

Experimentelle Untersuchungen zur Kalibrierung von Lorentzkraft-Anemometern für die Durchflussmessung in Flüssigmetallströmungen bei metallurgischen Hochtemperaturprozessen

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)

vorgelegt der
Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Ilmenau

von Herrn

Diplomingenieur Michael Gramß
geboren am 19.10.1981 in Münchberg

Gutachter: Priv.-Doz. Dr. Christian Karcher, Ilmenau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Fröhlich, Ilmenau
Prof. Dr.-Ing. Egbert Baake, Hannover

eingereicht am 27.11.2012
verteidigt am 20.8.2013

urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013000540

Zusammenfassung

Die Arbeit beschäftigt sich mit experimentellen Untersuchungen zur Kalibrierung von Lorentzkraft-Anemometern in Flüssigmetallströmungen. Ein Lorentzkraft-Anemometer ist ein elektromagnetisches Durchflussmessgerät, das an der TU Ilmenau entwickelt wird. Mit diesem Gerät ist es möglich, berührungsfrei Durchflüsse in heißen und aggressiven Medien, wie Flüssigmetallschmelzen zu messen. Ein Lorentzkraft-Anemometer besteht aus einem Magnetsystem, das mit einem Kraftsensor gekoppelt ist. Die durch die Wechselwirkung des Magnetfeldes mit der strömenden Metallschmelze entstehende Kraft ist proportional zum Durchfluss. Daneben beeinflussen aber noch zahlreiche andere Faktoren, wie die magnetische Flussdichte des Magnetsystems oder die elektrische Leitfähigkeit der Schmelze, das Messergebnis. Deshalb ist eine Kalibrierung des Systems notwendig. Erste Testmessungen in der Industrie zeigten, dass die trockene Kalibrierung, bei der die Schmelze in einer Gießrinne durch Festkörper mit festgelegter Breite und verschiedenen Höhen modelliert wird, um eine nasse Kalibrierung ergänzt werden muss. Eine Hypothese ist, dass die Ergebnisse der trockenen Kalibrierung in die Ergebnisse der nassen Kalibrierung überführt werden können, wenn ein einziges Lorentzkraft-Anemometer der gleichen Charge mit trockener und nasser Kalibrierung untersucht wird. Für die Kalibrierung des Gerätes wurden zwei Versuchsanlagen geplant, aufgebaut und instrumentiert. Mit Hilfe der sogenannten trockenen Kalibrierung können grundlegende Einflussfaktoren auf die gemessene Kraft des Lorentzkraft-Anemometers untersucht werden. Der Versuchsaufbau der trockenen Kalibrierung wurde weiterentwickelt und verbessert. Für die nächste Generation von Lorentzkraft-Anemometern wurde die Anlage neu konstruiert und aufgebaut. Der Durchfluss wird bei dieser Methode durch Variation der Geschwindigkeit der Probekörper und durch verschiedene Höhen der Probekörper verändert. Damit ergibt sich eine Abhängigkeit der Lorentzkraft von der Strömungsgeschwindigkeit und von der Höhe des durchströmten Volumens. Es stellt sich eine lineare Abhängigkeit der Kraft von der Strömungsgeschwindigkeit ein. Es werden Kraftwerte bis 4,5N gemessen. Die Höhe des durchströmten Volumens zeigt eine nichtlineare, kubische Abhängigkeit. Die elektrische Leitfähigkeit ist direkt proportional zur erzeugten Kraft.

Für die sogenannte nasse Kalibrierung wurde die Versuchsanlage LiTinCa geplant, aufgebaut und instrumentiert. Diese Anlage arbeitet mit Reinzinn bei Temperaturen zwischen 240°C und 380°C. In dieser Anlage können Strömungsgeschwindigkeit und die Höhe des durchströmten Volumens aufgrund der vorherrschenden Gerinneströmung nicht getrennt betrachtet werden. Es wird deshalb der Massenstrom für die Betrachtungen herangezogen. Erste Ergebnisse zeigen eine lineare Abhängigkeit zwischen Kraft und Massenstrom. Es werden Kraftwerte bis 2,5N verzeichnet. Die Ergebnisse der trockenen Kalibrierung und der

nassen Kalibrierung werden verglichen und daraus Schlussfolgerungen und Verbesserungsvorschläge erarbeitet.

Es können bereits tendenzielle Übereinstimmungen festgestellt werden, die die Hypothese einer Überführbarkeit der Ergebnisse unterstützen. Um aber eine endgültige Aussage über die Überführbarkeit der trockenen in nasse Kalibrierung treffen zu können, sollten weitere Untersuchungen unter Berücksichtigung der Verbesserungsvorschläge angestellt werden. Weiterhin wurde die Grundlagenforschungsanlage Tintelo geplant und aufgebaut. Hier wird Zinn bei 400°C in einem geschlossenen Ringkanal verwendet. An der horizontalen Testsektion der Anlage können, im Gegensatz zu LiTiCa, Untersuchungen an Lorentzkraft-Anemometer mit kontinuierlicher Flüssigmetallströmung durchgeführt werden. Dadurch werden Kalibrierungen mit längeren Messzeiten möglich. Aus Zeitgründen konnten hier noch keine Messungen erfolgen.

Abstract

This work is dedicated to experimental investigations for the calibration of a Lorentz force flowmeter in liquid metal flows. A Lorentz force flowmeter is an electromagnetic Flowmeter which is developed at Ilmenau University of technology.

Using this device volume flux can be measured in hot and aggressive media such as liquid metal flows. A Lorentz force flowmeter is consisting of a magnet system attached to a force sensor. The produced force due to the interaction of the magnetic field with the liquid metal flow is proportional to the metered flow. Besides other properties such as the magnetic flux density of the magnet system and the electrical conductivity of the media are influencing the measurement result. Therefore a calibration of the Lorentz force flowmeter is necessary. First tests in industry showed, that the so called dry calibration, where the liquid metal flow in a launder is modeled by solid bodies with fixed width and different heights, has to be completed by a wet calibration. One hypothesis is that results of dry calibration can be transferred to results of wet calibration, if one master Lorentz force flowmeter of the series is calibrated with wet and dry calibration. To calibrate this device two experimental facilities were planned, set up and instrumented. Using the so called dry calibration basic influences on the measured force of a Lorentz force flowmeter can be investigated. During the so called dry calibration the metered flow is varied by the velocity of the bars and by using different bar heights. The dry calibration set up was enhanced and improved. A new dry calibration set up was planned and build up based on the next generation of Lorentz force flowmeters. The flow velocity is influencing the produced force linearly, whereas the height of the flow volume influences the force nonlinear, with a cubic trend. Forces up to 4.5N could be measured. The electrical conductivity of the media is direct proportional to the force.

For the so called wet calibration an experimental set up called LiTinCa is planned, build up and instrumented. For this set up pure tin at temperatures between 240°C and 380°C is used. Due to open channel flow in this facility the flow velocity cannot be separated from the height of liquid metal. Therefore the mass flux is investigated. First results are showing a linear coherence between mass flux and produced force. Here forces up to 2,5N can be observed. Comparing the results of dry calibration and wet calibration some conclusions and suggestions for improvements are given. The measurements are showing trends which support the hypothesis that dry calibration results can be transferred to wet calibration results. For an ultimate decision further investigation with respect to the suggestions for improvements should be carried out. Furthermore Tintelo, a closed loop facility with tin at temperatures of 400°C for basic research in magnetohydrodynamics was planned and set up. In comparison to LiTinCa investigations of Lorentz force flowmeter in continuous flow regimes can be carried out. Thus longer measuring cycles are possible. Due to limited time no additional measurements using this set up could be done.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	7
	Untersuchung des in der Arbeit verwendeten Lorentzkraft-Anemometers	11
2	Stand der Technik und theoretische Betrachtungen.....	14
	2.1 Literatur.....	15
	2.2 Grundgleichungen und Kennzahlen der Magnetohydrodynamik	18
	2.3 Grundbegriffe der Messdatenauswertung.....	23
3	Versuchsstand der trockenen Kalibrierung- Mitroka	25
	3.1 Versuchsvorbereitung.....	26
	3.2 Versuchsdurchführung.....	28
	3.3 Diskussion der Versuchsergebnisse	31
	3.4 Weiterentwicklung und Neukonstruktion des Versuchsstandes.....	41
	3.5 Unsicherheitsbetrachtung der Messungen mit dem Versuchsstand zur trockenen Kalibrierung	47
4	Anlage zur nassen Kalibrierung- LiTinCa	50
	4.1 Planung der Anlage	50
	4.2 Aufbau und Instrumentierung der Anlage	53
	4.3 Versuchsvorbereitung und -durchführung.....	67
	4.4 Diskussion der Versuchsergebnisse	69
	4.5 Unsicherheitsbetrachtung der nassen Kalibrierung mit LiTinCa	74
5	Vergleich der Messungen mit den Ergebnissen der trockenen Kalibrierung	78
6	Verbesserungsvorschläge und Ausblick.....	80
	Aufbau der Grundlagenforschungsanlage Tintelo	83
7	Zusammenfassung.....	86
	Literaturverzeichnis	87
	Abbildungsverzeichnis	91
	Abkürzungsverzeichnis.....	93

1 Einleitung

Mit Hilfe von Magnetfeldern den Durchfluss von strömenden Medien zu bestimmen, ist eine bewährte Methode in der Strömungsmesstechnik. Ein Pionier der elektromagnetischen Durchflussmessung war Michael Faraday [1], der mit Hilfe von zwei Elektroden, die er zu beiden Seiten der Waterloo- Brücke Londons ins Wasser der Themse eintauchte, und durch das vorherrschende Erdmagnetfeld versuchte, die Fließgeschwindigkeit der Themse zu ermitteln. Damals blieb ihm der Erfolg aufgrund der mangelnden Präzision seiner Messgeräte verwehrt. Heutzutage findet dieses Messprinzip in sehr vielen Bereichen der Technik Anwendung. Das Gebiet der elektromagnetischen Durchflussmessung ist ein gut erforschter und etablierter Zweig der Messtechnik. Allerdings arbeitet ein Großteil der Sensoren auf diesem Gebiet mit Elektroden, die in das jeweilige Medium eingebracht werden müssen. Dies macht den Einsatz in besonders aggressiven und heißen Medien, wie etwa einer Flüssigmetallschmelze, unmöglich, da die Elektroden innerhalb kürzester Zeit unbrauchbar würden.

In Zeiten steigender Energie- und Rohstoffpreise gewinnt auch in der Aluminium- und Stahlindustrie die Verbesserung der Prozesskontrolle, beispielsweise durch Messung des Materialdurchflusses, zunehmend mehr an Bedeutung. Hier setzt das an der TU Ilmenau entwickelte Konzept der Lorentzkraft-Anemometrie an. Mit diesem in der Forschergruppe von Prof. Thess entwickelten Verfahren gelingt es, ein zum Durchfluss proportionales Kraftsignal berührungslos zu erzeugen. Das sogenannte Lorentzkraft-Anemometer (LKA) wird beispielsweise an einer Gießrinne der Sekundäraluminiumindustrie angebracht und misst den Durchfluss in der Rinne. Das Gerät erzeugt hierzu mittels eines außerhalb der Gießrinne angebrachten Magnetsystems ein magnetisches Feld quer zur Flussrichtung der Metallschmelze. Strömt die Schmelze durch die Gießrinne, erzeugt das außen angelegte magnetische Feld Wirbelströme in der Schmelze, die ein sekundäres magnetisches Feld erzeugen. Es entsteht eine Lorentzkraft entgegen der Bewegungsrichtung der Schmelze.

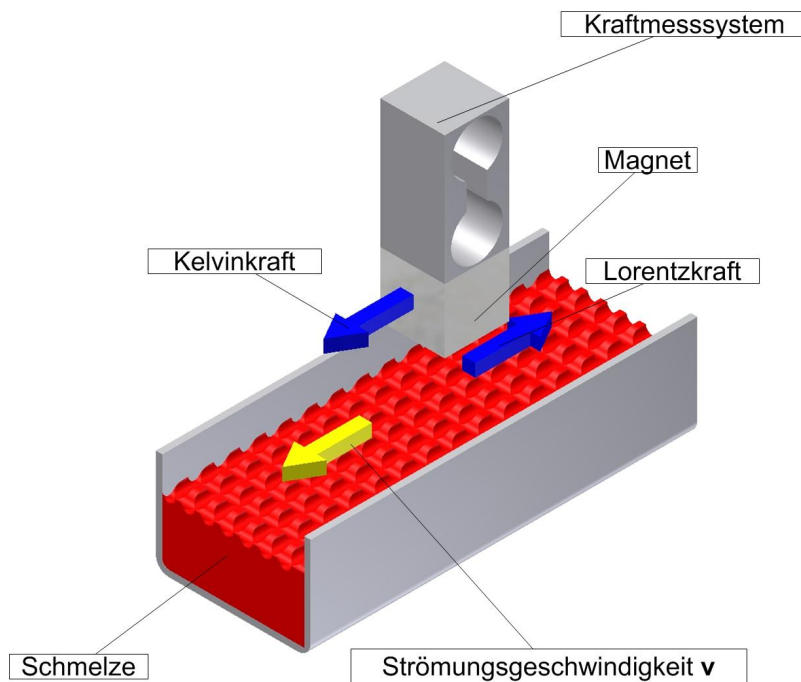


Abbildung 1: Prinzipdarstellung eines Lorentzkraft-Anemometers. Ein Magnet ist an einem Kraftmesssystem über einer Schmelze mit Strömungsgeschwindigkeit v befestigt. In der Schmelze entsteht eine Lorentzkraft entgegen der Bewegungsrichtung, auf den Magnet wirkt die gleichgroße Kelvinkraft als Gegenkraft zur Lorentzkraft.

In typischen metallurgischen Anwendungen, die durch hohe Durchflussraten gekennzeichnet sind, ist der Einfluss der Lorentzkraft auf die Schmelze relativ klein. Deshalb wird das Strömungsprofil der Schmelze nicht signifikant umgestaltet. Aufgrund des dritten Newtonschen Axioms entsteht neben der Lorentzkraft auch eine gleichgroße Gegenkraft in der entgegengesetzten Richtung, die auf das Magnetsystem wirkt. Diese Kraft wird Kelvinkraft genannt und dient als direkte Messgröße zur Bestimmung der Lorentzkraft. Natürlich gibt es außer dem Durchfluss noch andere Größen, wie die elektrische Leitfähigkeit des Mediums und die Höhe des Metalls in der Gießrinne, die das Messergebnis des Sensors beeinflussen. Daneben hängt das Messergebnis auch stark von der magnetischen Flussdichte und der charakteristischen Länge des Systems ab. In Abbildung 1 ist das Grundprinzip eines Lorentzkraftanemometers dargestellt. Ein mit einem Kraftmesssystem gekoppelter Magnet ist über einer strömenden Schmelze angebracht. Es entsteht eine Lorentzkraft entgegen der Bewegungsrichtung der Schmelze.

Durch das dritte Newtonsche Axiom wirkt auf den Magneten eine gleichgroße Gegenkraft, die Kelvinkraft. Sie wird zur Bestimmung der Lorentzkraft herangezogen. Die Lorentzkraft ergibt sich zu:

$$F_L \sim \sigma B_0^2 \dot{V} L . \quad (1)$$

Dabei ist F_L die Lorentzkraft, σ die elektrische Leitfähigkeit des Mediums in S/m, B_0 die charakteristische magnetische Flussdichte des Magnetsystems in T, \dot{V} der Volumenstrom des Mediums in m^3/s und L die charakteristische Länge des Systems [2]. Auf diese Formel wird im Kapitel 2 noch detaillierter eingegangen. Nicht zuletzt aufgrund dieser Abhängigkeiten und insbesondere aufgrund der schwer zu bestimmenden Faktoren B_0 und L , ist eine fundierte, rückführbare Kalibrierung des LKA äußerst wichtig. Die Kalibrierung von Durchflussmessgeräten ist unter anderem auch wegen der vielen Einflussgrößen sehr schwierig. Die Anlage mit der kleinsten Messunsicherheit für die Kalibrierung von Durchflussmessgeräten in Deutschland ist das „Hydrodynamische Prüffeld“ der Physikalisch Technischen Bundesanstalt. Die Anlage arbeitet mit Wasser und erreicht eine Unsicherheit von circa 0,02% [3].

Das „Hydrodynamische Prüffeld“ stellt in Deutschland auch das Normal für die Durchflussmessung dar. Die Kalibrierung eines Durchflussmessgerätes für Wasser stellt hohe Anforderungen an Gerät und Kalibrieranlage. Eine wesentlich schwierigere Aufgabe ist allerdings die Kalibrierung eines Gerätes, das üblicherweise mit Flüssigmetallschmelzen arbeitet. Es liegt nahe, das Gerät mit Flüssigmetall zu kalibrieren, jedoch ist der Einsatz von Schmelzen mit Temperaturen oberhalb von 600°C in Laborräumen nahezu unmöglich. Diesem Umstand wurde an der TU Ilmenau im Jahre 2005 erstmals Rechnung getragen.

Es wurde die sogenannte trockene Kalibrierung von Lorentzkraft-Anemometern entwickelt, durchgeführt und publiziert [4]. Bei dieser Methode wird die Flüssigmetallströmung durch einen festen Aluminiumkörper modelliert, der mittels eines Linearantriebes kontrolliert durch das Messgerät bewegt wird. Anschließende Tests in der Industrie machten deutlich, dass diese Kalibriermethode allein nicht ausreicht, um korrekte Resultate zu erzielen [5]. Bereits 2005 wurde deshalb vorgeschlagen, die bestehende trockene Kalibrierung um eine Flüssigkalibrierung, die die Flüssigmetallströmung besser annähern kann, zu erweitern.

Eine von Minchenya 2011 aufgestellte Hypothese war, dass in einer Serienproduktion von Lorentzkraft-Anemometern ein Master Lorentzkraft-Anemometer (LKA) flüssig und trocken kalibriert wird. Alle nachfolgenden Geräte dieser Charge könnten nur mit Hilfe der trockenen Kalibrierung und den Vergleichswerten des Mastergerätes kalibriert werden [6]. Dazu muss die flüssige Kalibrierung mit der trockenen Kalibrierung vergleichbar sein.

Der bisher verwendete Aufbau zur trockenen Kalibrierung weist verschiedene Mängel auf, die die Unsicherheit des Systems erhöhen. In dieser Arbeit soll die Verbesserung des Aufbaus der trockenen Kalibrierung thematisiert werden. Außerdem werden die Ausweitung der Versuche zur trockenen Kalibrierung und deren Ergebnisse dargestellt. Aufgrund der parallel vorangetriebenen Entwicklung des Lorentzkraft-Anemometers und den daraus resultierenden veränderten Anforderungen an den Aufbau zur trockenen Kalibrierung wird anschließend die Neukonstruktion der Anlage beschrieben. Zur weiteren Verbesserung wird der Vorschlag einer Flüssigkalibrierung aus dem Jahr 2005 aufgegriffen werden.

Dazu wird die Planung und der Aufbau der Flüssigzinnkalibrieranlage LiTinCa erläutert sowie die Ergebnisse von ersten Untersuchungen diskutiert. Es soll weiterhin die Vergleichbarkeit der flüssigen und trockenen Kalibriermethode untersucht werden.

Untersuchung des in der Arbeit verwendeten Lorentzkraft-Anemometers

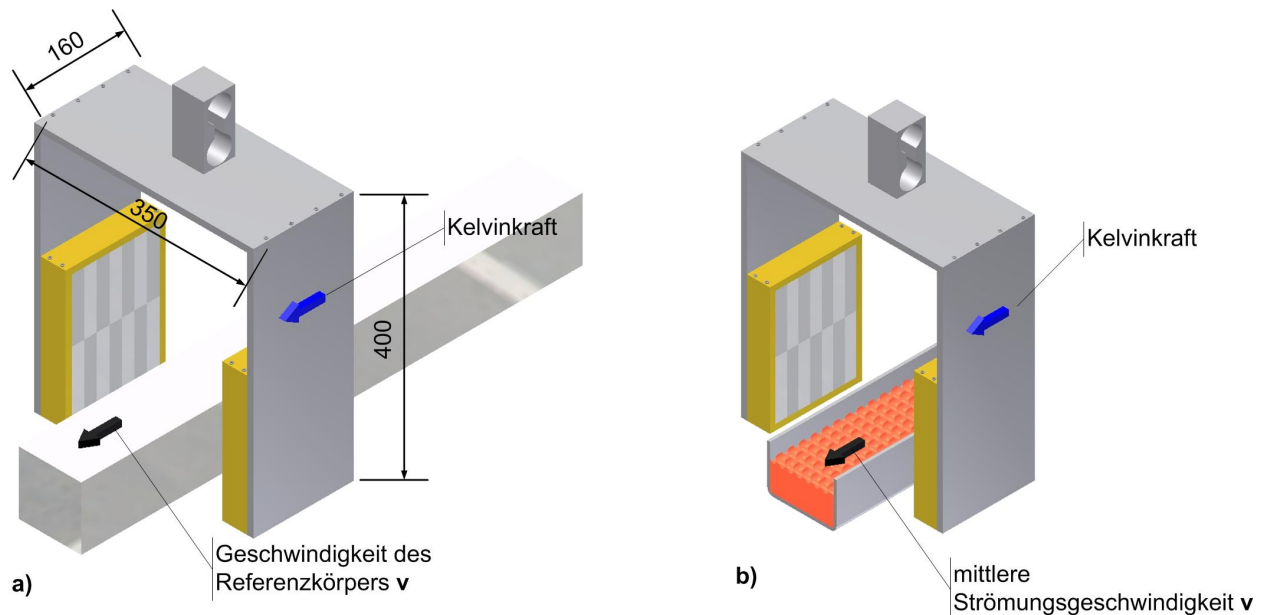


Abbildung 2: Prinzipdarstellung des verwendeten Aufbaus für die trockene Kalibrierung a) und die nasse Kalibrierung b). In Teilbild a) sind die wesentlichen Maße des verwendeten LKA eingetragen. Im Fall der trockenen Kalibrierung a) werden verschiedene feste Referenzkörper verschiedener Höhe und aus verschiedenen Materialien durch das LKA-System bewegt. Bei der nassen Kalibrierung wird das System über der Gießrinne montiert.

In Abbildung 2a ist der prinzipielle Aufbau der trockenen Kalibrierung dargestellt. Hier wird die Strömung der Flüssigmetallschmelze in einer Gießrinne durch die Bewegung fester Referenzkörper verschiedener Höhe und verschiedener Materialien modelliert. Abbildung 2b zeigt das Grundprinzip der nassen Kalibrierung. Das LKA wird an einer Gießrinne montiert, durch die eine Flüssigmetallschmelze fließt. Wie in Abbildung 2 und Abbildung 4 dargestellt, wird das Magnetfeld von zwei Permanentmagnetarrays quer zur Strömungsrichtung aufgespannt, die an der linken und rechten Seite der Gießrinne angebracht sind. Die Permanentmagnetarrays bestehen aus 2 Schichten mit je 14 identischen NdFeB Magneten der Abmessungen 20mm x 20mm x 100mm des Typs N40. Die Magnetisierung ist senkrecht zur Flussrichtung der Schmelze. Durch das primäre Magnetfeld der Permanentmagneten werden durch Interaktion mit der strömenden Schmelze Wirbelströme in der Schmelze erzeugt. Deren sekundäres Magnetfeld lässt schließlich eine Lorentzkraft entgegengesetzt der Bewegungsrichtung entstehen.

Aufgrund des dritten Newtonschen Axioms $actio = reactio$ entsteht eine gleichgroße Gegenkraft. Diese Kraft wird Kelvinkraft genannt und wirkt auf die Ursache des primären Magnetfeldes, das Magnetsystem des Lorentzkraft-Anemometers. Die Kraft wirkt in Strömungsrichtung der Schmelze und ist proportional zum Durchfluss. Sie wird vom Kraftmesssystem gemessen, über einen Digital-Analogwandler digitalisiert und über eine RS 232 Verbindung ausgelesen. Das Gesamtgewicht des LKA liegt aufgrund der massiven Stahlteile für Joch und Magnetpolunterstützung bei circa 30kg.

Im Graduiertenkolleg „Lorentzkraft-Anemometrie und Wirbelstromprüfung“ wurde ein automatisches Messsystem zur Messung der magnetischen Flussdichte in Magnetsystemen entwickelt. Dazu wurde ein bereits bestehendes Drei-Achs-Positioniersystem mit einer Hall-Sonde bestückt. Die Kalibrierung dieses Systems hat bei einer magnetischen Flussdichte von bis zu 400mT eine maximale Abweichung von $\pm 1,3\text{mT}$ ergeben. Mit Hilfe dieses Messsystems wurde im Einbauzustand der trockenen Kalibrierung der Raum zwischen den beiden Magnetpolen des Lorentzkraft-Anemometers in Schritten von 1mm automatisiert abgefahren und die magnetische Flussdichte gemessen.

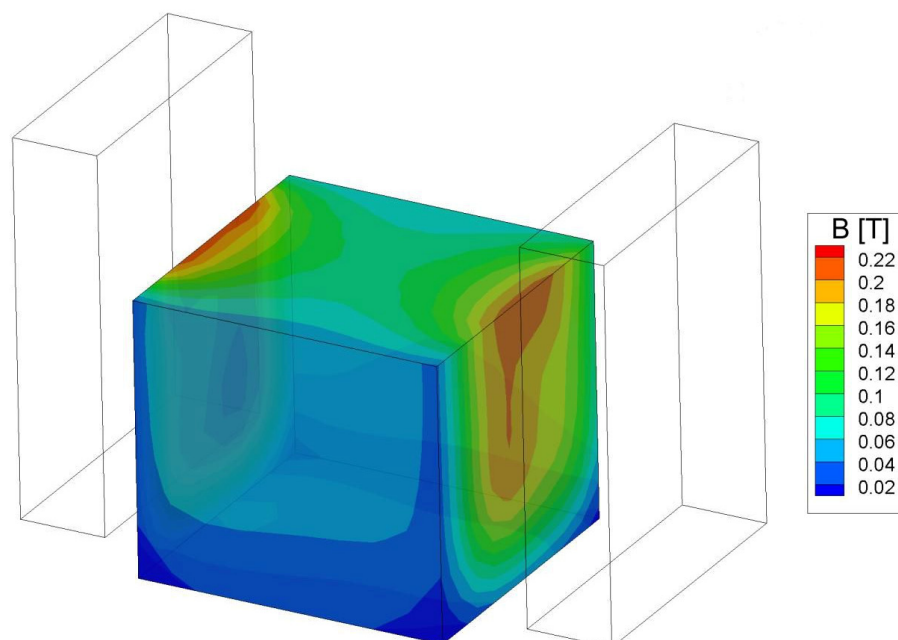


Abbildung 3: Ergebnis der Bestimmung der Flussdichte des Magnetfeldes. Die Farben symbolisieren den Messwert in Tesla. Der Mittelpunkt des dargestellten Messvolumens weist eine Flussdichte von ca. 80mT auf.

In Abbildung 3 sind die Messwerte der magnetischen Flussdichte zwischen den Polen aufgetragen. Es ist deutlich zu sehen, dass die Flussdichte zur Mitte hin abnimmt. Während die Flussdichte an der Oberfläche der Pole bei ungefähr 0,2T liegt, fällt sie in der Mitte des Messvolumens auf circa 0,08T. In diesem Fall kann von einer mittleren magnetischen Flussdichte von etwa 80mT im Wirkvolumen des Lorentzkraft-Anemometers ausgegangen werden. Die Ergebnisse decken sich weitgehend mit den Messergebnissen in einer privaten Mitteilung von Minchenya.

Vor dem Hintergrund dieses inhomogenen Magnetfeldes gewinnt die Kalibrierung, insbesondere die Kraft-Höhen Abhängigkeit des Sensors, zunehmend an Bedeutung. Eine kleine Exzentrizität des Messvolumens oder eine Veränderung der durchströmten Fläche hat eine große Auswirkung auf die Lorentzkraft, wie auch Formel 1 zeigt.

In der vorliegenden Arbeit werden nach einer kurzen Einleitung im Punkt 2 der aktuelle Stand der Technik und einige theoretische Betrachtungen erörtert. Abschnitt 3 beschäftigt sich mit der Anlage zur trockenen Kalibrierung und diskutiert die erzielten Ergebnisse. In Kapitel 4 werden Planung, Aufbau und Instrumentierung der Anlage zur nassen Kalibrierung beschrieben und erste Ergebnisse diskutiert. Ein Vergleich der Ergebnisse der trockenen Kalibrierung und der nassen Kalibrierung wird in Kapitel 5 gezogen, welcher schließlich in Abschnitt 6 durch einige Verbesserungsvorschläge und einen Ausblick für zukünftige Messungen abgeschlossen wird. In Kapitel 7 werden wesentliche Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst.

2 Stand der Technik und theoretische Betrachtungen

Da es momentan eine große Anzahl von elektromagnetischen Durchflussmessern auf dem Markt gibt, werden die Sensoren in zwei Hauptgruppen eingeteilt. Die erste Gruppe der elektromagnetischen Durchflussmesser sind Durchflussmesser mit medienberührenden Elektroden. Diese sind jedoch für die Messaufgabe in heißen und aggressiven Medien nicht geeignet, da die Elektroden in kürzester Zeit unbrauchbar würden. Die zweite Gruppe sind die Durchflussmeseinrichtungen ohne Medienberührung. Hier ist das sogenannte Lorentzkraft-Anemometer (LKA) einzuordnen.

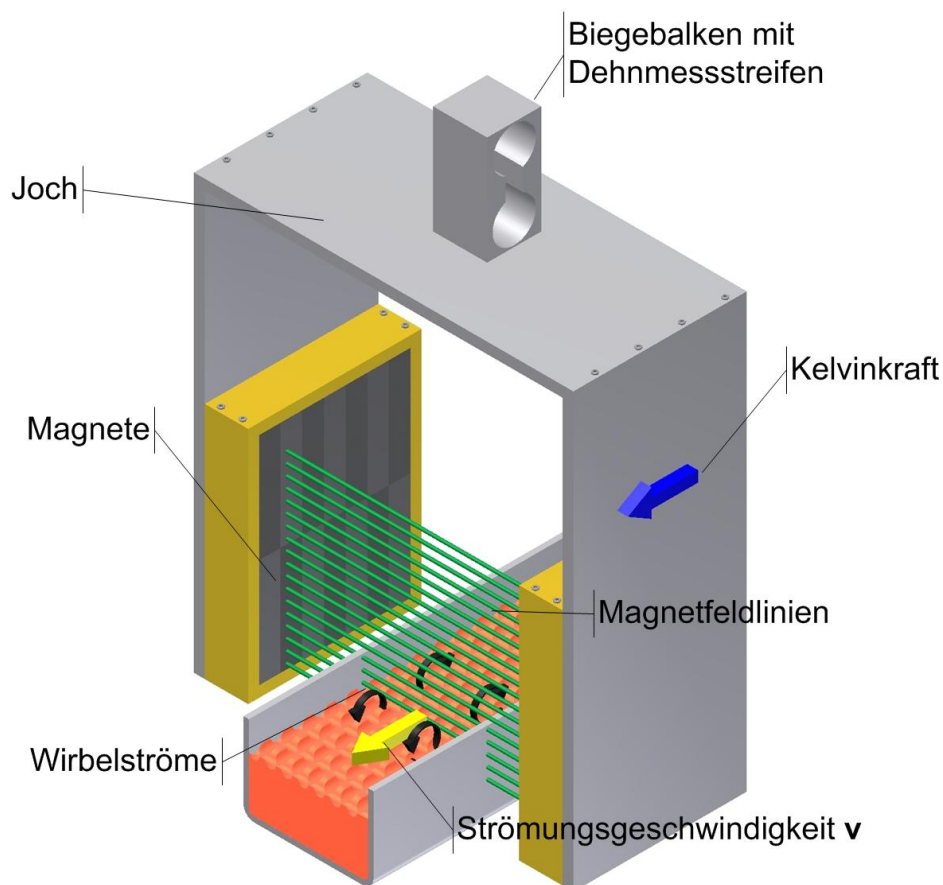


Abbildung 4: Grundprinzip des verwendeten Lorentzkraft-Anemometers. Zwischen den Magnetarrays entsteht ein magnetisches Feld. Die Magnete werden über ein Joch verbunden, an dem das Kraftmesssystem mit Biegebalken und Dehnmessstreifen befestigt ist. In der strömenden Schmelze werden Wirbelströme erzeugt und eine Lorentzkraft entgegen der Bewegungsrichtung induziert. Die Kelvinkraft wirkt auf das LKA und ist die Gegenkraft der Lorentzkraft.

Auf dem Markt gibt es momentan wenige Konkurrenzsysteme, die die Messaufgabe, Durchflüsse in Flüssigmetallschmelzen in einer Gießrinne zu messen, bewältigen könnten. Beispielsweise ist es durch Umbau der Produktionsanlage möglich, die Gießrinne der Anlage mit Wägezellen zu verbinden, die den Massenstrom in der Gießrinne durch Differenzmessung ermitteln. Der sogenannte Phasensensor, bei dem die durch die Strömungsgeschwindigkeit des Mediums induzierte Phasenverschiebung zwischen einer Sender- und zweier Empfängerspulen verwendet wird, steht kurz vor der Markteinführung. Allerdings ist die Wirksamkeit in Gerinneströmungen noch nicht nachgewiesen worden. Weiterhin ist das Gerät sehr empfindlich gegenüber äußeren elektromagnetischen Feldern, wie sie etwa durch einen Schmelzofen in der Aluminiumindustrie erzeugt werden [7]. Ebenso verhält es sich bei den Verfahren des rotierenden Magnetes und dem magnetischen Flügelrad nach Ideen von Shercliff [1], die von Buchenau auf ihre kommerzielle Verwertbarkeit hin untersucht wurden [7]. Auch hier ist eine aufwändige Kalibrierung und vor Ort ein Abgleich von Fremdfeldern erforderlich. Das kommerziell erhältliche Gerät der Firma Brosinsky funktioniert nach dem Messprinzip Faradays und nutzt die Potentialdifferenz, die durch die Strömung eines elektrisch leitfähigen Mediums an der Rohrwand auftritt. Allerdings kann hier nicht direkt an einer Gerinneströmung gemessen werden [8].

Nach der Veröffentlichung der Theorie eines Lorentzkraftanemometers 2007 [2], übernahm 2010 das Graduiertenkolleg „Strömungsmessung und Wirbelstromprüfung mittels Lorentzkraft“ die Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Lorentzkraft-Anemometrie und Wirbelstromprüfung mittels Lorentzkraft.

2.1 Literatur

Theoretische Arbeiten auf dem Gebiet der Lorentzkraftanemometrie

Neben der experimentellen Kalibrierung wird an der TU Ilmenau auch eine Kalibrierung auf numerischem Weg entwickelt, die die zu erwartenden Kräfte vor allem in der Designphase zuverlässig vorhersagen soll [9]. 2011 gelang es Wang, die zu erwartenden Kräfte für verschiedene Geometrien der Gießrinne numerisch zu berechnen [10]. Auch hier liegen die Messwerte der nassen Kalibrierung deutlich unter denen der trockenen Kalibrierung (vgl. 5).

Die Frage der numerischen Optimierung eines Lorentzkraft-Anemometers für den kommerziellen Einsatz wurde von Carmen Stelian in Zusammenarbeit mit Artem Alferenok 2011 erörtert [11]. Ein für die folgenden Betrachtungen wichtiges Teilergebnis dieser Arbeit ist, dass neben der Stärke des magnetischen Feldes auch die Masse des Gesamtsystems ein wichtiger Einflussparameter auf die produzierte Kraft des Lorentzkraft-Anemometers ist. So verkleinert ein hohes Eigengewicht die produzierte Lorentzkraft eines LKA. Dieser Einfluss wird besonders bei hohen Durchflussraten während der Nasskalibrierung deutlich (vgl. 4.4.).

G. Pulugundla gelang es 2012, lokale Strömungsmessungen in einer Flüssigmetallströmung numerisch zu modellieren und tiefgehende Erkenntnisse über die Auswirkungen eines lokalen Magnetfeldes in einer Flüssigmetallströmung zu erzeugen. [12]

Experimentelle Arbeiten auf dem Gebiet der Lorentzkraftanemometrie

C. Heinicke konnte 2012 lokale Geschwindigkeitsmessung mittels Lorentzkraft in Flüssigmetallen durchführen. Der Fokus liegt hier auf der Messung mehrerer Kraftkomponenten zur genauen Charakterisierung von Flüssigmetallströmungen und den experimentellen und messtechnischen Herausforderungen der Messung von drei sehr kleinen Kraftkomponenten [12]. A. Wegfraß gelang es, die Anwendbarkeit der Lorentzkraftanemometrie in Medien schwacher Leitfähigkeit nachzuweisen [13].

D. Jian entwickelte das sogenannte Tandem LKA Verfahren zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten unabhängig von der Leitfähigkeit des Mediums [14] [15]. Aus den Erfahrungen mit dem Tandem LKA-Systemen entwickelte Jian 2012 ein System zur Oberflächengeschwindigkeitsmessung auf Basis des LKA-Systems [16].

Die anwendungsnahe Kalibrierung eines Lorentzkraft-Anemometers ist aufgrund der Einsatzbedingungen in Sekundäraluminiumschmelzwerken und Stahlwerken eine wichtige Aufgabe. Bereits im Jahr 2009 wurde von Minchenya ein Artikel veröffentlicht, der sich vorwiegend mit der sogenannten trockenen Kalibrierung eines Lorentzkraft-Anemometers beschäftigt. Mit Hilfe dieser Methode wird eine Flüssigmetallschmelze, die durch das System fließt, durch quaderförmige Aluminiumfestkörper mit fester Breite und verschiedenen Höhen modelliert.

Minchenya kommt auch aufgrund erster Erfahrungen an diversen Industrieanlagen zu dem Schluss, dass eine trockene Kalibrierung eines Lorentzkraft-Anemometers allein nicht ausreichend ist [5] [4].

Im Jahr 2011 wurde von Minchenya ein weiterer Artikel mit tiefergehender Betrachtung seiner Experimente zur trockenen Kalibrierung und ersten Tests in der Industrie veröffentlicht [6]. Die trockene Kalibrierung muss demnach durch eine Kalibrierung mit Flüssigmetall komplettiert werden. Deshalb wurde im Rahmen des ForMaT- Projektes auch eine LKA- Kalibrieranlage beantragt. Der Aufbau dieser Anlage und die ersten Ergebnisse sollen einer der Hauptbestandteile dieser Arbeit sein. Die bisherige Forschung an der TU Ilmenau nutzte als Flüssigmetall ein Eutektikum aus Gallium, Indium und Zinn. Diese Mischung ist bei Raumtemperatur flüssig. Aus Kostengründen wurde erstmals Zinn als Modellfluid für diese Anlage gewählt. Im Rahmen der Forschung des Graduiertenkollegs „Strömungsmessung und Wirbelstromprüfung mittels Lorentzkraft“ wird die Gallium- Indium- Zinn- Mischung weiterhin verwendet, um beispielsweise die Regelung einer elektromagnetischen Pumpe zu entwickeln und Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Magnetohydrodynamik durchzuführen.

Die Ergebnisse der in dieser Arbeit beschriebenen Experimente zur trockenen Kalibrierung wurden von einigen numerisch arbeitenden Kollegen des Graduiertenkollegs „Lorentzkraft“ für die Validierung ihrer Modelle verwendet. Dabei entstand eine Veröffentlichung über Optimierungsansätze für Lorentzkraft-Anemometer. Es wurde der Einfluss von verschiedenen Stellgrößen, wie beispielsweise dem Gesamtgewicht des Systems, auf die zu erwartende Kraft für den Sonderfall der Anwendung in Elektrolyten diskutiert [17].

Die Entwicklungen hinsichtlich der Kalibrierung von Lorentzkraft-Anemometern und der grundsätzliche Aufbau der beiden hier beschriebenen Kalibriereinrichtungen wurden 2011 im Rahmen eines speziellen Kolloquiums zur Durchflussmessung präsentiert [18]. 2012 wurde eine Sonderausgabe der Zeitschrift „Technisches Messen“ zum Thema Messtechnik in der Magnetohydrodynamik herausgegeben. Hier wurden die Methode der Lorentzkraft-Anemometrie und der Aufbau der Kalibrieranlagen beschrieben [19]. Bevor die Kalibriermethoden eines LKA vorgestellt werden, wird zunächst ein Einblick in die Theorie eines Lorentzkraft-Anemometers, die physikalischen Zusammenhänge und die daraus resultierenden Abhängigkeiten gegeben.

2.2 Grundgleichungen und Kennzahlen der Magnetohydrodynamik

A - Grundlegende Skalenrelationen

Die folgenden theoretischen Betrachtungen orientieren sich an den Ausführungen in [1], [20] und an der von Prof. Thess gehaltenen Vorlesung „mathematical modeling“. Die 2007 veröffentlichte Theorie eines Lorentzkraft-Anemometers [2] und der Artikel über die trockene Kalibrierung eines LKA, der den Zusammenhang zwischen der abstrakten Theorie und dem realen System herstellt, werden hier ebenfalls berücksichtigt [4] [1].

Um die Theorie näher zu beleuchten, beginnen wir mit dem Faradayschen Gesetz, nach dem sich ein zeitveränderliches Magnetfeld mit einem elektrischen Wirbelfeld umgibt. Mit der differentiellen Form des Gaußschen Integralsatzes wird das Magnetfeld divergenzfrei:

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (2), (3)$$

Nach dem Ampèreschen Gesetz umgibt sich ein Wirbelstrom mit einem wirbelbehafteten Magnetfeld. Da sich die Wirbelströme schließen, ist deren Feld divergenzfrei:

$$\mathbf{j} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{B}; \quad \nabla \cdot \mathbf{j} = 0, \quad (4), (5)$$

wobei \mathbf{j} die Stromdichte in A/m², μ_0 die magnetische Feldkonstante, \mathbf{B} die magnetische Flussdichte in T sowie \mathbf{E} die elektrische Feldstärke in V/m ist. Das Ampèresche Gesetz ist ohne den Term der Verschiebungsströme dargestellt. Er kann für metallische Leiter, deren Leitungsströme üblicherweise deutlich größer als die Verschiebungsströme sind, vernachlässigt werden.

Nach dem Ohmschen Gesetz für einen bewegten Leiter kann ein Wirbelstrom in einem elektrisch leitfähigen Medium entweder durch ein elektrisches Feld oder durch Bewegung eines Leiters in einem Magnetfeld entstehen. Mit dem Ohmschen Gesetz

$$\mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (6)$$

erhält man durch einige Umformungen schließlich die Magnetfeldtransportgleichung:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{B} = (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \lambda \nabla^2 \mathbf{B}. \quad (7)$$

Dabei ist \mathbf{v} die Strömungsgeschwindigkeit.

Um die Interaktion des magnetischen Feldes mit einer vorhandenen Strömung zu betrachten und als Bestimmungsgleichung für die Strömungsgeschwindigkeit \mathbf{v} , wird die Navier-Stokes-Gleichung verwendet:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \mathbf{g} + \nu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f}_L. \quad (8)$$

Dabei ist p der Druck im Fluid in Pa, ρ die Dichte des Fluides in kg/m^3 und ν die kinematische Viskosität des Fluides m^2/s und \mathbf{g} ist die Beschleunigung im Schwerfeld der Erde in m/s^2 . \mathbf{f}_L steht dabei für die Lorentzkraft.

Um nun die grundlegende Theorie für ein LKA zu erläutern, muss der oben beschriebene magnetische Teil der Theorie mit dem strömungsmechanischen Teil verbunden werden. Durch die Kombination des allgemeinen Ohmschen Gesetzes für einen bewegten Leiter und dem Ausdruck der Lorentzkraftdichte aus der allgemeinen Induktionsgleichung erhält man aus

$$\mathbf{f}_L = \mathbf{j} \times \mathbf{B} \quad (9)$$

mit \mathbf{j} der Stromdichte im Medium in A/m^2 , zunächst folgende Abschätzung für die Lorentzkraftdichte

$$\mathbf{f}_L \sim \sigma \mathbf{v} B_0^2. \quad (10)$$

Wobei \mathbf{f}_L die Kraftdichte ist. In den folgenden Betrachtungen sind der entstehende Strom und das Magnetfeld, wie in (3) angenommen, aufgrund der sich im elektrischen Feld schließenden Wirbelströme divergenzfrei. Und mit Hilfe der Integration der Lorentzkraftdichte über das betreffende Wirkvolumen V in m^3

$$F_L = \int_V \mathbf{f}_L dV \quad (11)$$

erhält man schließlich folgende Abschätzung für die im Lorentzkraft-Anemometer erzeugte Kraft:

$$F_L \sim \sigma B_0^2 \dot{V} L. \quad (12)$$

Damit kann man bereits die Stellparameter für eine Kalibrierung eines solchen Gerätes ablesen.

Da bei einem Lorentzkraft-Anemometer das magnetische Feld durch Permanentmagneten erzeugt wird, kann man diesen Parameter nicht ändern. Zur Untersuchung des Einflusses der elektrischen Leitfähigkeit kann im Falle der trockenen Kalibrierung ein anderes Material verwendet werden. Der Volumenstrom \dot{V} bleibt die am einfachsten zu verändernde Stellgröße. Diese kann über die Fließgeschwindigkeit und die Querschnittsfläche der Strömung verändert werden.

Um aus Beziehung 12 eine Gleichung zu erhalten, muss eine entsprechende Kalibrierkonstante eingefügt werden. So wird aus 12:

$$F_L = K \sigma B_0^2 \dot{V} L. \quad (13)$$

Während eines Kalibriervorganges für ein Gerät einer Serienproduktion sollte durch geeignete Versuche die Kalibrierkonstante K möglichst genau bestimmt werden. Da die elektrische Leitfähigkeit des Fluides in der Industrie meistens nicht ausreichend bekannt ist, muss eine Möglichkeit der Charakterisierung ohne Kenntnis der elektrischen Leitfähigkeit der Schmelze gefunden werden. Deshalb werden die Abhängigkeiten des Gerätes mit bekannten Proben ermittelt.

B - Kennzahlen

Mit $\frac{1}{\lambda} = \mu_0 \sigma$ erhält man aus dem letzten Summanden aus Gleichung 7 durch Multiplikation mit dem Produkt aus mittlerer Strömungsgeschwindigkeit und charakteristischer Länge des Problems die magnetische Reynolds-Zahl.

Die magnetische Reynolds-Zahl

Die magnetische Reynolds-Zahl gibt den Zusammenhang zwischen Strömungsgeschwindigkeit, einer charakteristischen Länge des Problems, der elektrischen Leitfähigkeit des Mediums und der magnetischen Feldkonstante an. Physikalisch ist die magnetische Reynolds-Zahl das Verhältnis von Konvektion der Magnetfeldlinien zu Diffusion der Magnetfeldlinien. Für magnetische Reynolds-Zahlen $\ll 1$ kann die vollständige Induktionsgleichung wesentlich vereinfacht werden. Die magnetische Reynolds-Zahl berechnet sich aus:

$$Re_m = \mu_0 \sigma v_0 L. \quad (14)$$

Dabei sind:

Re_m - die magnetische Reynolds-Zahl, v_0 - die mittlere Strömungsgeschwindigkeit in m/s, L - die charakteristische Länge der Systems in m und σ - die elektrische Leitfähigkeit des Mediums in S/m. Die magnetische Reynolds-Zahl der Experimente bei einer maximalen Geschwindigkeit von etwa 2m/s und einer charakteristischen Länge von 0,2m beträgt etwa 1.

Die Reynolds-Zahl

Die Reynolds-Zahl gibt den Zusammenhang zwischen Strömungsgeschwindigkeit, kinematischer Viskosität des Fluides und charakteristischer Länge der Strömung an. Physikalisch stellt sie das Verhältnis von Trägheitskraft zu Reibungskraft beziehungsweise Impulskonvektion zu Impulsdiffusion des Systems dar. Mit Hilfe der Reynolds-Zahl kann bestimmt werden, wann eine Strömung laminar oder turbulent wird. So existieren für verschiedene Strömungen sogenannte kritische Reynolds-Zahlen, ab denen sich eine laminare Strömung über einen Transitionsbereich in eine turbulente Strömung verändern kann. Die Reynolds-Zahl berechnet sich aus:

$$Re = \frac{v_0 D}{\nu} . \quad (15)$$

Dabei sind:

D - der hydraulische Durchmesser des Systems in m und ν - die kinematische Viskosität des Fluides in m^2/s . In den vorliegenden Versuchen erreichen wir bei einer Geschwindigkeit von 2m/s und einem hydraulischem Durchmesser von 0,1m eine Reynolds-Zahl von etwa 918000. Es handelt sich also bei den Experimenten der nassen Kalibrierung um eine turbulente Strömung. Dies unterstreichen auch die Videoaufnahmen und Abbildung 22. Neben der Reynolds-Zahl und der magnetischen Reynolds-Zahl gibt die Hartmann- Zahl wichtige Hinweise zur Charakterisierung von Strömung und Magnetfeld.

Die Hartmann-Zahl

Das Quadrat der Hartmann-Zahl gibt das Verhältnis von elektromagnetischen Kräften zu Reibungskräften an. Die Hartmann-Zahl berechnet sich zu:

$$Ha = B L \sqrt{\frac{\sigma}{\eta}} \quad (16)$$

Dabei ist:

L- die oder eine charakteristische Länge des Systems in m, B- die magnetische Flussdichte des angelegten Magnetfeldes in T und η - die dynamische Viskosität des Mediums in kg/ (m s). In den Experimenten werden in der Spitze Hartmann-Zahlen von etwa 600 erreicht. Hier bilden sich bereits Grenzschichtbereiche in wandnähe des Fluides, sogenannte Hartmann und Shercliff Grenzschichten. In diesen Grenzschichten schließen sich die elektrischen Ströme. Dies erklärt auch die Messwerte in den Ergebnissen der nassen Kalibrierung (vgl. Kapitel 4.4).

Aus dem Quotienten des Quadrats der Hartmann-Zahl und der Reynolds-Zahl lassen sich Aussagen zur Stärke der Wechselwirkung zwischen Magnetfeld und Strömung ableiten. Der Quotient wird Interaktionsparameter genannt und gibt das Verhältnis von elektromagnetischer Kraft zur Trägheitskraft der Strömung an.

$$N = \frac{Ha^2}{Re} \quad (17)$$

Ist der Interaktionsparameter $\ll 1$, so kann davon ausgegangen werden, dass das Magnetfeld die Strömung nicht signifikant beeinflusst.

In den hier vorgestellten Experimenten werden maximal mittlere Strömungsgeschwindigkeiten von etwa 2m/s erreicht, die bei einer Längenskala von 0,1m und einer charakteristischen Flussdichte von 80mT einen Interaktionsparameter von 0,4 zur Folge haben. Damit könnte etwa für numerische Simulationen der kinematische Ansatz gewählt werden. Dieser geht davon aus, dass das angelegte Magnetfeld die Strömung nicht signifikant beeinflusst.

2.3 Grundbegriffe der Messdatenauswertung

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird auf einige Grundlagen der Messdatenauswertung zurückgegriffen. Deshalb sollen hier die verwendeten Begriffe der Messdatenauswertung erläutert werden. Wir orientieren uns hierbei an den Ausführungen in DIN 1319-4 [21].

Der arithmetische Mittelwert

Der arithmetische Mittelwert kommt besonders bei mehrmals gemessenen Größen zum Einsatz. Der Mittelwert wird aus der Summe der Werte, dividiert durch deren Anzahl gebildet und gibt den „besten Schätzwert“ für den wahren Wert der gemessenen Größe an:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (18)$$

Dabei ist n die Anzahl der Messwerte und x_j der Messwert der j -ten Wiederholung.

Standardmessunsicherheit

Die Standardmessunsicherheit ist zur Berechnung des vollständigen Messergebnisses notwendig. In dieser Arbeit werden zwei Varianten zur Berechnung der Standardmessunsicherheit angewandt. Die Standardmessunsicherheit für mehrmals gemessene Größen berechnet sich zu:

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2}{\sqrt{n}} \quad (19)$$

s wird dabei empirische Standardabweichung der Verteilung der Messwerte der Eingangsgrößen genannt, \bar{x} ist der Mittelwert der Messwerte. Diese Variante wird im „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ (GUM) [22] als Unsicherheit des Typs A bezeichnet. Daneben wird in dieser Arbeit auch die Unsicherheit des Typs B nach GUM verwendet. Diese Art der Unsicherheitsbestimmung ist vor allem dann anzuwenden, wenn nur eine obere Grenze b und untere Grenze a der möglichen Werte angegeben werden kann. Der Standardmessunsicherheit wird eine Rechteckverteilung der Werte zugrunde gelegt. Die Unsicherheit wird dann aus

$$u = \sqrt{\frac{(b-a)^2}{12}} \quad (20)$$

berechnet.

Die kombinierte Standardmessunsicherheit

Zur Angabe des vollständigen Messergebnisses ist es notwendig die nach Formel 19 oder 20 ermittelten Standardmessunsicherheiten zu kombinieren. Dabei unterscheidet man zwischen korrelierten und nicht korrelierten Eingangsgrößen.

Für nicht korrelierte Eingangsgrößen wird die kombinierte Standardmessunsicherheit nach dem Gauß-Verfahren wie folgt berechnet:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial G}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)}. \quad (21)$$

Dabei ist G die Modellgleichung des Systems, x_i die entsprechende Eingangsgröße, m die Anzahl der Einflussgrößen und u die Standardmessunsicherheit der Einflussgröße in Abhängigkeit von der Eingangsgröße.

Für korrelierte Eingangsgrößen gilt entsprechend dem Gauß-Verfahren:

$$u_c = \sum_{i,j=1}^m \frac{\partial G}{\partial x_i} \frac{\partial G}{\partial x_j} u(x_i, x_j). \quad (22)$$

Dabei sind x_i und x_j die korrelierten Eingangsgrößen und u die ermittelte Standardmessunsicherheit. Für die Angabe der Messergebnisse wird in dieser Arbeit die sogenannte erweiterte Messunsicherheit herangezogen. Hier wird die kombinierte Unsicherheit einem Quantil der zugrunde gelegten Verteilung zugeordnet. Damit kann eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit getroffen werden, dass der wahre Wert bei beliebig vielen Versuchen in diesem Bereich anzutreffen ist. Es sind dabei drei Konfidenzniveaus gebräuchlich. Sie werden üblicherweise mit k abgekürzt. $k=1$ entspricht einem Niveau von etwa 68%, $k=2$ etwa 95% und $k=3$ etwa 99%. Die erweiterte Unsicherheit wird durch die Multiplikation der ermittelten kombinierten Standardmessunsicherheit mit dem Konfidenzintervall k gebildet. Im Folgenden sollen der Aufbau der beiden Kalibriereinrichtungen für Lorentzkraft-Anemometer und die Ergebnisse der Experimente beschrieben werden.

3 Versuchsstand der trockenen Kalibrierung- Mitroka

Nach den 2009 von Minchenya [4] veröffentlichten Ergebnissen zur trockenen Kalibrierung eines LKA wurden die Untersuchungen auf diesem Gebiet wiederaufgenommen. Im Zuge dieser wurde das Experiment neu ausgerüstet und modifiziert aufgebaut. Im Vergleich zu Minchenyas Experiment wurden folgende Änderungen vorgenommen:

Das Lorentzkraft-Anemometer wurde an der Labordecke verankert, um unerwünschte Vibrationen vom Fußboden zu vermeiden. Der verwendete Linearmotor mit einer Höchstgeschwindigkeit von 0,06m/s und einem Hub von 946mm wurde durch einen Linearmotor mit einer Höchstgeschwindigkeit von 0,8m/s und einem Hub von 1600mm ersetzt. Dies gewährleistet bereits beim Eintritt in das Magnetsystem eine konstante Geschwindigkeit. Mit Hilfe dieses Motors konnte das Messprogramm mit 0,08m/s, 0,1m/s, 0,12m/s, 0,15m/s und 0,2m/s um fünf Geschwindigkeitsstufen erweitert werden. Die Geschwindigkeitsstufen wurden anhand der in der Motorsteuerung verfügbaren Geschwindigkeitsmitschnitte eingestellt und später mit Hilfe eines Miniaturinterferometers der Reihe MI 5000 der Fa. SIOS Messtechnik GmbH überprüft. Zusätzlich wurden für die Messungen mehrere neue Probekörper beschafft. Darunter zwei zusätzliche quaderförmige Proben aus Aluminium, die dem Verlauf der Kraft-Höhen Abhängigkeit (vgl. 3.3) zwei weitere Stützstellen hinzufügen sollen. Zwei zylinderförmige Probekörper aus Aluminium und Kupfer dienen zur Untersuchung des Einflusses der durchströmten Fläche auf die Lorentzkraft (vgl. 3.3). Mit Hilfe von zwei quaderförmigen Kupferproben und einem Kupferzylinder soll untersucht werden, inwieweit die elektrische Leitfähigkeit des Materials die Lorentzkraft verändert.

3.1 Versuchsvorbereitung

Referenzkörper

Um verschiedene Strömungssituationen innerhalb der trockenen Kalibrierung zu untersuchen, wurden folgende quaderförmige Körper aus EN AW 2007 - einer Aluminiumlegierung- verwendet:

BxH [mm ²]	Elektrische Leitfähigkeit des Referenzkörpers [MS/m] k=2
100 x 25	20,73 ± 0,21
100 x 30	21,18 ± 0,21
100 x 50	21,59 ± 0,22
100 x 60	20,95 ± 0,21
100 x 80	21,80 ± 0,22
100 x 100	21,69 ± 0,22

Tabelle 1: Die gemessene elektrische Leitfähigkeit der quaderförmigen Proben aus EN AW 2007 für k=2.

Die elektrische Leitfähigkeit der Proben wurde mit einem Leitfähigkeitsmessgerät des Typs Sigmatest 2.069 der Firma Förster gemessen. Das Gerät weist laut Datenblatt im Messbereich von 0,5MS/m bis 65MS/m eine absolute Unsicherheit von ±0,5% des Messwertes auf [23]. Für die Messungen wurde die Frequenz 60kHz gewählt, welche der niedrigsten Messfrequenz des Wirbelstromsensors und damit der größtmöglichen Eindringtiefe entspricht.

Alle Probekörper haben eine Länge von einem Meter, um eine bestmögliche Vergleichbarkeit der Messungen zu gewährleisten. Um den in Formel 13 beschriebenen Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit bestimmen zu können, wurden zusätzlich zwei quaderförmige Probekörper aus E- Kupfer 58 beschafft und untersucht.

BxH [mm ²]	Elektrische Leitfähigkeit des Referenzkörpers [MS/m] k=2
100 x 25	58,65 ± 0,59
100 x 50	59,79 ± 0,60

Tabelle 2: Die ermittelte elektrische Leitfähigkeit der quaderförmigen Probekörper aus E-Kupfer 58 für k=2.

Zusätzlich wurden auch zylindrische Proben aus EN AW 2007 und E- Kupfer 58 mit einem Durchmesser von 100mm und einer Länge von einem Meter verwendet.

d [mm] (Material)	Elektrische Leitfähigkeit des Referenzkörpers [MS/m] k=2
100 (EN AW 2007)	20,54 ± 0,24
100 (E Cu 58)	58,81 ± 0,61

Tabelle 3: Die ermittelte elektrische Leitfähigkeit der zylindrischen Probekörper für k=2.

Kalibrierung des Kraftsensors

Vor Beginn der Experimente wurde der Kraftsensor kalibriert, um das Sensorsignal der entsprechenden Kraft zuzuordnen. Das Sensorsignal wurde über den in Kapitel 1 beschriebenen Digital-Analog Wandler für Kraftmesssysteme des Typs DSCH der Fa. Mantracourt ausgelesen. Dabei wurde, wie auch in den folgenden Messungen der trockenen Kalibrierung, eine Abtastfrequenz von etwa 20Hz verwendet. Die Untersuchung wurde im eingebauten Zustand der trockenen Kalibrierung durchgeführt. Die Kraft wurde durch Prüfgewichte erzeugt, die über eine Umlenkrolle mit dem System verbunden waren. Entsprechend der vorhandenen Gewichte wurden die Kräfte aufgezeichnet und ausgewertet.

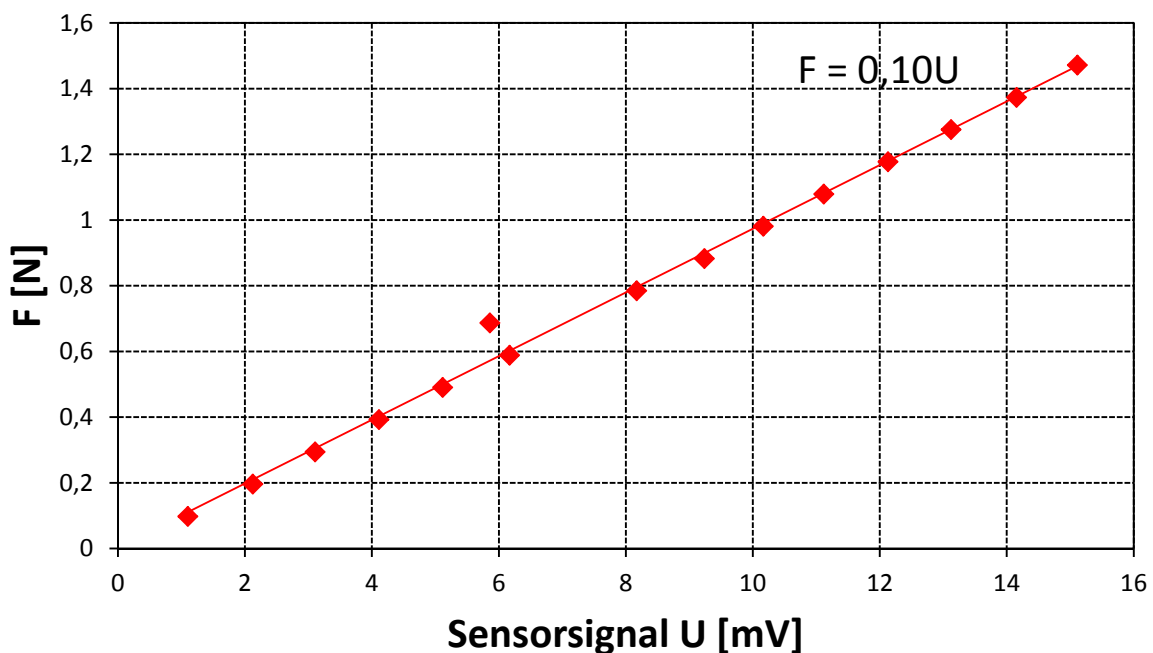


Abbildung 5: Kalibrierergebnis des Kraftsensors. Die am Lorentzkraft-Anemometer gemessene Spannung in mV wird gegen die durch Prüfgewichte aufgebrachte Kraft aufgetragen.

Es wurde der Faktor $0,10\text{N/mV}$ zur Umwandlung des mV-Sensorsignals des Lorentzkraft-Anemometers in der Auswertung herangezogen.

Es ist bei $0,69\text{N}$ ein deutlicher Krafrückgang zu verzeichnen. Bei dieser Prüfgewichtskombination kam es zu einem deutlichen Aufschwingen des LKA Systems während des Be- und Entlastens. Dieses Aufschwingen wirkte sich auf den eigentlichen Messpunkt in oben gezeigter Weise aus. Bei diesem Punkt weicht der Spannungswert um etwa 10% vom idealen Wert ab. Die Abweichungen der restlichen Punkte vom erwarteten Wert betragen in der Spitze 4,2%.

Während der Kalibrierung waren nur sehr geringe Winkeländerungen der Umlenkrolle durch die Prüfgewichte zu verzeichnen. Die Erdbeschleunigung ist über das Gravity Information System der Physikalisch Technischen Bundesanstalt abrufbar und beträgt für den Standort Ilmenau $9,8101\pm 0,000020\text{m/s}^2$ für $k=2$ [24]. In der Literatur wird für Umlenkrollen mit Gleitlager ein Wirkungsgrad von etwa 96% angesetzt [25]. Deshalb werden $96\pm 0,3\%$ als Übertragungsfaktor der verwendeten Umlenkrolle in der Modellgleichung eingesetzt. Die Unsicherheit der Erdbeschleunigung ist klein gegenüber den übrigen Unsicherheiten und kann damit nach DIN 1319-4 [21] vernachlässigt werden. Der Teil des Fadens von der Umlenkrolle an das LKA System wurde horizontal justiert, so dass eine maximale Abweichung von $\pm 5^\circ$ von der Horizontalen als Fehler anzunehmen ist. Das entspricht einer Unsicherheit von $\pm 0,22\%$. Für die Prüfgewichte wird nach OIML R111-1 die Fehlerklasse M3 zugrunde gelegt und dementsprechend eine maximale Unsicherheit von $\pm 0,05\%$ angesetzt [26]. Insgesamt ergibt sich eine erweiterte Unsicherheit von $\pm 0,8\%$ für $k=2$.

3.2 Versuchsdurchführung

Um die Einflussgrößen auf die Lorentzkraft näher zu untersuchen, wurden verschiedene Probekörper auf einem Linearmotor durch das LKA-System hindurchbewegt. Diese Vorgehensweise wählte bereits Minchenya [4]. Wie schon am Anfang des Kapitels 3 beschrieben, wurden im Vergleich zu Minchenya einige Veränderungen vorgenommen, um die Präzision der Messungen zu verbessern.

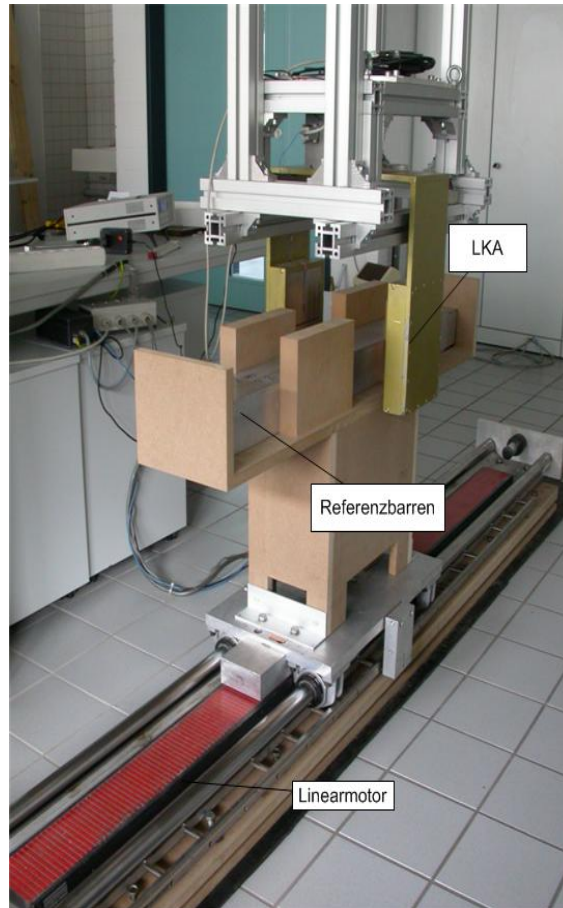


Abbildung 6: Versuchsstand zur trockenen Kalibrierung. Ein Referenzbarren wird mit einer Halterung auf dem Linearmotor befestigt. Die Anordnung fährt durch das an der Labordecke befestigte LKA.

Der in Abbildung 6 gezeigte Linearmotor besitzt eine Gesamtlänge von 2,5m und einen Hub von 1,6m. Die Geschwindigkeit kann computergestützt vorgegeben werden. Die Steuerung des Motors bietet die Möglichkeit eines Mitschnittes, der zur Einstellung und Kontrolle der Geschwindigkeiten genutzt wurde. Zur weiteren Verbesserung der Präzision des Systems wurde ein Miniaturinterferometer der Reihe MI 5000 der Fa. SIOS Messtechnik verwendet. Mit diesem Gerät wurden die gewählten Geschwindigkeitsstufen validiert (siehe Weiterentwicklung und Neukonstruktion des Versuchsstandes). Um die Vergleichbarkeit mit den Experimenten von Minchenya herzustellen, werden diese auf 3cm/s, 4cm/s, 5cm/s und 6cm/s festgelegt.

Geschwindigkeitsstufen [m/s]								
0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	0,12	0,15	0,20

Tabelle 4: Liste der im Experiment verwendeten Geschwindigkeitsstufen in m/s. Die bereits bei Minchenya verwendeten Geschwindigkeiten werden um 0,8m/s, 0,1m/s, 0,12m/s, 0,15m/s und 0,2m/s erweitert.

Da der Motor in der Lage ist, höhere Geschwindigkeiten zu erzeugen, wurden zusätzlich die Stufen 8cm/s, 10cm/s, 12cm/s, 15cm/s und 20cm/s in die Betrachtungen einbezogen. Um weitere Geschwindigkeitsstufen festzulegen, wurden zunächst die von Minchenya gemessenen Stufen eingestellt und dann die Geschwindigkeit in Schritten von 1cm/s erhöht. Die produzierten Kraftsignale wurden auf signifikante Kraftänderungen hin untersucht. Bei Geschwindigkeiten über 0,2 m/s vermindert sich die Anzahl der Werte, die zur Bestimmung der Lorentzkraft herangezogen werden können, zunehmend mehr (siehe Kap. Auswertung der Rohdaten). Dadurch erhöht sich die Unsicherheit der Messung signifikant. Deshalb wurde auf die Untersuchung höherer Geschwindigkeiten mit dieser Konfiguration verzichtet.

Um Störeinflüsse durch elektrisch leitfähige Materialien innerhalb des Magnetfeldes auszuschließen, wurden die Referenzbarren in einer Aufnahme aus mitteldichter Faserplatte fixiert. Die Höhe des Referenzbarrens im Magnetfeld kann durch Distanzplatten aus Holz justiert werden. Konstruktionsbedingt können nur Proben mit einer Breite von 100mm und einer Länge von 1000mm untersucht werden. Die Aufnahme ist mit dem Linearmotor verbunden und wird mit verschiedenen Geschwindigkeiten durch das LKA bewegt. Das LKA wurde an der Labordecke befestigt, um Störeinflüsse, die über den Laborboden übertragen werden, auszuschließen. Die Lage des Linearmotors wurde mit Hilfe eines Holzgliedermaßstabes so justiert, dass der Referenzbarren mittig durch das Lorentzkraft-Anemometer hindurchbewegt wird. Es ist deshalb eine Positionierungsunsicherheit des Referenzkörpers von $\pm 0,5\text{mm}$ anzunehmen.

Größere und länger andauernde Belastungen des Motors durch schwere Referenzbarren oder hohe Geschwindigkeiten führten zu einer signifikanten Erwärmung des Motorschlittens. Deshalb wurden unterhalb der Aufnahme ein Kühlkörper und zwei Gehäuselüfter installiert, um die entstehende Wärme abzuführen und eine Überhitzung der Komponenten zu vermeiden. Die elektrische Versorgung der Lüfter wurde in die Schleppkette des Motors integriert, um eine Erhöhung der Positionierungsunsicherheit des Motors auszuschließen.

Neben den quaderförmigen Probekörpern aus EN AW 2007 sind auch zylindrische Probekörper untersucht worden, um den Einfluss des Strömungsquerschnittes auf die erzeugte Kraft zu charakterisieren. Weiterhin wurde mit Probekörpern aus E-Kupfer 58 der Zusammenhang zwischen elektrischer Leitfähigkeit und der erzeugten Lorentzkraft bestimmt.

3.3 Diskussion der Versuchsergebnisse

Auswertung der Rohdaten

Bei jedem Versuchsdurchlauf wurde ein Signalverlauf generiert. Der Verlauf enthält jeweils die Sensorsignale einer Hin- und Rückfahrt des Probekörpers durch das LKA-System. Dabei ergibt sich ein plateauartiger Signalausschlag, der von der Größe des Probekörpers und dessen Geschwindigkeit abhängt. Dieser wird für die Bestimmung der mittleren Lorentzkraft herangezogen.

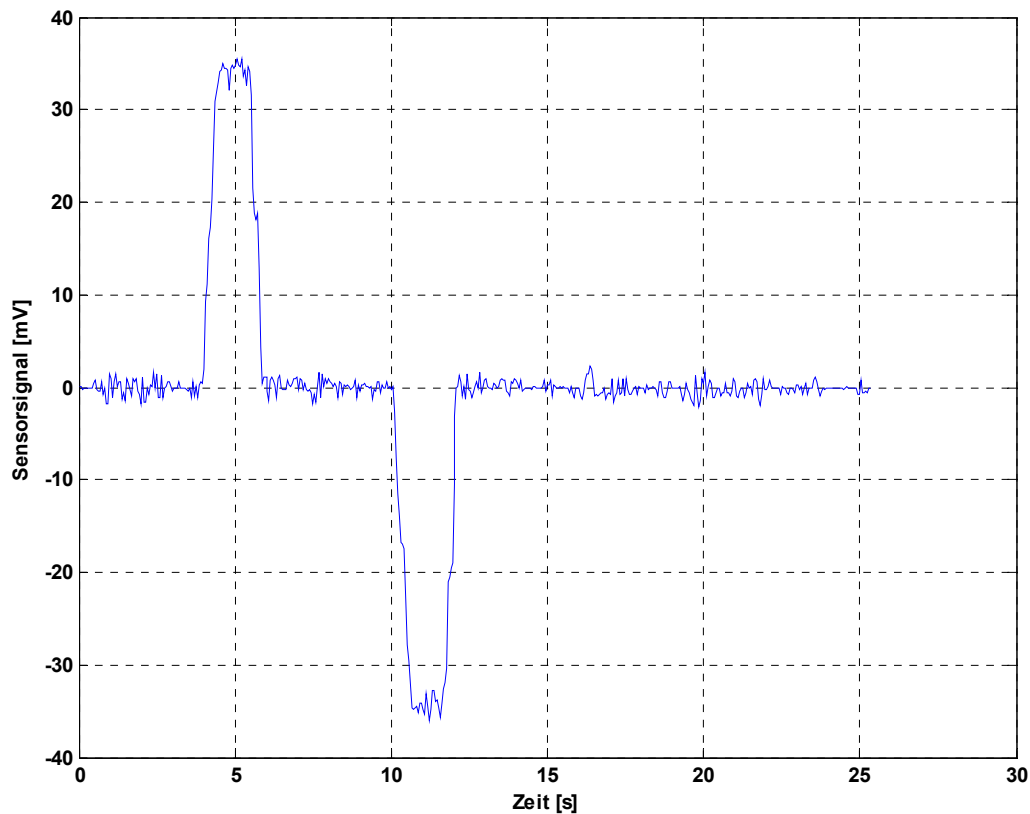


Abbildung 7: Typischer Signalverlauf für einen Versuch der trockenen Kalibrierung bei Geschwindigkeitsstufe 15cm/s des Aluminiumprobekörpers der Höhe 100mm. Der Signalanstieg entsteht beim Durchfahren des LKA-Systems in der Vorzugsrichtung, der Abfall des Sensorsignals bei der Rückfahrt des Schlittens.

Zur besseren Auswertung solcher Verläufe wurde eine Auswerteroutine mit Hilfe von „Mathworks Matlab“ erstellt, die vollautomatisch den Mittelwert des Plateaus im Signalverlauf bestimmt.

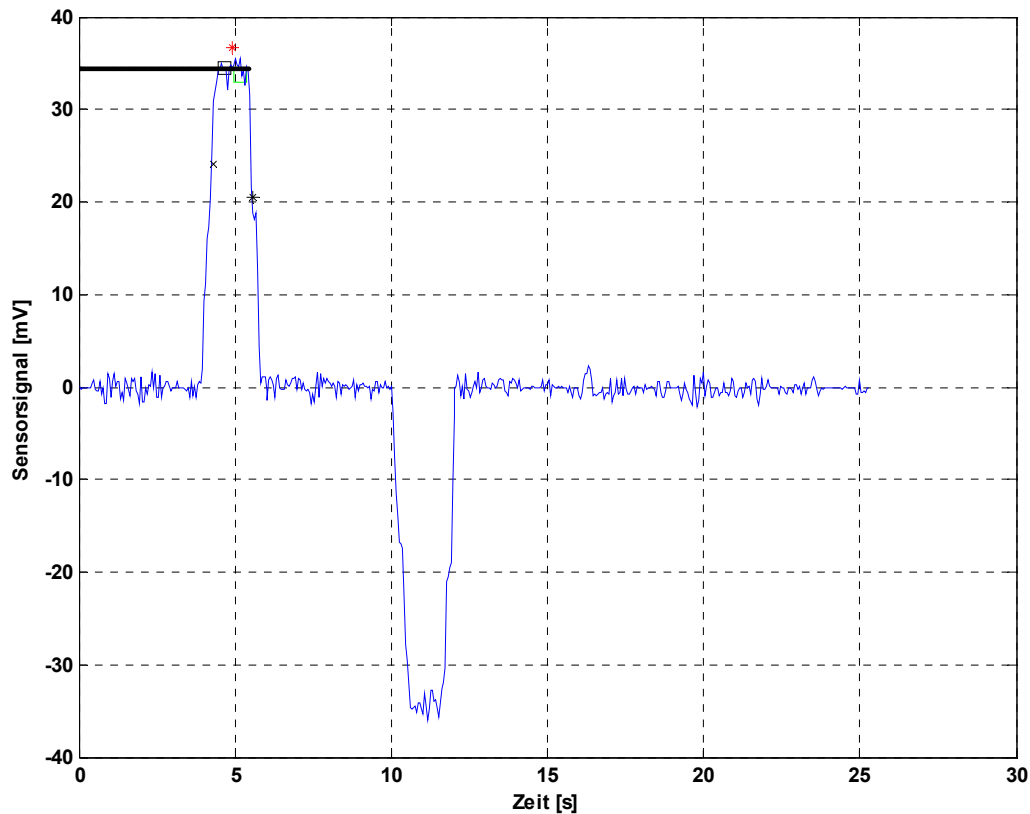


Abbildung 8: Der in Abbildung 7 gezeigte Verlauf nach Ermittlung des Plateau- Wertes. Der Wert wird durch die schwarz eingezeichnete Linie symbolisiert.

Diese Routine wertet mit Hilfe von Differenzenquotienten den Anstieg beziehungsweise den Abfall des Signales in der Umgebung des globalen Maximums aus und korrigiert die Offsetverschiebung des Signales selbstständig. Die so gewonnenen Erkenntnisse sowie die Rohverläufe werden im Workspace von „Mathworks Matlab“ in „Struct Strukturen“ nach Geschwindigkeit und Geometriezusatz abgelegt. Aus der Gesamtheit der bestimmten Plateau-Mittelwerte einer Geschwindigkeit wird ein Mittelwert gebildet. Mit Hilfe dieser Mittelwerte werden die Kraftwerte der in diesem Kapitel folgenden Diagramme erzeugt.

Diskussion der Versuchsergebnisse

Kraft-Geschwindigkeitskennlinie

Analysiert man die Theorie eines Lorentzkraft-Anemometers genauer, insbesondere die Gleichung 13, so stellt man fest, dass der Volumenstrom \dot{V} einen wesentlichen Einflussfaktor auf die zu erwartende Lorentzkraft darstellt. Der Volumenstrom \dot{V} wird in der Fluiddynamik als

$$\dot{V} = v_0 A \quad (23)$$

definiert, wobei v_0 die mittlere Geschwindigkeit des Fluides und A dessen Querschnittsfläche ist. Nimmt man die elektrische Leitfähigkeit des Fluides und die magnetische Flussdichte als konstant an, so wäre eine Kraftänderung des Lorentzkraftanemometers auf eine Änderung der Geschwindigkeit, des Strömungsquerschnittes oder auf eine Kombination aus beiden zurückzuführen. Konstruktionsbedingt ist es nur möglich, Proben mit einer Breite von 100mm auf dem Linearmotor zu befestigen. Deshalb kann der Parameter A nur durch die Höhe der Probe variiert werden. Nachfolgend soll zunächst die Kraft-Geschwindigkeitsabhängigkeit diskutiert werden. Eine Erhöhung der Geschwindigkeit sollte sich nach Gleichung 13 direkt proportional auf die erzeugte Lorentzkraft auswirken.

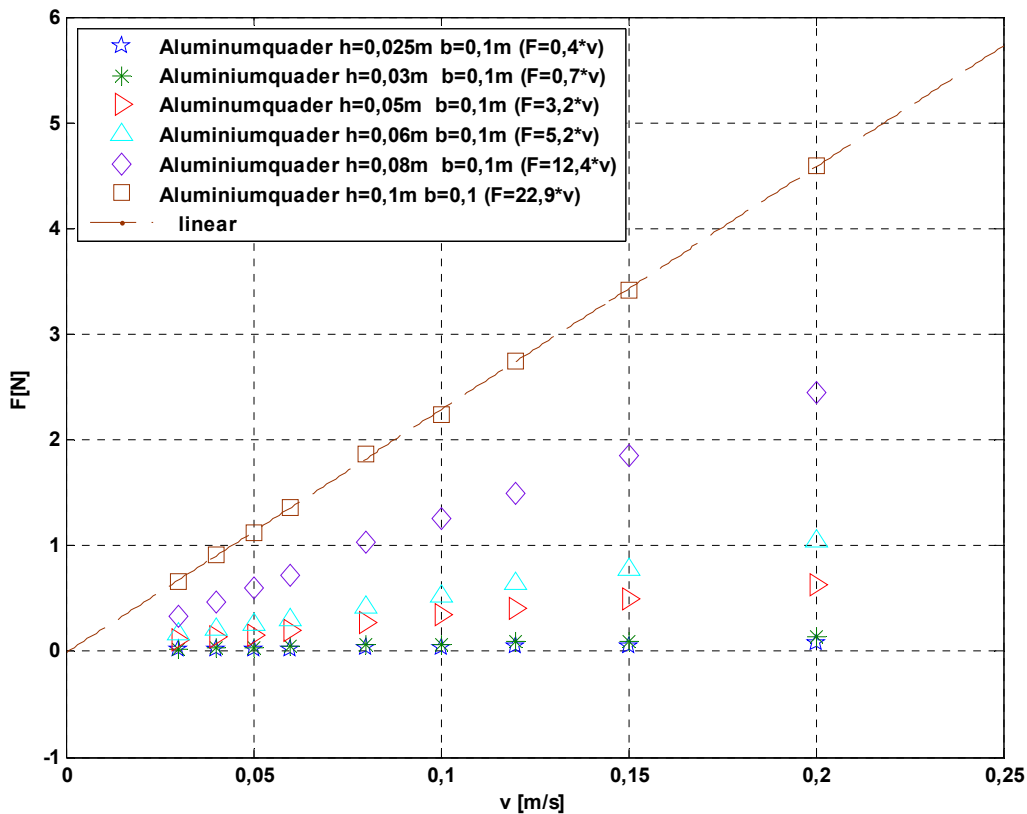


Abbildung 9: Die erzeugte Lorentzkraft in N in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Probekörpers bei verschiedenen Höhen der Aluminiumproben. Die erzeugte Kraft steigt linear mit anwachsender Geschwindigkeit. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde hier nur die Ausgleichsgerade für den Aluminiumquader mit Höhe 0,1m eingezeichnet und auf das Antragen von Fehlerbalken verzichtet.

In Abbildung 9 ist deutlich ein direkt proportionaler Zusammenhang zwischen der erzeugten Lorentzkraft und der Geschwindigkeit des Probekörpers zu erkennen. Dies bestätigt die Erwartungen aufgrund der theoretischen Betrachtungen in Gleichung 13 und im Bereich von 3cm/s bis 6cm/s die Erkenntnisse von Minchenya [4]. Die größte Abweichung von etwa 0,2N im Vergleich zu den Messwerten von Minchenya ist bei einer Höhe des Probekörpers von 100mm und einer Geschwindigkeit von 6cm/s zu verzeichnen. Diese Geschwindigkeit ist die schnellste der von Minchenya untersuchten Geschwindigkeiten. Die Abweichung ist durch den geänderten Aufbau und die mangelnde Geschwindigkeitskontrolle des Motors von Minchenya zu erklären. Der Bereich von 8cm/s bis 20cm/s wurde von Minchenya nicht untersucht. Die höhere Endgeschwindigkeit des verwendeten Linearmotors erlaubte diese Erweiterung der Messmatrix. Auch in diesem Bereich konnte ein linearer Verlauf der Kraft- Geschwindigkeitsabhängigkeit ermittelt werden. Die Theorie kann also auch für größere Geschwindigkeiten bestätigt werden. In der Anwendung ist demnach eine

Veränderung der Strömungsgeschwindigkeit direkt proportional zur erzeugten Lorentzkraft. Allerdings scheint bei einer festgelegten Geschwindigkeit in Abbildung 9 der Kraftzuwachs bei steigender Höhe des Probekörpers nichtlinear zu sein. Dies wird im folgenden Kapitel näher untersucht.

Kraft-Höhen Abhängigkeit

Um die Abhängigkeit der erzeugten Lorentzkraft von der Probenhöhe näher zu untersuchen, wird die ermittelte Lorentzkraft gegen die Höhe des Probekörpers aufgetragen.

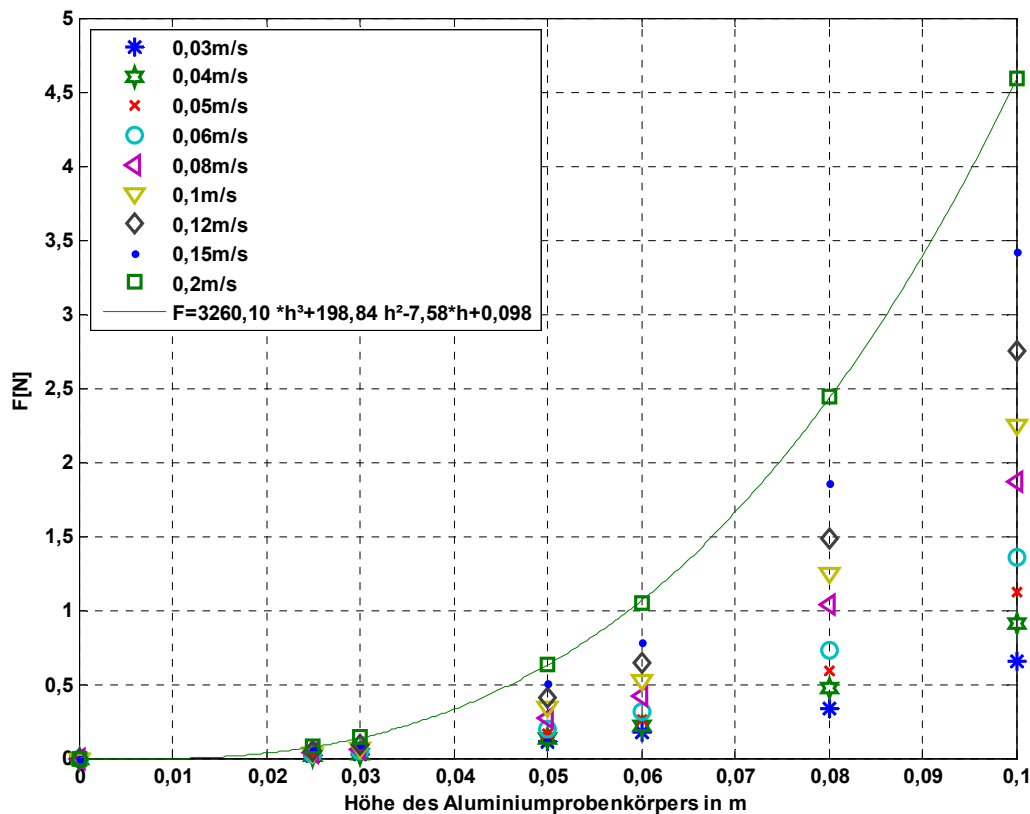


Abbildung 10: Kraft-Höhen Abhängigkeit des Lorentzkraft-Anemometers. An der Y- Achse ist die Kraft in N angetragen, an der x- Achse die Höhe des Probekörpers in m. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird auch hier nur die Trendlinie für 0,2m/s eingetragen. Man sieht einen deutlich progressiven Kraftanstieg mit steigender Barrenhöhe.

Abbildung 10 zeigt die erzeugte Lorentzkraft aufgetragen gegen die Höhe des Probekörpers. Wie auch Minchenya, sehen wir eine deutlich progressiv anwachsende Kraft mit zunehmender Höhe der Referenzbarren. Durch die

Verwendung von zwei zusätzlichen quaderförmigen Barren mit 0.03m und 0.06m konnte der Verlauf in diesen Punkten untermauert werden.

Die größte Abweichung der Messwerte vom eingezeichneten Polynom stellt sich bei einer Probekörperhöhe von 6cm mit etwa 1,7% ein.

Der progressive Verlauf aller Messpunkte in diesem Diagramm erklärt sich durch das Zusammenspiel der Erhöhung des durchströmten Querschnittes mit dem inhomogenen magnetischen Feld, das durch die Permanentmagneten des Lorentzkraft-Anemometers aufgespannt wird (vgl. Abbildung 3).

Die Theorie geht vom idealisierten Fall eines homogenen Magnetfeldes aus, der nicht realisierbar ist.

Mit zunehmender Barrenhöhe ist auch mehr Material dem Einfluss des Magnetfeldes ausgesetzt und kann darum zur Kraftentwicklung beitragen. Da der Einfluss des Magnetfeldes in der zweiten Potenz in die Formel zur Lorentzkraft eingeht (vgl. Gleichung 13), ist auch der Zusammenhang zwischen der Lorentzkraft und der Höhe des Probekörpers nichtlinear. Damit ist der nichtlineare Anstieg der Kraft bei anwachsender Barrenhöhe in Abbildung 10 zu erklären. Bei konstanter Geschwindigkeit wächst die Kraft progressiv mit ansteigender Höhe des Probekörpers. Für kleinere Höhen des Probekörpers ist die kubische Abhängigkeit wie folgt zu erklären. Bei sehr kleinen Höhen des Probekörpers weichen die Wirbelströme zunehmend mehr in die Längsachse des Körpers aus. Betrachtet man nun Gleichung 11 für die Lorentzkraft, so stellt man fest, dass durch die Integration über das Volumen die Höhe des Probekörpers in Form der umströmten Fläche in die Gleichung eingeht. Da es sich um sehr dünne Probekörper handelt, ist die charakteristische Länge mit der Breite des Probekörpers zu belegen. Es entsteht schließlich eine Spannung, die nach dem Ohmschen Gesetz (Gleichung 6) ebenfalls zur Stromdichte j beiträgt. Insgesamt ist nun die Stromdichte proportional zum Quadrat der Probekörperhöhe. Setzt man diese Abhängigkeit in Gleichung 11 ein, so ist die Kraft proportional zur dritten Potenz der Probekörperhöhe. Diese Erklärung gilt nur für sehr kleine Probenhöhen. Für größere Höhen der Probekörper kann die Abhängigkeit durch die vorliegende Theorie nicht erklärt werden und sollte in der Zukunft Gegenstand von weiteren Untersuchungen auf dem Gebiet der Lorentzkraft-Anemometrie sein.

Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit auf die erzeugte Lorentzkraft

Neben der Geschwindigkeit und der Änderung des Strömungsquerschnittes geht auch die elektrische Leitfähigkeit linear in Gleichung 13 ein. Zur Ermittlung der Leitfähigkeit ist, neben der SI- Einheit S/m, vor allem im angelsächsischen Ausland die prozentuale Angabe der Leitfähigkeit bezogen auf Kupfer üblich. Kupfer mit ca. 58MS/m wird als 100% des Kupferstandards (IACS) festgelegt. Es liegt daher nahe, neben einer mittleren Leitfähigkeit der Aluminiumbarren bei ca. 22MS/m, auch den Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit mit Hilfe von Kupferproben mit ca. 58MS/m, also 100% IACS, zu untersuchen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden nachfolgend dargestellt. Außer den Probekörpern aus Aluminium wurden auch drei Vergleichsproben aus E- Kupfer 58 untersucht. Darunter sind zwei quaderförmige Proben der Höhen 25mm und 50mm. Aus den Experimenten mit den Aluminiumproben ergab sich, dass unter Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen im Labor die Probe mit 25mm Höhe den Messbereich des LKA nach unten abgrenzt. Weiterhin können auch die Ergebnisse des Aluminium- und Kupferquaders der Höhe 50mm und des Aluminium- und Kupferzylinders des Durchmessers 100mm verglichen werden.

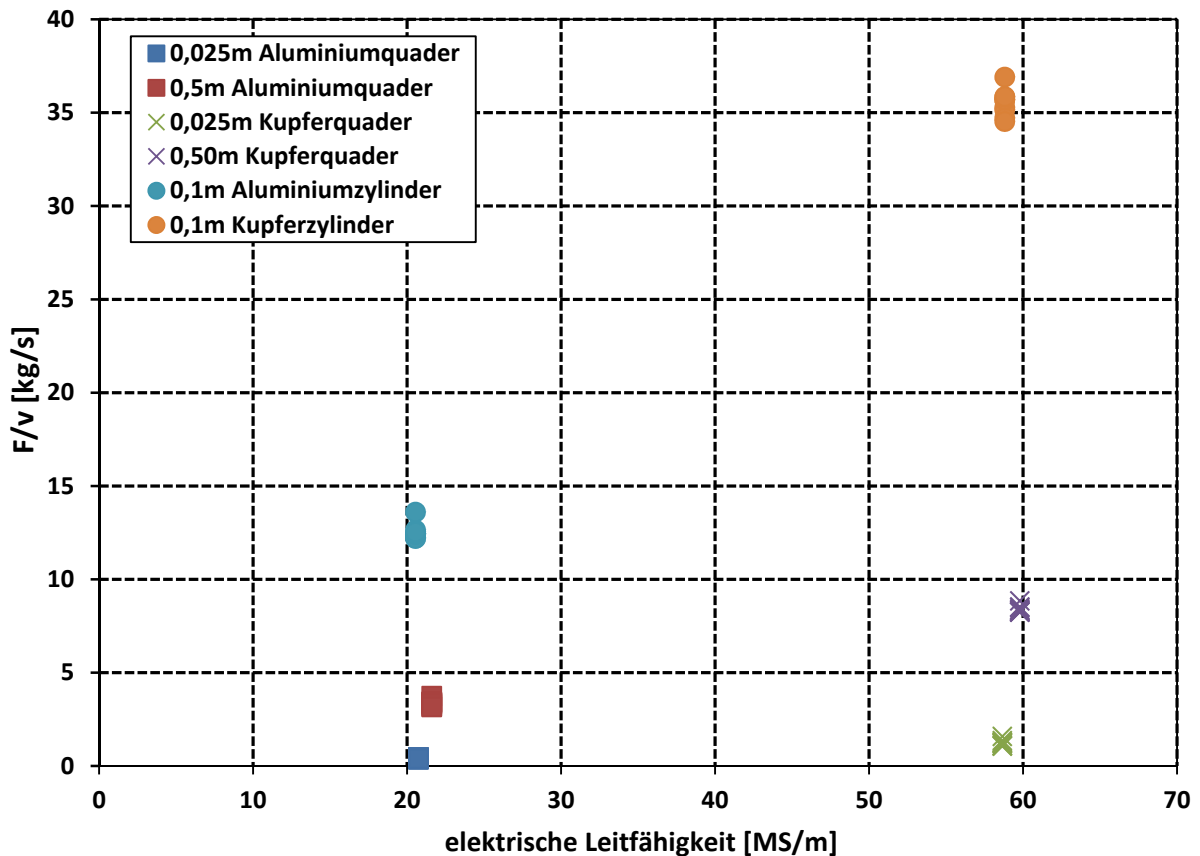


Abbildung 11: Die gemessene Kraft bezogen auf die Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Leitfähigkeit für die Aluminium- und Kupferprobekörper gleicher Abmessungen. Das Kraft-Geschwindigkeitsverhältnis F/v der Kupferproben ist deutlich größer als das der Aluminiumproben.

In Abbildung 11 wird die gemessene Kraft pro Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der elektrischen Leitfähigkeit der Aluminium- und Kupferproben aufgetragen. Die Werte des Kraft-Geschwindigkeitsverhältnisses der Kupferproben sind deutlich höher als bei den Aluminiumproben gleicher Abmessung. Dies ist auf die höhere elektrische Leitfähigkeit von Kupfer zurückzuführen. Vergleicht man die Werte der zylinderförmigen Probekörper, so wird der Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit besonders deutlich. Setzt man den Mittelwert der in Abbildung 11 aufgetragenen Werte des Kupferzylinders ins Verhältnis zu dem des Aluminiumzylinders, so ergibt sich ein Verhältnis von 2,83. Das Verhältnis der elektrischen Leitfähigkeiten der Proben ergibt 2,86. Eine ähnliche Abhängigkeit gilt auch für die Probekörper mit einer Höhe von 0,025m. Während die Werte der Aluminiumprobe maximal 0,5kg/s betragen, so sind die Werte der Kupferprobe in der Spitze etwa 1,5kg/s. Das Verhältnis der Werte der Kupferprobe zur Aluminiumprobe gleicher Abmessungen entspricht demnach 3.

Bildet man das Verhältnis der gemessenen Leitfähigkeiten (siehe Kapitel 3.1), so erhält man ebenfalls ungefähr 3. Ähnlich verhält es sich bei den Werten der Proben mit einer Höhe von 0,05m. Aus diesen Rechnungen ergibt sich also ein linearer Zusammenhang zwischen der elektrischen Leitfähigkeit des Probekörpers und dem Quotienten aus gemessener Kraft und eingestellter Geschwindigkeit und damit der gemessenen Lorentzkraft. Aufgrund der Zusammenhänge in Gleichung 13 war diese Abhängigkeit zu erwarten. Demnach ist die erzeugte Lorentzkraft direkt proportional zur elektrischen Leitfähigkeit des Materials.

Da eine Veränderung der Balkenbreite aus Sicherheitsgründen nicht sinnvoll ist, wurde die Geometrie des durchströmten Querschnitts durch die Untersuchung von zylindrischen Probekörpern verändert. Dadurch soll im Detail der Einfluss des durchströmten Querschnittes auf die erzeugte Lorentzkraft untersucht werden.

Einfluss der Geometrie der durchströmten Fläche auf die Lorentzkraft

In diesem Kapitel soll der Einfluss der durchströmten Querschnittsfläche auf die erzeugte Lorentzkraft untersucht werden. Dazu wurden die quaderförmigen Probekörper durch einen zylindrischen Probekörper mit Durchmesser 100mm ersetzt. Die Experimente wurden mit einer Aluminium- und einer Kupferprobe mit Durchmesser 100mm und der Länge 1000mm durchgeführt. Durch die ähnlichen Abmessungen konnten diese Proben in der vorhandenen Aufnahme befestigt werden. Betrachtet man die Abhängigkeiten der Theorie aus Gleichung 13, so sollte die durchströmte Querschnittsfläche direkt proportional zur erzeugten Lorentzkraft sein.

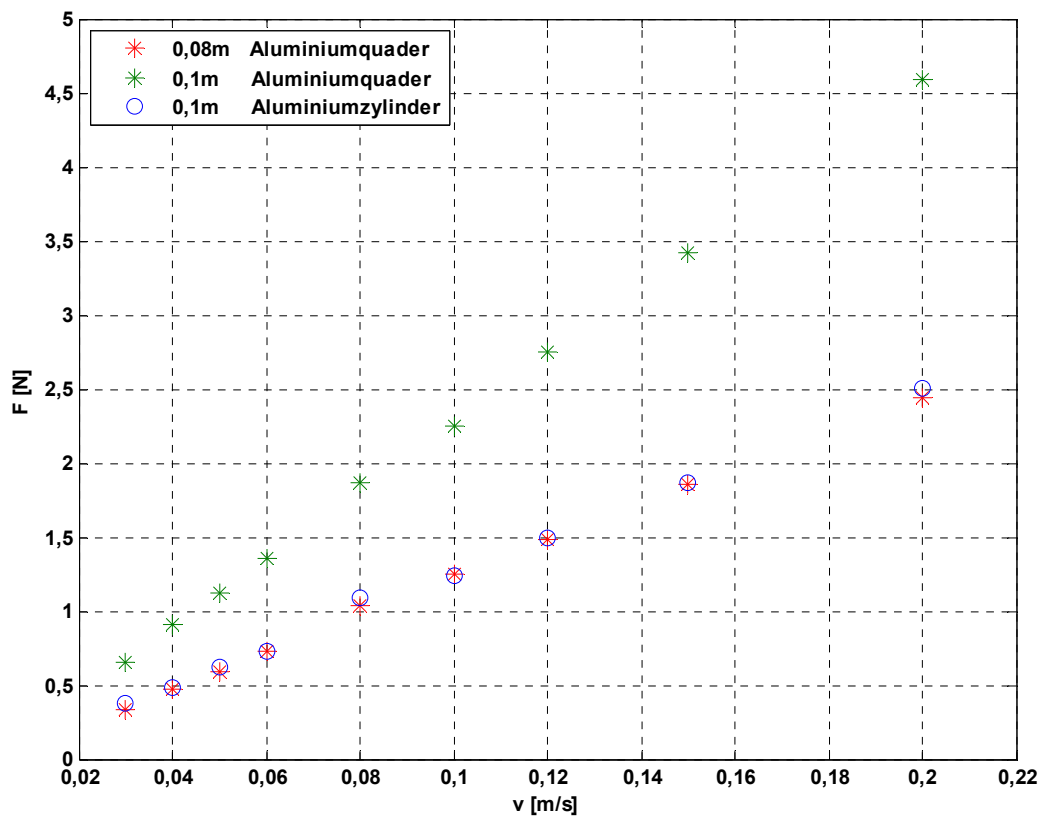


Abbildung 12: Kraft-Geschwindigkeitsabhängigkeit für quaderförmige und zylindrische Probekörper. Der zylindrische Probekörper wird durch Kreise angezeigt. Der zylindrische Probekörper produziert in etwa die Kraft eines quaderförmigen Probekörper mit 80x100mm².

Abbildung 12 zeigt die von einem Aluminiumzylinder mit Durchmesser 100mm induzierte Kraft im Vergleich zu den Kraftwerten der quaderförmigen Probekörper. Die Kraftwerte des Aluminiumzylinders liegen auf dem Niveau der Kraftwerte des Aluminiumquaders mit einer Höhe von 80mm. Ursache hierfür ist die gleiche Querschnittsfläche der beiden Proben. Daher ist davon auszugehen, dass Proben mit gleicher Strömungsquerschnittsfläche, unabhängig von der Geometrie der Querschnittsfläche, die gleichen Kraftwerte erzeugen. Verändert man den Strömungsquerschnitt, etwa durch Variation der Höhe eines quaderförmigen Probekörpers, so erhält man die in Kraft-Höhen Abhängigkeit beschriebene nichtlineare Abhängigkeit der gemessenen Kraft von der Höhe des Referenzkörpers.

3.4 Weiterentwicklung und Neukonstruktion des Versuchsstandes

Zur weiteren Erhöhung der Genauigkeit wurde ein Miniaturinterferometer mit Tripelspiegel vom Typ MI 5000 der Fa. SIOS Messtechnik GmbH beschafft und in den unter 3. beschriebenen Versuchsaufbau integriert. Mit diesem System ist es möglich, die Geschwindigkeitsstufen des Motors zu messen. Die am Motor eingestellte Geschwindigkeit wurde mit Hilfe der Messdaten des Laserinterferometers mit der tatsächlich gemessenen Geschwindigkeit verglichen. Das laserinterferometrische Messsystem hat einen Messbereich von 0-5000mm und eine maximale Wegauflösung von 0,1nm. Die Messungen zeigten eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der eingestellten Geschwindigkeit und der tatsächlichen Geschwindigkeit. Die folgende Tabelle soll einen Einblick in die Entwicklung und die Veränderungen des Kalibrierstandes zur trockenen Kalibrierung geben.

	Ursprünglicher Aufbau (Minchenya)	1. Änderung (Abbildung 6)	2. Änderung Integration eines Laserinterferometers	3. Änderung Integration eines neuen Linearmotors	4. Änderung Neukonstruktion der Anlage mit GFK (Abbildung 14)
Positionierung LKA	LKA auf dem Laborboden befestigt	LKA an der Labordecke befestigt	LKA an der Labordecke befestigt	LKA an der Labordecke befestigt	LKA am Laborboden befestigt
Motor, Geschwindigkeitsermittlung	Linearmotor mit Hub 946mm und einer max. Geschwindigkeit von 0,06m/s	Linearmotor mit Hub von 1,6m, Geschwindigkeitsbereich bis 0,8m/s und Geschwindigkeitsrückmeldung	Linearmotor mit Hub von 1,6m, Geschwindigkeitsbereich bis 0,8m/s und Geschwindigkeitsrückmeldung, Messung der Geschwindigkeitsstufen	Linearmotor mit Hub 2,5m und max. Geschwindigkeit von 2m/s. Geschwindigkeit wird über Interferometer kontrolliert	Linearmotor mit Hub 2,5m und max. Geschwindigkeit von 2m/s. Geschwindigkeit wird über Interferometer kontrolliert
Steuerung der Anlage	1 Steuerprogramm, 1 Messprogramm	1 Steuerprogramm, 1 Messprogramm	1 Steuerprogramm, 1 Messprogramm	Kombiniertes Steuer- und Messprogramm	Kombiniertes Steuer- und Messprogramm

Tabelle 5: Änderungshistorie der Anlage zur trockenen Kalibrierung von Lorentzkraft-Anemometern

Die Weiterentwicklung des LKA machte tiefgreifende konstruktive Veränderungen am Messgerät notwendig. Um auch zukünftige Prototypen mit der trockenen Kalibriermethode untersuchen zu können, musste die vorhandene Anlage unter Berücksichtigung der neuen Rahmenbedingungen umgestaltet werden.

Die neu entwickelten Geräte werden nun von unten an die Rinne angebracht, um einen freien Zugang zur Gießrinne zu gewährleisten. Damit kann die bisherige Methode der trockenen Kalibrierung nicht beibehalten werden und muss ebenfalls weiterentwickelt werden. Der bisher verwendete Motor musste bei starker Belastung durch relativ schnelle Versuchsgeschwindigkeiten zusätzlich durch Kühlrippen und Lüfter gekühlt werden. Da er deshalb für höhere Geschwindigkeiten nur bedingt geeignet war und auch konstruktiv nicht mehr den neuen Anforderungen genügte, wurde ein neuer Linearmotor inklusive Steuereinheit beschafft.

Für den Neuaufbau des Versuchsstandes zur trockenen Kalibrierung wurden verschiedene Varianten diskutiert. Vor allem sollte die neue Anlage eine hohe Beschleunigung aufweisen, um die Proben im Einflussbereich des Lorentzkraft-Anemometers möglichst lange mit konstanter Geschwindigkeit bewegen zu können. Der Hub des Motors muss deshalb mindestens 2m betragen, um zu gewährleisten, dass die Probe, abzüglich einer angemessenen Beschleunigungs- und Bremsstrecke, ausreichend lange mit konstanter Geschwindigkeit bewegt werden kann. Die maximale Geschwindigkeit der Anlage wurde perspektivisch auf 2m/s festgelegt.

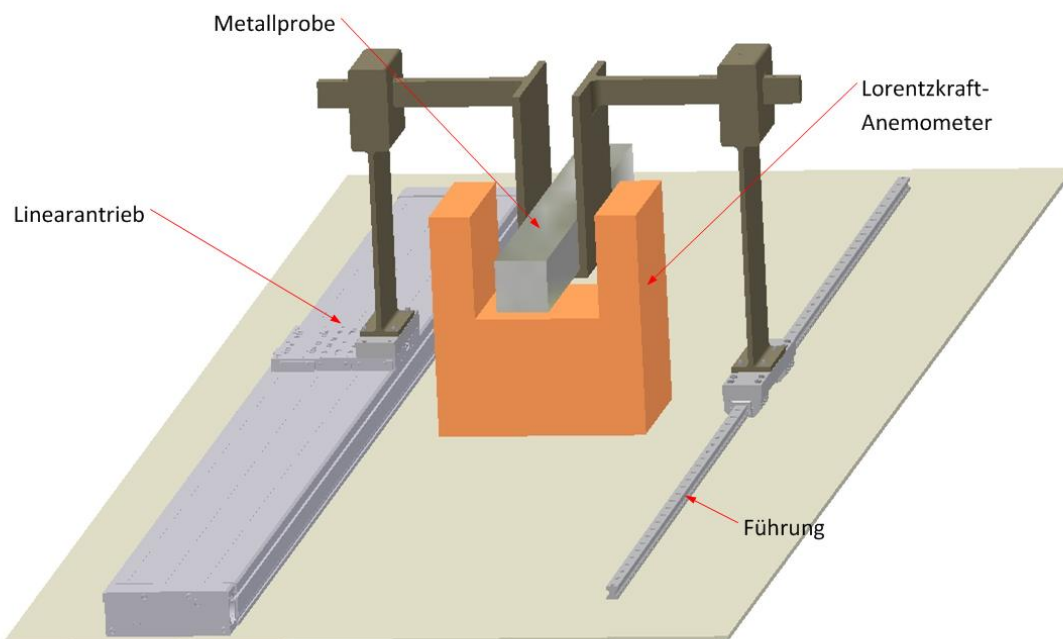


Abbildung 13: Prinzipieller Aufbau des neuen Versuchsstandes zur trockenen Kalibrierung. Die Probe wird in einer speziellen Aufnahme durch das am Boden verankerte Lorentzkraft-Anemometer bewegt.

Die Konstruktion des neuen Versuchsaufbaus sollte die Bestückung der Probenaufnahme von oben gestatten. Dies ermöglicht vor allem bei schweren Proben, wie etwa dem Kupferzylinder, den Einsatz von Hebezeugen. Bei Testmessungen sollte das Gerät immer unter Berücksichtigung der späteren Einbausituation untersucht werden. Daher wird das Lorentzkraft-Anemometer auf dem Laborboden befestigt. Die Probekörper werden in einer speziellen Aufnahme durch das Lorentzkraft-Anemometer bewegt. Der neue Motor ermöglicht höhere Geschwindigkeiten. Für die daraus resultierenden Beschleunigungs- und Bremskräfte, die von der Probenaufnahme aufgenommen werden müssen, wurde der Aufbau aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) gefertigt. Dieser Verbundwerkstoff bietet bei einem vergleichsweise geringem Eigengewicht eine sehr hohe Bruchdehnung, die für die Absorbierung der Beschleunigungs- und Bremskräfte notwendig ist. Ein Aufbau aus mitteldichter Faserplatte, wie er beim bisherigen Versuchsaufbau verwendet wurde, hätte den auftretenden Kräften nicht standhalten können. Im Zuge der Neukonstruktion ist es nun möglich, einen Parallelversatz der Probe senkrecht zum magnetischen Feld zu untersuchen. Dazu kann die Probenaufnahme mit Hilfe eines Lochrasters um bis zu 60mm aus der Nullposition verschoben werden.



Abbildung 14: Neubau des Versuchsaufbaus zur trockenen Kalibrierung. Das Lorentzkraft-Anemometer steht nun auf dem Laborboden. Die Metallproben werden durch das Gerät bewegt. Die Probenaufnahme wurde aus glasfaserverstärktem Kunststoff gefertigt.

Die Integration des neuen Motors bot zugleich die Möglichkeit, alle Kommando- und Messfunktionalitäten in einem Steuerprogramm zusammenzufassen. Da die Ansteuerung des Linearmotors und die Kommunikation mit dem Lorentzkraft-Anemometer mit LabView erfolgen können, liegt es nahe, die Hauptsteuerung der Anlage über LabView zu programmieren.

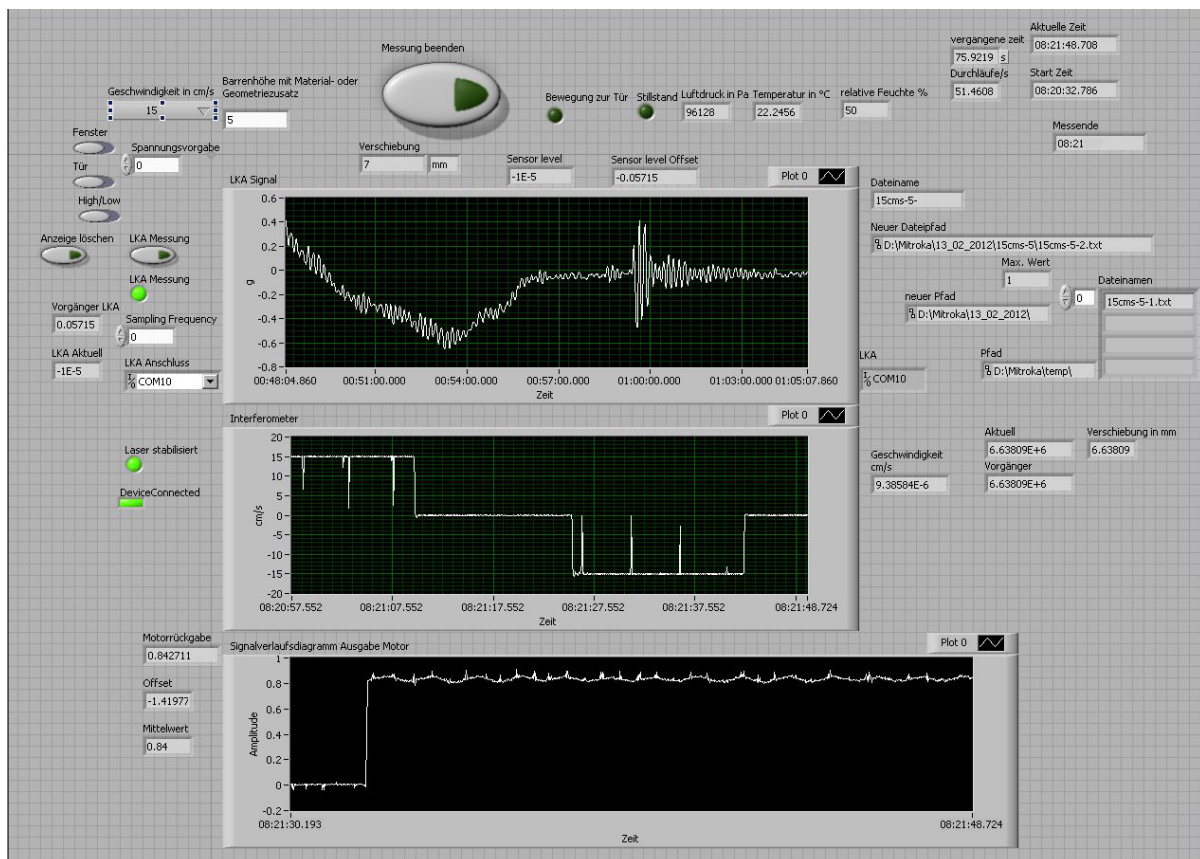


Abbildung 15: Screenshot des in LabView programmierten Mess- und Steuerprogrammes. Alle Daten werden vollautomatisch protokolliert. Die Ansteuerung des Motors erfolgt halbautomatisch.

In Abbildung 15 wird der Bildschirm des Steuerprogramms, das für die Steuerung der Anlage entwickelt wurde, gezeigt. Im linken oberen Teil des Fensters befinden sich die Einstellungen für den Motor. Das Dropdownfeld enthält alle untersuchten Geschwindigkeitsstufen und setzt gleichzeitig die entsprechende Spannung für die Ansteuerung des Motors. Neben diesem befinden sich die Richtungswahlschalter sowie die Bereichsumschaltung des Motors. Letztere wurde eingefügt, um mit den 5V high Pegel der USB Schnittstelle des Steuercomputers den Bereich zwischen 0 und 2m/s hinreichend genau ansteuern zu können.

Im Feld „Barrenhöhe mit Material- oder Geometriezusatz“ wird die Höhe des entsprechenden Probekörpers sowie sein Material- oder Geometriezusatz, wie zum Beispiel „cu“ für Kupfer, eingetragen. Mit dieser Information werden die gewonnenen Daten nach Abschluss der Messung vollautomatisch mit vordefinierten Dateinamen in entsprechenden Ordnern abgelegt. Die in Auswertung der Rohdaten beschriebene Routine nutzt den Dateinamen für den automatischen Import der Daten in Matlab. Im mittleren, oberen Teil befinden sich die Statusanzeigen der Anlage. Die Anzeige der Temperatur, der relativen Luftfeuchte und des Luftdruckes charakterisieren die Umgebungsbedingungen während des Versuchs und werden deshalb ebenfalls protokolliert. Die aktuelle Verschiebung der Probe wird als Bedingung für den Vergleich der aktuellen Position mit der Endlage des Motors herangezogen und im entsprechenden Feld angezeigt. Steht die Probe in der Endlage des Motors, so wird der Leuchtmelder „Stillstand“ aktiv und die Probe wird nach Ablauf einer einstellbaren Wartezeit selbstständig wieder mit der festgelegten Geschwindigkeit in die Ausgangslage zurückbewegt. Falls das Laserinterferometer nicht einsatzbereit ist, wertet das Programm die Rückmeldung des Frequenzumrichters zur Positionsbestimmung aus und kann damit ebenso halbautomatisch verfahren. Die Anzeigen über die Rückmeldung des Frequenzumrichters erscheinen im unteren Teil des Bildschirms.

In der Mitte des Bildes finden sich die Messwerte des Laserinterferometers. Im Diagramm wird die ermittelte Geschwindigkeit aufgetragen. Zur Ermittlung der Geschwindigkeit wird die Differenz der Messwerte von aufeinanderfolgenden Wegmessungen durch die Zeit zwischen den Messwerten geteilt. Die Zeit wird durch die Systemzeit des Steuercomputers ermittelt. Rechts neben dem Diagramm befindet sich die Anzeige der ermittelten Geschwindigkeit. Der Leuchtmelder „DeviceConnected“ zeigt an, ob das Laserinterferometer korrekt erkannt wurde. Da höchste Wegauflösung des Interferometers nur mit einem stabilisierten Laser erzielt werden kann, zeigt die „Laser stabilisiert“ Leuchte die Stabilisierung des im Laserinterferometer eingebauten Lasers an. Direkt über den Anzeigen für das Laserinterferometer sind die Bedien- und Anzeigeelemente für das Lorentzkraft-Anemometer. Hier wurde die Kommunikation mit allen bisher bekannten LKA Prototypen implementiert. Der Benutzer wählt den entsprechenden LKA Prototyp aus und die entsprechende Kommunikation wird etabliert und eine Offsetbereinigung des LKA durchgeführt.

Der ermittelte Offset des LKA Sensors wird in der entsprechenden Anzeige über der Signalverlaufsanzeige eingetragen. Allerdings nimmt die in Auswertung der Rohdaten beschriebene Auswerteroutine bereits eine Offsetbereinigung vor. Zudem können während der Online-Offsetbereinigung Fehler entstehen, weswegen nur das Rohsignal protokolliert wird. Rechts neben den Anzeigen für das Lorentzkraft-Anemometer finden sich die Anzeigen für das automatische Abspeichern der Protokolldateien. Die protokollierten Werte werden in einer Tabstopp getrennten Textdatei abgelegt. Dies reduziert den Speicherbedarf der Dateien und bietet gleichzeitig eine größtmögliche Kompatibilität mit den gängigsten Datenverarbeitungsprogrammen, wie zum Beispiel Mathworks Matlab oder Produkten der Microsoft Office Gruppe. Die Dateien werden aber gleichzeitig durch entsprechende Kopfzeilen so gestaltet, dass auch über Ansicht im Editor oder Notepad alle Informationen leicht zugänglich sind. Da während einer Untersuchung Messpunkte mehrmals angefahren werden müssen, wird der Dateiname innerhalb des Programmes entsprechend einer festgelegten Vorschrift automatisch ermittelt. Der Dateiname enthält Informationen über die untersuchte Geschwindigkeitsstufe und den verwendeten Probekörper und die Anzahl der Wiederholungen. Für den Fall, dass eine Messung nicht korrekt beendet werden kann, etwa durch Betätigung des Notaus-Tasters, werden die Messwerte während der Messung in einer temporären Datei protokolliert. Diese wird nach Betätigung der „Messung beenden“ Schaltfläche in die entsprechende Datei im Messverzeichnis umgespeichert.

3.5 Unsicherheitsbetrachtung der Messungen mit dem Versuchsstand zur trockenen Kalibrierung

Die Gesamtunsicherheit eines derart komplexen Systems, wie Mitroka, ist schwierig zu bestimmen. Deshalb sollen im Folgenden die Unsicherheiten der einzelnen Messungen betrachtet werden. Da in diesem Versuchsstand verschiedene Proben zum Einsatz kommen, muss jede Probe separat analysiert werden.

Die in den Diagrammen verwendeten Kraftwerte sind Mittelwerte aus mehreren Messungen. Deshalb greifen für die Unsicherheitsbestimmung der Kraftwerte die Vorschriften für mehrmals gemessene Werte nach DIN 1319-4 [21] beziehungsweise für die Unsicherheitsbestimmung nach Typ A des „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ (GUM). Demnach ist die Standardmessunsicherheit der Messwerte aus dem Quotienten der Standardabweichung und der Wurzel aus der Anzahl der Werte zu ermitteln.

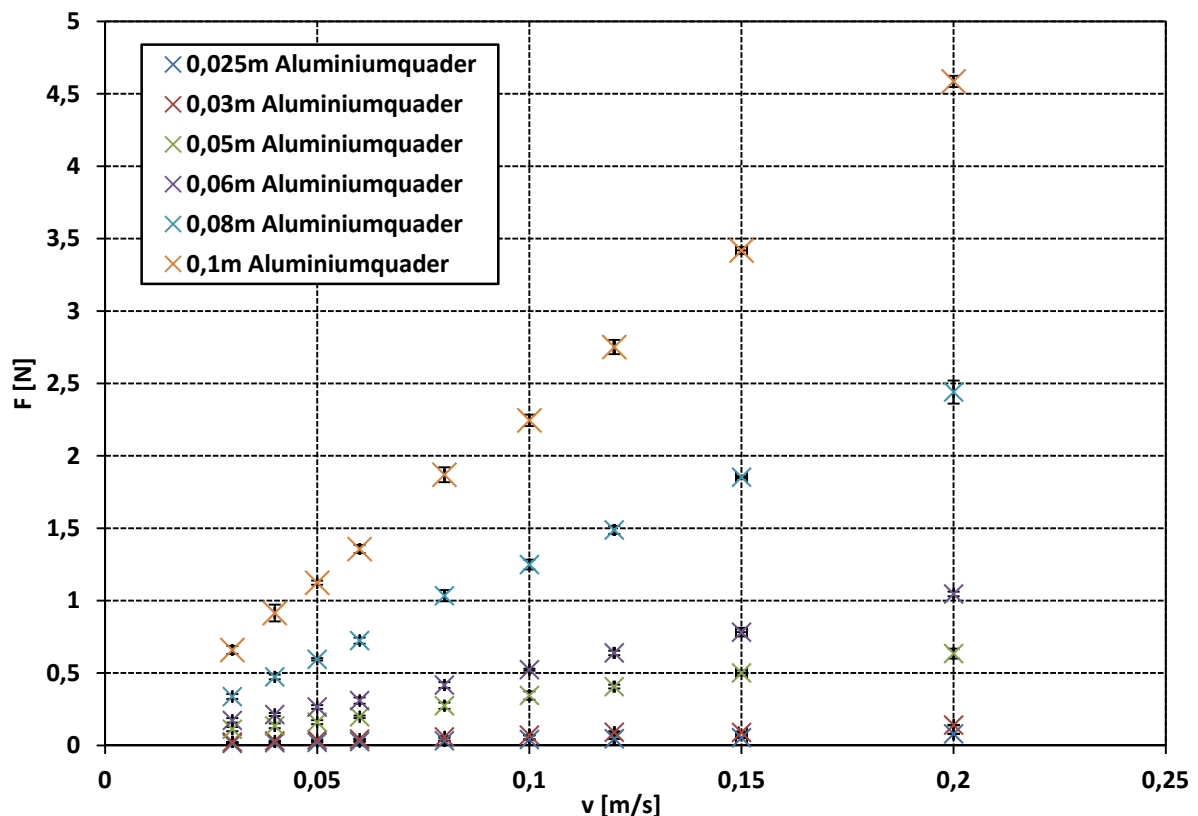


Abbildung 16: Die erzeugte Kraft in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Aluminiumreferenzkörpers bei verschiedenen Höhen des Referenzkörpers. Für jeden Messpunkt ist die erweiterte Unsicherheit für $k=2$ im Diagramm eingetragen.

In Abbildung 16 ist die aus 3.3 bekannte Kraft–Geschwindigkeitskennlinie des Lorentzkraft-Anemometers abgebildet. Für jeden Messpunkt ist die ermittelte Unsicherheit für $k=2$ eingetragen.

Die Geschwindigkeitsstufen wurden in einem separaten Versuch mit Hilfe des laserinterferometrischen Messsystems mit je 20 Wiederholungen gemessen.

Geschwindigkeitsstufe [m/s]	Messergebnis [m/s] k=2
0,03	0,029±8,96E-05
0,04	0,039±9,61E-05
0,05	0,049±3,85E-05
0,06	0,059±4,83E-05
0,08	0,079±6,99E-05
0,10	0,098±9,48E-05
0,12	0,118±1,79E-04
0,15	0,147±1,30E-03
0,20	0,199±1,05E-04

Tabelle 6: Die für die Versuche verwendeten Geschwindigkeitsstufen und die entsprechenden Messergebnisse.

In Tabelle 6 sind die verwendeten Geschwindigkeitsstufen den Messergebnissen gegenübergestellt. Für die erweiterte Unsicherheit wurde das Konfidenzintervall $k=2$ herangezogen. Dies entspricht einem Vertrauensbereich von 95%. Die angestrebten Geschwindigkeitsstufen zeigen eine sehr geringe Abweichung zur gemessenen Geschwindigkeit. Lediglich die Geschwindigkeitsstufe 0,015m/s zeigt mit einem Messergebnis von $(0,147\pm 1,30E-03)\text{m/s}$ eine etwas größere Abweichung von der angestrebten Geschwindigkeit. Das laserinterferometrische Messsystem weist eine maximale Wegauflösung von 0,1nm auf. Die Steuerroutine der Anlage ist in der Lage, 47 Werte pro Sekunde zu verarbeiten. Daher beträgt die maximale Unsicherheit der Geschwindigkeitsermittlung bei einem maximalen Hub von 2,5m $\pm 1,31\cdot 10^{-7}$ m/s. Dies ist wesentlich kleiner als die übrigen Fehlereinflüsse, wie beispielsweise die Unsicherheit der Leitfähigkeitsmessung oder der Kraftmessung, und kann damit nach DIN 1319-4 vernachlässigt werden [21]. Die in Abbildung 16 ermittelten Unsicherheiten der Kraftwerte wurden nach GUM Typ A ermittelt. Es ergeben sich folgende Messergebnisse:

h[m] u[m/s]	0,025	0,03	0,05	0,06	0,08	0,10
0,03	13,91 ± 0,82mN	23,19 ± 1,18mN	112,31 ± 14,18mN	173,13 ± 15,46mN	337,55 ± 16,72mN	659,40 ± 27,80mN
0,04	18,55 ± 1,27mN	30,82 ± 2,45mN	135,29 ± 16,38mN	213,74 ± 10,65mN	472,89 ± 16,61mN	914,75 ± 58,10mN
0,05	21,16 ± 1,38mN	37,57 ± 2,95mN	160,16 ± 13,78mN	265,35 ± 12,90mN	595,25 ± 8,46mN	1123,43 ± 14,44mN
0,06	27,15 ± 3,83mN	43,55 ± 1,20mN	197,65 ± 8,63mN	309,46 ± 21,29mN	723,69 ± 20,90mN	1356,27 ± 27,81mN
0,08	32,20 ± 2,00mN	58,85 ± 6,06mN	274,40 ± 21,68mN	416,74 ± 20,40mN	1034,04 ± 38,43mN	1869,26 ± 51,26mN
0,1	41,11 ± 1,90mN	71,32 ± 2,73mN	344,92 ± 28,64mN	523,33 ± 7,36mN	1249,26 ± 33,20mN	2245,56 ± 39,25mN
0,12	46,50 ± 1,10mN	90,84 ± 7,32mN	406,33 ± 13,64mN	638,93 ± 15,48mN	1487,75 ± 26,77mN	2751,27 ± 49,11mN
0,15	53,65 ± 1,87mN	90,09 ± 6,25mN	500,61 ± 17,58mN	781,81 ± 29,95mN	1852,84 ± 9,68mN	3417,84 ± 24,98mN
0,20	79,64 ± 1,92mN	140,18 ± 2,47mN	634,23 ± 34,37mN	1045,44 ± 16,00mN	2440,54 ± 79,55mN	4585,91 ± 38,53mN

Tabelle 7. Das Messergebnis der Kraftmessungen für die verwendeten Aluminiumprobekörper in mN. Die Messergebnisse sind nach der Höhe des Aluminiumprobekörpers und der Referenzgeschwindigkeit geordnet. Die Unsicherheit ist für k=2 bestimmt worden.

In Tabelle 7 sind die Messergebnisse der trockenen Kalibrierung für k=2 angegeben. Die Messergebnisse weisen eine relativ geringe Unsicherheit auf. Die maximale Unsicherheit zeigt das Messergebnis bei einer Geschwindigkeit von 0,2m/s und einer Probenhöhe von 0,08m. Insgesamt nimmt die Unsicherheit mit zunehmender Probengeschwindigkeit und Probenhöhe zu. Denn durch hohe Probengeschwindigkeiten werden am LKA Schwingungen induziert. Dies wird auch in Abbildung 16 deutlich. Die vorstehenden Betrachtungen beziehen sich weitgehend auf den ersten unveränderten Aufbau zur trockenen Kalibrierung. Für den neu konstruierten Aufbau der trockenen Kalibrierung wurde das laserinterferometrische Messsystem direkt in die Steuerung der Anlage integriert und misst die aktuell gefahrene Geschwindigkeit. Die Unsicherheit der Geschwindigkeitsbestimmung hängt damit im Wesentlichen nur von der Messunsicherheit des Laserinterferometers ab. Da die Unsicherheit des Interferometers sehr klein gegenüber den übrigen Einflüssen ist, kann die Unsicherheit der Geschwindigkeitsmessung für den neu konstruierten Aufbau vernachlässigt werden. Die Unsicherheit der Kraftmessung hängt vom Entwicklungsstand des jeweiligen Lorentzkraft-Anemometers ab und muss daher für jedes System separat bestimmt werden.

4 Anlage zur nassen Kalibrierung- LiTinCa

4.1 Planung der Anlage

Bereits 2009 empfahl Minchenya, die Methode der trockenen Kalibrierung durch eine sog. Nasskalibrierung zu ergänzen. Dabei sollte ein Lorentzkraft-Anemometer einsatznah mit Flüssigmetallströmungen untersucht werden. Das ForMaT-Projekt „Lorentzkraft-Anemometer“ bot die Möglichkeit, eine solche Kalibriereinrichtung zu planen, aufzubauen und erste Messungen mit dieser Anlage durchzuführen. Da das bisher im Fachgebiet Thermo- und Magnetofluidynamik verwendete eutektische Flüssigmetall GaInSn mit ca. 1000€ pro Kilogramm sehr teuer ist, wurde bereits in der Antragsphase die Anlage mit Reinzinn geplant. Reinzinn wurde ausgewählt, da in der geplanten offenen Gerinneströmung Modellfluide mit gesundheitsschädlichen Zusätzen wie Woodsmetall oder Bleilegierungen vermieden werden sollten. Hinzu kommt, dass der Schmelzpunkt von Zinn als Temperaturfixpunkt für die Kalibrierung von Thermometern verwendet wird. Deshalb sind die thermophysikalischen Eigenschaften von Zinn besser erforscht als die vergleichbarer anderer Reinstoffe.

Nach Beginn des Projektes wurden die Rahmenbedingungen für die Aufstellung der Anlage nochmals überprüft. Der Laborraum in der Maschinenhalle für Elektrotechnik hatte einige Randbedingungen, die zusätzlich berücksichtigt werden mussten. So ist in diesem Laborraum eine maximale lichte Höhe von 3,5m anzutreffen. Die zulässige Verkehrslast für diesen Laborraum beträgt 1500kg/m². Um die Sicherheitsbestimmungen der TU Ilmenau einzuhalten, wurde das Grundkonzept verändert.

Das flüssige Metall wird nun mit speziellen Pumpen durch Rohre in eine Versuchsrinne gebracht und in einem zweiten Ofen aufgefangen. Die Rückführung der Schmelze erfolgt durch die Versuchsrinne mit Hilfe einer weiteren Flüssigmetallpumpe. Aufgrund von preislichen Informationen für Tiegelöfen mit einem Fassungsvermögen von 1000kg und den Rahmenbedingungen im Laborraum musste die ursprünglich geplante Füllmenge von 1000kg auf 500kg reduziert werden. In der Industrie werden innerhalb weniger Minuten mehrere Tonnen Flüssigmetall vergossen. Unter Berücksichtigung der Füllmenge der Anlage von etwa 70l und einer minimalen Messzeit von 10s wird die Förderleistung der Flüssigmetallpumpen mit maximal 7l/s projektiert.

Neben den beiden Öfen mit je einer Flüssigmetallpumpe, ist die Versuchsrinne eine der Hauptkomponenten der Anlage. Mit Hilfe dieser Rinne soll das Lorentzkraft-Anemometer industrienah untersucht werden. Deshalb sollte die Rinne weitgehend mit dem Vorbild in der Industrie übereinstimmen. Da diese Kanäle in der Industrie eine leichte Neigung aufweisen, um den Abfluss des heißen Metalls durch Schwerkraft zu gewährleisten, sollte die Neigung auch in der Versuchsanlage einstellbar sein. Für die ersten Testmessungen in der Industrie wurde 2009 [5] ein Segment der Breite 100mm in die bestehende Gießrinne des Betriebes eingebaut. An diesem Segment wurde das Lorentzkraft-Anemometer befestigt. Dementsprechend wurde die Testsektion der Versuchsrinne ebenfalls mit einer Kanalbreite von 100mm geplant. Die Gießrinnen in der Industrie weisen üblicherweise eine Breite von etwa 200mm auf. Deshalb wurde der Ein- und Auslaufbereich der Versuchsrinne mit einer Kanalbreite von 200mm eingeplant. Die Industrie setzt zur Überführung von flüssigem Aluminium zwischen Öfen individuell gefertigte Gießrinnen ein. Daher sind die Ausmauerung und die endgültige Geometrie einer Gießrinne nicht einheitlich, sondern variieren je nach Einsatzort. Es wurde deshalb eine Edstahlgießrinne mit einem Einsatz aus RFM[®], einem keramischen Kompositmaterial, beschafft. Dieses Material kann für Temperaturen bis zu 700°C eingesetzt werden und weist bei dieser Temperatur eine Wärmeleitfähigkeit von 0,43W/(m K) auf [27]. Deshalb kann auf eine zusätzliche Beheizung der Rinne verzichtet werden. Aufgrund der zu erwartenden Belastung durch die Masse des Flüssigzinns wird der RFM[®] Einsatz des Kalibrierkanals mit einem nichtmagnetischen Edstahlmantel umgeben. Der Zwischenraum zwischen dem RFM[®] Einsatz und dem Edstahlmantel wird isoliert, um die maximal zulässige Außentemperatur von 60°C für Teile, die in Laborräumen frei zugänglich sind, zu unterschreiten.

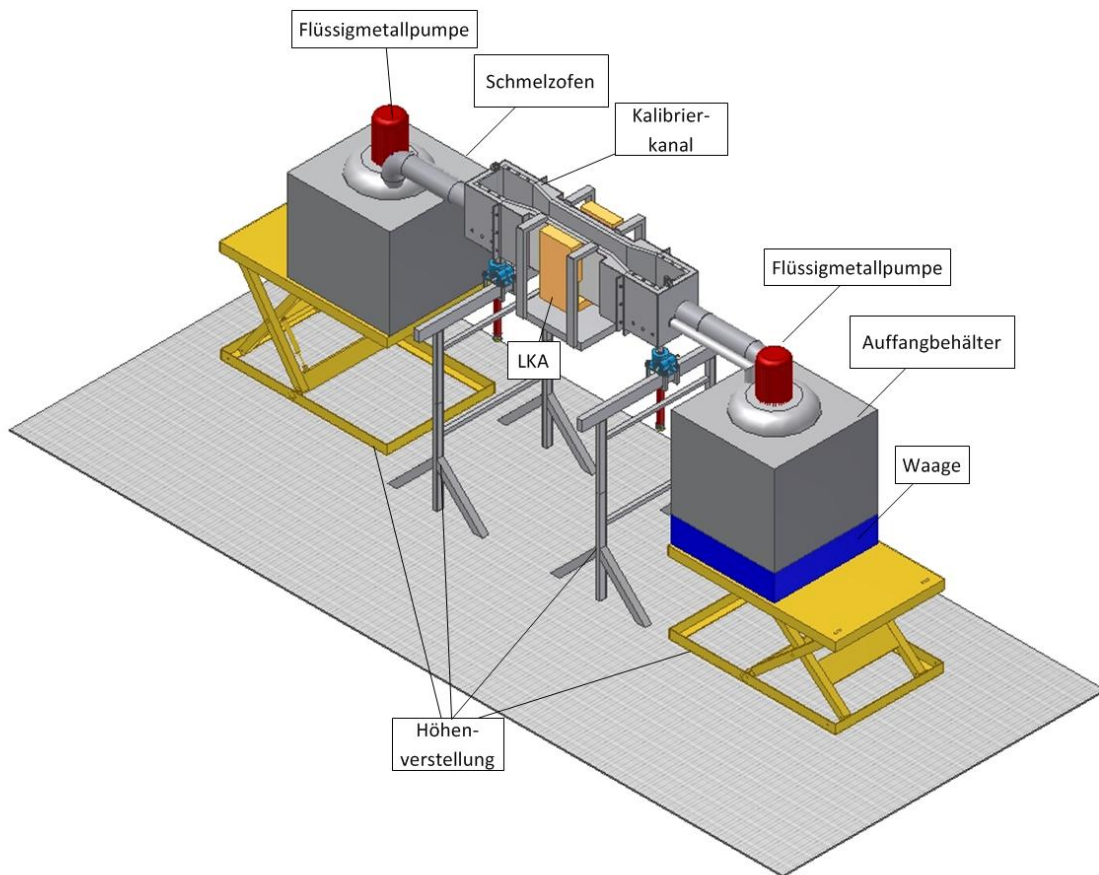


Abbildung 17: Konstruktionszeichnung der Flüssigzinnkalibrieranlage LiTinCa. Im Schmelzofen werden 500kg Reinzinn aufgeschmolzen und mit Hilfe der Flüssigmetallpumpe in die Gießrinne eingebracht. Die Schmelze passiert das in der Mitte der Gießrinne angebrachte Lorentzkraft-Anemometer und wird schließlich im Auffangbehälter verwogen. Die Gießrinne wird entsprechend der Pumprichtung geneigt. Nach dem Versuch wird die Schmelze durch die zweite Flüssigmetallpumpe wieder in den Schmelzofen gepumpt.

In Abbildung 17 ist die Konstruktionsskizze für die Flüssigzinnkalibrieranlage für Lorentzkraft-Anemometer abgebildet. Im Schmelzofen werden 500kg Reinzinn geschmolzen und auf 240°C bis 350°C überhitzt. Die Schmelze wird mit Hilfe der Flüssigmetallpumpe in den Kalibrierkanal eingebracht. Aufgrund der Anfangsgeschwindigkeit, die durch die Flüssigmetallpumpe aufgeprägt wurde, und der eingestellten Neigung fließt sie in den Auffangbehälter. Das Gewicht des Auffangbehälters wird ständig durch die Waage unter dem Behälter ermittelt. Der Auffangbehälter ist zusätzlich mit 5kW beheizt, um ein Erstarren des Zinns zu verhindern. Der Schmelzofen wurde mit 15kW Heizleistung ausgestattet, um die beabsichtigte Füllmenge innerhalb von 4h aufschmelzen zu können.

Sowohl die beiden Behälter als auch der Kalibrierkanal sind höhenverstellbar. Der maximale Hub der Hubtische unter den Behältern wurde mit 700mm festgelegt. Damit können die Öfen ebenfalls den für die Neigung der Rinne benötigten Hub ausführen und die Belastung der Rohrleitungen kann minimiert werden. Für die Verstellung des Kalibrierkanals wird das Konstruktionsprinzip des kombinierten Grob- und Feintriebes angewandt. Die Grobverstellung des Kalibrierkanals wird mit Hilfe zweier Kurbelböcke realisiert, die bis auf eine Höhe von 2,10m ausgefahren werden können. Dabei ist die Tragfähigkeit auf 1300kg pro Kurbelbock festgelegt. Angesichts einer Gesamtmasse der leeren Versuchsrinne von etwa 300kg, kann ein zweiter Kalibrierkanal mit anderer Geometrie auf den Kurbelböcken abgelegt werden, ohne die Tragfähigkeit zu überschreiten. Die zweite Stufe bilden elektrische Hubzylinder mit einem Hub von 150mm, die direkt am Kalibrierkanal angebracht werden. Ein Hubzylinder hat dabei eine Tragfähigkeit von 450kg. Aufgabe der Hubzylinder ist die Feinjustierung und Neigung des Kalibrierkanals.

In der Mitte des Kalibrierkanals wird das LKA angebracht. Um größtmögliche Übereinstimmung zwischen den Probemessungen in der Industrie und den Laborexperimenten zu erzielen, wird analog zur Versuchsrinne in der Industrie auch hier die Breite des Kalibrierkanals von 200mm auf 100mm verjüngt [28]. Diese Verkleinerung der Rinnenbreite erhöht den Pegel und erlaubt gleichzeitig, den Abstand der beiden Magnetpole des LKA zu verringern. Dies erhöht das zu erwartende Kraftsignal erheblich und verbessert somit das Verhältnis von Nutzsignal zu Signalrauschen im Bereich geringer Pegelhöhen. Für den Kalibrierkanal wird aufgrund der räumlichen Beschränkungen des Laborraumes eine Gesamtlänge 1500mm festgelegt.

4.2 Aufbau und Instrumentierung der Anlage

Neben den eben beschriebenen Großkomponenten wurde die Anlage mit verschiedenen Sensoren bestückt. So wurde ein Neigungssensor angeschafft, um die Neigung des Kalibrierkanals ermitteln zu können. Die Kenntnis der Pegelhöhe ist für die Bestimmung des Durchflusses am Lorentzkraft-Anemometer von entscheidender Bedeutung. Deshalb wurde ein Pegelmesssystem beschafft, das auch kommerziell an Gießrinnen eingesetzt wird und eine maximale Unsicherheit von $\pm 0,6\text{mm}$ aufweist. Die elektrische Leitfähigkeit eines Mediums ist an dessen Temperatur gekoppelt.

Aus diesem Grund wurden zusätzlich zu den bereits in den Schmelzbädern der Öfen befestigten Thermoelementen drei weitere Doppelthermoelemente angebracht. Mit diesen kann die Temperatur der Schmelze im Bereich der Teststrecke gemessen werden. Um ein Umknicken der Messfühler in der strömenden Zinnschmelze zu vermeiden, wurden spezielle Titan-Schutzrohre für die Thermoelemente verwendet. Während des Betriebes wird durch die Variation der Neigung des Kalibrierkanals auch der Winkel zu den Ofenkomponenten der Anlage verändert. Dadurch werden die Rohrverbindungen zum Kalibrierkanal gekrümmt. Abweichend zu Abbildung 17 wurden deshalb entsprechende Edelstahlkompensatoren eingebaut, die eine maximale Winkeländerung von 15° erlauben. Damit sind die Rohrleitungen ausreichend flexibel, um den Positionsänderungen der Großkomponenten während des Betriebes folgen zu können.

In Abbildung 18 ist der reale Aufbau der Versuchsanlage LiTinCa zu sehen. 500kg Reinzinn werden im Schmelzofen am linken Bildrand aufgeschmolzen und dann mit Hilfe der Flüssigmetallpumpe, gekennzeichnet durch den blauen Motor, in die Kalibrierstrecke eingebracht. Dabei wird die Schmelze durch ein Rohr der Nennweite DN 65 und einen Edelstahlkompensator gleicher Nennweite transportiert. Das flüssige Zinn fließt durch den geneigten Kalibrierkanal und ein Rohr mit Kompensator der Nennweite 125 in den Auffangbehälter am rechten Bildrand. Durch diese Nennweite soll ein störungsfreier Abfluss des Zinns gewährleistet werden. Der Auffangbehälter steht auf einer Waage, mit der über ein zeitaufgelöstes Massensignal der Massenstrom ermittelt werden kann. Die zweite Flüssigmetallpumpe (blauer Motor am rechten Bildrand) bringt die Schmelze durch ein weiteres Rohr mit Kompensator in den nun entgegengesetzt geneigten Kalibrierkanal ein und fördert sie wieder in den Schmelzofen zurück. Diese Vorgehensweise ermöglicht zudem Aussagen über die Reaktion des Lorentzkraft-Anemometers bei Messungen entgegen der Vorzugsmessrichtung. Sogenannte Rückstauklappen verhindern das Eindringen der Schmelze in die Flüssigmetallpumpe der Gegenrichtung. Hier würde das Zinn nicht ungehindert in den Ofen abfließen können.



Abbildung 18: Die Flüssigzinnkalibrieranlage LiTinCa ohne Lorentzkraft-Anemometer. Am linken Bildrand befindet sich der Schmelzofen inklusive der Flüssigmetallpumpe. Das flüssige Zinn wird über die Rohrleitungen durch die Kompensatoren hindurch in den Kalibrierkanal geleitet. Der Kalibrierkanal kann mit Hilfe von elektrischen Hubgetrieben beliebig zwischen 0 und 5° geneigt werden. Der Pegel im Kalibrierkanal wird durch die in der Testsektion in der Mitte angebrachte Pegelmesseinrichtung gemessen. Die Schmelze wird im Auffangbehälter am rechten Bildrand gesammelt und anschließend durch den Kalibrierkanal zurückgepumpt.

In Abbildung 18 sind ebenfalls die beschriebenen Kurbelböcke zu sehen. Auf den Kurbelböcken sind Winkel aus Stahl befestigt. Auf ihnen werden die Kalibrierkanäle beim Abrüsten der Anlage abgelegt, um die Hubgetriebe zu entlasten. Ein Wechsel der Kalibrierkanäle kann damit nach Lösen aller Verbindungselemente ohne Einsatz von Hebezeugen erfolgen. Hier kann zum Beispiel der montierte Kalibrierkanal gegen einen weiteren Kalibrierkanal mit Rinnenbreite 200mm ohne Verjüngung ausgetauscht werden. Dies ist eine in der Industrie oft anzutreffende Rinnenbreite. Es ist deshalb zu erwarten, dass zukünftige Prototypen des Lorentzkraft-Anemometers an dieser Rinnenbreite untersucht werden müssen.

In der Industrie können bei einem Abguss Pegelhöhen von bis zu 300mm beobachtet werden.

Da die Anlage LiTinCa im Vergleich zur Industrie mit erheblich weniger Schmelze arbeitet, wurde die Tiefe des Kalibrierkanals mit 270mm projektiert. Der Übergang in die Testsektion musste aus strömungstechnischen Gründen so gestaltet werden, dass scharfe Kanten, an denen sich Wirbel ablösen könnten, vermieden werden. Deshalb wurde die Verjüngung des Kanals mit einem relativ flachen Winkel von 16° eingeplant. Die Rinne wurde zunächst modular geplant, um die Testsektion austauschen zu können. Der relativ günstige Preis und Überlegungen zur Stabilität und Abdichtung führten schließlich zu der in Abbildung 18 gezeigten Lösung. Die Pegelmesseinrichtung ist im Bereich der Testsektion montiert und liefert die Information über den momentanen Pegel im Kalibrierkanal zur Berechnung des Strömungsquerschnitts. Da der Kalibrierkanal in der Testsektion eine Breite von 100mm aufweist, ist zusätzlich auch ein Vergleich mit den Versuchen der trockenen Kalibrierung (vgl. 3.1) möglich. Auch hier werden Probekörper mit einer Breite von 100mm und verschiedenen Höhen eingesetzt. Die Vorhersage des Pegels in einer Gießrinne ist aufgrund der Gerinneströmung äußerst schwierig. Die maximale Fördermenge der Flüssigmetallpumpen wurde auf 7l/s festgelegt. Damit soll in kurzer Zeit genügend Flüssigmetall im Kalibrierkanal vorhanden sein, um einen ausreichend hohen Pegel zu erzeugen. Es ist unmöglich die Schmelze während eines Abgusses direkt zu beobachten, da der Kalibrierkanal wegen der Anschlüsse der Flüssigmetallpumpen in etwa 1,4m über dem Fußboden angebracht werden muss. Zudem weist der Kanal inklusive des Edelstahlmantels und der Wärmeisolierung eine Höhe von 390mm auf. Aus diesen Gründen wurde eine Kamera beschafft, mit der es möglich ist, den Versuch gefahrlos zu beobachten und die Versuche als Video abzuspeichern. Anhand dieser Aufzeichnungen können auch die bei der Messung aufgetretenen Signale analysiert werden.



Abbildung 19: Die Flüssigzinnkalibrieranlage LiTinCa gegen Ende der Versuche. Im Bild ist deutlich das am Referenzkanal angebrachte Lorentzkraft-Anemometer sowie die Hubgetriebe und die Pegelmess-einrichtung zu erkennen. Die dünnen Rohre der Pumpen mussten zusätzlich mit entsprechenden Rohr-begleitheizungen versehen werden.

In Abbildung 19 ist die Flüssigzinnkalibrieranlage LiTinCa gegen Ende der Versuche zu sehen. Das auch für die Versuche der trockenen Kalibrierung verwendete LKA wurde in der Mitte der Testsektion des Referenzkanales angebracht. Dazu wurde es, wie im Einsatzfall in der Industrie, direkt am Kanal befestigt. Im oberen Teil des Bildes ist in diesem Bereich die Pegelmesseinrichtung zu erkennen. Um den Mindestabstand von 700mm einzuhalten, der in der Bedienungsanleitung des Sensors gefordert wird, wurde eine Aufnahme aus Aluminiumprofilen erstellt und am Kanal befestigt [29].

Während der ersten Pumptests stellte sich eine Blockade der Flüssigmetallpumpe im Schmelzofen ein. Die Blockade wurde durch den Hersteller beseitigt und die betreffende Pumpe wurde mit etwas größerem Spiel im Bereich der Förderzone versehen. In einem weiteren Test wurde die Rückstauklappe im Kanal durch in der Rinne zurückgebliebenes und erstarrtes Zinn blockiert.

Um ein Erstarren der Schmelze in den Rohren der Anlage zu vermeiden, wurden für die Pumprohre Heizbänder und Isolierungen beschafft, die die Pumprohre auf 350°C vorheizen. In Abbildung 19 sind im Vergleich zu Abbildung 18 die Hubgetriebe der Anlage deutlich sichtbar. Die zunächst gelieferte Lösung beinhaltete ein Hubgetriebe und eine Führung jeweils links und rechts am Kanal. Erste Messungen zeigten jedoch, dass sich die Neigung des Kanals während eines Abgusses veränderte. Deshalb wurden zwei weitere Hubgetriebe beschafft, die dieses Problem beseitigten. Die Aufnahmen der Hubgetriebe wurden vom Hersteller der Hubgetriebe als Biegeteile aus 3mm Material geliefert. Die Belastungen während des Betriebes der Anlage führten zu einer Verwindung der Aufnahmen. Deshalb wurden die in Abbildung 19 gezeigten Aufnahmen für die Hubgetriebe aus Aluminiumvollmaterial entwickelt und eingebaut.

Am rechten Rand von Abbildung 19 ist zudem die Aufnahme für die Rohrhalterungen am Auffangbehälter zu sehen. Da der Auffangbehälter direkt auf der Waage (blaue Plattform im Bild) positioniert ist, müssen die Belastungen, die durch das Gewicht der Rohrleitungen auf den Auffangbehälter wirken, eliminiert werden. Andernfalls wird das Initialgewicht des Auffangbehälters entsprechend der Neigung der Rinne und der daraus veränderten Lage der Rohrleitungen beeinflusst. Mit der gezeigten Lösung konnte der Einfluss lediglich minimiert werden, da der letzte Teil der Pumpleitung mit der Pumpe im Inneren des Auffangbehälters direkt verbunden bleiben muss. Um Probleme durch die Rückstauklappen im Kalibrierkanal zu vermeiden, wurde die Rückstauklappe in Fließrichtung des Zinnes bereits vor der Messung geöffnet und am Rand des Kanals befestigt. In Abbildung 19 ist am rechten Bildrand zusätzlich einer der Steuerschränke für die Anlage zu sehen. Über diesen Schaltschrank wird die Temperaturregelung der Öfen, die Steuerung der Flüssigmetallpumpen sowie der Hubtische realisiert. Zusätzlich ist hier das Anzeigegerät für die Waage installiert. Ebenfalls am rechten Bildrand befindet sich ein Teil der Einhausung, die zu diesem Zeitpunkt bereits auf die zukünftigen Bedürfnisse im Zuge des Aufbaus der Schwesteranlage Tintelo angepasst wurde. An der Traverse im rechten Teil von Abbildung 19 ist die verwendete Kamera sichtbar.

Steuerung der Anlage

Die Flüssigzinnkalibrieranlage für Lorentzkraft-Anemometer wurde als industrienaher Kalibrierstand geplant. Dieser Umstand wurde auch bei der Auswahl der Steuerungskomponenten berücksichtigt. Es sollte eine repräsentative, zielorientierte und industrienaher Anlage entstehen. Deshalb wurde auch die Ansteuerung mit einer in der Industrie üblichen Steuerung realisiert. Die Anlage wird mit einer Simatic 300 Steuerung von Siemens kontrolliert. Diese wird zur Visualisierung und Datenarchivierung mit einem bereits vorhandenen Simatic Multi Panel via Profibus verbunden. Für die Ansteuerung der verschiedenen Komponenten wird eine Simatic CPU mit 16 digitalen Ein- und Ausgängen verwendet. Hier werden verschiedene Steuerbefehle und Rückmeldungen verarbeitet. Die Steuerung wird zusätzlich um einige Baugruppen erweitert, um alle Signale einlesen und Steuerbefehle ausgeben zu können. Da die Kommunikation des in Abschnitt 1 beschriebenen LKA Prototyps über die RS232 Schnittstelle erfolgt, wird die CPU neben verschiedenen Analogeingangs- und Analogausgangsbaugruppen um zwei RS 232 Kommunikationsprozessoren erweitert.

Die beiden höhenverstellbaren Öfen und die beiden Flüssigmetallpumpen sowie die verwendete Waage wurden öffentlich ausgeschrieben. Diese Komponenten werden über einen vom Hersteller gelieferten Schaltschrank angesteuert. Die Hauptsteuerung der Anlage erfolgt über einen zweiten Schaltschrank. Damit werden Überlagerungen der Steuersignale und Messsignale durch Signale der Heizungssteuerung und Frequenzumrichter vermieden. Um die Ansteuerung der Komponenten zentral durchführen zu können, werden die folgenden Signale zwischen den beiden Schaltschränken übertragen:

- Temperaturvorgabe Schmelzbad „Schmelzofen“/ „Auffangbehälter“
- Endtemperatur erreicht- Signal der Temperaturregler
- Momentanwert der Waage
- Frequenzvorgabe der Frequenzumrichter für beide Flüssigmetallpumpen
- Regler-Freigabe der Frequenzumrichter der beiden Flüssigmetallpumpen
- Ansteuerung der beiden Hubtische

Zur Visualisierung und Steuerung wird auf dem Multipanel der Anlage eine Oberfläche auf Basis von Abbildung 18 geschaffen.

Das Multipanel wird mit Siemens Simatic WinCC Flexible betrieben, einer von Siemens geschaffenen Automatisierungsoberfläche auf Basis von Visual Basic Scripting.

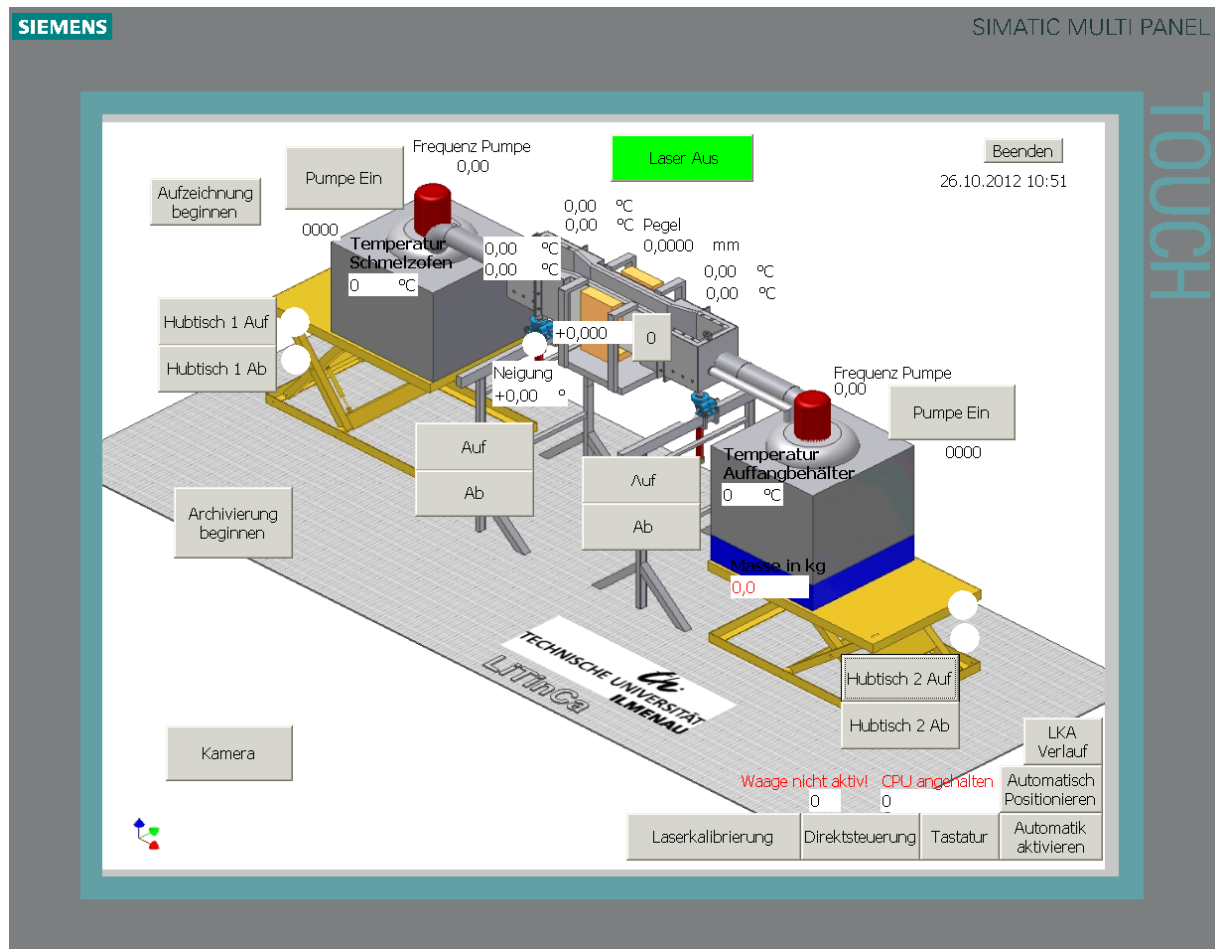


Abbildung 20: Screenshot der Hauptvisualisierungs- und Steueroberfläche der Flüssigzinckalibrieranlage LiTinCa auf Basis der 3D CAD Abbildung. Alle Steuerfunktionen können hier ausgeführt werden. Alle Messwerte werden hier angezeigt und abgespeichert.

In Abbildung 20 ist ein Bildschirmausdruck der Visualisierungsoberfläche abgebildet. Die „Auf“ und „Ab“ Schaltflächen schalten die digitalen Ausgänge der CPU für das Verstellen der Hubgetriebe. Aus Sicherheitsgründen sind die Schaltflächen als Taster ausgeführt. Somit wird der Ausgang beim Loslassen der Schaltfläche sofort inaktiv gesetzt und die Hubgetriebe angehalten. Analog wurden die Taster zum Verstellen der Hubtische ausgeführt. Die Taster kontrollieren die Hauptsteuerung der Hubtische über ein Relais. Die gewünschten Solltemperaturen des Schmelzofens und des Auffangbehälters können in die entsprechenden Felder eingetragen werden. Die Solltemperatur wird in der CPU in ein 0-20mA Signal umgerechnet. Mit diesem Signal wird der Sollwert der Schmelzbadregler der beiden Öfen gesetzt.

Bei einer maximalen Abweichung von $\pm 6\text{K}$ setzt der Regler ein „Temperatur erreicht“-Signal, das in der Visualisierung durch einen grünen Kreis unterhalb der Sollwertvorgabe des jeweiligen Ofens abgebildet wird. Die Frequenz der Flüssigmetallpumpen kann über je einen Frequenzumrichter zwischen 0Hz und 55Hz variiert werden. Dabei entsprechen etwa 55Hz der maximal möglichen Förderrate von 7l/s. Ab etwa 15Hz ist der Förderdruck groß genug, um das flüssige Zinn in den Kalibrierkanal einzubringen. Auch dieser Sollwert wird in der CPU in eine Spannung konvertiert, um den Sollwert am jeweiligen Frequenzumrichter zu setzen. Die gewünschte Pumpfrequenz kann im entsprechenden Eingabefeld eingetragen werden und wird automatisch an die Steuerung der Pumpe übertragen.

Im Bereich der Modellrinne werden die Temperaturen der drei montierten Doppelthermoelemente angezeigt. Die Neigung wird über einen Neigungssensor ermittelt. Er gibt ein Spannungssignal aus, das der Neigung zwischen $\pm 15^\circ$ entspricht. Dieses wird mit Hilfe des Kalibrierprotokolls des Herstellers in die entsprechende Neigung zurückverwandelt.

Wird der Pegelsensor aktiviert, so erscheint in der Mitte des Kalibrierkanals der entsprechende Messwert. Der Wert der Waage wird ebenfalls an der entsprechenden Stelle der Abbildung angezeigt. Die Kommunikation mit der Waage erfolgt über einen Kommunikationsprozessor mit RS 232 Schnittstelle. Dabei wird das sog. ASCII Protokoll verwendet, um mit dem Gerät zu kommunizieren. Ist ein Empfangsvorgang erfolgreich abgeschlossen, wird ein Zähler inkrementiert, der in der Visualisierung im unteren rechten Teil der Abbildung 20 zu sehen ist. Die Kommunikationsprozessoren sind wegen der Protokollabhängigkeit sog. asynchrone Bauteile. Das heißt, dass nicht bei jedem Durchlauf des Hauptprogrammes der CPU ein neuer Wert ausgegeben werden kann. Durch den Kommunikationsprozessor wird ein Lesebefehl an das Gerät übermittelt und das Gerät quittiert den Befehl mit dem aktuellen Messwert. Deshalb wird links neben der Anzahl der Werte der Waage auch die Anzahl der Durchläufe des Hauptprogrammes der CPU angezeigt. Alle übrigen Komponenten der Steuerung werden synchron betrieben, liefern also bei jedem Durchlauf des CPU Hauptprogrammes einen Wert.

Im Betrieb liegt die Anzahl der Werte des Kommunikationsprozessors der Waage bei ca. 23 Werten/s, die der übrigen Baugruppen bei ca. 85 Werten/s. Aus Sicherheitsgründen macht eine Angleichung der Durchläufe des CPU-Hauptprogrammes an die Durchläufe der Waage keinen Sinn, da ein Befehl zum Abschalten der Pumpe beispielsweise sofort und ohne zusätzliche Verzögerung ausführbar sein muss. Direkt am Lorentzkraft-Anemometer in Abbildung 20 wird der vom Sensor ausgelesene Messwert dargestellt. Mit der Schaltfläche neben dem Anzeigeelement ist es möglich, den momentanen Messwert als Offset zu kennzeichnen. Er wird dann bei zukünftigen Messwerten automatisch korrigiert.

Sicherheits- und Komfortfunktionen

Um einen sicheren Betrieb der Anlage zu gewährleisten, wurden einige Sicherheitsfunktionen installiert. Da die Flüssigmetallpumpen direkt im Schmelztiegel der Öfen eingebaut sind, dürfen die Pumpen, solange das Zinn im festen Zustand vorliegt, keinesfalls gestartet werden. Hierdurch könnte die Pumpe zerstört werden. Erst nach Überschreiten der Schmelztemperatur von $231,98^{\circ}\text{C}$ dürfen die Pumpen in Betrieb genommen werden. Deshalb wurden die Schalter zur Reglerfreigabe der Pumpen nicht direkt mit den Ausgängen der CPU verbunden. Erst nach Erreichen einer Zinntemperatur, die oberhalb der Schmelztemperatur liegt, dürfen die Regler freigegeben und damit die Pumpen gestartet werden. Dies wird über ein Skript realisiert, das beim Einschalten des Schalters den Steuerbefehl „Pumpe Einschalten“ mit dem „Temperatur ok“- Signal des jeweiligen Ofens logisch verknüpft. Nur wenn beide Bedingungen „Wahr“ ergeben, wird die Pumpe freigegeben. Die Beschriftung der Schaltfläche ändert sich entsprechend des Ergebnisses der Und- Verknüpfung des Skriptes. Bei Freigabe der Pumpe wird „Pumpe läuft“ angezeigt. Wird die Freigabe nicht erteilt, erscheint „Reglersperre aktiv“. Der Betrieb der Flüssigmetallpumpen wird zusätzlich durch eine Animation des Motors und dem Blinksignal einer Warnleuchte auf dem Schaltschrank signalisiert. Aus Sicherheitsgründen soll sich während einer Messung niemand im Gefahrenbereich der Anlage aufhalten. Dieser befindet sich im Inneren der Einhausung.

Eine weitere Sicherheitsfunktion ist für den sicheren Betrieb des Pegelmesssystems verantwortlich. Da dieses System mit einem Laser der Schutzklasse 2 arbeitet und deshalb verhindert werden muss, dass jemand direkt in den Strahl blickt, wurden hier spezielle Sicherheitsmechanismen implementiert.

So wird bevor der Laser eingeschaltet wird, zunächst der Bios Beep Ton des Panels fünfmal aufgerufen. Zusätzlich wird der Betrieb auch durch das Blinken einer roten Warnleuchte auf dem Steuerschrank signalisiert. Um ein unbeabsichtigtes Einschalten des Lasers zu verhindern und um den aktuellen Zustand des Lasersystems anzuzeigen, ist die entsprechende Schaltfläche in Signalfarben eingefärbt. Ist der Laser außer Betrieb, ist die Schaltfläche grün und trägt die Aufschrift „Laser ein“. Ist der Laser in Betrieb, wird die Schaltfläche rot und trägt die Aufschrift „Laser aus“.

Im unteren Bereich der Visualisierungsoberfläche ist die Schaltfläche „Laserkalibrierung“ angeordnet. Mit dieser Routine kann eine Nullpunktverschiebung des Messsystems bestimmt und korrigiert werden. Diese Routine ist nur bei leerem Kalibrierkanal sinnvoll durchzuführen, da sonst der Offset beispielsweise durch Zinnreste in der Rinne nicht korrekt bestimmt werden kann. Deshalb wird direkt nach dem Drücken der Schaltfläche ein Meldungsfenster mit diesem Hinweis sichtbar. Bestätigt der Benutzer die Meldung, so wird die Offsetkorrektur des Pegelmesssystems durchgeführt. Während dieses Vorganges werden auch die oben beschriebenen Sicherheitsroutinen für das Einschalten des Lasers abgearbeitet.

Da die Aufrüstung der Anlage mehrere Stunden benötigt, muss verhindert werden, dass Unbefugte Veränderungen der Prozessparameter vornehmen können. Deshalb wurde ein weiteres Bild in die Visualisierung eingebettet, das alle Informationen des Hauptbildes enthält, aber keine Steuerbefehle erlaubt. Dieses Bild wird nach 20 Minuten ohne Benutzeraktion automatisch aktiv gesetzt. Daneben kann dieses Bild auch durch eine vordefinierte Benutzeraktion aktiv gesetzt werden, um die Anlage vor unbefugtem Zugriff zu schützen.

Durch die Betätigung des Not-Aus Schalters wird die angelegte Spannung unterbrochen und der Steuerung ein Signal zur Verfügung gestellt. Durch dieses Signal werden alle aktiven Steuerbefehle zurückgenommen beziehungsweise mit Null belegt. Damit soll verhindert werden, dass nach dem Wiedereinschalten der Anlage, Steuerbefehle, die die Betätigung des Tasters erzwungen haben, weiter ausgeführt werden. Um zu gewährleisten, dass die maximal zulässige Neigung der Kompensatoren von 15° nicht überschritten wird, muss sich aus geometrischen Gründen der entsprechende Ofen in etwa auf gleicher Höhe wie die Rinne befinden. Im Betrieb ist dies häufig schwer einzuschätzen.

Deshalb wurde mit Hilfe von Gabellichtschranken eine Möglichkeit geschaffen, um die Position des Ofens und der Rinne elektronisch zu kontrollieren. Diese Sensoren wurden auf den Öfen und an der Rinne angebracht.

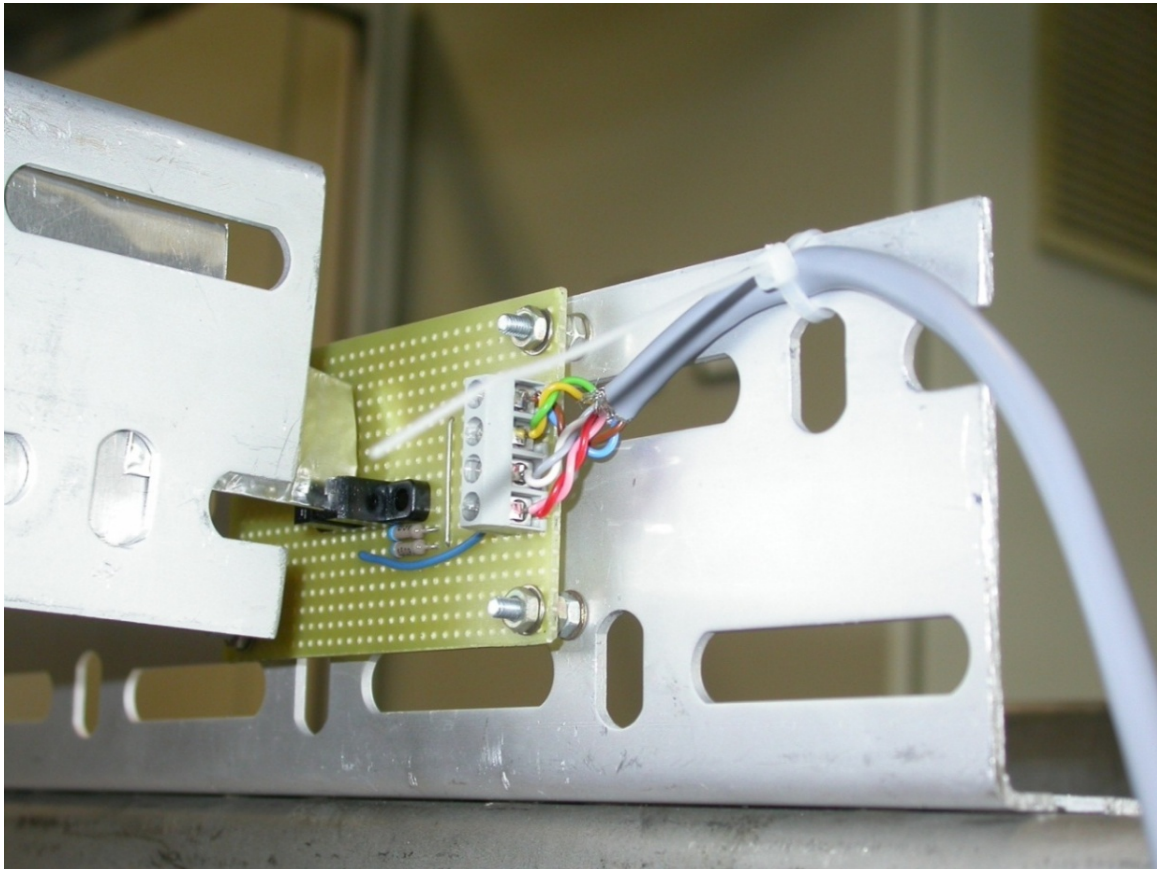


Abbildung 21: Die Positionsmeldeeinrichtung

Abbildung 21 zeigt die Positionsmeldeeinrichtung. Das Metallstück am linken Bildrand ist am Kalibrierkanal befestigt und bewegt sich nach oben oder unten. Der Ofen wird mit Hilfe der Hubtische so verstellt, dass das Metallstück des Kanals den Spalt der Lichtschranke verschließt. Das Signal der Lichtschranke wird der Steuerung zur Verfügung gestellt. Diese Lösung gibt an beiden Koppelstellen zwischen Öfen und Kalibrierkanal Aufschluss über die Position der Öfen und des Kalibrierkanals zueinander. Ein System derselben Art wird eingesetzt, um einen Endanschlag des Kalibrierkanals auf dem Kurbelbock zu realisieren. Um auch tiefere Aussagen über die Position von Ofen und Rinne zu machen und Steuerempfehlung in der Visualisierung geben zu können, werden die beiden Schaltungen an den Öfen durch einen weiteren Optokoppler direkt über den bestehenden erweitert.

Die Steuerung errechnet mit den Informationen der Positionsmeldeeinrichtungen Empfehlungen zum Korrigieren der Fehlstellung und zeigt diese in der Visualisierungsoberfläche an.

Neben der Empfehlung zur Korrektur von Fehlstellungen zwischen Ofen und Rinne werden die Signale auch für die automatische beziehungsweise halbautomatische Positionierung der Komponenten herangezogen. Die halbautomatische Positionierung wird über die Schaltfläche „Automatik aktivieren“ auf der Visualisierungsoberfläche gestartet. Eine Positionierung der Komponenten kann nun über die Schaltflächen der Hubgetriebe des Kalibrierkanals eingeleitet werden. Der entsprechende Ofen richtet sich dann skriptgesteuert automatisch aus. Es wurde ein Timeout von 5 Sekunden implementiert, um zu verhindern, dass die Anlage beschädigt wird. Wenn sich innerhalb dieser Zeit die Fehlstellung nicht korrigieren lässt, wird eine Fehlermeldung ausgegeben und die Automatik beendet. Eine weitere Steuerfunktion ist die vollautomatische Positionierung. Sie kann über die Schaltfläche „Automatisch Positionieren“ gestartet werden. Die automatische Positionierung setzt ein einwandfreies Funktionieren der Positionsmelder sowie einen freien Gefahrenbereich der Anlage voraus. Deshalb muss der Benutzer nach Aktivieren der „Automatisch Positionieren“ Schaltfläche bestätigen, dass der Gefahrenbereich der Anlage frei ist. Danach wird der gewünschte Winkel abgefragt und nach Bestätigung automatisch angefahren. Dabei wird die aktuelle Neigung der Rinne ermittelt und der entsprechende Steuerbefehl automatisch abgearbeitet. Bei Überschreiten des Timeouts wird die gesamte Positionierung abgebrochen.

Um Steuerbefehle und Variablen direkt manipulieren zu können, etwa zum Nivellieren des Kalibrierkanals, sind die Hubtische und Hubgetriebe sowie ausgewählte Variablen über die Schaltfläche „Direktsteuerung“ zugänglich. Die Schaltfläche „LKA Verlauf“ öffnet ein Bild mit dem zeitlichen Verlauf des Signales des Lorentzkraft-Anemometers. Da die Anlage wegen des Schmelzvorganges mehrere Stunden aufgerüstet werden muss, wird die Protokollierung der Messwerte auf die Zeit der Experimente beschränkt. Vor Beginn eines Experimentes kann die Archivierung mit der Schaltfläche „Archivierung beginnen“ aktiviert werden. Die Aufzeichnung der Kamera wird über die Schaltfläche „Aufzeichnung beginnen“ gestartet.

Um den Bedienkomfort zu erhöhen und Fehlversuche zu minimieren, werden der Laser des Pegelmesssystems, die Archivierung und die Aufzeichnung automatisch beim Einschalten der Pumpe aktiviert, falls sie zu diesem Zeitpunkt noch nicht aktiv sind. Mit der Schaltfläche „Kamera“ kann das Bild der Kamera im Panel angezeigt werden. Dazu wurde das Panel in das Subnetz der TU Ilmenau eingebunden.

Protokollierung der erzeugten Messwerte

Zum Protokollieren der erzeugten Messwerte muss zunächst die von Siemens vorgegebene Umgebung verwendet werden. Hierbei werden die Messwerte in einem sogenannten Variablenarchiv abgelegt, das als durch Tabstopp getrennte Textdatei konfiguriert werden kann. Dieses Variablenarchiv kann auf einen beliebigen, dem Panel zugänglich gemachten Datenträger abgespeichert werden. Zur Auswertung werden diese Daten dann auf einen PC kopiert.

Die vorgegebene Umgebung erlaubt einen Archivierungszyklus von maximal 1Hz. Da aber im Bereich der CPU, wie oben beschrieben, etwa 23 Werte pro Sekunde aufgenommen werden, wurde dem CPU Hauptprogramm eine Unterroutine hinzugefügt, die die entsprechenden Werte zwischenspeichert. Dazu wird in der CPU ein Array angelegt, das für je 40 Messwerte der Waage, des Lorentzkraft-Anemometers, des Neigungssensors und des Pegelmesssystems Platz bietet. Angesichts der minimalen Versuchsdauer von nur 10s wird zur Darstellung der Zeit eine Satellitenfunkuhr in die Anlage implementiert. Dieses Gerät erreicht mit einem beheizten Quarzschwinger und einer Korrektur durch die Zeit der Atomuhren der Satelliten eine maximale Impulsgenauigkeit von $\pm 100\text{ns}$ und stellt ein **puls per second**- Signal zur Verfügung [30]. Das heißt, dass die Steuerung jede Sekunde ein kurzes Signal von der Satellitenfunkuhr erhält, das den Ablauf einer Sekunde indiziert. Mit Hilfe dieses Signales werden die Zähler für die Werte der Waage, des Lorentzkraft-Anemometers und für die Durchläufe der CPU zu null gesetzt. Außerdem wird der Index des Arrays auf den Anfang des Arrays gesetzt. Es wird zusätzlich, gleichzeitig zum Eintragen des Messwertes in das Array, die Zeit des Ablegens in ein weiteres Array gleicher Größe eingetragen. Die beiden Arrays werden dem Panel zur Verfügung gestellt. Die Standard-Archivierungsroutine ist nicht in der Lage, Arrays abzuspeichern. Deshalb wurde eine skriptbasierende Ablegeroutine erstellt, die die Arrayelemente zusammen mit dem zugehörigen Zeitstempel in einer separaten Datei abspeichert. Die Routine wird an den Sekundenpuls der Satellitenfunkuhr gekoppelt.

4.3 Versuchsvorbereitung und -durchführung

Verwendetes Versuchsmetall

Wie bereits in 4.1 angedeutet, wurde die Anlage für 500kg Reinzinn konzipiert. Hier wurde Zinn der Marke Banka in Masseln beschafft. Das verwendete Zinn enthält laut Analyse des Lieferanten 99,92% Sn. Die Leitfähigkeit der einzelnen Masseln wurde vor dem Einschmelzen an 16 Stellen mit Hilfe des Förster Sigmatest 2.069 Leitfähigkeitsmessgerät bestimmt. Die Leitfähigkeit des verwendeten Materials nimmt starken Einfluss auf die produzierte Kraft des Systems (vgl. Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit auf die erzeugte Lorentzkraft sowie Formel 13). Die über alle Masseln gemittelte elektrische Leitfähigkeit bei Raumtemperatur beträgt $\sigma = (8,80 \pm 0,07)$ MS/m. Damit ist das Versuchsmetall im Vergleich zu den in der trockenen Kalibrierung verwendeten festen Aluminiumreferenzkörpern deutlich schlechter elektrisch leitfähig. Die elektrische Leitfähigkeit ändert sich mit steigender Temperatur. Deshalb kann die Messung bei Raumtemperatur nur eine Tendenz aufzeigen. Die in situ Messung der elektrischen Leitfähigkeit ist ein Problem, das momentan in der Forschergruppe untersucht wird.

Versuchsdurchführung

Um Experimente an der Anlage durchführen zu können, muss die Anlage zunächst aufgerüstet werden. Dazu muss etwa 4 Stunden vor dem geplanten Versuch die Beheizung der Öfen und Pumprohre aktiviert werden. Das verwendete Lorentzkraft-Anemometer stellt einen Feder-Masse Schwinger dar. Es ist deshalb sinnvoll, die Einstellung der gewünschten Neigung möglichst zeitnah vorzunehmen, da durch das Verfahren der Hubtische und Hubgetriebe eine Schwingung eingekoppelt wird. Erst nach Abklingen dieser Schwingung können exakte Messungen mit dem System durchgeführt werden. Nach Erreichen einer Temperatur von mindestens 250°C im Schmelzbad, können die Flüssigmetallpumpen gestartet werden. Um einen störungsfreien Ausfluss des Zinns in die Gießrinne zu gewährleisten, sollte die Rückstauklappe der Rinne geöffnet und auf dem Rand der Rinne fixiert werden. Nach Abschluss des Gießvorgangs muss kontrolliert werden, ob die entgegengesetzte Rückstauklappe frei beweglich ist und ob zurückgebliebenes Zinn aus der Rinne entfernt werden muss. Anschließend kann die Rinne in Richtung des Schmelzofens geneigt werden.

Üblicherweise muss die Schmelze im Auffangbehälter wieder auf die eingestellte Temperatur nachgeheizt werden. Dies nimmt in der Regel die gleiche Zeit in Anspruch, in der auch die oben beschriebene induzierte Schwingung am LKA abgeklungen ist. Der Versuch wird über die installierte Kamera überwacht.

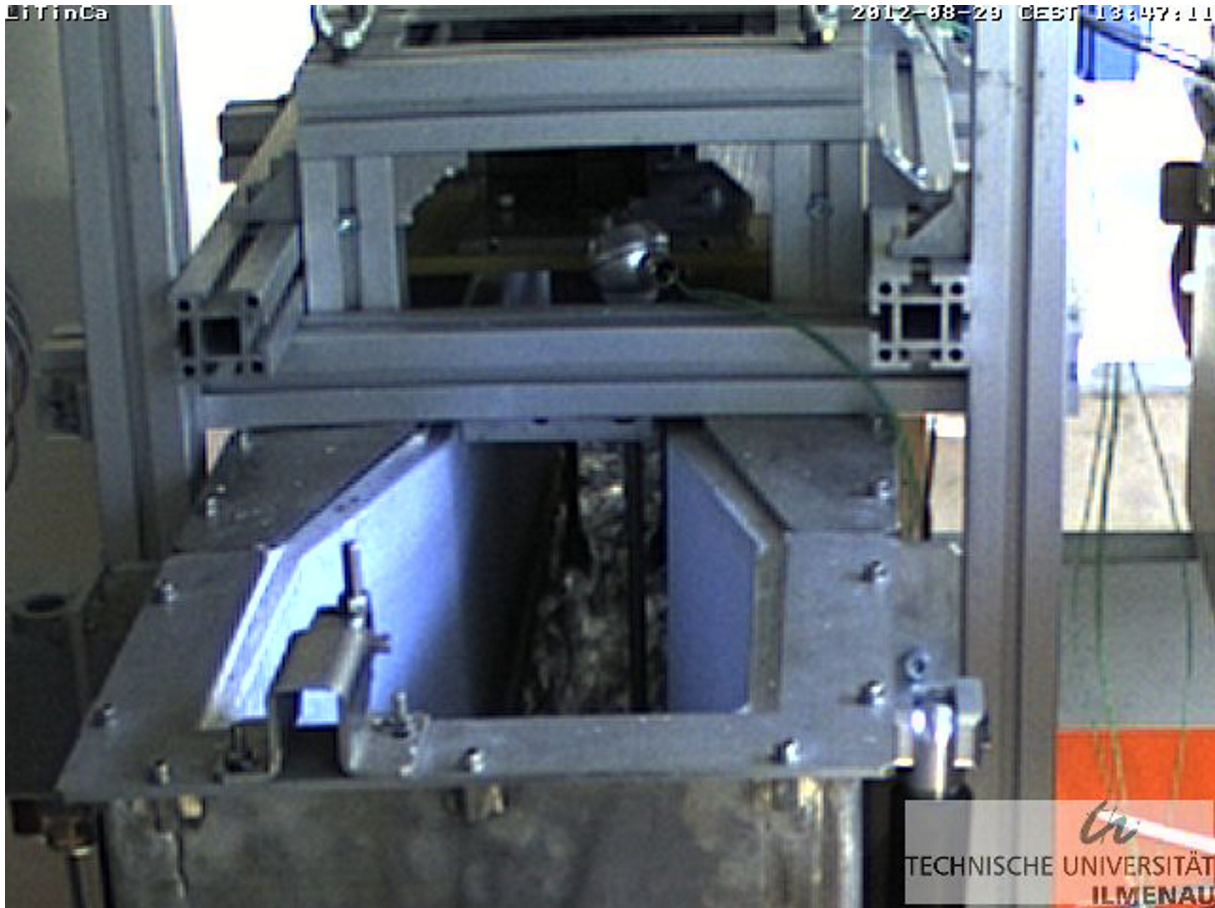


Abbildung 22: Kamerabild von der Gießrinne während eines Versuches mit Neigung $0,7^\circ$ und einer Pumpfrequenz von 20Hz

In Abbildung 22 ist das Bild der Kamera während eines Versuches mit Neigung $0,7^\circ$ und Pumpfrequenz 20Hz gezeigt. Die Kamera ist auf den Bereich der Testsection des Kalibrierkanals gerichtet. Im Bildhintergrund sind das Lorentzkraft-Anemometer und das Doppelthermoelement am Auslauf der Testsection zu sehen. Das flüssige Zinn strömt in Richtung des Auffangbehälters auf den Betrachter zu.

Zunächst wird neben der Pumpfrequenz auch die Neigung der Gießrinne verändert, die eine der wichtigsten Stellgröße der Anlage darstellt. Beide Stellgrößen haben direkten Einfluss auf den sich einstellenden Massenstrom und den Pegel in der Gießrinne. Die Stellgröße Temperatur wird in diesen ersten Versuchen nicht verändert und bleibt bei konstant 350°C .

Für jede Einstellung wurden 23 Versuche durchgeführt, da die Versuchsvorbereitung und die Auswertung der Messdaten sehr aufwändig sind. Es wurden die Neigungswerte $0,7^\circ$ und $1,4^\circ$ ausgewählt, da Gießrinnen in der Industrie eine ähnliche Neigung aufweisen.

4.4 Diskussion der Versuchsergebnisse

Auswertung der Rohdaten

Wie im Kapitel „Protokollierung der erzeugten Messwerte“ beschrieben, werden die Messwerte mit Hilfe eines Variablenarchives in einer durch Tabstopp getrennte Textdatei abgelegt. Pro Messwert wird eine Zeile mit dem entsprechenden Zeitstempel und dem Variablennamen abgelegt. Es kann sich dabei um mehrere tausend Einträge handeln, bei denen die Verbindung zwischen dem Zeitstempel und dem Variablenwert immer aufrechterhalten werden muss. Deshalb wurden aus den Daten zunächst die entsprechenden zeitlichen Verläufe mit Filter- und Sortiermechanismen von MS ACCESS erstellt. Aus den Massewerten der Waage wird ein Massenstrom in kg/s errechnet. Für die Werte des Lorentzkraft-Anemometers wird die Nullpunktverschiebung berechnet und korrigiert.

Versuchsergebnisse

Kraft-Massenstrom Abhängigkeit

Ziel eines Lorentzkraft-Anemometers ist es, den vorhandenen Massenstrom bei bekanntem Strömungsquerschnitt zu messen. Demnach muss es auch eines der Hauptziele der Anlage sein, das am Lorentzkraft-Anemometer vorhandene Kraftsignal mit dem entsprechenden Massenstrom zu verknüpfen. Nach Gleichung 13 ist die Kraft eines Lorentzkraft-Anemometers auch von der durchströmten Querschnittsfläche abhängig. Die Querschnittsfläche wird in der vorliegenden Gerinneströmung durch Multiplikation der Rinnenbreite mit der Pegelhöhe berechnet. Deshalb sind die nachfolgenden Kurven vom Pegel des Flüssigzinns in der Rinne abhängig. Die Abhängigkeit der Kraft vom „Pegel“ wird im Kapitel Kraft-Höhen Abhängigkeit besonders deutlich.

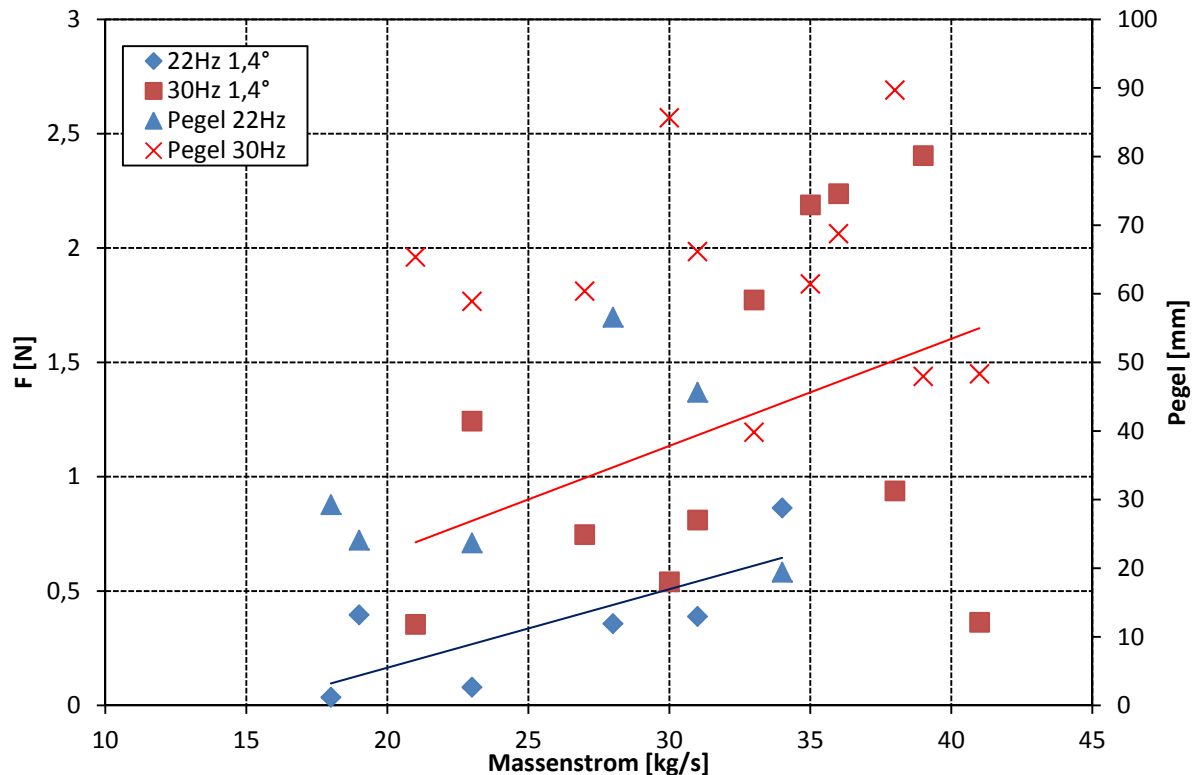


Abbildung 23: Ermittelte Kraft-Massenstrom Abhängigkeit der Versuche mit 1,4° Rinnenneigung. Die Kraft erhöht sich mit steigendem Massenstrom und steigender Pumpfrequenz. An der rechten Achse sind die für den jeweiligen Massenstrom gemittelten Pegelwerte in mm angetragen.

In Abbildung 23 ist die für dieses LKA ermittelte Kraft mit dem aktuell ermittelten Massenstrom verknüpft. Dabei wurde der Massenstrom aus dem zeitlichen Verlauf der Masse erstellt, die von der Waage gemessen wurde. Für die in Abbildung 23 gezeigten Abhängigkeiten wurden der ermittelte Massenstrom den offsetkorrigierten Werten des Lorentzkraft-Anemometers gegenübergestellt. Der Massenstrom wurde zunächst gerundet und Werte mit mehr als drei Wiederholungen und einem Pegel >0mm in die Auswertung einbezogen. Dabei wurde zu jedem Massenstromwert ein Mittelwert aus den zugehörigen Werten des Lorentzkraft-Anemometers zugeordnet und in Abbildung 23 aufgetragen. Kraftwerte <0 würden eine Auslenkung des Systems entgegen der Flussrichtung des Zinns bedeuten. Sie sind deshalb nicht auf die Kelvinkraft, sondern auf Schwingungen des LKA-Systems zurückzuführen und werden nicht betrachtet. Die Abhängigkeit soll aus Gründen der Übersichtlichkeit an den Werten für 1,4° Rinnenneigung diskutiert werden. Die Messungen bei 20Hz ergaben in der Mehrzahl Kraftwerte <0. Sie sind deshalb nicht auf die Fließgeschwindigkeit des Zinns zurückzuführen. Mit einem mittleren Pegel von nur 15,08mm (siehe Tabelle 8) liegen die Werte außerhalb des Messbereichs des LKA.

Bereits während der Untersuchungen mit der Methode der trockenen Kalibrierung zeichnete sich ab, dass eine Pegelhöhe von etwa 25mm die untere Grenze des Messbereichs dieses Gerätes darstellt. Messungen mit einer Referenzbarrenhöhe von 25mm konnten nur unter äußerst idealen Laborbedingungen durchgeführt werden. Die Werte für 20Hz wurden deshalb nicht in Abbildung 23 eingetragen. Die gemessene Kraft für 22 Hz steigt mit zunehmendem Massenstrom an. Diese Abhängigkeit soll durch die lineare Trendlinie unterstrichen werden. Aufgrund von Schwingungen und anderen externen Störeinflüssen fluktuieren die ermittelten Werte. Dies wird später noch erläutert.

Bei 30Hz ist ein deutlich stärkerer Anstieg der Werte zu verzeichnen. Auch hier wird die Tendenz durch eine lineare Trendlinie angezeigt. Im Vergleich zu den Werten bei 22Hz fällt die Häufung der Werte im Bereich größerer Massenströme auf. Eine Erhöhung der Pumpfrequenz ist gleichbedeutend mit einer Erhöhung der Fördermenge der entsprechenden Pumpe. Daher ist diese Verteilung der Werte zu erwarten. Es fällt weiterhin eine deutlich größere Streuung der Werte auf. Mit Erhöhung der Pumpfrequenz erhöht sich auch die Fluktuation der Pegelwerte in der Gießrinne. Es entstehen sehr schnelle Kraftänderungen, denen das Lorentzkraft-Anemometer folgen muss. Es kommt zu einer Schwingung des Lorentzkraft-Anemometers, die durch den Kraftsensor detektiert wird. Dies ist die Ursache für die zum Teil stark streuenden Messwerte am LKA. Bei höheren Pumpraten werden zunehmend mehr Störfrequenzen über die Rinne eingekoppelt. Die lineare Trendlinie für 30Hz zeigt im Vergleich zu den Werten bei 22Hz einen noch deutlicheren Anstieg der Werte bei zunehmendem Massenstrom. Auffallend hierbei ist die Analogie zur Kraft-Geschwindigkeitsabhängigkeit der trockenen Kalibrierung in Kapitel „Kraft-Geschwindigkeitskennlinie“. Die erzeugte Kraft steigt mit ansteigender Strömungsgeschwindigkeit, die sich im Massenstrom widerspiegelt, und ansteigender Höhe des Referenzmetalles, verkörpert durch die Veränderung der Pumpfrequenz. Denn durch eine Erhöhung der Pumpfrequenz ist ein höherer Pegel in der Rinne zu erwarten. Auch im vorliegenden Fall können diese Tendenzen erkannt werden. In Abbildung 23 wird auch die bereits beschriebene starke Streuung der Pegelwerte, die zur starken Streuung der Kraftwerte führt, besonders deutlich. Die Fluktuation der Pegelwerte nimmt ebenso wie die Fluktuation der Kraftwerte mit steigender Pumpfrequenz zu. Auffällig sind die extremen Kraftwerte bei extremen Pegelwerten, wie etwa bei 30Hz. Hier erzeugen extreme Pegelwerte eine zusätzliche

Schwingung im LKA System, der zu dem extrem niedrigen Kraftmittelwert führt. Bei diesen extremen Pegelwerten ist auch eine extrem hohe Streuung und Unsicherheit der Kraftwerte zu verzeichnen (vgl.4.5).

Einfluss der Rinnenneigung

Neben der Pumpfrequenz kann die Fließgeschwindigkeit und damit der Massenstrom auch durch die Neigung des Referenzkanals beeinflusst werden. Dieser Einfluss wurde anhand von zwei Neigungswerten für die oben genannten Pumpfrequenzen untersucht. Hierbei wurde eine Neigung von $0,7^\circ$ und $1,4^\circ$ eingestellt.

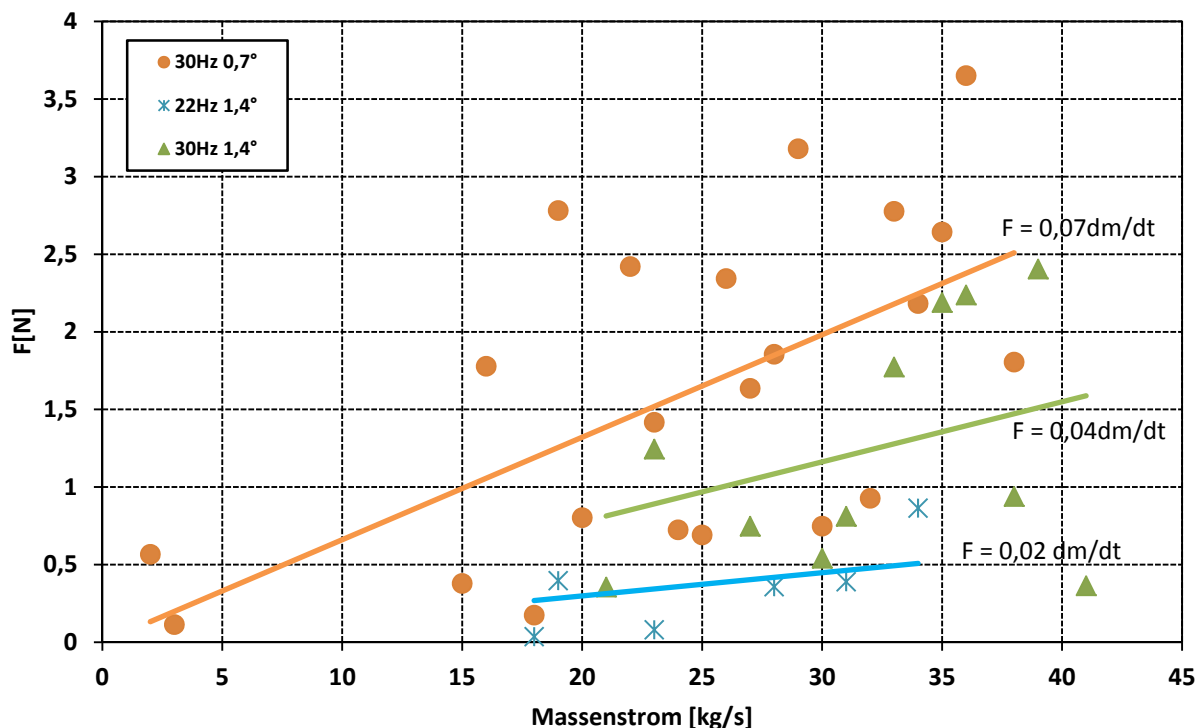


Abbildung 24: Die ermittelte Kraft-Massenstrom Abhängigkeit für verschiedene Neigungen und Pumpfrequenzen. Die Werte der Messungen mit einer Neigung von $1,4^\circ$ liegen deutlich unter denen mit Neigung $0,7^\circ$.

In Abbildung 24 ist der in Kapitel „Kraft-Massenstrom Abhängigkeit“ beschriebene Zusammenhang der erzeugten Kraft vom Massenstrom für verschiedene Neigungen des Referenzkanals aufgetragen. Für die Erstellung der vorliegenden Abhängigkeit wurden beide Fließrichtungen der Anlage herangezogen. Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Werte der Reihen mit negativen Kraftplateaus in den ersten Quadranten gedreht worden. Damit wird für diese Werte der Betrag dargestellt.

Eine Erhöhung der Neigung hat einen schnelleren Abfluss der Schmelze aus der Rinne zur Folge. Sie vergrößert also die Komponente der Fließgeschwindigkeit, die durch die Neigung der Rinne verursacht wird und verringert damit die Pegelhöhe in der Rinne. Es fällt auf, dass die Werte mit einer Neigung von $0,7^\circ$ höhere Kräfte aufweisen, als die Werte mit einer Neigung von $1,4^\circ$.

Die Werte bei $1,4^\circ$ konzentrieren sich im Bereich höherer Massenströme, während sich die Werte bei $0,7^\circ$ über einen größeren Massenstrombereich erstrecken. Dies liegt an der deutlich größeren Fließgeschwindigkeit der Versuche bei $1,4^\circ$ Rinnenneigung. Vergleicht man nun die Anstiege der Trendlinien, so stellt man fest, dass sich diese bei einer Pumpfrequenz von 30Hz für $0,7^\circ$ und $1,4^\circ$ lediglich um circa 3% unterscheiden und die Werte bei einer Neigung von $1,4^\circ$ etwas nach unten verschoben sind. Ein Blick auf die über alle Versuche gemittelten Pegelwerte kann zur Erklärung der Unterschiede aufschlussreich sein. In Tabelle 8 sind die gemittelten Pegelwerte für die Versuche mit gleicher Pumpfrequenz und Neigung aufgeführt.

Pumpfrequenz f=20Hz	gemittelter Pegel [mm]
Neigung= $0,7^\circ$	22,00
Neigung= $1,4^\circ$	15,08
Pumpfrequenz f=22Hz	
Neigung= $0,7^\circ$	19,56
Neigung= $1,4^\circ$	27,75
Pumpfrequenz f=30Hz	
Neigung= $0,7^\circ$	39,85
Neigung= $1,4^\circ$	50,35

Tabelle 8: Die gemittelten Pegelwerte über alle Versuche mit gleicher Pumpfrequenz und Neigung

Man sieht deutlich, dass der Pegel bei einer Pumpfrequenz von 22Hz und $0,7^\circ$ Neigung im Vergleich zu den Versuchen bei $0,7^\circ$ Neigung und 20Hz Pumpfrequenz abnimmt. Aus den Ergebnissen der trockenen Kalibrierung ist bekannt, dass eine Veränderung des Strömungsquerschnittes einen stärkeren Einfluss auf die erzeugte Kraft ausübt als eine Veränderung der Strömungsgeschwindigkeit. Die Versuche der trockenen Kalibrierung haben weiterhin gezeigt, dass Messungen mit dem Aluminiumprobekörper der Höhe 25mm nur unter idealen Laborbedingungen durchgeführt werden konnten. Das untersuchte Lorentzkraft-Anemometer hat also etwa bei 25mm die untere Grenze des Messbereichs erreicht.

Betrachtet man die Werte in Tabelle 8, so stellt man fest, dass die gemittelten Pegel der Messungen bei einer Rinnenneigung von $0,7^\circ$ bei 20Hz und bei 22Hz deutlich unter 25mm liegen. Angesichts einer bereits bei Raumtemperatur etwa dreifach schlechteren elektrischen Leitfähigkeit des Zinns im Vergleich zu den verwendeten Aluminiumproben können die Werte dieser Messreihen deshalb nicht betrachtet werden.

Die Verschiebung der Werte mit Rinnenneigung $1,4^\circ$ ist auch auf die schnell fluktuierenden Geschwindigkeiten und Pegelwerte zurückzuführen. Das Lorentzkraft-Anemometer kann den Kraftwechseln nicht angemessen schnell folgen. Im Signalverlauf hat dies den Charakter einer Mittelung der Messwerte. Bei den Messwerten der Pumpfrequenzen 30Hz ist eine deutlich erhöhte Streuung der Werte festzustellen. Am Lorentzkraft-Anemometer werden Schwingungen über die Rinne induziert, die im Signalverlauf abgebildet werden. Ursache hierfür sind Schwingungen von Anlagenteilen und schnelle Lastwechsel, verursacht durch schnelle Wechsel der Strömungssituation. Sieht man von der Verschiebung der Kurven in Abbildung 24 ab, so lässt sich feststellen, dass die Neigung der Rinne im Vergleich zur Veränderung der Pumpfrequenz nur einen geringen Einfluss auf die produzierte Kraft ausübt.

4.5 Unsicherheitsbetrachtung der nassen Kalibrierung mit LiTinCa

Für die Unsicherheitsbetrachtung der nassen Kalibrierung eines Lorentzkraft-Anemometers mit LiTinCa werden die Unsicherheiten der Mittelwerte bestimmt, die für die Erstellung der Diagramme zur Kraft- Massenstrom- Abhängigkeit und dem Einfluss der Rinnenneigung herangezogen wurden. Da sowohl für die Einstellmöglichkeit „Pumpfrequenz“ als auch für die Einstellmöglichkeit „Neigung“ der Rinne 23 Versuche unter annähernd identischen Bedingungen durchgeführt wurden, kann man hier von mehrmals gemessenen Größen im Sinne der DIN 1319-4 (GUM Unsicherheit vom Typ A) [21] [22] sprechen. Daher ist zur Bestimmung der Messunsicherheit die Standardabweichung der zur Mittelung herangezogenen Messpunkte zu berechnen und durch die Quadratwurzel der Anzahl der Werte zu teilen.

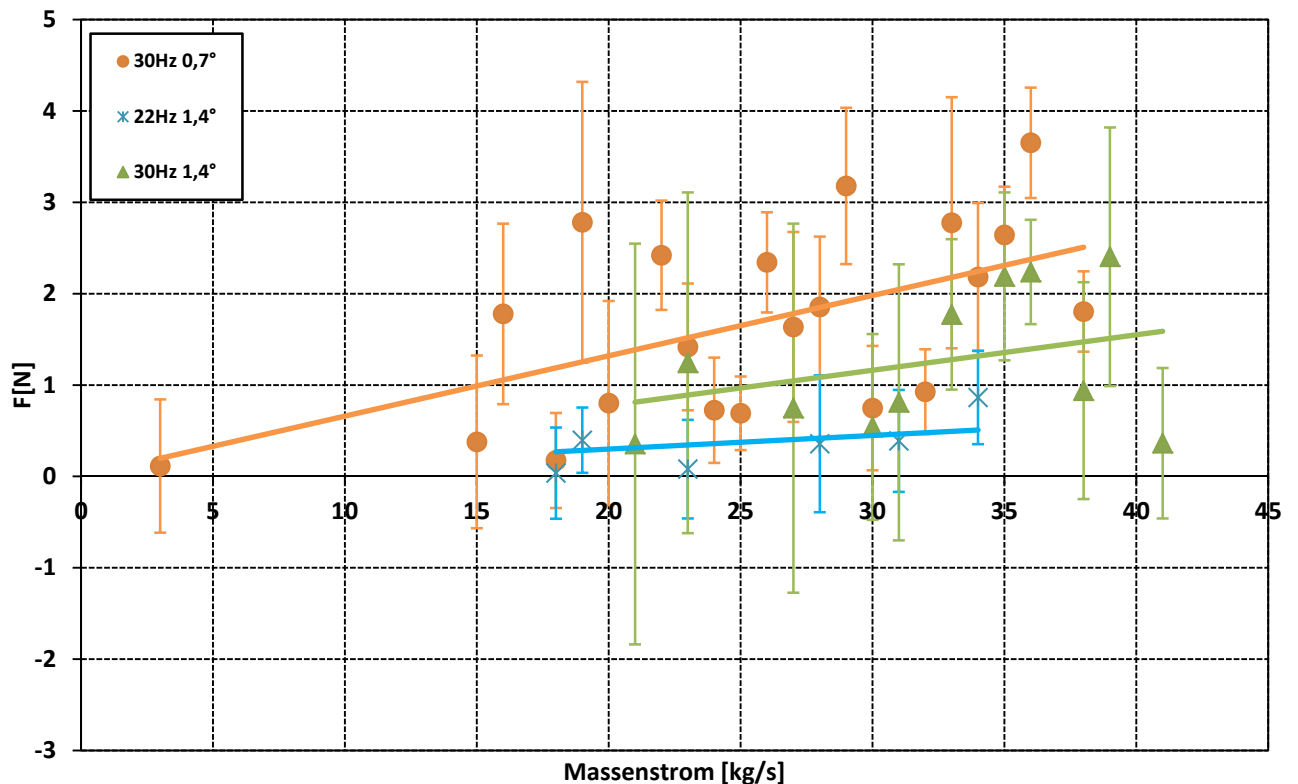


Abbildung 25: Die ermittelte Kraft in Abhängigkeit vom Massenstrom mit eingezeichneter Unsicherheit. Die Unsicherheit erhöht sich mit zunehmendem Massenstrom und zunehmender Pumpfrequenz.

In Abbildung 25 ist die ermittelte Kraft in Abhängigkeit vom Massenstrom aufgetragen. Die Unsicherheit jedes Messpunktes wird durch den entsprechenden Fehlerbalken dargestellt. Die Messpunkte bei einer Rinnenneigung von 1,4° weisen deutlich größere Fehlerbalken auf als die Messpunkte bei 0,7° Rinnenneigung. Ursache hierfür ist eine wesentlich größere Streuung der Werte durch den höheren Massenstrom und die stärkeren Fluktuationen sowohl im Pegel als auch in der mittleren Geschwindigkeit der Schmelze. Beide Einflüsse führen zu großen Gradienten in der erzeugten Kraft, denen das Lorentzkraft-Anemometer aufgrund seiner relativ großen trägen Masse nur bedingt folgen kann. Es ergibt sich eine Schwingung des vorliegenden Lorentzkraft-Anemometers, die das Messsignal überlagert und von Einflüssen der Umgebung, wie zum Beispiel Gebäudeschwingungen und anderen parasitären Schwingungen, beeinflusst wird. Außerdem verliert die zunächst lineare Theorie des Lorentzkraft-Anemometers bei größeren Geschwindigkeitsgradienten ihre Gültigkeit. Durch hohe Fluktuationsfrequenzen entstehen, trotz relativ geringer Strömungsgeschwindigkeiten, magnetische Reynolds-Zahlen von etwa 1.

Die Vereinfachung für kleine magnetische Reynolds-Zahlen wird immer unzureichender und ist schließlich nicht mehr zulässig. In diesem Fall muss die vollständige Magnetfeldtransportgleichung gelöst werden (siehe Gleichung 7). Die ermittelte Unsicherheit nimmt auch mit steigender Pumpfrequenz zu. So ist die größte Unsicherheit für die Neigung von $0,7^\circ$ bei einer Pumpfrequenz von 30Hz zu finden. Bei 19kg/s ist das Messergebnis $(2,78 \pm 1,54)$ N. Ursächlich hierfür sind die bereits beschriebene starke Fluktuation der Geschwindigkeits- und Pegelwerte bei einer Messung mit 30Hz und die daraus resultierende starke Streuung der Kraftwerte. Neben den Unsicherheiten, die die Bestimmung der Datenpunkte betreffen, sollten zusätzlich auch die Unsicherheiten betrachtet werden, die die Messinstrumente der Anlage einbringen.

Für die Bestimmung des Referenzmassenstromes der Anlage wird das Signal der Waage zyklisch abgefragt und in der standardmäßig implementierten Routine jede Sekunde abgelegt. Daher nehmen im Wesentlichen zwei Messgrößen auf die Berechnung des Massenstroms Einfluss: Der Messwert der Waage, die eine Auflösung von 0,2kg aufweist und die Taktfrequenz des Quarzschwingers im Panel des Kontrollsystems, das die Steuerung der Ablegeroutine übernimmt. Beide Einflüsse müssen nach GUM mit der Unsicherheit vom Typ B betrachtet werden, da für das Panel keine tiefergehenden Informationen hinsichtlich der Unsicherheit der verwendeten Systemzeit bekannt sind und die Waage nach einer persönlichen Mitteilung des Herstellers Dini Argeo bei 1500kg eine maximale Abweichung von 0,6kg aufweist. Danach wird für die Unsicherheit der Wägung und der Zeitmessung am Panel eine Rechteckverteilung angenommen und diese deshalb nach Formel 20 berechnet. Die Unsicherheit der Panelzeit hängt im Wesentlichen von der Frequenzstabilität des Hardware Quarzoszillators ab. Diese Bauelemente weisen heute üblicherweise einen Fehler von wenigen parts per million (ppm) auf [31]. Aufgrund von zeitlichen Verzögerungen durch parallel ausgeführte Systemprozesse des Panels und den Verzögerungen durch die notwendige Kommunikation mit der Simatic CPU entsteht eine maximal mögliche Messfrequenz von 1Hz.

So ergibt sich für die Waage eine Unsicherheit von $u_m = \pm 0,35$ kg und für das Panel eine Unsicherheit von $u_s = \pm 0,29$ s.

Der Arbeitspunkt der Anlage wird durch die Nennlastbedingung, bei der 500kg innerhalb von 10s transferiert werden, bestimmt. Hier ist aufgrund der kurzen Versuchsdauer auch der maximale Fehler zu erwarten.

Mit den Sensitivitätskoeffizienten, die sich aus der Ableitung der Modellgleichung nach der jeweiligen Größe berechnen, ergibt sich die kombinierte Standardunsicherheit des Massenstroms bei Nennlastbedingung zu:

$$u_{\text{ges}} = \sqrt{\left(\frac{1}{s}\right)^2 u_m^2 + \left(-\frac{m}{s^2}\right)^2 u_s^2} = 1,45 \frac{\text{kg}}{\text{s}}. \quad (24)$$

Die erweiterte Unsicherheit für $k=2$ ergibt sich zu $\pm 2,9 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$. Das entspricht einer relativen Unsicherheit von $\pm 6\%$.

Betrachtet man als weitere Größe die Messung des Pegels in der Rinne, so gibt der Hersteller des Pegelmesssystems eine maximale Linearitätsabweichung von $0,2\%$ des Messbereichs an. Im vorliegenden Fall wurde ein Sensor mit einem Messbereich von 300mm verwendet, um auch im Fall eines völlig gefüllten Referenzkanals den Pegel bestimmen zu können. Damit ergibt sich die maximale Abweichung des Sensors zu $\pm 0,2\% \cdot 300\text{mm} = \pm 0,6\text{mm}$. Da auch hier der Pegel zur Erstellung der Diagramme gerundet wurde, kommt ein Unsicherheitsbeitrag von $\pm 0,29\text{mm}$ hinzu. Rechnerisch ergibt sich eine Unsicherheit der Pegelmessung von $\pm 0,67\text{mm}$.

Eine weitere Größe, die indirekt den Messwert des Lorentzkraft-Anemometers beeinflusst, ist die Temperatur der Schmelze. Die Temperatur erlaubt im Nachhinein eine Aussage über die Leitfähigkeit der Schmelze. Sie wird deshalb in der Testsektion des Referenzkanals durch spezielle Mantelthermoelemente Typ K Klasse 1 gemessen. Für Temperaturwerte unter 375°C ist hier eine maximale Abweichung von $\pm 1,5\text{K}$ zulässig.

Für die Charakterisierung des vorliegenden Lorentzkraft-Anemometers ist auch die Neigung des Referenzkanals ein wichtiger Parameter. Die Neigung wird mit Hilfe eines Präzisionsinklinometers bestimmt. Das Kalibrierprotokoll des Sensors weist bei -12° die maximale Abweichung von $0,003\%$ des Messwertes aus.

5 Vergleich der Messungen mit den Ergebnissen der trockenen Kalibrierung

Eine zentrale Frage, die schon Minchenya in einer privaten Mitteilung gestellt hatte, ist, ob ein Ergebnis der trockenen Kalibrierung in die sog. Nasskalibrierung überführbar ist. Die Nasskalibrierung mit der Flüssigzinnkalibrieranlage LiTinCa ist im Vergleich zu der trockenen Kalibrierung deutlich aufwändiger und teurer. Auch deshalb ist es interessant, die Ergebnisse der trockenen Kalibrierung mit denen der nassen Kalibrierung zu vergleichen. Zur besseren Vergleichbarkeit der Messwerte, werden die Kraftwerte der trockenen Kalibrierung mit Hilfe der Dichte und der Abmessungen der Körper in den Massenstrom umgerechnet. Die daraus gewonnene Kurve kann dann der Kraft-Massenstrom Abhängigkeit des LKA-Systems gegenübergestellt werden. Um die Ergebnisse bestmöglich vergleichen zu können, werden die Mittelwerte der Pegel aller Versuche gleicher Frequenz und Neigung berechnet und in Tabelle 8 ausgewiesen. Die Werte in Tabelle 8 zeigen bei einer Neigung von $0,7^\circ$ einen Pegel zwischen 22mm und 39,85mm. Daher werden die Werte der nassen Kalibrierung mit den Werten bei einer Quaderhöhe von 25mm und 30mm verglichen. Die Werte der trockenen Kalibrierung wurden bei absolut horizontaler Ausrichtung des Lorentzkraft-Anemometers erzeugt. Eine exakt horizontale Position in der Flüssigzinnkalibrieranlage ist nicht möglich, da der Abfluss des Zinns gewährleistet sein muss.

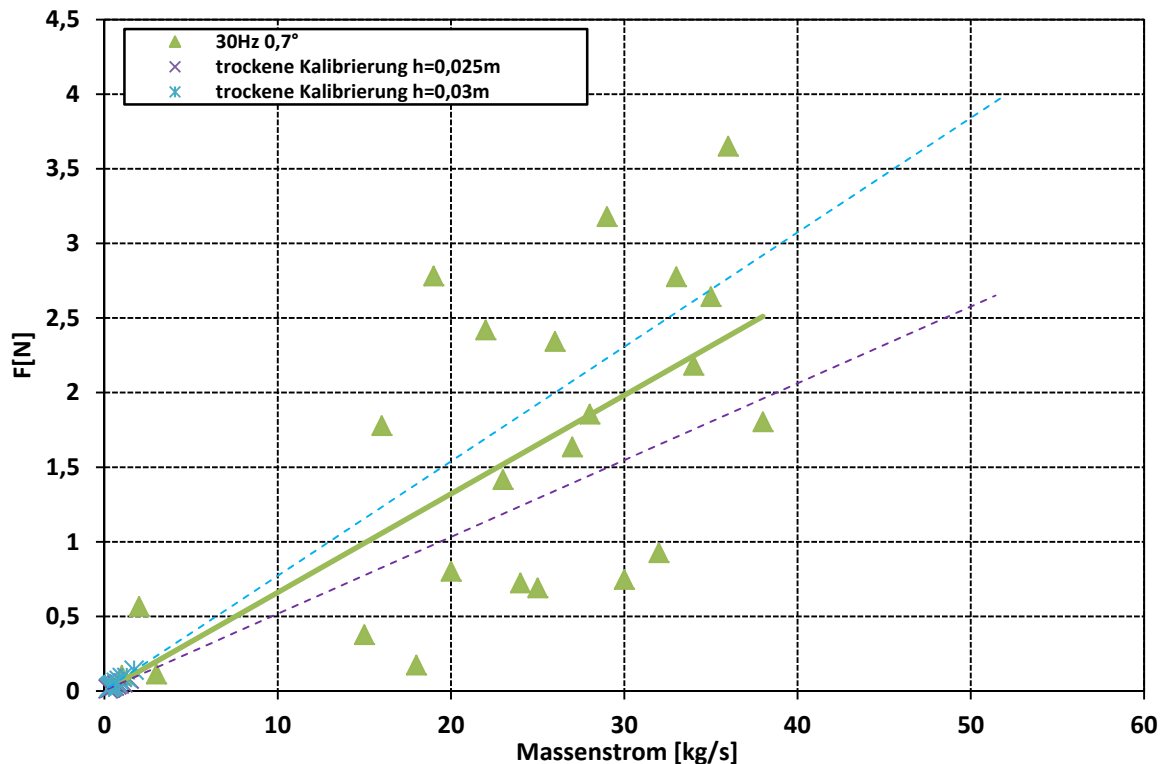


Abbildung 26: Die ermittelte Kraft-Massenstrom Abhängigkeit der nassen Kalibrierung im Vergleich mit der Kraft in Abhängigkeit des Massenstroms der trockenen Kalibrierung mit Quaderhöhe 25mm und 30mm.

Abbildung 26 zeigt die mit Hilfe der Flüssigzinnkalibrieranlage LiTinCa ermittelte Kraft- Massenstrom Abhängigkeit des Lorentzkraft-Anemometers. Im Vergleich dazu ist Kraft- Massenstrom Abhängigkeit der trockenen Kalibrierung bei einer Quaderhöhe von 0,025m und 0,03m aufgetragen. Diese beiden Quaderhöhen der Proben entsprechen in etwa den mittleren Pegelwerten bei der Flüssigkalibrierung. Die Trendlinien der Werte der flüssigen Kalibrierung zeigen einen Kraftanstieg bei steigenden Massenströmen. Im Vergleich zu den Werten der trockenen Kalibrierung werden hier im Mittel deutlich höhere Massenströme erreicht. Dies führt selbst bei den mit 20-40mm relativ niedrigen Pegelhöhen in der Testsektion des Kalibrierkanals zu einer Kraft von bis zu circa 3,7N. Die Werte der trockenen Kalibrierung erreichen maximal 0,14N bei der Messung mit einer Quaderhöhe von 0,03m. Beide Messreihen der trockenen Kalibrierung zeigen einen linearen Verlauf. Dies war aufgrund der Feststellungen im Kapitel „Kraft-Geschwindigkeitskennlinie“ zu erwarten. Betrachtet man die Trendlinie bei 30Hz, so kann, wie bei den Werten der trockenen Kalibrierung, ein linearer Trend beobachtet werden. Verlängert man die Trendlinien der trockenen Kalibrierung(--;--), so stellt man fest, dass die Trendlinie der flüssigen Kalibrierung zwischen den Trendlinien der trockenen Kalibrierung verläuft.

Der Pegel der flüssigen Kalibrierung lag bei etwa 39mm. In diesem Fall müssten die Werte der flüssigen Kalibrierung leicht über den Werten der trockenen Kalibrierung mit einer Barrenhöhe von 30mm liegen. Die deutlich schlechtere elektrische Leitfähigkeit des Zinns im Vergleich zur elektrischen Leitfähigkeit der Aluminiumprobekörper verbunden mit den im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Störeinflüssen, führt zu den abgebildeten Messwerten. Insgesamt zeigt dieses Kapitel, dass ein qualitativer Vergleich der trockenen Kalibrierung und der nassen Kalibrierung möglich ist. Allerdings können aufgrund der Abspeicherung mit 1Hz und der Schwingungsneigung des LKA-Systems hier nur die Trendlinien der Nasskalibrierung sinnvoll mit den Werten der trockenen Kalibrierung verglichen werden. Wegen der extremen Extrapolation der Messwerte der trockenen Kalibrierung und den großen Differenzen zwischen den Massenströmen der trockenen und nassen Kalibrierung kann die Überführbarkeit der Messwerte nur prinzipiell bestätigt werden. Es ist deshalb empfehlenswert nachfolgende Verbesserungsvorschläge umzusetzen.

6 Verbesserungsvorschläge und Ausblick

Die vorliegenden Messungen stellen einen ersten Ansatz zur Kalibrierung eines Lorentzkraft-Anemometers dar. Wenn auch für die Erstellung der Diagramme der nassen Kalibrierung zunächst nur die Messwerte der Standardabspeicherung verwendet wurden und daher eine maximale Frequenz von lediglich 1Hz erreicht wurde, lassen sich dennoch bereits deutliche Tendenzen und Abhängigkeiten feststellen. Aufgrund der schnellen Prozesse, vor allem bei höheren Pumpfrequenzen, ist es aber für die Zukunft sinnvoll, die in „Protokollierung der erzeugten Messwerte“ beschriebene Zusatzlösung mit Arrays in den Vordergrund zu stellen. Ein Problem hierbei ist die Initiierung der Abspeicherroutine vor dem Eintreten des Sekundenpulses der Satellitenfunkuhr. Durch die Nutzung von Arrays sinkt die Performance des Profibussystems zwischen Panel und CPU. Daher ist es nicht immer möglich, ein Array mit maximaler Anzahl an Werten abzulegen. Es sollte deswegen über eine Triggerung des Signales zum Abspeichern durch die CPU Systemzeit nachgedacht werden.

Es könnte hier die Ablegeroutine beispielsweise in Millisekunde 800 gestartet werden, um zu gewährleisten, dass zum Sekundenwechsel der gesamte Schreibvorgang abgeschlossen ist.

Mit der bereits programmierten Ablegeroutine ist eine Erhöhung der Ablegefrequenz um theoretisch weitere 20 Werte pro Sekunde möglich. Um die Ablegeroutine noch deutlicher zu beschleunigen, wäre es ebenso denkbar, die bestehende Simatic Steuerung durch weitere Komponenten zu erweitern, um eine Protokolldatei direkt an der Steuerungseinheit zu erzeugen. Es konnte nachgewiesen werden, dass die verwendete Erfassungseinheit die schnellen Prozesse während einer Messung nicht ausreichend schnell aufzeichnen kann. Daher ist zu empfehlen, die Steuerung der Anlage durch ein PXI System von National Instruments zu vervollständigen. Dies konnte aufgrund der begrenzten Projektdauer noch nicht umgesetzt werden. Angesichts der Versuchszeit von etwa 30s wäre es ebenfalls möglich, die Messwerte eines Versuches in der Hauptsteuerung zu sammeln und den Schreibvorgang erst nach Abschluss der Messung zu initialisieren. Vergleicht man die gemessenen Massenströme der Experimente der nassen Kalibrierung mit denen der trockenen Kalibrierung, so stellt man fest, dass die Massenströme der trockenen Kalibrierung sehr klein sind (vgl. Kraft-Geschwindigkeitskennlinie). Mit dem Linearmotor der neu aufgebauten Anlage zur trockenen Kalibrierung ist es möglich, die Referenzkörper auch mit deutlich höheren Geschwindigkeiten zu bewegen. Dies erzeugt höhere Massenströme und gewährleistet eine größere Schnittmenge zum Vergleich der trockenen und nassen Kalibrierung. Leider ist mit dem untersuchten LKA eine Messung in der trockenen Kalibrierung mit deutlich höheren Geschwindigkeiten wegen der Schwingneigung des Gerätes nicht möglich (siehe dazu auch Ausführungen in Kapitel 3.2). Angesichts der erreichten Pegel der nassen Kalibrierung sollten Referenzbarren mit kleineren Höhen im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der Experimente fokussiert werden. Für die Versuche mit LiTinCa sind Pumpfrequenzen $>22\text{Hz}$ zu empfehlen, um einen minimalen Pegel $> 25\text{mm}$ zu erhalten und damit innerhalb des Messbereiches des LKA zu bleiben. Während des Aufbaus von LiTinCa wurde das Lorentzkraft-Anemometer bereits von Kollegen der Forschergruppe weiterentwickelt und auf die Bedürfnisse der Industrie angepasst. Das in Abbildung 14 gezeigte Lorentzkraft-Anemometer stellt einen Zwischenschritt der Entwicklung dar. Hier wurden bereits wesentliche Probleme des untersuchten Prototyps, wie das ungünstige Kraft- zu Massenverhältnis oder die Reaktion auf parasitäre Schwingungen, minimiert beziehungsweise ausgeschlossen.

Auch die Offsetverschiebung durch die Neigung des Referenzkanals wurde durch die veränderte Bauweise des Prototyps der nächsten Lorentzkraft-Anemometergeneration unterbunden. Die „neuen“ Geräte werden nicht mehr auf, sondern unterhalb der Gießrinne positioniert. Damit hat die Neigung des Referenzkanals keinen direkten Einfluss auf den Nullpunkt des Systems. Die Erfahrungen aus dem Aufbau und dem Betrieb der Flüssigzinnkalibrieranlage LiTinCa flossen in die Planung und Errichtung eines weiteren Zinnkanals für die Grundlagenforschung ein.

Aufbau der Grundlagenforschungsanlage Tintelo

Diese Anlage wird, anders als LiTinCa, mit einem geschlossenen Kreislauf ausgestattet, in dem Reinzinn von einer elektromagnetischen Pumpe in einer Edelstahlrohrleitung des Durchmessers DN 65 umgewälzt wird. Mit diesem Kanal sollen dem Antrag folgend Reynolds- Zahlen von circa $2 \cdot 10^5$, Hartmann- Zahlen von circa 200 und magnetische Reynolds-Zahlen von circa 0,15 erreicht werden. Der Kanal besitzt zwei Testsektionen von je einem Meter Länge, an denen Experimente der Magneto hydrodynamik ausgeführt werden können. Die Flussrichtung des Zinns kann durch spezielle Ventile für Flüssigzinn gesteuert werden.

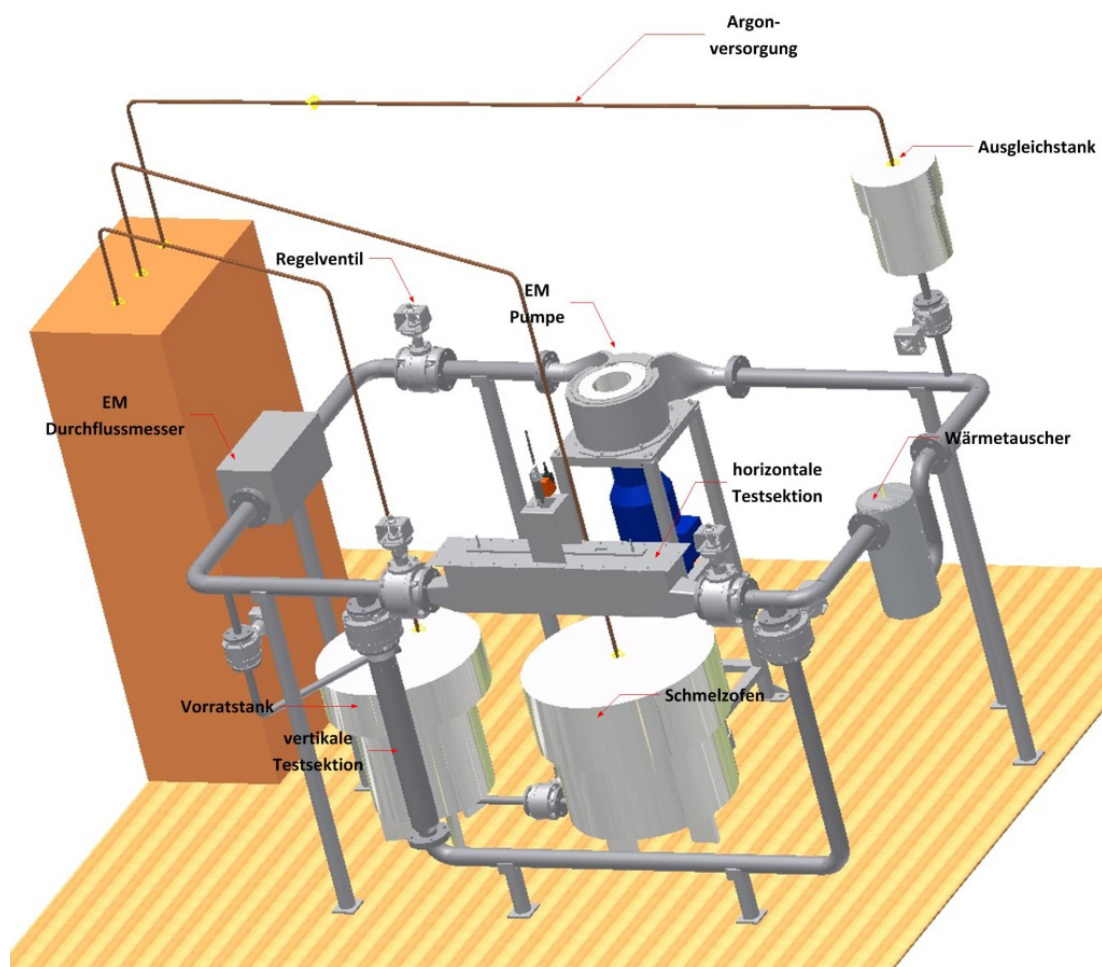


Abbildung 27: Konstruktionsskizze der Schwesteranlage Tintelo.

In Abbildung 27 ist die Konstruktionsskizze für den Zinnkanal Tintelo dargestellt. Die Anlage ist für eine Füllmenge von 1100kg Reinzinn konzipiert. Der Schmelzofen fasst 85 Liter und schmilzt das feste Zinn. Das flüssige Zinn wird mit Hilfe von Argon in den Vorrattank und nach Abschluss der Aufrüstung der Anlage in die Rohrleitung gedrückt. Der Benutzer der Anlage kann dann durch die Stellung der Ventile

entscheiden, ob Experimente an der horizontalen oder vertikalen Testsektion durchgeführt werden sollen. In der horizontalen Testsektion sind Untersuchungen an horizontalen Rechteckrohrströmungen und an Gerinneströmungen möglich. Dazu ist im Inneren der horizontalen Testsektion eine Abdeckung angebracht, die im Grundzustand auf Höhe der Eintritts- und Austrittsöffnungen der Sektion angeordnet ist. Für die Untersuchung von Gerinneströmungen kann diese Abdeckung mit dem orange gekennzeichneten Antrieb nach oben gefahren werden. Die so entstandene Atmosphäre über der Schmelze wird mit Argon aufgefüllt, um die Oxidation des Zinns zu vermeiden. In der vertikalen Testsektion können vertikale Rohrströmungen untersucht werden. Die Flanschverbindungen der Testsektionen sorgen für eine schnelle Austauschbarkeit der Testsektionen und damit für größtmögliche Variabilität der Anlage. Die Zinnschmelze wird durch die elektromagnetische Pumpe angetrieben und kann über das Regelventil kontrolliert werden. Der Durchfluss wird durch einen speziellen elektromagnetischen Durchflussmesser bestimmt. Hier kann im Gegensatz zu LiTinCa ein Massenstrom eingestellt und über längere Zeit konstant gehalten werden. Allerdings sind an der horizontalen Testsektion keine Neigungsänderungen möglich. Zur Feinjustierung der Temperatur der Schmelze ist ein regelbarer Wärmetauscher eingebaut. Der Ausgleichstank garantiert eine völlig gefüllte Rohrleitung und ist mit 5 Litern flüssigem Zinn bestückt.

Abbildung 28 zeigt Tintelo gegen Ende des letzten Bauabschnittes. Im Vordergrund des Bildes sind die beiden Testsektionen und die beheizte Rohrleitung zu sehen. Der Schmelzofen und Vorratstank sowie die elektromagnetische Pumpe sind im Hintergrund zu erkennen. Die Pumpe wird über einen 7,5kW Getriebemotor angetrieben und liefert bei idealen Verhältnissen einen Durchfluss von maximal 7l/s. Der Steuerschrank für die Rohrbegleitheizungen sowie die Argonentnahmestationen für den Schmelzofen und den Vorratstank sind im linken Teil abgebildet. Im rechten oberen Teil des Bildes ist der Ausgleichstank zu sehen.

Aufgrund des Transfers des Flüssigzinns mit Argondruck, müssen die Ofenkomponenten flüssigkeits- und gasdicht verschlossen werden. Die Füllstände in den Öfen werden deshalb durch spezielle Sensoren ermittelt.



Abbildung 28: Tintelo gegen Ende des letzten Bauabschnittes. Im Vordergrund befinden sich die beiden Testsektionen, im Hintergrund sind die Öfen und die EM- Pumpe zu sehen.

Da im Gegensatz zu LiTinCa zum Befüllen der Rohrleitung der Steuerstand verlassen werden muss, kann die Steuerung auf zwei Touchbildschirme in der Nähe der Argonentnahmestationen transferiert werden und so aktiv in die Steuerung eingegriffen werden. Alle Hauptkomponenten kommunizieren über Profibus mit der Hauptsteuerung. Jedes Ventil besitzt eine Heizmanschette, die den Ventilkörper auf die projektierte Leitungstemperatur von 400°C aufheizt. Alle Rohrleitungselemente der Anlage sind isoliert oder beheizt, um ein Erstarren des Zinns in der Anlage, wie bei LiTinCa geschehen, zu vermeiden. Aus den Erfahrungen mit LiTinCa wurde hier besonders großer Wert auf die Erweiterbarkeit der Steuerung und eine hinreichend schnelle Aufzeichnungsroutine gelegt. Messgeräte verschiedenster Art können über die DAQ100³ der HPF GmbH direkt in das Steuerungssystem integriert werden. Hier kann eine maximale Aufzeichnungsfrequenz von 1kHz erreicht werden.

Durch die geschlossene Bauform der Rohrleitung können im Vergleich zu LiTinCa deutlich längere Messzeiten erreicht werden und zusätzlich Experimente in stationären Strömungszuständen durchgeführt werden.

7 Zusammenfassung

Für die Kalibrierung von Lorentzkraft-Anemometern wird ein zweistufiger Prozess angewandt. Die erste Stufe umfasst die Experimente der trockenen Kalibrierung. Dazu wurde der von Minchenya benutzte Aufbau durch Implementierung von Leitfähigkeitsmessung, Geschwindigkeitsmessung und eines kombinierten Steuer- und Messprogrammes verändert und verbessert. Des Weiteren wurden fünf neue Geschwindigkeitsstufen der trockenen Kalibrierung festgelegt. Die von Minchenya gefundene lineare Abhängigkeit der Lorentzkraft von der Geschwindigkeit konnte für einen deutlich größeren Geschwindigkeitsbereich bestätigt werden. Neben neuen Geschwindigkeitsstufen wurde zusätzlich mit Hilfe weiterer Probekörper die Abhängigkeiten an zwei weiteren Punkten validiert und der Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit und der durchströmten Querschnittsfläche untersucht. Für den weiterentwickelten Prototyp des Lorentzkraft-Anemometers wurde die Anlage zur trockenen Kalibrierung neu konstruiert und aufgebaut. Hierbei konnte der Automatisierungsgrad erhöht und die Unsicherheit der Anlage durch Integration von laserinterferometrischer Weg- und Geschwindigkeitsmessung verringert werden.

Die zweite Stufe umfasst eine nasse Kalibrierung mit flüssigem Reinzinn an einer industrienahen Laboranlage. Dafür wurde die Anlage unter Berücksichtigung der Platzverhältnisse und Sicherheitsrichtlinien im Labor geplant, aufgebaut, instrumentiert und automatisiert. Erste Messungen zeigten trotz unterschiedlicher elektrischer Leitfähigkeit und Temperatur der Materialien eine tendenzielle Übereinstimmung mit den Experimenten der trockenen Kalibrierung. Die aus dem Aufbau von LiTinCa gewonnenen Erfahrungen wurden bei der Planung und dem Aufbau der Grundlagenforschungsanlage Tintelo eingebracht. Insgesamt konnte das Verständnis der grundsätzlichen Abhängigkeiten eines Lorentzkraft-Anemometers vor allem durch die zusätzlichen Messungen der trockenen Kalibrierung erweitert werden. Für die anwendungsnahe Kalibrierung eines LKA mit Flüssigzinn stehen nun an der TU Ilmenau mit LiTinCa und Tintelo zwei Anlagen zur Verfügung.

Literaturverzeichnis

- [1] J. A. Shercliff, THE THEORY OF ELECTROMAGNETIC FLOW- MEASUREMENT, London: THE SYNDICS OF THE CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 1962.
- [2] A. Thess, E. Voytakov, B. Knaepen und O. Zikanov, „Theory of the Lorentz force flowmeter,“ *New Journal of Physics*, 2007.
- [3] R. Engel, „Das Hydrodynamische Prüffeld der PTB zur Untersuchung von Durchflussmessgeräten,“ Braunschweig, 2001.
- [4] V. Minchenya, C. Karcher, Y. Kolesnikov and A. Thess, "DRY CALIBRATION OF THE LORENTZ FORCE FLOWMETER," *MAGNETOHYDRODYNAMICS*, 2009.
- [5] V. Minchenya, C. Karcher, Y. Kolesnikov und A. Thess, „Lorentz Force Flowmeter in Industrial Application“.
- [6] V. Minchenya, C. Karcher, Y. Kolesnikov und A. Thess, „Calibration of the Lorentz force flowmeter,“ *Flow Measurement and Instrumentation*, 2011.
- [7] D. Buchenau, Entwicklung von kontaktlosen und zeitlich hochauflösenden Strömungs- und Durchflusssensoren für Flüssigmetallströmungen, Karlsruhe: Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), 2012.
- [8] Bronsinsky- Flüssigmetall -Technik, „Durchflussmeßeinrichtungen- Meßsysteme für elektrisch leitende Flüssigkeiten- Datenblatt,“ Höxter.
- [9] X. Wang , Y. Kolesnikov und A. Thess, „Numerical calibration of a Lorentz force,“ *MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY*, Nr. 23, 2012.
- [10] X. Wang, R. Klein, Y. Kolesnikov und A. Thess, „Application of Lorentz Force Velocimetry to Open Channel Flow,“ *Materials Science Forum*, 2011.
- [11] C. Stelian, A. Alferenok, U. Lüdtker, Y. Kolesnikov und A. Thess, „OPTIMIZATION OF A LORENTZ FORCE FLOWMETER BY USING NUMERICAL MODELING,“ *MAGNETOHYDRODYNAMICS*, 2011.
- [12] C. Heinicke, G. Pulugundla, S. Tympel, T. Boeck, C. Karcher, J. Schumacher, I. Rahneberg, T. Fröhlich, F. Hillbrunner und A. Thess, „Lorentz force velocimetry for local velocity measurement,“ *Journal of iron and steel research international*, 2012.

- [13] A. Wegfraß, C. Diethold, M. Werner, T. Fröhlich, B. Halbedel, F. Hilbrunner, C. Resagk und A. Thess, „A universal noncontact flowmeter for liquids,“ *Applied physics letters*, 2012.
- [14] D. Jian und C. Karcher, „Non-contact local flow measurement using Lorentz force velocimetry in tandem arrangement,“ in *International symposium on liquid metal processing and casting (LMPC)*, 2011.
- [15] D. Jian und C. Karcher, „Electromagnetic flow measurements in liquid metals using time-of-flight Lorentz force velocimetry,“ *Measurement science and technology*, 2012.
- [16] D. Jian und C. Karcher, „Development of a non-contact electromagnetic surface velocity sensor for molten metal flow,“ *Journal of iron and steel research*, 2012.
- [17] A. Alferenok, M. Werner, M. Gramß, U. Lüdtko und B. Halbedel, „Numerical Optimization of the Magnet System for the Lorentz Force Velocimetry of Electrolytes,“ *IEEE Transaction on Magnetics*, 2011.
- [18] M. Gramß und C. Karcher, „Calibration of a Lorentz force Flowmeter,“ *Digitale Bibliothek Thüringen*, 2011.
- [19] R. Klein, C. Weidemann, X. Wang, M. Gramß, A. Alferenok, A. Thieme, Y. Kolesnikov, C. Karcher und A. Thess, „Lorentzkraft- Anemometrie für die berührungslose Durchflussmessung von Metallschmelzen,“ *technisches Messen*, 2012.
- [20] P. Davidson, *An Introduction to Magnetohydrodynamics*, Cambridge, 2001.
- [21] Deutsches Institut für Normung e.V., *Grundlagen der Messtechnik- Teil 4 Auswertung von Messungen Messunsicherheit DIN 1319-4*, 1999.
- [22] Bureau International des Poids et Mesures, *Evaluation of measurement-Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*, 2008.
- [23] Förster GmbH, „Sigmatest 2.069 Datenblatt“.
- [24] Physikalisch Technische Bundesanstalt, „Gravity Information System PTB,“ 2007. [Online].
- [25] A. Bröge, *Das Techniker Handbuch*, Braunschweig: Vieweg, 1999.
- [26] International Organization of Legal Metrology, „International Recommendation OIML R111-1,“ Paris, 2004.
- [27] Pyrotek, „RFM® AUTOPOUR LADLE“.

- [28] Y. Kolesnikov, C. Karcher und A. Thess, „Lorenz Force Flowmeter for Liquid Aluminum: Laboratory Experiments and Plant Tests,“ *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2011.
- [29] Precimeter, „ProH Digital Camera Sensor-for molten metal level control- User's Guide,“ 2010.
- [30] Meinberg Funkuhren GmbH & Co. KG, „Handbuch GPS170 LCD/MP,“ 2011.
- [31] Hewlett Packard, „Fundamentals of Quartz Oscillators Application Note 200-2,“ 1997.
- [32] J. A. Shercliff, *A Textbook of Magnetohydrodynamics*, Oxford: Pergamon Press Ltd., 1965.
- [33] G. Jirka und C. Lang, *Gerinnehydraulik*, 2005.
- [34] R. Engel, *Hydrodynamisches Prüffeld Funktionsbeschreibung*, 2002.
- [35] G. Wendt, R. Engel und J. Riedel, „Sicherstellung der Rückführbarkeit der Mengen- und Durchflussmessungen von Flüssigkeiten,“ *PTB Mitteilungen*, 2009.
- [36] R. Lyon und D. La Verne Katz, *Liquid-metals handbook*, 1954.
- [37] R. Engel, „Wägetechnische Aspekte in der Durchflussmessung,“ *sensor report*, 2008.
- [38] A. Thess, E. Votyakov und Y. Kolesnikov, „Lorentz force Velocimetry“.
- [39] A. Thess, T. Boeck, S. Engert, M. Gramß, C. Heinicke, D. Jian, C. Karcher, R. Klein, Y. Kolesnikov und V. Minchenya, „New developments in Lorentz force velocimetry,“ *Journal of iron and steel research international*, 2012.
- [40] D. Jian und C. Karcher, „Entwicklung eines elektromagnetischen Strömungskontrollsystems zur lokalen und globalen Geschwindigkeitsbestimmung in metallurgischen Prozessen,“ in *Workshop Elektroprozessechnik Ilmenau*, Ilmenau, 2011.
- [41] R. P. Uhlig, M. Zec, M. Ziolkowski, H. Brauer und A. Thess, „Lorentz force velocimetry: a contactless method for electrical conductivity measurements,“ *Journal of applied physics*, 2012.
- [42] R. P. Uhlig, M. Zec, H. Brauer und A. Thess, „Lorentz Force Eddy Current Testing: a Prototype Model,“ *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2012.
- [43] A. Viré, B. Knaepen und A. Thess, „Lorentz force velocimetry based on time-of-flight measurements,“ *Physics of Fluids*, 2010.

- [44] M. Gramß, „Experimentelle Untersuchungen an einem Wärmetauscher- Prototypen für Lacktrocknungsöfen,“ 2007.
- [45] W. Bohl, Technische Strömungslehre, Würzburg: Vogel Verlag, 2002.
- [46] VDI, VDI Wärmeatlas, Berlin, 2002.
- [47] Incorpora und De Witt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Toronto, 1996.
- [48] Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau, Berlin: Springer, 1997.
- [49] Hering, Martin und Strohrer, Physik für Ingenieure, Berlin: Springer, 2002.
- [50] S. Hasse und E. Brunhuber, Giesserei-Lexikon, Berlin: Fachverlag Schiele & Schoen, 2000.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzipdarstellung eines Lorentzkraft-Anemometers. Ein Magnet ist an einem Kraftmesssystem über einer Schmelze mit Strömungsgeschwindigkeit v befestigt. In der Schmelze entsteht eine Lorentzkraft entgegen der Bewegungsrichtung, auf den Magnet wirkt die gleichgroße Kelvinkraft als Gegenkraft zur Lorentzkraft.	8
Abbildung 2: Prinzipdarstellung des verwendeten Aufbaus für die trockene Kalibrierung a) und die nasse Kalibrierung b). In Teilbild a) sind die wesentlichen Maße des verwendeten LKA eingetragen. Im Fall der trockenen Kalibrierung a) werden verschiedene feste Referenzkörper verschiedener Höhe und aus verschiedenen Materialien durch das LKA-System bewegt. Bei der nassen Kalibrierung wird das System über der Gießrinne montiert.	11
Abbildung 3: Ergebnis der Bestimmung der Flussdichte des Magnetfeldes. Die Farben symbolisieren den Messwert in Tesla. Der Mittelpunkt des dargestellten Messvolumens weist eine Flussdichte von ca. 80mT auf.	12
Abbildung 4: Grundprinzip des verwendeten Lorentzkraft-Anemometers. Zwischen den Magnetarrays entsteht ein magnetisches Feld. Die Magnete werden über ein Joch verbunden, an dem das Kraftmesssystem mit Biegebalken und Dehnmessstreifen befestigt ist. In der strömenden Schmelze werden Wirbelströme erzeugt und eine Lorentzkraft entgegen der Bewegungsrichtung induziert. Die Kelvinkraft wirkt auf das LKA und ist die Gegenkraft der Lorentzkraft.	14
Abbildung 5: Kalibrierergebnis des Kraftsensors. Die am Lorentzkraft-Anemometer gemessene Spannung in mV wird gegen die durch Prüfgewichte aufgebraachte Kraft aufgetragen.	27
Abbildung 6: Versuchsstand zur trockenen Kalibrierung. Ein Referenzbarren wird mit einer Halterung auf dem Linearmotor befestigt. Die Anordnung fährt durch das an der Labordecke befestigte LKA.	29
Abbildung 7: Typischer Signalverlauf für einen Versuch der trockenen Kalibrierung bei Geschwindigkeitsstufe 15cm/s des Aluminiumprobekörpers der Höhe 100mm. Der Signalanstieg entsteht beim Durchfahren des LKA-Systems in der Vorzugsrichtung, der Abfall des Sensorsignals bei der Rückfahrt des Schlittens.	31
Abbildung 8: Der in Abbildung 7 gezeigte Verlauf nach Ermittlung des Plateau- Wertes. Der Wert wird durch die schwarz eingezeichnete Linie symbolisiert.	32
Abbildung 9: Die erzeugte Lorentzkraft in N in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Probekörpers bei verschiedenen Höhen der Aluminiumproben. Die erzeugte Kraft steigt linear mit anwachsender Geschwindigkeit. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde hier nur die Ausgleichsgerade für den Aluminiumquader mit Höhe 0,1m eingezeichnet und auf das Antragen von Fehlerbalken verzichtet.	34
Abbildung 10: Kraft-Höhen Abhängigkeit des Lorentzkraft-Anemometers. An der Y- Achse ist die Kraft in N angetragen, an der x- Achse die Höhe des Probekörpers in m. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird auch hier nur die Trendlinie für 0,2m/s eingetragen. Man sieht einen deutlich progressiven Kraftanstieg mit steigender Barrenhöhe.	35
Abbildung 11: Die gemessene Kraft bezogen auf die Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Leitfähigkeit für die Aluminium und Kupferprobekörper gleicher Abmessungen. Das Kraft-Geschwindigkeitsverhältnis F/v der Kupferproben ist deutlich größer als das der Aluminiumproben.	38
Abbildung 12: Kraft-Geschwindigkeitsabhängigkeit für quaderförmige und zylindrische Probekörper. Der zylindrische Probekörper wird durch Kreise angezeigt. Der zylindrische Probekörper produziert in etwa die Kraft eines quaderförmigen Probekörper mit 80x100mm ²	40
Abbildung 13: Prinzipieller Aufbau des neuen Versuchsstandes zur trockenen Kalibrierung. Die Probe wird in einer speziellen Aufnahme durch das am Boden verankerte Lorentzkraft-Anemometer bewegt.	42
Abbildung 14: Neubau des Versuchsaufbaus zur trockenen Kalibrierung. Das Lorentzkraft-Anemometer steht nun auf dem Laborboden. Die Metallproben werden durch das Gerät bewegt. Die Probenaufnahme wurde aus glasfaserverstärktem Kunststoff gefertigt.	43
Abbildung 15: Screenshot des in LabView programmierten Mess- und Steuerprogrammes. Alle Daten werden vollautomatisch protokolliert. Die Ansteuerung des Motors erfolgt halbautomatisch.	44
Abbildung 16: Die erzeugte Kraft in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Aluminiumreferenzkörpers bei verschiedenen Höhen des Referenzkörpers. Für jeden Messpunkt ist die erweiterte Unsicherheit für $k=2$ im Diagramm eingetragen.	47

Abbildung 17: Konstruktionszeichnung der Flüssigzinnkalibrieranlage LiTinCa. Im Schmelzofen werden 500kg Reinzinn aufgeschmolzen und mit Hilfe der Flüssigmetallpumpe in die Gießrinne eingebracht. Die Schmelze passiert das in der Mitte der Gießrinne angebrachte Lorentzkraft-Anemometer und wird schließlich im Auffangbehälter verwogen. Die Gießrinne wird entsprechend der Pumprichtung geneigt. Nach dem Versuch wird die Schmelze durch die zweite Flüssigmetallpumpe wieder in den Schmelzofen gepumpt.	52
Abbildung 18: Die Flüssigzinnkalibrieranlage LiTinCa ohne Lorentzkraft-Anemometer. Am linken Bildrand befindet sich der Schmelzofen inklusive der Flüssigmetallpumpe. Das flüssige Zinn wird über die Rohrleitungen durch die Kompensatoren hindurch in den Kalibrierkanal geleitet. Der Kalibrierkanal kann mit Hilfe von elektrischen Hubgetrieben beliebig zwischen 0 und 5° geneigt werden. Der Pegel im Kalibrierkanal wird durch die in der Testsektion in der Mitte angebrachte Pegelmesseinrichtung gemessen. Die Schmelze wird im Auffangbehälter am rechten Bildrand gesammelt und anschließend durch den Kalibrierkanal zurückgepumpt.....	55
Abbildung 19: Die Flüssigzinnkalibrieranlage LiTinCa gegen Ende der Versuche. Im Bild ist deutlich das am Referenzkanal angebrachte Lorentzkraft-Anemometer sowie die Hubgetriebe und die Pegelmesseinrichtung zu erkennen. Die dünnen Rohre der Pumpen mussten zusätzlich mit entsprechenden Rohrbegleitheizungen versehen werden.....	57
Abbildung 20: Screenshot der Hauptvisualisierungs- und Steueroberfläche der Flüssigzinnkalibrieranlage LiTinCa auf Basis der 3D CAD Abbildung. Alle Steuerfunktionen können hier ausgeführt werden. Alle Messwerte werden hier angezeigt und abgespeichert.	60
Abbildung 21: Die Positionsmeldeeinrichtung	64
Abbildung 22: Kamerabild von der Gießrinne während eines Versuches mit Neigung 0,7° und einer Pumpfrequenz von 20Hz	68
Abbildung 23: Ermittelte Kraft-Massenstrom Abhängigkeit der Versuche mit 1,4° Rinnenneigung. Die Kraft erhöht sich mit steigendem Massenstrom und steigender Pumpfrequenz. An der rechten Achse sind die für den jeweiligen Massenstrom gemittelten Pegelwerte in mm angetragen.	70
Abbildung 24: Die ermittelte Kraft-Massenstrom Abhängigkeit für verschiedene Neigungen und Pumpfrequenzen. Die Werte der Messungen mit einer Neigung von 1,4° liegen deutlich unter denen mit Neigung 0,7°.	72
Abbildung 25: Die ermittelte Kraft in Abhängigkeit vom Massenstrom mit eingezeichneter Unsicherheit. Die Unsicherheit erhöht sich mit zunehmendem Massenstrom und zunehmender Pumpfrequenz.....	75
Abbildung 26: Die ermittelte Kraft-Massenstrom Abhängigkeit der nassen Kalibrierung im Vergleich mit der Kraft in Abhängigkeit des Massenstroms der trockenen Kalibrierung mit Quaderhöhe 25mm und 30mm.	79
Abbildung 27: Konstruktionsskizze der Schwesteranlage Tintelo.....	83
Abbildung 28: Tintelo gegen Ende des letzten Bauabschnittes. Im Vordergrund befinden sich die beiden Testsektionen, im Hintergrund sind die Öfen und die EM- Pumpe zu sehen.	85

Abkürzungsverzeichnis

Anmerkung: Fett gedruckte Größen entsprechen vektoriellen Größen.

B	.....	die magnetische Flussdichte in T
B_0	.....	die charakteristische magnetische Flussdichte des Systems in T
$B \times H$ [mm]	.....	Breite x Höhe des Probekörpers in mm
D	.....	der hydraulische Durchmesser des Systems in m
E	.....	die elektrische Feldstärke in V/m
EM-Pumpe	.....	elektromagnetische Pumpe
f_L	.....	Die Lorentzkraft in der Navier- Stokes Gleichung
F_L	.....	Die Lorentzkraft in N
ForMaT	.....	F orschung für den M arkt im T eam (Initiative des BMBF)
g	.....	Beschleunigung im Schwerfeld der Erde in m/s^2
G	.....	die Modellgleichung des Messaufbaus
GUM	.....	Guide to the expression of uncertainty in measurement
Ha	.....	die Hartmann-Zahl
IACS	.....	I nternational A nnealed C opper S tandard
j	.....	die Stromdichte im Medium in A/m^2
L	.....	die charakteristische Länge des Systems in m
LKA	.....	Lorentzkraft-Anemometer
p	.....	der Druck im Fluid in Pa
ppm	.....	parts per million
Re	.....	die Reynolds-Zahl
Re_m	.....	die magnetische Reynoldszahl
u	.....	die Standardmessunsicherheit
u_c	.....	die kombinierte Standardmessunsicherheit
V	.....	das Volumen des Körpers in m^3
\dot{V}	.....	der Volumenstrom in m^3/s
v	.....	die Ausbreitungsgeschwindigkeit in m/s
v_0	.....	die mittlere Strömungsgeschwindigkeit in m/s
η	.....	die dynamische Viskosität des Mediums in $kg/(m \cdot s)$
μ_0	.....	die magnetische Feldkonstante $4\pi \cdot 10^{-7} N/A^2$
ν	.....	die kinematische Viskosität des Fluides in m^2/s
ρ	.....	die Dichte in kg/m^3
σ	.....	die elektrische Leitfähigkeit in S/m