

## Schlussbericht zum BMBF ForMaT-Projekt

# Verwertungsstrategien für Lorentzkraft-Anemometer in der Materialherstellung

Förderkennzeichen: 03FO2292

Zuwendungsempfänger: **Technische Universität Ilmenau**  
Postfach 10 05 65  
98684 Ilmenau

Ausführende Stelle: **Fachgebiet Thermo- und Magnetfluidodynamik**  
Prof. Dr. André Thess  
Fakultät für Maschinenbau  
Technische Universität Ilmenau  
Postfach 100565  
98684 Ilmenau

Vorhabenbezeichnung: Verwertungsstrategien für Lorentzkraft-Anemometer in der Materialherstellung

Projektlaufzeit: 01.01.2010 - 30.06.2012

**Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03FO2292 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt beim Autor.**

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## **Inhalt**

|   |    |
|---|----|
| Zusammenfassung .....   | 3  |
| I. Überblick zum Vorhaben .....                                       | 3  |
| 1. Voraussetzungen und Aufgabenstellung .....                         | 3  |
| 2. Planung und Ablauf des Vorhabens .....                             | 4  |
| 3. Wissenschaftliche und technische Anknüpfungspunkte .....           | 5  |
| 4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....                           | 6  |
| II. Ergebnisdarstellung .....   | 6  |
| 1. Ergebnis und Zielreflektion .....                                  | 6  |
| 2. Zahlenmäßiger Nachweis .....                                       | 19 |
| 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....      | 20 |
| 4. Nutzen und Verwertbarkeit .....                                    | 21 |
| 5. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen ..... | 23 |
| 6. Veröffentlichungen .....   | 23 |

## **Zusammenfassung**

Die Messung von Strömungsgeschwindigkeiten beim Gießen von Aluminium, Stahl und Floatglas galt bis vor kurzem als ungelöstes Problem mit herausragender wirtschaftlicher Bedeutung. Die Arbeitsgruppen der beiden Antragsteller haben zur Lösung dieses Problems gemeinsam ein neues Messverfahren namens Lorentzkraft-Anemometrie entwickelt, in mehreren Industriefirmen erprobt und in der ersten Phase des ForMaT-Projekts ein großes Verwertungspotenzial für diese Technologie identifiziert, was sich in der zweiten Phase verfestigte. Nach Projektende existieren nun funktionsfähige Prototypen für Lorentzkraft-Anemometer (LKA), die bereits ersten Tests unter Industriebedingungen unterzogen wurden. Außerdem konnten neue wissenschaftliche Erkenntnisse gewonnen und Anwendungsfelder generiert werden, die im Projektantrag noch unbekannt waren. Ein wesentliches Highlight des zweiten ForMaT-Jahres besteht in der Bewilligung eines EXIST Forschungstransfer-Projektes in Anschluss an ForMaT, was einerseits das große Potenzial der Entwicklung bestätigt und andererseits die Finanzierung der bis zur Gründung noch notwendigen Schritte sichert. Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten werden vom Projektteam, Kooperationspartnern und potenziellen Investoren gleichermaßen als konstant hoch bewertet, es wird weiterhin eingeschätzt, dass eine Unternehmensgründung Ende 2013 oder Anfang 2014 erfolgen wird. Der notwendige zeitliche Horizont vom Versuchsmodell bis zum verkaufsfähigen Produkt wurde vom Projektteam zu Beginn von ForMaT unterschätzt, was aber durch das sich anschließende EXIST-Projekt kein Gründungshemmnis darstellt. Insgesamt hat sich der Plan einer Unternehmensgründung im gesamten Verlauf des ForMaT-Projektes weiter verfestigt und konkretisiert.

### **I. Überblick zum Vorhaben**

#### **1. Voraussetzungen und Aufgabenstellung**

Systeme zur Durchflussmessung in „kalten Fluiden“ wie Getränken, Gasen und Chemikalien werden in der Lebensmittelindustrie sowie in der chemischen Industrie seit Jahrzehnten erfolgreich eingesetzt und verkörpern eine der wichtigsten kommerziellen Anwendungen der Strömungsmesstechnik. Demgegenüber bildet die zuverlässige und genaue Messung von Fließgeschwindigkeiten in „heißen Fluiden“ wie etwa flüssigem Stahl ein bis heute weitgehend ungelöstes Problem mit herausragender wirtschaftlicher Bedeutung.

In Zeiten der Rohstoffknappheit steigen in der Metallindustrie die Anforderungen an die Präzision bei der Legierungsherstellung stetig. Oft ist die genaue Messung der Durchflussmengen von Legierungskomponenten die größte Schwierigkeit bei der Entwicklung innovativer Produktionstechnologien. Das Problem besteht darin, dass herkömmliche Messgeräte zur Durchflussbestimmung in kalten Fluiden wie Flügelräder (Benzinzapfsäule) oder Sonden (Wassermessuhr) in extrem heißen und aggressiven Substanzen wie flüssigem Stahl oder Aluminium binnen weniger Minuten zerfressen werden. Keine klassischen Durchflussmessverfahren können diese anspruchsvolle Aufgabe lösen.

Mit dem Lorentzkraft-Anemometer hat das Projektteam der Technischen Universität Ilmenau ein Messgerät entwickelt, welches das oben beschriebene Problem beseitigt. Das LKA ist ein berührungsloses, elektromagnetisches Strömungsmessgerät zur Durchflussbestimmung in Hochtemperaturschmelzen wie Aluminium, Stahl oder Zinn.

Zu Beginn des ForMaT-Projektes befand sich der Entwicklungsstand der Lorentzkraft-Anemometer für die drei sich in Phase 1 als die mit dem höchsten Verwertungspotenzial herausgestellten Anwendungsbereiche Aluminium, Stahl und Floatglas auf unterschiedlichen Stufen. Das Marktpotenzial hatte sich bereits als hoch herausgestellt. Auch ein Netzwerk an potenziellen Kunden, Partnern und Lead Usern bestand bereits.

Am weitesten fortgeschritten war die Entwicklung im Aluminiumbereich. Neben der entwickelten Messtechnologie existierten bereits mehrere Versuchsmodelle, die bereits in Feldtests mit Industriepartnern getestet wurden. Ziel und Aufgabe für ForMaT Phase II war es deshalb, einen Businessplan zur Einleitung einer Existenzgründung im Umfeld der TU Ilmenau. Parallel dazu war das Ziel, das Versuchsmodell gemäß den vermarktungsrelevanten Anforderungen potenzieller Kunden weiter zu entwickeln. Dies beinhaltete unter anderem die Entwicklung von Verfahren zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit, die Optimierung des Mess- und Auswerteverfahren sowie die Erschließung neuer Einsatzorte. Am Ende von ForMaT sollte ein verkaufsfertiger Prototyp bestehen.

Für das Anwendungsfeld Stahl existierte noch kein Versuchsmodell, jedoch bestand bereits ein fertiges, detailliertes Konzept für ein LKA-System zur Anwendung am Schattenrohr und Gießrohr von Stranggussanlagen bei der Stahlherstellung. Bereits im Vorfeld von ForMaT konnte ein Industriepartner gewonnen werden, der sich bereit erklärt hat, eine Testumgebung für Feldversuche zur Verfügung zu stellen. Das Ziel für ForMaT Phase II bestand darin, Prototypen für das Messsystem an den verschiedenen Einsatzstellen zu entwickeln und im Rahmen von bestehenden Kooperationen mit Industriepartnern sowie intern im Innovationslabor zu testen. Außerdem sollten ein Fahrplan zur Integration des Messverfahrens in den Produktionsablauf entwickelt sowie Lead User und Kooperationspartner gewonnen werden.

Die Entwicklung für den Anwendungsbereich Floatglas war zu Beginn von ForMaT Phase II am wenigsten fortgeschritten. Es existierte ein konkretes Konzept zur berührungslosen Messung und Beeinflussung der Zinnströmung im Floatprozess, die sich aus Beratungen mit Industriepartnern und Besichtigungen mehrerer Glaswerke entwickelt hat. Das Ziel von ForMaT Projektphase II bestand zunächst darin, aus dem bereits bestehendem Konzept heraus eine nutzeranforderungsgerechte LKA-Anwendung im Floatglasbereich zu entwickeln. Dies umfasste sowohl die Strömungsmessung im Zinnbad als auch die automatisierte Beeinflussung der Zinnströmung mit dem LKA. Parallel dazu hatten der Aufbau eines Lead-User-Netzwerks sowie die Gewinnung von Partnern zur Bereitstellung einer Feldtestumgebung hohe Priorität.

## **2. Planung und Ablauf des Vorhabens**

Die Arbeiten in ForMaT Phase II fanden vom 01.01.2010 bis zum 31.12.2011 bzw. zum 30.06.2012 statt. Durch die Möglichkeit einer kostenneutralen Verlängerung um sechs Monate zum Abschluss der Arbeiten im Aluminiumbereich dauerte das ForMaT-Projekt für dieses Anwendungsfeld 2,5 Jahre, während die Tätigkeiten in den Bereichen Stahl und Floatglas wie geplant nach zwei Jahren beendet wurden.

Das Innovationslabor „Lorentzkraft-Anemometer“ bestand aus drei Forschergruppen, von denen sich jede mit einem der Anwendungsfelder Aluminium, Stahl und Floatglas beschäftigte. Forschergruppenübergreifend stand mit der Stelle der Projektunterstützung betriebswirtschaftliche Expertise zur Verfügung. Federführend wurde die Kontroll- und Lenkungsfunktion der Projektgruppen durch eine technische (Prof. Thess) und eine betriebswirtschaftliche Projektleitung (Prof. Gelbrich/ ab 2010 Prof. Bach) übernommen.

Um mit der Entwicklung eines verkaufsfertigen Prototyps das Projektziel im Aluminiumbereich zu erreichen, wurde eine vierstufige Weiterentwicklung des Versuchsmodells im halbjährlichen Rhythmus angestrebt. Dabei sollte der Prototyp jeweils in Hinblick auf Design und verschiedene Funktionalitäten systematisch verbessert und bei einem Industriepartner getestet werden. Außerdem umfassten die experimentellen Arbeiten den Aufbau, die Instrumentalisierung und Inbetriebnahme einer Kalibrieranlage, an der neben der numerischen Kalibrierung des Prototypen zusätzlich Kalibrierungen mit Flüssigzinn erfolgen sollten. Begleitend zu den Entwicklungsarbeiten sollte ein Businessplan erstellt werden, um nach Ende von ForMaT eine Unternehmensgründung einzuleiten.

Im Projektbereich Stahl sollte der Prozess der Prototypentwicklung zweistufig im jährlichen Rhythmus erfolgen. Nach der Entwicklung eines Prototyps und dem Aufbau eines Laborversuchsstands mit horizontaler und vertikaler Strömungsführung sollten ebenfalls industrielle Tests erfolgen, deren Ergebnisse in die zweite Ausbaustufe des Prototyps einfließen sollten. Außerdem war geplant, detaillierte Marktanalysen durchzuführen und das Verwertungskonzept des Lorentzkraft-Anemometers im Stahlbereich zu entwickeln.

Für den Projektbereich „Floatglas“ bestand das Ziel in der Erstellung und ersten Umsetzung eines Konzeptes zum Einsatz eines LKA in Einheit mit einer elektromagnetischen Pumpe zur gleichzeitigen Durchflussmessung und Strömungskontrolle - dem berührungsfreien Dosieren. Hierzu bietet der Floatglasbereich ideale Anwendungspotenziale, da die Qualität des auf einem Flüssigzinnbad erstarrenden Glases entscheidend von den Strömungszuständen im Zinn beeinflusst wird. Neben der Konzeptentwicklung sollten die Verwertungsmöglichkeiten für dieses Anwendungsfeld analysiert werden.

### **3. Wissenschaftliche und technische Anknüpfungspunkte**

Die Entwicklungsarbeiten in allen drei Projektbereichen basieren auf dem Verfahren der „Lorentzkraft-Anemometrie“, welches am Fachgebiet Thermo- und Magnetofluidodynamik entwickelt und patentiert wurde (vgl. Karcher et al. 2007a, Karcher et al. 2007b, Thess et al. 2005, Thess et al. 2006, Thess et al. 2007a, DE 10 2007 038 653 B3, DE 10 2005 046 910 B4). Das LKA basiert auf physikalischen Prinzipien der Magnetofluidodynamik, welche die Kraft- und Heizwirkung elektromagnetischer Felder auf elektrisch leitfähige Flüssigkeiten (wie beispielsweise Metallschmelzen) untersucht. Wirkt ein stationäres Magnetfeld auf eine strömende, elektrisch leitfähige Flüssigkeit, werden in der Schmelze elektrische Wirbelströme induziert. Diese Wirbelströme rufen in Wechselwirkung mit dem Magnetfeld eine bremsende Lorentzkraft in der Schmelze hervor. Das LKA misst diese Lorentzkraft, welche proportional zum Schmelzendurchfluss und zur elektrischen Leitfähigkeit der Schmelze ist. Die Wirksamkeit und Zuverlässigkeit der Messmethode wurden vom Projektteam sowohl experimentell unter kontrollierten Laborbedingungen als auch prototypisch durch Feldmessungen in Industrieunternehmen erfolgreich nachgewiesen.

Es existierten zu Projektbeginn schon einige Arbeiten im Bereich elektromagnetischer Durchflussmessung. Eine Analyse der agierenden potenziellen Konkurrenten für Lorentzkraft-Anemometer ergab, dass das LKA im Vergleich zu anderen Verfahren deutliche Vorteile mit sich bringt, die sich im Laufe der Entwicklungsarbeiten und in Gesprächen mit der Industrie während des Projektverlaufs bestätigt haben.

#### **4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Während des ForMaT-Projektes wurde seitens der Mitarbeiter großer Wert darauf gelegt, mit anderen relevanten Personen, Organisation und Stellen zusammen zu arbeiten. So erfolgte immer mit Blick auf das Ziel der Einleitung einer Ausgründung aus der TU Ilmenau von Anfang an eine Eingliederung in das lokale und überregionale Gründernetzwerk. Das Projektteam hat unter anderem die Idee auf diversen Pitch-Veranstaltungen präsentiert, in Jena an einem Businessplanseminar teilgenommen und die Netzwerkveranstaltungen des auftakt.-Gründerforums Ilmenau intensiv genutzt.

Neben den gründungsrelevanten Kooperationen erfolgte innerhalb der TU Ilmenau eine Zusammenarbeit mit anderen Fachgebieten. So konnte beispielsweise im Bereich Prozessmess- und Sensortechnik auf die Erfahrungen des gleichnamigen Fachgebietes zurückgegriffen werden, wodurch keine Aufträge an Dritte zum Design des Kraftmesssystems nötig waren. Auch die geplante Zusammenarbeit mit lokalen Unternehmen erfolgte, so konnten die Arbeiten im Bereich der Softwareentwicklung von einem ortsansässigen Systemtechnik-Unternehmen durchgeführt werden.

Einen großen Vorteil brachte die Zusammenarbeit zwischen dem Innovationslabor „Lorentzkraft-Anemometer“ und dem Graduiertenkolleg „Lorentzkraft“, dessen Forschungsergebnisse zur elektromagnetischen Strömungsmessung und Wirbelstromprüfung in die Arbeiten in ForMaT einfließen.

Außerdem bestehen in allen Projektbereichen enge Verbindungen zu Industriepartnern, die im Rahmen von ForMaT weiter ausgebaut wurden.

## **II. Ergebnisdarstellung**

### **1. Ergebnis und Zielreflektion**

Im Folgenden werden die Ergebnisse in den einzelnen Projektgruppen eingehend dargestellt. Zunächst sollen jedoch einige Highlights aufgeführt werden, die in den 2,5 Jahren Projektlaufzeit erreicht wurden:

- erfolgreiche Antragstellung zu EXIST-Forschungstransfer als Anschlussfinanzierung an ForMaT zur Einleitung der Gründungsaktivitäten, Projektlaufzeit Phase 1: 01.07.2012 – 31.12.2013
- Schützen von „Lofotec“ als Name des späteren Gründungsunternehmens
- Aussteller auf der Aluminiummesse in Essen zur Partnergewinnung
- Gewinnen eines neuen Projektpartners und Anwendungsfeldes im Bereich Aluminium: Erhöhung der Dosiergenauigkeit beim Druckguss
- Gewinnen eines Kooperationspartners, der eine Testumgebung für den Prototyp im Aluminiumbereich sowohl an einer Forschungsanlage als auch im realen Produktionsbetrieb bereitstellt

- Vorstellung des Projektes beim VC Campus 2011 an der TU Ilmenau (Abb. 1), positives Feedback zur Gründungsidee von potenziellen Investoren



Abbildung 1: Vorstellung der Gründungsidee beim VC Campus Ilmenau 2011

- Planung und Bau der weltweit einzigartigen Kalibrieranlage LiTinCa (Abb. 2: Realfoto aus dem Labor). LiTinCa (Liquid Tin Calibration) wurde Anfang 2011 fertiggestellt und dient der Kalibrierung von LKA-Prototypen unter anwendungsnahen Einsatzbedingungen in einem heißen Flüssigzinnbad

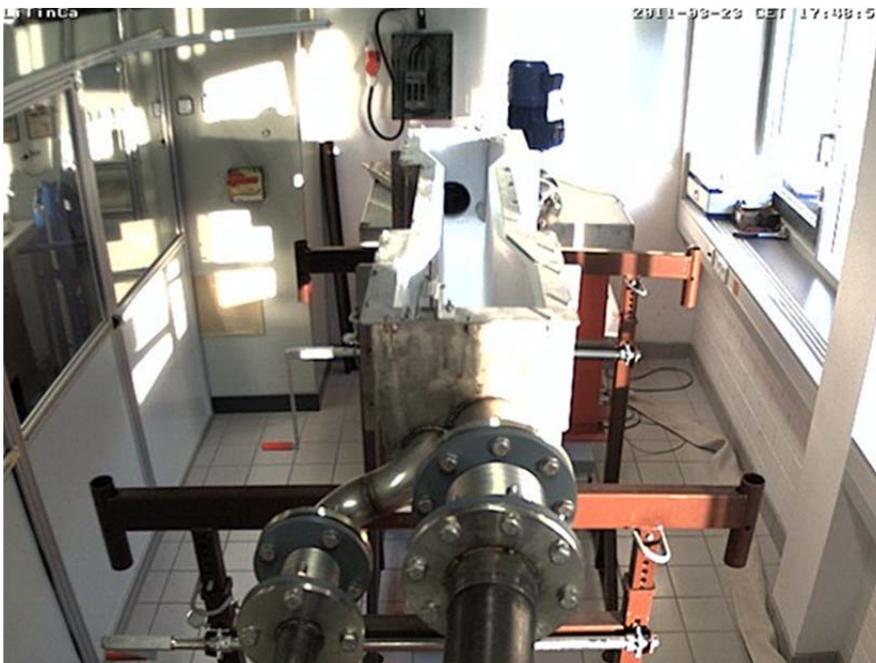


Abbildung 2: Flüssigkalibrieranlage LiTinCa

## Projektbereich A: Aluminium

Das erste technische Arbeitspaket umfasste die Entwicklung, Kalibrierung und den Test eines **LKA-Prototyps in der ersten Ausbaustufe**. Dazu wurde ein LKA hinsichtlich der vorgegebenen Rinnenbreiten (100mm und 200mm) entworfen und an die sich im Neuaufbau befindliche Anlage zur Kalibrierung mit Festkörpern verschiedener Metall-Legierungen angepasst. Der entwickelte Prototyp der ersten Ausbaustufe wurde numerisch und experimentell mit Metall-Festkörpern verschiedener Geometrien und Legierungsarten kalibriert. Auf die Flüssigkalibrierung musste bei der ersten Ausbaustufe verzichtet werden, da die dafür notwendige Anlage noch nicht fertiggestellt war. Die industriellen Tests des Prototyps der 1. Ausbaustufe wurden aus organisatorischen Gründen verschoben und fanden mit der nächsten Ausbaustufe 2011 statt.

Die Entwicklung der **zweiten Ausbaustufe** des LKA erfolgte unter dem Gesichtspunkt der Optimierung des Leistungs-Gewicht-Verhältnisses des Magnetsystems. Dazu wurden numerische Simulationen durchgeführt. Außerdem wurden neue Erkenntnisse über alternative Magnetsysteme gewonnen, die in die Konstruktion der zweiten Ausbaustufe einfließen. Neu am Prototypen der zweiten Ausbaustufe ist die Anordnung unterhalb der Gießrinne. Diese hat sich im Vergleich zur beim ersten Prototyp umgesetzten Anordnung oberhalb der Gießrinne während der Gespräche mit Industriepartnern und potenziellen Kunden als für den Reinigungsprozess der Rinne deutlich vorteilhafter herausgestellt. Da die Arbeiten zur Flüssigkalibrierung noch nicht möglich waren, weil die dafür notwendige LiTinCa-Anlage erst 2011 fertiggestellt wurde und erst gegen Ende des Jahres betriebsbereit war, wurde die Trockenkalibrierung optimiert und an die neuen Anforderungen an das nun vorliegende Design des Messsystems angepasst. Dafür wurde eine verbesserte Anlage installiert, mit Hilfe derer die Trockenkalibrierung der entwickelten LKA-Ausbaustufen durchgeführt werden konnte. Weiterhin wurde ein neues Auswerteprogramm zur Steuerung der Anlage erstellt. Durch die experimentelle Simulation der Strömung der flüssigen Aluminiumschmelze mittels der Bewegung eines festen Aluminiumbarrens wurden wichtige wissenschaftliche Erkenntnisse zur Durchflussmessung mittels Lorentzkraft-Anemometrie gesammelt, die entscheidend für die Entwicklung der Prototypen sind. Im Jahr 2011 konnten mit dem Prototyp der zweiten Ausbaustufe Testmessungen beim Kooperationspartner durchgeführt werden, der dem Projektteam eine sich direkt in der Produktionsumgebung befindliche Forschungsanlage zu Testzwecken zur Verfügung stellte.

Im Rahmen der Weiterentwicklung wurden die Untersuchungen zum Schwingungsverhalten des Lorentzkraft-Anemometers weitergeführt (Bestimmung der Eigenfrequenz, Dimensionierung der Dämpfungselemente). Außerdem wurden im September 2011 in-situ-Messungen bezüglich des Schwingverhaltens (Vibrometer) und der Temperaturen (Pyrometer) an der Gießrinne der Forschungsanlage beim Kooperationspartner durchgeführt, ausgewertet und dokumentiert. Zusätzlich dazu wurden Magnetfeldmessungen durchgeführt, um die durch die Umgebung induzierten Stör-Magnetfelder zu messen. Das Ziel bestand darin, einen möglichen Einfluss auf das Lorentzkraft-Anemometer zu ermitteln. Die in diesem Zusammenhang gewonnenen Erkenntnisse fließen bereits in die Entwicklung und das Design der **3. Ausbaustufe** des Lorentzkraft-Anemometers mit ein. Die Fertigung und der Zusammenbau der 3. Ausbaustufe wurden im Q1/2012 abgeschlossen. Die 3. Ausbaustufe des Lorentzkraft-Anemometers mit verändertem Design wurde numerisch und experimentell kalibriert. Dabei wurden das numerische Modell und der Versuchsstand für die Kalibrierung mit Metall-Festkörpern („trockene“ Kalibrierung) auf die jeweiligen Veränderungen am Messgerät (Geometrische Abmaße vom Magnetsystem und Gehäuse) angepasst. Der Einfluss von sich in

den Gießrinnen einstellenden, unterschiedlichen Flüssigmetallfüllständen wurde dabei durch Festkörper unterschiedlicher Höhe realisiert. Bei der Kalibrierung an der Flüssigzinn-Anlage (LiTinCa) wurde das Kraftsignal am Lorentzkraft-Anemometer in Abhängigkeit der Pumpenfrequenz (variiert im Bereich zwischen 20Hz und 30Hz) bestimmt und mit den Werten am Referenzsystem (Wägemessung) verglichen. Die Messungen ergaben, dass sich der Metallpegel in der Gießrinne und dadurch das Kraftsignal am Lorentzkraft-Anemometer mit zunehmender Pumpenfrequenz erhöhen. Ein vergleichbares Ergebnis wurde bei der Kalibrierung mit Festkörpern beobachtet. Anschließend erfolgten Feldmessungen mit dem Prototyp an der Forschungsanlage beim Industriepartner. Dabei wurde das Messgerät in der Nähe des Schmelzofens an der Gießrinne befestigt. Die Messdaten (Kraftsignal, Temperaturen) wurden mit Hilfe eines Prozessmoduls des LKA aufgenommen und am Industrie-PC visualisiert. Die Ergebnisse der Messungen haben gezeigt, dass das Messgerät die strömende Metallschmelze zwar detektiert, jedoch die Signalqualität aufgrund des Einflusses der Umgebungsbedingungen verbessert werden muss. Diese Erkenntnisse flossen in die Entwicklung der 4. Ausbaustufe des LKA ein.

Bei der Entwicklung der **4. Ausbaustufe** des LKA sind die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Feldmessungen eingeflossen. In diesem Zusammenhang bestand eines der wesentlichen Ziele in der Verbesserung des Signal/Rausch-Verhältnisses und in der Verringerung des Einflusses von Störungen (z.B. Temperatur, elektromagnetische Störfelder) auf das Messsignal. Dazu wurde unter anderem ein optimiertes Magnetsystem mit Abschirmung entwickelt und gebaut und die Signalverarbeitung (z.B. Filterung) im Elektronikmodul des LKA verbessert. Des Weiteren wurde ein Neigungssensor in das Messgerät integriert, um zeitliche Winkelveränderungen an der Gießrinne zu detektieren und bei der Auswertung der Messung berücksichtigen zu können. Bei der Kalibrierung der 4. Ausbaustufe wurde ähnlich vorgegangen wie bei der 3. Ausbaustufe. Dabei wurden im Labor Al-Festkörper unterschiedlicher Höhen durch das Messsystem geleitet und die Kraft am Messgerät registriert. Desweiteren wurde die Neigung des Messgerätes in Bewegungsrichtung variiert und dessen Einfluss auf das Messsignal registriert. Parallel dazu wurden die experimentellen Untersuchungen an der Flüssigzinn-Anlage LiTinCa erweitert und der Einfluss der Rinnenneigung auf das Kraftsignal eines Lorentzkraft-Anemometers untersucht. Dabei wurde die Rinnenneigung im Bereich zwischen  $0,7^\circ$  bis  $1,4^\circ$  verändert. Die Ergebnisse zeigen, dass Veränderungen in der Rinnenneigung bei der Kalibrierung der Lorentzkraft-Anemometer berücksichtigt werden müssen. Mit Hilfe der Messungen konnte ebenfalls gezeigt werden, dass die Optimierungen am Magnetsystem und der Elektronik zu einem verbesserten Signal/ Rauschverhältnis geführt haben. Die Labormessungen wurden durch numerische Untersuchungen mit Festkörpern und Flüssigkeiten begleitet. Auch die vierte Ausbaustufe wurde an der Forschungsanlage des Kooperationspartners installiert und getestet. Dabei wurde der Versuchsaufbau im Vergleich zu den Feldmessungen mit der 3. Ausbaustufe verändert und das Messgerät weiter entfernt vom Schmelzofen an der Gießrinne befestigt. Diese Veränderung im Versuchsaufbau vermindert unter anderem die durch das Kippen des Schmelzofens auf das Messgerät wirkenden Einflüsse. Die Messdaten (Kraftsignal, Temperaturen) wurden mittels Prozessmoduls des LKA aufgenommen und am Industrie-PC visualisiert. Die Ergebnisse der Messungen zeigen eine deutliche Verbesserung des Signal/Rauschverhältnisses gegenüber den Messungen mit der 3. Ausbaustufe.

In die Entwicklung der Prototypen flossen die Ergebnisse der **numerischen Untersuchung von MHD-Prozessen** im LKA ein. Die numerischen Modelle zur Untersuchung der Wechselwirkungsprozesse zwischen sich bewegenden, elektrischen Leitern und einem homogenen Magnetfeld (z.B. erzeugt durch eine Halbach-Magnetanordnung) wurden erstellt und die jeweiligen numerischen Simulationen durchgeführt. Das numerische Modell zur Untersuchung

der Wechselwirkungsprozesse zwischen sich bewegenden, elektrischen Festkörpern und einem inhomogenen Magnetfeld (z.B. erzeugt durch ein offenes Magnetsystem mit Eisenjoch und ohne) ist erstellt und wurde für die Kalibrierungen verwendet. Das numerische Modell zur Untersuchung von laminaren und turbulenten Strömungen in offenen und geschlossenen Geometrien unter dem Einfluss eines inhomogenen Magnetfeldes wurde ebenfalls entwickelt, die ermittelten Kalibrierfunktionen wurden bei den Feldmessungen mit der 4. Ausbaustufe im Q2/2012 sowie bei den Kalibriermessungen an der hauseigenen LiTinCa verwendet. Die numerischen Modelle zur Untersuchung von laminaren und turbulenten, magnetohydrodynamischen Rohrströmungen und Strömungen in offenen Gießrinnen wurden erweitert, optimiert und auf die derzeitigen Eigenschaften des Lorentzkraft-Anemometers angepasst. Bei den numerischen Simulationen wurden die thermophysikalischen Eigenschaften (temperaturabhängige elektrische Leitfähigkeit, Dichte und Viskosität) des flüssigen Metalls berücksichtigt, da diese Einfluss auf den Verlauf der Kalibrierfunktionen haben.

Parallel zu den Entwicklungsarbeiten an den Prototypen wurde 2010 die **Flüssigkalibrieranlage LiTinCa** (Abb. 3) komplett geplant (Pflichtenheft, Lastenheft, Einholen von Angeboten der Komponenten). Der erste Entwurf der Anlage musste verworfen werden, da die dazu notwendigen Umbaumaßnahmen von der Universität aus Arbeitsschutzgründen abgelehnt wurden. Deshalb erfolgte eine Neukonzeption unter Berücksichtigung der Möglichkeiten im Labor. Die Anlage besteht aus zwei höhenverstellbaren Öfen mit je 500kg Fassungsvermögen. 500kg Reinzinn werden geschmolzen und mit Flüssigmetallpumpen in die Modellrinne aus RFM eingebracht. Die Rinne kann über eine spezielle Höhenverstellung aus Kurbelböcken und Hubgetrieben den Bewegungen der Öfen folgen und zwischen 0,5 und 5° geneigt werden. Die max. Förderleistung der Pumpen liegt bei 7l/s, d.h. bei einer Füllmenge von 500kg~ 70l und der höchsten Förderleistung der Pumpen liegt die Versuchszeit bei ca. 10s. Die vergossene Zinnmenge wird durch eine Waage unter dem zweiten Ofen verwogen. Zeitaufgelöst erhält man mit dem Signal den Referenzmassenstrom der Anlage. Außerdem werden der Pegel in der Rinne und die Temperatur der Schmelze gemessen. Die Arbeitstemperaturen liegen zwischen 240 und 380°C.

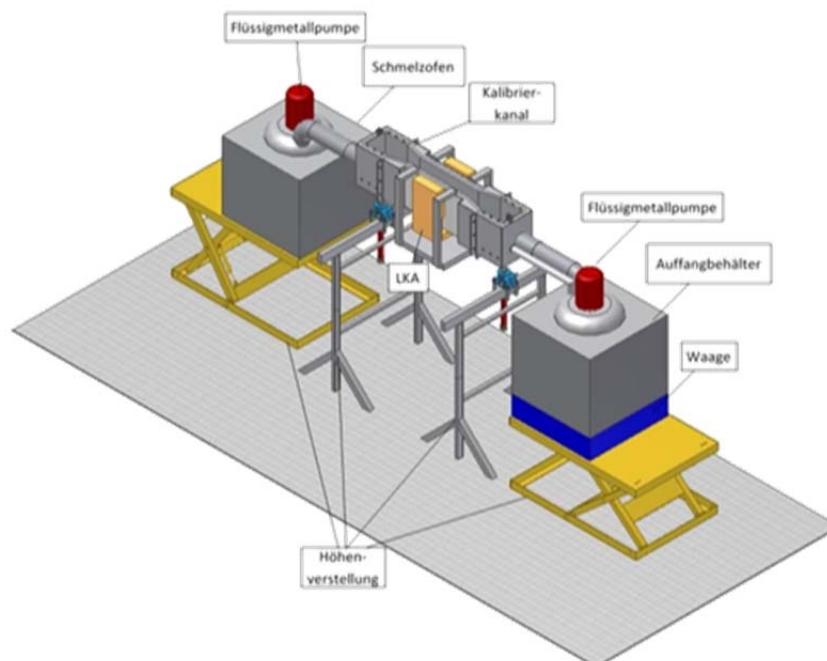


Abbildung 3: Flüssigzinnkalibrieranlage LiTinCa

LiTinCa konnte schließlich 2011 erfolgreich in Betrieb genommen werden. Bei der Kalibrierung wird das Kraftsignal am Lorentzkraft-Anemometer in Abhängigkeit der Pumpenfrequenz und dem Neigungswinkel der Gießrinne bestimmt und mit den Werten am Referenzsystem (Wägemessung) verglichen. Die Höhe des Kraftsignals resultiert dabei im Wesentlichen aus dem Füllstand der Metallschmelze in der Gießrinne. Dieser wird durch Pumpenfrequenz-Neigungswinkel und Gießrinnenquerschnitt bestimmt.

Ergänzend zu den Entwicklungsarbeiten an den Prototypen erfolgte die Entwicklung eines **in-situ Leitfähigkeitsmessmoduls**. Dies ist erforderlich, da die Kenntnis der thermophysikalischen Eigenschaften der Schmelze entscheidend für die Genauigkeit der Durchflussmessung mittels LKA sind. Dazu wurde auf Basis von Literaturrecherchen eine Datenbank erstellt, welche die thermophysikalischen Eigenschaften von verschiedenen Flüssigmetallen enthält. Neben den Daten für die Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von Aluminiumlegierungen umfasst die Datenbank auch die entsprechenden Werte für die temperaturabhängige Viskosität und Dichte. Die Viskosität sowie die Dichte der flüssigen Metalle spielen bei der Kalibrierung der Lorentzkraft-Anemometer ebenfalls eine wichtige Rolle. Desweiteren beschränkt sich die Datenbank nicht nur auf Aluminium und Legierungen, sondern enthält ebenfalls Daten zu zahlreichen anderen flüssigen Metallen und dessen Legierungen (z.B. Kupfer, Magnesium, Zinn usw.). Diese zusätzlichen Daten sind wichtig für eine spätere Erweiterung des Anwendungsspektrums der Lorentzkraft-Anemometrie auf die o.g. anderen Metalle und deren Legierungen. Anschließend wurde ein Prototyp zur elektrischen Leitfähigkeitsmessung entwickelt und gebaut. Grundlage für den Bau des Prototyps war ein kommerziell erhältlicher Metalldetektor, der umgebaut und auf unseren Anwendungsbereich angepasst wurde. Mit diesem Prototyp wurden Kalibriermessungen an etwa 20 Festkörperproben verschiedener Aluminiumlegierungen durchgeführt und mit den jeweils bekannten Spektralanalysedaten verglichen. In diesem Zusammenhang wurden ebenfalls verschiedene Messspulen mit einem festgelegten Arbeitsfrequenzbereich am Prototyp erprobt. Die Messungen haben eine gute Reproduzierbarkeit der Messwerte gezeigt. Erste Testmessungen zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit von Flüssigmetallen wurden durchgeführt. Diese wurden mit einem überarbeiteten Prototyp weiter ausgebaut. Der Prototyp wurde hinsichtlich der Optimierung der Messwerterfassung (z.B. Optimierung des Arbeitsfrequenzbereiches der Messspulen, Kompensierung des Temperatureinflusses) und - Auswertung weiterentwickelt. Es wurde ein alternatives auf der induktiven Tauchsonde basiertes System untersucht und getestet. Im Rahmen der Untersuchungen hat sich ergeben, dass die erforderlichen Genauigkeiten mit beiden Methoden aufgrund der praktischen Bedingungen und Einflussfaktoren am Einsatzort wie z.B. den Temperaturen und elektromagnetischen Störfeldern nicht realisieren lassen. Nach Rücksprache mit Industriepartnern wurde deshalb festgelegt, dass die thermophysikalischen Eigenschaften mittels Kompensationskennlinien im LKA berücksichtigt werden müssen.

Zusätzlich zu den im Arbeitsplan vorgesehenen Entwicklungsarbeiten haben sich im Projektverlauf Tätigkeiten ergeben, die darüber hinaus durchgeführt wurden.

So konnte 2010 auf Basis eines **Workshops zur Anforderungsermittlung** mit potenziellen Kunden und Partnern, in dem die technischen Parameter des LKA präzisiert und über das wirtschaftliche Potenzial sowie weitere Anwendungsfelder diskutiert wurde, ein Pflichtenheft erstellt werden, was die Grundlage für ein ebenfalls erstelltes **Entwicklungskonzept** für den Prototypen der finalen Ausbaustufe darstellt. Dadurch wurde ein marktanforderungsgerechter, professioneller Entwicklungsprozess sichergestellt.

Ebenfalls im Jahr 2010 wurde ein neuer Partner zur Ermittlung der Machbarkeit einer Anwendung von Lorentzkraft-Anemometern zur Optimierung von Dosieröfen (**Erhöhung der Dosiergenauigkeit beim Druckguss**) gewonnen; das Unternehmen hat das wirtschaftliche Potenzial dieser Anwendung bestätigt und stand als Ansprechpartner für technische Fragen sowie zur Unterstützung der Entwicklungsarbeiten zur Verfügung. Die Besonderheit des LKA für diesen Bereich liegt darin, dass es nicht an einer offenen Rinne, sondern ähnlich wie im Stahlbereich an einem geschlossenen Rohr angebracht wird. 2011 wurde eine Machbarkeitsstudie durchgeführt, die zu einem positiven Ergebnis führte. Es haben sich sowohl die technische Realisierbarkeit als auch die praktische Machbarkeit herausgestellt, weshalb dieses neue Anwendungsfeld in den Businessplan integriert wurde.

Neben den technischen Arbeiten wurde im Aluminiumbereich an der Erstellung eines **Businessplans** gearbeitet. Die Tätigkeiten umfassten eine detaillierte Marktanalyse, die Festlegung von Marketingzielen und die Einordnung in das Zielsystem, die Festlegung von taktischen Marketingstrategien, die Planung des Marketing-Mix sowie die Kosten- und Wirtschaftlichkeitsanalyse und Finanzplanung. Auf Basis der Ergebnisse wurde ein Plan für die Unternehmensgründung erstellt. Probleme bereitete die Preisfestlegung, da es den Kooperationspartnern schwer fällt, Angaben über das finanzielle Einsparpotenzial und ihre Zahlungsbereitschaft zu machen. Aus diesem Grund wurde beschlossen, die endgültige Preisstrategie festzulegen, wenn Ergebnisse aus den Langzeittests in der Industrie vorliegen. Dies war in ForMaT nicht endgültig realisierbar, weshalb die Tätigkeiten im sich direkt anschließenden EXIST-Projekt durchgeführt werden.

Neben den im Arbeitsplan vorgesehenen Tätigkeiten konnte im Rahmen von ForMaT eine **Anschlussfinanzierung** an das Projekt gesichert werden. Dies war notwendig, da eine Unternehmensgründung nicht wie zu Projektbeginn geplant direkt nach ForMaT erfolgen konnte. Durch auftretende Veränderungen bei der Prototypentwicklung und das Erkennen der Notwendigkeit von Langzeit-Industrietests wurde bereits Ende 2011 deutlich, dass eine Unternehmensgründung im Jahr 2012 noch nicht möglich ist. Da aber ein enormes wirtschaftliches Potenzial der Messmethode während sämtlicher Projektstätigkeiten bestätigt wurde, wurde ein EXIST-Antrag gestellt, welcher die Finanzierung der weiteren bis zur Gründung notwendigen Entwicklung des LKA und des Gründungsteams sichert. Das EXIST-Team „Lorentzkraft-Anemometer“ wurde eingeladen, vor einer Expertenjury zu präsentieren, welche ein positives Votum für das geplante Vorhaben abgab. Das EXIST-Projekt konnte dadurch ab Juli 2012 direkt im Anschluss an ForMaT starten, die Gründung des Unternehmens ist für Anfang 2014 geplant, wenn die Langzeittests des LKA die praktische Anwendung über einen andauernden Zeitraum unter Produktionsbedingungen bestätigt haben und der Endpreis für das LKA festgelegt wurde.

Das Ziel im Projektbereich Aluminium bestand darin, im Anschluss an ForMaT nach einem stufenweisen Entwicklungsprozess einen verkaufsfähigen Prototyp entwickelt zu haben, der durch ein im Anschluss an ForMaT zu gründendes Unternehmen hergestellt und vermarktet wird. Aufgrund der Verzögerungen beim Entwicklungsprozess durch bis dahin unbekannte Anforderungen der Industrie und die Notwendigkeit von industriellen Langzeittests konnte die Gründung nicht bereits 2012 erfolgen. Am hohen ermittelten Marktpotenzial hat sich jedoch nichts geändert, weshalb die Gründung nur zeitlich verschoben wurde. Am Ende von ForMaT besteht ein fertiger, im Labor getesteter Prototyp (Abb. 4), der nun im Rahmen des EXIST-Projektes Langzeittests beim Kooperationspartner unterläuft. Bei einem planmäßigen Verlauf der Tests soll die Gründung Anfang 2014 erfolgen. Ein weiteres Ziel bestand in der

Entwicklung und im Aufbau einer weltweit einzigartigen Flüssigkalibrieranlage. Diese wurde geplant und gebaut und während ForMaT in Betrieb genommen. Damit ist es gelungen eine Anlage zu entwickeln, an der unter industrienahen Bedingungen LKAs kalibriert werden können.



Abbildung 4: Prototyp des LKA für den Aluminiumbereich

#### Projektbereich B: Stahl

Der erste Schritt bei der Entwicklung von LKA für den Einsatz beim Strangguss von Stahl bestand darin, basierend auf dem bestehenden Konzept einen **ersten Prototyp** zu entwickeln. Dazu wurde die bereits bestehende Kooperation mit einem weltweit agierenden Hersteller von Stranggussanlagen intensiviert. Dabei stellte sich heraus, dass die spezielle Messaufgabe, anders als vorher angenommen, eine zeitlich hochauflösende Bestimmung des Massenstromes im Gießrohr der Stranggussanlage erfordert, weshalb während des Projektes die Untersuchung des dynamischen Systemverhaltens des Messgerätes hohe Priorität erhielt und als zusätzliches Arbeitspaket in den Arbeitsplan aufgenommen wurde. Demgegenüber hat sich ergeben, dass die Leitfähigkeitsmessung im Gegensatz zum Aluminiumbereich hier eine untergeordnete Rolle spielt. Die Betreiber besitzen umfassende Datenbanken mit den elektrischen Leitfähigkeiten der Stahllegierungen. Außerdem muss in der vorliegenden Messaufgabe kein absoluter Wert, sondern nur die Änderung detektiert werden. Deshalb kann vorerst von einer In-Situ Messung der elektrischen Leitfähigkeit abgesehen werden. Es wurde ein erster Funktionsprototyp (ausgerüstet mit Kraftmesssystem, Kühlsystem und Signalauswertung) entwickelt und gebaut. Die Entwicklung basiert auf numerischer Simulation mit Hilfe der Finiten Elemente Methode (FEM), auf dessen Grundlage vor allem das komplexe Design des Magnetsystems entstanden ist. Der Funktionsnachweis ist mit einem extra konstruierten, speziellen Versuchsstand mit vertikaler Strömungsführung erbracht (Abb. 5). Mit dieser Testumgebung ist es möglich das LKA umfassend zu untersuchen, zu kalibrieren und den Messfehler abzuschätzen. Außerdem konnte die Zeitabhängigkeit des Signals weiterführend studiert werden. Neben Kalibrierversuchen konnten an diesem Versuchsstand Untersuchungen zur Sensitivität und zur Empfindlichkeit verschiedener Magnetsysteme durchgeführt werden.



Abbildung 5: Vertikaler Versuchsstand

Während der Fertigung der ersten Ausbaustufe konnten wichtige Erfahrungen gesammelt werden, die sich in der **zweiten Ausbaustufe** widerspiegeln. Das Magnetsystem spielt eine zentrale Rolle bei der Lorentzkraft-Anemometrie und wird demzufolge in die Kategorie „Hohe Priorität“ eingeordnet. Die Halbachanordnung konnte mit Hilfe von numerischen Simulationen (FEM) umfassend untersucht und anschließend zur Anwendung an der Stranggussanlage optimiert werden. Das Ergebnis ist theoretisch, aber vielversprechend. Bei einem bestimmten Verhältnis von Außenradius zu Innenradius und bei einer charakteristischen Länge des Halbachmagneten stellt sich ein Maximum im Wirkungsgrad des LKA ein. Darüber hinaus konnten im Jahr 2011 weitere Designstudien für Magnetsysteme durchgeführt werden. Der limitierende Faktor bei der Produktion solcher komplexen Magnetsysteme bleibt der schwierige Umgang mit Permanentmagneten dieser Größe. Eine automatische bzw. semiautomatische Fertigungsstraße war noch nicht vorhanden. Deshalb erfolgte parallel zum LKA der Bau einer Fügevorrichtung für Halbachanordnungen (Abb. 6). Die erste Anlage wurde 2012 fertiggestellt. Das Kühlsystem ist eine der schwierigsten Entwicklungsaufgaben. Durch die extrem hohen Temperaturen der Stahlschmelze von mehr als  $1500^{\circ}\text{C}$  bedarf es einem sehr komplexen Hitzeschild mit Aktivkühlung, um die gewünschten Temperaturen im inneren des Messgerätes zu erreichen. Die Konzepte wurden mittels numerischer Simulation in ANSYS CFX untersucht und hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit bewertet. Das beste Kühlsystem ist im aktuellen Prototyp verbaut. Das neue Projekt zum zeitlichen Abhängigkeit der Lorentzkraft wurde

theoretisch und experimentell untersucht. Es stellt sich heraus, dass die Reaktionszeit des LKA sehr stark von den verwendeten Kraftsensoren abhängt und in der Größenordnung von ca. 100 Millisekunden liegt. Vom Kunden ist eine Reaktionszeit von ca. 100 Millisekunden für die dynamische Messung des Massenstromes im Gießrohr gefordert. Es konnte nachgewiesen werden, dass das LKA den Kundenanforderungen gerecht wird.

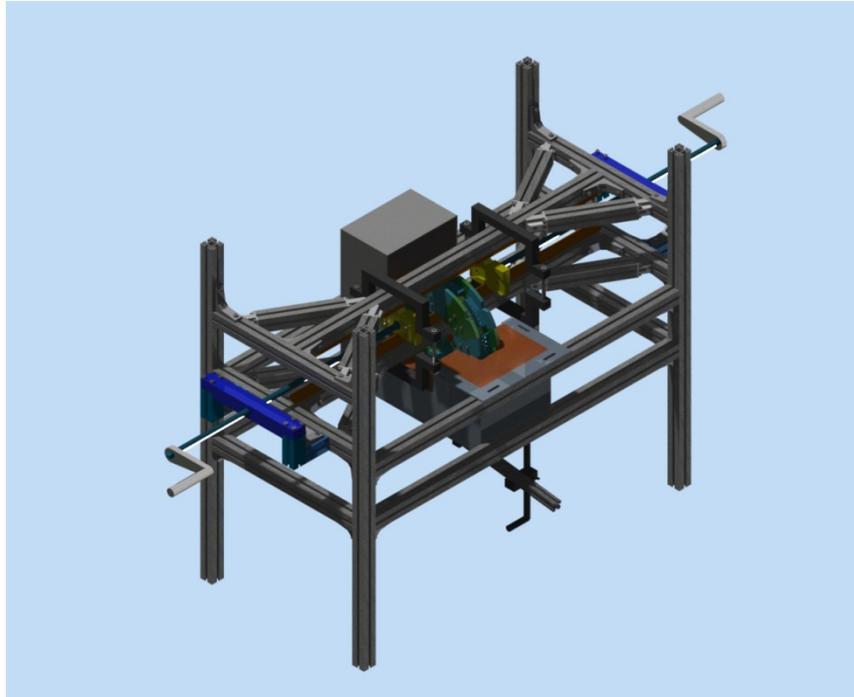


Abbildung 6: Magnetfügeeinrichtung

Mit dem verbesserten Prototyp wurden **Industrietests** an einer Stranggussanlage bei einem Kooperationspartner durchgeführt. Der erste Test wurde ohne Magnetsystem und elektrische Komponenten durchgeführt (Abb. 7), um die Bedingungen vor Ort besser kennenzulernen und die Funktion von Gehäuse und Kühlsystem zu testen. Dieser Zwischenschritt war nötig, da ein vollausgestattetes Lorentzkraft-Anemometer teure und sensible Technik enthält, die dem Test nur bei voll funktionfähigem Kühlsystem standhält. Die Ergebnisse des Leergehäusetests sind positiv. Die Kühlleistung ist ausreichend, um die Temperatur im inneren des Gehäuses unter  $60^{\circ}\text{C}$  zu halten. Der zweite Test wurde mit einem vollausgestatteten LKA durchgeführt, um den Durchfluss im Gießrohr der Stranggussanlage zu messen. Dieser Test hat gezeigt, dass der Produktionsprozess selbst einen großen Einfluss auf die Messungen hat. Es wurde ein Signal aufgezeichnet, welches mit dem Durchfluss im Gießrohr in Verbindung gebracht werden kann. Allerdings ist die Signalstärke noch recht schwach und die externen Einflüsse durch Temperatur, mechanische Schwingungen und elektromagnetisches Rauschen aus der Umgebung überwiegen.

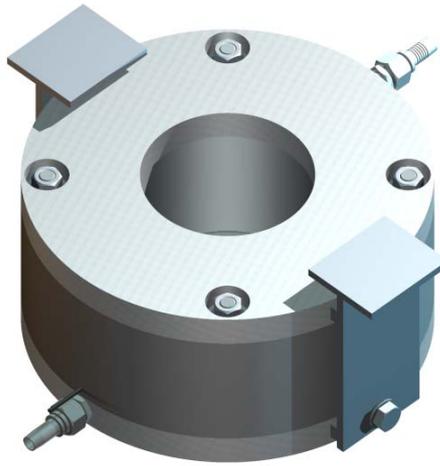


Abbildung 7: Leergehäuse zum Test von Kühlleistung, Vibrationen und Störgrößen

Neben den Entwicklungen des LKA für das Gießrohr wurde ein Konzept zum Einsatz am **Schattenrohr** erstellt. Die Erfahrungen in der Entwicklung des Prototyps für das Gießrohr zeigen, dass es mit einigen Modifikationen möglich ist den Prototyp auch am Schattenrohr einzusetzen. Dazu müssen das Gehäuse und die Subsysteme an die neuen Randbedingungen angepasst werden. Die zur Auslegung der Subsysteme notwendigen numerischen Modelle existieren und sind geprüft. Mit Hilfe der neuen Bauraumabmessung und der Prozessdaten kann das System zur Anwendung am Schattenrohr umkonzipiert werden.

Parallel zur Prototypentwicklung wurde ein Konzept zum **Arbeitsschutz** und zur sicheren Geräteintegration in den Produktionsprozess erstellt.

Sowohl die durchgeführte detaillierte Marktanalyse als auch die intensiven Gespräche mit dem Kooperationspartner haben das große wirtschaftliche Potenzial des LKA bestätigt. Aus diesem Grund wurden bereits verschiedene Verwertungsoptionen unter Berücksichtigung der Kooperation mit dem Partner geprüft. Ein endgültiger Entschluss kann aber erst gefasst werden, wenn das LKA in einer für den potenziellen Kunden zufriedenstellenden Genauigkeit Signale generiert und damit die technische Machbarkeit in Bezug auf die Erfüllung der gegebenen Anforderungen endgültig bestätigt ist.

Die Projektziele im Projektbereich Stahl wurden damit erreicht. Es existieren zwei Prototypen und sowohl die prinzipielle technische Machbarkeit als auch das wirtschaftliche Potenzial haben sich bestätigt. In Anschluss an ForMaT sollen die Entwicklungsarbeiten weiter laufen, sodass das LKA für den Stahlbereich in das Produktportfolio des Gründungsunternehmens aufgenommen werden kann.

#### Projektbereich C: Floatglas

Das primäre Ziel im Technologiebereich Floatglas war es, Verwertungsmöglichkeiten für das erteilte Patent DE 10 2007 038 653 B3 „Anordnung und Verfahren zum elektromagnetischen Dosieren elektrisch leitfähiger Substanzen“ (Karcher et al. 2007) zu analysieren. Das Verfahren beruht darauf, dass ein LKA in Einheit mit einer elektromagnetischen Pumpe zur gleichzeitigen Durchflussmessung und Strömungskontrolle - dem berührungsfreien Dosieren - ein-

gesetzt werden kann. Hierzu bietet der Floatglasbereich ideale Anwendungspotenziale, da die Qualität des auf einem Flüssigzinnbad erstarrenden Glases entscheidend von den Strömungszuständen im Zinn beeinflusst wird. Es waren umfassende Vorstudien notwendig, die das Ziel einer virtuellen Prototypentwicklung verfolgten.

Im Jahr 2010 wurden dazu Modellexperimente zur berührungsfreien Strömungskontrolle von Flüssigmetallschmelzen mittels Lorentzkraft-Anemometrie und elektromagnetischer Pumpe (EMP) in der Modellschmelze GaInSn als Testfluid geplant; ein entsprechender Umlaufkanal EFCO (electromagnetic flow control loop, Abb. 8) wurde aufgebaut und in Betrieb genommen.

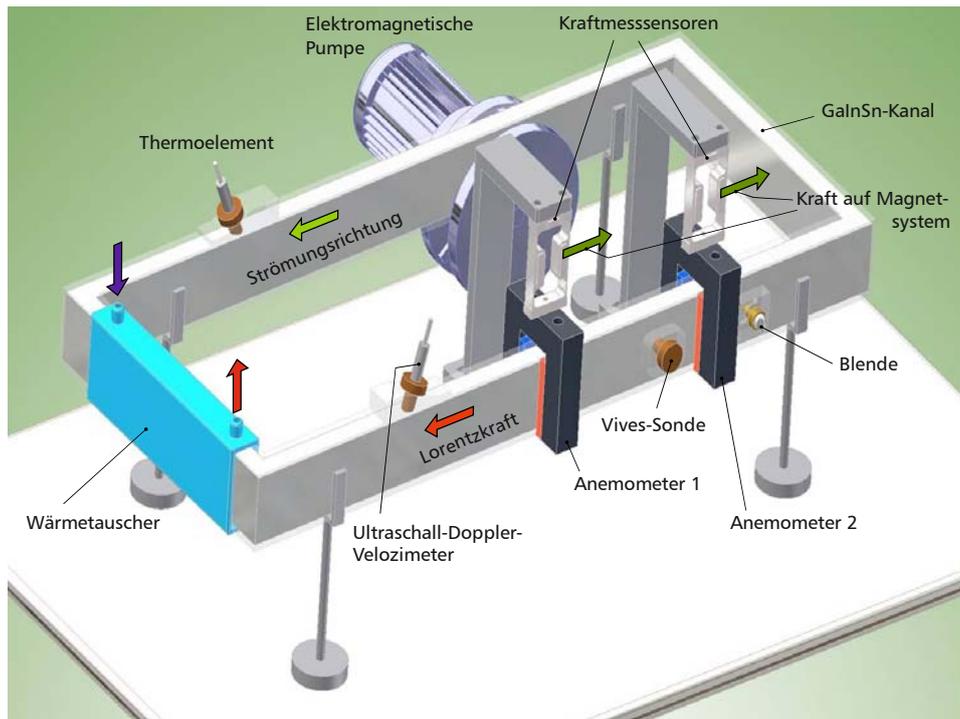


Abbildung 8: Umlaufkanal "EFCO"

In mehreren Testmessungen konnte nachgewiesen werden, dass die berührungsfreie Strömungskontrolle mittels LKA und EMP machbar ist. In EFCO wurde erfolgreich ein neu entwickeltes, berührungsfreies Durchflussmessverfahren getestet, das auf Korrelationsmessungen mittels zweier hintereinander geschalteter LKA beruht (Tandem-Lorentzkraft-Anemometer). Dieses neue Verfahren bietet die Möglichkeit, den Durchfluss ohne die Kenntnis der thermophysikalischen Eigenschaften der Metallschmelze zu bestimmen. Anhand der experimentellen Ergebnisse wurde ein Konzept für eine technische Realisierung der globalen Strömungskontrolle mittels LKA und EMP für eine Flüssigzinnströmung im Floatglas-Prozess erstellt. Die Modellexperimente zur berührungsfreien Strömungskontrolle von Flüssigmetallschmelzen mittels Tandem-Lorentzkraft-Anemometrie und elektromagnetischer Pumpe (EMP) wurden im Umlaufkanal EFCO (electromagnetic flow control loop) unter Einsatz der Modellschmelze GaInSn als Testfluid über das ganze Berichtsjahr 2011 fortgeführt. Mit diesem neuen und mittlerweile patentierten Verfahren, das auf Korrelationsmessungen mittels zweier hintereinander geschalteter LKA beruht, gelingt es, den Durchfluss ohne die Kenntnis der thermophysikalischen Eigenschaften der Metallschmelze zu bestimmen. Hierzu wurde EFCO umgebaut und mit einer komplett neuen Instrumentierung versehen, die hochaufgelöste Korrelationsmessungen erlauben. Zudem wurden für die neuen Messungen verbesserte Lorentzkraft-Anemometer entwickelt, die sich durch deutlich geringe Eigenmasse und

präzisere Kraftmesssensoren auszeichnen. Diese experimentelle Optimierung des Aufbaus war notwendig, da mit der alten Instrumentierung lediglich der Nachweis der Machbarkeit erbracht, nicht aber die gewünschte Genauigkeit erzielt werden konnte. Anhand der experimentellen Ergebnisse wurde ein Konzept für eine technische Realisierung der globalen Strömungskontrolle mittels LKA und EMP nicht nur für eine Flüssigzinnströmung im Floatglas-Prozess, sondern generell für Flüssigmetallströmungen in verschiedenen metallurgischen Anwendungsfeldern erstellt. Die Ergebnisse der Modellexperimente zur berührungsfreien Strömungskontrolle mittels Tandem-LKA und der EMP in verschiedenen metallurgischen Anwendungsbereichen wurden wissenschaftlich dokumentiert, einem internationalen Publikum auf mehreren Konferenzen und Fachtagungen vorgestellt und in Tagungsunterlagen, Konferenzproceedings und referierten Fachzeitschriften publiziert. Es liegen 3D-Zeichnungen des Konzepts vor. In Fachgesprächen mit Floatglasherstellern auf der Glastechnischen Tagung 2011 in Saarbrücken zeigte sich, dass das Verfahren zur berührungsfreien Kontrolle der Zinnbadströmung fachlich akzeptiert, dessen technische Umsetzung in einer realen Anlage zum gegenwärtigen Zeitpunkt jedoch wegen hohem Zeit- und Kostenaufwand als nicht erstrebenswert eingestuft wird.

Zusätzlich zu den ursprünglich geplanten Untersuchungen wurden Modellexperimente für die Nutzung der Lorentzkraft-Anemometrie zur Messung von Oberflächengeschwindigkeiten in Metallschmelzen durchgeführt. Hierzu wurden spezielle Versuchsmodelle von miniaturisierten Lorentzkraft-Anemometern entwickelt und erfolgreich getestet. Ziel dieser Untersuchungen ist, nicht nur eine globale Strömungskontrolle des mittels regelbarer Durchflussmessung, sondern auch eine lokale Kontrolle mittels Oberflächenmessung mit hoher örtlicher Auflösung und Integration von elektromagnetischen Aktuatoren zu erreichen. Hierzu wurde der mit der Modellschmelze GaInSn betriebene Testkanal LiMeSCo (liquid metal surface velocity correlation measurement, Abb. 9) erfolgreich aufgebaut, instrumentiert und in Betrieb genommen.

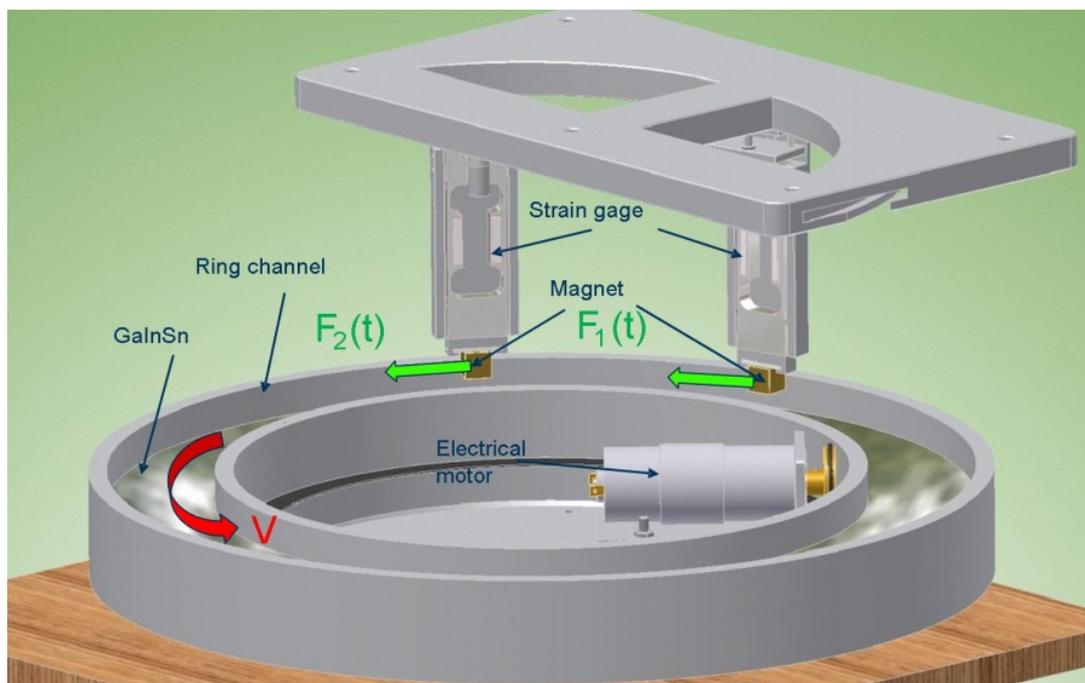


Abbildung 9: Modellteststand LiMeSCo

Auf Basis der Modellexperimente wurde ein erster Prototyp eines Sensors entwickelt, mit dem nach dem Tandem-LKA-Prinzip berührungsfrei die Messung von Oberflächengeschwindigkeiten in heißen Flüssigmetallschmelzen ermöglicht wird. Der Sensorprototyp besteht aus zwei kleinen hintereinander angeordneten Permanentmagneten, an die jeweils ein digitaler Kraftaufnehmer montiert ist. Der Sensor misst die Transitzeit, die ein mit der Strömung mit-schwimmendes Störsignal benötigt, die Strecke zwischen den zwei Magnetsystemen zurück-zulegen. Damit kann die Oberflächengeschwindigkeit bestimmt werden. Der Prototyp ist in einem doppelwandigen Gehäuse untergebracht, um das Messsystem gegen Hitze, Staub und mechanische Erschütterungen zu schützen. Der entwickelte Prototyp zur berührungsfreien Messung von Oberflächengeschwindigkeiten in Flüssigmetallschmelzen wurde in Feldmes-sungen unter industrienahen Bedingungen bei einem Kooperationspartner erfolgreich getestet. Als Schmelzen wurden PbLiSn bei ca. 300°C und Flüssigstahl bei ca. 1500°C benutzt. Zu-sätzlich zu den ursprünglich geplanten numerischen Untersuchungen des Prototyps wurden numerische Simulationen zur berührungsfreien Oberflächengeschwindigkeitsmessung mittels miniaturisierten Tandem-LKA durchgeführt. Hierdurch konnte der Prototyp wärmetechnisch und mechanisch ausgelegt werden. Magnetofluiddynamische Grundlagenberechnungen zur Wirkung von zwei wechselwirkenden lokalisierten Magnetfeldern auf Flüssigmetallströmun-gen halfen, das Messprinzip physikalisch besser zu verstehen.

Bei der Konzepterstellung und –umsetzung wurde mit potenziellen Partnern aus der Floatglas-industrie gesprochen. Mit fortschreitendem Entwicklungsstand werden die Kontakte intensi-viert, was während ForMaT aber noch nicht notwendig war. Die Arbeiten haben gezeigt, dass zwar prinzipielles Interesse seitens der Industrie besteht, jedoch noch viel Grundlagenfor-schung in Projektbereich C notwendig war. Aus diesem Grund wurde der Floatglasbereich nicht in die Gründungsplanung aufgenommen. Das Ziel, ein Konzept zum Einsatz eines LKA in Einheit mit einer elektromagnetischen Pumpe zur gleichzeitigen Durchflussmessung und Strömungskontrolle zu entwickeln, wurde erreicht, erste Verwertungsoptionen wurden mit der Industrie besprochen, das tatsächliche Marktpotenzial wird ermittelt, wenn der Entwicklungs-stand weiter fortgeschritten ist.

## 2. Zahlenmäßiger Nachweis

Im Folgenden werden die bewilligten Mittel den verausgabten gegenübergestellt:

| Position                        | Bewilligte Mittel     | Verausgabte Mittel    |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 0812 (Beschäftigte E12-E15)     | 826.146,00 €          | 794.645,54 €          |
| 0817 (Beschäftigte E1-E11)      | 79.808,00 €           | 94.033,20 €           |
| 0822 (Sonstige Besch.-Entgelte) | 76.315,00 €           | 81.915,67 €           |
| 0831 (Gegenstände bis 410 €)    | 6.959,00 €            | 5.738,10 €            |
| 0835 (Vergabe von Aufträgen)    | 47.180,00 €           | 21.700,96 €           |
| 0843 (Verwaltungsausgaben)      | 80.000,00 €           | 83.164,33 €           |
| 0846 (Dienstreisen)             | 62.300,00 €           | 72.991,66 €           |
| 0850 (Gegenstände über 410 €)   | 292.520,00 €          | 291.588,54 €          |
|                                 | <b>1.471.228,00 €</b> | <b>1.445.778,00 €</b> |

Die Differenz zwischen den bewilligten und verausgabten Mitteln von 25.450 Euro entspricht genau dem Betrag, der in der Position 0835 bis zum Projektende gesperrt war. Im Projektver-lauf hat sich ergeben, dass die Verausgabung dieser Mittel nicht zielfördernd ist. Aus diesem Grund wurde keine Entsperrung beantragt.

### 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

In Zeiten der Rohstoffknappheit steigen in der Metallindustrie die Anforderungen an die Präzision bei der Legierungsherstellung stetig. In einer Aluminiumlegierung ist neben dem Hauptbestandteil **Aluminium** noch mindestens ein weiteres Element als Nebenbestandteil zugesetzt, wodurch die Eigenschaften des metallischen Werkstoffes beeinflusst werden können. Wie bei einem Kochrezept entscheidet ausschließlich die hochgenaue Dosierung der Nebenbestandteile über die Qualität der Legierung. Das Problem im Produktionsprozess besteht darin, dass die erforderliche Menge an Legierungsbestandteilen momentan nur abgeschätzt werden kann. Herkömmliche Messgeräte zur Durchflussbestimmung in kalten Fluiden wie Flügelräder (Benzinzapfsäule) oder Sonden (Wasseruhr) können hier nicht eingesetzt werden, da sie in extrem heißen und aggressiven Substanzen wie flüssigem Aluminium binnen kurzer Zeit zerfressen werden. Keines der klassischen Durchflussmessverfahren kann diese anspruchsvolle Aufgabe lösen. Die Kenntnis der fließenden Aluminiummenge ermöglicht eine exakte Dosierung der Legierungsbestandteile, wodurch sich mehrere Vorteile für den Hersteller ergeben. Zum einen reduziert sich der Ausschuss bei der Produktion von Aluminiumlegierungen. Das heißt, es muss weniger Material erneut aufgeschmolzen werden, was den Energiebedarf und damit die Energiekosten senkt. Zum anderen erhöht sich die Produktqualität, was dem Hersteller einen Wettbewerbsvorteil gegenüber der Konkurrenz verschafft. Außerdem besteht ein Vorteil in der Möglichkeit einer hochgenauen Steuerung der Zugabe von Legierungsbestandteilen. Die Entwicklung eines Messgerätes, das diese anspruchsvolle Aufgabe löst, birgt daher ein großes wirtschaftliches Potenzial. Ein weiteres Anwendungsfeld für das LKA in der Aluminiumindustrie, das sich erst während des ForMaT-Projektes als höchst relevant herausgestellt hat, ist das Druckgussverfahren. Dabei wird flüssiges Aluminium aus dem Dosierofen mit Druck über ein Steigrohr in eine Druckgussmaschine befördert, welche wiederum das Aluminium in Formen drückt. Um die Aluminiummenge exakt zu dosieren ist es wichtig, diese im Dosierofen genau zu steuern. Bisher beruht diese Kenntnis auf Erfahrungswerten über das sogenannte Druck-Zeit-Integral. Damit wird bisher eine Messunsicherheit von 2% erreicht. Kunden der Anbieter von Dosieröfen äußerten allerdings den Wunsch nach einer Unsicherheit von maximal 1%. Dies ist mit einem fertig entwickelten LKA möglich.

Auch die Arbeiten im **Stahlbereich** sind von großer Relevanz für die Industrie. Das Stranggießverfahren wird in den meisten Stahlwerken angewendet. Das Prinzip des Verfahrens ist in Abbildung 10 dargestellt. Der flüssige Stahl strömt von der Pfanne mit einem Fassungsvermögen von bis zu 400 Tonnen durch ein so genanntes Schattenrohr in den Verteiler. Dieser verteilt den Flüssigstahl bei Mehrstranganlagen auf die einzelnen Stränge und leitet die Schmelze durch ein Gießrohr an die Kokille weiter. Der Prozess des Stranggießens ist ein kontinuierliches Verfahren (Endlosstrang), bei dem die Automatisierung eine wichtige Rolle spielt. Bisher dienen lediglich die Füllhöhe und die Stopfenstellung des Verteilers sowie die Strangdicke als indirekte Kontrollparameter für den Steuerkreis des Dosiersystems. Durch direkte Messung des Massenstromes im Gießrohr mittels eines LKA kann eine effiziente und schnelle Gießspiegelregelung bereitgestellt werden. Damit würde sich die Stabilität des Stranggießprozesses erhöhen, was die Qualität des Endproduktes positiv beeinflusst.

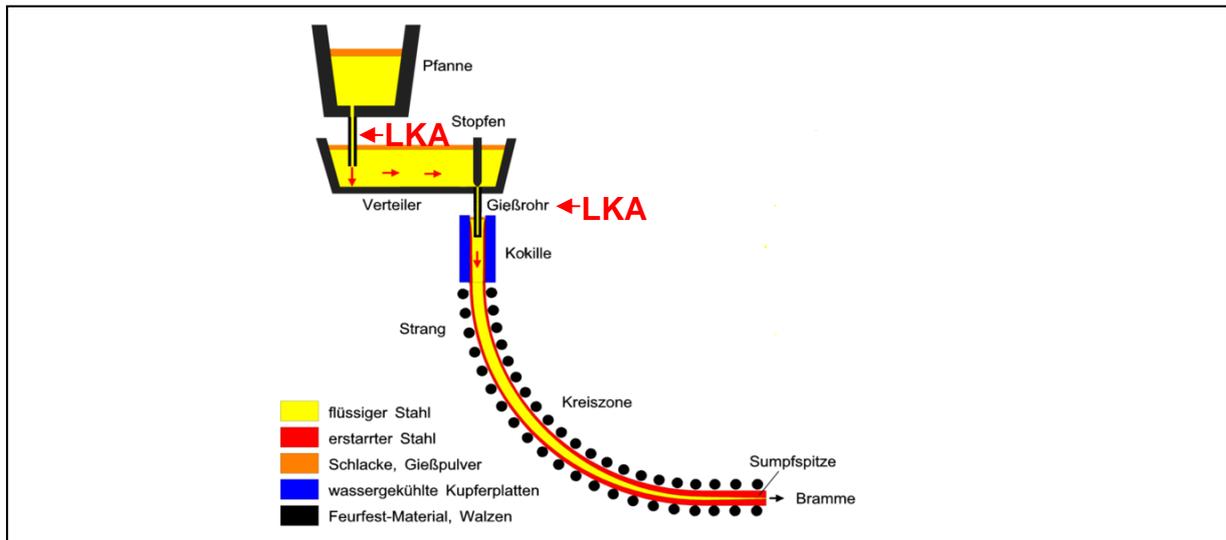


Abbildung 10: Prinzip einer Stranggießanlage mit potenziellen Einsatzbereichen des LKA

Auch der Einsatz von LKA im **Floatglasbereich** bringt den potenziellen Kunden große Vorteile, vor allem hinsichtlich einer Verbesserung der Produktqualität. Beim Floatglas handelt es sich um ein Flachglas, das im Floatverfahren hergestellt wird. Dieses Verfahren ist für die Glasindustrie von großer Bedeutung, weil damit hochwertige, kostenintensive Gläser wie Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG), Teilvorgespanntes Glas (TVG), Solarglas und Spiegelglas produziert werden. Beim Floatverfahren läuft das geschmolzene Glas mit einer Temperatur von  $1100^{\circ}\text{C}$  über eine geneigte Ebene auf ein ca. 60 Meter langes Flüssigzinnbad. Dort kühlt das Glas ab, erstarrt und wird am Ende des Bades mit einer Temperatur von ca.  $600^{\circ}\text{C}$  von einer Walze abgehoben. Mit dem LKA könnte die Strömung im Zinnbad berührungslos gemessen und beeinflusst werden. Ziel dieser Beeinflussung ist die Vergleichmäßigung der Temperaturfelder, da die unterschiedlichen Temperaturen im Zinnbad (höchste Temperaturen kurz vor dem Ausgang des Glases) zu Qualitätsverlusten des Endproduktes in Form von optischen Verwerfungen führen. Mit bisherigen Verfahren ist eine solche Beeinflussung bisher nicht bzw. nicht zufriedenstellend möglich. Im Rahmen des ForMaT-Projektes wurde die prinzipielle technologische Machbarkeit dieses Anwendungsgebietes im Rahmen eines Laborexperiments untersucht und bestätigt. Erste Gespräche mit der Industrie zeigten, dass Interesse an dieser Anwendung besteht. Es existieren aber noch keine detaillierten Informationen über Anforderungen, Voraussetzungen und den tatsächlichen Nutzen durch das LKA. Aus diesem Grund beschränken sich die weiteren Arbeiten in diesem Bereich künftig zunächst auf Universitätsforschung.

#### 4. Nutzen und Verwertbarkeit

Beim LKA handelt es sich unabhängig vom Anwendungsbereich aufgrund des hohen Innovationsgrades um eine radikale, technologische Innovation. Das ökonomisch herausragende Problem der Durchflussmessung in Hochtemperaturschmelzen wird mit dem LKA erstmals zufriedenstellend gelöst. Bisherige erste Lösungsansätze scheitern an Hüttenfestigkeit, Praxistauglichkeit oder Genauigkeit, weshalb auf dem Markt kein vergleichbares Messgerät vorhanden ist. Das wesentliche Problem einer solchen Messung besteht darin, dass auf direkten Kontakt mit der flüssigen Schmelze aufgrund der hohen Temperatur und Aggressivität des Mediums verzichtet werden muss. Eine in die Flüssigkeit eingetauchte Elektrode beispielsweise würde schnell erodieren und die Schmelze verunreinigen. Folglich entfallen herkömmliche mechanische Durchflussmessgeräte wie z.B. Flügelräder, Vortex- oder thermische Sen-

soren. Die Besonderheit beim LKA besteht in der Berührungslosigkeit der Messmethode. Durch diese Technologie ist es erstmals möglich, die Menge an strömendem Flüssigmetall exakt zu bestimmen. Außerdem weist das LKA im Vergleich zu den bisherigen Methoden zur Massebestimmung in der Aluminiumindustrie entscheidende Vorteile auf, welche einen maximalen Kundennutzen stiften.

Die Nutzung des LKA birgt daher in allen Anwendungsbereichen für den Kunden großes Potenzial zur Optimierung des Produktionsprozesses. Für die Durchflussmessung im Aluminiumbereich besteht ein zentraler Kundennutzen in der Möglichkeit, die Genauigkeit beim Legierungsprozess zu erhöhen und damit Ressourcen (Material, Energie und Arbeitszeit) zu sparen und den durch Fehllegierungen bedingten Ausschuss deutlich zu verringern. Ein weiterer wichtiger Vorteil ist durch die Möglichkeit einer genauen Ermittlung der Schrottausbeute gegeben. Bisher gibt es keine Methode, mit der genau gemessen werden kann, wie viel Aluminium aus dem eingeschmolzenen Schrott gewonnen werden konnte. Dies führt zu Streitigkeiten mit den Lieferanten und ist nach Aussage mehrerer Produktionsleiter ein großes Problem, dessen Lösung enormes wirtschaftliches Potenzial mit sich bringt. Für den Druckgussbereich besteht der Vorteil der LKA-Nutzung in einer deutlichen Erhöhung der Dosiergenauigkeit. Dadurch werden ebenfalls der Ausschuss durch Fehldosierungen der Aluminiummenge gesenkt und gleichzeitig der Einsatz von Energie und Arbeitszeit bei durch Ausschuss bedingten notwendigen Neueinschmelzungen vermieden. Im Stahlbereich erhöht sich durch den Einsatz von LKA die Stabilität des Stranggießprozesses, was die Qualität des Endproduktes positiv beeinflusst. Auch im Floatglasbereich bringt der Einsatz von LKA Qualitätsverbesserungen mit sich.

Neben den genannten, innovativen Optimierungsmöglichkeiten im Produktionsprozess weist das LKA folgende Vorteile auf, die die Akzeptanzquote bei potenziellen Kunden erhöhen:

- **Berührungslosigkeit**  
Das LKA kommt nicht mit der Schmelze in Kontakt. Dadurch ist es verschleißfrei, da keine Sonden oder ähnliches durch das aggressive Aluminium zerstört werden. Außerdem liegt ein Vorteil der Berührungslosigkeit darin, dass der Produktionsprozess durch das Gerät nicht verändert wird.
- **Genauigkeit**  
Das LKA soll eine Messunsicherheit von 0,5% erreichen. Weder im Anwendungsfeld R1 noch bei P1 gibt es bisher die Möglichkeit, die gegebenen Problemstellungen mit dieser Genauigkeit zu lösen. Dies ist ein wichtiges Alleinstellungsmerkmal des Messgerätes.
- **Robustheit und Unempfindlichkeit**  
Das LKA wird so konstruiert, dass es ohne Probleme für den Einsatz unter den extremen Bedingungen in Aluminiumschmelzwerken geeignet ist. Die extrem hohen Temperaturen und der raue Umgang mit Produktionsmitteln durch die Mitarbeiter stören das Messgerät dadurch nicht. Durch den Einsatz hochwertiger und robuster Materialien ist das Gerät sehr wartungsarm.

Ein weiterer Vorteil des LKA liegt in der Flexibilität der Anwendungsbereiche. Neben den beschriebenen Entwicklungsperspektiven sind zahlreiche Anwendungsfelder denkbar, bei denen ein Nutzen durch Durchflussmessung in metallischen Schmelzen denkbar ist. Geplant ist, diese im Laufe der Zeit durch einen F&E-Verantwortlichen im Gründungsunternehmen zu analysieren.

Während des ForMaT-Projektes haben qualitative und quantitative Analysen das große wirtschaftliche Potenzial des LKA vor allem für den Aluminium- und Stahlbereich bestätigt. Durch das sich anschließende EXIST-Projekt gewinnt das Projektteam die Möglichkeit, die Verwertung des LKA weiter voranzutreiben und die geplante Unternehmensgründung mit zeitlichem Verzug zu realisieren.

## **5. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Es sind keine wissenschaftlich-technologischen Ergebnisse von Dritter Seite bekannt, die sich während der ForMaT-Laufzeit ergeben haben. Im Vergleich zum Zeitpunkt der Antragstellung wurden, trotz laufender Marktbeobachtungen, keine weiteren Konkurrenzprodukte und -verfahren bekannt. Auch Forschungsergebnisse anderer Einrichtungen, die das Verwertungsziel des LKA behindern könnten, sind dem Projektteam nicht bekannt.

## **6. Veröffentlichungen**

Jian, D.; Karcher, Ch. (2011): Electromagnetic flow rate measurement in turbulent liquid metal channel flow: experimental investigations and numerical modeling, Proceedings of 82th Annual Scientific Conference of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics (GAMM), Graz, Austria, 18. - 21. April 2011, pp. 645-646.

Jian, D.; Karcher, Ch. (2011): Berührungsfreie globale und lokale Strömungskontrolle in Flüssigmetallschmelzen. Posterbeitrag bei der 85. Glastechnischen Tagung, Saarbrücken, 30.05.-01.06. 2011.

Jian, D.; Karcher, Ch. (2011): Electromagnetic flow control using Lorentz force velocimetry: experimental investigations and numerical modeling. Proceeding of 8th PAMIR International Conference, Borgo, Corsica, France, 05.-09. Sept. 2011.

Jian, D.; Karcher, Ch. (2011): Electromagnetic flowrate measurements using tandem Lorentz Force Velocimetry as a cross-correlation flowmeter, Proceeding of 56th International Scientific Colloquium (IWK), Ilmenau University of Technology, 12 - 16 Sept 2011.

Jian, D.; Karcher, Ch. (2011): Non-contact local flow measurement using Lorentz force velocimetry in tandem arrangement, Proceeding of International symposium on liquid metal processing and casting (LMPC), Nancy, France 25.-28. Sept. 2011.

Jian, D.; Karcher, Ch. (2011): Entwicklung eines elektromagnetischen Strömungskontrollsystems zur lokalen und globalen Geschwindigkeitsbestimmung in metallurgischen Prozessen, Proceedings of Workshop Elektroprozesstechnik (EPT) Ilmenau , 06.-07.Okt.2011.

Jian, D.; Karcher, Ch. (2012): Electromagnetic flow measurements in liquid metals using time-of-flight Lorentz force velocimetry, accepted for publication in Measurement Science and Technology, 2012.

Jian, D.; Karcher, Ch. (2012): Non-contact measurements in liquid metal free-surface flow using time-of-flight Lorentz force velocimetry, TMS Annual Meeting & Exhibition, Orlando, FL, USA, 11. - 15. March 2012.

Jian, D.; Karcher, Ch. (2012): Flow rate measurements in turbulent liquid metal channel flow using time-of-flight Lorentz force velocimetry, 83rd Annual Meeting of the International As-

sociation of Applied Mathematics and Mechanics (GAMM), Darmstadt, Germany, 26.-30.March, 2012.

Jian, D.; Karcher, Ch. (2012): Electromagnetic surface velocity measurement in liquid metal melts using time-of-flight Lorentz Force Velocimetry, Poster at 5th International Congress on the Science and Technology of Steelmaking (ICS), Dresden, Germany, 01.-03. October 2012.

Jian, D.; Karcher, Ch.; Thess, A.; Xu, X.; Deng, A.; Wang, X. (2012): Development of Non-contact electromagnetic surface velocity sensor for molten metal using time-of-flight technique, 7th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials (EPM), 22-26. Oct. BeiJing China 2012; in: Journal of Iron and Steel Research, International, Vol. 19, Supplement 1-1, pages 509 – 513.

Jian, D.; Karcher, Ch. (2012): Flowrate measurement in turbulent liquid metal channel flow using time-of-flight Lorentz force velocimetry: experimental investigations and numerical modeling, Poster at 7th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials (EPM), 22-26. Oct. BeiJing China 2012; in: Journal of Iron and Steel Research, International, Vol. 19, Supplement 1-1, pages 582 - 585

Klein, R.; Guttzeit, M.; Thess, A. (2011): "Lorentzkraft-Anemometer - die Wasseruhr der Gießereiindustrie" Venture Capital CAMPUS 10/2011, Ilmenau.

Klein, R.; Gramss, M.; Kolesnikov, Y.; Karcher, Ch.; Thess, A. (2010): Lorentzkraft-Anemometrie: Ein Verfahren zur berührungslosen Durchflussmessung in Hochtemperaturschmelzen, Symposium Stranggießen von NE-Metallen, 11/2010, Neu-Ulm.

Klein, R.; Guttzeit, M.; Thess, A. (2010): "Hochtechnologie Lorentzkraft-Anemometrie", Venture Capital Campus, 08/2010, Ilmenau.

Klein, R.; Thess, A.; Kolesnikov, Y.; Karcher, Ch.; Minchenya, V. (2010): Lorentzkraft-Anemometrie: Ein Verfahren zur berührungslosen Durchflussmessung in Hochtemperaturschmelzen, ELMUG-Technologiekonferenz, 07/2010, Suhl.

Klein, R.; Weidemann, Ch.; Wang, X.; Gramss, M.; Alferenok, A.; Thieme, A.; Kolesnikov, Y.; Karcher, Ch.; Thess, A. (2012): Lorentzkraft-Anemometrie für die berührungslose Durchflussmessung von Metallschmelzen, tm-Technisches Messen 2012 No. 79/9, S. 394, 5 Seiten.

Kolesnikov, Y. (2011): "Liquid metal flow under inhomogeneous magnetic field", Annual Meeting of the Materials, Minerals and Metals Society (TMS) San Diego 26.2.-3.3.2011.

Kolesnikov, Y.; Karcher, Ch.; Thess, A. (2011): Lorentz Force Flowmeter for Liquid Aluminum: Laboratory Experiments and Plant Tests, in: Metallurgical and Materials Transactions B, DOI: 10.1007/s11663-011-9477-6.

Minchenya, V.; Karcher, Ch.; Kolesnikov, Y.; Thess, A. (2011): Calibration of the Lorentz force flowmeter, Flow Measurement and Instrumentation, 22, 242-247.

Minchenya, V.; Karcher, Ch.; Kolesnikov, Y.; Thess, A. (2011): Calibration of the Lorentz force flowmeter. Flow measurement and instrumentation 22; pp. 242-247.

Thess, A. (2012): New Developments in Lorentz Force Velocimetry. In: Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Processing of Materials, Beijing, October 2012.

Thess, A. (2011): "Lorentz force velocimetry: fundamentals and industrial applications", Übersichtsvortrag auf dem Annual Meeting of the Materials, Minerals and Metals Society (TMS) San Diego 26.2.-3.3.2011.

Wang, X.; Kolesnikov, Y.; Thess, A. (2012): Numerical calibration of a Lorentz force flowmeter. In: Measurement Science and Technology, Vol. 23, pp. 1-9.

Wang, X.; Klein, R.; Kolesnikov, Y.; Thess, A. (2011): Application of Lorentz Force Velocimetry to Open Channel Flow, Mat. Sci. For., 690, 99-102.

Weidermann, Ch.; Thess, A.; Lieftucht, D.; Reifferscheid, M. (2012): Application of Lorentz force velocimetry in continuous casting of steel. In: Proceedings of the 5th International Congress on the Science and Technology of Steelmaking, 2012, Dresden.

Weidermann, Ch. (2012): Design and laboratory test of a Lorentz force flowmeter for pipe flows. PhD-Thesis, Ilmenau University of Technology, 2012 (Einreichung Dezember 2012).

Weidermann, Ch und Thess, A.: Lorentz force and Joule heat induced in an electrically conducting plate moving with time-dependent velocity under the influence of a homogeneous magnetic field. J. Eng. Math. (in preparation)

#### **Patente:**

Patent DE 10 2007 038 635 B3. Verfahren und Anordnung zum elektromagnetischen Dosieren elektrisch leitfähiger Substanzen. Karcher Ch.; Kolesnikov, Y.; Thess, A., 2007.

Patent WO 2007/033982 Verfahren und Anordnung zum elektromagnetischen Dosieren elektrisch leitfähiger Substanzen. Karcher Ch.; Kolesnikov, Y.; Thess, A., 2007.

Patent WO/2011/015469. Device and method for measuring the motion speed of moved electrically conductive substances. A. Thess, V. Minchenya, Ch. Karcher, Y. Kolesnikov, B. Knaepen, A. Viré, 2011.

Patent DE10 2009 036 703 A1. Vorrichtung und Verfahren zur Messung der Bewegungsgeschwindigkeit bewegter elektrisch leitfähiger Substanzen. A. Thess, V. Minchenya, Ch. Karcher, Y. Kolesnikov, B. Knaepen, A. Viré, 2011.

## Berichtsblatt

|  |   |
|--|---|
| 1. ISBN oder ISSN  | 2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)<br>Schlussbericht |
| 3. Titel<br><b>Lorentzkraft-Anemometer</b>   |   |
| 4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]<br>Prof. Dr. André Thess<br>Prof. Dr. Norbert Bach<br>Dr. Rico Klein<br>Dipl.-Kffr. Mandy Gutzzeit  | 5. Abschlussdatum des Vorhabens<br>30.06.2012                           |
|  | 6. Veröffentlichungsdatum<br>01.01.2013                                 |
|  | 7. Form der Publikation<br>Abschlussbericht                             |
| 8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)<br><br>Technische Universität Ilmenau<br>Fakultät für Maschinenbau<br>Fachgebiet Thermo- und Magnetofluidynamik<br>Postfach 100565<br>98684 Ilmenau | 9. Ber. Nr. Durchführende Institution                                   |
|  | 10. Förderkennzeichen<br>03FO2292                                       |
|  | 11. Seitenzahl<br>25  |
| 12. Fördernde Institution (Name, Adresse)<br><br>Bundesministerium für<br>Bildung und Forschung (BMBF)<br>53170 Bonn   | 13. Literaturangaben  |
|  | 14. Tabellen  |
|  | 15. Abbildungen   |
| 16. Zusätzliche Angaben  |   |
| 17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)  |   |

## 18. Kurzfassung

Die Messung von Strömungsgeschwindigkeiten beim Gießen von Aluminium, Stahl und Glas galt bis vor kurzem als ungelöstes Problem mit herausragender wirtschaftlicher Bedeutung. Das Fachgebiet Thermo- und Magnetofluidynamik der TU Ilmenau hat zur Lösung dieses Problems ein neues Messverfahren namens Lorentzkraft-Anemometrie entwickelt, in mehreren Industriefirmen erprobt und in der ersten Phase des ForMaT-Projekts „Lorentzkraft-Anemometer“ (LKA) ein großes Verwertungspotenzial für diese Technologie identifiziert.

In Zeiten der Rohstoffknappheit steigen in der Metallindustrie die Anforderungen an die Präzision bei der Legierungsherstellung stetig. Oft ist die genaue Messung der Durchflussmengen von Legierungskomponenten die größte Schwierigkeit bei der Entwicklung innovativer Produktionstechnologien. Das Problem besteht darin, dass herkömmliche Messgeräte zur Durchflussbestimmung in kalten Fluiden wie Flügelräder (Benzinzapfsäule) oder Sonden (Wasseruhr) in extrem heißen und aggressiven Substanzen wie flüssigem Stahl oder Aluminium binnen weniger Minuten zerfressen werden. Keine klassischen Durchflussmessverfahren können diese anspruchsvolle Aufgabe lösen. Mit dem entwickelten LKA-Messgerät soll dies ermöglicht werden.

Um solch ein Messverfahren erfolgreich vermarkten zu können, ist die frühzeitige Überprüfung der Verwertungsmöglichkeiten und des Potenzials von immenser Bedeutung. Im Rahmen des interdisziplinären ForMaT-Projektes „Lorentzkraft-Anemometer“ wurden in einer ersten Phase die Anwendungsfelder „Aluminium“, „Stahl“ und „Floatglas“ als wirtschaftlich Erfolg versprechend identifiziert. In Phase 2 des ForMaT-Projekts wurden die vorhandenen Entwicklungen auf diesen Gebieten in Hinblick auf spezifische Markt- und Kundenanforderungen weitergeführt und ein Verwertungskonzept für Lorentzkraft-Anemometer erstellt. Folgende zentrale Ergebnisse wurden dabei erreicht:

Für den Projektbereich Aluminium wurde ein bestehender Prototyp zum Einsatz an offenen Rinnen beim Gießen von Aluminium stufenweise weiterentwickelt und sowohl im Labor als auch bei einem Industriepartner getestet. Zusätzlich wurde an der TU Ilmenau eine weltweit einzigartige Anlage errichtet, die mit Flüssigzinn arbeitet und der Kalibrierung von LKA unter industrienahen Bedingungen dient. Am Ende von ForMaT besteht ein auf Kundenbedürfnisse ausgerichteter Prototyp, der in einem Anschlussprojekt Langzeitindustrietests durchlaufen soll. Zusätzlich wurde mit der Erhöhung der Dosiergenauigkeit beim Druckguss ein weiteres potenzielles Anwendungsfeld für das LKA entdeckt. Sowohl die technologische Machbarkeit als auch das Marktpotenzial haben sich in ForMaT als gegeben herausgestellt.

Im Projektbereich Stahl wurde ebenfalls ein in zwei Stufen entwickelter Prototyp zum Einsatz an Stranggussanlagen der Stahlindustrie entwickelt und an einem eigens dafür errichteten vertikalen Versuchsstand zur Trockenkalibrierung untersucht. Auch Industrietests beim Industriepartner konnten erfolgreich durchgeführt werden. Außerdem wurde im Rahmen der Entwicklungsarbeiten eine Vorrichtung zum semiautomatischen Fügen von Permanentmagneten zu komplexen Magnetsystemen gebaut.

Im Projektbereich Floatglas wurde für den Einsatz im Zinnbad bei der Abkühlung des Floatglases ein Kreuzkorrelationsmessverfahren mittels Tandem-LKA entwickelt, was in Experimenten im dafür speziell errichteten Umlaufkanal EFCO (electromagnetic flow control loop) getestet wurde. Diese Entwicklungen sorgen perspektivisch dafür, dass die Genauigkeit der Messung mittels LKA nicht mehr von der Kenntnis der thermophysikalischen Eigenschaften der Metallschmelze abhängt. Zusätzlich zu den ursprünglich geplanten Untersuchungen wurden Modellexperimente im neu errichteten Modellteststand LiMeSCo (liquid metal surface velocity correlation measurement) für die Nutzung der Lorentzkraft-Anemometrie zur Messung von Oberflächengeschwindigkeiten in Metallschmelzen durchgeführt.

Projektgruppenübergreifend besteht das Ergebnis von ForMaT darin, dass am ursprünglichen Plan, eine Unternehmensgründung im Umfeld der TU Ilmenau einzuleiten, festgehalten wird. Das Marktpotenzial hat sich vor allem in den Bereichen Aluminium und Stahl als sehr hoch herausgestellt. Die Existenzgründung ist nach Abschluss des EXIST Forschungstransfer-Projektes geplant, welches direkt im Anschluss an ForMaT startete. Bis dahin sind weitere Industrietests, im Aluminiumbereich vor allem Langzeittests, notwendig. Das Anwendungsfeld Floatglas erfordert weitere intensive Untersuchungen im Bereich der Grundlagenforschung, sodass es zunächst nicht in die Gründungsplanungsaktivitäten integriert wird.

## 19. Schlagwörter

ForMaT, Unternehmen Region, Innovation, Durchflussmessung, Strömungsmesstechnik, Kraftmesstechnik, Metallurgie, Verwertungskonzept

## 20. Verlag

## 21. Preis

## Document Control Sheet

|   |  |
|---|--|
| 1. ISBN or ISSN   | 2. type of document (e.g. report, publication)<br>report |
| 3. title<br><b>Lorentzkraft-Anemometer</b>  |  |
| 4. author(s) (family name, first name(s))<br>Prof. Dr. André Thess<br>Prof. Dr. Norbert Bach<br>Dr. Rico Klein<br>Dipl.-Kffr. Mandy Guttzeit  | 5. end of project<br>2012-06-30                          |
|   | 6. publication date<br>2013-01-01                        |
|   | 7. form of publication<br>final report                   |
| 8. performing organization(s) (name, address)<br><br>Technische Universität Ilmenau<br>Fakultät für Maschinenbau<br>Fachgebiet Thermo- und Magnetofluidynamik<br>Postfach 100565<br>98684 Ilmenau | 9. originator's report no.                               |
|   | 10. reference no.<br>03FO2292                            |
|   | 11. no. of pages<br>25                                   |
| 12. sponsoring agency (name, address)<br><br>Bundesministerium für<br>Bildung und Forschung (BMBF)<br>53170 Bonn  | 13. no. of references                                    |
|   | 14. no. of tables  |
|   | 15. no. of figures                                       |
| 16. supplementary notes   |  |
| 17. presented at (title, place, date)   |  |

18. abstract

The measurement of flow velocities in casting aluminum, iron, and glass has been an unsolved problem with enormous economic potential. At the Institute of Thermodynamic and Fluid Mechanics at Ilmenau University of Technology a new measurement technique called Lorentz Force Velocimetry was developed as a contactless way to measure velocities in high temperature fluids. The general principle has been successfully tested in several industrial applications; a considerably large potential for commercial utilization of this technique was identified during the first phase of the ForMaT project.

Shortage of raw material forces the metal industry (especially aluminum) to put more effort in precision and control during the preparation of alloys. The exact knowledge of the flow rate of alloy components is the limiting factor in the development of innovative product technologies. Ordinary measurement techniques like fly wheel velocimeters, turbine flow meters, and Venturi nozzles that are used in cold liquids, like gasoline and water, fail in the chemically aggressive high-temperature melts due to rapid corrosion. No classical flow measurement technique can solve this problem. The newly developed LFV technique is a powerful tool to facilitate such flow measurements.

To develop the measurement technique according to market requirements, knowledge about potential application fields and their market potential is critical to success. During the first stage of the interdisciplinary ForMaT project "Lorentz Force Velocimeter" the application fields "aluminum", "steel" and "float glass" have been identified as economically promising. In the second stage of ForMaT, the existing designs and developments in these fields were continued with regard to specific customer and market needs. Furthermore, a business model for commercialization of the technique has been developed. The following important results were achieved:

In the project field aluminum an existing prototype for the application at open launders during the casting of aluminum has been refined stepwise. Furthermore, a unique calibration equipment of Lorentz force velocimeters under industry-oriented conditions called LiTinCa has been developed; LiTinCa uses liquid tin for calibration. At the end of ForMaT an improved prototype of the Lorentz force velocimeter proved workable in a first aluminium cast industry environment test. Next steps are long-term industry tests in a follow-up third party funded project. In addition with the increase of dose exactness during die casting, a new application field in the aluminum area has been discovered. Both technological feasibility and market potential are given for this new application domain.

In the project field steel also a prototype for application at continuous casting of steel has been developed in two stages. Further refinements included a vertical experimental rig for dry calibration which was constructed specifically for this purpose. Also, industry tests were conducted at the production line of our co-operation partner. Furthermore, a device for semi-automatic joining of permanent magnets to complex magnet systems has been built.

In the field of float glass a cross correlation measuring system using Tandem-LKA for application in the tin bath during the cooling process of float glass has been developed. The measuring system was tested in experiments in a closed channel "EFCO" (electromagnetic flow control loop); this channel was installed specifically for this purpose. In the future these developments will allow to achieve accuracy of the LKA without knowledge of thermo-physical characteristics of the molten metal. In addition to the originally planned research model experiments were carried out in the newly constructed model test rig "LiMeSCO" (liquid metal surface velocity correlation measurement) allowing to measure surface velocity in molten metal based on Lorentz force velocimetry.

An overall result of the ForMaT project is the continuance of the plan to found an enterprise in Ilmenau. Especially in the fields of aluminum and steel a high market potential has been revealed by our industry partners. The foundation of the company should take place after having finished the third-party funded EXIST project, which is a follow-up project to ForMaT. Additional industrial (long-time) tests are necessary. The application field of float glass requires deep fundamental research, so that it will not be integrated in the initial foundation activities.

19. keywords

20 publisher

21. price