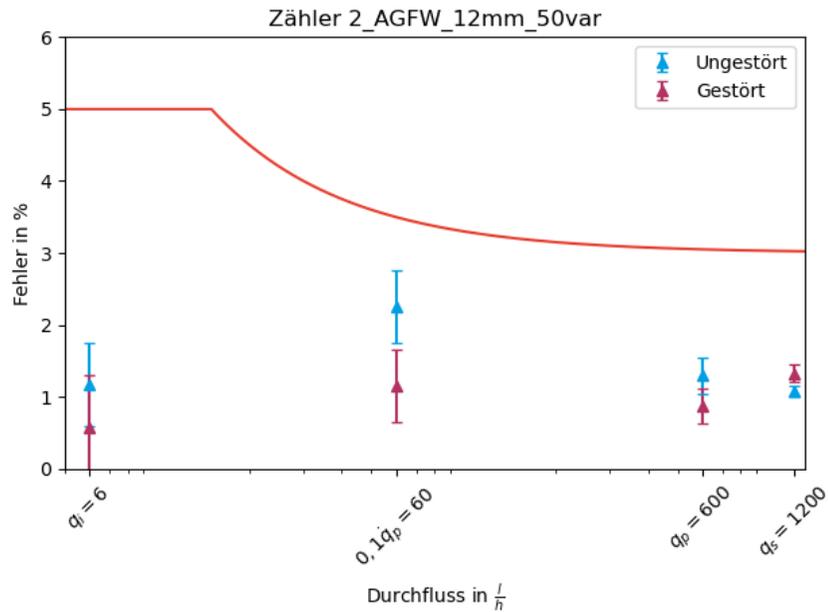
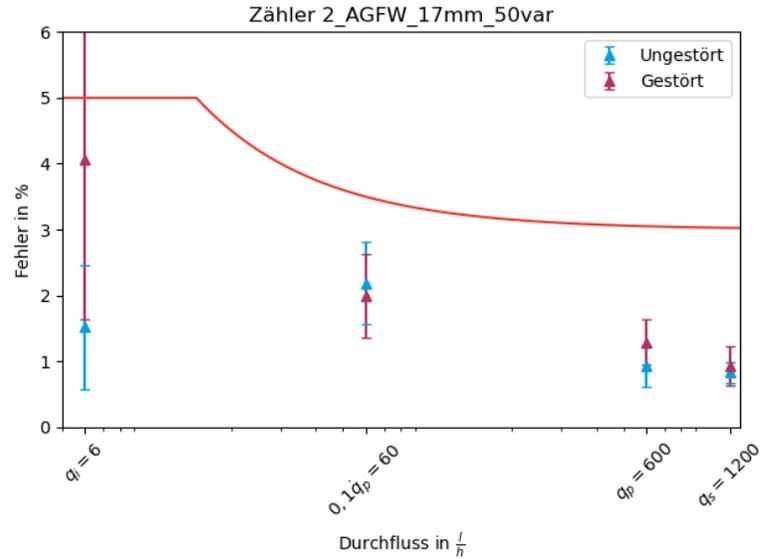


A 3 Ergebnisse Zähler 2

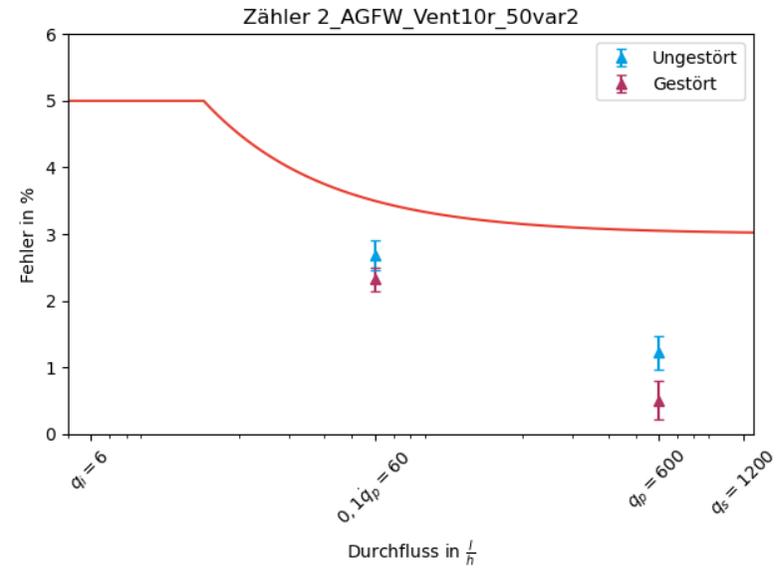
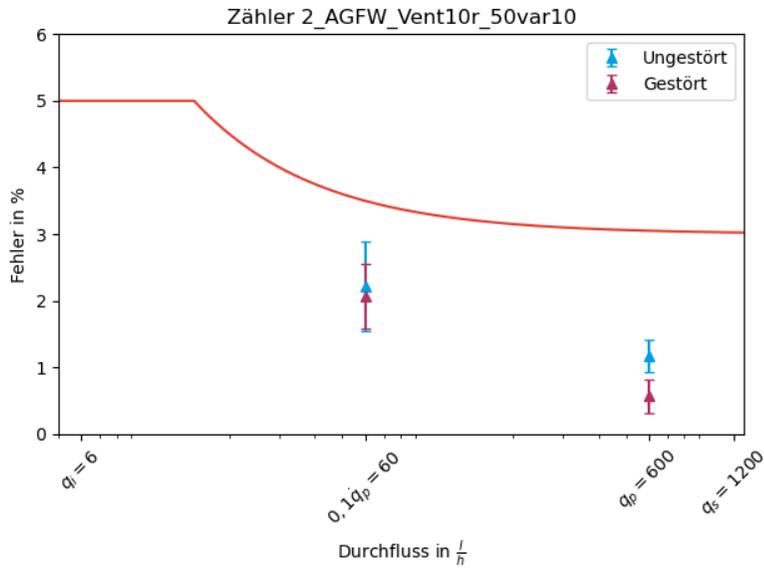
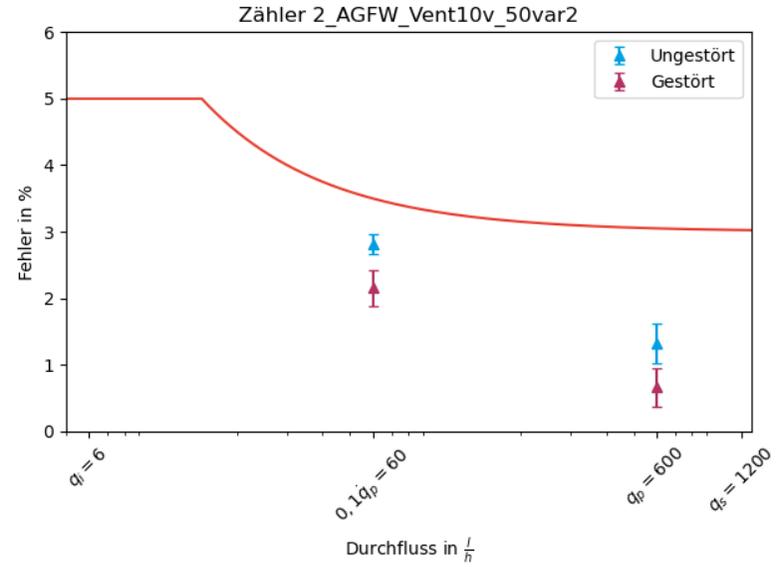
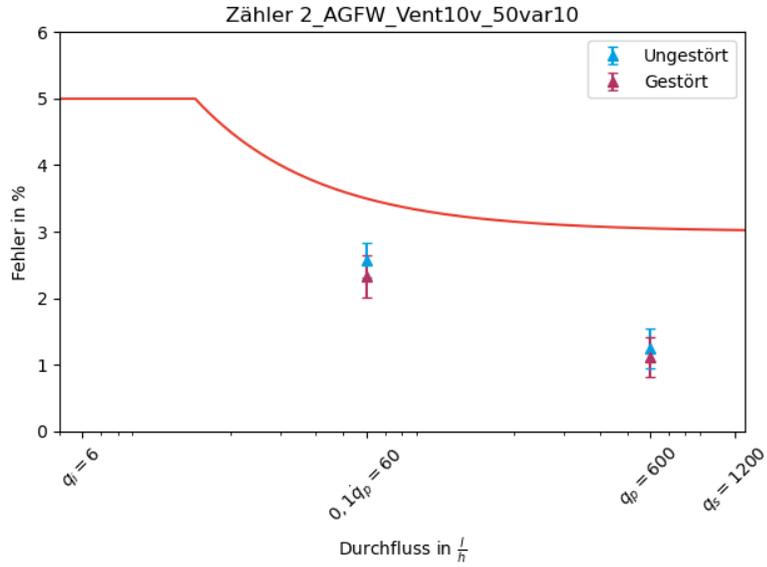
A 3.1 Eingangsmessung beider Zähler und Alterungsverhalten ungestörter Zähler



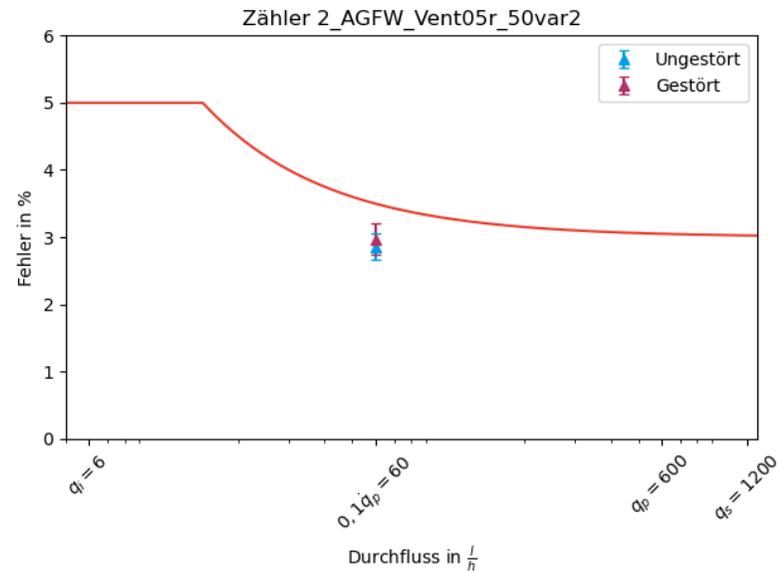
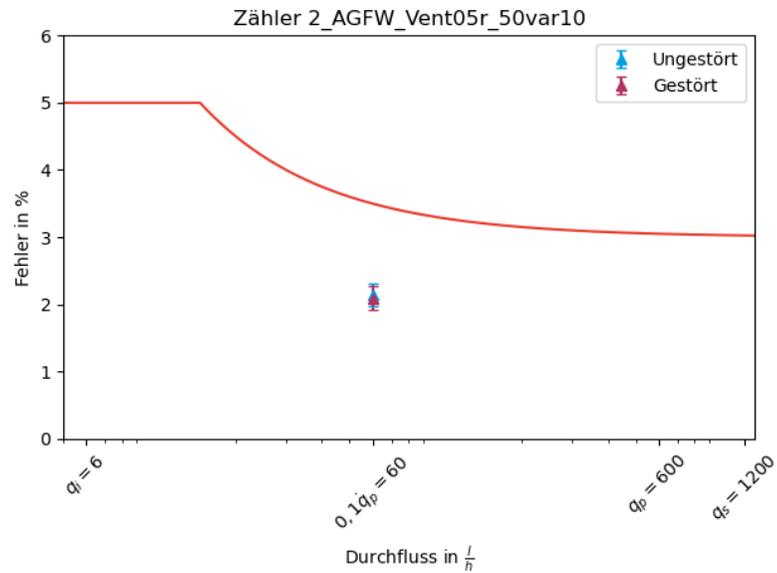
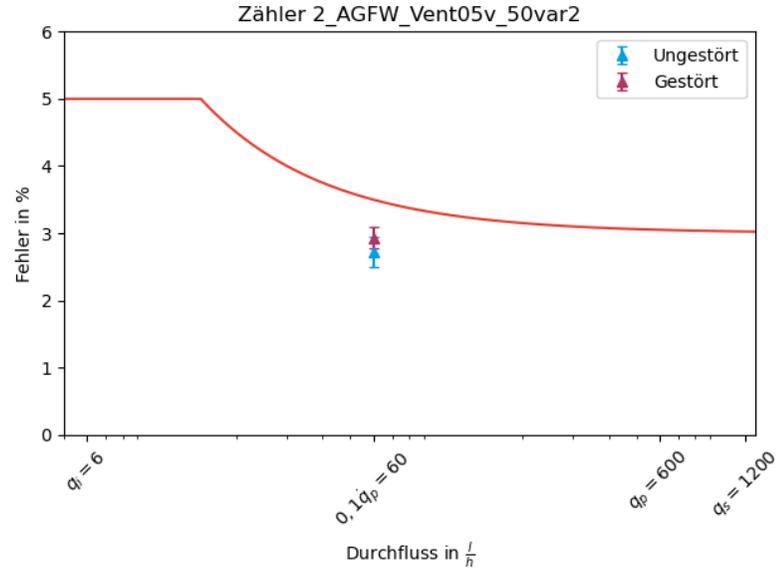
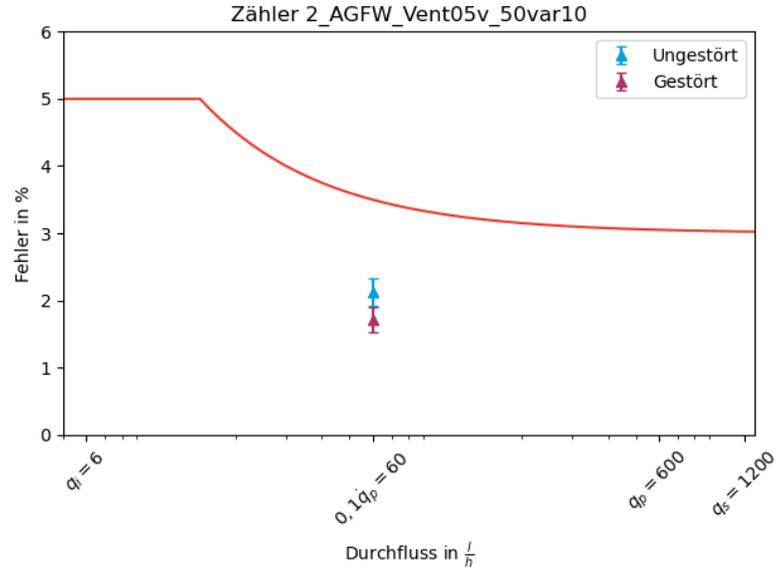
A 3.2 Störeinfluss Kantensprung



A 3.3 Störeinfluss Kegelsitzventil

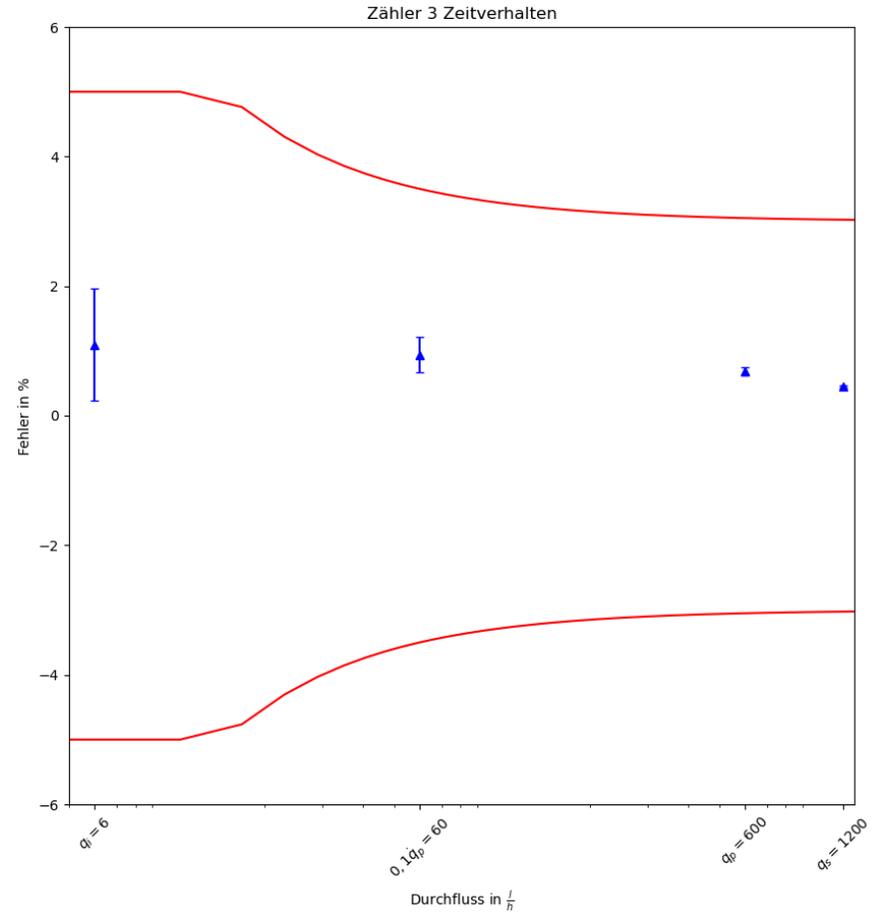
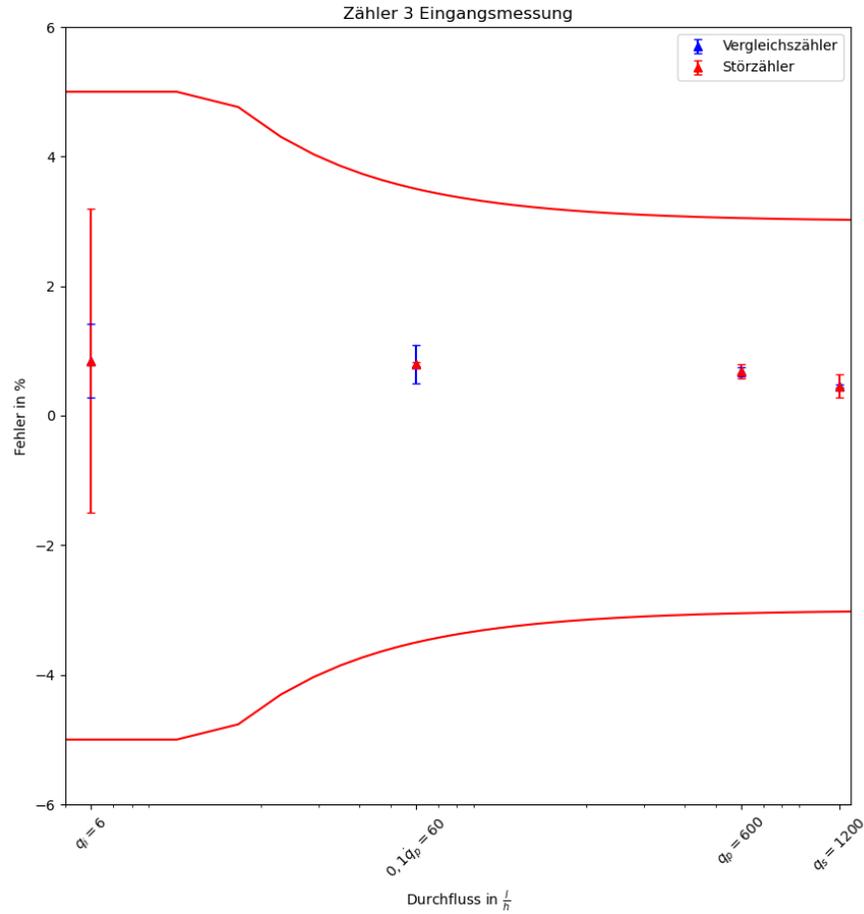


Weiter A 3.3 Störeinfluss Kegelsitzventil

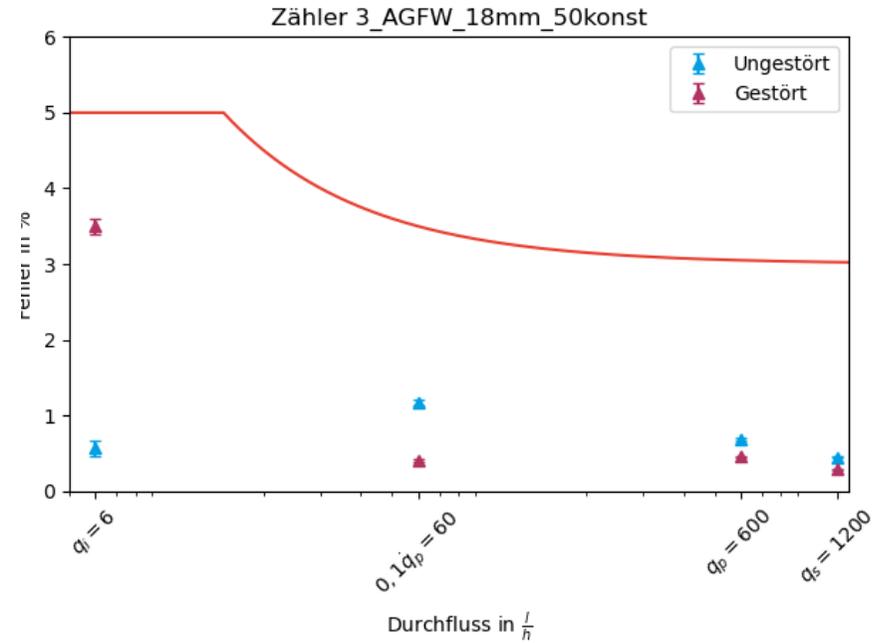
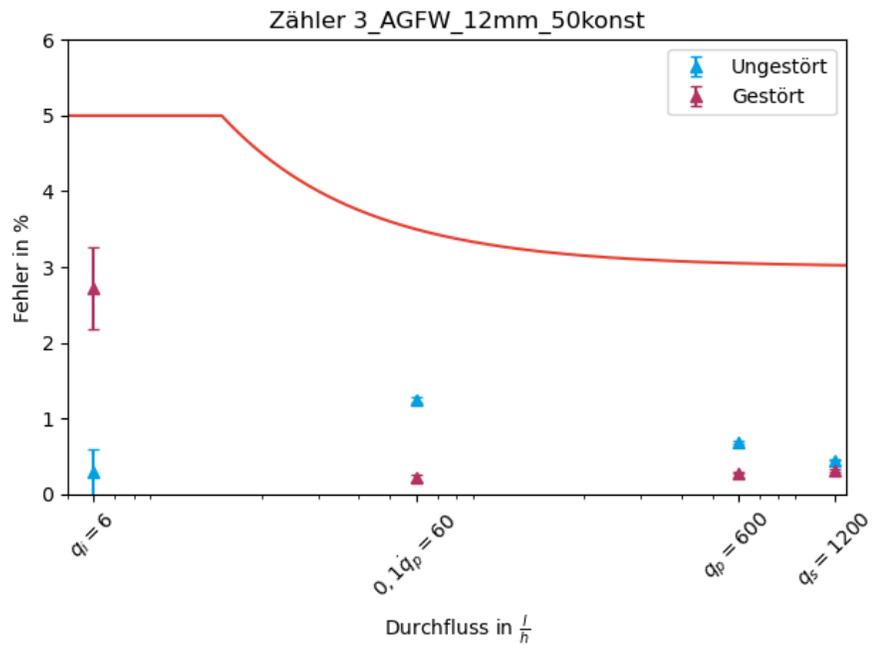
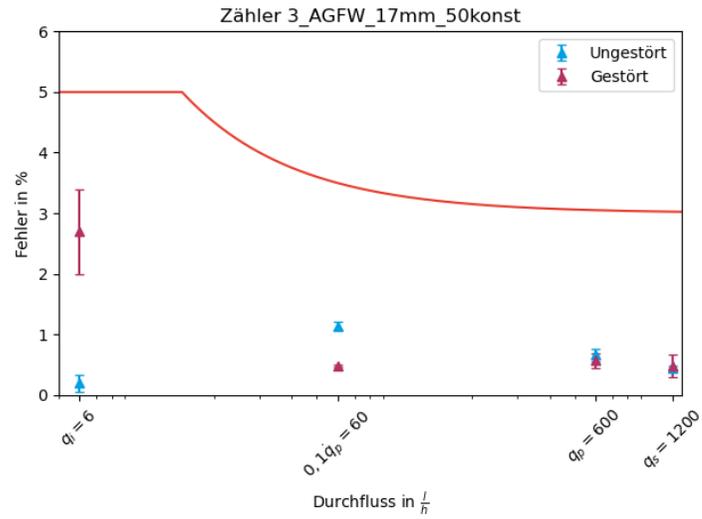


A 4 Einzelergebnisse Zähler 3

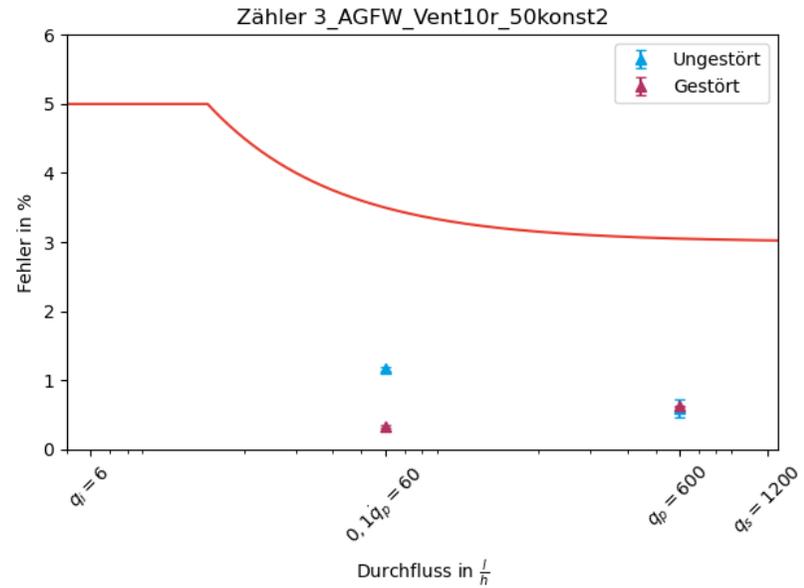
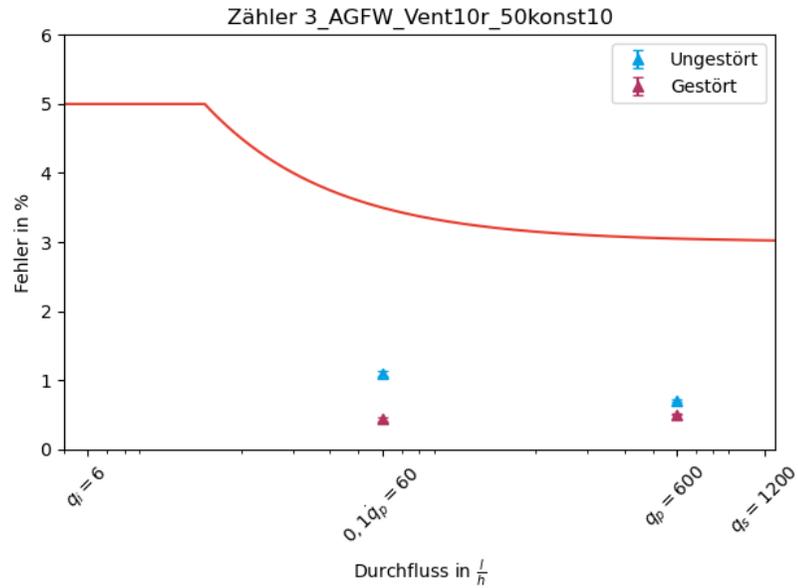
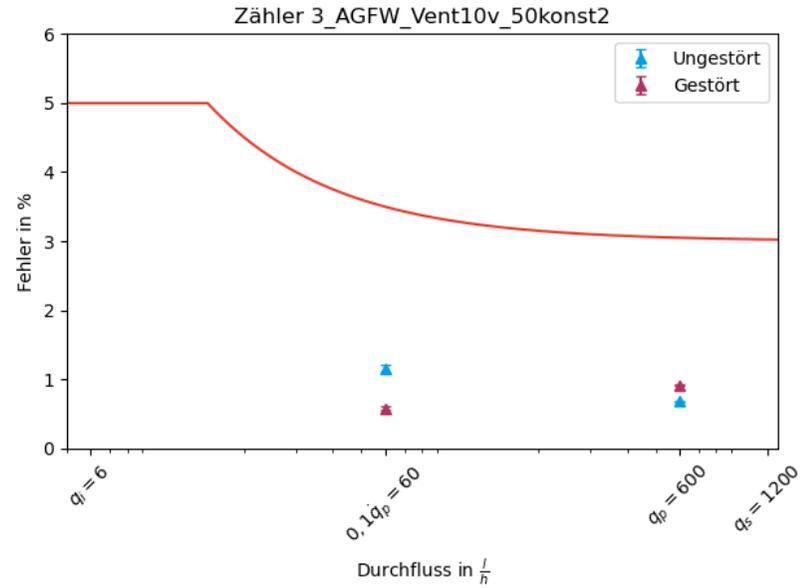
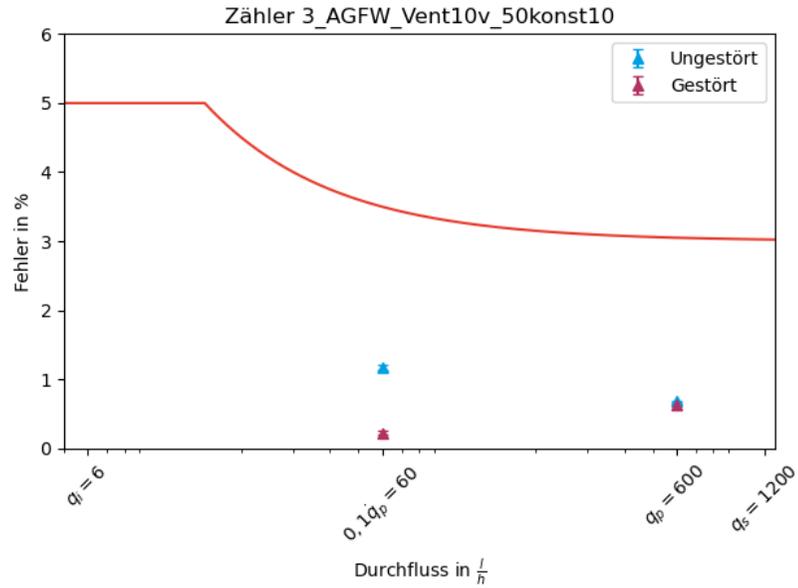
A 4.1 Eingangsmessung beider Zähler und Alterungsverhalten ungestörter Zähler



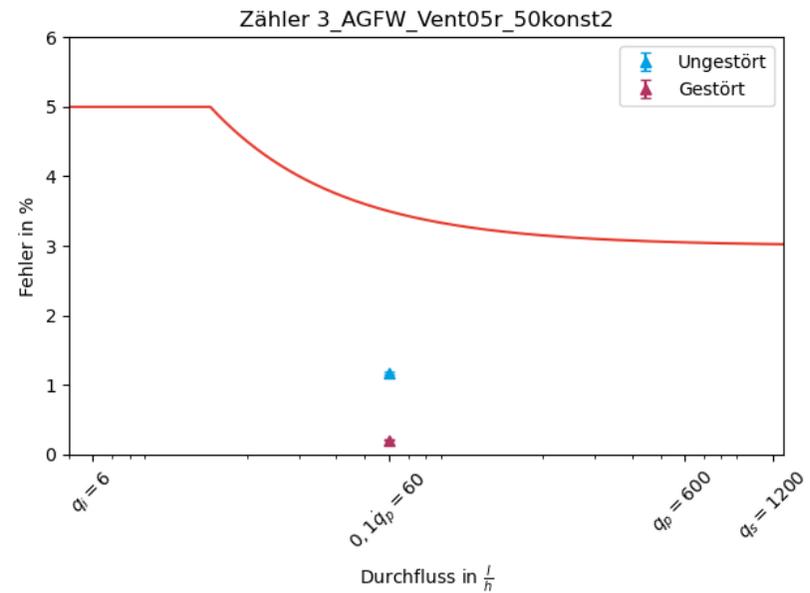
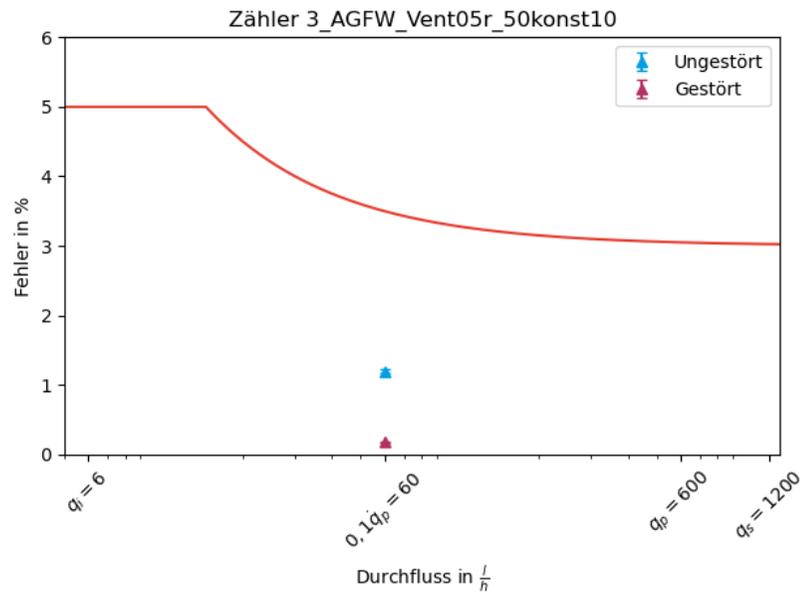
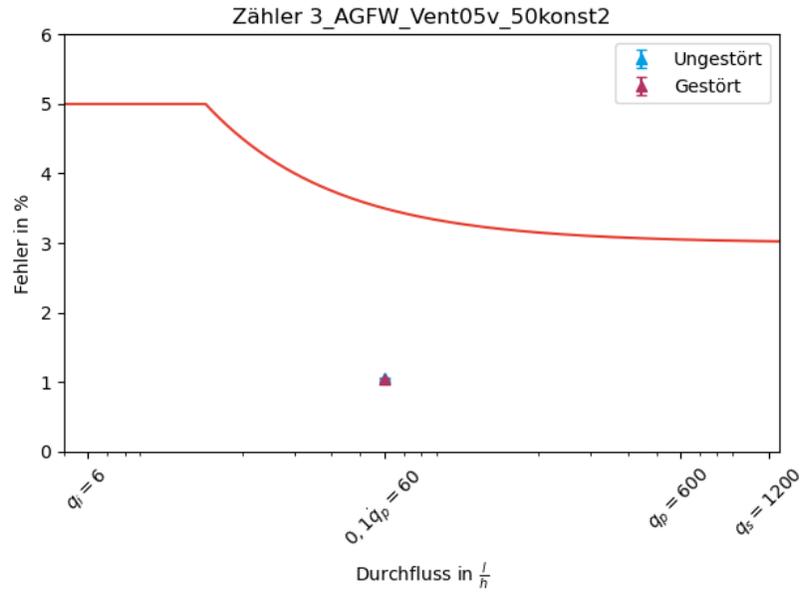
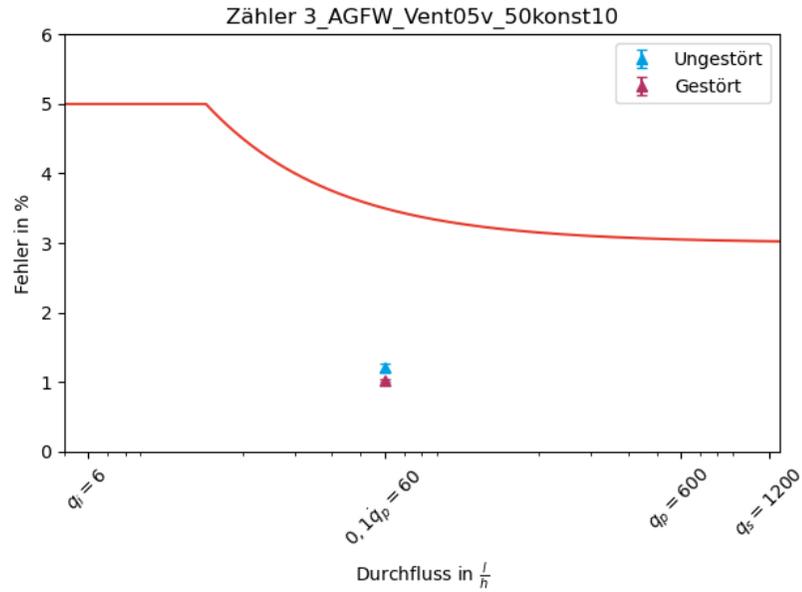
A 4.2 Störeinfluss Kantensprung



A 4.3 Störeinfluss Kegelsitzventil

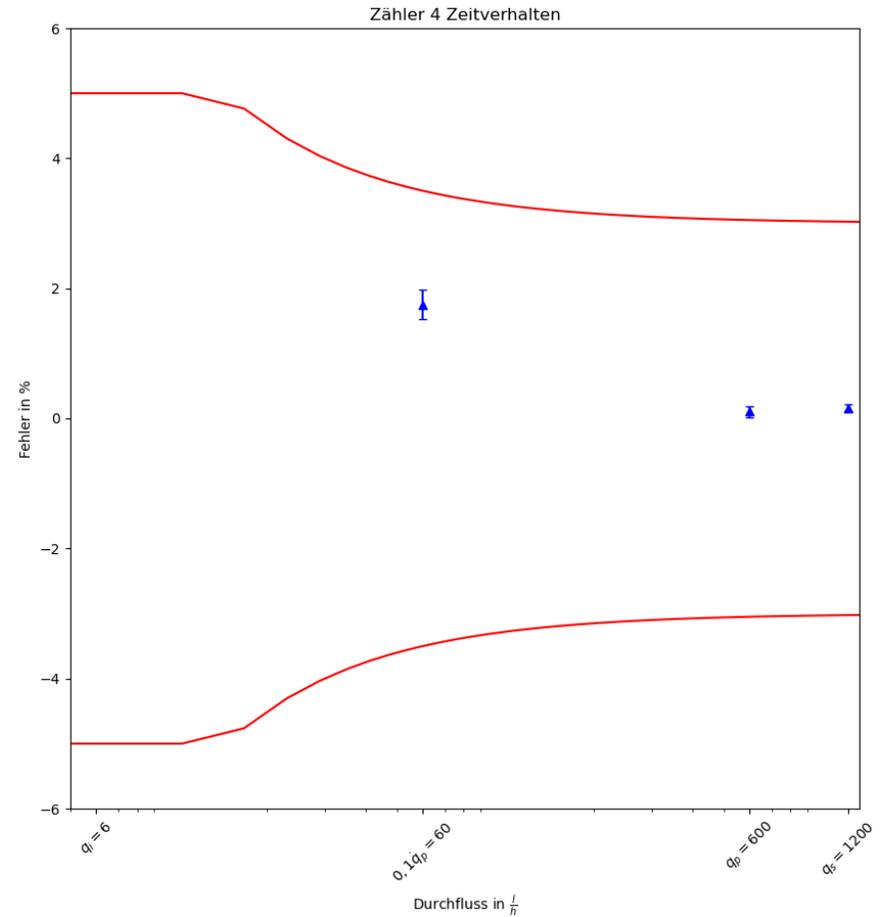
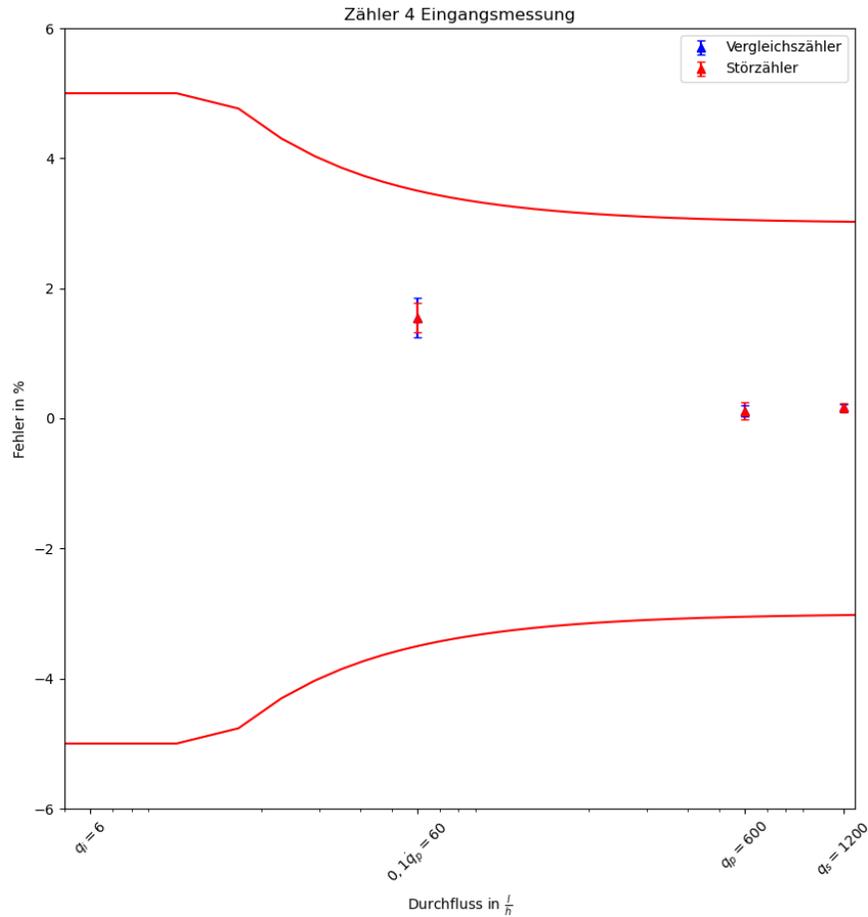


weiter A 4.3 Störeinfluss Kegelsitzventil

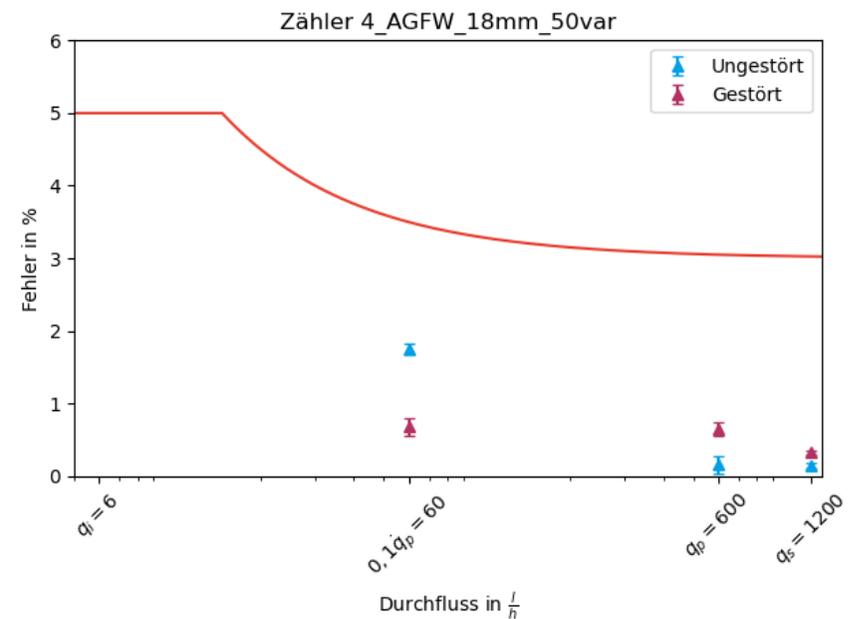
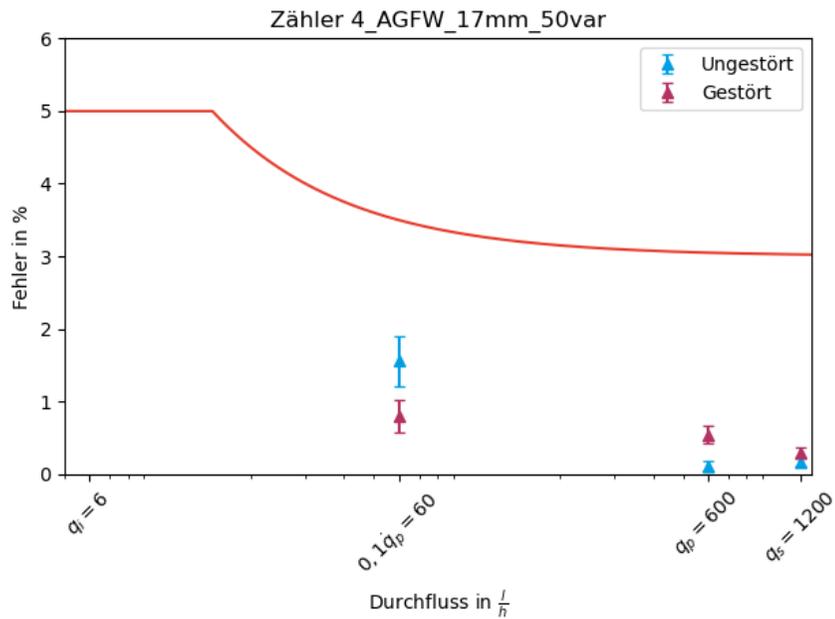
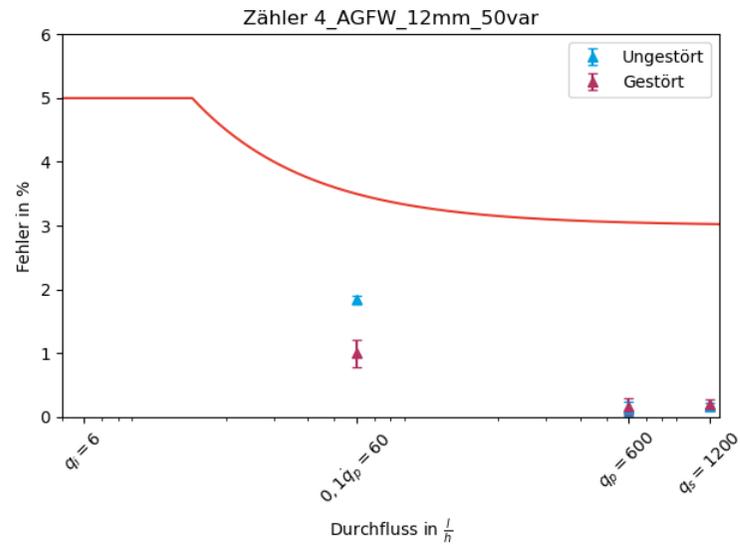


A 5 Einzelergebnisse Zähler 4

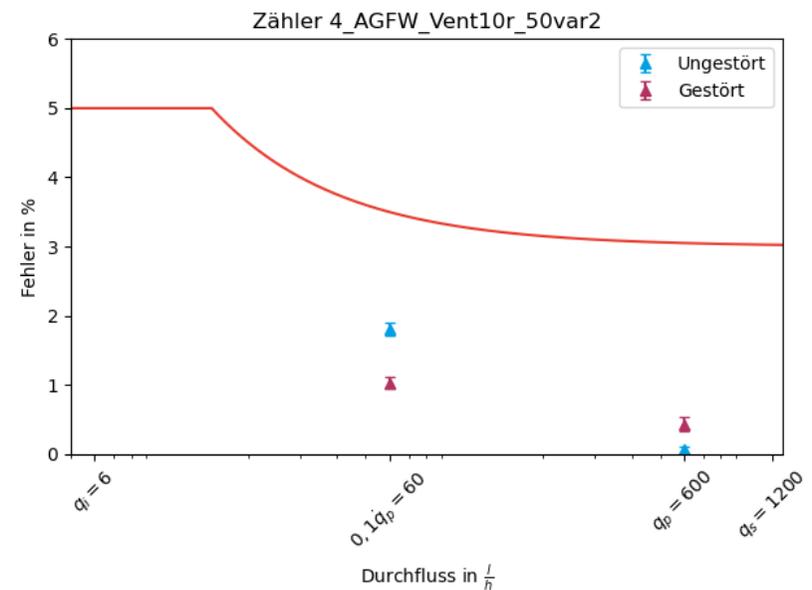
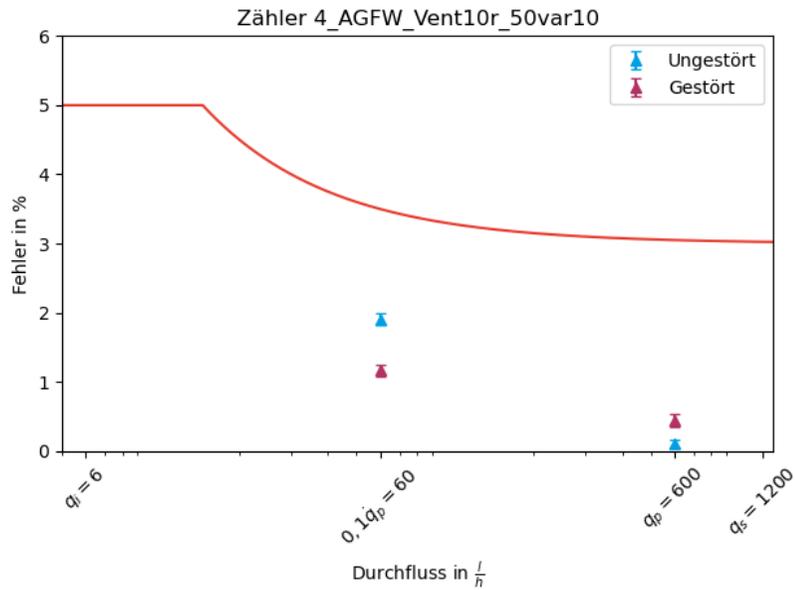
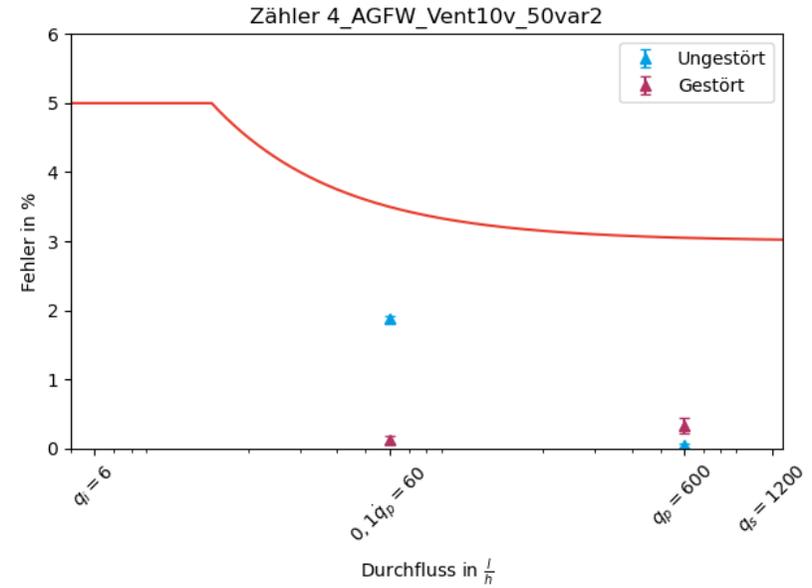
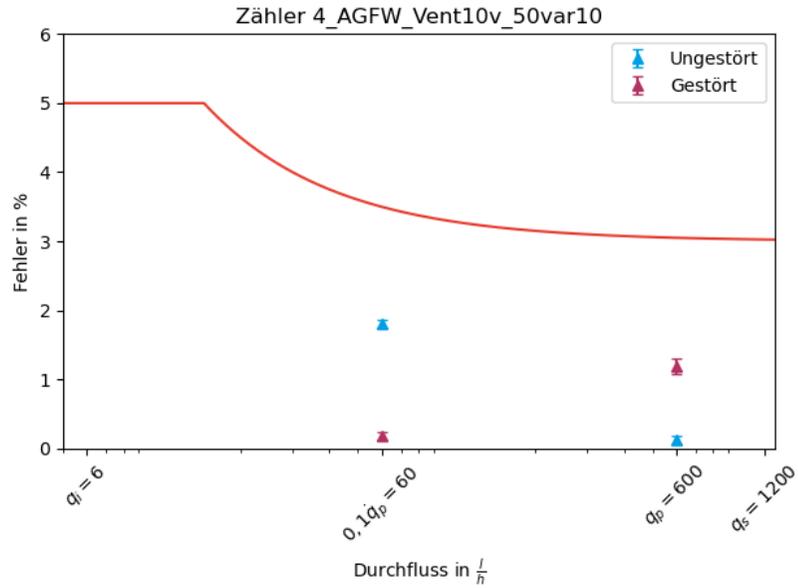
A 5.1 Eingangsmessung beider Zähler und Alterungsverhalten ungestörter Zähler



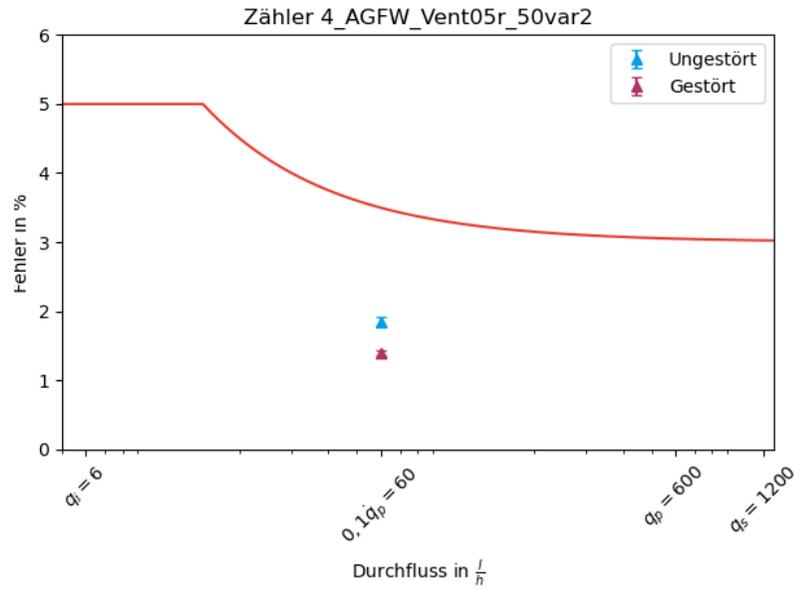
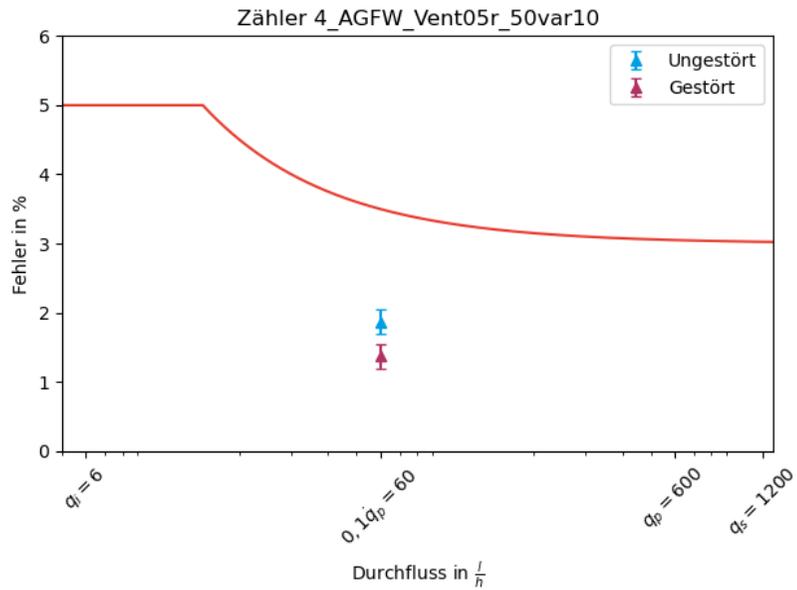
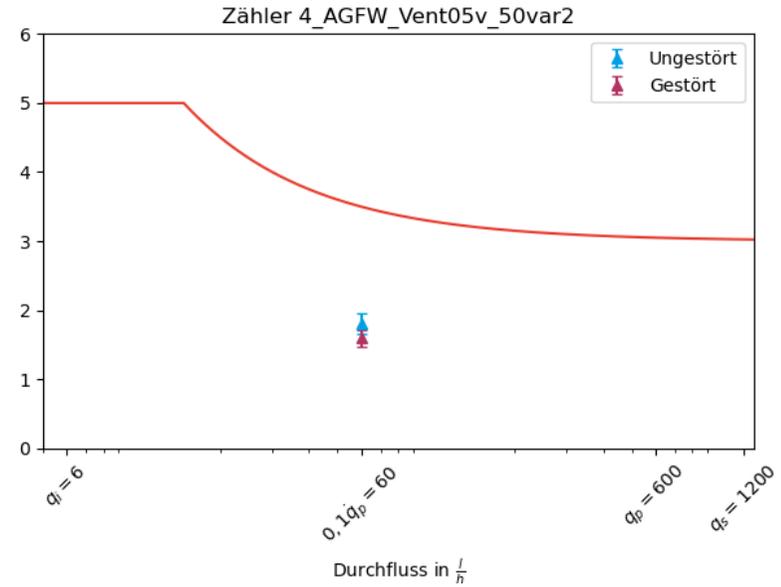
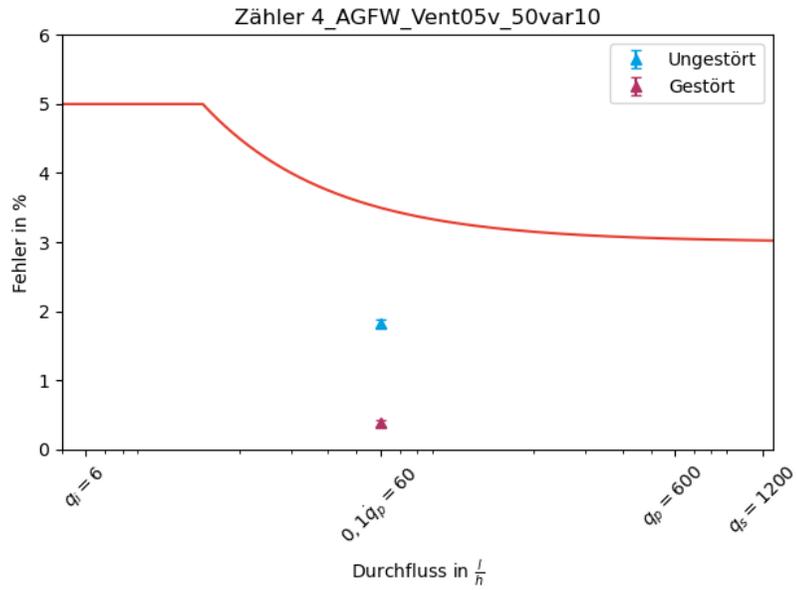
A 5.2 Störeinfluss Kantensprung



A 5.3 Störeinfluss Kegelsitzventil



weiter A 5.3 Störeinfluss Kegelsitzventil

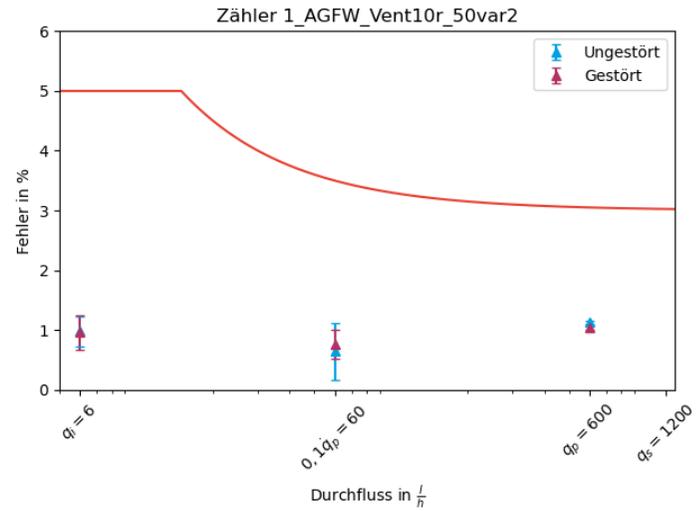


Anhang B Anhängigkeit vom Regelungsverhalten der Pumpe

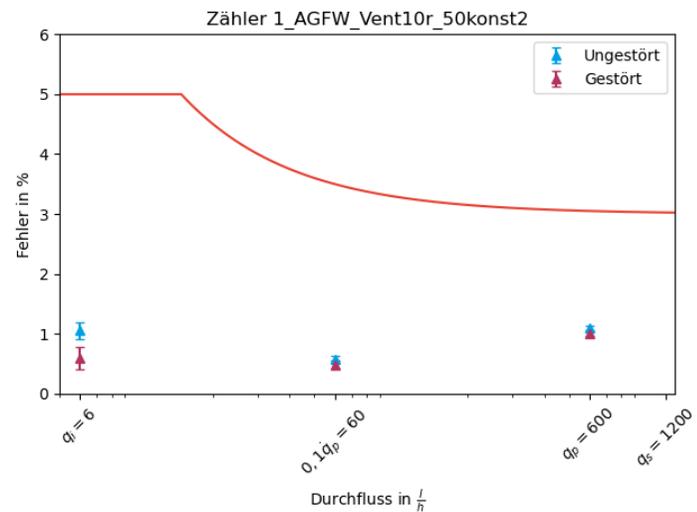
Ausgewählte Beispiele

Zähler 1

Variable
Pumpendrehzahl



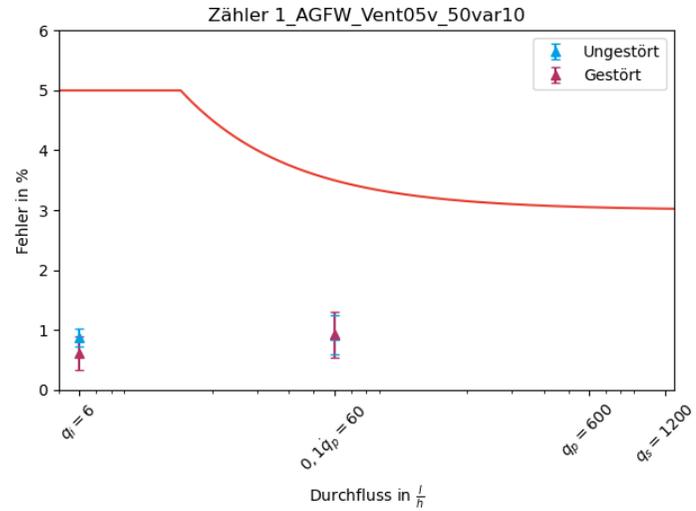
Konstante
Pumpendrehzahl



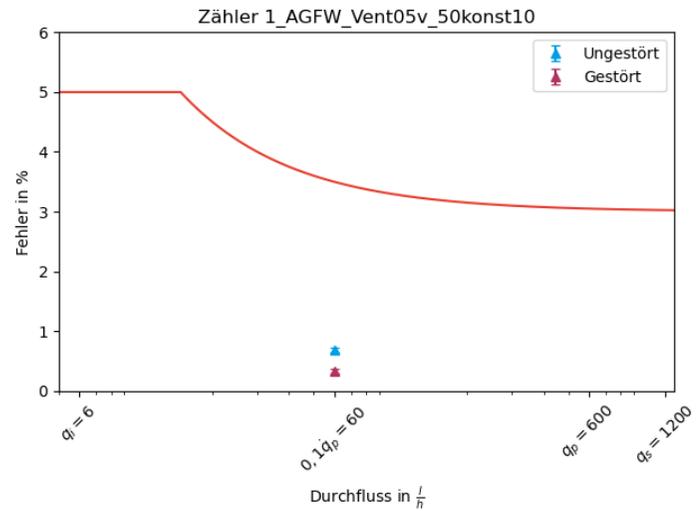
Anhang B

Zähler 1

Variable
Pumpendrehzahl



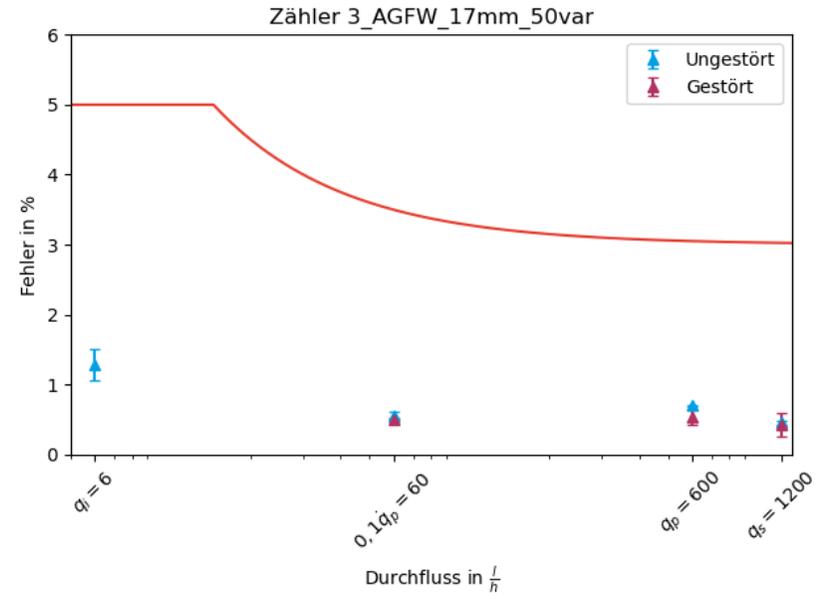
Konstante
Pumpendrehzahl



Anhang B

Zähler 3

Variable
Pumpendrehzahl



Konstante
Pumpendrehzahl

