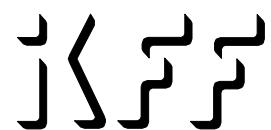


Universität Stuttgart

Jahresbericht IKFF 2014

Institut für Konstruktion und
Fertigung in der Feinwerktechnik



Herausgeber und Verlag:

Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik
Pfaffenwaldring 9
70550 Stuttgart

Tel.: 0711 685-66402

Fax: 0711 685-56402

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe

Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik, Februar 2014

1	DAS INSTITUT	1
1.1	Mitarbeiter	1
1.2	Jahresrückblick	2
1.3	Wissenschaftliche Arbeitsgebiete	6
2	LEHRVERANSTALTUNGEN	9
2.1	Vorlesungen und Übungen für das Bachelorstudium.....	9
2.2	Vorlesungen und Übungen für das Bachelor- und Masterstudium und das Hauptdiplom	9
2.3	Prüfungen	12
2.4	Praktika.....	13
2.5	Projektarbeiten.....	15
2.6	Seminar Feinwerktechnik (WS 2013/14 und SS 2014)	16
3	WISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN, STUDIEN-, DIPLOM- UND BACHELORARBEITEN	19
3.1	Dissertationen	19
3.2	Master-/Diplomarbeiten am IKFF (WS 2013/14 und SS 2014)	19
3.3	Bachelorarbeiten am IKFF (WS 2013/14 und SS 2014)	20
3.4	Studienarbeiten am IKFF (WS 2013/14 und SS 2014)	22
3.5	Preise.....	23
4	ARBEITSGEBIETE DER WISSENSCHAFTLICHEN MITARBEITER ..	24
4.1	Aktorik.....	24
4.2	Spritzgießen.....	26
4.3	Zuverlässigkeitstechnik.....	28
5	ÖFFENTLICHKEITSARBEIT	29
5.1	Veröffentlichungen	29
5.2	Gremienarbeit	30
5.3	Tag der Wissenschaft	30
6	KONGRESSE, TAGUNGEN UND MESSEN	31
7	WERKSTATTBERICHT	32
8	ANHANG - Ausgewählte Veröffentlichungen	32

1 DAS INSTITUT

1.1 Mitarbeiter

Institutsleitung:

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe

Emeritus:

Prof. Dipl.-Ing. Artur Jung

Sekretariat:

Ulrike Ortner

Kornelia Wanner

Unbefristeter wissenschaftlicher Mitarbeiter:

Akademischer Oberrat:

Dipl.-Ing. Eberhard Burkard

Befristete wissenschaftliche Mitarbeiter:

Dipl.-Ing. Sebastian Bobrowski

Dipl.-Ing. Matthias Engel (Graduate Student der GSaME)

Dipl.-Ing. Bastian Keller

Dipl.-Ing. Judith Henzler (geb. Kofler)

Dipl.-Ing. (FH) Daniel Kreuzer (Graduate Student der GSaME)

Dipl.-Ing. Matthias Maier

Dipl.-Ing. Andreas Maucher

Dipl.-Ing. Minh Nguyen (Graduate Student der GSaME)

Dipl.-Ing. Adrian Retzbach

Dipl.-Ing. Benjamin Reutzsch

Dipl.-Ing. Gregor Schattka

Modellbau und Versuchswerkstatt:

Ralf Berwanger

Stefan Schneider

Wissenschaftliche Hilfskräfte:

Dürr, Christian

Junginger, Elias

Karlowitz, Andreas

Kayarat, Rekha

Kraus, Corinna

Laabs, Kevin

Litwin, Thomas

Maul, Markus

Nußbaumer, Ralf

Riggenmann, Simon

Schneider, Marcel

Strohmeyr, Simon

Wolf, Marius

1.2 Jahresrückblick**Brand im Pfaffenwaldring 9**

Das einschneidendste Ereignis des zurückliegenden Jahres 2014 war ein Brand im Pfaffenwaldring 9. Am Sonntag, den 15.06.2014 brannte es im 3. Obergeschoss, also genau unter unseren Institutsräumen. Im 3. Obergeschoss kam es zu einem Totalschaden. Aber auch unsere Etage war massiv betroffen. Letztlich musste fast unser gesamtes bewegliches Inventar wegen Rußbelastung entsorgt werden, alle Möbel, eine Vielzahl von Geräten und alles Kleinmaterial. Verblieben sind lediglich Großmaschinen in der Werkstatt und im Spritzgussbereich und eine überschaubare Anzahl von Geräten, die nass gereinigt werden konnten.

Dieses Ereignis hat den ganzen weiteren Jahresverlauf des Jahres 2014 bestimmt. Das Institut musste ein Interimsquartier im Allmandring 30 beziehen. Dort waren natürlich keine experimentellen Arbeiten mehr möglich, lediglich Bürotätigkeiten und Rechnersimulationen. Die Sanierung der Institutsräume im Pfaffenwaldring 9, die Sanierung der Großgeräte und kleineren Geräte banden dann sehr viel Kapazität des Institutes. Unser Werkstattpersonal, insbesondere Herr Berwanger als Werkstattmeister, waren für die gesamte Zeit komplett abgestellt, um den Sanierungsfortschritt zu unterstützen und Maßnahmen zu koordinieren.

Die Forschungsarbeit war in dieser Zeit stark eingeschränkt, da kaum noch Zugriff auf Geräte bestand. Glücklicherweise hatten mehrere Mitarbeiter ihre Arbeiten zur Dissertation weitgehend abgeschlossen, sodass die persönlichen Forschungsarbeiten deutlich geringer betroffen waren als Drittmittelprojekte. Auch in der Lehre musste ein Interimskonzept umgesetzt werden. Die Lehrveranstaltungen fanden in Ausweichquartieren statt, Praktika wurden eher als Vorführungen umgesetzt und studentische Arbeiten weitgehend in theoretische Aufgabenstellungen geleitet. Im Gegensatz zu Drittmittelprojekten konnte die Lehre jedoch ohne größere Ausfälle abgesichert werden. Nur der Konstruktionswettbewerb musste komplett abgesagt werden, da dafür jegliche materielle Basis verloren gegangen war.

Der Wiedereinzug in die sanierten Institutsräume erfolgte im Februar 2015. Gegenwärtig beginnen die Wiederinbetriebnahme der Labore und Maschinen sowie die Wiedereinrichtung der studentischen Arbeits- und Praktikumsplätze. Dies wird sich jedoch noch bis zum Ende des Sommersemesters 2015 hinziehen.

Die Beeinträchtigungen im Jahr 2014 waren also sehr groß und werden im Ergebnis erst zu Beginn des Wintersemesters 2015 überwunden sein, sodass das Institut für einen Zeitraum von deutlich mehr als einem Jahr massiv beeinträchtigt und eingeschränkt war und noch ist.

Personalia

Im Jahr 2014 liefen drei Arbeitsverträge planmäßig aus (Dipl.-Ing. Matthias Engel, Dipl.-Ing. Matthias Maier und Dipl.-Ing. Benjamin Reutzsch). Auch wegen der schwierigen Situation nach dem Brand gelang erst 2015 wieder eine erste Neubesetzung.

Aktivitäten in der Lehre

Die Anfängerzahlen im Maschinenbau sind konstant hoch. Die Anfängerzahlen aller maschinenbaulichen Bachelor-Studiengänge der Universität Stuttgart (ohne Luft- und Raumfahrttechnik) lagen im Jahr 2014 bei ca. 1050 Studierenden. Im Bachelor-Studiengang Maschinenwesen selbst bewegen sich die Anfängerzahlen wie im Vorjahr bei ca. 350. Hinzu kommen noch insgesamt ca. 650 neu immatrikulierte Masterstudierende in allen Mastern der Fakultät.

Der Masterstudiengang Maschinenbau/Mikrotechnik, Gerätetechnik und Technische Optik (Studiendekan Prof. Schinköthe, Studiengangsmanager Herr Burkard) hat ca. 20 Studierende pro Jahr. Zuspruch zu unserem Master gibt es vor allem von außen, aus anderen Universitäten, Fachhochschulen bzw. aus Dualen Hochschulen. Die Studierendenzahl liegt damit immer noch unter der langfristigen Zielstellung von 25 Immatrikulationen pro Jahr.

In der Konstruktionslehre Feinwerktechnik hatten wir bis zum Sommer 72 Studierende zu betreuen, im Wintersemester haben 82 Studierende den Zyklus neu begonnen. Die Bachelor-Lehrveranstaltungen konzentrierten sich nach wie vor auf die Fächer Konstruktionslehre Feinwerktechnik III und IV im dritten und vierten Semester als Wahlmöglichkeit für die beiden Bachelorstudiengänge Maschinenbau sowie Fahrzeug- und Motorentchnik.

Im Hauptfach laufen die Diplomstudiengänge nun aus und die Master dominieren. Derzeit begannen 44 Studierende im Fach „Gerätekonstruktion und -fertigung in der Feinwerktechnik“ als Pflicht- oder Kernfach. 22 Studierende starteten im Kernfach „Aktorik“. Das Fach „Praxis des Spritzgießens in der Gerätetechnik, Verfahren, Prozesskette, Simulation“ belegten 11 Studierende, die „Praktische

FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL“ belegten 22 Studierende. Im vergangenen Jahr hatten wir zudem mit 27 Studien-, Bachelor- und Masterarbeiten trotz Brand wieder einen enormen Zuspruch in diesem Bereich. Hinzu kamen nochmals 34 Studierende in Projektarbeiten im WS 2013/14 und im SS 2014. Im WS 2014/15 konnten wir brandbedingt keine Projektarbeiten ausgeben.

Die Lehrveranstaltungen des Masterstudiums konzentrieren sich auf die beiden Schwerpunkte Gerätekonstruktion als methodisch orientierte Linie und feinwerktechnische Aktorik als konkret forschungs- und entwicklungsorientierte Linie, ergänzt durch die Lehrveranstaltungen Praxis des Spritzgießens und Praktische FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL.

Die Vorlesung „Gerätekonstruktion und -fertigung in der Feinwerktechnik“ behandelt Grundlagen der Entwicklung und Konstruktion feinwerktechnischer Geräte bzw. Systeme. Den Schwerpunkt bilden Themenkreise wie zuverlässigkeits- und sicherheitsgerechte Konstruktion, Genauigkeit, Fehlerverhalten und Toleranzrechnung in der Präzisionsgerätetechnik, Lärminderung in der Gerätetechnik sowie Beziehungen zwischen Gerät und Umwelt. Eingeschlossen in die Lehrveranstaltung sind drei praktische Bestandteile, zur Einführung in die Koordinatenmesstechnik, zur Zuverlässigkeit und zur Geräuschmessung und Lärminderung.

Die Vorlesung „Aktorik in der Feinwerktechnik - Konstruktion, Berechnung und Anwendung mechatronischer Komponenten“ beleuchtet dagegen ausgewählte Aspekte der Entwicklung und Konstruktion mechatronischer Komponenten und Systeme der Feinwerktechnik. Behandelt werden feinwerktechnische Antriebssysteme unterschiedlichster Wirkprinzipien. Den Schwerpunkt bilden elektromagnetische und elektrodynamische Stelltechnik, piezoelektrische und magnetostruktive Stelltechnik, Magnettechnik und -technologie sowie Beispiele zur Realisierung mechatronischer Lösungen in der Feinwerktechnik.

Unsere Lehrveranstaltung „Praktische FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL“ wurde wieder sehr gut angenommen und ist mit 22 Studierenden voll ausgelastet. Auch unsere Lehrveranstaltung „Praxis des Spritzgießens in der Gerätetechnik; Verfahren, Prozesskette, Simulation“ fand 2014 mit 11 Studierenden einen guten Anklang.

Seit dem Wintersemester 2013/14 hat das Institut zusätzlich das Spezialisierungsfach Medizingerätekonstruktion übernommen, da der dafür vorgesehene Professor nach wie vor nicht berufen werden konnte. Das Spezialisierungsfach Medizingerätekonstruktion setzt sich zum Teil aus vorhandenen Lehrveranstaltungen zusammen, die inhaltlich dazu passen. Als spezifische Lehrveranstaltung

wurde die Vorlesung Medizingerätetechnik I/II neu etabliert. Sie wird durch externe Dozenten gehalten, im Wintersemester Medizingerätetechnik I durch Prof. Frank und im Sommersemester Medizingerätetechnik II durch Dr. Maier. Diese Vorlesung ist sehr stark nachgefragt. Derzeit sind 60 Studierende in dieser Mastervorlesung. Das IKFF ist für diese Vorlesung und das gesamte Spezialisierungsfach interimsmäßig verantwortlich bis ein Professor für Medizingerätetechnik berufen ist.

Die Spezialisierungsfachpraktika Ultraschallantriebe, Lineardirektantriebe, Schrittmotoren, Gleichstrommotoren, Koordinatenmesstechnik, FEM-Berechnung mit ANSYS sowie MAXWELL, Spritzgießen inklusive Spritzgieß-Simulation mit Moldflow sind in die Lehrveranstaltungen einbezogen. Mit diesen insgesamt 7 Praktika wurde ein solides Angebot zum praktischen Arbeiten für die Studierenden geschaffen. Ab dem Brandtermin mussten die Praktika in deutlich eingeschränktem Umfang realisiert werden, da keine Laborräume mehr verfügbar waren.

Durch den großen persönlichen Einsatz der Mitarbeiter gelang es, trotz der immensen Brandfolgen die Lehre ohne größere Ausfälle abzusichern. Nur der Konstruktionswettbewerb musste komplett abgesagt werden.

Die Absolventen fanden auch 2014 überwiegend problemlos ihren Einstieg in die Industrie.

Aktivitäten in der Forschung

Die Entwicklung alternativer Antriebssysteme für die Feinwerktechnik auf der Basis elektrodynamischer Kraftwirkung (elektrodynamische Linearmotoren) bzw. von Festkörpereffekten steht nach wie vor im Mittelpunkt des Arbeitsgebiets **Aktorik**.

Als Schwerpunkt in der Nutzung elektrodynamischer Antriebsprinzipien wurden 2014 die Untersuchungen zu magnetischen Schwebeführungen mit der Einreichung der Dissertation von Herrn Reutzsch und die Arbeiten zur Untersuchung von Wirbelstrom- und Hystereseverlusten in Linearantrieben mit der Einreichung der Dissertation von Herrn Engel abgeschlossen. Die Forschungen zur Entwicklung von neuartigen mehrdimensionalen piezoelektrischen Antrieben wurden fortgeführt. Generell bilden dabei neben der Motorentwicklung und durchgängigen Motorberechnung bzw. -simulation die Realisierung von Ansteuerung und Regelung über eine dSPACE-Entwicklungsumgebung einen Schwerpunkt. Beide Antriebslinien ergänzen und befruchten sich gegenseitig.

Das Thema **Spritzgießtechnologie** in der Feinwerktechnik bildet einen weiteren Stützpfiler des Instituts. Nach wie vor werden am IKFF die Entformungskräfte

beim Spritzgießen in Abhängigkeit von Oberflächenrauheit und Beschichtung sowie vom eingesetzten Kunststoff untersucht und spezielle Werkstoffe und Beschichtungen für Firmen getestet. Dazu lief ein ZIM-Projekt. Darüber hinaus wurden im Jahre 2014 die Arbeiten zur variothermen Prozessführung mit integrierten Induktoren mit der Einreichung der Dissertation von Herrn Maier nutzernah aufbereitet. Die Arbeiten zur Nutzung der Induktionserwärmung für das induktive Kleben sowie Arbeiten zum Magnetspritzgießen werden fortgeführt. Ergebnisse dazu sind mehrfach veröffentlicht.

Im Arbeitsgebiet **Zuverlässigkeit feinwerktechnischer Antriebe** wurde das gemeinsame DFG-Projekt (Normalverfahren) zusammen mit der Universität Hohenheim mit der Einreichung der Dissertation von Herrn Bobrowski zu einem Abschluss gebracht. Ziel war es hier, eine Zuverlässigkeitsprognose in frühen Entwicklungsphasen mit Hilfe statistischer Modelle zu realisieren. Mit den entwickelten Prognosesystemen stehen effiziente Werkzeuge in Form von Prognosemodulen für Motoren und Getriebe für die Nutzung vorhandener Ausfalldaten zur statistischen Vorhersage des Ausfallverhaltens bei nicht unmittelbar getesteten Parametersätzen in verschiedenen Phasen der Entwicklungs- und Lebenszyklen zur Verfügung. Die Dauerversuche zur Ermittlung von Ausfalldaten vorzugsweise an Kleingetrieben konnten noch vor dem Brand nahezu vollständig abgeschlossen werden. Nur einige Langläufer fielen dem Brand zum Opfer. Generell werden am Institut neben oder innerhalb dieser Forschungsarbeiten auch viele Industrieprojekte realisiert, seit dem Brand musste dies aber massiv eingeschränkt werden.

1.3 Wissenschaftliche Arbeitsgebiete

Im Institut werden zusammengefasst vier Forschungsschwerpunkte bearbeitet:

Im Arbeitsgebiet **Aktorik** stehen feinwerktechnische Direktantriebe, vorzugsweise für lineare Antriebsbewegungen, im Mittelpunkt. Einen Schwerpunkt bilden elektrodynamische Linearantriebe, deren Berechnung und Simulation. Zusätzlich wurden die Aktivitäten auch auf die Entwicklung von Luftführungen und magnetische Schwebeführungen für Linearantriebe erweitert. Neben den elektrodynamischen Systemen bilden piezoelektrische Antriebe einen zweiten Arbeitsschwerpunkt.

Im Arbeitsgebiet **Präzisionsspritzguss** steht die Abformung von Präzisionsbauteilen mit sehr feinen, genauen Strukturen durch Spritzgießen im Vordergrund. Dabei wird neben der Bauteilkonstruktion und dem Formenbau insbesondere der Formfüllvorgang sowohl theoretisch simuliert als auch praktisch an zwei Spritzgießautomaten untersucht. Maßnahmen zur Verbesserung des Füllvorgangs, wie

die variotherme Prozessführung durch induktive Formtemperierung, sowie die Erfassung von Entformungskräften bilden gegenwärtig die Arbeitsschwerpunkte. Hinzu kommen auch Aktivitäten zum Magnetspritzgießen.

Im Arbeitsgebiet **optische und mechanische Sensorik** standen bisher insbesondere die Verfahren zur integrierten Wegsignalerfassung in elektrodynamischen Linearmotoren mit bewegten Magneten oder auch bewegten Spulen im Mittelpunkt der Arbeiten.

Übergreifend bildet produktbezogene **Konstruktionsmethodik** in der Feinwerktechnik ein viertes Arbeitsgebiet. Schwerpunkte sind hier die konstruktive Gestaltung, die Berechnung von Systemen und die Simulation mit FEM. Dazu zählen auch Magnetfeldberechnungen sowie thermische Berechnungen für Linearantriebe oder die FEM-Analyse von piezoelektrischen Antrieben.

Auch das Arbeitsgebiet **Zuverlässigkeit feinwerktechnischer Antriebe** lässt sich in diesen Problemkreis einordnen. Hier arbeitet das Institut auf dem Gebiet der Zuverlässigkeit von elektromechanischen/mechatronischen Systemen am Beispiel feinwerktechnischer Antriebe/Aktorik. Dies betrifft sowohl die elektromechanischen als auch die mechanischen Komponenten derartiger Antriebe.

Im Detail werden folgende Inhalte bearbeitet:

Feinwerktechnische Aktorik

- Entwicklung alternativer Antriebssysteme für die Feinwerktechnik auf der Basis elektrodynamischer Kraftwirkung bzw. von Festkörpereffekten (elektrodynamische Linearmotoren, Piezomotoren).
- Berechnung derartiger Antriebe und Simulation ihres dynamischen Verhaltens.
- Erarbeitung geeigneter Unterstützungsmittel und Methoden zur Entwicklung derartiger Antriebssysteme.
- Entwicklung von magnetischen Schwebeführungen für Linearantriebe.

Präzisions-Spritzgießtechnologie

- Herstellung von Präzisionsbauteilen und feinen Strukturen bis hin zur Verbindung mit mikromechanischen Bauelementen.
- Ermittlung von Entformungskräften beim Spritzgießen in Abhängigkeit von Oberflächenrauheit und Beschichtung sowie vom eingesetzten Kunststoff.
- Untersuchung spezieller Werkstoffe und Beschichtungen im Werkzeugbau.
- Dynamische Formtemperierung durch induktive Beheizung mit externem oder internem Induktor zur Verbesserung des Formfüllverhaltens, insbesondere im Hinblick auf die Abformung mikrotechnischer Strukturen.
- Magnetspritzgießen.

- Erweiterung der induktiven Erwärmung auf weitere Anwendungen (induktiv unterstütztes Kleben).

Theorie des Konstruktionsprozesses

- Produktbezogene Konstruktionsmethoden in der Feinwerktechnik.
- Konstruktive Gestaltung unter Nutzung von 2D- und 3D-CAD.
- Simulation mit FEM, beispielsweise des Formfüllvorgangs beim Spritzgießen.
- Gekoppelte Feldberechnungen, beispielsweise elektromagnetisch, elektromagnetisch-thermisch, piezoelektrisch-dynamisch.

Zuverlässigkeit feinwerktechnischer Antriebe

- Übertragung und Verifizierung bekannter Zuverlässigkeitstechniken auf feinwerktechnische mechatronische Baugruppen, Antriebe und Aktorik.
- Datensammlung.
- Experimentelle Untersuchungen, Aufbau von Dauerlauf-Versuchsständen für Kleinstmotoren und Getriebe.
- Erarbeitung von Ansätzen für die Ermittlung der Systemzuverlässigkeit in frühen Entwicklungsphasen (Konzeptphase).

2 LEHRVERANSTALTUNGEN

2.1 Vorlesungen und Übungen für das Bachelorstudium

Konstruktionslehre III (Feinwerktechnik)

(Schinköthe, Burkard)

Wintersemester 2013/2014: 85 Studenten (mach + famo)

Wintersemester 2014/2015: 82 Studenten (mach + famo)

15 Vorlesungen à 2 SWS

13 Vorlesungen à 1 SWS

13 Übungen à 2 SWS

Betreuer: Burkard, Keller, Henzler (geb. Kofler), Maucher, Retzbach, Reutzsch, Schattka

Konstruktionslehre IV (Feinwerktechnik)

(Schinköthe, Burkard)

Sommersemester 2014: 72 Studenten (mach + famo)

14 Vorlesungen à 2 SWS

13 Vorlesungen à 1 SWS

13 Übungen à 1 SWS

Betreuer: Bobrowski, Burkard, Henzler (geb. Kofler), Maucher, Reutzsch, Schattka

2.2 Vorlesungen und Übungen für das Bachelor- und Masterstudium und das Hauptdiplom

Gerätekonstruktion und -fertigung in der Feinwerktechnik

(Schinköthe, Burkard, Bobrowski)

Wintersemester 2013/2014: 48 Studenten

Wintersemester 2014/2015: 44 Studenten

19 Vorlesungen à 2 SWS

10 Übungen à 2 SWS

Betreuer: Burkard, Bobrowski, Engel, Henzler (geb. Kofler), Retzbach

**Aktorik in der Gerätetechnik - Konstruktion, Berechnung, und Anwendung mechatronischer Komponenten
(Schinköthe)**

Wintersemester 2013/2014: 24 Studenten

Wintersemester 2014/2015: 22 Studenten

10 Vorlesungen à 2 SWS

5 Übungen à 2 SWS

Betreuer: Henzler (geb. Kofler), Kreuzer, Reutzsch

Sommersemester 2014: 13 Studenten

10 Vorlesungen à 2 SWS

3 Übungen à 2 SWS

Betreuer: Keller

**Praktische FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL
(Maucher, Nguyen, Keller, Reutzsch)**

Sommersemester 2014: 22 Studenten

10 Vorlesungen à 2 SWS

10 Übungen à 2 SWS

Betreuer: Maucher, Nguyen, Keller, Reutzsch

Praxis des Spritzgießens in der Gerätetechnik; Verfahren, Prozesskette, Simulation

(Schinköthe/Burkard)

Sommersemester 2014: 11 Studenten

18 Vorlesungen à 2 SWS

8 Übungen à 2 SWS

Betreuer: Burkard

Medizingerätetechnik

(Schinköthe/Frank/Maier)

Wintersemester 2013/2014: 29 Studenten

Wintersemester 2014/2015: 60 Studenten

12 Vorlesungen à 2 SWS

Sommersemester 2014: 39 Studenten

6 Vorlesungen à 2 SWS

(reduzierter Umfang wegen Brandfolgen)

Projektarbeiten für alle Studierenden der Maschinenbaufakultäten

Wintersemester 2013/2014: 30 Studenten
6 Gruppen mit jeweils 5 Studierenden

Sommersemester 2014: 4 Studenten
1 Gruppe

Wintersemester 2014/2015: Keine Projektarbeiten wegen Brandfolgen.

2.3 Prüfungen

Fach	Termin	Kandidaten
KL III + IV (Feinwerktechnik)	F 2014	23
	H 2014	58
Gerätekonstruktion und -fertigung in der Feinwerktechnik (Kompetenzfeld, Pflichtfach)	F 2014	21
	H 2014	8
Gerätekonstruktion und -fertigung in der Feinwerktechnik (Kernfach, mündlich)	F 2014	12
	H 2014	1
Aktorik in der Feinwerktechnik - Berechnung, Konstruktion und Anwendung mechatronischer Komponenten (Kernfach/Pflichtfach, mündlich)	F 2014	11
	H 2014	16
Medizingerätetechnik (Gesamtnote) Teilprüfung Medizingerätetechnik 1 Teilprüfung Medizingerätetechnik 2	H 2014	28
	F 2014	29
	H 2014	40
Praxis des Spritzgießens in der Gerätetechnik; Verfahren, Prozesskette, Simulation	H 2014	9
Praktische FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL	F 2014	4
	H 2014	10
Projektarbeiten	F 2014	30
	H 2014	4
Studienarbeit Feinwerktechnik	F 2014	3
	H 2014	3
Bachelorarbeiten	F 2014	6
	H 2014	6
Diplomarbeiten/Masterarbeiten	F 2014	4
	H 2014	2

2.4 Praktika

Spezialisierungsfachpraktikum Feinwerktechnik

(Für Studierende des Spezialisierungsfaches Feinwerktechnik)

Sommersemester 2014

Versuch 1: „FEM-Simulation mit ANSYS/
MAXWELL“

22 Teilnehmer 5 Termine

Betreuer: Maucher, Reutzsch, Keller

Versuch 2: „Ultraschallantriebe“

12 Teilnehmer 1 Termin

Betreuer: Keller

Wintersemester 2014/2015

Versuch 1: „Koordinatenmesstechnik“

29 Teilnehmer 5 Termine

Betreuer: Burkard

Versuch 2: „Spritzgussimulation mit Moldflow“

11 Teilnehmer 2 Termine

Betreuer: Burkard

Versuch 3: „Gleichstrommotoren“

15 Teilnehmer 2 Termine

Betreuer: Henzler (geb. Kofler), Bobrowski

Versuch 4: „Lineardirektantriebe“

18 Teilnehmer 3 Termine

Betreuer: Henzler (geb. Kofler), Kreuzer

Versuch 5: „Optische 3D-Vermessung“

Betreuer: Burkard

Ausgefallen wegen Brand

**Allgemeines Praktikum Maschinenbau (APMB)
(Für Studierende im zweiten Studienabschnitt Maschinenbau)**

Sommersemester 2014

Versuch 1:	„Schrittmotoren“
22 Teilnehmer	4 Termine
Betreuer: Reutzsch, Keller	

Wintersemester 2014/2015

Versuch 2:	„Koordinatenmesstechnik“
29 Teilnehmer	5 Termine
Betreuer: Burkard	

Versuch 3:	„Optische 3D-Vermessung“
Betreuer: Burkard	
Ausgefallen wegen Brand	

Praktika im Rahmen des Kompetenzfeldes Gerätekonstruktion und -fertigung in der Feinwerktechnik

Wintersemester 2014/2015

Versuch 1:	„Einführung in die 3D-Messtechnik“
45 Teilnehmer	4 Termine
Betreuer: Burkard	

Versuch 2:	„Zuverlässigkeitsuntersuchung und Lebensdauertests“
45 Teilnehmer	2 Termine
Betreuer: Bobrowski	

Versuch 3:	„Einführung in die Geräuschmesstechnik und Lärminderung“
45 Teilnehmer	1 Termin
Betreuer: Henzler (geb. Kofler), Retzbach	

2.5 Projektarbeiten

Wintersemester 2013/2014

- | | |
|------------|--|
| 30.01.2014 | Aktives Gehörschutzgerät |
| 30.01.2014 | Entwicklung und Entwurf von Kinematik-Varianten für Ultraschall-Demonstratoren |
| 30.01.2014 | Konstruktion von Spritzgießwerkzeugen für Demonstratorerteile für den Tag der Wissenschaft |
| 06.02.2014 | Forschungstrends bei Lineardirektantrieben |
| 06.02.2014 | Entwicklung und Aufbau eines Lineardirektantriebs |
| 06.02.2014 | Untersuchungen von Alternativen zur Verwendung von kommerziellem Filament beim 3D-Druck |

Sommersemester 2014

- | | |
|------------|---|
| 10.07.2014 | Konzeption, Entwurf und Ausarbeitung von Spielzeugautomaten |
|------------|---|

Wintersemester 2014/2015

Keine Projektarbeiten wegen Brandfolgen.

2.6 Seminar Feinwerktechnik (WS 2013/14 und SS 2014)

10.10.2013	Gharsallaoui, Mohamed	Entwicklung und Konstruktion eines motorisch angetriebenen X-Y-Tisches für die Objektverschiebung für Mikropanoramaaufnahmen mit einem Mikroskop oder einer Makrooptik
10.10.2013	Riggenmann, Simon	Untersuchung von Hard- und Software zur optischen 3D-Vermessung und Entwicklung eines darauf aufbauenden Praktikumsversuchs
24.10.2013	Strohmeyr, Simon	Entwicklung eines schwebenden Rütteltisches mit passivem Läufer
24.10.2013	Palenga, Julian	Entwicklung eines elektromagnetischen Aktors für lineare Schwebeantriebe
21.11.2013	Litwin, Thomas	Entwicklung einer sensorlosen Vorschubsteuerung für Lineardirektantriebe
16.01.2014	Wolf, Marius	Konstruktion einer Halte- und Schwenkvorrichtung für die Strukturierung der Elektroden von sphärenförmigen Piezokeramiken
13.02.2014	Bayer, Udo	Simulative Untersuchung des Einflusses der Einspannung piezoelektrischer Resonatoren auf das Resonanzverhalten mit Ansys
13.02.2014	Reimann, David	Auslegung und Konstruktion eines Versuchsaufbaus zur Verifikation eines neuartigen Messverfahrens zur Erfassung magnetischer Neukurven
27.03.2014	Thorwart, Alexander	Konstruktion eines elektromagnetischen Schwebeantriebs

17.04.2014	Akili, Julian	Thermische Leistungsbetrachtungen eines elektrodynamischen Schwebeantriebs
08.05.2014	Warag, Mouldi	Programmierung von Routinen zur Visualisierung des Verschleißes von Kunststoff-Zahnradern
15.05.2014	Butzer, Manuel	Untersuchung zu Effekten kontrollierter Partikelausrichtung bei gefüllten Klebstoffen
05.06.2014	Hüber, Mike	Machbarkeitsuntersuchung zur Simulation der Kommutierung von bürstenbehafteten DC-Motoren mit ANSYS/Maxwell/Simplorer
12.06.2014	Dardouri, Aymen	Entwicklung und Aufbau eines miniaturisierten Induktionsgenerators für sehr kleine Lasten
Wintersemester 2014/2015 (unvollständig)		
16.10.2014	Starz, Julian	Aufbau eines Kerns zur Messung von Schwindungskräften im Kunststoffspritzguss
16.10.2014	Sturm, Josef	Entwicklung einer Simulationsumgebung für ein Vorhersagemodell von Entformungskräften im Kunststoffspritzguss
23.10.2014	Digel, Sebastian	Entwicklung eines Demonstratorteils mit Kunststoffspritzgussfehlern
23.10.2014	Zeller, Stefan	Entwicklung einer Anbauvorrichtung für ein Handlingsystem
23.10.2014	Kübler, Michael	Untersuchung der Entformungskräfte im Kunststoffspritzguss in Abhängigkeit unterschiedlicher Prozessparameter

30.10.2014	Rossmeissl, Thomas	Konstruktion und Untersuchung eines induktiv beheizten Spritzgusswerkzeugs mit effizienter thermischer Trennung der Kavitäten
30.10.2014	Hitzer, Hannes	Entwicklung eines Versuchsstandes zur Messung von Adhäsionskräften zwischen Werkzeugoberflächen und Thermoplasten
13.11.2014	Dürr, Christian	Auswahl und Aufbau von Sensorik für Mehrkoordinatenantriebe eines Prüfstandes für Ultraschallmotoren
20.11.2014	Feng, Qi	Entwicklung eines Auswerferbolzens zur Messung der Entformungskräfte im Kunststoffspritzguss
11.12.2014	Butzer, Manuel	Entwicklung eines Prüfverfahrens für induktive Klebungen

3 WISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN, STUDIEN-, DIPLOM- UND BACHELORARBEITEN

3.1 Dissertationen

Ulmer, Matthias	Einbeziehung des thermischen Teilsystems in die Dimensionierung feinwerktechnischer elektrodynamischer Lineardirektantriebe. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 37, 2014
Engel, Matthias	Untersuchungen von Wirbelstrom- und Hystereseverlusten an Lineardirektantrieben mit rotationssymmetrischem Querschnitt. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 38, 2014
Voelz, Karsten	Entwicklung und Untersuchung von Ovalstatormotoren mit multiplen Läufern. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 39, 2014
Maier, Matthias	Ganzheitlicher Ansatz bei der Auslegung von Induktionserwärmungssystemen zur Anwendung im Kunststoffspritzguss. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. XX, 2015, Prüfung 2014

3.2 Master-/Diplomarbeiten am IKFF (WS 2013/14 und SS 2014)

10/2013	Bayerlein, Philipp	Untersuchung von Abkühlvorgängen bei induktiv beheizten Spritzgusswerkzeugen
11/2013	Schmid, Matthias	Auslegung von Kunststoffformwerkzeugen mit energetisch optimierter Temperierung
02/2014	Bokesch, Stefanie	Aufbau und Inbetriebnahme eines Prüfstandes für aktive Fahrpedale
02/2014	Koobar, Islem	Konstruktionsoptimierung des automatisierten Prozessschrittes Sensoreinschub in Kanüle

05/2014	Hetzinger, Stephan	Entwicklung einer kostengünstigen elektrischen Kettensäge für Privatanwender
09/2014	Sturm, Josef	Entwicklung einer Simulationsumgebung für ein Vorhersagemodell von Entformungskräften im Kunststoffspritzguss

Wintersemester 2014/2015 (unvollständig)

11/2014	Rossmeissl, Thomas	Konstruktion und Untersuchung eines induktiv beheizten Spritzgusswerkzeugs mit effizienter thermischer Trennung der Kavitäten
01/2015	Butzer, Manuel Nicolas	Entwicklung eines Prüfverfahrens für induktive Klebungen

3.3 Bachelorarbeiten am IKFF (WS 2013/14 und SS 2014)

10/2013	Maul, Markus	Untersuchungen zur Nutzung von kostengünstigen Induktionsgeneratoren aus dem Konsumgüterbereich für industrielle Anwendungen
10/2013	Litwin, Thomas	Entwicklung einer sensorlosen Vorschubsteuerung für Lineardirektantriebe
12/2013	Wolf, Marius	Konstruktion einer Halte- und Schwenkvorrichtung für die Strukturierung der Elektroden von sphärenförmigen Piezokeramiken
01/2014	Bayer, Udo	Simulative Untersuchung des Einflusses der Einspannung piezoelektrischer Resonatoren auf das Resonanzverhalten mit Ansys
03/2014	Thorwart, Alexander	Konstruktion eines elektromagnetischen Schwebeantriebs

03/2014	Akili, Julian	Thermische Leistungsbetrachtungen eines elektrodynamischen Schwebeantriebs
04/2014	Warag, Mouldi	Programmierung von Routinen zur Visualisierung des Verschleißes von Kunststoff-Zahnradern
04/2014	Hüber, Mike	Machbarkeitsuntersuchung zur Simulation der Kommutierung von bürstenbehafteten DC-Motoren mit ANSYS/Maxwell/Simplorer
05/2014	Dardouri, Aymen	Entwicklung und Aufbau eines miniaturisierten Induktionsgenerators für sehr kleine Lasten
05/2014	Hartmann, Timo	Untersuchung zur elektromagnetischen Verträglichkeit linearer Schwebeantriebe
07/2014	Laabs, Kevin	Entwicklung und Implementierung einer digitalen Positionsregelung für Lineardirektantriebe
08/2014	Gröger, Matthias	Entwicklung eines Kunststoffextruders zur Verarbeitung gefüllter Thermoplaste in 3D-Druckern
09/2014	Digel, Sebastian	Entwicklung eines Demonstratorteils mit Kunststoffspritzgussfehlern
09/2014	Kübler, Michael	Untersuchung der Entformungskräfte im Kunststoffspritzguss in Abhängigkeit unterschiedlicher Prozessparameter

Wintersemester 2014/2015 (unvollständig)

10/2014	Zeller, Stefan	Entwicklung einer Anbauvorrichtung für ein Handlingsystem
10/2014	Starz, Julian	Konstruktion eines Kerns zur Messung von Schwindungskräften im Kunststoffspritzguss
10/2014	Deska, Bartłomiej	Optimierung eines aktiven Gehörschutzgeräts
10/2014	Dürr, Christian	Auswahl und Aufbau von Sensorik für Mehrkoordinatenantriebe eines Prüfstandes für Ultraschallmotoren
11/2014	Hitzer, Hannes	Entwicklung eines Versuchsstandes zur Messung von Adhäsionskräften zwischen Werkzeugoberflächen und Thermoplasten

3.4 Studienarbeiten am IKFF (WS 2013/14 und SS 2014)

10/2013	Strohmeyr, Simon	Entwicklung eines schwebenden Rütteltisches mit passivem Läufer
12/2013	Reimann, David	Auslegung und Konstruktion eines Versuchsaufbaus zur Verifikation eines neuartigen Messverfahrens zur Erfassung magnetischer Neukurven
04/2014	Lang, Susanne	Aufbau einer Messumgebung in LabVIEW mit visueller Datenanalyse
05/2014	Bach, Michael	Entwicklung und Aufbau einer Leistungsregelung für Induktionsgeneratoren
05/2014	Butzer, Manuel Nicolas	Untersuchung zu Effekten kontrollierter Partikelausrichtung bei gefüllten Klebstoffen

Wintersemester 2014/2015 (unvollständig)

10/2014	Feng, Qi	Entwicklung eines Auswerferbolzens zur Messung der Entformungskräfte im Kunststoffspritzguss
11/2014	Glunk, Christian	Einsatz von Micro-Electro-Mechanical Systems in der Montage- und Handhabungstechnik am Beispiel eines Beschleunigungssensors

3.5 Preise

M.Sc. Julian Palenga	Gustav-Magenwirth-Preis
----------------------	-------------------------

4 ARBEITSGEBIETE DER WISSENSCHAFTLICHEN MITARBEITER

4.1 Aktorik

- Engel, M. Lehre:
 Betreuung der Bachelorübungen in KL 3/4.
 Forschung:
 Wirbelstrom- und Hystereseverluste in Linearmotoren.
 Simulation von Wirbelstromverlusten und Hystereseverlusten in Rückschlussmaterialien.
- Keller, B. Lehre:
 Betreuung von Gruppenübungen in KL 3/4.
 Überarbeitung Vortragsübung „Getriebedimensionierung/-gestaltung“ in KL 3/4.
 Vortragsübung und Praktikum „Ultraschallantriebe“ im Kernfach Aktorik und Praktikum „Schrittmotoren“.
 Vorlesung und Übung „Praktische FEM-Simulation mit MAXWELL und ANSYS“ und Ausarbeitung von Aufgabenstellungen für Prüfungsaufgaben sowie deren Korrektur.
 Betreuung von Projekt-, Bachelor-, Master- und Studienarbeiten.
 Forschung:
 Entwicklung von piezoelektrischen Motoren mit Schwerpunkt in Schwingungsuntersuchungen von Mehrkoordinaten-Ultraschallmotoren.
 Industrieprojekte.
 Sonstiges:
 PC-Administration.
- Henzler
 (geb. Kofler), J. Lehre:
 Betreuung der Bachelorübungen in KL 3/4, Testatgruppen.
 Vortragsübung und Vorlesung KL 3/4 zur Lagerberechnung sowie Ausarbeitung von Übungsaufgaben.
 Vortragsübung zum Thema „Berechnung von Lineardirektantrieben“.
 Durchführung der Praktika „Lineardirektantriebe“ sowie „Gleichstrommotoren“ und „Geräuschmesstechnik“.
 Betreuung von Bachelor- und Projektarbeiten.

Betreuung von FEM-Aufgaben.

Forschung:

Simulationen zu rotationssymmetrischen Lineardirektantrieben.

Industrieprojekte.

Sonstiges:

PC-Administration.

Kreuzer, D.

Lehre:

Betreuung der Gruppenübungen in KL 3/4.

Betreuung einer Studienarbeit und einer Bachelorarbeit.

Durchführung des Praktikums „Lineardirektantriebe“.

Forschung:

Erstellung von bauformspezifischen schnellen und auf analytischen Berechnungsgleichungen gründenden Dimensionierungssoftware.

FEM-Validierung der Dimensionierungssoftware.

Entwicklung einer rechnergestützten Entwurfsmethodik für applikationsspezifische Lineardirektantriebe kleiner Leistung.

Sonstiges:

Erfüllung von Promotionsauflagen und GSaME-Programm.

Reutzsch, B.

Lehre:

Vortragsübung und Vorlesung KL 3/4 zum Themenkomplex „Welle-Lager“ und „Kupplungen“.

Vorlesung zum Themenkomplex „Ansteuerung und Regelung von Lineardirektantrieben“ in „Aktorik in der Feinwerktechnik“.

Vorlesung „Praktische FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL“.

Durchführung des Praktikums „Schrittmotoren“.

Betreuung der Bachelorübungen in KL 3/4, Testatgruppen.

Betreuung von Bachelorarbeiten.

Forschung:

Forschungsschwerpunkt: Magnetschwebetechnik für feinerwerktechnische Antriebe.

Simulative Auslegung und Konstruktion sowie Regelung und Ansteuerung magnetischer Führungen und linearer Direktantriebe.

Industrieprojekte.

Sonstiges:

PC-Administration.

4.2 Spritzgießen

- Burkard, E. Untersuchung des Einflusses von Werkzeugbeschichtungen auf die Entformungskraft bei Spritzgussbauteilen aus Thermoplastwerkstoffen.
Bearbeitung von Industrieaufträgen.
Betreuung der Studenten im B.Sc., M.Sc. und Hauptdiplom.
Betreuung von Vorlesungen und Übungen im B.Sc., M.Sc. und Hauptdiplom.
Organisation des Konstruktionswettbewerbs.
Betreuung und Durchführung der Vorlesung „Praxis des Spritzgießens in der Gerätetechnik“.
Betreuung der 3D-Messmaschinen und der Praktika zur 3D-Messtechnik sowie Vermessung von Werkstücken.
Administration und Wartung der Linux-Rechner und des Institutsnetzes.
Stundenplanbeauftragter und Studiengangsmanager für den M.Sc. Maschinenbau/Mikrotechnik, Gerätetechnik und Technische Optik.
- Maier, M. Lehre:
Betreuung der Bachelorübungen in KL 3/4, Testatgruppen.
Forschung:
Weiterentwicklung von FEM-Simulationsmodellen zur quantitativen Beschreibung von Induktionserwärmung unter Berücksichtigung des Generatorschwingkreises.
Einsatz von Hochleistungskeramiken in induktiv beheizten Spritzgusswerkzeugen.
- Maucher, A. Lehre:
Betreuung der Bachelorübungen in KL 3/4, Testatgruppen.
Vortragsübung „Koppelgetriebe“ im Bachelor KL 3/4 sowie Ausarbeitung von Übungsaufgaben.
Durchführung der Vorlesung und Übung „Praktische FEM-Simulation mit MAXWELL und ANSYS“ und Ausarbeitung von Aufgabenstellungen.
Durchführung des Spezialisierungsfachpraktikums „FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL“.
Betreuung von einer Masterarbeit und zwei Studienarbeiten.

Forschung:

Untersuchung des Abkühlverhaltens von induktiv beheizten Spritzgusswerkzeugen.

Simulative Untersuchung des Strömungsverhaltens von Kühlflüssigkeiten in Spritzgusswerkzeugen im Hinblick auf unterschiedliche Einströmarten mittels CFD.

Entwicklung von Simulationsmodellen zur Untersuchung des Energiehaushalts bei Phasenübergängen von Fluiden in Kühlkreisläufen.

Simulative Untersuchung der induktiven Erwärmung dünner Oberflächenbeschichtungen.

Untersuchung der Herstellbarkeit von „Stents“ mittels Spritzgussverfahren.

Sonstiges:

Netzwerk-Administration.

Nguyen, M.

Lehre:

Betreuung der Bachelorübungen in KL 3/4 in Form von Gruppenübungen.

Betreuung von zwei FEM-Aufgaben.

Forschung:

Konstruktion eines Spritzgusswerkzeugs und einer Messeinrichtung zur Validierung eines entwickelten Simulationsansatzes für kunststoffgebundene Dauermagnete.

Retzbach, A.

Lehre:

Betreuung der Bachelorübungen in KL 3/4, Testatgruppen.

Betreuung von Bachelor-, Studien- und Masterarbeiten.

Durchführung der Vortragsübung „Getriebedimensionierung/gestaltung“ in KL 3/4.

Durchführung des Praktikums „Geräuschmesstechnik“.

Forschung:

Entwicklung neuer Ansätze zur Vorkonditionierung partikelgefüllter Klebstoffe.

Untersuchungen zu Einflussfaktoren bei der induktiven Erwärmung partikelgefüllter Klebstoffe.

Modellbildung, Simulation und Auslegung von induktiven Heizsystemen.

Untersuchungen zu induktivem Entkleben von partikelgefüllten Klebstoffen.

Schattka, G. Lehre:
Betreuung der Gruppenübungen in KL 3/4.
Ausarbeitung von Aufgabenstellungen für die Übungsaufgaben „Konstruktionsmethodik“ und „Getriebe“.
Betreuung von 2 FEM-Aufgaben.
Betreuung von Bachelor- und Studienarbeiten und einer Masterarbeit.
Organisation des Konstruktionswettbewerbs.
Forschung:
Vorabschätzung von Entformungskräften im Kunststoffspritzguss mit Einbeziehung der adhäsiven Kraftanteile.

4.3 Zuverlässigkeitstechnik

Bobrowski, S. Lehre:
Durchführung der Vortragsübungen „Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme“ im Rahmen der Vorlesung Gerätekonstruktion und -fertigung in der Feinwerktechnik im Masterstudium.
Betreuung von Gruppenübungen in KL 3/4.
Betreuung von Studienarbeiten und einer Bachelor-Projektarbeit.
Praktikum „Gleichstrommotoren“ und „Zuverlässigkeitsuntersuchung und Lebensdauertests“.
Forschung:
Mitarbeit im DFG-Projekt „Zuverlässigkeitsprognose mechatronischer Systeme mit Hilfe statistischer Modelle am Beispiel feinwerktechnischer Komponenten“ (GZ: Je 162/10-1, Schi 457/12-1).
Aufbau und Betrieb von Dauerlaufprüfständen für mechatronische Systeme (rotatorische Kleinantriebe), Dokumentation.
Vermessung von Prüflingen.
Entwicklung von Methoden zur Zuverlässigkeitsermittlung und mathematischen Zuverlässigkeitsmodellen (Kooperation mit dem IAMS, Institut für Angewandte Mathematik und Statistik der Universität Hohenheim).
Sonstiges:
Ansprechpartner für Literaturrecherchen.

5 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

5.1 Veröffentlichungen

Artikel oder Tagungsbeiträge:

Bobrowski, S.; Schinköthe, W.; Jensen, U.; Döring, M.; Chen, H.: Zuverlässigkeitsprognose mittels statistischer Modelle am Beispiel von Kleinmotoren und Kleingetrieben. Vortrag 22. Kleinmaschinenkolloquium Ilmenau, 13./14.03.2014, Tagungsband.

Kreuzer, D.: Entwurfsmethodik für applikationsspezifische Lineardirektantriebe kleiner Leistung, Tagungsbandbeitrag und Posterveröffentlichung zur GSaME Jahrestagung 2014, Stuttgart, 19.03.2014.

Nguyen, M.; Schinköthe, W.: Simulation kunststoffgebundener Dauermagnete unter Berücksichtigung der Schmelztemperatur. ANSYS Conference & 32th CADFEM Users' Meeting 2014, Nürnberg, 04.-06.06 2014.

Keller, B.; Schinköthe, W.: A new Multi-degree-of-freedom Ultrasonic Motor using a Bell Shaped Piezoelectric Vibrator. Actuator 2014, International Conference and Exhibition on New Actuators and Drive Systems, Bremen, 23.-25.06.2014.

Reutzsch, B.; Schinköthe, W.: Innovative Magnetschwebeantriebe für feinwerktechnische Stell- und Positionieraufgaben. Forschungsreport für den Maschinenbau in Baden-Württemberg. Public Verlagsgesellschaft 2014, S. 8-11.

Nguyen, M.; Maier, M.; Schinköthe W.: Proposal for a Simulation-Based Measuring Method of Magnetization Curves Using a FE-Analysis. IEEE Transactions on Magnetics, Volume 50 (2014), Issue 9.

Nguyen, M.; Schinköthe, W.: Simulation of Thin-Walled Injection Molded Magnets. 4th International Electric Drives Production Conference, Nürnberg, September 30th - October 1st 2014, Proceedings S. 217-224.

5.2 Gremienarbeit

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe:

Mitglied des Wissenschaftlichen Beirates der Zeitschrift Mechatronik F&M

Mitglied im Kuratorium der Gustav-Magenwirth-Stiftung, Bad Urach

Mitglied im Kuratorium der Kendrion Academy

In der VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikro- und Feinwerktechnik (GMM):

Mitglied des Beirats der GMM

Fachbereichsleiter Fachbereich 3 Feinwerktechnik und Mechatronik

Mitglied des Fachausschusses 3.3 Elektrische Geräte- und Stellantriebe

Programmausschuss Tagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik, Köln.

5.3 Tag der Wissenschaft

Alle Aktivitäten des IKFF am Tag der Wissenschaft der Universität Stuttgart mussten dieses Jahr aufgrund der Brandschäden im Pfaffenwaldring 9 entfallen.

Ein besonderer Dank gilt den folgenden Firmen, die unseren Wettbewerb auch 2014 unterstützen wollten:

ARBURG GmbH & Co, Audi AG, Bilz Werkzeugfabrik GmbH & Co. KG, Carl Hanser Verlag GmbH & Co, Christian Bürkert Stiftung gGmbH, Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG, Dr. Ing. Paul Christiani GmbH & Co KG, G. Ulmer Automation GmbH, Hauni Maschinenbau AG, Kendrion GmbH, Springer Verlag GmbH und Verlag Europa-Lehrmittel Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG.

6 KONGRESSE, TAGUNGEN UND MESSEN

Prof. Schinköthe, W.:

- 22. Kleinmaschinenkolloquium Ilmenau, 13./14.03.2014

Bobrowski, S.:

- 22. Kleinmaschinenkolloquium Ilmenau, 13./14.03.2014
- 28. Control - Internationale Fachmesse für Qualitätssicherung, Stuttgart, 06./07.05.2014

Burkard, E.:

- ARBURG Technologietage, Loßburg, 20.03.2014

Keller, B.:

- International Conference and Exhibition on New Actuators and Drive Systems, Bremen, 23.-25.06.2014

Kreuzer, D.:

- Jahrestagung der GSaME Graduate School of advanced Manufacturing Engineering, Stuttgart, 19.03.2014
- CADFEM-Seminar, Leinfelden-Echterdingen, 09.-11.07.2014
- 6. CADFEM EM-Symposium 2014, Würzburg, 05.11.2014

Maucher, A.:

- CADFEM EM-Symposium, Würzburg, 05.11.2014

Nguyen, M.:

- ANSYS Conference & 32. CADFEM Users' Meeting, Nürnberg, 05.06.2014
- 4th Electric Drives Production Conference, Nürnberg, 30.09.2014

Retzbach, A.:

- CADFEM EM-Symposium, Würzburg, 05.11.2014

Reuttsch, B.:

- Messe Automatica 2014, München, 04.06.2014

Schattka, G.:

- CADFEM EM-Symposium, Würzburg, 05.11.2014

7 WERKSTATTBERICHT

Mit der Fertigung von Linearmotoren, Linearmotorprüfständen, Spritzgussformen und Formeinsätzen sowie Bauteilen und Baugruppen für Versuche im Rahmen von studentischen Arbeiten und Dissertationen war die Institutswerkstatt auch in diesem Berichtsjahr bis zum Brand wieder vollständig ausgelastet.

Nach dem Brand war die Werkstatt nicht mehr nutzbar. Das Werkstattpersonal, insbesondere Herr Berwanger als Werkstattmeister, wurden dann komplett abgestellt, um den Sanierungsfortschritt zu unterstützen und Maßnahmen zu koordinieren.

8 ANHANG - Ausgewählte Veröffentlichungen

In diesem Jahr verweisen wir exemplarisch auf zwei Veröffentlichungen aus dem Bereich des Magnetspritzgießens und der Ermittlung der nötigen Materialparameter dafür, die vom IEEE veröffentlicht wurden:

Nguyen, M.; Maier, M.; Schinköthe W.: Proposal for a Simulation-Based Measuring Method of Magnetization Curves Using a FE-Analysis. IEEE Transactions on Magnetics, Volume 50 (2014), Issue 9.

Nguyen, M.; Schinköthe, W.: Simulation of Thin-Walled Injection Molded Magnets. 4th International Electric Drives Production Conference, Nürnberg, September 30th - October 1st 2014, Proceedings S. 217-224.

Proposal for a Simulation-Based Measuring Method of Magnetization Curves Using Finite Element Analysis

Minh Nguyen, Matthias Maier, and Wolfgang Schinkoethe

Institute of Design and Production in Precision Engineering, Stuttgart 70550, Germany

The accuracy of magnetostatic finite element simulations depends largely on the quality of the magnetization curves used to model ferromagnetic materials. Established measuring approaches either suffer from a time-consuming preparation of samples or a reduced accuracy in measuring the sample's field strength. Therefore, a simulation-based approach was developed that replaces the problematic field strength measurement with a finite element simulation while maintaining a convenient sample geometry. The proposed method's requirements and feasibility were discussed using a simple magnetic circuit. The method's accuracy in determining a correct magnetization curve was shown on a closed simulation model using a known magnetization curve as reference. Influences of measurement and simulation errors were determined and compared with the typical simulation accuracies.

Index Terms—Finite element analysis, magnetization curve measurement, magnetostatics.

I. INTRODUCTION

THE INITIAL magnetization curves of ferromagnetic materials are required for the numerical simulation of electromagnetic systems such as linear direct drives, solenoid valves, or magnetization coils for injection molded magnets. The accuracy of the simulation results is directly determined by the quality of the magnetization curves defined for the simulation model [1], [2]. Two approaches for measuring the initial magnetization curves of ferromagnetic materials are described in IEC 60404-4. One approach uses a ring specimen. The flux density inside the ring is measured with a toroidal coil connected to a flux meter. The corresponding field strength is analytically calculated using the current through a toroidal excitation coil as well as the mean geometric path length of the ring specimen. However, preparation of the excitation and measuring coil windings is very time-consuming. Furthermore, a strict ratio of the outer to inner diameter of 1.1 or less has to be kept to ensure accurate results. This leads to a large sample diameter, which further complicates the production of the ring specimen [3].

Alternatively, a bar specimen can be used for the permeameter method. Similar to the ring specimen, a measuring coil connected to a flux meter records the flux density inside the bar. The field strength is typically measured with a Hall sensor close to the bar specimen's surface. This allows a separation of sensors and sample thus reducing the time and effort needed to prepare a sample for measurement. Unfortunately, the magnetic field strength inside the sample cannot be measured due to physical limitations. Furthermore, the Hall sensor cannot be positioned directly on the sample's surface for technical reasons. This leads to a reduced accuracy due to a gradient in the field strength outside the sample. There are efforts to increase the accuracy of the field strength measurements by

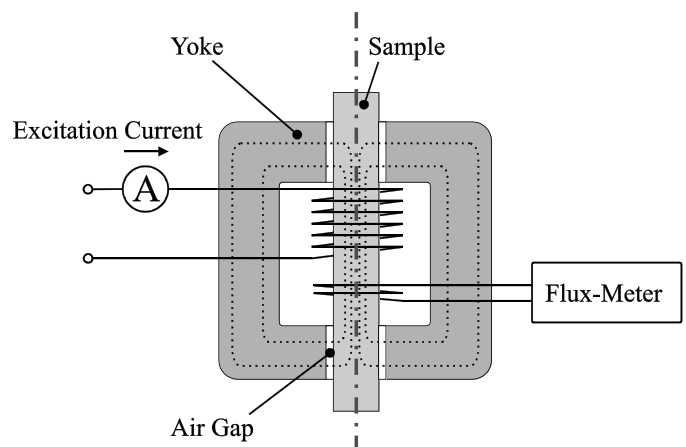


Fig. 1. Setup used for the proposed method.

adding further Hall sensors to extrapolate the field gradient onto the sample's surface [4]. However, this increases the complexity of the entire measurement system.

In this paper, a method for measuring the initial magnetization curve is proposed that replaces the problematic field strength measurement with a finite element (FE) simulation of the magnetic circuit thus eliminating the disadvantages of the permeameter method while maintaining its convenient sample geometry. In the following, the requirements for this specific approach are discussed and the method's feasibility and accuracy are analyzed using a closed simulation model.

II. PROPOSED METHOD

The proposed method uses a setup similar to a permeameter, as shown in Fig. 1. The cylindrical sample is inserted into a pot-shaped ferromagnetic yoke containing an excitation coil to obtain a closed magnetic circuit. The magnetic flux density B_s within the sample is conventionally determined using a flux meter. There are air gaps between the sample and yoke to ensure a smooth insertion of the sample.

Furthermore, the current I through the excitation coil is recorded. The current I is then successively increased and the corresponding sample flux density $B_s(I)$ is measured. An exemplary progression is shown in Fig. 2.

Manuscript received March 7, 2014; revised April 22, 2014; accepted April 23, 2014. Date of publication April 29, 2014; date of current version September 9, 2014. Corresponding author: M. Nguyen (e-mail: nguyen@ikff.uni-stuttgart.de).

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online at <http://ieeexplore.ieee.org>.

Digital Object Identifier 10.1109/TMAG.2014.2320699

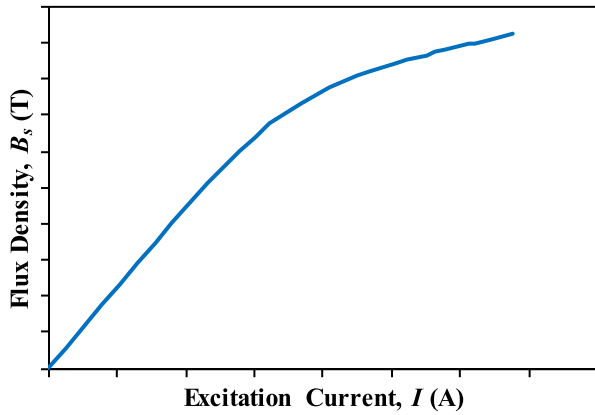


Fig. 2. Exemplary progression of the sample flux density B_s as a function of the excitation current I .

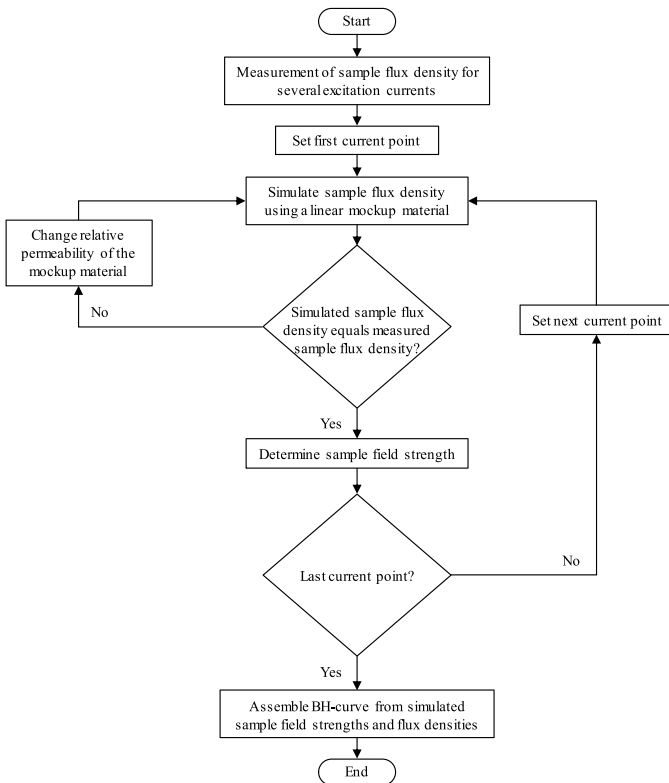


Fig. 3. Flow chart of the proposed measurement method.

The field strength H_s inside the sample is determined by a magnetostatic FE-simulation of the magnetic circuit using the measured values $B_s(I)$ as input data. Therefore, an exact simulation model of the setup is created. The yoke's nonlinear magnetization curve has to be accurately known. As the material properties of the sample are to be determined a linear mockup material is defined instead using (1)

$$B_s = \mu_0 \mu_{r,s} H_s. \quad (1)$$

The relative permeability $\mu_{r,s}$ is then set as an optimization parameter within the FE-simulation. The optimization algorithm strives to find a value for the relative permeability $\mu_{r,s}(I)$ that provides the best match between the measured and simulated sample flux density $B_s(I)$. The optimization is repeated for each measured value of the excitation current I .

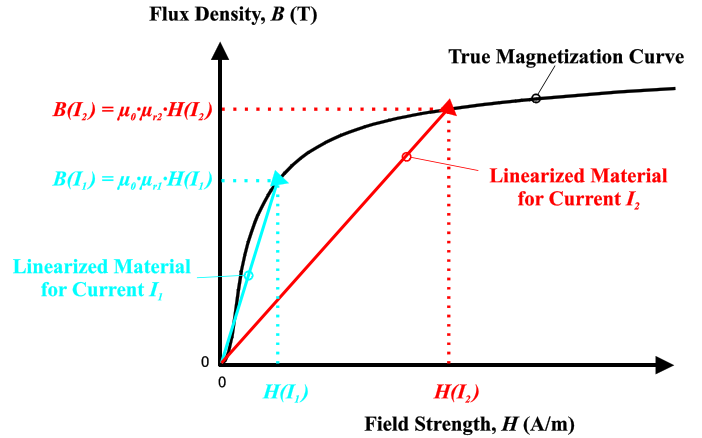


Fig. 4. Linearization of the true magnetization curve for distinct operating points.

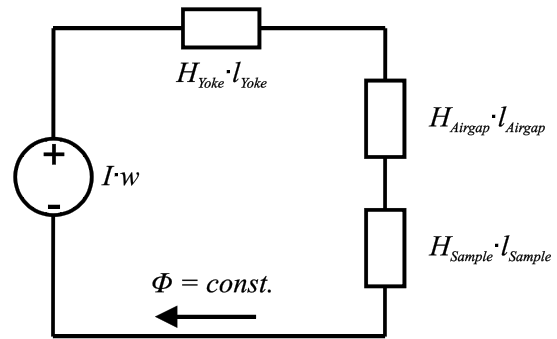


Fig. 5. Equivalent circuit diagram for the analytical description of the setup shown in Fig. 1.

The corresponding pair of BH-values for the sample can then be extracted from the simulation results for each current. The complete initial magnetization curve can finally be assembled from the simulation results. The proposed method is shown in Fig. 3.

III. DISCUSSION OF REQUIREMENTS

The requirements for the presented method are subsequently discussed. First, the field strength H_s and flux density B_s must be homogenous inside the sample geometry for each excitation current I . This allows the linearization of the sample's material properties using (1) for the FE-simulation and the optimization of the relative permeability $\mu_{r,s}$. Since a magnetostatic analysis is performed only the operating point of the sample is relevant. In this case, a linear material can be found leading exactly to the circuit's same distinct operating point as the unknown nonlinear sample material, as shown in Fig. 4.

Second, the method's feasibility depends on the uniqueness of the sample's relative permeability $\mu_{r,s}(I)$ for each measured flux density $B_s(I)$. If more than one relative permeability $\mu_{r,s}(I)$ could be found that leads to the same sample flux density $B_s(I)$ then the corresponding operating point is no longer guaranteed to be on the unknown nonlinear magnetization curve. For the discussion of these requirements, the proposed setup is described using a simple magnetic circuit composed of the excitation coil, yoke, sample, and air gap. The circuit is shown in Fig. 5. Due to the setup's symmetry,

the yoke and the air gaps are modeled using one magnetic field strength and magnetic path length, respectively. The measuring coil is assumed to be wound directly onto the sample's surface. Leakage flux between the measuring coil and the sample is therefore ignored. Furthermore, any leakage flux resulting from the air gap between the sample and yoke is assumed to be negligible.

The field strength H is described by Ampère's circuital law with Maxwell's corrections. In this case, a quasistatic magnetic field is regarded and displacement currents can therefore be neglected. The field strength inside the magnetic circuit can therefore be expressed as

$$wI = \int_y H_y ds_y + \int_a H_a ds_a + \int_s H_s ds_s \quad (2)$$

where w is the number of excitation coil windings, s_y is the magnetic path length inside the yoke, H_y is the field strength inside the yoke, s_s is the magnetic path length inside the sample, and H_a and s_a are the field strength and magnetic path length inside the air gap. For a homogenous magnetic field inside the sample, i.e., a constant field strength H_s over the path length s_s , (2) can be expressed as

$$wI = \int_y H_y ds_y + \int_a H_a ds_a + H_s s_s. \quad (3)$$

The magnetic flux Φ is given by Gauss's law for magnetism

$$\Phi = \iint_A B dA \quad (4)$$

and for a magnetic circuit without leakage flux

$$\Phi = \Phi_y = \Phi_a = \Phi_s \quad (5)$$

where Φ_y , Φ_a , and Φ_s are the flux through the yoke, the air gap, and sample, respectively. The field strength of a nonlinear ferromagnetic material can be expressed as

$$H = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \cdot B = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \cdot \frac{d\Phi}{dA}. \quad (6)$$

The homogenous field inside the sample leads to a constant flux density B_s over the sample's cross-sectional area A_s . Furthermore, the flux density inside the yoke and the air gap is assumed to be constant over the cross-sectional area for each infinitesimal path element ds_y and ds_a . The flux Φ can then be expressed as

$$\Phi = B \cdot A. \quad (7)$$

The field strength H is then determined by

$$H = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \cdot \frac{\Phi}{A}. \quad (8)$$

The magnetic circuit can be described by applying (8) and (5) to (3) resulting in

$$\begin{aligned} wI &= \int_y \frac{\Phi_y}{\mu_0 \mu_{r,y} A_y} ds_y + \int_a \frac{\Phi_a}{\mu_0 A_a} ds_a + \frac{\Phi_s s_s}{A_s \mu_0 \mu_{r,s}} \\ &= \int_y \frac{\Phi_s}{\mu_0 \mu_{r,y} A_y} ds_y + \int_a \frac{\Phi_s}{\mu_0 A_a} ds_a + \frac{\Phi_s s_s}{A_s \mu_0 \mu_{r,s}} \end{aligned} \quad (9)$$

where A_y and A_a are the cross-sectional areas inside the yoke and the air gap. The sample's flux Φ_s is known by measuring the flux density B_s using (7). All the magnetic path lengths and cross-sectional areas as well as the number of excitation coil windings are known through the setup's dimensions. The excitation current I is also measured. Since the nonlinear material properties of the yoke are assumed to be well known, the yoke's relative permeability $\mu_{r,y}$ can be determined from the flux Φ_s . Equation (9) can then be solved for $\mu_{r,s}$ thus showing the uniqueness of the sample's material properties for each value of $\Phi_s(I)$

$$\mu_{r,s} = \frac{\Phi_s s_s}{A_s \mu_0 \left(wI - \frac{\Phi_s}{\mu_0} \left(\int_y \frac{1}{\mu_{r,y} A_y} ds_y + \int_a \frac{1}{A_a} ds_a \right) \right)} = f(\Phi_s, I). \quad (10)$$

IV. DETERMINATION OF THE METHOD'S ACCURACY

As shown above, the proposed method is feasible in theory. In this paragraph, the influences of leakage flux, geometrical imperfections, measurement errors, and simulation errors on the method's accuracy are discussed.

The influences of leakage flux can be determined by using the FE-method. Geometrical imperfections due to machining tolerances lead to unknown dimensions of the air gaps within the magnetic circuit. Neglecting these changes in dimension in the FE-model can produce simulation errors. Measurement errors occur during the determination of the excitation current I and the sample flux $\Phi_s(I)$. As the measurement of dc currents is well established with accuracies $< 1\%$, the focus will be on the measurement of the sample flux Φ_s . Simulation errors result from simplifications made during modeling, inaccurate material data, and the numerical nature of the FE-method.

For the discussion of the method's accuracy, an FE-model of the setup shown in Fig. 1 is used. The FE-simulations are performed with ANSYS Maxwell. The model's main dimensions can be obtained from Fig. 6.

The measuring coil is modeled with a larger active diameter of 12.2 mm compared with the sample diameter of 10 mm thus resulting in a leakage flux between sample and measuring coil. This leakage flux is considered by the FE-simulation and needs not be compensated. Therefore, the flux $\Phi_c(I)$ and flux density $B_c(I)$ within the measuring coil are used for the proposed method instead of the sample flux $\Phi_s(I)$. The excitation coil has an inner diameter of 14 mm, an outer diameter of 34 mm, and contains 500 windings. An air gap between the sample and the yoke of 0.1 mm is included to ensure a smooth insertion of the sample into the yoke. For the yoke, a machining steel 1.1730 is defined using a known magnetization curve. The model is surrounded by a large region of air to allow the computation of flux outside the yoke. The setup shows rotational symmetry around the sample's axis as well as mirror symmetry through the middle of the sample. Therefore, the model is reduced to two dimensions and a quarter of the full setup's cross section, as shown in Fig. 7.

Boundary conditions are defined at the model's edges to take symmetry into account. A fine starting mesh is chosen

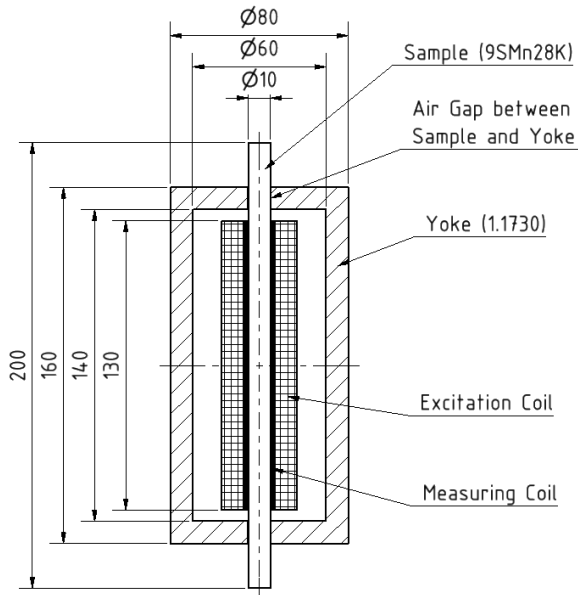


Fig. 6. Main dimensions of the model used in the FE-simulations in mm.

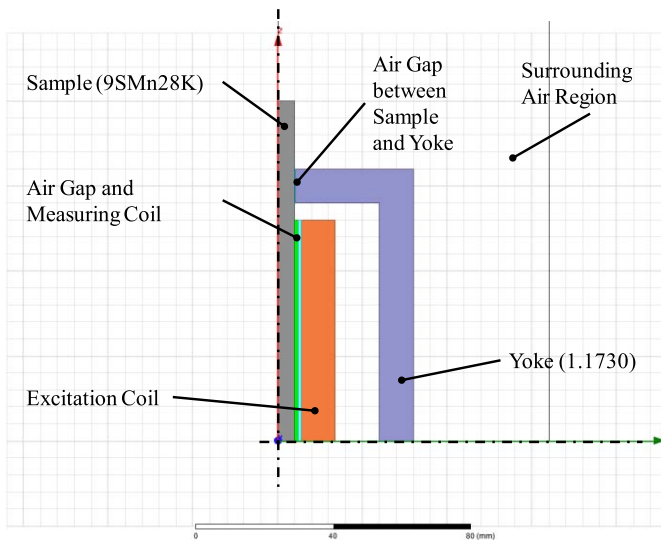


Fig. 7. FE-model used in the discussion of the proposed method's accuracy.

for the sample as well as the measurement coil's active area to ensure accurate results. The mesh and the boundary conditions are shown in Fig. 8.

In a first step, the measurement of the flux $\Phi_c(I)$ and flux density $B_c(I)$ within the measuring coil is simulated using the known nonlinear magnetization curve of a machining steel 9SMn28K for the sample and arbitrary values for the excitation current I . These results will be used as virtual measuring results in the following sections and contain the influences of leakage flux on the measuring results.

The air gap between the sample and yoke is then varied within coarse machining tolerances of ± 0.05 mm in steps of 0.025 mm to determine the influences of geometrical imperfections on the average flux density $B_c(I)$. The results are shown in Fig. 9.

The deviations compared with the original air gap of 0.1 mm are most significant for the lowest excitation currents and the

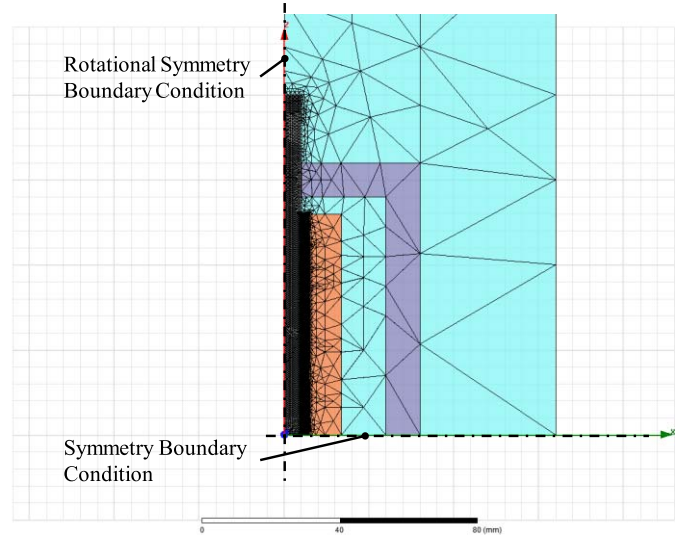


Fig. 8. Mesh and symmetry boundary conditions of the FE-model.

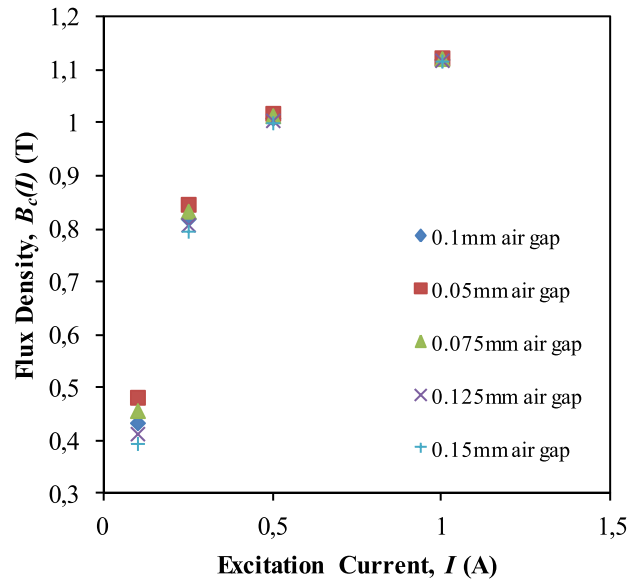


Fig. 9. Influences of machining tolerances in the air gap between sample and yoke on the simulated flux density $B_c(I)$ through the measuring coil.

most extreme machining tolerances. An air gap of 0.05 mm leads to an error in the virtual measurement of flux density $B_c(I)$ of +11% while an air gap of 0.15 mm results in an error of -9% for an excitation current of 0.1 A. These errors are reduced to $\pm 5\%$ for air gaps of 0.75 and 0.125 mm at 0.1 A. The deviations quickly become irrelevant for higher excitation currents. The results show that machining tolerances lead to possible errors in the simulated flux density $B_c(I)$ through the measurement coil. Therefore, the air gap between the sample and yoke cannot be neglected in the simulation model and has to be well known within small tolerances to minimize simulation errors. This goal can be achieved by measuring the sample diameter prior to each measurement and adapting the air gap in the FE-model.

In a second step, the sample's material properties are replaced with a linear material using (1). The optimization of the sample's relative permeability $\mu_{r,s}$ is then started

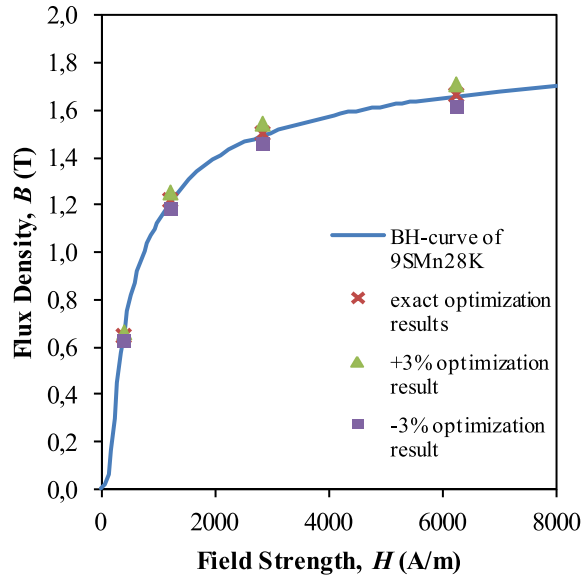


Fig. 10. Comparison of the resulting magnetization curve with the known magnetization curve using exact values for the flux density $B_c(I)$ as well as errors of $\pm 3\%$.

with the virtual measuring results from the first step as the optimization goal. The original air gap of 0.1 mm is used for the model. A sequential nonlinear programming algorithm included in ANSYS Maxwell is used for the optimization. The optimization is set to stop once a relative permeability $\mu_{r,s}$ is found that meets the optimization goal with an error of $<0.1\%$. The model's geometry, boundary conditions, and mesh settings are left unchanged from the first step apart from the linearization of the sample's material properties. Therefore, the simulated flux density $B_c(I)$ from the first step is regarded as a measurement without influences from geometrical imperfections, measurement, or simulation errors. The resulting sample magnetization curve therefore represents the baseline accuracy of the proposed method.

All the errors discussed above result in an error in the flux density $B_c(I)$ through the measurement coil. Therefore, these values are varied by $\pm 3\%$ in relation to the first simulation using a known nonlinear material for the sample. This variation represents a reasonable combined simulation and measurement error and can be used to characterize the proposed method's accuracy. The results of these simulations compared with the known magnetization curve used for the sample are shown in Fig. 10.

For exact flux densities $B_c(I)$, the BH-curve of 9SMn28K can be determined by the proposed method with negligible error. Even with assumed errors of $\pm 3\%$ in the flux density $B_c(I)$, the known magnetization curve can be found within an acceptable accuracy of $\pm 3\%$ for each data point. These results show that the method's accuracy correlates with any errors made in the measurement or simulation of the flux density $B_c(I)$. The model features a large air gap between the measuring coil and sample as well as yoke and sample. It can therefore be shown that the proposed method can take

these influences into account without reducing its accuracy. Therefore, the proposed method does not need a compensation of leakage flux between the sample and measuring coil.

V. CONCLUSION

A new method for measuring the magnetization curves of ferromagnetic materials using a simulation-based approach was presented. The method's requirements and feasibility were first discussed using a theoretical approach. It was shown that the magnetization curve can theoretically be assembled by measuring the excitation current and the sample flux and deriving the corresponding BH-values from a FE-simulation. The proposed method's accuracy was then discussed by performing an FE-analysis with variable air gaps between the sample and yoke. A significant influence of the air gaps on the sample's flux density was found. A simulation with a known magnetization curve for the sample was then performed to generate virtual measuring values for the sample flux density. These virtual values were applied to the proposed method. The results were compared with the known magnetization curve to determine the method's baseline accuracy. Errors of $\pm 3\%$ were then added to the virtual measuring values and the influences on the resulting magnetization curve were examined. It was shown that the proposed method's accuracy directly depends on the combined simulation and measurement accuracy of the sample flux. If these errors are smaller than $\pm 3\%$ then the proposed method determines the samples unknown magnetization curve with an accuracy of less than $\pm 3\%$. It was further shown that leakage flux between the measuring coil and the sample is considered by the proposed method and needs not be compensated. Achieving a simulation and measurement error within the discussed bounds on a specific magnetic circuit is nontrivial due to the influences described in this paper. However, recent publications show that these accuracies can be obtained with reasonable effort for a magnetostatic FE-analysis [5], [6].

REFERENCES

- [1] P. Graca and K. Mrozek, "Influence of magnetization curve on the force generated in axial active magnetic bearing," in *Proc. Int. SELM Syst.*, Opole-Zawiercie, Poland, May 2013, pp. 89–90.
- [2] A. E. Umenei, Y. Melikhov, and D. C. Jiles, "Models for extrapolation of magnetization data on magnetic cores to high fields," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, no. 12, pp. 4707–4711, Dec. 2011.
- [3] T. Nakata, N. Takahashi, K. Fujiwara, M. Nakano, Y. Ogura, and K. Matsubara, "An improved method for determining the DC magnetization curve using a ring specimen," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 28, no. 5, pp. 2456–2458, Sep. 1992.
- [4] O. Stupakov, "Controllable magnetic hysteresis measurement of electrical steels in a single-yoke open configuration," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 12, pp. 4718–4726, Dec. 2012.
- [5] B. A. T. Iamamura *et al.*, "Study of synchronous generator static eccentricities—FEM results and measurement," in *Proc. 20th ICEM*, Marseille, France, Sep. 2012, pp. 1829–1835.
- [6] F. J. Perez-Cebolla, A. Martinez-Isturbe, B. Martin-del-Brio, E. Laloya, S. Mendez, and C. E. Montano, "3D FEM characterization of a switched reluctance motor from direct experimental determination of the material magnetization curve," in *Proc. IEEE ICIT*, Athens, Greece, Mar. 2012, pp. 971–976.

Simulation of thin-walled injection molded magnets

Minh Nguyen, Wolfgang Schinköthe
Institute of Design and Production in Precision Engineering
University of Stuttgart
Stuttgart, Germany
nguyen@ikff.uni-stuttgart.de

Abstract—Injection molded magnets offer significant advantages in production cost and freedom of design compared to sintered magnets. The magnetic properties of the molded magnets are influenced by complex and interdependent factors derived from process settings as well as magnetic and rheological material properties. Simulation of the resulting injection molded magnets is therefore very difficult. Existing approaches suffer from reduced accuracy for thin-walled parts since an inhomogeneous distribution of melt temperatures during filling is not taken into account. In this paper, a new simulation approach is presented that includes these influences. The new approach is first described step by step. The measurement of required material properties is presented and the results are discussed for an exemplary material. Simulations of a thin-walled injection molded plate with a multipolar magnetization structure are then performed using an existing as well as the new approach. The results for this part are finally compared in order to determine the new simulation approach's feasibility.

Keywords—polymer-bonded magnets, injection molding, magnetostatic FE-simulation

I. INTRODUCTION

Injection molded magnets are composed of hard magnetic fillers embedded into a polymer matrix. The magnetic properties of the molded part are defined during the filling phase of the injection molding process by applying a magnetic orientation field inside the cavity. This leads to a magnetization and orientation of the hard magnetic fillers inside the polymer melt. During the cooling phase, the desired filler particle orientation is frozen inside the mold, defining the magnetization structure of the molded part.

Injection molded magnets offer significant advantages in production cost, freedom of design, number of process steps required, and functional integration compared to sintered magnets. The best results regarding magnitude and complexity of the part's magnetization can be achieved with anisotropic hard magnetic filler particles [1, 2]. Disadvantages of injection molded magnets include the high cost and complexity of the injection molds due to the integrated magnetic orientation fields. Furthermore, the composite nature of the base material leads to reduced magnetic properties of the molded magnets in comparison to sintered magnets [1-3].

The magnetic properties of the injection molded magnets are determined by the degree of magnetization and orientation as well as the volume content of the filler particles. The filler content is limited to 65% [1, 4] due to a negative effect

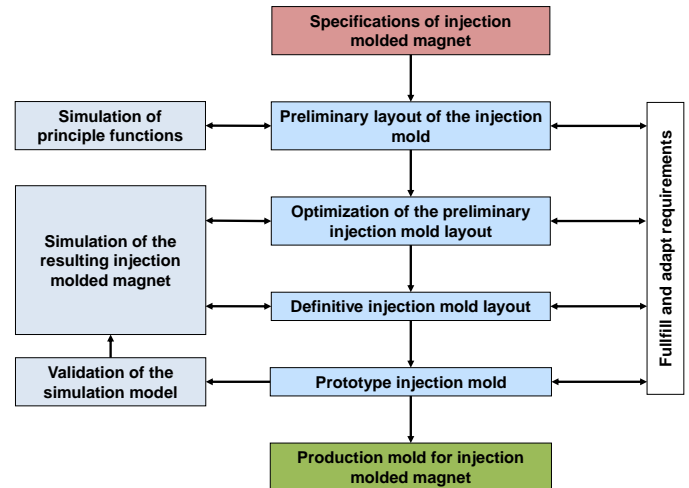


Fig. 1. Integration of simulation methods into the development process of injection molded magnets.

on the rheological properties of the compound material. The fillers' degree of magnetization and orientation is influenced by the magnetic and rheological properties of the compound material as well as process settings. The process influences include the orientation field strength, melt and mold temperatures, injection rate, and packing pressure. These influences are interdependent which makes an accurate prediction of the injection molded magnet's properties very difficult [1, 3].

The high complexity of injection molds and process influences calls for the use of simulation methods during the development of injection molded magnets. This allows a reduction of development times and the number of prototype molds since changes in the mold or the part can be analyzed quickly using a virtual model. Fig. 1 shows an iterative development process of injection molded magnets with the integration of simulation methods. Each development stage is compared to the specifications individually and iterations are performed backwards and forwards between the stages where needed. First, a preliminary layout of the injection mold is derived from specifications of the injection molded magnet. The preliminary layout is then refined using FE-simulations of the mold's principle functions. Simple models are therefore created to perform separate magnetic, thermal, structural, and fill simulations. The magnetic properties of the resulting injection molded magnets are then simulated for the preliminary injection mold layout. The preliminary layout is

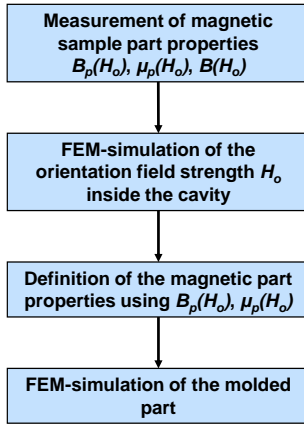


Fig. 2. Existing simulation approach.

optimized by applying changes to the injection mold design and repeating the simulation of the injection molded magnet until the specifications are fulfilled. Next, a definitive injection mold layout is designed. The injection molded magnet for this design is simulated and compared to specifications as well. Simulation methods provide a bigger advantage in time and cost the more accurate they are. An infinitely accurate simulation of the molded magnet's properties can eliminate the need for expensive prototype molds. In practice, at least a single prototype of the definitive injection mold layout is still required. Data from this prototype is used to validate the simulation models and test process settings before a production mold for the injection molded magnet is manufactured.

An existing approach for the simulation of injection molded magnets is shown in Fig. 2. First, a correlation between the orientation field strength H_o inside the mold and the resulting part's magnetic properties is determined for each individual compound material. Test samples are molded for this purpose and subjected to varying orientation field strengths H_o during molding. The orientation field has to be homogenous inside the sample cavity so that a homogenous magnetization and orientation of filler particles throughout the sample can be assumed. Then, the sample's resulting permanence B_p and permanent permeability μ_p are measured and correlated with the applied orientation field strength H_o . This measurement also allows a determination of the material's initial magnetization curve $B(H_o)$. In a next step, an FE-model of the actual injection molded magnet, that is to be simulated, is created. This model contains the orientation field inside the injection mold, any relevant tool steels, and the compound material's initial magnetization curve. The orientation field strength H_o is then evaluated for each finite element of the cavity. The measured correlation between magnetic part properties and orientation field strength H_o from the samples is then transferred to each element of the cavity, thus defining the magnetic properties of the actual injection molded magnet. In a last step, the molded magnet itself can be simulated [2, 5].

The existing approach works well for injection molded magnets with a wall thickness of more than 1 mm and strong

orientation fields, reaching simulation errors well below 10% [3, 5]. However, studies show simulation errors of up to 20% for a part thickness of 1 mm and a finely divided multipolar magnetization structure with relatively weak orientation fields inside the cavity [3]. The existing approach assumes a homogeneous distribution of temperatures inside the polymer melt during magnetization and orientation of the sample as well as the actual part. However, the polymer melt starts freezing where it comes into contact with the much cooler mold. The temperature difference between melt and mold results in an inhomogeneous distribution of melt temperatures through the part's thickness and along the flow path. In these cooler melt regions, the filler particle's degree of orientation is reduced compared to the hot core of the part. The existing approach cannot take this effect into account and thus leads to an overestimation of the filler orientation and magnetic part properties [3]. The resulting simulation error can be neglected for thick-walled parts since most of the melt volume shares the same temperature and freezing effects are confined to the edges of the part [3, 5]. For thin-walled parts however, the regions of reduced orientation are larger compared to the part's volume and thus the simulation error becomes significant. Since the existing approach assumes a homogenous distribution of temperatures inside the molded part, neither the effects of melt cooling at the part's edges nor a cooling of the melt over the flow length can be simulated.

In this paper, a new simulation approach is therefore presented that is able to take an inhomogeneous distribution of melt temperatures inside the mold cavity into account. The new approach is first described step by step. Its feasibility is then discussed by performing a simulation of a thin-walled injection molded plate with a multipolar magnetization structure. The new approach is finally compared to the existing approach and differences in the results are presented and discussed.

II. NEW SIMULATION APPROACH

In order to increase the simulation accuracy for thin-walled parts, the existing approach was expanded to include the effects of inhomogeneous melt temperatures on the magnetic part properties. The new simulation approach is shown in Fig. 3.

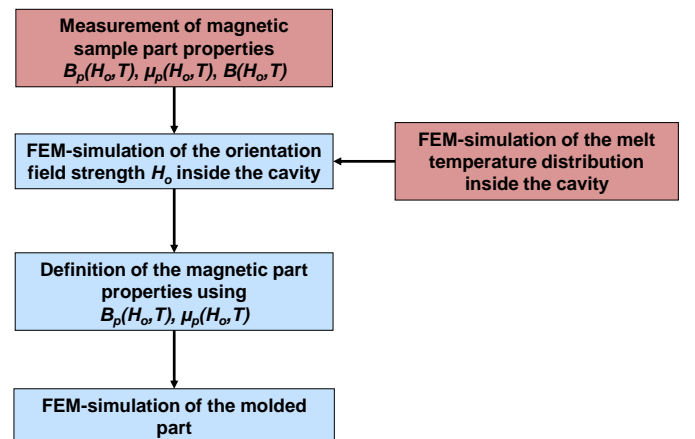


Fig. 3. New simulation approach.

First, the correlation between the magnetic part properties, the orientation field strength H_o , and additionally the melt temperature T at the time of orientation has to be measured for each compound material. This correlation is determined by producing test samples using a specialized injection mold similar to the existing approach. For each sample, the mold is set to a specific temperature. The mold is then filled and a homogenous electro-magnetic orientation field is applied to the cavity once the melt and mold temperatures have equalized. The orientation field is sustained until the sample reaches its freezing temperature in order to avoid a disorientation of fillers during freezing. The sample's resulting permanence B_p and permanent permeability μ_p are then measured according to IEC 60404-5 and correlated with the set mold temperature T and orientation field strength H_o . This measurement also yields an initial magnetization curve $B(H_o, T)$ of the material for each set melt temperature [5]. The resulting magnetic properties contain both the degree of filler orientation and the degree of filler magnetization.

In a next step, a fill analysis of the actual injection molded magnet, that is to be simulated, is performed. This analysis determines the polymer flow and the melt temperature inside the mold during the filling phase. The model for the filling analysis has to contain accurate thermal and rheological material properties for the mold materials as well as the melt material. Ideal process parameters such as mold temperature, injection pressure, and injection rate can be determined by the fill analysis depending on the available injection molding machines and the given mold geometry. The melt temperatures at the time of complete filling can then be stored for each finite element inside the mold. It is assumed that any orientation of the hard magnetic filler particles by the orientation field only occurs once the melt flow stops since the high injection pressure overrides any magnetic orientation during filling [3].

A magnetostatic FEM-simulation of the injection mold is performed next in order to calculate the orientation field strength H_o inside the cavity. The magnetic properties of the tool steels as well as the measured properties of the melt have to be defined in this analysis using the respective initial magnetization curves. The melt temperatures derived from the fill analysis are therefore mapped onto the mesh of the magnetostatic model. The temperatures of the injection mold and the melt have to be taken into account since these magnetic properties are often measured at room temperature and are reduced by the higher process temperatures inside the mold. If the orientation field is produced by permanent magnets then the magnetic properties of the magnets are reduced by the mold temperature as well. Studies have shown that the melt material inside the cavity cannot be neglected in the magnetostatic analysis although its relative permeability μ_r is close to 1 [6]. The magnitude and direction of the orientation field strength vector are then stored for each finite element of the cavity.

The measured correlation between the test sample's magnetic properties, the orientation field strength inside the test cavity, and the melt temperatures is now transferred to each finite element of the actual magnet. The part's magnetic properties are defined using the simulated orientation field strength and

the mapped melt temperatures. It is assumed that the resulting magnetic properties are oriented in the exact same direction as the simulated orientation field strength vector since the measured sample material data already includes the filler's degree of orientation. Therefore, the material inside the cavity is defined as an anisotropic permanent magnet with magnetic properties depending on the melt temperatures at the end of filling as well as the orientation field strength vector inside the cavity.

In a final step, the injection molded magnet with its defined properties can be simulated on its own or as part of a technical setup.

III. DETERMINATION OF THE NEW APPROACH'S FEASIBILITY

The correlation between magnetic part properties, melt temperatures, and orientation field strength is first measured and analyzed in order to determine whether or not the new approach is feasible. An injection mold for a thin-walled plate with a multipolar magnetization structure is then modeled. The resulting magnetic properties of the injection molded magnet are simulated separately using the existing and the new simulation approach. The results are then compared with one another, as well as measurements found in literature, in order to determine whether or not the changes resulting from the new simulation approach are significant [3].

A PA12-based compound with anisotropic hard ferrite fillers with a volumetric filler content of 63% was chosen for the following measurements and simulations. The compound has a freezing temperature of 160°C and a recommended processing temperature of 280°C.

Fig. 4 shows the parts of the injection mold used in the simulations of the thin-walled injection molded magnet. The injection molded magnet is composed of a thin rectangular plate with a length of 52 mm, a width of 20 mm, and a thickness of 1 mm. It is filled through a sprue bushing and a film gate. The cavity is placed in a mold insert on the ejector side. The insert is composed of high strength aluminum 3.4365. On the feed, side seven NdFeB-magnets with alternating polarization, as shown in Fig. 4, are situated close to the cavity. They produce a curved orientation field inside the cavity.

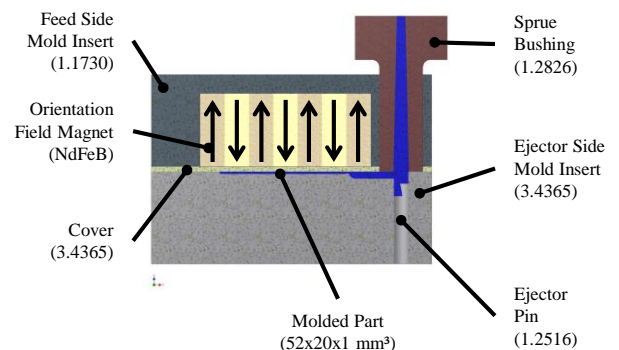


Fig. 4. Injection mold used for the discussion of the new approach's feasibility.

The magnets are designed to be slightly wider than the cavity to ensure a more homogenous orientation field over the part's width. They are separated from the polymer melt by a thin cover plate composed of high strength aluminum 3.4365. The mold insert on the injection side is made from a tool steel 1.1730 and functions as a back iron for the magnetic flux produced by the orientation magnets.

A. Measurement of magnetic sample part properties

Cylindrical test samples with a diameter of 20 mm and a thickness of 5 mm were produced with melt temperatures T ranging from 100°C to 280°C and orientation field strengths H_o ranging from 90000 A/m to 900000 A/m. Measurement of the samples results in the compound material's permanence B_p and permanent permeability μ_p as a function of the orientation field strength H_o and the melt temperature T . An initial magnetization curve of the compound material can be derived from this data [5]. Fig. 5, Fig. 6 and Fig. 7 show the results of the measurements for the sample's permanence, permanent permeability and initial magnetization curve respectively.

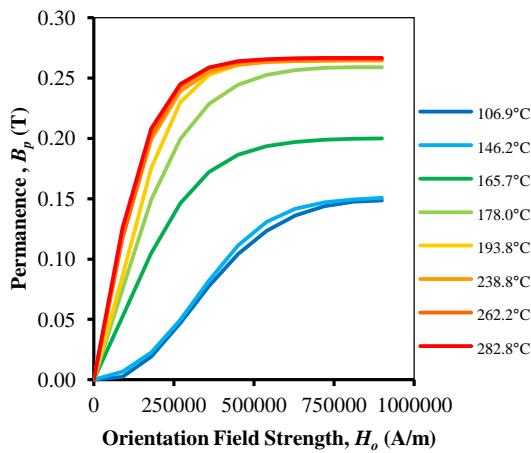


Fig. 5. Measured permanence for different melt temperatures.

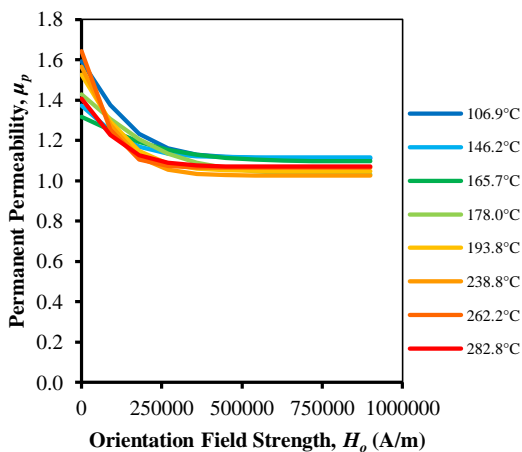


Fig. 6. Measured permanent permeability for different melt temperatures.

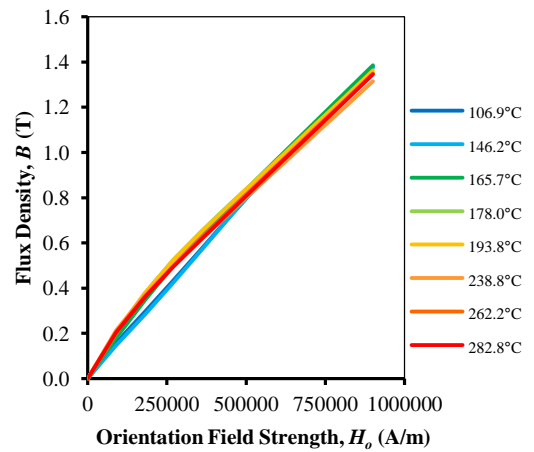


Fig. 7. Measured initial magnetization curve for different melt temperatures.

The material's permanence B_p shows a strong correlation with the melt temperature T . The part shows isotropic behavior at temperatures below the freezing temperature of 160°C. In this case, the magnetic properties are the same as for samples that have been molded without an orientation field and have been magnetized after freezing. Above the freezing temperature, the resulting permanence rises quickly. Between 240°C to 280°C, differences in melt temperature show little influence on the sample's permanence. A similar degree of filler orientation can be assumed for these temperatures.

The results for the sample's permanent permeability μ_p show little influences of the melt temperature T on the material properties. A trend for a decrease of the permanent permeability with rising melt temperatures can be seen. However, it has to be noted that measurements of such a low permeability, at around 1 to 1.2 for high field strengths, are close to the measurement setup's margin of error.

The initial magnetization curves also show little influence of the melt temperature. Most changes occur at field strengths below 500000 A/m. Since this data is derived from the measurement of the sample's permanent permeability, the setup's margin of error is reflected in the initial magnetization curve as well.

B. FEM-simulation of the melt temperature distribution

A full 3D model of the injection molded magnet and the surrounding mold materials, as shown in Fig. 4, is created in Autodesk Moldflow for the fill analysis. Thermal conductivity and specific heat have to be defined for the mold materials. The polymer melt's rheological properties have to be defined as coefficients of the Cross-WLf viscosity model and the 2-domain modified Tait pvT model. Finally the melt's thermal conductivity and specific heat have to be defined as well. The cavity is then finely meshed to ensure a sufficient number of elements over the part's thickness. The meshed part is shown in Fig. 8.

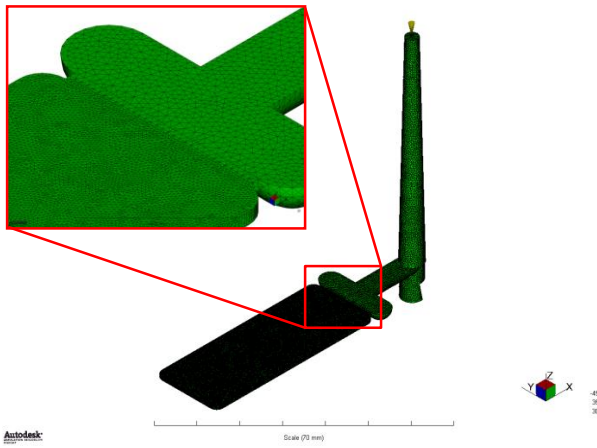


Fig. 8. Finely meshed part in Autodesk Moldflow.

The mold temperature is set to 100°C and the melt temperature is set to 280°C at the start of filling. The injection molding process parameters are set for an ARBURG Allrounder 270S injection molding machine with an 18 mm machine screw diameter and a clamping force of 250 kN. The filling process is controlled by the injection time of the polymer melt. At the end of the filling phase, the nodal melt temperatures and coordinates inside the cavity are exported to a text file. The melt temperatures are simulated for set fill times of 0.2 s, 0.5 s and 1.0 s in order to determine the new approach's feasibility. Exemplary results of the fill analysis derived from a cutting plane through the middle of the part's thickness are shown in Fig. 9.

The results of the fill analysis show that the melt cools down to the mold temperature of about 100°C where it touches the mold surface. In these regions, a reduced degree of filler orientation is to be expected. The edges are cooler the closer they are to the sprue since cooling of the melt is time-dependent. This results in a thicker region of reduced filler orientation near the sprue.

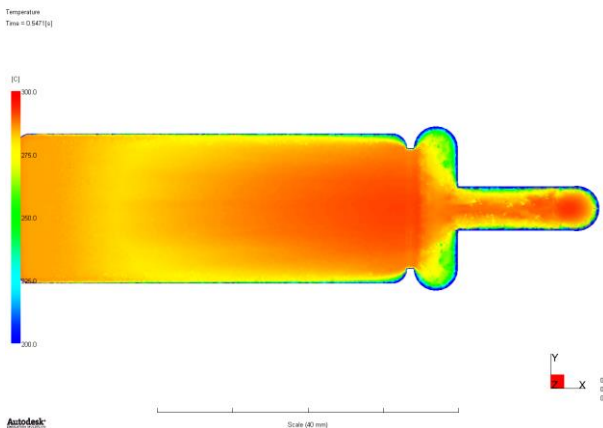


Fig. 9. Distribution of melt temperatures inside the cavity at the end of filling for an injection time of 0.5 s.

This effect is confined to the part's width and cannot be observed over its thickness since the hot melt is transported through the middle of the part. However, the melt experiences a slighter cooling over the length of the cavity compared to the edges. Simulations with different fill times show that the regions of reduced orientation at the part's edges grow thicker the slower the part is filled while cooling of the melt over the flow length increases.

C. FEM-simulation of the orientation field strength

The orientation field strength H_o inside the cavity is determined by a magnetostatic FE-simulation using ANSYS Mechanical APDL. A 3D model of the setup shown in Fig. 4 is created using the following simplifications. First, the entire setup is cut in half in order to reduce the number of finite elements. A flux parallel boundary condition is defined on the cutting plane in order to take the model symmetry into account. Any holes for screws or ejection pins inside the mold inserts are ignored as well as the entire sprue bushing, runner, and gate. The inserts are modeled to be massive instead. Preliminary simulations showed these simplifications to have no significant effect on the orientation field strength inside the cavity. The reduced model is shown in Fig. 10.

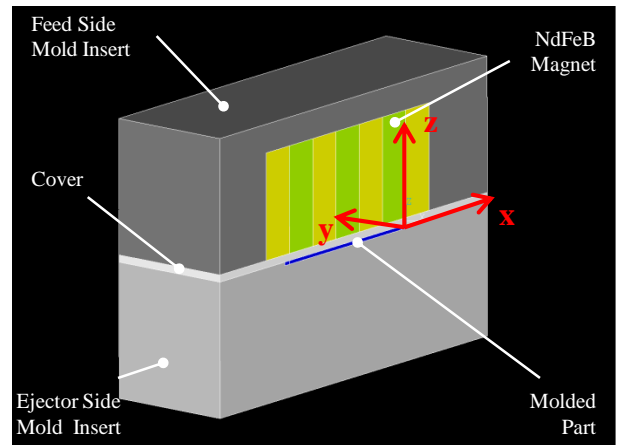


Fig. 10. Model used for the magnetostatic analysis of the orientation field strength inside the cavity.

The NdFeB magnets are defined with a relative permeability of $\mu_r=1.05$ and a coercive force of $H_c=800000$ A/m. The direction of polarization is set as shown in Fig. 4. The tool steel 1.1730 is defined using an initial magnetization curve derived from measurements according to DIN EN 60404-4. For the aluminum 3.4365, a relative permeability of $\mu_r=1$ is assumed. The polymer melt is defined using the temperature-dependent initial magnetization curves $B(H_o, T)$ derived from the test samples, as shown in Fig. 7. Therefore, the melt temperature results from Autodesk Moldflow are imported and mapped onto the finite element mesh in ANSYS Mechanical APDL. These melt temperatures are then used to assign an individual initial magnetization curve to each finite element inside the cavity. The cavity is finely meshed with hexahedral elements to ensure accurate results and a sufficient resolution for the magnetic field at the part's edges. The rest of the model is meshed using coarser tetrahedral elements. The meshed model is shown in Fig. 11.

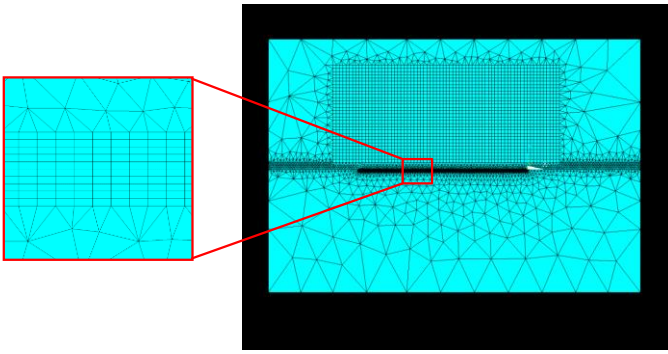


Fig. 11. Meshed FE-model for the simulation of the orientation field strength inside the cavity.

The orientation field strength inside the cavity is then simulated for different melt temperature distributions at the end of filling. The existing approach is replicated by setting the melt temperature to 280°C for each element of the cavity. In this case, each finite element is assigned the same initial magnetization curve for the set temperature. For the new approach, the melt temperatures derived from the fill analysis in Autodesk Moldflow for a fill time of 0.2 s, 0.5 s and 1.0 s are mapped onto the cavity. The initial magnetization curves of the melt are set accordingly for each element. An exemplary simulated orientation field is shown in Fig. 12 for an enlarged portion of the cavity. The view is set along the y-direction as shown in Fig. 10.

The NdFeB magnets produce a curved field inside the cavity with field strength magnitudes varying from 110000 A/m to 290000 A/m. The orientation field strength H_z in the model's z-direction, as shown in Fig. 10, is evaluated on a cutting plane through the middle of the cavity's thickness. Fig. 13 shows the resulting orientation fields for the existing approach with a constant melt temperature of 280°C and the new approach for a fill time of 0.5 s.

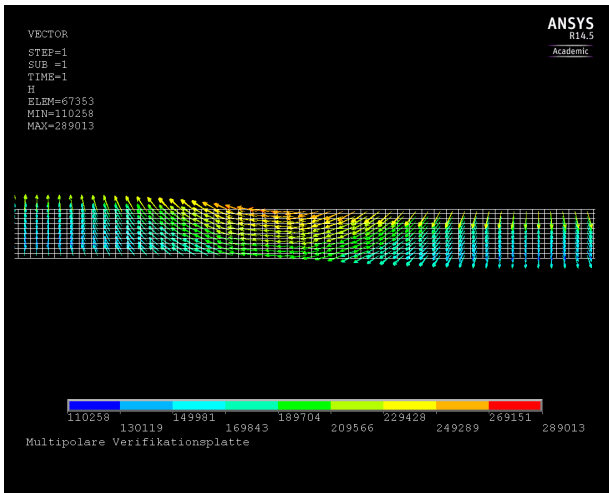


Fig. 12. Resulting orientation field strength vector inside an enlarged portion of the cavity for a fill time of 0.5 s.

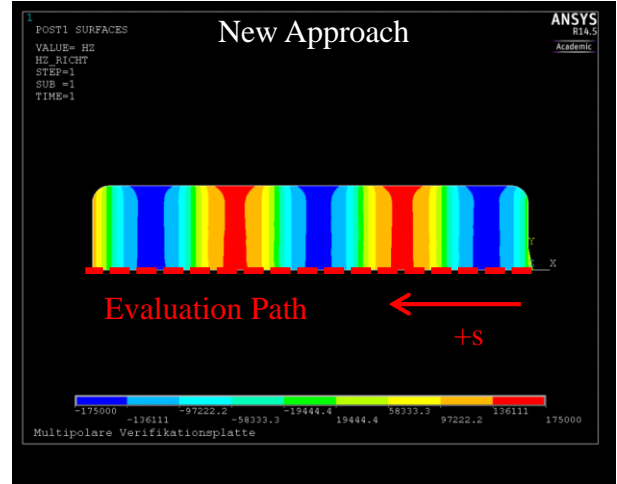
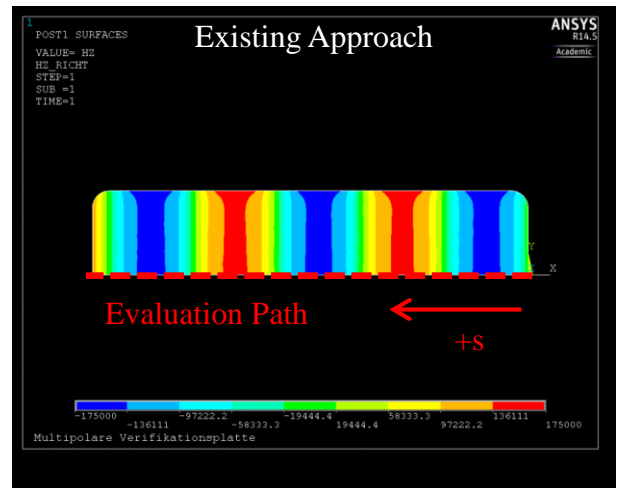


Fig. 13. Comparison of the orientation field strength inside the cavity between the existing approach and the new approach.

The results for the orientation field strength show no obvious differences between the existing approach and the new approach. In order to achieve a more accurate comparison the orientation field strength H_z is evaluated on a path through the cavity as shown in Fig. 13. The results of the comparison are presented in Fig. 14.

No significant differences can be seen in the orientation field strength H_z between the existing and the new simulation approach on the evaluation path. It can therefore be stated that the inhomogenous melt temperature distribution at the end of filling has no effect on the orientation field strength inside the cavity for the investigated filling times. This result is plausible when compared to the measured initial magnetization curve of the melt material which was shown to be largely independent of the melt temperature in Fig. 7.

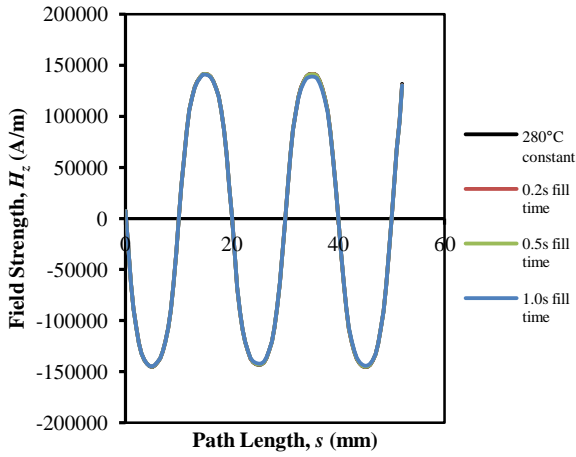


Fig. 14. Comparison of the orientation field strength between the existing approach and the new approach on an evaluation path through the cavity.

D. Definition of the part's magnetic properties

The hard magnetic properties of the injection molded part are now defined using the material properties gained from the test samples. The magnetostatic model is first changed in order to analyze the resulting magnetic properties of the part. All model geometries and finite elements are deleted except for the newly-defined magnet. A new region of air is then modeled around the part. A finely-meshed region of air is additionally created above the injection molded magnet for the evaluation of the magnetic properties. The same flux parallel boundary condition as before is used on this model to take symmetry into account. The new model is shown in Fig. 15.

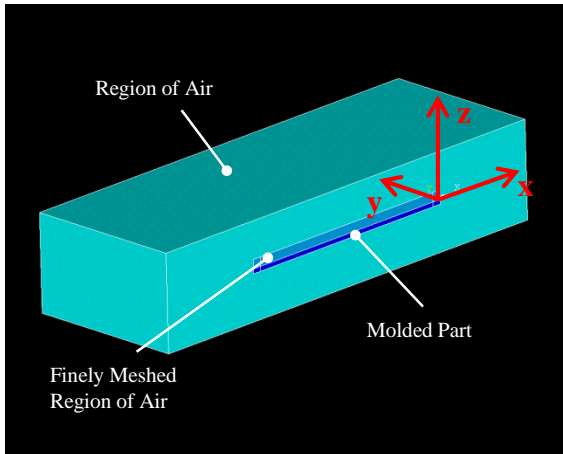


Fig. 15. Model used to evaluate the resulting magnet's properties.

The magnetic field strength H_z is evaluated in the z-direction, as shown in Fig. 15, on a plane 1 mm above the part's surface. The evaluation plane lies inside the finely meshed region of air. The magnetic field of the resulting injection molded magnet is then simulated for a homogenous distribution of melt temperatures as well as varying fill times. Fig. 16 shows the resulting magnetic field strength H_z at the evaluation plane for the existing approach and for a fill time of 0.5 s.

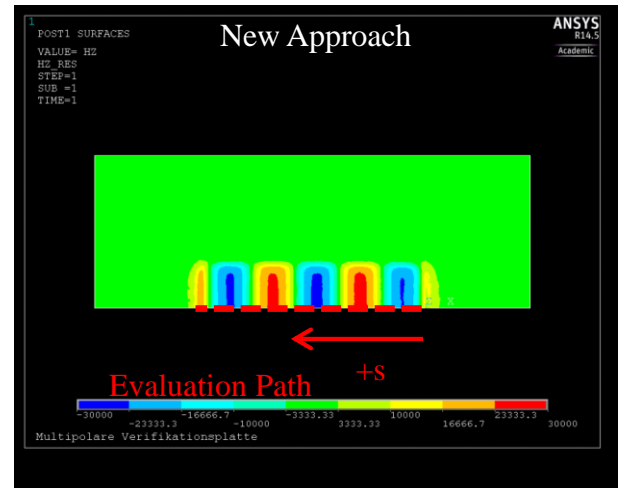
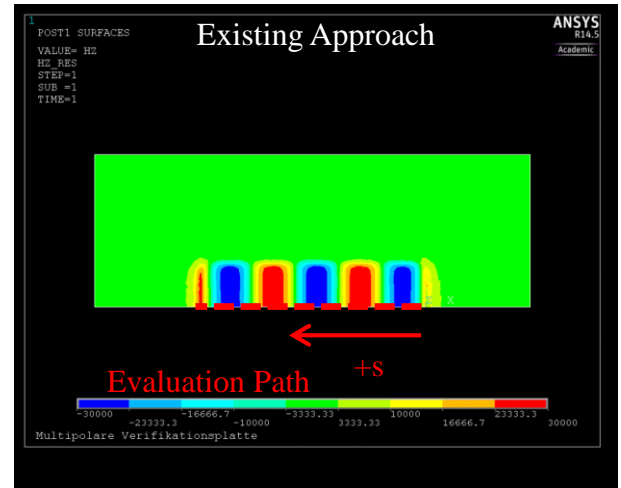


Fig. 16. Comparison of the resulting field strength above the part between the existing approach and the new approach.

Significant differences can be seen in the resulting magnetic properties of the injection molded part even though the orientation field strengths were shown to be the same. For the new approach, the resulting field strengths are reduced overall for a fill time of 0.5 s. This reduction can be seen especially around the part's edges where the melt is the coolest. The field strength H_z is evaluated on the path shown in Fig. 16 for a comparison of all simulated fill times. The results are summarized in Fig. 17.

An overall decrease of the peak field strengths on the evaluation path can be seen in the new simulation approach. This shows that the injection molded magnet is weakened by taking the inhomogeneous distribution of melt temperatures into account. For a further evaluation, only the three middle peaks are considered since they show constant field strength magnitudes with the existing approach. This is due to the arrangement of the orientation magnets used in the model. The peak field strengths decrease by 14% for a fill time of 0.2 s, 17% for fill time of 0.5 s and 21% for a fill time of 1.0 s. Furthermore, the results show a decrease of the peak field strength magnitude along the path length. This decrease is most significant with 4.2% for a fill time of 1.0 s.

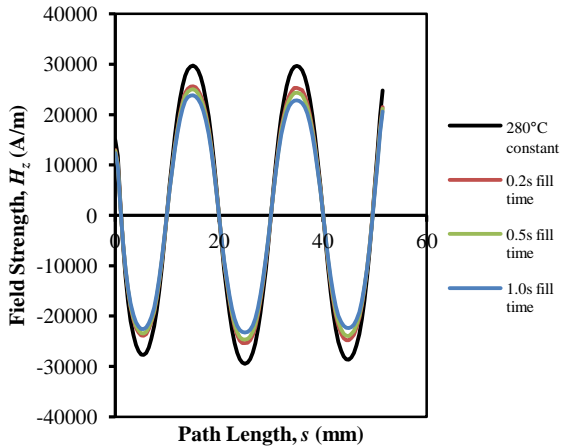


Fig. 17. Comparison of the resulting field strength between the existing approach and the new approach on an evaluation path above the part.

These results show that the new simulation approach leads to significant changes in the magnetic part properties compared to the existing approach. Both the overall decrease of peak field strengths as well as the decrease of field strength over the flow length occur in measurements of actual injection molded magnets with a thicknesses of 1 mm [3]. The resulting decrease of the part's magnetic properties is still roughly comparable although these measurements were performed with a different melt material and different part dimensions. Therefore, it can be shown that the new simulation approach is suitable to increase the simulation accuracy for the prediction of thin-walled injection molded magnets. The new approach can take additional influences on the magnetic properties, derived from different fill times and distributions of melt temperatures, into account. The results of these influences can be reasonably simulated, the new approach is therefore feasible.

IV. CONCLUSION

In this paper, a new approach for the simulation of thin-walled injection molded magnets is presented. The new approach is able to take the effects of an inhomogeneous distribution of melt temperatures at the end of filling on the part's magnetic properties into account. Exemplary material data measurements, performed as part of the new approach, are presented and discussed. It is shown that the melt temperature at the time of filler orientation has a significant effect on the part's magnetic properties. The permanence B_p is affected most while permanent permeability μ_p and initial magnetization curve $B(H_o, T)$ are mostly unaffected.

The new approach is compared with an existing simulation approach using the model of a thin-walled multipolar injection molded magnet. First, the melt temperatures at the end of filling are simulated with a fill analysis in Autodesk Moldflow for different fill times. It can be shown that the melt

temperatures decrease with increasing fill times. This decrease is concentrated on the part edges where the hot melt comes into contact with the much cooler mold. Furthermore, a cooling of the melt over the flow length is observed. Then, the influences of the new approach on the orientation field inside the cavity are simulated with a magnetostatic analysis in ANSYS Mechanical APDL. It can be shown that the orientation field is not influenced by the inhomogeneous melt temperatures. This result correlates with the measurement data for the material's initial magnetization curve.

A simulation of the injection molded magnet however shows a significant overall decrease in the magnetic properties with increasing fill times and increasing cooling of the melt. Furthermore, the magnetic properties of the simulated injection molded magnet decrease over the flow length with the new approach. The overall decrease in the part's field strength in air amounts to as much as 21% for a simulated fill time of 1.0 s. The simulation also results in a decrease of peak field strengths of 4.2% over the flow length for the same fill time. These results are compared to existing measurement data. The new approach is deemed feasible since both the decrease in overall field strength and over the flow length roughly match existing experimental data. Therefore it can be concluded that the new simulation approach is able to increase the simulation accuracy for thin-walled injection molded magnets.

Future works are planned to validate the new simulation approach by comparing the simulation results to further experimental data. An injection mold for production of the thin-walled magnet presented in this paper was developed and manufactured for this purpose. The resulting properties of the injection molded magnet are then to be measured close to the part's surface using a hall sensor. This data can finally be compared to the simulation results in order to validate the new approach.

References

- [1] D. Drummer, "Verarbeitung und Eigenschaften kunststoffgebundener Dauermagnete", Dissertation, Institute of Polymer Technology, University Erlangen-Nuremberg, 2004.
- [2] T. Schliesch, "Kunststoffgebundene Dauermagnete – Werkstoffe, Auslegung und Prüftechnik", in *Hochgefüllte Kunststoffe*, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2002, pp. 179-210.
- [3] S. Eimeke, "Spritzgießen multipolarer, kunststoffgebundener Dauermagnete", Dissertation, Institute of Polymer Technology, University Erlangen-Nuremberg, 2008.
- [4] K. H. Kurth, D. Drummer, "Improvement of the magnetic properties of injection molded polymer bonded magnets", in *Proceedings of 3rd International Electric Drives Production Conference*, Nuremberg, 2013.
- [5] T. Schliesch, "Kunststoffgebundener Rotor für Gleichstrommotoren mit unterschiedlichen Werkstoffen und Feldbereichen", in *Kunststoffgebundene Dauermagnete*, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2004, pp. 68-88.
- [6] T. Schliesch, "Distribution of Polarization in Bonded Permanent Magnets", in *Proceedings of Magnetics 2014, Orlando*, 2014.