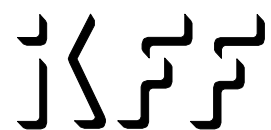


Universität Stuttgart

Jahresbericht IKFF 2015

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 2016

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 2014/15 und SS 2015)	16
3	WISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN, STUDIEN-, DIPLOM- UND BACHELORARBEITEN	19
3.1	Dissertationen	19
3.2	Master-/Diplomarbeiten am IKFF (WS 2014/15 und SS 2015)	19
3.3	Bachelorarbeiten am IKFF (WS 2014/15 und SS 2015)	20
3.4	Studienarbeiten am IKFF (WS 2014/15 und SS 2015)	21
3.5	Preise.....	22
4	ARBEITSGEBIETE DER WISSENSCHAFTLICHEN MITARBEITER ..	23
4.1	Aktorik.....	23
4.2	Spritzgießen.....	25
4.3	Zuverlässigkeitstechnik.....	28
5	ÖFFENTLICHKEITSARBEIT	29
5.1	Veröffentlichungen	29
5.2	Gremienarbeit	31
5.3	Tag der Wissenschaft	31
6	KONGRESSE, TAGUNGEN UND MESSEN	33
7	WERKSTATTBERICHT	35
8	ANHANG - Ausgewählte Veröffentlichungen	35

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. Judith Henzler (geb. Kofler)

Dipl.-Ing. Bastian Keller

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

Dipl.-Ing. Andreas Maucher

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

M.Eng. Markus Raab

Dipl.-Ing. Adrian Retzbach

Dipl.-Ing. Gregor Schattka

M.Sc. Frank Schiele

M.Sc. Simon Strohmeyr

Modellbau und Versuchswerkstatt:

Ralf Berwanger

Stefan Schneider

Wissenschaftliche Hilfskräfte:

Kaupp, Tatjana

Litwin, Thomas

Mäder, Georg

Maul, Markus

Pricci, Roberto

Wolf, Marius

1.2 Jahresrückblick**Der Brand von 2014 und seine Nachwirkungen**

Das einschneidendste Ereignis des vorletzten Jahres 2014 war ein Brand im Pfaffenwaldring 9. Im Juni 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.

Das Institut musste ein Interimsquartier im Allmandring 30 beziehen. Dort waren 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 war für die gesamte Zeit komplett abgestellt, um den Sanierungsfortschritt zu unterstützen und Maßnahmen zu koordinieren. Die Forschungsarbeit war in dieser Zeit stark eingeschränkt, da kein Zugriff auf Geräte bestand. Auch in der Lehre musste ein Interimskonzept umgesetzt werden.

Der Wiedereinzug in die sanierten Institutsräume erfolgte im Februar 2015. Schritt für Schritt wurden die Wiederinbetriebnahmen der Labore und Maschinen sowie die Wiedereinrichtung der studentischen Arbeits- und Praktikumsplätze abgearbeitet. Dies zog sich zumindest teilweise noch bis zum Wintersemester 2015/2016 hin. Zum Jahresende 2015 waren dann alle Labor- und Praktikumsräume wieder voll einsatzbereit. Allerdings sind die Nachwirkungen der vielen materiellen Verluste nach wie vor unverkennbar. Viele Eigenbauten von Versuchsständen, Antrieben und anderen Geräten sind nicht mehr vorhanden, Vorlesungsmodelle nicht mehr existent und jeder Griff nach Kleinmaterial, Werkzeug und Messtechnik offenbart immer wieder neue Lücken. Das Institut war insgesamt für einen Zeitraum von ca. 18 Monaten massiv beeinträchtigt und eingeschränkt, insbesondere hinsichtlich der Forschungsarbeiten und Drittmittelaktivitäten. Auch die Aufrechterhaltung der Lehre erforderte in dieser Zeit erhebliche zusätzliche Anstrengungen.

Personalia

Glücklicherweise hatten viele Mitarbeiter des IKFF ihre Arbeiten zur Dissertation weitgehend abgeschlossen, als das Brandereignis auftrat. Sie konnten ihre Arbeiten dann teils sogar deutlich eher als geplant zusammenschreiben, weil alle weiteren Institutsaktivitäten stark eingeschränkt waren.

Die Herren Matthias Engel, Matthias Maier und Benjamin Reutzsch wurden gleich noch im Jahre 2014 mit der Dissertation fertig, 2015 folgten Sebastian Bobrowski, Minh Nguyen und Bastian Keller. Alle gingen danach in die Industrie. Eine Mitarbeiterin, Frau Henzler, ging in die Elternzeit, so dass insgesamt sieben Mitarbeiterinnen/Mitarbeiter innerhalb einer vergleichsweise kurzen Zeitspanne aus dem Institut ausschieden. Im Ergebnis stand damit fast ein kompletter personeller Neuaufbau an. Neu eingestellt wurden bisher die Herren Simon Strohmeyr, Markus Raab und Frank Schiele.

Aktivitäten in der Lehre

Die Anfängerzahlen im Maschinenbau sind nach wie vor konstant hoch. Die Anfängerzahlen aller maschinenbaulichen Bachelor-Studiengänge der Universität Stuttgart (ohne Luft- und Raumfahrttechnik) lagen im Jahr 2015 bei ca. 1150 Studierenden. Derartig hohe Anfängerzahlen haben wir nun schon seit 2010 zu verzeichnen. Im Bachelor-Studiengang Maschinenwesen selbst fielen die Anfängerzahlen gegenüber dem Vorjahr etwas auf ca. 310. Hinzu kommen noch ca. 850 neue Masterstudierende gegenüber 625 im Vorjahr und 400 vor 2 Jahren in allen Mastern unserer Fakultät. Hier wachsen die Zahlen also noch stark an. Wir fahren eine hohe freiwillige Überlast.

Der Masterstudiengang Maschinenbau/Mikrotechnik, Gerätetechnik und Technische Optik (Studiendekan Prof. Schinköthe, Studiengangsmanager Herr Burkard) hat inzwischen ca. 20 Anfänger pro Semester (halbjährliche Zulassung). Zuspruch zu unserem Master gibt es vor allem von außen, aus anderen Universitäten, Fachhochschulen bzw. aus Dualen Hochschulen. Die Studierendenzahl liegt damit nun über der langfristigen Zielstellung von 25 Immatrikulationen pro Jahr, falls diese Entwicklung so bestehen bleibt.

In der Konstruktionslehre Feinwerktechnik hatten wir bis zum Sommer 72 Studierende zu betreuen, im Wintersemester haben 81 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 Bachelor-Studiengänge Maschinenbau sowie Fahrzeug- und Motorentchnik.

Im Hauptfach/Spezialisierungsfach dominieren nun die Masterstudierenden. Derzeit begannen 50 Studierende im Fach „Gerätekonstruktion und -fertigung in der

Feinwerktechnik“ als Pflicht- oder Kernfach. 33 Studierende starteten im Kernfach „Aktorik“. Das Fach „Praxis des Spritzgießens in der Gerätetechnik, Verfahren, Prozesskette, Simulation“ belegten 14 Studierende, die „Praktische FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL“ belegten 24 Studierende. Im vergangenen Jahr hatten wir zudem mit 25 Studien-, Bachelor- und Masterarbeiten trotz Brand wieder einen enormen Zuspruch in diesem Bereich. Hinzu kamen nochmals 16 Studierende in Projektarbeiten im SS 2015 und WS 2015/16.

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.

Hinzu kommen die Lehrveranstaltungen „Praktische FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL“ und „Praxis des Spritzgießens in der Gerätetechnik; Verfahren, Prozesskette, Simulation“, die einen guten Anklang finden.

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 64 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 und konnten jetzt nach dem Wiederaufbau auch vollständig angeboten werden. Mit diesen insgesamt 7 Praktika existiert ein solides Angebot zum praktischen Arbeiten für die Studierenden.

Durch den großen persönlichen Einsatz der Mitarbeiter gelang es, trotz der immensen Brandfolgen die Lehre ohne größere Ausfälle abzusichern. Auch der Konstruktionswettbewerb fand 2015 wieder statt.

Die Absolventen fanden auch 2015 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 2015 Arbeiten zum Entwurf von anwendungsspezifischen Lineardirektantrieben sowie die Weiterführung der Aktivitäten zu magnetischen Führungen gestartet. Die Forschungen zur Entwicklung von neuartigen mehrdimensionalen piezoelektrischen Antrieben wurden mit der Einreichung der Dissertation von Herrn Keller zunächst abgeschlossen, eine Weiterführung ist aber geplant. 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 Stützpfeiler 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 läuft seit 2015 erneut ein ZIM-Projekt. Darüber hinaus wurden im Jahre 2015 die Arbeiten zum Magnetspritzgießen mit der Einreichung der Dissertation von Herrn Nguyen abgeschlossen. Die Arbeiten zur Nutzung der Induktionserwärmung für das Spritzgießen aber auch für das induktive Kleben 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.

Hinzu kamen neben oder innerhalb dieser Forschungsarbeiten auch Industrieprojekte, die nun langsam wieder aufgebaut 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 2014/2015: 82 Studenten (mach + famo)

Wintersemester 2015/2016: 81 Studenten (mach + famo)

15 Vorlesungen à 2 SWS

15 Vorlesungen à 1 SWS

15 Übungen à 2 SWS

Betreuer: Burkard, Kreuzer, Maucher, Raab, Retzbach, Schattka, Schiele,
Strohmeyr

Konstruktionslehre IV (Feinwerktechnik)

(Schinköthe, Burkard)

Sommersemester 2015: 72 Studenten (mach + famo)

14 Vorlesungen à 2 SWS

14 Vorlesungen à 1 SWS

14 Übungen à 1 SWS

Betreuer: Burkard, Kreuzer, Maucher, Retzbach, Schattka, Strohmeyr

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

Gerätekonstruktion und -fertigung in der Feinwerktechnik

(Schinköthe, Burkard, Bobrowski)

Wintersemester 2014/2015: 44 Studenten

Wintersemester 2015/2016: 50 Studenten

18 Vorlesungen à 2 SWS

9 Übungen à 2 SWS

Betreuer: Burkard, Retzbach, Schiele

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

Wintersemester 2014/2015: 22 Studenten

Wintersemester 2015/2016: 33 Studenten

10 Vorlesungen à 2 SWS

5 Übungen à 2 SWS

Betreuer: Kreuzer, Raab

Sommersemester 2015: 23 Studenten

9 Vorlesungen à 2 SWS

4 Übungen à 2 SWS

Betreuer: Keller

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

Sommersemester 2015: 24 Studenten

10 Vorlesungen à 2 SWS

10 Übungen à 2 SWS

Betreuer: Maucher, Nguyen

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

(Schinköthe/Burkard)

Sommersemester 2015: 14 Studenten

18 Vorlesungen à 2 SWS

8 Übungen à 2 SWS

Betreuer: Burkard, Schattka

Medizingerätetechnik

(Schinköthe/Frank/Maier)

Wintersemester 2014/2015: 57 Studenten

Wintersemester 2015/2016: 64 Studenten

12 Vorlesungen à 2 SWS

Sommersemester 2015: 72 Studenten

12 Vorlesungen à 2 SWS

Projektarbeiten für alle Studierenden der Maschinenbaufakultäten

Wintersemester 2014/2015: Keine Projektarbeiten wegen Brandfolgen

Sommersemester 2015: 4 Studierende (1 Projektgruppe)

Wintersemester 2015/2016: 12 Studierende (3 Projektgruppen)

2.3 Prüfungen

Fach	Termin	Kandidaten
KL III + IV (Feinwerktechnik)	F 2015	17
	H 2015	51
Gerätekonstruktion und -fertigung in der Feinwerktechnik (Kompetenzfeld, Pflichtfach)	F 2015	39
	H 2015	6
Gerätekonstruktion und -fertigung in der Feinwerktechnik (Kernfach, mündlich)	F 2015	12
	H 2015	0
Aktorik in der Feinwerktechnik - Berechnung, Konstruktion und Anwendung mechatronischer Komponenten (Kernfach/Pflichtfach, mündlich)	F 2015	10
	H 2015	13
Medizingerätetechnik (Gesamtnote)	F 2015	12
	H 2015	45
Teilprüfung Medizingerätetechnik 1	F 2015	57
Teilprüfung Medizingerätetechnik 2	H 2015	68
Praxis des Spritzgießens in der Gerätetechnik; Verfahren, Prozesskette, Simulation	F 2015	2
	H 2015	12
Praktische FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL	F 2015	2
	H 2015	16
Projektarbeiten	F 2014	0
	H 2014	4
Studienarbeit Feinwerktechnik	F 2014	4
	H 2014	7
Bachelorarbeiten	F 2014	7
	H 2014	4
Diplomarbeiten/Masterarbeiten	F 2014	2
	H 2014	6

2.4 Praktika

Spezialisierungsfachpraktikum Feinwerktechnik

(Für Studierende des Spezialisierungsfaches Feinwerktechnik)

Sommersemester 2015

Versuch 1:	„FEM-Simulation mit ANSYS/ MAXWELL“
24 Teilnehmer	5 Termine
Betreuer: Nguyen, Maucher	

Wintersemester 2015/2016

Versuch 1:	„Koordinatenmesstechnik“
39 Teilnehmer	7 Termine
Betreuer: Burkard	

Versuch 2:	„Gleichstrommotoren“
17 Teilnehmer	4 Termine
Betreuer: Strohmeyr, Raab	

Versuch 3:	„Lineardirektantriebe“
17 Teilnehmer	1 Termin
Betreuer: Kreuzer, Raab	

Versuch 4:	„Optische 3D-Vermessung“
33 Teilnehmer	6 Termine
Betreuer: Burkard	

Allgemeines Praktikum Maschinenbau (APMB)

(Für Studierende im zweiten Studienabschnitt Maschinenbau)

Sommersemester 2015

Versuch 1:	„Schrittmotoren“
28 Teilnehmer	5 Termine
Betreuer: Kreuzer	

Wintersemester 2015/2016

Versuch 1:	„Koordinatenmesstechnik“
39 Teilnehmer	7 Termine
Betreuer: Burkard	

Versuch 2:	„Optische 3D-Vermessung“
33 Teilnehmer	6 Termine
Betreuer: Burkard	

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

Wintersemester 2015/2016

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

Versuch 2:	„Einführung in die Geräuschesstechnik und Lärminderung“
24 Teilnehmer	1 Termin
Betreuer: Retzbach, Schiele	

2.5 Projektarbeiten

Wintersemester 2014/2015

Keine Projektarbeiten wegen Brandfolgen

Sommersemester 2015

10.09.2015 Konstruktion von Spritzgießwerkzeugen für Demonstrator
teile für den Tag der Wissenschaft

Wintersemester 2015/2016

15.02.2016 Geschichte, Stand der Technik und Weiterentwicklung von
Dekupiersägen

15.02.2016 Recherche zum Stand der Technik und Weiterentwicklung von
Impellerklapptriebwerken

15.02.2016 Analyse und Vergleich unterschiedlicher Kamerastabilisie-
rungssysteme (Gimbal)

2.6 Seminar Feinwerktechnik (WS 2014/15 und SS 2015)

16.10.2014	Aufbau eines Kerns zur Messung von Schwindungskräften im Kunststoffspritzguss
16.10.2014	Entwicklung einer Simulationsumgebung für ein Vorhersagemodell von Entformungskräften im Kunststoffspritzguss
23.10.2014	Entwicklung eines Demonstratorteils mit Kunststoffspritzgussfehlern
23.10.2014	Entwicklung einer Anbauvorrichtung für ein Handlingssystem
23.10.2014	Untersuchung der Entformungskräfte im Kunststoffspritzguss in Abhängigkeit unterschiedlicher Prozessparameter
30.10.2014	Konstruktion und Untersuchung eines induktiv beheizten Spritzgusswerkzeugs mit effizienter thermischer Trennung der Kavitäten
30.10.2014	Entwicklung eines Versuchsstandes zur Messung von Adhäsionskräften zwischen Werkzeugoberflächen und Thermoplasten
13.11.2014	Auswahl und Aufbau von Sensorik für Mehrkoordinatenantriebe eines Prüfstandes für Ultraschallmotoren
20.11.2014	Entwicklung eines Auswerferbolzens zur Messung der Entformungskräfte im Kunststoffspritzguss
11.12.2014	Entwicklung eines Prüfverfahrens für induktive Klebungen
16.04.2015	Konstruktion eines induktiv variothermen Spritzgusswerkzeugs zur Herstellung von Stents aus Biopolymerwerkstoffen

- 16.04.2015 Entwicklung einer Drehzahlerfassungsmethode für magnetisch abgeschirmte Rotationsmaschinen im Prüffeld
- 16.04.2015 Aufbau, Inbetriebnahme und Erweiterung von Prüfständen für die Vermessung von Gleichstrommotoren
- 16.04.2015 Recherche unterschiedlicher Strukturen von Stents sowie die Konstruktion und Untersuchung eines selbstexpandierenden Stents aus Biopolymerwerkstoff
- 22.04.2015 Konstruktiver Aufbau eines Prüfstands für Lineardirektantriebe
- 22.04.2015 Simulation und Konstruktion von rotationssymmetrischen Lineardirektantrieben mit bewegter Spule und bewegtem Magnet
- 22.04.2015 Konzeption, Entwurf und Ausarbeitung eines Spielzeugautomaten mit Lineardirektantrieben
- 21.05.2015 Experimenteller Vergleich von 3D-Messverfahren
- 21.05.2015 Generierung eines variablen Simulationssoftwareoptimierers für Lineardirektantriebe
- 28.05.2015 Aufbau eines Prüfstandes und Durchführung von Versuchen zu induktivem Entkleben
- 02.07.2015 Thermisch transiente FEM-Analyse von Werkzeugoberflächen im Kunststoffspritzguss
- 27.07.2015 Recherche von Fertigungsverfahren in der Piezoherstellung und Ausarbeitung einer Adaption des Keramikspritzgussverfahrens auf PZT-Keramiken
- 24.09.2015 Modifikation und Erweiterung des Hauptfachpraktikums Piezoaktoren / Ultraschallantriebe

Wintersemester 2015/2016 (unvollständig)

22.10.2015	3D-Druck von Kunststoffbauteilen mit anisotropen Eigenschaften
22.10.2015	Entwicklung eines LabVIEW-Programms zur Signalerfassung am 3D-Schwingungsprüfstand
22.10.2015	Programmierung der Bedienoberfläche des Prüfstands für Lineardirektantriebe
05.11.2015	Verifikation und Weiterentwicklung einer Software zur Zuverlässigkeitsprognose
26.11.2015	Konstruktion eines Prüfstands zur Untersuchung der Festigkeiten eines im Spritzgussverfahren hergestellten Stents
15.12.2015	Recherche und Analyse unterschiedlicher Methoden zur Temperaturmessung
15.12.2015	Einfluss unterschiedlicher Prozessparameter sowie Werkzeugbeschichtungen auf die Entformungskräfte beim Spritzgießen
04.02.2016	Untersuchung der Verwendungsmöglichkeiten von Supraleitern in feinwerkmechanischen Lineardirektantrieben
24.02.2016	Kontaktlose Energieübertragung auf bewegte Bauteile

3 WISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN, STUDIEN-, DIPLOM- UND BACHELORARBEITEN

3.1 Dissertationen

Maier, Matthias	Ganzheitlicher Ansatz bei der Auslegung von Induktionserwärmungssystemen zur Anwendung im Kunststoffspritzguss. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 40, 2015, Prüfung 2014
Bobrowski, Sebastian	Zuverlässigkeitsuntersuchungen und Lebensdauerprognose am Beispiel feinwerktechnischer Antriebe. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 41, 2015
Reutzsch, Benjamin	Entwicklung feinwerktechnischer Magnetschwebeantriebe. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 42, 2015
Nguyen, Minh	Charakterisierung von Magnetspritzgießprozessen. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 43, 2015

3.2 Master-/Diplomarbeiten am IKFF (WS 2014/15 und SS 2015)

11/2014	Konstruktion und Untersuchung eines induktiv beheizten Spritzgusswerkzeugs mit effizienter thermischer Trennung der Kavitäten
01/2015	Entwicklung eines Prüfverfahrens für induktive Klebungen
03/2015	Konzeption eines Präzisionsgetriebes anhand eines iterativen Entwicklungsablaufes mit Funktionsmustern
05/2015	Konstruktion und Auslegung eines Wirbelstromaktors zur Unkrautregulierung
05/2015	Entwicklung eines Pump-Moduls

20

05/2015 Reduzierung der Schallemission bei Akkublasgeräten

09/2015 Entwicklung eines LabVIEW-Programms zur Signalerfassung am 3D-Schwingungsprüfstand

Wintersemester 2015/2016 (unvollständig)

11/2015 Entwicklung und Konstruktion einer Vorrichtung zur Fixierung des Dreheinschlages auf einer Siegel- und Wickelmaschine

11/2015 Konzeption und Konstruktion einer fahrwerksnahen Komponente eines alternativen hydraulischen Bremsystems

12/2015 Einfluss unterschiedlicher Prozessparameter sowie Werkzeugbeschichtungen auf die Entformungskraft beim Spritzgießen

12/2015 Analysieren, Bewerten und Implementieren von Verbesserungspotentialen einer Spritzgießmaschine und deren Werkzeug unter Berücksichtigung der fertigungstechnischen Umgebung

3.3 Bachelorarbeiten am IKFF (WS 2014/15 und SS 2015)

10/2014 Entwicklung einer Anbauvorrichtung für ein Handlingsystem

10/2014 Konstruktion eines Kerns zur Messung von Schwingungskräften im Kunststoffspritzguss

10/2014 Optimierung eines aktiven Gehörschutzgeräts

10/2014 Auswahl und Aufbau von Sensorik für Mehrkoordinatenantriebe eines Prüfstandes für Ultraschallmotoren

11/2014 Entwicklung eines Versuchsstandes zur Messung von Adhäsionskräften zwischen Werkzeugoberflächen und Thermoplasten

03/2015	Experimenteller Vergleich von 3D-Messverfahren
04/2015	Simulation und Konstruktion von rotationssymmetrischen Lineardirektantrieben mit bewegter Spule und bewegtem Magnet
04/2015	Entwurf und Konstruktion eines Spielzeugautomaten mit Lineardirektantrieben
04/2015	Konstruktiver Aufbau eines Prüfstands für Lineardirektantriebe
05/2015	Thermisch transiente FEM-Analyse von Werkzeugoberflächen im Kunststoffspritzguss
Wintersemester 2015/2016 (unvollständig)	
11/2015	Recherche und Analyse unterschiedlicher Methoden zur Temperaturmessung

3.4 Studienarbeiten am IKFF (WS 2014/15 und SS 2015)

10/2014	Entwicklung eines Auswerferbolzens zur Messung der Entformungskräfte im Kunststoffspritzguss
11/2014	Einsatz von Micro-Electro-Mechanical Systems in der Montage- und Handhabungstechnik am Beispiel eines Beschleunigungssensors
03/2015	Entwicklung einer Drehzahlerfassungsmethode für magnetisch abgeschirmte Rotationsmaschinen im Prüffeld
04/2015	Aufbau, Inbetriebnahme und Erweiterung von Prüfständen für die Vermessung von Gleichstrommotoren
04/2015	Recherche unterschiedlicher Strukturen von Stents sowie die Konstruktion und Untersuchung eines selbstexpandierenden Stents aus Biopolymerwerkstoff

04/2015	Konstruktion eines induktiv variothermen Spritzgusswerkzeugs zur Herstellung von Stents aus Biopolymerwerkstoffen
05/2015	Untersuchungen zur Materialbeständigkeit aktiver Medizinprodukte im Kontext von Desinfektionsverfahren
05/2015	Generierung eines variablen Simulationssoftwareoptimierers für Lineardirektantriebe
06/2015	Aufbau eines Prüfstandes und Durchführung von Versuchen zum induktiven Entkleben
07/2015	Recherche von Fertigungsverfahren in der Piezoherstellung und Ausarbeitung einer Adaption des Keramikspritzgussverfahrens auf PZT-Keramiken
07/2015	Modifikation und Erweiterung des Spezialisierungsfachpraktikums Piezoaktoren/Ultraschallantriebe
Wintersemester 2015/2016 (unvollständig)	
10/2015	3D-Druck von Kunststoffbauteilen mit anisotropen Eigenschaften
10/2015	Programmierung der Bedieneroberfläche des Prüfstands für Lineardirektantriebe
10/2015	Verifikation und Weiterentwicklung einer Software zur Zuverlässigkeitsprognose
11/2015	Konstruktion eines Prüfstandes zur Untersuchung der Festigkeiten eines im Spritzgussverfahren hergestellten Stents

3.5 Preise

Dr.-Ing. Matthias Maier

Gustav-Magenwirth-Preis

4 ARBEITSGEBIETE DER WISSENSCHAFTLICHEN MITARBEITER

4.1 Aktorik

Keller, B.	<p>Lehre:</p> <p>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.</p> <p>Forschung:</p> <p>Entwicklung von piezoelektrischen Motoren mit Schwerpunkt in Schwingungsuntersuchungen von Mehrkoordinaten-Ultraschallmotoren.</p> <p>Industrieprojekte.</p> <p>Sonstiges:</p> <p>PC-Administration.</p>
Henzler (geb. Kofler), J.	<p>Lehre:</p> <p>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“.</p> <p>Durchführung der Praktika „Lineardirektantriebe“ sowie „Gleichstrommotoren“ und „Geräuschmesstechnik“.</p> <p>Betreuung von Bachelor- und Projektarbeiten. Betreuung von FEM-Aufgaben.</p> <p>Forschung:</p> <p>Simulationen zu rotationssymmetrischen Lineardirektantrieben.</p> <p>Industrieprojekte.</p> <p>Sonstiges:</p> <p>PC-Administration.</p>

Kreuzer, D.

Lehre:

Betreuung der Gruppenübungen in KL 3/4.

Korrektur von Klausuraufgaben in GFF.

Betreuung einer Studienarbeit und einer Bachelorarbeit.

Betreuung der Lineardirektantriebeübung.

Betreuung der Praktika „Lineardirektantriebe“ und „Schrittmotoren“.

Forschung:

Einarbeitung in die Entwicklung von Lineardirektantrieben und FEM-Simulation.

Gliederung der Antriebskonzepte in Anwendungsbereiche und Aktoreinsatzgebiete.

Erstellung einer bauformspezifischen schnellen und auf analytischen Berechnungsgleichungen gründenden Dimensionierungssoftware.

FEM-Validierung der Dimensionierungssoftware.

Entwicklung einer rechnergestützten Entwurfsmethodik für applikationsspezifische Lineardirektantriebe kleiner Leistung.

Erweiterung der automatisierten Dimensionierungen um weitere Bauformen.

Aufbau und Prüfung von Prototypen zur Verifizierung der Optimierungsergebnisse.

Entwicklung von Gleichungen zur schnellen Abschätzung der Leistungsfähigkeit von Lineardirektantrieben.

Sonstiges:

Erfüllung des GSaME-Programms.

Raab, M.

Lehre:

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

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

Betreuung der Bachelorübungen in KL 3/4, Testatgruppen.

Organisation des Übungskomplexes „Welle-Lager“.

Betreuung von Studienarbeiten und einer Masterarbeit.

Forschung:

Forschungsschwerpunkt: Magnetschwebetechnik für feinwerktechnische Antriebe.

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

Industrieprojekte.
 Sonstiges:
 PC-Administration.

Strohmeyr, S. Lehre:
 Vortragsübung und Vorlesung KL 3/4 zum Themenkomplex „Welle-Lager“.
 Betreuung von Prüfungen in „Praktische FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL“ .
 Betreuung der Übungen in KL 3/4, Testatgruppen.
 Organisation des Übungskomplexes „Welle-Lager“.
 Betreuung von Studienarbeiten.
 Betreuung Gleichstrommotorenpraktikum.
 Forschung:
 Forschungsschwerpunkt: Thermische Untersuchungen an feinwerktechnischen Lineardirektantrieben.
 Simulative Auslegung und Konzeptionierung von Lineardirektantrieben mit verbesserter thermischer Wärmeabführung.
 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 Studiengangsmanger für den M.Sc. Maschinenbau/Mikrotechnik, Gerätetechnik und Technische Optik.

Maucher, A.

Lehre:

Betreuung der Bachelorübungen in KL 3/4, Testatgruppen. Erstellung und Ausarbeitung der Testataufgabe sowie der Klausuraufgaben zur Thematik „Koppelgetriebe“ im Bachelor KL 3/4.

Organisation und Durchführung der/s Vorlesung/Spezialisierungsfachpraktikums und der Übung „Praktische FEM-Simulation mit MAXWELL und ANSYS“ und Ausarbeitung von Prüfungsaufgaben sowie deren Korrektur.

Betreuung einer Projektarbeit, drei Studienarbeiten und einer externen Masterarbeit.

Forschung:

Untersuchungen zum thermischen Verhalten von induktiv beheizten Spritzgusswerkzeugen.

Simulative Untersuchungen unterschiedlicher Strömungsarten zur Kühlung von induktiv beheizten Spritzgusswerkzeugen.

Simulative Untersuchungen zur Steigerung der Energieeffizienz im Bereich der induktiven Erwärmung im Spritzguss.

Untersuchung der Herstellbarkeit von „Stents“ mittels des Spritzgussverfahrens.

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:

Vorlesung und Vortragsübung in KL 3/4 zum Themenkomplex „Getriebedimensionierung/-gestaltung“.

Vorlesung und Vortragsübung in KL 3/4 zum Themenkomplex „Kupplungen“.

Betreuung der Übungen in KL 3/4, Testatgruppen.
 Betreuung von Bachelor-, Studien- und Masterarbeiten.
 Betreuung von Prüfungen in „Praktische FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL“.
 Betreuung von Projektarbeitsgruppen.
 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 Übungen in KL 3/4, Testatgruppen.
 Erstellung und Ausarbeitung der Testataufgabe zur Thematik „Getriebe“ und „Konstruktionsmethodik“ im Bachelor KL 3/4.
 Organisation des Konstruktionswettbewerbs.
 Betreuung einer Projektarbeit, zwei Bachelorarbeiten, einer Studienarbeit, einer Masterarbeit sowie einer externen Masterarbeit.
 Beteiligung am Praktikum „Koordinatenmesstechnik“.
 Forschung:
 Untersuchung der Entformungskräfte unterschiedlicher Nanostrukturen und Oberflächenbeschichtungen sowie unterschiedlicher Prozessparameter.
 Untersuchung der adhäsiven Komponente der Entformungskraft bei ausschließlich polierten Werkzeugoberflächen mittels eines neu aufgebauten Torsionswerkzeugs.
 Simulative Analyse des Entformungsverhaltens hülsenförmiger Formteile.
 Sonstiges:
 Bearbeitung mehrerer Drittmittelaufträge zur Entformungskraftmessung.

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.

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.; Chen, H.; Döring, M.; Jensen, U.; Schinköthe, W.: Estimation of the lifetime distribution of mechatronic systems in the presence of covariates: A comparison of parametric, semiparametric and nonparametric models. Reliability Engineering & System Safety 139(2015)105-112. Elsevier Verlag 2015.

Engel, M.: Eddy current and hysteresis losses in high dynamic direct-drive linear motors for manufacturing systems. Untersuchungen von Wirbelstrom- und Hystereseverlusten an Lineardirektantrieben mit rotationssymmetrischem Querschnitt. Jahrestagung GSaME 2015, Stuttgart 2015.

Kreuzer, D.: Entwurfsmethodik für applikationsspezifische Lineardirektantriebe kleiner Leistung, Tagungsbandbeitrag und Posterveröffentlichung zur GSaME Jahrestagung 2015, Stuttgart, 19.03.2015.

Kreuzer, D.: Moderne Methoden zur Dimensionierung von Lineardirektantrieben, Veröffentlichung im Ingenieurspiegel 3/2015. Public Verlag Bingen 2015.

Maucher, A.; Retzbach, A.; Schinköthe, W.; Konturnahe induktive Werkzeugheizung in der Kunststoffverarbeitung. Erfindungsmeldung an Uni Stuttgart 2015, Patent wird erarbeitet.

Nguyen, M.; Schinköthe, W.: Simulation der Magnetisierung spritzgegossener, kunststoffgebundener Dauermagnete. Vortrag 24. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, 25./26.2.2015. Tagungsband, IKT, Universität Stuttgart, S. 133-140.

Kazi, A.; Raab, M.; Ernst, B.; Schiepp, T.; Laufenberg, M.: MSM-Greifer mit stationärer Aktuierung, Postervortrag, Mechatronik 2015, Dortmund, 12/13.03.2015, Tagungsband, S. 319-324

Raab, M.; Kazi, A.; Trumper, D.: Magnetically levitated BLDC motor as a modular teaching tool, Vortrag, 16th International Conference on Research and Education in Mechatronics REM 2015, Bochum, 18.-20.11.2015, Proceedings S. 255-261

Retzbach, A.: Maßgeschneiderte Induktive Erwärmung von Klebstoffen, Posterveröffentlichung am IKFF.

Retzbach, A.; Schinköthe, W.: Induktives Schnellhärten von thermisch aktivierbaren Klebstoffen - Simulative Prozessauslegung und Optimierung; 24. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, 25./26.2.2015. Tagungsband, IKT, Universität Stuttgart, S. 141-145.

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

Wirklich nur ein Kinderspiel?

Die Aufgabe des diesjährigen Konstruktionswettbewerbs ist ein Kinderspiel. Das Ziel ist es, vier Holzfiguren in möglichst kurzer Zeit in die dafür vorgesehenen Öffnungen zu platzieren.



So einfach lautete die Aufgabenstellung des 22. Konstruktionswettbewerbs des Instituts für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik der Universität Stuttgart. In der Vorrunde musste „nur“ das Kinderspiel nachgeahmt werden, verschieden geformte Bauklötze in die passenden Öffnungen zu bringen. Was aber schon für kleine Kinder eine erlernbare Aufgabe ist, ist für kleine Maschinen eine schwierige, teilweise unlösbare Herausforderung.

Die Bauklötze durften dabei selbstverständlich nicht direkt vor den Öffnungen platziert werden, sondern mussten zum Start bei der Maschine liegen und dann über eine Entfernung von ca. einem Meter bis zu den Löchern gebracht werden.

Wie in den vergangenen Jahren waren dabei einige Randbedingungen zu beachten. Dabei waren das limitierte Gewicht und die begrenzte Größe der Maschinen beim Start wohl die stärksten Einschränkungen.

Es zeigte sich schon in der Vorbereitungsphase, dass es gar nicht einfach ist, die Klötze zielsicher zu transportieren, denn die selbstgebauten Maschinen mussten die nur 10 mm größeren Öffnungen genau treffen.

Nach der Vorrunde, die nur von fünf Maschinen bewältigt wurde, ging es dann auch noch um die Geschwindigkeit. Zwei Maschinen starteten auf der Spielbahn und jetzt mussten die Bauklötze vor der gegnerischen Maschine in die passenden Öffnungen gebracht werden, da dort jeweils nur ein Bauklotz Platz hatte.

Mal wieder zeigte sich beim Konstruktionswettbewerb des Instituts für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik, dass die Umsetzung von theoretischem Wissen in eine praktisch funktionierende, kleine Maschine nicht ganz so einfach ist, wie es manchmal scheint. Da wurden verschiedenste Führungen für die Geradeausbewegung verwendet und aufwendige Entfaltmechanismen aufgebaut. Aber nicht alles funktionierte wie gedacht und es war am Ende auch nicht nur die Frage, wer die beste Maschine gebaut hatte, sondern auch, welche Taktik beim Finallauf in Kombination mit der Schnelligkeit das beste Ergebnis bringt.

Ein besonderer Dank gilt den folgenden Firmen, die den Wettbewerb teilweise schon seit vielen Jahren unterstützen:

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, Hauni Maschinenbau AG, Kendrion GmbH, Springer Verlag GmbH und Verlag Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer GmbH & Co. KG.

Ergebnisse:

1. Platz: Yunus Arslan, Daniel Breuning, Paul Eichinger, Jonas Mohacsi.
2. Platz: Bruno Hegewald, Eduardo Rodriguez Fernandez, Patrick Seeger, Kai Stiefenhofer.
3. Platz: Elias Beier, Darius Curt, Christian Istrate, Kevin Kuhn.

6 KONGRESSE, TAGUNGEN UND MESSEN

Prof. Schinköthe, W.:

- Kendrion Symposium, Rottweil und Villingen/Schwenningen, 18./19.03.2015
- Tagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik, Köln 14./15.09.2015
- Fachausschusssitzung 3.3 Elektrische Geräte- und Stellantriebe, Fa. Wittenstein, Ingersheim, 04.11.2015

Burkard, E.:

- 24. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, 25./26.02.2015
- FAKUMA Internationale Fachmesse für Kunststoffverarbeitung, Friedrichshafen, 15.10.2015

Kreuzer, D.:

- Jahrestagung der GSaME Graduate School of advanced Manufacturing Engineering, Stuttgart, 19.03.2015
- EDPC-Tagung, Nürnberg, 15./16.09.2015

Maucher, A.:

- ARBURG Technologietage, Loßburg, 12.03.2015
- MOTEK, Messe Stuttgart, 05.10.2015
- FAKUMA, Internationale Fachmesse für Kunststoffverarbeitung, Friedrichshafen, 15.10.2015

Raab, M.:

- Mechatronik 2015, Dortmund, 12./13.03.2015
- Research and Education on Mechatronics REM 2015, Bochum, 18.-20.11.2015
- IPC/SPS/Drives 2015, Messe Nürnberg, 26.11.2015

Retzbach, A.:

- ARBURG Technologietage, Loßburg, 12.03.2015
- Bondexpo, Stuttgart, 07.10.2015
- BiS-Net Workshop, Duisburg, 19.11.2015

Schattka, G.:

- ARBURG Technologietage, Loßburg, 12.03.2015
- MOTEK, Messe Stuttgart, 05.10.2015

- FAKUMA Internationale Fachmesse für Kunststoffverarbeitung, Friedrichshafen, 15.10.2015

Strohmeyr, S.:

- Dozentenworkshop CADFEM, Frankfurt, 10.09.2015
- EDPC, Nürnberg, 15./16.09.2015
- SPS IPC Drives, Nürnberg, 26.11.2015

7 WERKSTATTBERICHT

Mit Arbeiten zur Wiedereinrichtung von Praktikumsversuchen und Prüfständen bzw. zur Wiederinbetriebnahme von Spritzgussformen sowie der Herstellung von Bauteilen und Baugruppen für Versuche im Rahmen von studentischen Arbeiten und Dissertationen war die Institutswerkstatt auch in diesem Berichtsjahr wieder vollständig ausgelastet.

8 ANHANG - Ausgewählte Veröffentlichungen

In diesem Jahr verweisen wir exemplarisch auf zwei Veröffentlichungen aus dem Bereich des Magnetspritzgießens und der Nutzung der Induktionserwärmung im Zusammenhang mit Klebevorgängen, die auf dem Stuttgarter Kunststoffkolloquium veröffentlicht wurden:

Nguyen, M.; Schinköthe, W.: Simulation der Magnetisierung spritzgegossener, kunststoffgebundener Dauermagnete. Vortrag 24. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, 25./26.2.2015. Tagungsband, IKT, Universität Stuttgart, S. 133-140.

Retzbach, A.; Schinköthe, W.: Induktives Schnellhärten von thermisch aktivierbaren Klebstoffen - Simulative Prozessauslegung und Optimierung; 24. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, 25./26.2.2015. Tagungsband, IKT, Universität Stuttgart, S. 141-145.

SIMULATION DER MAGNETISIERUNG SPRITZGEGOSSENER, KUNSTSTOFFGEBUNDENER DAUERMAGNETE

SIMULATION OF THE MAGNETIZATION OF INJECTION MOLDED POLYMER-BONDED MAGNETS

M. Nguyen¹, W. Schinköthe¹

¹ IKFF, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik der Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 9, 70550 Stuttgart
Tel.: + 49 (0) 711 685 66425, Fax: + 49 (0) 711 685 66356, E-Mail: nguyen@ikff.uni-stuttgart.de

Kurzfassung: Kunststoffgebundene, spritzgegossene Dauermagnete bestehen aus hartmagnetischen Füllstoffen, die in eine Thermoplastmatrix eingebettet sind. Sie werden überwiegend in Kleinantrieben und als Signalgeber von Winkel- und Wegmesssensoren eingesetzt. Die Formgebung erfolgt durch Spritzgießen, wobei sich verfahrensbedingte Vorteile in Formfreiheit, Polteilung und Wirtschaftlichkeit ergeben. Die magnetischen Eigenschaften der spritzgegossenen Dauermagnete werden durch komplexe, werkstoff- und prozessabhängige Faktoren beeinflusst, die miteinander in Wechselwirkung stehen. Dies erschwert eine genaue Simulation der magnetischen Eigenschaften des resultierenden Dauermagneten. Existierende Simulationsansätze führen insbesondere bei dünnwandigen Formteilen zu signifikanten Fehlern, da eine inhomogene Temperaturverteilung in der Kunststoffschmelze während der Füllphase nicht berücksichtigt wird. Daher soll in diesem Beitrag ein neuartiger Simulationsansatz vorgestellt werden, der diese zusätzlichen Prozesseinflüsse enthält. Der neue Ansatz wird zunächst vorgestellt. Die Messung der benötigten Materialdaten wird beschrieben und anhand beispielhafter Messergebnisse diskutiert. Anschließend wird der neue Simulationsansatz am Modell einer dünnwandigen Platte mit multipolarer Magnetisierungsstruktur validiert. Dazu werden die Simulationsergebnisse für die magnetischen Eigenschaften des Formteils mit dem existierenden Ansatz sowie Messdaten aus der Literatur verglichen. Abweichungen in den Ergebnissen werden abschließend vorgestellt und diskutiert.

Abstract: Polymer-bonded injection molded magnets are composed of hard magnetic fillers embedded into a thermoplastic polymer matrix. They are mainly used in miniature drives and as transducers for angle and distance sensors. The injection molding process offers advantages in freedom of design, complexity of the magnetization structure as well as production cost. The magnetic properties of the injection molded polymer-bonded magnets are determined by complex and interdependent material and process factors. This makes an accurate simulation of the resulting magnetic properties very difficult. Existing simulation approaches result in significant errors for thin-walled parts since an inhomogeneous distribution of melt temperatures during filling is not taken into account. Therefore, a new simulation approach including these additional process influences is presented in this paper. The new approach is first described. The measurement method for the material data required is presented and discussed using exemplary results. The new simulation approach is then validated using the model of a thin-walled plate with a multipolar magnetization structure. The simulation results of the resulting part's magnetic properties are therefore compared to the existing approach as well as experimental data found in literature. Differences between the results are finally presented and discussed.

Schlagwörter: kunststoffgebundene Dauermagnete, Magnetspritzguss, FEM-Simulation

Keywords: polymer-bonded magnets, injection molded magnets, FEM-simulation

Einleitung

Spritzgegossene Dauermagnete bestehen aus hartmagnetischen Füllstoffen, die in eine Thermoplastmatrix eingebettet sind. Die magnetischen Eigenschaften des Formteils werden während der Füllphase des Spritzgussprozesses durch Anlegen eines magnetischen Richtfeldes in der Kavität erzeugt. Dies führt zu einer Magnetisierung und Ausrichtung der hartmagnetischen Füllstoffe innerhalb der Kunststoff-

schmelze. Während der Kühlphase erstarrt die gewünschte Füllstofforientierung in der Kavität und definiert somit die Magnetisierungsstruktur des Formteils.

Im Vergleich zu gesinterten Dauermagneten bieten spritzgegossene Magnete deutliche Vorteile in Herstellungskosten, Formfreiheit, Anzahl benötigter Prozessschritte sowie Funktionsintegration. Die besten Ergebnisse hinsichtlich Betrag und Komplexität der Formteilmagnetisierung können mit anisotropen hart-

magnetischen Füllstoffen erreicht werden [1, 2]. Zu den Nachteilen spritzgegossener Dauermagnete gehören die hohen Kosten und die hohe Komplexität der Spritzgusswerkzeuge, die durch das integrierte magnetische Richtfeld bedingt sind. Des Weiteren führt die Mischung der hartmagnetischen Füllstoffe mit einem Kunststoff zu reduzierten magnetischen Eigenschaften im Vergleich zu gesinterten Magneten [1-3].

Die magnetischen Eigenschaften des spritzgegossenen Dauermagneten hängen von dem Magnetisierungsgrad, dem Orientierungsgrad sowie dem volumetrischen Anteil der hartmagnetischen Füllstoffe ab. Der volumetrische Anteil ist auf maximal 65% beschränkt, da sich höhere Füllgrade negativ auf die Verarbeitungseigenschaften des Compound-Materials auswirken [1, 4]. Magnetisierungsgrad und Orientierungsgrad der Füllstoffe werden von den magnetischen und rheologischen Materialeigenschaften des Compounds sowie den Prozesseinstellungen beeinflusst. Zu den Prozesseinflüssen gehören Richtfeldstärke, Schmelze- und Werkzeugtemperatur, Einspritzgeschwindigkeit und Nachdruck. Wechselwirkungen zwischen diesen Einflussfaktoren erschweren eine genaue Vorausberechnung der magnetischen Eigenschaften des spritzgegossenen Dauermagneten deutlich [1, 3].

Aufgrund der hohen Komplexität der Spritzgusswerkzeuge und der Prozesseinflüsse bietet sich die Verwendung von Simulationswerkzeugen während der Entwicklung spritzgegossener Dauermagnete an. Dies erlaubt die Reduktion der Entwicklungszeiten und der Prototypenanzahl, da Änderungen am Formteil in kurzer Zeit an einem virtuellen Modell untersucht werden können.

Mit einem existierenden Simulationsansatz können bei Wandstärken über 1 mm und starken Richtfeldern Simulationsfehler weit unterhalb von 10% erreicht werden [3, 5]. Bei Wandstärken unterhalb 1 mm und einer sehr feinen Polteilung mit relativ schwachen Richtfeldern in der Kavität treten jedoch Simulationsfehler von bis zu 20% auf [3]. Der existierende Ansatz nimmt eine homogene Temperaturverteilung der Kunststoffschmelze in der Kavität während der Magnetisierung und Orientierung der Füllstoffe an. Jedoch erstarrt die Schmelze bereits beim Kontakt mit der deutlich kälteren Kavitätswand. Dieser Temperaturunterschied führt zu einer inhomogenen Verteilung der Schmelztemperatur über die Formteildicke sowie den Fließweg. In den kälteren Schmelzebereichen ist der Orientierungsgrad der Füllstoffe gegenüber dem heißen Kern des Formteils reduziert. Der existierende Ansatz kann diese Effekte nicht berücksichtigen und führt daher zu einer Überschätzung des Orientierungsgrades und somit der magnetischen Eigenschaften des Formteils [3]. Der daraus resultierende Simulationsfehler kann für dickwandige Formteile vernachlässigt werden, da die Erstarrungseffekte auf den

Randbereich des Formteils beschränkt sind und der Großteil des Schmelzevolumens eine konstante Temperatur aufweist [3, 5]. Bei dünnwandigen Formteilen sind die Randbereiche mit reduziertem Orientierungsgrad im Vergleich zum Formteilvermögen groß, daher wird der Simulationsfehler signifikant. Da der existierende Ansatz von einer homogenen Temperaturverteilung in der Schmelze ausgeht, kann weder der Einfluss einer Abkühlung der Schmelze am Formteilrand noch der einer Abkühlung der Schmelze über den Fließweg simuliert werden.

In diesem Beitrag soll daher ein erweiterter Simulationsansatz vorgestellt werden, der die inhomogene Schmelztemperaturverteilung in der Kavität berücksichtigen kann. Der neue Ansatz wird zunächst beschrieben. Die Ergebnisse sollen anhand eines Simulationsmodells einer dünnwandigen Platte mit multipolarer Magnetisierungsstruktur validiert werden. Dazu werden die Ergebnisse mit denen des existierenden Ansatzes verglichen und auftretende Abweichungen vorgestellt und diskutiert.

Erweiterter Simulationsansatz

Der existierende Ansatz wurde um den Einfluss der Schmelztemperatur auf die magnetischen Formteileigenschaften erweitert um die Simulationsgenauigkeit bei dünnwandigen Formteilen zu verbessern. Der erweiterte Simulationsansatz ist in Bild 1 dargestellt, die rot hinterlegten Felder entsprechen der Erweiterung des existierenden Ansatzes.

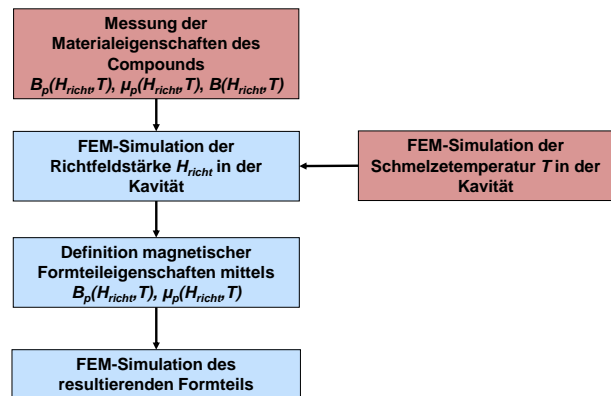


Bild 1: Erweiterter Simulationsansatz

Zunächst muss der Zusammenhang zwischen den magnetischen Formteileigenschaften, der Richtfeldstärke H_{richt} und der Schmelztemperatur T zum Zeitpunkt der Füllstoffausrichtung für das verwendete Compound-Material ermittelt werden. Dieser Zusammenhang wird mit Hilfe von Probekörpern bestimmt, die in einem speziellen Spritzgusswerkzeug hergestellt werden. Für jeden Probekörper wird eine spezifische Kavitätstemperatur eingestellt. Die Schmelze wird anschließend in die Kavität eingespritzt und ein homogenes Richtfeld wird angelegt, sobald sich die Schmelze- und Kavitätstemperatur angeglichen ha-

ben. Die resultierende Permanenz B_p und permanente Permeabilität μ_p des Probekörpers wird anschließend nach IEC 60404-5 gemessen und mit der eingestellten Kavitätstemperatur T und Richtfeldstärke H_{richt} korreliert. Aus diesen Messungen kann eine temperaturabhängige Neukurve des Compound-Materials erstellt werden [5]. Die gemessenen magnetischen Materialeigenschaften enthalten bei diesem Verfahren sowohl den Orientierungsgrad als auch den Magnetisierungsgrad der Füllstoffe.

Im nächsten Schritt wird eine Füllsimulation des zu simulierenden spritzgegossenen Magneten durchgeführt. Diese bestimmt die Schmelzetemperatur innerhalb der Kavität während der Formfüllung. Die Schmelzetemperatur zum Zeitpunkt der vollständigen Formfüllung kann anschließend für jedes finite Element der Kavität ausgewertet werden. Dabei wird aufgrund des hohen Spritzdrucks angenommen, dass eine Ausrichtung der hartmagnetischen Füllstoffe durch das Richtfeld nur bei Stillstand der Schmelze stattfindet [3].

Als Nächstes wird eine magnetostatische FEM-Simulation des Spritzgusswerkzeugs durchgeführt um die Richtfeldstärke H_{richt} in der Kavität zu berechnen. Die gemessene temperaturabhängige Neukurve des Compound-Materials wird für diese Simulation benötigt. Dazu werden die Schmelzetemperaturen aus der Füllsimulation auf das Netz des magnetostatischen Modells interpoliert und jedem finiten Element der Kavität eine eigene Neukurve zugewiesen. Untersuchungen zeigten, dass die magnetischen Eigenschaften der Schmelze in der Kavität nicht vernachlässigt werden können, obwohl die relative Permeabilität μ_r des Compound-Materials nahe 1 liegt [6]. Betrag und Richtung des Richtfeldstärkevektors werden nun für jedes finite Element der Kavität ausgewertet.

Mit Hilfe des gemessenen Materialzusammenhangs werden nun die magnetischen Formteileigenschaften in Abhängigkeit der simulierten Richtfeldstärke und der interpolierten Schmelzetemperatur für jedes finite Element definiert. Dabei wird angenommen, dass die resultierenden magnetischen Eigenschaften parallel zum simulierten Richtfeldstärkevektor ausgerichtet sind. Somit wird das Formteil als anisotroper Dauermagnet definiert.

In einem letzten Schritt kann der resultierende spritzgegossene Dauermagnet vereinzelt oder als Teil eines technischen Aufbaus simuliert werden.

Validierung des erweiterten Simulationsansatzes

Zunächst soll untersucht werden, ob die Schmelzetemperatur einen signifikanten Einfluss auf die magnetischen Eigenschaften des Compound-Materials hat. Dazu wird der Zusammenhang zwischen den magnetischen Formteileigenschaften, der Schmelzetemperatur und der Richtfeldstärke gemessen. An-

schließend wird ein Spritzgusswerkzeug für die Herstellung eines dünnwandigen Formteils mit multipolärer Magnetisierungsstruktur modelliert. Die resultierenden magnetischen Eigenschaften des Formteils werden jeweils mit dem existierenden und dem erweiterten Simulationsansatz bestimmt. Die Ergebnisse werden sowohl miteinander als auch mit experimentellen Ergebnissen aus der Literatur verglichen [3]. Somit soll bestimmt werden, ob die Abweichungen des erweiterten Ansatzes signifikant sind und ob die Berücksichtigung der Schmelzetemperaturen zu einer Abnahme der magnetischen Formteileigenschaften führt.

Für die Materialdatenbestimmung und die Simulation wurde ein Compound auf PA12-Basis mit 63% Füllstoffvolumenanteil eines anisotropen Strontiumferrits verwendet. Die Erstarrungstemperatur des Compounds beträgt 160°C , die empfohlene Verarbeitungstemperatur liegt bei 280°C .

In Bild 2 sind die für die Simulation des dünnwandigen spritzgegossenen Dauermagneten verwendeten Teile des Spritzgusswerkzeugs dargestellt.

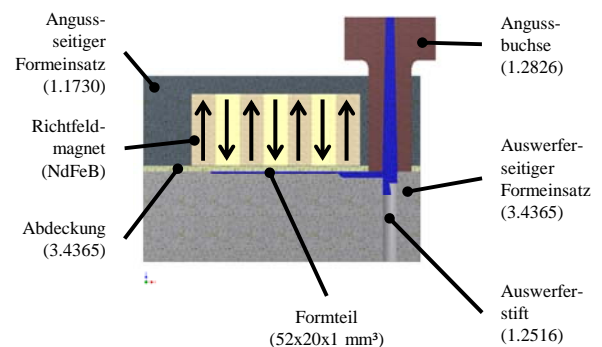


Bild 2: Relevante Bereiche des Spritzgusswerkzeugs für die Herstellung eines dünnwandigen, multipolaren Dauermagneten

Das Formteil besteht aus einer dünnen, rechteckigen Platte mit einer Länge von 52 mm, einer Breite von 20 mm und einer Wandstärke von 1 mm. Es wird über einen Kegelanguss mit Filmanschnitt gefüllt. Die Kavität ist auf der Auswerferseite in einem Formeinsatz enthalten. Der Einsatz besteht aus Formbaualuminium 3.4365. Auf der Angussseite sind sieben NdFeB-Magnete mit abwechselnder Polarisierung, wie in Bild 2 gezeigt, in einem Formeinsatz angeordnet. Die Magnete erzeugen ein bogenförmiges Richtfeld in der Kavität. Eine dünne Abdeckung aus Formbaualuminium 3.4365 trennt die Magnete von der Kunststoffschmelze. Der angussseitige Formeinsatz besteht aus dem Werkzeugstahl 1.1730 und stellt gleichzeitig den magnetischen Rückschluss für das Richtfeld dar.

Messung der magnetischen Materialeigenschaften

Zylindrische Probekörper mit einem Durchmesser von 20 mm und einer Dicke von 5 mm wurden mit Schmelzetemperaturen von 100°C bis 280°C und Richtfeldstärken von 90000 A/m bis 900000 A/m hergestellt. Anschließend wurden die Permanenz B_p , die permanente Permeabilität μ_p sowie die Neukurve des Compound-Materials als Funktion der Richtfeldstärke H_{richt} und der Schmelzetemperatur T gemessen. In Bild 3, Bild 4 und Bild 5 sind die Ergebnisse der Materialdatenmessung der Probekörper dargestellt.

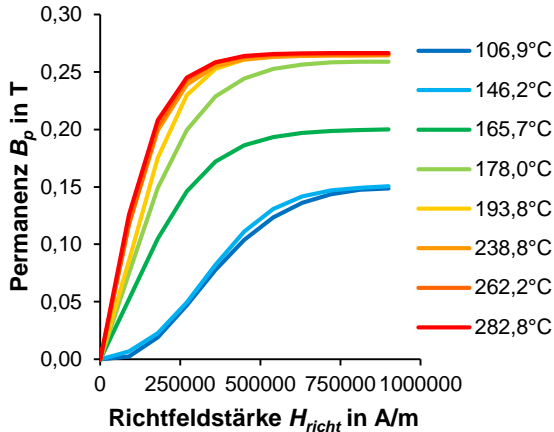


Bild 3: Gemessene Permanenz in Abhängigkeit der Schmelzetemperatur

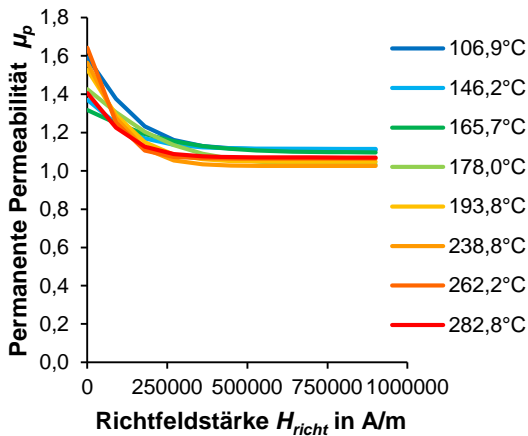


Bild 4: Gemessene permanente Permeabilität in Abhängigkeit der Schmelzetemperatur

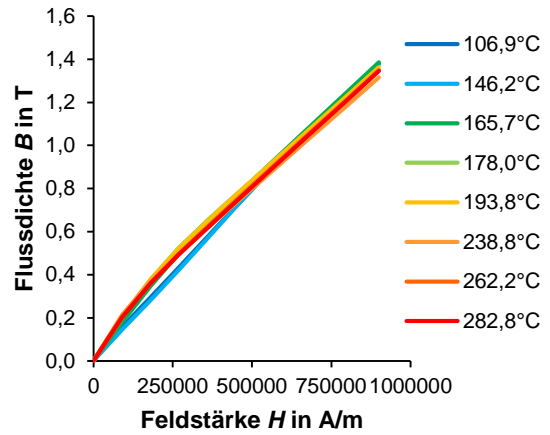


Bild 5: Gemessene Neukurve in Abhängigkeit der Schmelzetemperatur

Die Permanenz B_p des Compound-Materials zeigt eine starke Abhängigkeit von der Schmelzetemperatur T . Unterhalb der Erstarrungstemperatur von 160°C zeigt der Probekörper isotropes Verhalten. In diesem Fall entsprechen die magnetischen Eigenschaften denen einer Probe, die ohne Einfluss eines Richtfelds gespritzt und nach dem Erstarren aufmagnetisiert wurde. Oberhalb der Erstarrungstemperatur nimmt die Permanenz schnell zu. Zwischen 240°C und 280°C wirken sich Unterschiede in der Schmelzetemperatur nur noch geringfügig auf die Permanenz des Probekörpers aus. Bei diesen Temperaturen kann angenommen werden, dass ein maximaler Orientierungsgrad der Füllstoffe erreicht wurde.

Die Ergebnisse der permanenten Permeabilität μ_p der Probekörper zeigen einen geringen Einfluss der Schmelzetemperatur T . Es kann lediglich ein Trend zu einer Abnahme der permanenten Permeabilität mit zunehmender Schmelzetemperatur festgestellt werden. Es sei angemerkt, dass die Messung einer Permeabilität zwischen 1 und 1,2 an der Grenze der Messgenauigkeit des verwendeten Aufbaus liegt.

Die Neukurve zeigt ebenfalls einen geringen Einfluss der Schmelzetemperatur. Die größten Änderungen treten bei Feldstärken unterhalb von 500000 A/m auf. Da diese Daten aus der Messung der permanenten Permeabilität des Probekörpers abgeleitet wurden, findet sich der Einfluss der Messgenauigkeit des verwendeten Aufbaus ebenfalls in der Neukurve wieder.

FEM-Simulation der Formfüllung

Ein vollständiges 3D-Modell des gespritzten Magneten und des umgebenden Spritzgusswerkzeugs, wie in Bild 2 dargestellt, wurde für die Füllsimulation in Autodesk Moldflow erstellt. Die Kavität wurde fein vernetzt um eine ausreichende Elementanzahl über die Formteildicke zu gewährleisten. Die Kavitätstemperatur wurde mit 100°C und die Schmelztemperatur mit 280°C zu Beginn der Füllphase festgelegt. Die Prozessparameter wurden einer ARBURG Allrounder 270S Spritzgussmaschine entsprechend eingestellt. Der Füllvorgang wird über die vorgegebene Füllzeit geregelt. Am Ende der Füllphase wurden die Knotentemperaturen und -koordinaten des Formteils als Textdatei exportiert. Die Temperaturverteilung wurde für Füllzeiten von 0,2 s, 0,5 s und 1,0 s ausgewertet. Beispielhafte Ergebnisse der Füllanalyse sind in Bild 6 auf halber Formteildicke dargestellt.

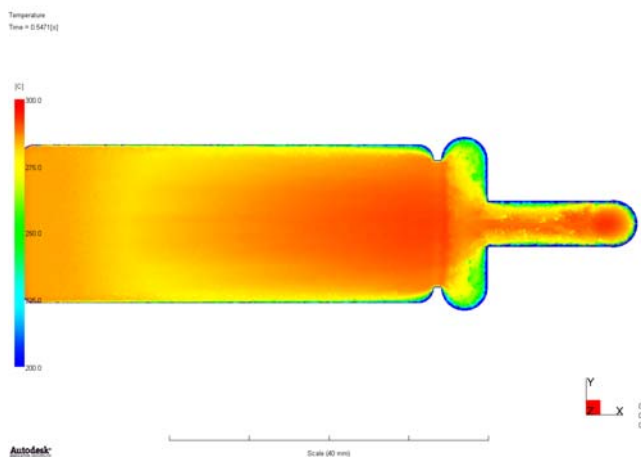


Bild 6: Schmelztemperaturverteilung in der Kavität am Ende der Formfüllung bei einer Füllzeit von 0,5 s

Die Ergebnisse der Füllsimulation zeigen eine starke Abkühlung der Schmelze auf ca. 100°C nahe der Kavitätswand. In diesen Bereichen ist eine Abnahme des Orientierungsgrades der Füllstoffe zu erwarten. Die kälteren Randbereiche sind in Angussnähe stärker ausgeprägt, da die Abkühlung der Schmelze zeit- und strömungsabhängig ist. Zusätzlich kann eine leichte Abkühlung der Schmelze über den Fließweg beobachtet werden. Diese Abkühlung ist gegenüber den Randbereichen geringer. Mit zunehmender Füllzeit sind die kälteren Randbereiche stärker ausgeprägt und die Abkühlung der Schmelze über den Fließweg nimmt ebenfalls zu.

FEM-Simulation der Richtfeldstärke

Die Richtfeldstärke H_{richt} in der Kavität wurde mit Hilfe einer magnetostatischen FEM-Simulation in ANSYS Mechanical APDL bestimmt. Ein 3D-Modell des in Bild 2 dargestellten Aufbaus wurde dazu mit folgenden Vereinfachungen erstellt. Zunächst wurde das gesamt-

te Modell halbiert und eine Symmetriebedingung auf der Schnittebene definiert um die Anzahl finiter Elemente zu reduzieren. Bohrungen für Verschraubungen und Auswerferstifte in den Formeinsätzen wurden ebenso wie der Anguss und Anschnitt vernachlässigt. Voruntersuchungen zeigten, dass der Einfluss dieser Vereinfachungen auf das Richtfeld vernachlässigbar ist. Das vereinfachte Modell ist in Bild 7 dargestellt.

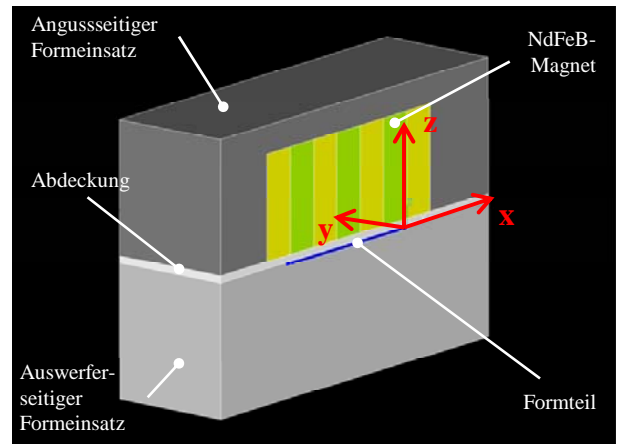


Bild 7: Modell für die magnetostatische Simulation des Richtfeldes in der Kavität

Die Compound-Schmelze wurde mit der in Bild 5 abgebildeten, gemessenen Neukurve $B(H_{richt}, T)$ angegeben. Als Nächstes wurden die Temperaturergebnisse aus Autodesk Moldflow importiert und auf das FE-Netz in ANSYS Mechanical APDL interpoliert. Somit wurde jedem finiten Element der Kavität eine individuelle temperaturabhängige Neukurve zugewiesen.

Die Richtfeldstärke in der Kavität wurde anschließend für die unterschiedlichen Füllzeiten und Schmelztemperaturverteilungen simuliert. Der existierende Simulationsansatz wurde repliziert, indem die Schmelztemperatur für jedes finite Element der Kavität auf 280°C gesetzt wurde.

Die Richtfeldstärke $H_{richt,z}$ in Z-Richtung nach Bild 7 wurde auf einer Schnittebene in halber Kavitätstiefe ausgewertet. Bild 8 zeigt das Richtfeld für den existierenden Ansatz mit einer konstanten Schmelztemperatur von 280°C und den erweiterten Simulationsansatz für eine Füllzeit von 0,5 s.

Die Ergebnisse der Richtfeldstärke zeigen keine signifikanten Abweichungen zwischen den Simulationsansätzen. Für einen genaueren Vergleich wurde die Richtfeldstärke $H_{richt,z}$ auf einem Pfad in der Kavität, wie in Bild 8 dargestellt, ausgewertet. Die Ergebnisse dieses Vergleichs sind in Bild 9 zusammengestellt.

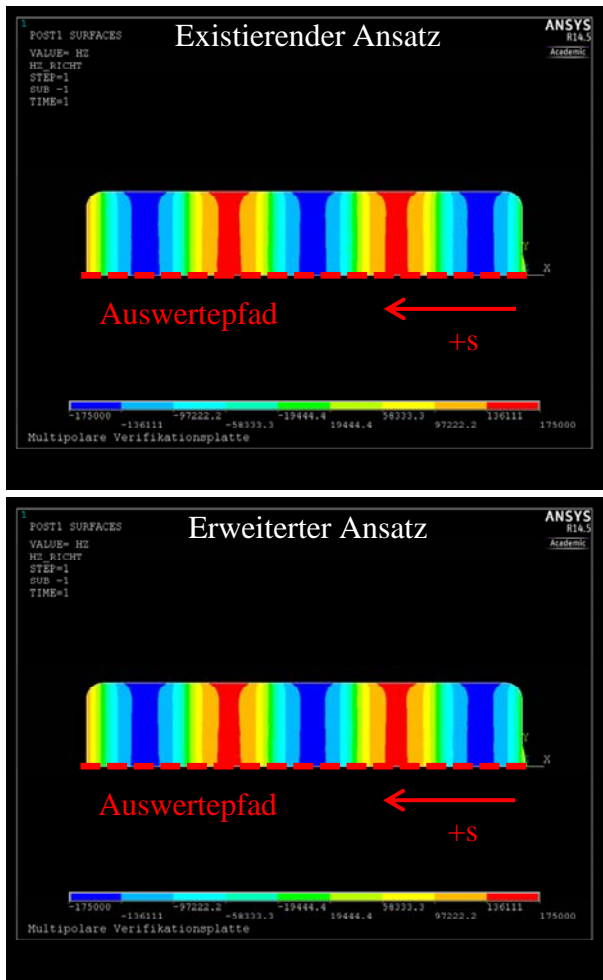


Bild 8: Vergleich der Richtfeldstärke in der Kavität zwischen existierendem und erweitertem Simulationsansatz

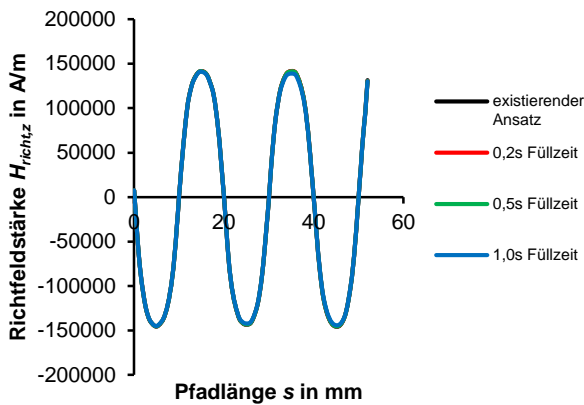


Bild 9: Vergleich der Richtfeldergebnisse auf einem Auswertepfad in der Kavität

Es können keine signifikanten Unterschiede in der Richtfeldstärke $H_{richt,z}$ auf dem Auswertepfad zwischen dem existierenden und dem erweiterten Simulationsansatz festgestellt werden. Die inhomogene Schmelzetemperaturverteilung hat somit bei den untersuchten Füllzeiten keinen Einfluss auf die Richtfeldstärke

in der Kavität. Dieses Ergebnis ist plausibel, da die in Bild 5 gezeigte Neukurve der Compound-Schmelze ebenfalls weitgehend unabhängig von der Schmelztemperatur ist.

FEM-Simulation des Formteils

Die hartmagnetischen Eigenschaften des spritzgegossenen Dauermagneten wurden mit Hilfe der gemessenen Materialeigenschaften definiert. Das magnetostatische Modell wurde zunächst angepasst um die resultierenden Eigenschaften des Formteils zu simulieren. Dazu wurden alle Geometrien und finite Elemente mit Ausnahme des definierten Magneten aus dem Modell entfernt. Eine neue Lufthülle wurde um das Formteil modelliert. Zusätzlich wurde ein fein vernetzter Luftraum für die Auswertung der magnetischen Eigenschaften oberhalb des Formteils hinzugefügt. Die Symmetriebedingung wurde beibehalten um die Modellgröße zu reduzieren. Das neue Modell ist in Bild 10 dargestellt.

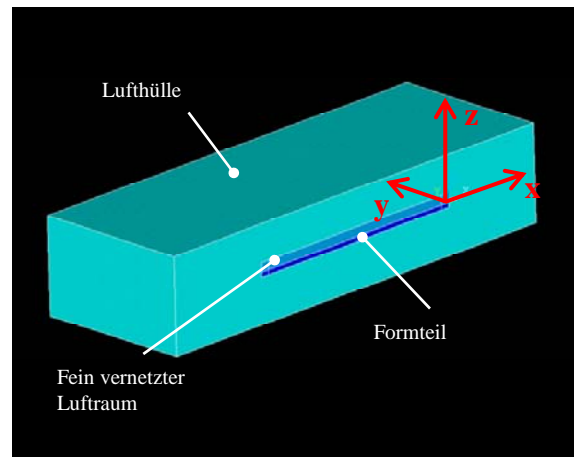


Bild 10: Modell für die Simulation der resultierenden Formteileigenschaften

Die Feldstärke in Z-Richtung wurde auf einer Ebene parallel zur XY-Ebene, wie in Bild 10 dargestellt, 1 mm oberhalb des Formteils ausgewertet. Das Magnetfeld des resultierenden spritzgegossenen Dauermagneten wurde anschließend für eine homogene Schmelzetemperaturverteilung sowie für unterschiedliche Füllzeiten simuliert. Bild 11 zeigt die Ergebnisse der Feldstärke H_z für den existierenden sowie den erweiterten Simulationsansatz bei 0,5 s Füllzeit.

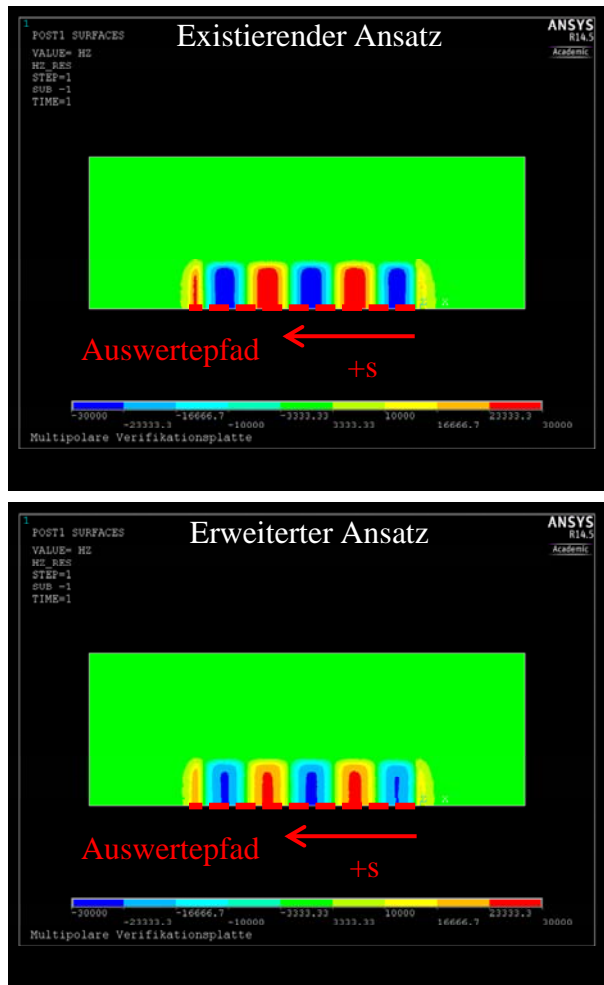


Bild 11: Vergleich der Feldstärke oberhalb des resultierenden Formteils zwischen existierendem und erweitertem Simulationsansatz

Man kann deutliche Unterschiede in den resultierenden magnetischen Eigenschaften des spritzgegossenen Dauermagneten erkennen obwohl die Richtfeldverläufe in allen Fällen sehr ähnlich waren. Beim erweiterten Ansatz kann generell eine Abnahme der resultierenden Feldstärke bei einer Füllzeit von 0,5 s beobachtet werden. Diese Abnahme ist in den stark abgekühlten Randbereichen des Formteils am größten. Der Feldstärkeverlauf in Z-Richtung wurde zusätzlich auf dem in Bild 11 dargestellten Pfad ausgewertet um die Ergebnisse aller Füllzeiten zu vergleichen. Die Ergebnisse sind in Bild 12 zusammengefasst.

Auf dem Auswertepfad kann eine allgemeine Abnahme der Feldstärkeamplitude beim erweiterten Simulationsansatz beobachtet werden. Dies zeigt, dass der spritzgegossene Dauermagnet geschwächt wird, wenn eine inhomogene Schmelzetemperaturverteilung in der Kavität berücksichtigt wird.

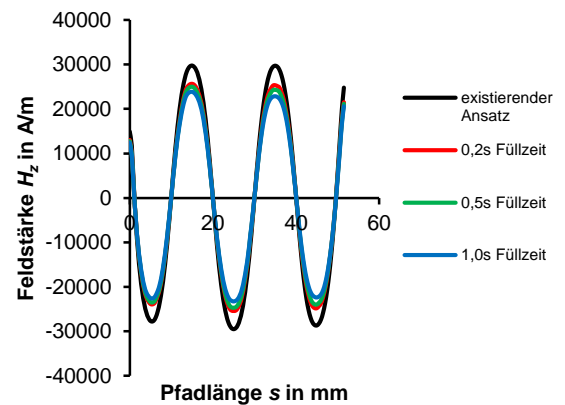


Bild 12: Vergleich der resultierenden Feldstärke auf einem Auswertepfad oberhalb des Formteils

Für eine weitere Auswertung wurden lediglich die drei mittleren Feldstärkepeaks betrachtet. Diese weisen aufgrund der Formteilgeometrie eine konstante Feldstärkeamplitude beim existierenden Simulationsansatz auf und eignen sich somit als Referenz. Die mittlere Feldstärkeamplitude in den Peaks nimmt bei einer Füllzeit von 0,2 s um 14% gegenüber dem existierenden Ansatz ab, bei 0,5 s um 17% und bei 1,0 s um 21%. Weiterhin zeigen die Ergebnisse eine Abnahme der Feldstärkeamplitude über der Fließweg. Diese ist mit 4,2% bei 1,0 s Füllzeit am deutlichsten ausgeprägt.

Die Ergebnisse zeigen, dass der erweiterte Simulationsansatz zu deutlichen Änderungen der magnetischen Formteileigenschaften gegenüber dem existierenden Ansatz führt. Sowohl die Abnahme der gesamten Feldstärkeamplitude als auch die Abnahme der Feldstärke über den Fließweg gegenüber dem existierenden Simulationsansatz konnten bei Messungen an realen spritzgegossenen Dauermagneten mit einer Wandstärke von 1 mm beobachtet werden [3]. Die Größenordnung der Feldstärkeabnahme liegt ungefähr im selben Rahmen obwohl die Versuche mit unterschiedlichem Compound-Material und unterschiedlicher Formteilgeometrie durchgeführt wurden. Somit kann gezeigt werden, dass der erweiterte Simulationsansatz geeignet ist, die Simulationen genauigkeit dünnwandiger spritzgegossener Dauermagnete zu erhöhen. Der erweiterte Ansatz kann zusätzliche Einflüsse auf die Formteileigenschaften aufgrund unterschiedlicher Füllzeiten und Schmelzetemperaturverteilungen berücksichtigen. Die Auswirkung dieser Einflüsse lässt sich hinreichend simulieren, somit kann der erweiterte Simulationsansatz als plausibel angesehen werden.

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird ein erweiterter Simulationsansatz für dünnwandige spritzgegossene Dauermagnete vorgestellt. Der erweiterte Ansatz ist in der Lage, die Auswirkung einer inhomogenen Schmelzetemperaturverteilung am Ende der Füllphase auf die magnetischen Formteileigenschaften zu berücksichtigen.

Beispielhafte Materialdatenmessungen, die als Teil des neuen Simulationsansatzes durchgeführt wurden, werden vorgestellt und diskutiert. Es kann gezeigt werden, dass die Schmelzetemperatur einen deutlichen Einfluss auf die magnetischen Formteileigenschaften hat. Die Permanenz B_p wird am stärksten beeinflusst, die Auswirkungen auf die permanente Permeabilität μ_p und die Neukurve sind hingegen vernachlässigbar klein.

Der erweiterte Simulationsansatz wird anhand des Modells eines dünnwandigen spritzgegossenen Dauermagneten mit multipolarer Magnetisierungsstruktur validiert. Dazu wird zunächst die Schmelzetemperatur am Ende der Füllphase mit Hilfe einer Füllsimulation in Autodesk Moldflow für unterschiedliche Füllzeiten simuliert. Dabei kann gezeigt werden, dass die Schmelzetemperatur in der Kavität mit zunehmender Füllzeit abnimmt. Diese Abnahme konzentriert sich auf die Formteiltränder, wo die heiße Schmelze mit der kalten Kavitätswand in Kontakt kommt. Weiterhin kann eine Abkühlung der Schmelze über den Fließweg festgestellt werden. Anschließend werden die Einflüsse des erweiterten Ansatzes auf das Richtfeld innerhalb der Kavität mit einer magnetostatischen Analyse in ANSYS Mechanical APDL simuliert. Die Ergebnisse zeigen, dass das Richtfeld nicht von der inhomogenen Temperaturverteilung in der Compound-Schmelze beeinflusst wird. Dieses Verhalten stimmt mit den Ergebnissen der Neukurvenmessung des Compounds überein.

Die Simulation des resultierenden spritzgegossenen Dauermagneten zeigt jedoch eine signifikante Abnahme der magnetischen Eigenschaften mit zunehmender Füllzeit und Abkühlung der Schmelze. Weiterhin kann beim erweiterten Ansatz eine Abnahme der magnetischen Eigenschaften über den Fließweg festgestellt werden. Die Abnahme der simulierten Feldstärke des resultierenden Dauermagneten in Luft beträgt bis zu 21% bei einer Füllzeit von 1,0 s. Die Simulation zeigt zudem eine Abnahme der Feldstärkeamplitude über den Fließweg von 4,2% bei derselben Füllzeit. Diese Ergebnisse werden mit experimentellen Daten aus der Literatur verglichen. Der erweiterte Simulationsansatz kann als plausibel angesehen werden, da sowohl die allgemeine Abnahme der Feldstärken als auch die Abnahme der Feldstärke über den Fließweg grob mit den experimentellen Daten übereinstimmen. Daraus kann geschlossen werden, dass der erweiterte Simulationsansatz geeignet ist,

die Simulationsgenauigkeit bei dünnwandigen, spritzgegossenen Dauermagneten zu verbessern.

Zukünftig sollen eigene Versuche zur Validierung des erweiterten Simulationsansatzes durchgeführt werden. Zu diesem Zweck wurde ein Spritzgusswerkzeug für den in diesem Beitrag vorgestellten dünnwandigen Dauermagneten entwickelt und hergestellt. Die resultierenden Eigenschaften dieses spritzgegossenen Dauermagneten sollen mit den Simulationsergebnissen des erweiterten Ansatzes verglichen werden um diesen zu validieren.

Danksagung

Die Autoren möchten sich bei der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung im Rahmen der Graduate School advanced Manufacturing Engineering (GSaME) bedanken.

Literatur

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

INDUKTIVES SCHNELLHÄRTEN VON THERMISCH AKTIVIERBAREN KLEBSTOFFEN

SIMULATIVE PROZESSAUSLEGUNG UND OPTIMIERUNG

INDUCTION CURING OF THERMALLY ACTIVATED ADHESIVES

SIMULATIVE PROCESS DESIGN AND OPTIMIZATION

A. Retzbach¹ und W. Schinköthe¹

¹ IKFF, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik der Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart
Tel.: + 49 711 685 66424, Fax: +49 711 685 56402, E-Mail: retzbach@ikff.uni-stuttgart.de

Kurzfassung: Thermisch aktivierte Klebstoffe können in vielen technischen Anwendungen eingesetzt werden. Abhängig vom Einsatzgebiet existieren verschiedenartige Möglichkeiten, die für die Aushärtung notwendige Energie in die Klebefuge einzubringen. Im Idealfall soll die Energie in Form von Wärme ausschließlich in die Klebefuge eingebracht werden, da eine Erwärmung der Fügepartner nicht gewünscht oder nicht zulässig ist. Die induktive Energieeinbringung erfüllt diese Anforderung und erschließt somit neue Einsatzfelder für thermisch aktivierbare Klebstoffe, da eine exklusive Energieeinbringung in den Klebstoff möglich ist. Hierzu werden dem Klebstoff metallische Partikel zugegeben, welche induktiv erwärmbar sind. Auf Grund der geringen Erfahrungswerte steuert eine simulative Vorauslegung wertvolle Informationen für die Prozessauslegung bei. Im Rahmen dieser Untersuchung wird ein Verfahren für die Simulation der induktiven Erwärmung vorgestellt. Hierbei wird auch auf die Ermittlung der notwendigen Materialdaten eingegangen. Weiterhin werden Möglichkeiten zur Prozessoptimierung durch eine Vorkonditionierung der Klebefuge vorgestellt und diskutiert.

Abstract: Thermally activated adhesives have opened up a wide field of technical applications. There are several ways to induce the needed heating energy into the glue joint, depending on the specific field of operation. The ideal case is an exclusive heating of the glue joint, especially if a heating of the joining parts is not permissible. Induction heating is predestinated for this field of application and opens up a wide range of new applications since it is possible to heat the adhesive exclusively. For that purpose ferromagnetic particles are added to the adhesive matrix. Since there is a shortcoming of experience data a simulation can add valuable information for the process design. In this work a new method for the process simulation is proposed. A method for obtaining material data needed in the simulation process is also suggested. Moreover possibilities of a process optimization through a preconditioning procedure of the adhesive are discussed.

Schlagwörter: Induktion, Kleben, Prozessauslegung

Keywords: Induction, adhesive, process layout

Einleitung

Induktionserwärmung ist seit Mitte der 90er-Jahre ein zentraler Forschungsschwerpunkt am Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik. Ausgehend vom schwerpunktmäßigen Einsatz in der variothermen Prozessführung im Spritzguss wurden neue Einsatzgebiete für die Induktionserwärmung erschlossen. Im Rahmen eines öffentlich geförderten ZIM-Projekts [1] konnte bereits nachgewiesen werden, dass sich Induktionserwärmung für das Verkleben von Bipolarplatten für Brennstoffzellen eignet. Der hier vorgestellte Ansatz verwendet zur Simulation Ansys Workbench in der Version 15.0 sowie Ansys Maxwell Version 15.0.0.

Grundlagen der Induktionserwärmung

Grundlage der Induktionserwärmung ist die Erzeugung eines elektromagnetischen Wechselfelds mittels einer Spule, dem sogenannten Induktor. Abhängig von den Materialeigenschaften können drei physikalische Effekte zu einer Erwärmung beitragen.

Wird ein elektrisch leitfähiges Werkstück in das Wechselfeld eingebracht, so wird darin eine elektrische Spannung induziert. Diese treibt einen Wirbelstrom durch das Werkstück. Bedingt durch den Ohmschen Widerstand des Werkstücks werden die Wirbelströme gemäß dem Ohmschen Gesetz in Joulesche Verlustleistung gewandelt.

Besitzt das Werkstück ferromagnetische Materialeigenschaften hat die Exposition im Wechselfeld eine

stetige Ummagnetisierung der magnetischen Domänen zur Folge und es treten Hystereseverluste auf. Dabei kommt es zu einer wechselnden Ausrichtung der Weisschen Bezirke mit der Frequenz des Erregfelds. Diese Ummagnetisierung benötigt Energie, welche in Wärme umgesetzt wird.

Unterschreitet die Abmessung des Werkstücks eine werkstoffspezifische Größe ist die für die Aufrechterhaltung einer Blochwand zwischen zwei Weisschen Bezirken benötigte Energie größer als die Energie für die Erhaltung einer einzelnen magnetischen Domäne. Man spricht dann von Superparamagnetismus, wobei superparamagnetische Relaxation für die Erwärmung im elektromagnetischen Wechselfeld verantwortlich ist.

Induktiv aushärtende Klebstoffe

Klebstoffe welche für eine induktive Erwärmung ausgelegt sind, beinhalten ferromagnetische bzw. superparamagnetische Partikel, welche von der Klebstoffmatrix umgeben sind. Die Füllstoffkonzentration befindet sich dabei stets unterhalb der Perkolationschwelle, ab welcher die makroskopische Leitfähigkeit stark ansteigen würde. Da diese Klebstoffe somit makroskopisch schlecht leitfähig sind, leisten Wirbelstromverluste keinen nennenswerten Beitrag zu der Erwärmung.

Mögliche Füllstoffe welche für eine Absorption des elektromagnetischen Felds geeignet sind, wurden bereits in anderen Arbeiten untersucht und diskutiert [2], [3].

Versuche zeigen, dass sowohl Klebstoffe auf Epoxidharzbasis als auch auf Basis von Acrylat verwendet werden können. Im Anwendungsfall unterliegt die Auswahl der verwendeten Klebstoffmatrix jedoch den spezifischen Anforderungen der Klebeverbindung. Die jeweilige Eignung des Klebstoffs muss im Einzelfall untersucht werden.

Neben der Beschaffenheit der Klebstoffmatrix sowie Partikelgröße und -werkstoff gibt es eine Reihe weiterer Faktoren, welche das Erwärmungsverhalten beeinflussen. Sowohl die Frequenz, als auch die Feldstärke des durch den Induktor erzeugten Feldes wirken sich bei einer Erhöhung verstärkend auf die erreichbaren Heizraten aus.

Prozessauslegung

Bei der Verbindung von nicht elektrisch leitfähigen Bauteilen eröffnet sich durch die induktive Verklebung ein neues Fertigungsverfahren. Der Vorteil bei induktiv erwärmbaren Klebstoffen liegt dabei in der unmittelbaren Wärmeumsetzung im Klebstoff. Somit ist die thermische Belastung der Fügepartner auf ein Minimum beschränkt. Wärmeleitung zwischen dem Klebstoff und dem Fügepartnern ist zwar vorhanden, auf

Grund der hohen Heizgeschwindigkeiten und der daraus resultierenden kurzen Zykluszeit jedoch gering.

Die Auslegung der Klebefugegeometrie unterliegt den für Klebstoffe typischen Gestaltungsmerkmalen mit der Einschränkung, dass nach dem Fügen der Bauteile ein Induktor in unmittelbarer Nähe zum Klebstoff positioniert werden muss.

Nach dem Auftragen des Klebstoffes und dem Fügen der Bauteile kann der Induktor entweder statisch für die Zeit der Erwärmung über der Klebefuge positioniert oder in einem bahnförmigen Profil über die Klebefuge geführt werden. Die Induktorgeometrie richtet sich dabei nach der jeweiligen Anwendung und ihre Bestimmung ist Teil des Auslegungsprozesses. Zusammen mit dem verwendeten Generator muss für jede Anwendung eine individuelle Auslegung erfolgen. Ein simulationsgestütztes ganzheitliches Verfahren wurde bereits in [4] vorgestellt.

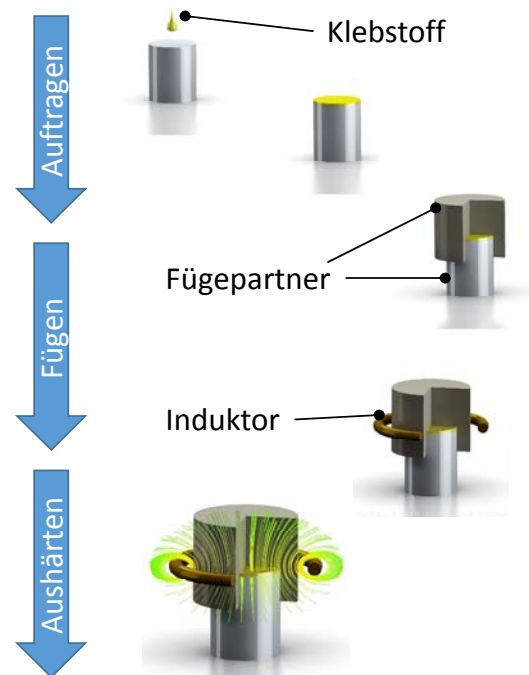


Bild 1: Verfahrensablauf des induktiven Klebens

Die für die Erwärmung notwendige Verweilzeit unterliegt einer Vielzahl von Einflussfaktoren. Insbesondere spielt das Zusammenwirken von Induktorstrom, Arbeitsfrequenz, Partikelzusammensetzung und Felddurchdringung der Klebefuge eine zentrale Rolle. In Laborversuchen wurden Aufheizgeschwindigkeiten von über 30 K/s dokumentiert. Ausgehend von einem notwendigen Temperaturhub von etwa 100 K, sind Zykluszeiten unter vier Sekunden möglich.

Da Erfahrungswerte bei der Prozessauslegung nicht ausreichend vorhanden oder öffentlich zugänglich sind, kann eine simulative Untersuchung des Prozesses frühzeitig Informationen für die Auslegung bereitstellen.

Materialdatenerfassung und Aufbereitung

Da zum derzeitigen Stand der Technik eine Simulation von Hystereseverlusten nur durch abstrahierte Modelle möglich ist und superparamagnetische Relaxation nicht berücksichtigt wird, muss bei der Auslegung auf alternative Modelle zurückgegriffen werden.

Der hier vorgestellte Ansatz bietet eine Möglichkeit Materialdaten zu erfassen und aufzubereiten, so dass keine Herstellerangaben zu den magnetischen Eigenschaften der verwendeten Partikelfüllungen verwendet werden. Hierbei wird eine Kombination aus Messung und Simulation verwendet, um anhand einer Probelebung die benötigten Daten zu erfassen und so aufzubereiten, dass anschließend beliebige Klebungen mit dem zuvor verwendeten Klebstoff simuliert werden können. Bild 2 zeigt den schematischen Ablauf der Materialdatenerfassung und Aufbereitung. Ziel ist die Ermittlung einer klebstoffspezifischen Flussdichte-Verlustleistungskennlinie, im Nachfolgenden BP-Kennlinie genannt, welche in den Simulationen für der Bestimmung der umgesetzten Verlustleistung genutzt wird. So kann mittels der Berechnung der vorherrschenden Flussdichte in der Klebefuge, unter Berücksichtigung der Arbeitsfrequenz, die resultierende Erwärmungsleistung simuliert werden.

Zur Ermittlung der relativen Permeabilität des gefüllten Klebstoffes wird eine stabförmige Probe gegossen und im Ofen zur Aushärtung gebracht. Anschließend kann mit einem Remagraph des Typs MagHyst mittels Stabprobenadapter nach DIN EN 60404 die Permeabilität ermittelt werden. Bei der für die Versuche verwendeten Probe handelt es sich um einen Klebstoff auf Epoxidharzbasis gefüllt mit Magnetitpulver (Fe_3O_4 , Korngröße $< 20\mu\text{m}$) und Mangan-Zink-Nanoferriten, entwickelt und hergestellt durch die Firma Wellmann Technologies.

In einem Testaufbau wird eine Klebstoffprobe definiert im elektromagnetischen Feld eines Induktors platziert und erwärmt. Während des Erwärmungsvorganges wird der Induktorstrom mittels einer Rogowskispule erfasst. Die Erwärmung selbst wird berührungslos mittels eines Pyrometers über die Zeit gemessen. Über die bekannte Masse der Klebstoffprobe kann somit die in den Klebstoff eingebrachte Leistung $P(I)$ in Abhängigkeit des Induktorstroms nach (1) erfasst werden. Für die Aufnahme eines Kennfeldes, muss diese Messung für verschiedene Ströme wiederholt werden.

$$P(I) = m \cdot \Delta T \cdot c_p / t \quad (1)$$

Mit m = Masse der Klebstoffprobe
 ΔT = Gemessener Temperaturdifferenz
 c_p = Spez. Wärmekapazität des Klebstoffes
 t = Messdauer

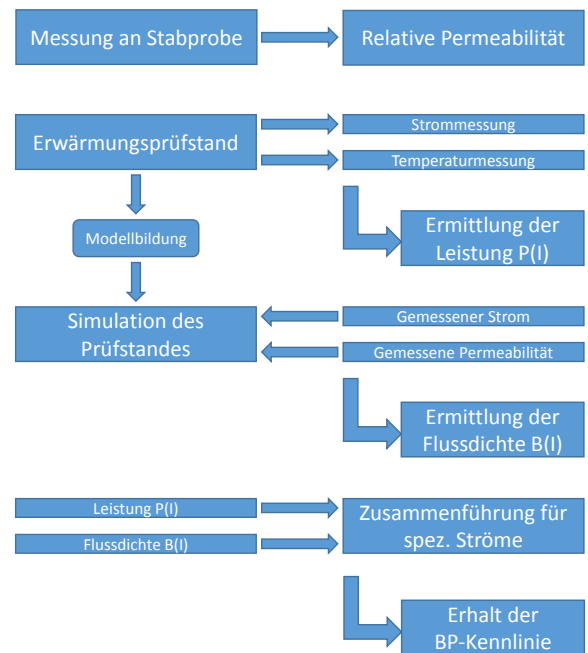


Bild 2: Ablaufschema der Materialdatenerfassung und Aufbereitung

Das durch den Versuchsaufbau erzeugte elektromagnetische Wechselfeld sollte die Klebstoffprobe homogen durchdringen. Hierfür eignet sich eine Spulenordnung in Art einer Helmholtzspule. Die Abmessungen der Klebstoffproben bestimmen sich durch den näherungsweise homogenen Feldbereich der verwendeten Spule (siehe Bild 3). Unter Verwendung der gemessenen Induktorströme wird das entstehende elektromagnetische Feld des Induktors in einer harmonischen Simulation berechnet. Induktor- und Klebstoffprobegeometrie sind identisch der Geometrie aus dem zuvor verwendeten Versuchsaufbau, wobei der Klebstoffprobe die relative Permeabilität aus der zuvor durchgeführten Stabprobenmessung zugewiesen wird. Aus den Simulationsergebnissen wird eine mittlere Flussdichte $B(I)$ in der Klebstoffprobe für den jeweiligen verwendeten Induktorstrom I berechnet.

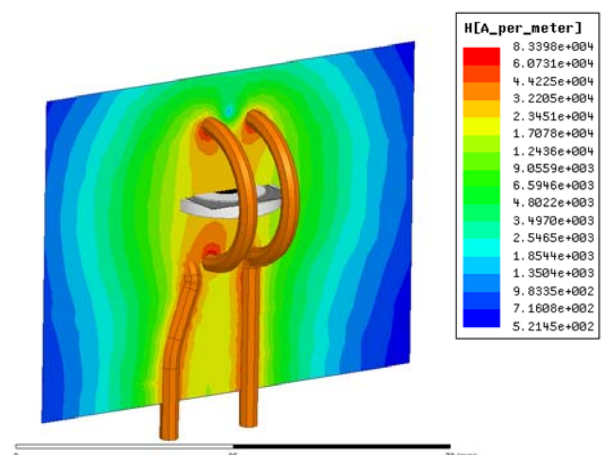


Bild 3: Feldsimulation des Prüfstandes

FEM-Simulation der resultierenden Verlustleistung

Die Zusammenführung der eingebrachten Verlustleistung $P(I)$ und der Flussdichte $B(I)$ über die gemeinsame Bezugsgröße des Induktorstroms I erlaubt die Erstellung einer BP-Kennlinie für den verwendeten Klebstoff. Unter Verwendung dieser BP-Kennlinie kann nun in Maxwell eine beliebige Klebefugen- und Induktorgeometrie simuliert werden. Eine Übertragung der simulierten Verlustleistung in eine thermisch transiente Simulation erlaubt das Abbilden der sich einstellenden Erwärmung. Auch lassen sich so die Einflüsse der Wärmeleitung der Klebpartner sowie Konvektion- und Strahlungsverluste mit einbeziehen.

Die durchgeführten Messungen und Simulationen müssen für jeden spezifischen Klebstoff erneut durchgeführt werden, da eine Übertragbarkeit der Ergebnisse nicht gewährleistet ist.

Prozessbeeinflussung durch Vorkonditionierung

Geht man von einer komplexen Klebefugengeometrie aus, wird die Klebefuge nicht homogen vom erzeugten elektromagnetischen Feld durchdrungen. Zwangsläufig ist eine Hotspot-Bildung zu erwarten. Eine Anpassung der Induktorgeometrie ist möglich, unterliegt jedoch praktischen Beschränkungen.

Eine andere, neuartige Möglichkeit eine Hotspot-Bildung zu verhindern bietet eine räumlich gezielte Manipulation des elektromagnetischen Absorptionsverhaltens des Klebstoffes. Dazu wird der Klebstoff nach dem Auftragen einem definierten magnetischen Gleichfeld ausgesetzt. Die Erzeugung dieses Feldes kann sowohl durch Elektro- wie auch durch Permanentmagnete erfolgen. Es kommt zu einer räumlichen Ausrichtung der Partikel innerhalb des Klebstoffes entlang ihrer magnetischen Vorzugsrichtung sowie zu einer Ausbildung pfadförmiger Strukturen entlang der erzeugten Feldlinien. Erklärt werden kann dieser Effekt der magnetischen Perkolation nach [5] mit der Feldverzerrung durch die Partikel. Unterschreiten die Partikel einen kritischen Abstand untereinander, so kommt es zu Wechselwirkungen zwischen den Partikeln. Gemäß dem resultierenden Feldgradienten zwischen den Partikeln erfahren diese eine Kraft, welche diese Anordnung bedingt.

Weitere Einflussfaktoren auf das Absorptionsverhalten sind die Dauer der Feldausssetzung sowie die Feldstärke des Gleichfeldes. In Laborversuchen [6] wurden diese beiden Einflüsse auf die resultierende Heizrate experimentell untersucht. Bild 4 zeigt, dass eine Erhöhung der Beeinflussungsdauer oder der Feldstärke zu einer Erhöhung der erreichbaren Heizrate führt, welche ein Maximum besitzt. Nach Überschreiten des Maximums durch eine zu lange Beeinflussungsdauer tritt eine Minderung der Heizrate auf. Die Dauer bis zum Erreichen des Maximums ist abhängig von der Verwendeten Feldstärke, wobei bei höheren Feldstär-

ken das Maximum früher erreicht wird. Für die Untersuchung in Bild 4 wurde für die Ausrichtung ein Gleichfeld mit identischem Feldrichtungsvektor zu dem Wechselfeld verwendet.

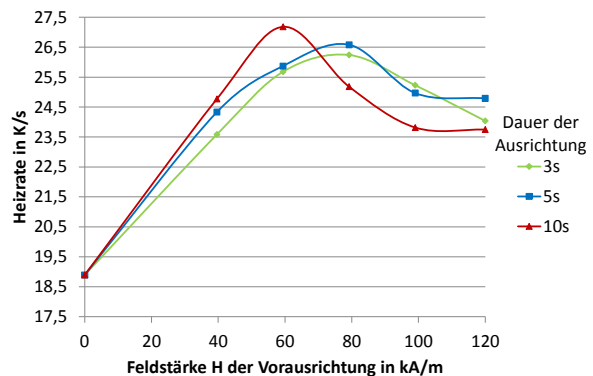


Bild 4: Heizrate bei parallelem Ausrichtungsfeld

Bild 5 zeigt die Beeinflussung der Heizrate bei einem Winkelversatz zwischen den Feldrichtungsvektoren des zur Ausrichtung verwendeten Gleichfeldes und des zur Erwärmung verwendeten Wechselfelds von 90° . Es ist ersichtlich, dass es zu keiner nennenswerten Beeinflussung der Heizrate kommt.

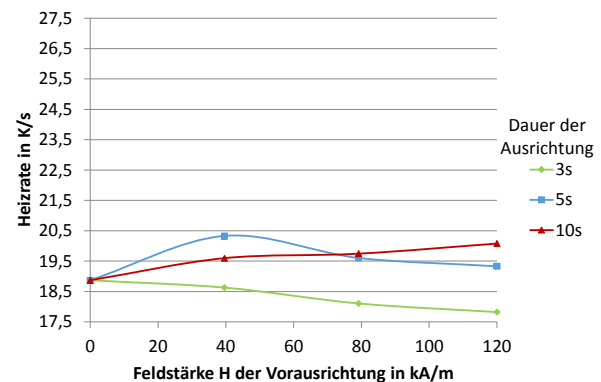


Bild 5: Heizrate bei senkrechtem Ausrichtungsfeld

Fazit

In dieser Arbeit wurde ein Verfahren für die simulative Auslegung einer induktiv aushärtenden Klebefuge für elektrisch nicht leitfähige Bauteile unter Verwendung von mit ferromagnetischen und superparamagnetischen Partikeln gefüllter Klebstoffe vorgestellt und diskutiert. Es können so komplexe Klebefugengeometrien simulativ auf ihr Erwärmungsverhalten hin untersucht werden. Die Auslegung eines geeigneten Induktors wird vereinfacht und zuverlässiger. Ein Verfahren für die notwendige Materialdatenbestimmung wurde ebenfalls vorgestellt.

Weiter wurde ein neuer Ansatz zur Beeinflussung der Absorptionseigenschaften von Klebstoffen mit ferromagnetischer oder superparamagnetischer Partikelfül-

lung vorgestellt. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass durch eine geeignete Exposition der Klebefuge gegenüber einem magnetischen Gleichfeld eine Verbesserung der Absorptionseigenschaften erreicht werden kann. Die Zusammenhänge aus Feldstärke und Expositionsdauer auf die Absorptionseigenschaften wurde durch praktische Versuche ermittelt. Die resultierende Steigerung der erreichbaren Heizraten kann sowohl zu einer Homogenisierung der Erwärmung bei komplexen Klebefugegeometrien, als auch für eine Reduzierung der Zykluszeiten genutzt werden. Eine Implementierung des Einflusses der Vorkonditionierung in das Vorhandene Simulationsmodell steht noch aus.

Danksagung

Die Autoren möchten sich für die Förderung des Projekts durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) mit dem Förderkennzeichen KF2843303 bedanken. Darüber hinaus sei der Firma Wellmann Technologies GmbH in besonderem Maße für die hervorragende Zusammenarbeit gedankt.



Literatur

- [1] A. Retzbach et. Al., Entwicklung eines schnell aushärtenden Klebverfahrens für Bipolarplatten mittels induktiver Erwärmung, Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand, Abschlussbericht, 2014
- [1] M. Frauenhofer, Schnellhärtung struktureller Verbundklebungen mittels elektromagnetischer Wechselfelder, Technische Universität Braunschweig, Institut für Füge- und Schweißtechnik, Dissertation, 2010
- [2] A. Kaimann, Verkürzung der Prozesszeiten durch Aushärtung von Klebeverbindungen mittels induktiver Erwärmung, Universität Paderborn, Laboratorium für Werkstoff- und Füge-technik, Dissertation, 2002
- [4] M. Maier, A. Retzbach, W. Schinköthe, Ganzheitliche Modellbildung, Plastverarbeiter, Vol 10, S. 134-137
- [5] H. Göktürk, T. Fiske, D. Kalyon, Electric and magnetic Properties of a Thermoplastic Elastomer Incorporated with Ferromagnetic Powders, IEEE Transactions on Magnetism, Vol. 29, No. 6, 1993, 4170-4176
- [6] M. Butzer, Untersuchung zu Effekten kontrollierter Partikelausrichtung bei gefüllten Klebstoffen, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik, Studienarbeit, 2014