

# Inbetriebnahme und Validierung eines akustischen Durchflussmessgerätes basierend auf dem Laufzeitdifferenzverfahren

*Diplomarbeit 2013*

*Arbeit für die Verleihung des akademischen Grades*

*Diplomingenieur (Dipl.-Ing.)*



Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen  
Technische Universität Graz

Vorgelegt von  
David Sprenger, BSc

Betreuer  
O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Jaberg  
Dipl.-Ing. Mark Guggenberger  
Dipl.-Ing. (FH) Florian Senn

Graz 2013

Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008  
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

### **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

### **STATUTORY DECLARATION**

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, am/at 25.08.2013

---

David Sprenger, BSc

## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen der Technischen Universität Graz. Dabei möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mir beim Erstellen dieser Arbeit geholfen haben.

Besonderer Dank gilt meinen Betreuern O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Ja-berg, Dipl.-Ing.(FH) Florian Senn und Dipl.-Ing. Mark Guggenberger für ihre hilfreichen Hinweise und tatkräftige Unterstützung.

An dieser Stelle möchte ich mich auch bei all meinen Studienkollegen für die aufre-gende Zeit hier an der Universität und bei meiner Freundin für Ihr Vertrauen in mich bedanken.

Nicht zuletzt gilt großer Dank meinem Onkel der mir einen sehr schönen Aufenthalt in Graz ermöglicht hat und natürlich meiner ganzen Familie, die immer und überall hinter mir steht und egal wann, die nötige Motivation und Rückhalt liefert.

Graz, am 25.08.2013

---

David Sprenger, BSc

## Kurzfassung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird die Inbetriebnahme und Validierung eines akustischen Durchflussmessgerätes (ADM) nach dem Prinzip der Laufzeitdifferenz diskutiert. Dieses Messsystem arbeitet dabei mit akustischen Sensoren, welche ein Ultraschallsignal durch das zu messende Medium senden. Diese Sensoren können im Medium angebracht sein, oder auch nicht-invasiv arbeiten. Zweitere bezeichnet man als Clamp-On Sensoren.

Anfänglich sind Grundlagen zum Messen mit Ultraschall angeführt und verschiedene mathematische Methoden für das allgemeine Verständnis werden erläutert. Aufbauend auf diesen Zusammenhängen behandelt die Arbeit den Betrieb des verwendeten Messsystems und eine ausführliche Verfassung einer Anleitung, um auch weiterhin eine gezielte und problemlose Anwendung zu gewährleisten. Zudem werden die aktuellen Richtlinien, wie zum Beispiel die IEC 41 beim Messen mit akustischen Sensoren berücksichtigt. Außerdem erfolgt eine Implementierung des Verfahrens in *LabVIEW v2012* von *National Instruments*. Dabei wird eine erste einfache Lösung erstellt und aufbauend auf dieser ein komplexeres Modell zur einfacheren Datenakquirierung implementiert. Durch eine Visualisierung der Messwerte besteht die Möglichkeit zu entscheiden, welche Daten aussagekräftig sind und welche nicht. Die daraus resultierenden Werte sind mit einer grafischen Oberfläche im Programm *Matlab* analysierbar. Dabei besteht die Möglichkeit Statistiken und Fehlerrechnungen vorzunehmen, damit die Messungen besser interpretiert werden können. In weiterer Folge ist eine Standardisierung des Auswertevorgangs möglich.

Zur Überprüfung der Ergebnisse sind Vergleichsmessungen mit anderen Durchflussmessmethoden angegeben. Zusätzlich werden anhand von Kraftwerksmessungen die gewonnenen Erfahrungen getestet und gefestigt.

Der letzte Abschnitt behandelt theoretische Verbesserungspotenziale bei der akustischen Durchflussmessung und wendet diese auf das vorhandene Messsystem an. Abschließend sind alle Erkenntnisse zusammengefasst und ein Ausblick für zukünftige Anwendungen der ADM wird angegeben.

## Abstract

This diploma thesis covers the commissioning and validation of an acoustic discharge measurement method according to the principle of the transit time difference. The measurement system sends an ultrasonic wave through the medium. Where sensors can be placed in the medium, or non-invasiv. The second are so called "clamp-on" sensors.

For the general understanding the basics of acoustic measurements are given and furthermore there are various mathematical principles and methods discussed. Based on this an error analysis is made and the impact of the most important influence factors is mentioned.

Further work deals with the application of the measurement system used and a detailed documentation of the operating instructions. Hence general guidelines for measuring with acoustic sensors are investigated and mentioned. Also an implementation of the measurement method in *LabVIEW v2012* of *National Instruments* is done. The measured results are analyzed with a *Matlab v2011* graphical user interface (GUI). Therefore different tools were designed to standardize such processes.

Additionally a comparison of different discharge measurement methods is investigated and further improvements for the system are suggested. Also the gained experiences are tested in a power plant measurement.

Finally general improvements for the acoustic discharge measurement are mentioned and also the usage for the applied system is discussed.

In the end of this thesis all the results are summarized and an outlook for further research in this area is given.

# Inhaltsverzeichnis

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Abbildungsverzeichnis</b>  | <b>ix</b>   |
| <b>Tabellenverzeichnis</b>  | <b>xii</b>  |
| <b>Abkürzungsverzeichnis</b>  | <b>xiii</b> |
| <b>1. Einleitung</b>  | <b>1</b>    |
| 1.1. Grundlegende Zusammenhänge . . . . .                           | 1           |
| 1.1.1. Durchflussmessung in der Wasserkraft . . . . .               | 3           |
| 1.1.2. Akustische Durchflussmessung . . . . .                       | 3           |
| 1.2. Aufgabenstellung . . . . .                                     | 5           |
| 1.3. Vorgehensweise . . . . .                                       | 5           |
| <b>2. Grundlagen der akustischen Durchflussmessung</b>              | <b>6</b>    |
| 2.1. Messung nach dem Doppler-Effekt . . . . .                      | 7           |
| 2.1.1. Mathematische Beschreibung . . . . .                         | 7           |
| 2.2. Messung nach dem Laufzeitdifferenzverfahren . . . . .          | 10          |
| 2.2.1. Mathematische Bestimmung der gemittelten Pfadgeschwindigkeit | 10          |
| 2.2.2. Bestimmung des Durchflusses . . . . .                        | 15          |
| 2.2.3. Andere Messverfahren nach dem Mitnahme-Effekt . . . . .      | 15          |
| 2.3. Akustische Sensoren . . . . .                                  | 16          |
| <b>3. Richtlinien beim Messen mit akustischen Sensoren</b>          | <b>19</b>   |
| 3.1. Allgemeine Vorgaben . . . . .                                  | 19          |
| 3.2. Vorgaben zur Laufzeitdifferenzmessung . . . . .                | 19          |
| 3.2.1. Durchflussbestimmung . . . . .                               | 20          |
| 3.2.2. Wahl der Messektion und Installationsbedingungen . . . . .   | 20          |
| 3.2.3. Anwendung und Grenzen . . . . .                              | 21          |
| 3.2.4. Vergleich zum verwendeten ADM . . . . .                      | 22          |
| <b>4. Fehlerarten und Regression</b>                                | <b>25</b>   |
| 4.1. Fehlerarten . . . . .  | 25          |
| 4.2. Methode der kleinsten Fehlerquadrate - Regression . . . . .    | 26          |
| 4.3. Fehlerprognose . . . . .                                       | 31          |
| <b>5. Messungen am Institut</b>                                     | <b>32</b>   |
| 5.1. Vergleichsmessungen . . . . .                                  | 32          |
| 5.1.1. Messung mittels Messvolumen . . . . .                        | 32          |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 5.1.2.    | Magnetisch induktive Durchflussmessung . . . . .                                  | 32        |
| 5.2.      | Akustische Durchflussmessung . . . . .  | 33        |
| 5.2.1.    | Randbedingungen der ersten Messung . . . . .                                      | 35        |
| 5.2.2.    | Durchführung der Messung . . . . .  | 36        |
| 5.2.3.    | Auswertung und Diskussion . . . . .   | 36        |
| 5.2.4.    | Anpassung der Messung und korrigierte Randbedingungen . . . . .                   | 39        |
| 5.2.5.    | Ergebnisse bei den korrigierten Randbedingungen . . . . .                         | 40        |
| <b>6.</b> | <b>Messunsicherheit - Fehlerfortpflanzung</b>                                     | <b>47</b> |
| 6.1.      | Grundlagen der Fehlerrechnung für die ADM . . . . .                               | 47        |
| 6.2.      | Auswertung für die Messung im Labor . . . . .                                     | 55        |
| 6.3.      | Einflussgrößen auf die Messunsicherheit bei der ADM . . . . .                     | 59        |
| <b>7.</b> | <b>Messungen im Kraftwerk</b>   | <b>67</b> |
| 7.1.      | Kraftwerk Birkenwald . . . . .  | 67        |
| 7.1.1.    | Randbedingungen . . . . .   | 68        |
| 7.1.2.    | Durchführung der Messung . . . . .  | 68        |
| 7.1.3.    | Diskussion und Ergebnisse . . . . .   | 69        |
| 7.1.4.    | Fehlerbetrachtung . . . . .   | 69        |
| 7.2.      | Speicherkraftwerk Salza . . . . .   | 72        |
| 7.2.1.    | Randbedingungen . . . . .   | 72        |
| 7.2.2.    | Durchführung der Messung . . . . .  | 73        |
| 7.2.3.    | Diskussion und Ergebnisse . . . . .   | 73        |
| 7.2.4.    | Fehlerbetrachtung . . . . .   | 74        |
| 7.3.      | Fazit . . . . .   | 75        |
| 7.4.      | Verwendete Geräteliste für Kraftwerksmessungen . . . . .                          | 78        |
| <b>8.</b> | <b>Theoretische Verbesserungspotenziale der Messwerte</b>                         | <b>79</b> |
| 8.1.      | Messwertkorrektur durch optimierte Sensormontage . . . . .                        | 79        |
| 8.2.      | Weiterführende Verbesserungsmöglichkeiten . . . . .                               | 81        |
| 8.2.1.    | Messwertkorrektur durch Mehrpfadanordnung und Gewichtung . . . . .                | 81        |
| 8.2.2.    | Messwertanpassung durch Berücksichtigung der Geschwindigkeitsverteilung . . . . . | 92        |
| 8.2.3.    | Mehrpfadige Anordnung von Clamp-On Sensoren . . . . .                             | 94        |
| <b>9.</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>   | <b>96</b> |
| <b>A.</b> | <b>Anleitung und Inbetriebnahme</b>   | <b>97</b> |
| A.1.      | Technische Daten der Clamp-On Sensoren . . . . .                                  | 98        |
| A.2.      | Montage der Sensoren . . . . .  | 98        |
| A.2.1.    | Vorbereitung des Montageortes - Randbedingungen . . . . .                         | 98        |
| A.2.2.    | Positionierung der Sensoren . . . . .   | 100       |
| A.3.      | Verbindung zum <i>Transit Time Modul</i> und <i>Controller</i> . . . . .          | 103       |
| A.4.      | Ansteuerung mittels Computer . . . . .  | 104       |
| A.4.1.    | Zugriff auf das Web-Interface . . . . .   | 105       |
| A.4.2.    | Einstellung einer Messsektion im Standard-Modus . . . . .                         | 105       |
| A.4.3.    | Anschluss eines analogen Ausgangs . . . . .                                       | 109       |

|  |            |
|--|------------|
| A.4.4. Verwendung von Datalogs . . . . .                         | 110        |
| A.4.5. Anwendung des Experten-Modus . . . . .                    | 112        |
| A.5. Messung unter der Verwendung von <i>LabVIEW</i> . . . . .   | 113        |
| A.6. Auswertung unter der Verwendung von <i>Matlab</i> . . . . . | 118        |
| <b>B. Fehlerschranken - Diagramme</b>                            | <b>122</b> |
| <b>Literaturverzeichnis</b>                                      | <b>129</b> |



# Abbildungsverzeichnis

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1. | Definition durchströmter Querschnitt, Kontrollvolumen, beziehungsweise Normal- und Geschwindigkeitsvektor . . . . .         | 2  |
| 1.2. | Verschiedene Anordnungen von Messpfaden bei der ADM. . . . .  | 4  |
| 2.1. | Laufzeitdifferenzmethode einer einpfadigen ADM. . . . .   | 6  |
| 2.2. | Doppler-Verfahren zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit. . . . .  | 8  |
| 2.3. | Unterschied zwischen getrenntem (a) und gemeinsamen (b) Sender und Empfänger. . . . .                                       | 9  |
| 2.4. | Signale am Wandler, durch eine Finite-Elemente-Simulation sichtbar gemacht. . . . .   | 11 |
| 2.5. | Mathematische Formulierung der Strömungsverhältnisse für die Laufzeitdifferenzmethode. . . . .                              | 11 |
| 2.6. | Unterschiedliche Pfadanordnungen bei der akustischen Durchflussmessung. . . . .   | 15 |
| 2.7. | Einfluss der Querströmung bei einer V-Anordnung. . . . .  | 16 |
| 2.8. | Elektroakustischer Wandler. . . . .   | 16 |
| 2.9. | Piezoelektrischer Effekt und Erzeugung von longitudinalen und transversalen Wellen. . . . .                                 | 17 |
| 3.1. | Abstände bei der Durchmesserbestimmung nach IEC 41. . . . .   | 21 |
| 3.2. | Temperaturänderung und Auswirkung auf den Durchfluss. . . . .   | 23 |
| 4.1. | Darstellung der systematischen sowie zufälligen Abweichung des Messwertes anhand eines Beispiels einer W-Anordnung. . . . . | 26 |
| 4.2. | Regressionsgerade zweier beliebiger Datensätze. . . . .   | 27 |
| 4.3. | Regressionsgerade zwischen ADM und IDM nach der Korrektur. . . . .  | 30 |
| 5.1. | Ansicht des Hauptprüfstandes am Institut für hydraulische Strömungsmaschinen. . . . .                                       | 34 |
| 5.2. | Zu- und Abströmsituation bei der induktiven Durchflussmessung am Institut. . . . .  | 35 |
| 5.3. | Messaufbau am Prüfstand bei einem DN400 Rohr. . . . .   | 36 |
| 5.4. | Vergleich des gemessenen Durchflusses bei der akustischen und der induktiven Durchflussmessung. . . . .                     | 37 |
| 5.5. | Darstellung von absolutem (a) und relativem (b) Fehler der unterschiedlichen Anordnungen. . . . .                           | 38 |
| 5.6. | Erklärung des Ablaufes bei der Zeitdifferenzbestimmung $\Delta t$ , im ADM. . . . .   | 40 |
| 5.7. | Darstellung des gemessenen Durchflusses von ADM zu IDM. . . . .   | 41 |
| 5.8. | Darstellung von relativem (a) und absolutem (b) Fehler der unterschiedlichen Anordnungen mit neuen Randbedingungen. . . . . | 42 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 5.9.  | Darstellung der Korrelation zwischen IDM und ADM mit neuen Randbedingungen. . . . .   | 44 |
| 5.10. | Die relativen Abweichungen bei den verschiedenen Anordnungen in Abhängigkeit von den Randbedingungen. . . . .                 | 46 |
| 6.1.  | Darstellung der Winkel, Pfadlängen und Brechungen bei einem Clamp-On Sensor. . . . .  | 47 |
| 6.2.  | Änderung der Schallgeschwindigkeit im Wasser mit der Temperatur bei konstantem Druck. . . . .                                 | 51 |
| 6.3.  | Übersicht der Fehlerberechnung bei der ADM mit Clamp-On Sensoren. . . . .   | 54 |
| 6.4.  | Veränderung der Strömungsgeschwindigkeit im DN400 Rohr bei unterschiedlichen Messanordnungen. . . . .                         | 60 |
| 6.5.  | Einfluss der absoluten Abweichung in der Durchmesserbestimmung, auf die Messung des Durchflusses an einem Rohr DN400. . . . . | 60 |
| 6.6.  | Temperatureinfluss auf die Unsicherheit bei der Bestimmung des Durchflusses. . . . .  | 61 |
| 6.7.  | Auswirkung von ungenauer Bestimmung der Schallgeschwindigkeit im Sensor (a) und im Rohr (b). . . . .                          | 62 |
| 6.8.  | Auswirkung von ungenauer Zeitmessungen im Sensor. . . . .   | 64 |
| 6.9.  | Darstellung des Diskretisierungsfehlers durch die interne Taktrate. . . . .   | 65 |
| 6.10. | Auswirkung der Diskretisierung auf die Durchflussbestimmung (a) und der dabei auftretende relative Fehler (b). . . . .        | 66 |
| 7.1.  | Ansicht der Peltonturbinen im Kraftwerk Birkenwald. . . . .   | 67 |
| 7.2.  | Messaufbau und Durchführung der Durchflussmessung. . . . .  | 69 |
| 7.3.  | Ergebnisse der Durchflussmessung im Kraftwerk Birkenwald. . . . .   | 70 |
| 7.4.  | Angabe der Fehlerschranken bei der verwendeten V-Anordnung im Kraftwerk Birkenwald. . . . .                                   | 71 |
| 7.5.  | Kraftwerk Salza. . . . .  | 72 |
| 7.6.  | Messanordnung der Ultraschallsensoren im Kraftwerk Salza. . . . .   | 73 |
| 7.7.  | Darstellung der Messposition und der Pfadanordnung an der Druckrohrleitung. . . . .   | 74 |
| 7.8.  | Vergleich des am Institut verwendeten ADM, zum akustischen Durchflussmessgerätes von <i>Flexim</i> . . . . .                  | 75 |
| 7.9.  | Unterschiedliche Messpositionen des ADM von <i>Rittmeyer</i> . . . . .  | 76 |
| 7.10. | Echtzeitaufnahme der beiden Durchflusssignale während einem Lastwechsel. . . . .  | 76 |
| 7.11. | Fehlerschranken bei der Messung mit einer V-Anordnung im Kraftwerk Salza. . . . .   | 77 |
| 8.1.  | Änderung des Sensorabstandes zum Abgleich der Laufzeitdifferenzen. . . . .  | 80 |
| 8.2.  | Ermittlung der Breite $b(z)$ in Abhängigkeit von der Höhe. . . . .  | 82 |
| 8.3.  | Darstellung eines Teildurchflusses für einen Rohrquerschnitt. . . . .   | 83 |
| 8.4.  | Annäherung einer Funktion mit der Trapezregel. . . . .  | 84 |
| 8.5.  | Darstellung einer zweipfadigen ADM mit deren Abständen von der Mittelachse. . . . .   | 87 |
| 8.6.  | Strömungsprofile beim Gauss-Jacobi und OWICS Verfahren. . . . .   | 89 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 8.7.  | Strömungsprofile für verschiedenste Reynoldszahlen im Vergleich zum OWICS Verfahren. . . . .           | 90  |
| 8.8.  | Vergleich der Totalreflexion bei Clamp-On Sensoren an einem Rohr. . .                                  | 95  |
| A.1.  | <i>Rittmeyer</i> Messgeräte nach dem Clamp-On Verfahren. . . . .                                       | 97  |
| A.2.  | Empfohlene Einbaulängen laut der Firma <i>Rittmeyer</i> für einpfadige Messung. . . . .                | 99  |
| A.3.  | Verwendete Hilfsmittel bei der Sensormontage . . . . .   | 99  |
| A.4.  | Abgleich der Montagewinkel am Rohr. . . . .  | 101 |
| A.5.  | Anzeichnen der Markierungen am Papier-, oder Alustreifen. . . . .                                      | 101 |
| A.6.  | Vermessung des Rohrumfanges mit Hilfe eines Papierstreifens. . . . .                                   | 102 |
| A.7.  | Bestimmung der Position von Halterung drei und vier. . . . .   | 103 |
| A.8.  | Ausrichten der Sensorhalterungen am Rohr. . . . .  | 104 |
| A.9.  | Anbindung der Sensoren an das <i>Transit Time Modul</i> und den <i>Controller</i> . . . . .            | 105 |
| A.10. | LAN-Verbindung zum Messgerät mittels Computer. . . . .   | 106 |
| A.11. | Statusansicht des Messvorganges nach der Anmeldung im <i>Risonic</i> System. . . . .                   | 106 |
| A.12. | Ansicht der Sektionen bei den Messparametern. . . . .  | 107 |
| A.13. | Hinzufügen des <i>Transit Time Moduls</i> . . . . .  | 108 |
| A.14. | Hinzufügen einer doppletten V-Anordnung für ein rundes Rohr als Messsektion. . . . .                   | 108 |
| A.15. | Eingabe der Rohrdaten für die Berechnung des axialen Abstandes der Sensoren. . . . .                   | 109 |
| A.16. | Hinzufügen eines analogen Ausgangs zur Datenverarbeitung. . . . .                                      | 110 |
| A.17. | Einstellungen des analogen Datenausgangs. . . . .  | 111 |
| A.18. | Messungen mittels eines Datalogs. . . . .  | 111 |
| A.19. | Ermittlung der Signalqualität bei der Messung. . . . .   | 112 |
| A.20. | Beispiel für die durchgeführten Vorgänge im Syslog. . . . .  | 113 |
| A.21. | Einstellung der Serviceparameter und Neustart des Messgerätes. . . . .                                 | 114 |
| A.22. | Gehäuse des „cDAQ“ im Labor. . . . .   | 114 |
| A.23. | Darstellung des „cDAQ“ mit verschiedenen Modulen (a). Ansicht des verwendeten Strommoduls (b). . . . . | 114 |
| A.24. | Einbindung des ADM in die Messsoftware am Prüfstand des Institutes. . . . .                            | 115 |
| A.25. | Auswahl der Skaliervorschriften für die ADM. . . . .   | 116 |
| A.26. | Beschreibung der Einstellungen in <i>LabVIEW</i> . . . . .   | 116 |
| A.27. | Darstellung des Durchflusses in der Registerkarte „Diagramme“. . . . .                                 | 117 |
| A.28. | Erklärung des Messspeichers zur Aufzeichnung der Daten. . . . .  | 119 |
| A.29. | Ansicht der grafischen Benutzeroberfläche mit einem Messpunkt und dessen Statistik. . . . .            | 120 |
| A.30. | Schrittweise Erklärung der Bedienelemente. . . . .   | 120 |
| A.31. | Statistische Auswertung eines Messpunktes und dessen relevante Größen. . . . .                         | 121 |
| A.32. | Ansicht zweier Messungen und Erklärung der Darstellung. . . . .  | 121 |

# Tabellenverzeichnis

|      |   |    |
|------|---|----|
| 3.1. | Korrekturfaktoren bei der Messung mit akustischen Sensoren. . . . .                             | 20 |
| 5.1. | Induktives Durchflussmessgerät am Institut. . . . .   | 33 |
| 5.2. | Eckdaten des Prüfstandes. . . . .   | 35 |
| 5.3. | Gegenüberstellung vom Durchfluss der ADM zum IDM bei unterschiedlichen Messanordnungen. . . . . | 39 |
| 6.1. | Absolute Messfehler bei der ADM und Rechenwerte am Beispiel für ein DN400 Rohr. . . . .         | 55 |
| 6.2. | Ergebnisse der absoluten Messfehler der ADM für einen Betriebspunkt. .                          | 59 |
| 7.1. | Daten der beiden Peltonturbinen im Kraftwerk Birkenwald. . . . .                                | 68 |
| 7.2. | Annahmen zu den absoluten Unsicherheiten bei der ADM im Kraftwerk Birkenwald. . . . .           | 71 |
| 7.3. | Annahmen zu den absoluten Unsicherheiten bei der ADM im Kraftwerk.                              | 77 |
| 8.1. | Wichtige Beispiele von Orthogonalpolynomen. . . . .   | 87 |

# Abkürzungsverzeichnis

## Mathematische Formelzeichen

| <i>Formelzeichen</i>        | <i>Einheit</i> | <i>Bezeichnung</i>  |
|-----------------------------|----------------|---|
| $A$                         | $[m^2]$        | <i>Strömungsquerschnitt</i>                                     |
| $a$                         | $[-]$          | <i>Nullversatz der Regressionsgeraden</i>                       |
| $\alpha$                    | $[rad]$        | <i>Brechungswinkel Rohr bezogen senkrecht auf Mittelachse</i>   |
| $\beta$                     | $[rad]$        | <i>Brechungswinkel Wasser bezogen senkrecht auf Mittelachse</i> |
| $B$                         | $[Tesla]$      | <i>magnetische Flussdichte</i>                                  |
| $b$                         | $[-]$          | <i>Steigung der Regressionsgeraden</i>                          |
| $b(z)$                      | $[m]$          | <i>Querschnittsbreite</i>                                       |
| $c$                         | $[m/s]$        | <i>Schallgeschwindigkeit</i>                                    |
| $c_L, c_T$                  | $[m/s]$        | <i>Schallgeschwindigkeit longitudinal, transversal</i>          |
| $c_{Rohr}$                  | $[m/s]$        | <i>Schallgeschwindigkeit Rohr</i>                               |
| $c_{Sensor}$                | $[m/s]$        | <i>Schallgeschwindigkeit Sensor</i>                             |
| $c_{Wasser}$                | $[m/s]$        | <i>Schallgeschwindigkeit Wasser</i>                             |
| $c_{12}$                    | $[m/s]$        | <i>Schall – überlagert mit Strömungsgeschwindigkeit</i>         |
| $\Delta$                    | $[-]$          | <i>Differenz</i>  |
| $D$                         | $[m]$          | <i>Durchmesser</i>  |
| $\eta_H$                    | $[-]$          | <i>hydraulischer Wirkungsgrad</i>                               |
| $\epsilon$                  | $[-]$          | <i>Residuum</i>   |
| $e_a$                       | $[-]$          | <i>absolute Unsicherheit allgemein</i>                          |
| $e_A$                       | $[m^2]$        | <i>absolute Unsicherheit Fläche</i>                             |
| $e_{\alpha, \beta, \gamma}$ | $[rad]$        | <i>absolute Unsicherheit Winkel</i>                             |
| $e_L$                       | $[m]$          | <i>absolute Unsicherheit Länge</i>                              |
| $e_D$                       | $[m]$          | <i>absolute Unsicherheit Durchmesser</i>                        |
| $e_p$                       | $[Pa]$         | <i>absolute Unsicherheit Druck</i>                              |
| $e_s$                       | $[m]$          | <i>absolute Unsicherheit Wandstärke</i>                         |
| $e_t$                       | $[s]$          | <i>absolute Unsicherheit Zeit</i>                               |
| $e_T$                       | $[^\circ C]$   | <i>absolute Unsicherheit Temperatur</i>                         |
| $e_c$                       | $[m/s]$        | <i>absolute Unsicherheit Schallgeschwindigkeit</i>              |
| $e_{\bar{U}}$               | $[m/s]$        | <i>absolute Unsicherheit Strömungsgeschwindigkeit</i>           |
| $f_S$                       | $[1/s]$        | <i>Frequenz Sender</i>  |
| $f_R$                       | $[1/s]$        | <i>Frequenz Reflektor</i>                                       |
| $f_{\bar{U}}$               | $[m/s]$        | <i>relative Unsicherheit Strömungsgeschwindigkeit</i>           |
| $f_Q$                       | $[m^3/s]$      | <i>relative Unsicherheit Durchfluss</i>                         |
| $f_x$                       | $[-]$          | <i>Funktionswerte</i>   |
| $g$                         | $[m/s^2]$      | <i>Erdbeschleunigung</i>  |
| $G$                         | $[Pa]$         | <i>Schubmodul</i>   |
| $\gamma$                    | $[rad]$        | <i>Brechungswinkel Sensor</i>                                   |

Abkürzungsverzeichnis

| <i>Formelzeichen</i>          | <i>Einheit</i>       | <i>Bezeichnung</i>                          |
|-------------------------------|----------------------|---|
| $H$                           | [m]                  | Förder – / Fallhöhe                         |
| $k$                           | [–]                  | Profilfaktor                                |
| $k_s$                         | [–]                  | Sandraufigkeit                              |
| $\lambda_S$                   | [m]                  | Wellenlänge Sender                          |
| $\lambda_R$                   | [m]                  | Wellenlänge Reflektor                       |
| $L$                           | [m]                  | Länge                                       |
| $L_R$                         | [m]                  | Schallpfadlänge Rohr                        |
| $L_S$                         | [m]                  | Schallpfadlänge Sensor                      |
| $L_W$                         | [m]                  | Schallpfadlänge Wasser                      |
| $L_j(x)$                      | [–]                  | Lagrange – Polynom                          |
| $M$                           | [Nm]                 | Drehmoment                                  |
| $n$                           | [1/s]                | Drehzahl                                    |
| $\nu$                         | [–]                  | Querkontraktionszahl                        |
| $\omega$                      | [1/s]                | Kreisfrequenz                               |
| $\phi$                        | [–]                  | Phasenverschiebung                          |
| $\frac{\partial}{\partial x}$ | [–]                  | partielle Ableitung nach $x$                |
| $p_n$                         | [–]                  | Polynom Grad $n$                            |
| $P_{hydr}$                    | [W]                  | hydraulische Leistung                       |
| $P_{mech}$                    | [W]                  | mechanische Leistung                        |
| $Q$                           | [m <sup>3</sup> /s]  | Durchfluss                                  |
| $Q_{ADM}$                     | [m <sup>3</sup> /s]  | Durchfluss akustische Durchflussmessung     |
| $Q_{IDM}$                     | [m <sup>3</sup> /s]  | Durchfluss induktive Durchflussmessung      |
| $R$                           | [m]                  | Radius                                      |
| $Re$                          | [–]                  | Reynoldszahl                                |
| $R^2$                         | [–]                  | Bestimmtheitsmass                           |
| $\rho$                        | [kg/m <sup>3</sup> ] | Dichte des Mediums                          |
| $s$                           | [m]                  | Wandstärke                                  |
| $t$                           | [s]                  | Zeit  |
| $t_{12}$                      | [s]                  | Laufzeit Sensor 1 – Sensor 2 Wasser         |
| $t_{21}$                      | [s]                  | Laufzeit Sensor 2 – Sensor 1 Wasser         |
| $t_{ges}$                     | [s]                  | Laufzeit gesamt                             |
| $t_{Kabel}$                   | [s]                  | Laufzeit Kabel                              |
| $t_{Rohr}$                    | [s]                  | Laufzeit Rohr                               |
| $t_{Sensor}$                  | [s]                  | Laufzeit Sensor                             |
| $T$                           | [°C]                 | Temperatur                                  |
| $U_e$                         | [V]                  | induzierte Spannung                         |
| $U(x, y)$                     | [m/s]                | axiale Strömungsgeschwindigkeit             |
| $U_{konst}$                   | [m/s]                | axiale, konstante Strömungsgeschwindigkeit  |
| $\bar{U}$                     | [m/s]                | lokale, gemittelte Strömungsgeschwindigkeit |
| $\bar{U}_A$                   | [m/s]                | flächengemittelte Strömungsgeschwindigkeit  |
| $V$                           | [m <sup>3</sup> ]    | Volumen                                     |
| $v_{proj}$                    | [m/s]                | lokale projizierte Strömungsgeschwindigkeit |
| $w_i$                         | [–]                  | Gewichtungsfaktor                           |
| $W$                           | [m/s]                | Querströmung                                |
| $X_i$                         | [–]                  | Messpunkte $x$ – Koordinate                 |
| $\bar{X}$                     | [–]                  | Mittelwert Messpunkte $x$ – Koordinate      |
| $Y_i$                         | [–]                  | Messpunkte $y$ – Koordinate                 |
| $\bar{Y}$                     | [–]                  | Mittelwert Messpunkte $y$ – Koordinate      |

**Abkürzungen und Indizes**

| <i>Abkürzungen</i> | <i>Bezeichnung</i>   |
|--------------------|--|
| 1                  | <i>Zustand/Sensor/Position 1</i>                             |
| 2                  | <i>Zustand/Sensor/Position 2</i>                             |
| $\vec{x}$          | <i>Vektor <math>x</math></i>                                 |
| <i>ADM</i>         | <i>akustische Durchflussmessung</i>                          |
| <i>cDAQ</i>        | <i>kompakte Datenakquirierung (compact data acquisition)</i> |
| <i>DIN</i>         | <i>Deutsches Institut für Normung</i>                        |
| <i>DN</i>          | <i>Nennweite Rohr</i>  |
| <i>EN</i>          | <i>Europäische Norm</i>                                      |
| <i>IDM/MID</i>     | <i>magnetisch induktive Durchflussmessung</i>                |
| <i>IP</i>          | <i>International Protection; Sensorschutzklasse</i>          |
| <i>LAN</i>         | <i>Lokales Netzwerk</i>                                      |
| <i>MFATAG05</i>    | <i>Bezeichnung der Ultraschallsensoren</i>                   |
| <i>MKQ</i>         | <i>Methode der kleinsten Fehlerquadrate</i>                  |
| <i>NI</i>          | <i>National Instruments</i>                                  |
| <i>PEEK</i>        | <i>Polyetheretherketon</i>                                   |
| <i>RIMO</i>        | <i>Risonic Modular; verwendetes Messgerät</i>                |
| <i>V/W/Z</i>       | <i>Messanordnungen</i>                                       |

# 1. Einleitung

Der Durchfluss (oder auch Volumenstrom)  $Q$  eines strömenden Fluids ist ein bedeutender Messparameter, nicht nur in der Energietechnik, sondern auch in vielen anderen Industriezweigen. Durch die individuellen Anforderungen in den jeweiligen Branchen haben sich im Laufe der Zeit sehr viele unterschiedliche Messverfahren zur Ermittlung dieser Größe entwickelt. Dabei ist die geeignete Wahl der Messmethode in jedem speziellen Anwendungsfall zu überprüfen. Wobei laut [1] wichtige Einflussgrößen bei der Entscheidung sind:

- Grenzen durch die Gegebenheiten bei der jeweiligen Messstelle.
- Kosten für die Installation und Durchführung der Messung.
- Eigenschaften des strömenden Fluids.
- Limitierungen durch den Betrieb bei der Messung.

## 1.1. Grundlegende Zusammenhänge

Per Definition ist der Durchfluss das pro Zeiteinheit  $\Delta t$  durch einen definierten Querschnitt tretende Volumen  $\Delta V$ .

$$Q = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (1.1)$$

Es besteht die Möglichkeit den Durchfluss direkt über die Volumendifferenz während einer definierten Zeit zu messen. Dies kann zum Beispiel über Messbehälter, oder rotierende Verdränger geschehen. In dieser Arbeit wird eine andere Messmethode verwendet, welche den Durchfluss aus dem Geschwindigkeitsfeld im durchströmten Querschnitt bestimmt. Der einfachste Ansatz dabei wäre durch die Annahme, dass eine konstante Geschwindigkeit  $U_{konst}$  im durchströmten Querschnitt  $A$  herrscht. Dies lässt sich wie folgt beschreiben:

$$Q = U_{konst} \cdot A \quad (1.2)$$

Darin wird allerdings der Fehler gemacht, dass die Geschwindigkeitsverteilung im durchströmten Querschnitt keinesfalls konstant sein muss. Dies bestätigt alleine die Haftbedingung an den Wänden. Außerdem ist für die Bestimmung des Durchflusses nur der Geschwindigkeitsanteil welcher normal auf die durchströmte Fläche steht entscheidend, was eine genauere Formulierung durch die Gleichung 1.3 ergibt.



$$Q = - \int_A \vec{u} \cdot \vec{n} \, dA \quad (1.3)$$

Hierin haben die physikalischen Größen folgende Bedeutung:

|  |           |
|--|-----------|
| $Q = \text{Durchfluss}$                                  | $[m^3/s]$ |
| $A = \text{Querschnittsfläche}$                          | $[m^2]$   |
| $\vec{u} = \text{Geschwindigkeitsvektor}$                | $[m/s]$   |
| $\vec{n} = \text{Normalenvektor auf Querschnittsfläche}$ | $[-]$     |

Daraus resultiert, dass der Durchfluss aus der jeweiligen Strömungsgeschwindigkeit in die Normalenrichtung projiziert, über einen definierten Querschnitt aufintegriert, berechnet werden kann. Es muss also die durchströmte Querschnittsfläche und die darin auftretende Geschwindigkeitsverteilung bekannt sein, um den Durchfluss exakt bestimmen zu können. Das negative Vorzeichen vor dem Integral kommt aus der Betrachtung eines Kontrollvolumens, bei dem ein zuströmendes Fluid positiv und ein abströmendes Fluid negativ bewertet wird. Dies resultiert aus der Annahme, dass der Normalenvektor aus dem Volumen heraus gerichtet ist. An dieser Stelle soll nun immer ein zuströmender Durchfluss, also entgegen der Normalenrichtung, angenommen werden. Eine genauere Herleitung dieser Zusammenhänge sind in [2] zu finden über die Definition der Divergenz eines Vektorfeldes. In der Abbildung 1.1 ist dieser Zusammenhang dargestellt.

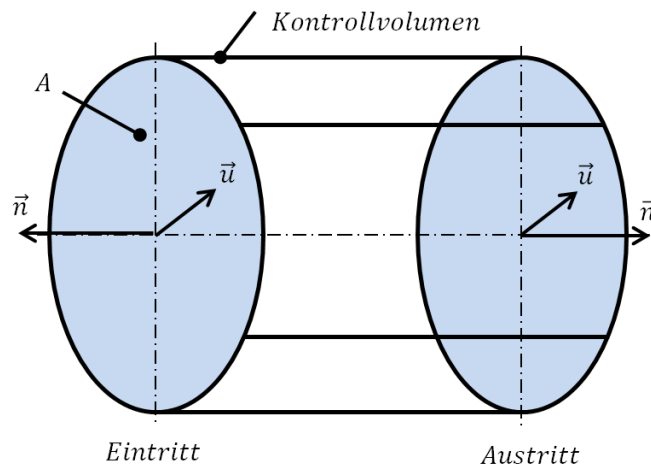


Abbildung 1.1.: Definition durchströmter Querschnitt, Kontrollvolumen, beziehungsweise Normal- und Geschwindigkeitsvektor zur Bestimmung des Durchflusses.

Die Ermittlung des Durchflusses über diesen Ansatz hat den Hintergrund, dass bei der verwendeten Messmethode Zeitdifferenzen und daraus Geschwindigkeiten an verschiedenen Rohrpositionen gemessen werden. Es wird im Kapitel 8 genauer diskutiert, wie man die Integration einer nicht immer bekannten Geschwindigkeitsverteilung, durch approximative Verfahren beschreiben kann. Andere Verfahren zur Messung des Durchflusses mit definierten Volumen, oder durch induktive Methoden sind im Kapitel 5 beschrieben.

### 1.1.1. Durchflussmessung in der Wasserkraft

Um die hydraulische Leistung einer Anlage zu ermitteln, muss meist der Durchfluss bestimmt werden. Diese ist für die Betreiber von großer Bedeutung, um ein Verhältnis zwischen mechanischer  $P_{mech}$  und hydraulischer  $P_{hydr}$  Leistung ermitteln zu können, was allgemein als hydraulischer Wirkungsgrad  $\eta_H$  bekannt ist. Siehe dazu Gleichung 1.4 für eine Turbine und 1.5 für eine Pumpe [3].

$$\eta_{HTurbine} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{P_{mech}}{P_{hydr}} = \frac{M\omega}{\rho gQH} \quad (1.4)$$

$$\eta_{HPumpe} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{P_{hydr}}{P_{mech}} = \frac{\rho gQH}{M\omega} \quad (1.5)$$

Darin bedeutet:

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| $\rho = \text{Dichte des Mediums}$  | $[kg/m^3]$ |
| $g = \text{Erdbeschleunigung}$      | $[m/s^2]$  |
| $Q = \text{Durchfluss}$             | $[m^3/s]$  |
| $H = \text{Förder- / Fallhöhe}$     | $[m]$      |
| $M = \text{Drehmoment}$             | $[Nm]$     |
| $\omega = \text{Kreisfrequenz}$     | $[1/s]$    |
| $n = \omega/2\pi = \text{Drehzahl}$ | $[1/s]$    |

In hydraulischen Kraftwerken sind Lastwechsel keine Seltenheit. Um dabei einen möglichst günstigen Betriebsbereich der Maschine zu gewährleisten, werden die oben angeführten Größen überwacht und aufgezeichnet. Ein weiterer Punkt ist die Kontrolle von Leckagen durch eine Durchflussmessung, was auch für die Lebensmittel- oder Chemieindustrie von Interesse ist.

### 1.1.2. Akustische Durchflussmessung

Die am Institut verwendete Messmethode zur Bestimmung des Durchflusses arbeitet nach dem Prinzip der Laufzeitdifferenzen und ist ein sogenanntes „Clamp-On“<sup>1</sup> Verfahren. Die Motivation dieses Messsystem zu verwenden ist im Folgenden aufgelistet:

- Messung ohne Veränderung der Messstelle, da die Sensoren von außen angebracht werden.
- Keine Strömungsbeeinflussung, wie es bei innen liegenden Sensoren der Fall ist.
- Messung ohne den Betrieb der Anlage zu unterbrechen, was Zeit und Kosten spart.
- Anwendungsbereich mit Rohrdurchmessern zwischen zirka 0,02 - 10 m.

---

<sup>1</sup> Der Begriff „Clamp-On“ steht in diesem Zusammenhang für die Verwendung von Sensoren welche von außen an die zu messende Stelle einer Leitung angebracht werden.

- Nicht-invasive Messung von aggressiven und korrosiven Medien.
- Geringe Dämpfung von Ultraschallwellen im Vergleich zu elektromagnetischen Wellen im Wasser [4].

Allgemein sind diese Verfahren unter dem Namen akustische Durchflussmessung (ADM), oder Ultraschall Durchflussmessung bekannt und beinhalten die Messung nach zwei verschiedenen physikalischen Grundprinzipien. Dem Mitnahme-Effekt (meist Laufzeitdifferenzen) und dem Doppler-Effekt. Diese werden in Kapitel 2 beschrieben.

Um eine Vorstellung für die angewendete Ultraschall Durchflussmessung zu bekommen, sei hier einleitend vereinfacht erklärt, wie diese aussieht. Man unterscheidet bei der ADM von ein- und mehrpfadigen Anwendungen. Dabei sind die jeweiligen Schallpfade zwischen den Sensoren gemeint welche miteinander kommunizieren. Mehrpfadige Anordnungen sind in ihrer Anschaffung teurer und auch in der Montage sowie Anwendung komplexer. Allerdings werden sie benötigt, um das Strömungsprofil genauer aufzulösen und somit den Durchfluss exakter zu bestimmen. Ein Beispiel für solche Messanordnungen ist in Abbildung 1.2 ersichtlich. Darin ist erkennbar, dass es durchaus sinnvoll sein kann die akustischen Pfade in verschiedenen Messebenen, beziehungsweise exzentrisch anzuordnen.

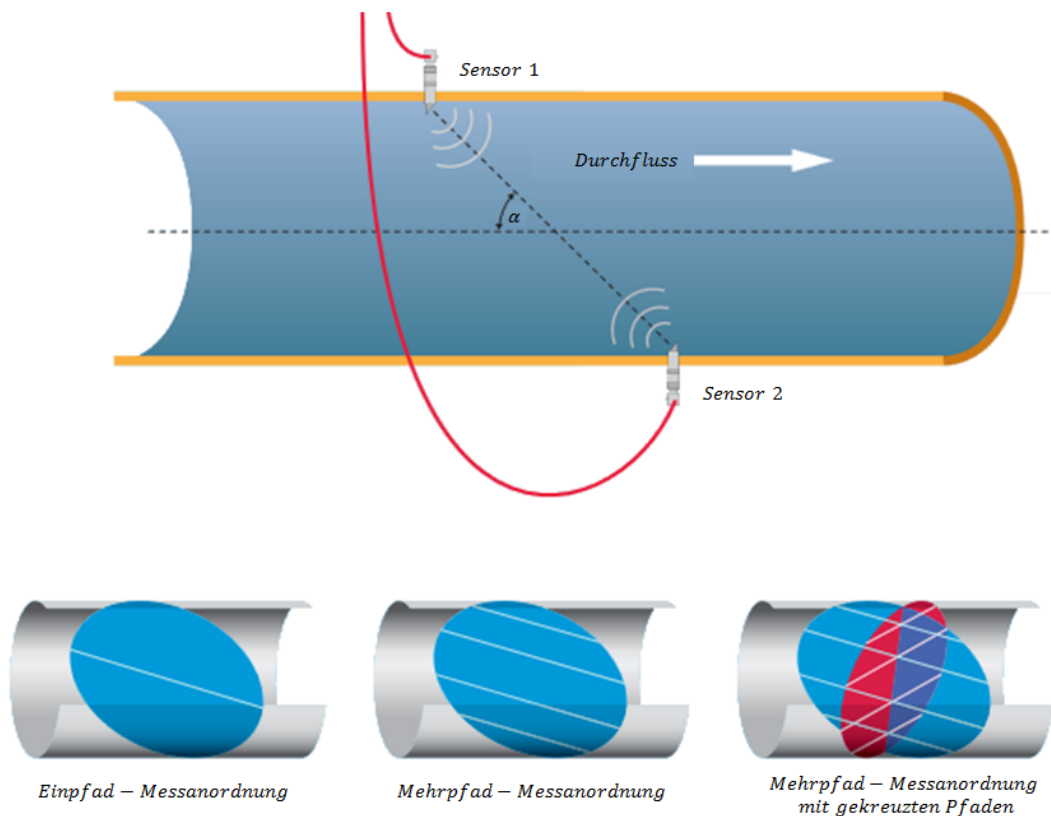


Abbildung 1.2.: Verschiedene Anordnungen von Messpfaden bei der ADM [5].

## 1.2. Aufgabenstellung

Es soll die Inbetriebnahme des Durchflussmessgerätes im Labor erfolgen und durch die gesammelten Erfahrungen eine Anleitung verfasst werden. Anschließend sind Messungen mit dem Clamp-On Messgerät unter geregelten Randbedingungen durchzuführen, und die Resultate dieser mit geeigneten Vergleichsmessungen zu validieren und über eine Auswertesoftware darzustellen. Darauf aufbauend hat eine Fehlerbetrachtung der Messungen zu erfolgen, um Fehlerschranken und Systematiken der Ergebnisse angeben zu können. In einer Kraftwerksmessung soll das Messgerät unter anderen Rahmenbedingungen getestet werden. Abschließend werden Verbesserungspotenziale angegeben, die die Genauigkeiten beim Messen mit den Ultraschallsensoren steigern und die Anwendung erleichtern.

## 1.3. Vorgehensweise

Im Verlauf der Arbeit wird aufbauend auf den theoretischen Grundlagen eine erste Vergleichsmessung des Durchflusses im Labor des Institutes für hydraulische Strömungsmaschinen durchgeführt. Um die Ergebnisse auf Basis der ADM einschätzen zu können bestimmt man zusätzlich den Durchfluss mit einer magnetisch induktiven Durchflussmessung (MID oder IDM), welche am Institut vorhanden ist. Diese wurde durch ein Messvolumen kalibriert. Die Grundlagen für diese Messmethoden sind in Kapitel 5.1.1 und Kapitel 5.1.2 beschrieben. Ein weiterer Aufgabenpunkt ist die Datenakquirierung mit dem Programm *LabVIEW v2012* von *National Instruments*. Anhand von einem einfachen Modell werden erste Ergebnisse und Erkenntnisse erarbeitet und für weitere genauere Messungen angewendet. Die Visualisierung und Speicherung der brauchbaren Daten soll möglichst einfach und übersichtlich durchführbar sein. Im nächsten Schritt erfolgt mit dem Programm *Matlab* eine Auswertung sowie Darstellung dieser. Es können zur Überprüfung der Messwerte Regressionen, Fehleranalysen und eine Korrektur der Ergebnisse durchgeführt werden. Neben den Messungen am Institut ist auch eine Kraftwerksmessung vorgesehen. Diese soll den Umgang mit dem portablen Messsystem im Feld testen und zusätzlich fließen die daraus gewonnen Erfahrungen in die Betriebsanleitung mit ein. Des weiteren erfolgt eine Fehlerbetrachtung zur ADM, mit welcher man die Qualität der Messung erhöhen kann. Dabei wird auf die wichtigsten Einflussfaktoren bei dieser hingewiesen und Größenordnungen diskutiert. Dies ist in Abschnitt 6 erklärt. Im Kapitel 8 sind Verbesserungspotenziale bei der akustischen Durchflussmessung erwähnt. Diese können in Zukunft zur Steigerung der Güte bei Messungen angewendet werden. Abschließend sind im Abschnitt 9 die gewonnenen Erfahrungen zusammenfassend betrachtet und es wird ein Ausblick für weiterführende Forschung in diesem Gebiet gegeben. Außerdem wird im Appendix A eine genaue Vorgehensweise zur Inbetriebnahme des am Instituts verwendeten Clamp-On-Verfahrens gegeben, welche eine spätere Anwendung erleichtern soll. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass diese Anleitung nur für das am Institut verwendete Messgerät gültig ist.

## 2. Grundlagen der akustischen Durchflussmessung

Akustische Sensoren senden aktiv eine Schallwelle durch das zu messende Medium. Als Schallwellen werden Druck- und Dichteschwankungen bezeichnet die sich im Medium mit einer charakteristischen Geschwindigkeit ausbreiten. Diese Geschwindigkeit bezeichnet man als Schallgeschwindigkeit  $c$ . Dabei gibt es wie einleitend erwähnt zwei unterschiedliche Prinzipien wie eine Messung erfolgen kann. Das Erste ist der Mitnahme-Effekt (meist Laufzeitdifferenzverfahren) welcher darauf beruht, dass sich Schallwellen in Strömungsrichtung schneller ausbreiten als entgegen dieser. Dabei kann man die Strömung überlagert mit der aktiv ausgesendeten Schallwelle betrachten, wobei sich die Information stromabwärts addiert und stromaufwärts wird die Schallgeschwindigkeit um die lokale projizierte Strömungsgeschwindigkeit vermindert. In der Abbildung 2.1 ist dieses Verfahren anhand von einem Pfad dargestellt.

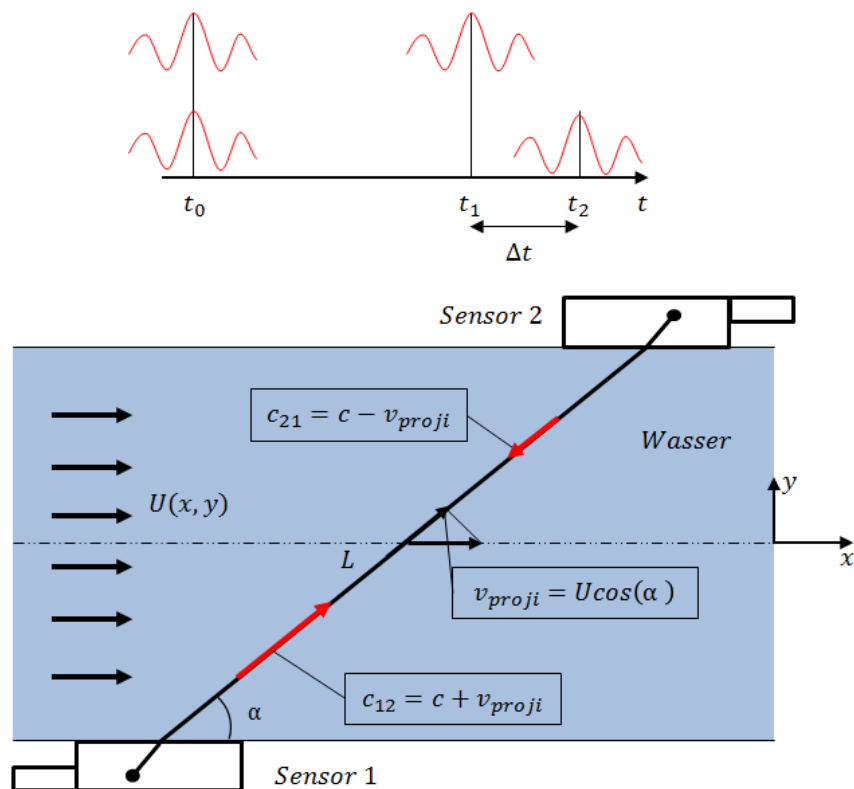


Abbildung 2.1.: Laufzeitdifferenzmethode einer einpfadigen ADM [6].

Analog kann man sich als Beispiel ein Motorboot vorstellen, welches auf einem Fluss schwimmt. Dieses kommt stromabwärts schneller voran als stromaufwärts, auch wenn es immer den gleichen Vortrieb durch den Motor erzeugt. Dies liegt daran, dass sich die Geschwindigkeit des Bootes mit der Strömungsgeschwindigkeit des Flusses überlagert. Dabei soll der Fluss die Strömung im zu messenden Medium und das Motorboot das ausgesendete Signal sein.

Der beschriebene Zusammenhang kann über die in den Gleichungen 2.1 und 2.2 dargestellten Formeln beschrieben werden.

$$c_{12} = c + v_{proj} \quad (2.1)$$

$$c_{21} = c - v_{proj} \quad (2.2)$$

Darin bedeutet  $c_{12}$  die überlagerte Geschwindigkeit vom Sensor 1 zum Sensor 2 und umgekehrt für  $c_{21}$ .

Im Gegensatz dazu nützt das zweite Prinzip den Doppler-Effekt, welcher die Strömungsgeschwindigkeit über die Reflexion beziehungsweise Streuung des Ultraschalls an Teilchen im Fluid ermittelt. Bei der Reflexion entsteht eine Frequenzverschiebung die dann indirekt ein Maß für die Geschwindigkeit ist. Weiterführende Informationen sind in [4] und [7] zu finden.

## 2.1. Messung nach dem Doppler-Effekt

Beim Ultraschall Doppler-Verfahren macht man sich den Effekt zu Nutzen, dass Partikel die im fließenden Medium mit transportiert werden den Schall reflektieren und streuen. Dabei wird angenommen, dass sich die Teilchen im Mittel wie die Strömung bewegen und somit durch diese auf die Strömungsgeschwindigkeit geschlossen werden kann. Der Ultraschallwandler empfängt die an den mit transportierten Teilchen reflektierten Schallwellen mit einer anderen Frequenz, als er sie ausgesendet hat. Das heißt, die Messgröße ist in diesem Fall eine Frequenz und keine Zeit, welche anschließend auf die Geschwindigkeit umgerechnet wird. Das Messprinzip ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

### 2.1.1. Mathematische Beschreibung

Ausgangspunkt ist eine ruhende Schallquelle, welche gleichzeitig auch wieder der Empfänger ist. Der Sensor schickt ein Signal in das Medium, welches sich mit der Geschwindigkeit  $v_{proj}$  bewegt. Es kommt deshalb wieder  $v_{proj}$  zum Einsatz weil der Sensor nicht in Strömungsrichtung sondern unter einem bestimmten Winkel sendet. Da die Quelle ruht gilt der Ansatz, dass die Wellenlänge zwischen gesendetem ( $\lambda_S$ ) und reflektiertem ( $\lambda_R$ ) Signal gleich bleibt. [4]. Mit der Gleichung 2.3 folgt dann durch Einsetzen von 2.4 und 2.5 das Ergebnis.

$$\lambda_S = \lambda_R \quad (2.3)$$

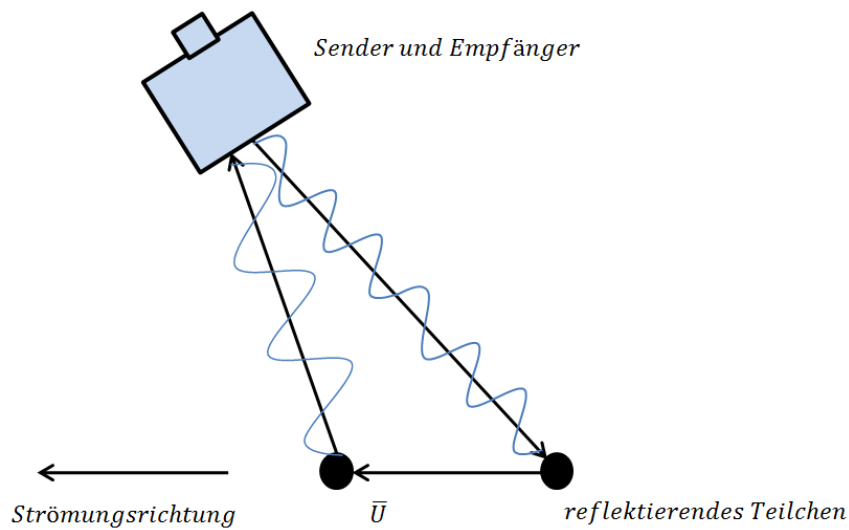


Abbildung 2.2.: Doppler-Verfahren zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit [8].

Erzeugtes Wellenfeld:

$$\lambda_S = \frac{c}{f_S} \quad (2.4)$$

Der Empfänger sieht das selbe Wellenfeld, nur dass sich die effektive Ausbreitungsgeschwindigkeit ändert und damit die Frequenz.

$$\lambda_R = \frac{c + v_{proj}}{f_R} \quad (2.5)$$

Also formuliert sich die reflektierte Frequenz  $f_R$  zu:

$$\frac{c}{f_S} = \frac{c + v_{proj}}{f_R} \quad (2.6)$$

$$f_R = f_S \left(1 \pm \frac{v_{proj}}{c}\right) \quad (2.7)$$

Hierin gilt „+“ für eine Bewegung zum und „-“ für eine Entfernung vom Sensor. Allerdings folgt diese Beziehung aus der Annahme, dass ein ruhender Sender auf einen bewegten Empfänger sendet, also durchquert das Signal die Messstrecke nur einmal. Das Ergebnis muss noch um den Faktor 2 bei  $v_{proj}$  erhöht werden, da sich der Sender und der Empfänger an der gleichen Stelle befinden und das Signal von einem reflektierenden Teilchen zurück geworfen wird. Also gilt, dass sich der Reflektor durch das Wellenfeld bewegt während er reflektiert. Es treten also zwei Effekte auf:

1. Bewegung des Reflektors
2. Reflexion während dieser Bewegung

Man spricht hierbei auch vom sogenannten Sonarprinzip was zur Ortung eingesetzt wird [4]. Das beschriebene Verfahren ist in Abbildung 2.3 beschrieben.

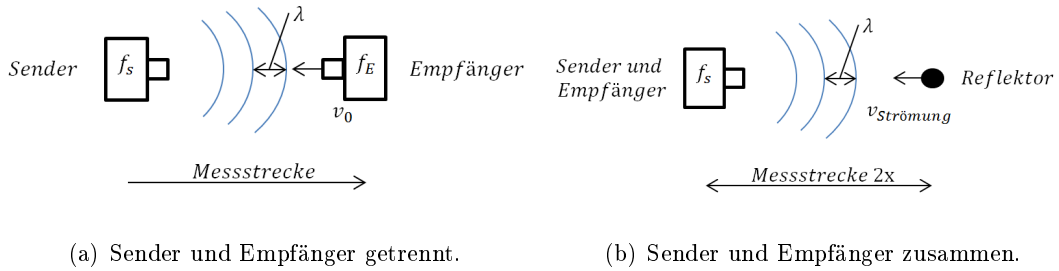


Abbildung 2.3.: Unterschied zwischen getrenntem (a) und gemeinsamen (b) Sender und Empfänger.

Durch die Subtraktion von  $f_S$  und  $f_R$  ergibt sich die Differenz in der Frequenz  $\Delta f$  zur Gleichung 2.8.

$$\Delta f = f_R - f_S = \pm f_S \frac{2v_{\text{proj}}}{c} \quad (2.8)$$

Wenn darin auf die projizierte Geschwindigkeit umgeformt wird und man anschließend die Beziehung  $v_{\text{proj}} = U/\cos(\alpha)$  für die Strömungsgeschwindigkeit anwendet, folgt Gleichung 2.9.

$$\bar{U} = \pm \frac{f_S}{\Delta f} \left( \frac{c}{2\cos(\alpha)} \right) \quad (2.9)$$

Im letzten Schritt berechnet sich der Durchfluss  $Q$  (Gleichung 2.10) aus der axialen Strömungsgeschwindigkeit  $U$  und der durchströmten Fläche  $A$ .

$$Q = \bar{U} \cdot A \quad (2.10)$$

Dieser Zusammenhang resultiert aus der Annahme, dass die Geschwindigkeit im ganzen Querschnitt konstant ist, was natürlich nicht korrekt ist. Im Kapitel 2.2.2 sind Verbesserungsmöglichkeiten bei der Bestimmung des Durchflusses angegeben. Wichtig ist außerdem noch der Hinweis, dass nur die Geschwindigkeit eines einzelnen Partikels und nicht die der ganzen Strömung gemessen wird. An welchem Partikel das Signal in der Strömung reflektiert ist nicht wirklich beeinflussbar und daher ein stochastischer Vorgang.

Da bei der Messung nach dem Doppler-Effekt keine Richtungsbestimmung erfolgt, kann sich einer zusätzlichen elektronischen Schaltung beholfen werden, die diese ermittelt. Diese Schaltung und das genaue Vorgehen ist in [9] beschrieben.



## 2.2. Messung nach dem Laufzeitdifferenzverfahren

Bei dem Laufzeitdifferenzverfahren wird durch die Überlagerung der Strömungsgeschwindigkeit mit einem Ultraschallsignal eine Laufzeitdifferenz bestimmt, mit welcher dann auf die mittlere Pfadgeschwindigkeit geschlossen werden kann. Dabei müssen die Sensoren in Strömungsrichtung versetzt an der Leitung, oder im Kanal angebracht sein. Ohne einen Versatz der Sensoren in Strömungsrichtung könnte man keine Zeitdifferenz bei der Übertragung des Signales ermitteln. Es werden immer zwei Sensoren für einen akustischen Pfad benötigt, welche beide als Sender und Empfänger arbeiten. Der einzige Unterschied liegt darin, dass der Sensor stromabwärts eine Ultraschallwelle in Strömungsrichtung sendet und somit eine kürzere Zeit für das Durchdringen der Strömung benötigt als der Sensor stromaufwärts. Eine Messung mittels Laufzeitdifferenz kann man sich sehr stark vereinfacht in den folgenden Schritten vorstellen.

1. Sensor 1 sendet ein Ultraschall Signal. Dieses breitet sich mit der Geschwindigkeit  $c_{12}$  durch das Medium aus und trifft auf den Sensor 2.
2. Sensor 2 sendet ein Signal zum Sensor 1 zurück, welches sich mit der Geschwindigkeit  $c_{21}$  ausbreitet. Da beide Signale die gleiche Distanz mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten zurück legen, muss sich eine Zeitdifferenz ergeben. Man spricht deshalb auch von einer Messung nach der Laufzeitdifferenzmethode.
3. Über diese Laufzeitunterschiede kann in weiterer Folge auf eine entlang eines Messpfades gemittelte Strömungsgeschwindigkeit  $v_{proj}$  zurück geschlossen werden.

Wichtig ist darauf hinzuweisen, dass bei diesem Messprinzip die Strömung an zwei unterschiedlichen Zeitpunkten vermessen wird. Dadurch kommt es bei nicht turbulenten Strömungen zu einer Verfälschung der Messung, da nicht der idente Strömungszustand vermessen werden kann. Ein Beispiel wie das Ultraschallsignal mit und ohne Strömung aussehen kann ist in Abbildung 2.4 zu finden.

### 2.2.1. Mathematische Bestimmung der gemittelten Pfadgeschwindigkeit

Um ein Verständnis für die Funktion der ADM zu bekommen werden in diesem Abschnitt die mathematischen Hintergründe erläutert, einmal für reine Axialströmung  $U$ , sowie auch für Störeinflüsse wie zum Beispiel eine Querströmung  $W$ . Dieser Zusammenhang ist in der Abbildung 2.5 dargestellt.

#### Reine Axialströmung

Es erfolgt die Herleitung bei rein axialer Strömung ( $W = 0$ ). Dazu wird die Strömungsgeschwindigkeit in den akustischen Pfad projiziert, was im folgenden mit  $v_{proj}$  benannt werden soll. Die Zeit die eine Signal von der Sonde 1 zur Sonde 2 benötigt ist durch die Formel 2.11 bestimmt. Dies ist nichts anderes als die zurückgelegte Strecke  $L$  bezogen auf die Geschwindigkeit. In diesem Fall die Schallgeschwindigkeit  $c$  addiert mit der projizierten Strömungsgeschwindigkeit  $v_{proj}$ .

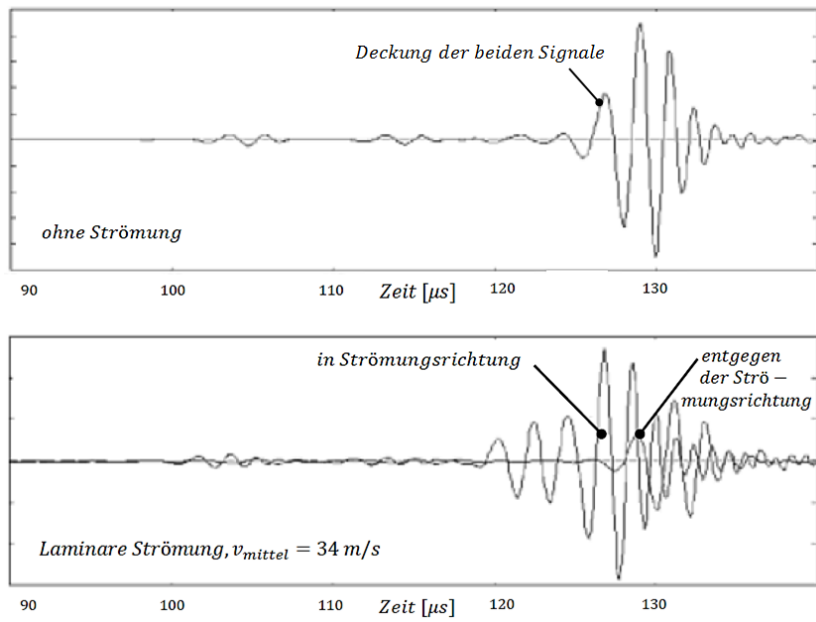


Abbildung 2.4.: Signale am Wandler, durch eine Finite-Elemente-Simulation sichtbar gemacht. [4]

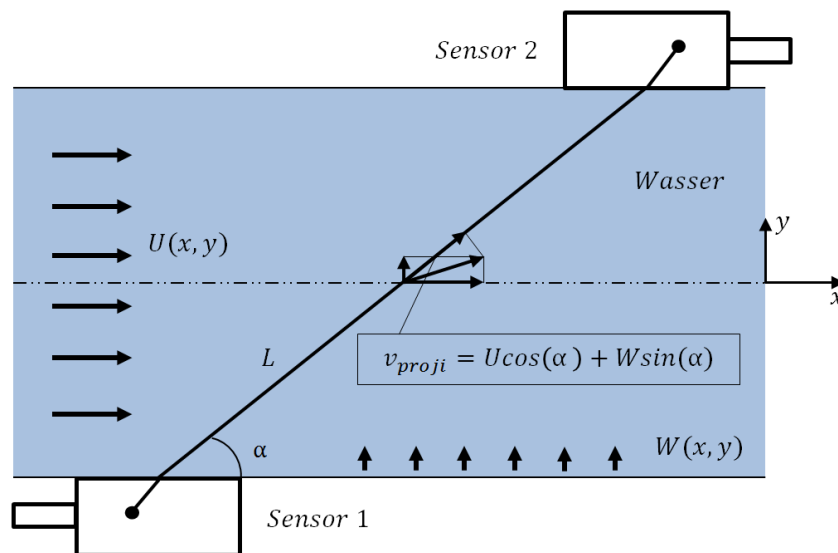


Abbildung 2.5.: Mathematische Formulierung der Strömungsverhältnisse für die Laufzeitdifferenzmethode [8].

$$t_{12} = \frac{L}{c + v_{proj\dot{i}}} \quad (2.11)$$

Das Signal welches sich vom Sensor 2 zum Sensor 1 ausbreitet, ist aus der Schallgeschwindigkeit  $c$ , von welcher die projizierter Strömungsgeschwindigkeit  $v_{proj\dot{i}}$  abgezogen wird, zu berechnen.

$$t_{21} = \frac{L}{c - v_{proj\dot{i}}} \quad (2.12)$$

Wenn man Gleichung 2.11 und 2.12 auf  $v_{proj\dot{i}}$  umschreibt und anschließend addiert ergibt sich eine von der Schallgeschwindigkeit unabhängige Formulierung für die Strömungsgeschwindigkeit.

$$v_{proj\dot{i}} = \frac{L}{2} \cdot \left( \frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right) \quad (2.13)$$

Dies kann von Vorteil sein, weil die genaue Schallgeschwindigkeit oft sehr schwierig zu ermitteln ist. Weiter soll der besprochene Zusammenhang kurz diskutiert werden.

### Bestimmung der Schallgeschwindigkeit

Bildet man die Zeitdifferenz zwischen 2.11 und 2.12 durch Subtraktion, ergibt sich Gleichung 2.14

$$\Delta t = \frac{2Lv_{proj\dot{i}}}{c^2 - v_{proj\dot{i}}^2} \approx \frac{2Lv_{proj\dot{i}}}{c^2} \quad (2.14)$$

Hierbei wird oft  $v_{proj\dot{i}}^2$  vernachlässigt weil man annimmt, dass  $c^2$  viel größer als  $v_{proj\dot{i}}^2$  ist. Stellt man diese Gleichung um, so kann wieder aus der Zeitdifferenz und der Schallgeschwindigkeit die projizierte Geschwindigkeit  $v_{proj\dot{i}}^2$  berechnet werden. Hier soll aber eine andere Methode zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit gewählt werden, um diesen Fehler durch die Vernachlässigung nicht zu machen. Ausgangspunkt sind die Gleichungen für die projizierte Geschwindigkeit  $v_{proj\dot{i}}$ , was nichts anderes als die Umformulierung von Gleichung 2.11 und 2.12 ist.

$$v_{proj\dot{i}} = \frac{L}{t_{12}} - c \quad (2.15)$$

$$v_{proj\dot{i}} = -\frac{L}{t_{21}} + c \quad (2.16)$$

Es ergibt sich durch die Subtraktion von Gleichung 2.15 und 2.16 die Formel zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit, was für die Messung eine sinnvolle Zusatzinformation sein kann.

$$c = \frac{L}{2} \cdot \left( \frac{1}{t_{12}} + \frac{1}{t_{21}} \right) \quad (2.17)$$

Aus der oben angeführten Herleitung folgt für die projizierte Strömungsgeschwindigkeit  $v_{proj}$ , dann weiter der Schluss auf die axiale gemittelte Geschwindigkeit  $\bar{U}$ , welche repräsentativ für den Durchfluss steht. Dies kann mit der Formel 2.18 beschrieben werden.

$$v_{proj} = \bar{U} \cdot \cos(\alpha) \quad (2.18)$$

Der genaue Zusammenhang zwischen dem Durchfluss und der gemessenen axialen Geschwindigkeit  $\bar{U}$ , welche nur entlang eines Pfades ermittelt wurde, wird in Kapitel 2.2.2 beschrieben. Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass die mit den Sensoren 1 und 2 gemessene Geschwindigkeit entlang des Pfades gemittelt und auch nur an der Position an der die Sensoren installiert sind, bestimmt wird. Daher ist es nicht trivial von dieser stark vereinfachten Information auf ein ganzes Strömungsprofil zu schließen, was für die Bestimmung des Durchflusses erforderlich ist. Ein vermeintliche Schwäche des Verfahrens, nämlich die Mittlung über einen Pfad, kann bei genauerer Betrachtung aber auch Vorteile mit sich bringen. Dies lässt sich damit begründen, dass bei turbulenten Strömungen zumindest über die ganze akustische Pfadlänge gemittelt wird und nicht wie beim Doppler-Verfahren ein punktuell bestimmtes Teilchen repräsentativ für den Durchfluss in diesem Moment steht.

### Überlagerung mit einer Querströmung

Es sollen die oben angeführte Berechnung, durch eine Strömung quer  $W$  zur eigentlichen Fließrichtung  $U$  erweitert werden.

$$v_{proj} = U \cdot \cos(\alpha) + W \cdot \sin(\alpha) \quad (2.19)$$

Diese Betrachtung ist wichtig, weil eine ganz andere axiale Geschwindigkeit  $U$  aus der projizierten Geschwindigkeit  $v_{proj}$  berechnet wird. Man kann durch umformen von Formel 2.19 auf  $U$  und einsetzen der projizierten Geschwindigkeit  $v_{proj}$  aus der Formel 2.13 zu folgender Gleichung gelangen.

$$U = \frac{L}{2 \cdot \cos(\alpha)} \cdot \left( \frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right) - W \cdot \tan(\alpha) \quad (2.20)$$

In weiterer Folge wird eine Anordnung von zusätzlich zwei Sensoren, gekreuzt zu den ersten beiden, betrachtet. Dies ist sinnvoll, weil man so die Möglichkeit hat, die Querströmungseinflüsse zu verringern, oder gar ganz zu eliminieren. Geht man davon aus, dass sich  $W$  im gesamten Querschnitt konstant verhält, so kann folgender Ansatz für gekreuzte Pfade  $A$  und  $B$  gemacht werden, sofern diese unter dem selben Winkel  $\alpha$  zur Strömungsrichtung positioniert sind.

$$v_{proj i A} = U \cdot \cos(\alpha) + W \cdot \sin(\alpha) \quad (2.21)$$

$$v_{proj i B} = U \cdot \cos(\alpha) - W \cdot \sin(\alpha) \quad (2.22)$$

Es ergibt sich wieder mit dem selben Vorgehen wie bei Gleichung 2.18 und der Addition von 2.23 und 2.24

$$U = \frac{L}{2 \cdot \cos(\alpha)} \cdot \left( \frac{1}{t_{12A}} - \frac{1}{t_{21A}} \right) - W \cdot \tan(\alpha) \quad (2.23)$$

$$U = \frac{L}{2 \cdot \cos(\alpha)} \cdot \left( \frac{1}{t_{12B}} - \frac{1}{t_{21B}} \right) + W \cdot \tan(\alpha) \quad (2.24)$$

die nachstehende Bedingung für die axiale Strömungsgeschwindigkeit.

$$U = \frac{L}{4 \cdot \cos(\alpha)} \cdot \left( \frac{1}{t_{12A}} - \frac{1}{t_{21A}} + \frac{1}{t_{12B}} - \frac{1}{t_{21B}} \right) \quad (2.25)$$

Diese Formel ist wieder bereinigt von der Querströmung  $W$  und somit schließt man einfach von den gemessenen Laufzeiten, beziehungsweise den projizierten Geschwindigkeiten, auf die axiale Strömungsgeschwindigkeit.

Außerdem lässt die Formulierung mit gekreuzten Pfaden auch den Schluss auf eine V-Anordnung oder eine W-Anordnung zu, welche in Abbildung 2.6 gegeben sind.

Bei diesen beiden Anordnungen folgt unter der Annahme konstanter Querströmung einmal eine positive Überlagerung von  $U$  und  $W$  beziehungsweise eine negative. Dies ist in Abbildung 2.7 für eine V-Anordnung dargestellt.

Es ist ersichtlich dass über die Länge  $L_1$  entgegen der Querströmung  $W$  gesendet wird, und über  $L_2$  mit dieser. Dadurch ergibt sich unter der gleichen Annahme wie bei den gekreuzten Pfaden, also konstanter Querströmung  $W$ , dass sich der gemessene Durchfluss unabhängig von dieser berechnen lässt. Dies ist in Gleichung 2.29 beschrieben, welche durch Addition von 2.27 und 2.26 folgt. Es sollen andere Vorteile von V- beziehungsweise W-Anordnungen in den nachstehenden Kapiteln diskutiert werden.

$$v_{proj i 1} = U \cdot \cos(\alpha) - W \cdot \sin(\alpha) \quad (2.26)$$

$$v_{proj i 2} = U \cdot \cos(\alpha) + W \cdot \sin(\alpha) \quad (2.27)$$

$$v_{proj i} = \frac{v_{proj i 1} + v_{proj i 2}}{2} \quad (2.28)$$

$$v_{proj i} = \frac{2U \cdot \cos(\alpha)}{2} = U \cdot \cos(\alpha) \quad (2.29)$$

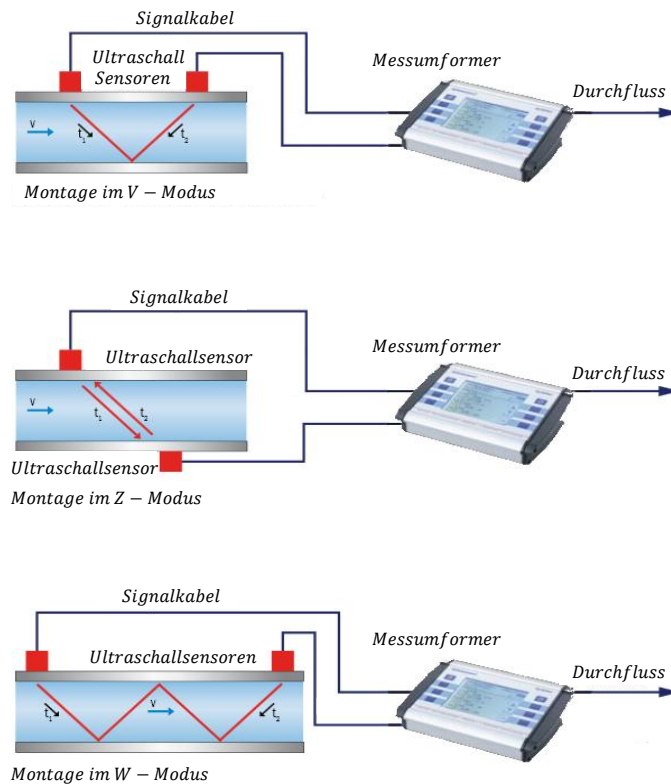


Abbildung 2.6.: Unterschiedliche Pfadanordnungen bei der akustischen Durchflussmessung [6].

### 2.2.2. Bestimmung des Durchflusses

In den vorigen zwei Kapiteln wurden die grundlegenden Zusammenhänge zur Bestimmung der mittleren axialen Strömungsgeschwindigkeit für einen Pfad, beziehungsweise für eine gekreuzte Anordnung, erläutert. Der Durchfluss berechnet sich in weiterer Folge aus der durchströmten Fläche und der axialen Strömungsgeschwindigkeit, wenn keine Berücksichtigung von Gewichtungen oder Geschwindigkeitskorrekturen vorgenommen wird. Weiterführende Berechnungen sind im Kapitel 8.2.1 zu finden.

### 2.2.3. Andere Messverfahren nach dem Mitnahme-Effekt

Es gibt die unterschiedlichsten Möglichkeiten den Mitnahme-Effekt zu nützen, beziehungsweise auszuwerten. Neben der Laufzeitdifferenzmessung kommen noch andere Verfahren zum Einsatz, die hier der Vollständigkeit halber aufgelistet sind. Dabei richtet sich die Aufzählung nach [9].

- Messung nach dem Sing-around-Verfahren
- Messung der Phasendifferenz  $\Delta\phi$

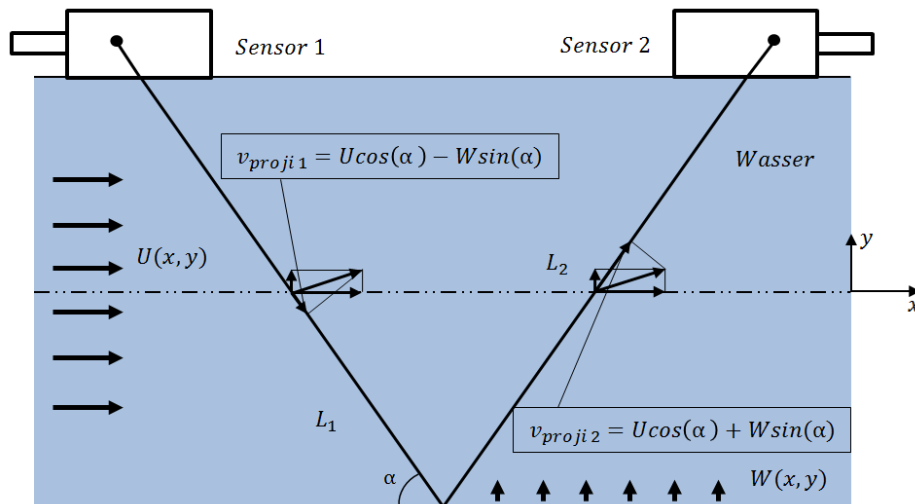


Abbildung 2.7.: Einfluss der Querströmung bei eine V-Anordnung.

- Messung der Frequenzdifferenz  $\Delta f$
- Messung der Strahlablenkung  $\Delta y$

### 2.3. Akustische Sensoren

Beim Empfänger eines akustischen Signales wird eine mechanische in eine elektrische Größe gewandelt. Den umgekehrten Vorgang von einer elektrischen Größe zu einer mechanischen bezeichnet man als Sender eines akustischen Signales, was in der Abbildung 2.8 genauer erklärt ist.

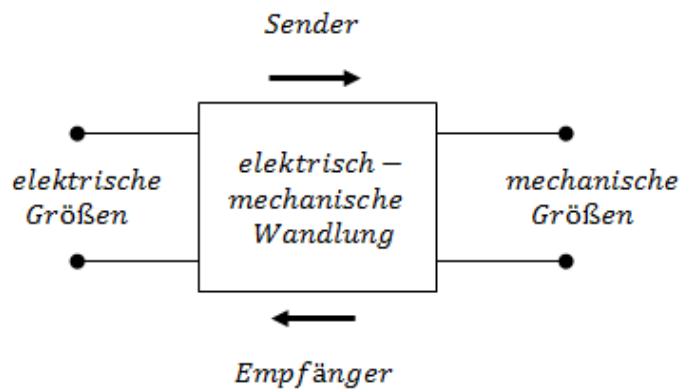


Abbildung 2.8.: Elektroakustischer Wandler. [4]

In diesem Zusammenhang gibt es die Bezeichnung reversibler und nicht reversibler Wandler. Im Fall eines reversiblen Wandlers kann dieser sowohl als Sender, sowie Emp-

fänger arbeiten. Dies ist die verbreitetste Anordnung und auch die am Institut eingesetzten Sensoren arbeiten mit dieser. Im Gegensatz dazu können nicht reversible Wandler stets nur senden oder empfangen. Die mechanisch-elektrische Wandlung und umgekehrt erfolgt in einem mechanischen Schwingssystem welches den piezoelektrischen Effekt nützt. Bei mechanischer Deformation wird eine elektrische Polarisation im jeweiligen Wandlermaterial erzeugt und umgekehrt. Diese Polarisation ist über Elektroden an der Oberfläche des Materials detektierbar. Die Einwirkung einer äußeren Kraft und die daraus resultierende Deformation des Materials ist in der Darstellung 2.9 geben.

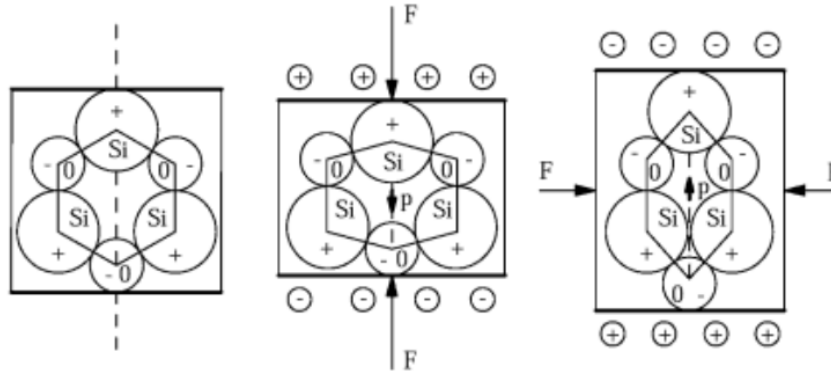


Abbildung 2.9.: Piezoelektrischer Effekt und Erzeugung von longitudinalen und transversalen Wellen. [4]

Darin ist ersichtlich, dass ohne Deformation (links) keine Polarisation auftritt. Bei einer longitudinalen Belastung (Mitte) ergibt sich eine Erzeugung von longitudinalen Wellen. Dies gilt ident für transversale Belastung (rechts). Wobei eine longitudinale Welle immer in Wellenausbreitungsrichtung schwingt und die transversale senkrecht dazu. In der schematischen Darstellung erkennt man die Verschiebungen der Ladungsträger  $Si^+$  und  $O^-$ , welche als Resultat eine Ladungstrennung und damit eine messbare Potentialdifferenz haben. Entscheidend ist der Unterschied zwischen longitudinaler Belastung, bei der die elektrischen und die mechanischen Größen in die selbe Richtung wirken und transversaler Belastung, bei der diese senkrecht aufeinander stehen.

Die verwendeten Sensoren nützen den transversalen Effekt und erzeugen somit ein Signal welches sich mit der Schallgeschwindigkeit in transversaler Richtung ausbreitet. Diese berechnet sich im Vergleich zur longitudinalen Richtung rein aus dem Schubmodul  $G$  und der Dichte  $\rho$ . Es gelten die folgenden zwei Formeln für die Ausbreitungsgeschwindigkeit von longitudinalen 2.30 und transversalen 2.31 Wellen.

$$c_L = \sqrt{\frac{2G(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)}} \quad (2.30)$$

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.31)$$



Es bedeutet also für das Verhältnis der beiden Geschwindigkeiten zueinander, dass nur noch die Querkontraktionszahl  $\nu$  entscheidend ist.

$$\frac{c_L}{c_T} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (2.32)$$

Daraus folgt zum Beispiel für Stahl mit einem Wert von  $\nu = 0,3$  das Verhältnis  $c_L/c_T = 1,9$ . Es ist leicht nachzuvollziehen, dass die longitudinale Welle stets die höchste Ausbreitungsgeschwindigkeit hat wenn man andere Materialien und deren Werte einsetzt.

### **Sendefrequenzen**

Abhängig von der gegebenen Messsituation sollten unterschiedliche Sensoren, beziehungsweise Sendefrequenzen eingesetzt werden. Legt man am Sensor eine Wechselspannung mit einer bestimmten Frequenz an, so resultiert eine Deformation des Materials und dadurch eine ausgesandte Ultraschallwelle mit dieser Frequenz. Bei langen Messstrecken im Wasser werden tiefere Sendefrequenzen als bei kurzen verwendet. Der Grund dafür ist, dass die Detektiergenauigkeit des Messsignales mit steigender Sendefrequenz steigt. Daher sollte bei geringen Pfadlängen eine hohe Frequenz zur genaueren Ermittlung der Laufzeiten gewählt werden. Ein weiterer Einflussfaktor ist die Dämpfung der Wellen im Wasser, was auch von der Sendefrequenz abhängt. Je größer die Frequenz desto größer ist die Dämpfung des Signales, daher wählt man bei großen Pfadlängen geringere Sendefrequenzen. In [10] sind empfohlene Sendefrequenzen bei verschiedenen Messanordnungen angegeben. Die Größenordnungen für Ultraschallsensoren liegen bei 0,2 MHz für Kanäle und 8 MHz für sehr dünne Rohre.

## 3. Richtlinien beim Messen mit akustischen Sensoren

Die in diesem Kapitel zusammengefassten Erkenntnisse richten sich nach der IEC 41 [1] und dabei speziell an den Appendix J zur akustischen Durchflussmessung.

### 3.1. Allgemeine Vorgaben

Es gibt viele Möglichkeiten mit Ultraschall den Durchfluss zu bestimmen. Allerdings ist nur die Messung nach dem Mitnahme-Effekt (meist Laufzeitdifferenzmethode) auch tatsächlich von der IEC 41 für Feldmessungen erlaubt und dabei nur unter bestimmten Bedingungen, beziehungsweise Anordnungen. Das Doppler-Verfahren kann die Genauigkeitsanforderungen nicht erfüllen und ist somit nicht zulässig. Die Gründe dafür sind zum Ersten eine geringe Reproduzierbarkeit, da willkürlich ein reflektierendes Teilchen vermessen wird. Zweitens ist der Schluss von der Geschwindigkeitsinformation dieses reflektierenden Partikels, auf das der gesamten Strömungsverteilung nur sehr begrenzt möglich und somit lässt sich daraus der Durchfluss nur ungenau ermitteln.

In der IEC 41 wird zwischen Messungen in rechteckigen und kreisförmigen Querschnitten unterschieden, wobei hier nur auf runde Profile eingegangen wird. Misst man in Rohrleitungen, so sollte mindestens mit zwei Pfaden gearbeitet werden, um die systematischen Fehlereinflüsse durch Querströmungen zu reduzieren. Außerdem ist es empfehlenswert Sensoren exzentrisch und in mehreren Pfaden anzuordnen, da dies eine genauere Auflösung des Geschwindigkeitsprofils ermöglicht. Es ist zusätzlich wichtig, bei der Messung nach dem Laufzeitdifferenzverfahren das Geschwindigkeitsprofil zu berücksichtigen, da bei der Messung nur über die Pfade gemittelt wird.

Es gibt neben der Messung der Laufzeitdifferenzen auch noch das Sing-around-Verfahren welches zulässig für die Messung mit akustischen Sensoren ist. Dieses wurde einleitend schon erwähnt und arbeitet mit Triggersignalen welche entlang einer fixen Messstrecke ausgesendet und gezählt werden. Genaueres ist in [4] zu finden.

### 3.2. Vorgaben zur Laufzeitdifferenzmessung

Es gelten die in der Einleitung beschriebenen Vorgaben zur Ermittlung der axial gemittelten Strömungsgeschwindigkeit aus den Zeitdifferenzen. Dabei sind Pfadwinkel  $\alpha$  für die Sensoren zwischen  $45^\circ$  und  $75^\circ$  empfohlen.

Ein Kriterium bei der Zeitmessung ist die Verzögerung des zeitlichen Signals im elektrischen Schaltkreis, in den Kabeln und auch in den nicht im Wasser verlaufenden Schallpfaden. Diese müssen berücksichtigt werden und sind im Kapitel 6 zur Messunsicherheit in die Fehlerschranken eingeflossen.

### 3.2.1. Durchflussbestimmung

Laut der IEC 41 ist für die Bestimmung des Durchflusses in Rohren unter der Annahme eines stetigen, differenzierbaren Strömungsprofils der folgende Ansatz für die Bestimmung des Durchflusses  $Q$  vorgeschrieben 3.1.

$$Q = k \cdot 2R^2 \sum_{i=1}^N \bar{U}_i \cdot w_i \quad (3.1)$$

Hierin sind:

|   |           |
|---|-----------|
| $Q = \textit{Durchfluss}$                               | $[m^3/s]$ |
| $k = \textit{Korrekturfaktor bei Gewichtung der Pfade}$ | $[-]$     |
| $R = \textit{Rohrradius}$                               | $[m]$     |
| $\bar{U}_i = \textit{Geschwindigkeit Pfad } i$          | $[m/s]$   |
| $w_i = \textit{Gewichtungsfaktor Pfad } i$              | $[-]$     |

In Abschnitt 8.2.1 ist die genaue Herleitung dieser Formel und die Bestimmung von Gewichtungsfaktoren mit Hilfe der Numerischen Integration erläutert. Dort wird auch beschrieben warum Pfade überhaupt gewichtet werden und wie stark. Außerdem ist erklärt wie man die Sensorposition bei mehrpfadigen Anordnungen bestimmt. Bei der Ermittlung des Durchflusses sollten außerdem mindestens vier Pfade zum Einsatz kommen, um die erwünschten Genauigkeiten zu erreichen.

Der Korrekturfaktor  $k$  hängt von der gewählten Geometrie und dessen Gewichtung ab. Dabei gelten die folgenden Werte:

Tabelle 3.1.: Korrekturfaktoren bei der Messung mit akustischen Sensoren.

|                         | <i>Kreisförmig</i> | <i>Rechteckig</i> |
|-------------------------|--------------------|-------------------|
| <i>Gauss – Jacobi</i>   | $k = 1$            | $k = 1,034$       |
| <i>Gauss – Legendre</i> | $k = 0,994$        | $k = 1$           |

### 3.2.2. Wahl der Messsektion und Installationsbedingungen

Aufgrund der Unrundheit von Rohren ist es empfehlenswert an verschiedenen Rohrpositionen den Durchmesser zu bestimmen. Dabei gilt nach der IEC 41 der in der Abbildung 3.1 vorgeschriebene Vorgang. Es soll dabei unter mindestens fünf gleich großen

Abständen, einer in der Mitte und zwei am Rand der Messanordnung, gemessen werden. Anschließend erfolgt eine Mittelung dieser Werte zu einem im Messsystem verwendeten repräsentativen Wert. Sollten Fehler bei der Anordnung der Sensoren passieren, so sind diese in die Fehleranalyse mit einzubeziehen, oder vorher durch eine Korrektur des Volumenstroms zu berücksichtigen. Bei der Verwendung von innenliegenden Sensoren muss eine Korrektur der Messwerte auf Grund der Strömungsbeeinflussung erfolgen.

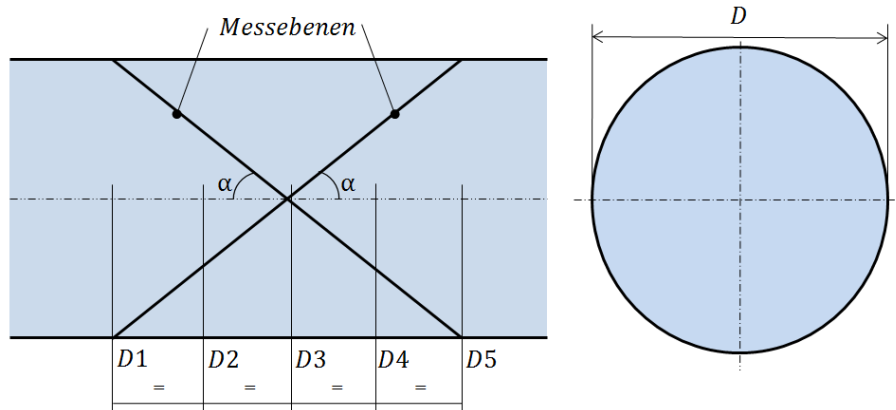


Abbildung 3.1.: Abstände bei der Durchmesserbestimmung nach IEC 41.

Weiter ist der Einbau der Sensoren an Rohrpositionen möglichst weit entfernt von Armaturen, die die Strömung verungleichmäßigen, zu wählen. Dies gilt stromaufwärts, sowie auch stromabwärts. Die genauen Vorgaben für die jeweiligen Messgeräte sind in diesem Fall der Betriebsanleitung zu entnehmen. Allerdings sollte für eine laut der IEC 41 empfohlenen vier-Pfad Anordnung in zwei Ebenen, ein Abstand zur Messsektion von  $10 D$  stromaufwärts und  $3 D$  stromabwärts, zu jeglichen Irregularitäten in der Rohrleitung vorhanden sein. Für eine vier-Pfad Anordnung in einer Ebene werden aus Erfahrung gute Ergebnisse mit dem doppelten Abstand, das heißt  $20 D$  und  $6 D$ , erzielt.

Vor jeder Messung sollte überprüft werden, ob das Messgerät richtig arbeitet. Dabei gilt es die folgenden Punkte zu untersuchen:

- Darstellung der akustischen Pulse
- Interne elektronische Tests des Messprogramms
- Vergleich der aus dem Messgerät bestimmten Wasserschallgeschwindigkeit durch eine Differenzzeitmessung, mit einer Berechnung dieser aus der tatsächlichen Temperatur
- Separate Messung der Geschwindigkeiten in jedem Pfad

### 3.2.3. Anwendung und Grenzen

Um eine ausreichend große Zeitdifferenz bestimmen zu können und keine Probleme mit der Auflösungsgenauigkeit zu bekommen, (Siehe dazu Kapitel 6) ist die Größenordnung der Strömungsgeschwindigkeiten und Rohrdurchmesser zu beachten. Diese sind immer

den speziellen Herstellerangaben zu entnehmen. Die im Kapitel 5 dargestellten Ergebnisse lassen allerdings darauf schließen, dass diese Angaben sehr kritisch zu betrachten sind.

Im Rahmen der IEC 41 Richtlinien ist eine Messung mit einem Messpfad in einer, oder zwei Messebenen nicht zulässig. Es sollten zumindest vier Pfade in einer, beziehungsweise zwei Ebenen gewählt werden.

Luftblasen oder andere Partikel, beziehungsweise externe akustische Wellen beeinflussen die Messungen zusätzlich. Es muss darauf geachtet werden, dass die Anzahl der gültigen, übertragenen Messsignale ausreicht, um eine korrekte Messung durchzuführen.

Für die Fehlerbetrachtung sind die Unsicherheiten bei der Bestimmung der nachstehenden Größen zu berücksichtigen:

- Schallpfadlängen  $L$  und  $L_{Wasser}$
- Pfadwinkel und weitere durch die Brechung resultierende Winkel
- Durchmesser  $D$
- Wandstärke
- axialer Abstand der Sensoren am Rohr
- Zeitnehmung und Auflösungsgenauigkeit
- Nicht im Wasser verlaufende Schallpfadzeiten
- Räumliche und zeitliche Unsicherheiten in der Schallgeschwindigkeit
- Existenz von Querströmungen
- Räumliche und zeitliche Änderung des Geschwindigkeitsprofils
- Strömungsbeeinflussung durch innen liegende Sensoren

Diese Unsicherheiten sollen mit einer Fehlerfortpflanzung nach Gauss, also einer Summe der Fehlerquadrate, zu einer gesamten Messunsicherheit zusammengefasst werden.

### 3.2.4. Vergleich zum verwendeten ADM

Vergleicht man die Voraussetzungen die an akustische Durchflussmessgeräte gestellt werden, mit den Spezifikationen des verwendeten ADM so sind die nachstehenden Punkte anzumerken:

- Das verwendete Clamp-On Verfahren misst prinzipiell mit einem Pfad in einer oder zwei Messebenen, was nicht mit dem IEC Standard konform ist. Betrachtet man die V-/W-Anordnung als eine Messung in mehreren Ebenen, so sollte dieser Punkt noch genauer untersucht werden. Fakt ist allerdings, dass das verwendete Messgerät keine mehrfach, exzentrisch angeordneten Pfade in einer Messebene hat, was laut der IEC 41 empfohlen wird.

- Es erfolgt keine Temperaturkompensation im Messgerät. Dies resultiert in einem Fehler bei Messungen mit unterschiedlichen Temperaturen, wie es bei Tag und Nacht, oder zu verschiedenen Jahreszeiten vorkommt. Der Sensor müsste immer wieder neu montiert werden, da sich mit unterschiedlichen Wassertemperaturen andere Brechungswinkel zwischen Sensor und Wasser ergeben. Daraus resultieren unterschiedliche axiale Abstände bei der Sensor Montage, oder ohne eine Kompensation ein Messfehler. Ein Beispiel dafür wie stark sich eine nicht angewendete Temperaturkompensation auf den gemessenen Durchfluss auswirkt, ist in der nachstehenden Darstellung 3.2 angegeben. Dabei erkennt man den Bezugspunkt von 7 °C welcher im Messsystem eingestellt ist und mit welchem die Sensoren am Rohr montiert werden. Ändert sich die Temperatur im Wasser, so ergibt sich ein anderer Brechungswinkel und damit ein veränderter Abstand für die Montage der Sensoren. Das Messgerät bleibt allerdings an der selben Montageposition und somit misst es einen falschen Durchfluss.

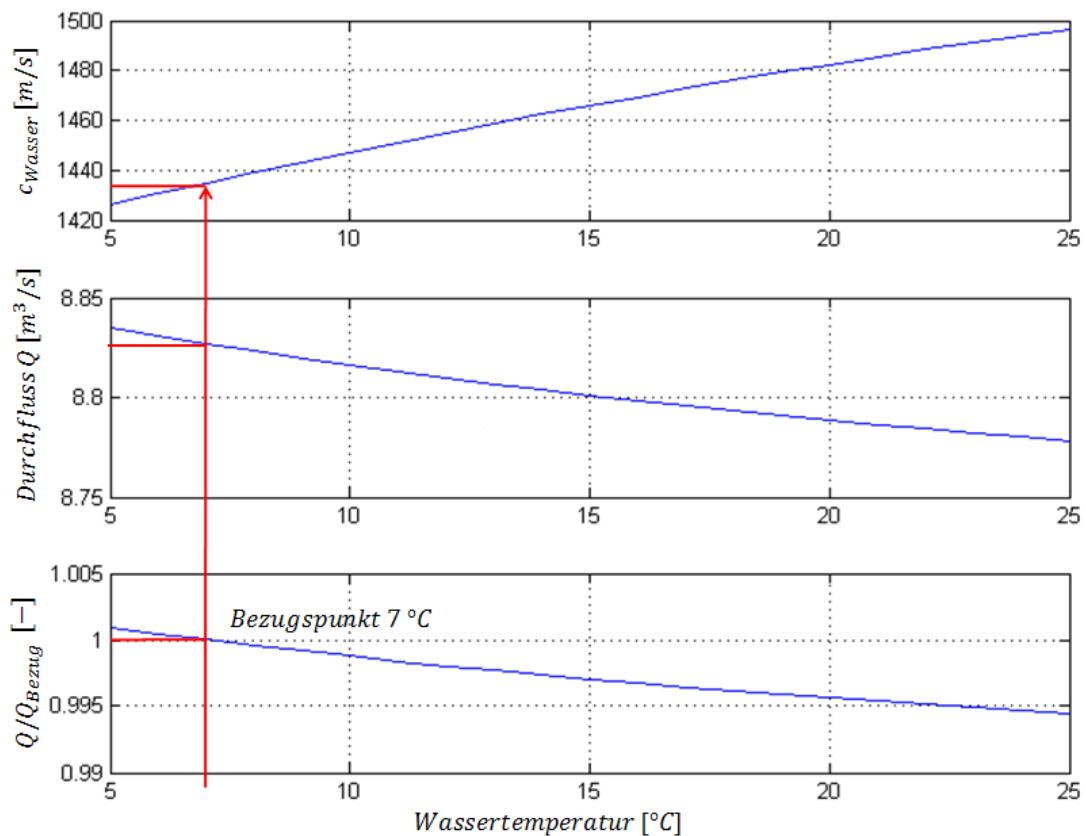


Abbildung 3.2.: Temperaturänderung und Auswirkung auf den Durchfluss.

- Strömungsgeschwindigkeiten von weniger als 1,5 m/s sollten vermieden werden
- Rohrdurchmesser kleiner als 0,8 m sind nicht empfehlenswert

Diese Werte gelten bei den letzten zwei Punkten aus Gründen der Zeitdifferenzmessung, die durch die interne Taktrate beeinflusst werden. Es gilt, dass bei größeren Geschwindigkeiten und Rohrdurchmessern die Laufzeitdifferenzen erhöht werden, was für

die Genauigkeit der Messung von Vorteil sein kann. Detailliertere Betrachtungen zu Fehlereinflüssen durch die Taktrate, beziehungsweise der Auflösung des Signals sind in Kapitel 6 angegeben.

Daraus folgt, dass das verwendete ADM noch nicht den Anforderungen der IEC 41 entspricht. Weiter soll aber in diese Richtung gearbeitet und die Kritikpunkte mit der Firma *Rittmeyer* diskutiert werden.

## 4. Fehlerarten und Regression

In diesem Kapitel werden allgemeine Definitionen zu Fehlerbetrachtungen bei Messungen angeführt. Außerdem erfolgt eine Möglichkeit der Trennung von systematischen und zufälligen Fehlern.

### 4.1. Fehlerarten

Zuerst sei definiert, was als systematischer beziehungsweise zufälliger Fehler bezeichnet wird.

#### Systematischer Fehler

Systematische Fehler zeigen sich durch eine Abweichung des Messwertes vom wahren Wert, bei wiederholten Messungen, unter identen Rahmenbedingungen. Das heißt es tritt eine Differenz zwischen Messwert und wahren Wert auf, welche zwar nicht konstant über den Messbereich sein muss, aber reproduzierbar. Der große Vorteil dieser Fehler liegt an der Wiederholbarkeit, was es möglich macht diesen Einfluss zu korrigieren [11].

#### Zufälliger Fehler

Im Gegensatz zu den systematischen Fehlern zeigen sich die zufälligen durch die Streuung um den erwarteten Wert. Das heißt bei wiederholten Messungen schwankt der Messwert zufällig und nicht reproduzierbar um den wahren Wert. In der Regel geht man zur Beschreibung dieser Abweichungen von einer Normalverteilung der Messwerte aus [11].

#### Trennung von systematischem und zufälligem Fehler

Um eine Korrektur des Messwertes vornehmen zu können, das heißt die systematischen Abweichungen zu eliminieren, benötigt man die Aufspaltung des gesamten Fehlers in dessen Bestandteile. (Siehe dazu Gleichung 4.1)

$$e_{ges} = e_{sys} + e_{zuf} \quad (4.1)$$



Das Auftreten dieses Fehlers wird anhand eines Beispiels, wie es in Abbildung 4.1 zu sehen ist, durchgeführt.

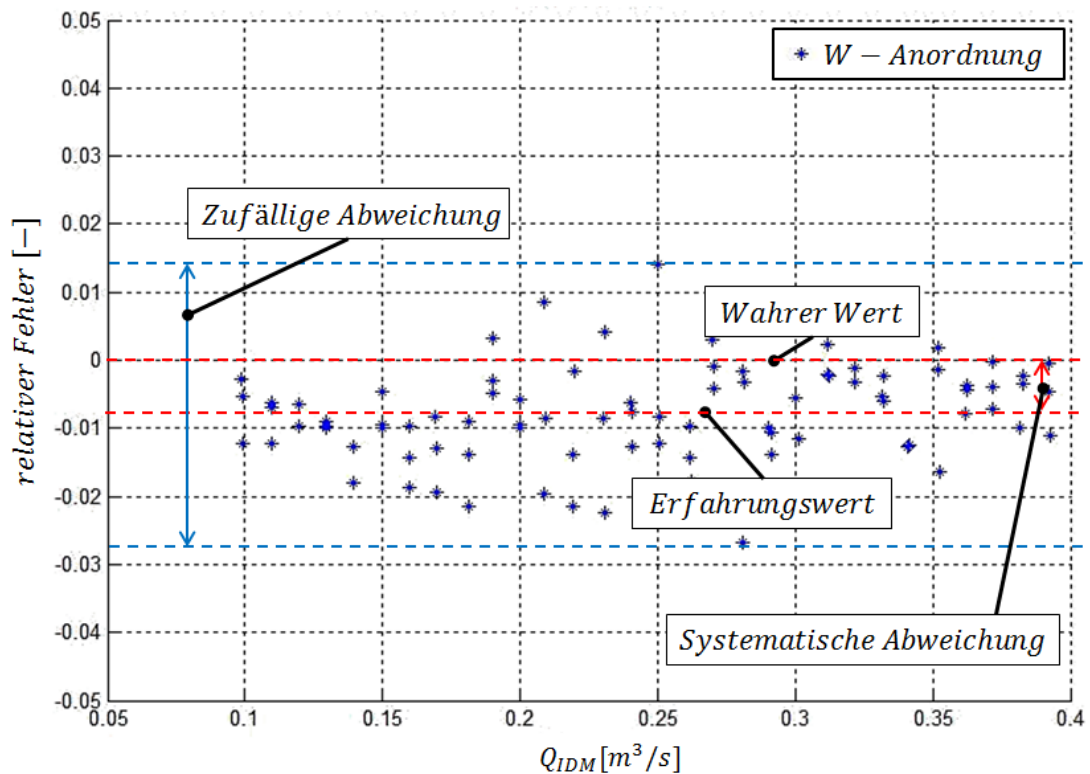


Abbildung 4.1.: Darstellung der systematischen sowie zufälligen Abweichung des Messwertes anhand eines Beispiels einer W-Anordnung.

Es ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Die Differenz zwischen dem Mittelwert der Einzelmessungen (Erwartungswert) und dem wahren Wert ist der systematische Fehler.
- In der Streuung der Einzelmesswerte um den Erwartungswert spiegeln sich die zufälligen Fehler wieder.

Möglichkeiten zur Bestimmung und Korrektur der Fehler sind im nachstehenden Kapitel diskutiert.

## 4.2. Methode der kleinsten Fehlerquadrate - Regression

Es wird anhand einer Korrelation der Messwerte von ADM und IDM eine Regressionsgerade erstellt. Mit dieser soll ein Zusammenhang beider Messwerte entwickelt werden und daraus eine Korrektur des ADM Messwertes erfolgen. Als erstes wird die Methode der kleinsten Fehlerquadrate erklärt, da dieses Verfahren anschließend in *Matlab* Anwendung findet. Ausgangspunkt sei der in Abbildung 4.2 dargestellte Zusammenhang.

Untersucht wird die Korrelation von zwei beliebigen Datensätzen  $X$  und  $Y$ . Die in diesem Kapitel verwendeten Ansätze und Vorgehensweisen sind in [12] und [11] ausführlicher durchgeführt.

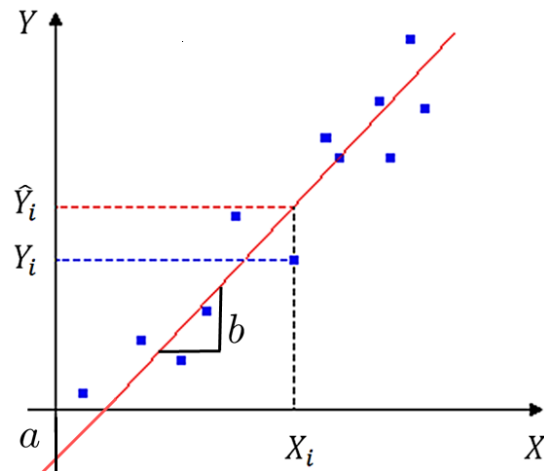


Abbildung 4.2.: Regressionsgerade zweier beliebiger Datensätze. [12]

Es gilt für den berechneten Wert  $\hat{Y}_i$  die Gleichung 4.2 was als *empirische Regressionsgerade* bezeichnet wird.

$$\hat{Y}_i = a + b \cdot X_i \quad (4.2)$$

Darin bedeuten die Faktoren „b“ die Steigung der Geraden, oder auch *Regressionskoeffizient* und „a“ den Versatz aus der Nullposition (*Regressionskonstante*). Annahmen:

1. Ein linearer Zusammenhang liegt zwischen den Messwerten vor.
2. Die Messwerte sind voneinander unabhängig.
3. Eine Normalverteilung der  $Y$  Werte zu den  $X$  Werten ist gegeben.

Durch die Modellierung der  $Y$  Werte mit der Geradengleichung, resultiert ein *Versuchsfehler*  $\epsilon_i$  (auch *Residuum*) zwischen wahren Wert  $Y$  und berechnetem Wert  $\hat{Y}$  (4.3).

$$\epsilon_i = Y_i - \hat{Y}_i \quad (4.3)$$

Um das Residuum der Ausgleichsgeraden zu minimieren behilft man sich mit der vorhin erwähnten Methode der kleinsten Fehlerquadrate (MKQ). Der Ansatz dafür ist in Gleichung 4.4 dargestellt, worin für  $\hat{Y}_i$  der Zusammenhang aus 4.2 eingesetzt wird.

$$\epsilon^2 = \sum_{i=1}^N (Y_i - (a + b \cdot X_i))^2 \quad (4.4)$$

Im nächsten Schritt versucht man ein Minimum für die Residuen zu finden was durch die partielle Ableitung nach den beiden Parametern „a“ und „b“ und Null setzen gelingt. Das

heißt die empirische Regressionsgerade ergibt sich aus der Minimierung der Summe der Quadrate der vertikalen Abstände. Zuerst erfolgt die Ableitung nach „a“ und konstant halten von „b“:

$$\frac{\partial \epsilon^2}{\partial a} = \sum_{i=1}^N (-2)(Y_i - (a + b \cdot X_i)) = 0$$

Wird die Summe auf die einzelnen Parameter und deren Summen aufgeteilt erhält man die nachstehende Form.

$$0 = \sum_{i=1}^N Y_i - b \sum_{i=1}^N X_i - \sum_{i=1}^N a$$

Die Parameter „a“ sowie „b“ müssen konstante Werte annehmen, um eine Geradengleichung zu erhalten. Deshalb ist es möglich die Summe über alle „a“ aufzulösen und als  $N \cdot a$  zu schreiben. Anschließend stellt man noch die Gleichung auf „a“ um.

$$0 = \sum_{i=1}^N Y_i - b \sum_{i=1}^N X_i - N \cdot a$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i - b \sum_{i=1}^N X_i}{N}$$

Hierin ergeben die Summen von  $\sum_{i=1}^N Y_i$  und  $\sum_{i=1}^N X_i$  mit  $N$  gemeinsam die jeweiligen Mittelwerte  $\bar{Y}_i$  und  $\bar{X}_i$ .

$$\bar{Y}_i = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i}{N}$$

$$\bar{X}_i = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}$$

$$a = \bar{Y}_i - b\bar{X}_i \tag{4.5}$$

Für die Bestimmung des Versatzes aus dem Nullpunkt benötigt man offensichtlich die Steigung der Regressionsgeraden. Diese berechnet sich nach dem gleichen Prinzip wie

vorhin, durch partielle Ableitung und Null setzen. Nur muss in Gleichung 4.2 die Beziehung 4.5 eingesetzt werden.

$$\hat{Y}_i = a + b \cdot X_i$$

Einsetzen von „a“ ergibt:

$$\hat{Y}_i = \bar{Y}_i - b\bar{X}_i + b \cdot X_i$$

$$\hat{Y}_i = \bar{Y}_i + b(X_i - \bar{X}_i)$$

Es folgt mit der Gleichung 4.3 die Beziehung für den quadratischen Fehler.

$$\epsilon^2 = \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y}_i - b(X_i - \bar{X}_i))^2$$

Mit der Ableitung nach „b“ folgt also:

$$\frac{\partial \epsilon^2}{\partial b} = \sum_{i=1}^N 2(Y_i - \bar{Y}_i - b(X_i - \bar{X}_i)) \cdot (-(X_i - \bar{X}_i)) = 0$$

In dieser Gleichung wird wieder der Faktor „-2“ vernachlässigt. Aufspalten der Summe und umformen auf den gesuchten Wert „b“ liefert das Ergebnis.

$$0 = \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y}_i)(X_i - \bar{X}_i) - b \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X}_i)^2$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y}_i)(X_i - \bar{X}_i)}{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X}_i)^2}$$

Die Steigung der Geraden kann direkt aus den Messwerten und deren Mittelwerten bestimmt werden. Außerdem ermöglicht dies die Bestimmung vom Versatz „a“.

### Implementierung in *Matlab*

Durch die bekannten Werte für die Regressionsgerade kann ein Model in *Matlab* erstellt werden. Dieses ist über das in der Betriebsanleitung beschriebene GUI aufrufbar. Dabei sind die  $X$  Werte gleich den Messwerten der IDM und die der  $Y$  gleich denen der ADM. In der Abbildung 4.3 ist eine Korrelation dargestellt nachdem eine Korrektur vorgenommen wurde. Unter Korrektur versteht man in diesem Fall das Abgleichen der Messwerte von ADM zu IDM. Es wird folgende mathematische Operation durchgeführt:

$$Q_{ADM_{korr}} = \frac{Q_{ADM} - a}{b} \quad (4.6)$$

Also erfolgt ein Abgleich der Messwerte durch den Versatz und die Steigung. Was verbleibt sind die Schwankungen, welche die zufälligen Abweichungen widerspiegeln.

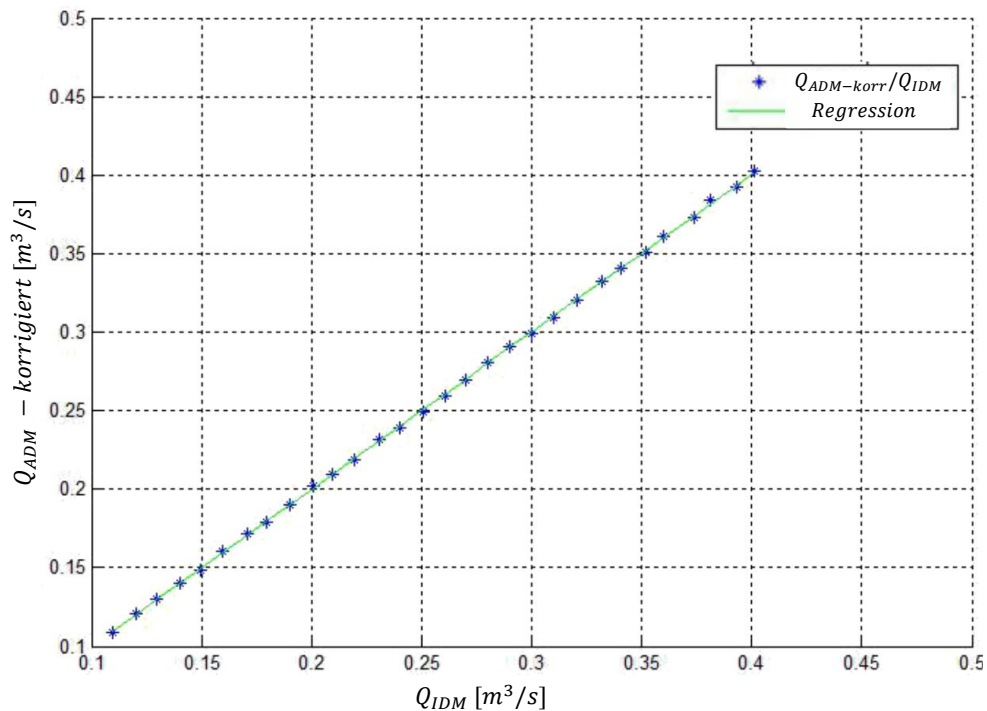


Abbildung 4.3.: Regressionsgerade zwischen ADM und IDM nach der Korrektur.

Dabei ergeben sich die Werte für vorher und nachher zu:

- *Vorher* :  $a = 0,983$      $b = -0,000398$      $R^2 = 0,99995$
- *Nachher* :  $a = 1$              $b = 0$              $R^2 = 0,99995$

Daraus folgt ein exakter linearer Zusammenhang, der außerdem mit einem sehr hohen Bestimmtheitsmaß  $R^2$  erfüllt ist. Diese Korrektur wurde anhand mehrerer Anordnungen und Abweichungen getestet. Dabei folgt immer das gleiche Ergebnis einer exakten

Korrelation. Die Frage ist allerdings wie stark der Wert korrigiert werden muss und ob es einen reproduzierbaren Zusammenhang zwischen den einzelnen Messungen und Anordnungen gibt.

### 4.3. Fehlerprognose

Um Vorhersagen über die Genauigkeit der Messwerte treffen zu können und damit eine Plausibilitätskontrolle durchzuführen, wird ein *Matlab* Skript entwickelt das die Brechungsvorgänge des Schallsignales, sowie Laufzeiten bei einer Messung prognostizieren kann. Dazu wird das Modell wie es in Kapitel 8 beschrieben ist, angewendet. Es besteht damit die Möglichkeit den kompletten Schallpfad, dessen Laufzeit und Länge nachzubilden, und damit die erwarteten Ergebnisse der Messung zu überprüfen. Zusätzlich können mit dem erstellten Modell Fehlereinflüsse und Schranken angegeben werden, was im Kapitel 6 genauer erklärt wird. Dies ist ein wichtiges Instrument, um direkt bei der Messung eine Kontrolle der Werte durchführen zu können.

## 5. Messungen am Institut

Nachdem die Sensoren und alle weiteren Messgeräte richtig in Betrieb genommen sind, kann eine Messung erfolgen. Dazu soll ein Vergleich des gemessenen Durchflusses mit einer magnetisch induktiven Durchflussmessung angestellt werden. Um die ersten Ergebnisse der akustischen Durchflussmessung einschätzen und mögliche systematische Abweichungen ausgleichen zu können, ist dieser Vergleich wichtig.

### 5.1. Vergleichsmessungen

Zuerst eine Beschreibung der im Labor vorhandenen Vergleichsmessverfahren.

#### 5.1.1. Messung mittels Messvolumen

Bei diesem Verfahren füllt sich ein Messbehälter über einen gewissen Zeitraum. Dabei misst man die Spiegelhöhe vorher  $z_1$  und nachher  $z_2$ , eines genau bekannten Volumens  $V$ . Aus der errechneten Differenz lässt sich auf den mittleren Volumenstrom  $\bar{Q}$  schließen. Wichtig ist dabei, dass der Durchfluss statisch für einen bestimmten Betriebspunkt bestimmt wird und während der Messung konstant gehalten werden muss. Dies lässt sich mit den Gleichungen 5.1 und 5.2 beschreiben. Es muss die genaue Kenntnis des verwendeten Messvolumens und dessen Füllstand, sowie eine exakte Zeitnahme während dem Messen vorhanden sein. Am Institut ist ein solches Messvolumen in Form eines Messbehälters vorhanden. Es wird über eine Schaltvorrichtung welche innerhalb kürzester Zeit auf das Messvolumen umschalten kann, der zu messende Durchfluss geregelt. Dieses Verfahren wurde für die Kalibrierung des IDM am Institut angewendet.

$$\Delta V(z) = V(z_2) - V(z_1) \quad (5.1)$$

$$\bar{Q} = \frac{\Delta V(z)}{\Delta t} \quad (5.2)$$

#### 5.1.2. Magnetisch induktive Durchflussmessung

Nach dem Induktionsgesetz entsteht eine elektrische Spannung, wenn ein elektrischer Leiter in einem Magnetfeld bewegt wird. Diese induzierte Spannung ist dann gerade dem Durchfluss proportional. Der elektrische Leiter ist in diesem Fall das strömende

Fluid welches leitend sein muss, damit das Verfahren funktioniert. Das Magnetfeld wird senkrecht zur Strömungsrichtung eingeleitet und so kann über am Rohr angebrachte Elektroden die Spannung  $U_e$  abgegriffen werden. Es gilt, dass diese direkt proportional dem Elektrodenabstand (meist der Rohrdurchmesser  $D$ ), der magnetischen Flussdichte  $B$  und der mittleren Fließgeschwindigkeit  $\bar{U}$  ist. Siehe dazu folgende Formel 5.3, welche auf die gesuchte Geschwindigkeit umgeformt ist. Aus der mittleren Geschwindigkeit und der Rohrfläche ergibt sich der Durchfluss wie in Gleichung 5.4.

$$\bar{U} \approx \frac{U_e}{D \cdot B} \quad (5.3)$$

$$Q = \frac{D^2 \pi}{4} \cdot \bar{U} \quad (5.4)$$

### Verwendetes IDM

Das für die Messungen am Institut verwendete Messgerät ist vom Hersteller *ABB* und wird in [13] genauer beschrieben. Die allgemeinen Spezifikationen lauten:

Tabelle 5.1.: Induktives Durchflussmessgerät am Institut.

|                          |                                 |
|--------------------------|---------------------------------|
| <i>Hersteller</i>        | <i>ABB</i>                      |
| <i>Modell</i>            | <i>FSM4000</i>                  |
| <i>Seriennummer</i>      | <i>SE41F</i>                    |
| <i>Durchflussbereich</i> | $\leq 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ |
| <i>Messsignal</i>        | $4 - 20 \text{ mA}$             |
| <i>Messgenauigkeit</i>   | $\pm 0,331\%$                   |

Es wird im nachstehenden Kapitel die Einbauposition am Prüfstand und die aus der Kalibrierung resultierende Genauigkeit erläutert.

## 5.2. Akustische Durchflussmessung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse und Randbedingungen der Messungen am Institut mit den Clamp-On Sensoren beschrieben. Dazu ist in der Abbildung 5.1 der gesamte Prüfstand dargestellt, welcher sich über vier Stockwerke erstreckt.

Man erkennt im Keller die Hauptpumpe des Prüfstandes, bei der über Frequenzumrichter die Drehzahl geregelt wird. Das Rohrsystem ist geschlossen, was bedeutet dass die Pumpe das Wasser ständig im Kreis fördert. Eine weitere Regelungsmöglichkeit des Prüfstandes steht durch den Energiedissipator im Erdgeschoss zur Verfügung, welcher als ein Ringkolbenschieber ausgeführt ist. Es wird ein Kolben axial verschoben und damit reduziert sich der durchströmte Querschnitt des kegeligen Ringkolbenschiebers.



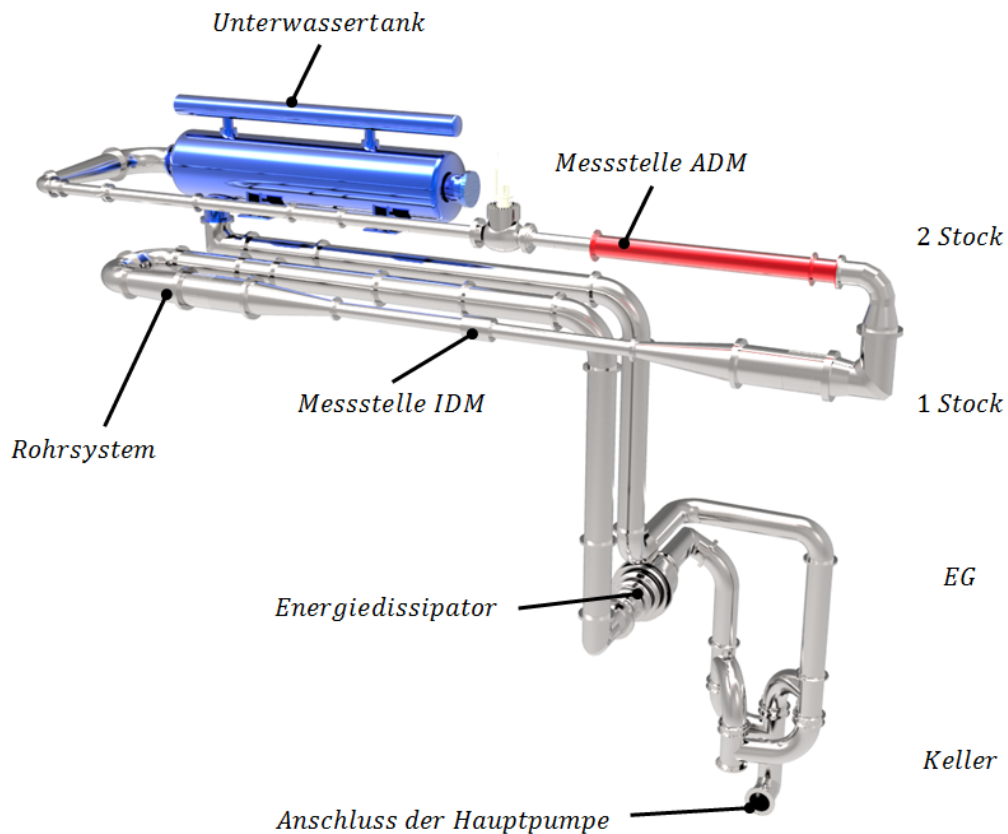


Abbildung 5.1.: Ansicht des Hauptprüfstandes am Institut für hydraulische Strömungsmaschinen. [14]

Dabei erfolgt eine Umwandlung der kinetischen Energie des Wassers in sogenannten Toskammern zu Wärme und Schallenergie. Außerdem ist die Messstelle des IDM ersichtlich, welche auf einem kleinen Rohrdurchmesser und unter Einhaltung der Vor- beziehungsweise Nachlaufstrecken angebracht wurde. Dabei sind vor der Querschnittsverengung, die die Strömung beschleunigt und dadurch vergleichmäßigt, Gleichrichtbleche eingebaut. Nach dem IDM ist wieder eine Erweiterung mit Gleichrichtblechen angeordnet. Dieser Zusammenhang ist in der Abbildung 5.2 dargestellt.

Dieses Messgerät wurde mit dem Eichbehälter kalibriert. Vereinfacht gesagt misst das IDM zur selben Zeit den Durchfluss, während auf den Eichbehälter umgeschaltet wird. So kann ein Abgleich dieser beiden Werte erfolgen und unterschiedliche Betriebspunkte am Hauptprüfstand variiert werden. Durch eine Messabweichung von maximal  $\pm 0,331\%$  über den gesamten Bereich der durchgeführten Messungen, eignet sich diese Methode als Vergleichsinstrument [15]. Die Rohrleitung in rot markiert den Messbereich der ADM im zweiten Stock. Zusätzlich ist die Möglichkeit vorhanden den Systemdruck durch Abschluss von der Umgebung zu erhöhen. Durch eine Vakuumpumpe kann der Druck auch abgesenkt werden. Die allgemeinen Eckdaten des Prüfstandes sind laut [16] in der Tabelle 5.2 zu finden.

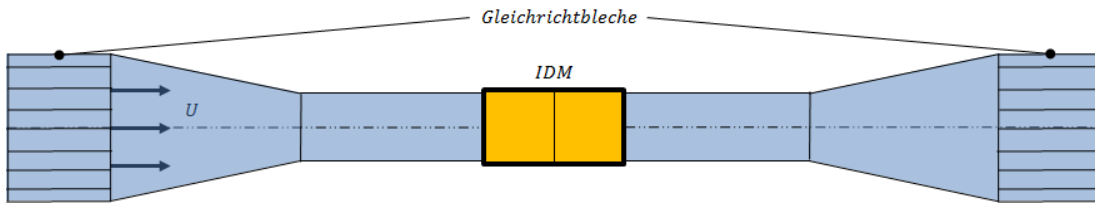


Abbildung 5.2.: Zu- und Abströmsituation bei der induktiven Durchflussmessung am Institut.

Tabelle 5.2.: Eckdaten des Prüfstandes.

|                                |         |
|--------------------------------|---------|
| <i>Maximaler Durchfluss</i>    | 550 l/s |
| <i>Maximale Fallhöhe</i>       | 87 m    |
| <i>Nennleistung Hauptpumpe</i> | 250 kW  |

### 5.2.1. Randbedingungen der ersten Messung

Die folgenden Randbedingungen sind bei der ersten Messung durch den Prüfstand und das Messgerät gegeben:

- Nennweite DN400, wobei eine Mittlung des Durchmessers über sechs Werte am Umfang erfolgte.
- Beruhigungsstrecke hinter einem Krümmer entspricht mindestens dem zehnfachen Durchmesser.
- Hinter dem Krümmer befinden sich Gleichrichtbleche, um die Strömungsverhältnisse zu verbessern. (Siehe dazu Abbildung 5.3)
- Es sind neun verschiedene Messanordnungen an der selben Stelle zu untersuchen, um alle Varianten unter identen Bedingungen vergleichen zu können.
- Durchflussbereich von 0,1 bis 0,4 m<sup>3</sup>/s mit Schrittweiten zu je 0,01 m<sup>3</sup>/s, wobei immer von tiefstem zu höchstem Durchfluss gemessen wird.
- Software 2.3.1 am *Risonic Modular*, welche bei späteren Messungen überarbeitet wird.
- Ausgabe der Messwerte über den analogen Ausgang. Abtasten des Signales mit einer Rate von 100 Hz und Paketen aus 100 Samples über eine Messdauer von 30 Sekunden. Das heißt jede Sekunde werden 100 Messwerte aufgezeichnet.
- Auswertung der Messpunkte in *Matlab R2011b*.

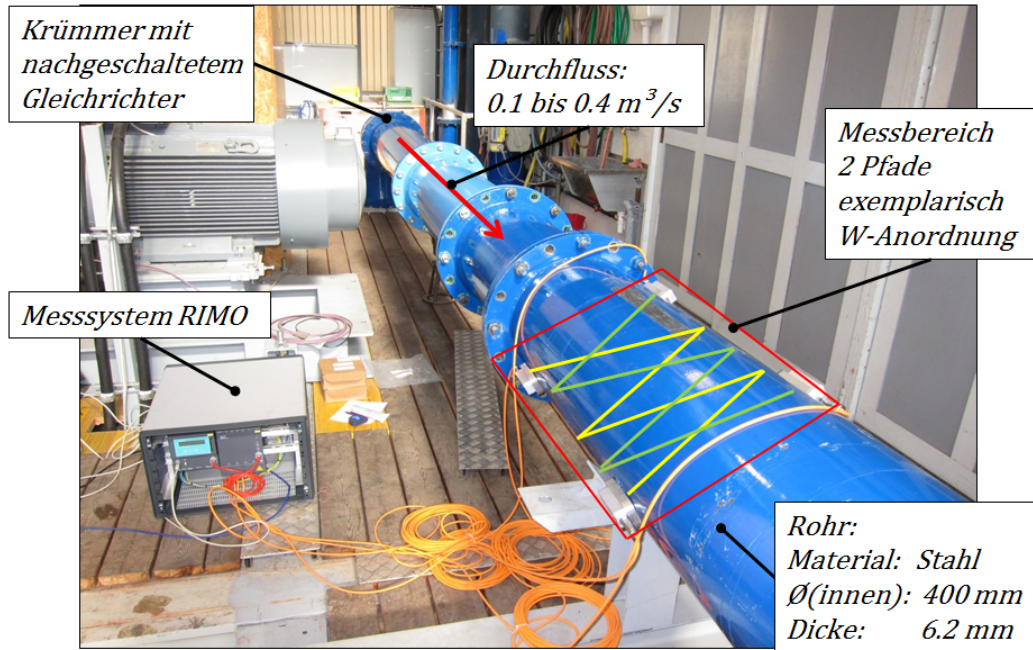


Abbildung 5.3.: Messaufbau am Prüfstand bei einem DN400 Rohr.

### 5.2.2. Durchführung der Messung

Am Institut für hydraulische Strömungsmaschinen wird über die Prüfstandsteuerung der Durchfluss variiert. Dieser wird über die Hauptpumpe im Keller gefördert. Das Verarbeiten des analogen Signals vom *Risonic Modular* erfolgt in *LabVIEW* über das Messsystem mit einem Strommodul. Dabei entsprechen der angelegten linearen Skalierungsvorschrift nach  $4\text{ mA} - 0\text{ m}^3/\text{s}$  und  $20\text{ mA} - 0,4\text{ m}^3/\text{s}$ . Die Messungen beginnen immer mit der zweipfadigen Anordnung und werden dann ohne eine Änderung bei der Montage, einfach durch ausschalten eines Messpfades auf die einpfadige Anordnung reduziert. Außerdem wird zu Beginn über die Prüfstandsteuerung ein Durchfluss von  $0,1\text{ m}^3/\text{s}$  eingestellt, welcher dann schrittweise bis  $0,4\text{ m}^3/\text{s}$  erhöht wird. Über das „Diagnose“-Fenster im *Risonic Modular* kann zusätzlich die Anzahl der „guten/schlechten“ Messungen kontrolliert werden.

### 5.2.3. Auswertung und Diskussion

Unter der Zuhilfenahme der beschriebenen Auswertesoftware ergeben sich die folgenden Ergebnisse. Dabei ist in Abbildung 5.4 der Zusammenhang des Durchflusses zwischen  $0,1$  und  $0,4\text{ m}^3/\text{s}$ , bei verschiedenen Pfadanordnungen der akustischen Durchflussmessung im Vergleich zur induktiven, dargestellt. Man erkennt die größere Abweichung zu kürzeren Pfadlängen hin, das heißt von der W-Anordnung mit einer Pfadlänge von  $1,72\text{ m}$  bis zur Z-Anordnung mit  $0,43\text{ m}$ . Es kann viele Gründe für diese Tendenz geben. Einer davon ist die Erhöhung der Laufzeiten und damit deren Differenz mit erhöhter Pfadlänge, da das Signal so länger durch das Medium gesendet wird. Dadurch ist die

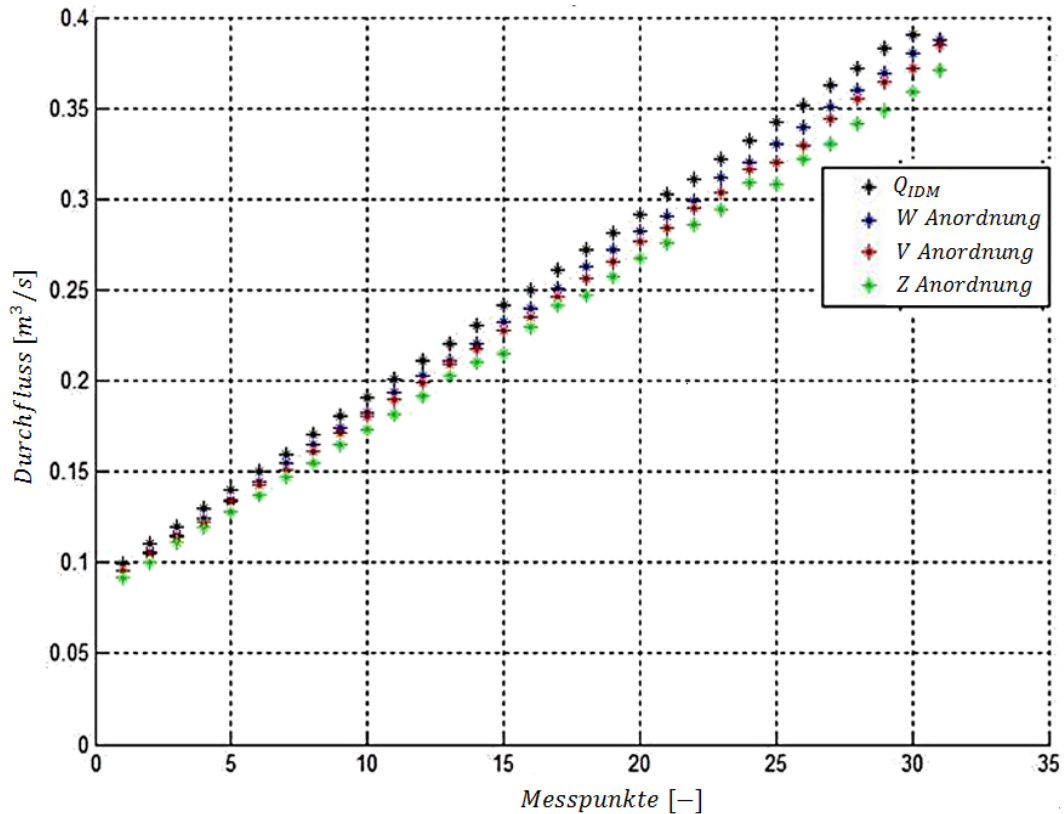
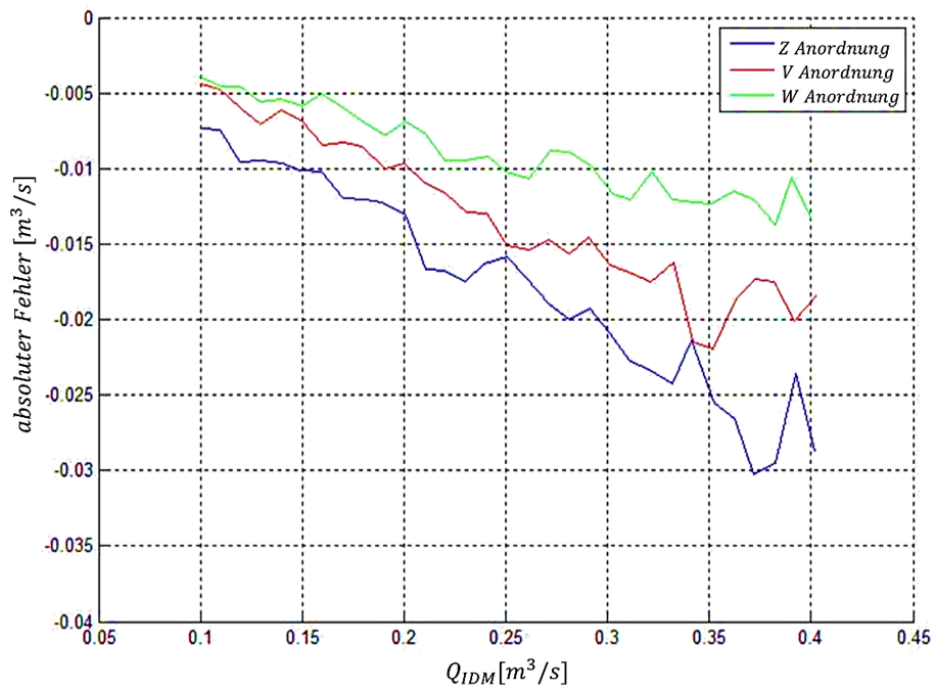


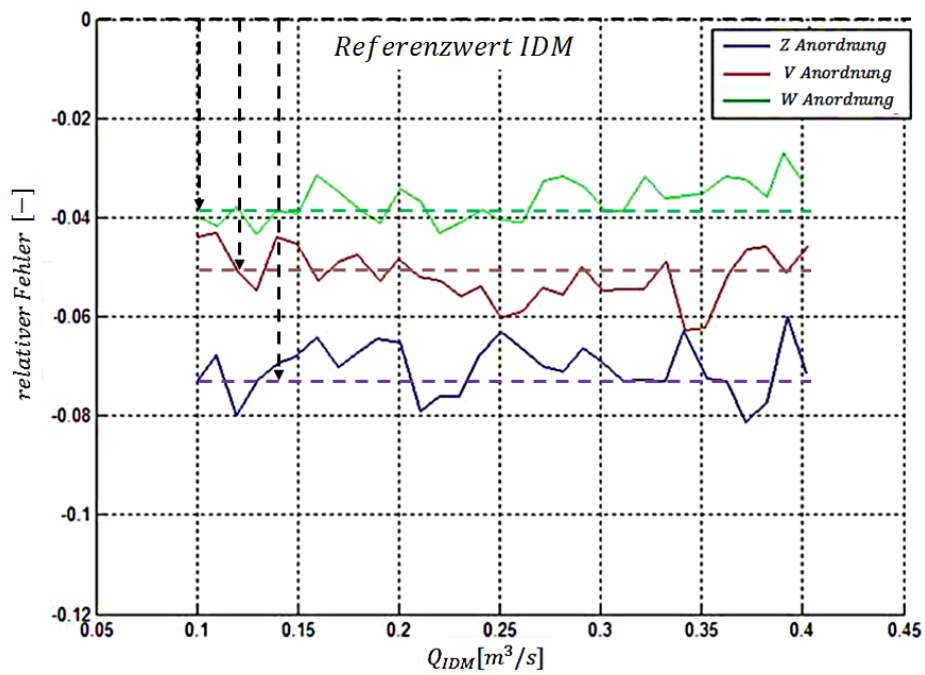
Abbildung 5.4.: Vergleich des gemessenen Durchflusses bei der akustischen und der induktiven Durchflussmessung.

Wirkung der Strömung auf das vorwärts und rückwärts übertragene Ultraschallsignal größer und der Einfluss der begrenzten Auflösung des Signales kann damit reduziert werden, was eine höhere Genauigkeit zur Folge hat. Ein weiterer Grund für die geringere Abweichung der W/V-Anordnung kann die einleitend erwähnte Reduktion der Querströmungen sein. Allerdings sollte in diesem Fall durch die Gleichrichtbleche dieser Einfluss stark reduziert sein.

Um einen besseren Überblick über das erhaltene Ergebnis zu bekommen, sind in den folgenden zwei Abbildungen 5.5 a und b, die absoluten beziehungsweise relativen Abweichungen zur Referenzmessung (IDM) dargestellt. Aus dieser ist ersichtlich, dass die Genauigkeit bei der ADM noch deutlich erhöht werden muss. Mögliche Gründe für die Ungenauigkeiten sind die zu tiefe Sendefrequenz der Sensoren von 500 kHz, was bei kleinen Rohrdurchmessern eine schlechte Detektion zur Folge hat. Auch die Messung über den Standard-Modus, welcher nicht alle Einstellungen für die Messung freigibt hat einen Einfluss.



(a) Absoluter Fehler



(b) Relativer Fehler

Abbildung 5.5.: Darstellung von absolutem (a) und relativem (b) Fehler der unterschiedlichen Anordnungen.

### Gesammelte Ergebnisse der ersten Messung

Die Tabelle 5.3 listet alle neun unterschiedlichen Anordnungen bei der Messung am DN400 Rohr auf. Dabei bedeutet „W-02P/A/B“, dass eine W-Anordnung mit zwei Pfaden A und B verwendet wird. Dasselbe gilt für die V- und die Z-Anordnung, beziehungsweise eine einpfadige Anordnung bei welcher nur „01P/A oder B“ als Bezeichnung vorkommen. Die Steigung der Geraden ergibt sich, wenn auf der Y-Achse der Durchfluss ADM und auf der X-Achse der Durchfluss IDM aufgezeichnet wird und dann eine Korrelation der Messwerte erfolgt. Dieses Vorgehen wurde im Kapitel 4 mit der Herleitung einer Regressionsgeraden und Aufspaltung in systematischen und zufälligen Fehler genauer diskutiert. Es sei hier erwähnt, dass die Steigung die systematische Abweichung zwischen ADM und IDM wiedergibt. In der letzten Spalte der Tabelle ist auch noch das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  bei der Bestimmung der Regression aufgelistet, was bei einem Wert von  $R^2 = 1$  eine exakte Korrelation bedeutet.

Tabelle 5.3.: Gegenüberstellung vom Durchfluss der ADM zum IDM bei unterschiedlichen Messanordnungen.

| <i>Anordnung</i>   | <i>Steigung</i> | <i>Bestimmtheit <math>R^2</math></i> |
|--------------------|-----------------|--------------------------------------|
| <i>W – 02P/A/B</i> | 0,96486         | 0,99986                              |
| <i>W – 01P/A</i>   | 0,97536         | 0,99988                              |
| <i>W – 01P/B</i>   | 0,97624         | 0,99983                              |
| <i>V – 02P/A/B</i> | 0,94671         | 0,99972                              |
| <i>V – 01P/A</i>   | 0,94036         | 0,99947                              |
| <i>V – 01P/B</i>   | 0,95011         | 0,99965                              |
| <i>Z – 02P/A/B</i> | 0,92931         | 0,99968                              |
| <i>Z – 01P/A</i>   | 0,91478         | 0,99946                              |
| <i>Z – 01P/B</i>   | 0,90590         | 0,99991                              |

Weiter erkennt man, dass die Ergebnisse der ADM immer zu tief ausfallen. Um diese Systematik zu verbessern werden in weiterer Folge eine neue Betriebssoftware, eine feinere Filterung und auch Temperaturanpassungen im Messgerät, vorgenommen.

#### 5.2.4. Anpassung der Messung und korrigierte Randbedingungen

Um die erhaltenen Messergebnisse zu verbessern, haben sich folgende Randbedingungen geändert:

- Anpassung der am Messgerät vorgegebenen Temperatur. Dazu wurde zur Bestimmung des axialen Sensorabstandes die Temperatur über den Prüfstand gemessen und im System eingegeben. Es ist allerdings trotz möglichst genauer Ausrichtung der Sensoren am Rohr eine Differenz zwischen angegebener Temperatur und anschließend vom Messsystem berechneter Temperatur zu erkennen. Dies kann die systematischen Abweichungen der Messergebnisse erklären, da wie aus den

Diagrammen ersichtlich ist, der Messwert des ADM immer zu tief liegt. Dieser Zusammenhang wird in Kapitel 8 noch einmal genauer beschrieben.

- Software am *Risonic Modular* upgedatet.
- Anpassung des Messfilters, aus dem das Messgerät die Durchflusswerte jede Sekunde bestimmt. Es werden pro Sekunde im Hintergrund aus den gemessenen Zeitdifferenzen, Durchflusswerte berechnet. Allerdings nicht nur ein Messwert pro Sekunde, sondern zirka 50. Aus diesen 50 Werten wird eine bestimmte Anzahl zur Mittelung genommen und dann wird die Vorwärts- beziehungsweise Rückwärtszeit bestimmt, um auf den Durchfluss zu schließen. Das bedeutet dass der sekundlich ausgegebene Wert aus einer großen Anzahl einzelner Messwerte gefiltert und gemittelt wird. Eine Beschreibung des Messfilters ist in Abbildung 5.6 gegeben.

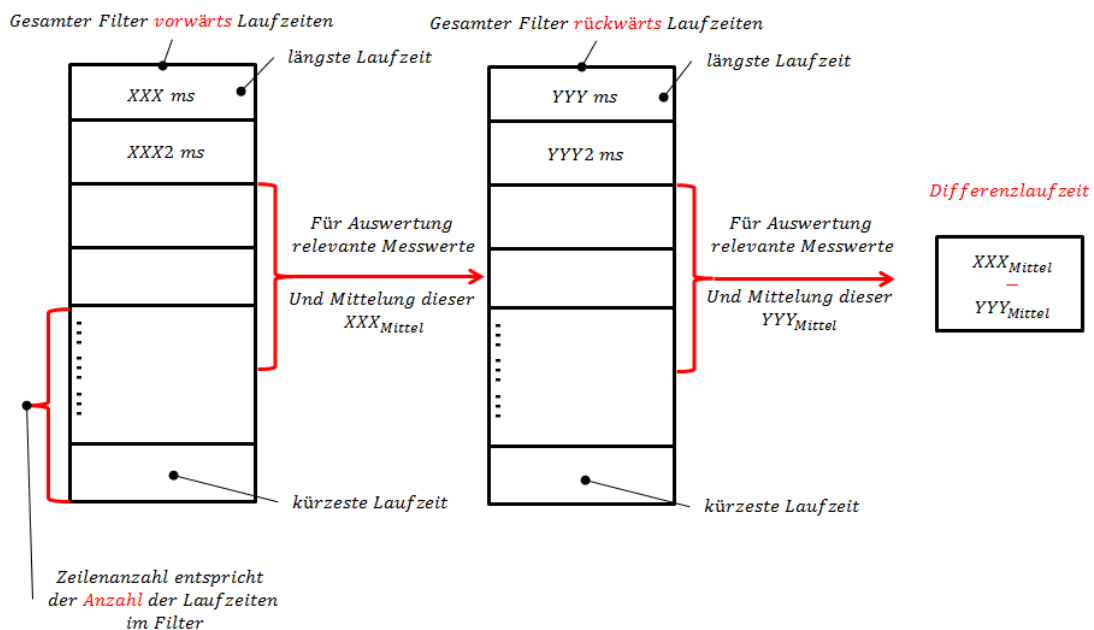


Abbildung 5.6.: Erklärung des Ablaufes bei der Zeitdifferenzbestimmung  $\Delta t$ , im ADM.

Dies erklärt auch teilweise die Sprünge in den zeitlich dargestellten Durchflussverläufen, wie in Abbildung 5.7 ersichtlich. Es wird bei dem Kapitel zur Fehlerbetrachtung noch genauer auf diese große Schwankungsbreite eingegangen und der Zusammenhang zur internen Taktrate erklärt.

### 5.2.5. Ergebnisse bei den korrigierten Randbedingungen

Nachdem die neuen Randbedingungen im Messgerät übernommen sind erfolgt die Messung nach dem gleichen Vorgehen wie bei der ersten Messung. Es ergeben sich die in Abbildung 5.8, dargestellten Ergebnisse für den relativen und den absoluten Fehler, bei den jeweiligen zweipfadigen Anordnungen.

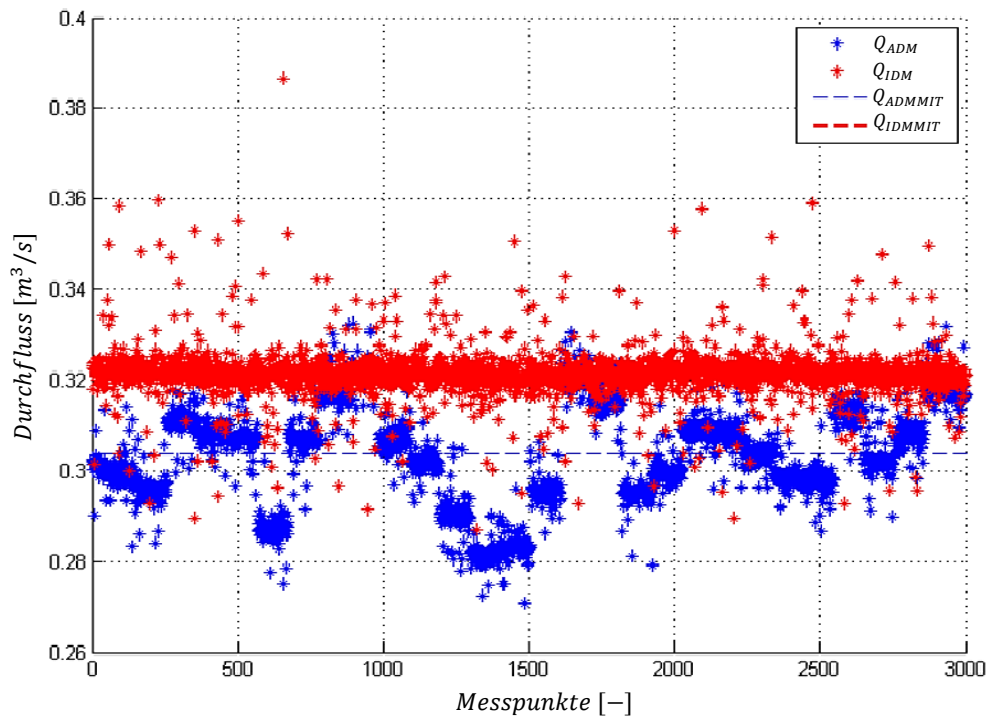
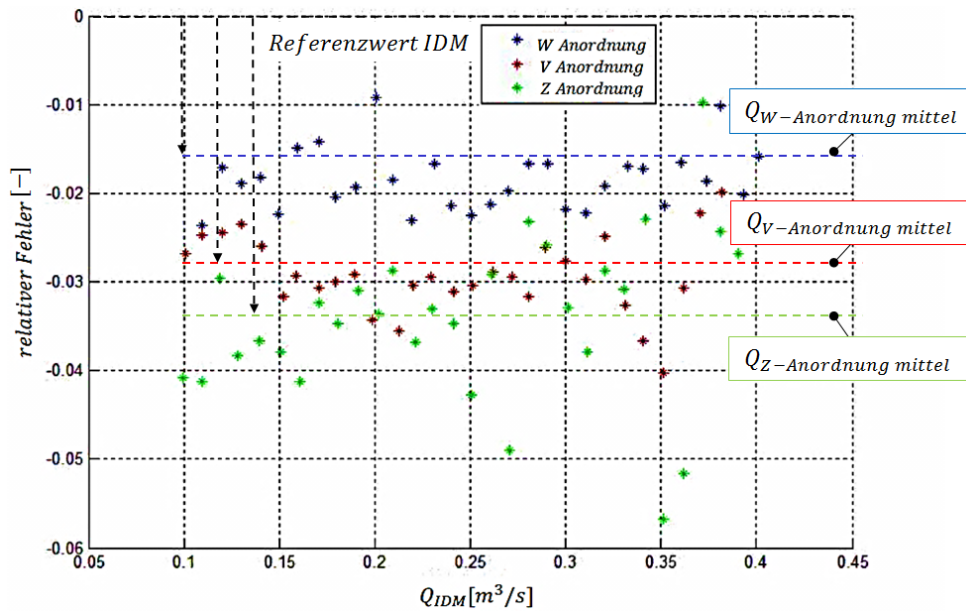


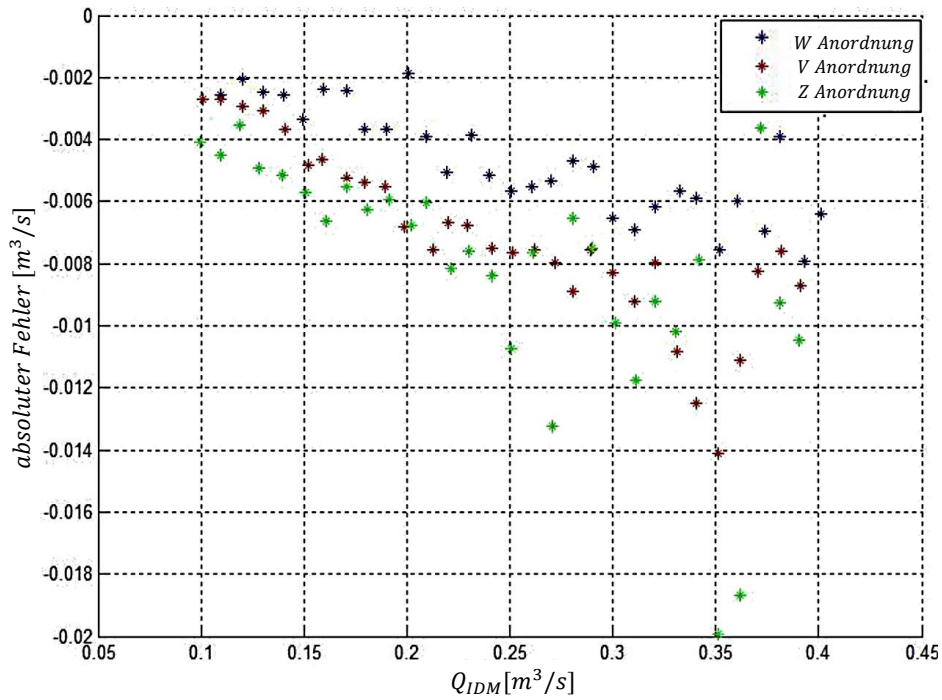
Abbildung 5.7.: Darstellung des gemessenen Durchflusses von ADM zu IDM.

Bei diesen Verläufen erkennt man wieder den selben Trend wie bei den ursprünglichen Randbedingungen, allerdings sind die Genauigkeiten deutlich erhöht. Auch der Zusammenhang zwischen Pfadlänge und Schwankung der Messwerte ist wieder erkennbar. Bei der *kurzen* Z-Anordnung variieren die Durchflusswerte stärker als bei der *langen* W-Anordnung. Durch eine Korrelation vom Durchflusswert der ADM mit dem der IDM ergeben sich die Darstellungen 5.9 a-c. Darin gibt die Steigung die systematische Abweichung zwischen ADM und IDM wieder. Es ergeben sich bei allen Anordnungen zu tiefe Werte. Wichtig ist bei der Auswertung auf das Bestimmtheitsmaß für die Regression zu achten. Die Werte lagen bei allen Regressionen über 0,995 was auf eine sehr gute Annäherung schließen lässt. In Kapitel 4 wurde die Aufspaltung der Messwerte in einen zufälligen und systematischen Anteil diskutiert. Im Prinzip wird mit der Regressionsgerade nichts anderes bestimmt als die systematische Abweichung des ADM zum IDM. Dabei gibt die Steigung Auskunft über diesen Fehler. Außerdem ist dort eine Diskussion zum Ausgleich dieses Fehlers angeführt.



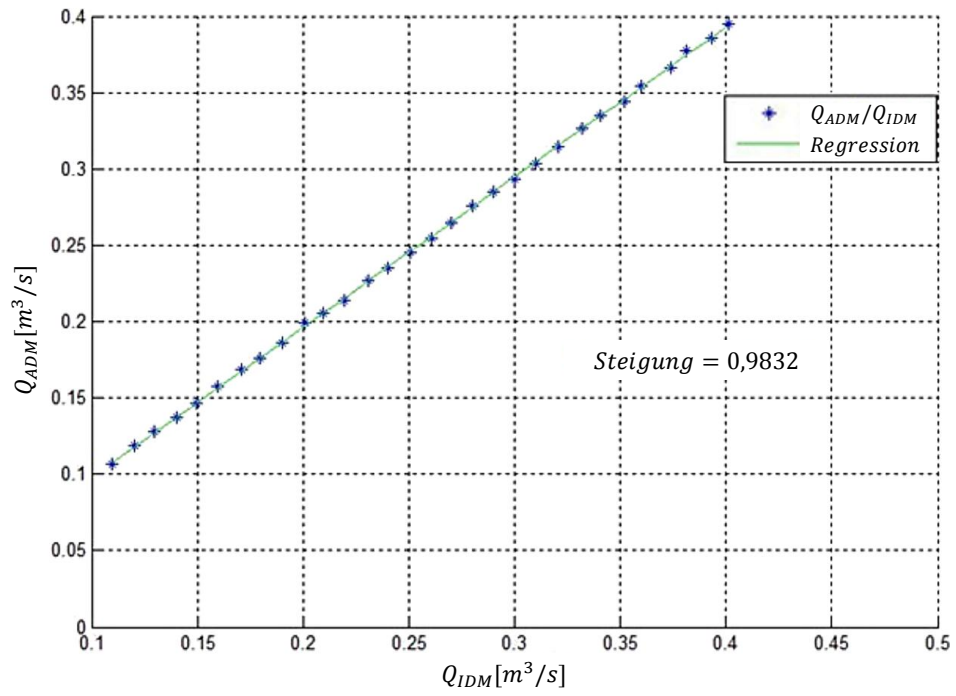


(a) Relativer Fehler.

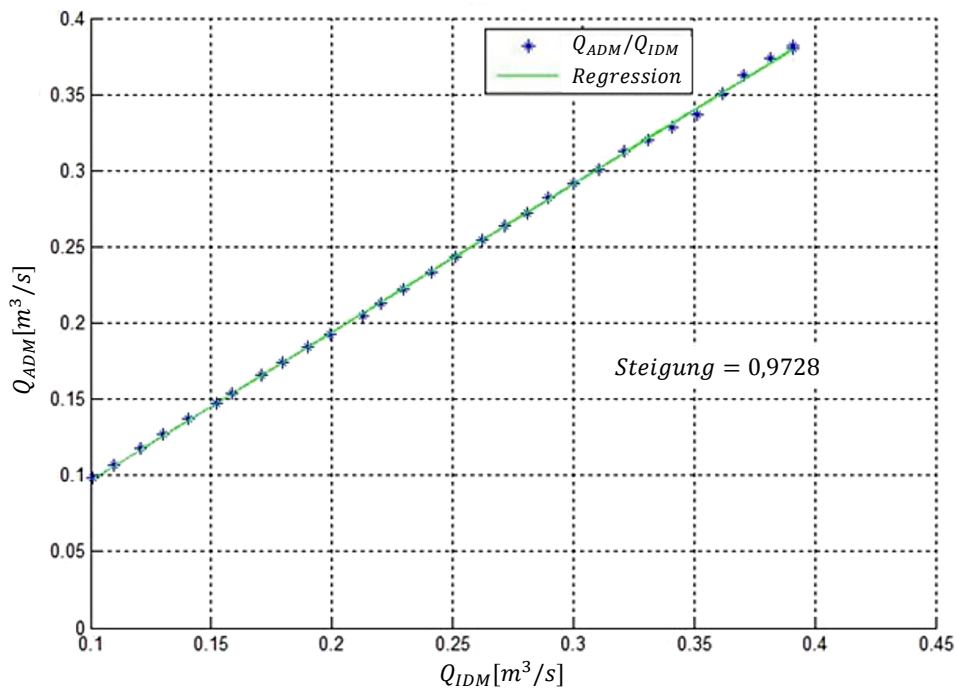


(b) Absoluter Fehler.

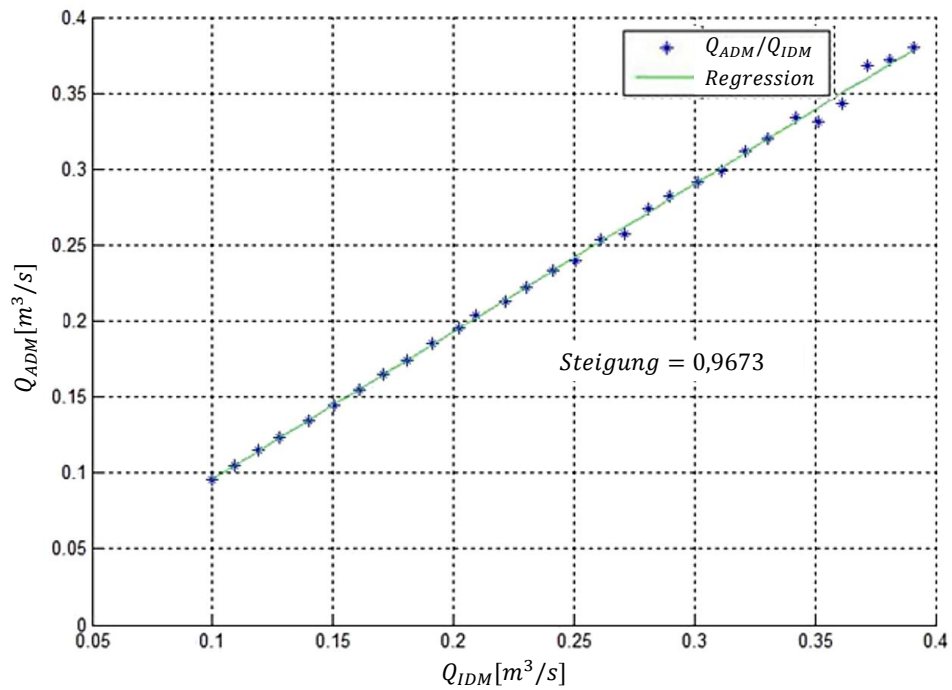
Abbildung 5.8.: Darstellung von relativem (a) und absolutem (b) Fehler der unterschiedlichen Anordnungen mit neuen Randbedingungen.



(a) Korrelation der W-Anordnung.



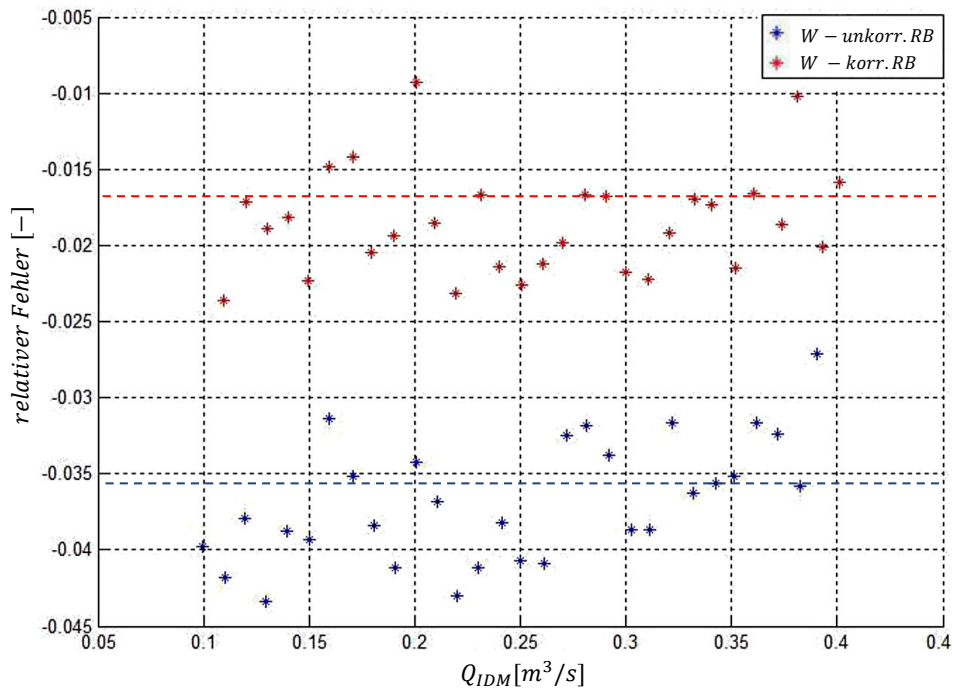
(b) Korrelation der V-Anordnung.



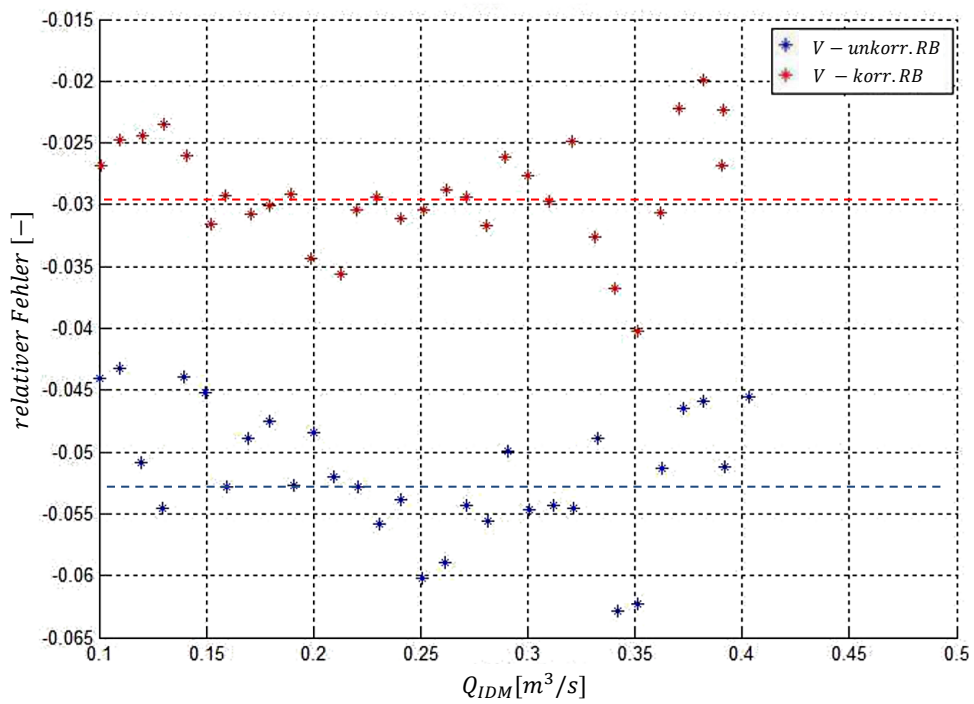
(c) Korrelation der Z-Anordnung.

Abbildung 5.9.: Darstellung der Korrelation zwischen IDM und ADM mit neuen Randbedingungen.

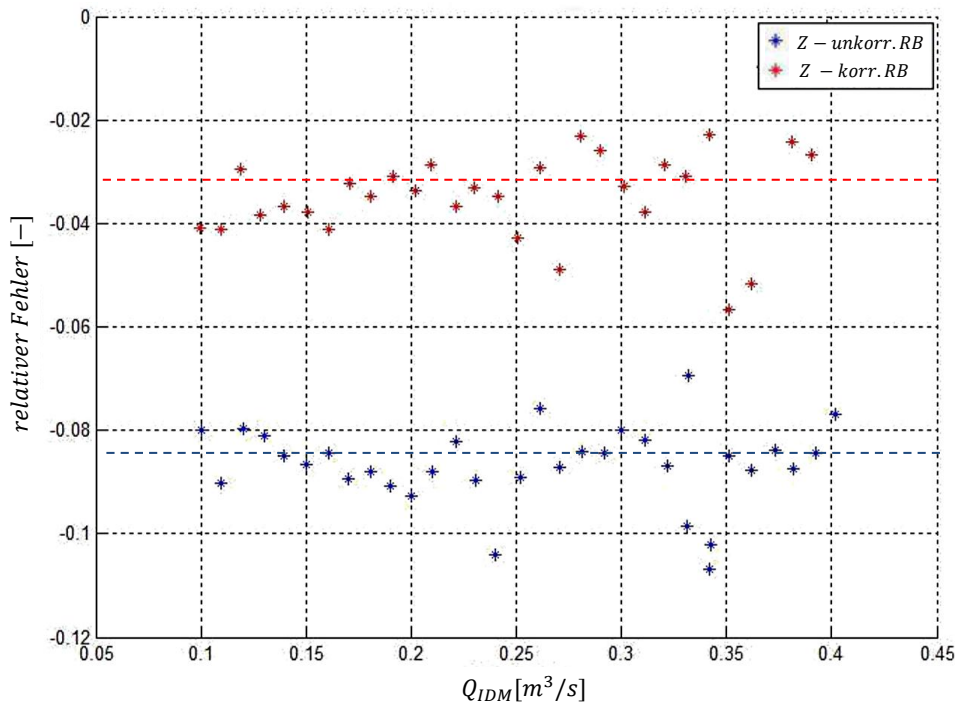
Die Abbildungen 5.10 geben einen direkten Vergleich zwischen den ursprünglichen und korrigierten Randbedingungen. Es ist zu erkennen, dass der relative Fehler stark reduziert wurde. Auffallend ist weiter, dass sich die Z-Anordnung am stärksten verbessert hat.



(a) Relative Abweichung der W-Anordnung.



(b) Relative Abweichung der V-Anordnung.



(c) Relative Abweichung der Z-Anordnung

Abbildung 5.10.: Die relativen Abweichungen bei den verschiedenen Anordnungen in Abhängigkeit von den Randbedingungen.

Allgemein ist eine deutliche Reduktion der Abweichungen von ADM zu IDM, an einem DN400 Rohr unter den korrigierten Randbedingungen zu erkennen. In weiterer Folge soll mit Hilfe eines Matlab-Tools versucht werden die systematischen Abweichungen zu erklären und im nächsten Schritt diese zu beseitigen. Außerdem werden im nachstehenden Kapitel 6 die Messunsicherheiten bei der ADM ganz allgemein diskutiert, um zu verstehen in welcher Genauigkeitsklasse Messungen unter gewissen Voraussetzungen möglich sind.

## 6. Messunsicherheit - Fehlerfortpflanzung

Es ist bei jeder Messung wichtig die Fehlerschranken anzugeben, damit nachvollzogen werden kann, wie aussagekräftig die Ergebnisse dieser sind. In diesem Abschnitt wird zuerst ganz allgemein die Herleitung für die Messunsicherheit und dann weiter die Anwendung auf eine bestimmte Messungen beschrieben. Dabei wird die Herleitung nach [10] geführt.

### 6.1. Grundlagen der Fehlerrechnung für die ADM

Einen Überblick über die berechneten Größen für die Messunsicherheit gibt die Grafik 6.1 für eine Z-Anordnung.

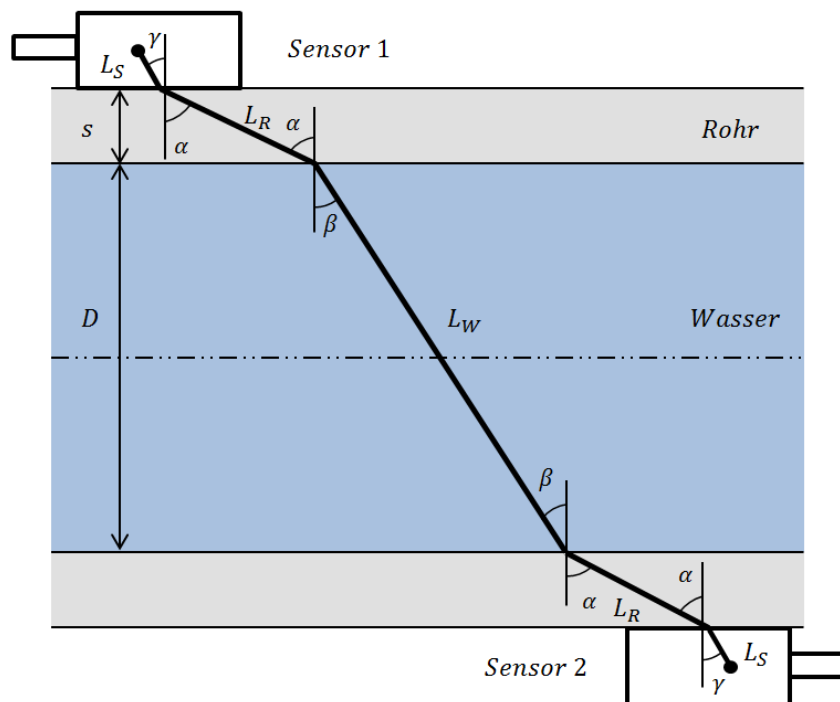


Abbildung 6.1.: Darstellung der Winkel, Pfadlängen und Brechungen bei einem Clamp-On Sensor.

Allgemein kann der Durchfluss indirekt aus den zwei gemessenen Größen: Fläche und Geschwindigkeit berechnet werden.

$$Q = \bar{U} \cdot A \quad (6.1)$$

Die Messung der Rohrfläche beziehungsweise der Geschwindigkeit erfolgt auf indirektem Weg, das heißt es werden andere Größen bestimmt und daraus die gesuchten Werte abgeleitet. Wenn alle Abweichungen als unabhängig voneinander, sowie deren Änderung mit linearen Gesetzmäßigkeiten beschrieben werden können, gilt das Gauss'sche Fehlerfortpflanzungsgesetz wie folgt nach [17] und [11]:

$$e_a = \sqrt{\left(\frac{\partial a}{\partial b} e_b\right)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial c} e_c\right)^2 + \dots} \quad (6.2)$$

Worin ganz allgemein  $e_a$  für die absolute Abweichung der zu errechnenden Größe und  $e_b$  beziehungsweise  $e_c$  für die Abweichungen der Einflussgrößen stehen. Diese Gleichung resultiert aus einer Taylorreihen-Entwicklung bis zum linearen Glied und anschließendem aufsummieren der quadratischen Fehler. Dies kommt zur Anwendung, wenn eine Fehlerschranke für die Durchflussmessung gesucht wird. Somit lässt sich die Messunsicherheit des Durchflusses  $e_Q$  aus den Abweichungen der Geschwindigkeit  $e_{\bar{U}}$  und der Fläche  $e_A$  bestimmen.

### Messunsicherheit der Fläche

Es gilt für eine kreisförmige Fläche die Formel 6.3.

$$A = \frac{D^2 \cdot \pi}{4} \quad (6.3)$$

woraus der Zusammenhang für die Unsicherheit der Fläche  $A$  mit der Gleichung 6.4 abgeschätzt werden kann.

$$e_A = \frac{D \cdot \pi}{2} \cdot e_D \quad (6.4)$$

Die Unsicherheit des Durchmessers  $e_D$  ergibt sich zu 1 mm wenn man davon ausgeht, dass das Rohr mit einem Messschieber vermessen wurde, allerdings eine gewisse Unrundheit vorhanden ist. Was zur Folge hat, dass die Fläche im System falsch berechnet wird, weil nur ein gemittelter Durchmesser und nicht mehrere Werte angegeben werden.

### Messunsicherheit der Geschwindigkeit

Bei der Bestimmung der Messunsicherheit der Geschwindigkeit erfolgt die Berechnung auf Basis der in der Einleitung hergeleiteten Zusammenhänge mit der Beziehung 6.5.

$$\bar{U} = \frac{L_w}{2 \cdot \sin(\beta)} \left( \frac{\Delta t}{t_{12} \cdot t_{21}} \right) \quad (6.5)$$

und daher ergibt sich die absolute Unsicherheit  $e_{\bar{U}}$  zu:

$$e_{\bar{U}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial L_w} e_{L_w}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial \beta} e_{\beta}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial \Delta t} e_{\Delta t}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial t_{12}} e_{t_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial t_{21}} e_{t_{21}}\right)^2} \quad (6.6)$$

Hierin müssen die einzelnen Unsicherheiten: Messstrecke im Wasser  $L_w$ , Brechungswinkel im Wasser  $\beta$ , Differenzzeit  $\Delta t$ , Laufzeit vorwärts und rückwärts  $t_{12}$  und  $t_{21}$ , erneut aus deren Abhängigkeiten bestimmt werden.

Die partiellen Ableitungen lauten wie folgt:

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial L_w} = \frac{\Delta t}{2 \sin(\beta) t_{12} t_{21}} \quad (6.7)$$

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial \beta} = -\frac{L_w \cos(\beta) \Delta t}{2 \cos(\beta)^2 t_{12} t_{21}} \quad (6.8)$$

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial \Delta t} = \frac{L_w}{\sin(\beta) t_{12} t_{21}} \quad (6.9)$$

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t_{12}} = -\frac{L_w \Delta t}{2 \sin(\beta) t_{12}^2 t_{21}} \quad (6.10)$$

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t_{21}} = -\frac{L_w \Delta t}{2 \sin(\beta) t_{12} t_{21}^2} \quad (6.11)$$

Also fehlen bei der Bestimmung von  $e_{\bar{U}}$ , noch die absoluten Abweichungen von den nachstehenden Größen.

### Messunsicherheit der Pfadlänge im Wasser

Die Schallstrecke im Wasser wird mit der Gleichung 6.12 beschrieben.

$$L_w = \frac{D}{\cos(\beta)} \quad (6.12)$$

Worin  $D$  dem Durchmesser und  $\beta$  dem Brechungswinkel im Wasser entsprechen. Der Winkel muss später noch abgeschätzt werden.

$$e_{L_w} = \sqrt{\left(\frac{\partial L_w}{\partial D} e_D\right)^2 + \left(\frac{\partial L_w}{\partial \beta} e_{\beta}\right)^2} \quad (6.13)$$



Die partiellen Ableitungen aus der Beziehung 6.12 eingesetzt, ergeben für die Messunsicherheit der Schallpfadlänge im Wasser:

$$e_{L_w} = \sqrt{\left(\frac{1}{\cos(\beta)}e_D\right)^2 + \left(\frac{D \tan(\beta)}{\cos(\beta)}e_\beta\right)^2} \quad (6.14)$$

Darin ist wiederum die Unsicherheit für den Winkel im Wasser  $\beta$  gesucht.

### Messunsicherheit des Pfadwinkels

Aus dem Snellius'schen Brechungsgesetz ergibt sich die Beziehung für den Brechungswinkel im Wasser  $\beta$ :

$$\frac{\sin(\gamma)}{\sin(\beta)} = \frac{c_{Sensor}}{c_{Wasser}} \quad (6.15)$$

Also folgt mit der Gauss'schen Fehlerfortpflanzung für die absolute Abweichung des Winkels  $\beta$ :

$$e_\beta = \sqrt{\left(\frac{\partial \beta}{\partial \gamma}e_\gamma\right)^2 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial c_{Wasser}}e_{c_{Wasser}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial c_{Rohr}}e_{c_{Sensor}}\right)^2} \quad (6.16)$$

Darin benötigt man die partiellen Ableitungen aus der Gleichung 6.15 die wie folgt dargestellt werden können:

$$\frac{\partial \beta}{\partial \gamma} = \frac{c_{Wasser} \cos(\gamma)}{c_{Sensor} \sqrt{(1 - (c_{Wasser}^2 \sin(\gamma)^2) / c_{Sensor}^2)}} \quad (6.17)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial c_{Wasser}} = \frac{\sin(\gamma)}{c_{Sensor} \sqrt{(1 - (c_{Wasser}^2 \sin(\gamma)^2) / c_{Sensor}^2)}} \quad (6.18)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial c_{Sensor}} = -\frac{\sin(\gamma) c_{Wasser}}{c_{Sensor}^2 \sqrt{(1 - (c_{Wasser}^2 \sin(\gamma)^2) / c_{Sensor}^2)}} \quad (6.19)$$

Diese in der Messunsicherheit für den Winkel  $\beta$  eingesetzt führt zum Ergebnis.

### Messunsicherheit der Schallgeschwindigkeit im Wasser

Die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit im Wasser kann mit der Formel 6.20 nach [8] bestimmt werden, wenn der Einfluss des Salzgehaltes vernachlässigt wird.

$$c_{Wasser} = 1402,39 + 0,156p + 5,011T - 0,05509T^2 + 0,0002215T^3 \quad (6.20)$$

Darin sind der relative Druck  $p$  in *bar* und die Temperatur  $T$  in °C einzusetzen. Außerdem ist zu beachten, dass der relative Druck zwischen 0-50 *bar* sowie die Temperatur zwischen 2-40 °C liegen müssen, damit diese Formel ihre Gültigkeit behält. Es folgt daraus die Gleichung für die Unsicherheit der Schallgeschwindigkeit im Wasser zu 6.21:

$$e_{c_{Wasser}} = \sqrt{\left(\frac{\partial c_{Wasser}}{\partial p} e_p\right)^2 + \left(\frac{\partial c_{Wasser}}{\partial T} e_T\right)^2} \quad (6.21)$$

Worin die absolute Messunsicherheit des Druckes  $e_p$  am Prüfstand auf 0,01 *bar* und der Temperatur auf 0,1 °C genau bestimmbar sind. Die partiellen Ableitungen in die Gleichung 6.21 eingesetzt ergibt die absolute Unsicherheit für die Schallgeschwindigkeit. (Siehe Formel 6.22)

$$e_{c_{Wasser}} = \sqrt{(0,156e_p)^2 + ((5,011 - 0,11018T + 0,0006645T^2)e_T)^2} \quad (6.22)$$

Eine Darstellung in welcher Größenordnung sich  $c_{Wasser}$  ändert ist in Abbildung 6.2 zu ersehen.

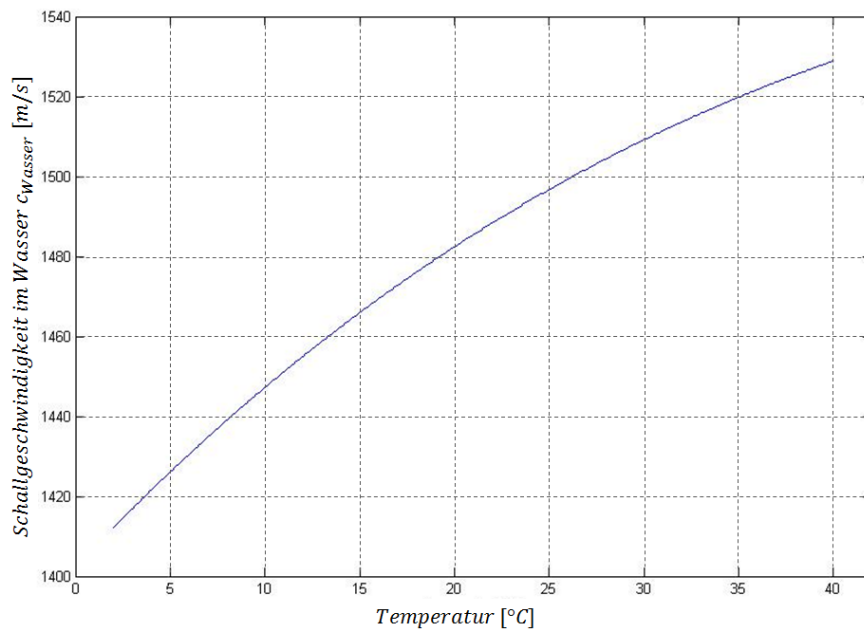


Abbildung 6.2.: Änderung der Schallgeschwindigkeit im Wasser mit der Temperatur bei konstantem Druck.

### Messunsicherheit der Laufzeiten

Geht man davon aus dass die Taktrate des Messgerätes 50 MHz entspricht, so kann aus dem Reziprokwert ( $f = 1/T$ ) eine Zeit von 20 ns bestimmt werden, welche maximal

detektiert wird. Da sich die Differenzlaufzeit  $\Delta t$  aber durchaus bei kleinen Rohrdurchmessern beziehungsweise kurzen Pfadlängen in diesem Bereich bewegen, muss auch diese Abweichung in die Messunsicherheit miteinbezogen werden. Das heißt für die absolute Messunsicherheit von  $\Delta t$  wird ein Wert von  $20 \cdot 10^{-9}$  s angenommen. Bei der Auswertung der Fehlerschranken für die Messung am DN400 Rohr, wird dieses Thema noch einmal aufgegriffen und genauere Auswirkungen diskutiert.

Die Differenzlaufzeiten im Wasser  $t_{12}$  und  $t_{21}$  berechnen sich wie folgt aus der gesamten Zeitdifferenzen:

$$t_{12} = t_{ges12} - (2t_{Rohr} + 2t_{Kabel} + 2t_{Sensor}) \quad (6.23)$$

$$t_{21} = t_{ges21} - (2t_{Rohr} + 2t_{Kabel} + 2t_{Sensor}) \quad (6.24)$$

Die Messunsicherheiten in den Kabeln und den Sensoren sind so gering, dass sie an dieser Stelle vernachlässigt werden [10]. Also ergibt sich für die Unsicherheiten  $t_{12}$  und  $t_{21}$  wieder die bekannte Formel:

$$e_{t_{12}} = \sqrt{\left(\frac{\partial t_{12}}{\partial t_{ges12}} e_{t_{ges12}}\right)^2 + \left(\frac{\partial t_{12}}{\partial t_{Rohr}} e_{t_{Rohr}}\right)^2} \quad (6.25)$$

$$e_{t_{21}} = \sqrt{\left(\frac{\partial t_{21}}{\partial t_{ges21}} e_{t_{ges21}}\right)^2 + \left(\frac{\partial t_{21}}{\partial t_{Rohr}} e_{t_{Rohr}}\right)^2} \quad (6.26)$$

In diese die partiellen Ableitungen eingesetzt, ergibt Gleichung 6.27 und 6.28.

$$e_{t_{12}} = \sqrt{e_{t_{ges12}}^2 + 4e_{t_{Rohr}}^2} \quad (6.27)$$

$$e_{t_{21}} = \sqrt{e_{t_{ges21}}^2 + 4e_{t_{Rohr}}^2} \quad (6.28)$$

Für die Messunsicherheit der gesamten Laufzeiten  $t_{ges}$  ergibt sich ein Wert von  $10^{-7}$  Sekunden nach [10].

Weiter berechnet sich die Zeit im Rohr aus dessen Wandstärke  $s$ , dem Brechungswinkel  $\alpha$  und der Schallgeschwindigkeit in der Rohrwand, also dem Material. Letztere bestimmt man aus dem Zusammenhang 6.29 mit dem Schubmodul  $G$  und der Dichte  $\rho$ .

$$c_{Rohr} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (6.29)$$

Allerdings können abhängig von der Lackierung des Materials und dessen Stärke unterschiedlichste Bedingungen auftreten. Außerdem kennt man meist nicht die genaue Zusammensetzung des Materials und so wird nach [10] eine absolute Unsicherheit für

$c_{Rohr}$  von  $\pm 100$  m/s empfohlen. Für die Laufzeit in der Rohrwand ergibt sich mit Gleichung 6.30 die Beziehung 6.31 für die Messunsicherheit.

$$e_{t_{Rohr}} = \frac{s}{\cos(\alpha) \cdot c_{Rohr}} \quad (6.30)$$

$$e_{t_{Rohr}} = \sqrt{\left(\frac{1}{\cos(\alpha) \cdot c_{Rohr}} e_s\right)^2 + \left(\frac{-s}{\cos(\alpha) \cdot c_{Rohr}^2} e_{c_{Rohr}}\right)^2 + \left(\frac{s \cdot \sin(\alpha)}{\cos(\alpha)^2 \cdot c_{Rohr}} e_\alpha\right)^2} \quad (6.31)$$

Hierin muss noch  $e_\alpha$  bestimmt werden, was wieder über den Brechungsansatz, nur diesmal zwischen dem Sensor und dem Rohr, gelingt. Die Gleichung dafür resultiert aus der Fehlerfortpflanzung in 6.32.

$$e_\alpha = \sqrt{\left(\frac{\partial \alpha}{\partial \gamma} e_\gamma\right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial c_{Sensor}} e_{c_{Sensor}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial c_{Rohr}} e_{c_{Rohr}}\right)^2} \quad (6.32)$$

Dabei benötigt man die partiellen Ableitungen aus der Gleichung für die Brechung:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \gamma} = \frac{c_{Rohr} \cos(\gamma)}{c_{Sensor} \sqrt{(1 - (c_{Rohr}^2 \sin(\gamma)^2) / c_{Sensor}^2)}} \quad (6.33)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial c_{Rohr}} = \frac{\sin(\gamma)}{c_{Sensor} \sqrt{(1 - (c_{Rohr}^2 \sin(\gamma)^2) / c_{Sensor}^2)}} \quad (6.34)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial c_{Sensor}} = -\frac{\sin(\gamma) c_{Rohr}}{c_{Sensor}^2 \sqrt{(1 - (c_{Rohr}^2 \sin(\gamma)^2) / c_{Sensor}^2)}} \quad (6.35)$$

Diese in der Messunsicherheit für den Winkel  $\alpha$ , also die Gleichung 6.32 eingesetzt, führt zum Ergebnis.

Aus den oben beschriebenen Zusammenhängen und Abweichungen sind die Unsicherheit für Geschwindigkeit und Fläche beziehungsweise den Durchfluss gegeben.

### Berechnungsanleitung

Zusammenfassend ist an dieser Stelle noch einmal eine schrittweise Berechnungsvorschrift angegeben. Siehe dazu die Darstellung 6.3, in der in rot die Abhängigkeiten des Durchflusses von der Geschwindigkeitsbestimmung und in blau jene von der Fläche angegeben sind. Es ist ersichtlich, dass die meisten Unsicherheiten bei der Ermittlung der Geschwindigkeit auftreten, da dabei sehr viele Einflussfaktoren berücksichtigt werden müssen.

1) Durchfluss:  $Q = \bar{U} \cdot A$   $e_Q = \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial \bar{U}} e_{\bar{U}}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial A} e_A\right)^2}$

2) Geschwindigkeit:  $\bar{U} = \frac{L_w}{2 \cdot \sin(\beta)} \left(\frac{\Delta t}{t_{12} \cdot t_{21}}\right)$  → 2) Fläche:  $A = \frac{D^2 \cdot \pi}{4}$   $e_A = \frac{D\pi}{2} \cdot e_D$

$e_{\bar{U}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial L_w} e_{L_w}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial \beta} e_{\beta}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial \Delta t} e_{\Delta t}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial t_{12}} e_{t_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial t_{21}} e_{t_{21}}\right)^2}$

3) Wasserpfadlänge:  $L_w = \frac{D}{\cos(\beta)}$   $e_{L_w} = \sqrt{\left(\frac{1}{\cos(\beta)} e_D\right)^2 + \left(\frac{D \tan(\beta)}{\cos(\beta)} e_{\beta}\right)^2}$

3) Laufzeiten:  $e_{t_{12}} = \sqrt{e_{t_{ges12}}^2 + 4e_{t_{Rohr}}^2}$   $e_{t_{21}} = \sqrt{\left(\frac{\partial t_{12}}{\partial t_{ges12}} e_{t_{ges12}}\right)^2 + \left(\frac{\partial t_{12}}{\partial t_{Rohr}} e_{t_{Rohr}}\right)^2}$

$e_{t_{21}} = \sqrt{e_{t_{ges21}}^2 + 4e_{t_{Rohr}}^2}$   $e_{t_{21}} = \sqrt{\left(\frac{\partial t_{21}}{\partial t_{ges21}} e_{t_{ges21}}\right)^2 + \left(\frac{\partial t_{21}}{\partial t_{Rohr}} e_{t_{Rohr}}\right)^2}$

4) Brechungswinkel Wasser:  $\frac{\sin(\gamma)}{\sin(\beta)} = \frac{c_{Sensor}}{c_{Wasser}}$   $e_{\beta} = \sqrt{\left(\frac{\partial \beta}{\partial \gamma} e_{\gamma}\right)^2 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial c_{Wasser}} e_{c_{Wasser}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial c_{Rohr}} e_{c_{Sensor}}\right)^2}$

4) Rohrlaufzeit:  $e_{t_{Rohr}} = \frac{s}{\cos(\alpha) \cdot c_{Rohr}}$

$e_{t_{Rohr}} = \sqrt{\left(\frac{1}{\cos(\alpha) \cdot c_{Rohr}} e_s\right)^2 + \left(\frac{-s}{\cos(\alpha) \cdot c_{Rohr}^2} e_{c_{Rohr}}\right)^2 + \left(\frac{s \cdot \sin(\alpha)}{\cos(\alpha)^2 \cdot c_{Rohr}} e_{\alpha}\right)^2}$

5) Schallgeschwindigkeit:  $e_{c_{Wasser}} = \sqrt{(0,156e_p)^2 + ((5,011 - 0,11018T + 0,0006645T^2)e_T)^2}$

5) Brechungswinkel Rohr:  $e_{\alpha} = \sqrt{\left(\frac{\partial \alpha}{\partial \gamma} e_{\gamma}\right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial c_{Sensor}} e_{c_{Sensor}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial c_{Rohr}} e_{c_{Rohr}}\right)^2}$

Abbildung 6.3.: Übersicht der Fehlerberechnung bei der ADM mit Clamp-On Sensoren.

## 6.2. Auswertung für die Messung im Labor

Die Berechnung der Messunsicherheit des Durchflusses am DN400 Rohr soll exemplarisch mit den nachstehenden Zahlenwerten dargestellt werden. Dabei sind die absoluten Messunsicherheiten und dierestlichen Angaben der Tabelle 6.1 zu entnehmen.

Tabelle 6.1.: Absolute Messfehler bei der ADM und Rechenwerte am Beispiel für ein DN400 Rohr.

| <i>Annahmen</i>  |   |
|--|---|
| $s = 0,00619 \text{ m}$  | $e_D = 0,001 \text{ m}$                     |
| $\alpha = 52,805^\circ$  | $e_s = 0,0005 \text{ m}$                    |
| $\beta = 21,510^\circ$   | $e_T = 1^\circ \text{C}$                    |
| $\gamma = 38,612^\circ$  | $e_p = 10000 \text{ Pa}$                    |
| $c_{Wasser} = 1496,6 \text{ m/s}$  | $e_{\Delta T} = 20 \cdot 10^{-9} \text{ s}$ |
| $c_{Rohr} = 3255 \text{ m/s}$  | $e_{t_{ges}} = 10^{-7} \text{ s}$           |
| $c_{Sensor} = 2550 \text{ m/s}$  | $e_{c_{Rohr}} = 200 \text{ m/s}$            |
| <i>Temperatur</i> = 25,6 °C  | $e_{c_{Sensor}} = 50 \text{ m/s}$           |
| <i>Sensorabstand</i> = 0,331614 m  | $e_\gamma = 0,1^\circ$                      |
| $v_{proji} = 1 \text{ m/s} \Leftrightarrow Q = 0,342 \text{ m}^3/\text{s}$ | $D = 0,4 \text{ m}$                         |

### Absolute Abweichung der Fläche

Für die absolute Abweichung bei der Fläche ergibt sich somit aus der nachstehenden Gleichung mit einem Durchmesser von  $D = 0,4 \text{ m}$ :

$$e_A = \frac{D \cdot \pi}{2} \cdot e_D = \frac{0,4 \cdot \pi}{2} \cdot 0,001 = 6,2832 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

### Absolute Abweichung der Geschwindigkeit

Die Bestimmung der Messunsicherheit der Strömungsgeschwindigkeit ist dagegen etwas aufwändiger und daher sind die Ergebnisse nach den im vorigen Kapitel abgeleiteten Formeln mit *Matlab* bestimmt. Es ergeben sich mit den Angaben bei der schrittweisen Berechnung die Unsicherheiten wie folgt.

### Absolute Abweichung des Winkels im Rohr

$$\begin{aligned}
 e_{\alpha} &= \sqrt{\left(\frac{\partial \alpha}{\partial \gamma} e_{\gamma}\right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial c_{Rohr}} e_{c_{Rohr}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial c_{Sensor}} e_{c_{Sensor}}\right)^2} \\
 &= \sqrt{(0,0144)^2 + (0,0810)^2 + (-0,0258)^2} \\
 &= 0,0862 \text{ rad}
 \end{aligned}$$

### Absolute Abweichung der Laufzeit im Rohr

Mit der absoluten Abweichung des Winkels im Rohr ergibt sich die Unsicherheit der Laufzeit im Rohr.

$$\begin{aligned}
 e_{t_{Rohr}} &= \sqrt{\left(\frac{1}{\cos(\alpha) \cdot c_{Rohr}} e_s\right)^2 + \left(\frac{-s}{\cos(\alpha) \cdot c_{Rohr}^2} e_{c_{Rohr}}\right)^2 + \left(\frac{s \cdot \sin(\alpha)}{\cos(\alpha)^2 \cdot c_{Rohr}} e_{\alpha}\right)^2} \\
 &= \sqrt{(5,082 \cdot 10^{-7})^2 + (-1,933 \cdot 10^{-7})^2 + (3,573 \cdot 10^{-7})^2} \\
 &= 6,506 \cdot 10^{-7} \text{ s}
 \end{aligned}$$

### Absolute Abweichung der Laufzeit im Wasser

Für die vorwärts, sowie rückwärts gemessenen Laufzeiten im Wasser berechnet sich die Messunsicherheit zu:

$$e_{t_{12}} = \sqrt{e_{t_{ges12}}^2 + 4e_{t_{Rohr}}^2} = 2,604 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

$$e_{t_{21}} = \sqrt{e_{t_{ges21}}^2 + 4e_{t_{Rohr}}^2} = 2,604 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

### Absolute Abweichungen im Wasser

Mit der Temperatur T (in °C) und dem Druck p (in bar) folgt der absolute Fehler der Wasserschallgeschwindigkeit.

$$\begin{aligned}
 e_{cW_{asser}} &= \sqrt{(0,156e_p)^2 + ((5,011 - 0,11018T + 0,0006645T^2)e_T)^2} \\
 &= 2,703 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

Im nächsten Schritt wird der Winkel-

$$\begin{aligned}
 e_\beta &= \sqrt{\left(\frac{\partial\beta}{\partial\alpha}e_\alpha\right)^2 + \left(\frac{\partial\beta}{\partial cW_{asser}}e_{cW_{asser}}\right)^2 + \left(\frac{\partial\beta}{\partial c_{Sensor}}e_{c_{Sensor}}\right)^2} \\
 &= \sqrt{(0,0043)^2 + (0,00071076)^2 + (-0,0077)^2} \\
 &= 0,0089 \text{ rad}
 \end{aligned}$$

und der Pfadlängenfehler berechnet.

$$\begin{aligned}
 e_{L_w} &= \sqrt{\left(\frac{1}{\cos(\beta)}e_D\right)^2 + \left(\frac{D\tan(\beta)}{\cos(\beta)}e_\beta\right)^2} \\
 &= \sqrt{(0,0011)^2 + (0,0015)^2} \\
 &= 0,0018 \text{ m}
 \end{aligned}$$

### Absolute Abweichung der Geschwindigkeit

Es sind dadurch alle Abweichungen zur Bestimmung des gesamten absoluten Fehlers der Geschwindigkeit bekannt. Die bestimmten Werte in die Gleichung für die Abweichung der Geschwindigkeit  $e_{\bar{U}}$  eingesetzt, ergibt das Ergebnis.

$$\begin{aligned}
 e_{\bar{U}} &= \sqrt{\left(\frac{\partial\bar{U}}{\partial L_w}e_{L_w}\right)^2 + \left(\frac{\partial\bar{U}}{\partial\beta}e_\beta\right)^2 + \left(\frac{\partial\bar{U}}{\partial\Delta t}e_{\Delta t}\right)^2 + \left(\frac{\partial\bar{U}}{\partial t_{12}}e_{t_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\partial\bar{U}}{\partial t_{21}}e_{t_{21}}\right)^2} \\
 &= \sqrt{(3,428 \cdot 10^{-5})^2 + (0,0038)^2 + (0,005)^2 + (0,00015242)^2 + (0,00015242)^2} \\
 &= 0,0955 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$



Bezieht man den berechneten absoluten Fehler  $e_{\bar{U}}$  auf die tatsächliche Geschwindigkeit  $\bar{U}$ , dann ergibt sich die relative Abweichung  $f_{\bar{U}}$ , wie in der Gleichung 6.36.

$$f_{\bar{U}} = \frac{e_{\bar{U}}}{\bar{U}} = 0,035 \quad (6.36)$$

Diese wendet man weiter auf den Durchfluss an.

### **Absolute Abweichung des gemessenen Durchflusses**

Mit den bestimmten Größen kann auf den Fehler im Durchfluss geschlossen werden.

$$\begin{aligned} e_Q &= \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial A} e_A\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial \bar{U}} e_{\bar{U}}\right)^2} \\ &= \sqrt{(\bar{U} \cdot e_A)^2 + (A \cdot e_{\bar{U}})^2} \\ &= \sqrt{(0,0017)^2 + 0,00014416^2} \\ &= 0,0121 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

Es bestimmt sich die relative Abweichung  $f_Q$  aus Gleichung 6.37 mit der absoluten Abweichung  $e_Q$  und dem Durchfluss  $Q = 0,342 \text{ m}^3/\text{s}$  für diesen Betriebspunkt zu:

$$f_Q = \frac{e_Q}{Q} = 0,0354 \quad (6.37)$$

Es ist ersichtlich, dass sich die Abweichung des Durchflusses mit den gewählten Werten in einem durchaus realistischen Rahmen bewegt. Außerdem erkennt man die starke Abhängigkeit von der Unsicherheit in der Geschwindigkeit welche beide für die gewählte Anordnung zirka 3,5% betragen. Dies spiegelt auch die Ergebnisse der ersten Messung wieder, welche im vorigen Kapitel diskutiert wurden. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist in der Tabelle 6.2 dargestellt.

In weiterer Folge werden die Auswirkungen einzelner Parameter auf die Unsicherheit in der Bestimmung des Durchflusses diskutiert, um ein besseres Verständnis für die Genauigkeitsanforderungen bei der ADM zu bekommen. Außerdem sollen unterschiedliche Anordnungen variiert werden.

Allgemein sei noch festgehalten, dass durch die Abhängigkeiten von sehr vielen Parametern bei der Messung mit einem Clamp-On Verfahren nicht die Genauigkeiten wie bei einer innen liegenden Ultraschall Messung erreichbar sind. Durch die sensiblen Abhängigkeiten von den Rohrdaten, wie dem Innendurchmesser, der Wandstärke, oder der Schallgeschwindigkeit im Rohr, welche oft nicht genau bestimmbar sind, erhöht sich diese Unsicherheiten noch weiter.

Tabelle 6.2.: Ergebnisse der absoluten Messfehler der ADM für einen Betriebspunkt.

| <i>Ergebnisse</i>                                     |  |
|---|--|
| $e_A = 6,2832 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$              | $e_\alpha = 0,0862 \text{ rad}$              |
| $e_{t_{\text{Rohr}}} = 6,506 \cdot 10^{-7} \text{ s}$ | $e_{t_{12}} = 2,604 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ |
| $e_{t_{21}} = 2,604 \cdot 10^{-6} \text{ s}$          | $e_{c_{\text{Wasser}}} = 2,703 \text{ m/s}$  |
| $e_\beta = 0,0089 \text{ rad}$                        | $e_{L_w} = 0,0018 \text{ m}$                 |
| $e_{\bar{U}} = 0,0955 \text{ m/s}$                    | $e_Q = 0,0121 \text{ m}^3/\text{s}$          |
| $f_{\bar{U}} = 0,035$                                 | $f_Q = 0,0354$                               |

### 6.3. Einflussgrößen auf die Messunsicherheit bei der ADM

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Einflussgrößen auf die Durchflussmessung, mit den im vorigen Kapitel beschriebenen Randbedingungen, variiert. Dabei werden alle Parameter konstant gehalten, und eine Größe geändert. In den nachstehenden Darstellungen sind diese Einflüsse dargestellt und diskutiert. Außerdem findet sich im Appendix B eine genauere Darstellung der Fehlerschranken.

#### Unsicherheit in der Strömungsgeschwindigkeit

In Abbildung 6.4 ist ersichtlich, dass Strömungsgeschwindigkeiten unter 2 m/s einen großen Einfluss auf die Genauigkeit der Messung haben. Dies ist mit der Tatsache zu erklären, dass bei geringen Geschwindigkeiten die Laufzeitdifferenzen kürzer werden. Dieses Argument gilt auch für den Unterschied bei den Pfadanordnungen zueinander. Die W-Anordnung ist deutlich weniger empfindlich auf geringe Geschwindigkeiten als die Z-Anordnung, da die Pfadlänge im Wasser auch viermal so lang ist wodurch sich der Einfluss der Strömung auf die Zeitdifferenzen länger bemerkbar macht.

#### Unsicherheit in der Rohrgeometrie

In Darstellung 6.5 ist zu erkennen, dass die Unsicherheit im Durchmesser alleine einen großen Einfluss auf die Genauigkeit der Durchflussbestimmung hat, sobald ein Wert von 0,001 m überschritten wird. Der angenommene Wert von 0,001 m ist durchaus realistisch für ein DN400 Rohr und liegt genau an der Grenze zu größeren Unsicherheiten hin. Die Variation über die Wandstärke ist hier nicht dargestellt, da sie einen sehr ähnlichen Zusammenhang liefert.

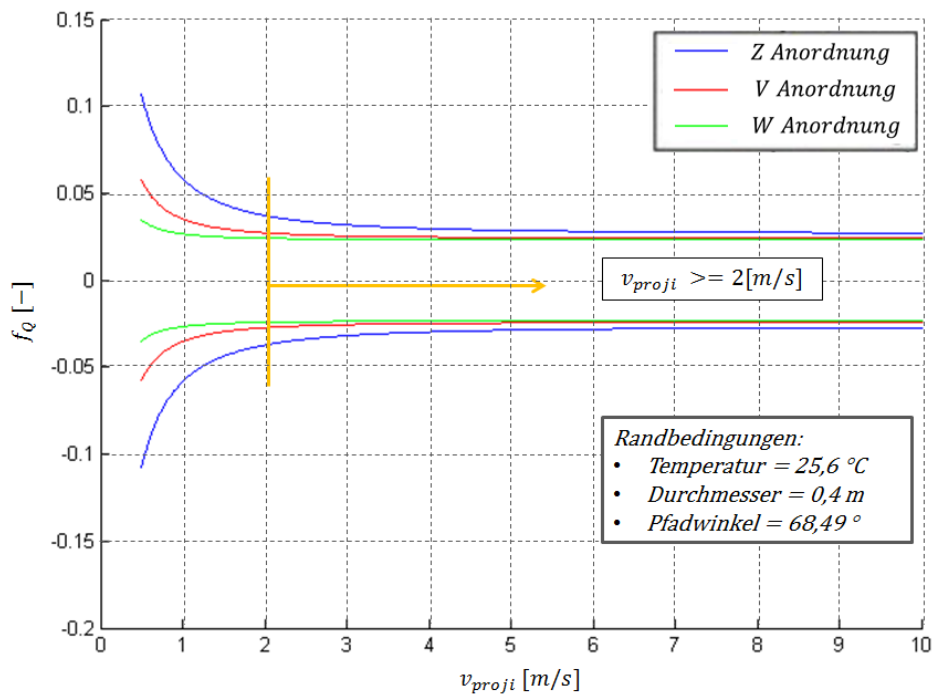


Abbildung 6.4.: Veränderung der Strömungsgeschwindigkeit im DN400 Rohr bei unterschiedlichen Messanordnungen.

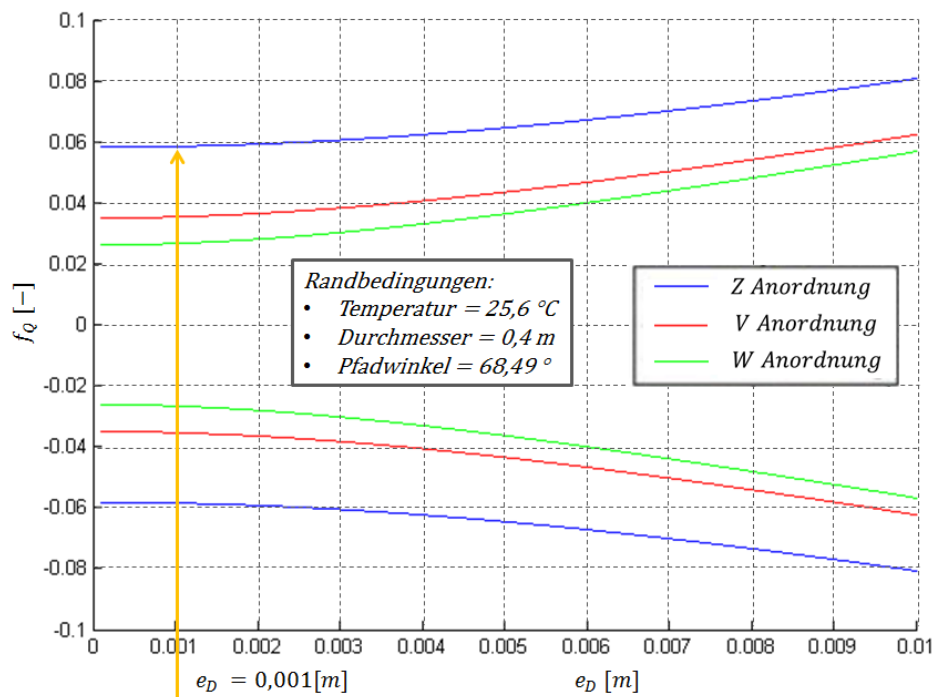


Abbildung 6.5.: Einfluss der absoluten Abweichung in der Durchmesserbestimmung, auf die Messung des Durchflusses an einem Rohr DN400.

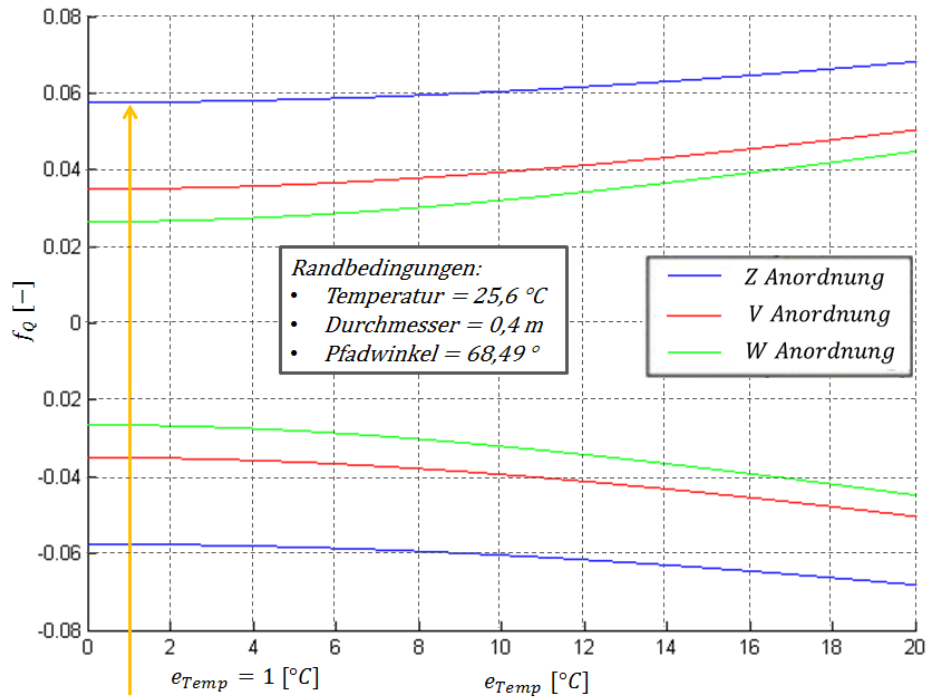


Abbildung 6.6.: Temperatureinfluss auf die Unsicherheit bei der Bestimmung des Durchflusses.

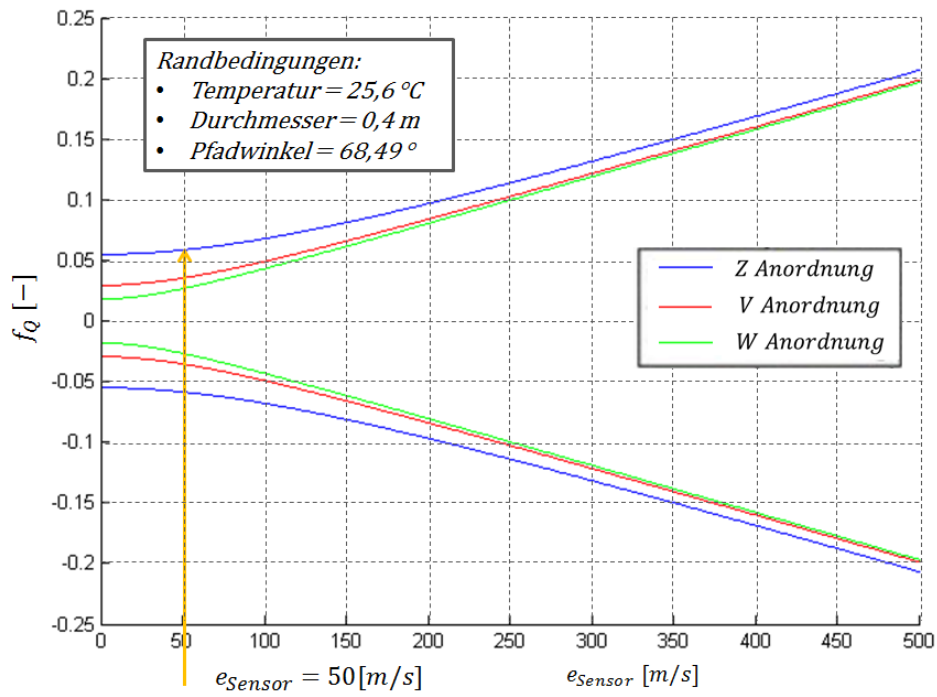
### Unsicherheit in der Temperaturbestimmung

Aus der Abbildung 6.6 folgt ein geringer Einfluss der Temperaturbestimmung auf den Durchfluss, sofern man auf 2 °C genau messen kann. Wird eine Temperatur sehr ungenau gemessen, oder gar nicht bestimmt, so muss man mit größeren Abweichungen beziehungsweise Unsicherheiten rechnen. Interessant ist auch die unterschiedliche Abhängigkeit der Anordnungen von der Temperatur. Es zeigt sich, dass die Z-Anordnung am robustesten gegen Temperaturunsicherheiten ist, was mit der kürzesten Wasserpfadlänge und somit der geringsten Abhängigkeit von der Schallgeschwindigkeit im Wasser zu erklären ist.

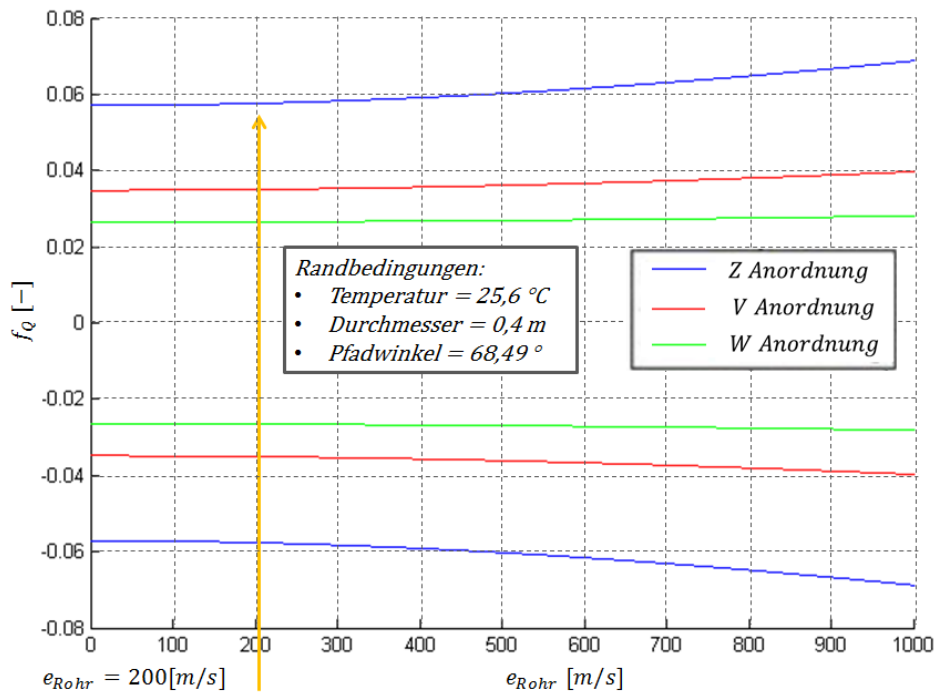
### Unsicherheit in den Schallgeschwindigkeiten

Um die exakte Schallgeschwindigkeit im Rohr zu bestimmen bedarf es der genauen Kenntnis des Materials. In der Angabe dieser Unsicherheit steckt somit ein großes Fehlerpotenzial, da bei Messungen in Kraftwerken sehr selten eine präzise Angabe gemacht werden kann. Clamp-On Sensoren kommen oft zur Anwendung, wenn eine Kontrolle eines Durchflusses durchgeführt werden soll. Dadurch ergibt sich die Situation, dass diese beim Bau der Anlage noch nicht berücksichtigt und die Messung erst im Nachhinein erfolgt.

Im dargestellten Beispiel 6.7 wurden relativ große Unsicherheiten angenommen. Der



(a) Änderung der Unsicherheit der Schallgeschwindigkeit im Sensor.



(b) Änderung der Unsicherheit der Schallgeschwindigkeit im Rohr.

Abbildung 6.7.: Auswirkung von ungenauer Bestimmung der Schallgeschwindigkeit im Sensor (a) und im Rohr (b).

Einfluss von großen Unsicherheiten bei der Variation der Sensorschallgeschwindigkeit zeigt wie wichtig eine eindeutige Kenntnis dieser Größe ist. Die angegebene Unsicherheit von 50 m/s ist aber angemessen, da die Hersteller oft keine genauen Daten bereitstellen, beziehungsweise sehr spärlich Informationen Preis geben.

### Unsicherheit in der Zeitnehmung

In den Darstellungen 6.8 a und b, ist der Zusammenhang zwischen relativem Fehler im Durchfluss und der Genauigkeit in der Zeitnehmung gegeben. Dabei resultiert aus einer ungenauen Zeitmessung ein erheblicher Fehler in der Durchflussbestimmung. Gerade bei der Messung der Differenzzeiten  $e_{\Delta t}$  ergibt sich eine starke Reduktion der Genauigkeit. Diese Zeit ist durch die Taktrate des Messgerätes bestimmt, was bei den verwendeten Sensoren eine Frequenz von 50 MHz bedeutet. Dass eine Reduktion der absoluten Unsicherheit in der Zeitnahme keine wesentliche Verbesserung bringt, weil man schon am unteren Ende der absoluten Unsicherheit ist, wäre ein falscher Schluss Bezug nehmend zur Darstellung 6.8, da darin lediglich ein Parameter variiert wurde. An dieser Stelle sei ein kurzer Einschub zum Thema „interne Taktrate“ angegeben.

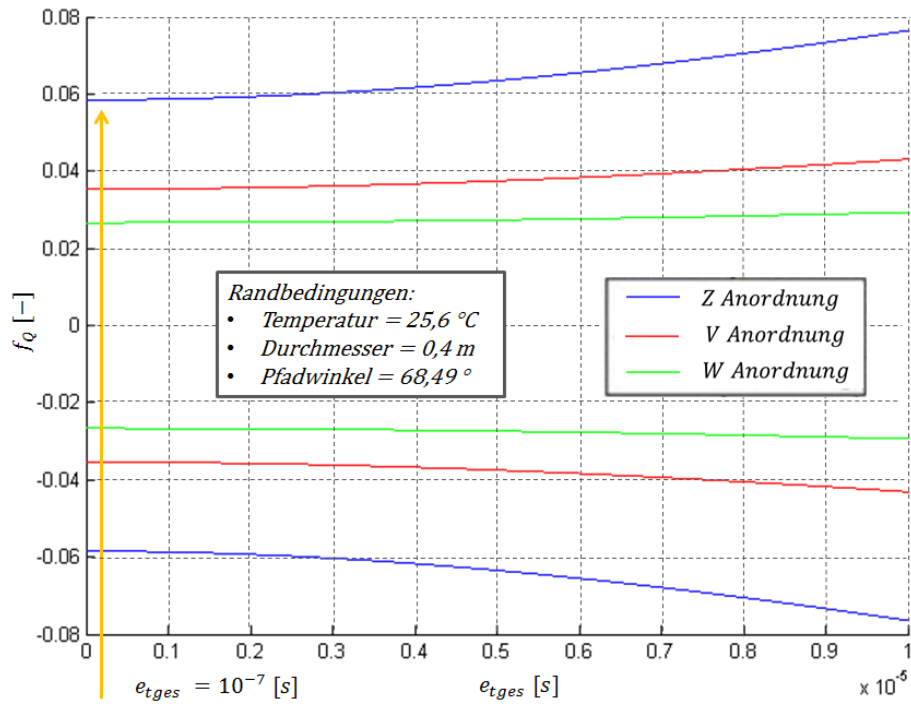
### Interne Taktrate

Die Taktrate des Messgerätes bestimmt die maximale Auflösung mit welchem das Messsystem ein Signal detektieren kann. Das bedeutet bei einer Frequenz von 50 MHz folgt eine Auflösung von 20 ns als kleinster Zeitschritt mit dem Zusammenhang  $f = 1/T$ . Das bedeutet, dass Werte unter dieser Zeit nicht mehr exakt aufgelöst werden und somit erfolgt eine unerwünschte Diskretisierung. Man spricht in diesem Zusammenhang deshalb auch vom Diskretisierungsfehler. In der Abbildung 6.9 erkennt man einen solchen Fehler bei einer Laufzeitmessung. Dabei wird einmal die Vorwärts- und einmal die Rückwärtszeit ermittelt und mit dem definierten Zeitschritt diskretisiert. Es ist ersichtlich, dass bei steigenden Strömungsgeschwindigkeiten die Differenz der Laufzeit größer wird. Außerdem kann bei den unterschiedlichsten Geschwindigkeiten eine Diskretisierung erfolgen, bei der sich die wahren und die unterteilten Werte exakt treffen, oder nicht.

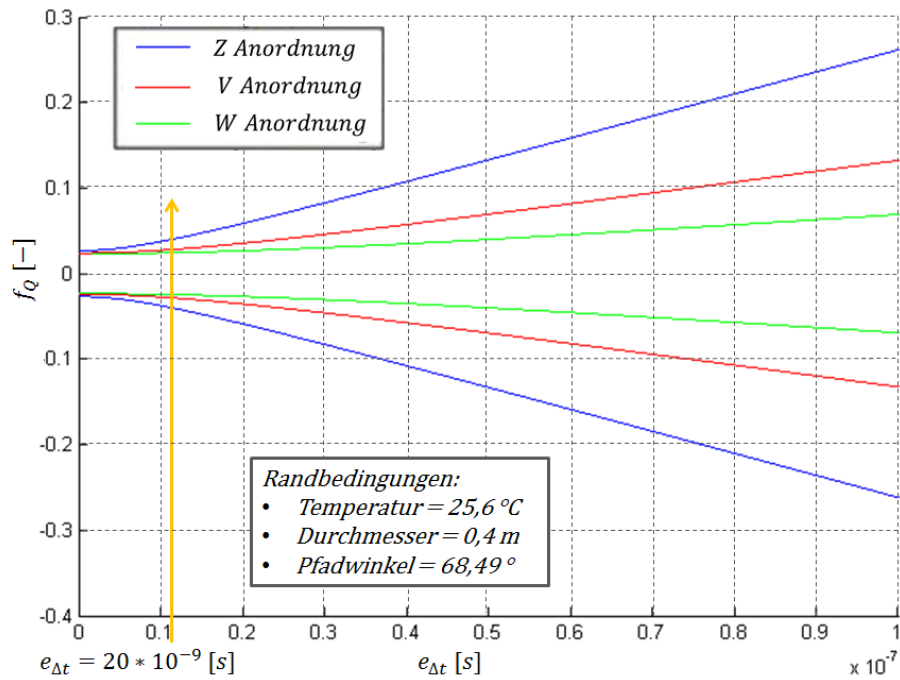
In weiterer Folge werden drei der definierten Geschwindigkeiten betrachtet, um die Auswirkungen der Diskretisierung auf die Durchflussmessung zu zeigen. Siehe dazu Abbildung 6.10, in welcher einmal der Durchfluss zu tief, zu hoch und exakt gemessen wird. Die Darstellung beinhaltet die Randbedingungen aus der Messung am Institut für eine Z-Anordnung.

Man erkennt, dass aus dem Diskretisierungsfehler große Abweichungen resultieren, welche bei niederen Strömungsgeschwindigkeiten noch weiter zunehmen. Durch eine Erhöhung der Pfadlänge, wie es bei der V- und der W-Anordnung der Fall ist, kann die Auswirkung reduziert werden, da dadurch die Differenz zwischen Vorwärts- und Rückwärtslaufzeiten erhöht werden.

In der Darstellung 6.10 ist zusätzlich ein zufälliges Rauschen im Messsignal aufgetragen. Dieses hat die Größenordnung des kleinsten Zeitschrittes. Damit soll vermittelt werden,



(a) Unsicherheit in der Zeitdifferenz.



(b) Unsicherheit in der Messung der Gesamtlaufzeiten.

Abbildung 6.8.: Auswirkung von ungenauer Zeitmessungen im Sensor.

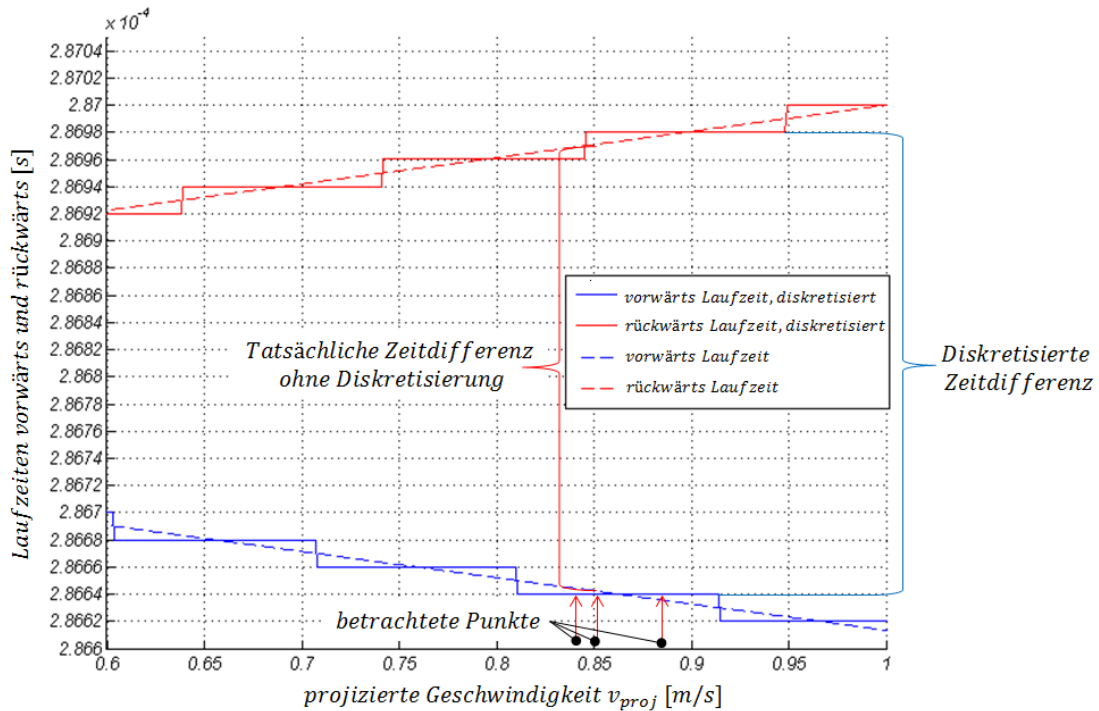


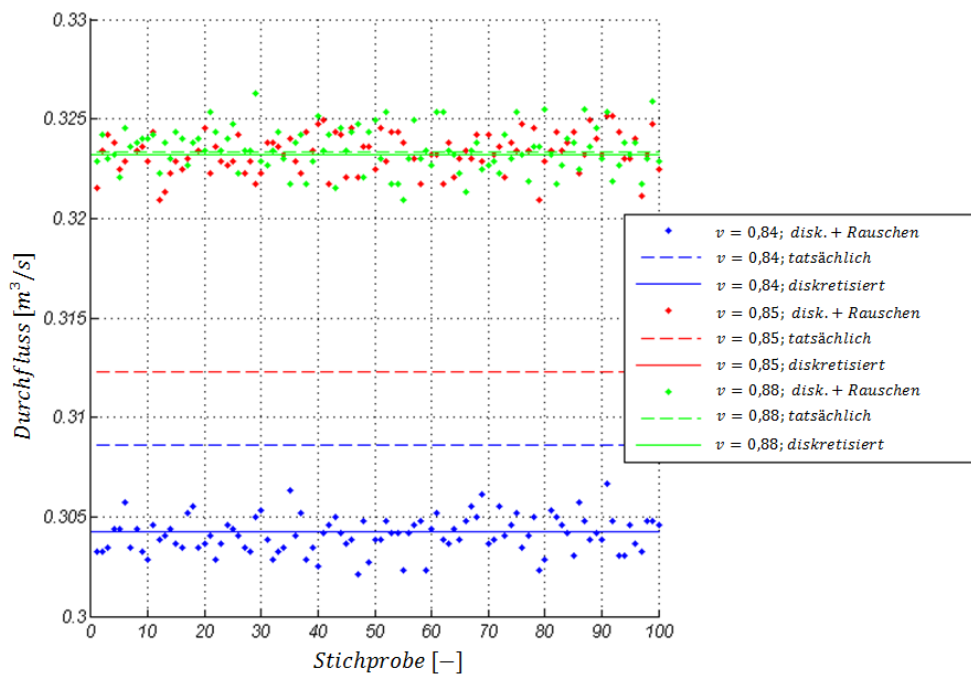
Abbildung 6.9.: Darstellung des Diskretisierungsfehlers durch die interne Taktrate.

dass durch dieses Rauschen eventuelle Schwankungen in der Strömung gar nicht detektiert werden können, da sie in diesem untergehen. Dies hat Auswirkungen auf die Auswertung und dadurch auf den bestimmten Durchfluss.

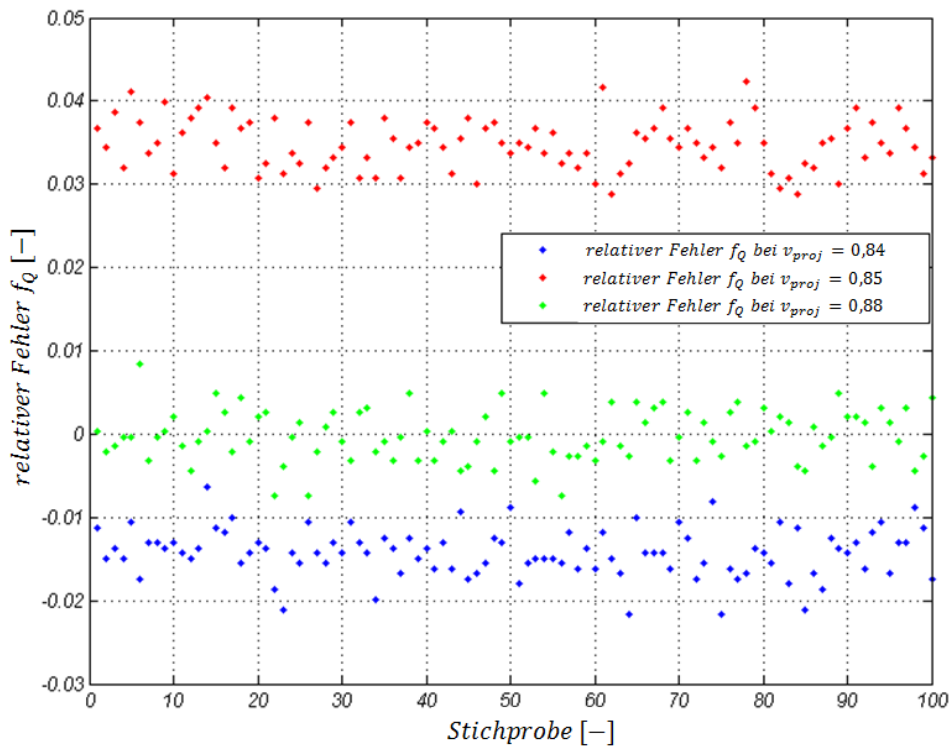
Andere Unsicherheiten wie die der Schallgeschwindigkeit haben ebenso einen großen Einfluss auf die Durchflussmessung und sind auch bei einer höheren Taktrate nicht genauer bestimmbar. Es sei also festgehalten, dass immer eine Reduktion der gesamten Messunsicherheiten benötigt wird. Dies ist mit den in diesem Kapitel dargestellten Abbildungen erklärbar, da wie in diesen erkennbar ist, eine einzige große Unsicherheit die ganze Messung unbrauchbar machen kann. Umgekehrt benötigt man für eine Verbesserung der Messqualität immer eine Reduktion aller Messunsicherheiten.

Prinzipiell gilt wieder der Zusammenhang zwischen langen und kurzen Pfadlängen. Bei kleinen Durchmessern wie jene vom beschriebenen DN400 Rohr, sollte also zumindest mit einer V-Anordnung gemessen werden, wenn die Einbausituation dies ermöglicht.





(a) Fehler in der Durchflussbestimmung durch Diskretisierung.



(b) Darstellung des relativen Fehlers bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten.

Abbildung 6.10.: Auswirkung der Diskretisierung auf die Durchflussbestimmung (a) und der dabei auftretende relative Fehler (b).

## 7. Messungen im Kraftwerk

Möglichkeiten wie eine Feldmessung mit der ADM aussehen kann, sollen in diesem Kapitel genauer beschrieben werden.

### 7.1. Kraftwerk Birkenwald

In Südtirol bei Meran befindet sich das Kraftwerk Birkenwald welches zwei Pelton-turbinen, eine zweidüsige und eine eindüsige besitzt. Das Krafthaus mit den Turbinen ist in der Abbildung 7.1 zu sehen.

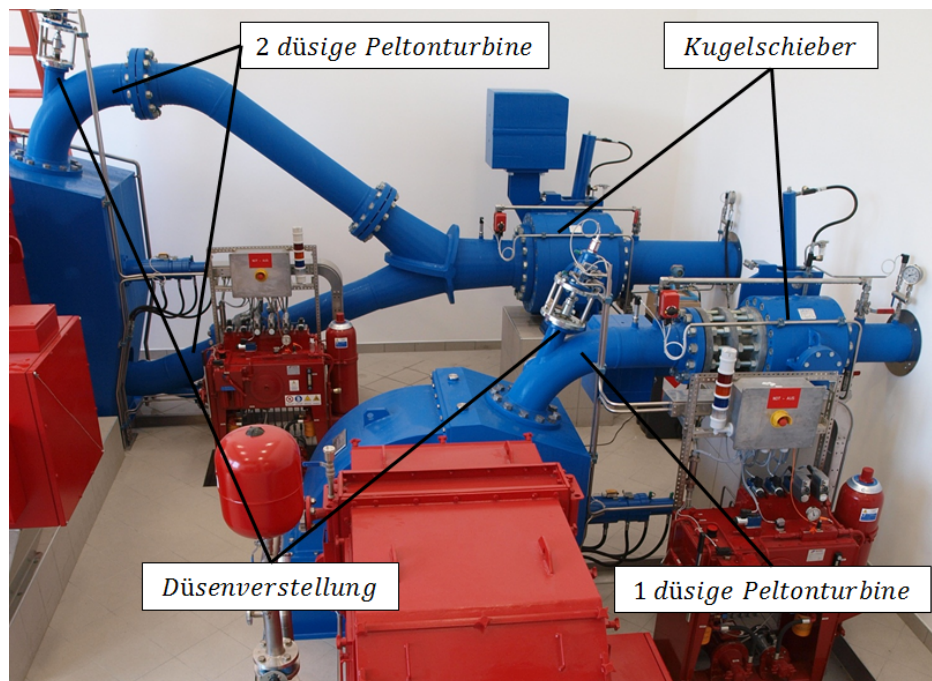


Abbildung 7.1.: Ansicht der Pelton-turbinen im Kraftwerk Birkenwald.

Die Eckdaten der beiden Turbinen sind in der Tabelle 7.1 aufgelistet.

Da die zu entnehmende Wassermenge begrenzt ist und im Winter sehr gering ausfällt, ist die Auslegung der Maschinen in dieser Art geschehen. So ist sichergestellt, dass auch bei kleinen Durchflüssen die eindüsige Turbine noch in Betrieb ist und Strom in das Netz einspeisen kann.

Tabelle 7.1.: Daten der beiden Peltonturbinen im Kraftwerk Birkenwald.

| <i>Kennwert</i>                              | <i>2 – düsig</i>              | <i>1 – düsig</i>             |
|--|-------------------------------|------------------------------|
| $Q = \text{Nenndurchfluss}$                  | $0,575 \text{ m}^3/\text{s}$  | $0,120 \text{ m}^3/\text{s}$ |
| $H = \text{Nennfallhöhe}$                    | $443 \text{ m}$               | $443 \text{ m}$              |
| $n = \text{Nennzahl}$                        | $1000 \text{ 1/min}$          | $1500 \text{ 1/min}$         |
| $P = \text{Nennleistung}$                    | $\text{ca. } 2243 \text{ kW}$ | $\text{ca. } 485 \text{ kW}$ |
| $\text{Becheranzahl}$                        | $22$                          | $22$                         |
| $D = \text{Rohrinnendurchmesser Messstelle}$ | $0,609 \text{ m}$             | $0,609 \text{ m}$            |

### 7.1.1. Randbedingungen

Die Messung des Durchflusses wird an der Druckrohrleitung zirka 100 m nach dem Einlaufbauwerk durchgeführt, da im Krafthaus selbst keine geeignete Position für eine Ultraschallmessung gegeben ist. Die Randbedingungen für die Messung lauten:

- Rohrinnendurchmesser 0,609 m.
- Wandstärke 0,013 m. Davon 0,008 m duktiler Guss GGG K9 und 0,005 m Zementauskleidung
- Beruhigungsstrecke hinter der Wasserfassung sind mindestens 10 D.
- Vergleichsmessmethode ist ein einpfadiges Ultraschall Messgerät in einer Z-Anordnung von der Firma *Endress und Hauser*. Der verwendete Typ ist ein Clamp-On Messgerät mit der Bezeichnung Prosonic Flow W [18]
- Es wird eine zweipfadige V-Anordnung für die Messung verwendet.
- Durchflussbereich von 0,02 bis 0,75 m<sup>3</sup>/s, was durch die Nadelstellung, beziehungsweise zu- und abschalten einer Turbine variiert wurde.
- Ausgabe der Messwerte über den Datalogger. Dabei wird für einen Betriebspunkt jede Sekunde ein Wert über eine Minute ermittelt.

### 7.1.2. Durchführung der Messung

In einer zweitägigen Messung sollte der Wirkungsgrad der Anlage bestimmt werden. Dieser ist für die verschiedensten Nadelstellungen zu überprüfen. Am ersten Tag der Messung wird nur die zweidüsige Turbine vermessen, wobei zuerst die obere und anschließend die untere Düse in Betrieb genommen werden. Die Vermessung der gesamten Anlage und die eindüsige Turbine werden am zweiten Tag durchgeführt. Da die restlichen Messwerte für die Bestimmung des Wirkungsgrads im Krafthaus erfolgen, ist eine Kommunikation über Funkgeräte nötig. Nachdem der gewünschte Betriebspunkt eingestellt ist, wird das Starten der Messung abgesprochen. Dabei erfolgt eine Aufzeichnung der Messwerte über eine Minute. Wichtig ist der Abgleich der Uhrzeit vor der Messung,

um später eine geeignete Referenz zu haben. In der Darstellung 7.2 erkennt man den Aufbau im Schacht und die Durchführung der Messung.



Abbildung 7.2.: Messaufbau und Durchführung der Durchflussmessung.

### 7.1.3. Diskussion und Ergebnisse

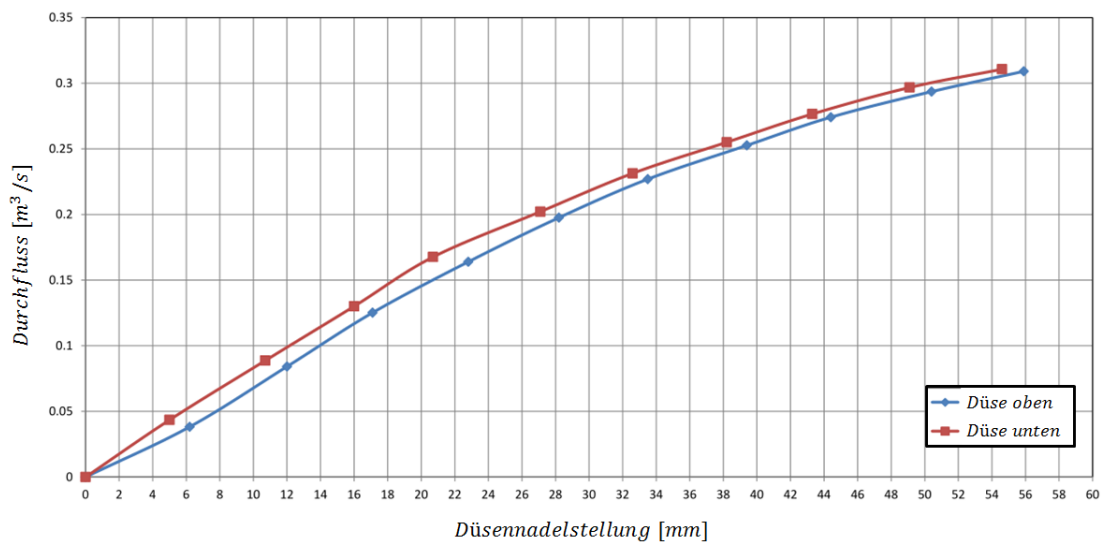
Die Auswertung der Ergebnisse sind in den Darstellungen 7.3 a und b ersichtlich. Dabei sind immer die erhaltenen Durchflusswerte für die unterschiedlichen Düsenöffnungen in mm Nadelstellung dargestellt. Darin ist der Durchfluss des ADM mit dem der Referenzmessung gewichtet und gemittelt. Bei der Messung traten am Ende des ersten Tages Probleme mit einem Messpfad auf. Die Ergebnisse dieser möglicherweise fehlerhaften Messungen, werden am nächsten Tag wiederholt überprüft und neu vermessen.

### 7.1.4. Fehlerbetrachtung

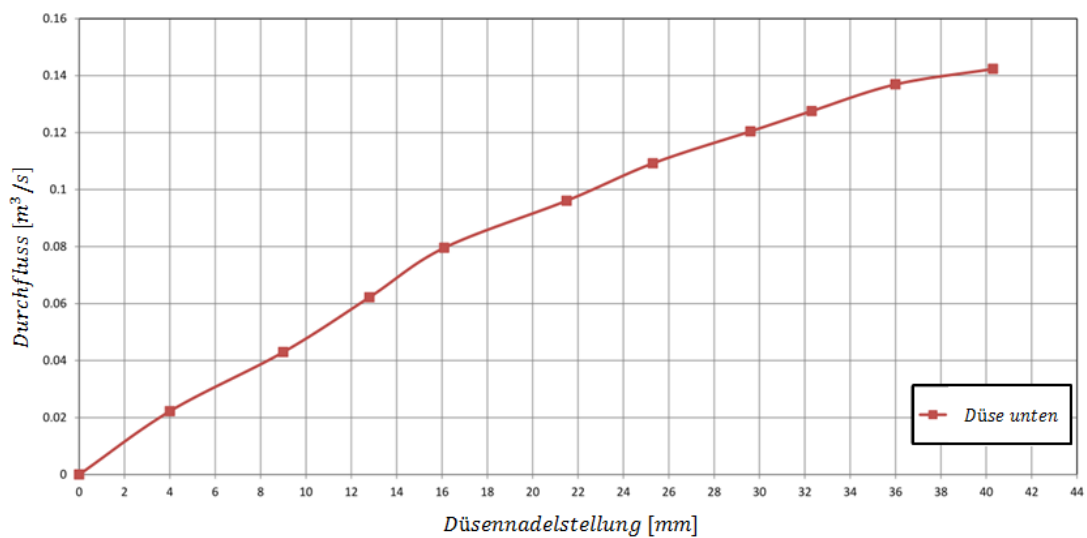
Die Fehlerschranken für die Messung können der Darstellung 7.4 entnommen werden, wobei die Randbedingungen dafür in der Tabelle 7.2 ersichtlich sind.

Darin erkennt man, dass der relative Fehler zu geringen Durchflüssen hin ansteigt, was gerade bei der Vermessung der eindüsigen Turbine ein Problem darstellt. Der Teillastbereich dieser Turbine kann somit nur mit großen Unsicherheiten angegeben werden. Der gleiche Zusammenhang gilt für die zweidüsige Turbine, wenn auch nicht in diesem Ausmaß, da größerer Durchflusswerte auftreten. Geringe Fehlerschranken können beim Messen vom maximalen Durchfluss der Anlage angegeben werden, wenn beide Peltonturbinen im Volllastbereich laufen.

Die Wahl einer V-Anordnung hat sich durch die geringeren Abweichungen bei Teillast als eine Z-Anordnung bestätigt, da die Pfadlängen im Wasser größer sind. Eine W-Anordnung hätte die Angabe von geringeren Fehlerschranken bei kleinen Durchflüssen ermöglicht, allerdings sind die Gegebenheiten bei der Messstelle nicht für diese geeignet gewesen. Zusätzlich ist eine dreifache Reflexion, wie sie bei einer W-Anordnung auftritt, bei einem mit Zement ausgekleideten Rohr aus Gründen der Unebenheit nicht zu empfehlen.



(a) Durchfluss zweidüsige Peltonmaschine.



(b) Durchfluss eindüsige Peltonmaschine.

Abbildung 7.3.: Ergebnisse der Durchflussmessung im Kraftwerk Birkenwald.

Tabelle 7.2.: Annahmen zu den absoluten Unsicherheiten bei der ADM im Kraftwerk Birkenwald.

*Annahmen*

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| $s = 0,013 \text{ m}$             | $e_D = 0,001 \text{ m}$                     |
| $\alpha = 42,710^\circ$           | $e_s = 0,001 \text{ m}$                     |
| $\beta = 21,174^\circ$            | $e_T = 1^\circ \text{C}$                    |
| $\gamma = 39,399^\circ$           | $e_p = 10000 \text{ Pa}$                    |
| $c_{Wasser} = 1451,1 \text{ m/s}$ | $e_{\Delta T} = 20 \cdot 10^{-9} \text{ s}$ |
| $c_{Rohr} = 2725 \text{ m/s}$     | $e_{t_{ges}} = 10^{-7} \text{ s}$           |
| $c_{Sensor} = 2550 \text{ m/s}$   | $e_{c_{Rohr}} = 100 \text{ m/s}$            |
| Temperatur = $9,0^\circ \text{C}$ | $e_{c_{Sensor}} = 50 \text{ m/s}$           |
| $D = 0,609 \text{ m}$             | $e_\gamma = 0,1^\circ$                      |
| $Sensorabstand = 0,495 \text{ m}$ |   |

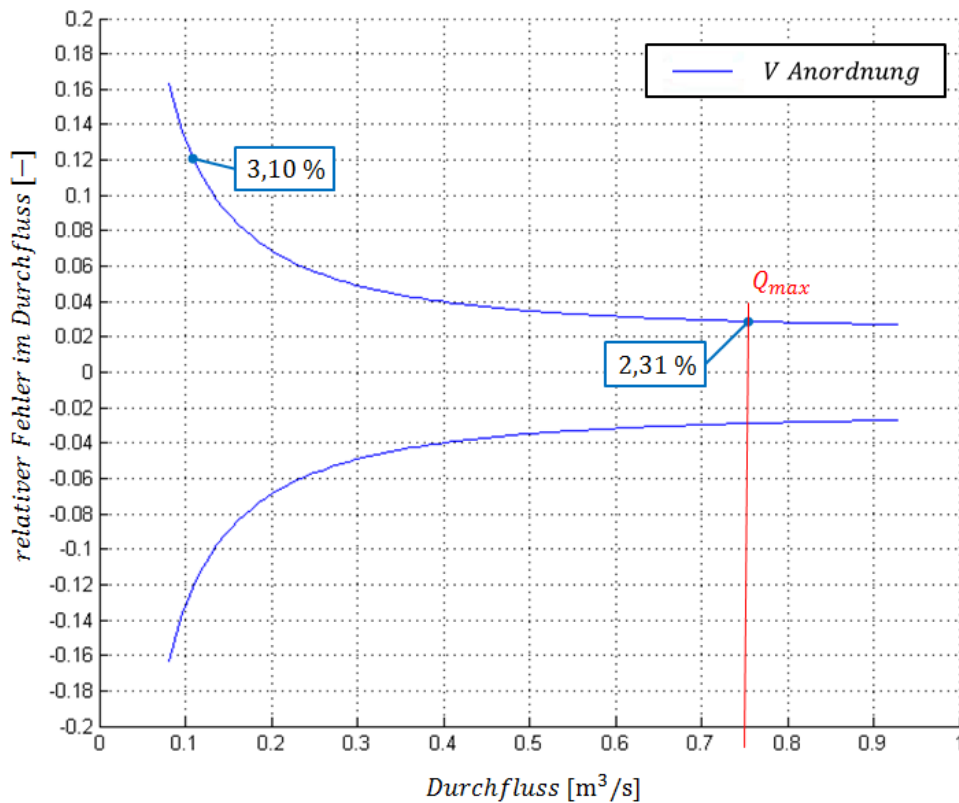


Abbildung 7.4.: Angabe der Fehlerschranken bei der verwendeten V-Anordnung im Kraftwerk Birkenwald.

## 7.2. Speicherkraftwerk Salza

Das Speicherkraftwerk Salza von der *VERBUND Hydro Power AG* befindet sich in der Gemeinde St. Martin am Grimming. Die Eckdaten dieses Kraftwerks sind:

|                                   |                           |
|-----------------------------------|---------------------------|
| $Q = \text{Durchfluss}$           | $10 \text{ m}^3/\text{s}$ |
| $H = \text{Ausbaufallhöhe}$       | $103,5 \text{ m}$         |
| $P = \text{Engpassleistung}$      | $8,5 \text{ MW}$          |
| $D = \text{Rohrinnendurchmesser}$ | $2 \text{ m}$             |

Eine Übersicht vom gesamten Kraftwerk mit dem Speicher, der Staumauer, Druckrohrleitung, sowie dem Krafthaus ist in der Abbildung 7.5 gegeben. Auch die Messstelle in der Drosselklappenkammer ist eingezeichnet.

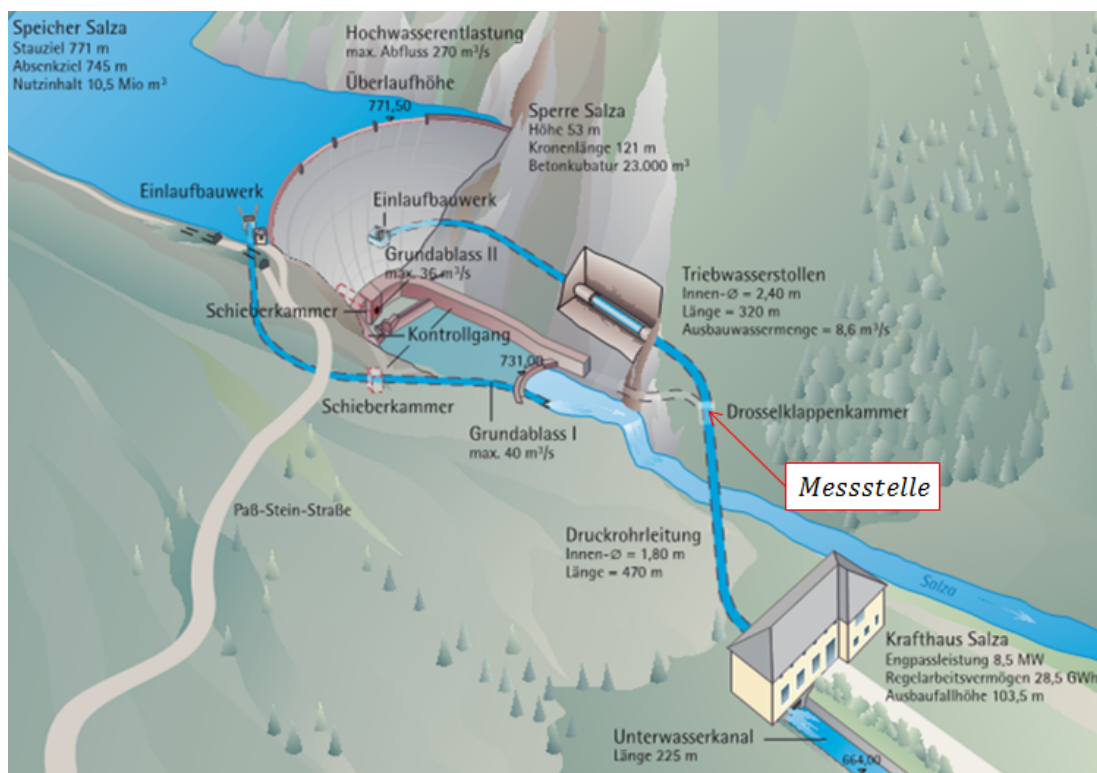


Abbildung 7.5.: Kraftwerk Salza [19].

### 7.2.1. Randbedingungen

Es werden die nachstehenden Randbedingungen bei der Messung an der Druckrohrleitung gewählt, beziehungsweise durch das Kraftwerk gegeben:

- Rohrdurchmesser 1,995 m.
- Wandstärke 20,2 mm aus Stahl mit einer Schallgeschwindigkeit von 3230 m/s.

- Beruhigungsstrecke entspricht zirka dem zweifachen Rohrdurchmesser.
- Vergleichsmessmethode ist eine zweite Ultraschallmessung in doppelter V-Anordnung von der Firma *Flexim* vom Typ Fluxus ADM7407. Die Sensoren sind laut Abbildung 7.6 angeordnet und haben eine Sendefrequenz von 0,5 MHz.

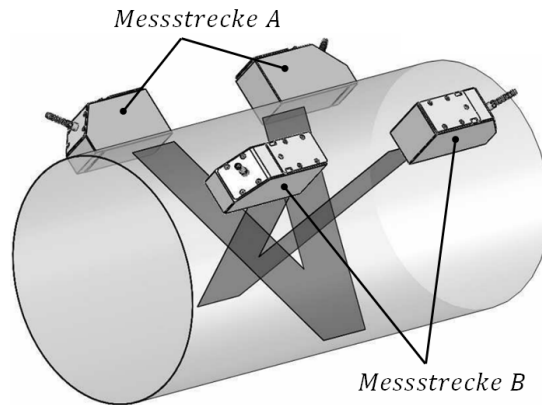


Abbildung 7.6.: Messanordnung der Ultraschallsensoren im Kraftwerk Salza [20].

- Durchflussbereich von zirka 5 bis 10 m<sup>3</sup>/s.
- Ausgabe der Messwerte über den analogen Ausgang. Abtasten des Signals mit einer Rate von 100 Hz und Paketen aus 100 Samples über eine Messdauer von 3-5 Minuten. Das heißt jede Sekunde ein Paket von 100 Werten.
- Auswertung der Messpunkte in *Matlab R2011b* und *Excel*.

### 7.2.2. Durchführung der Messung

Die Messung im Kraftwerk Salza wird an einem Tag durchgeführt, wobei der Durchfluss immer mit einer V-Anordnung bestimmt wird. Die Sensoren werden an den verschiedensten Positionen an der Druckrohrleitung angebracht. Dabei erfasst der Datalogger des *Risonic Modluar* immer die Werte im Hintergrund und eine Echtzeitanzeige erfolgt in LabVIEW über das portable DAQ-System mit einem Strommodul. Zusätzlich kann das Stromsignal des Vergleichsmessinstrumentes abgegriffen und im DAQ weiter verarbeitet werden. Damit besteht die Möglichkeit eines direkten Vergleichs vom ADM vor Ort und dem am Institut verwendeten. Neben den verschiedensten Sensorpositionen wird zusätzlich ein Lastwechsel der Maschine aufgezeichnet und die Messwerte verglichen. Eine der Anordnungen und der Messaufbau in der Drosselklappenkammer ist in der Abbildung 7.7 zu sehen.

### 7.2.3. Diskussion und Ergebnisse

Eine Darstellung des gesamten Messprogramms und damit der unterschiedlichen Anordnungen, beziehungsweise Betriebspunkte, ist in der Abbildung 7.8 zu sehen. Es ist



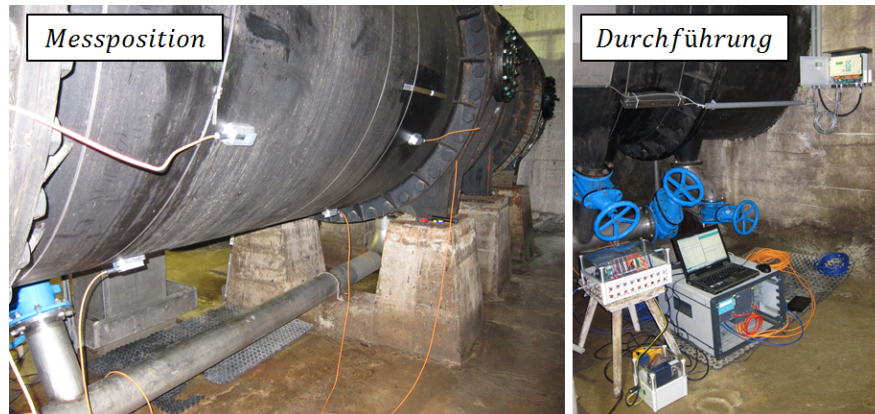


Abbildung 7.7.: Darstellung der Messposition und der Pfadanordnung an der Druckrohrleitung.

ersichtlich, dass durch die Veränderung der radialen Position der Sensoren am Rohr eine deutliche Abweichung der gemessenen Werte besteht. Die Durchflusswerte werden aus den Messpfaden, wie in der Abbildung 7.9 zu erkennen ist, ermittelt.

Am Beginn der Messung wird nur mit einem Pfad aufgezeichnet. Dieser ist in der vertikalen Rohrachse angeordnet und bestimmt einen größeren Durchfluss als die Referenz. Bei der Messanordnung 1 ist zusätzlich ein zweiter Pfad in der horizontalen Ebene angebracht. Der ermittelte Wert ist geringer als die Referenz. Dies hat den Grund, dass zirka 2 D hinter der Messstelle eine Rohrklappe in der horizontalen Ebene der Druckrohrleitung verbaut ist. Diese hat Rückwirkungen auf die Messergebnisse des Pfades in der horizontalen Ebene. Über das Messgerät besteht die Möglichkeit den gemessenen Durchfluss der einzelnen Pfade anzuzeigen. Dabei wird bestätigt, dass der gemessene Durchfluss mit dem Messpfad in der horizontalen Ebene um zirka 8 % geringer ist als in der vertikalen. Aus Gründen der Rückwirkung der Klappe, wird der Messpfad verschoben. Die neue Anordnung 2 liefert Ergebnisse die weniger als 1 % vom Referenzwert abweichen. Um diese Ergebnisse zu überprüfen wird auf eine dritte Messanordnung gewechselt, welche möglichst nahe an der Position der Flexim Sensoren angeordnet ist, um ein identes Strömungsprofil zu vermessen. Dabei sind neben Problemen bei der Montage, die Messabweichungen wie sie bis jetzt auch immer im Labor verzeichnet wurden, aufgetreten. Mit dieser Sensorposition werden Lastwechsel zum Abschluss der Messung durchgeführt. Ein detailliertes Ergebnis der Echtzeitanzeige ist in der Abbildung 7.10 zu sehen. Neben den bekannten Schwankungen des *Rittmeyer*-Gerätes sind zusätzlich schnellere Reaktionszeiten von diesem zu erkennen. Der Grund dafür ist eine höhere Geschwindigkeitsdämpfung des *Flexim*-Signals, welche keine Sprünge im Verlauf zulässt.

#### 7.2.4. Fehlerbetrachtung

Durch die Fehlerrechnung aus dem Kapitel 6, ergibt sich mit den Werten aus der Tabelle 7.3 das Ergebnis. Dieses ist in der Abbildung 7.11 dargestellt ist.

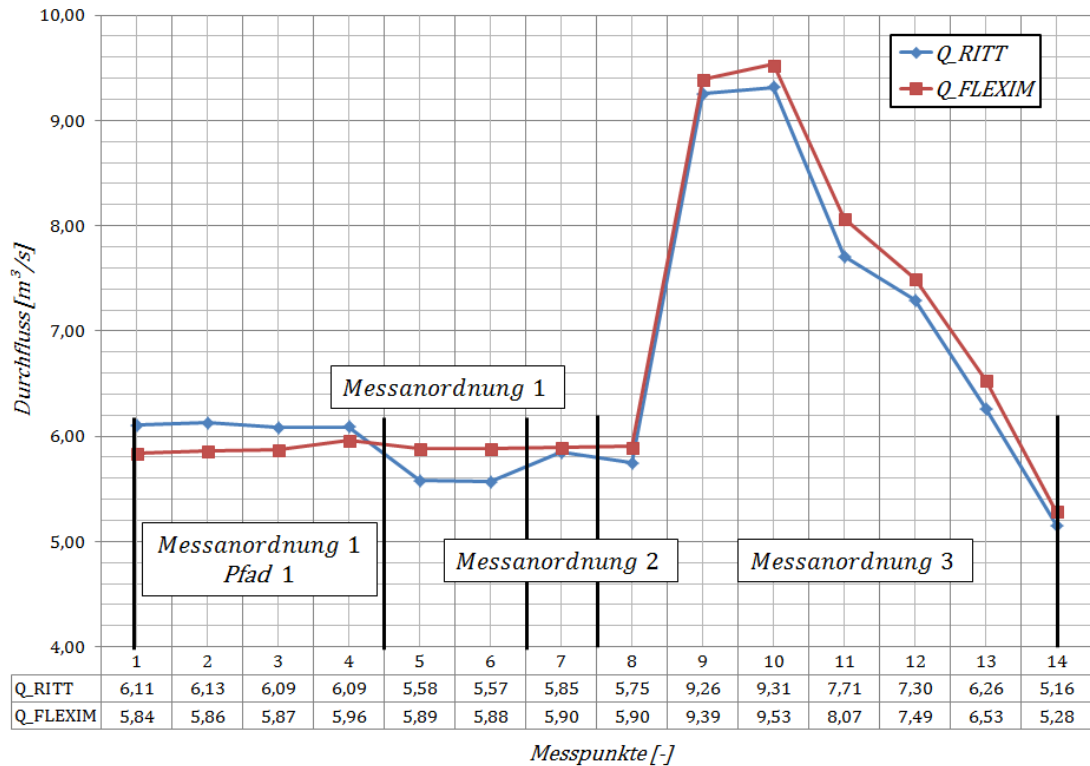


Abbildung 7.8.: Vergleich des am Institut verwendeten ADM, zum akustischen Durchflussmessgerätes von *Flexim*.

Die angegebenen Fehlerschranken machen deutlich, dass gerade bei geringen Durchflussmengen die V-Anordnung genauere Ergebnisse als die Z-Anordnung liefert. Eine W-Anordnung kommt nicht zum Einsatz, da dies die Grenzen des Messsystems überschreitet. Bei großen Durchflüssen haben die V- sowie die Z-Anordnung Unsicherheiten kleiner als 2,5 %. Es wäre in diesen Bereichen zu überlegen, ob eine Z-Anordnung bessere Ergebnisse liefert, da bei der Anordnung im V-Modus immer Probleme durch die Reflexion entstehen können. Allerdings ist aus Gründen der Reproduzierbarkeit nicht empfehlenswert den Aufbau am Rohr während einer Messung zu ändern und daher wird die gesamte Messung mit einer V-Anordnung durchgeführt. Auch die zufälligen Fehler, welche durch die Diskretisierung des Signals bei tiefen Durchflüssen und geringen Pfadlängen immer größeren Einfluss haben, sprechen in diesem Fall für eine V-Anordnung.

### 7.3. Fazit

Das von der Firma *Rittmeyer* verwendete Messsystem ist bei zwei Kraftwerksmessungen zum Einsatz gekommen. Dort sei die einfache Montage dieser Sensoren, beziehungsweise rasche Wechseln auf unterschiedliche Anordnungen hervorzuheben. Auch die Kombination aus Datalog und Echtzeitanzeige der Messwerte funktioniert unkompliziert. Über das verwendete portable DAQ-System besteht zusätzlich die Möglichkeit weitere Mess-

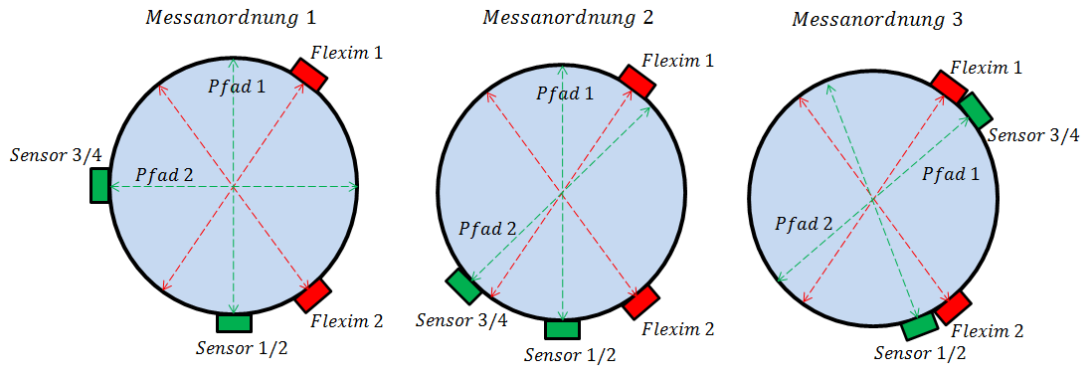


Abbildung 7.9.: Unterschiedliche Messpositionen des ADM von *Rittmeyer*.

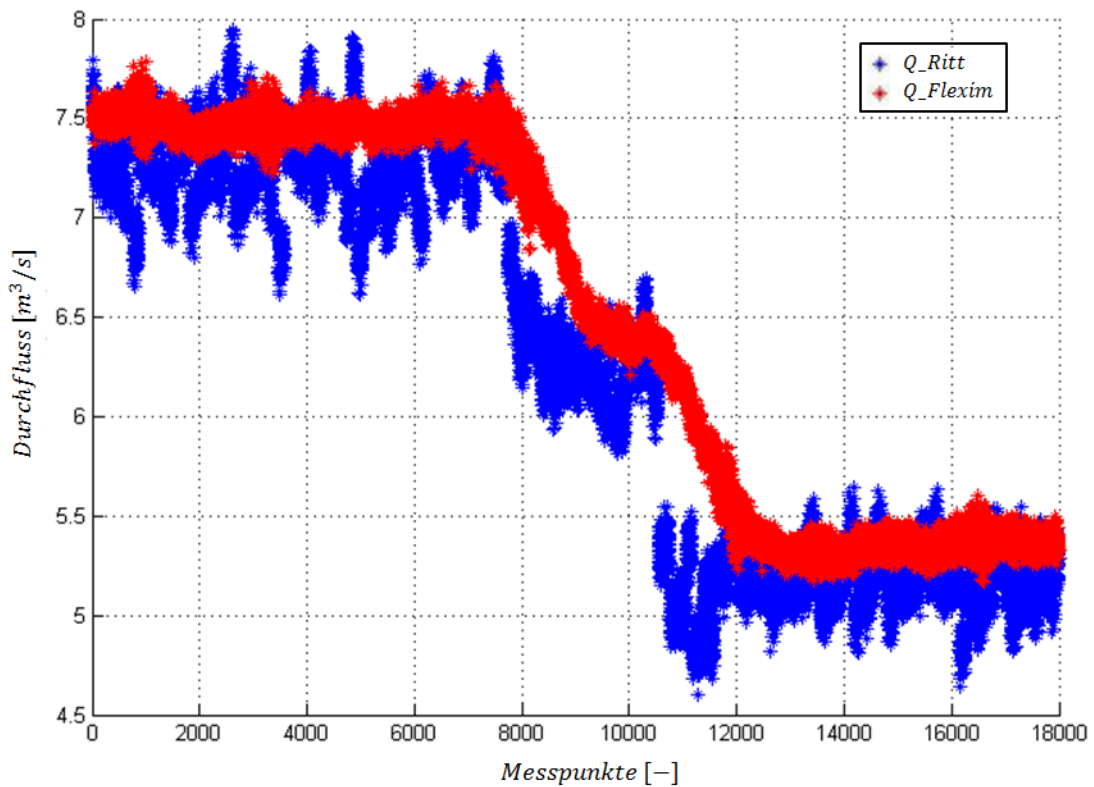


Abbildung 7.10.: Echtzeitaufnahme der beiden Durchflusssignale während einem Lastwechsel.

Tabelle 7.3.: Annahmen zu den absoluten Unsicherheiten bei der ADM im Kraftwerk.

| Annahmen                          |   |
|-----------------------------------|---|
| $s = 0,0202 \text{ m}$            | $e_D = 0,001 \text{ m}$                     |
| $\alpha = 52.858^\circ$           | $e_s = 0,001 \text{ m}$                     |
| $\beta = 20.739^\circ$            | $e_T = 1^\circ \text{C}$                    |
| $\gamma = 39,003^\circ$           | $e_p = 10000 \text{ Pa}$                    |
| $c_{Wasser} = 1435 \text{ m/s}$   | $e_{\Delta T} = 20 \cdot 10^{-9} \text{ s}$ |
| $c_{Rohr} = 3230 \text{ m/s}$     | $e_{t_{ges}} = 10^{-7} \text{ s}$           |
| $c_{Sensor} = 2550 \text{ m/s}$   | $e_{c_{Rohr}} = 100 \text{ m/s}$            |
| Temperatur = $7^\circ \text{C}$   | $e_{c_{Sensor}} = 20 \text{ m/s}$           |
| $D = 1,995 \text{ m}$             | $e_\gamma = 0,1^\circ$                      |
| Sensorabstand = $1,564 \text{ m}$ |   |

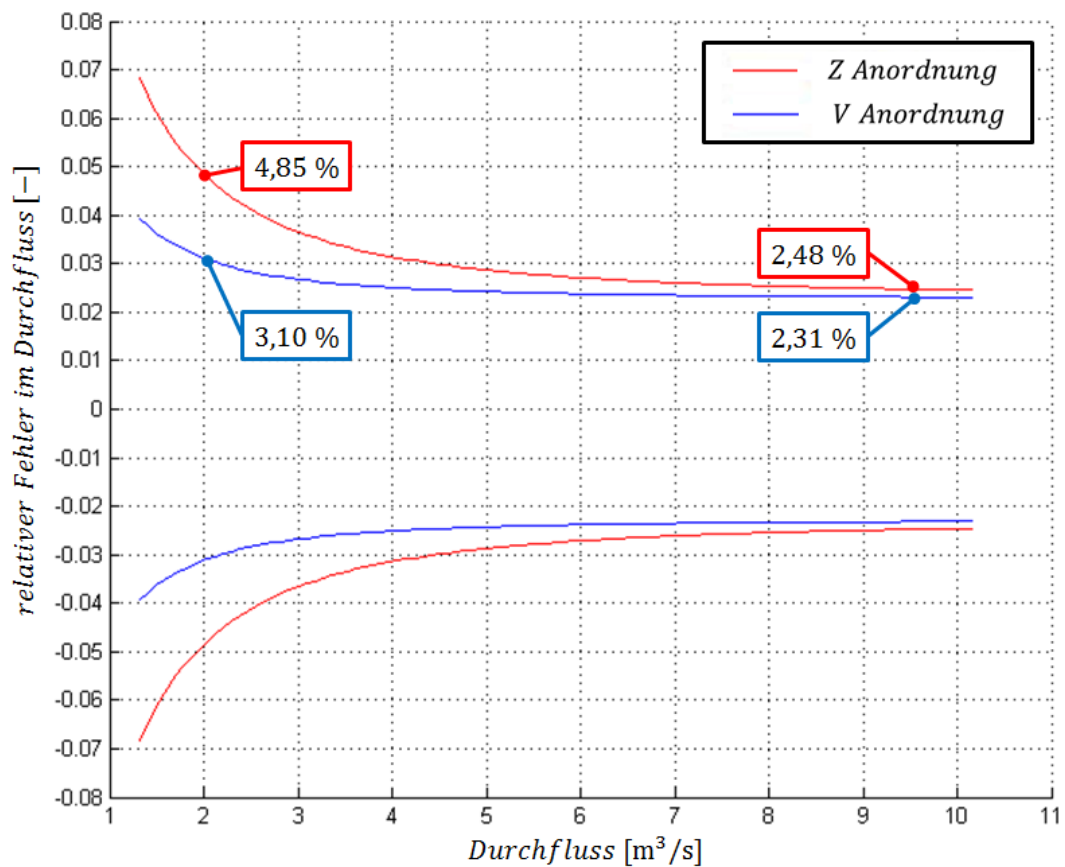


Abbildung 7.11.: Fehlerschranken bei der Messung mit einer V-Anordnung im Kraftwerk Salza.

signale, wie einen Referenzwert für den Durchfluss aufzuzeichnen. Als Kritikpunkt muss allerdings die Unsicherheit in der Montage der Sensoren, der Temperaturkompensation, der Rohrdaten allgemein und weiter die Schwankungen der Messwerte erwähnt werden. Im nachstehenden Kapitel 8, wird weiter auf diese Punkte eingegangen und gezeigt, wie man diese Fehlereinflüsse reduzieren kann.

## 7.4. Verwendete Geräteliste für Kraftwerksmessungen

Um weiterhin unkompliziert Feldmessungen durchführen zu können sei an dieser Stelle eine Liste der benötigten Geräte angegeben.

### Messung mit Datalog

1. *Risonoc Modular* (Netzanschluss, 4 akustische Sensoren und deren Verbindungskabel)
2. Laptop oder Messcomputer
3. LAN-Kabel
4. Stromversorgung und gegebenenfalls Verlängerungskabel oder Verteilerleiste
5. Koppelgel für akusitsche Sensoren
6. Messschieber, oder anderes Längenmessgerät
7. Magnetische Wasserwaage
8. Stift für Markierungen
9. Temperaturmesssensor
10. Reinigungsmittel und Putztücher
11. Taschenlampe
12. Kabelbinder

### Zusätzliche Geräte für die Messung mit dem DAQ

1. Portables DAQ und Netzgerät
2. Switch und zwei LAN-Kabel
3. Anschlusskabel der Messsignale an das DAQ
4. Kreuz- und Schlitzschraubenzieher
5. Gegebenenfalls Lüsterklemmen

# 8. Theoretische Verbesserungspotenziale der Messwerte

In diesem Abschnitt soll durch verschiedene Ansätze versucht werden die Messergebnisse so zu korrigieren, dass der systematische Fehler minimiert wird.

## 8.1. Messwertkorrektur durch optimierte Sensormontage

Durch Messungen am DN400 Rohr konnte festgestellt werden, dass die Abweichungen bei der ADM im Vergleich zur IDM immer zu tief ausfielen. Siehe dazu auch die Abbildungen in Kapitel 5. Dies legt die Frage nach einem möglichen systematischen Fehler im System selbst nahe. Daher wurde versucht die nach dem Brechungsgesetz auftretenden Schallwege und deren Winkel, in einem Modell nachzuvollziehen. Vorgaben für dieses sind:

1. Die komplette Geometrie wie Durchmesser, Wandstärke, axialer Sensorabstand und die gewählte Anordnung bei der Messung.
2. Die Werte für die Schallgeschwindigkeiten in den verwendeten Medien und deren Abhängigkeiten. Dabei wird zum Beispiel die Schallgeschwindigkeit im Wasser über Druck und Temperatur beschrieben.
3. Der Sensor wird durch eine Punktquelle angenähert.

Es erfolgt im nächsten Schritt eine Iteration der Brechungswinkel mit den angegebenen Randbedingungen. Dabei muss eine Iteration stattfinden weil in der Gleichung für die Brechung 8.1 nur die Schallgeschwindigkeiten bekannt sind, aber keine Winkel. Also ist immer eine Gleichung mit zwei Unbekannten zu lösen.

$$\frac{\sin(\gamma)}{\sin(\beta)} = \frac{c_{Sensor}}{c_{Wasser}} \quad \text{bzw.} \quad \frac{\sin(\gamma)}{\sin(\alpha)} = \frac{c_{Sensor}}{c_{Rohr}} \quad (8.1)$$

Hat man diese bestimmt, können alle Schallwege mit den Geometriedaten beschrieben werden. Die Schallfadlänge im Sensor wird vom *Risonic Modular* direkt berechnet, da keine Geometriedaten zu diesem bekannt sind.

$$L_{Rohr} = \frac{s}{\cos(\alpha)} \quad \text{bzw.} \quad L_{Wasser} = \frac{D}{\cos(\beta)} \quad (8.2)$$

Im Modell noch Unbekannte sind die Laufzeiten und dadurch die Geschwindigkeit, welche nur durch die Sensoren selbst messbar ist. Allerdings besteht die Möglichkeit über das „Diagnose-Fenster“ im *Risonic Modular* die gemessenen Laufzeiten und deren Differenz auszugeben. Geht man zum Beispiel von  $Q = 0$  aus, also keiner Strömungsgeschwindigkeit, und daher Laufzeitdifferenz  $\Delta t = 0$ , kann über die Schallgeschwindigkeiten und die Pfadlängen aus 8.2 die benötigten Laufzeiten  $t_{12} = t_{21}$  für das Ultraschall Signal berechnet werden. Der beschriebene Zusammenhang ist in Gleichung 8.3 formuliert.

$$t_{12} = t_{21} = \frac{2L_{Sensor}}{c_{Sensor}} + \frac{2L_{Rohr}}{c_{Rohr}} + \frac{L_{Wasser}}{c_{Wasser}} \quad (8.3)$$

Vergleicht man diese Laufzeiten mit denen aus dem „Diagnose-Fenster“ im *Risonic Modular*, so folgt immer eine zu tiefe Zeit. Das heißt die Schallpfadlängen sind zu gering, oder die Geschwindigkeiten zu groß. Da aber die Schallgeschwindigkeit im Wasser aus der gemessenen Temperatur auf  $1^\circ\text{C}$  genau bestimmt wurde und die Schallgeschwindigkeiten im Sensor sowie im Rohr praktisch keinen Einfluss haben, da deren Pfadlängen so gering sind, wurde versucht die Pfadlängen allgemein zu erhöhen. Dies ist durch das Auseinanderschieben der Sensoren am Rohr gelungen. Der eben diskutierte Zusammenhang ist in der Abbildung 8.1 dargestellt. Ein weiterer Effekt der dabei auftritt ist, dass sich dadurch auch der Winkel im Wasser ändert. So rechnet das Messgerät immer noch mit dem ursprünglichen Winkel  $\beta$ , hat aber tatsächlich einen anderen größeren Winkel. Dadurch wird die gemessene Geschwindigkeit bei der Projektion in den Pfad zusätzlich erhöht.

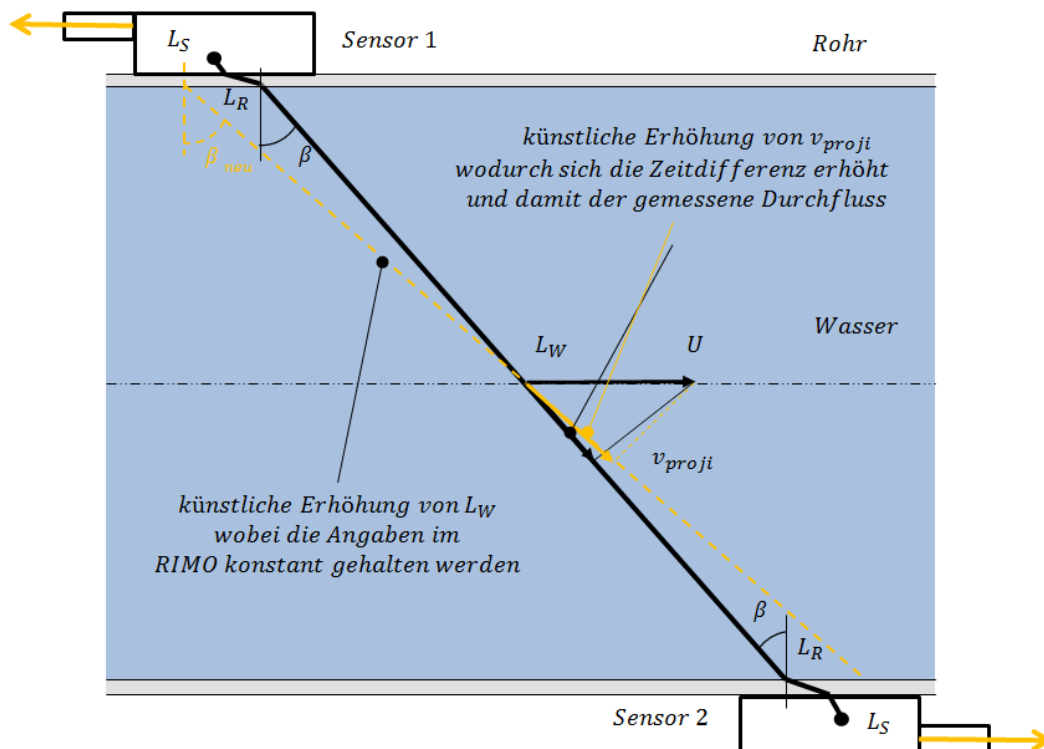


Abbildung 8.1.: Änderung des Sensorabstandes zum Abgleich der Laufzeitdifferenzen.

Durch das Berechnungsmodell kann der Sensorabstand so lange variiert werden bis die Laufzeiten denen der Referenzmessung entsprechen. Verändert man die Anordnung der Sensoren am Rohr und führt eine Messung durch, so ergibt sich das folgende Ergebnis. Bei der W-Anordnung ist die Korrektur erfolgreich und es ergeben sich Werte mit zirka 0,5% Abweichung mit den selben Randbedingungen wie bei allen anderen Messungen. Allerdings ist es nicht zulässig von einer Messung auf einem DN400 Rohr auf einen systematischen Fehler im Messsystem zu schließen. Die Firma *Rittmeyer* wurde von den gemessenen Ergebnissen in Kenntnis gesetzt und untersucht diese. Dieses Kapitel soll für eine kritische Hinterfragung des Messsystems stehen, da die Sensoren noch im Prototypenstadium sind.

## 8.2. Weiterführende Verbesserungsmöglichkeiten

Um weiterführende Forschung auf dem Gebiet der ADM am Institut für hydraulische Strömungsmaschinen voran zu treiben, sind in den nächsten zwei Abschnitten Potenziale im Zusammenhang mit Mehrpfadanordnungen und Strömungsprofilen angeführt. Diese sind allerdings bei dem verwendeten Messgerät noch nicht implementiert.

### 8.2.1. Messwertkorrektur durch Mehrpfadanordnung und Gewichtung

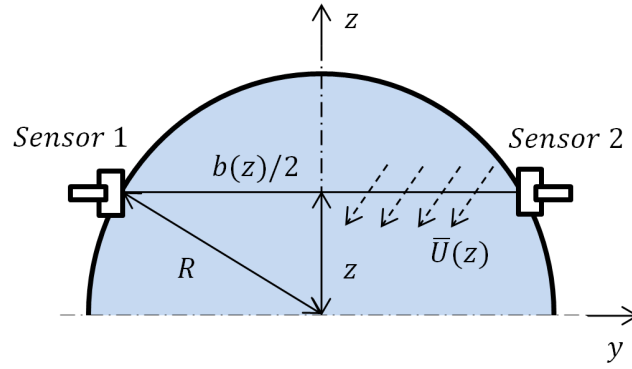
In der Beschreibung der Grundlagen der akustischen Durchflussmessung wurden Berechnungsverfahren für den Durchfluss gegeben. Diese gelten allerdings nur für einen Pfad und ohne jegliche Berücksichtigung der Geschwindigkeitsverteilung im Rohr. Genauer betrachtet ergeben sich die Gleichungen zur Ermittlung des Durchflusses, wie mit der Formel 8.4 ausgedrückt. Dabei sei darauf hingewiesen, dass es viele Ansätze für diese Bestimmung gibt und hier nur einer dieser angegeben werden kann, da die Betrachtung sonst zu umfassend sein würde. Außerdem ist diese Berechnung laut der internationalen Norm für Abnahmemessungen IEC 41 vorgeschrieben und soll daher genauer diskutiert werden. Für die Bestimmung des Durchflusses geht man von folgendem Ansatz aus:

$$Q = \int_{-R}^R \bar{U}(z) \cdot b(z) \cdot dz \quad (8.4)$$

Das bedeutet, dass sich der Durchfluss aus der Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Höhe über einen Strömungsquerschnitt (hier ein Kreis) aufintegriert, bestimmen lässt. Dieser Zusammenhang wurde auch schon einleitend nur mit vektoriellen Größen angegeben. Hierbei wird allerdings schon die Einschränkung auf eine mittlere Pfadgeschwindigkeit  $\bar{U}(z)$  getroffen. Später soll auch diese Vereinfachung noch einmal aufgegriffen werden, um die Qualität der Messung zu verbessern. Mit der Breite  $b(z)$  (Formel 8.5), folgt für den Durchfluss  $Q$  die nachstehende Beziehung 8.6. Wobei die Definition für  $b(z)$  der Abbildung 8.2 entnommen werden kann.

Die Gleichung für die Breite folgt aus dem Satz von Pythagoras mit dem Radius  $R$  und dem Abstand  $z$ . (Siehe dazu Abbildung 8.2)




 Abbildung 8.2.: Ermittlung der Breite  $b(z)$  in Abhängigkeit von der Höhe. [5].

$$b(z) = 2 \cdot \sqrt{R^2 - z^2} = 2 \cdot R \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{z}{R}\right)^2} \quad (8.5)$$

$$Q = \int_{-R}^R \bar{U}(z) \cdot 2 \cdot R \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{z}{R}\right)^2} \cdot dz \quad (8.6)$$

Man kann dieses Integral durch eine Koordinatentransformation in eine für später einfachere Form überführen, da bei der numerischen Integration die Integrale meist auf ein Intervall zwischen  $[+1/-1]$  bezogen sind. Hier soll gleich diese Transformation durchgeführt werden. Dabei wird  $z/R$  mit der Variable  $x$  substituiert, welche sich wie der Bruch auch zwischen  $[+1/-1]$  bewegt.

$$x = \frac{z}{R} \quad (8.7)$$

$$dx = \frac{dz}{R} \quad (8.8)$$

$$Q = R \cdot \int_{-1}^1 \bar{U}(x) \cdot 2 \cdot R \cdot \sqrt{1 - (x)^2} \cdot dx \quad (8.9)$$

In weiterer Folge soll die Geschwindigkeit  $\bar{U}(x)$ , von der aber nicht die genaue Verteilung im Rohr bekannt ist, durch die gemessenen Pfadgeschwindigkeiten angenähert werden. Dazu spaltet man das Integral in eine unendliche Summe auf. Der gesamte Durchfluss steht repräsentativ für eine unendliche Summe von Teilflüssen, was in Abbildung 8.3 genauer dargestellt ist.

$$Q = 2 \cdot R^2 \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^N \bar{U}(x_i) \cdot \sqrt{1 - (x_i)^2} \quad (8.10)$$

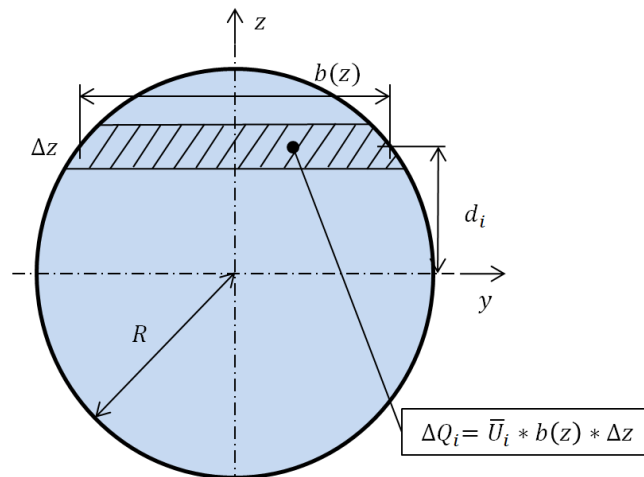


Abbildung 8.3.: Darstellung eines Teildurchflusses für einen Rohrquerschnitt. [5]

Da es aber in der Realität nicht möglich ist unendlich viele Pfadgeschwindigkeiten zu bestimmen, muss man sich approximativer mathematischer Methoden behelfen. Dazu führt man Gewichtsfunktionen  $w(x)$  ein, welche den verschiedenen gemessenen Geschwindigkeiten eine gewisse Wertigkeit verleihen, um den Durchfluss durch eine endliche Anzahl an Messwerten zu bestimmen. Daraus folgt die Formulierung für den Durchfluss wie sie weiterhin verwendet werden soll.

$$Q = 2 \cdot R^2 \sum_{i=1}^N \bar{U}(x_i) \cdot \sqrt{1 - (x_i)^2} \cdot w(x_i) \quad (8.11)$$

Für die Lösung dieser Gleichung benötigt man die Kenntnis der Gewichtsfunktion  $w(x_i)$ . Dafür muss zuerst ganz allgemein die Numerische Integration anhand der hier gewählten Gauss-Jacobi Quadratur erklärt werden.

### Numerische Integration

Numerische Integration findet immer dann Anwendung wenn die Funktion nicht integrierbar ist, oder man nur einzelne Stützstellen und nicht den ganzen Verlauf der Funktion kennt. Für die Lösung gibt es verschiedene Verfahren wie die Trapez-, oder Simpsonregel, welche fixe Abszissenwerte verwenden und ihnen Gewicht verleiht. Die Abszissenwerte stehen hier repräsentativ für den Rohrquerschnitt und die angenäherte Funktion für das Geschwindigkeitsprofil. In der Abbildung 8.4 sieht man eine solche Annäherung, wobei einfach am linken und rechten Funktionsrand ausgewertet wird. Um die Approximation zu verbessern kann die Abszisse in feinere Intervalle unterteilt werden, was aber wieder die Kenntnis von mehr Funktionswerten verlangt. Für das dargestellte Beispiel berechnet sich das Integral wie folgt:

$$I = \int_0^1 f(x)dx = \sum_{i=1}^N w(x_i) \cdot f(x_i) \quad (8.12)$$

Bei zwei Stützstellen folgt:

$$\int_0^1 f(x)dx = w(x_1) \cdot f(x_1) + w(x_2) \cdot f(x_2) = w(0) \cdot f(0) + w(1) \cdot f(1) \quad (8.13)$$

Schlussendlich berechnet sich mit der Formel für ein Trapez die Fläche unter der Funktion. Wobei hier bewusst eine Intervallbreite von  $[1/0]$  gewählt wurde, um die Berechnung zu vereinfachen.

$$\int_0^1 f(x)dx = 1 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot f(0) + \frac{1}{2} \cdot f(1)\right) \quad (8.14)$$

Es ist ersichtlich dass durch die Wahl der Trapezregel welche eine lineare Approximation darstellt ein Berechnungsfehler gemacht wird. Man kann also weiterhin festhalten, dass immer dann wenn der Grad der zu approximierenden von der anzunähernden Funktion überstiegen wird, ein Integrationsfehler die Folge ist. Daher sollen auf dies aufbauend genauere Verfahren für die Numerische Integration, wie die Gauss Quadratur beschrieben werden.

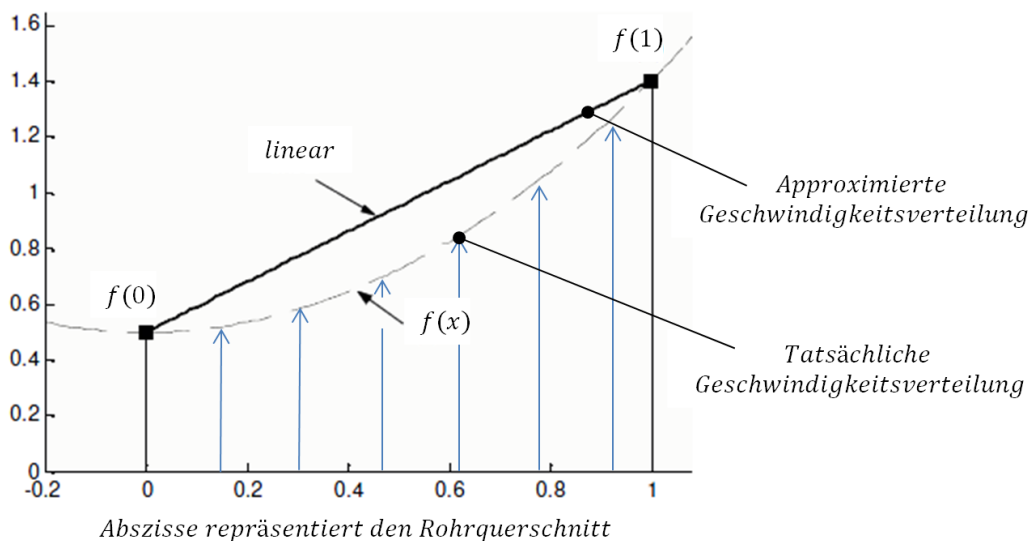


Abbildung 8.4.: Annäherung einer Funktion mit der Trapezregel. [5]

Laut der internationalen Norm für Abnahmemessungen IEC 41 ist die Gauss-Jacobi beziehungsweise Gauss-Legendre Quadratur als Berechnungsverfahren für die Auswertung von ADM nach dem Laufzeitdifferenzverfahren vorgeschrieben. Dabei handelt es sich um eine Gauss Quadratur mit den speziellen Gewichtsfunktionen nach Gauss-Jacobi

für Kreisquerschnitte und Gauss-Legendre für Rechteckquerschnitte. Diese Quadratur-Verfahren werden vorgeschrieben weil mit  $n$  Funktionswerten aus Messungen ein Polynom  $P(x)$  vom Grad  $2n - 1$  angenähert werden kann, was im Vergleich zu den anderen Numerischen Integrationsverfahren einen erheblichen Genauigkeitsvorteil mit sich bringt. Dies kommt daher, dass bei Gauss weder die Gewichtsfunktionen noch die zugehörigen Abszissenwerte fixiert sind, was die Freiheitsgrade erhöht.

### Gauss-Legendre

Die grundlegende Berechnungsvorschrift soll zuerst mit einem Beispiel für die Zweipunkt Gauss-Legendre Quadratur beschrieben werden, weil man dadurch das essentielle Verständnis für die späteren Berechnungen gewinnt. Zweipunkt bedeutet für die Bestimmung des Durchflusses, dass zwei Geschwindigkeitsmessungen an bestimmten Positionen. Wieder ist ein Integral von der vorigen Form, aber diesmal in den Grenzen von  $[-1/1]$  der Ausgangspunkt.

$$I = \int_{-1}^1 f(x)dx = w(x_1) \cdot f(x_1) + w(x_2) \cdot f(x_2) \quad (8.15)$$

Daraus resultieren vier Unbekannte  $w(x_1)$ ,  $w(x_2)$ ,  $x_1$  und  $x_2$ . Daher sind für die Lösung vier Gleichungen nötig. Ein Polynom dritten Grades, zur Approximation der Funktionen, schreibt sich wie in Gleichung 8.16.

$$f(x) = P(x) = a + b \cdot x + c \cdot x^2 + d \cdot x^3 \quad (8.16)$$

Dieses integriert im Intervall  $[-1/1]$  ergibt 8.17.

$$I = \int_{-1}^1 (a + b \cdot x + c \cdot x^2 + d \cdot x^3)dx \quad (8.17)$$

Nach der Integration und dem Einsetzen der Grenzen folgt weiter 8.18.

$$I = a \cdot 2 + b \cdot 0 + c \cdot \frac{2}{3} + d \cdot 0 \quad (8.18)$$

Laut der gegebenen Berechnungsvorschrift ist das nichts anderes als die Summe der Gewichte mit den zugehörigen Funktionswerten.

$$I = w(x_1) \cdot (a + b \cdot x_1 + c \cdot x_1^2 + d \cdot x_1^3) + w(x_2) \cdot (a + b \cdot x_2 + c \cdot x_2^2 + d \cdot x_2^3) \quad (8.19)$$

Umschreiben dieser Beziehung und ein Koeffizientenvergleich zwischen 8.18 und 8.19 ergibt vier Gleichungen für vier Unbekannte.

$$2 = w(x_1) + w(x_2) \quad (8.20)$$

$$0 = w(x_1) \cdot x_1 + w(x_2) \cdot x_2 \quad (8.21)$$

$$\frac{2}{3} = w(x_1) \cdot x_1^2 + w(x_2) \cdot x_2^2 \quad (8.22)$$

$$0 = w(x_1) \cdot x_1^3 + w(x_2) \cdot x_2^3 \quad (8.23)$$

Daraus lassen sich die Unbekannten bestimmen, welche die nachstehenden Werte ergeben:

$$w(x_1) = w(x_2) = 1 \quad (8.24)$$

$$x_1 = x_2 = +/ - \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (8.25)$$

Mit dem oben angeführten Beispiel wurde gezeigt, dass mit zwei Messwerten, die dazugehörigen Messpositionen (Stützstellen) und auch die Gewichtungsfaktoren für die Berechnung des Integrals ermittelt werden können. Dabei nähert man ein Polynom vom Grad  $2n - 1$ , also für zwei Messwerte vom Grad drei, an.

Dieses Verfahren auf die Durchflussmessung angewandt, bedeutet dass die Position der Pfade mit  $x_1$  und  $x_2$  am Rohr festgelegt ist. Vergleiche dazu die Darstellung 8.5 mit den Abständen  $z_1$  und  $z_2$  die sich wieder nach der Rücktransformation mit  $x = z/R$  ergeben. Überdies kann mit der Formel 8.9, den gemessenen Pfadgeschwindigkeiten und deren Gewichtungen  $w(x_1)$  und  $w(x_2)$ , der Durchfluss bestimmt werden.

### Gauss-Jacobi Verfahren

Verallgemeinert folgt weiter das Berechnungsverfahren und der dazugehörige Formalismus, sowie außerdem ein Beispiel für die Gauss-Jacobi Gewichtung. Ausgangspunkt ist die Gleichung für den Durchfluss 8.26, für welche die Stützstellen und die dazugehörigen Gewichte bestimmt werden sollen.

$$Q = 2 \cdot R^2 \sum_{i=1}^N \bar{U}(x_i) \cdot \sqrt{1 - (x_i)^2} \cdot w(x_i) \quad (8.26)$$

Allgemein gilt, dass die Stützstellen genau den Nullstellen des n-ten orthogonalen Polynoms vom Grad n entsprechen. Diese Polynome müssen dabei orthogonal bezüglich des mit  $W(x)$  gewichteten Skalarproduktes sein [22].

Für die gewählte Anwendung lässt sich die Berechnung der Nullstellen mit der *Rodrigues*-Formel 8.27 durchführen. Die Nullstellen sind aus dem Polynom vom höchsten Grad bestimmbar. Das bedeutet für zwei Stützstellen den Faktor  $n = 2$ .

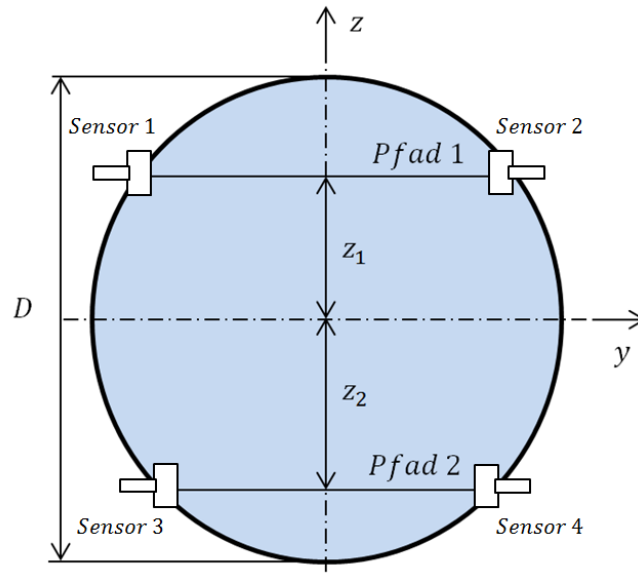


Abbildung 8.5.: Darstellung einer zweipfadigen ADM mit deren Abständen von der Mittelachse. [21]

$$p_n = \frac{1}{e_n w(x)} \frac{d^n}{dx^n} (w(x) g(x)^n) \quad (8.27)$$

Der Tabelle 8.1 kann man die Parameter zur Bestimmung der verschiedenen Orthogonalpolynome entnehmen. Findet man dadurch die Nullstellen des n-ten Polynoms, wird weiter mit der Bestimmungsgleichung für die Gewichte  $w_j(x)$  aus den Lagrange-Polynomen  $L_j(x)$  gerechnet. Dies ist in den Gleichungen 8.28 und 8.29 ersichtlich.

Tabelle 8.1.: Wichtige Beispiele von Orthogonalpolynomen unter Anwendung von Formel 8.27. [22]

| Wichtige Beispiele von Orthogonalpolynomen |                 |           |          |                                    |  |  |          |             |
|--|-----------------|-----------|----------|------------------------------------|--|--|----------|-------------|
| $p_n(x)$                                   | Name            | a         | b        | $\omega(x)$                        | Standard.  | $h_n$  | $e_n$    | $g(x)$      |
| $P_n(x)$                                   | <i>Legendre</i> | -1        | 1        | 1                                  | $P_n(x) = 1$                                     | $\frac{2^n}{2n+1}$                                   | $2^n n!$ | $(x^2 - 1)$ |
| $T_n(x)$                                   | <i>Tscheby.</i> | -1        | 1        | $\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$           | $T_n(1) = 1$                                     | $\left(\frac{\pi}{2}, n \neq 0\right)$<br>$\pi, n=0$ | $2^n n!$ | $(x^2 - 1)$ |
| $L_n(x)$                                   | <i>Laguerre</i> | 0         | $\infty$ | $e^{-x}$                           | $K_n = (-1)^n / n!$                              | 1  | $1/n!$   | $x$         |
| $H_n(x)$                                   | <i>Hermite</i>  | $-\infty$ | $\infty$ | $e^{-x^2}$                         | $e_n = (-1)^n$                                   | $\sqrt{\pi} 2^n n!$                                  | $(-1)^n$ | 1           |
| $P_n^{(\alpha, \beta)}(x)$                 | <i>Jacobi</i>   | -1        | 1        | $\frac{(1-x)^\alpha}{(1+x)^\beta}$ | $P_n^{(\alpha, \beta)}(1) = \binom{n+\alpha}{n}$ |  | $2^n n!$ | $(x^2 - 1)$ |

$$L_j(x) = \prod_{k=0, k \neq j}^N \frac{x - x_k}{x_j - x_k} \quad (8.28)$$

$$w_j(x) = \frac{1}{W(x_j)} \int_{-1}^1 W(x) \cdot L_j(x) \cdot dx \quad (8.29)$$

Eine genaue Ableitung der Formeln mit Erklärung kann nach [23] erfolgen. Die hier verwendete Herleitung ist abgekürzt nach [5] angeführt.

Um ein besseres Verständnis für diese Berechnungsvorschriften zu bekommen, wird wieder anhand einer Zweipunkt Gauss-Legendre Quadratur eine Berechnung durchgeführt. Wiederholt ist bewusst ein Zweipunkt Gauss-Legendre Verfahren gewählt, um die Ergebnisse zum vorigen Beispiel vergleichen zu können.

Zuerst die Berechnung der Nullstellen mit der *Rodrigues*-Formel 8.27 für  $n = 2$  und den Funktionen aus der Tabelle 8.1 .

$$p_2 = \frac{1}{2^2 \cdot 2! \cdot 1} \frac{d^2}{dx^2} (1 \cdot (x^2 - 1)^2) \quad (8.30)$$

Nach zweimaligem Ableiten und Null setzen von der Beziehung 8.30 ergibt sich die Gleichung für die Bestimmung der Nullstellen.

$$\frac{dp_2}{dx} = \frac{1}{8} (2(x^2 - 1) \cdot 2x^2) \quad (8.31)$$

$$\frac{d^2p_2}{dx^2} = \frac{1}{2} ((x^2 - 1) + 2x^2) = 0 \quad (8.32)$$

Schlussendlich folgen die schon bekannten Werte für die Nullstellen. (Siehe 8.25)

$$x_1 = x_2 = +/ - \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (8.33)$$

In weiterer Folge bestimmt man die Gewichte  $w_j(x)$  der zugehörigen Nullstellen unter der Verwendung von 8.29 mit  $W(x_1) = 1$ , wie es in der Tabelle 8.1 gegeben ist.

$$w_1(x) = \frac{1}{1} \int_{-1}^1 1 \cdot \frac{x - x_2}{x_1 - x_2} \cdot dx \quad (8.34)$$

Einsetzen der Nullstellen und integrieren liefert wieder für die Gewichte  $w_1(x) = w_2(x) = 1$ .

Da jetzt der Grundlegende Algorithmus zur Bestimmung der Gewichte und Messpositionen gegeben ist, kann in weiterer Folge die Betrachtung auf die Gewichtung der Geschwindigkeiten gelegt werden. Bis jetzt wurde nämlich nur eine Gewichtung der akustischen Pfade und deren Position am Rohr diskutiert.

### Vergleich zum OWICS Verfahren

In diesem Abschnitt soll der Schwerpunkt auf der Gewichtung der Geschwindigkeiten liegen welche das ADM liefert. Prinzipiell kann man sich das Geschwindigkeitsprofil in einem Rohr als konstant in y-Richtung vorstellen wenn dieses über die Pfade gemittelt wird. Diese Näherung ist natürlich falsch und so versucht man zum Beispiel die Haftbedingung, das heißt das die Geschwindigkeit an der Wand auf Null abfallen muss, mit einzubeziehen. Dies ist in Abbildung 8.6 dargestellt. Dabei ist zu erwähnen, dass das OWICS<sup>1</sup> Verfahren eine spezielle Gewichtung der Geschwindigkeiten vornimmt. Aus der Tabelle 8.1 entnommen, ergibt sich für die Gauss-Jacobi Quadratur eine Gewichtungsfunktion laut 8.35.

$$W(x) = (1 - x)^a \cdot (1 + x)^b \tag{8.35}$$

Welche mit  $a = b = \kappa = 0,5$  ganz einfach umgeschrieben werden kann zu Gleichung 8.36.

$$W(x) = (1 - x^2)^\kappa \tag{8.36}$$

Wenn man an die Gewichtung der Fläche zurück denkt (Gleichung 8.11), ist erkennbar, dass bei Gauss-Jacobi nichts anderes gemacht wird, als die Kreisfläche zu gewichten. Dies führt uns dann weiter auf die Form der Strömungsprofile wie sie in der Abbildung 8.6 dargestellt sind. Dabei sieht man links den Verlauf ohne Gewichtung der Strömungsverteilung und rechts den Verlauf mit Gewichtung. Dies kommt ganz einfach daher, dass bei dem OWICS Verfahren der in Gleichung 8.37 und 8.38 dargestellte Zusammenhang gilt .

$$W(x) = (1 - x^2)^\kappa \quad \text{mit} \quad \kappa = 0,6 \tag{8.37}$$

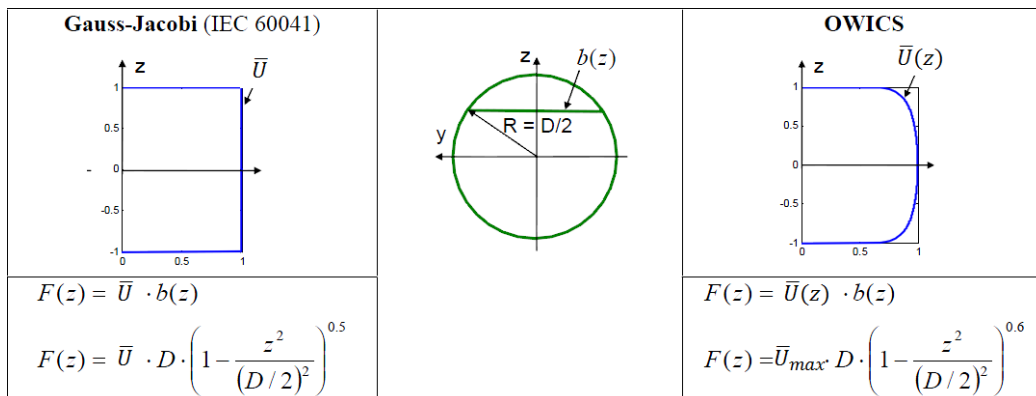


Abbildung 8.6.: Strömungsprofile beim Gauss-Jacobi und OWICS Verfahren. [5]

---

<sup>1</sup>OWICS steht für: Optimal weighted integration for circular sections



Dies wiederum lässt sich auf zwei Gleichungen aufspalten, einmal die Gewichtung der Fläche mit  $\kappa = 0,5$  und einmal die Gewichtung der Geschwindigkeiten entlang der Pfade mit  $\kappa = 0,1$ .

$$W(x) = W(x)_{Fläche} \cdot W(x)_{Geschwindigkeit} = (1 - x^2)^{0,5} \cdot (1 - x^2)^{0,1} \quad (8.38)$$

Der Ansatz für die Geschwindigkeitsverteilung, also  $\kappa = 0,1$  zu wählen, kommt von der Grundidee eines potenzförmigen Strömungsprofils 8.39. (Siehe dazu auch [4])

$$u(r) = u_{max}(1 - (r/R))^{1/n} \quad (8.39)$$

In der Gleichung 8.39 wird die Variable  $n$  verwendet, welche wiederum eine Funktion der Reynoldszahl  $Re$  und der Sandrauigkeit  $ks$  ist. Es können für die verschiedensten Werte von  $n$  Strömungsprofile graphisch in einem Rohrquerschnitt dargestellt und mit  $\kappa = 0,1$  verglichen werden [21]. (Siehe dazu Abbildung 8.7)

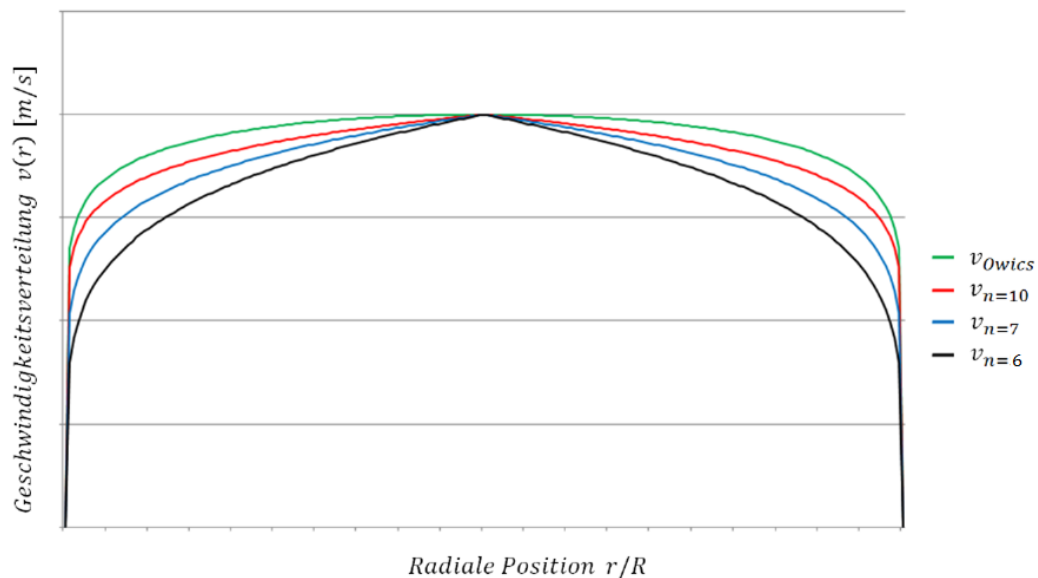


Abbildung 8.7.: Strömungsprofile für verschiedenste Reynoldszahlen im Vergleich zum OWICS Verfahren.

Hierbei werden Werte von  $n = 6$  für  $Re \approx 10^4$ ,  $n = 7$  für  $Re \approx 10^5$  und  $n = 10$  für  $Re \approx 10^6$  gewählt. Man kann den Unterschied zur OWICS Approximation erkennen, wobei natürlich für die verschiedensten Strömungsverhältnisse unterschiedliche Annäherungen angewandt werden müssen. Man erkennt weiter, dass mit steigender Reynoldszahl das Profil „völliger“ wird, da die Turbulenz in der Strömung und damit der Transport an kinetischer Energie zur Wand hin, zunimmt. Dies ist in [24] genauer beschrieben.

Mit  $\kappa = 0,5$ , also einer reinen Gewichtung der Fläche, ergibt sich der nachstehende Zusammenhang 8.40 für die Gewichtungsfunktion.

$$w_j(x) = \frac{1}{W(x_j)} \int_{-1}^1 W(x) \cdot L_j(x) \cdot dx \quad (8.40)$$

Nach dem Einsetzen von  $W(x)$  folgt 8.41.

$$w_j(x) = \frac{1}{(1-x_j^2)^{0,5}} \int_{-1}^1 (1-x^2)^{0,5} \cdot L_j(x) \cdot dx \quad (8.41)$$

Es soll der Fall einer einpfadigen Geschwindigkeitsmessung betrachtet werden. Das heißt man bekommt nur eine gemittelte Geschwindigkeit von der ADM zur Verfügung gestellt. Außerdem sind die Sensoren in der Mittelebene des Rohres positioniert, weil dies beim „Clamp-On“ Verfahren die übliche Anordnung ist. Also folgt für die Pfadposition  $x = 0$  und für das Lagrange-Polynom  $L_j(x) = 1$ , da nur ein Pfad verwendet wird. Diese Werte in 8.41 eingesetzt, ergeben für die Gewichtung den Zusammenhang 8.42.

$$w(x) = \frac{1}{(1-0)^{0,5}} \int_{-1}^1 (1-x^2)^{0,5} \cdot 1 \cdot dx \quad (8.42)$$

Diese Funktion integriert mit einer Substitution von  $x = \sin(u)$  und  $dx = \cos(u)du$  liefert das Ergebnis. Auch die Grenzen müssen mit substituiert werden  $\int_{-1}^1 dx = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} du$ .

$$w(u) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} (1 - \sin(u)^2)^{0,5} \cos(u) du = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} (\cos(u)^2)^{0,5} \cos(u) du \quad (8.43)$$

Unter Anwendung der Produktregel:

$$w(u) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos(u)^2 du = \cos(u) \sin(u) \Big|_{-\pi/2}^{\pi/2} - \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \sin(u)^2 du \quad (8.44)$$

Der erste Term auf der rechten Seite verschwindet in den angegebenen Grenzen. Der Zweite lässt sich als  $\int_{-\pi/2}^{\pi/2} 1 - \cos(u)^2 du$  schreiben. Teilt man dieses Integral auf und bringt  $\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos(u)^2 du$  auf die linke Seite folgt das Ergebnis.

$$w(u) = 2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos(u)^2 du = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} 1 du \quad (8.45)$$

$$w(u) = 1/2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} 1 du = \pi/2 \quad (8.46)$$

Also ergibt sich die Gewichtung zu  $w(x) = \pi/2$ . Mit der Gleichung für den Durchfluss 8.11 und  $x = 0$  sowie  $w(x) = \pi/2$  berechnet sich der Durchfluss mit 8.47.

$$Q = 2 \cdot R^2 \sum_{i=1}^N \bar{U}(x) \cdot \sqrt{1 - (0)^2} \cdot \pi/2 \quad (8.47)$$

Also folgt mit  $N = 1$ :

$$Q = R^2 \pi \cdot \bar{U}(x) \quad (8.48)$$

Dies ist nichts anderes als die Pfadgeschwindigkeit  $\bar{U}(x)$  multipliziert mit einer Kreisfläche  $R^2\pi$ . Das heißt für eine einpfadige Messung nimmt das Gauss-Jacobi Verfahren ein konstantes Strömungsprofil an welches in der Abbildung 8.6 zu erkennen ist. Was natürlich nicht korrekt ist, da insbesondere an der Wand die Geschwindigkeit aus der Haftbedingung verschwinden muss. Daher wählt man die oben beschriebene Gewichtung, wie zum Beispiel beim OWICS Verfahren.

### 8.2.2. Messwertanpassung durch Berücksichtigung der Geschwindigkeitsverteilung

Verschiedenste Ansätze um das Geschwindigkeitsprofil einer Strömung anzunähern können verwendet werden. Es soll ein Vorgehen zur Bestimmung der Verteilung angegeben werden. Siehe dazu auch die Herleitung nach [4]. Man geht von einer Flächengeschwindigkeit  $\bar{U}_A$  und einer dazugehörigen Rohrfläche  $A$  aus. Daraus bestimmt sich der Durchfluss  $Q$  mit der Gleichung 8.49.

$$Q = \bar{U}_A \cdot A \quad (8.49)$$

Allerdings stellt sich die Frage was ist eine Flächengeschwindigkeit und wie kann man sie bestimmen? Bei der ADM misst man eine Pfadgeschwindigkeit  $\bar{U}$ , welche auf eine Flächengeschwindigkeit umgerechnet werden muss. Es gelten die folgenden Beziehungen:

$$\bar{U}_A = \frac{Q}{A} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^R u(r) \cdot r \cdot dr \cdot d\phi}{R^2 \cdot \pi} \quad (8.50)$$

$$\bar{U} = \frac{\int_0^R u(r) \cdot dr}{R} \quad (8.51)$$

Hierbei kann gleich nach  $d\phi$  integriert werden. Außerdem erkennt man nichts anderes als eine Mittlung der Flächengeschwindigkeit über die Fläche und eine Mittlung der Pfadgeschwindigkeit über den Radius. Die Annahmen hierbei sind ein kreisförmiger Querschnitt mit einer Messung durch den Mittelpunkt.

Um aus der Information einer Pfadgeschwindigkeit auf den Durchfluss zu schließen, führt man einen Faktor  $k$  ein. Also folgt mit 8.52 und 8.49 die Gleichung 8.53.

$$Q = k \cdot \bar{U} \cdot A \quad (8.52)$$

$$\bar{U}_A = k \cdot \bar{U} \quad (8.53)$$

Umgeformt und einsetzen von 8.50 und 8.51 gibt:

$$k = \frac{2}{R} \cdot \frac{\int_0^R u(r) \cdot r \cdot dr}{\int_0^R u(r) \cdot dr} \quad (8.54)$$

Wobei  $k$  aus dem Strömungsprofil bestimmt werden muss. In der Beziehung 8.54 ist nur mehr  $u(r)$ , also die Verteilung der Geschwindigkeit unbekannt. Jetzt kann wie schon beim OWICS Verfahren erwähnt, der Ansatz eines Potenzprofiles gewählt, daraus der Faktor  $k$  und schließlich der Durchfluss  $Q$  bestimmt werden. Die Problematik dabei ist das unbekannte Strömungsprofil. Das eben nicht immer durch einen Potenzansatz approximierbar ist. Es seien noch zwei Ansätze für Strömungsprofile in kreisförmigen Rohren nach [4], gegeben.

### Potenzprofil

$$u(r) = u_{max}(1 - (r/R))^{1/n} \quad \text{mit } n = n(Re) \quad (8.55)$$

$$k_n = \frac{\bar{U}_A}{\bar{U}} = \frac{2n}{2n+1} \quad (8.56)$$

### Logarithmisches Profil

$$u(r) = u_{max}(1 + q \cdot \ln(1 - r/R))^{1/q} \quad \text{mit } q = q(Re) \quad (8.57)$$

$$k_q = \frac{\bar{U}_A}{\bar{U}} = \frac{1 - \frac{3}{2}q}{1 - q} \quad (8.58)$$

### Anwendung auf die Messungen

Als Beispiel für die Auswertung für ein Potenzprofil ergibt sich mit den Reynoldszahlen (zwischen  $3 \cdot 10^5$  und  $1,2 \cdot 10^6$ ) welche bei den Messungen am Institut aufgetreten sind, Werte für  $n(Re) = 7 - 9$ . Diese sind laut [24] angegeben. Es resultiert ein Faktor  $k$  welcher die Volumenstromäquivalente Strömungsgeschwindigkeit bestimmt, von  $k(n) = \frac{14}{15}$  bis  $\frac{18}{19}$ , was 0,933 und 0,947 entspricht. Das heißt man müsste die gemessene Pfadgeschwindigkeit und damit den Durchfluss noch um zirka 5% nach unten korrigieren. Wie in Kapitel 5 gezeigt wurde, sind aber die Messergebnisse immer zu tief ausgefallen. Würde man diese auch noch um den Faktor  $k$  von der Pfadgeschwindigkeit auf die über

die Fläche gemittelte Geschwindigkeit reduzieren, dann wären die Abweichungen noch größer. Trotzdem soll im Hinblick auf weitere Forschung in diesem Gebiet am Institut diese Thematik erwähnt sein, auch wenn sie aus dem genannten Grund nicht angewendet wurde.

### 8.2.3. Mehrpfadige Anordnung von Clamp-On Sensoren

Eine zusätzliche Idee ist die Anbringung von exzentrisch versetzten Clamp-On Sensoren am Rohr, zur mehrpfadigen Messung, wie es einleitend diskutiert wurde. Es sind bei diesen Messungen komplizierte Brechungsvorgänge durch das Rohr zu beachten, da die Sensoren nicht mehr einfach nur radial durch das Medium senden. Dazu sei der maximale Brechungswinkel, welcher in Abhängigkeit von der Schallgeschwindigkeit gegeben ist, bestimmt. Geht man wie in den meisten Fällen von einem Stahlrohr aus, so liegt die Schallgeschwindigkeit in diesem bei zirka 3300 m/s. Um die Herleitung zu vereinfachen wird eine Schallgeschwindigkeit im Wasser von 1500 m/s angenommen was zirka 25 °C entspricht. Ausgangspunkt ist die Annäherung des Sensors als eine Punktquelle. Daraus ergibt sich der nachstehende Formalismus für die Totalreflexion aus dem Snellius'schen Brechungsgesetz.

$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = \frac{c_{Rohr}}{c_{Wasser}} \quad (8.59)$$

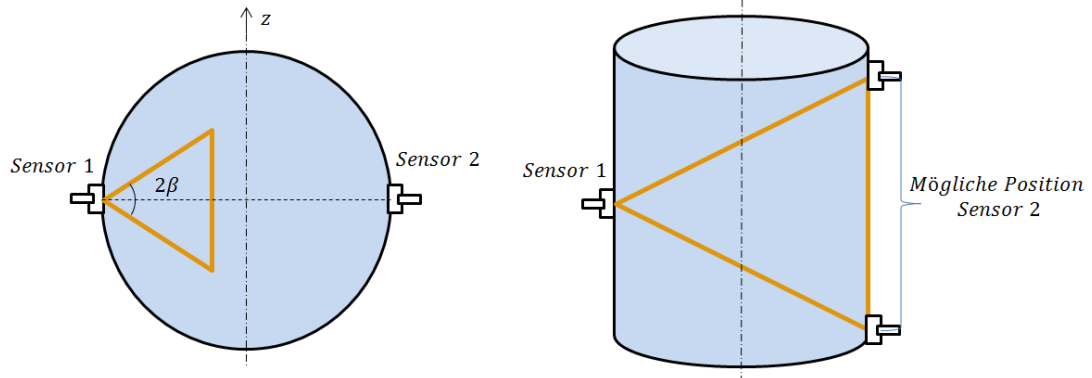
Hierin ist  $\alpha$  der Winkel im Rohr und  $\beta$  der Brechungswinkel im Wasser, sowie  $c$  die zugehörigen Schallgeschwindigkeiten. Setzt man den Winkel im Rohr auf 90 °, was der Totalreflexion entspricht, so folgt ein maximaler Pfadwinkel im Wasser:

$$\beta = \text{asin}\left(\frac{c_{Wasser}}{c_{Rohr}} \sin(90^\circ)\right) = 26^\circ \quad (8.60)$$

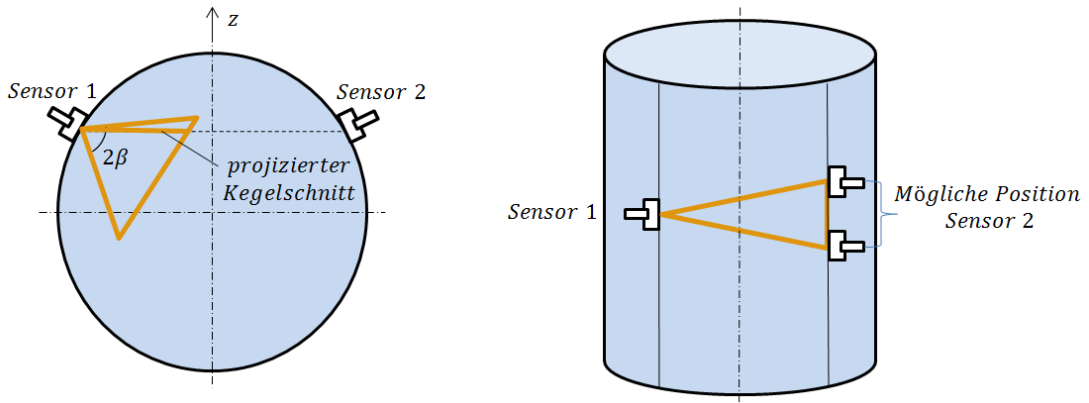
Dabei sei angemerkt, dass möglichst große Winkel  $\beta$  erwünscht sind, da diese bei der Projektion der axialen Strömungsgeschwindigkeit in den Pfad eine größere projizierte Geschwindigkeit liefern und damit größere Zeitunterschiede zwischen vorwärts und rückwärts gemessener Laufzeit. Dies ist wiederum günstig im Bezug auf die interne Taktrate die die maximal auflösbare Zeitdifferenz begrenzt.

Weiter stellt man sich den Sensor radial am Rohr versetzt vor, wie es bei der mehrpfadigen Anordnung der Fall ist. Dies ist in der Abbildung 8.8 b zu erkennen.

Der eingezeichnete Kegel hat den doppelten Winkel der Totalreflexion. Also den Bereich der maximal mit Clamp-On Sensoren verwendet werden kann, rein durch die Gesetzmäßigkeiten der Brechung. Dabei soll der Unterschied zwischen Sensoren welche radial durch das Rohr senden und exzentrisch versetzten, gezeigt werden. Je weiter die Sensoren aus der Mitte angeordnet sind, desto geringer wird der Winkel welcher für die Pfadanordnung axial am Rohr zur Verfügung steht. Damit wird die projizierte Geschwindigkeit immer geringer und die Genauigkeit bei der Bestimmung der Laufzeiten immer mehr durch die Auflösung des Signales bestimmt.



(a) Herkömmliche Anordnung der Clamp-On Sensoren.



(b) Exzentrisch versetzte Anordnung der Clamp-On Sensoren.

Abbildung 8.8.: Vergleich der Totalreflexion bei Clamp-On Sensoren an einem Rohr.

Es sei also aus den beschriebenen Zusammenhängen gefolgert, dass Clamp-On Sensoren in Kombination mit Stahlrohren nicht für exzentrische beziehungsweise mehrpfadige Anordnungen, aus Gründen der Brechung, geeignet sind. Würde man ein anderes Material, welches eine geringere Schallgeschwindigkeit als Stahl hat, verwenden, so könnten größere Winkel und damit bessere Verhältnisse erreicht werden.

## 9. Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend sei in diesem Kapitel ein kurzer Überblick über diese Arbeit gegeben. Diese setzt sich mit der akustischen Durchflussmessung und dabei im speziellen nach der Laufzeitdifferenzmethode durch ein Clamp-On Verfahren, auseinander.

Am Beginn dieser Arbeit sind die zwei geläufigsten Messprinzipien erklärt und mathematische Zusammenhänge werden vermittelt. Für die Verständnis eines akustischen Sensors wird dessen Funktion beschrieben und dabei der piezoelektrische Effekt erklärt. Darauf aufbauend erfolgt die Erstellung einer Betriebsanleitung für das Messsystem, damit weiterhin ein problemloser Betrieb möglich ist. Die Einbindung des Messverfahrens in das am Institut für hydraulische Strömungsmaschinen verwendete Programm ist ein weiterer Punkt der behandelt wird. Anschließend erfolgen erste Messungen im Labor, bei denen unterschiedlichste Anordnungen, sowie Messparameter variiert werden. Die ermittelten Ergebnisse werden in *Matlab* ausgewertet und dabei statistisch relevante Größen überprüft. Anhand dieser erfolgt eine Fehlerberechnung für die akustische Durchflussmessung, welche Grenzen aufzeigt und es ermöglicht im Vorhinein Einflussfaktoren abzuschätzen. Mit den Messergebnissen und den erhaltenen Fehlerbetrachtungen wird eine Optimierung hinsichtlich der Messgenauigkeit vorgenommen. Die gewonnenen Erkenntnisse werden in einer Kraftwerksmessung getestet und überprüft. Auch die Richtlinien beim Messen mit akustischen Sensoren werden angeführt. Im letzten Kapitel der Arbeit sind unterschiedlichste Verbesserungspotenziale für die ADM erwähnt und beschrieben.

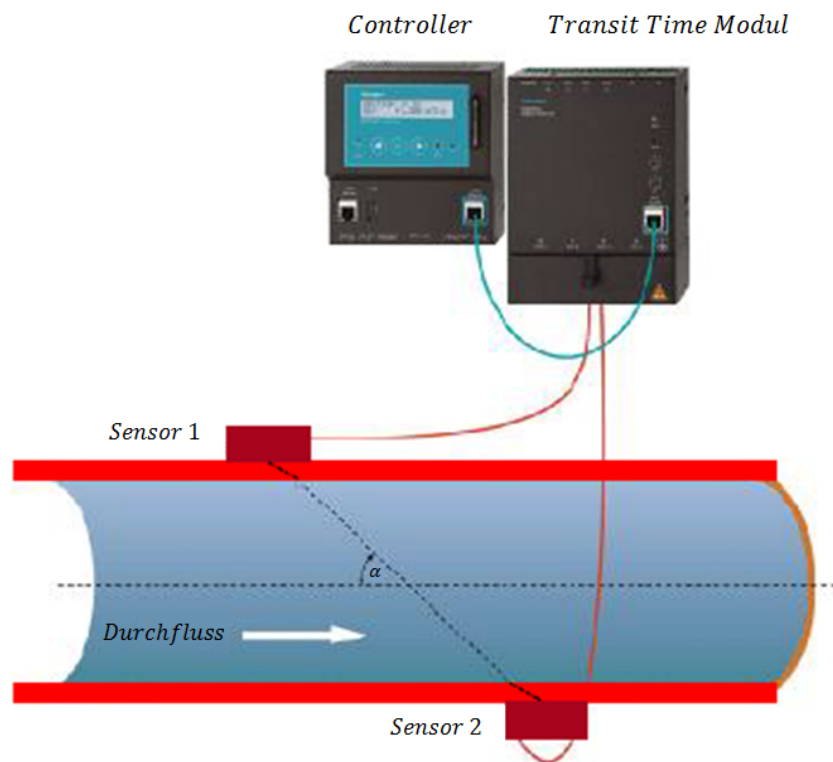
In Zukunft soll das verwendete Messsystem zur Überprüfung von Volumenströmen am Institut, sowie in Kraftwerken dienen. Neue Sensoren mit höheren Sendefrequenzen sollen weiter an kleineren Rohrdurchmessern getestet werden, um die Messergebnisse in diesem Bereich zu verbessern.

Eine interessante Idee wäre die Anwendung von mehrpfadigen Clamp-On Sensoren. Diese könnten die Messergebnisse durch eine genauere Auflösung des Strömungsprofils verbessern. Allerdings sind bei diesen Anordnungen komplizierte Brechungsvorgänge zu bewältigen und außerdem die Grenzen durch die Totalreflexion zu beachten.

Weiter sollte um die Montage der Sensoren zu erleichtern, die Positionierung mit Laserpointern untersucht werden. Dies könnte zusätzlich die Genauigkeit erhöhen, da durch eine ungenaue Ausrichtung der Sensoren ein Messfehler entsteht.

## A. Anleitung und Inbetriebnahme

Diese Anleitung richtet sich in erster Linie an das am Institut verwendete Messgerät. Dieses basiert auf einem von der Firma *Rittmeyer* entwickelten Clamp-On Verfahren welches nach dem Prinzip der Laufzeitdifferenzmethode arbeitet. Dafür kommen vier Sensoren vom Typ *MFATAG05* zum Einsatz, welche mit Hilfe einer magnetischen Halterung an verschiedenen Rohren oder Kanälen angebracht werden können. Darin steht die Abkürzung „05“ für die Frequenz in MHz, also senden die Sensoren mit 500 KHz. Weiter sind diese über Kabel mit dem *RISONIC Ultrasonic Transit Time Modul* verbunden, welches wiederum durch den *RISONIC Controller* gesteuert wird. Man kann die Steuerung des Sensors über das am *Controller* vorhandene Menü vornehmen. Allerdings sollte für erweiterte Einstellungen und eine sachgerechte Inbetriebnahme des Messsystems eine Verbindung mit einem LAN-Kabel zu einem PC hergestellt werden. Eine einfache Darstellung der verwendeten Geräte ist in Abbildung A.1 gegeben.



*Clamp On Sensoren werden von außen aufgeschnallt.  
Ultraschall Signal wird durch die Rohrwand hindurch gesandt*

Abbildung A.1.: *Rittmeyer* Messgeräte nach dem Clamp-On Verfahren. [25]



## A.1. Technische Daten der Clamp-On Sensoren

Um die Grenzen und Anwendungsbereiche des Clamp-On Verfahrens zu beschreiben, sind hier die wichtigsten technischen Daten nach [26] für den verwendeten Sensor *MFA-TAG05* aufgelistet.

- Sensorschutzklasse: IP65. Worin „IP“ für *International Protection* und die Ziffern „6“ für *Staubdicht* beziehungsweise *vollständiger Schutz gegen Berührung*, sowie „5“ für *Schutz gegen Strahlwasser aus beliebigem Winkel* nach DIN EN 60529 steht.
- Oszillationsfrequenz des Sensors: 500 kHz.
- Minimale akustische Pfadlänge: 0,500 m.
- Maximale akustische Pfadlänge: 4,000 m.
- Rohrwandstärke: 8-60 mm.
- Sensormaterial: **Polyetheretherketon** (PEEK) und Aluminium.
- Einsatztemperatur: -20°C bis +70°C.
- Luftfeuchtigkeit bis 100% relative Feuchte.

## A.2. Montage der Sensoren

Als erstes sollte man sich überlegen wie viele Sensoren für die Messungen angeschlossen werden müssen. Dabei gilt, dass mit der Anzahl der Sensoren normalerweise die Genauigkeit der Messung steigt. Allerdings nimmt dabei auch der Montageaufwand zu. Die Sensoren sind immer paarweise zu verwenden, um einen akustischen Messpfad zu bilden. Außerdem kann man auch nicht mit einer ungeraden Anzahl an Sensoren messen. Weiter ist es wichtig eine geeignete Messposition der Sensoren zu finden, was wieder mit deren Anzahl zusammenhängt. Im Allgemeinen sollte die Messung an einer Stelle erfolgen, an welcher die Strömung möglichst ausgebildet ist. Ungleichmäßige Strömungen welche durch verschiedenste Armaturen oder Rohrverzweigungen hervorgerufen werden, können dabei eine Messung so stark beeinflussen, dass die Ergebnisse nicht mehr aussagekräftig sind. Die Firma *Rittmeyer* empfiehlt die in Abbildung A.2 gezeigten Beruhigungsstrecken für ein einpfadiges Messverfahren.

### A.2.1. Vorbereitung des Montageortes - Randbedingungen

Damit eine genaue und reproduzierbare Messung erfolgen kann, muss die Position der Sensoren am Rohr genau markiert werden. Außerdem ist es wichtig ein Rohrstück zu wählen welches den empfohlenen Beruhigungsstrecken entspricht. Weiter sollte auf einem möglichst runden Rohr gemessen werden, da man sonst falsche Informationen im *Controller* eingibt, welcher nur einen Durchmesser und keine Unrundheit berücksichtigt. Zur exakten Messung darf auch nur auf glatten Rohroberflächen gemessen werden, da die Schallwellen möglichst ungestört durch die Wandung dringen sollten. Dazu

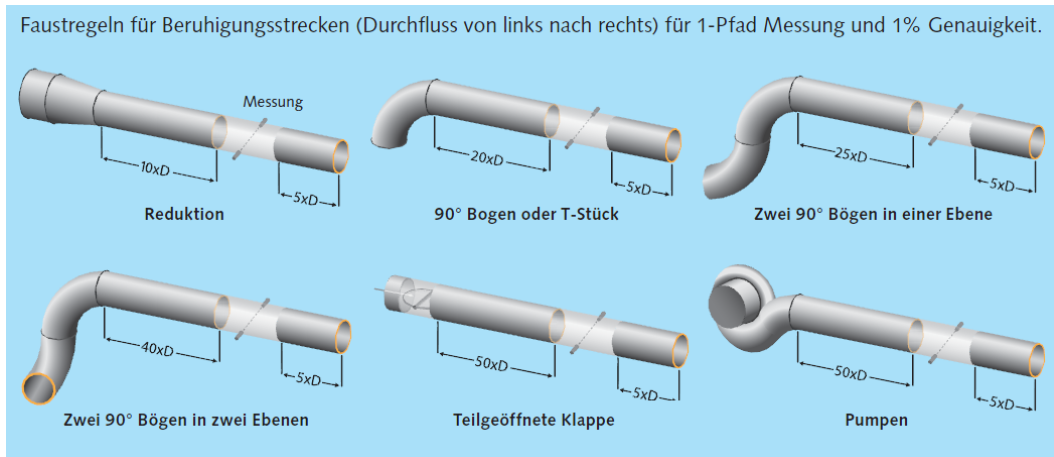


Abbildung A.2.: Empfohlene Einbaulängen laut der Firma *Rittmeyer* für einpfadige Messung. [27]

empfehlen die Firma *Rittmeyer* eine Reinigung der Oberfläche mit dem mitgelieferten Schnellreiniger von *Loctite*. Ein weiteres Kriterium für die Wahl des Montageortes ist der axiale Abstand der Sensoren, welcher je nach gewählter Anordnung unterschiedlich groß ist. Sollen alle Anordnungen getestet werden so muss von der längsten, also der W-Anordnung ausgegangen werden, was zirka 1,5 mal dem Durchmesser für den axialen Abstand entspricht. Für V- und Z-Anordnung ergeben sich Werte von zirka 1 mal und 0,5 mal dem Durchmesser. Prinzipiell besteht die Möglichkeit jede radiale Position am Rohr zu verwenden, es wird aber die Montage in der horizontalen Ebene empfohlen. Das weitere Vorgehen wird zum Teil nach der von *Rittmeyer* empfohlenen Schnellinstallation durchgeführt [28].

Eine Liste der benötigten Materialien lautet wie folgt:

- Schnellreiniger von *Loctite*. (Siehe Abbildung A.3 a)
- Maßband für die genaue Bestimmung des Umfangs sowie der axialen Positionen



(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung A.3.: Verwendete Hilfsmittel bei der Sensormontage a) Reinigungsmittel, b) Ultraschall Kopplungsgel, c) Sensor und Halterung, d) Kleber.

Mit diesen beiden Materialien sollte eine geeignete Position gefunden und gereinigt

werden. Der genaue Abstand der Sensoren wird mit Hilfe des Computers in Abschnitt A.4.2 bestimmt.

### A.2.2. Positionierung der Sensoren

Ist der Montageort fachgerecht vorbereitet, kann die Montage der Sensoren erfolgen. Dazu benötigt man die folgenden Materialien:

- Sensor vom Typ *MFATAG05* (Siehe Abbildung A.3 c).
- Magnetische Halterung der Sensoren (Siehe Abbildung A.3 c).
- Maßband.
- Messschieber mit einem Außenmaß das zirka dem Durchmesser des Rohres entspricht.
- Papierstreifen oder biegbares Aluband, welche mindestens so lang wie der Umfang des Rohres sein müssen, plus zehn Zentimeter Aufmaß. Sowie eine Breite von zirka der Sensorhalterungslänge aufweist.
- Stift zum Anzeichnen der Markierungen.
- Wasserwaage mit welcher die Neigung des Rohres und die Ausrichtung der Sensoren bestimmt werden kann.
- Lineal oder Formrohr mit mindestens einem Meter Länge welches nicht gekrümmt ist.
- Spanngurt.

### Schrittweise Montage der Sensoren

1. Bei der Positionierung der ersten magnetischen Halterung an der gereinigten Rohrstelle muss darauf geachtet werden, dass die Einkerbung an welcher das Kabel für die Sensoren durchgeführt wird, nach außen gerichtet ist. Das heißt, dass der Sensor in die entgegen gerichtete Richtung sendet, als das Kabel angeschlossen ist. Man bringt also wenn möglich die Halterung auf der horizontalen Ebene des Rohres an. Dann richtet man den Sensor mit Hilfe der Wasserwaage aus, wobei als erstes die Steigung des Rohres und anschließend die der Halterung bestimmt wird. Nun muss man die Halterung an den Winkel des Rohres anpassen, damit auch wirklich in der gewünschten Ebene gemessen wird. Dies ist in der Abbildung A.4 dargestellt.
2. Im nächsten Schritt bestimmt man den genauen Umfang des Rohres mit Hilfe des Maßbandes und überträgt diesen Wert auf den Papier- beziehungsweise Alustreifen. Außerdem sollte auch gleich der halbe Umfang angezeichnet werden, damit man nachher die Halterung für den zweiten Sensor genau um 180° versetzt montieren kann. (Siehe dazu Abbildung A.5)



Abbildung A.4.: Abgleich der Montagewinkel am Rohr.

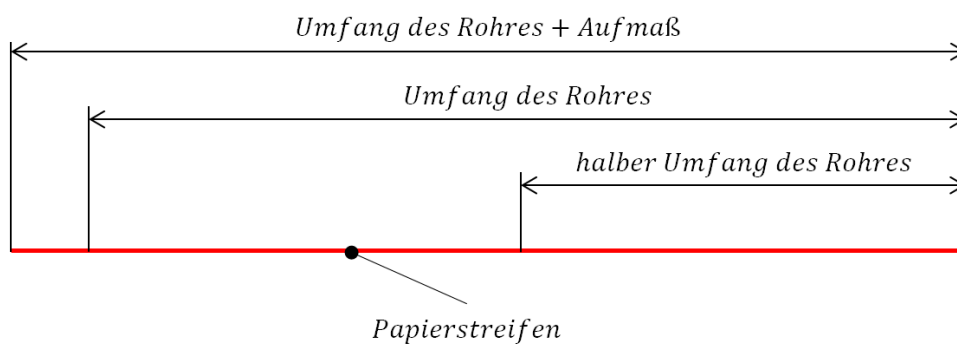


Abbildung A.5.: Anzeichnen der Markierungen am Papier-, oder Alustreifen.

3. Mit Hilfe der montierten Halterung sind die eingekerbten Markierungen am Umfang dieser, auf das Rohr zu übertragen. Weiter wird von der Horizontalen auf die gegenüberliegende Seite des Rohres mit dem Papier-/Alustreifen gemessen. Wichtig ist dabei auf eine straffe Anbringung des Streifens und der Überlappung zu achten, damit die Markierungen auch wirklich gegenüber am Rohr gesetzt werden. Das beschriebene Vorgehen ist in Abbildung A.6 ersichtlich. Wie in der Abbildung ersichtlich ist, werden die oberen Markierungen der Halterung um  $180^\circ$  versetzt, was dann für die zweite Halterung die unteren Markierungen bedeuten. Nun bringt man die zweite Halterung an der gegenüberliegenden Markierung an und richtet sie wieder mit der Wasserwaage aus.

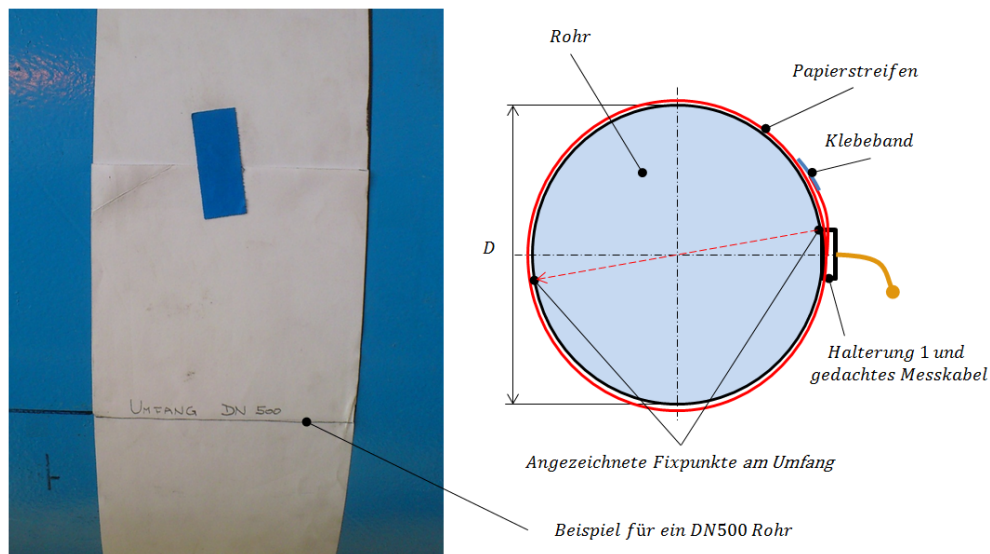
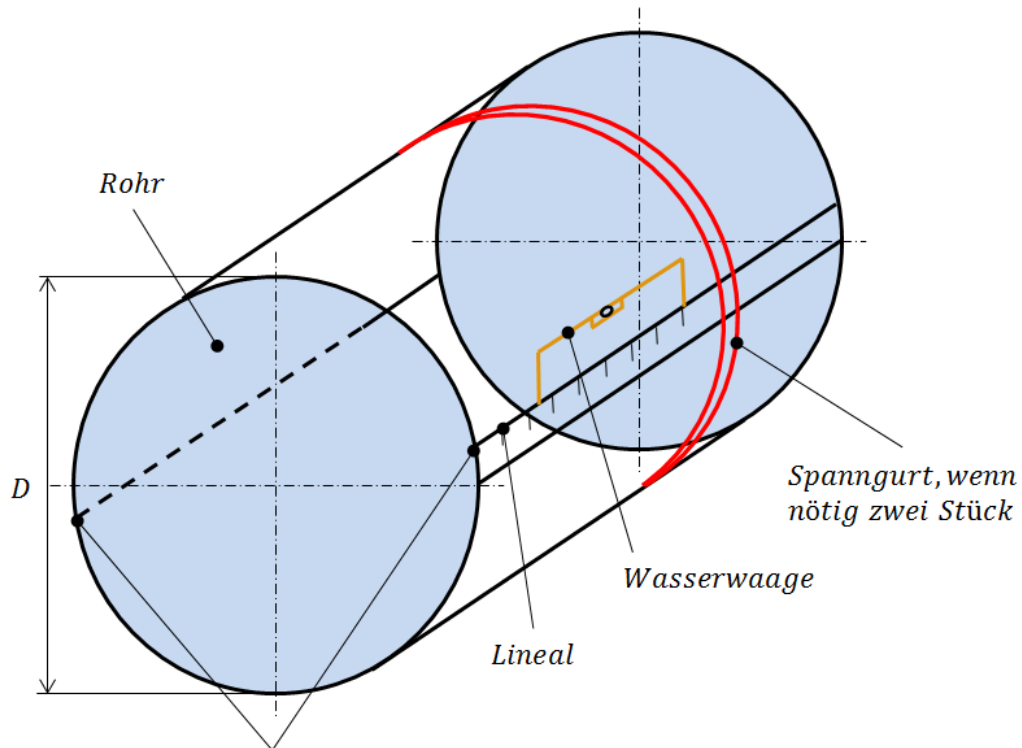


Abbildung A.6.: Vermessung des Rohrumfanges mit Hilfe eines Papierstreifens.

4. Für die nächsten Sensoren welche man in einem bestimmten axialen Abstand am Rohr montiert, muss dieser erst aus den Rohrdaten ermittelt werden. Es gibt dabei die drei oben besprochenen Anordnungen und damit verschiedenen Abstände. Die Berechnung ist in Kapitel A.4 beschrieben. Ist der gewünschte Wert bestimmt, kann mit einem Lineal oder Formrohr, dem Spanngurt und der Wasserwaage weitergearbeitet werden. Dazu bringt man das Lineal/Formrohr am Rohr mit dem Spanngurt an. Weiter sollte das Lineal/Formrohr so lange am Rohr verschoben werden bis es an einer Seite die vorher angezeichneten Markierung berührt. In weiterer Folge richtet man diese mit der Wasserwaage aus und markiert das Rohr in den gewünschten axialen Abständen. Dadurch sind die Positionen für die verschiedensten Anordnung auf dieser Seite des Rohres bestimmt. Das beschriebene Vorgehen ist in der Darstellung A.7 gegeben.
5. Um die Markierungen auf der gegenüberliegenden Seite zu erhalten, verfährt man noch einmal wie in Schritt drei beschrieben. Es ist weiter möglich alle vier Halterungen am Rohr anzubringen und die jeweils auf einer Rohrseite liegenden Sensoren mit Hilfe des Lineals und der Wasserwaage erneut abzugleichen, falls die Positionen noch nicht genau stimmen. Dazu legt man das Lineal an die Ober-



*Angezeichnete Fixpunkte am Umfang*

Abbildung A.7.: Bestimmung der Position von Halterung drei und vier.

kante der Halterungen und richtet dieses mit der Wasserwaage aus, wobei darauf geachtet werden muss, dass die Halterungen mit der ganzen Längsseite am Lineal anliegen. Erklärung dazu in Abbildung A.8. Weiters kann auch noch mit dem Papier- beziehungsweise Alustreifen nach kontrolliert werden, ob die Positionen, also die  $180^\circ$  Versatz am Umfang stimmen.

6. Eine genauere Überprüfung der Position erfolgt später mit Hilfe des Computers
7. Dort sollte dann auch erst das Koppelgel verwendet werden, beziehungsweise der zusätzliche Kleber sofern eine fixe Montage gewünscht ist. (Siehe Abbildung A.3 b) und A.3 d)

### **A.3. Verbindung zum *Transit Time Modul* und *Controller***

Die Sensoren benötigen zur Signalverarbeitung den Anschluss an das *Transit Time Modul* welcher in Abbildung A.9 zusammen mit dem *Controller* und den restlichen Materialien zu sehen ist. Für den Anschluss der Sensoren an das Messgerät wird Folgendes verwendet:

- *Transit Time Modul*



Abbildung A.8.: Ausrichten der Sensorhalterungen am Rohr.

- *Controller*
- Orange Koaxialkabel für jeden Sensor ein Kabel
- Rotes LAN-Kabel, für die Verbindung *Transit Time Modul* und *Controller*

Dies gelingt mit den orangenen Kabeln welche einerseits am Sensor befestigt werden und andererseits am Modul verkabelt sind. Es ist darauf zu achten welche Sensoren miteinander kommunizieren, denn die Pfade A und B sind am Modul fix angeschlossen und so müssen für die Z-Anordnung die zwei Sensoren um  $180^\circ$  versetzt angebracht werden. Für V-/ und W-Anordnung ergibt sich eine Ausrichtung auf der gleichen Seite am Rohr. Die beiden Pfade bestehen jeweils aus zwei Sensoren und somit ist es auch möglich diese zwei vertauscht am Rohr anzubringen. Dies wiederum resultiert bei der Ausgabe des Durchflusses in einem positiven oder negativen Wert, je nachdem wie die Sensoren angeordnet sind. Sind die Pfade zueinander vertauscht, so ergibt sich ein Durchfluss von Null was man auch am PC über die Vorzeichen der Mittleren Pfadgeschwindigkeiten ablesen kann. Das heißt ein Pfad liefert eine positive und der andere eine negative Geschwindigkeit und dadurch heben sich die beiden auf.

Damit eine Übertragung des Signales an den *Controller* möglich ist, muss ein LAN-Kabel zwischen Transit Time Modul und *Controller* angeschlossen werden. Siehe dazu Abbildung A.1. Außerdem kann man am *Controller* die verschiedensten Messwerte und bestimmte Einstellungen mit den Cursortasten vornehmen.

## A.4. Ansteuerung mittels Computer

Für eine Ansteuerung der Sensoren und die Bestimmung von Messparametern wird der *Controller* mit einem weiteren LAN-Kabel am PC angeschlossen. Am Computer muss für eine Kommunikation mit dem Messgerät die folgende Einstellung vorgenommen werden. Im Startmenü des Computers folgt unter Start > Systemsteuerung > Netzwerk und Internet > Netzwerk- und Freigabecenter > LAN-Verbindung > Eigenschaften > die Darstellung A.10. Es müssen nur noch die angegebene IP-Adresse beziehungsweise Subnetzmaske eingegeben und anschließend mit „OK“ bestätigt werden. Gegebenenfalls

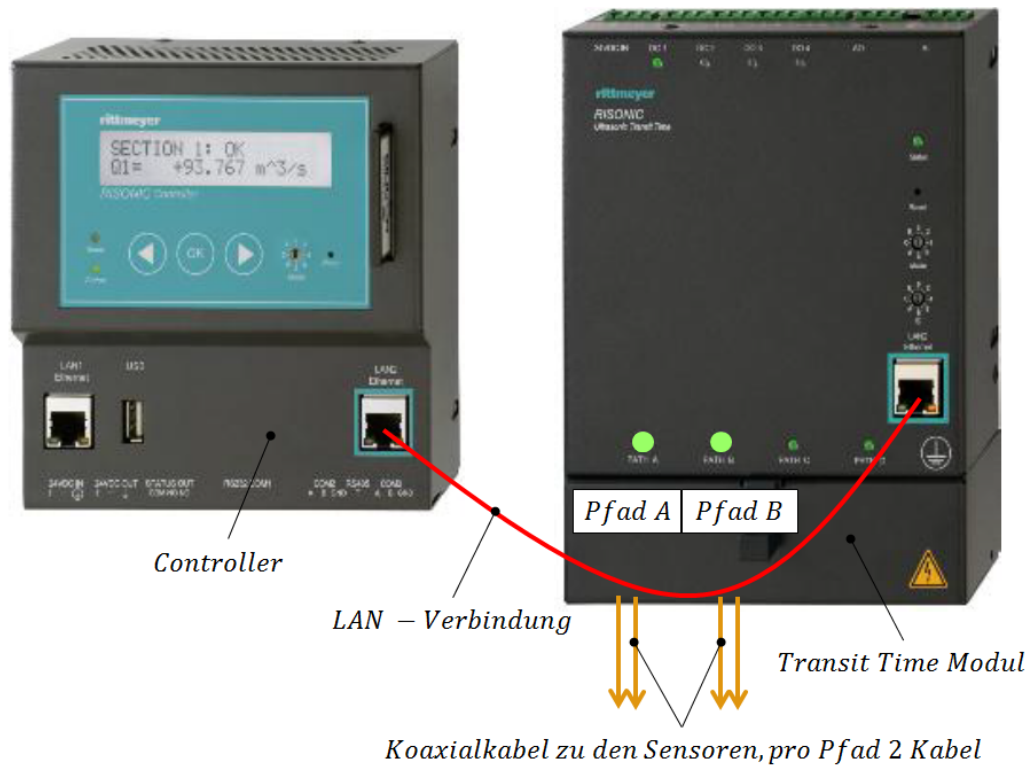


Abbildung A.9.: Anbindung der Sensoren an das *Transit Time Modul* und den *Controller*.

benötigt diese Änderung der Einstellungen einen Neustart.

#### A.4.1. Zugriff auf das Web-Interface

Nachdem eine Verbindung zum ADM steht, gelangt man mit dem Web-Browser (zum Beispiel: *Mozilla Firefox*, *Internet Explorer*, ...) durch die voreingestellte Adresse: 192.168.1.1 und dem Passwort: 1234 in das Menü.

In den nachstehenden Bildern und Screenshots sind die wichtigsten Einstellungen mit einem roten Kasten umrandet.

Als erstes erscheint eine Statusübersicht bei der allgemeine Informationen angegeben sind. Dort erkennt man auch die eingestellte Messsektion, falls vorhanden und deren angeschlossenen Pfade sowie den aktuellen Durchfluss. Die Steuerung des *RISONIC Modular* erfolgt über das Menü an der linken Seite. (Siehe dazu Ansicht A.11)

#### A.4.2. Einstellung einer Messsektion im Standard-Modus

Es steht einem der Standard und der Experten-Modus zur Verfügung. Für eine erste Messung kann im Standard-Modus gearbeitet werden. Im Unterpunkt Messparameter



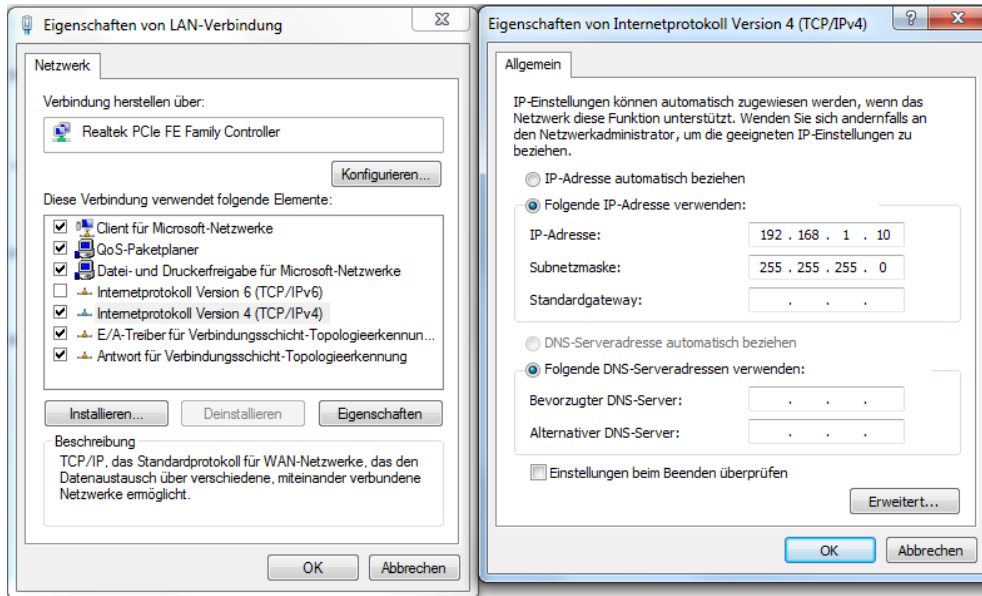


Abbildung A.10.: LAN-Verbindung zum Messgerät mittels Computer.

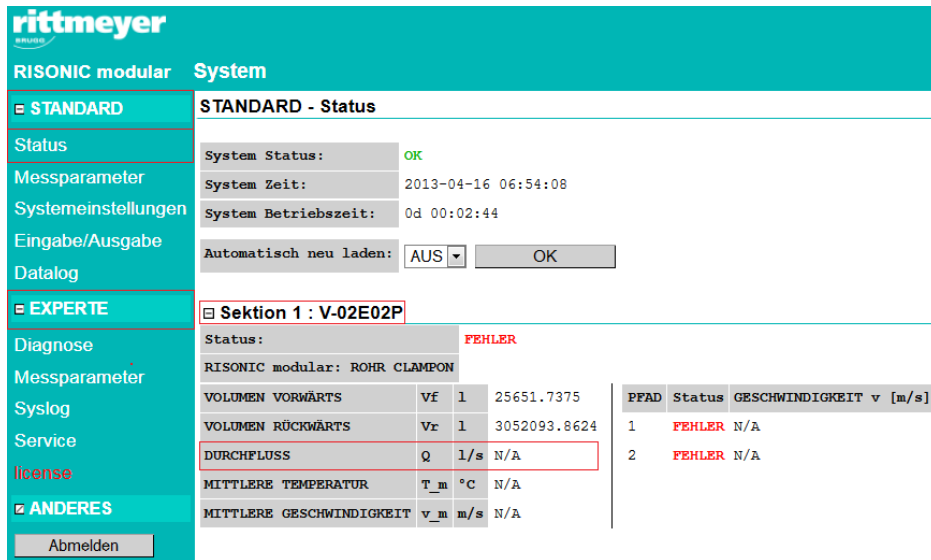


Abbildung A.11.: Statusansicht des Messvorganges nach der Anmeldung im *Risonic* System.

gibt man die benötigten Daten ein. Auch der axiale Abstand der Sensoren zueinander ist hier zu bestimmen. Wählt man im Hauptmenü links den Punkt Messparameter aus, folgt die Darstellung A.12.

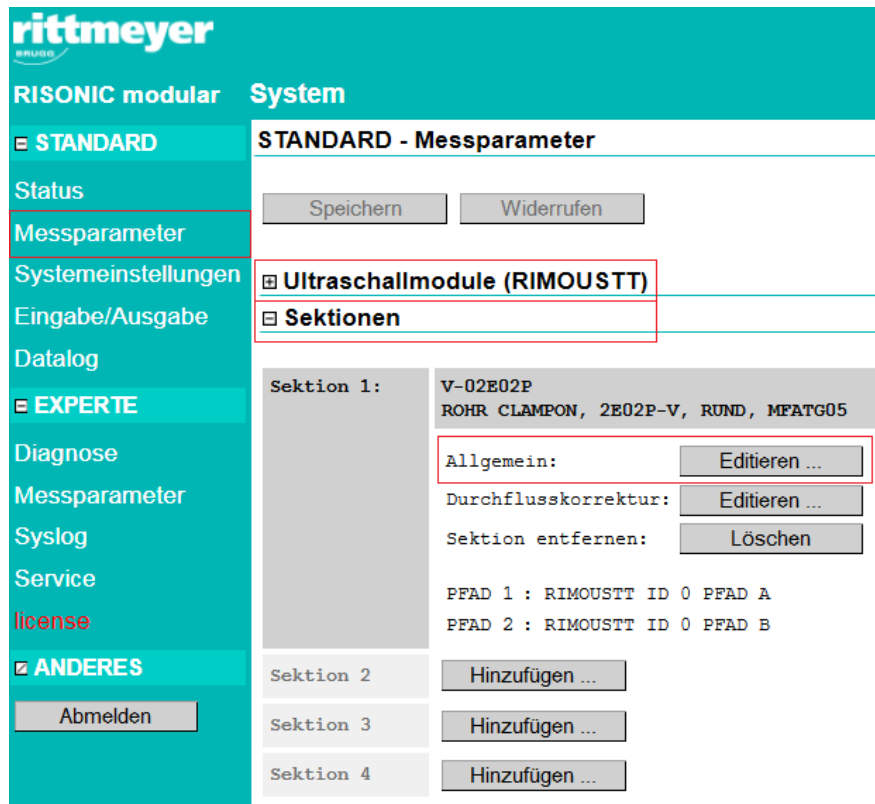


Abbildung A.12.: Ansicht der Sektionen bei den Messparametern.

Unter dem Menüpunkt Sektion gibt man die gewünschte Messanordnung wie zum Beispiel eine V-Anordnung vor. Zuerst sollte aber das *Transit Time Modul* (Ultraschallmodul) hinzugefügt werden, wie es in Abbildung A.13 zu erkennen ist.

Weiters gibt man hier auch die Anzahl der Messpfade an, welche am Modul angeschlossen, beziehungsweise verwendet werden. Am Institut erfolgt die Messung vorerst mit einem Ultraschallmodul, sowie maximal zwei Pfaden. Diese sind in diesem Menü hinzuzufügen beziehungsweise zu entfernen.

Die gewünschte Sektion ergibt sich mit den in Abbildung A.14 angegebenen Informationen für eine doppelte V-Anordnung. Hier können auch andere Rohrquerschnitte oder Anordnungen festgelegt werden. Der Sensortyp *MFATAG05* liegt mit der Wahl der Clamp-On Sensoren am Institut eindeutig fest.

Es wird die genaue Kenntnis des Rohrrinnendurchmessers und der Rohrstärke benötigt. Außerdem muss die Wassertemperatur und Schallgeschwindigkeit im Rohr eingegeben werden, da diese die Übertragung beeinflussen. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die eingegebenen Werte die Messung sehr wohl beeinflussen und daher sollte sorgfältig nachgeprüft werden, was einzugeben ist. Die Unsicherheiten dieser Angaben auf

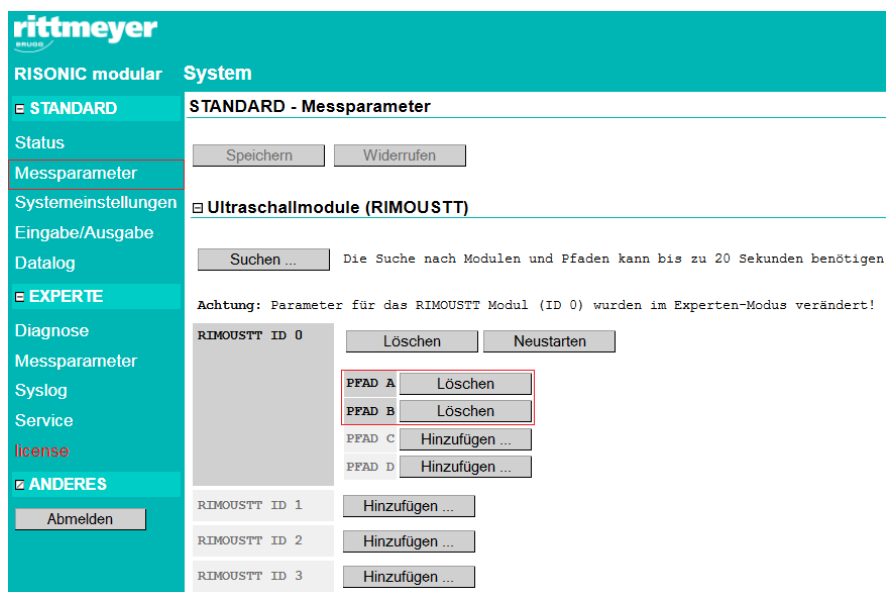


Abbildung A.13.: Hinzufügen des *Transit Time Moduls*.

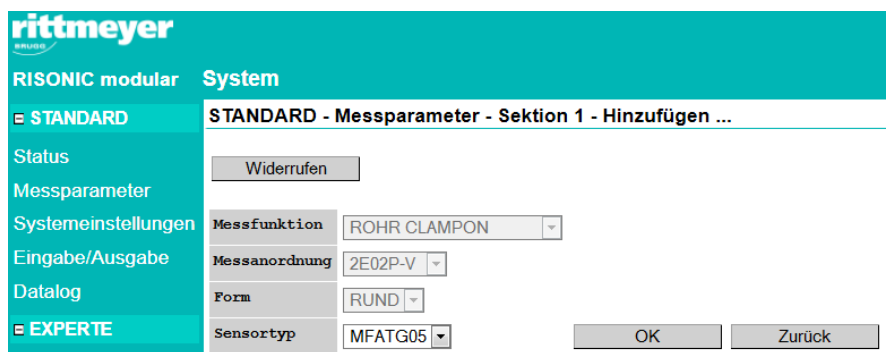


Abbildung A.14.: Hinzufügen einer doppletten V-Anordnung für ein rundes Rohr als Messsektion.

das Messergebnis sind in Kapitel 6 diskutiert. Ein Beispiel für die Einstellungen kann man in der Abbildung A.15 sehen.

**Sektion 1:**

|                               |              |         |   |
|-------------------------------|--------------|---------|---|
| DESCRIPTION                   | description  |         | DN400_1   |
| ROHRHÖHE                      | R            | [m]     | 0.405 (0.100 .. 100.000)                          |
| PIPEWALL_THICKNESS            | t_pwr        | [m]     | 0.006000 (0.001000 .. 0.200000)                   |
| PIPEWALL_SOUNDSPED            | c_pwr        | [m/s]   | Benutzerdefiniert 3255.000 (1000.000 .. 8000.000) |
| WASSERTEMPORATUR              | t_w          | [°C]    | 15.000 (0.000 .. 50.000)                          |
| STATISCHER DRUCK              | p_static     | [Pa]    | 0.000 (0.000 .. 1000.000)                         |
| SENDELEISTUNG                 | tx_pwr       |         | High  |
| SCHWINDIGKEITSDÄMPFUNG        | v_damp       | [s]     | AUS   |
| DURCHFLUSSDÄMPFUNG            | Q_damp       | [s]     | AUS   |
| SCHLEICHMENGENUNTERDRÜCKUNG   | lv_Q_cutoff  | [l/s]   | 0.000 (0.000 .. 1000.000)                         |
| MINIMUM-DURCHFLUSS            | lv_Q_raw_min | [l/s]   | 0.000 (0.000 .. 10000000.000)                     |
| MAXIMAL-DURCHFLUSS            | lv_Q_raw_max | [l/s]   | 10000000.000 (0.000 .. 10000000.000)              |
| DURCHFLUSSÄNDERUNGS-GRENZWERT | lv_d_Q_raw   | [m³/s²] | 10000000.000 (0.000 .. 10000000.000)              |

**ANDERES**

Abmelden

**Anmerkung:** Die Beschreibung muss aus den Zeichen "a-zA-Z0-9\_~+\*%(){}<>[];:~.\$?!" und dem Leerzeichen bestehen mit einer maximalen Länge von 32 Zeichen!

**calc\_clampOn**

OK

**Anmerkung:** Geänderte Parameter werden überschrieben!

**PFAD 1:**

|                 |          |     |                                  |
|-----------------|----------|-----|----------------------------------|
| RIMOUSTT PFAD   |          |     | RIMOUSTT ID 0 - PFAD A           |
| KABELLÄNGE      | L_C      | [m] | 15.000 (0.000 .. 1000.000)       |
| D_SENSOR        | d_sensov | [m] | 0.330524 (0.000000 .. 10.000000) |
| SCHALLPFADLÄNGE | L        | [m] | 0.869 (0.200 .. 5.000)           |

**PFAD 2:**

|                 |          |     |                                  |
|-----------------|----------|-----|----------------------------------|
| RIMOUSTT PFAD   |          |     | RIMOUSTT ID 0 - PFAD B           |
| KABELLÄNGE      | L_C      | [m] | 15.000 (0.000 .. 1000.000)       |
| D_SENSOR        | d_sensov | [m] | 0.330524 (0.000000 .. 10.000000) |
| SCHALLPFADLÄNGE | L        | [m] | 0.869 (0.200 .. 5.000)           |

*Wird berechnet durch "calc\_clampOn"*

Abbildung A.15.: Eingabe der Rohrdaten für die Berechnung des axialen Abstandes der Sensoren.

Mit der Betätigung von „calc clampOn“, wird der axiale Abstand der Sensoren zueinander am Rohr bestimmt. Dieser Abstand bezieht sich auf die Markierungen an der Sensorhalterung auf der Längsseite. Noch einmal sei darauf hingewiesen, dass die Sensoren nur dann miteinander kommunizieren, wenn das Kabel nach außen gerichtet ist, da sich das Signal in die entgegen liegende Richtung ausbreitet. Sind alle Daten korrekt eingegeben und der Abstand berechnet, kann mit „Speichern“ das Menü verlassen werden. Nachdem die Parameter im System übernommen sind beginnt sofort die Messung. Das bedeutet der Sensor sollte schon vorher richtig ausgerichtet sein, oder es wird kein Durchfluss angezeigt, wie es auch im dargestellten Beispiel der Fall ist. Siehe dazu wieder die Statusübersicht in Abbildung A.11. Mit dem oben beschriebenen Vorgehen kann somit eine erste Messung zur Überprüfung der Funktionalität des Messgerätes erfolgen. Für eine Überprüfung der Sendequalität, beziehungsweise wie genau die Sensoren zueinander positioniert werden, wird auf Kapitel A.4.5 verwiesen.

### A.4.3. Anschluss eines analogen Ausganges

Für eine Weiterverarbeitung der Daten mit anderen Programmen wie zum Beispiel *LabVIEW*, benötigt das Messgerät die Verbindung zur Messsystem am Institut. Dazu ist der analoge Ausgang am Messgerät welcher zwischen 4 - 20 mA arbeitet, zu verwenden. Mit der Wahl des Menüpunktes Eingabe-Ausgabe ergibt sich die folgende Ansicht A.16

am Messcomputer. Dort ist bereits ein analoger Anschluss verbunden. Außerdem besteht hier auch die Möglichkeit digitale Ein-, oder Ausgänge zu verwenden.

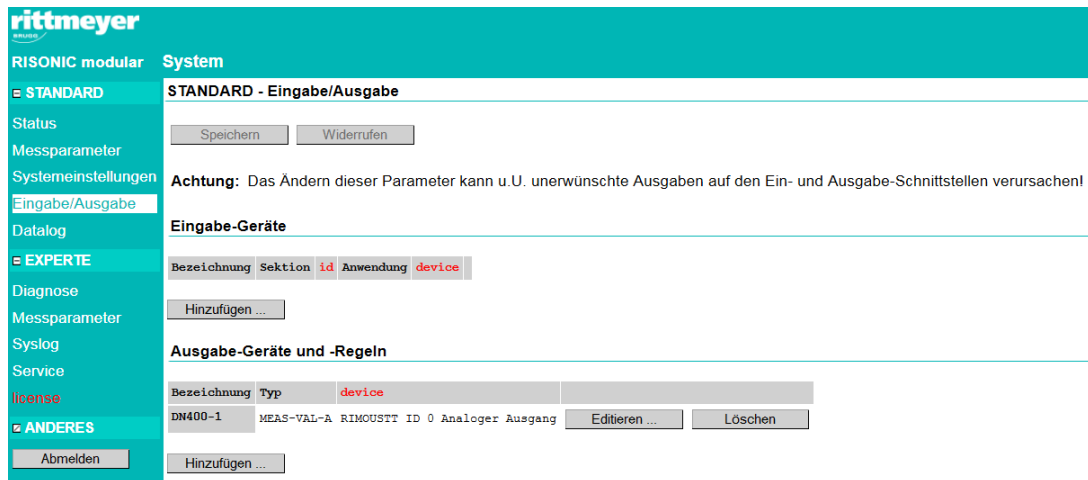


Abbildung A.16.: Hinzufügen eines analogen Ausgangs zur Datenverarbeitung.

Fügt man einen analogen Ausgang ein, folgt die Darstellung A.17. Es ist möglich den Durchfluss Vorzeichen behaftet in beiden Richtungen zu bestimmen. Will man nur den Betrag, weil die Richtung bekannt ist, die Sensoren aber vertauscht am Rohr montiert wurden, so kann mit einer absoluten Messwertausgabe gearbeitet werden. Die Ausgabe eines Fehlerstromes ist dann sinnvoll wenn eine allgemeine Überprüfung der Signalübertragung stattfinden soll. In dem gezeigten Beispiel erkennt man die Einheit  $l/s$  und nebenstehend einen Wert von  $\pm 0.400$ . Das Programm benötigt hier trotz der Angabe in  $l/s$  den Wert in  $m^3/s$ , da sonst eine um den Faktor tausend falsche Messwertausgabe erfolgt.

#### A.4.4. Verwendung von Datalogs

Mit dem Datalog besteht die Möglichkeit Messungen von gewählten Sektionen, zu bestimmten Zeiten und in gewissen Intervallen durchzuführen. Dies kann sinnvoll sein wenn einmal pro Tag eine Überprüfung des Durchflusses gefordert ist, oder eine Messung erst an einem anderen Datum erfolgen soll, dort aber niemand für die Bedienung vor Ort ist. Außerdem bietet der Datalog durch die Auswahl „Diagnose“ die Möglichkeit jede Sekunde einen Messwert auszugeben und diese über einen gewissen Zeitraum in einem für *MS Excel* lesbares Dateiformat zu speichern. Dort wird nicht nur der bestimmte Durchfluss sondern ebenso die Laufzeiten, deren Differenz und die daraus resultierende Geschwindigkeit ausgegeben. Den beschriebenen Vorgang zum Anlegen eines Datalogs findet man in der Ansicht A.18.

**rittmeyer**  
RISONIC modular System

**STANDARD - Eingabe/Ausgabe - Ausgabe-Geräte und -Regeln: 'DN400-1' - Editieren**

Speichern | Widerrufen

Bezeichnung: DN400-1  
Anwendung: Absoluter Messwert  
Ausgabe-Gerät: RIMOUSTT ID 0 Analoger Ausgang  
Wert: Q1

**EXPERTE**

Diagnose  
Messparameter  
Syslog  
Service  
license

**ANDERES**

Abmelden

$I_{ox} / \text{mA}$

20

4

0

val<sub>min</sub> | val<sub>max</sub>

|                |       |        |
|----------------|-------|--------|
| Wert 4mA:      | [1/s] | 0.000  |
| Wert min 20mA: | [1/s] | -0.400 |
| Wert max 20mA: | [1/s] | 0.400  |
| Fehlerstrom:   | [mA]  | 3.000  |
| Sättigung:     |       | AUS    |
| Dämpfung:      | [s]   | AUS    |

Abbildung A.17.: Einstellungen des analogen Datenausgangs.

**rittmeyer**  
RISONIC modular System

**STANDARD - Datalog - Datalog-Aufgabe - Datalog-Aufgabe hinzufügen: Test - Diagnose**

Speichern | Widerrufen

Sektion: Sektion 1

Intervall: 1 s

Dauer: 3 min

Starten: 2013 | August | 16 | 07 | 07 | 20

**EXPERTE**

Abbildung A.18.: Messungen mittels eines Datalogs.

### A.4.5. Anwendung des Experten-Modus

Im Experten-Modus erfolgt über die Einstellung Diagnose die Aufzeichnung des Messsignals und dessen Qualität. Bevor eine Messung durchgeführt wird, sollte bei der Einstellung für das Empfangssignal der Wert an ungültigen Messungen, sowie die Prozentzahl darunter überprüft werden. Sind praktisch keine ungültigen Messungen angezeigt bedeutet dies, dass die Sensoren richtig zueinander positioniert wurden. Bei einer hohen Anzahl an schlechten Messungen muss eine genauere Positionierung erfolgen, da nur dann von einer aussagekräftigen Messung ausgegangen werden kann. Ein Beispiel dazu ist in Abbildung A.19 zu erkennen. Des weiteren findet man dort auch die gemessenen Laufzeiten, die Schallgeschwindigkeit des Wassers im Rohr, sowie andere nützliche Informationen.

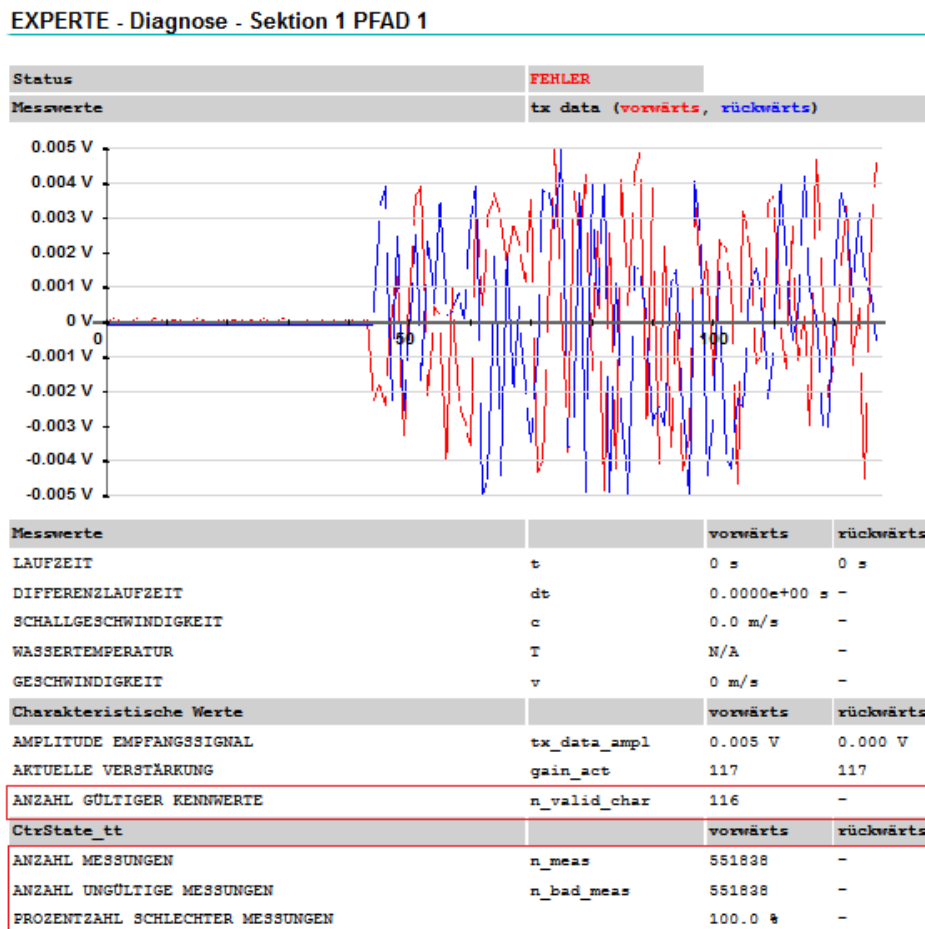


Abbildung A.19.: Ermittlung der Signalqualität bei der Messung.

Auch im Experten-Modus ist eine erweiterte Einstellung der Messparameter zu finden. Es besteht die Möglichkeit Gewichtungsfaktoren von den Messpfaden einzustellen wie es in den mathematischen Grundlagen erklärt wurde. Für die ersten Anwendungen benötigt man diese aber nicht und sollte keine Änderungen vornehmen, da diese die Werte im Standard-Modus überschreiben. Für eine Übersicht über die getätigten Einstellungen

beziehungsweise Änderungen, ist der Menüpunkt Syslog hilfreich. Ein Beispiel wie eine Liste im Syslog aussehen kann ist in A.20 dargestellt.

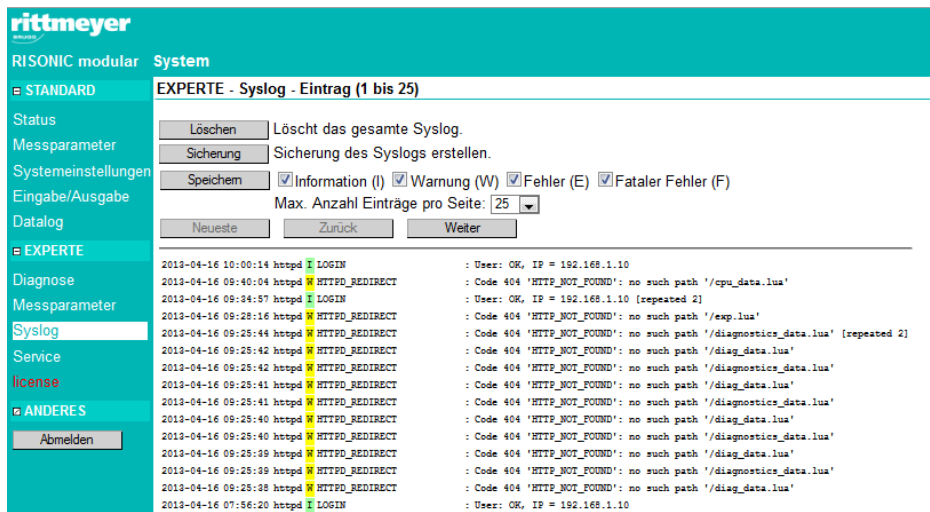


Abbildung A.20.: Beispiel für die durchgeführten Vorgänge im Syslog.

Die Auswahl von Service im Menü führt zum Fenster wie es in der Abbildung A.21 zu sehen ist. Dort besteht die Möglichkeit die Messung zu stoppen, das System neu zu starten, oder die verschiedensten Statuszähler vor einer neuen Messung zurückzusetzen.

## A.5. Messung unter der Verwendung von LabVIEW

Im vorigen Abschnitt wurde der Anschluss eines analogen Ausgangs am Messgerät diskutiert. Unter Verwendung dieser Verbindung besteht die Möglichkeit mit dem am Institut vorhandenen Messcomputer auf das „cDAQ“<sup>1</sup> und damit auf den analogen Stromanschluss zuzugreifen. Das Chassis des „cDAQ“ sieht im Labor wie in der Darstellung A.22 aus.

Darin befindet sich das cDAQ selbst, welches acht Slots bietet, um unterschiedliche Module darin anzuschließen [29]. Ein prinzipieller Aufbau eines „cDAQ“ ist in der Abbildung A.23 (a) gegeben. Darin ist das für die ADM eingesetzte Strommodul mit acht Eingängen, einer Auflösung von 16 bit und einer Summenabtastrate von 200 kSamples/s. Die Auflösung von 16 bit, bedeutet eine Unterteilung des abgetasteten Signale in  $2^{16}$  Teilbereiche. Verwendet man zum Beispiel ein Stromsignal zwischen 4-20 mA, dann ergibt sich daraus eine Auflösung von  $16 \text{ mA} / 2^{16} = 0,000244 \text{ mA}$ . Summenabtastrate steht in diesem Zusammenhang für die Rate welche auf alle acht Anschlüsse aufgeteilt werden muss. Genauere Informationen sind auf der Homepage in [30] zu finden.

Startet man das Icon „NI-MAX“ vom Desktop aus erscheint das Fenster wie es in der Abbildung A.24 dargestellt ist.

<sup>1</sup> cDAQ steht für CompactDAQ wobei es sich um ein modulares Datenerfassungssystem für elektrische Messungen am Prüfplatz, in mobilen Anwendungen handelt. [29]





Abbildung A.21.: Einstellung der Serviceparameter und Neustart des Messgerätes.

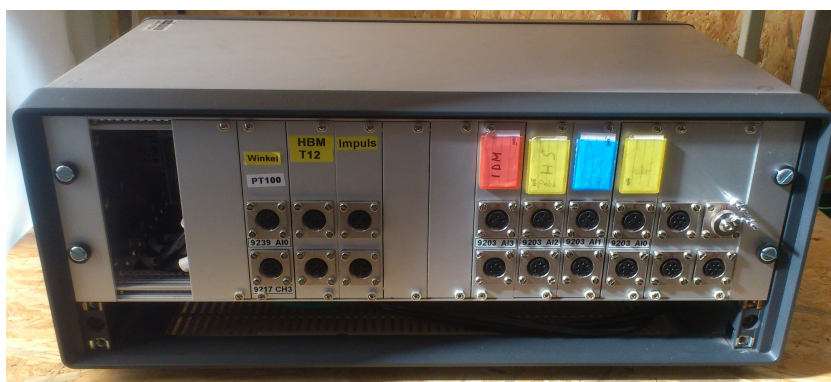


Abbildung A.22.: Gehäuse des „cDAQ“ im Labor.

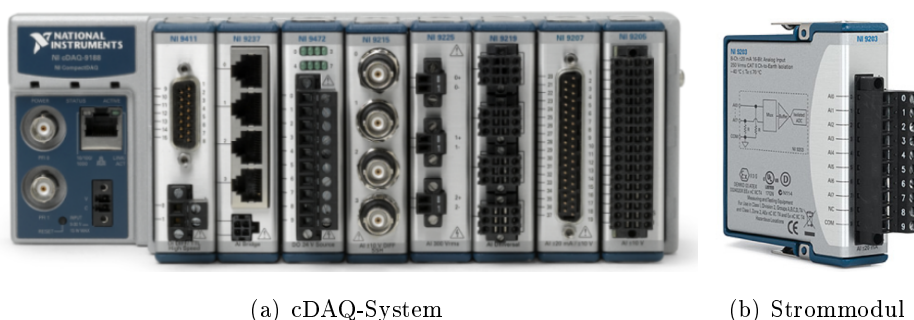


Abbildung A.23.: Darstellung des „cDAQ“ mit verschiedenen Modulen (a). Ansicht des verwendeten Strommoduls (b).

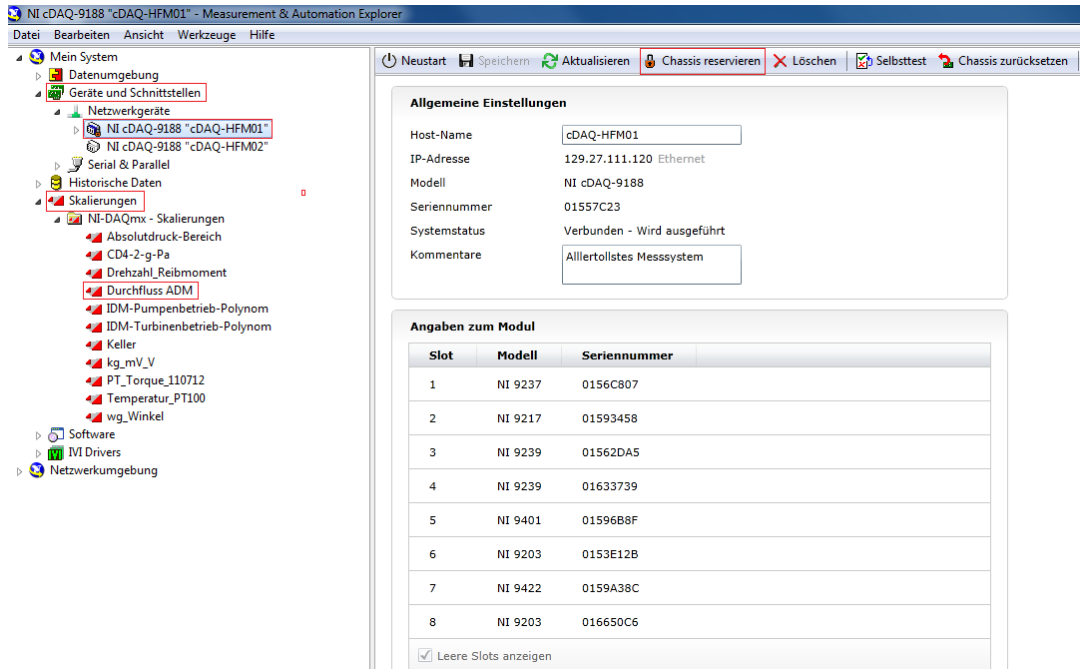


Abbildung A.24.: Einbindung des ADM in die Messsoftware am Prüfstand des Institutes.

Es sind die folgenden Einstellungen für den Start der Software nötig:

- Unter dem Menüpunkt „Geräte und Schnittstellen“ muss auf das „cDAQ-HFM01“ mit dem Befehl „Chassis reservieren“ zugegriffen werden. Dabei ist zu beachten, dass immer nur ein Anwender auf das Chassis zugreifen kann und somit möglicherweise die Verbindung eines anderen Messcomputers getrennt wird, wenn man ein Chassis reserviert.
- Ist eine Verbindung hergestellt findet man unter „Skalierungen“ die Vorschrift „Durchfluss ADM“. Diese sieht wie in Ansicht A.25 aus. Bei der Skalierung passiert nichts anderes als die Umrechnung von einem Strom, also  $A$  zurück zum Durchfluss, also  $l/s$  beziehungsweise  $m^3/s$ .
- Diese Einstellungen sind notwendig da sie im Messprogramm in *LabVIEW* automatisch erkannt und aufgerufen werden können.
- Startet man die Datei „Messprogramm ADM“ so folgt die Ansicht wie sie in Abbildung A.26 dargestellt ist. Es sind die Einstellungen laut der Darstellung vorzunehmen, außer die Wahl des Speicherpfades welche individuell festgelegt werden müssen. Diese sind im nächsten Abschnitt genauer erklärt.

Die Registerkarte mit den Diagrammen ist in Abbildung A.27 ersichtlich. Bei der Darstellung der Diagramme sei noch erwähnt, dass der Durchfluss in der Farbe weiß, also das ADM hier bewusst falsch dargestellt ist. Dies soll darauf hinweisen, was passiert wenn die Sensoren zum Durchfluss um  $180^\circ$  versetzt angeordnet sind. Daher ergibt sich eine negative gemessenen Geschwindigkeit, welche dann einen negativen Durchfluss

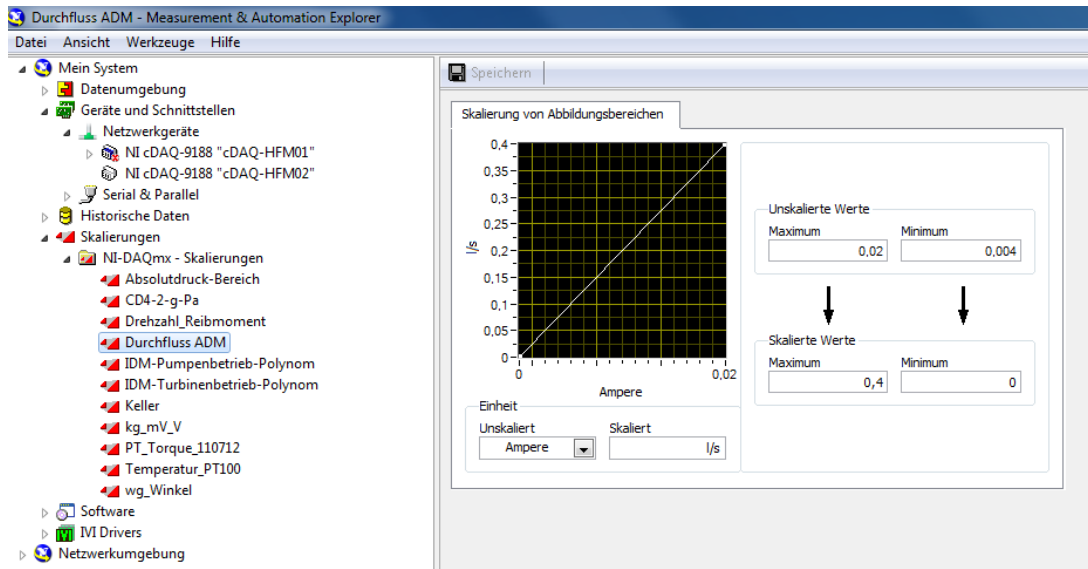


Abbildung A.25.: Auswahl der Skaliervorschriften für die ADM.

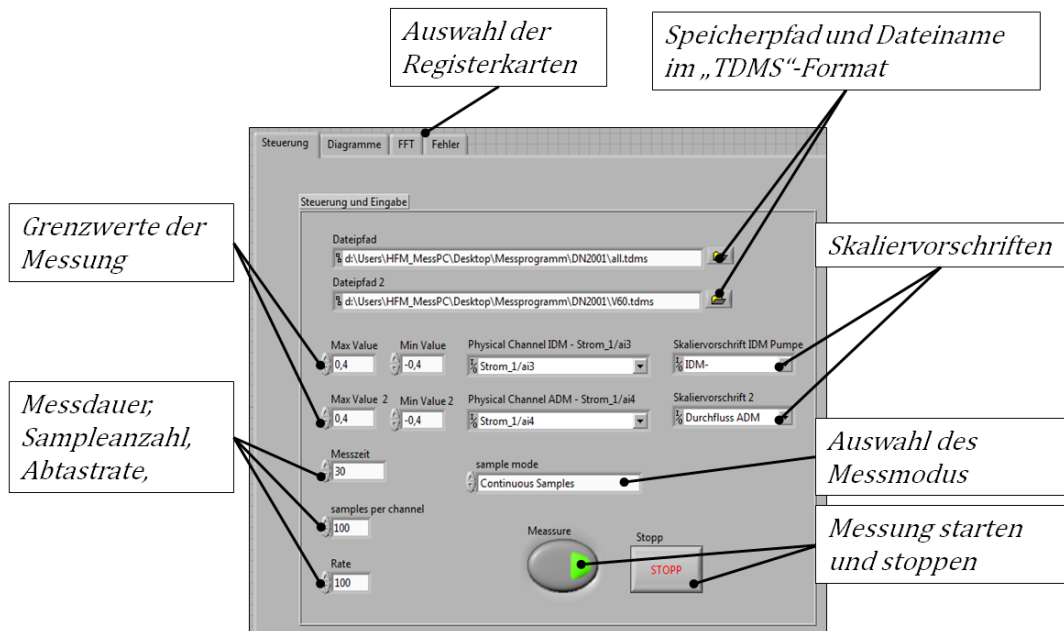


Abbildung A.26.: Beschreibung der Einstellungen in LabVIEW.

zur Folge hat. Die Sensoren geben immer dann einen positiven Durchfluss, wenn von jedem Messpfad der erste Sensor stromaufwärts montiert ist. Das heißt er sendet in Strömungsrichtung.

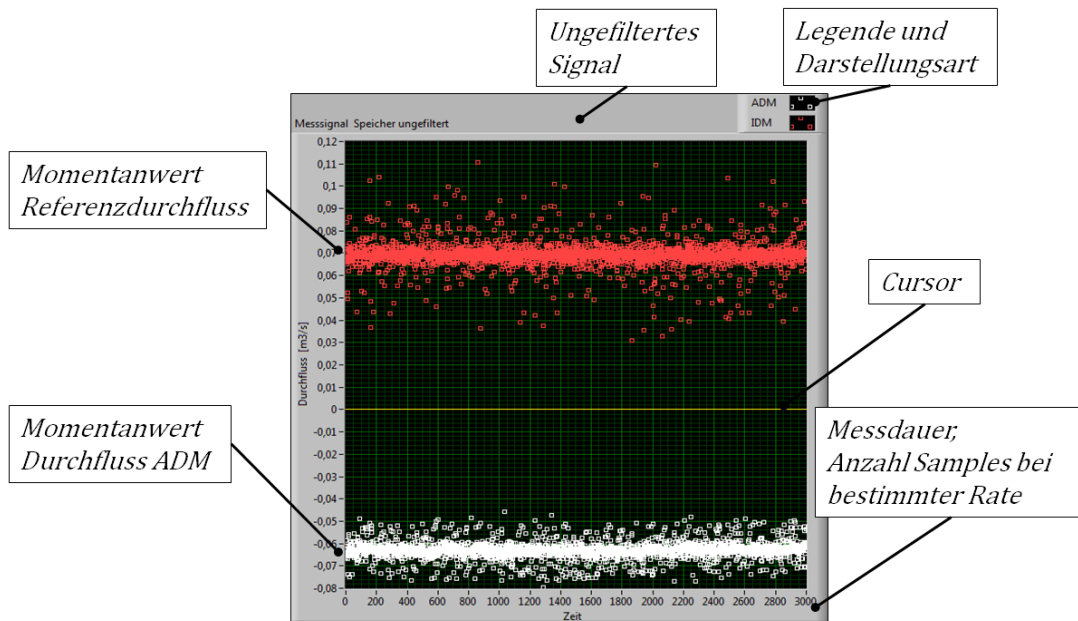


Abbildung A.27.: Darstellung des Durchflusses in der Registerkarte „Diagramme“.

### Erklärung der Einstellungen

Bei dem Eingabefenster „Dateipfad“, sowie „Dateipfad 2“ werden im ersten Fall die gesammelten Daten (Mittelwert des Durchflusses) der jeweiligen Messung gespeichert. Also muss man den Pfad nicht mehr ändern, wenn man eine gesamte Messreihe für eine Anordnung durchführt. Beim zweiten Pfad sollte man für jede Messung einen neuen Dateinamen angeben, da dort immer alle Messwerte in Abhängigkeit von der Messdauer sowie den Samples und der Rate gespeichert werden. Bei einer Messzeit von 30 Sekunden, einer Rate von 100 Hz und 100 Samples ergeben sich jede Sekunde 100 Werte und damit 3000 über die gesamte Messdauer. Man spricht dabei meist von einer Abtastrate oder Samplerate, welche nach dem Nyquist-Shannon-Kriterium festgelegt ist und die Häufigkeit mit der ein kontinuierliches Signal in einer vorgegebenen Zeit abgetastet und dadurch diskretisiert wird [31]. Dadurch ergibt sich aus der Abtastfrequenz  $f_A$  der Zeitschritt  $t_A$ .

$$f_A = \frac{1}{t_A} \quad (\text{A.1})$$

Will man das Signal vollständig wiedergeben, so muss diese Abtastfrequenz mehr als doppelt so groß wie die höchste im Signal auftretende Frequenz  $f_S$  sein. Dies formuliert sich auch wie in Gleichung A.2. Daraus resultiert für die angegebene Abtastfrequenz

von 100 Hz, dass im Signal die maximale Frequenz kleiner als 50 Hz sein muss, um es vollständig rekonstruieren zu können.

$$f_A > 2f_S, \text{ besser } f_A > 10f_S \quad (\text{A.2})$$

Eine weitere Einstellung ist die Angabe, wie das Messsignal aufgezeichnet werden soll. In den meisten Fällen soll eine kontinuierliche Messung erfolgen und somit ist bei „sample mode“ die Einstellung „Continuos Samples“ einzustellen. Da die Messung am Institut ein Vergleich zwischen IDM und ADM ist, welche am gleichen Rohrsystem montiert sind, ergibt sich für die Einstellung des Durchflusses der selbe maximale beziehungsweise minimale Wert. Im dargestellten Beispiel wird zwischen Null und 400 l gemessen. Ist dieser eingegebene Wert mit der nachstehenden Skaliervorschrift welche im Menü „Skaliervorschrift“ angegeben wird, nicht konform, so meldet das Programm einen Fehler. Bei der Messung im Turbinenbetrieb am Institut, muss als Skaliervorschrift für das IDM „Pumpenbetrieb“ gewählt werden und umgekehrt. Für das ADM wählt man hier die vorhin angelegte Vorschrift. Außerdem benötigt das Messprogramm die Kenntnis der Messkanäle welche verwendet werden, was im gezeigten Bild einmal das IDM und andererseits das ADM ist. Am „cDAQ“ entspricht der Kanal „Strom 1/ai3“ dem IDM und „Strom 1/ai4“ dem ADM.

Sind alle Einstellungen angegeben kann das Messprogramm ausgeführt werden. Unter der Betätigung von „Measure“ beginnt das Programm einen Speicher zu füllen, welcher genau die Größe der eingegebenen Messdauer in Zusammenhang mit der Abtastrate und der Sample Anzahl hat.

### **Erklärung des Messspeichers**

Anhand eines Beispiels soll die Funktion des Speichers erklärt werden. Über eine Messdauer von 30s und einer Rate von 100 Hz sowie Pakete aus 100 Samples, werden jede Sekunde 100 Messwerte in den Speicher geschrieben. Dies über 30 s ergibt 3000 Messwerte im Speicher die anschließend auszuwerten sind. Dabei ist zu beachten, dass der Speicher schrittweise gefüllt wird, also immer ein Paket durch die angegebenen Rate angeglichen. Die Prinzipskizze A.28 erklärt das Vorgehen.

## **A.6. Auswertung unter der Verwendung von *Matlab***

Bei der Messung des Durchflusses mit einer bestimmten Abtastrate sowie Sample Anzahl ergeben sich unterschiedlich große Datenmengen. Es bietet sich daher an die Auswertung und Weiterverarbeitung der Daten mit *Matlab* vorzunehmen, da dieses Programm eine Vielzahl von Mathematischen Operationen hinterlegt hat, welche den Umgang mit vielen Messwerten erleichtert. Dazu besteht die Möglichkeit die Messwerte aus dem von *LabVIEW* ausgegebenem *TDMS*-Format mit Hilfe eines speziellen „Import“ Skriptes in *Matlab* aufzurufen. Die Auswertung erfolgt mit einer Grafischen Oberfläche welche auf objektorientierter Basis geschrieben wurde. Der Grund dafür ist die Möglichkeit das

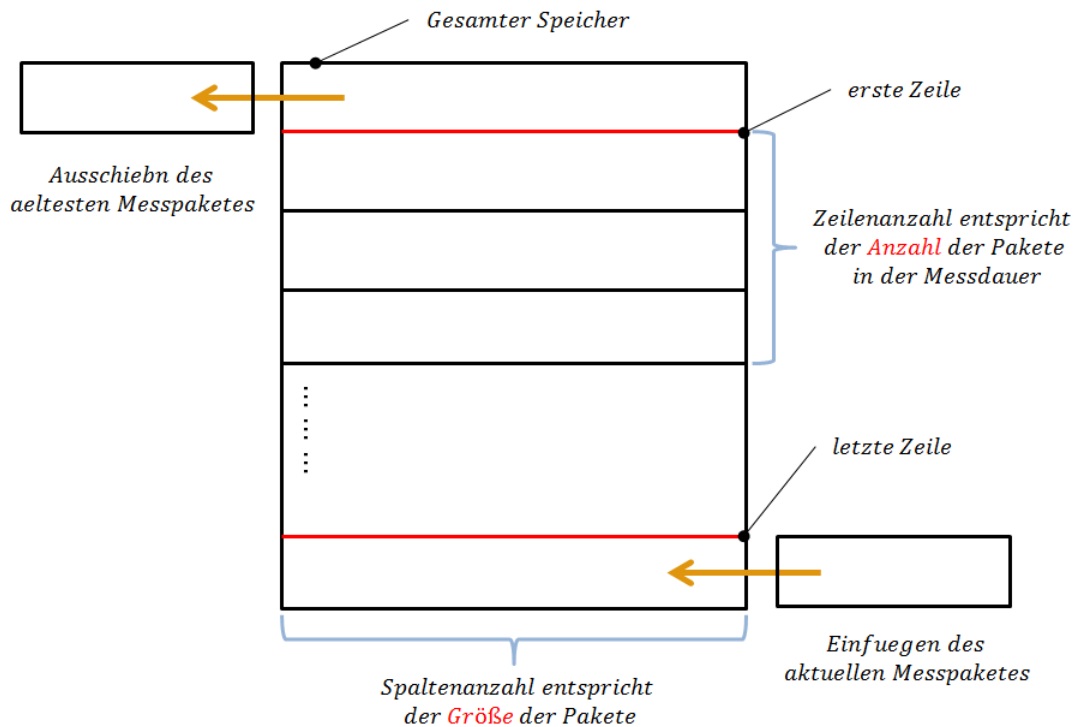


Abbildung A.28.: Erklärung des Messspeichers zur Aufzeichnung der Daten.

Auswerteverfahren somit leicht erweitern zu können, da man bei diesem Programmierstil den verschiedensten Objekten Eigenschaften zuweisen und auch erweitern kann. So wären in diesem Fall Eigenschaften des importierten Messpunktes die gemessenen Volumenströme, deren Mittelwerte und die dazugehörigen Standardabweichungen. Weiter bietet der Aufruf von bestimmten Funktionen wie „Statistik“, „Plot Messung“ oder „Save Messung“ die Möglichkeit diese Eigenschaften in Befehlen weiter zu verarbeiten.

In weiterer Folge wird mit Hilfe einer graphischen Oberfläche (GUI), das Auswerteverfahren benutzerfreundlicher gemacht. Es werden den verschiedensten Bedienelementen die vorhin definierten Funktionen zugewiesen, was einen einfachen Umgang mit den Daten zur Folge hat. So können in der Benutzeroberfläche Statistiken erstellt, Regressionen zwischen verschiedenen Durchflüssen bestimmt, diese Zusammenhänge grafisch dargestellt und im letzten Schritt gespeichert werden. Ein Beispiel für die grafische Oberfläche ist in Abbildung A.29 und die schrittweise Erklärung dieser, in den darauf folgenden Abbildungen A.30, A.31 sowie A.32, dargestellt.

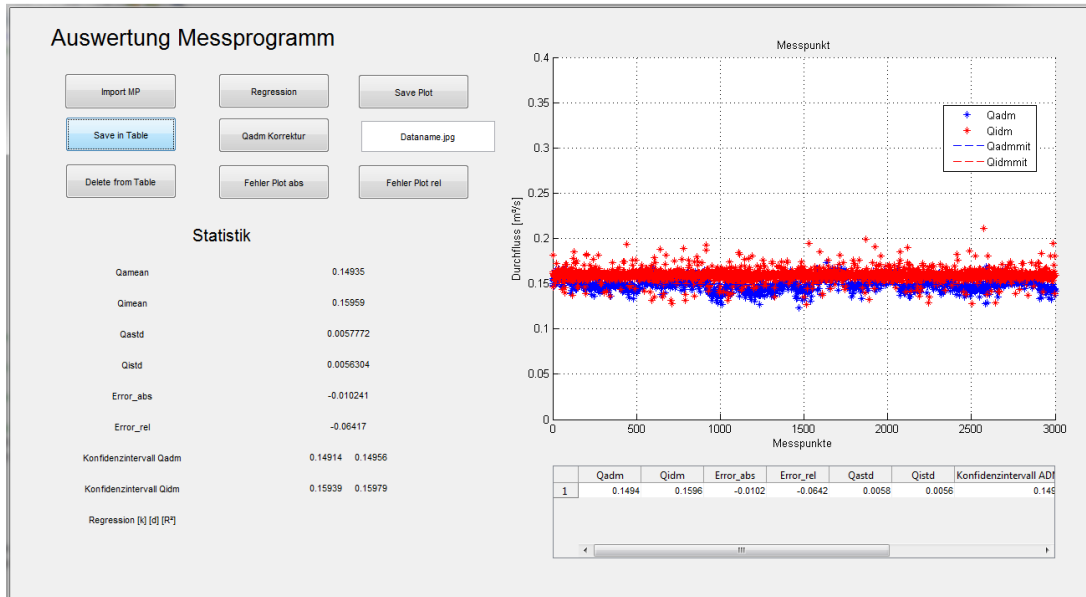


Abbildung A.29.: Ansicht der grafischen Benutzeroberfläche mit einem Messpunkt und dessen Statistik.

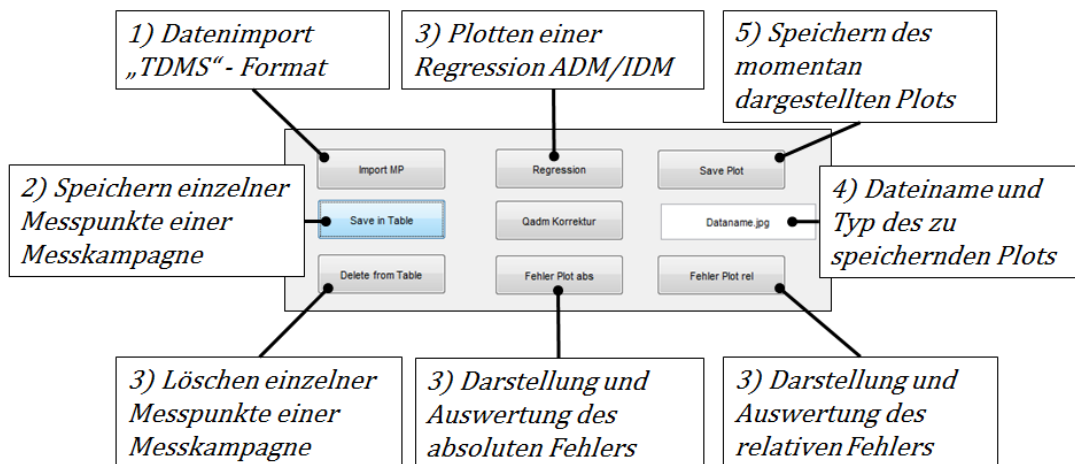


Abbildung A.30.: Schrittweise Erklärung der Bedienelemente.

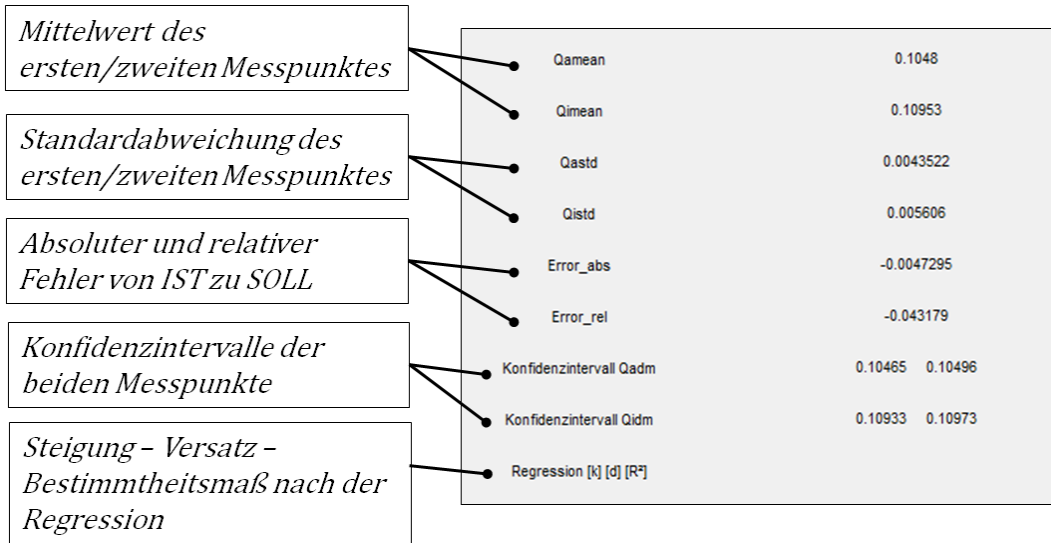


Abbildung A.31.: Statistische Auswertung eines Messpunktes und dessen relevante Größen.

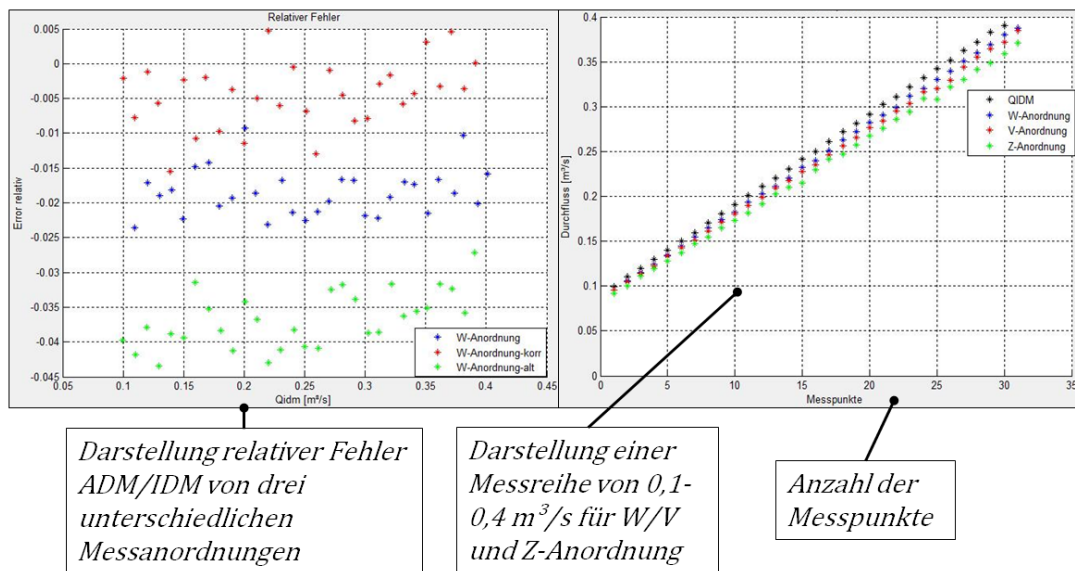
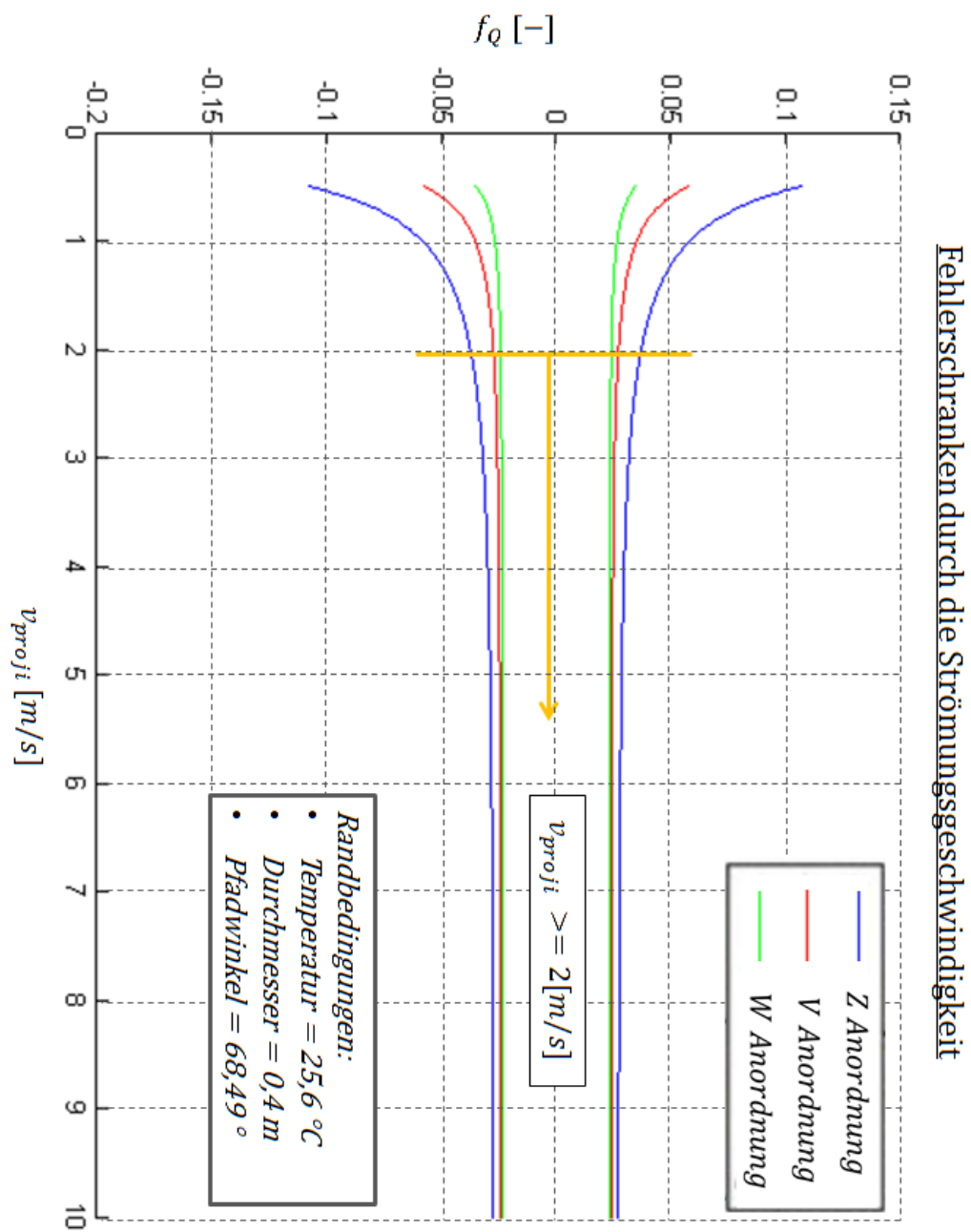


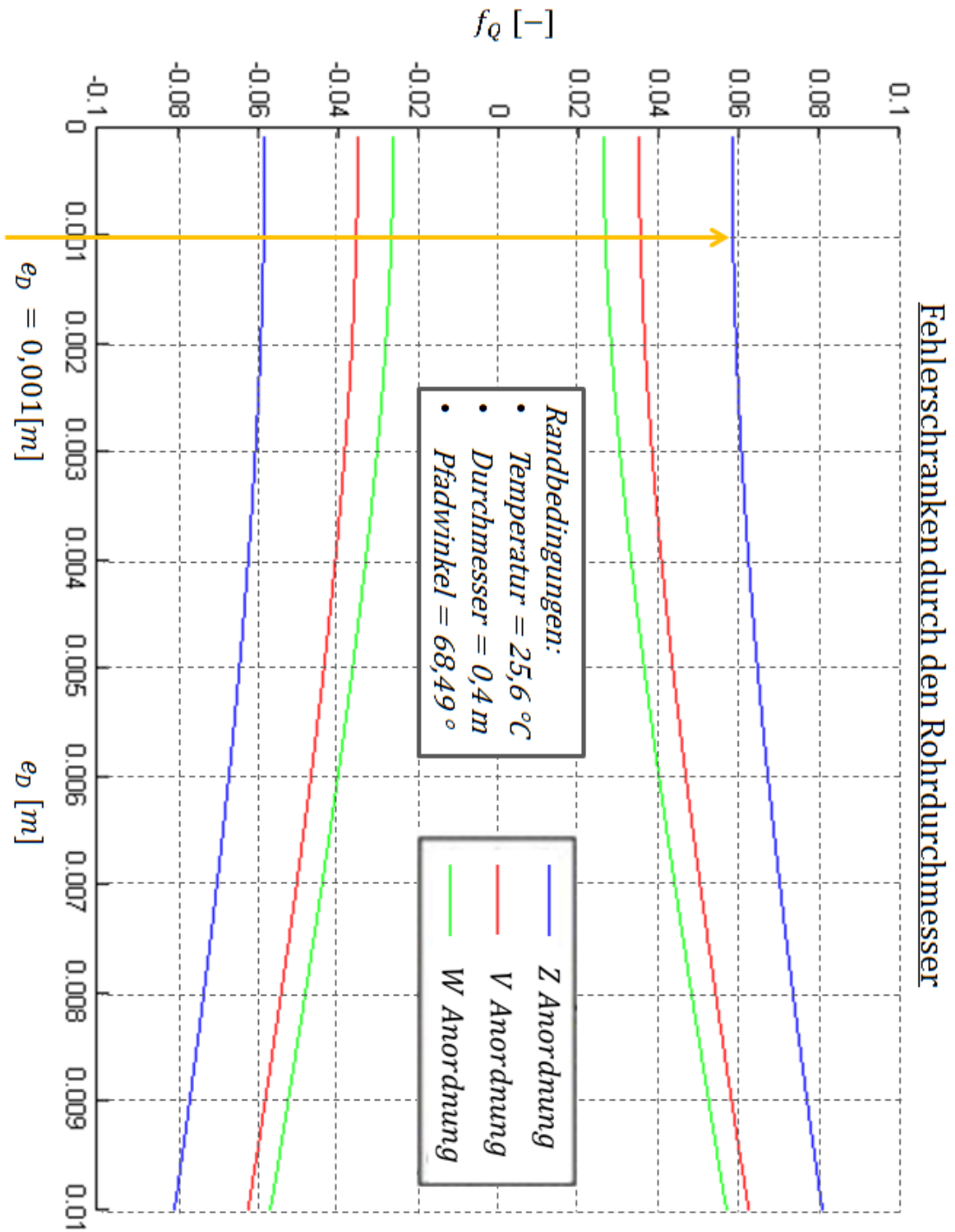
Abbildung A.32.: Ansicht zweier Messungen und Erklärung der Darstellung.



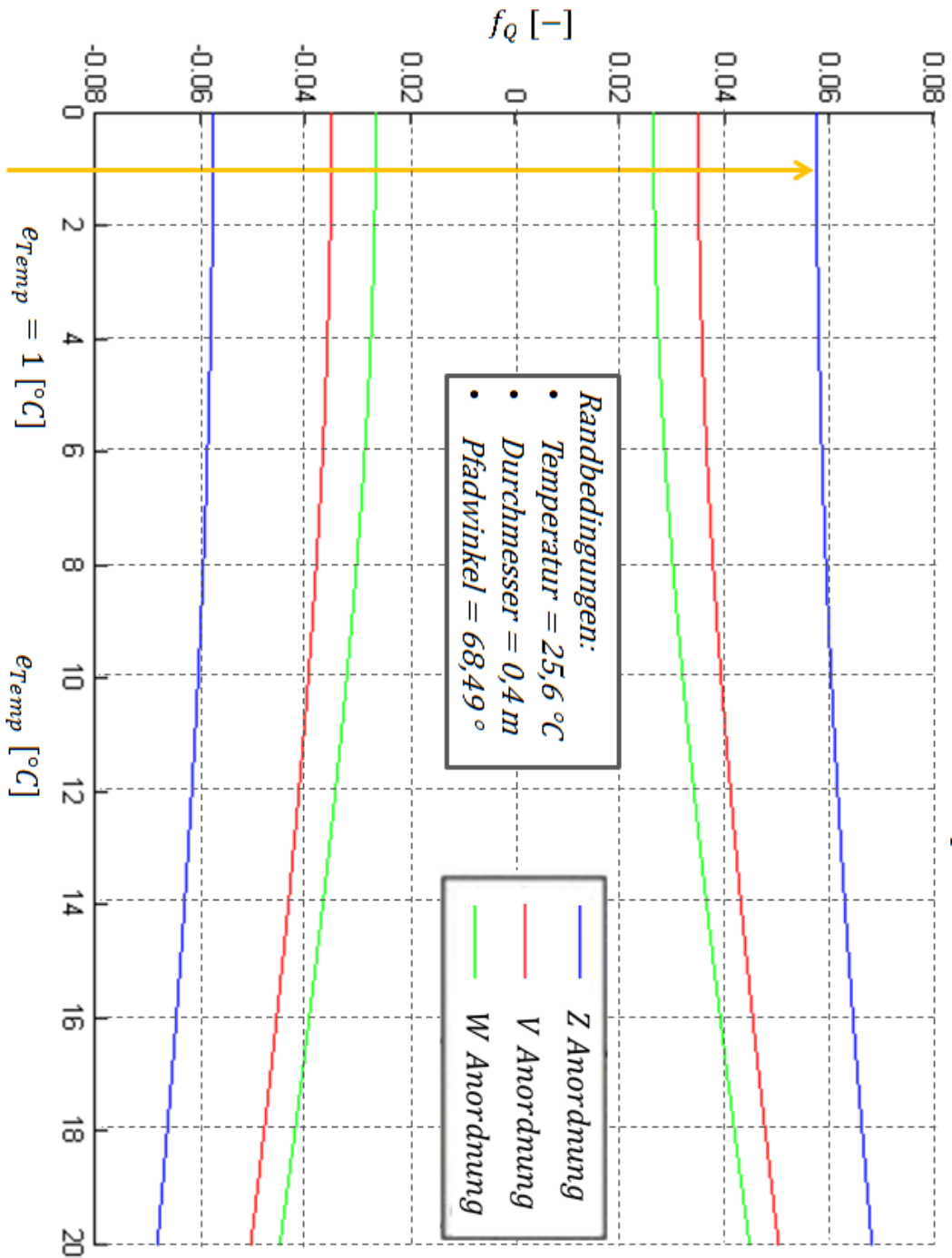
## B. Fehlerschranken - Diagramme

Es sind nachstehend die Fehlerschranken aus dem Kapitel zur Fehlerfortpflanzung noch einmal übersichtlicher angegeben. Dies soll die Anwendung der Diagramme erleichtern.

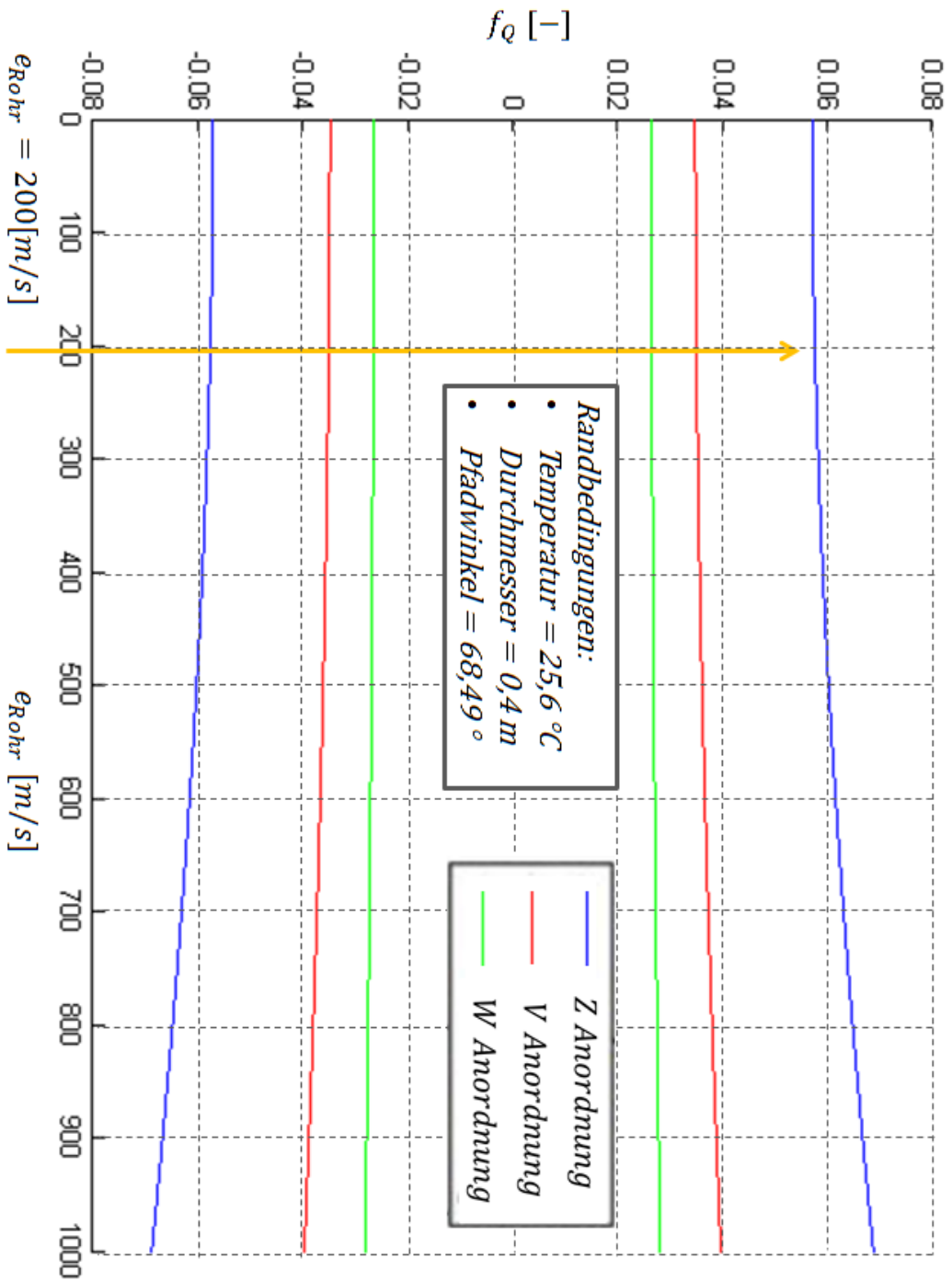


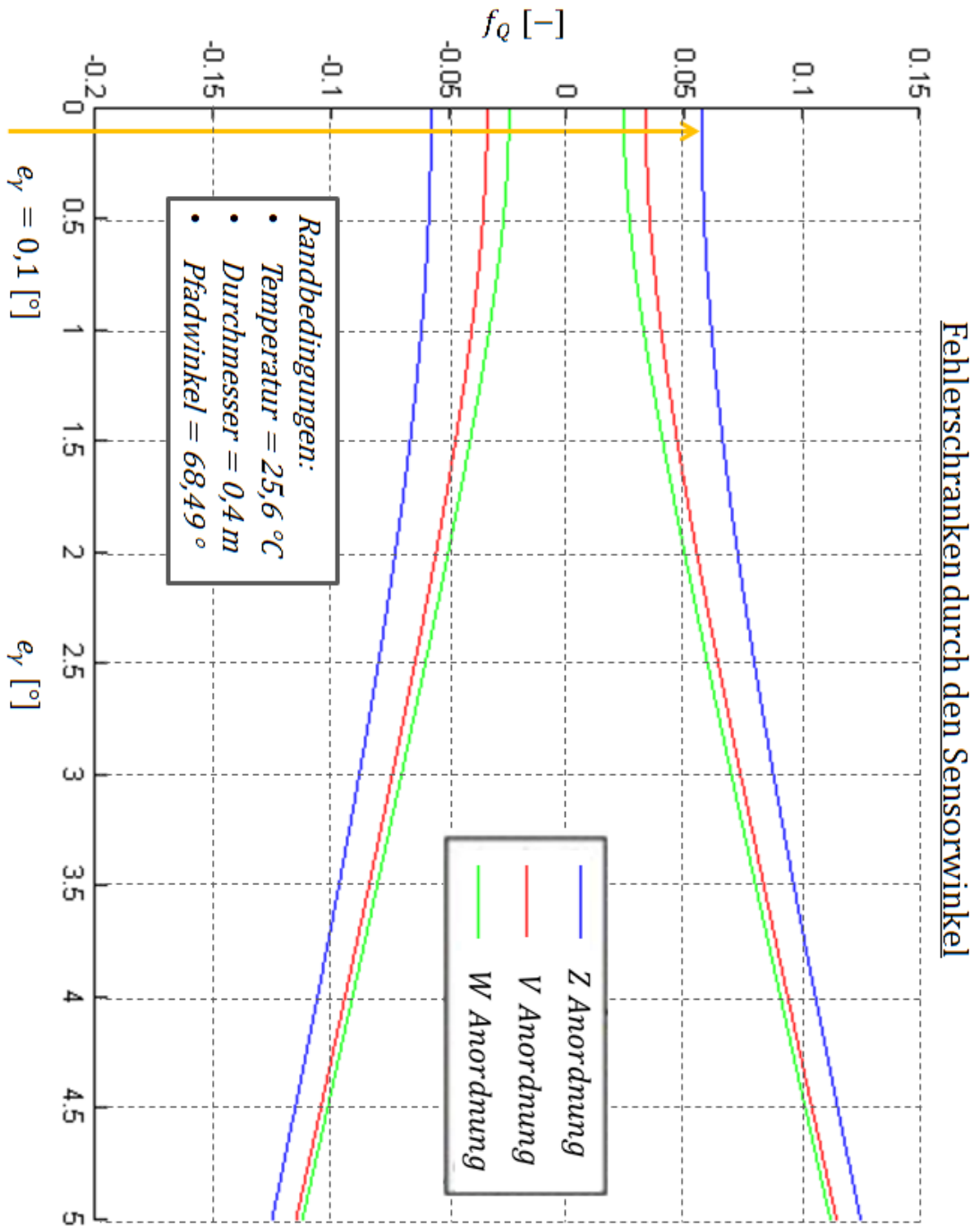


Fehlerschranken durch die Temperatur

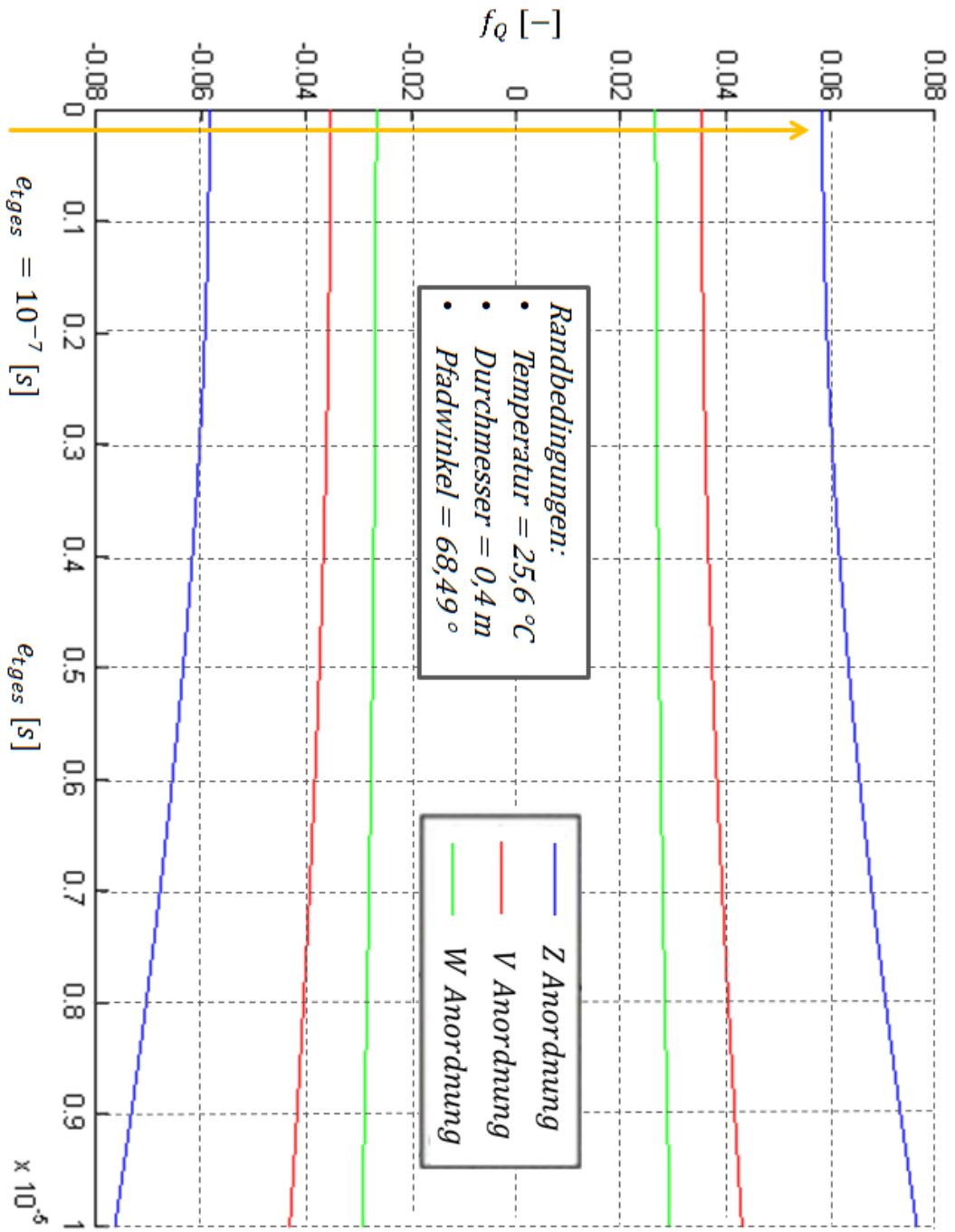


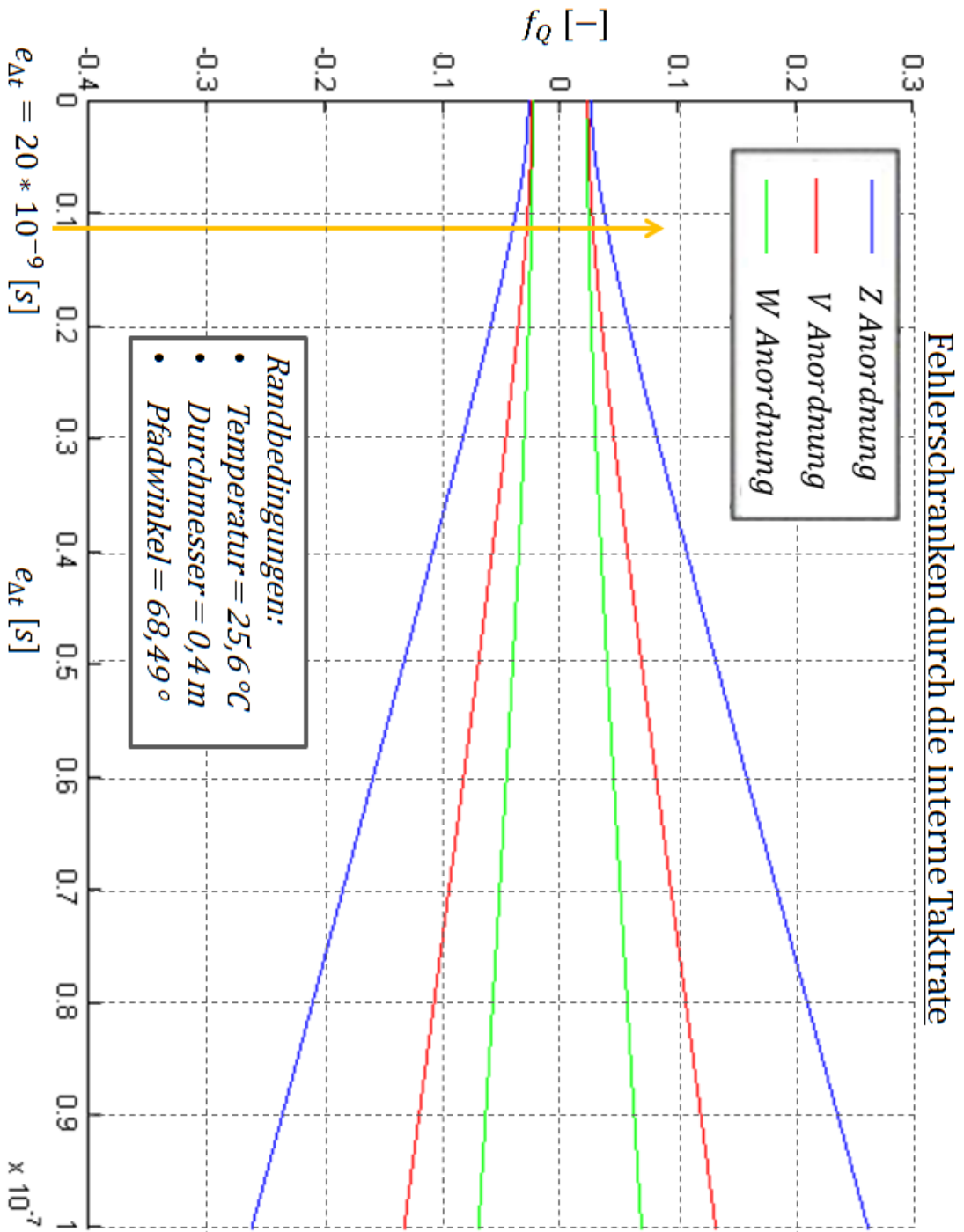
Fehlerschranken durch die Rohrschallgeschwindigkeit





Fehlerschranken durch die Differenzzeitmessung





# Literaturverzeichnis

- [1] International Standard IEC41. Technical report, Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines, Third edition 1991-11.
- [2] Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helfried Steiner. *Höhere Strömungslehre und Wärmeübertragung; Vorlesungsskriptum*, page 191, 2012.
- [3] O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Jaberg. *Vorlesungsunterlagen Hydraulische Strömungsmaschinen*; <http://www.hfm.tugraz.at/de/studium-weiterbildung/skripten-beispiele.html>, 16.04.2013.
- [4] Reinhard Lerch; Gerhard Sessler; Dietrich Wolf. *Technische Akustik*. Springer-Verlag, 2009.
- [5] Thomas Tresch; Thomas Staubli; Peter Gruber. *Comparison of integration methods for multipath acoustic discharge measurement; International Conference on Innovation in Hydraulic Efficiency Measurements*, page 16, 2006.
- [6] Systec Controls Mess und Regeltechnik GmbH. *Anordnung und Funktion der Durchflussmessung nach dem Laufzeitprinzip*, [www.systec-controls.de](http://www.systec-controls.de). 14.06.2013.
- [7] *Bau und Betrieb von Ultraschall-Durchflussmessanlagen*; <http://www.quantum-hydrometrie.de/wir.htm> Quantum Hydrometrie, 2011.
- [8] Alexandre Voser. *Analyse und Fehleroptimierung der mehrpfadigen akustischen Durchflussmessung in Wasserkraftanlagen*. PhD thesis, Eidgenössische technische Hochschule Zuerich, 1999.
- [9] Otto Fiedler. *Stromungs- und Durchflussmesstechnik*. Oldenbourg.
- [10] Andre Schwery; Andre Abgottspon; Thomas Staubli. *Field and laboratory experience with a clamp-on acoustic transit time flow meter; International Conference on Hydraulic Efficiency Measurements*, page 21, 2012.
- [11] Jörg Hoffmann, editor. *Handbuch der Messtechnik*. Carl Hanser Verlag, 2007.
- [12] *Regressions - Gerade*, Hans Lohninger, [www.statistics4u.info](http://www.statistics4u.info), 04.05.2013.
- [13] *ABB FSM4000, Seriennummer: SE41F*, <http://www.abb.de>, 30.03.2013.
- [14] Daniel Biernatzki. *Umbau des Prüfstandes und Messungen an Ventilen für die Solarindustrie. Bachelorarbeit im Fachbereich Maschinenbau am Institut für hydraulische Strömungsmaschinen*, page 55, 2012.
- [15] Mark Guggenberger. *Dynamische Druckpulsationen in einer Pumpturbine; Technische Universität Graz*, 2012.



- [16] Juergen Schiffer; Florian Senn; Mark Guggenberger. *Modification of a pump-turbine test-rig. Milestone report, TU Graz*, 2011.
- [17] K.-H. Grote; J. Feldhusen, editor. *Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau*. Springer-Verlag, 2005.
- [18] *Endress und Hauser Typ Prosonic Flow W* <http://www.endress.com>, 20.08.2013.
- [19] *Kraftwerk Salza*, <http://www.verbund.com/pp/de/speicherkraftwerk/salza>, 22.07.2013.
- [20] *Flexim*, <http://www.Flexim.com>, 11.06.2013.
- [21] Thomas Tresch; Bruno Lüscher; Thomas Staubli. *Presentation of optimized integration methods and weighting corrections for the acoustic discharge measurement; International Conference on Hydraulic Efficiency Measurements*, page 14, 2008.
- [22] Mathematik Institut. *Orthogonalpolynome; Universtät Ulm*, 2008.
- [23] W.H. Press; S.A. Teukolsky; W.T. Vetterling; B.P. Flannery. *Numerical Recipes in C, Second edition*. Cambridge University Press, 1995.
- [24] O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Günter Brenn; Ass-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Walter Meile. *Strömungslehre und Wärmeübertragung 1; Vorlesungsskriptum*, page 149, 2012.
- [25] *2012 RISONIC Clamp On Prospekt*, <http://www.rittmeyer.com>, 09.03.2013.
- [26] *RISONIC modular Clamp On Transducer Type G - Dataheet*, <http://www.rittmeyer.com>, 19.05.2013.
- [27] *2012 RISONIC modular Prospekt*, <http://www.rittmeyer.com>, 07.03.2013.
- [28] *Quick guide for RISONIC modular Clamp On installations*, <http://www.rittmeyer.com>, 07.03.2013.
- [29] *NI CompactDAQ*, <http://www.ni.com/data-acquisition/compactdaq/d/>, 08.07.2013.
- [30] *Strommodul NI9203*, [sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/de/nid/208805](http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/de/nid/208805), 13.06.2013.
- [31] M. Unser. *Sampling—50 Years After Shannon; Proceedings of the IEEE*, 88(4):569–587, April 2000.