

Experimentelle Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Lorentzkraft-Anemometrie auf schwach leitfähige Fluide

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTORINGENIEUR

(Dr.-Ing.)

vorgelegt der

Fakultät für Maschinenbau

Technischen Universität Ilmenau

von Herrn

Dipl.-Ing. André Wegfraß

geboren am 26.04.1984

in Rudolstadt, Deutschland

Gutachter:

Prof. Dr. rer. nat. habil. Jörg Schumacher

Prof. Dr.-Ing. Egbert Baake

Dr. rer. nat. Christian Resagk

Tag der Einreichung: 26. November 2012

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 26. Februar 2013



Vorwort

Die in der vorliegenden Arbeit dargestellten Ergebnisse entstanden während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in dem Fachgebiet *Thermo- und Magnetofluid-dynamik* der Fakultät für Maschinenbau an der *Technischen Universität Ilmenau*. Diese Tätigkeit war eingebettet in das Graduiertenkolleg *Lorentz Force Velocimetry and Lorentz Force Eddy Current testing* (GRK-1567/1) und wurde durch die finanzielle Förderung der *Deutschen Forschungsgemeinschaft* ermöglicht, wofür ich sehr dankbar bin.

Allem voran möchte ich mich bei meinen beiden Direktbetreuern Prof. A. Thess und Dr. C. Resagk für ihre stets aufbauenden Worte sowie die Annahme und Begutachtung der Arbeit bedanken. Ferner sei Prof. J. Schumacher für die Übernahme des zweiten Gutachtens, sowie Prof. E. Baake für die Übernahme des dritten Gutachtens gedankt.

Die vorgelegte Arbeit lebte von dem Umfeld welche sie umgab. So möchte ich mich vor allem bei meinen beiden engsten Projektmitstreitern Dipl.-Ing. C. Diethold und Dipl.-Ing. M. Werner bedanken. Ohne ihre Zuarbeit wäre die Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen. Des Weiteren möchte ich mich bei der exzellenten Arbeit von T. Kühlmann und A. Kruse bedanken, welche mich im Zuge ihrer Anstellung als Wissenschaftliche Hilfskraft besonders beim Aufbau des EMK-Prototypen unterstützt haben. Ferner bin ich der *Fa. RINN* zu Dank verpflichtet. Ohne ihre Mühe bei der Herstellung der Kanalgeometrien wäre der EMK-Aufbau nicht in vorgegebener Zeit zustande gekommen. Darüber hinaus danke ich Dipl.-Ing. C. Weidermann, M. Sc. G. Pulugundla sowie Dipl.-Phys. C. Heinicke für die vielen fruchtbaren Diskussionen sowie die ausführlichen und konstruktiven Kritiken. Überdies sei Dipl.-Ing. M. Winzer, Dipl.-Ing. V. Unger sowie C. Kraft für das Korrekturlesen der Arbeit gedankt.

Nadine und meiner Familie gilt ein ganz besonderer Dank für die Geduld und das Verständnis, welches sie mir und meiner Arbeit entgegenbrachten – Danke!



Abstract

In times of sustainable energy savings and steadily rising commodity prices, life without flow measurements is unthinkable. Be it metering of waste water, or gauging at a gas station, everybody insists on paying only for what they consumed. Despite the variety of existing flow meters, some applications remain where the volume flux can be measured only with high uncertainty if at all. The measurement is particularly difficult if the flow to be measured is opaque, extremely hot, and chemically aggressive.

Lorentz force velocimetry (LKA or LFV) represents a solution to these problems. This non-contact flow measurement method has been patented at *Ilmenau University of Technology* in 2005 and relies on the electromagnetic interaction between an electrically conducting fluid and an externally imposed magnetic field. Metallurgical applications of LFV are particularly promising due to the high electrical conductivities involved. Currently, first prototypes are being tested under industrial conditions.

This thesis is concerned with the question whether LFV can be extended to the measurement of weakly conductive fluids. In contrast to metallurgy, Lorentz forces in the order of $F < 10^{-5}\text{N}$ must be resolved. In this thesis, two LFV prototypes have been built which have been especially adapted for the measurement of salt water flows. With these prototypes the suitability of LFV for the flow measurement of weakly conducting fluids has been demonstrated experimentally for the first time. The work confirms the theoretically predicted linear dependence between the Lorentz force and the flow rate as well as the electrical conductivity of the weakly conductive fluid (Thess et al.). Moreover, this thesis shows how different magnetic fields and velocity fields affect the measured Lorentz force.



Kurzfassung

In Zeiten nachhaltiger Energieeinsparung sowie stetig steigender Rohstoffpreise ist die Durchflussmesstechnik aus dem alltäglichen Leben nicht mehr wegzudenken. Sei es bei der Ermittlung des Wasserverbrauchs im Haushalt oder bei der Treibstoffabfüllung an der Tankstelle, jeder Einzelne ist darauf bedacht, dass der ihm in Rechnung gestellte auch dem tatsächlich angefallenen Verbrauch entspricht. Trotz der Vielzahl unterschiedlicher existierender Mengen- und Volumenzähler bestehen indes immer noch Anwendungsfälle, bei denen der Durchfluss nur sehr ungenau oder gar nicht erfasst werden kann. Problematisch ist die Erfassung vor allem, wenn das Messgut undurchsichtig, extrem heiß und chemisch aggressiv ist.

Einen Lösungsweg zur Überwindung des aufgeführten Problems stellt die Lorentzkraft-Anemometrie (LKA) dar. Das im Jahre 2005 an der *Technischen Universität Ilmenau* patentierte, berührungslos arbeitende Durchflussmessverfahren basiert auf den elektromagnetischen Wechselwirkungen, welche beim Durchfließen eines elektrisch leitfähigen Mediums durch ein Magnetfeld entstehen. Besonders gut funktioniert das Verfahren in der Metallurgie aufgrund der dort herrschenden hohen elektrischen Leitfähigkeiten. Aktuell werden erste serienreife Prototypen auf ihre Tauglichkeit getestet.

Die vorliegende Dissertation befasst sich mit der Frage, ob sich die LKA für schwach leitfähige Fluide erweitern lässt. Im Gegensatz zu Anwendungsfällen in der Metallurgie müssen dafür Lorentzkraft in der Größenordnung $F < 10^{-5} \text{N}$ aufgelöst werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei LKA-Prototypen aufgebaut, die für die Messung einer Salzwasserströmung angepasst wurden. So konnte die Eignung der LKA für die Durchflussmessung von schwach leitfähigen Fluiden erstmalig experimentell nachgewiesen werden. Die von Thess et al. vorhergesagte lineare Abhängigkeit zwischen der Lorentzkraft und der Fließgeschwindigkeit sowie der elektrischen Leitfähigkeit des schwach leitfähigen Fluids wird bestätigt. Außerdem zeigt die Arbeit, wie sich verschiedene Magnet- und Geschwindigkeitsfelder auf die gemessene Lorentzkraft auswirken.



Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Abstract	III
Kurzfassung	V
Inhaltsverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
2 Ingenieurtechnische Grundlagen	5
2.1 Relevante Grundgleichungen inkompressibler Fluide	5
2.2 Methoden zur Durchflussmessung	7
2.3 Stand der Technik zur Lorentzkraft-Anemometrie	13
2.4 Lorentzkraft-Anemometer im quali- und quantitativen Vergleich	15
3 Konzipierung der Prototypen	17
3.1 Zeitliche Entwicklung der Prototypen	17
3.2 Grundelemente der Versuche	18
3.2.1 Wahl des schwach leitfähigen Modellfluids	19
3.2.2 Betrachtungen zur Magnetquelle	20
3.2.3 Prinzipien zum Fluidtransport	26
3.3 Eingesetzte Messtechnik während der Versuche	28
3.3.1 Detektierung des Weges mittels Interferometer	28
3.3.2 Kraftmessung mittels EMK-Waage	31
3.3.3 Durchflussmessung mittels kommerzieller Messtechnik	33
3.3.4 Messdatenakquise	36
3.4 Entwicklung des Versuchsaufbaus – Pendelprototyp	37
3.4.1 Design und Funktionsweise	37
3.4.2 Grenzen des Pendelprototypen	41

3.5	Entwicklung des Versuchsaufbaus – EMK-Prototyp	42
3.5.1	Idee des konstruktiven Entwicklungsprozesses	42
3.5.2	Bestimmung der Grundelemente	43
3.5.3	Optimierung von Geometrien des Wasserumlaufkanals	49
3.5.4	Konstruktive Umsetzung und Funktionsweise	52
4	Versuche am Pendelprototypen	55
4.1	Validierung des Systems mittels Solid-Body-Approximation	55
4.2	Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Lorentzkraft	59
4.2.1	Einwirkung durch Geschwindigkeitsänderungen des Fluids	59
4.2.2	Beeinflussung durch Variation der Leitfähigkeit	61
4.2.3	Verhalten gegenüber Temperaturschwankungen	66
4.3	Unsicherheitsbetrachtung der Messergebnisse	70
4.4	Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerung	74
5	Versuche am EMK-Prototypen	77
5.1	Charakterisierung des Fluidsystems	77
5.2	Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Lorentzkraft	80
5.2.1	Einwirkung durch Geschwindigkeitsänderungen des Fluids	81
5.2.2	Beeinflussung durch Variation der Leitfähigkeit	83
5.2.3	Reaktion auf sich ändernde Fluidprofile	86
5.2.4	Beitrag durch Modifikationen am Magnetfeld	88
5.3	Messperformance im Vergleich	90
5.3.1	Gegenüberstellung mit Pendelprototyp	90
5.3.2	Messqualität gegenüber MID und USD	92
5.4	Unsicherheitsbetrachtung der Messergebnisse	93
5.5	Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerung	94
6	Zusammenfassung	97
	Literaturverzeichnis	101
	Symbolverzeichnis	107
	Abbildungsverzeichnis	111
	Tabellenverzeichnis	117
A	Anhang	119
A.1	Kanalgeometrie	119
A.2	Steuerung des EMK-Prototypen	122
B	Erklärung	127

KAPITEL

1

Einleitung

Nicht erst heutzutage ist der Einzelne darauf bedacht, dass der ihm in Rechnung gestellte auch dem tatsächlich angefallenen Verbrauch entspricht. So verwundert es nicht, dass bereits die Tauschwirtschaft eine physikalische Messung der ausgetauschten Menge forderte. Mit dem Übergang in unsere heutige Geldwirtschaft, bei dem ein Gut anhand des Geldes beurteilt wird, ist infolgedessen die Messung von Mengen- und Volumenströmen unerlässlich geworden [1]. Nicht zuletzt sind Durchflussmessverfahren in Zeiten nachhaltiger Energieeinsparung sowie stetig steigender Rohstoffpreise in ihrer Bedeutung als überaus wichtig anzusehen. Durchflussmessungen im alltäglichen Leben, wie sie beispielsweise in der Haustechnik bei der Bestimmung des Wasserverbrauchs oder bei der Treibstoffabfüllung an Tankstellen mittels Flügelradzähler stattfinden, sollen nur kurz den immensen Bedarf an der exakten Bestimmung des Messgutes aufzeigen.

Die Vielzahl unterschiedlich existierender Mengen- und Volumenzähler [2] verdeutlicht, dass die Menschheit sich seit Jahrzehnten daran versucht bestehende Messverfahren zu verbessern beziehungsweise komplett neu zu entwickeln. Beruhend auf diesem Aspekt hat die Durchflussmessung eine Qualität und Betriebssicherheit erreicht, welche sich vor allem durch den beachtlichen Einsatz in vielen Industrie- und Technikanlagen dokumentieren lässt. Gerade in diesen Bereichen sind Durchflussmesser dringend benötigte Standardelemente, um Produktionsketten automatisiert ablaufen zu lassen und überwachen zu können. Klassische Volumenstrommessverfahren, wie die bereits erwähnten Flügelradzähler, finden beispielsweise in der chemischen Verfahrenstechnik sowie in der Nahrungsmittelindustrie ihre Anwendung.

Trotz zahlreich existierender Messmethoden bestehen indes immer noch Anwendungsfälle bei denen der Durchfluss nur sehr ungenau oder gar nicht erfasst werden kann. Problematisch ist dies vor allem wenn das Messgut undurchsichtig, extrem heiß und chemisch aggressiv ist. Beispiele für derartige Medien sind Säuren, Laugen, Salz- und Glasmolzen sowie flüssige Metalle. In diesen Fällen funktionieren medieninvasive Messmethoden nur sehr kurze Zeit oder können von vornherein überhaupt nicht eingesetzt

werden. Ferner scheitern nichtinvasive Methoden, wie die bildgebende Messtechnik, zu meist an opaken Medien und / oder den Kanalwänden. Um in Zukunft auch solche Prozesse beherrschen zu können, ist die Entwicklung eines neuen Messverfahrens demzufolge unerlässlich.

Erste Versuche eine Strömung auf einen unkonventionellen Weg zu vermessen unternahm der englische Experimentalphysiker Michael Faraday im Jahre 1832 [3]. Dieser versuchte in seinem Experiment an der Waterloo Bridge die Strömungsgeschwindigkeit der unter ihm fließenden Themse zu vermessen. Die Grundlage des Experiments beruht auf der Messung der elektrischen Spannung, welche durch die Strömung des Wassers im Magnetfeld der Erde induziert wird. Aufgrund der unzureichenden Messtechnik war das Experiment zum damaligen Zeitpunkt erfolglos. Die Ursache für das Nichtgelingen ist hierbei in der geringen Auflösung der damaligen Messtechnik zu suchen. So war es zu jener Zeit nicht möglich, die bei den Messungen auftretenden winzigen Potenziale an den Kupferelektroden zu determinieren. Aufbauend auf seinem Versuch und unter Ausnutzung des zu Grunde liegenden Prinzips, wurde erst Mitte der 70er Jahre des vorigen Jahrhunderts ein Messsystem unter den Namen *Magnetisch-induktiver Durchflussmesser*¹ erfolgreich angewendet [4]. Trotz zahlreicher Vorteile² gegenüber bestehenden Messverfahren jener Zeit ist der noch immer direkt bestehende Kontakt zwischen Messinstrument und Messgut das größte Manko dieser Methode.

Ein Lösungsweg zur Überwindung des aufgeführten Problems stellt die Lorentzkraft-Anemometrie (LKA) [5] dar. Das berührungslose Messverfahren basiert auf der Messung der Wechselwirkung eines sich bewegenden elektrisch leitfähigen Fluids auf ein externes statisches Magnetfeld. Bewegt sich ein leitfähiges Medium durch ein Magnetfeld, kommt es aufgrund der entstehenden Wirbelströme zur Generierung einer Kraft, die der Ursache, in diesem Fall dem fließendem Medium, entgegenwirkt – die Lorentzkraft. Da das Magnet-system bei Einwirkung der Lorentzkraft in Richtung der anliegenden Fluidströmung mit bewegt wird, ist der Durchfluss des Mediums theoretisch proportional zur gemessenen Lorentzkraft [6].

Bedingt durch die hohe elektrische Leitfähigkeit von flüssigen Metallen ($\sigma > 10^7$ S/m) [7] konnte diese Methode bereits in den vergangenen Jahren erfolgreich für die Volumenstrommessung in Aluminium- und Stahlschmelzen industriell angewendet werden [8, 9]. Die dabei aufgetretenen Lorentzkräfte lagen dabei im einstelligen Newton-Bereich.

Bei schwach leitfähigen Fluiden ($\sigma < 100$ S/m) hingegen ist die erzeugte Lorentzkraft, basierend auf der linearen Abhängigkeit der Lorentzkraft von der Leitfähigkeit und der Strömungsgeschwindigkeit des Mediums, sehr gering, weshalb Sensoren zur Detektierung winzigster Lorentzkräfte ($F < 10^{-5}$ N), bei gleichzeitig hoher Messauflösung, erforderlich sind [10].

¹Detaillierte Informationen über Aufbau und Wirkungsweise siehe Kapitel 2.2.

²Hierunter zählen vor allem die Unabhängigkeit von Viskosität, Dichte, Temperatur sowie elektrischer Leitfähigkeit oberhalb einer, durch Kalibrierung bestimmten, Mindestleitfähigkeit.

Die Motivation der vorliegenden Dissertation besteht in der Untersuchung der Übertragbarkeit des erfolgreich getesteten LKA-Prinzips auf Durchflussmessungen von schwach leitfähigen Fluiden. So könnte bei erfolgreichem Aufbau eines Serienreifen Messgerätes in den folgenden Jahren, der industrielle Bedarf überall dort abgedeckt werden, wo Messungen beispielsweise unter erschwerten Umgebungsbedingungen (hohe Temperaturen, chemische Aggressivität der Messmedien) beziehungsweise erhöhter Hygienebedingungen stattfinden müssen. Hier sei im Speziellen an die Pharma- und Nahrungsmittelindustrie gedacht. Die vorliegende Arbeit widmet sich somit dem Aufbau sowie der experimentellen Untersuchung geeigneter LKA-Prototypen, um erstmalig Durchflussmessungen an schwach leitfähigen Elektrolyten realisieren zu können.

Im Einzelnen ergeben sich die Arbeitspunkte zu:

- Konzipierung und Aufbau geeigneter Prototypen zur Messung von Lorentzkraften an schwach leitfähigen Fluiden
- Untersuchung der Beeinflussbarkeit der Lorentzkraft durch systematische Parametervariation (Geschwindigkeits-, Leitfähigkeits-, Temperaturänderungen sowie in Hinblick auf Änderung der Messlage des Sensors)
- Diskussion und messtechnische Analyse der einzelnen Prototypen
- Einordnung der LKA zur Durchflussmessung an schwach leitfähigen Fluiden in Bezug auf bestehende Messverfahren

Den aufgeführten Arbeitspunkten ist je ein Kapitel innerhalb der Arbeit gewidmet, wobei die letzten beiden Arbeitspunkte sowohl in Kapitel vier als auch fünf abgehandelt werden. Allen Kapiteln gemein ist eine kurze Einführung in die betreffende Problemstellung. Im ersten Punkt und somit Kapitel zwei wird zunächst die grundlegende Wirkungsweise der Messmethode sowie deren Einordnung gegenüber bestehenden Messverfahren beleuchtet. Der zweite Arbeitspunkt – Kapitel drei – handelt von der systematischen Beschreibung der Konzeptionierung sowie konstruktiven Umsetzung der entwickelten Prototypen. Ferner werden in diesem Kapitel die Grundelemente der Prototypen und die dabei zum Einsatz gekommene Messtechnik dargestellt. Die beiden letztgenannten Arbeitspunkte teilen sich Kapitel vier und fünf. Hier wird neben der Charakterisierung der Prototypen auf das Verhalten des Messsignals eingegangen, welches sich bei systematischen Parametervariationen einstellt.

KAPITEL

2 Ingenieurtechnische Grundlagen

In dem vorliegenden Kapitel wird ein kurzer Überblick über die mathematisch - physikalischen Zusammenhänge der Magnetofluidodynamik gegeben. Besonderer Wert wird hierbei auf die leicht verständliche Beschreibung der zugrundeliegenden Wirkprinzipien gelegt, da diese für das Verständnis der Arbeit relevant sind. Ferner wird eine Übersicht der kommerziell verfügbaren Durchflussmessmethoden gegeben und mit dem Stand der Forschung auf dem Gebiet der Lorentzkraft-Anemometrie verglichen.

2.1 Relevante Grundgleichungen inkompressibler Fluide

Um Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Lorentzkraft-Anemometrie auf schwach leitfähige Fluide durchzuführen, ist es wichtig einen allgemeinen Überblick über die Wirkmechanismen der Magnetofluidodynamik zu besitzen. Schwerpunkt dieses Forschungsbereiches ist die Erforschung des Einflusses magnetischer Felder auf Strömungsphänomene. Unter der Annahme, dass es sich bei dem zu verwendenden Arbeitsmedium um eine wässrige Elektrolytlösung handelt und die zugrundeliegenden geometrischen Abmaße weit oberhalb der freien molekularen Weglänge liegen¹, kann der Impulstransport in einer magnetofluidodynamischen Strömung mittels der Navier-Stokes-Gleichung

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nu \Delta \mathbf{u} + \frac{\mathbf{f}}{\rho} \quad (2.1)$$

beschrieben werden. Bei den aufgeführten Parametern beschreibt p den Druck, t die Zeit und ρ und ν die Stoffeigenschaften, Dichte sowie die kinematische Viskosität des betrachteten Fluids. Des Weiteren wird die Erhaltung der Masse bei Flüssigkeiten konstanter Stoffwerte $\rho = \text{const.}$ mittels der Kontinuitätsgleichung [11]

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2.2)$$

¹Im vorliegenden Fall liegen die charakteristischen Längen im makroskopischen Bereich von $5 \text{ mm} \leq l \leq 300 \text{ mm}$, womit die Approximation des Fluids als Kontinuum gerechtfertigt ist.

beschrieben. Der in beiden Gleichungen vorkommende Parameter \mathbf{u} beschreibt das Geschwindigkeitsfeld. Ferner gilt der Term $\nu \Delta \mathbf{u}$, da der Newtonsche Spannungsansatz² anwendbar ist.

Der zusätzliche (Lorentz-) Kraftterm \mathbf{f} auf der rechten Seite von Gleichung 2.1 beruht auf den nichtrelativistischen Maxwellgleichungen [12], welche im Folgenden kurz aufgegriffen, jedoch aufgrund ihrer Komplexität nicht detailliert beschrieben werden sollen. Vielmehr soll das Aufzeigen grundlegender physikalischer Zusammenhänge im Vordergrund stehen. Auf eben genannter Grundlage beschreibt das Induktionsgesetz (Gleichung 2.3), in Folge der Bewegung eines elektrischen Leiters durch ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld \mathbf{B} das Entstehen eines elektrischen Wirbelfeldes E und somit die Entstehung eines Spannungsgradienten ϕ (Gleichung 2.4). Von einer Divergenzfreiheit³ der magnetischen Flussdichte (Gleichung 2.5) wird ausgegangen.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.5)$$

Unter Verwendung des Ohmschen Gesetzes, bei gleichzeitigem Ersetzen von \mathbf{E} (aus Gleichung 2.4), beschreibt Gleichung 2.6 die Entstehung von Wirbelströmen \mathbf{j} bei Existenz eines Spannungsgradienten innerhalb eines Fluids mit spezifischer Leitfähigkeit σ [13]. Auch hier wird von Divergenzfreiheit (Gleichung 2.7) ausgegangen, da sich die Wirbel im Medium schließen.

$$\mathbf{j} = \sigma(-\nabla \phi + \mathbf{u} \times \mathbf{B}) \quad (2.6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = 0 \quad (2.7)$$

Als Resultat der Kreuzung von ausgebildeten Wirbelströmen und einwirkenden Magnetfeld entsteht die Lorentzkraft (Gleichung 2.8), welche die Lücke der Beschreibung der eingangs postulierten Gleichung 2.1 schließt.

$$\mathbf{f} = \mathbf{j} \times \mathbf{B}. \quad (2.8)$$

Neben der Beschreibung der magnetofluiddynamischen Strömung werden in der Magneto hydrodynamik vier wichtige dimensionslose Kennzahlen unterschieden [11]. Sie dienen zu der quantitativen Bestimmung des Einflusses von magnetischen Feldern auf die Fluidströmung (Gleichung 2.1). Die Reynolds-Zahl Re (Gleichung 2.9) beschreibt dabei das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften des betrachteten Fluids. Wobei u als

²Auch bekannt als newtonsches Fluid. Bezeichnung für Fluide oder Gase deren Scherspannung τ proportional der Schergeschwindigkeit ist.

³Beschreibt die Quellenfreiheit des betrachteten Vektorfeldes, d.h. es bestehen weder Quellen noch Senken.

mittlere Strömungsgeschwindigkeit, l als charakteristische Länge und ν als kinematische Viskosität in die Rechnung eingehen.

$$Re = \frac{ul}{\nu} \quad (2.9)$$

Eine weitere, auch für diese Arbeit, bedeutende Kennzahl ist der, auch als Stuart-Zahl bekannte, Interaktionsparameter N . Diese Kennzahl wird definiert als:

$$N = \frac{\sigma B^2 l}{\rho u} \quad (2.10)$$

und stellt das Verhältnis zwischen den elektrodynamischen Kräften und den Trägheitskräften dar. Der Interaktionsparameter trifft damit eine quantitative Aussage über gegenseitige Beeinflussung des strömenden Fluids und des aufgeprägten Magnetfeldes. Die dritte relevante Kennzahl repräsentiert die Hartmann-Zahl Ha (Gleichung 2.11).

$$Ha = \sqrt{NRe} = Bl \sqrt{\frac{\sigma}{\eta}} \quad (2.11)$$

Wobei η die dynamische Viskosität widerspiegelt. Im Gegensatz zum Interaktionsparameter stellt die Hartmann-Zahl das Verhältnis zwischen den elektrodynamischen Kräften und den Reibungskräften dar und kann ferner als Stärke des Magnetfeldes interpretiert werden. Die vierte und zuletzt zu erwähnende Kennzahl wird durch die magnetische Reynolds-Zahl

$$R_m = \mu \sigma ul \quad (2.12)$$

beschrieben. Die Kennzahl repräsentiert das Verhältnis des induzierten Magnetfeldes zum äußeren angelegten Magnetfeld. Die Konstante μ kennzeichnet die magnetische Permeabilität und repräsentiert die Durchlässigkeit des Messgutes gegenüber magnetischen Feldern. In der vorliegenden Arbeit, zur Untersuchung von schwach leitfähigen Elektrolyten unter Laborbedingungen, werden nur sehr kleine Werte $R_m \ll 1$ erreicht. Dies hat zur Folge, dass das induzierte Magnetfeld, welches beim Durchlaufen des elektrischen Leiters durch das aufgeprägte Magnetfeld entsteht, vernachlässigt werden kann.

2.2 Methoden zur Durchflussmessung

Wie bereits in Kapitel 1 thematisiert, haben Durchflussmessverfahren in vielen industriellen Bereichen ihre Anwendung gefunden. Aufgrund der ständigen Weiterentwicklung in den letzten Jahren haben Durchflussmesser eine Betriebssicherheit erreicht, welche es ermöglicht Produktionsabläufe zu überwachen, beziehungsweise komplette Produktionsprozesse in der Industrie zu steuern. Angesichts der Vielfalt bestehender Messverfahren ist eine detaillierte Vorstellung aller in Frage kommender Systeme in diesem Abschnitt weder angestrebt noch im gegebenen Rahmen möglich. Vielmehr soll ein kurzer Überblick über die industriell bedeutendsten Durchflussmessverfahren und deren Wirkungsweise gegeben werden. Ferner wird auf die Vorzüge sowie die technischen Grenzen der

kommerziellen Messverfahren eingegangen.

Um den Überblick zu wahren und der historischen Entwicklung von Volumenstrommessgeräten gerecht zu werden, wird auf den nachfolgenden Seiten eine Unterteilung der Volumenflussmesser in drei Hauptbereiche vorgenommen und näher beschrieben. Hierbei wurde bewusst auf die Beschreibung bildgebender Messverfahren verzichtet, da diese, anders als gewöhnliche Volumenmessverfahren, eine Transparenz gegenüber dem zu vermessenden Fluid voraussetzen und in der Industrie, aufgrund der vergleichsweise hohen Investitionskosten, weniger nachgefragt werden.

a.) Volumetrische Messverfahren

Bei den volumetrischen Messverfahren werden entsprechend ihres konstruktiven Aufbaues und der daraus resultierenden Wirkungsweise zwei große Gruppen unterschieden.

Unmittelbare Volumenzähler (UMVZ) arbeiten grundlegend nach dem Prinzip der kontinuierlichen Abgrenzung diskreter Volumina des zu vermessenden Fluids. Deren Größe wird hierbei durch die Messkammerform beschrieben. Die Messkammer kann hierbei sowohl aus starren oder beweglichen Wänden bestehen, wobei die Bestimmung der Anzahl von Durchgängen bei den meisten Volumenmessern durch eine Mechanik nach außen auf ein Zählwerk übertragen wird. Beispielhaft seien Kipp- und Ovalradzähler in Abbildung 2.1 aufgeführt.

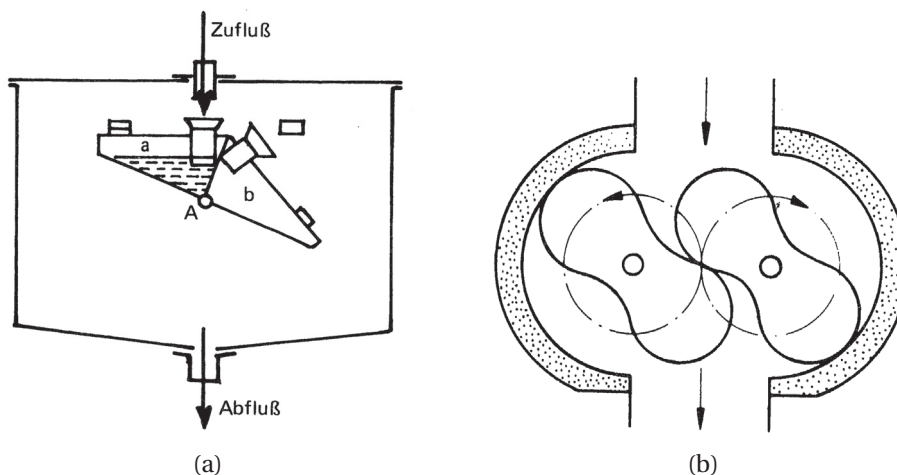


Abbildung 2.1: Beispiele für unmittelbare Volumenzähler [14]: (a) repräsentiert das Prinzip des Kippzählers, (b) das eines Drehkolbenzählers.

- Technische Grenzen / Einschränkungen:
 - direkter Kontakt mit Medium, daher wartungsintensiv
 - nur für homogene Flüssigkeiten einsetzbar: Gasanteile führen zu Fehlern

- Fehlerzunahme bei Medien mit geringerer Viskosität durch Zunahme der Spaltverluste
- Durchflussblockade bei Feststoffanteilen, Filter notwendig
- sehr hohe Druckverluste (ca. 3 - 4 bar)
- Überlastempfindlichkeit

Mittelbare Volumenzähler (MVZ) besitzen anders als unmittelbare Volumenzähler keine abgeschlossenen Messkammern. Sie arbeiten mit beweglichen Messorganen (Flügelräder, Schaufeln - siehe Abbildung 2.2), welche durch das strömende Fluid in Rotation versetzt werden. Die Frequenz des Flügelrades ist hierbei direkt proportional zur Fließgeschwindigkeit und durch die Einbeziehung des Messquerschnittes auch äquivalent zu dem Volumendurchfluss des Messgutes. Zu den gängigsten Beispielen zählen die Flügelrad- oder Woltmannzähler.

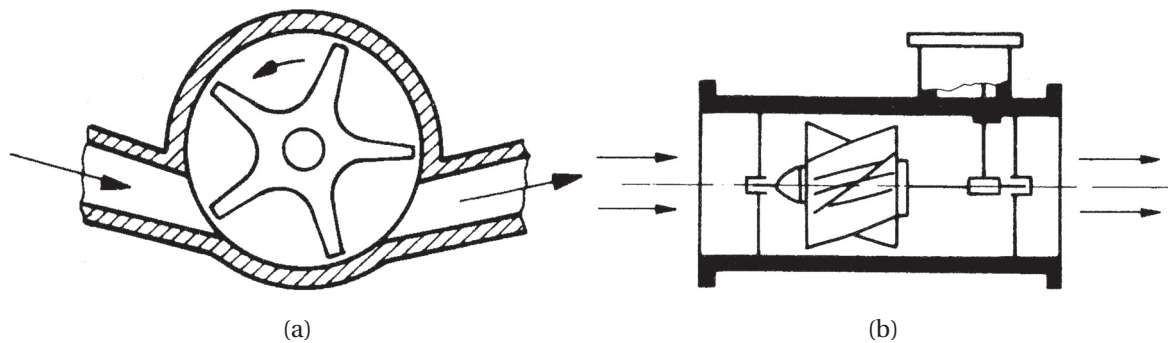


Abbildung 2.2: Beispiele für mittelbare Volumenzähler [14]: (a) repräsentiert das Prinzip eines Flügelradzählers, (b) das eines Woltmannzählers.

- Technische Grenzen / Einschränkungen:
 - direkter Kontakt mit Medium, daher wartungsintensiv
 - hohe Druckverluste
 - nur für vollgefüllte Rohre
 - Mindestfließgeschwindigkeit vorausgesetzt
 - Filter notwendig, da empfindlich gegenüber Verschmutzungen
 - Rückflussmessung nur bedingt möglich

b.) Wirkdruckverfahren

Im Gegensatz zu volumetrischen Messverfahren findet bei der Durchflussmessung nach dem Wirkdruckverfahren (WDV) keine Auswertung von rotierenden Bewegungen der Messorgane statt. Vielmehr wird die Energieumsetzung (Druck- bzw. Gefälldifferenz) analysiert, welche beispielsweise dann auftritt, wenn sich der Querschnitt einer Rohrleitung an einer Stelle ändert. Die Grundlage zur Bestimmung des Durchflusses liefert hierbei die

Bernoulli-Gleichung (siehe Gleichung 3.3). Die Verfahren finden meist in der chemischen Industrie Anwendung, da aufgrund hoher Temperaturen sowie schneller Fluidströmungen korrosiver Medien volumetrische Messverfahren nicht eingesetzt werden können. Drosselgeräte, wie Blenden (siehe Abbildung 2.3a) und Düsen, seien als meist eingesetzte Beispiele genannt. Darüber hinaus werden in den letzten Jahren immer mehr Durchflussmesser auf Grundlage von Schwebekörpern (siehe Abbildung 2.3b) nachgefragt, weshalb diese auch Erwähnung finden sollen.

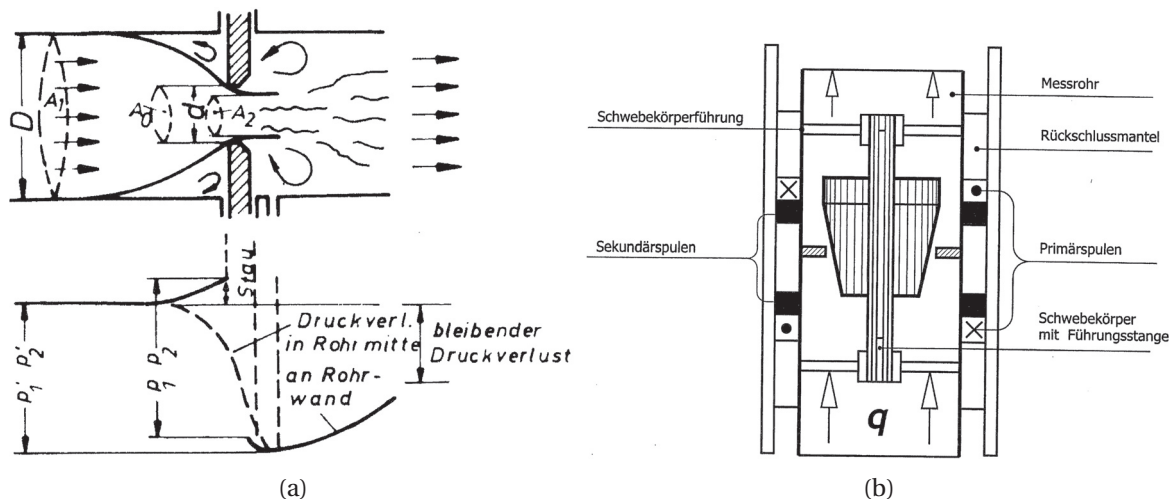


Abbildung 2.3: Beispiele für Messverfahren, welche unter den Wirkdruckverfahren arbeiten [14]: (a) repräsentiert hierbei die Wirkung einer Blende und (b) eines Schwebekörper-Durchflussmessers.

- Technische Grenzen / Einschränkungen:
 - direkter Kontakt mit Medium, daher wartungsintensiv
 - Mindestfließgeschwindigkeit vorausgesetzt
 - keine Rückwärtsmessung möglich
 - empfindlich gegenüber Verschmutzungen, wenn Korngröße der Verschmutzung größer ist als Ringspaltbreite
 - Kavitationseffekte möglich
 - Druckverluste

c.) Verfahren nach anderen physikalischen Prinzipien

Neben den oben aufgeführten Messverfahren, die zumeist durch eine mechanische Interaktion mit dem zu vermessenden Fluid charakterisiert sind, existieren noch weitere Methoden zur Durchflussmessung. Die Bestimmung des Durchflusses auf thermischer Grundlage sind dabei ebenso zu erwähnen, wie die Bestimmung auf Grundlage des Coriolis-Prinzips. Allen Systemen gemein ist der Wegfall des medien-invasiven Eingriffes. Durchflussmessungen sind somit erstmals ohne nennenswerte Druckverluste durch das

Messgerät möglich. Systeme, welche beispielsweise auf dem Ultraschall-Verfahren beruhen, benötigen lediglich den Kontakt zur Wandung des Rohres beziehungsweise Rinne des zu vermessenden Fluids. Aufgrund der flexiblen Einsetzbarkeit sowie der großen Nachfrage bei industriellen Anwendungen wird in diesem Absatz insbesondere auf eben genannte Systeme sowie auf Messverfahren mit magnetisch-induktivem Wirkprinzip eingegangen.

Ultraschall-Durchflussmesser (USD) beruhen auf der Abhängigkeit der Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Schallwellen in bewegten Flüssigkeiten – der sogenannten Laufzeitdifferenz. Hierbei senden und empfangen mindestens zwei auf der Rohrleitung parallel zur Strömungsrichtung versetzt angeordnete Sensoren Ultraschallimpulse (zu sehen in Abbildung 2.4). Ohne Durchfluss ist die Laufzeit der Ultraschallwellen stets gleich, im strömenden Medium hingegen benötigt das gegen den Strom gesendete Signal mehr Zeit als das stromabwärts gesendete. Die dabei auftretende Laufzeitdifferenz ist direkt proportional zur mittleren Fließgeschwindigkeit des zu vermessenden Fluids. Bereits erwähnt kommt diese Methode ohne mechanisch bewegte Teile aus, was den Wartungsaufwand erheblich verringert und keinen Druckverlust, durch den Wegfall von Querschnittsverengungen, in der Messstelle verursacht.

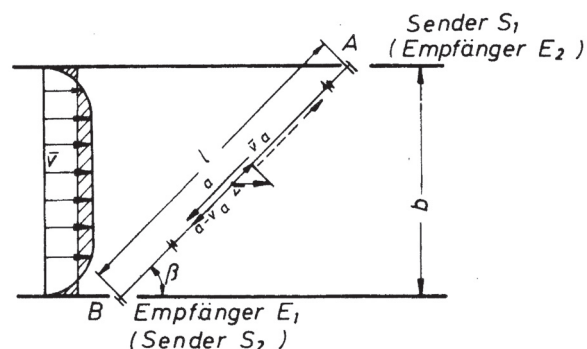


Abbildung 2.4: Prinzipielles Wirkungsschema eines Ultraschall-Durchflussmessers [14].

- Einschränkungen:
 - Laufzeitverfahren nur für homogene Medien
 - Doppler-Verfahren nur bei leichter Verschmutzung und wenig Gasblasen
 - stark strömungsabhängig, da Schallstrahl querschnittsrepräsentativ misst
 - Mindestviskosität vorausgesetzt, da Dämpfung der Ultraschallwellen bei geringen Viskositäten
 - hohe Störanfälligkeit, so hängt Schallgeschwindigkeit von Temperatur, Dichte, etc. ab
 - nur für vollgefüllte Rohre, ausgenommen Doppler-Verfahren mit zusätzlichem Füllstandssensor

Magnetisch-induktive Durchflussmesser (MID) beruhen auf dem Faradayschen Induktionsgesetz (Gleichung 2.3), wonach in einem, sich im Magnetfeld bewegendem Leiter, eine Spannung induziert wird. Das erste Patent wurde bereits vor gut 100 Jahren durch Smith und Slepian [15] eingereicht, jedoch in der Umsetzung nicht weiter verfolgt. Erst durch den englischen Physiker Arthur Shercliff [4, 12] erlebte das Prinzip circa 50 Jahre später den Aufschwung zu einem eigenständigen Messprinzip. Bei dieser Art von Durchflussmessern kommt es aufgrund des Durchfließens, des mittels Spulen erzeugten Magnetfeldes, zu Wechselwirkungen mit dem elektrisch leitenden Messgut und dabei zur Trennung der sich in dem Fluid befindlichen Ladungsträger. Die senkrecht zum Magnetfeld im Inneren angeordneten Elektroden messen die entstehende Spannung (siehe Abbildung 2.5), welche proportional der mittleren Fließgeschwindigkeit des Mediums ist [14].

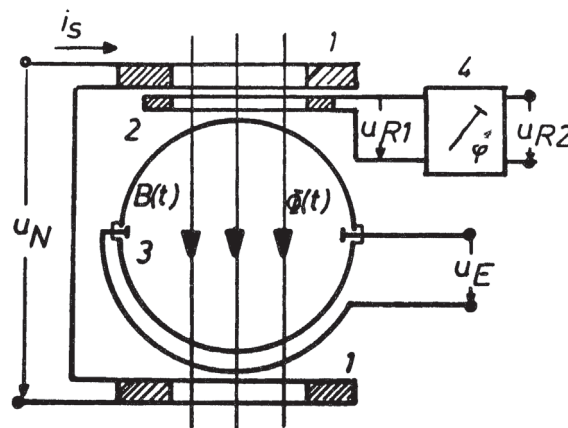


Abbildung 2.5: Prinzipielles Wirkungsschema des Magnetisch-induktiven Durchflussmessers [14].

- Einschränkungen:

- Mindestleitfähigkeit und Mindestfließgeschwindigkeit bestimmen Qualität der Durchflussmessung
- Ein- / Auslaufstrecke erforderlich (Einlauf: 3 x Rohrdurchmesser, Auslauf: 2 x Rohrdurchmesser)
- preisintensiv mit zunehmendem Kanaldurchmesser
- Isolationsschicht im Inneren nötig, kann zu schleichendem Drift des Messergebnis führen
- hohe Genauigkeiten nur für vollgefüllte Rohre mit rotationssymmetrischem Geschwindigkeitsprofil
- Gasanteile verursachen Fehlmessungen
- Gefahr der Verschmutzung durch Korrosion der Messelektroden

2.3 Stand der Technik zur Lorentzkraft-Anemometrie

Bei den oben aufgeführten industriell eingesetzten Durchflussmessgeräten wird deutlich, dass es eine Vielzahl von Anwendungen gibt, in denen der Durchfluss nur bedingt oder überhaupt nicht bestimmt werden kann. Beispielhaft sei hier an Medien hoher Temperatur, beziehungsweise an Medien mit chemisch- und abrasiven Verhalten gedacht. Allen vorgestellten Verfahren gemein ist, dass sie bei mindestens einer der genannten Anwendungsfälle schnell an ihre Grenzen stoßen. Hauptgrund hierfür ist der erforderliche mechanische Kontakt des Sensors mit dem Medium selbst, respektive mit der Wandung der Messstrecke in dem das Medium fließt. Aufgrund des Kontaktes kann es zu Verunreinigungen sowie Temperaturüberhöhungen der Messelektroden kommen, was daraufhin zu Messfehlern oder schlimmstenfalls zum Versagen des Gerätes führen kann und unter allen Umständen zu vermeiden ist.

Exemplarisch soll das Beherrschen von Flüssigmetall- und Halbleiterschmelzen [16, 17] aufgeführt werden. Die Schmelzen sind größtenteils derart aggressiv in ihrem Verhalten, dass eingangs vorgestellte Messmethoden, welche beispielsweise auf dem magnetisch-induktiven sowie auf dem Ultraschall-Prinzip beruhen, für die Bestimmung des Durchflusses ungeeignet sind – von direkt messenden Methoden ist von vornherein abzusehen. Somit existiert bis zur heutigen Zeit kein kommerziell verfügbares Strömungsmessverfahren, welches den oben beispielhaft erwähnten Anwendungsfall befriedigend realisieren kann.

Alternativ entwickelte Messverfahren wie das *Eddy Current Flowmeter* von Feng et al. [18], das *Contactless Inductive Flow Tomography* von Baumgartl et al. [19] sowie ein ähnliches, auf Korrelationsmessung beruhendes Prinzip von Julius [20], konnten trotz umfassender Labortests sowie numerischer Aktivitäten⁴ nicht in die serienreife Fertigung übergehen. Es verwundert daher nicht, dass seitens der Industrie ein großes Interesse an der Entwicklung eines berührungslosen Durchflussmessverfahrens besteht. So gilt es ein System zu entwickeln, welches die Nachteile bestehender Verfahren beseitigt und in der Lage ist unter industriellen Bedingungen störungsfrei zu operieren.

Aus diesem Grund entstand vor circa 10 Jahren an der *TU Ilmenau* die Idee für ein neuartiges berührungsloses Strömungsmessverfahren – das Lorentzkraft-Anemometer. Das Verfahren arbeitet vollkommen kontaktfrei wodurch nachteilige Interaktionen zwischen Sensor und dem Messgut vermieden werden. Abrieb, Korrosion sowie Überhitzung der Messsonde sind somit kausal ausgeschlossen, womit das System nahezu unabhängig von den Eigenschaften des Medium einsetzbar ist.

Das Grundprinzip des Verfahrens geht auf Arthur Shercliff [4] zurück und ist in Abbildung 2.6 dargestellt. Fließt demnach ein elektrisch leitendes Medium durch ein von außen aufgeprägtes Magnetfeld, so werden im Medium elektrische Wirbelströme induziert. In Folge der Wirbelströme kommt es zur Entstehung einer bremsenden Kraft, welche der Ur-

⁴Exemplarisch sei hier auf Stefani et al. [21] des *Forschungszentrum Dresden-Rossendorf* verwiesen.

sache seiner Entstehung entgegenwirkt – die Lorentzkraft. Sie ist dabei proportional zur mittleren Strömungsgeschwindigkeit des Mediums und somit auch zur Durchflussmenge. Dem dritten Newtonschen Gesetz (*actio = reactio*) zufolge entsteht eine, im Betrag gleiche und entgegengesetzte, Beschleunigungskraft, welche das Magnetsystem aus dem Gleichgewichtszustand drängt. Die bei der Verschiebung auftretende Kraft kann mittels handelsüblicher Messtechnik (Kraft- / Wegsensor) detektiert werden.

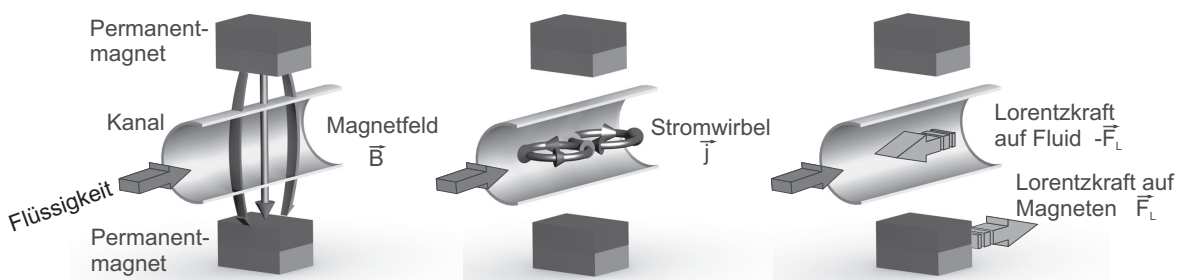


Abbildung 2.6: Grundlegendes Wirkungsschema der Lorentzkraft-Anemometrie [22].

Der für die Anwendung der Lorentzkraft-Anemometrie wichtige Zusammenhang zwischen gemessener Kraft F und gesuchter Durchflussgeschwindigkeit u wird durch die Relation

$$F_{Lorentz} \sim c \sigma u B^2 V \quad (2.13)$$

beschrieben [5]. Dabei definiert sich die Lorentzkraft als näherungsweise linear abhängig von einer Kalibrierkonstante c , der elektrischen Leitfähigkeit des Fluids σ , der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u , der angelegten magnetischen Flussdichte B zum Quadrat sowie dem spezifischen Messvolumen V .

Der Fortschritt der Arbeiten an der *TU Ilmenau* spiegelt sich in den eingereichten Patenten [23, 24] sowie einer Vielzahl von Veröffentlichungen wider. Die wohl interessantesten wissenschaftlichen Abhandlungen zur Theorie der Lorentzkraft - Anemometrie wurden bereits im Jahre 2006 und 2007 von Thess et al. [5, 6] publiziert. Ferner soll das im Jahre 2010 begonnene Graduiertenkolleg *Elektromagnetische Strömungsmessung und Wirbelstromprüfung mittels Lorentzkraft* erwähnt werden. Dieses, von der *Deutschen Forschungsgemeinschaft* finanzierte Forschungsprojekt, hat sich die Grundlagenuntersuchung von drei verschiedenen Bereichen zur Aufgabe gemacht. Zwölf Doktoranden sowie weitere assoziierte Mitglieder der *TU Ilmenau* teilen sich dabei die Forschungsschwerpunkte und deren Untersuchung der Lorentzkraft-Anemometrie gegenüber:

- A - Flüssigmetallen,
- B - Elektrolyten sowie
- C - Festkörpern.

2.4. LORENTZKRAFT-ANEMOMETER IM QUALI- UND QUANTITATIVEN VERGLEICH 15

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die wichtigsten wissenschaftlichen Erkenntnisse seit jener Zeit gegeben. Neben der Prüfung erster Prototypen für Durchflussmessungen in der metallverarbeitenden Industrie durch Weidermann et al. [9] und Kolesnikov et al. [8], konnten durch Heinicke [25] erste orts aufgelöste Durchflussmessungen mittels sehr kleiner Magnete und neu entwickelter 6-Komponentenwaage von Rahneberg [26] erzielt werden. Ferner konnte die Durchflussmessung von schwach leitfähigen Elektrolyten durch Wegfrass et al. [10] realisiert werden, was beachtlich ist, da im Gegensatz zu metallurgischen Anwendungen sehr viel kleinere Kräfte aufgelöst werden müssen. Des Weiteren sei noch die Überprüfung der sogenannten *Time of Flight - Theorie* von Viré et al. [27] erwähnt, welche von Jian et al. [28] durchgeführt und publiziert wurde.

Auch über die Grenzen des Graduiertenkollegs der *TU Ilmenau* hinaus beschäftigen sich Forscher mit der Durchflussmessung beruhend auf dem Lorentzkraft - Effekt. Hierbei sei vor allem auf die Arbeiten der Forschergruppe des *Forschungszentrum Dresden - Rossendorf* [29, 30] und deren eingereichte Patente [31, 32] verwiesen.

Folgende Zusammenfassung repräsentiert abgeleitete Eigenschaften des neuartigen, vollkommen berührungslos arbeitenden Messverfahrens:

- Vorteil gegenüber vorgestellten Verfahren in Abschnitt 2.2:
 - Messungen unabhängig von der Medienzusammensetzung möglich
 - Unabhängigkeit gegenüber chemischen / thermischen Eigenschaften
 - hygienische Unbedenklichkeit
 - Nachrüstmöglichkeit an beliebiger Position an bestehenden (Industrie-) Messanlagen
- Optimierungsansätze / Nachteile:
 - Mindestleitfähigkeit und Mindestfließgeschwindigkeit wird vorausgesetzt
 - Empfindlichkeit gegenüber Vibrationen

Die meisten der eben aufgeführten Entwicklungsarbeiten zur Lorentzkraft-Anemometrie beruhen auf der Vermessung des Durchflusses von elektrisch hoch leitenden Fluiden. Hierunter zählen vor allem flüssige Metalle wie Aluminium- und Stahllegierungen.

2.4 Lorentzkraft-Anemometer im quali- und quantitativen Vergleich

In Tabelle 2.1 wird ein Überblick über die qualitativen und quantitativen Eigenschaften der in Abschnitt 2.2 und 2.3 vorgestellten Messverfahren gegeben. Ziel der Tabelle ist das neue Messverfahren in seinen Eigenschaften (Vorzüge / Nachteile) in das Gesamtbild der zur Verfügung stehenden Messverfahren einzugliedern. Anzumerken ist, dass die messbaren Aggregatzustände als l - liquid, g - gaseous und s - solid abgekürzt sind und die

möglichen Erscheinungsformen des Messgutes beschreiben. Ferner beruht die qualitative Bestimmung der unter Punkt *Anschaffungskosten* aufgeführten Verfahren auf der Festsetzung eines gemeinsamen Messquerschnittes (im vorliegende Fall: DN 10).

Tabelle 2.1: Quali- und quantitative Gegenüberstellung der vorgestellten Verfahren in Bezug auf die Lorentzkraft-Anemometrie.

Eigenschaften	UMVZ	MVZ	WDV	USD	MID	LKA
messbare Aggregatzustände	l, g, l-g	l, g, l-g	l, g, l-g	l, l-g	l, l-s	l, l-g, l-s, s
Messungenauigkeit [%]	0,3	0,75	1	1	0,2	~ 4
Max. Temperatur [°C]	300	400	360	500	170	~ 1300
Max. Druck [bar]	100	100	400	100	250	unabhängig
Maximale Nennweite [DN]	800	400	2000	4000	3000	~ 400
Anschaffungskosten	gering	gering	gering	mittel	mittel	hoch
Robustheit	mittel	mittel	mittel	hoch	hoch	sehr hoch

Es zeigt sich, dass die vorgestellte Lorentzkraft-Anemometrie momentan noch Schwächen in Messgenauigkeit sowie maximaler Messnennweite aufweist. Im Gegenzug erweist sich das Verfahren jedoch als Favorit bezüglich der Einsetzbarkeit. So ist dieses Verfahren erstmalig in der Lage, quasi unabhängig von der Medienzusammensetzung, anliegenden Systemdrücken und Systemtemperaturen, Durchflüsse von Messgütern zu determinieren. Der aufgeführte Anschaffungspreis beruht dabei nur auf wirtschaftlichen Abschätzungen von bereits gefertigten Prototypen. Wie bei allen anderen Verfahren würden die anfallenden Kosten durch eine denkbare Serienfertigung des Verfahrens enorm sinken und somit auf ein Preisniveau zur Konkurrenz aufschließen.

Konzipierung der Prototypen

Der Fokus des vorliegenden Kapitels liegt in der Darstellung der systematischen Konzipierung der beiden, von Grund auf neu entwickelten Versuchsprototypen. Hierbei wird insbesondere auf die Grundelemente der Versuchseinrichtungen und der dabei zum Einsatz gekommenen Messtechnik eingegangen. Ferner werden die Grenzen des ersten Prototyps beleuchtet und der Bedarf nach einem verbesserten, mittels konstruktivem Entwicklungsplan erstellten, Prototypen aufgezeigt.

3.1 Zeitliche Entwicklung der Prototypen

Um zu erörtern, weshalb während der letzten drei Jahre zwei Versuchseinrichtungen von Grund auf neu konzipiert, aufgebaut und vermessen wurden, bedarf es der Erwähnung des Forschungsstandes zu Beginn der Untersuchungen. So war von Anbeginn strittig, ob die – bei Flüssigmetallen gut funktionierende – LKA überhaupt auf schwach leitfähige Fluide anwendbar ist. Ergo bestand bis zuletzt keine Versuchseinrichtung mit dessen Hilfe eine Überprüfung hätte durchgeführt werden können. Als Hauptgründe für die Zweifel bezüglich der Anwendbarkeit des Systems seien sowohl die theoretisch prognostizierten winzigen Lorentzkräfte (siehe Abschnitt 2.3), wie auch die messtechnische Umsetzung genannt. Hauptarbeitspunkte der vorliegenden Untersuchungen definierten sich somit zu:

1. Erbringung eines qualitativen Nachweises zur Anwendbarkeit des Verfahren auf Fluide niedriger elektrischer Leitfähigkeit ($\sigma \leq 100 \text{ S/m}$).
2. Infolge erfolgreicher Nachweisführung: Quantitative Untersuchung des Systems im Hinblick auf Reproduzierbarkeit, Unsicherheit sowie genereller Messbeeinflussung durch Umweltfaktoren.

Die aufgeführten Punkte sowie der begrenzte zeitliche Rahmen des Projektes führten zu dem Aufbau von zwei heterogenen Prototypen.

In Anlehnung an Punkt 1 war das übergeordnete Ziel des ersten Prototyps binnen kurzer Zeit eine generelle Aussage über die Eignung des Verfahrens zur Determinierbarkeit von Durchflussraten an schwach leitfähigen Fluiden zu erhalten. Da Lorentzkräfte im unteren Mikronewton-Bereich erwartet wurden und somit um mehrere Größenordnungen geringer sind als bei bestehenden LKA-Systemen (siehe Abschnitt 2.3), wurde eine Lösung angestrebt, welche im Betrag umgekehrt proportional zur benötigten Sensitivität ist. Resultierend aus diesen Vorüberlegungen kam es zur Konzipierung des im Kapitel 3.4 aufgeführten Pendelaufbaus.

Pendel sind im Allgemeinen, in Abhängigkeit ihrer Länge und Masse, sehr sensitiv gegenüber externen Kräfteinwirkungen. Bereits die Physiker Cavendish [33] und Foucault [34] nutzten dieses Prinzip in der Vergangenheit um präzise Untersuchungen durchzuführen. Auch im vorliegenden Fall zeigte sich der Erfolg des Prinzips zur indirekten Lorentzkraft Messung. So konnten, wie in Kapitel 4 ersichtlich, bereits über die qualitative Aussage – der Anwendbarkeit des LKA auf schwach leitfähige Fluide – hinaus Parameterstudien durchgeführt werden. Als Grundlage zur Auswertung der Abhängigkeit der Lorentzkraft von Geschwindigkeits-, Leitfähigkeits- und Temperaturänderungen des Fluids (siehe Abschnitt 4.2) diente die Analyse der Auslenkung des Pendels, fußend auf der wirkenden Lorentzkraft.

Nach ersten erfolgreichen Untersuchungen schloss sich eine detaillierte Analyse (siehe Abschnitt 3.4.2) des Systems an. Hierbei wurde vor allem auf die Reproduzierbarkeit der Messdaten sowie auf die genaue Beschreibung der Systemparameter geachtet. Die Untersuchungen ergaben, dass das System aus einer Vielzahl schwer erfassbarer Parameter besteht, was selbstredend unakzeptabel im Hinblick auf die Beherrschbarkeit des Systems sowie auf die Reproduzierbarkeit der Messbedingungen ist.

Dieser Ursache geschuldet, war es unerlässlich, den im Abschnitt 3.5 beschriebenen Prototypen aufzubauen. Auf einem vollständig neuen Messprinzip beruhend, wurde erst mit diesem definierten Prototyp eine kontinuierliche Überwachung der vorherrschenden Systemparameter¹ zu jeder Zeit und an jedem Ort möglich (siehe Kapitel 5). Basis des neuen Systems bildet die in Abschnitt 3.3.2 beschriebene und in ihrer Messart abgeänderte elektromagnetische Kraftkompensationswaage, mit deren Hilfe erstmals direkte Messungen der auftretenden Lorentzkräfte möglich sind.

3.2 Grundelemente der Versuche

Bereits einleitend aufgeführt handelt es sich bei den beiden existierenden Prototypen um grundsätzlich in ihrer Messart unterschiedliche Systeme. Um den Überblick über beide Versuchseinrichtungen zu wahren, wurde im Zuge des zugrundeliegenden Zeitrahmens,

¹Hierunter zählen vor allem Parameter wie die Fließgeschwindigkeit, die Temperatur, die Leitfähigkeit und der Druck des zu untersuchenden Fluids sowie die bei dem Durchströmen des Magnetfeldes entstehende Lorentzkraft.

der Vergleichbarkeit der Systeme untereinander sowie aus wirtschaftlichen Gründen entschieden gemeinsame Elemente festzulegen, welche bei beiden Systemen zum Tragen kommen. Als Schnittmenge dieser Überlegungen wurden drei Grundelemente definiert. Die Wahl fiel hierbei auf das verwendete Modellfluid, die Art der Magnetquelle sowie auf die prinzipielle Beförderungsart des Fluids.

3.2.1 Wahl des schwach leitfähigen Modellfluids

Wie in Abschnitt 2.2 ersichtlich, steht und fällt die Qualität² heutiger elektrischer Messsysteme mit der Mindestleitfähigkeit des Fluids. Vor allem sei hierbei an Durchflussmessungen mit einem MID gedacht. Fällt die Leitfähigkeit des zu vermessenden Fluids unter eine vom Messgerätehersteller vorgegebene Leitfähigkeitsschwelle, ist eine Durchflussmessung nur mit großen Fehler oder gar nicht durchführbar [35, 36]. Aufgrund dessen ist man in der Industrie³ gewillt möglichst große Leitfähigkeitsbereiche vorzufinden, beziehungsweise eine Mindestleitfähigkeit im Fluid vorauszusetzen, die mindestens gleich oder größer der Mindestanforderung des Messsystems ist [37]. Die besten Leitfähigkeitswerte für flüssige Fluide erhält man bei Metalllegierungen aufgrund der zugrundeliegenden Elektronenleitung. Die hierbei auftretenden spezifischen Leitfähigkeiten liegen im Bereich von mehreren Megasiemens pro Meter.

Im Fokus der vorliegenden Arbeit steht jedoch die Anwendung und Untersuchung von Elektrolyten, welche im Gegensatz zu den flüssigen Metallen auf Ionenleitung beruhen und in ihrer Leitfähigkeit um mehrere Größenordnungen kleiner sind [38]. So weist beispielsweise eine Aluminiumlegierung (*AlSi-12* bei 650°C) eine spezifische elektrische Leitfähigkeit von $\sigma \approx 3,3 \times 10^7$ S/m [7] auf, wohingegen Meerwasser als gewöhnliches Elektrolyt nur einen Wert von $\sigma \approx 4,3$ S/m [39] besitzt.

Aufgrund der Fülle von existierenden Elektrolyten ist eine vollständige Analyse aller in Frage kommender Fluide in diesem Abschnitt weder angestrebt noch im gegebenen Rahmen möglich⁴. Es soll dabei aber nicht unerwähnt bleiben das Elektrolyte eine weitere, in diesem Fall ungünstige, Eigenschaft inne haben. So hängen die meisten Elektrolyte in ihren Stoffeigenschaften – wie beispielsweise ihrer elektrischen Leitfähigkeit – sehr stark vom herrschenden Druck, der Temperatur sowie ihrer Konzentrationsverteilung ab. Die eben aufgeführten sowie die magnetofluidodynamischen Eigenschaften der zur Verfügung stehenden Elektrolyte werden in Tabelle 3.1 beleuchtet.

Um Vergleiche ziehen zu können, beruhen die angegebenen Stoffdaten auf äquivalenten Konzentrationen [41] sowie auf der im Versuch vorherrschenden Temperatur von $T = 20^\circ\text{C}$. Die Berechnungen des jeweiligen Interaktionsparameter N beruhen auf den im Versuch vorzufindenden Systemparametern, wie der jeweiligen spezifischen Dichte und

²Der Begriff Qualität repräsentiert hierbei den Unsicherheitsbeitrag sowie die Reproduzierbarkeit der Messwerte des Durchflussmessers.

³Einsatz von MID bei großen Anlagen der Pharma- und Verfahrenindustrie zur Überwachung von Herstellungsprozessen.

⁴Einen detaillierten Überblick gibt Falkenhagen [40] sowie D'Ans und Lax [41].

Leitfähigkeit des Fluids, der mittleren magnetischen Flussdichte von $B = 0,210$ T, einer charakteristischen Länge von $L = 56$ mm sowie einer angenommenen mittleren Fluidgeschwindigkeit von $u = 2,5$ m/s.

Tabelle 3.1: Stoffparameter sowie Eigenschaften von Elektrolyten in wässriger Lösung bei $T = 20^\circ\text{C}$. σ beschreibt hierbei die elektrische Leitfähigkeit, N den dazugehörigen Interaktionsparameter des Fluids.

	HNO_3	H_2SO_4	KOH	$NaOH$	$NaCl$
σ [S/m]	54,18	39,15	36,40	31,24	12,11
N	$5,35 \cdot 10^{-5}$	$3,86 \cdot 10^{-5}$	$3,59 \cdot 10^{-5}$	$3,08 \cdot 10^{-5}$	$1,19 \cdot 10^{-5}$
Stoffverhalten	ätzend	ätzend	ätzend	basisch	neutral
Kosten je Liter	hoch	hoch	mittel	mittel	gering

Basierend auf den Anforderungen der durchzuführenden Experimente wurden die Fluide bezüglich ihrer Eignung untersucht. Im Allgemeinen ist festzuhalten, dass aufgrund der geringen Werte von $N \ll 1$ keine großen Wechselwirkungen zwischen aufgeprägtem Magnetfeld und den in Tabelle 3.1 aufgeführten Elektrolyten erwartet werden können. Im Hinblick auf eine sich entwickelnde Lorentzkraft werden demnach Leitfähigkeit und Stoffverhalten gegeneinander abgewogen.

Als endgültige Festlegung des zu verwendeten Modellfluids hat sich $NaCl$ in wässriger Lösung als besonders zweckmäßig erwiesen. Während erste Abschätzungen über die benötigte Fluidmenge⁵ Werte über $V_{Fluid} \gg 2000$ l lieferten, war neben der Handhabbarkeit des Fluids der wirtschaftliche Aspekt einer der Hauptgründe, welcher zur Entscheidung beigetragen hat.

Resultierend sei aufgeführt, dass sich $NaCl$ in wässriger Lösung – im Folgenden als Salzwasser bezeichnet – als ungefährlichstes sowie kostengünstigstes Fluid erwies. Die relativ geringe Leitfähigkeit gegenüber den anderen tabellierten Elektrolyten muss hierbei in Kauf genommen werden. Eigene Untersuchungen im Labor zeigten jedoch, dass mit Erhöhung der $NaCl$ -Konzentration eine Manipulation an der Leitfähigkeit des Elektrolyts erfolgen kann. Bei der stetigen Zugabe von $NaCl$, bis hin zur Sättigung der Salzlösung, konnten Maximalwerte von $\sigma \approx 21,4$ S/m erreicht werden.

3.2.2 Betrachtungen zur Magnetquelle

Neben der Auswahl eines geeigneten Modellfluids nimmt die Dimensionierung sowie Optimierung eines praktikabel einsetzbaren Magnetsystems einen wichtigen Untersu-

⁵Berechnungen fußen hierbei auf den Bedarf des mehrmaligen Befüllens der Versuchseinrichtung aufgrund von Leitfähigkeitsänderungen des Modellfluids.

chungspunkt ein. Bedingt durch die quadratische Abhängigkeit der magnetischen Flussdichte (siehe Gleichung 2.13) hat die Leistungsfähigkeit des Magnetsystem den größten Einfluss auf die sich entwickelnde Lorentzkraft. Infolgedessen liegt das Hauptaugenmerk auf der Maximierung der magnetischen Flussdichte des Magnetsystems. Hinzu kommt, dass die verbleibenden Parameter in erwähnter Gleichung, wie Leitfähigkeit und Fließgeschwindigkeit des Fluids, im vorliegenden Fall aufgrund projektspezifischer Faktoren in ihrem Wert limitiert sind und darüber hinaus nur einen linearen Beitrag zur erzielenden Lorentzkraft liefern.

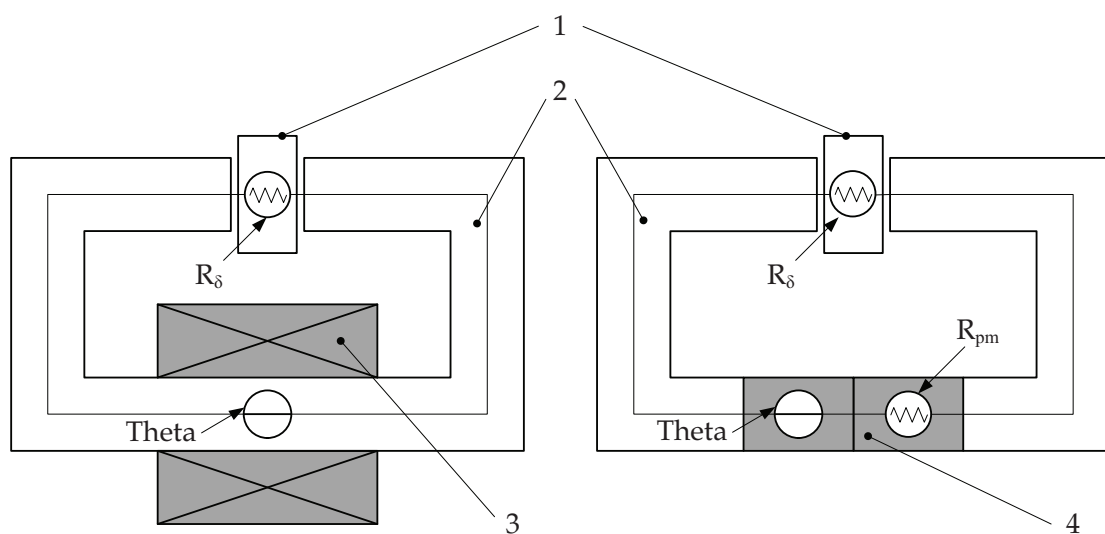


Abbildung 3.1: Elektromagnetische Ersatzschaltbilder der in Frage kommenden Magnetsysteme. Links: Magnetsystem auf Grundlage einer Spulenanordnung. Rechts: Magnetsystem aufgebaut aus Permanentmagneten. 1 - Strömungskanal; 2 - Joch; 3 - Spule; 4 - Permanentmagnet.

Gleichwohl, jedoch in Gleichung 2.13 nicht aufgeführt, ist die Masse des Magnetsystems ein weiterer bedeutender Parameter für die Auswahl eines geeigneten Magnetsystems und darf aufgrund messtechnischer Randbedingungen einen Wert von 1 kg nicht überschreiten. Ursache für die Festsetzung der kleinen Masse ist hierbei der gewählte konstruktive Aufbau des Messsystems. Unter anderem sei eine schlechte Dynamik und starkes Kriechverhalten⁶ bei Überschreiten dieses Wertes genannt.

Es ist daher festzuhalten, dass im vorliegenden Fall ein Magnetsystem gefunden und aufgebaut werden muss, welches bei geringstem Gewicht eine möglichst große magnetische Flussstärke aufweist.

⁶Nähere Angaben zur Festsetzung des maximal möglichen Magnetsystemgewichtes ist der Dissertation von C. Diethold zu entnehmen [42].

Um geeignete Magnetsysteme zur späteren Applikation innerhalb der angestrebten LKA-Prototypen zu dimensionieren, muss zunächst die Frage nach der grundlegend zu verwendenden Systemart geklärt werden. Üblicherweise werden Systeme mit (Elektromagnete) und ohne (Permanentmagnete) elektronische Kontaktierung sowie Systeme mit und ohne Eisenjoch unterschieden. Alle benannten Systeme haben gleichwohl Vor- wie auch Nachteile. Elektromagnete können beispielsweise mit geeigneten Stromquellen in einen Zustand betrieben werden, mit dem es für sehr kurze Zeiten möglich ist, sehr hohe magnetische Flussdichten zu erzeugen. Nachteilig bei solchen Systemen ist der konstruktive Aspekt der mechanischen Kontaktierung zur Bestromung, die notwendige Kühlung bei Dauerversuchen und das hohe Eigengewicht. Vergleichsweise dazu erreichen Permanentmagnetsysteme abhängig vom Gütegrad⁷ nur einen Bruchteil der magnetischen Flussdichte, sind hierbei allerdings um Größenordnungen leichter als ihre bestromten Pendants.

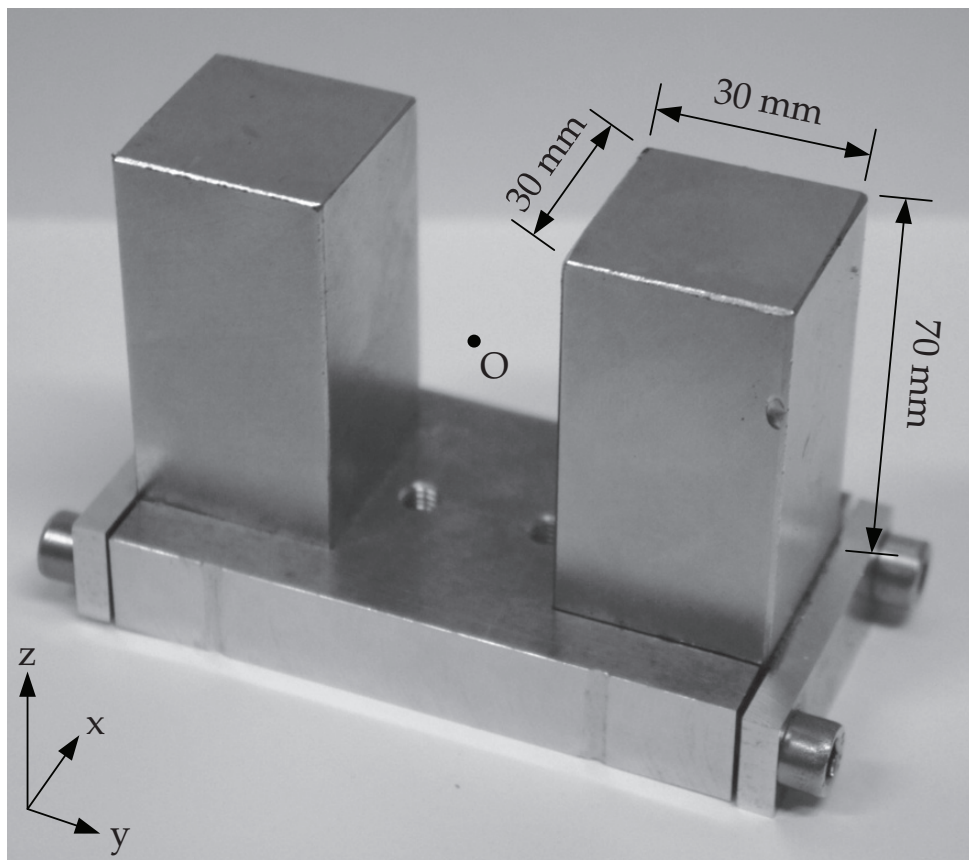
Bei der Gegenüberstellung zweier einfach gewählter statischer Systeme (siehe Abbildung 3.1 [43]) und der Annahme, dass sowohl das Elektromagnetsystem wie auch das Permanentmagnetsystem denselben Sachverhalt (gleicher Luftspalt, gleiche zu erreichende magnetische Flussdichte) widerspiegeln, ist der Vorteil des mit Permanentmagneten versehenen Systems offensichtlich. Fällt bei letztgenanntem System ein Gewicht von 400 Gramm an, erreicht das spulenbasierende System circa das zehnfache Gewicht. Ein weiterer Punkt welcher für die Auswahl eines Permanentmagnetsystemes spricht ist das Nichtvorhandensein elektrischer Kontaktierungen. Anders als bei den spulenbetriebenen Systemen muss keine elektrische Kontaktierung stattfinden. Darüber hinaus wird bei Dauer-einsatz des Systemes keine Kühlung benötigt, welche zusätzlichen Kontakt bedeuten würde. Das Kontaktierungsproblem resultiert aus dem konstruktiven Aufbau des LKA-Prototypen. Dieser ist als frei-schwingendes Pendel ausgelegt um die benötigte Sensitivität/Auflösung von $F_{Lorentz} \approx 10^{-7}$ N für die Kraftmessung zu gewährleisten.

Bezugnehmend auf die Systemart der Magnete soll darüber hinaus erwähnt sein, dass eine Verwendung eines Eisenjoches im vorliegenden Fall keine Verbesserung hinsichtlich der Erhöhung der Magnetflussdichte bewirkt [44]. Bei Untersuchungen wurde festgestellt, dass bei den fiktiven Kanalabmessungen ein Magnetsystem mit Eisenjoch in der Regel effektiver arbeitet, da das Eisenjoch keine Feldquellen aufweist, jedoch entsprechende Masse ins System einbringt. Da dies, wie oben erwähnt ausdrücklich nicht erwünscht ist, wurde dieser Ansatz bei der Findung eines geeigneten Systems nicht weiter verfolgt.

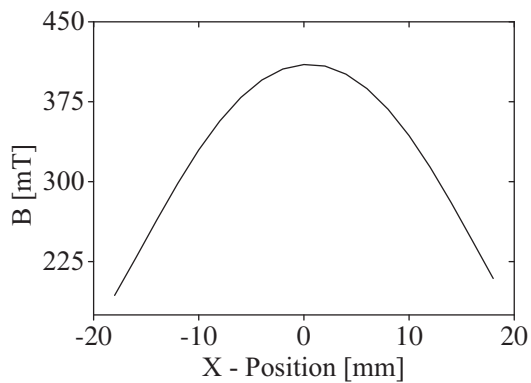
Im Folgenden sind die zum Einsatz gekommenen Magnetsysteme in ihrem Aufbau und magnetischer Charakteristik dargestellt. So finden sich zu jedem Magnetsystem die charakteristischen Dimensionen des Systems sowie magnetischen Flussdichten entlang und orthogonal zur Magnetisierungsrichtung. Auf detaillierte Auslegungs- sowie Optimierungsberechnungen⁸ wird im Folgenden indes nicht eingegangen.

⁷Angabe des Leistungsvermögen der Magnete (Koerzitivfeldstärke, etc.) an der Oberfläche.

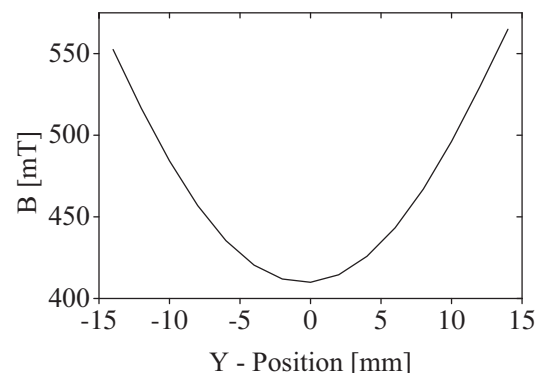
⁸Nachzuschlagen in der Dissertation von M. Werner [45].



(a)

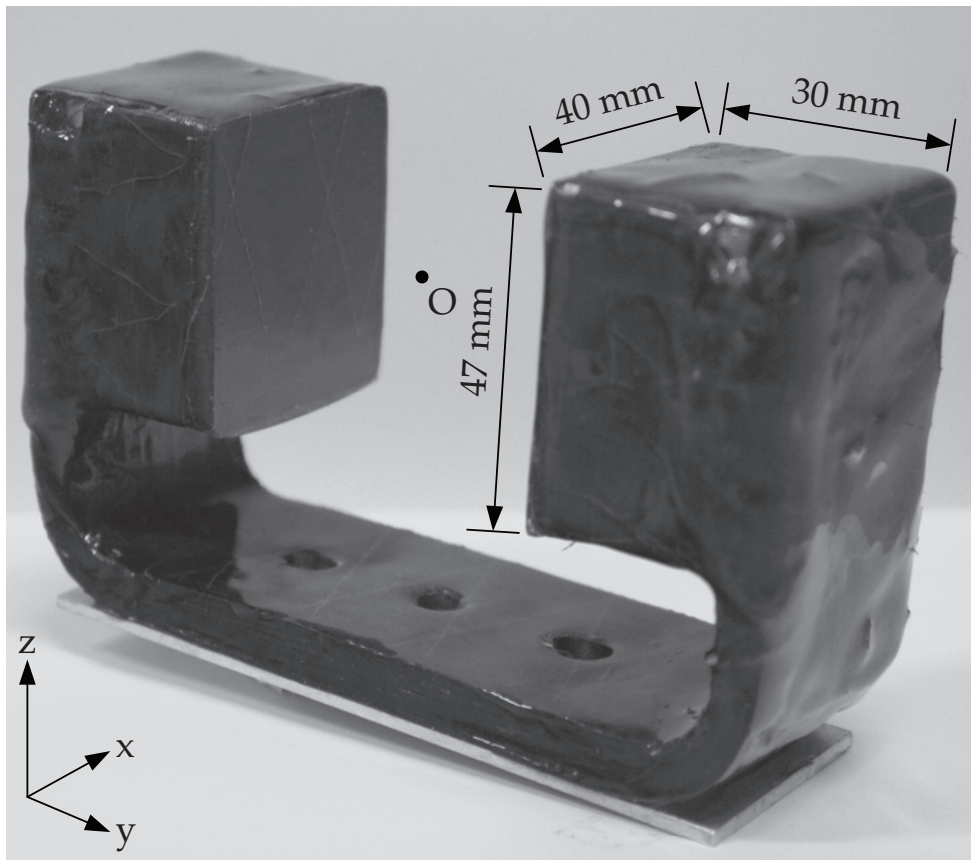


(b)

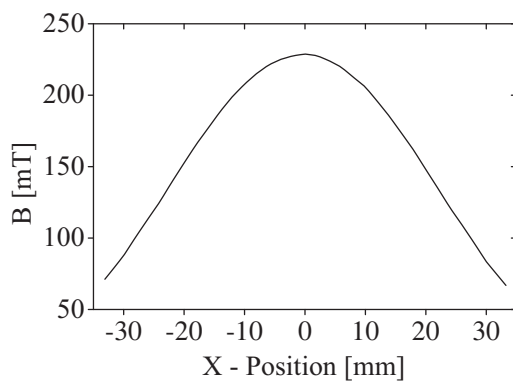


(c)

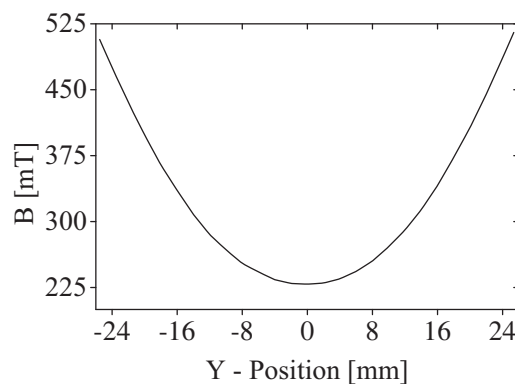
Abbildung 3.2: (a) Schaubild des klassischen Magnetsystems, welches beim Pendelprototypen zum Einsatz gekommen ist. Charakterisiert wird dieses durch die im Bild angegebenen Abmaße sowie einer magnetischen Flussdichte von $B = 410$ mT im Koordinatenursprung $O(0;0)$. (b) Gemessene Magnetflussdichte des Magnetsystems entlang der x-Achse bei $y = 0$. (c) Gemessene Magnetflussdichte des Magnetsystems entlang der y-Achse bei $x = 0$.



(a)

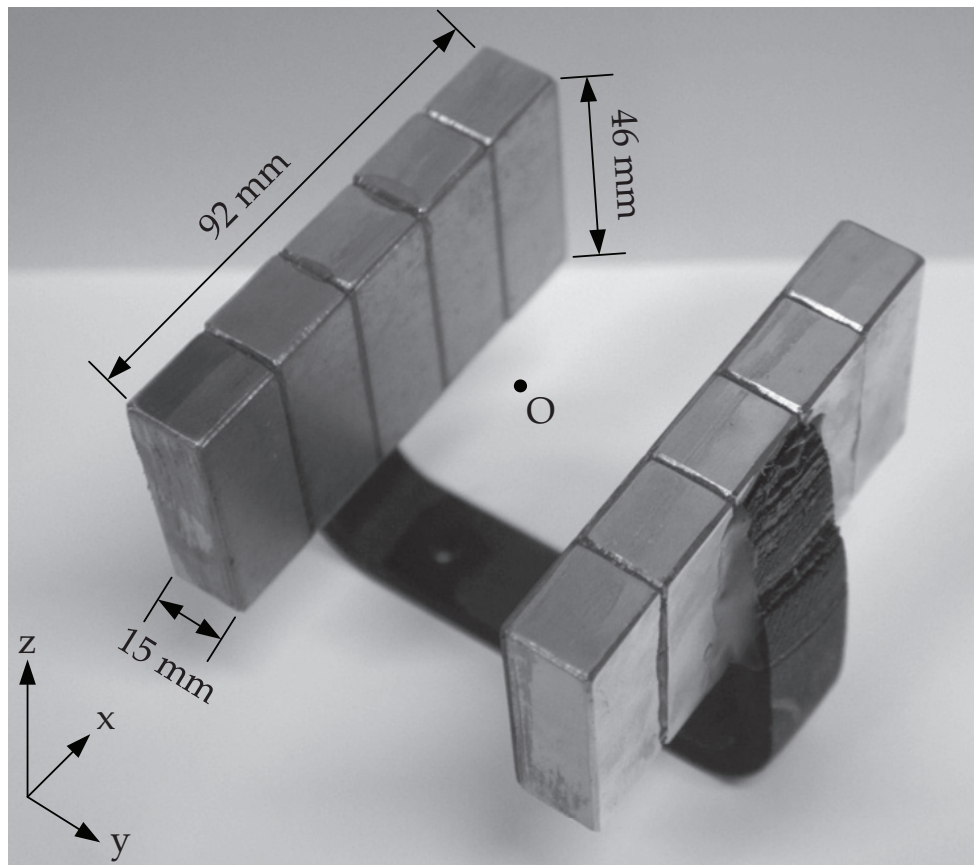


(b)

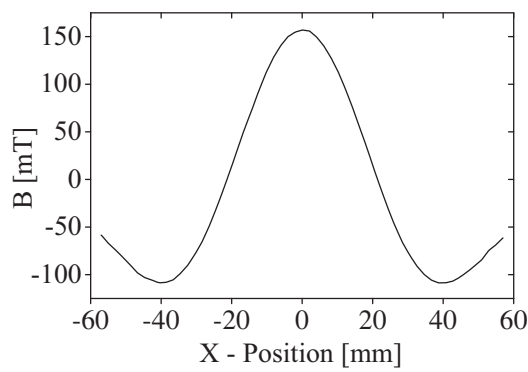


(c)

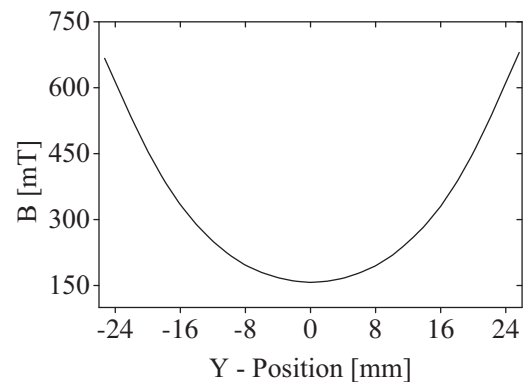
Abbildung 3.3: (a) Schaubild des klassischen Magnetsystems, welches beim EMK-Prototypen zum Einsatz gekommen ist. Charakterisiert wird dieses durch die im Bild angegebenen Abmaße sowie einer magnetischen Flussdichte von $B = 229$ mT im Koordinatenursprung $O(0;0)$. (b) Gemessene Magnetflussdichte des Magnetsystems entlang der x-Achse bei $y = 0$. (c) Gemessene Magnetflussdichte des Magnetsystems entlang der y-Achse bei $x = 0$.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 3.4: (a) Schaubild des Halbach-Magnetsystems, welches beim EMK-Prototypen zum Einsatz gekommen ist. Charakterisiert wird dieses durch die im Bild angegebenen Abmaße sowie einer magnetischen Flussdichte von $B = 210$ mT im Koordinatenursprung $O(0;0)$. (b) Gemessene Magnetflussdichte des Magnetsystems entlang der x-Achse bei $y = 0$. (c) Gemessene Magnetflussdichte des Magnetsystems entlang der y-Achse bei $x = 0$.

3.2.3 Prinzipien zum Fluidtransport

Wohingegen vorangestellte Abschnitte die Auswahl des zu verwendenden Modellfluids sowie die Bestimmung einer geeigneter Magnetquelle zum Thema hatten, widmet sich der vorliegende Abschnitt mit der Findung eines Prinzips zum Fluidtransport. Stehen Modellfluid und Magnetquelle in direktem Zusammenhang mit der quantitativen Messgröße der Lorentzkraft, kommt der Generierung des Fluidstromes – welcher sich letztendlich durch das Magnetfeld der Magnetquelle bewegt und somit kausal mit der Entstehung der Lorentzkraft zusammenhängt – eine besondere qualitative Bedeutung zu. So entscheidet die Auswahl des Prinzips über die Reproduzierbarkeit der Versuche und somit direkt über die Vergleichbarkeit der einzelnen Tests zueinander. Hierdurch wird dieser Problematik eben soviel Aufmerksamkeit zuteil wie den beiden vorhergegangenen Punkten. Eingangs sei die Unmenge an in Frage kommenden Möglichkeiten zur Generierung eines Fluidstromes erwähnt. Beispielsweise kann an einen durch einen Motor angetriebenen Wasserringkanal beziehungsweise an eine von einer Pumpe angetriebene Rohrströmung gedacht werden. Unter Berücksichtigung der vorliegenden Raumkapazitäten des Laboratoriums von 6 m x 6 m x 2,5 m sowie einer angemessenen Reproduzierbarkeit der Messbedingungen reduzieren sich die Prinzipien jedoch auf die nachstehend aufgeführten Möglichkeiten zur Fluidstromgenerierung:

a.) Schwerkraftprinzip mit passiven Antrieb

Abbildung 3.5 stellt den Grundgedanken des Prinzips dar. Laut Pascal'schem Gesetz (siehe Gleichung 3.1) bestimmt das Höhenniveau des Fluidspiegels maßgeblich den sich aufbauenden hydrostatischen Druck und ist unter Betrachtung des Bernoulli-Gesetzes (siehe Gleichung 3.3) ein Maß für die sich aufbauende Fluidgeschwindigkeit in der Messstrecke (MS).

$$p_{Fluid}(h) = \rho gh \quad (3.1)$$

Begründet durch das Schwerfeld der Erde bedeutet dies, angewandt auf die dargestellte Skizze, dass beim Öffnen des dargestellten Ventils, das Fluid von Behälter 1 in Behälter 2 mit der sich aus der Höhe ergebenden Geschwindigkeit fließt. Nachteilig an diesem Transportsystem ist der Aspekt der Diskontinuität sowie der Inflexibilität. Ist einmal das Volumen des höher liegenden Behälters versiegt, muss so lange mit einer erneuten Messung gewartet werden, bis das Fluid durch eine externe Fördereinrichtung wieder in den Niveau höher liegenden Behälter verbracht wurde. Hierbei muss des Weiteren aufgrund von Wandreibung und anderen Effekten davon ausgegangen werden, dass das Fluid nicht die gleiche Ausgangstemperatur aufweist wie zu Beginn der Messung, wodurch diesem System keine akzeptable Reproduzierbarkeit zugeschrieben werden kann.

Des Weiteren ist die sich einstellende Strömungsgeschwindigkeit direkt proportional von der Höhe des Behältnisses abhängig, was Variationen der Fließgeschwindigkeit untersagt. Darüber hinaus würde bei einer gewünschten Fluidgeschwindigkeit von 5 m/s innerhalb der Messstrecke die verfügbare Raumhöhe nicht ausreichen. Es bleibt festzuhalten, dass sich das Prinzip generell eignen würde, jedoch aufgrund aufgeführter Nachteile auszu-

schließen ist.

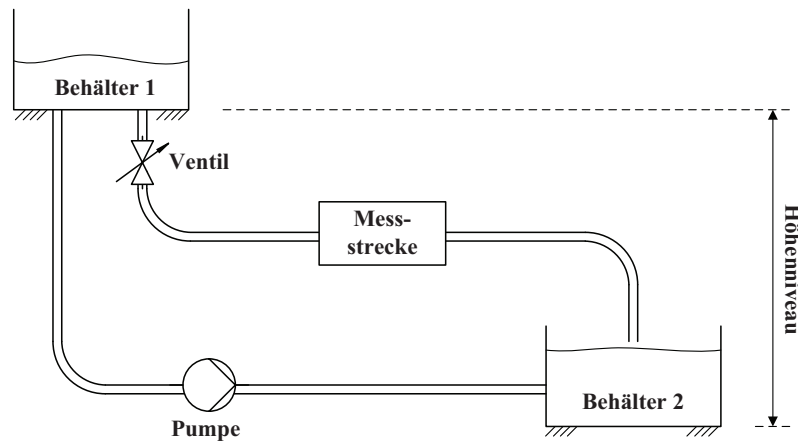


Abbildung 3.5: Fluidtransport beruhend auf dem Schwerkraftprinzip.

b.) Umfüllprinzip mit aktiven Antrieb

Im Gegensatz zu dem vorherigen Prinzip bedient sich in Abbildung 3.6 dargestelltes Prinzip eines aktiven Antriebes. Dies bedeutet auf der einen Seite einen erhöhten Energiebedarf, ermöglicht auf der anderen Seite jedoch eine aktive Regelung der Fluidgeschwindigkeit innerhalb der Messstrecke.

Auch diesem Prinzip müssen analog Nachteile wie der oben aufgeführten Methode zugeschrieben werden. So sind auch hier die Diskontinuität, verbunden mit der vergleichsweise schlechten Reproduzierbarkeit der Messbedingungen als großer Nachteil zu werten, wodurch auch diesem System keine Eignung zugesprochen werden kann.

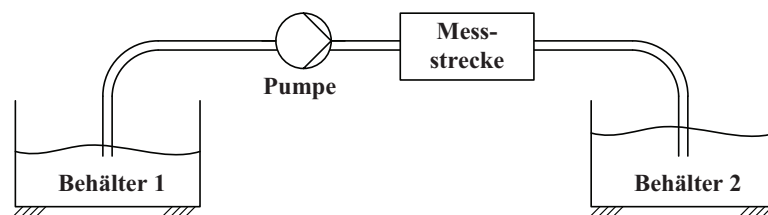


Abbildung 3.6: Fluidtransport beruhend auf dem Umfüllprinzip.

c.) Umlaufprinzip mit aktiven Antrieb

Eine sich auf Abbildung 3.6 aufbauende, verbesserte Transportmethode ist in Abbildung 3.7 zu sehen. Das Umlaufprinzip arbeitet im Gegensatz zu den beiden vorangegangenen Prinzipien als geschlossenes System, was der Reproduzierbarkeit der Fluidparameter zugute kommt. So kann erstmals eine Regelung, in Form von Sensoren und Wärmetauschern, in das System eingebracht werden, was, unter der Voraussetzung der Isolation des

Kanales nach Außen, eine Einstellbarkeit der Systemparameter gestattet und wiederholbare Messbedingungen zulässt.

Darüber hinaus kann durch die Verwendung einer aktiv regelbaren Pumpe die Fluidgeschwindigkeit im gewünschten Maße variiert werden. Die aufgeführten Argumente sowie das Vermögen eine gute Reproduzierbarkeit zu gewährleisten, schreiben diesem Umlaufprinzip die beste Eignung für die erforderlichen Bedingungen zu.

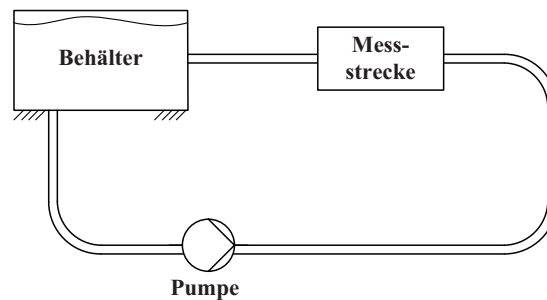


Abbildung 3.7: Fluidtransport beruhend auf dem Umlaufprinzip.

Nach Auswahl des Prinzipes des Fluidtransportes wurde die Untersuchung einer nun notwendig gewordenen Pumpe erforderlich. Dies bedeutet im Gegensatz zum Schwerkraftprinzip das Hinzukommen einer hoch genauen hydraulischen Auslegung, da die Pumpe den vorherrschenden Parametern des Umlaufkanales genügen muss. An diesem Punkt sei auf die Vielzahl, der in ihrem Aufbau und ihren Wirkungsweisen, unterschiedlich existierenden Pumpenarten verwiesen. Es ist jedoch nicht das Anliegen des Abschnittes in die Tiefen der Hydraulik einzutauchen, wodurch an diesem Punkt auf die Auslegung der Versuchseinrichtung in Abschnitt 3.4 und 3.5 verwiesen werden soll.

3.3 Eingesetzte Messtechnik während der Versuche

Immer dann, wenn ein neues Messprinzip validiert werden soll, bedient man sich standardisierter Messverfahren zur Referenzierung der erzielten Messwerte. Im vorliegenden Abschnitt wird ein kurzer Überblick über die bei den Untersuchungen zur Anwendung gekommenen Messtechnik gegeben. Ziel des Abschnittes ist es dem Leser mit dem Aufbau und der Wirkungsweise der Messelektronik vertraut zu machen, um die in den folgenden Abschnitten 3.4 und 3.5 dargestellten Prototypen in ihrer Funktionsweise zu verstehen und einordnen zu können.

3.3.1 Detektierung des Weges mittels Interferometer

Wie in Abschnitt 3.1 dargestellt beruht der erste LKA-Prototyp auf dem Pendelprinzip. Ziel des Pendelaufbaues war es, die theoretisch winzig prognostizierten Lorentzkräfte mess-

technisch auflösen zu können. Hierzu wurde das Pendel entsprechend analytisch berechnet und an das Messgestell (siehe Abbildung 3.14) appliziert. Bewegt sich das Pendel infolge der wirkenden Lorentzkraft aus seiner Gleichgewichtslage, muss diese sich ausbildende Wegänderung auch hinreichend genau quantifiziert werden können. Anknüpfend an diesen Umstand wird ein Messsystem benötigt, welches in der Lage ist kleinste Wegänderungen zu detektieren. Ein Laser-Interferometer kommt den Anforderungen am Besten nach.

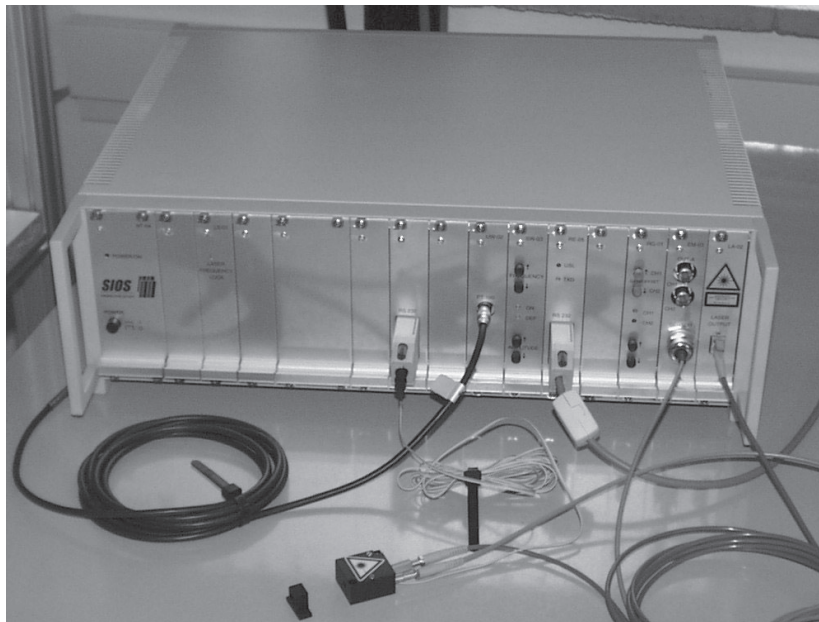
Grundlage des Messprinzips ist das Ausnutzen des Interferenz-Phänomens, welches bei der Überlagerung zweier kohärenter⁹ Lichtwellen – im vorliegenden Fall von einem Laser – beobachtet werden kann. Nachvollziehbar wird die Funktionsweise bei der Betrachtung des Ur-Experimentes zur Interferenz [46], dem sogenannten *Michelson-Interferometer*, welches nach dem amerikanischen Erfinder und Nobelpreisträger A. A. Michelson benannt wurde.

Grundgedanke der Anordnung ist die Aufteilung der Lichtwelle in einem Strahlteiler, präziser eines halbdurchlässigen Spiegels, in zwei Teillichtwellen. Die beiden Lichtwellen durchlaufen unterschiedlich lange Wegstrecken bis zum vollständigen Reflektieren an einem Spiegel, wodurch sich in Folge eine Phasenverschiebung ergibt. Werden die Wellen im Verlauf wieder zusammengeführt, entstehen auf dem Detektor Interferenzstreifen. Verändert sich die relative Position der Spiegel zueinander, verschieben sich die Phasen der beiden Wellen. Sind beide Strahlen in Phase, so addieren sich ihre Amplituden (Intensitätsmaxima), sind sie gegenphasig, löschen sie sich aus (Intensitätsminima). Resultierend können anhand von Intensitätsmessungen kleinste Wegänderungen detektiert werden, welche sich im Bereich der halben Wellenlänge des Lichtes bewegen.

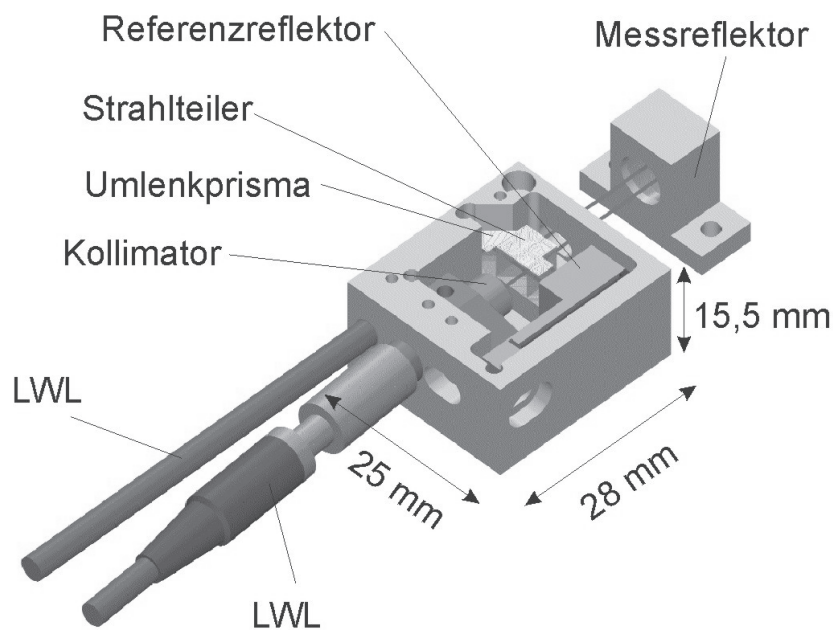
Im vorliegenden Versuch kam es zur Verwendung des, von der Firma *SIOS Meßtechnik GmbH* hergestellten, *Corner Cube Interferometer MC500*. Der äußerst kompakte Sensorkopf misst, aufgrund von mikrooptischer Bauteile sowie Verbindungstechnik, nur 25 mm x 28 mm x 16 mm. Wie bereits in Abschnitt 3.2.2 aufgeführt, ist jeder Beitrag, der zur Erhöhung der Masse führt und nicht in direktem Zusammenhang mit der Erhöhung der magnetischen Flussdichte des Magnetsystems steht, unerwünscht. Hier besteht der große Vorteil dieses Messequipments. Aufgrund des in Gewicht und Größe sehr klein ausfallenden Messreflektors, welcher zur Reflektion der ausgesendeten Laserstrahlen notwendig ist, kommt es nur zu einer geringen Gewichtsänderung im unteren Gramm-Bereich des Magnetsystems, welche sich hierbei nicht nachteilig auf das System auswirkt.

Das Interferometer arbeitet mit einem stabilisierten He-Ne-Laser und einer Wellenlänge von 632,8 nm als Maßverkörperung und ist in der elektronischen Versorgungs- und Auswerteeinheit integriert, welche mit einer RS 232 Schnittstelle an einen handelsüblichen Computer angeschlossen und betrieben werden kann. Überdies sorgt die Luftbrechzahlkorrektur für ausgezeichnete metrologische Eigenschaften des Interferometers [47].

⁹(lat.: cohaerere = zusammenhängen) Kohärenz bezeichnet die Eigenschaft von Wellen, im dynamischen Verlauf einer gemeinsamen festen Regel zu folgen.



(a)



(b)

Abbildung 3.8: Verwendetes Corner Cube Interferometer [47]: (a) Komplettes Messequipment bestehend aus elektronischer Versorgungs- und Auswerteeinheit sowie kompaktem Sensorkopf und Messreflektor. (b) Detaillierte Ansicht des MC500 Interferometers.

3.3.2 Kraftmessung mittels EMK-Waage

Im Gegensatz zum ersten Prototypen fußt der zweite Prototyp nicht auf einer Wegdetektierung durch ein Interferometer, sondern auf dem Prinzip der direkten Kraftmessung mittels elektromagnetischer Kraftkompensation (EMK). Als komplexe, mechatronische Waage aufgebaut, besteht die Messeinrichtung aus vier zentralen Elementen [48]:

1. einer monolithischen Waagenmechanik
2. einem elektromagnetischen Antrieb (Spule und Permanentmagnet)
3. einem Lageindikator
4. einem Regler

Im normalen, kommerziell erhältlichen Betrieb wird die Waage horizontal betrieben (siehe linke Abbildung 3.9). Sobald die Waagschale (1) mit einer Masse beaufschlagt wird, senkt sich der durch Parallelenker geführte Lastträger (2) ab. Die auftretende Wegänderung wird dabei vom Koppelband (3) auf den Hebel (5) übertragen, welcher sich hierbei um ein Festlager (4) dreht. Die Bewegung der Hebelspitze wird von dem Lageindikator (6) erkannt und in Form eines elektrischen Signals an den Regler (7) übergeben. Darüber hinaus ist an dem Hebel eine Spule (8) befestigt, welche sich im Magnetfeld des Permanentmagneten bewegt.

Sobald der Lageindikator eine Bewegung detektiert, wird über den verbauten Regler die Spule so lange bestromt – woraufhin die Lorentzkraft dafür sorgt, dass die Spule je nach Stromrichtung hineingezogen beziehungsweise abgestoßen wird – bis der Hebel in seine Ausgangsposition zurückgekehrt ist [49]. Die Kraft, in Form der aufgebracht Masse, wird demzufolge komplett durch den Antrieb kompensiert. Durch eine Spannungsmessung, über einen in den Regler integrierten Präzisionswiderstand, erfolgt ein lastproportionaler Signalabgriff, welcher im eingeschwungenen Zustand ein sehr genaues Maß für die aufgelegte Masse ergibt. Präzisionswaagen, worunter auch die EMK-Waage zählt, sind heutzutage in der Lage, abhängig von der Totlast, relative Messauflösungen im Bereich von $2 \cdot 10^{-7}$ N zu erreichen. Dies ist umso mehr von Bedeutung, da, wie in früheren Abschnitten postuliert, von sehr kleinen Lorentzkräften ausgegangen werden muss.

Um Lorentzkräfte mittels beschriebener Waagenmechanik am Umlaufkanal messen zu können, müssen Modifikationen unternommen werden. Die Drehung der kompletten Messanordnung um 90° gegenüber der horizontalen Funktionsweise beschreibt hierbei die wichtigste Abänderung. Ziel ist es den Lastträger gegenüber der Messstrecke so zu positionieren, dass die aufzunehmenden Lorentzkräfte senkrecht zur Gewichtskraft wirken. So einfach es klingt, desto schwerer stellt sich die Aufgabe in der Realität dar. Da die Mechanik nur für den horizontalen Einsatz konzipiert wurde, bedeutet dies den Wegfall mechanischer Anschlüsse im vertikalen Betrieb. Besonders kritisch ist dieser Aspekt für die Festkörpergelenke des Aluminium-Monolith. Diese, nur wenige Mikrometer dicken Gelenke, sind unter solchen Einsatzbedingungen allen erdenklichen Überlastfällen direkt ausgesetzt. Beispielsweise könnten bei falscher Justage der Waage Querkraftkomponenten zur eigentlichen Wirkungskraft entstehen, welche in Folge zum Zerreißen der dünnen

Gelenke führen.

Die eventuell auftretenden Querkräfte beziehungsweise Momente führen jedoch nicht allein zum Versagen der Mechanik. Vor allem die angehängte Masse, in Form des Magnetsystems, ist bei dieser Betriebsart von entscheidender Bedeutung. Überstreicht die Masse des Magnetsystems den maximal zulässigen Gewichtsereich, kommt es in Folge zur plastischen Verformung der Gelenkstellen bis hin zu ihrer Zerstörung. Um solche Überlastungen im Ansatz zu vermeiden wurde die maximal anzuhängende Masse des Magnetsystems (vergleich Abschnitt 3.2.2) auf 1 kg restringiert.

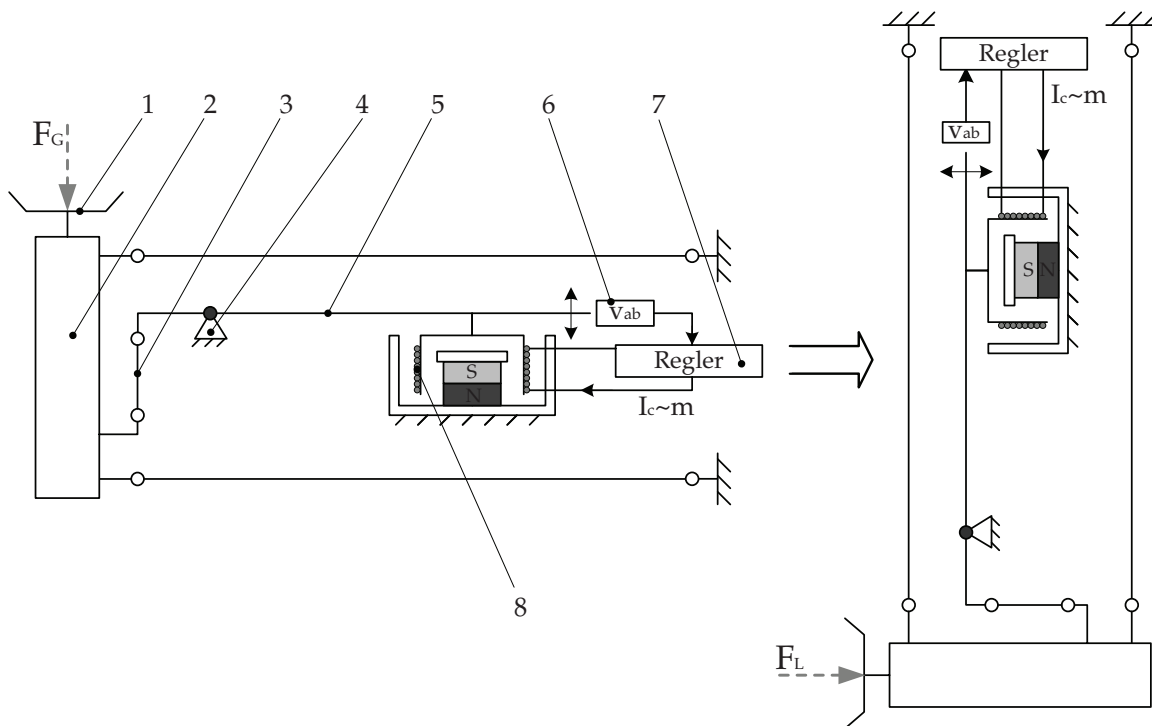


Abbildung 3.9: Aufbau und Betriebsweise der zum Einsatz gekommenen Waage nach dem Prinzip der elektromagnetischen Kraftkompensation [48]. Linke Abbildung verdeutlicht die horizontale Betriebslage sowie den Ort der Komponenten einer kommerziellen EMK-Waage. Rechte Abbildung repräsentiert den um 90° gedrehten Ist-Zustand der Waage, wie er am Versuch vorherrscht [50].

Die Limitierung der Masse hat darüber hinaus noch eine weitere wichtige Bedeutung. Die im vorherigen Absatz erwähnte Abhängigkeit der plastischen Verformung vom angehängten Gewicht führt zu einem Drift der Messwerte. Dies ist a priori zu unterbinden, wodurch sich abermals die Limitierung des Magnetsystemgewichtes begründet.

Um die volle Messauflösung der EMK-Waage zu nutzen muss darüber hinaus besonderes Augenmerk auf die Klimakenngrößen gelegt werden. So sind zeitliche Schwankun-

gen der Luftdichte, der Umgebungstemperaturen sowie der Luftfeuchte zu vermeiden, da sich diese in Signaldriften beziehungsweise in systematischen Messabweichungen äußern. Prinzipiell können diese Einflussfaktoren mittels geeignetem Modell des integrierten Reglers kompensiert werden. Eleganter und weniger zeitintensiv, können diese Faktoren jedoch durch eine geeignete Einhausung im vornherein unterdrückt werden, wie im Abschnitt 3.5 dargestellt.

Auch das Vorhandensein von externen elektromagnetischen Feldern – zusätzlich zu dem des elektromagnetischen Antriebs der Waage – führt ohne geeignete Schirmung der Kabel und des Gehäuses ebenfalls zu systematischen Abweichungen des Messwertes. Darüber hinaus muss das komplette Gebilde vor mechanischen Einflüssen, wie Verkipfung und Vibrationen, geschützt werden. Beides wurde auch im vorliegenden Prototypen berücksichtigt und ist in Abschnitt 3.5 aufgeführt.

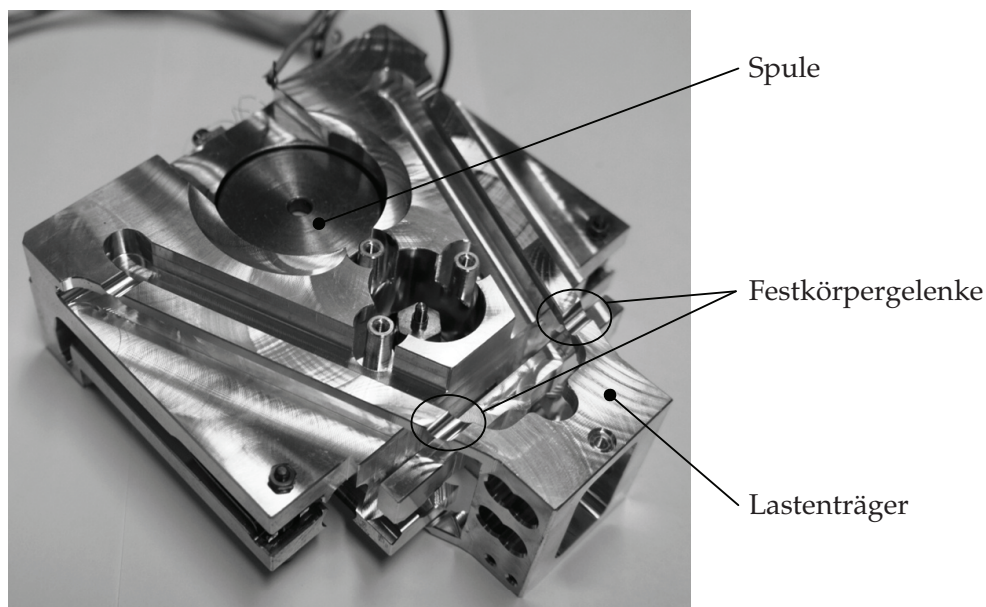


Abbildung 3.10: Schaubild des im Versuch eingesetzten EMK-Aluminium-Monolith. Zu sehen sind einzelne Komponenten des im Text beschriebenen Aufbaus.

3.3.3 Durchflussmessung mittels kommerzieller Messtechnik

Neben den in Abschnitt 3.3.1 und 3.3.2 vorgestellten Messmethoden zur Detektierung der Lorentzkraft bedarf es darüber hinaus geeigneter Messmethoden zur Quantifizierung des Ist-Durchflusses der anliegenden Strömung. Besonders im vorliegenden Fall ist dies von größter Wichtigkeit, da sonst die Charakterisierung der neu aufgebauten Prototypen nicht auf ein einheitliches Maß zurückgeführt werden kann.

Bereits im Abschnitt 2.2.c. wurde auf zwei der drei, bei den Untersuchungen zum Einsatz gekommenen Messverfahren eingegangen. Die Ultraschall- wie auch die magnetisch-induktiven Durchflussmesser gehören zu den weg-integrativen Messverfahren und sind seit

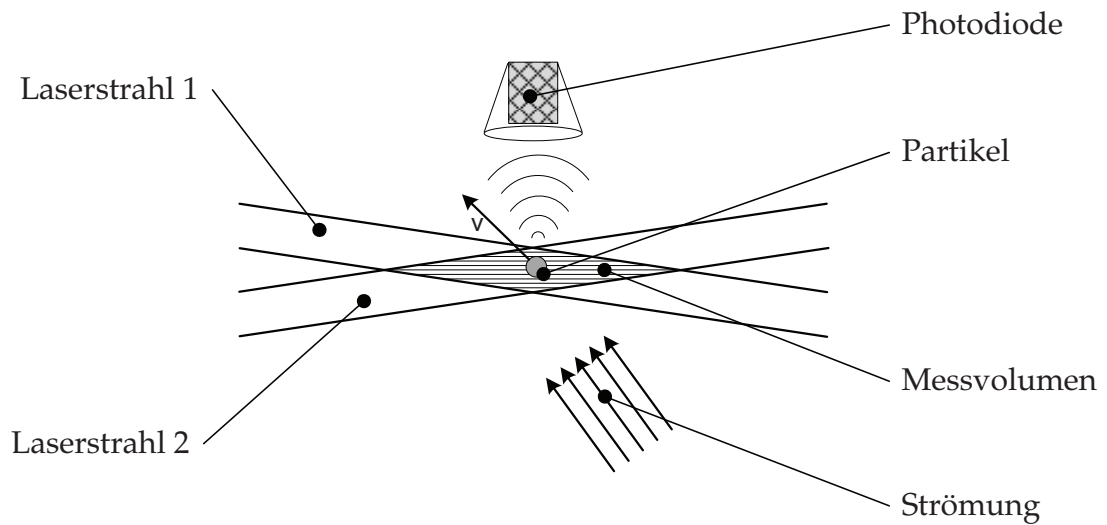
mehreren Jahren fester Bestandteil der Durchflussmesstechnik. Auch bei den vorliegenden Untersuchungen wurden die beiden Verfahren als Standard-Referenzmesser zur Determinierung des Ist-Durchflusses eingesetzt. An dieser Stelle wird auf die Wiederholung der Eigenschaften sowie der Spezifizierung der Durchflussmesser verzichtet und im Folgenden auf die Abschnitte 3.4 und 3.5 verwiesen, um den Einsatzort der beiden Messverfahren innerhalb der Versuche aufzuzeigen.

Ein weiteres, bei den Untersuchungen zum Einsatz gekommenes Messverfahren ist in der Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) zu finden. Dieses Verfahren diene im Gegensatz zu den bereits erwähnten Methoden nicht zur direkten Referenzierung der Lorentzkraft, sondern wurde zur notwendigen Charakterisierung des Strömungsprofils innerhalb der Messstrecke des Umlaufkanals herangezogen. Das Wissen um die Gestalt des Profils ist für die Untersuchung der Abhängigkeit der Lorentzkraft vom Strömungszustand von entscheidender Natur und wird gesondert in Abschnitt 5.1 behandelt. Abschließend sei erwähnt, dass einzig mit diesen Messverfahren eine präzise Strömungscharakterisierung innerhalb der zu untersuchenden Messvolumina erfolgen kann, ohne eine gleichzeitige Beeinflussung der Strömung durch Messsonden oder ähnliches zu verursachen.

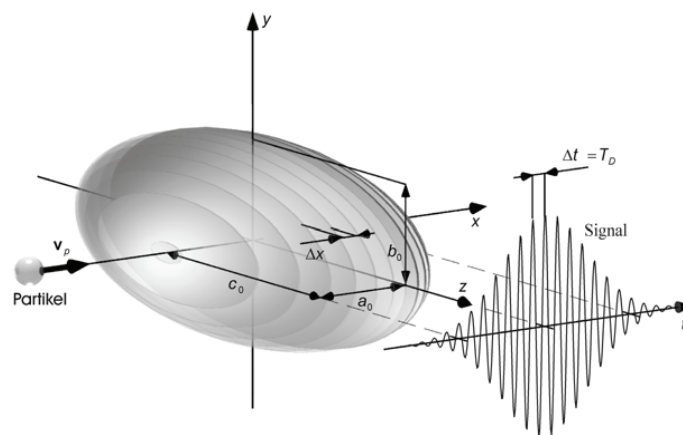
Historisch repräsentiert die LDA seit über einem halben Jahrhundert [51] eines der am häufigsten angewendeten, vollkommen berührungslos arbeitenden Punktmessverfahren in der Strömungmesstechnik. Sie fußt auf dem Doppler-Effekt und der Analyse der Wechselwirkungen von Laserstrahlen an sich bewegenden Strömungspartikeln, auch als Tracer-Partikel bekannt. Diese Partikel werden der Strömung zugegeben und sollen im Idealfall bei geringer Partikelgröße die gleiche Dichte wie das Fluid besitzen [52]. Die sich hieraus ableitenden und mittels Fast Fourier-Transformation ausgewerteten Frequenzverschiebungen des gestreuten Laserlichtes stellen ein sehr genaues Maß für die Fließgeschwindigkeit der Partikel dar.

Phänomenologisch ähnelt das Messverfahren im Ansatz, dem im Abschnitt 3.3.1 beschriebenen Interferometer. Auch in vorliegendem Fall bilden zwei sich schneidende Laserstrahlen ein Interferenzmuster aus. Das sich bildende Streifenmuster von Intensitätsmini- und Maxima wird exemplarisch von einem Strömungspartikel abgerastert und ergibt in Folge der emittierten Helligkeitsmodulation – aufgefangen von einer Photodiode – multipliziert mit dem Interferenz-Streifenabstand den direkten Geschwindigkeitsbetrag des Strömungspartikels senkrecht zum Streifenmuster.

Zusätzlich zu dem Vorteil der berührungslosen Detektion von eindimensionalen Strömungsfeldern ist dieses Punktmessverfahren in der Lage die Detektion von zwei- beziehungsweise dreidimensionalen Geschwindigkeitsfeldern – durch die Verwendung von vier beziehungsweise sechs Laserstrahlen verschiedener Wellenlängen – durchzuführen. Hauptnachteil des Messverfahrens ist neben den hohen Anschaffungskosten der langwierige Justageaufwand, welcher auf dem Problem der Bündelung aller Laserstrahlen in einen gemeinsamen Schnittpunkte beruht.



(a)



(b)

Abbildung 3.11: Übersicht über die Wirkungsweise der LDA. (a) Funktionsschema der LDA nach [2]. (b) Darstellung des bei der Kreuzung der Laserstrahlen entstehenden Messvolumens nach [52].

3.3.4 Messdatenakquise

Um Erkenntnisse über das Verhalten der Lorentzkraft gegenüber einer anliegenden Strömung gewinnen zu können bedarf es aussagekräftiger Messwerte. Diese werden zum einen von den in Abschnitt 3.3.1 - 3.3.3 aufgezeigten Messgeräten sowie von weiteren, unabhängigen Druck- und Temperatursensoren geliefert, welche am und im Experiment verbaut wurden.

Die Aufgabe besteht darin alle elektrischen Sensorsignale zu vereinen und in ein geeignetes Format zu konvertieren, um eine zentrale Auswertung durchführen zu können. Im vorliegenden Fall wurde das Problem mit dem modularen Messdatenerfassungssystem *34970A* der Firma *Agilent Technologies* gelöst. Das System besteht aus einem Grundgerät mit drei Einschubsteckplätzen und einem integrierten 6,5-stelligen Digital-Multimeter. Abhängig vom applizierten Steckmodul können Thermoelemente, Widerstandstemperaturmessfühler, Thermistoren, Gleichspannung, Wechselspannung, Gleichstrom, Wechselstrom, Widerstand, Frequenz sowie Periode direkt gemessen werden [53]. Darüber hinaus steht zur Synchronisation der erfassten Messwerte eine Digitalschnittstelle (GPIB) zur Verfügung mit deren Hilfe die Messwerte auf den PC übertragen werden.

Der oben aufgeführte Datenlogger kam sowohl beim Pendel- wie auch beim EMK-Prototypen zum Einsatz und erwies sich als sehr zuverlässiges Messwerkzeug. Im ersten Fall diente das System zur Aufnahme des interferometrisch ermittelten Weges der Pendelbewegung des Magnetsystems sowie der Aufnahme des Geschwindigkeitssignals des USD. Darüber hinaus erfolgte zeitgleich eine Temperaturmessung an vier zuvor festgelegten neuralgischen Stellen des Umlaufkanals (siehe Abschnitt 4.2.3). Die während der Messungen entstandenen Messdateien wurde im Nachgang mittels MatLab analysiert und zur Ausgabe gebracht (siehe Abschnitt 4).

Im Fall des EMK-Prototyps erwies sich das Messdatenerfassungssystem abermals als gut geeignet und überaus störunanfällig. Im vorliegenden Fall wurde mittels des Systems die Aufnahme und Zusammenführung von zehn, in und am Umlaufkanal verschieden platzierter, Druck- sowie Temperatursensoren, eines Leitfähigkeitsmessers sowie eines MID realisiert. Da die Lorentzkraft hoch genau aufgelöst werden musste, was die Bedingung nach der Auswertung von kleinsten Strömen im Nanoampere-Bereich nach sich zog, wurde die Messdatengewinnung nicht mit dem *34970a* durchgeführt. Vielmehr erwies sich die von *Agilent Technologies* sowie *Hewlett Packard* stammende Kombination aus hoch genauer *Strom- / Signalquelle 3245a* [54] und 8,5-stelligem *Digital-Multimeter 3458a* [55] als besonders geeignet.

Die beiden Datensätze wurden unter Zuhilfenahme der Auswertesoftware *LabVIEW* vereinigt, in einer gemeinsamen Datei gespeichert und im Verlauf zur Anzeige gebracht. Durch eine eigens entwickelte Bedienoberfläche (siehe Anhang A.2) wurde somit neben der Zusammenführung der Messdaten ein Live-Monitoring der aktuell stattfindenden Messungen möglich. Darüber hinaus diente die Bedienoberfläche im Verlauf der Untersuchungen als Motivation den gesamten Bedienprozess zu automatisieren. In Folge wur-

de die Ansteuerung des Frequenzumrichters der Kreiselpumpe in die Oberfläche integriert. Um die zugrundeliegenden Datenkommunikationen der einzeln aufgeführten Systeme nachvollziehen zu können sei an dieser Stelle auf den Anhang A.2 verwiesen.

3.4 Entwicklung des Versuchsaufbaus – Pendelprototyp

Nach Beendigung der Voruntersuchungen, wie sie in Abschnitt 3.2 und 3.3 stattgefunden haben, schloss sich der Aufbau des ersten Prototypen zur Lorentzkraft-Messung an schwach leitfähigen Elektrolyten an. Um aufzuzeigen, wie und wo die Vorüberlegungen ihre Anwendung gefunden haben, erfolgt im anschließenden Abschnitt eine Dokumentation über den Aufbau sowie die Funktionsweise des Prototyps. Überdies setzt sich ein im Verlauf folgender Abschnitt mit den messtechnischen Grenzen des ersten Versuches auseinander, was sowohl als Motivation sowie Ausgangslage für den Aufbau eines zweiten Prototypen dient.

3.4.1 Design und Funktionsweise

Da es sich bei dem aufgebauten Pendelprototypen um einen, aus einer Vielzahl unterschiedlich zusammengesetzter Funktionsgruppen bestehenden Experimentalaufbau handelt, soll bevor detailliert auf die einzelnen Bauelemente eingegangen wird, ein Überblick über den generellen Aufbau des Prototypen erfolgen. Abbildung 3.12 repräsentiert den schematischen Aufbau des Prototyps [56]. Der Versuch besteht aus einem, aus Glas gefertigten Wasserumlaufkanal (1), welcher mit dem Modellfluid Salzwasser gefüllt ist. Das Modellfluid wird hierbei durch eine Kreiselpumpe (2) angetrieben, womit das Salzwasser durch die rechteckige, 2 mm starke Messstrecke (3), mit den Innenabmessungen von 26 mm x 46 mm, befördert wird. In einem Abstand von jeweils 1 mm zu den Außenabmaßen des rechteckigen Glaskanals sind die, im Abschnitt 3.2.2 beschriebenen, Hochenergiepermanente Magnete aus *NdFeB Grad N48* angeordnet. Die beiden Magnete sind unter Zuhilfenahme eines Aluminiumrahmens in ihrer Lage fixiert und bilden das Magnetsystem (4). Das Magnetsystem wiederum ist mittels vier, jeweils 175 μm dicken und 560 mm langen Wolframdrähten (5) an einem Messgestell (6) befestigt, wodurch ein physikalisches Pendel nachgebildet wird.

Durch die mittels Kreiselpumpe generierte Fluidströmung kommt es laut Gleichung 2.6 beim Durchdrängen des Magnetfeldes zur Ausbildung von Wirbelströmen. Die erzeugten Wirbelströme führen laut Gleichung 2.8 ihrerseits zu Lorentzkräften, was eine Auslenkung des Magnetpendels zur Folge hat und mit dem aus Abschnitt 3.3.1 beschriebenen Interferometer (7) vermessen wird. Das eigentliche Messsystem – bestehend aus (4), (5), (6) und (7) – ist auf einem 100 kg schweren Granitblock (8) befestigt, welcher wiederum in einer 300 kg schweren mit Sand befüllten Kiste (9) eingebettet ist. Erstgenannte Maßnahme dient hierbei der Fixierung wie auch der Versteifung des Messsystems, wohingegen das künstliche Beschweren der Kiste, störende Einflüsse wie Vibrationen zu dämpfen vermag. Als Referenzmessung für die Fließgeschwindigkeit, respektive des Volumenstroms

des Modellfluids innerhalb der Messstrecke dient ein Ultraschall-Durchflussmesser (10).

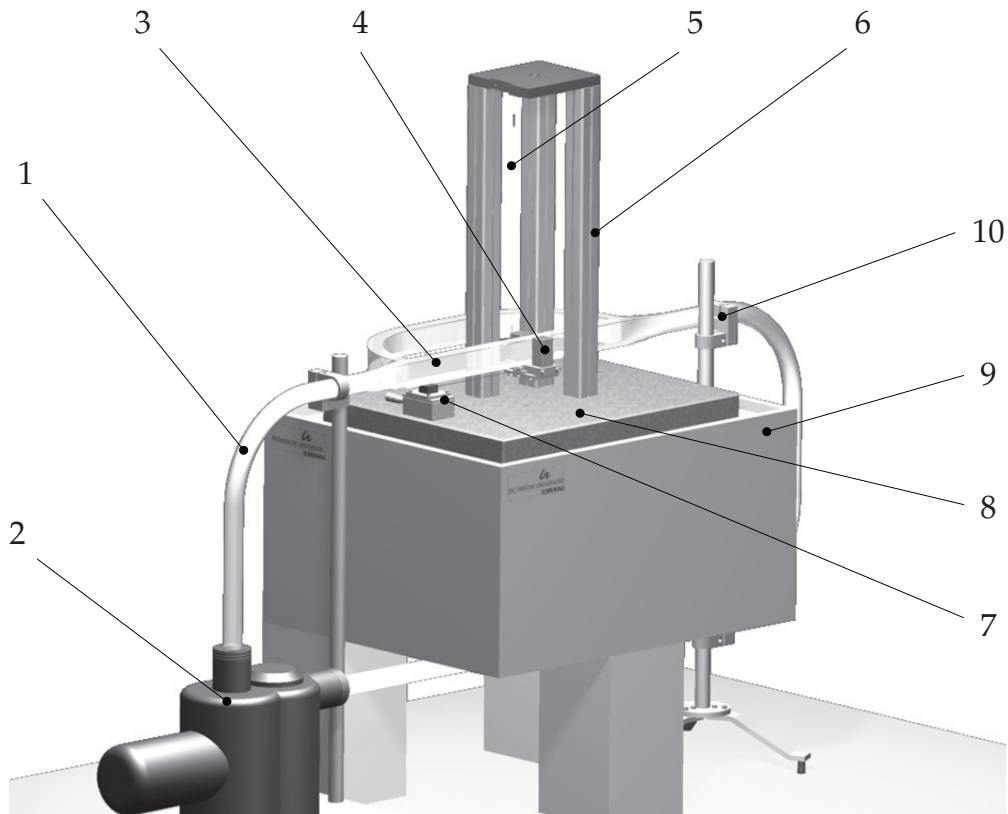


Abbildung 3.12: Schematischer Aufbau des Pendelprototyps.

a.) Strömungsantrieb und Wasserumlaufkanal

Da im vorliegenden Versuch die Beweisführung einer generellen Eignung der LKA für schwach leitfähige Fluide im Vordergrund stand, wurde keine präzise hydraulische Auslegung der Pumpe nötig. Die Charakterisierung sowie Auslegung der Pumpe fußt einzig auf dem zu leistenden Mindestfluidumsatz. Nach einer eigens vorgegebenen maximalen Fluidgeschwindigkeit von 4 m/s in der Messstrecke wurde unter Einbeziehung aller Verlustfaktoren des Kanals die *Nautilus Salzwasserpumpe 1,50 kW 29 m³/h 400V* der Firma *Astral* gewählt. Unter Zuhilfenahme eines Frequenzumrichters *F4* der Firma *KEB Combinvert* konnte die Pumpe im Verlauf angesteuert und betrieben werden.

Der Wasserumlaufkanal besteht bei diesem Versuch aus einem circa 8 m langen Grundgerüst aus runden 2,3 mm starken Borosilikatglas bei einem Außendurchmesser von 40 mm. Einzig die 0,5 m lange Messstrecke besitzt aufgrund numerischer Simulationen [57] einen rechteckigen Querschnitt von 30 mm in der Breite sowie 50 mm in der Höhe. Die 8 m Umlaufkanal teilen sich dabei zu gleichen Teilen in den regulären Messumlauf wie auch in eine Bypassstrecke ein. Diese dient zum Zwecke der Untersuchungen von Vibra-

tionseinflüssen auf das Messsignal.

b.) LKA-Messsystem sowie zusätzliche Messkomponenten

Das Messsystem – bestehend aus Magnetsystem, vier Wolframdrähten, Messgestell und Interferometer – repräsentiert das Herzstück des Versuches. Abbildung 3.14 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt der Anordnung.

Um den Messprozess zu beherrschen wurden, wie in Abschnitt 3.3.4 bereits erwähnt, zusätzlich zur Auslenkung des Magnetsystems zwei weitere Parameter detektiert. So wurden PT100 Temperatursensoren an vier neuralgischen Stellen des Wasserumlaufkanals montiert. Hierzu gehören die Positionen vor und hinter der Pumpe, an der Messstelle sowie am Punkt der Zusammenkunft von Bypass- und Messumlaufstrecke (zu sehen in Abbildung 3.13). Als wichtigste Komponente sei jedoch das Referenzmessgerät zur Erfassung der Fluidgeschwindigkeit erwähnt. Das von der Firma *Hermann Ehlers GmbH* stammende USD *FLUXUS F 601* ist stromabwärts hinter dem eigentlichen LKA-Messsystem angeordnet und misst den Durchfluss mit einer Unsicherheit von 1,2%.

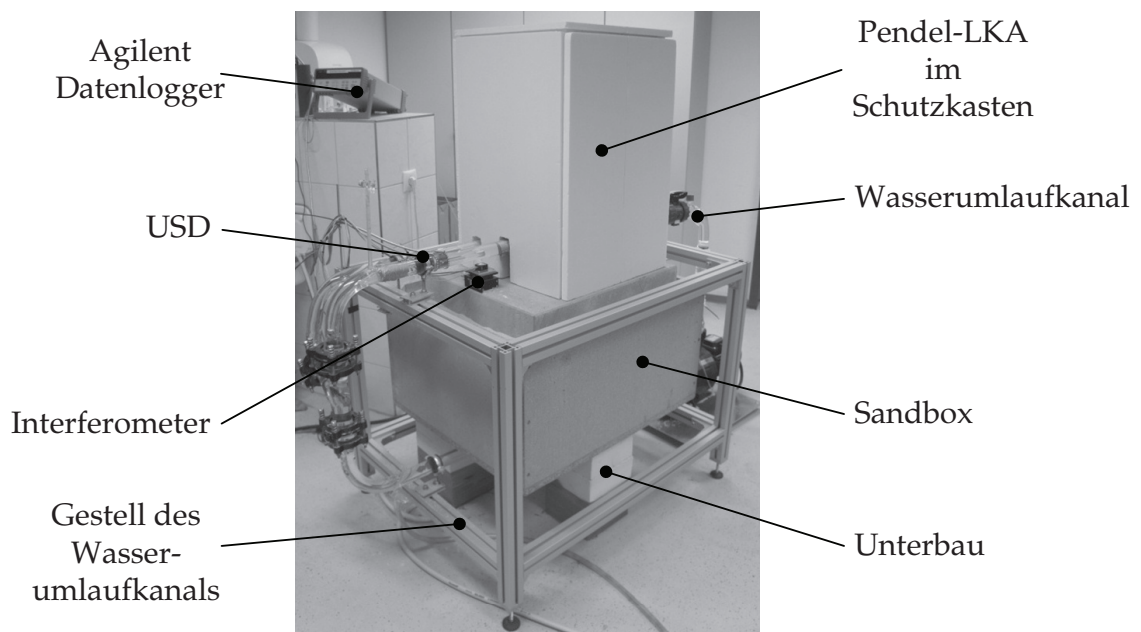


Abbildung 3.13: Darstellung des Gesamtsystems Pendelprototyp in Anlehnung an Abbildung 3.12. Die Abbildung zeigt den Gesamtaufbau mit Schutzhaube sowie den wichtigsten Komponenten.

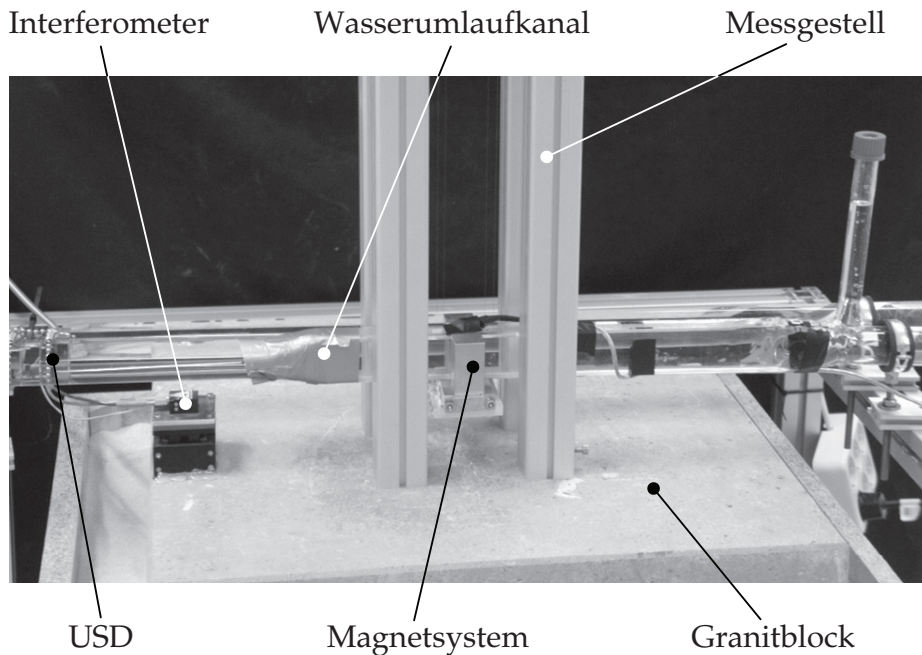


Abbildung 3.14: Abbildung der Hauptkomponenten des Versuches nach Abnahme der Schutzhaube.

c.) Inbetriebnahme

Bevor der Pendelprototyp erstmalig in Betrieb genommen werden konnte, musste festgestellt werden, dass aufgrund der Sensitivität des Pendels sowie der Verwendung der in Abbildung 3.2a dargestellten Hochenergiemagneten, das LKA-Messsystem derart empfindlich auf äußere Störeinflüsse reagiert, wodurch besondere Vorkehrungen bei der Aufstellung getroffen werden mussten.

Die Verkippung des oben beschriebenen Aufbaus zählt zu einen der Störeinflüsse. Aufgrund der relativ großen Pendellänge des Prototyps muss der komplette Messaufbau samt Granitblock und Sandkiste auf einem in sich stabilen Unterstand platziert werden, um Verkippungen und damit systematische Messabweichungen zu verhindern. Um Verkippungen zu unterdrücken kam eine aus Hohlbetonsteinen konstruierte Dreipunktauflage zum Einsatz, welche die statische Festigkeit des Aufbaus sicherstellte.

Darüber hinaus bedingt die starke magnetische Flussdichte der Permanentmagnete eine Ausrichtung des kompletten Systems zum magnetischen Nordpol der Erde, wodurch die windschiefe Aufstellung des Prototyps im Laboratorium begründet liegt. Bei Missachtung kommt es zur Verdrehung des Magnetsystems und infolgedessen zu einem Kontakt mit dem Wasserumlaufkanal, was unter allen Umständen zu vermeiden ist.

Da Windeinflüsse generell einen großen Beitrag zur Unsicherheit des Pendelmesssystems liefern und Temperaturänderungen Einwirkung auf die Stoffdaten (Längenänderung etc.)

des Aluminiums besitzen, wurde eine aus *Styrodon* bestehende Messeinhausung appliziert (siehe Abbildung 3.13), dessen Ziel eine Verbesserung von reproduzierbaren Messbedingungen zur Aufgabe hat.

3.4.2 Grenzen des Pendelprototypen

Wie einleitend in Abschnitt 3.1 aufgeführt, handelt es sich bei den im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Pendelprototypen um eine Konstruktion, deren Ziel darin besteht Aussagen über die Eignung der Anwendbarkeit der LKA auf schwach leitfähige Elektrolyte zu generieren. So wundert es nicht, dass einige Funktionsgruppen des Pendelprototyps nicht optimal ausgelegt beziehungsweise appliziert wurden. Ohne eine erste Messreihe aufgenommen zu haben ergeben sich die im Folgenden aufgeführten Optimierungs- beziehungsweise Kritikpunkte, welche sogleich als Motivation zum Aufbau eines zweiten, verbesserten Prototyps stehen.

Unter anderem lässt der oben beschriebene Versuchsaufbau nur schwer wiederholbare Messbedingungen zu. Sei es durch das fehlende Wissen beziehungsweise der nicht Einstellbarkeit des Fluidprofils innerhalb der Messstrecke oder durch die fehlende permanente Überwachung der Leitfähigkeit des Modellfluids. Überdies lässt die Einrichtung eine Temperaturregelung vermissen, was einen stabilen Langzeitbetrieb von vornherein ausschließt.

Systematische Fehler treten des Weiteren durch verbleibende Luftströmungen sowie Klimaschwankungen am Pendelsystem auf. Ferner folgt die Justage des Interferometers keinen festen Regeln, wodurch es keine klare Einstellreferenz gibt und der Fehlerbeitrag nicht hinreichend beschrieben werden kann.

Den wohl größten Beitrag in Bezug auf die Kritik gegenüber dem System liegt in seinem Unterbau. Dieser ist in Form und Gewicht zwar ausreichend dimensioniert, steht jedoch auf einem schwimmenden Fundament¹⁰ des Laboratoriums. Hierin liegt die Ursache weshalb der Versuch im Standbybetrieb beim Umlaufen des selbigen um mehrere Winkelsekunden kippt und in Folge zur Auslenkung des Magnetpendels aus der Gleichgewichtslage von $\approx 3\mu\text{m}$ führt. In gleicher Weise gilt dies auch in Bezug auf die Störanfälligkeit des Systems gegenüber starken Vibrationen. Hier sei vor allem an Stöße durch ins Schloss fallende Türen oder an Schwankungen des kompletten Gebäudes gedacht, welche sich durch das Hausfundament bis hin zum Messplatz übertragen.

Eine weitere nicht akzeptable Eigenschaft dieses Systems liegt in der Richtungsabhängigkeit des Aufstellungsortes. So stellt der Aufbau, aufgrund seiner hohen Sensitivität des Pendels gepaart mit den Hochenergiemagneten aus *NdFeB* einen großen Kompass dar, welcher sich zum magnetischen Nordpol der Erde ausrichtet. Im Zuge dessen muss der

¹⁰Bodenunterkonstruktion bestehend aus verschiedenen Bodenschichten mit einer abschließenden Styropor-Schicht, welche den Boden in alle Raumrichtung nachgiebig macht. Die gesamte Bodenkonstruktion ist dabei in das Fundament des Hauses eingebettet.

komplette Aufbau der Nord-Süd-Ausrichtung des Erdmagnetfeldes folgen, was den wind-schiefen Aufstellungsort des Systems begründet, im Zuge einer denkbaren Überführung in die Industrie jedoch nicht akzeptabel ist.

3.5 Entwicklung des Versuchsaufbaus – EMK-Prototyp

Um die im vorangestellten Abschnitt aufgezeigten Grenzen des ersten Prototypen zu überwinden, wurden im Hinblick auf das Erreichen reproduzierbarer Messergebnisse zahlreiche Optimierungsschritte unternommen. Der vorliegende Abschnitt führt hierbei die Idee des konstruktiven Entwicklungsprozesses auf und geht auf die Grundelemente des neuen Prototyps ein. Des Weiteren wird aufgezeigt welche Maßnahmen ergriffen wurden um die Umlaufgeometrie des Kanales zu optimieren, die letztendlich zum Gesamtsystem EMK-Prototyp führten.

3.5.1 Idee des konstruktiven Entwicklungsprozesses

Um eine Neuentwicklung eines Produktes systematisch durchzuführen wird in der Praxis meist auf Konstruktionsschemata zurückgegriffen. Eines der weit verbreitetsten Schemata folgt der VDI-Richtlinie 2221 [58] über die *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte* und ist ferner unter den Worten *Konstruktiver Entwicklungsprozess* (im Folgenden mit KEP abgekürzt) bekannt.

Beim Entwickeln und Konstruieren innovativer Produkte muss eine Vielzahl komplexer Probleme erkannt und in Folge gelöst werden. Der KEP schafft durch eine konsequente Strukturierung des Gesamtsystems in Teilsysteme eine methodische Grundlage, mit deren Hilfe nahezu beliebige Konstruktionsprobleme wirtschaftlich und in einem vorgegebenen Zeitrahmen gelöst werden können [60]. Durch die in Abbildung 3.15 dargestellte Unterteilung in sieben aufeinander aufbauende Kernaufgaben folgt das Schema einer iterativen Logik, wodurch das Arbeitsergebnis einer vorangegangenen Arbeitsaufgabe gleichzeitig die Eingangsinformation für den nächst folgenden Schritt bereitstellt.

Ausgehend von der Gesamtfunktion des zu konstruierenden Gebildes werden zunächst alle wesentlichen Teilfunktionen entwickelt. Das Finden von Teilstrukturen sowie deren Kombinationen bilden die Grundlage der Funktionsstruktur des Gesamtsystems. Existiert die Funktionsstruktur, erfolgt im nächsten Schritt die Konkretisierung der Gestalt des Produktes. Als Arbeitsergebnis folgen Vorentwürfe der Grobstruktur sowie maßstäbliche Ableitungen der einzelnen Teilsysteme. Bei Verknüpfen aller strukturierten Teilsysteme entsteht der Gesamtentwurf, welcher alle wesentlichen gestalterischen Merkmale zur Realisierung des neuen Produktes enthält. Im abschließenden Arbeitsschritt werden die erzielten Ergebnisse zusammengeführt und in einer Produktdokumentation in Form von Einzelteil- und Gesamtzeichnungen, Stücklisten sowie Bedienungsanleitungen niedergeschrieben.

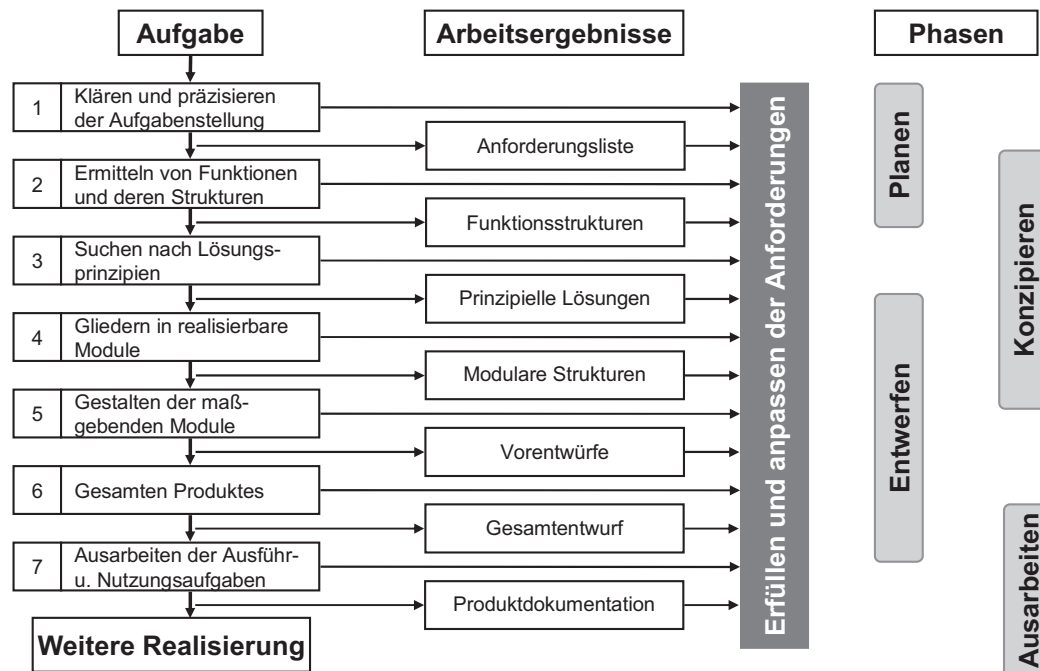


Abbildung 3.15: Abbildung zeigt das Schema des konstruktiven Entwicklungsprozesses [59], welcher aus vier Hauptarbeitsphasen – Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten – besteht.

3.5.2 Bestimmung der Grundelemente

Da die vorliegende Arbeit die Überprüfung der Applikation der LKA an schwach leitfähigen Fluiden zum Gegenstand hat und nicht die Dokumentation der einzelnen notwendigen Konstruktionsschritte des KEP zur Findung der jeweils bestmöglichen Teilstruktur, soll im vorliegenden Fall auf die detaillierte Darstellung der Vorgehensweise verzichtet werden. So werden in der vorliegenden Arbeit lediglich die Ansätze der Lösungen sowie deren endgültige Resultate dargestellt. Um eine Übersicht auf die detaillierte Vorgehensweise der Abarbeitung der einzelnen KEP-Arbeitsschritte zu erlangen sei an dieser Stelle auf die Ausführungen von [59] verwiesen.

Basierend auf den Unzulänglichkeiten des Pendelprototyps (siehe Abschnitt 3.4.2) gliedert sich der EMK-Prototyp in fünf Teilsysteme, welche sich wiederum in Unterabschnitte aufgliedern. An dieser Stelle sei ausdrücklich erwähnt, dass die Auslegung aller Teilsysteme auf der in Abschnitt 3.5.1 skizzierten VDI-Vorschrift 2221 beruhen. Somit wurden für jedes der unten aufgeführten Teilsysteme unterschiedlichste Prinzipkombinationen generiert, gegeneinander verglichen und das für die Teilfunktion beste System bestimmt. Die folgenden Ausführungen stehen als Rechtfertigung dafür, weshalb der EMK-Prototyp in fünf zu untersuchende Teilsysteme gegliedert wurde. So zieht jeder Mangel des Pendelprototypen einen oder mehrere konstruktive Verbesserungen nach sich. Die mit (•) gekennzeichneten Ausführungen beschreiben den bestehenden Mangel des Pendelpro-

totyps und definieren im Folgenden – durch Doppelpunkt abgetrennt – die konstruktiven Bedürfnisse zur Verbesserung des EMK-Prototyps.

- Unwissenheit über die Form des Fluidprofils innerhalb des Wasserumlaufkanals: Konstruktion sowie Aufbau eines definierten Wasserumlaufkanals bestehend aus Messstrecke, Düse, Diffusor, Beruhigungsbehälter, Gleichrichter sowie einer Kreiselpumpe zur stufenlosen Einstellung der Fließgeschwindigkeit des Elektrolyts (*Wasserumlaufkanal*).
- Richtungsabhängigkeit gegenüber dem Aufstellungsort des Pendelprototypen: Findung und Applikation einer robusten Messtechnik (*LKA-Messsystem*).
- Instabilität des Hausfundaments: Konzeption eines Unterbaus zur Entkopplung des Fundaments (*Messunterbau*).
- Klimaregulierung nicht möglich: Konstruktion eines Wärmetauschers für den Wasserumlaufkanal sowie Auslegung einer Raumklimaanlage (*Temperaturregelung*).
- Überwachung der Systemparameter nicht möglich: Auswahl und Applikation geeigneter Sensoren um Temperaturen, Drücke, Leitfähigkeiten und Geschwindigkeiten des Fluids zu ermitteln (*Messwert-Monitoring*).

Jeder der oben aufgeführten Punkte wird im Folgenden durch ein analoges Schema abgearbeitet. Beginnend mit der Beleuchtung der Lösungsansätze zur Findung des jeweils benötigten Teilsystems, werden am Schluss die auf den Untersuchungen beruhenden Resultate aufgezeigt.

a.) Wasserumlaufkanal

Im Gegensatz zu den Untersuchungen am Pendelprototypen sollen dem neuen Wasserumlaufkanal definiert einstellbare Fluidprofile zugeschrieben werden können. Dies erforderte zuallererst die Bestimmung der Geometrie der Messstrecke. Bei den durch das Projekt vorgegebenen Innenabmaßen von 50 mm \times 50 mm verblieb einzig die Auslegung der Länge sowie der äußeren Gestalt der Messstrecke. Als Ansatz zur Berechnung der Länge wurde die Formel der Grenzschichtdicke herangezogen und eine Ermittlung der turbulenten Einlaulänge x_{Tu} durch Gleichung 3.2 bestimmt [61]. Das Erreichen von x_{Tu} beschreibt dabei den vollzogenen Strömungsübergang von einem Kolbenprofil hin zu einen quasi-statischen Parabolprofil. Die Berechnungen mit Gleichung 3.2 führten dabei zu Einlaulängen im Bereich von 0,3 m - 6 m, abhängig von der zugrundeliegenden Literaturquelle. Da dies wenig zufriedenstellend war, wurde im Anschluss eine numerische Simulation mit *FLUENT* durchgeführt, worauf eine Länge von 1,5 m festgesetzt wurde. Nach Festsetzung der inneren Abmessungen erfolgte mit den Mitteln der technischen Mechanik die Dimensionierung der äußeren Abmessungen des Kanals, dessen Werte der Zeichnung im Anhang A.1 entnommen werden können.

$$x_{Tu} = 5,2 \cdot d \cdot \left(\frac{uv}{v} \right)^{0,12} \quad (3.2)$$

$$\frac{u^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z = \text{const.} \quad (3.3)$$

Fußend auf den Abmessungen der berechneten Messstrecke wurden die zusätzlich benötigten Komponenten des Wasserumlaufkanals bestimmt. Durch das Vorliegen eines inkompressiblen Fluids erfolgte mit Hilfe der Bernoulli-Gleichung (siehe Gleichung 3.3) im nächsten Schritt eine überschlägige Berechnung aller zum geschlossenen Kreislauf dazugehörigen Komponenten [62]. Die hierbei erzielten Werte sind Anhang A.1 zu entnehmen. Auf Grundlage der ermittelten Abmessungen wurde im Nachgang die Form der Düse bestimmt, da diese, neben dem Diffusor den größten Einfluss auf das entstehende Fluidprofil besitzt.

Es sei hierbei erwähnt, dass die Auswahl als nicht trivial angesehen werden kann, da viele Randbedingungen (wie Randschichtdicke etc.) nicht einfach zu determinieren sind. Bestätigt wird dieser Umstand durch die Vielzahl wissenschaftlicher Abhandlungen zu diesem Thema und die bis heute uneinige Meinung über die beste Düsenform. Eine bedeutende Abhandlung zu diesem Thema ist in [63] zu finden.

$$y(x) = \frac{r}{\sqrt{1 - \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \cdot \left[\frac{1 - \left(\frac{x}{l} \right)^2}{1 + \left(\frac{x}{3l} \right)^2} \right]^2}} \quad (3.4)$$

Im vorliegenden Fall wurde die Düse nach Witoszynski [64] ausgelegt, der durch Findung von Gleichung 3.4 eine analytische Beschreibung der Düsenkontur zulässt. Hierbei beschreibt l die Länge der Düse, R den Radius des Düsen Eintritts und r den Radius des Düsenaustritts. Die hieraus resultierende Kontur kann Anhang A.1 entnommen werden.

Nach Bestimmung der Düsenkontur wurde sich mit der Auswahl des Diffusors beschäftigt. Dieser dient zur Beruhigung des Fluidstromes und steht damit im unmittelbaren Zusammenhang mit dem sich entwickelnden Turbulenzgrad des Wasserumlaufkanals. Auch im diesem Fall wurden vorab Berechnungen durchgeführt, welche einen Richtwert zur Auslegung der Diffusoren lieferten. In Abschnitt 3.5.3 kann nachvollzogen werden wie gut die vorab berechneten Werte mit der endgültigen Gestalt übereinstimmen.

Zur Absicherung eines geringen Turbulenzgrades der Fluidströmung wurden im Kanal sogenannte Gleichrichter verbaut. Hierbei können zwei Arten unterschieden werden – Netze [65] und Honeycombs [66]. Netze kommen vor allem dort zum Tragen, wo eine Verringerung der örtlichen Turbulenz verlangt wird. Durch die Brechung des Fluides an den zylindrischen Gebilden kommt es infolgedessen stromabwärts zu einer Erhöhung der Turbulenz, welche im Verlauf jedoch wieder schnell zusammenfällt und letztendlich unter der turbulenten Ausgangsmarke liegt, bevor die Strömung das Netz passiert hat. Im vorliegenden Fall wurden zwei Netze mit unterschiedlichen Netzweiten verbaut. Ein Netz

wurde zwischen Umlenkdiffusor und Beruhigungsstrecke verbaut. Das andere nach dem Gleichrichter. Simulationen zeigten das an diesen Stellen die besten Orte zur Turbulenzverringerung vorliegen. Der Honeycomb hingegen beschreibt eine Wabenstruktur, bestehend aus einer Vielzahl von hexagonalen Waben. Beim Durchfließen der Waben bilden sich endlich viele kleine Teilströmungen aus, die stromabwärts laminarisiert werden. Um den Abschluss der Gleichrichtung und somit die benötigte Dicke der Wabenstruktur zu beschreiben, bedient man sich der Grenzschichttheorie (siehe Gleichung 3.2).

Um die Strömung nach dem Passieren der Messstrecke aufzufangen und zu entspannen, wurde ein Beruhigungsbehälter entworfen. Hierfür wurde ein großes Volumen gewählt, um den Impulseeffekt zu nutzen und des Weiteren immer genügend Flüssigkeit für die unter dem Behälter befindliche Pumpe zur Verfügung zu stellen. Darüber hinaus dient der Behälter als wichtiges Element der Klimatisierungsvorrichtung des Umlaufkanals, da in ihm der Wärmetauscher zur Regulierung der Temperatur der Modellflüssigkeit angebracht ist.

Nach endgültiger Festlegung aller Wasserumlaufkomponenten und deren Geometrien wurde die Fluidpumpe ausgelegt. Hierbei wurde sich, aufgrund bestehender Erfahrungen hinsichtlich des Pendelprototypen, für eine Kreiselpumpe entschieden. Die Auslegung erfolgte hierbei durch die Festsetzung eines gewünschten Durchflusses und der Einbeziehung aller auftretenden Verlustfaktoren, wie sie beim Passieren der Strömung von Netzen, Gleichrichtern, umlaufenden Ecken etc. auftreten. In enger Zusammenarbeit mit der *Fa. Allweiler* wurde eine eigens angefertigte Pumpe aus einem Bronzeguss gefertigt. Die Festlegung des Pumpenmaterials ist hierbei von besonderer Bedeutung, da die meisten anderen Materialien binnen kurzer Zeit, aufgrund des hohen Salzgehaltes, korrodieren würden.

b.) LKA-Messsystem

Um einen richtungsunabhängigen Aufbau des LKA-Prototyps zu gewährleisten wurde im Gegensatz zu dem Pendelprototypen eine robustere Messtechnik gewählt. Zum Einsatz kam die in Abschnitt 3.3.2 beschriebene EMK-Messtechnik. Durch ihren robusten Aufbau und sogleich höheren Kraftauflösungsbereich wurde sie als bestes, derzeit verfügbares Messsystem in die Versuchsanlage integriert. Weiterführende Informationen über Gestalt und Funktionsweise sind Abschnitt 3.3.2 sowie [42] zu entnehmen.

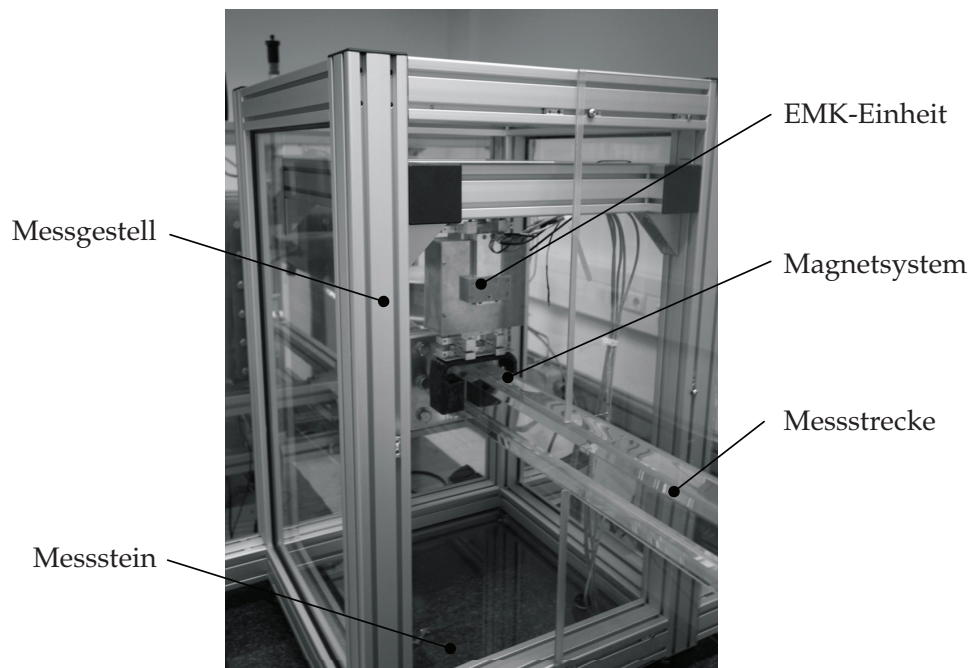


Abbildung 3.16: Aufbau der zum Einsatz gekommenen EMK-Einheit bei Applikation am Wasserumlaufkanal. Die Abbildung zeigt die wichtigsten Komponenten der Messeinrichtung.

c.) Messunterbau

Um die, durch die neue Messtechnik dazugewonnene Auflösung nicht direkt wieder zu annullieren, wurde am neuen Aufbau größte Sorgfalt auf den Unterbau des Messsystems gelegt. Wie Probebohrungen im Laboratorium zeigten, besteht das Fundament aus mehreren Schichten unterschiedlicher Textur. Die unterste Schicht ist hierbei als besonders kritisch anzusehen, da sie aus 60 mm dicken Styropor besteht. Dies führt dazu, dass der gesamte Boden bei Gewichtsverlagerung zu Kippungen und Schwingungen neigt. Um diesem negativen Verhalten entgegenzuwirken, wurde der Boden in den Maßen von 1200 mm x 800 mm bis zum Grund entfernt und ein solider Betonklotz, mit einem Abstand von 50 mm zum Hausfundament, gegossen.

Darüber hinaus, wurden die vier Auflagepunkte des Untergestells, welches den 800 kg schweren Messstein trägt, mittels Bessel-Funktion bestimmt, sodass keine inneren Spannungen auftreten und das Messgestell nur unwesentlich von der Umwelt beeinflusst wird. Messungen mit einem Winkelmesser bestätigten die Vorüberlegungen und zeigten durch geringere Verkipfungswinkel ein verbessertes Verhalten des Unterbaus.

d.) Temperaturregelung

Aufbauend auf dem Wunsch nach einer Klimatisierung des Modellfluids wurde im vorliegenden Fall eine Konzipierung einer Klimaregulierung durchgeführt. Hierbei wird un-

terschieden in Modellfluid- und Raumklimatisierung. Abbildung 3.17 zeigt die Resultate der Klimabetrachtungen. Anhand des VDI-Wärmeatlas [67] wurde die Kühllastberechnung für das Laboratorium sowie für die auftretenden Temperaturen des Modellfluids bestimmt und passende Komponenten – im Falle des Wärmetauschers – konstruiert beziehungsweise bestimmt. Die Untersuchungen zeigten, dass sich die Raumklimaanlage *Daikin FTXS-J* sowie eine eigens konstruierte, 600 mm lange (aus 12 Windung bestehender Wärmetauscher) Edelstahl-Rohrspirale am besten zur Klimatisierung der Anlage sowie des Laboratoriums eignen.

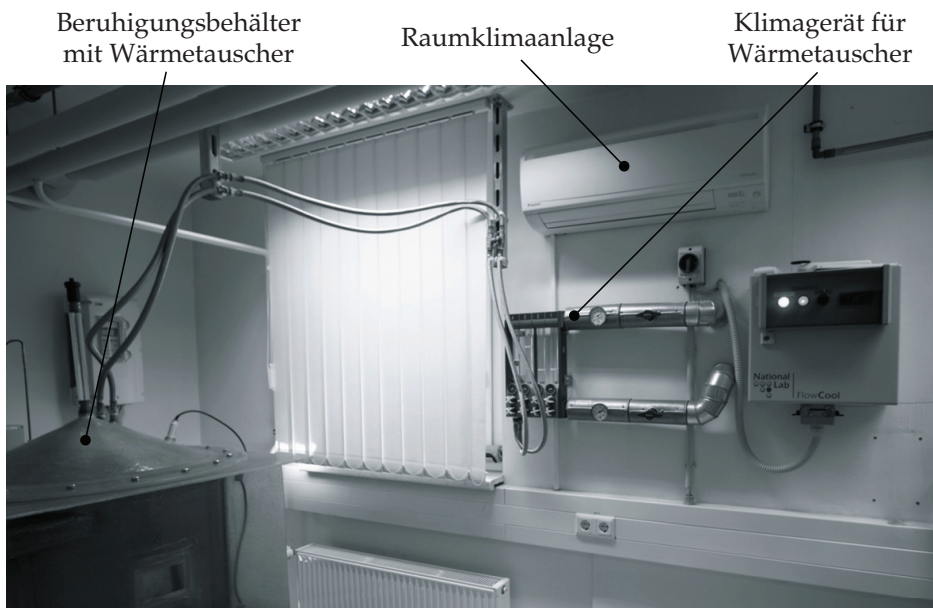


Abbildung 3.17: Einsatzort der Klimavorrichtungen. Zu sehen ist die Klimaanlage des Laboratoriums sowie die Kühlanlage des im Beruhigungsbehälter verbauten Wärmetauschers.

Bei Temperaturmessungen am EMK-Prototyp zeigte sich die gute Wirkungsweise beider Systeme durch eine maximale Temperaturfluktuation von 0,1 K des Modellfluids innerhalb des Wasserumlaufkanals sowie 0,5 K der Raumluft des Laboratoriums.

e.) Messwert-Monitoring

Um während der Untersuchungen genaue Kenntnisse über die vorherrschenden Systemparameter zu erlangen, wurden an dem EMK-Prototypen eine Reihe von zusätzlichen Messkomponenten verbaut. Die besonders hervorzuhebenden Komponenten sind hierbei im Leitfähigkeitsmesser *CLS 50D* der *Fa. Endress+Hauser* sowie im magnetisch-induktiven Durchflussmesser *Optiflux 2000* der *Fa. KROHNE* zu suchen. Diese Geräte dienen unmittelbar zur Referenzierung der gemessenen Lorentzkraft und sind somit unverzichtbarer Bestandteil des Systems.

Ferner wurden an fünf neuralgischen Stellen des Wasserumlaufkanals Temperatur- und Drucksensoren verbaut. Die von der *Fa. electrotherm* hergestellten Kontaktthermometer arbeiten auf der Basis von PT100 Elementen und dienen der Überwachung der Temperaturverteilung im Kanal. Die Drucksensoren der *Fa. VIGA* geben des Weiteren Auskunft darüber an welchen Stellen im Kanal kritischer Druck herrscht. Sollte der voreingestellte Maximaldruck überschritten werden, öffnen sich zwei am Umlaufkanal applizierte Regelventile, um die Zerstörung des Kanals durch Überdruck zu verhindern.

Die gesamten Messinformationen der aufgeführten Komponenten sowie die zusätzlichen Messwerte der EMK-Einheit fließen durch die Verwendung eines *Agilent Datenlogger* in einem Punkt zusammen und können durch eine eigens erstellte *LabVIEW*-Umgebung in Echtzeit verfolgt und gespeichert werden. Um einen Überblick über die Funktionsstruktur des Regelkreises zu bekommen sei an dieser Stelle auf den Anhang A.2 verwiesen.

3.5.3 Optimierung von Geometrien des Wasserumlaufkanals

Auch wenn der KEP ein probates Werkzeug zur systematischen Entwicklung eines neuen Produktes darstellt, ist dies nicht gleichbedeutend mit der Erzielung des letztendlich geeignetsten Versuchsdesigns. Um dennoch ein optimales Ergebnis zu erzielen, bedient sich die Forschung und Entwicklung der Computational Fluid Dynamics (im Folgenden mit CFD abgekürzt). Auf Grundlage numerischer Berechnungen eröffnen Simulationsprogramme wie *FLUENT* neue Möglichkeiten der Optimierung zukünftiger Prototypen. So kann durch gezielte Voruntersuchungen in Hinblick auf Herstell- und Umsetzbarkeit viel Geld und Zeit eingespart werden, noch bevor Fertigungsaufträge an die Manufakturen herausgegeben werden. Das Anliegen dieses Abschnittes ist nicht die Dokumentation der Wirkungsweise solcher Programme, vielmehr soll der Einfluss der CFD auf die in Abschnitt 3.5.2 hervorgebrachten Ergebnisse des Pendelprototypen aufgezeigt werden.

Prinzipiell kann jede Geometrie des Wasserumlaufkanals mit den zur Verfügung stehenden Methoden der CFD optimiert werden. Im vorliegenden Fall wurden die Untersuchungen auf die Findung der besten Geometrie der Düse, der Messstrecke, des Beruhigungsbehälters sowie des Umlenkdiffusors begrenzt, da dies die Komponenten sind, die den größten Einfluss auf das Fluidverhalten inne haben. Die nachfolgenden Untersuchungen charakterisieren beispielhaft das Potential der CFD, hinsichtlich durchzuführender Verbesserungsmaßnahmen und Berechnungen der Strömungsstrukturen anhand zweier Beispiele. Hierbei wird insbesondere auf die konstruktive Auslegung des Umlenkdiffusors sowie auf die Findung der bestmöglichen Platzierung des Wärmetauschers im Beruhigungsbehälter eingegangen.

a.) Umlenkdiffusor

Die Hauptaufgabe des Umlenkdiffusors ist das Herabsetzen der Fließgeschwindigkeit sowie die Umkehr der Fließrichtung des Modellfluids um 180° bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung eines definierten Fluidprofils. Hierzu sind mehrere Randbedingungen einzu-

halten. Die Wichtigste ist, dass der halbe Öffnungswinkel des Diffusors einen Wert von $\alpha < 2,75^\circ$ nicht übersteigen darf [68], da sonst Ablösungen der Strömung von der Innenwand folgen würden. Diese würden das sich aufbauende Fluidprofil nachhaltig stören und sind von daher zu vermeiden.

Abbildung 3.18 zeigt die Resultate einer mittels *FLUENT* durchgeführten Optimierung. Die linke Abbildung zeigt hierbei den Umlenkdiffusor vor der Optimierung. Zu sehen ist die vertikale Mittelebene sowie die Ebenen von Ein- (unteres Viereck) und Auslass (oberes Viereck). Deutlich wird der störende Jet, welcher sich am oberen Ende des Auslasses, ohne das Zutun weiterer Maßnahmen ergeben würde. Dies ist für die Ausbildung eines definierten Stömungsprofils zu vermeiden, wodurch nach Kombinationsuntersuchungen von Anstellwinkel und Form möglicher Umlenkrippen die rechte Abbildung gefunden wurde. Die Lösung sieht eine, durch Einführung von drei Umlenkrippen, Unterteilung des Diffusors in vier diskrete Abschnitte vor. Resultierend ergibt sich am Auslass eine homogenisierte Ausgangsströmung, welche eine mittlere Geschwindigkeit von 0,21 m/s aufweist. Durch die Simulationen konnte somit ein enorm wichtiger Beitrag zur Entwicklung eines definierten Fluids beigetragen werden.

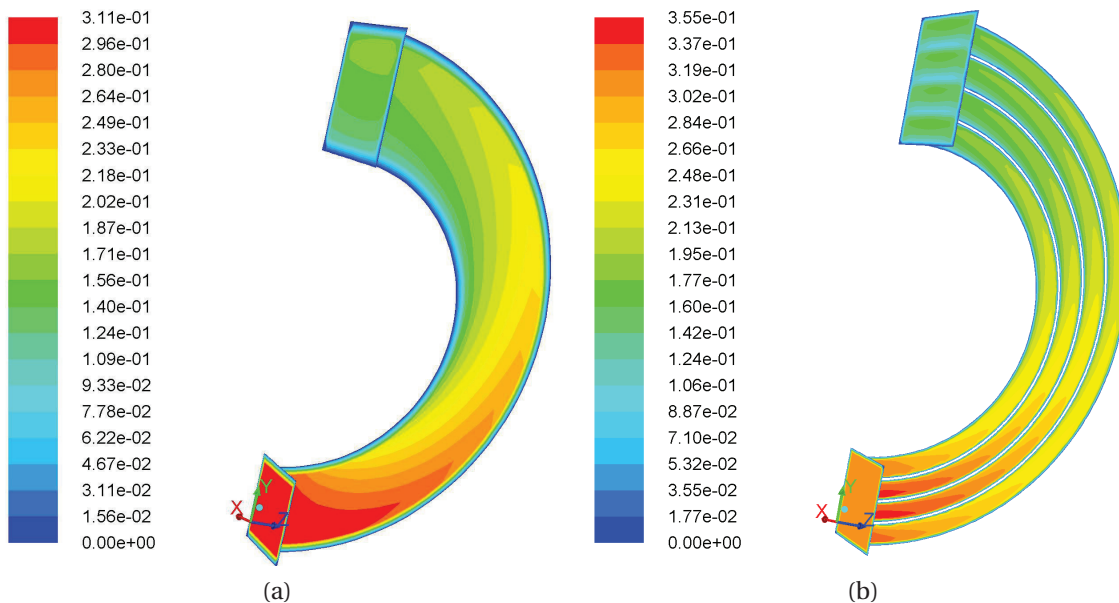


Abbildung 3.18: Vergleich der Umlenkdiffusoren (a) vor und (b) nach der Optimierung mit *FLUENT*. Die Legende symbolisiert die Fließgeschwindigkeit u des Fluids in m/s. Die Bilder zeigen eindrucksvoll die Verbesserung der Auslassströmung im oberen Teil des Diffusors. Bei gleicher Eintrittsgeschwindigkeit von 0,31 m/s im unteren Abschnitt, konnte eine Homogenisierung des Auslassströmungsprofils bei einer mittleren Geschwindigkeit von 0,21 m/s erreicht werden.

b.) Beruhigungsbehälter

Neben der Entwicklung eines definierten Fluidprofils innerhalb der Messstrecke des Umlaufkanals, kommt der Klimatisierung des Umlaufkanals eine ebenso hohe Aufmerksamkeit zu. Nach Auslegung des Wärmetauschers stellt sich die Frage, an welcher Stelle im Umlaufsystem dieser den größten Wirkungsgrad aufweist. Wie in Abschnitt 3.5.2 aufgeführt, ist durch die Dimension des Wärmetauschers nur eine Platzierung im Beruhigungsbehälter des Wasserumlaufkanals möglich.

Ziel der *FLUENT*-Untersuchungen war die Bestimmung der bestmöglichen Wirkstelle des Wärmetauschers. Hierzu wurde der Beruhigungsbehälter in seinem Strömungsverhalten simuliert, wie in Abbildung 3.19 ersichtlich. Die Ergebnisse zeigten die Flusslinien der Fluidströmung in der horizontalen Mittelebene des Behälters innerhalb der Einlaufstrecke. Zum einen bestätigen die Simulationen das der Behälter zur gewünschten Abbremsung des aus der Messstrecke kommenden Fluides führt. Zum anderen zeigt die Abbildung eine permanente Fluidströmung in der Mitte des Behälters, wodurch der Wirkungsgrad des Wärmetauschers bei Platzierung in diesem Bereich am größten angenommen werden muss. Fußend auf diesen Erkenntnissen wurde der Wärmetauscher an dieser Stelle appliziert (siehe Abbildung 3.19b). Die gute Wirksamkeit des Wärmetauschers konnte bei späteren Messungen aufgrund der sehr geringen Temperaturhysterese von 0,1 K bestätigt werden.

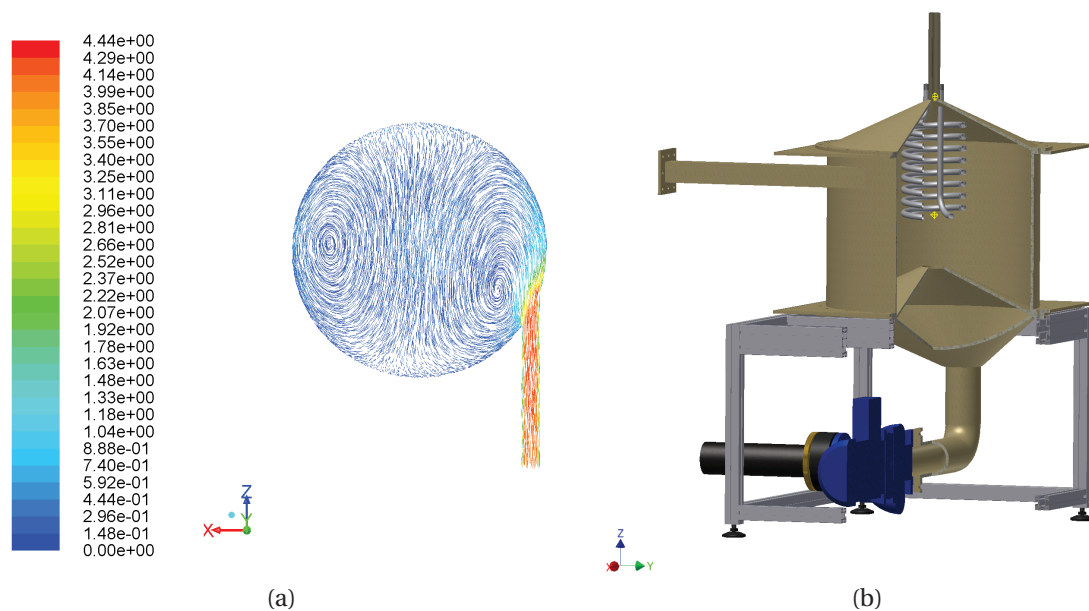


Abbildung 3.19: Darstellung zur Findung der optimalen Platzierung des Spiral-Wärmetauschers. (a) zeigt den simulierten Strömungsverlauf (u in m/s) in der horizontalen Mittelebene des Beruhigungsbehälters am Einlass. (b) Dreiviertelschnitt des Beruhigungsbehälters mit mittig platziertem Wärmetauscher.

3.5.4 Konstruktive Umsetzung und Funktionsweise

Ausgehend von den gewonnenen Erkenntnissen der Abschnitte 3.5.1 - 3.5.3 steht in diesem Abschnitt die Zusammenführung sowie die Erklärung der Funktionsweise des EMK-Prototypen im Vordergrund. Nach den Simulationen zur Findung der bestmöglichen Kanalgeometrien wurden die Teile des Kanals an die Fertigung übergeben. Hierbei erwies sich die *Fa. RINN* als ein außergewöhnlich fähiger Projektpartner, welcher sich größte Mühe gab, die zum Teil aus Freikörperflächen bestehenden Kanalgeometrien herzustellen. Überdies trugen sie durch das Verwirklichen der geforderten glatten Kanalinnenflächen dazu bei, dass die mittels *FLUENT* bestimmten Ergebnisse auch auf den realen Kanal übertragen werden konnten.

Nach Fertigung der Kanalkomponenten und Lieferung sämtlicher Zusatzkomponenten erfolgte der Zusammenbau. Hierbei wurden alle oben erwähnten Komponenten zu einem Gesamtsystem (siehe Abbildung 3.20) vereinigt, wobei das System aus folgenden Hauptelementen besteht:

- 1 - Messrechner,
- 2 - Beruhigungsstrecke,
- 3 - Düse,
- 4 - EMK-Messsystem,
- 5 - Messstrecke,
- 6 - LDA mit Traversiereinrichtung,
- 7 - USD,
- 8 - Beruhigungsbehälter,
- 9 - Leitfähigkeitsmessgerät,
- 10 - Umlenkdiffusor,
- 11 - Kanalgestell,
- 12 - Diffusor,
- 13 - Messrechner,
- 14 - Messgestell,
- 15 - Granitstein,
- 16 - Fundamentblock,
- 17 - MID,
- 18 - Pumpe,
- nicht auf dem Bild sichtbar: Druck- und Temperatursensoren.

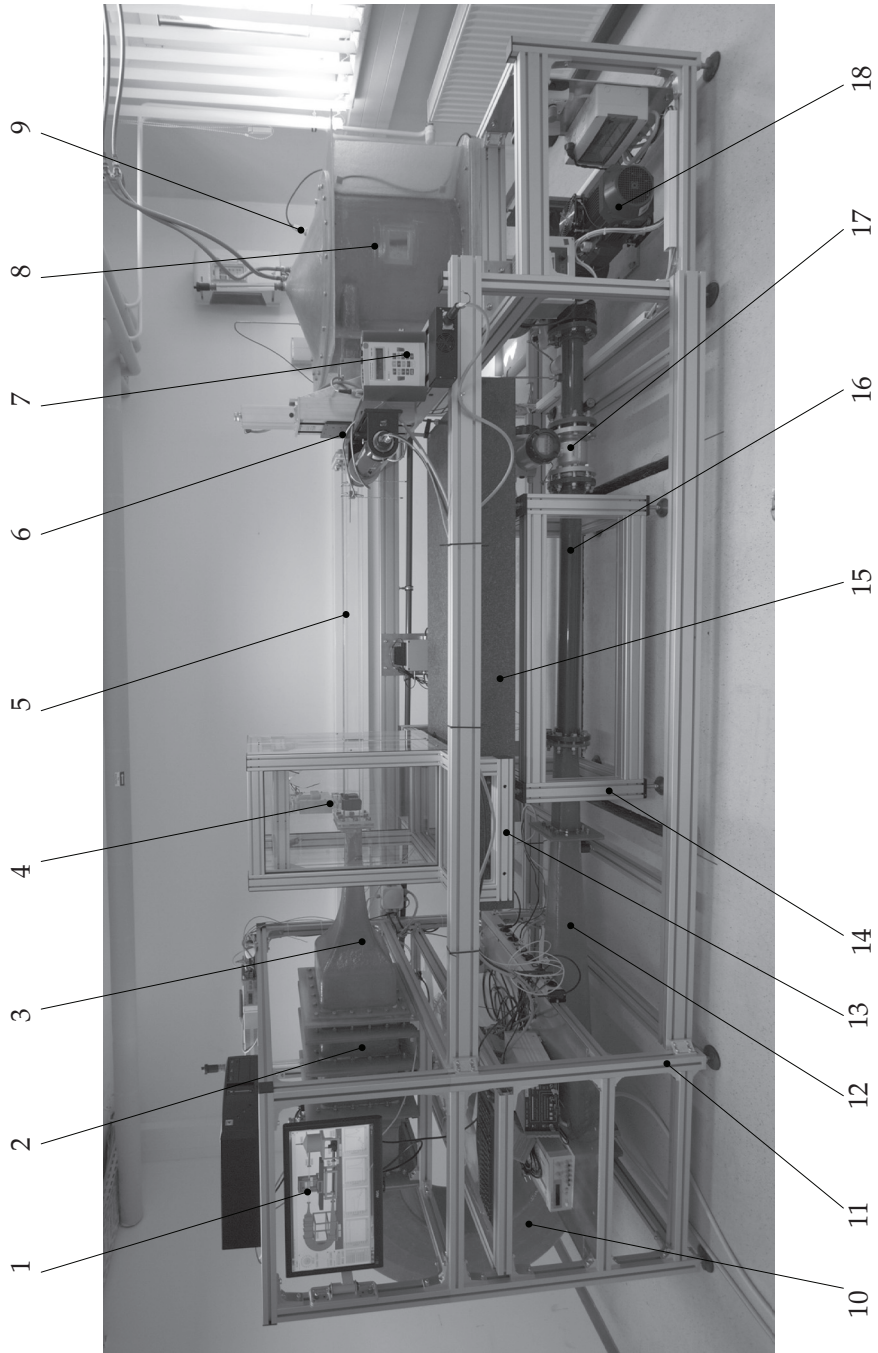


Abbildung 3.20: Abbildung zeigt den Komplettaufbau des EMK-Prototyps. Die Ziffern kennzeichnen die Hauptkomponenten des Systems und sind dem vorliegenden Abschnitt zu entnehmen.

Die Funktionsweise ist ähnlich der des Pendelprototyps aus Abschnitt 3.4. Auch bei dieser Versuchseinrichtung wird das Modellfluid durch den Umlaufkanal in die Messstrecke bewegt, wodurch sich bei Durchfließen des Magnetsystems Wirbelströme und letztendlich Lorentzkräfte ausbilden. Diese führen im vorliegenden Fall nicht zur Auslenkung eines Pendels sondern zur Auslösung eines Stromregelkreises (siehe Abschnitt 3.3.2). Je höher die wirkende Lorentzkraft, desto höher der benötigte Strom in der Spule, wodurch nach Kalibrierung des Systems ein proportionaler Signalabgriff und somit ein direkter Bezug zur Lorentzkraft möglich ist.

Results! Why, man, I have gotten a lot of results. I know several thousand things that won't work.

T. A. Edison

KAPITEL

4

Versuche am Pendelprototypen

Hauptgegenstand des vorliegenden Kapitels ist die Analyse und Interpretation der mittels Pendelprototyp erzielten Messdaten. Beginnend mit der Beschreibung der Vorgehensweise zur Validierung des LKA-Systems, werden im Verlauf die Einflüsse von Geschwindigkeits- sowie Leitfähigkeitsänderungen auf die Lorentzkraft beleuchtet. Ferner wird die Wirkung einer nicht konstanten Fluidtemperatur sowie die Reaktion der Lorentzkraft, auf ein sich änderndes Magnetfeld dargestellt. Abschließend erfolgt eine allgemeine Unsicherheitsbetrachtung der Messwerte sowie ein Fazit der erzielten Messleistungen.

4.1 Validierung des Systems mittels Solid-Body-Approximation

Um Aussagen über das Verhalten des – unter Abschnitt 3.4 aufgeführten – von Grund auf neu zusammengestellten Prototyps zu erlangen, wurde ein sogenannter Solid-Body-Test durchgeführt. Ziel, der in Abbildung 4.1 aufgeführten Anordnung, ist neben der Überprüfung der ordnungsgemäßen Wirkungsweise der Systemkomponenten, der Abgleich des Prototyps mit einem numerischen Simulationsprogramm. Dies ist insofern wichtig, da bis zu Beginn der Untersuchungen keine Versuche dieser Art durchgeführt wurden und somit kein Wissen über das Verhalten solch eines Systems besteht.

Numerische Berechnungsprogramme, wie die zum Einsatz gekommenen Simulationsumgebungen *MAXWELL*, *COMSOL* und *FLUENT*, beruhen auf der Finiten-Elemente-Methode und sind soweit fortgeschritten, dass sie einen verlässlichen Anhaltspunkt geben, ob und inwieweit ein System erfolgreich arbeiten wird. Da transiente Fluidsimulationen gepaart mit elektromagnetischen Simulationen zur Magnetfeldberechnung schwer zu analysieren sind, wurde im vorliegenden Fall eine Solid-Body-Approximation durchgeführt [69]. D.h., dass schwach leitfähige Elektrolyt wird durch ein Festkörper ersetzt, welcher einfacher und genauer berechnet werden kann. Die Begründung liegt hierbei in dem genauen Wissen der vorliegenden Systemparameter. So werden im Gegensatz zu einem

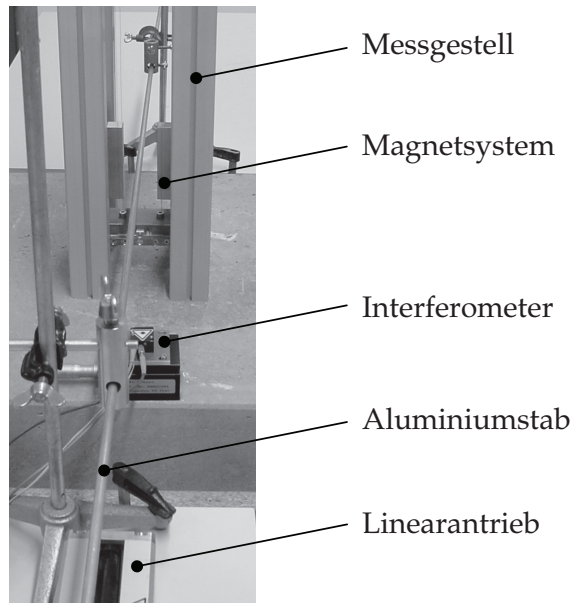


Abbildung 4.1: Bild vom Solid-Body-Experiment mit der Kennzeichnung der wichtigsten Komponenten.

strömenden Fluid die elektrische Leitfähigkeit, die Geometrie des Profils sowie die Bewegungsgeschwindigkeit des Stabes über die gesamte Profillänge als konstant angenommen, was eine immense Verringerung der Simulationszeiten bewirkt. Bei den Tests erwiesen sich 3 m lange und im Querschnitt runde Aluminiumstangen, dreier unterschiedlicher Durchmesser, zur Durchführung der Experimente als besonders geeignet.

In Hinblick auf den in Abschnitt 3.4.1 beschriebenen Aufbau ergibt sich somit der Zwang nach einem Umbau des Pendelprototyps. Im Folgenden wurde der Wasserumlaufkanal durch eine der drei oben erwähnten Aluminiumstangen ersetzt und mit einer konstanten Geschwindigkeit mittels Linearantrieb durch den Mittelpunkt (siehe Abbildung 3.2a) des Magnetsystems bewegt. Die eintretende Wirkung ist identisch mit der des Elektrolyts. Bewegt sich der elektrisch leitende Stab durch das Magnetfeld hindurch, folgt eine – in Abschnitt 2.3 aufgezeigte – Interaktion, welche im Verlauf zur Bewegung des Magnetsystems aus seiner Gleichgewichtslage führt. Die Lageänderung des Magnetpendels wird dabei mit dem im Abschnitt 3.3.1 aufgeführten Interferometer erfasst (siehe Abbildung 4.2).

Die Ergebnisse der numerischen Simulationen wurden mit dem Programm *COMSOL* ermittelt und beruhen auf dem ADAC-Modul *Magnetic and Electric Fields* unter Verwendung des Lorentzkraft-Terms. Ferner wurden die Kräfte als symmetrisches Problem zwischen den beiden Magnetpolen betrachtet. Die Netze wurden automatisch mit der Größenoption *extremely fine* für den Stab und *normal* für die Magnetregion generiert, was 240000 tetrahedrale Elemente zweiter Ordnung hervorbrachte.

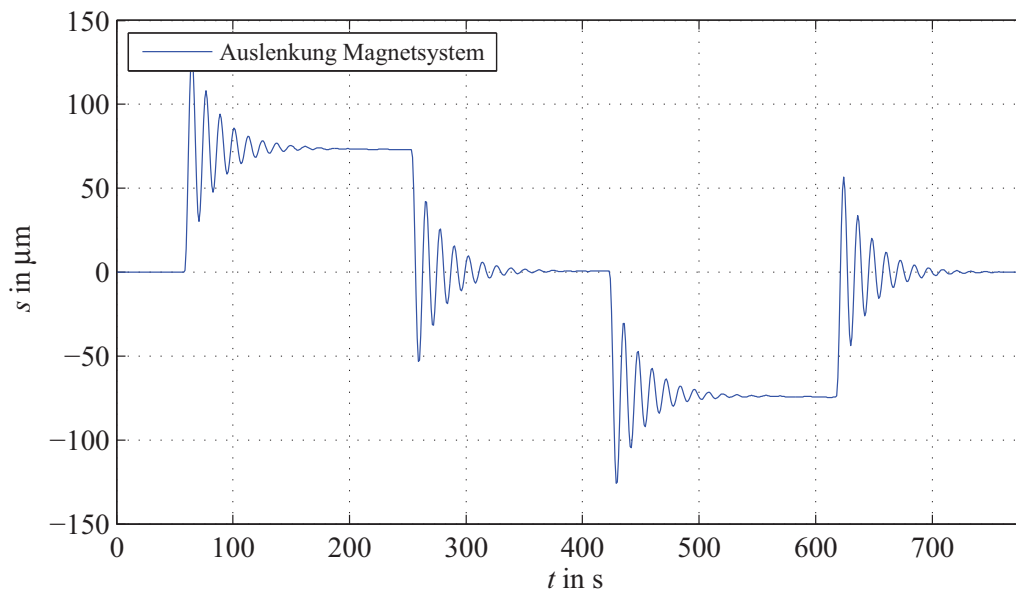


Abbildung 4.2: Exemplarischer Auslenkungs-Zeit-Verlauf der Vermessung eines 9 mm starken Aluminiumstabes bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 20 mm/s. Die Zeitbereiche von 60 s - 260 s sowie 420 s - 620 s repräsentieren die Bereiche der positiven wie auch negativen Verschieberichtung des Stabes durch das Magnetfeld.

Um die elektrische Leitfähigkeit der Aluminiumstangen zu bestimmen wurde mittels *Fischerscope XRAY XDV-SDD* eine Röntgenspektroskopie der Stangen durchgeführt. Hierbei wurde für jeden Stab die genaue Materialzusammensetzung bestimmt. Diese wurden anschließend mit bestehenden DIN-Daten [70] verglichen und einem Werkstoff zugeordnet. Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die Spezifikationen der Aluminiumstangen in Hinblick auf mögliche elektrische Leitfähigkeiten, deren Mittelwerte und Werkstoffbezeichnungen.

Unter Kenntnis der elektrischen Leitfähigkeit, der Geschwindigkeit der Aluminiumstangen über die Schrittzahl des Schrittmotors sowie der Auslenkung des Magnetsystems kann durch die Modellgleichung 4.1 auf die tatsächliche Lorentzkraft geschlossen werden. Abbildung 4.3 zeigt die bei dem Versuch erzielten Lorentzkräfte für die Aluminiumstäbe der Durchmesser 5 mm, 9 mm und 10 mm bei einem Geschwindigkeitsbereich von 5 mm/s bis 35 mm/s. Darüber hinaus sind die jeweiligen Beiträge der Messunsicherheit (vertikale Balken) sowie die numerischen Simulationen der *COMSOL* Lösung (durchgezogene Linien) angetragen. Der Graph zeigt, dass die Messwerte – wie theoretisch vorhergesagt – mit steigender Geschwindigkeit der Aluminiumstangen linear ansteigen. Des Weiteren treffen die Messwerte die numerischen Simulationen, was darauf schließen lässt, dass der aufgebaute Prototyp – bestehend aus den einzelnen Systemkomponenten – in sich funktioniert sowie, dass *COMSOL* ein gutes Werkzeug zur Abschätzung von Lorentzkräften darstellt.

Tabelle 4.1: Spezifische Leitfähigkeiten der bei dem Solid-Body-Versuch verwendeten Aluminiumstangen. Nach erfolgter Röntgenspektroskopie wurden die Stangen den aufgeführten Materialien zugeordnet. Die Materialien besitzen laut DIN die dargestellten Mindest- und Maximalwerte. Die Berechnungen der erzielten Lorentzkraft in Abbildung 4.3 wurde mit dem jeweiligen Mittelwert durchgeführt.

d [mm]	Material [DIN]	σ_{min} [MS/m]	σ_{max} [MS/m]	σ_{mittel} [MS/m]
5 mm	AW 2007	18,0	22,0	20,0
9 mm	AW 2024	18,0	21,0	19,5
10 mm	AW 2024	18,0	21,0	19,5

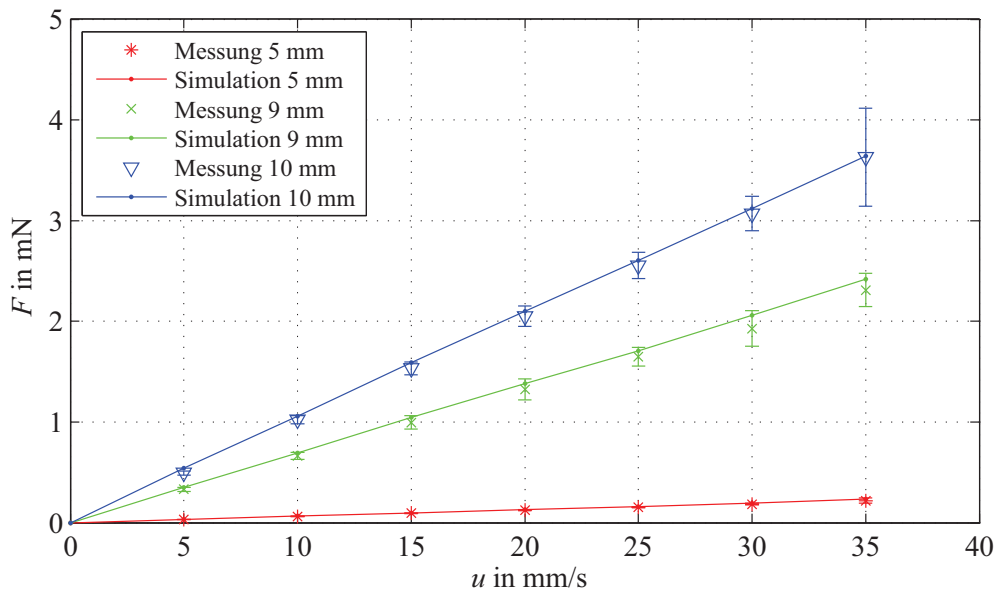


Abbildung 4.3: Endresultat der Solid-Body-Untersuchungen für die Aluminiumstangendurchmesser 5 mm, 9 mm und 10 mm. Das Diagramm zeigt in dem Geschwindigkeits-Kraft-Verlauf die Messwerte der jeweiligen Einzelmessungen sowie deren Fehlerbeitrag. Die durchgezogenen Linien repräsentieren die äquivalenten numerischen Simulationen.

Etwaige Unstetigkeiten, wie sie beispielsweise bei der Vermessung vom 9 mm Aluminiumstab zu sehen sind, können durch eine Vielzahl von Problemen hervorgerufen werden. Zum einen kann es aufgrund der Länge und der im Vergleich sehr kleinen Durchmesser zu Durchbiegungen der Aluminiumstäbe kommen, wodurch sie sich aus der Mittellage des Magnetfeldes entfernen und zu fehlerhaften Ergebnissen führen. Darüber hinaus können

Streulüsse des Magnetfelds mit in der Nähe befindlichen Komponenten des Prototyps interagieren und zu Abweichungen im Signal führen. Nichtsdestotrotz bleibt festzuhalten, dass es sich bei dem vorgestellten Solid-Body-Versuchsaufbau um ein erfolgreiches Experiment handelt, welches das Verhalten des neu aufgebauten LKA-Systems aufzeigt und ferner mit einem kommerziell verfügbaren numerischen Berechnungsprogramm validiert werden kann.

4.2 Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Lorentzkraft

Nach erfolgreicher Validierung des Systems, wie im vorhergehenden Abschnitt aufgezeigt, werden fortan Untersuchungen am Modellfluid beschrieben. Das oberste Ziel der Fluiduntersuchungen – wie in Kapitel 1 postuliert – ist die Generierung von Aussagen über die Eignung der LKA zur Applikation auf schwach leitfähige Fluide. Aus diesem Grund wurde der Pendelprototyp in den aus Abschnitt 3.4.1 bekannten Ausgangszustand zurückgesetzt und mit dem Modellfluid Salzwasser gefüllt. Die folgenden Abschnitte zeigen die Wirksamkeit der Methode und gehen ferner auf mögliche Faktoren zur Beeinflussung der Lorentzkraft ein.

4.2.1 Einwirkung durch Geschwindigkeitsänderungen des Fluids

Basierend auf den Validierungsergebnissen der Festkörperuntersuchungen gelang unter Zuhilfenahme des Modellfluids Salzwasser erstmals die Vermessung von schwach leitfähigen Fluiden. Durch die Generierung eines Fluidstromes, mittels der Ansteuerung der in Abschnitt 3.4.1 aufgezeigten Pumpe, war es möglich durch Ausnutzung der Lorentzkraft Auslenkungen des Magnetsystems zu detektieren. Die Messroutine sah jeweils einen diskreten Wechsel zwischen Ein- und Aus-Phase der Pumpe, beziehungsweise des Fluidstromes vor. D.h., der applizierten Pumpe wurde vor Beginn einer jeden Messung eine feste Frequenz zugeteilt, welche mittels Kippschalter zu- oder abgeschaltet werden konnte. Es sei zu erwähnen, dass dem eingesetzten Frequenzumrichter keine An- beziehungsweise Ablauframpe¹ zugeschrieben wurde, da besonderes Interesse am direkten Verhalten des Prototyps sowie dessen Rohsignal bestand.

Ein beispielhaftes Messsignal zum Nachweis der Funktionsweise der LKA an schwach leitfähigen Fluiden ist in Abbildung 4.4 zu sehen. Hier wurde das Fluid mit einer elektrischen Leitfähigkeit von 6,2 S/m und einer Geschwindigkeit von 2,5 m/s jede Minute für 30 Sekunden durch das Magnetsystem geführt. Es ist festzuhalten, dass sowohl gezeigt werden kann, dass das ungefilterte Wegmesssignal des Magnetsystems (blaue Kurve) der vorgegebenen Fluidgeschwindigkeit (grüne Kurve) im beeindruckenden Maße folgt, sowie dass eine gute Reproduzierbarkeit zwischen den einzelnen Messphasen besteht. Die gewonnene Erkenntnis bestätigt zum einen die in Abschnitt 2.3 aufgeführte Theorie zur LKA, offen-

¹Rampe: Im Standardfall voreingestellte Frequenzkurve des Umrichters, um Motoren langsam auf eine eingestellte Drehzahl zu regeln.

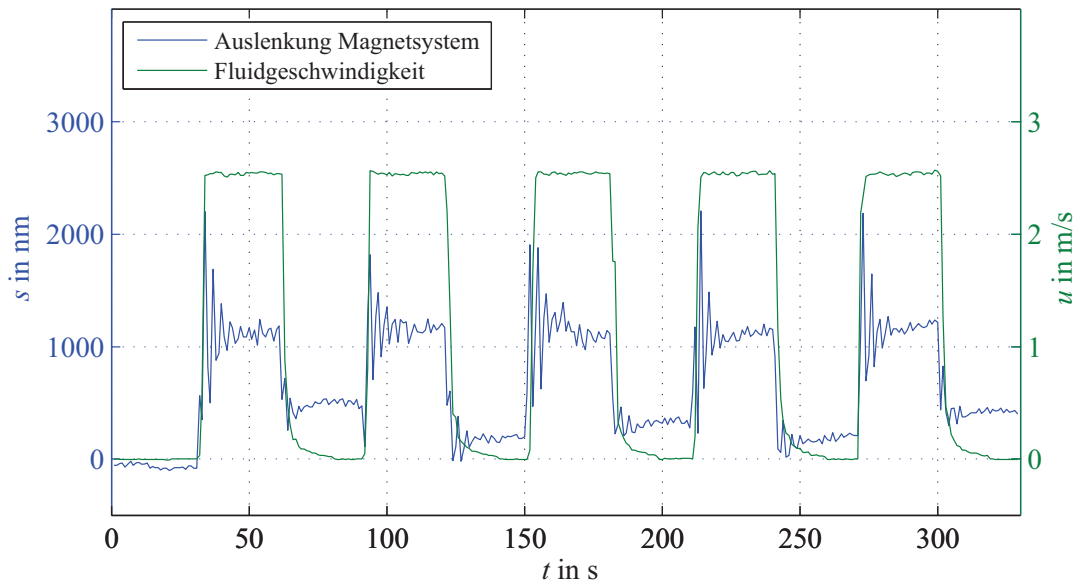


Abbildung 4.4: Exemplarisches Messsignal für eine Vermessung des Fluides bei einer Fließgeschwindigkeit von 2,5 m/s und einer elektrischen Leitfähigkeit von 6,2 S/m. Das Messintervall zwischen An- und Aus-Phase des Fluidstromes beträgt jeweils 30 s. Die blaue Kurve repräsentiert die Auslenkung des Magnetsystems, die grüne Kurve die Geschwindigkeit des Fluids innerhalb der Messstrecke.

bart durch die schnelle Reaktionszeit des Systems darüber hinaus die gute Wirkungsweise des Pendelprototypen.

Aufgrund des erfolgreichen Tests wurden weitere Messserien mit unterschiedlichen Fluidgeschwindigkeiten durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war die Bestätigung der postulierten linearen Abhängigkeit der Geschwindigkeit u von der Lorentzkraft in Abschnitt 2.3. Die Abbildung 4.5 zeigt stellvertretend den Signalverlauf für die Geschwindigkeit von 3,5 m/s bei unveränderter Leitfähigkeit. Auch dieses Signal zeigt eine gute Reproduzierbarkeit des Messsignals. Weitaus wichtiger ist die Tatsache über die Erkenntnis der Vergrößerung der Magnetsystemauslenkung. Betrug sie in Abbildung 4.4 bei einer Fließgeschwindigkeit von 2,5 m/s circa 1000 nm, erreicht sie im vorliegenden Fall ungefähr 1500 nm und dient dem Beweis der Abhängigkeit des aufgebauten LKA-Prototypen von der anliegenden Fluidgeschwindigkeit.

Zusammenfassend sei festzuhalten, dass dem Pendelprototyp eine Eignung als kontaktloses Durchflussmesssystem zugesprochen werden kann. So konnte erstmalig qualitativ gezeigt werden das die LKA auch für schwach leitfähige Fluide verwendet werden kann. Durch die hohe Sensitivität des Aufbaus konnten darüber hinaus weitere Untersuchungen durchgeführt werden, welche eine Überprüfung der Abhängigkeit der Lorentzkraft gegenüber der anliegenden Fluidströmung ermöglichten.

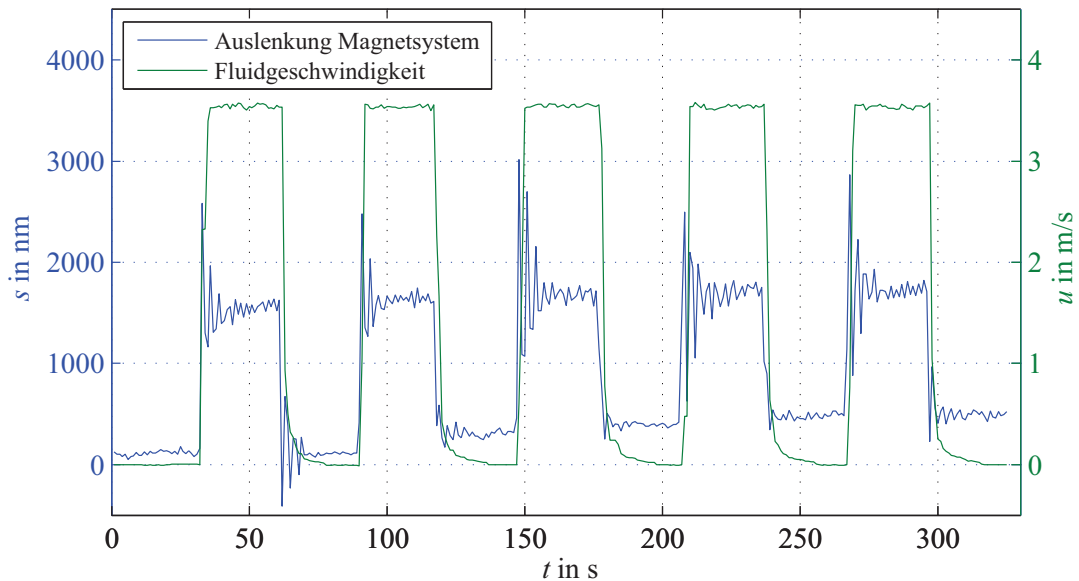


Abbildung 4.5: Exemplarisches Messsignal für die Vermessung des Fluides bei einer Fließgeschwindigkeit von 3,5 m/s und einer elektrischen Leitfähigkeit von 6,2 S/m. Das Messintervall zwischen An- und Aus-Phase des Fluidstromes beträgt jeweils 30 s. Die blaue Kurve repräsentiert die Auslenkung des Magnetsystems, die grüne Kurve die Geschwindigkeit des Fluids innerhalb der Messstrecke.

4.2.2 Beeinflussung durch Variation der Leitfähigkeit

Nach ersten positiven Messungen der Abhängigkeit der Lorentzkraft von dem Geschwindigkeitseintrag der Fluidströmung, folgten Experimente zur Überprüfung des Einflusses durch Abänderung der elektrischen Leitfähigkeit des Modellfluids. In gleicher Weise, wie in Abschnitt 4.2.1 aufgezeigt, wurden auch die vorliegenden Untersuchungen durchgeführt. D.h. die Messroutine bleibt unverändert, einzig die elektrischen Leitfähigkeiten des Fluids variieren mit der Zeit. Die eingestellten Leitfähigkeiten wurden während der Messungen stets durch das mobile Leitfähigkeitsmessgerät *HANNA Instrument 9835* überwacht. Als exemplarisches Beispiel für eine Leitfähigkeitsuntersuchung sei Abbildung 4.6 aufgeführt. Die im Diagramm dargestellte blaue Kurve repräsentiert die Detektierung der Auslenkung des Magnetsystems gegenüber der grünen Kurve, welche die reale Geschwindigkeit des Fluids beschreibt. Im direkten Vergleich von Abbildung 4.4 und 4.6 wird der Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit des Modellfluids klar. Beide Kurven zeigen den Auslenkungs-Zeit-Verlauf für die gleiche Fließgeschwindigkeit von 2,5 m/s. Einzig die Leitfähigkeit änderte sich von 6,2 S/m auf 12,5 S/m. Laut Theorie müsste bei Verdopplung der Leitfähigkeit eine Verdopplung der Kraft, beziehungsweise in diesem Fall eine Verdopplung der Auslenkung erfolgen. Bei Vergleich beider Abbildungen bestätigt sich die Annahme. Während Abbildung 4.4 eine Auslenkung von ≈ 1000 nm aufweist, wird im vorliegenden Fall eine Auslenkung von ≈ 2000 nm erreicht. In Folge wurden acht verschie-

dene Leitfähigkeiten im Bereich von 0,04 S/m - 14 S/m durchgeführt. Die untersuchten Geschwindigkeiten reichten hierbei von 0,8 m/s - 4 m/s. Abbildung 4.7 zeigt die Übersicht der erzielten Ergebnisse.

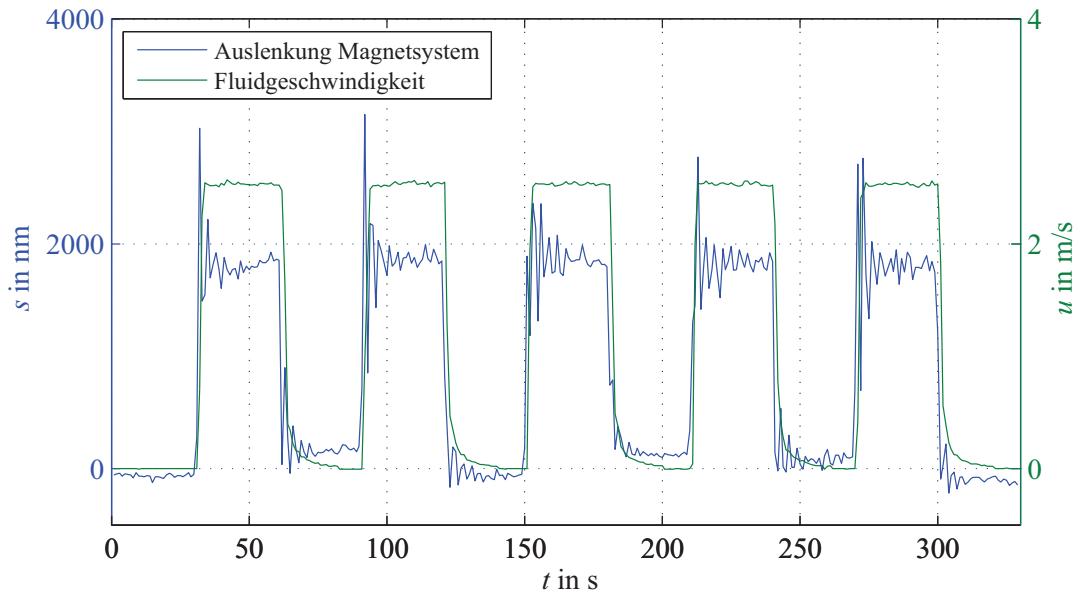


Abbildung 4.6: Exemplarisches Messsignal für die Vermessung des Fluides bei einer Fließgeschwindigkeit von 2,5 m/s und einer elektrischen Leitfähigkeit von 12,5 S/m. Das Messintervall zwischen An- und Aus-Phase des Fluidstromes beträgt jeweils 30 s. Die blaue Kurve repräsentiert die Auslenkung des Magnetsystems, die grüne Kurve die Geschwindigkeit des Fluids innerhalb der Messstrecke.

Zu sehen sind die detektierten Messwerte sowie die ermittelten Unsicherheiten der jeweiligen Messung im oben angegebenen Messbereich. Die durchgezogenen Linien repräsentieren darüber hinaus die auf numerischen Simulationen beruhenden erwarteten Lorentzkräfte. Fußend auf dem Diagramm leiten sich zwei Aussagen ab. Zum einen bestätigen die gemessenen Kurven nochmals die unter Abschnitt 4.2.1 aufgeführte These der Abhängigkeit der Lorentzkraft von der Fließgeschwindigkeit, zum anderen führen die Messwerte den Beweis der Abhängigkeit der Lorentzkraft gegenüber der elektrischen Leitfähigkeit. Das nachfolgende Zahlenbeispiel steht stellvertretend als Beweis der aufgeführten These. Wird bei einer festen Geschwindigkeit von 2,5 m/s und einer Leitfähigkeit von 2,3 S/m eine Lorentzkraft von circa $8 \mu\text{N}$ erzeugt, erzielt die Lorentzkraft bei einer Leitfähigkeit von 4,0 S/m einen 1,7-fach größeren Messwert und bestätigt somit die Korrelation der zugrundeliegenden Theorie.

Neben dem positiven Nachweis der Quantifizierung der Abhängigkeit der Lorentzkraft von Geschwindigkeit und Leitfähigkeit des Modellfluids, müssen dem Pendelsystem zwei offensichtliche Nachteile attestiert werden. Durch die benötigte Sensitivität des Pendels

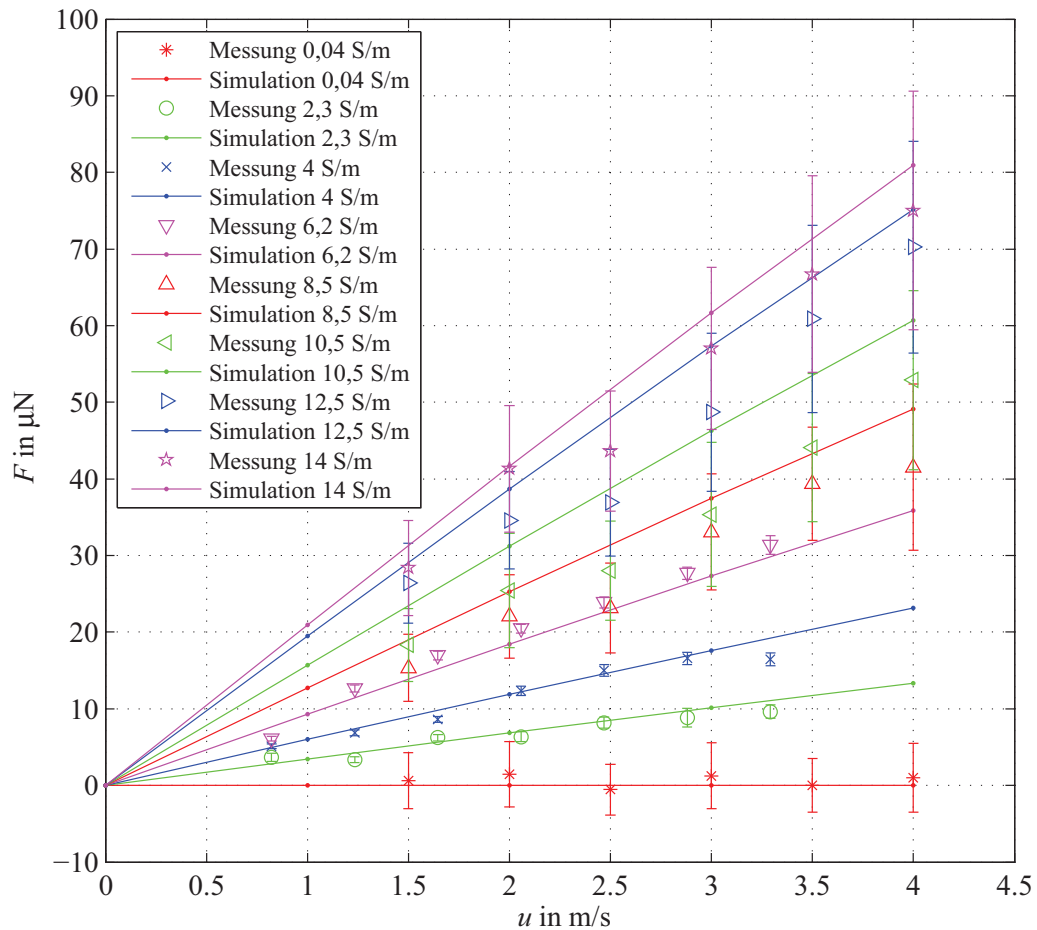


Abbildung 4.7: Resultat der Untersuchungen von Geschwindigkeits- und Leitfähigkeitseinfluss auf das Messsignal des Pendelprototyps sowie deren Messunsicherheit. Dargestellt sind alle untersuchten Messserien im Geschwindigkeitsbereich von 0,8 m/s - 4,0 m/s sowie der Leitfähigkeiten im Bereich von 0,04 S/m - 14 S/m. Die durchgezogenen Linien im Hintergrund stellen die numerischen Simulationen der jeweiligen Leitfähigkeit dar. Vor allem bei höheren Leitfähigkeiten ist der große Fehlerbeitrag um den Erwartungswert auffällig.

sowie der impulsreichen Sprungantwort des System gegenüber der Ein- und Ausschaltphase der Pumpe, neigen die Untersuchungen am Pendelaufbau zum Überschwingen (siehe Abbildung 4.4 etc.). Dieses Überschwingen schlägt sich im hohen Maße auf den Beitrag der Messunsicherheit nieder, welcher sich – wie in Abbildung 4.7 aufgeführt – im zweistelligen Prozentbereich bewegt.

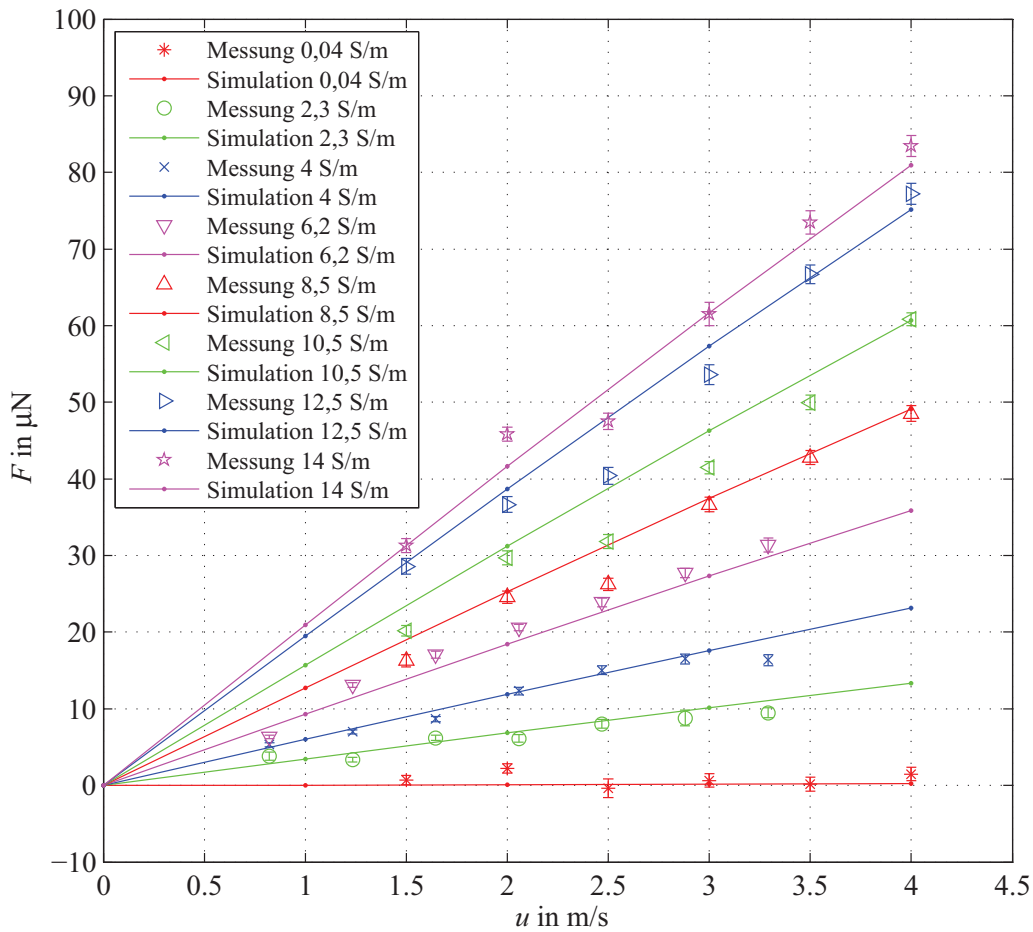


Abbildung 4.8: Aufbereitete Abbildung zur Darstellung des Resultats der Untersuchungen von Geschwindigkeits- und Leitfähigkeitseinfluss auf das Messsignal des Pendelprototyps. Im Gegensatz zur vorherigen Abbildung dient eine Veränderung an der Auswertemethode (siehe Abschnitt 4.3) als Grundlage der Berechnungen.

Um eine bereinigte Kurve zu erzeugen, bedient sich die vorliegende Arbeit zwei unterschiedlicher Auswertemethoden (siehe hierzu Abschnitt 4.3). Werden bei Methode 1 alle detektierten Messwerte in die Berechnung der Lorentzkräfte sowie der dazugehörigen Messunsicherheiten betrachtet, kommt bei Methode 2 eine andere Analysetechnik zum Tragen. Im Gegensatz zu Methode 1 wird hier der störende Beitrag des Überschwingens vernachlässigt und nur das stabile Plateau ausgewertet. Findet Methode 2 auf die oben aufgeführten Messwerte Anwendung so ergibt sich Abbildung 4.8.

Durch die starke Verringerung der Messunsicherheit der einzelnen Messserien sind die resultierenden Messkurven wesentlich besser zu interpretieren. Die Übersicht zeigt bis auf die Abweichungen bei der Geschwindigkeit von 2,5 m/s und den Leitfähigkeiten oberhalb von 8,5 S/m gute Übereinstimmungen mit den erwarteten Simulationsergebnissen.

Um eine generell gültige Aussage über die Qualität des Pendelprototypen zu erlangen wurden die gemessenen Kraftsignale mit der anliegenden Fließgeschwindigkeit innerhalb der Messstrecke normiert und gegenüber der elektrischen Leitfähigkeit des Modellfluids aufgetragen. Ist der Prototyp in sich konsistent muss laut Theorie eine lineare Funktion durch den Nullpunkt des Koordinatenursprung folgen. Wie Abbildung 4.9 zeigt kann auch dies durch die vorliegenden Untersuchungen bestätigt werden. Die hohen Messunsicherheiten für die Leitfähigkeitsbereiche größer 8,5 S/m erklären sich hierbei durch die zugrundeliegende Auswertung mittels Methode 1, bei der alle Messwerte in der Berechnung berücksichtigt wurden und in Korrespondenz mit Abbildung 4.7 stehen.

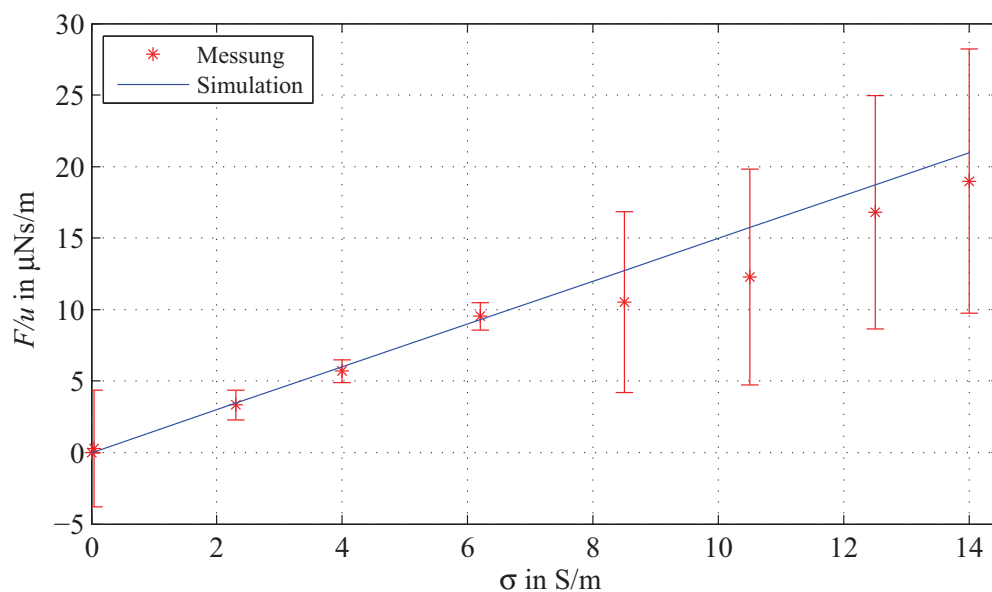


Abbildung 4.9: Diagramm repräsentiert die Abhängigkeit der geschwindigkeitsnormierten Lorentzkraft zur elektrischen Leitfähigkeit des Modellfluids. Erkennbar ist ein nahezu linearer Verlauf der Messwerte, welcher mit den im Hintergrund liegenden numerischen Simulationen (blaue Linie) korreliert.

Abschließend sei festzuhalten, dass die durchgeführten Untersuchungen den Nachweis der Abhängigkeit der Lorentzkraft von der elektrischen Leitfähigkeit des Modellfluids erbrachten. Hierfür wurden Messungen an acht verschiedenen Leitfähigkeiten bei einem Geschwindigkeitsbereich von 0,8 m/s - 4 m/s durchgeführt. Die Auswertungen ergaben ein lineares Verhalten der Leitfähigkeit zwischen der eingestellten elektrischen Leitfähigkeit gegenüber der erzielten Lorentzkraft.

4.2.3 Verhalten gegenüber Temperaturschwankungen

Während der durchgeführten Fluidmessungen – im Abschnitt 4.2.1 und 4.2.2 – musste immer wieder festgestellt werden, dass es vor allem bei höheren Fließgeschwindigkeiten zu Drifts im Messsignal gekommen war. Als Hauptgründe seien hierbei der Temperatureintrag der Pumpe, die größer werdende Wandreibung des Fluids sowie eine Steigerung der viskosen Fluidreibung aufgeführt, welche mit der Erhöhung der Fließgeschwindigkeit des Modellfluids einhergehen. Alle aufgeführten Effekte beruhen auf dem Anstieg der Fluidtemperatur und resultieren zum einen in einer Wärmestrahlung gegenüber den umgebenden Messkomponenten, wie einer Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit des Modellfluids.

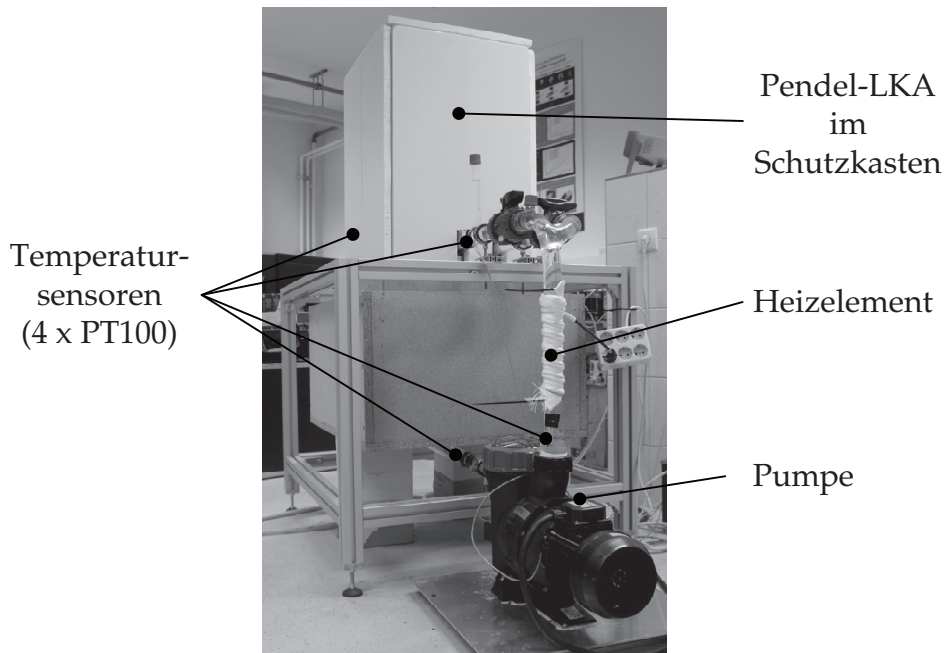


Abbildung 4.10: Aufbau des Versuches zur Ermittlung der Temperaturabhängigkeit des Lorentzkraft-Messsignals. Dargestellt sind die Hauptkomponenten des Versuches sowie die Platzierungen der vier Temperatursensoren.

Die generierte Wärmestrahlung führt zur leichten Erwärmung des Messaufbaus, was in Folge zu geringfügigen Längenänderungen und Spannungen in den verbauten Aluminiumkomponenten und letztendlich zur systematischen Beeinflussung der Lage des Pendels führt. Im vorliegenden Fall wird dieser Effekt keine weitere Beachtung finden, da analytische Berechnungen zeigten, dass die abgestrahlte Wärmemenge sehr hoch angesetzt werden müsste, um einen entsprechenden Beitrag zur Verschiebung des Signals zu leisten.

Wie die aufgeführten Experimente in Abschnitt 4.2.2 hingegen beweisen, besteht ein linearer Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit des Fluids gegenüber der gemessenen Lor-

entzkraft. Ändert sich demnach die Temperatur des Fluids resultiert dies in einem direkten Einfluss auf das Lorentzkraft-Signal, worin eine genauere Untersuchung des Verhaltens begründet liegt.

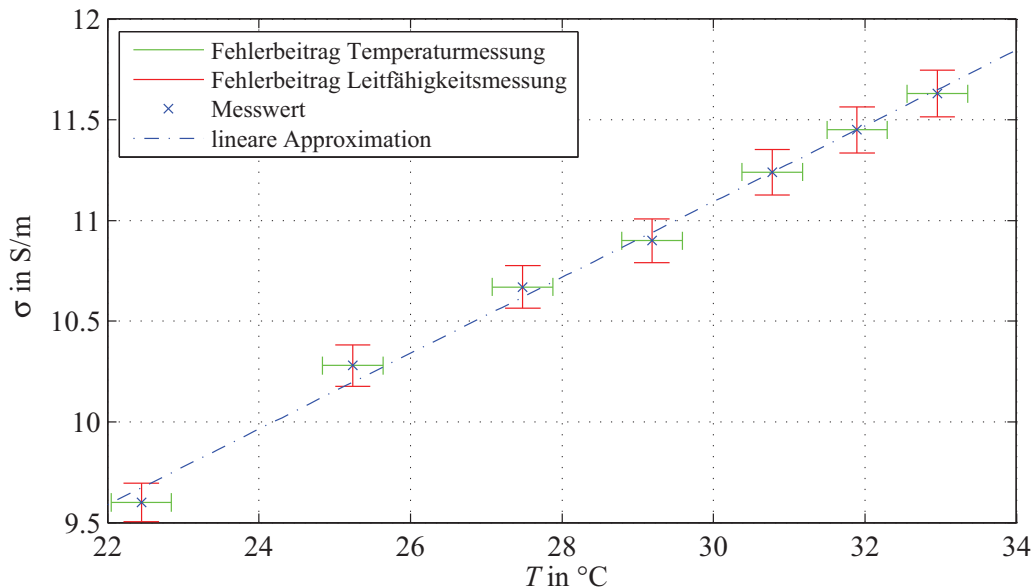


Abbildung 4.11: Das Diagramm repräsentiert die Einwirkung einer steigenden Fluidtemperatur auf die Leitfähigkeit des Modellfluids. Die dargestellten Messwerte zeigen einen beispielhaften Auszug der Untersuchungen des Temperaturbereiches von 22°C - 33°C.

Um eine systematische Überprüfung des Temperatureinflusses auf die Lorentzkraft durchzuführen, wurde der in Abbildung 4.10 dargestellte Versuchsaufbau mit einer regelbaren Heizung modifiziert. Ferner wurden vier Temperatursensoren des Typs PT100 entlang des Wasserumlaufkanals angeordnet. Ein Sensor wurde jeweils vor sowie nach der Pumpe, in direkter Nähe zur Messstelle und an einer der Pumpe gegenüberliegenden Stelle platziert.

Bevor die eigentlichen Lorentzkraft-Messungen begonnen, wurde das Temperaturverhalten des Modellfluids studiert. Hierzu wurde eine Probe des Wasserumlaufkanals entnommen und bei gleichzeitiger Beobachtung der Leitfähigkeit mittels einem Wärmetauscher erhitzt. Abbildung 4.11 zeigt das Resultat des Laborexperiments zur Eruiierung der Wirkung des Temperaturanstiegs gegenüber der Leitfähigkeitsänderung des Modellfluids. Die Messungen wurden hierbei mit dem mobilen Leitfähigkeitsmessgerät HI9835 [71] durchgeführt. Im untersuchten Temperaturbereich von 20°C - 40°C wurde eine lineare Abhängigkeit gegenüber der elektrischen Leitfähigkeit festgestellt.

Im Anschluss an die Voruntersuchungen begannen die eigentlichen Untersuchungen zur Überprüfung der Einwirkung der Temperatur auf den Pendelprototypen. Vor Beginn einer jeden Messung wurde die elektronische Heizung so lange bestromt bis das Fluid eine

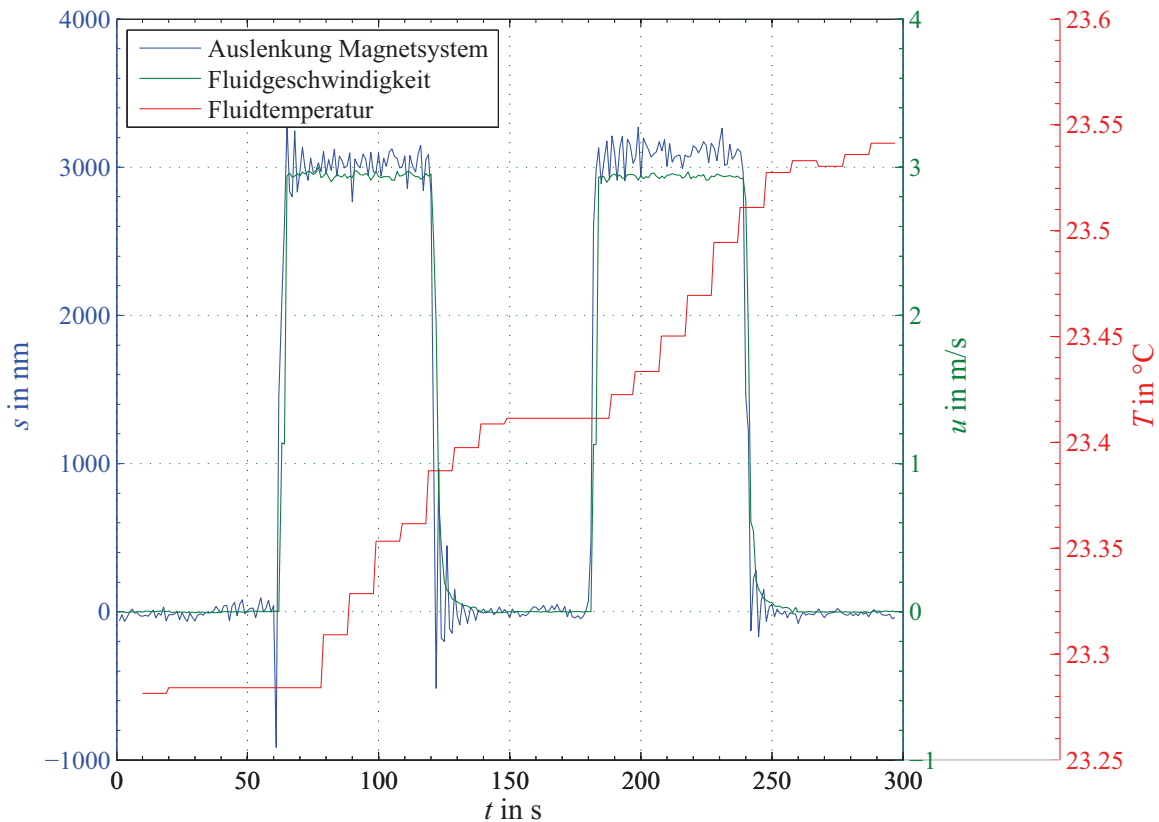


Abbildung 4.12: Das Diagramm zeigt das Auslenkungs-Temperatur-Verhalten des Pendelprototypen bei einer Fluidgeschwindigkeit von 3 m/s und einer eingestellten Grundleitfähigkeit von 10 S/m. Die mittlere Temperatur des Modellfluids beträgt in der Messstelle $23,4^{\circ}\text{C}$. Die blaue Kurve symbolisiert die Auslenkung des Magnetsystems und korreliert mit der grünen Kurve, welche die anliegende Fluidgeschwindigkeit repräsentiert. Die rote Kurve zeigt den Temperaturverlauf des Modellfluids in der Messstelle.

zuvor festgelegte Temperatur erzielte. Bei Erreichen der Temperatur starteten die Messungen mit einem 60-sekündigen Wechsel zwischen einer An- und Ausschaltphase des Fluidstromes. Abbildung 4.12 zeigt repräsentativ eine Systemantwort des Pendelprototyps bei einer eingestellten Fluidgeschwindigkeit von 3 m/s, einer Leitfähigkeit von 10 S/m und einer Fluidtemperatur von $23,4^{\circ}\text{C}$. Um eine Aussage über das Temperaturverhalten des Prototyps zu generieren, wurden die Tests für verschiedene Fluidtemperaturen wiederholt. Besonders beeindruckend ist das Verhalten des Systems bei einem Temperatursprung von $23,4^{\circ}\text{C}$ auf $36,3^{\circ}\text{C}$ (siehe Abbildung 4.13). An dieser Stelle sei nochmals erwähnt, dass während der Tests keine Veränderungen an den Systemparametern durchgeführt wurden. D.h., die Konzentration der Salzmenge des Modellfluids, wie auch die eingestellte Fließgeschwindigkeit blieb über die gesamte Untersuchungszeit konstant. Umso mehr erstaunt die Vergrößerung der detektierten Auslenkung des Magnetsystems.

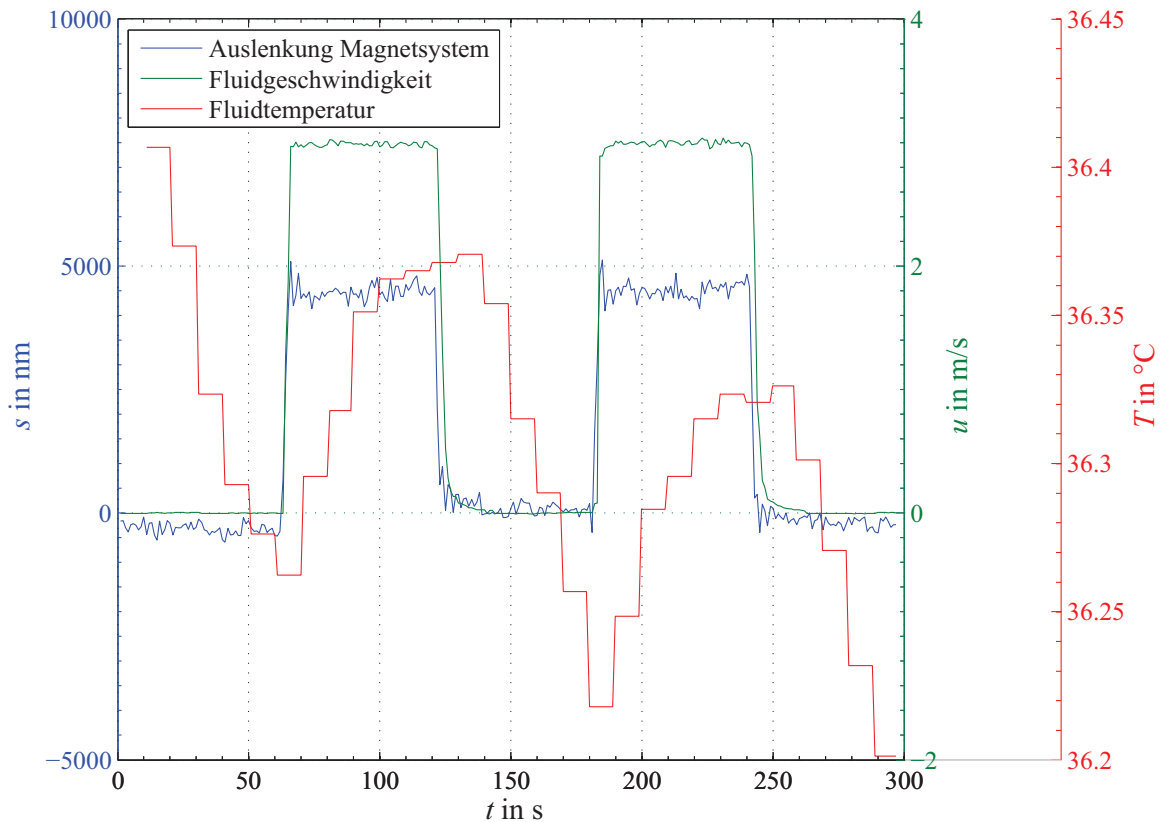


Abbildung 4.13: Das Diagramm zeigt das Auslenkungs-Temperatur-Verhalten des Pendelprototyps bei einer Fluidgeschwindigkeit von 3 m/s und einer eingestellten Grundleitfähigkeit von 10 S/m. Die mittlere Temperatur des Modellfluids beträgt in der Messstelle 36,3 $^{\circ}\text{C}$. Die blaue Kurve symbolisiert die Auslenkung des Magnetsystems und korreliert mit der grünen Kurve, welche die anliegende Fluidgeschwindigkeit repräsentiert. Die rote Kurve zeigt den Temperaturverlauf des Modellfluids in der Messstelle.

Betrug diese im Fall von 24 $^{\circ}\text{C}$ Fluidtemperatur eine Auslenkung von ≈ 3000 nm, resultiert aufgrund der Erhöhung der Fluidtemperatur auf 36,3 $^{\circ}\text{C}$ eine Auslenkung von ≈ 4300 nm. Abbildung 4.14 zeigt die ermittelte Temperatur-Lorentzkraft-Kurve für ein exemplarisches Messset auf acht verschiedenen Fluidtemperaturen. Die tiefste, wie auch die höchste Temperatur entsprechen dabei der äquivalenten Lorentzkraft aus den Beispielen der Abbildungen 4.12 und 4.13. Im Vergleich zu den Fluiduntersuchungen der Probe der Modellflüssigkeit muss auch im vorliegenden Fall festgestellt werden, dass die Temperatureinwirkung einen linearen Einfluss auf das Messsignal besitzt.

Es sei daher erwähnt, dass die angestrebten Messungen in der Industrie nur mit einer gleichzeitigen Temperatureaufnahme des zu vermessenden Fluids – zur Kompensation der Leitfähigkeit – sinnvolle Ergebnisse liefern werden.

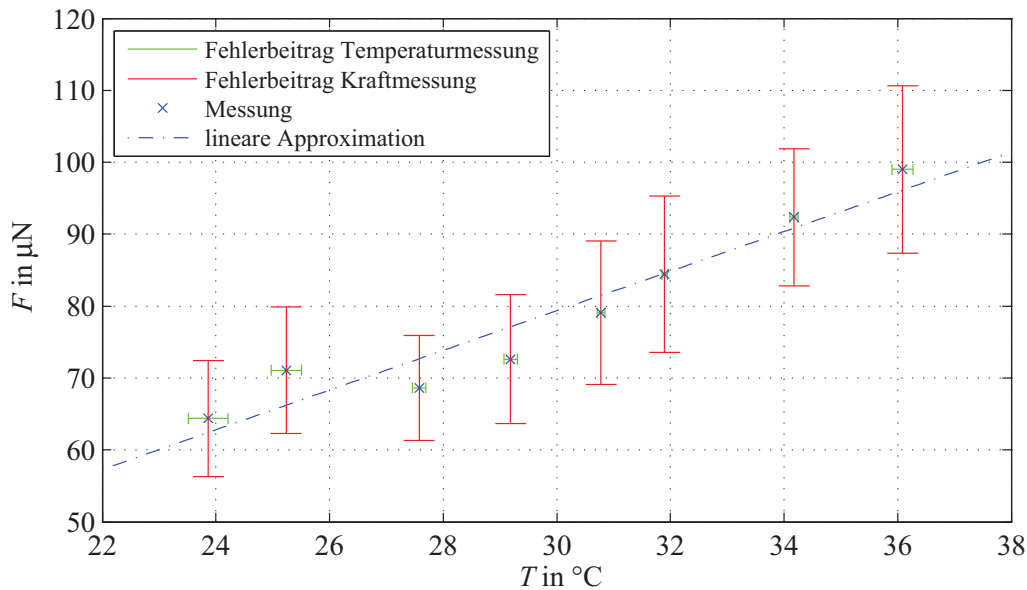


Abbildung 4.14: Abbildung zeigt das Kraft-Temperatur-Verhalten des Pendelprototyps und damit die Einwirkung der Fluidtemperatur auf die resultierende Messkraft.

Schlussfolgernd muss dem Pendelprototyp eine hohe Sensitivität gegenüber Temperatureinflüssen attestiert werden. Bereits eine Erhöhung von 6 K zieht eine Erhöhung von 10% der elektrischen Leitfähigkeit mit sich, was bei einer gewünschten guten Reproduzierbarkeit der Messungen nicht akzeptabel ist. So wird bei zukünftigen Untersuchungen empfohlen auf einem parallelen Weg die Fluidtemperatur zu erfassen und mit deren Hilfe eine Kompensation der Leitfähigkeit herbeizuführen, um eine Vergleichbarkeit der gemessenen LKA-Werte zu gestatten.

4.3 Unsicherheitsbetrachtung der Messergebnisse

Bereits in den Diagrammen der vorherigen Abschnitte als Unsicherheit (rote Balken) dargestellt, hat dieser Absatz die Herleitung der Unsicherheit des Pendelprototyps zum Gegenstand. Es sei festgehalten, dass es aufgrund einer Vielzahl nicht beherrschbarer Messbedingungen im Prinzip nicht möglich ist exakt zu messen, sodass zu jedem erzielten Messwert eine Messabweichung besteht. So muss bei jeder Messung einer physikalischen Größe „...auch eine quantitative Angabe zur Qualität des Ergebnisses erfolgen, damit der Benutzer dessen Zuverlässigkeit beurteilen kann.“ [72]. In der vorliegenden Arbeit wurde die Auswertung der Messdaten mittels „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ durchgeführt. Das Standardwerk beschreibt hierbei allgemeine Regeln zur Ermittlung und Angabe der Messunsicherheit und klärt metrologische Begriffe, wie sie im vorliegenden Abschnitt verwendet werden.

Da in den meisten Fällen die eigentlich gesuchte Messgröße nicht direkt gemessen werden kann und somit aus mehreren Größen besteht, findet zu Beginn einer jeden Unsicherheitsbetrachtung die Formulierung eines Modells statt. Im vorliegenden Fall soll Abbildung 4.15 eine Hilfestellung zur Herleitung der für den Pendelprototyp gültigen Modellgleichung 4.1 liefern.

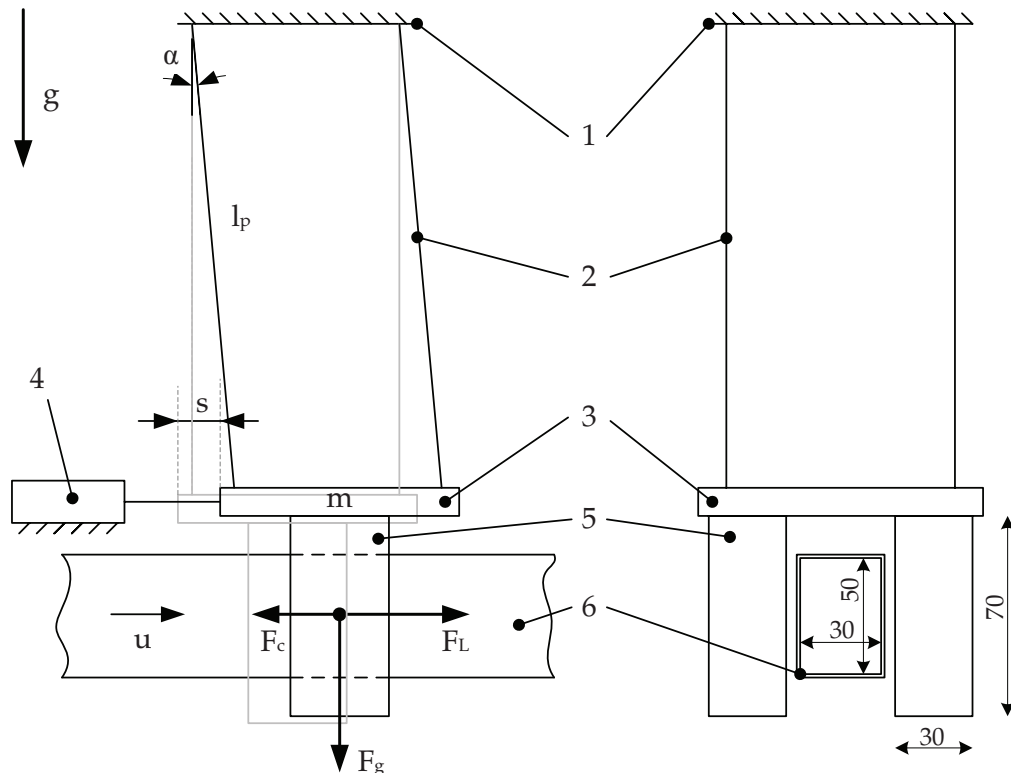


Abbildung 4.15: Schemata der wichtigsten Komponenten des Pendelprototyps: (1) Messgestell; (2) Wolframdraht; (3) Fixierungsplatte mit Messreflektor; (4) Interferometer; (5) NeFeB-Magnet sowie (6) Fluidkanal. Ferner sind die Kräfte und geometrischen Abmessungen des LKA-Systems aufgeführt.

Die Modellgleichung beschreibt den Zusammenhang zwischen den bekannten Einflussgrößen und der Messgröße und führt im vorliegenden Fall zu dem Momentengleichgewicht:

$$0 = F_L \cdot l_p \cdot \cos(\alpha) - F_c \cdot l_p \cdot \cos(\alpha) - F_g \cdot s. \quad (4.1)$$

Im vorliegenden Fall interessiert einzig die Lorentzkraft F_L , wodurch eine Umstellung der Gleichung nötig wird. Während der Umstellung erfährt die Gleichung sodann einige Vereinfachungen. Da bei den in Abschnitt 4.2.ff. dargestellten Untersuchungen nur sehr kleine Auslenkungen (s) detektiert wurden, werden schlussfolgernd sehr kleine Winkel (α) erwartet, wodurch sich $\cos(\alpha) \approx 1$ ergibt. Durch das sehr große Verhältnis zwischen Drahtlänge zu Drahtdurchmesser wird darüber hinaus die Federkraft der Wolframdrähte

vernachlässigt. Unter Betrachtung aller Maßnahmen ergibt sich die endgültige Modellgleichung zur Berechnung der Lorentzkraft zu:

$$F_L = m \cdot g \cdot \frac{s}{l_p} \quad (4.2)$$

Nach erfolgreicher Herleitung der Modellgleichung 4.2 vollzieht sich die Berechnung des arithmetischen Mittelwertes der Messgröße. Im vorliegenden Fall muss jedoch zunächst ein geeignetes Auswerteverfahren zur Bestimmung des Mittelwertes gefunden werden. Dies ist insofern wichtig, da wie in Abbildung 4.4 bis 4.6 ein großes Überschwingen des Pendelsystems vorliegt. Abbildung 4.16 zeigt am Beispiel einer Vermessung der Auslenkung des Magnetsystems bei einer Fließgeschwindigkeit von 2,5 m/s und einer Leitfähigkeit von 12,5 S/m, wie die unterschiedlichen Methoden angewandt wurden.

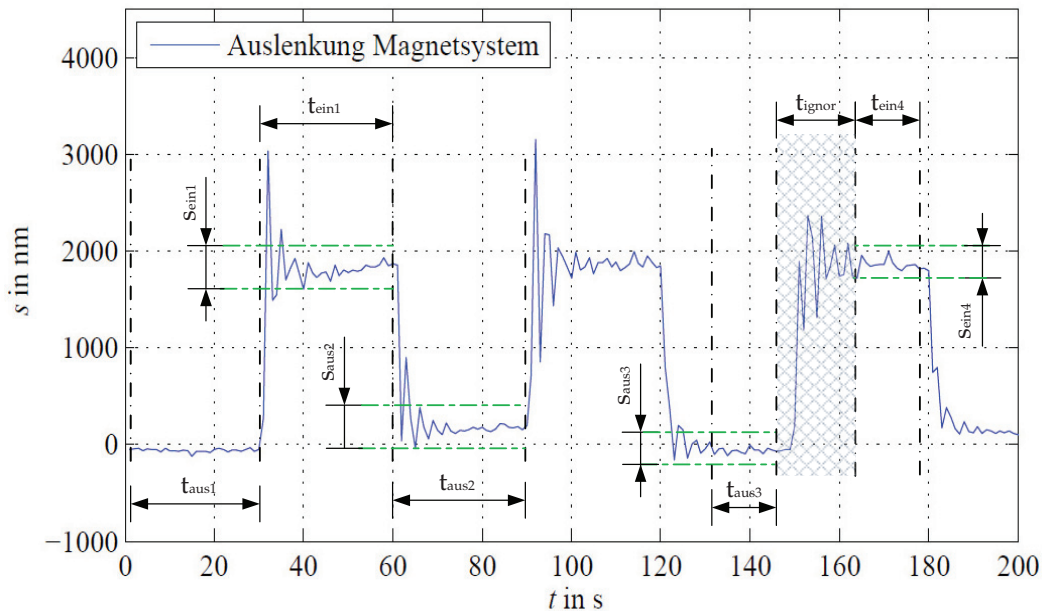


Abbildung 4.16: Detaildarstellung der zur Anwendung gekommenen Auswertemethoden. Linke Hälfte der Abbildung repräsentiert die Methode 1 bei der alle Messwerte in die Berechnung einbezogen werden. Die rechte Hälfte zeigt Methode 2, bei der das Überschwingen des Pendels nicht in die Berechnungen einbezogen wird. So werden bei Detektierung des Sprunges jeweils fünf Messwerte vor und zehn Messwerte nach dem Sprung vernachlässigt.

Grundsätzlich wird – wie in Abschnitt 4.2.2 aufgezeigt – zwischen zwei Auswertestrategien unterschieden. Während Methode 1 alle aufgezeichneten Messwerte zur Berechnung der Lorentzkraft heranzieht, werden in Methode 2 lediglich stabile Plateaus ausgewertet. Dies ist insofern wichtig, da die stochastischen Überschwingungen der Messungen wegfallen und eine bessere Vergleichbarkeit der Resultate erlauben.

Nach der Wahl der Auswertemethode erfolgt die Bestimmung der Unsicherheit durch oben aufgeführten Leitfaden. Nach Bestimmung des Mittelwertes (siehe Gleichung 4.3) – auch als Erwartungs- beziehungsweise Schätzwert der Messgröße bekannt – erfolgt die Bestimmung der empirischen Standardabweichung der Messgröße mittels Gleichung 4.4.

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (4.3)$$

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2 \quad (4.4)$$

Sie charakterisiert die Qualität des Messsystems und stellt die Grundlage zur Berechnung der empirischen Standardunsicherheit dar. Jene Größe beschreibt sich durch Gleichung 4.5 und charakterisiert die Qualität des Messwertes.

$$u_m = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4.5)$$

Um eine Aussage über die sich ergebende Unsicherheit des Gesamtsystems zu generieren wird im letzten Schritt mittels Gleichung 4.6 die kombinierte Standardunsicherheit bestimmt. Sie ist die quadratische Aufsummierung der einzelnen empirischen Standardunsicherheiten sowie deren Gewichtung am Beitrag der Gesamtunsicherheit. Die kombinierte Unsicherheit drückt aus, „... daß für eine gegebene Meßgröße [...] eine unendliche Menge von um das Ergebnis gestreuten Werten gibt, die mit allen Daten vereinbar sind und der Meßgröße mit verschiedenen Graden von Glaubwürdigkeiten zugewiesen werden können“ [72].

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (4.6)$$

Beispielhaft wird in nachfolgender Gleichung 4.7 das Resultat der Herleitung der kombinierten Unsicherheit für die Modellgleichung des Pendelprototyps dargestellt.

$$u_{fl} = \sqrt{\left(\frac{g \cdot s \cdot u_m}{l_p} \right)^2 + \left(\frac{m \cdot s \cdot u_g}{l_p} \right)^2 + \left(\frac{m \cdot g \cdot u_s}{l_p} \right)^2 + \left(-\frac{m \cdot s \cdot g \cdot u_l}{l_p^2} \right)^2} \quad (4.7)$$

Ferner repräsentiert Tabelle 4.2 eine exemplarische Unsicherheitsberechnung für eine willkürlich gewählte Vermessung des Modellfluids bei einer Fließgeschwindigkeit von 2,5 m/s und einer Leitfähigkeit von 12,5 S/m. Zu sehen sind die einzeln aufgeführten und zur Berechnung der Unsicherheit notwendigen Zahlenwerte sowie die Auswirkung der in Abbildung 4.16 vorgestellten Auswertemethoden.

Es bleibt festzuhalten, dass bei richtiger Wahl der Auswertestrategie die relative Messunsicherheit von 18,83% (Methode 1) auf 2,75% (Methode 2) verringert werden kann, was zugleich eine bessere Analyse der Messreihen untereinander gestattet (siehe Abbildung 4.8). Im Allgemeinen kann den von Grund auf neu konzipierten Pendelprototypen eine gute Messqualität attestiert werden, welche jedoch noch weiteren Verbesserungen bedarf.

Tabelle 4.2: Exemplarische Messunsicherheitsbetrachtung des Pendelprototyps. Die aufgeführten Werte entsprechen der in Abbildung 4.2.2 exemplarisch dargestellten Messreihe bei einer anliegenden Fließgeschwindigkeit von 2,5 m/s sowie einer Leitfähigkeit von 12,5 S/m. Die Abkürzung STU steht hierbei für Standardunsicherheit. Der Wert der Erdbeschleunigung wurde aus dem SchwebereinFORMATIONSSYSTEM der Physikalisch-Technischen-Bundesanstalt entnommen [73].

Parameter	Mittelwert	empirische STU	Fehlertyp	kombinierte STU
m	1,286 kg	$2,89 \cdot 10^{-4}$ kg	A	-
g	9,810151 m/s^2	$1 \cdot 10^{-5}$ m/s^2	B	-
l_p	0,56 m	0,0029 m	B	-
$s_{Methode1}$	1,638 μm	0,308 μm	A	-
$s_{Methode2}$	1,794 μm	0,048 μm	A	-
$F_{L-Methode1}$	36,914 μN	-	-	$\pm 6,950$ μN
$F_{L-Methode2}$	40,416 μN	-	-	$\pm 1,110$ μN

Ferner sei erwähnt, dass selbst bei geringen Messabweichungen keine Garantie besteht, dass die Abweichung des Messergebnisses um den Erwartungswert gering ausfällt. Daraus schließt sich, dass es sich bei den ermittelten Werten lediglich um Schätzwerte für die wahrscheinliche Nähe des zu den vorhandenen Kenntnissen passenden besten Wert handelt [72].

4.4 Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerung

Um eine abschließende Überprüfung der Qualität des Messsignals des Pendelprototyps durchzuführen bedient sich der vorliegende Abschnitt der Gleichung 2.13. Formt man diese nach der Kalibrierkonstante C um und stellt das Ergebnis über die einzeln untersuchten Geschwindigkeiten in einem Diagramm dar, so müsste laut Theorie eine horizontale Linie schlussfolgern. Abbildung 4.17 bestätigt diese These und zeigt die Übereinstimmung mit den numerischen Werten der Simulation. Es bleibt festzuhalten, dass trotz teilweise hoher Messunsicherheiten die Qualität des Signals bis auf eine Ausnahme über den gesamten Untersuchungsbereich um die Simulationswerte fluktuiert, was dem Pendelprototypen ein gutes Messverhalten attestiert und nochmals die hervorragende Messleistung des ersten Prototyps aufzeigt.

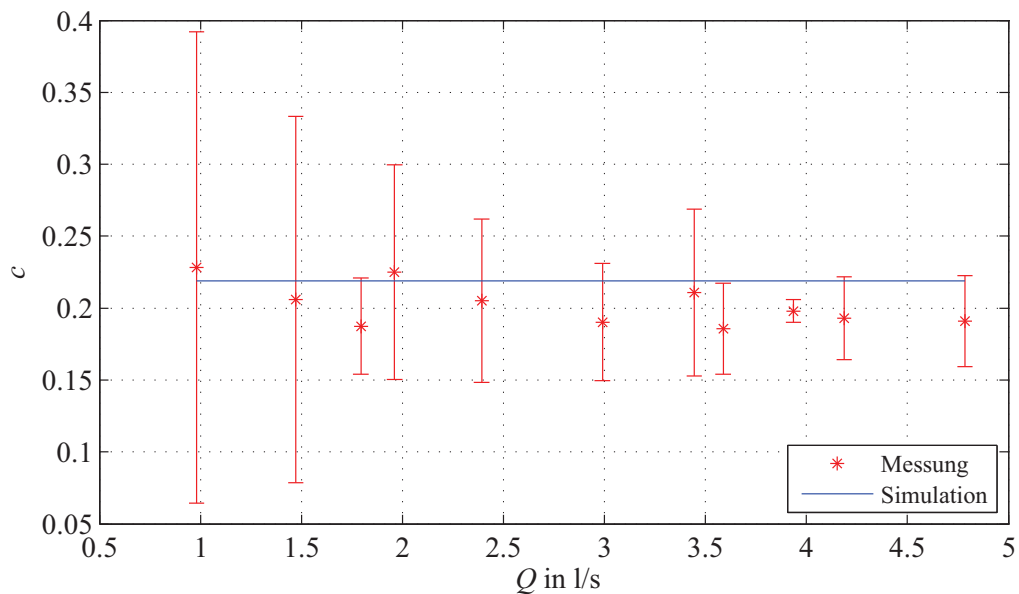


Abbildung 4.17: Abbildung zeigt die Kalibrierkonstante des Pendelprototyps über den aufgeführten Geschwindigkeitsbereich. Hierdurch lässt sich die Qualität der Messungen ablesen. Im vorliegenden Fall korreliert die Konstante gut mit der numerischen Simulation (blaue Linie).

Zusammenfassend wurde im vorliegenden Kapitel die Durchführung von vier unterschiedlichen Experimenten am Pendelprototypen dargestellt. Hierbei wurde bei jedem Versuch eine Messdatenanalyse durchgeführt, wobei die jeweiligen Erwartungswerte sowie die dazugehörigen Messunsicherheiten determiniert wurden.

Nach erfolgreicher Validierung mittels Solid-Body-Approximation, wurde dem LKA-System bei Fluiduntersuchungen eine Abhängigkeit der gemessenen Lorentzkraft gegenüber der Veränderung von Fließgeschwindigkeit und Leitfähigkeit attestiert. Neben der positiv herauszustellenden guten Funktionsweise des Pendelprototyps musste nichtsdestotrotz beobachtet werden, dass negative Aspekte dominieren. So zeigen vor allem Abbildungen 4.4 und 4.5 das starke Überschwingen des Pendels nach dem Ein- und Ausschaltvorgang der Pumpe, was zu einer Erhöhung der Messunsicherheit führt.

Des Weiteren zeigen die selben Abbildungen den durch Temperaturerhöhung herbeigeführten Drift des Messsignals. Wohingegen der Temperatureinfluss zu systematischen Fehlern führt, besteht ein noch viel gewichtigeres Problem. So verdeutlicht Abbildung 4.4 das zusätzliche Auftreten von Inkonsistenzen zwischen den einzelnen Messphasen, deren Ursache nur schwer nachvollzogen werden kann. Zum einen können konstruktionsbedingte Ursachen zu Grunde liegen, zum anderen Fehler in der Auswerteeinheit des Interferometers. Hierbei ist vor allem an Lamda-Halbe-Sprünge zu denken, die ein Verzählen der Interferenzstreifen bewirken und somit zu fehlerhaften Wegdetektierungen führen.

Im Hinblick auf die oben aufgeführten Nachteile sowie die in Abschnitt 3.4.2 postulierten Grundprobleme des Pendelprototyps schließt sich der Wunsch nach einer verbesserten Neukonstruktion, in der alle aufgeführten Mängel berücksichtigt und in Folge verhindert werden können, an.

Versuche am EMK-Prototypen

In Anlehnung an Kapitel 4 befasst sich der vorliegende Teil mit der Analyse und Interpretation der mittels EMK-Prototyp erzielten Messergebnisse. Zu Beginn des Kapitels wird auf die LDA-basierende Charakterisierung des Fluidsystems eingegangen. Gefolgt von der Präsentation der Fluiduntersuchungen werden im Speziellen die Einflüsse von Geschwindigkeits- und Leitfähigkeitsänderungen des Modellfluids, die Abhängigkeit vom Fluidprofil sowie der Einfluss eines sich ändernden Magnetfeldes gegenüber der Lorentzkraft dargestellt. Ferner werden die erzielten Messleistungen mit den Leistungen des Pendelprototyps sowie mit kommerziellen Durchflussmesssystemen verglichen. Abschließend erfolgt eine Betrachtung zur Unsicherheit des Prototyps sowie ein Resümee der erzielten Messleistungen.

5.1 Charakterisierung des Fluidsystems

Beruhend auf den Resultaten des Pendelprototyps musste festgestellt werden, dass eine Überprüfung der Abhängigkeit der Lorentzkraft gegenüber den vorherrschenden Fluidprofilen aufgrund konstruktiver Unzulänglichkeiten nicht durchgeführt werden konnte. So war durch die starke Verwirbelung des Fluides keine Einstellung der Fluidprofile innerhalb der Messstrecke möglich. Hieran anknüpfend wurde ein neuer – wohl definierter – Wasserumlaufkanal konzipiert, mit dessen Hilfe zeitlich konstante Fluidprofile verwirklicht werden konnten. Das oberste Ziel der in Abschnitt 3.5 dargestellten Auslegung war eine Realisierung von unterschiedlichen Fluidprofilen stromabwärts der 1,5 m langen Messstrecke.

Hintergrund der Anstrengungen fußt auf der zugrundeliegenden Theorie der LKA [6]. Hier wird eine Abhängigkeit der Lorentzkraft gegenüber dem anliegenden Fluidprofil beschrieben. Demnach ergibt sich die Lorentzkraft zu:

$$F_L = -\frac{45\pi^2}{256} \frac{\sigma v_0 B_0^2 R^4}{L} S. \quad (5.1)$$

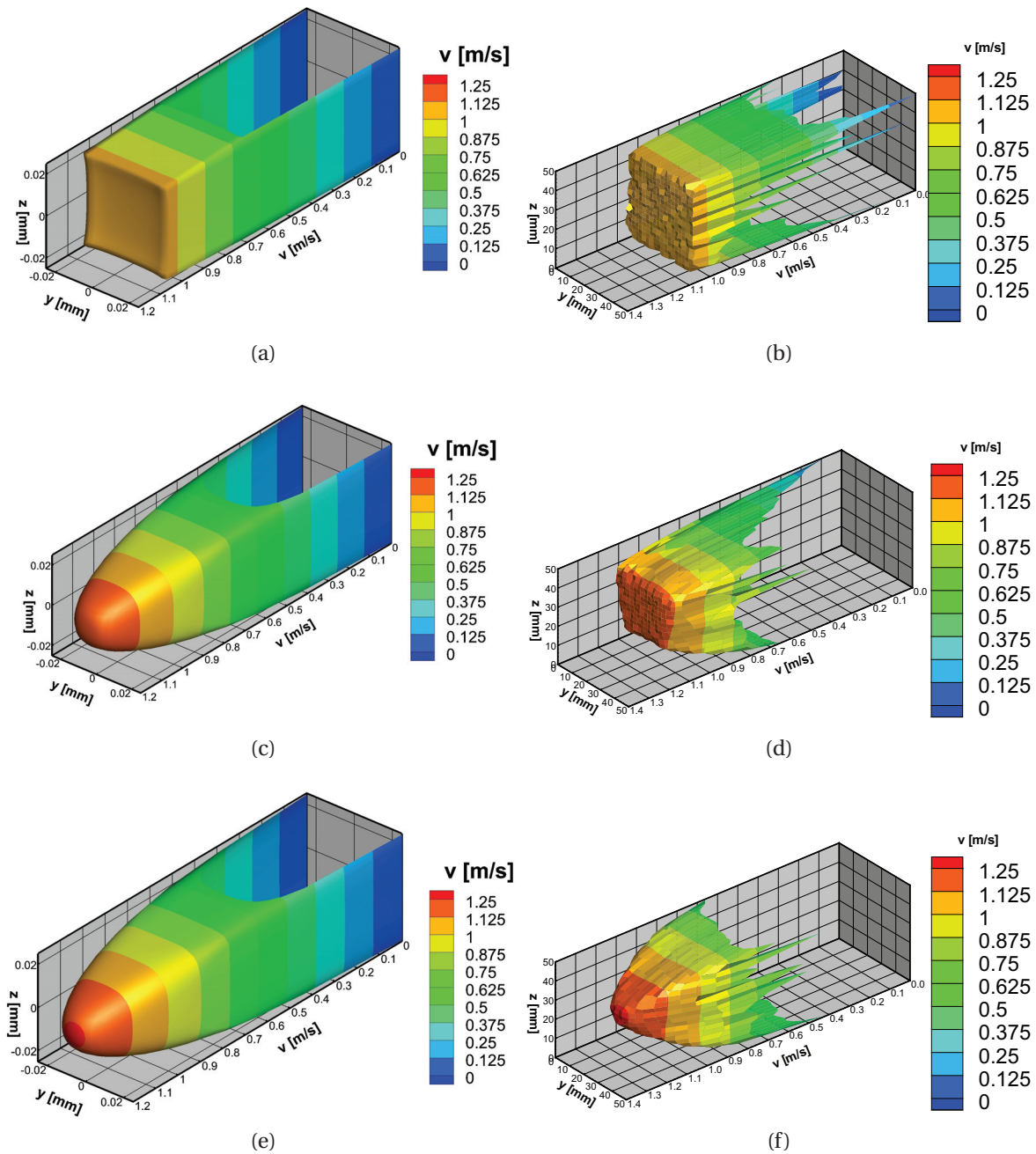


Abbildung 5.1: Vergleich der Fluidprofile der untersuchten Messstrecke des Wasserumlaufkanals bei einer eingestellten mittleren Fließgeschwindigkeit von $u = 1$ m/s. Die einzelnen Abbildungen zeigen auf der linken Hälfte das erwartete Fluidprofil basierend auf numerischen Berechnungen durch *FLUENT* [45]. Die rechte Hälfte hingegen präsentiert die mittels LDA vermessenen Fluidprofile. Beginnend vom Übergang der Düse zur Messstrecke wurden die Messungen bei $x = 30$ mm (a, b), $x = 750$ mm (c, d) und $x = 1470$ mm (e, f) durchgeführt.

Hierbei repräsentiert σ die elektrische Leitfähigkeit des Mediums, B_0 die magnetische Flussdichte des anliegenden Magnetfeldes, R den Radius des betrachteten Rohrquerschnittes und L die charakteristische Länge, welche im vorliegenden Fall den Radius der Magnetspule angibt. Der bedeutendste Parameter verbirgt sich hinter S , der sogenannten Shape-Funktion. Sie beschreibt auf mathematischem Wege die unterschiedlich denkbaren Fluidprofile und zeigt durch die bestehende multiplikative Verknüpfung mit der Gleichung 5.1 den direkten linearen Einfluss auf die sich ausbildende Lorentzkraft.

Um zu überprüfen, ob und inwieweit eine Übereinstimmung zur zugrundeliegenden Theorie besteht, ist zunächst eine Vermessung der Geometrie der Messstrecke durchzuführen. Hierbei wird gleichzeitig geklärt ob alle in Abschnitt 3.5 durchgeführten Untersuchungen zur Findungen der bestmöglichen Kanalgeometrie einen positiven Beitrag gefunden haben.

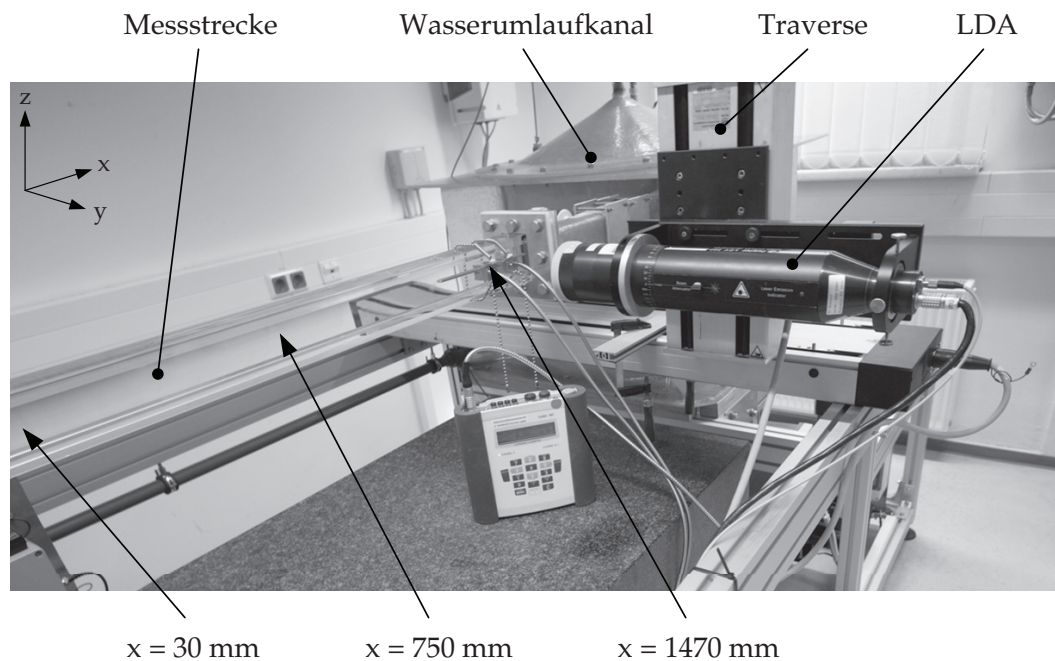


Abbildung 5.2: Darstellung des LDA-Experiments zur Überprüfung der Fluidcharakteristik innerhalb der Messstrecke des Wasserumlaufkanals. Die Variable x kennzeichnet hierbei den jeweiligen Messort entlang der 1,5 m langen Messstrecke.

Zur Validierung der in der Messstrecke vorherrschenden Fluidprofile wurde eine konstante mittlere Fließgeschwindigkeit von $u = 1$ m/s eingestellt und mittels der in Abschnitt 3.3.3 beschriebenen LDA vermessen. Hierzu wurde eine Traversiereinrichtung aufgebaut, welche eine Abtastung der Messstrecke an drei verschiedenen Messorten mit jeweils einem Netz von 21×21 Messpunkten erlaubte. Abbildung 5.2 zeigt den Aufbau des Experimentes sowie die Messorte der LDA-Messungen. Beginnend von dem Übergang der Düse

in die 1,5 m lange Messstrecke wurden im Bereich des Einlaufes ($x = 30$ mm), der Mitte der Teststrecke ($x = 750$ mm) sowie an deren Auslauf ($x = 1470$ mm) Profilmessungen durchgeführt. Abbildung 5.1 gibt einen Überblick über die erzielten Resultate der Messungen.

Beruhend auf den numerischen Untersuchungen mittels *FLUENT*, kann dem Kanal, trotz der relativ geringen räumlichen Auflösung von 21×21 Messpunkten pro Messstelle, ein qualitativ gutes Strömungsverhalten attestiert werden. Aufgrund der großen Geschwindigkeitsgradienten am Randbereich sollte bei künftigen Untersuchungen die örtliche Auflösung höher gewählt werden. Hierin liegt auch die Abweichung der mittleren Fließgeschwindigkeit begründet (siehe Tabelle 5.1). Des Weiteren ist eine deutliche Veränderung des Fluidprofils mit wachsender Messstreckenlänge zu erkennen. Beschreibt die Fluidströmung anfangs ein Kolbenprofil, kommt es im Verlauf zu Abflachungen an den Randbereichen, worauf sich am Ende der Messstrecke ein quasi-parabolisches Fluidprofil ausbildet. Der Nachweis zur Untersuchung der Abhängigkeit der Lorentzkraft gegenüber dem Fluidprofil kann somit mit dem vorliegenden Wasserumlaufkanal durchgeführt werden.

Tabelle 5.1: Resultat der LDA-Untersuchungen an der 1500 mm langen Messstrecke des EMK-Prototyps. Aufgeführt sind die in Abbildung 5.2 dargestellten Messstellen und deren gemessene Mittel- und Maximalwerte für die Fließgeschwindigkeit (Abbildung 5.1) sowie deren Turbulenzgrad.

Messort [mm]	$v_{mittel}[m/s]$	$v_{max}[m/s]$	Tu_{mittel} [%]	Tu_{max} [%]
$x = 30$	1,0658	1,0721	2,0376	3,6500
$x = 750$	1,1142	1,1549	3,7925	19,7000
$x = 1470$	1,0981	1,2662	6,5126	21,4200

Der quantitative Vergleich der einzelnen Messorte untereinander wird in Tabelle 5.1 angestrengt. Beruhend auf den erzielten Messdaten wird die in [74] postulierte stetige Entwicklung der maximalen Fließgeschwindigkeit bestätigt. Im vorliegenden Fall beträgt der Unterschied zwischen den Bereichen des Ein- und Auslaufes der Messstrecke 18,10%. Ferner soll der geringe Turbulenzgrad (Tu) der Messstrecke erwähnt sein, welcher über die gesamte Länge der Messstrecke im Mittel nicht über 10% steigt. Hierdurch wird ein weiteres Mal die gute Wirkungsweise des gesamten Wasserumlaufkanals bestätigt.

5.2 Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Lorentzkraft

In Anlehnung an Abschnitt 4.2 werden in diesem Teil der Arbeit die unterschiedlichen Einflussfaktoren auf die sich entwickelnde Lorentzkraft untersucht. Neben den Auswirkungen von Geschwindigkeits- und Leitfähigkeitsänderungen werden in diesem Abschnitt

die Reaktion des Systems auf sich ändernde äußere Randbedingungen untersucht, wie sie bei Variation des Magnet- beziehungsweise Geschwindigkeitsfeldes auftreten.

5.2.1 Einwirkung durch Geschwindigkeitsänderungen des Fluids

Wie einleitend erwähnt steht im vorliegenden Abschnitt die Überprüfung der Abhängigkeit der Lorentzkraft von der anliegenden Strömungsgeschwindigkeit des Modellfluids im Mittelpunkt. Die Untersuchungen dienen hierbei sogleich als Funktionsnachweis des in Abbildung 3.20 dargestellten EMK-Prototypen. Im Gegensatz zu den Voruntersuchungen am Pendelprototyp wurde im vorliegenden Fall auf eine Solid-Body-Approximation verzichtet und auf die mittels *COMSOL* generierten numerischen Vorbetrachtungen, beruhend auf den Vorhersagen der Lorentzkraft bei dem Pendelprototyp, vertraut.

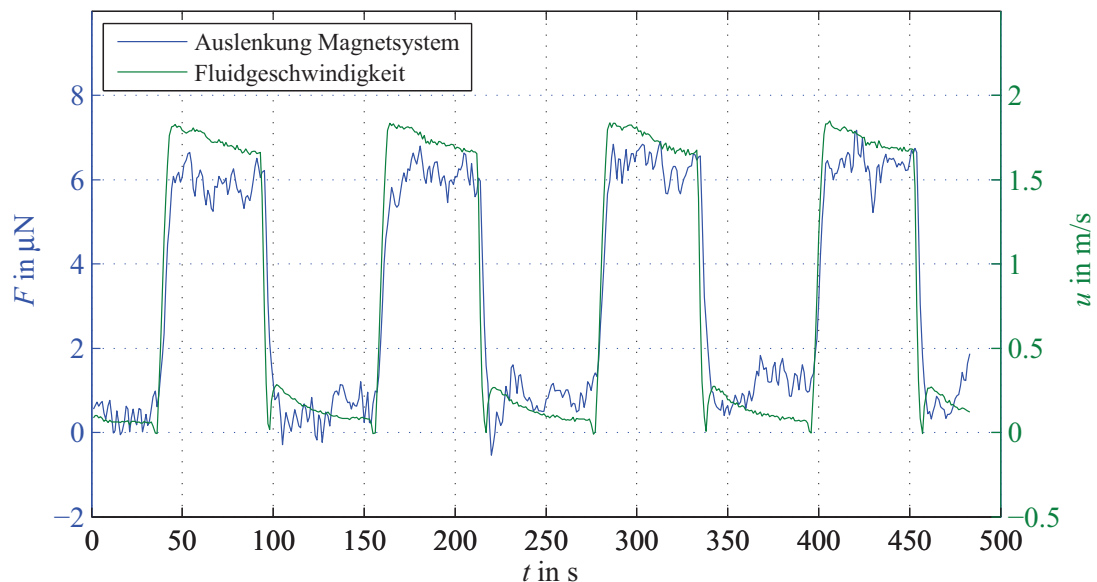


Abbildung 5.3: Exemplarisches Messsignal für eine Vermessung des Fluides bei einer Pumpendrehzahl von 350 1/min und einer elektrischen Leitfähigkeit des Fluids von 2 S/m. Die blaue Kurve repräsentiert die wirkende Lorentzkraft auf das Magnetsystem, die grüne Kurve die Geschwindigkeit des Fluids innerhalb der Messstrecke.

Abbildung 5.3 zeigt den exemplarischen Verlauf der Vermessung des Modellfluids bei einer Pumpendrehzahl von 350 1/min und einer elektrischen Leitfähigkeit von 2 S/m. Im Vergleich zu den Untersuchungen mit dem Pendelprototyp (siehe Abschnitt 4.2.1) wird ersichtlich, dass es unter der vorliegenden Anordnung zu keinem Überschwingen des Messsignals kommt. Dies ist ein entscheidender Vorteil des neuen Prototyps. So ergibt sich damit der Wegfall unterschiedlicher Auswertemethoden, wodurch die Messwertqualität deutlich zunimmt. Die aufgeführten Fakten beweisen eindeutig den Entwicklungsfortschritt des neuen Prototyps. So können mit ihm erstmals reproduzierbare Messergeb-

nisse, selbst für sehr geringe Produkte aus Fließgeschwindigkeit und elektrischer Leitfähigkeit des Modellfluids, detektiert werden.

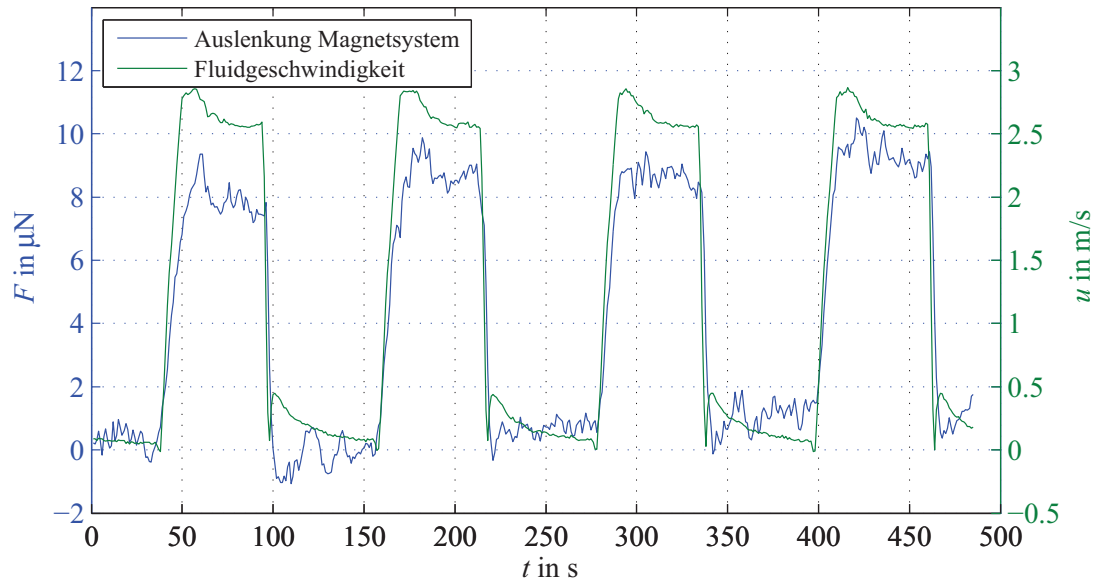


Abbildung 5.4: Exemplarisches Messsignal für eine Vermessung des Fluides bei einer Pumpendrehzahl von 550 1/min und einer elektrischen Leitfähigkeit von 2 S/m. Die blaue Kurve repräsentiert die wirkende Lorentzkraft auf das Magnetsystem, die grüne Kurve die Geschwindigkeit des Fluids innerhalb der Messstrecke.

Nach erfolgreicher Überprüfung der Funktionsweise, widmeten sich weiterführende Tests der Überprüfung der Abhängigkeit der Lorentzkraft von der Fließgeschwindigkeit des Modellfluids. Abbildung 5.4 zeigt den Lorentzkraftverlauf bei konstanter elektrischer Leitfähigkeit, wie bei der vorangegangenen Untersuchung, jedoch einer gesteigerten Pumpendrehzahl von 550 1/min. Während bei einer Pumpendrehzahl von 350 1/min eine Lorentzkraft von $\approx 5,5 \mu\text{N}$ detektiert wird, kommt es bei der Erhöhung der Drehzahl auf 550 1/min zu einer Lorentzkraft von $\approx 8,1 \mu\text{N}$.

Abbildung 5.5 zeigt die Zusammenfassung aller Geschwindigkeitsvermessungen im Bereich von 0,2 m/s bis 2,7 m/s bei einer konstanten elektrischen Leitfähigkeit von 2 S/m. Die Messserie zeigt beim Einfügen einer linearen Approximation ein gutes lineares Verhalten des LKA-Systems bei gleichzeitigem Auftreten von geringen Messunsicherheiten. Es bleibt festzuhalten, dass auch bei dem vorliegenden Prototypen eine Korrelation zwischen gemessenen Lorentzkraft und anliegender Fließgeschwindigkeit besteht und überdies eine deutliche Verbesserung des Messsignals im Vergleich zum Pendelprototypen festgestellt werden kann.

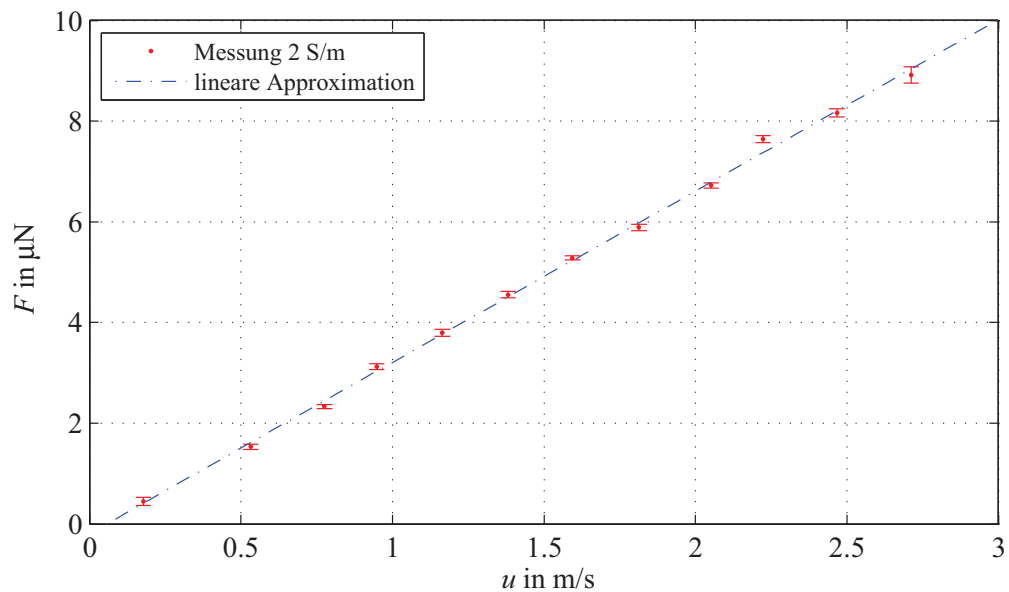


Abbildung 5.5: Abbildung einer resultierenden Messreihe für die Untersuchungen bei einer eingestellten elektrischen Leitfähigkeit von 2 S/m. Die Vermessung des Modellfluids fanden hierbei in einem Geschwindigkeitsbereich von 0,2 m/s - 2,7 m/s statt. Die roten Markierungen präsentieren die Erwartungswerte mit den jeweiligen Messunsicherheiten.

5.2.2 Beeinflussung durch Variation der Leitfähigkeit

Nach erfolgreicher Überprüfung der Abhängigkeit der Lorentzkraft gegenüber der Fließgeschwindigkeit schließt sich im Folgenden die Untersuchung der Reaktion des LKA-Prototyps auf Variationen hinsichtlich der elektrischen Leitfähigkeit an. Wie bereits von den Untersuchungen des Pendelprototypen bekannt, wurden hierzu Manipulationen an der Salzkonzentration des Modellfluids durchgeführt, wodurch vier verschiedene Leitfähigkeiten erzielt und untersucht werden konnten.

Die Graphen in Abbildung 5.6 zeigen den exemplarischen Verlauf der Vermessung des Modellfluids bei einer Pumpendrehzahl von 350 1/min und einer elektrischen Leitfähigkeit von 4 S/m. Im direkten Vergleich zu Abbildung 5.3 wird die, wie bereits beim Pendelprototyp vorgefundene, Abhängigkeit der Lorentzkraft gegenüber der elektrischen Leitfähigkeit des Modellfluids sichtbar. Während beide Versuche bei ein und der selben Drehzahl stattfanden, erhöht sich bei Verdopplung der elektrischen Leitfähigkeit von 2 S/m auf 4 S/m die Lorentzkraft von circa $5,5 \mu\text{N}$ auf circa $10 \mu\text{N}$. Wie beim Pendelprototypen wird auch hier eine Korrelation sichtbar, welche wenngleich nicht genau den numerischen Simulationen folgt.

Abbildung 5.7 zeigt einen Überblick der durchgeführten LKA-Messungen bei den vier untersuchten elektrischen Leitfähigkeiten von 0,04 S/m, 2 S/m, 4 S/m sowie 6 S/m. Bei jeder

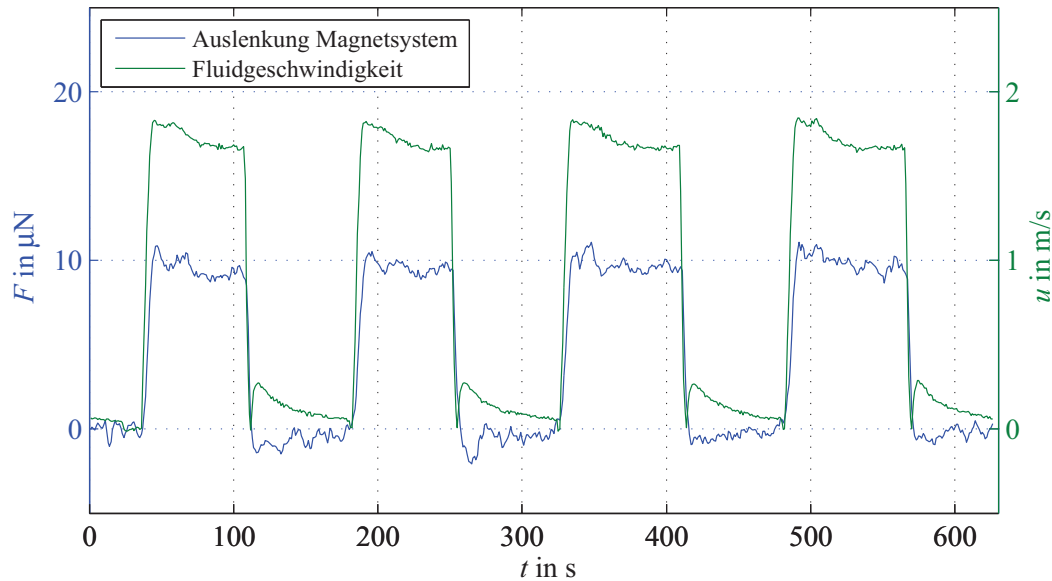


Abbildung 5.6: Exemplarisches Messsignal für eine Vermessung des Fluides bei einer Pumpendrehzahl von 350 1/min und einer elektrischen Leitfähigkeit von 4 S/m. Die blaue Kurve repräsentiert die wirkende Lorentzkraft auf das Magnetsystem, die grüne Kurve die Geschwindigkeit des Fluides innerhalb der Messstrecke.

dieser aufgeführten Messserien wurden die Experimente in einem Geschwindigkeitsbereich von 0,2 m/s bis 2,7 m/s durchgeführt. Die im Diagramm dargestellten Linien entsprechen den numerischen Simulationen, welche auf den Berechnungen des Simulationsprogramms *COMSOL* beruhen. Auffällig ist das Verhalten der Messwerte gegenüber den numerischen Simulationen. Durch die linearen Anstiege der einzelnen Messserien schlussfolgert sich zwar die Übereinstimmung mit der zugrundeliegenden Theorie, liefert aber keine Begründung für die Abweichung der einzelnen Messserien gegenüber den Simulationen bei zunehmenden elektrischen Leitfähigkeiten des Modellfluids. Die immer größer werdenden Differenzen der Anstiege bei Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit, bezogen auf die numerischen Simulationen, deuten auf das Vorliegen von systematischen Messabweichungen des EMK-Prototyp hin.

Die sichtbare Unzulänglichkeit konnte auch nach mehrmaliger Überprüfung nicht hinreichend determiniert werden, worauf nachfolgend auf denkbare Ursachen verwiesen werden soll. Zum einen kann nicht ausgeschlossen werden, dass die neu eingesetzte Messtechnik zur Überprüfung der Systemparameter fehlerbehaftet ist. So kann beispielsweise eine instabile Messcharakteristik des Leitfähigkeitsmessgeräts zu systematischen Messabweichungen führen, so dass die ermittelten Lorentzkraft-Werte zwar theoretisch Gültigkeit besitzen, jedoch a priori nicht an die numerischen Simulationen heranreichen können. Würden beispielhaft zu große Leitfähigkeitswerte vom Gerät ermittelt, schlägt sich dies in einer Verschiebung der Lorentzkraft-Kurve im Diagramm zur rechten Seite

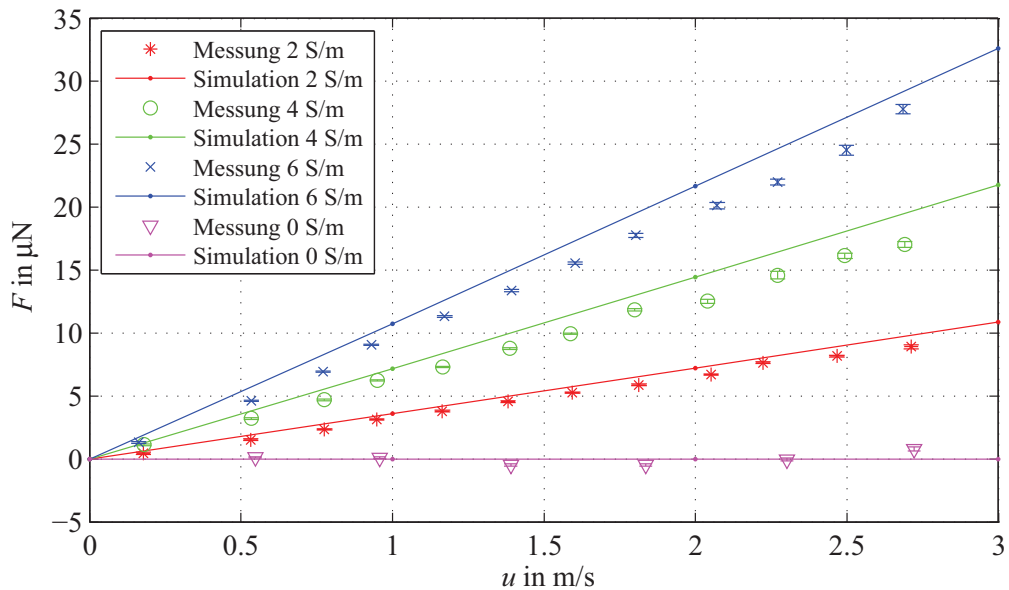


Abbildung 5.7: Resultat der Untersuchungen von Geschwindigkeits- und Leitfähigkeitseinfluss auf das Messsignal des EMK-Prototyps sowie deren Messunsicherheit, gemessen am Einlass der Messstrecke ($x = 30$ mm). Dargestellt sind alle untersuchten Messserien im Geschwindigkeitsbereich von $0,2$ m/s - $2,7$ m/s sowie der Leitfähigkeiten im Bereich von 0 S/m - 6 S/m. Die durchgezogenen Linien im Hintergrund stellen die numerischen Simulationen der jeweiligen elektrischen Leitfähigkeit dar.

nieder. Zum anderen kann ein weiterer Grund im Aufbau der Steuerelektronik der EMK-Waage sowie deren Kalibrierung liegen¹. So kann aufgrund des kompakten sowie gekapselten Designs der EMK-Waage nicht gänzlich nachvollzogen werden, wie der, für die Berechnung der Lorentzkraft benötigte, Kalibrierungsfaktor K (siehe Abschnitt 5.4) bestimmt wurde. Auch dieser Fehler würde eine systematische Verschiebung des Kraftsignals begründen. Es bleibt daher festzuhalten, dass künftige Untersuchungen die Überprüfung der beispielhaft aufgeführten Messkomponenten zum Ziel haben sollten, um abschließend zu erörtern wo die Ursachen der aufgetretenen Abweichungen liegen.

Um nichtsdestotrotz die Qualität des Messaufbaus zu überprüfen, wurde in Abbildung 5.8 die geschwindigkeitsnormierte Lorentzkraft berechnet und gegenüber der elektrischen Leitfähigkeit aufgetragen. Auch hier wird abermals sichtbar, dass, wenngleich eine systematische Abweichung von den numerischen Werten der Simulation besteht, dem EMK-Aufbau – wie bereits dem Pendelprototypen – ein lineares Verhalten attestiert werden kann.

¹Details über die Kalibrierung der EMK-Einheit sind in der Dissertation von [42] nachzulesen.

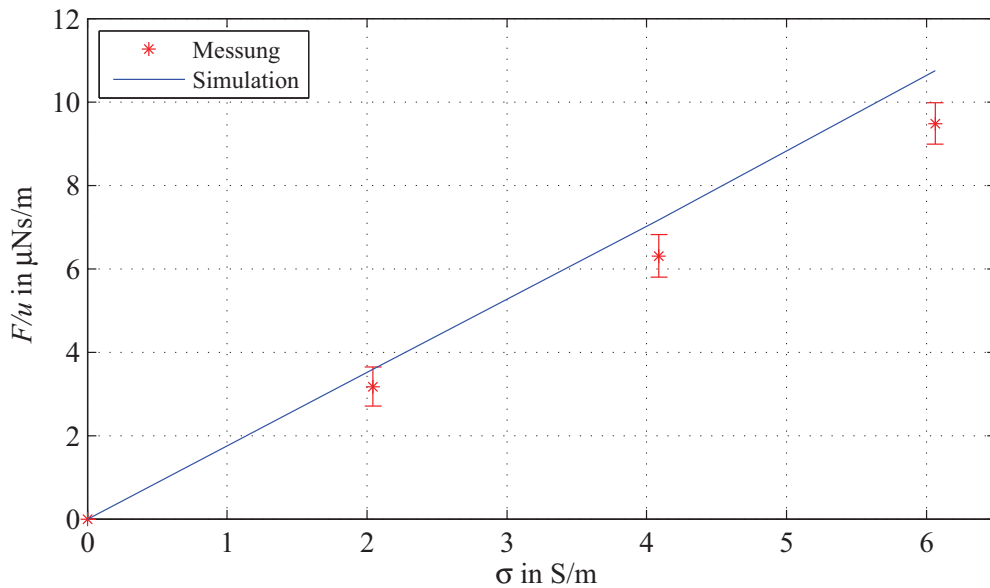


Abbildung 5.8: Abhängigkeit der geschwindigkeitsnormierten Lorentzkraft zur eingestellten elektrischen Leitfähigkeit des Modellfluids. Erkennbar ist ein linearer Verlauf der Messwerte mit einer systematischen Abweichung von der im Hintergrund liegenden numerischen Simulation (blaue Linie).

5.2.3 Reaktion auf sich ändernde Fluidprofile

Durch die in Abschnitt 3.5.4 dargestellte Neukonstruktion des Wasserumlaufkanals war es erstmals möglich Untersuchungen der Abhängigkeit der Lorentzkraft vom Strömungsprofil des Modellfluids anzustrengen. Hauptgegenstand des vorliegenden Abschnittes ist die experimentelle Überprüfung der theoretisch hergeleiteten Gleichung 5.1, welche eine Abhängigkeit der generierten Lorentzkraft gegenüber einem sich einstellenden Fluidprofil beschreibt. Wohingegen bei theoretischer Betrachtung Einflüsse bei dem Übergang von einem turbulenten zu einem laminaren Fluidprofil im zweistelligen Prozentbereich aufgezeigt werden, sollen die vorliegenden Untersuchungen die Beweisführung der eigenen ermittelten numerischen Berechnungen anstreben.

Aufgrund der Kanalgeometrie, sowie der Strömungsgeschwindigkeit innerhalb des Kanals, kann im Gegensatz zu [6] im vorliegenden Fall keine Überprüfung der Auswirkung eines laminaren Strömungsprofils erfolgen, da permanent über der kritischen Reynoldszahl von $Re_{krit} \approx 2040$ gearbeitet wurde. Fußend auf den gemessenen Fluidprofilen in Abschnitt 5.1 wurden mittels *COMSOL* numerische Berechnungen der Lorentzkraft durchgeführt. Die Ergebnisse lieferten für das klassische Magnetsystem, bei einer Referenzgeschwindigkeit von 1 m/s und dem Übergang von einem Kolbenprofil am Einlass der Messstrecke, hin zu einem quasi-statischen parabolischen Profil am Auslass, einen Abfall der erwarteten Lorentzkraft von $\approx 4\%$.

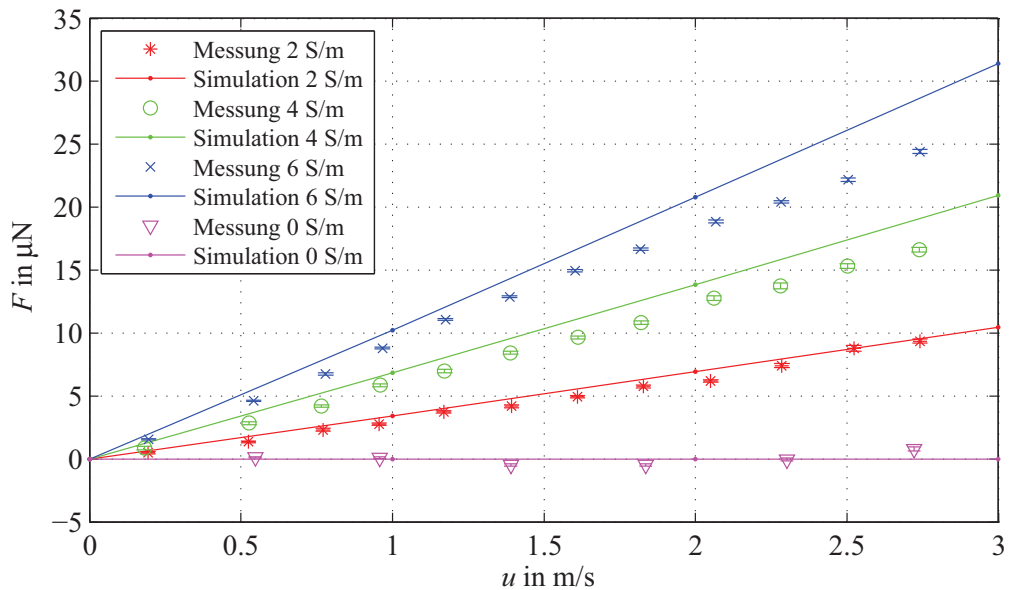


Abbildung 5.9: Einfluss von Geschwindigkeits- und Leitfähigkeitsänderungen auf das Messsignal des EMK-Prototyps sowie deren Messunsicherheiten gemessen am Auslass der Messstrecke ($x = 1470$ mm). Durch Veränderung des Messortes von Einlass (Vergleich Abbildung 5.7) zu Auslauf der Messstrecke ist eine Absenkung der Lorentzkraft im Mittel von 4,51% zu verzeichnen.

Abbildung 5.9 zeigt die Vermessung des Modellfluids bei den elektrischen Leitfähigkeiten von 0 S/m, 2 S/m, 4 S/m sowie 6 S/m am Auslass der Messstrecke ($x = 1470$ mm). Ähnlich der Abbildung 5.7 ist ein linearer Verlauf der Messserien zu erkennen, womit nochmals die Eignung des Prototypen bestätigt wird. Ferner muss auch bei diesen Untersuchungen eine Diskrepanz zwischen den numerisch generierten sowie gemessenen Werten festgestellt werden. Zur Ursachenforschung sowie zur Vermeidung von Wiederholungen sei an dieser Stelle auf Abschnitt 5.2.2 verwiesen. So kann zu diesem Zeitpunkt nur vermutet werden, weshalb eine systematische Abweichung zwischen Messung und numerischer Simulation besteht. Es ist bei künftigen Untersuchungen empfohlen die im erwähnten Abschnitt aufgeführten Thesen zu prüfen, um sie endgültig zu beseitigen.

Bei direktem Vergleich der Messserien ist festzuhalten, dass eine Korrelation zwischen der elektrischen Leitfähigkeit des Fluids und dem Einfluss des Messortes besteht. So wird mit steigender elektrischer Leitfähigkeit ein höherer Abfall der Lorentzkraft aufgrund des Einflusses des Fluidprofils verzeichnet. Wird bei einer Leitfähigkeit von 2 S/m ein Unterschied von lediglich 1,84% detektiert, steigt die Abweichung bei 4 S/m auf 4,83% und bei 6 S/m auf 6,86% an. Die sich daraus ergebende mittlere Abweichung beträgt 4,51% was innerhalb der mittels *COMSOL* berechneten Grenzen liegt und die Abhängigkeit der Lorentzkraft vom Fluidprofil bestätigt.

Ein interessanter Forschungsansatz besteht in der Weiterführung der Experimente hinsichtlich der Untersuchung der Einwirkung der elektrischen Leitfähigkeit, bezogen auf das Abfallverhalten der Lorentzkraft bei sich ändernden Fluidprofilen. Hier könnten neue Erkenntnisse gewonnen werden, welche in dieser Arbeit nicht genauer analysiert werden konnten, möglicherweise jedoch zu neuen Denkanstößen führen.

5.2.4 Beitrag durch Modifikationen am Magnetfeld

Neben der quantitativen Ermittlung der Abhängigkeit der Lorentzkraft gegenüber dem Fluidprofil, sind mit Hilfe des neu aufgebauten EMK-Prototypen überdies Untersuchungen des Einflusses von dem vorherrschenden Magnetfeld realisierbar. Die Neuerung ergibt sich durch die durchdachte Konstruktion des EMK-Messsystems, welches eine einfache Möglichkeit des Wechsels der unterschiedlichen Magnetsysteme bietet.

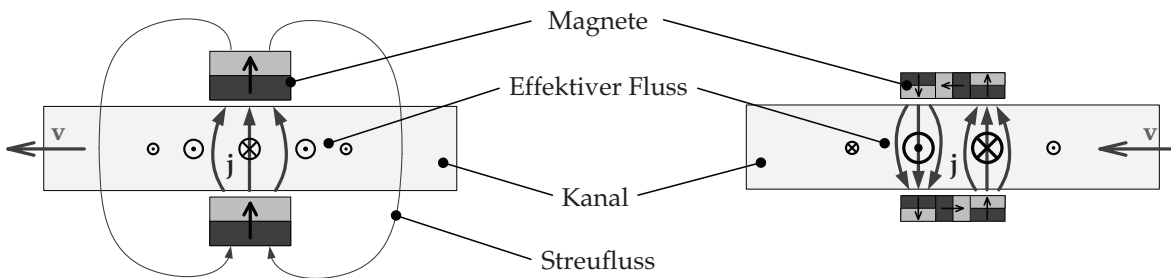


Abbildung 5.10: Vergleich der Wirkungsweise [45] vom klassischen Magnetsystem (links) und einer Halbach-Anordnung (rechts). Die schwarzen Pfeile signalisieren die Magnetisierungsrichtung der einzelnen Magnete. Der Parameter v beschreibt hierbei die Fließgeschwindigkeit des Modellfluids; j die beim Durchfließen des Magnetfeldes entstehenden Wirbelströme.

Wohingegen in den vorangegangenen Abschnitten des vorliegenden Kapitels die LKA-Untersuchungen mit dem aus Abbildung 3.3a bekannten klassischen Magnetsystem durchgeführt wurden, werden im Folgenden die Resultate des in Abbildung 3.4a dargestellten Halbach-Arrays beleuchtet. Die Abbildung zeigt, dass das Array aus zehn einzelnen Permanentmagneten besteht, welche jeweils unterschiedlich in ihrer Polarisationsrichtung angeordnet sind. Die Wirkungsweise sowie die Vorteile eines solchen Magnetsystems werden durch Abbildung 5.10 verdeutlicht. Wohingegen bei klassischen Anordnungen Streuflüsse an den Außenseiten der Magnete fließen – die per se einen vernachlässigbaren geringen Beitrag zur Lorentzkraftgenerierung liefern – wird bei der Halbach-Anordnung durch eine geschickte Anordnung einzelner Magnete der magnetische Fluss in der messtechnisch relevanten Region verdichtet und der Streufluss an der Außenseite auf nahe Null reduziert [75, 76], was den Wirkungsgrad des Magnetsystems steigert. Durch die Ausbildung der nunmehr zwei Wirbelströme in der Mitte des Messkanals, wird basierend auf den numerischen Simulationen von *COMSOL* eine Verdreifachung der Lorentzkraft erwartet.

Abbildung 5.11 zeigt die Auswirkung der Modifikation gegenüber dem klassischen Magnetsystem, gemessen bei einer konstanten elektrischen Leitfähigkeit von 6 S/m sowie am Einlass der Messstrecke ($x = 30$ mm). Während das klassische Magnetsystem beispielhaft bei einer Fließgeschwindigkeit von 2,5 m/s eine Lorentzkraft von $\approx 24 \mu\text{N}$ aufweist, werden mit der Halbach-Anordnung $\approx 69 \mu\text{N}$ erzielt. Der mittlere kalkulierte Faktor über alle gemessenen Werte beträgt für die beiden Messserien 2,91 und liegt damit im Bereich der aufgeführten numerischen Erwartung.

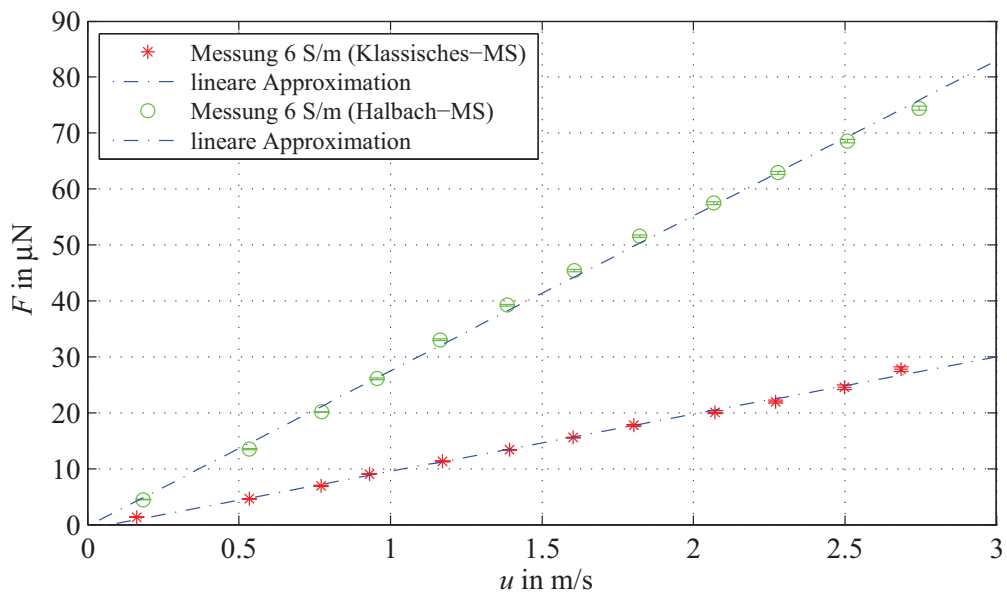


Abbildung 5.11: Unterschied der Kraftentwicklung aufgrund des modifizierten Magnetsystems. Die Messungen wurden bei gleichen Randbedingungen (σ , $u = \text{const.}$) am Einlauf ($x = 30$ mm) durchgeführt.

Motiviert von den erzielten Ergebnissen des klassischen Magnetsystems zur Überprüfung des Einflusses vom vorherrschenden Fluidprofil (siehe Abschnitt 5.2.3), wurde auch im vorliegenden Fall eine Fluidprofiluntersuchung mit dem Halbach-Array durchgeführt. Abbildung 5.12 zeigt die Messcharakteristik des Halbach-Arrays bei den zum Auslass geänderten Messort. Wie bereits bei den durchgeführten Experimenten am Einlass folgen die erzielten Lorentzkräfte einer Linearen. Strengt man einen Vergleich der Ein- und Auslassergebnisse an, wird auch dem Halbach-System eine Abhängigkeit gegenüber dem Fluidprofil zugesprochen. So werden mit dem Halbach-Array bei Manipulation des Messortes von Ein- zu Auslass im Mittel 2,2% geringere Lorentzkäfte gemessen. Ferner kommt es bei Verwendung des klassischen Magnetsystems zu einer Verringerung der Lorentzkraft von 3,1%.

Zusammenfassend wird festgehalten, dass die auf Grundlage von numerischen Simulationen erwartete Verdreifachung der Lorentzkraft durch das untersuchte Halbach-Array mittels den durchgeführten Untersuchungen bestätigt werden konnte. Überdies konnte

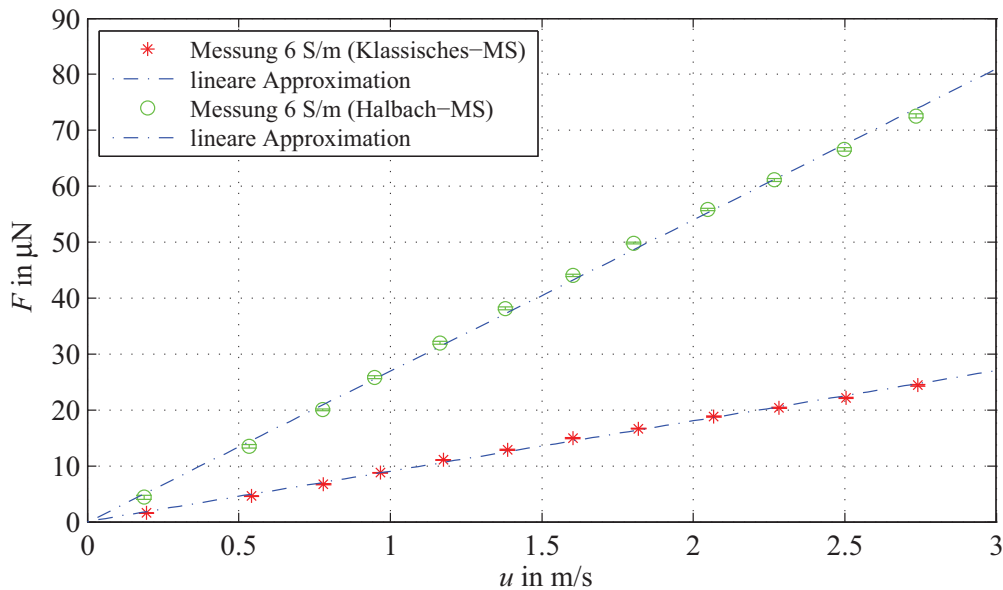


Abbildung 5.12: Unterschied der Kraftentwicklung aufgrund des modifizierten Magnet-systems. Die Messungen wurden bei gleichen Randbedingungen (σ , $u = \text{const.}$) am Auslauf ($x = 1470 \text{ mm}$) durchgeführt.

nochmals gezeigt werden, dass der untersuchte EMK-Prototyp abhängig vom Fluidprofil Lorentzkkräfte misst, wodurch sich bei einem eventuell geplanten industriellen Einsatz spezielle Anforderungen zur Applikation ergeben. Eine fest einzuhaltende Kalibriervorschrift wäre anzuraten, um ein vertretbares Maß an Messsicherheit und Reproduzierbarkeit zu gewährleisten.

5.3 Messperformance im Vergleich

Aufgrund der erzielten Resultate in Kapitel 4 und 5 wird im vorliegenden Abschnitt der Vergleich der beiden aufgebauten Prototypen angestrebt. Die folgenden Abschnitte teilen sich somit die qualitativen sowie quantitativen Vergleiche der einzelnen Prototypen. Hierbei wird zunächst auf Übereinstimmungen, beziehungsweise Unterschiede zwischen den einzeln aufgeführten Prototypen verwiesen und im Folgenden mit zwei kommerziellen Durchflussmesssystemen verglichen.

5.3.1 Gegenüberstellung mit Pendelprototyp

Um eine Einordnung in bestehende Messsysteme zu ermöglichen, sowie um Rückschlüsse über die Wirkung der Optimierungsarbeiten ziehen zu können, werden im vorliegenden Abschnitt die qualitativen und quantitativen Eindrücke beider Systeme auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen dargestellt.

Beiden Prototypen kann die qualitative Wirkungsweise und somit die Applikation der LKA auf schwach leitfähige Fluide attestiert werden. Fußen die Messauswertungen beider Systeme auf ein und derselben Auswertungsmethode, liegt die Messunsicherheit bei dem Pendelprototyp im zweistelligen Prozentbereich (siehe Abbildung 4.7), wohingegen ein signifikantes Absinken der Messunsicherheit bei dem EMK-Prototypen festgestellt werden konnte. Dies zeigt, dass beide Systeme fähig sind Lorentzkräfte im Mikronewtonbereich zu detektieren sowie deren Messunsicherheit zu bestimmen. Ferner zeigt sich, dass die durchgeführten Optimierungsarbeiten zu einer besseren Funktionsweise des EMK-Prototyps führten, was in einem besseren Signalverlauf sowie einer Senkung der Messunsicherheit begründet liegt.

Bezogen auf das Signal waren während den Untersuchungen am Pendelprototyp störende Überschwingungen des Pendels zu erkennen. Überdies zeichneten sich die Signalverläufe durch einen enormen Drift aus, dessen Ursache in der Temperaturerhöhung des Modellfluids – aufgrund mangelnder Klimaregulierung – zu suchen ist. Trotz der Implementierung eines Wärmetauschers in den EMK-Prototyp mussten auch bei dem verbesserten Prototyp kleine Temperaturdrifts festgestellt werden. Diese fußen jedoch nicht auf Temperaturerhöhungen des Modellfluids sondern auf Temperatureffekten der verbauten Kupferspule innerhalb des EMK-Systems. Durch den proportionalen Zusammenhang zwischen Lorentzkraft und Spulenstrom (siehe Abschnitt 3.3.2) werden gerade bei höheren Lorentzkräften größere Ströme benötigt, welche zur Erwärmung der Spule und somit zum Drift führen. Es zeigt sich abermals, dass selbst kleine Temperaturänderungen während der Messungen einen Einfluss auf das Messsignal bewirken. Der große Vorteil des EMK-Prototypen ist das gutmütige Signalverhalten des Systems, selbst bei kleinen Produkten aus Fließgeschwindigkeit und elektrischer Leitfähigkeit. So werden, wie in Abbildung 5.3 zu sehen ist, keine Überschwingungen im Signal festgestellt. Grund hierfür liegt in der Verwendung der robusten EMK-Messtechnik, welche in der Lage ist selbst kleinste Kraftbereiche sicher aufzulösen.

Über die Vermessung mehrerer elektrischer Leitfähigkeiten hinweg wird beiden Systemen eine gute Linearität attestiert, welche bei dem Pendelprototyp, verbunden mit relativ hohen Messunsicherheit, selbst den numerischen Simulationen folgt. Trotz der attestierten besseren Funktionsweise des EMK-Prototyps reichen die Werte nicht an die durch die Simulation erwarteten Werte heran, weshalb eine systematische Abweichung in ein oder mehreren Messsystemen vermutet wird (siehe Abschnitt 5.2.2).

Es bleibt festzuhalten, dass beim Vergleich der beiden von Grund auf neu konzipierten Prototypen eine positive Entwicklung zu erkennen ist. Mit dem Hintergrund der Einzigartigkeit kann aufgrund der erzielten Messleistungen ein positives Fazit aus den durchgeführten Untersuchungen gezogen werden.

5.3.2 Messqualität gegenüber MID und USD

In den vorangegangenen Abschnitten der Kapitel 4 und 5 wurden die Vor- und Nachteile der neu konzipierten LKA-Prototypen für die Anwendung auf schwach leitfähige Fluide beleuchtet. Wie in Abschnitt 2.4 aufgeführt, reiht sich das in der vorliegenden Dissertation untersuchte LKA-Verfahren in eine weitreichende Palette bestehender Strömungsmessverfahren ein. Um eine erste Aussage über die quantitative Eignung in Bezug auf Reproduzierbarkeit und Messunsicherheit zu erhalten, wurden die drei am Experiment verbauten Strömungsmessverfahren gegeneinander verglichen.

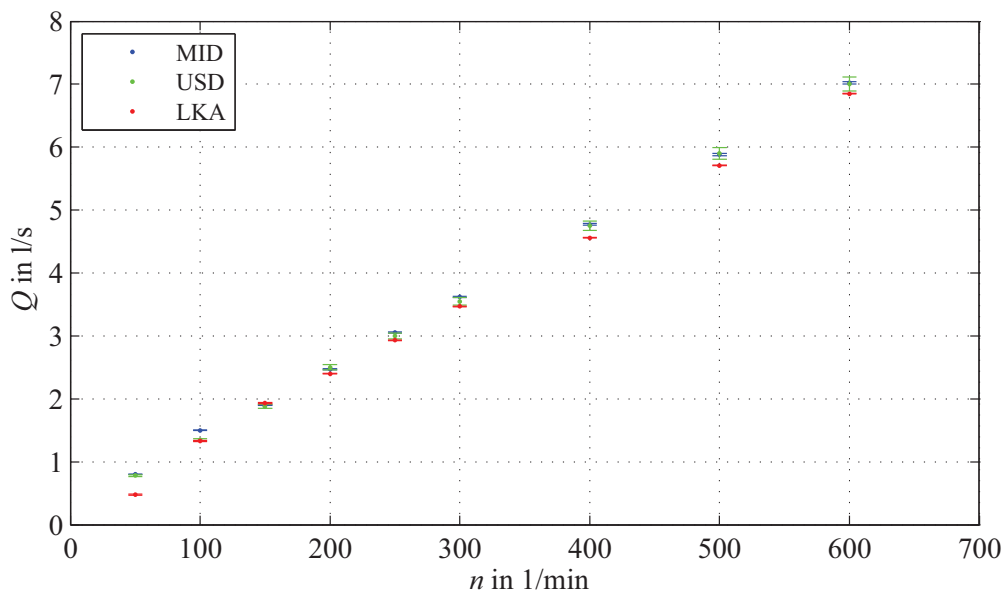


Abbildung 5.13: Momentaufnahmen der unterschiedlichen Messsysteme und deren Unsicherheit während der durchgeführten Messungen von 0 S/m, 2 S/m, 4 S/m und 6 S/m.

Abbildung 5.13 zeigt die ermittelten Durchflusswerte sowie die dazugehörigen Messunsicherheiten für den Magnetisch-induktiven Durchflussmesser (MID), den Ultraschall-Durchflussmesser (USD) sowie des entwickelten LKA. Da die Ergebnisse nah beieinander liegen wurden die Werte der Übersicht wegen in Tabelle 5.2 nochmals dargestellt. Es sei hierbei ausdrücklich erwähnt, dass es sich bei den Resultaten um Momentaufnahmen handelt. So stützen sich die Daten auf den Vermessungen der Lorentzkräfte von 0 S/m, 2 S/m, 4 S/m und 6 S/m. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass Schwankungen um den erzielten Erwartungswert bestehen.

Mit dem erwähnten Hintergrund konnte nichtsdestotrotz eine sehr gute Übereinstimmung mit den kommerziellen Durchflussmessverfahren beobachtet werden. Überdies zeigten sich Ähnlichkeiten in Bezug auf die Messcharakteristika der einzelnen Messmethoden. So ist allen drei Messverfahren eine Erhöhung der Unsicherheit bei kleiner wer-

denden Durchflussraten gemein. Fällt die Pumpendrehzahl unter einen Wert von 150 1/min – was einem Durchfluss von ≈ 2 l/s entspricht – ist eine reproduzierbare Vermessung des Durchflusses nur sehr schwer möglich.

Tabelle 5.2: Messperformance des EMK-Prototyps. Darstellung der Durchflüsse (Q in l/s) für diskrete Umdrehungsgeschwindigkeiten (n in 1/min) der Pumpe. STU steht hierbei für die empirische Standardunsicherheit des jeweilig betrachteten Messverfahrens.

n [1/min]	MID_{mittel}	STU_{MID}	USD_{mittel}	STU_{USD}	LKA_{mittel}	STU_{LKA}
50	0,80	0,00239	0,78	0,01240	0,48	0,00915
100	1,50	0,00451	1,35	0,02160	1,33	0,01075
150	1,90	0,00570	1,88	0,03009	1,93	0,00823
200	2,47	0,00742	2,50	0,04001	2,40	0,00643
250	3,05	0,00914	3,00	0,04802	2,93	0,00352
300	3,62	0,01087	3,55	0,05680	3,47	0,00401
400	4,77	0,01431	4,75	0,07600	4,56	0,00533
500	5,88	0,01763	5,90	0,09440	5,71	0,00278
600	7,02	0,02107	7,00	0,11200	6,85	0,00173

Zusammenfassend sei nochmals ausdrücklich darauf hingewiesen, dass der angestrebte Vergleich aufgrund der relativ wenigen Vermessungen lediglich als Momentaufnahme betrachtet werden kann. Es konnte zwar eine gute Übereinkunft der LKA mit den anderen Messverfahren, sogar mit teilweise besseren Messunsicherheiten als bei der Konkurrenz, determiniert werden, was durch weitere Untersuchungen jedoch nochmals überprüft und bestätigt werden sollte.

5.4 Unsicherheitsbetrachtung der Messergebnisse

In Anlehnung an Abschnitt 4.3 sowie vorangegangenen Abschnitt 5.3.2 wird im Folgenden eine kurze Betrachtung zur Messunsicherheit des EMK-Systems durchgeführt. Anders als bei dem Pendelprototyp genügt der EMK-Prototyp hierbei der simplen Modellgleichung,

$$F_L = \frac{I}{K} \quad (5.2)$$

weshalb auf eine erneute detaillierte Herleitung der Messunsicherheit verzichtet wird. Das in der Gleichung enthaltene K ist als Kalibrierkonstante des EMK-Aufbaus definiert und wird durch $K = 5,1075 \pm 0,0012$ mA/N beschrieben. Die Konstante stammt aus einer

nicht trivialen Kalibriermessung² und ist mittels GUM hergeleitet und berechnet worden. Der detektierte Regelstrom I der Spule charakterisiert das Messsignal und ist ein proportionales Maß für die erzielte Lorentzkraft.

Um die Messunsicherheit zu bestimmen wurden sämtliche aufgeführten Schritte des Abschnittes 4.3 durchgeführt, was in Folge zur Gleichung 5.3 führt.

$$u_{fl} = \sqrt{\left(\frac{u_i}{K}\right)^2 + \left(\frac{I \cdot u_k}{K^2}\right)^2} \quad (5.3)$$

In Anlehnung an Abschnitt 4.3 wird auch im vorliegenden Fall eine exemplarische Betrachtung der Messunsicherheit für die Vermessung des Modellfluids bei einer willkürlich gewählten Fließgeschwindigkeit von 1,6 m/s und einer elektrischen Leitfähigkeit von 4 S/m durchgeführt.

Tabelle 5.3: Exemplarische Messfehlerbetrachtung des EMK-Prototyps. Darstellung der Werte für eine in Abbildung 5.2.2 exemplarisch dargestellten Messreihe, gemessen am Einlass ($x = 30$ mm) bei einer Fließgeschwindigkeit des Modellfluids von 1,6 m/s und einer elektrischen Leitfähigkeit von 4 S/m. STU kennzeichnet hierbei die Standardunsicherheit

Parameter	Mittelwert	empirische STU	Fehlertyp	kombinierte STU
K	5,1075 mA/N	0,0012 mA/N	B	-
I	50,7176 nA	0,0219 nA	A	-
F_L	9,9300 μ N	-	-	$\pm 0,0431$ μ N

Im direktem Vergleich zu dem Pendelprototypen kann dem EMK-basierten System eine verbesserte Unsicherheit gegenüber dem Messsystem attestiert werden. Wird im vorliegenden Fall ein Fehler von 0,43% detektiert, erreichen die Fehlerbeiträge beim Pendelprototyp im günstigen 2,75% und im ungünstigen Fall sogar 18,83%, wodurch dem EMK-Prototypen eine Verringerung des Fehlers um Faktor 40 zugeschrieben werden kann.

5.5 Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerung

In Anlehnung an Abschnitt 4.4 folgt eine abschließende quantitative Überprüfung der Qualität des EMK-Prototyps. Hierzu wird die aus Gleichung 2.13 bekannte Kalibrierkonstante C bestimmt und gegenüber den durchgeführten Durchflussraten im Bereich von

²Details über das Verfahren der Kalibrierung sowie deren genauen Berechnung sind der Dissertation von C. Diethold zu entnehmen [42].

0,5 l/s - 7,0 l/s aufgetragen. Basierend auf der Theorie und den numerischen Simulationen müsste eine horizontale Linie schlussfolgern. Abbildung 5.14 bestätigt diese These und zeigt die ermittelten Werte in Bezug auf die numerischen Werte der Simulation. Die gemessenen Werte fluktuieren um eine gedankliche Gerade von $c = 0,22$, treffen jedoch nicht die numerischen Erwartungswerte. Die Ursache hierfür liegt in der bereits attestierten systematischen Abweichung des EMK-Prototypen in den vorangegangenen Abschnitten. Nichtsdestotrotz soll im direkten Vergleich zu Abbildung 4.17 die starke Verringerung der Messunsicherheit hervorgehoben werden, wodurch dem EMK-basierten Prototyp ein hohes Messpotenzial zugeschrieben werden kann.

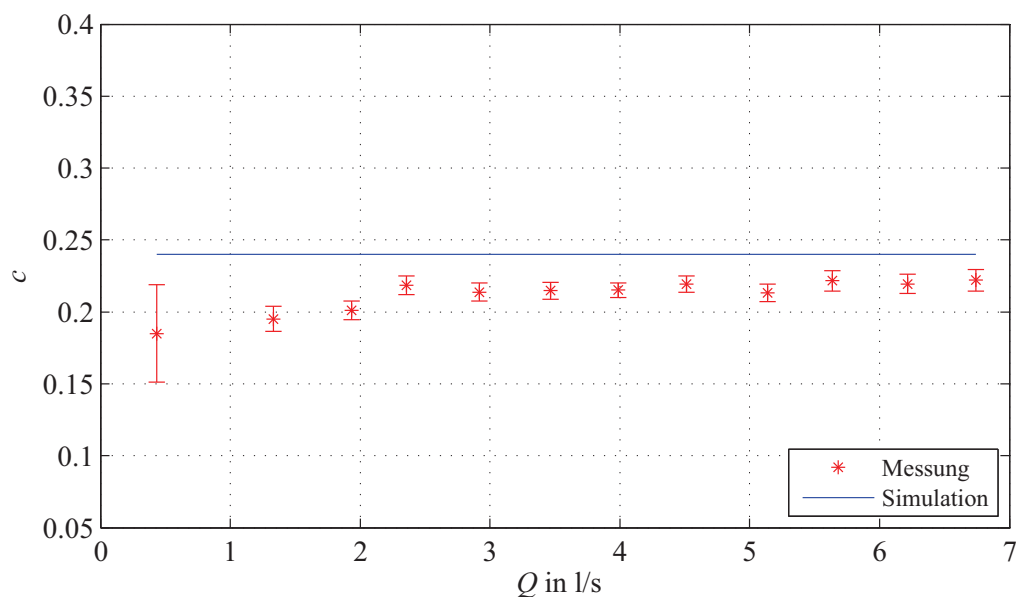


Abbildung 5.14: Abbildung zeigt die Kalibrierkonstante des Pendelprototyps über den durchgeführten Geschwindigkeitsbereich. Hierdurch lässt sich die Qualität der Messungen ablesen. Im vorliegenden Fall korreliert die Konstante gut mit der numerischen Simulation (blaue Linie).

Zusammenfassend wurde im vorliegenden Kapitel die Durchführung von sechs unterschiedlichen Experimenten am neu konzeptionierten und in Betrieb genommenen EMK-Prototyp beschrieben. Bei jedem aufgeführten Experiment wurde die generelle Funktionsweise des Versuchs und die mit ihm erzielten Resultate beschrieben. So erfolgte bei jeder Untersuchung eine Analyse der Messdaten hinsichtlich der Bestimmung des Erwartungswertes sowie dessen Messunsicherheit.

Beginnend mit der Charakterisierung des Fluidsystems mittels LDA-Vermessung der Fluidprofile an drei Stellen entlang der Messstrecke wurde der EMK-Prototyp im Verlauf auf sein Verhalten gegenüber sich ändernden Randbedingungen untersucht. Hierbei wurde festgestellt, dass bei dem vorliegenden EMK-Prototyp, wie bereits bei dem Pendelprototyp, eine Abhängigkeit der gemessenen Lorentzkraft gegenüber der Veränderung von

Fließgeschwindigkeit und Leitfähigkeit besteht. Durch Messungen am Ein- und Auslass der Messstrecke konnte ferner der theoretisch postulierte Einfluss des Fluidprofils, bezogen auf die Lorentzkraft, bestätigt werden. Überdies bestand durch den konstruktiven Aufbau des EMK-Prototyps die Möglichkeit der Modifikation des Magnetsystems. Durch Applikation eines Halbach-Arrays konnte der starke Einfluss eines optimierten Magnet-systems aufgezeigt und quantifiziert werden.

Bei der Gegenüberstellung des LKA-Systems mit zwei am Experiment verbauten kommerziellen Durchflussmessern konnten sehr gute Übereinkünfte der Messdaten sowie Messcharakteristik festgestellt werden. Allgemein war zu beobachten, dass der untersuchte EMK-Aufbau einen positiven Entwicklungssprung – basierend auf dem Pendelprototypen – erfahren hat. Die Messunsicherheit wurde teilweise um Faktor 40 verkleinert, wodurch das hohe Messpotential des Systems erkennbar wird.

So eine Arbeit wird eigentlich nie fertig, man muss sie für fertig erklären, wenn man nach der Zeit und den Umständen das Möglichste getan hat.

J. W. Goethe

KAPITEL

6

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den experimentellen Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Lorentzkraft-Anemometrie auf schwach leitfähige Fluide. Hierzu wurden zwei in ihrer Wirkungsart unterschiedliche Prototypen konzipiert, aufgebaut und in Betrieb genommen. In Anlehnung an die in der Einleitung postulierten Arbeitspunkte werden die wesentlichen Ergebnisse nach den durchgeführten Untersuchungen gegliedert und zusammengefasst.

Konzipierung und Aufbau geeigneter Prototypen

Aufgrund mangelnder Experimentalaufbauten zur Vermessung von schwach leitfähigen Fluiden wurden innerhalb einer Bearbeitungszeit von drei Jahren zwei von Grund auf neu und auf unterschiedlichen Prinzipien beruhende LKA-Prototypen entwickelt. Beiden gemein ist die Verwendung des Modellfluids Salzwasser, welches durch Änderungen an der Salzkonzentration elektrische Leitfähigkeiten in einem Bereich von 0,04 S/m bis 14,0 S/m ermöglichten.

Der zuerst in Betrieb genommene Pendelprototyp arbeitet nach dem Prinzip der Detektion der Auslenkung des Magnetpendels, fußend auf der Interaktion des Modellfluids mit dem Magnetfeld. Zur Erfassung der winzigen Wegänderungen wurde ein Laserinterferometer verbaut, welches aufgrund seiner hohen Messauflösung von 1 nm zum Einsatz kam. Da Anfangs keine fundierten Erfahrungen in Aufbau und Inbetriebnahme eines solchen Prototypen bestanden, mussten dem Prototyp im Verlauf einige Unzulänglichkeiten attestiert werden, welche erst mit dem nachfolgenden Prototyp beseitigt werden konnten.

Der EMK-Prototyp stellt die logische Weiterentwicklung des Pendelprototyps dar und arbeitet nach dem Prinzip der elektromagnetischen Kraftkompensation. Durch die auftretende Interaktion beim Zusammentreffen von Modellfluid und Magnetfeld wird ein Stromregelkreis in Gang gesetzt, welcher permanent versucht einen Gleichgewichtszustand herzustellen. Durch eine Spannungsmessung, über einen in den Regler integrierten Präzi-

sionswiderstand, erfolgt ein lastproportionaler Signalabgriff, welcher ein gutes Maß für die wirkende Lorentzkraft ergibt. Darüber hinaus wurden aufgrund der attestierten Unzulänglichkeiten des Pendelprototypen weitreichende Optimierungen durchgeführt und appliziert. Im Folgenden konnten durch den fluidtechnisch sehr gut definierten Wasserumlaufkanal erstmalig Untersuchungen der Abhängigkeit von dem vorherrschenden Fluidprofil durchgeführt werden.

Untersuchung der Beeinflussbarkeit der Lorentzkraft

Nach erfolgreicher Validierung des Pendelprototypen mittels Solid-Body-Approximation wurden drei unterschiedliche Experimente durchgeführt. Bei Fließgeschwindigkeiten von 0,8 m/s - 4 m/s, elektrischen Leitfähigkeiten bis 14 S/m sowie Temperaturänderungen von bis zu 17 K zeigten sich lineare Abhängigkeiten der Lorentzkraft von den aufgeführten Parametern des Modellfluids. Die Untersuchungen deckten ferner nicht akzeptable Unzulänglichkeiten, wie ein starkes Überschwingen sowie Inkonsistenzen während der Vermessungen auf, worin der Wunsch nach einem verbesserten Prototypen lag.

Im Gegensatz zu den Untersuchungen am Pendelprototypen wurden beim EMK-Prototyp fünf unterschiedliche Experimente durchgeführt. Beginnend mit der Charakterisierung der Fluidsystems erfolgten Messungen zur Überprüfung der Einflussfaktoren auf die Lorentzkraft. Die vorliegenden Experimente zeigten bei Fließgeschwindigkeiten von 0,2 m/s - 2,6 m/s sowie elektrischen Leitfähigkeiten von bis zu 6 S/m eine lineare Abhängigkeit auf die sich einstellende Lorentzkraft. Darüber hinaus zeigten die Untersuchungen eine Abhängigkeit der Lorentzkraft vom vorherrschenden Fluidprofil sowie den Einfluss eines optimierten Magnetsystems. So konnte bei einer Veränderung des Fluidprofils, von Kolben- zu quasi-statischen parabolischen Fluidprofil ein Absinken der Lorentzkraft um 4,51% determiniert werden, wohingegen bei Applikation eines optimierten Halbach-Magnetsystems eine Vergrößerung der Lorentzkraft um Faktor 2,91 festgestellt werden konnte.

Messtechnische Analyse der Prototypen

Die Auswertungen der jeweiligen Pendelversuche ergaben gute Übereinkünfte der numerischen Simulationen gegenüber den erzielten Lorentzkräften. Es sei erwähnt, dass durch die konstruktiv bedingten Überschwingungen des Pendels zwei Auswertemethoden angewendet wurden. Der Einfluss der beiden Auswertestrategien zeigte sich durch die Verringerung der Messunsicherheit von 18,83% auf 2,75%. Im direktem Vergleich zu dem Pendelprototyp konnte dem EMK-basierten System eine nochmals verbesserte Messunsicherheit attestiert werden. Im Mittel wurden Messunsicherheiten kleiner 0,5% detektiert, wodurch eine quantitative Verbesserung um mehrere Faktoren zwischen den beiden Prototypen erzielt werden konnte.

Einordnung der LKA in Bezug auf bestehende Messverfahren

Nach Durchführung aller Untersuchungen wurde durch eine Gegenüberstellung des LKA-Prototyps mit zwei am Experiment verbauten kommerziellen Durchflussmessern eine sehr gute Übereinkunft der Messdaten sowie deren Messcharakteristik festgestellt. Diese, sowie die Erkenntnisse der qualitativen Untersuchungen, zeigen das Potenzial des Messsystems, wenngleich noch weitere Messungen zur Abklärung offener Fragen sowie noch nicht untersuchter Einflussgrößen geklärt werden müssen.

Abschließend wird festgehalten, dass die durchgeführten Untersuchungen neue Erkenntnisse über die Anwendbarkeit der LKA auf schwach leitfähige Fluide hervorgebracht haben. So konnte über eine qualitative Aussage, bezüglich der Eignung der LKA zur Durchflussmessung von schwach leitfähigen Fluiden, bereits Parameteruntersuchungen durchgeführt und analysiert werden, wodurch eine Überprüfung der zugrundeliegenden Theorie möglich wurde. Trotz aller positiven Erkenntnisse wird empfohlen weiterführende Versuche am EMK-Prototypen durchzuführen um noch bestehende Fragestellungen zu erörtern und vorhandene Messergebnisse zu bestätigen. In anschließenden Projekten sollten überdies Untersuchungen nach neuen Magnetfeldquellen erfolgen, da hier das größte Potenzial zur Steigerung der Lorentzkraft zu suchen ist.

Im Hinblick auf die Anwendbarkeit des LKA-Messverfahrens, zur Bestimmung von Durchflussgeschwindigkeiten von schwach leitfähigen Fluiden in der Industrie, kann an diesem Punkt der Forschung noch kein abschließendes Urteil getroffen werden. Der Grund hierfür ist im Konflikt zwischen benötigter Sensitivität sowie gegebener Robustheit der Prototypen zu suchen. Zukünftig sollte versucht werden das System soweit zu optimieren, dass bei geringerer Störanfälligkeit, kleinere Lorentzkräfte sicher aufgelöst werden können.



Literaturverzeichnis

- [1] F. Reuther und A. Orlicek, *Zur Technik der Mengen- und Durchflussmessung von Flüssigkeiten*. R. Oldenbourg Verlag, München-Wien, 1971.
- [2] C. Tropea, A. Yarin, und J. Foss, *Handbook of Experimental Fluid Mechanics*. Springer Verlag, 2007.
- [3] M. Faraday, “Experimental Researches in Electricity”, *Philos. Trans. R. Soc. London*, vol. 15, no. 175, 1832.
- [4] J. Shercliff, *The theory of electromagnetic flow-measurement*. University Press, Cambridge, 1962.
- [5] A. Thess, E. Votyakov, und Y. Kolesnikov, “Lorentz force velocimetry”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 96, no. 164501, 2006.
- [6] A. Thess, E. Votyakov, B. Knaepen, und O. Zikanov, “Theory of the Lorentz force flowmeter”, *New. J. Phys.*, vol. 9, no. 299, 2007.
- [7] R. Brandt und G. Neuer, “Electrical resistivity and thermal conductivity of pure aluminum and aluminum alloys up to and above the melting temperature”, *Int. J. Thermophys.*, vol. 28, no. 5, pp. 1429–1446, 2007.
- [8] Y. Kolesnikov, C. Karscher, und A. Thess, “Lorentz force flowmeter for liquid aluminum: Laboratory experiments and plant tests”, *Metall. Mater. Trans. B*, vol. 42, pp. 441–450, 2011.
- [9] C. Weidemann, A. Thess, D. Lieftucht, und R. Reifferscheid, “Application of lorentz force velocimetry in continuous casting of steel”, 2012. 5th International Congress on the Science and Technology of Steelmaking, Dresden.
- [10] A. Wegfrass, C. Diethold, M. Werner, T. Fröhlich, B. Halbedel, F. Hilbrunner, C. Resagk, und A. Thess, “A Universal Noncontact Flowmeter for Liquids”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 100, no. 194103, 2012.

- [11] P. Davidson, *An Introduction to Magnetohydrodynamics*. University Press, Cambridge, 2001.
- [12] J. Shercliff, *A textbook of magnetohydrodynamics*. Pergamon Press, Oxford, 1965.
- [13] J. Jackson, *Klassische Elektrodynamik*. Walter de Gruyter, 1981.
- [14] K. Bonfig, *Technische Durchflussmessung*. Vulkan-Verlag, 2002.
- [15] C. Smith und J. Slepian, 1917. Patent Number 1,249,530. Electromagnetic ship's log.
- [16] S. Eckert, V. Galindo, G. Gerbeth, W. Witke, R. Gerke-Cantow, H.-P. Nicolai, und Steinrücken, "Strömungskontrolle beim Formfüllen mit Hilfe von Magnetfeldern", *Gießerei*, vol. 92, 2005.
- [17] R. Lantsch, *VGF-Kristallzüchtung unter dem Einfluss externer Magnetfelder*. PhD thesis, Technischen Universität Bergakademie Freiberg, 2005.
- [18] C. Feng und W. Deeds, "Analysis of eddy-current flowmeters", *J. Appl. Phys.*, vol. 46, no. 7, pp. 2935–2940, 1975.
- [19] J. Baumgartl, A. Hubert, und G. Müller, "The use of magnetohydrodynamic effects to investigate fluid flow in electrically conducting melts", *Phys. Fluids A*, vol. 5, no. 12, pp. 3280–3289, 1993.
- [20] E. Julius und H. Haubrich, 1995. Patent Number 5,426,983. Flow meter for contact-free determination of velocities of electrically conductive fluid media.
- [21] F. Stefani, T. Gundrum, und G. Gerbeth, "Contactless inductive flow tomography", *Phys. Rev. E*, vol. 70, no. 056306, 2004.
- [22] M. Werner und B. Halbedel, "Optimization of NdFeB magnet arrays for improvement of Lorentz Force Velocimetry", *IEEE T Magn*, vol. 48, no. 11, 2012.
- [23] A. Thess, Y. Kolesnikov, und C. Karcher, 2007. Patent Nummer WO2007033982. Verfahren und Anordnung zur berührungslosen Inspektion bewegter elektrisch leitfähiger Substanzen.
- [24] C. Karcher, Y. Kolesnikov, und A. Thess, 2008. Patent Nummer DE102007038635. Anordnung und Verfahren zum elektromagnetischen Dosieren elektrisch leitfähiger Substanzen.
- [25] C. Heinicke, "Measurement of local velocities in turbulent liquid metal duct flows using Lorentz force velocimetry", 2011. Proceedings of the International Scientific Colloquium.
- [26] I. Rahneberg, F. Hilbrunner, und T. Fröhlich, "Novel concept of a high precision 6-dof force/torque transducer", 2011. Proceedings of the International Scientific Colloquium.

- [27] A. Viré, B. Knaepen, und A. Thess, “Lorentz force velocimetry based on time-of-flight measurements”, *Phys. Fluids A*, vol. 22, no. 12, 2012.
- [28] D. Jian und C. Karcher, “Electromagnetic flow measurements in liquid metals using time-of-flight lorentz force velocimetry”, *Meas. Sci. Technol.*, vol. 23, no. 7, 2012.
- [29] J. Priede, D. Buchenau, und G. Gerbeth, “Force-free and contactless sensor for electromagnetic flowrate measurements”, *Magnetohydrodynamics*, vol. 45, no. 3, pp. 451–458, 2009.
- [30] J. Priede, D. Buchenau, und G. Gerbeth, “Single-magnet rotary flowmeter for liquid metals”, *J. Appl. Phys.*, vol. 110, no. 034512, 2011.
- [31] F. Stefani, J. Priede, G. Gerbeth, A. Cramer, S. Eckert, und A. Thess, 2001. Patent Nummer DE19922311C2. Verfahren und Anordnung zur Bestimmung von räumlichen Geschwindigkeitsverteilungen in elektrisch leitfähigen Flüssigkeiten.
- [32] J. Priede, D. Buchenau, G. Gerbeth, I. Bucenieks, und J. Gelfgats, 2009. Patent Nummer DE102007046881A1. Verfahren und Anordnung zur Messung des Durchflusses elektrisch leitfähiger Medien.
- [33] H. Cavendish, “Experiments to Determine the Density of the Earth”, *Philos. Trans. R. Soc. London*, vol. 80, pp. 469–526, 1798.
- [34] L. Foucault, *Démonstration physique du mouvement de rotation de la terre au moyen du pendule*. Bachelier, Paris, 1851.
- [35] “Industrielle Durchfluss-Messtechnik: Grundlagen und Praxis”, 2010. ABB Automation Products GmbH.
- [36] V. Gundelach und L. Litz, *Moderne Prozeßmeßtechnik: Ein Kompendium*. Springer Verlag, 1999.
- [37] R. Baker, *An Introductory Guide to Flow Measurement*. Wiley Verlag, 2002.
- [38] C. Hamann und W. Vielstich, *Elektrochemie*. Wiley-VCH, 1975.
- [39] F. Culkin und N. Smith, “Determination of the concentration of potassium chloride solution having the same electrical conductivity, at 15°C and infinite frequency, as standard seawater of salinity 35.000% (chlorinity 19.37394%)”, *IEEE J. Oceanic Engng*, vol. 5, no. 1, pp. 22–23, 1980.
- [40] H. Falkenhagen, *Theorie der Elektrolyte*. S. Hirzel Verlag Leipzig, 1971.
- [41] J. D’Ans und E. Lax, *Taschenbuch für Chemiker und Physiker*. Springer Verlag, 1949.
- [42] C. Diethold, *Messung von kleinen, horizontal wirkenden Kräften mit gleichzeitig wirkenden großen Gewichtskräften*. PhD thesis, Technischen Universität Ilmenau, 2012.

- [43] M. Werner, B. Halbedel, und E. Rädlein, "Numerical study of magnet systems for lorentz force velocimetry in electrically low conducting fluids", 2010. Proceedings of the 6th International Scientific Colloquium Modelling for Material Processing, Riga.
- [44] A. Wegfrass, C. Diethold, M. Werner, A. Alferenok, C. Resagk, T. Fröhlich, B. Halbedel, U. Lüdtke, und A. Thess, "Lorentzkraft-Aneometrie für die berührungslose Durchflussmessung von Elektrolyten", *Tech. Mess*, vol. 79, no. 0263, 2012.
- [45] M. Werner, *Design, Optimierung, Realisierung und Test von passiven Magnetsystemen für die Lorentzkraftanemometrie an Elektrolyten*. PhD thesis, Technischen Universität Ilmenau, 2012.
- [46] A. Michelson, "Interference phenomena in a new form of refractometer", *Phil. Mag.*, vol. 13, 1882.
- [47] "Mikrointerferometer Serie MC", 2002. SIOS Meßtechnik GmbH.
- [48] H. Gevatter und U. Grünhaupt, *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik*. Springer Verlag, 2006.
- [49] L. Krause, "Vergleich von Kompensations- und Ausschlagprinzip am Beispiel der Wägetechnik", *Tech. Mess.*, vol. 71, no. 12, pp. 643–650, 2004.
- [50] C. Diethold und F. Hilbrunner, "Force measurement of low forces in combination with high dead loads by the use of electromagnetic force compensation", *Meas. Sci. Technol.*, vol. 23, no. 074017, 2012.
- [51] Y. Yeh und H. Cummins, "Localized fluid flow measurements with an He-Ne laser spectrometer", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 4, pp. 176–179, 1964.
- [52] H.-E. Albrecht, M. Borys, N. Damaschke, und C. Tropea, *Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques*. Springer Verlag, 2002.
- [53] "Service Guide: Agilent 34970a - Data Acquisition / Switch Unit", 2012. Agilent Technologies Inc.
- [54] *Universal Source, HP 3245A*, 2004. Instruction manual.
- [55] *Agilent Technologies, 3458A Multimeter*, 2001. Instruction manual.
- [56] A. Wegfrass, C. Diethold, M. Werner, C. Resagk, T. Fröhlich, B. Halbedel, und A. Thess, "Flow rate measurement of weakly conducting fluids using lorentz force velocimetry", *Meas. Sci. Technol.*, vol. 23, no. 105307, 2012.
- [57] M. Werner und B. Halbedel, "Anwendung von Halbacharrays in der Lorentzkraftanemometrie", 2011.
- [58] "Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, VDI-Verlag", 1993. VDI-Richtlinie 2221.

- [59] M. Seidel, *Methodische Produktplanung*. PhD thesis, Universität Karlsruhe, 2005.
- [60] W. Krause, *Gerätekonstruktion in Feinwerktechnik und Elektronik - 3. Auflage*. Carl Hanser Verlag, 2000.
- [61] W. Wagner, *Strömung und Druckverlust*. Vogel Buchverlag, 2008.
- [62] W. Wagner, *A Brief Introduction to Fluid Mechanics*. John Wiley and Sons, 2010.
- [63] G.-G. Börger, *Optimierung von Windkanaldüsen für den Unterschallbereich*. PhD thesis, Ruhr-Universität Bochum, 1973.
- [64] C. Witoszynski, *Über Strahlerweiterung und Strahlablenkung*. Springer Berlin, 1924.
- [65] E. Laws und J. Livesey, "The flow downstream of screens and its influence on the flow in the stagnation region of cylindrical bodies", *J. Fluid Mech*, vol. 204, pp. 501–522, 1989.
- [66] E. Laws und J. Livesey, "Flow through screens", *Ann. Rev. Fluid Mech*, vol. 10, pp. 247–266, 1978.
- [67] *VDI-Wärmeatlas: Berechnungsblätter für den Wärmeübergang*. Springer Berlin, 2002.
- [68] H. Sprenger, *Experimentelle Untersuchung an geraden und gekrümmten Diffusoren*. Verlag Leemann Zürich, 1959.
- [69] V. Minchenya, C. Karcher, Y. Kolesnikov, und A. Thess, "Dry calibration of the Lorentz force flowmeter", *Magnetohydrodynamics*, vol. 45, no. 4, pp. 569–578, 2009.
- [70] "Aluminium und Aluminiumlegierungen, Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeug, Teil 3: Chemische Zusammensetzung und Erzeugnisformen; Deutsche Fassung EN 573-3:2009", August 2009. DIN EN 573-3.
- [71] *HI9835 EC Meter*, 2000. Instruction manual.
- [72] "Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen", 1995. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [73] "Schwereinformationssystem SIS", 2007. Physikalisch-Technische-Bundesanstalt.
- [74] F. M. White, *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill International Editions, Singapore, 1999.
- [75] J. Mallinson, "One-Side Fluxes - A Magnetic Curiosity?", *IEEE T. Magn.*, vol. 9, no. 4, pp. 678–682, 1973.
- [76] K. Halbach, "Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material", *Nucl. Instrum. Methods*, vol. 169, pp. 1–10, 1980.
- [77] *Entwurf einer grafischen Benutzeroberfläche zur Steuerung eines Wasserkanal Prototyps und effizienten Auswertung der Versuchsergebnisse mit der Prozesssteuerungssoftware LabVIEW*, 2012. Softwaredokumentation.

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Erläuterung
A	m^2	Fläche
B	T	magnetische Flussdichte
c	–	Kalibrierkonstante der Lorentzkraft
d	m	Durchmesser
E	V/m	elektrische Feldstärke
F	N	Kraft; Lorentzkraft
F_c	N	Federkraft
F_g	N	Gewichtskraft
F_l	N	Lorentzkraft
g	m/s^2	Erdbeschleunigung; gasförmig
Ha	–	Hartmann-Zahl
h	m	Höhe
I	A	elektrischer Strom
j	A/m^2	Wirbelstromdichte; Wirbelstrom
K	–	Kalibrierkonstante des EMK-Systems
L	m	Länge
l	–	liquid
l_p	m	Länge der Wolframdrähte
N	–	Stuart-Zahl; Interaktionsparameter; Variable
n	min^{-1} ; 1/min	Drehzahl der Pumpe; Messwert

m	kg	Masse
p	Pa ; N/m	Druck
Q	m ³ /s; l/s	Durchfluss
R	m	Radius
Re	–	Reynolds-Zahl
Re_m	–	magnetische Reynolds-Zahl
S	–	Shape-Funktion
s	m	Auslenkung; empirische Standardabweichung; solid
T	°C; K	Temperatur
t	s	Zeit
Tu	%	Turbulenzgrad der Strömung
u	m/s	Strömungsgeschwindigkeit
u_c	–	kombinierte Standardunsicherheit
u_m	–	empirische Standardunsicherheit
u_x	–	Unsicherheit des jeweiligen Indizes
V	m ³	spezifisches Volumen
v	m/s	Fließgeschwindigkeit
x	m	Messpunkt; x-Achse
y	m	Messpunkt; y-Achse
z	m	Messpunkt; z-Achse

griech. Symbol	Einheit	Erläuterung
α	°	Auslenkwinkel des Pendels
μ	Vs/Am	magnetische Permeabilität
ν	m/s ²	kinematische Viskosität
ρ	kg/m ³	Dichte
σ	S/m	elektrische Leitfähigkeit
τ	N/m ²	Scherspannung
ϕ	V	elektrisches Potential

Abkürzungen

EMK	e lektromagnetische K raftkompensation
LDA	L aser- D oppler- A немometer
LKA	L orentzkraft- A немometer; L orentzkraft- A немometrie
MHD	M agnetohydro d ynamik
MID	m agnetisch- i nduktiver D urchflussmesser
MVZ	m ittelbarer V olumenzähler
STU	empirische S tandard u nsicherheit
UMVZ	u nmittelbarer V olumenzähler
USD	U ltraschall- D urchflussmesser
WDV	W irk d ruckverfahren

Abbildungsverzeichnis

2.1	Beispiele für unmittelbare Volumenzähler [14]: (a) repräsentiert das Prinzip des Kippzählers, (b) das eines Drehkolbenzählers.	8
2.2	Beispiele für mittelbare Volumenzähler [14]: (a) repräsentiert das Prinzip eines Flügelradzählers, (b) das eines Woltmannzählers.	9
2.3	Beispiele für Messverfahren, welche unter den Wirkdruckverfahren arbeiten [14]: (a) repräsentiert hierbei die Wirkung einer Blende und (b) eines Schwabekörper-Durchflussmessers.	10
2.4	Prinzipielles Wirkungsschema eines Ultraschall-Durchflussmessers [14]. . . .	11
2.5	Prinzipielles Wirkungsschema des Magnetisch-induktiven Durchflussmessers [14].	12
2.6	Grundlegendes Wirkungsschema der Lorentzkraft-Anemometrie [22].	14
3.1	Elektromagnetische Ersatzschaltbilder der in Frage kommenden Magnetsysteme. Links: Magnetsystem auf Grundlage einer Spulenanordnung. Rechts: Magnetsystem aufgebaut aus Permanentmagneten. 1 - Strömungskanal; 2 - Joch; 3 - Spule; 4 - Permanentmagnet.	21
3.2	(a) Schaubild des klassischen Magnetsystems, welches beim Pendelprototypen zum Einsatz gekommen ist. Charakterisiert wird dieses durch die im Bild angegebenen Abmaße sowie einer magnetischen Flussdichte von $B = 410$ mT im Koordinatenursprung $O(0;0)$. (b) Gemessene Magnetflussdichte des Magnetsystems entlang der x-Achse bei $y = 0$. (c) Gemessene Magnetflussdichte des Magnetsystems entlang der y-Achse bei $x = 0$	23
3.3	(a) Schaubild des klassischen Magnetsystems, welches beim EMK-Prototypen zum Einsatz gekommen ist. Charakterisiert wird dieses durch die im Bild angegebenen Abmaße sowie einer magnetischen Flussdichte von $B = 229$ mT im Koordinatenursprung $O(0;0)$. (b) Gemessene Magnetflussdichte des Magnetsystems entlang der x-Achse bei $y = 0$. (c) Gemessene Magnetflussdichte des Magnetsystems entlang der y-Achse bei $x = 0$	24

3.4	(a) Schaubild des Halbach-Magnetsystems, welches beim EMK-Prototypen zum Einsatz gekommen ist. Charakterisiert wird dieses durch die im Bild angegebenen Abmaße sowie einer magnetischen Flussdichte von $B = 210$ mT im Koordinatenursprung $O(0;0)$. (b) Gemessene Magnetflussdichte des Magnetsystems entlang der x-Achse bei $y = 0$. (c) Gemessene Magnetflussdichte des Magnetsystems entlang der y-Achse bei $x = 0$	25
3.5	Fluidtransport beruhend auf dem Schwerkraftprinzip.	27
3.6	Fluidtransport beruhend auf dem Umfüllprinzip.	27
3.7	Fluidtransport beruhend auf dem Umlaufprinzip.	28
3.8	Verwendetes Corner Cube Interferometer [47]: (a) Komplettes Messequipment bestehend aus elektronischer Versorgungs- und Auswerteeinheit sowie kompaktem Sensorkopf und Messrefektor. (b) Detaillierte Ansicht des MC500 Interferometers.	30
3.9	Aufbau und Betriebsweise der zum Einsatz gekommenen Waage nach dem Prinzip der elektromagnetischen Kraftkompensation [48]. Linke Abbildung verdeutlicht die horizontale Betriebslage sowie den Ort der Komponenten einer kommerziellen EMK-Waage. Rechte Abbildung repräsentiert den um 90° gedrehten Ist-Zustand der Waage, wie er am Versuch vorherrscht [50].	32
3.10	Schaubild des im Versuch eingesetzten EMK-Aluminium-Monolith. Zu sehen sind einzelne Komponenten des im Text beschriebenen Aufbaus.	33
3.11	Übersicht über die Wirkungsweise der LDA. (a) Funktionsschema der LDA nach [2]. (b) Darstellung des bei der Kreuzung der Laserstrahlen entstehenden Messvolumens nach [52].	35
3.12	Schematischer Aufbau des Pendelprototyps.	38
3.13	Darstellung des Gesamtsystems Pendelprototyp in Anlehnung an Abbildung 3.12. Die Abbildung zeigt den Gesamtaufbau mit Schutzhaube sowie den wichtigsten Komponenten.	39
3.14	Abbildung der Hauptkomponenten des Versuches nach Abnahme der Schutzhaube.	40
3.15	Abbildung zeigt das Schema des konstruktiven Entwicklungsprozesses [59], welcher aus vier Hauptarbeitsphasen – Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten – besteht.	43
3.16	Aufbau der zum Einsatz gekommenen EMK-Einheit bei Applikation am Wasserumlaufkanal. Die Abbildung zeigt die wichtigsten Komponenten der Messeinrichtung.	47
3.17	Einsatzort der Klimavorrichtungen. Zu sehen ist die Klimaanlage des Laboratoriums sowie die Kühlanlage des im Beruhigungsbehälter verbauten Wärmetauschers.	48
3.18	Vergleich der Umlenkdiffusoren (a) vor und (b) nach der Optimierung mit <i>FLU-ENT</i> . Die Legende symbolisiert die Fließgeschwindigkeit u des Fluids in m/s. Die Bilder zeigen eindrucksvoll die Verbesserung der Auslassströmung im oberen Teil des Diffusors. Bei gleicher Eintrittsgeschwindigkeit von $0,31$ m/s im unteren Abschnitt, konnte eine Homogenisierung des Auslassströmungsprofils bei einer mittleren Geschwindigkeit von $0,21$ m/s erreicht werden.	50

3.19	Darstellung zur Findung der optimalen Platzierung des Spiral-Wärmetauschers. (a) zeigt den simulierten Strömungsverlauf (u in m/s) in der horizontalen Mittelebene des Beruhigungsbehälters am Einlass. (b) Dreiviertelschnitt des Beruhigungsbehälters mit mittig platziertem Wärmetauscher.	51
3.20	Abbildung zeigt den Komplettaufbau des EMK-Prototyps. Die Ziffern kennzeichnen die Hauptkomponenten des Systems und sind dem vorliegenden Abschnitt zu entnehmen.	53
4.1	Bild vom Solid-Body-Experiment mit der Kennzeichnung der wichtigsten Komponenten.	56
4.2	Exemplarischer Auslenkungs-Zeit-Verlauf der Vermessung eines 9 mm starken Aluminiumstabes bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 20 mm/s. Die Zeitbereiche von 60 s - 260 s sowie 420 s - 620 s repräsentieren die Bereiche der positiven wie auch negativen Verschieberichtung des Stabes durch das Magnetfeld.	57
4.3	Ergebnis der Solid-Body-Untersuchungen für die Aluminiumstangendurchmesser 5 mm, 9 mm und 10 mm. Das Diagramm zeigt in dem Geschwindigkeits-Kraft-Verlauf die Messwerte der jeweiligen Einzelmessungen sowie deren Fehlerbeitrag. Die durchgezogenen Linien repräsentieren die äquivalenten numerischen Simulationen.	58
4.4	Exemplarisches Messsignal für eine Vermessung des Fluides bei einer Fließgeschwindigkeit von 2,5 m/s und einer elektrischen Leitfähigkeit von 6,2 S/m. Das Messintervall zwischen An- und Aus-Phase des Fluidstromes beträgt jeweils 30 s. Die blaue Kurve repräsentiert die Auslenkung des Magnetsystems, die grüne Kurve die Geschwindigkeit des Fluids innerhalb der Messstrecke. . .	60
4.5	Exemplarisches Messsignal für die Vermessung des Fluides bei einer Fließgeschwindigkeit von 3,5 m/s und einer elektrischen Leitfähigkeit von 6,2 S/m. Das Messintervall zwischen An- und Aus-Phase des Fluidstromes beträgt jeweils 30 s. Die blaue Kurve repräsentiert die Auslenkung des Magnetsystems, die grüne Kurve die Geschwindigkeit des Fluids innerhalb der Messstrecke. . .	61
4.6	Exemplarisches Messsignal für die Vermessung des Fluides bei einer Fließgeschwindigkeit von 2,5 m/s und einer elektrischen Leitfähigkeit von 12,5 S/m. Das Messintervall zwischen An- und Aus-Phase des Fluidstromes beträgt jeweils 30 s. Die blaue Kurve repräsentiert die Auslenkung des Magnetsystems, die grüne Kurve die Geschwindigkeit des Fluids innerhalb der Messstrecke. . .	62
4.7	Resultat der Untersuchungen von Geschwindigkeits- und Leitfähigkeitseinfluss auf das Messsignal des Pendelprototyps sowie deren Messunsicherheit. Dargestellt sind alle untersuchten Messserien im Geschwindigkeitsbereich von 0,8 m/s - 4,0 m/s sowie der Leitfähigkeiten im Bereich von 0,04 S/m - 14 S/m. Die durchgezogenen Linien im Hintergrund stellen die numerischen Simulationen der jeweiligen Leitfähigkeit dar. Vor allem bei höheren Leitfähigkeiten ist der große Fehlerbeitrag um den Erwartungswert auffällig.	63

4.8	Aufbereitete Abbildung zur Darstellung des Resultats der Untersuchungen von Geschwindigkeits- und Leitfähigkeitseinfluss auf das Messsignal des Pendelprototyps. Im Gegensatz zur vorherigen Abbildung dient eine Veränderung an der Auswertemethode (siehe Abschnitt 4.3) als Grundlage der Berechnungen.	64
4.9	Diagramm repräsentiert die Abhängigkeit der geschwindigkeitsnormierten Lorentzkraft zur elektrischen Leitfähigkeit des Modellfluids. Erkennbar ist ein nahezu linearer Verlauf der Messwerte, welcher mit den im Hintergrund liegenden numerischen Simulationen (blaue Linie) korreliert.	65
4.10	Aufbau des Versuches zur Ermittlung der Temperaturabhängigkeit des Lorentzkraft-Messsignals. Dargestellt sind die Hauptkomponenten des Versuchs sowie die Platzierungen der vier Temperatursensoren.	66
4.11	Das Diagramm repräsentiert die Einwirkung einer steigenden Fluidtemperatur auf die Leitfähigkeit des Modellfluids. Die dargestellten Messwerte zeigen einen beispielhaften Auszug der Untersuchungen des Temperaturbereiches von 22°C - 33°C.	67
4.12	Das Diagramm zeigt das Auslenkungs-Temperatur-Verhalten des Pendelprototypen bei einer Fluidgeschwindigkeit von 3 m/s und einer eingestellten Grundleitfähigkeit von 10 S/m. Die mittlere Temperatur des Modellfluids beträgt in der Messstelle 23,4°C. Die blaue Kurve symbolisiert die Auslenkung des Magnetsystems und korreliert mit der grünen Kurve, welche die anliegende Fluidgeschwindigkeit repräsentiert. Die rote Kurve zeigt den Temperaturverlauf des Modellfluids in der Messstelle.	68
4.13	Das Diagramm zeigt das Auslenkungs-Temperatur-Verhalten des Pendelprototyps bei einer Fluidgeschwindigkeit von 3 m/s und einer eingestellten Grundleitfähigkeit von 10 S/m. Die mittlere Temperatur des Modellfluids beträgt in der Messstelle 36,3°C. Die blaue Kurve symbolisiert die Auslenkung des Magnetsystems und korreliert mit der grünen Kurve, welche die anliegende Fluidgeschwindigkeit repräsentiert. Die rote Kurve zeigt den Temperaturverlauf des Modellfluids in der Messstelle.	69
4.14	Abbildung zeigt das Kraft-Temperatur-Verhalten des Pendelprototyps und damit die Einwirkung der Fluidtemperatur auf die resultierende Messkraft.	70
4.15	Schemata der wichtigsten Komponenten des Pendelprototyps: (1) Messgestell; (2) Wolframdraht; (3) Fixierungsplatte mit Messreflektor; (4) Interferometer; (5) NeFeB-Magnet sowie (6) Fluidkanal. Ferner sind die Kräfte und geometrischen Abmessungen des LKA-Systems aufgeführt.	71
4.16	Detaildarstellung der zur Anwendung gekommenen Auswertemethoden. Linke Hälfte der Abbildung repräsentiert die Methode 1 bei der alle Messwerte in die Berechnung einbezogen werden. Die rechte Hälfte zeigt Methode 2, bei der das Überschwingen des Pendels nicht in die Berechnungen einbezogen wird. So werden bei Detektierung des Sprunges jeweils fünf Messwerte vor und zehn Messwerte nach dem Sprung vernachlässigt.	72

4.17 Abbildung zeigt die Kalibrierkonstante des Pendelprototyps über den aufgeführten Geschwindigkeitsbereich. Hierdurch lässt sich die Qualität der Messungen ablesen. Im vorliegenden Fall korreliert die Konstante gut mit der numerischen Simulation (blaue Linie). 75

5.1 Vergleich der Fluidprofile der untersuchten Messstrecke des Wasserumlaufkanals bei einer eingestellten mittleren Fließgeschwindigkeit von $u = 1 \text{ m/s}$. Die einzelnen Abbildungen zeigen auf der linken Hälfte das erwartete Fluidprofil basierend auf numerischen Berechnungen durch *FLUENT* [45]. Die rechte Hälfte hingegen präsentiert die mittels LDA vermessenen Fluidprofile. Beginnend vom Übergang der Düse zur Messstrecke wurden die Messungen bei $x = 30 \text{ mm}$ (a, b), $x = 750 \text{ mm}$ (c, d) und $x = 1470 \text{ mm}$ (e, f) durchgeführt. 78

5.2 Darstellung des LDA-Experiments zur Überprüfung der Fluidcharakteristik innerhalb der Messstrecke des Wasserumlaufkanals. Die Variable x kennzeichnet hierbei den jeweiligen Messort entlang der 1,5 m langen Messstrecke. 79

5.3 Exemplarisches Messsignal für eine Vermessung des Fluides bei einer Pumpendrehzahl von 350 1/min und einer elektrischen Leitfähigkeit des Fluids von 2 S/m. Die blaue Kurve repräsentiert die wirkende Lorentzkraft auf das Magnetsystem, die grüne Kurve die Geschwindigkeit des Fluids innerhalb der Messstrecke. 81

5.4 Exemplarisches Messsignal für eine Vermessung des Fluides bei einer Pumpendrehzahl von 550 1/min und einer elektrischen Leitfähigkeit von 2 S/m. Die blaue Kurve repräsentiert die wirkende Lorentzkraft auf das Magnetsystem, die grüne Kurve die Geschwindigkeit des Fluids innerhalb der Messstrecke. 82

5.5 Abbildung einer resultierenden Messreihe für die Untersuchungen bei einer eingestellten elektrischen Leitfähigkeit von 2 S/m. Die Vermessung des Modellfluids fanden hierbei in einem Geschwindigkeitsbereich von 0,2 m/s - 2,7 m/s statt. Die roten Markierungen präsentieren die Erwartungswerte mit den jeweiligen Messunsicherheiten. 83

5.6 Exemplarisches Messsignal für eine Vermessung des Fluides bei einer Pumpendrehzahl von 350 1/min und einer elektrischen Leitfähigkeit von 4 S/m. Die blaue Kurve repräsentiert die wirkende Lorentzkraft auf das Magnetsystem, die grüne Kurve die Geschwindigkeit des Fluids innerhalb der Messstrecke. 84

5.7 Resultat der Untersuchungen von Geschwindigkeits- und Leitfähigkeitseinfluss auf das Messsignal des EMK-Prototyps sowie deren Messunsicherheit, gemessen am Einlass der Messstrecke ($x = 30 \text{ mm}$). Dargestellt sind alle untersuchten Messserien im Geschwindigkeitsbereich von 0,2 m/s - 2,7 m/s sowie der Leitfähigkeiten im Bereich von 0 S/m - 6 S/m. Die durchgezogenen Linien im Hintergrund stellen die numerischen Simulationen der jeweiligen elektrischen Leitfähigkeit dar. 85

5.8 Abhängigkeit der geschwindigkeitsnormierten Lorentzkraft zur eingestellten elektrischen Leitfähigkeit des Modellfluids. Erkennbar ist ein linearer Verlauf der Messwerte mit einer systematischen Abweichung von der im Hintergrund liegenden numerischen Simulation (blaue Linie). 86

5.9	Einfluss von Geschwindigkeits- und Leitfähigkeitsänderungen auf das Messsignal des EMK-Prototyps sowie deren Messunsicherheiten gemessen am Auslass der Messstrecke ($x = 1470$ mm). Durch Veränderung des Messortes von Einlass (Vergleich Abbildung 5.7) zu Auslauf der Messstrecke ist eine Absenkung der Lorentzkraft im Mittel von 4,51% zu verzeichnen.	87
5.10	Vergleich der Wirkungsweise [45] vom klassischen Magnetsystem (links) und einer Halbach-Anordnung (rechts). Die schwarzen Pfeile signalisieren die Magnetisierungsrichtung der einzelnen Magnete. Der Parameter v beschreibt hierbei die Fließgeschwindigkeit des Modellfluids; j die beim Durchfließen des Magnetfeldes entstehenden Wirbelströme.	88
5.11	Unterschied der Kraftentwicklung aufgrund des modifizierten Magnetsystems. Die Messungen wurden bei gleichen Randbedingungen ($\sigma, u = \text{const.}$) am Einlauf ($x = 30$ mm) durchgeführt.	89
5.12	Unterschied der Kraftentwicklung aufgrund des modifizierten Magnetsystems. Die Messungen wurden bei gleichen Randbedingungen ($\sigma, u = \text{const.}$) am Auslauf ($x = 1470$ mm) durchgeführt.	90
5.13	Momentaufnahmen der unterschiedlichen Messsysteme und deren Unsicherheit während der durchgeführten Messungen von 0 S/m, 2 S/m, 4 S/m und 6 S/m.	92
5.14	Abbildung zeigt die Kalibrierkonstante des Pendelprototyps über den durchgeführten Geschwindigkeitsbereich. Hierdurch lässt sich die Qualität der Messungen ablesen. Im vorliegenden Fall korreliert die Konstante gut mit der numerischen Simulation (blaue Linie).	95
A.1	Hauptabmaße der 1,5 m langen Fluidmessstrecke des Wasserumlaufkanals. . .	119
A.2	Düsenform nach Witoszynski [64]: (a) Berechnete Düsenkontur. (b) Dreidimensionales Abbild der aufgebauten Düse.	120
A.3	Kennzeichnung der neuralgischen Übergangspositionen am Wasserumlaufkanal (vgl. Tabelle in Abbildung A.4).	121
A.4	Übersicht über die vorgegebenen sowie die berechneten Nennmaße des Wasserumlaufkanals in Bezug auf Abbildung A.3. Die aufsummierte Verlustsumme repräsentiert hierbei den Ausgangspunkt zur Berechnung der Pumpenleistung.	121
A.5	Darstellung der unter <i>LabVIEW</i> entstandenen Bedienoberfläche. Zu sehen sind die Einstellmöglichkeiten für die Pumpendrehzahl, Messwertaufnahme, Messwertspeicherung sowie mehrere Grafiken zur Onlineüberwachung der Messdaten.	123
A.6	Darstellung des Blockschaltbildes innerhalb der <i>LabVIEW</i> -Umgebung mit Kennzeichnung der wichtigsten Unterprogramme.	126

Tabellenverzeichnis

2.1	Quali- und quantitative Gegenüberstellung der vorgestellten Verfahren in Bezug auf die Lorentzkraft-Anemometrie.	16
3.1	Stoffparameter sowie Eigenschaften von Elektrolyten in wässriger Lösung bei $T = 20^\circ\text{C}$. σ beschreibt hierbei die elektrische Leitfähigkeit, N den dazugehörigen Interaktionsparameter des Fluids.	20
4.1	Spezifische Leitfähigkeiten der bei dem Solid-Body-Versuch verwendeten Aluminiumstangen. Nach erfolgter Röntgenspektroskopie wurden die Stangen den aufgeführten Materialien zugeordnet. Die Materialien besitzen laut DIN die dargestellten Mindest- und Maximalwerte. Die Berechnungen der erzielten Lorentzkraft in Abbildung 4.3 wurde mit dem jeweiligen Mittelwert durchgeführt.	58
4.2	Exemplarische Messunsicherheitsbetrachtung des Pendelprototyps. Die aufgeführten Werte entsprechen der in Abbildung 4.2.2 exemplarisch dargestellten Messreihe bei einer anliegenden Fließgeschwindigkeit von 2,5 m/s sowie einer Leitfähigkeit von 12,5 S/m. Die Abkürzung STU steht hierbei für Standardunsicherheit. Der Wert der Erdbeschleunigung wurde aus dem Schwereinformationssystem der Physikalisch-Technischen-Bundesanstalt entnommen [73].	74
5.1	Resultat der LDA-Untersuchungen an der 1500 mm langen Messstrecke des EMK-Prototyps. Aufgeführt sind die in Abbildung 5.2 dargestellten Messstellen und deren gemessene Mittel- und Maximalwerte für die Fließgeschwindigkeit (Abbildung 5.1) sowie deren Turbulenzgrad.	80
5.2	Messperformance des EMK-Prototyps. Darstellung der Durchflüsse (Q in l/s) für diskrete Umdrehungsgeschwindigkeiten (n in 1/min) der Pumpe. STU steht hierbei für die empirische Standardunsicherheit des jeweilig betrachteten Messverfahrens.	93

5.3	Exemplarische Messfehlerbetrachtung des EMK-Prototyps. Darstellung der Werte für eine in Abbildung 5.2.2 exemplarisch dargestellten Messreihe, gemessen am Einlass ($x = 30 \text{ mm}$) bei einer Fließgeschwindigkeit des Modellfluids von $1,6 \text{ m/s}$ und einer elektrischen Leitfähigkeit von 4 S/m . STU kennzeichnet hierbei die Standardunsicherheit	94
-----	---	----

Anhang

A

A.1 Kanalgeometrie

Messstrecke

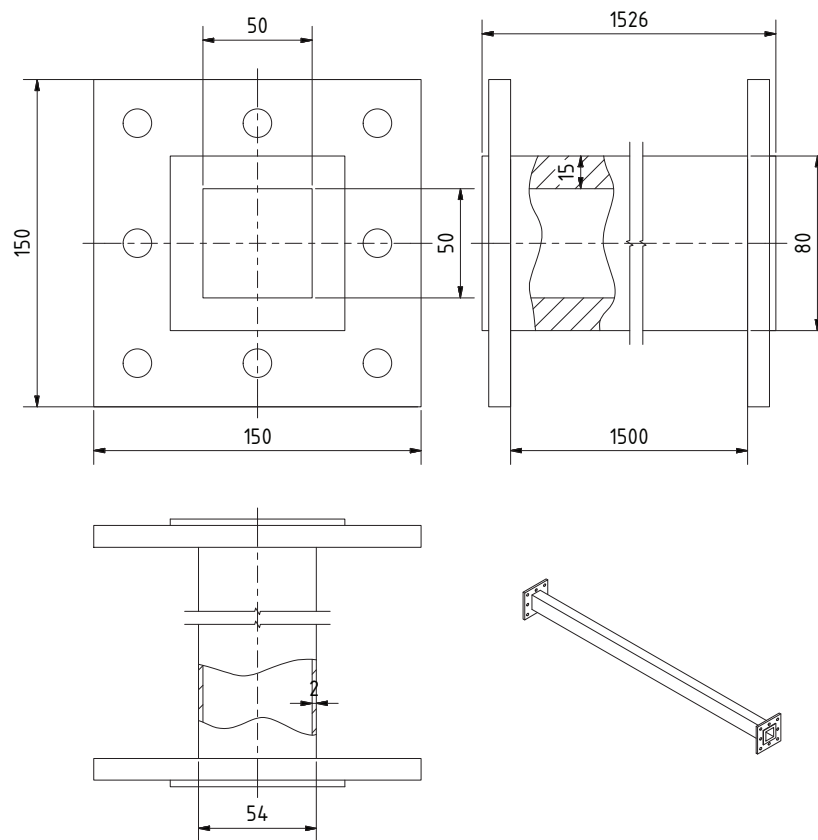
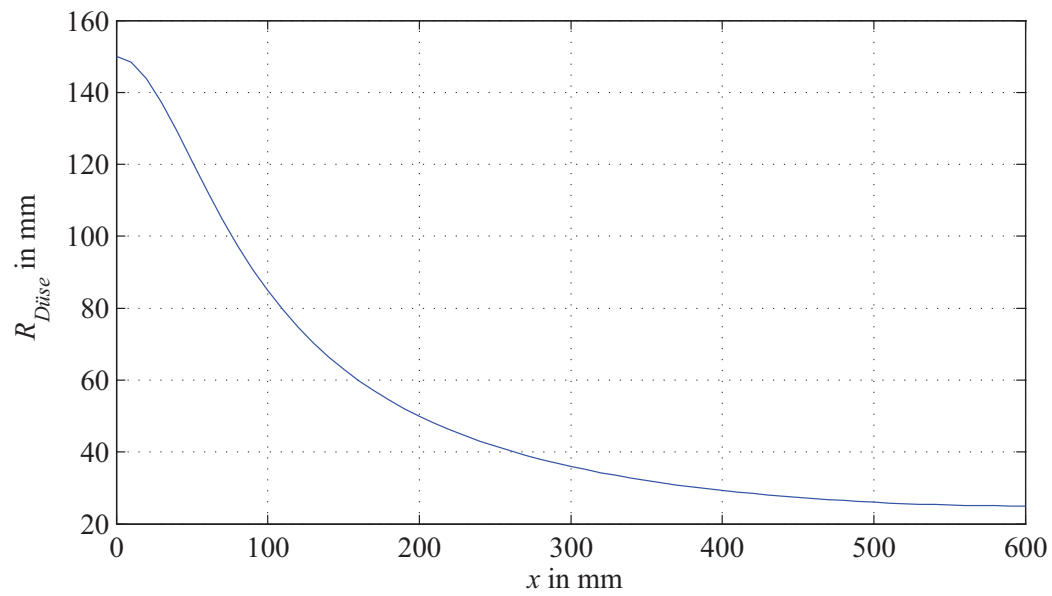
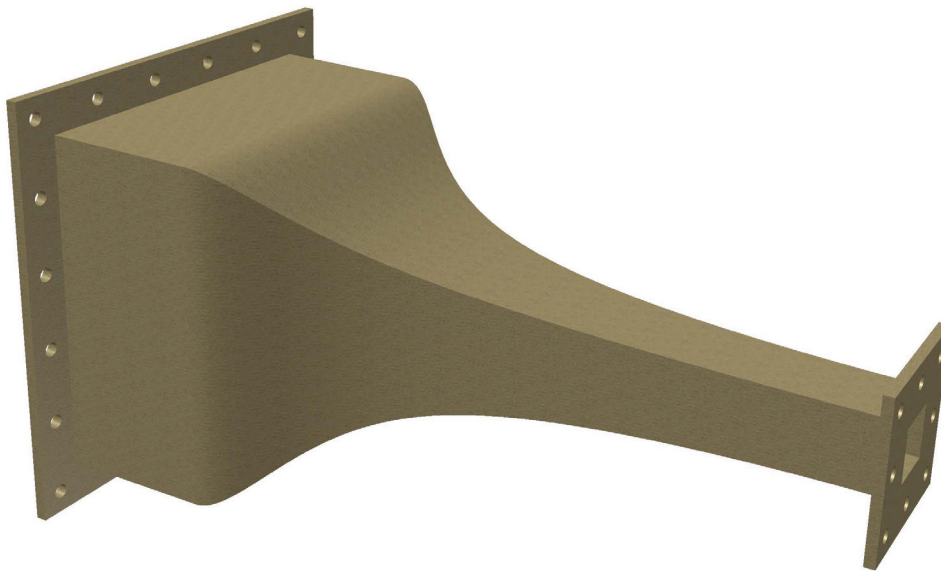


Abbildung A.1: Hauptabmaße der 1,5 m langen Fluidmessstrecke des Wasserumlaufkanals.

Düsenform



(a)



(b)

Abbildung A.2: Düsenform nach Witoszynski [64]: (a) Berechnete Düsenkontur. (b) Dreidimensionales Abbild der aufgebauten Düse.

Wasserumlaufkanal

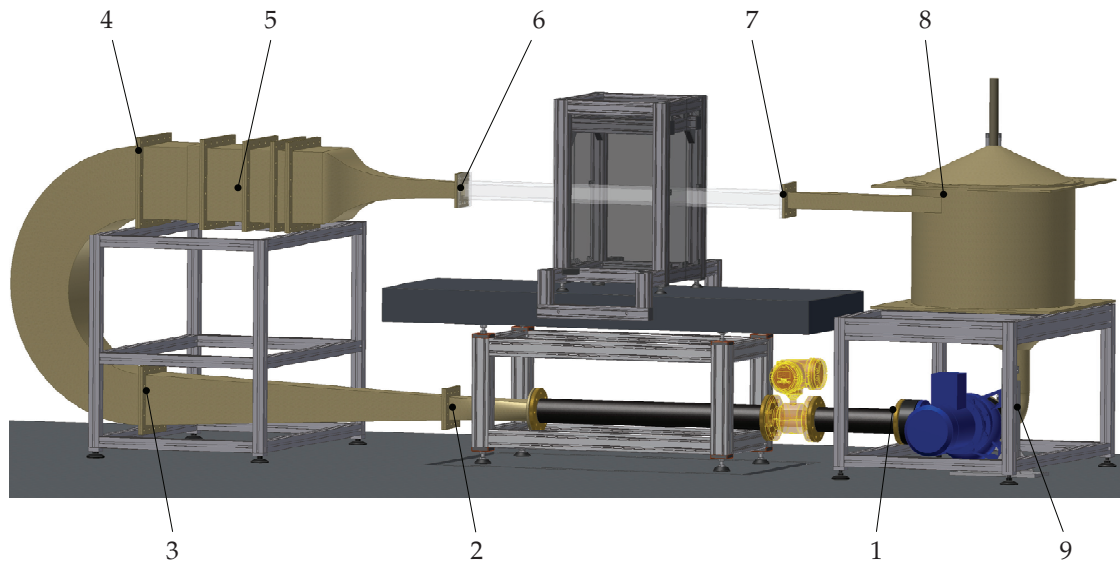


Abbildung A.3: Kennzeichnung der neuralgischen Übergangspositionen am Wasserumlaufkanal (vgl. Tabelle in Abbildung A.4).

Position	Nennmaß [mm]	Querschnitt [dm ²]	Geschw. [m/s]	Verlustbeiwert	Verlust [m]
1	75	0,56	2,222222	0,6	0,151017
2	80	0,64	1,953125	0,2	0,038886
3	200	4,00	0,312500	0,2	0,000995
4	300	9,00	0,138889	4,0	0,003933
5	300	9,00	0,138889	0,2	0,000197
6	50	0,25	5,000000	0,6	0,764526
7	50	0,25	5,000000	0,6	0,764526
8	800	64,00	0,019531	0,2	0,000004
9	100	1,00	1,250000	0,2	0,015928

variable Werte
feste Werte
berechn. Werte

Summe Verluste:	1,740012
-----------------	----------

Abbildung A.4: Übersicht über die vorgegebenen sowie die berechneten Nennmaße des Wasserumlaufkanals in Bezug auf Abbildung A.3. Die aufsummierte Verlustsumme repräsentiert hierbei den Ausgangspunkt zur Berechnung der Pumpenleistung.

A.2 Steuerung des EMK-Prototypen

Die folgenden zwei Punkte sind in leicht veränderter Form der – unter meiner Betreuung – angefertigten Dokumentation des Studenten M. Unger entnommen. Für weiterführende Informationen, wie die Ansteuerung der Pumpe beziehungsweise der übrigen Sensoren, soll an dieser Stelle auf das Hauptdokument [77] verwiesen werden.

LabVIEW-Benutzeroberfläche

Wird die Messanwendung gestartet, öffnet sich die in Abbildung A.5 dargestellte Benutzeroberfläche. Hiervon können die Messungen durchgeführt und verarbeitet werden. Die Anwendung ist im Wesentlichen in drei Bereiche unterteilt. Im linken Teil der Oberfläche befinden sich die Steuerelemente für die Pumpe, ein Bedienfeld für die Auswahl der zu speichernden Datei sowie die Steuerung zum Starten und Beenden der Messungen. Mit Hilfe der Pumpensteuerung kann die gewünschte Drehzahl eingestellt werden und die Pumpe im Wasserkanal gestartet und gestoppt werden. Die Dateisteuerung erlaubt die Auswahl einer Datei, in der die aufgenommenen Messdaten gespeichert werden sollen, sowie die Daten in die ausgewählte Datei aufgenommen oder die Aufzeichnungen gestoppt werden sollen. Mit der Messsteuerung werden die Messungen am Wasserkanal und das Auslesen der Messdaten gestartet oder gestoppt.

Im rechten Bereich der Oberfläche werden die aufgenommenen Messdaten übersichtlich in einer dreidimensionalen Darstellung des Wasserumlaufkanals wiedergegeben. Um die Messwerte einfacher erfassen zu können werden sie an der Stelle positioniert an der sie am Wasserkanal abgenommen werden. Dadurch können die Temperatur- und Druckverteilungen im Wasserkanal leichter erkannt werden. Darüber hinaus können fehlerhafte Messsensoren schneller detektiert werden. Der dritte und untere Teil der Benutzeroberfläche gibt die aufgenommenen Messdaten in vier Diagrammen wieder. Zwei Diagramme teilen sich hierbei alle gebündelten Druck- und Temperatursensoren. Für die Fließgeschwindigkeit im Wasserkanal und die ermittelte Lorentzkraft stehen zwei weitere Diagramme zur Verfügung. Mit Hilfe dieser Diagramme ist eine intuitive und schnellere visuelle Erfassung der Messdaten, sowie derer Veränderung beim Ein- und Ausschalten der Pumpe möglich.

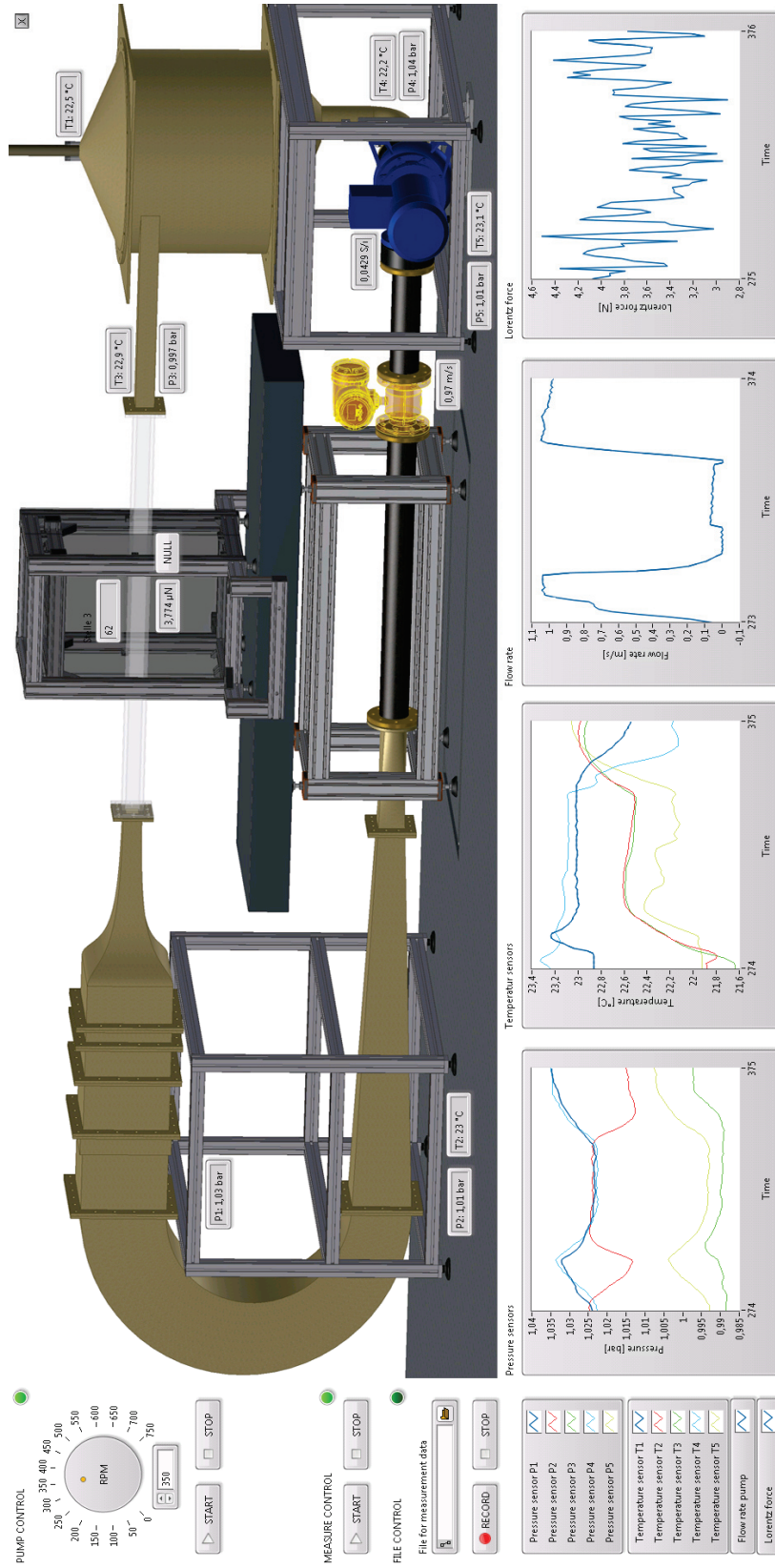


Abbildung A.5: Darstellung der unter *LabVIEW* entstandenen Bedienoberfläche. Zu sehen sind die Einstellmöglichkeiten für die Pumpendrehzahl, Messwertaufnahme, Messwertspeicherung sowie mehrere Grafiken zur Onlineüberwachung der Messdaten.

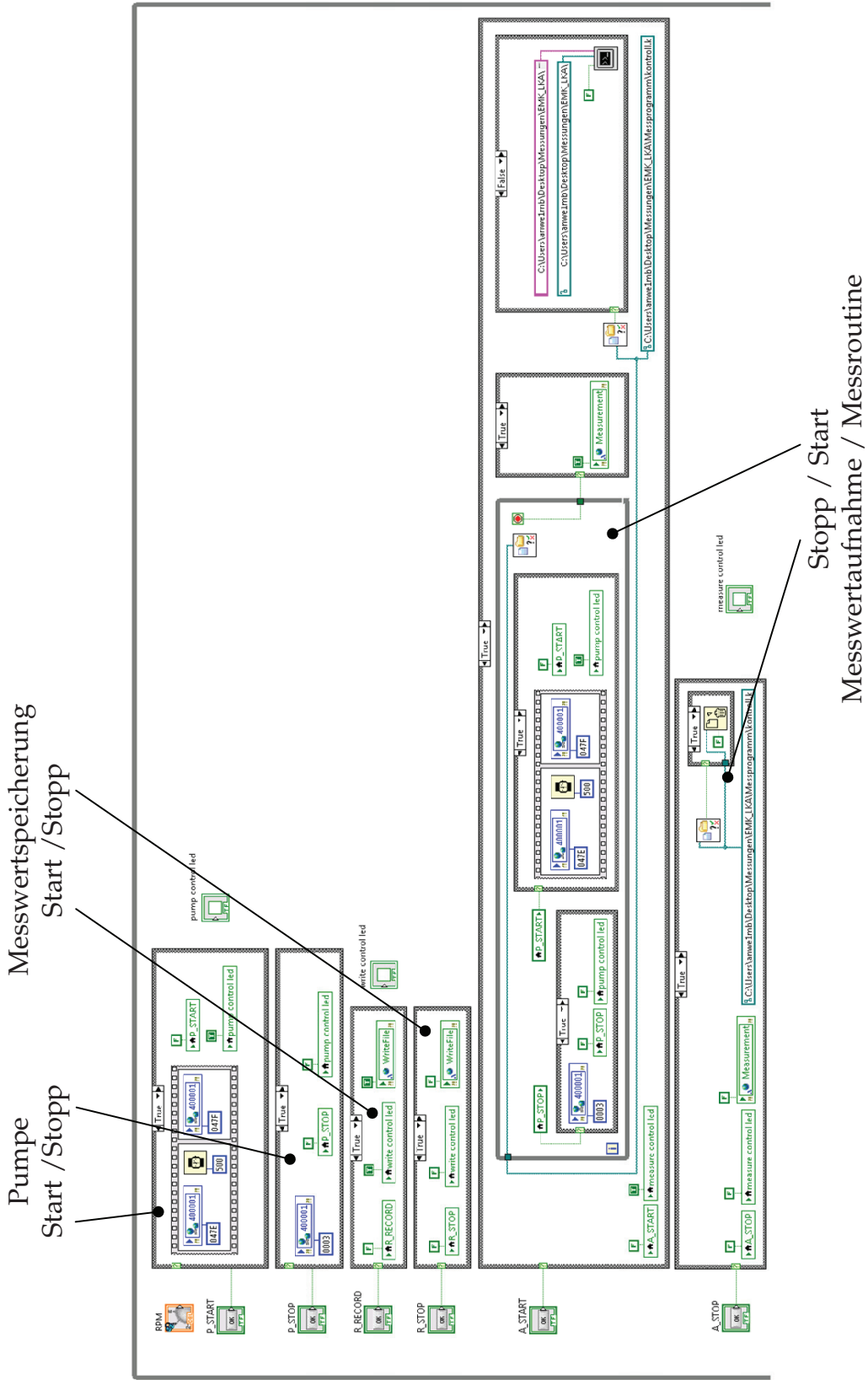
LabVIEW-Blockdiagramm

LabVIEW ist eine Entwicklungsumgebung die hauptsächlich für messtechnische Aufgaben wie Datenerfassung und Gerätesteuerung, sowie auch zur industriellen Automatisierung eingesetzt wird. Des Weiteren eignet sich *LabVIEW* auch zur Auswertung, Analyse und Dokumentation von Daten.

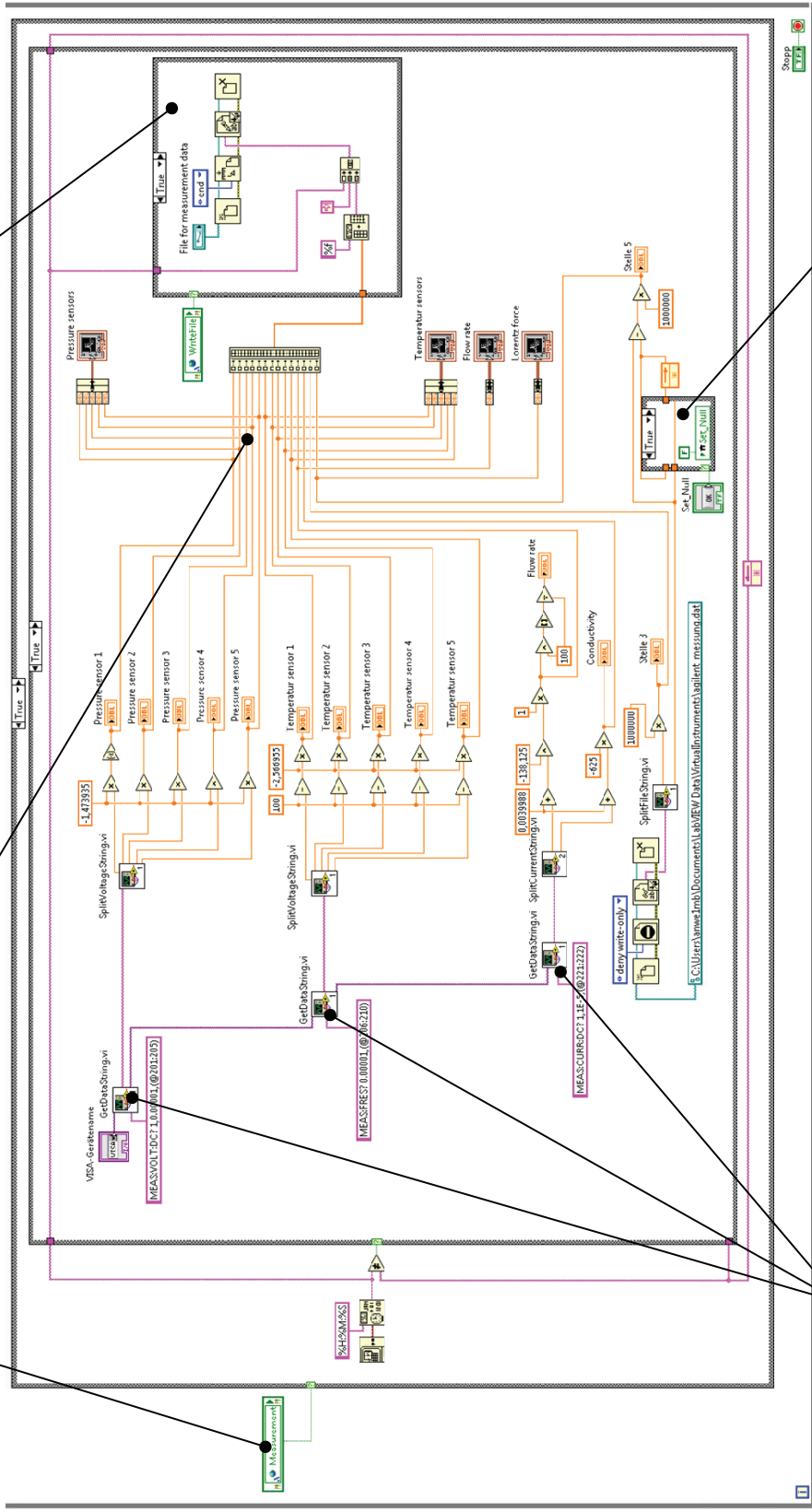
In *LabVIEW* werden Symbole anstelle von Textzeilen verwendet, um den Programmablauf zu erstellen. Die damit erstellten Programme werden als virtuelle Instrumente bezeichnet, da sie hinsichtlich ihres Erscheinungsbilds und ihrer Funktionalität realen Instrumenten nachempfunden sind. Die im Wesentlichen zur Erfassung, Analyse, Darstellung und Speicherung von Daten erstellten Programme bestehen aus einem Frontpanel mit der Benutzerschnittstelle und einem Blockdiagramm mit dem grafischen Programmcode.

Jedes Programm kann ebenfalls als Unterprogramm, einem sogenannten Sub-VI, in einem vollständigen Programm aufgerufen werden. Dadurch ist es möglich, einzelne eigenständig lauffähige Module zu erstellen, die beliebig tief verschachtelt werden können, um mit deren Hilfe komplexe Programme übersichtlicher zu gestalten. Jedes Unterprogramm kann mehrere Ein- und Ausgänge besitzen, die im Blockdiagramm mit Linien, welche Leitungen charakterisieren, verbunden werden. Besitzt ein Unterprogramm Eingänge, so wird dieses erst ausgeführt, sobald an allen Eingängen Daten anliegen. Besitzt das Sub-VI keine Eingänge, so wird dieses sofort beim Start des kompletten Programmes ausgeführt. Die verarbeiteten Daten liegen am Ausgang erst vor, wenn das komplette Unterprogramm abgearbeitet wurde. Besitzt ein Sub-VI keine Ausgänge, so werden die Daten verworfen oder im Unterprogramm, zum Beispiel durch das Speichern auf der Festplatte, verarbeitet. Bestimmt wird die Abarbeitungsreihenfolge durch die sogenannte Datenflussprogrammierung, bei welcher der Fluss der Daten den Programmablauf steuert und nicht wie bei textbasierten Programmiersprachen durch die Programmausführung von Anweisungen in einer vordefinierten Reihenfolge, wie zum Beispiel Zeilenweise von oben nach unten.

Die im Blockdiagramm zur Datenverarbeitung benötigten Datenquellen und nach der Verarbeitung erzeugten Datensinken können im Frontpanel mit Bedien- und Anzeigeelementen dargestellt werden. Mit der Vielzahl an Bedien- und Anzeigeelementen können im Frontpanel sehr komfortabel Programme mit einer guten grafischen Benutzeroberfläche erstellt werden.



Messroutine Zusammenführung und Anzeige der Messdaten Abspeicherung in externer Datei



Aufteilung des Datenstrings
 Tara-Funktion für Lorentzkraft
 Abbildung A.6: Darstellung des Blockschaltbildes innerhalb der LabVIEW-Umgebung mit Kennzeichnung der wichtigsten Unterprogramme.

Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit zu dem Thema "*Experimentelle Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Lorentzkraft-Anemometrie auf schwach leitfähige Fluide*" ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Bei der Auswahl und Auswertung folgenden Materials haben mir die nachstehend aufgeführten Personen in der jeweils beschriebenen Weise unentgeltlich geholfen:

- Alexander Kruse – Wissenschaftliche Hilfskraft der TU Ilmenau: Aufnahme von Messreihen am Pendelprototypen sowie Mitwirkung bei Koordination der Fertigungsvorschriften für den Aufbau der Einzelteile des EMK-Prototypen.
- Matthias Unger – Wissenschaftliche Hilfskraft der TU-Ilmenau: Erstellung eines *LabVIEW*-Programmes sowie einer Dokumentation zur Ansteuerung des Wasserumlaufkanals.
- Thomas Kühlmann – Wissenschaftliche Hilfskraft der TU Ilmenau: Mithilfe beim Aufbau des EMK-Prototyps sowie bei der Aufnahme und Analyse von Messreihen am EMK-Prototypen.
- Tilman Stark – Wissenschaftliche Hilfskraft der TU Ilmenau: Durchführung einer Patentrecherche zum LKA-Messverfahren und artverwandten Messmethoden.

Weitere Personen waren an der inhaltlich-materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder andere Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalte der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer Prüfungsbehörde vorgelegt. Ich bin darauf hingewiesen worden, dass die Unrichtigkeit der vorstehenden Erklärung als Täuschungsversuch bewertet wird und gemäß § 7 Abs. 10 der Promotionsordnung den Abbruch des Promotionsverfahrens zur Folge hat.

Ilmenau, 26. November 2012
Ort, Datum

André Wegfraß