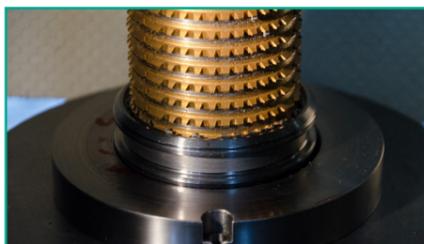


## Prozesskettenbetrachtung: Innenräumen von PKW-Schiebemuffen

An moderne PKW Schaltgetriebe werden sehr hohe Anforderungen gestellt. Beispielsweise müssen diese eine zuverlässige Drehmomentübertragung von der Antriebswelle über die Zahnradpaarung zur Abtriebswelle gewährleisten. Hierzu müssen allerdings auch die einzelnen Getriebekomponenten diese Anforderungen erfüllen. Innenverzahnte PKW-Schiebemuffen müssen beispielsweise sowohl hohe mechanische und thermische Belastungen ertragen, als auch hohe Maß- und Formgenauigkeiten aufweisen. Hierzu werden die Schiebemuffen nach der Weichbearbeitung gehärtet. Hierbei kommt es allerdings neben dem Festigkeitsanstieg zu einem Härteverzug der Bauteile. Um die hohen Maß- und Formgenauigkeiten wieder herzustellen, wird die Verzahnung in Anschluss durch Harträumen nachbearbeitet. Zum besseren Verständnis der dabei ablaufenden Mechanismen, wurden im Zuge des Graduiertenkollegs 1483 „Prozessketten in der Fertigung“ PKW-Schiebe-



Innenräumen einer PKW-Schiebemuffe

muffen vor und nach jedem Prozessschritt auf einer Koordinatenmessmaschine vermessen und die resultierende Geometrieänderung mithilfe einer Fourier-Analyse bestimmt. Die Untersuchungen ergaben, dass der Weichraumprozess eine deutliche Reduzierung der Ovalität und eine Steigerung der Dreieckigkeit der Schiebemuffen am Innendurchmesser zur Folge hat. Während die reduzierte Ovalität auf das ideale Räumwerkzeug zurückzuführen ist, verursachen die auf dem Umfang um jeweils 120°

verteilten Doppelnuten in der Verzahnung die steigende Dreieckigkeit. Am Außendurchmesser konnten infolge des Innenräumprozesses keine signifikanten geometrischen Abweichungen identifiziert werden. Die im Anschluss aufgekohlten und über Dorn gehärteten Schiebemuffen wurden ebenfalls untersucht. Dabei zeigte sich eine um die Mittelachse 60° versetzte Übertragung der Dreieckigkeit von der Innenkontur auf die Außenkontur der Schiebemuffen. Dies kann durch das Anlegen der zuvor dreieckig ausgeprägten Innenkontur auf den ideal runden Härtedorn erklärt werden. Im nächsten Schritt steht nun der finale Harträumprozess der Schiebemuffen an. Die finale Bauteilkontur soll dann ebenfalls durch eine Fourier-Analyse untersucht und bewertet werden.

**Ansprechpartner:**  
Dipl.-Ing. Farhoud Bejnoud  
Telefon: +49 721/608-42447  
E-Mail: Farhoud.Bejnoud@kit.edu

### Promotionen

**Dipl.-Ing. Florian Sell-Le Blanc**

„Prozessmodell für das Linearwickeln von unrunder Zahnspulen - Ein Beitrag zur orthozyklischen Spulenwickeltechnik“

**Dipl.-Wi.-Ing. Anna Sauer**

„Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien - Entscheidungsunterstützung zur Konfiguration einer qualitätsorientierten multi-use Batteriemontage“

**Dipl.-Ing. Jörg Bauer**

„Hochintegriertes hydraulisches Vorschubsystem für die Bearbeitung kleiner Werkstücke mit hohen Fertigungsanforderungen“

**Dipl.-Wi.-Ing. Nicole Stricker**

„Robustheit verketteter Produktionssysteme - Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit“

**Dipl.-Ing. Henning Wagner**

„Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen“

### Impressum

wbk Institut für Produktionstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Kaiserstr. 12 | 76131 Karlsruhe  
www.wbk.kit.edu  
ISSN: 2509-4378 (Print), 2509-4386 (Online)

### Neueinstellungen



**M.Sc. Bruno Vargas**  
Wälzschalen mit kleinen Achskreuzwinkeln  
zum 01.06.2016



**M.Sc. Patrick Moll**  
Produktionstechnologien für hybride Bauteile  
zum 01.09.2016



**M.Sc. Elisa Götze**  
Additive Fertigung mittels Selektivem Laserschmelzen  
zum 01.10.2016



**M.Sc. Andreas Kuhnle**  
Industrie 4.0 in der Produktionsplanung und -steuerung  
zum 01.09.2016



**Lauritz Elias Kühne**  
Industriemechaniker Fachrichtung Geräte- und Feinwerktechnik  
zum 01.09.2016



**M.Sc. Hannes Weinmann**  
Automatisierung der Stapelbildung in der Batteriezellproduktion  
zum 01.11.2016



**M.Sc. Niclas Eschner**  
Qualitätssicherung in der metallischen additiven Fertigung  
zum 01.09.2016



**Benjamin Stober**  
Industriemechaniker Fachrichtung Geräte- und Feinwerktechnik  
zum 01.09.2016



**M.Sc. Matthias Zapf**  
Werkzeug- und Prozessauslegung für das Wälzschalen  
zum 15.11.2016

## Editorial

Liebe Freunde und Partner des wbk,

wir blicken auf ein erfolgreiches Jahr 2016 für das wbk zurück. Auch dieses Jahr konnten wir mit einer Vielzahl an interessanten Veranstaltungen, neuen Projekten und Ereignissen füllen. Im Oktober fand unsere Herbsttagung mit dem Thema „Resiliente Produktion durch Industrie 4.0“ statt. Hier konnten wir mit hochrangigen Vertretern aus der Industrie die Potenziale von Indus-

trie 4.0 zur Erhöhung der Effizienz einer Produktion erörtern. Das Advanced Manufacturing Technology Center (AMTC) in China konnte dieses Jahr im Rahmen der „4th International Conference on Sustainable Manufacturing“ eine Demolinie für die Fertigung und Montage variantenreicher Hydraulikventile mit Industrie 4.0 Ansätzen vorstellen. Gegen Ende des Jahres wird das neue Produktionstechnische Labor E-Antriebe (PTLEA) unseres Instituts eröffnet werden. Der inhaltliche Schwerpunkt in



dieser Ausgabe unserer Topics liegt auf der Elektromobilität. Inzwischen fast traditionell, verzichten wir auch 2016 auf Weihnachtsgeschenke zugunsten einer Spende an die Hilfsorganisation „Ärzte ohne Grenzen e.V.“. Wir bedanken uns hiermit herzlich für Ihr Vertrauen und versichern, dass wir Ihnen auch im nächsten Jahr ein verlässlicher Partner sein werden. Ihnen und Ihren Familien wünschen wir ein frohes Weihnachtsfest sowie ein gesundes und erfolgreiches Jahr 2017.

Ihr wbk-Team

## Neues Fachbuch zur Spulenwickeltechnik in Zusammenarbeit mit der Firma Aumann GmbH veröffentlicht

Innerhalb von wenigen Wochen nach Erscheinen eroberte eine neue Publikation zur Wickeltechnik bei den Fachbüchern für Ingenieure – Sparte Automatisierung für Kraftfahrzeugtechnik – den Amazon Bestseller-Rang 3. Das bei Springer Vieweg erschienene „Handbuch der Wickeltechnik für hocheffiziente Spulen und Motoren“ erklärt gängige Spulenwickelverfahren, angrenzende Technologien und die zugehörige Automatisierung. Es handelt sich um die enorme Fleißarbeit von Entwicklern der Aumann GmbH aus Espelkamp und Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer vom Institut für Produktionstechnik (wbk), die erstmals alle wichtigen Aspekte der Wickeltechnik beleuchtet. „Wir beschreiben nicht nur die maschinellen Verfahren, sondern auch erstmals das händische Träufelwickeln für den Elektromaschinenbau mit allen Arbeitsschritten“, sagt Dipl.-Ing. Jürgen Hagedorn, Leiter für Prozessentwicklung bei Aumann. Alles in allem stecken in dem Buch daher sicherlich 70 Jahre Know-how.

Aumann und das wbk wollen mit dem Buch Wissenslücken in Sachen Wickeltechnik bei Firmen schließen: Das Buch ist beispielsweise gedacht für Ingenieure, die in der Auslegung induktiver Produkt- und Produktionstechnik, in der Entwicklung und im Umfeld der Produktionstechnik von Motoren tätig sind. Aber auch Angestellte in der Beschaffung, Logistik für induktive Produktionstechnik und nicht zuletzt Anlagenbediener von Wickelmaschinen sollen von dem in diesem Handbuch zusammengefassten Wissen profitieren. „Alle Leser mit und ohne Wickeltechnik-Know-how profitieren von dem Buch vor allem bei der Einführung von neuen Produkten. „Im Idealfall steigert sich die Produktqualität, während gleichzeitig die Entwicklungszeit für die meist sehr komplexen elektro-magnetischen Baugruppen sinkt. Außerdem ermöglicht der Inhalt des Buches die erfolgreiche Einführung des Industrialisierungsprozesses bei neuen Produkten.“, ergänzt Hagedorn.

Handbuch der Wickeltechnik für hocheffiziente Spulen und Motoren: Ein Beitrag zur Energieeffizienz  
Jürgen Hagedorn, Florian Sell-Le Blanc, Jürgen Fleischer  
Springer Vieweg, Juli 2016  
ISBN 978-3-662-49209-3



Das „Handbuch der Wickeltechnik für hocheffiziente Spulen und Motoren“ eroberte in kurzer Zeit den Amazon Bestseller-Rang 3 in seiner Sparte

**Ansprechpartner:**  
M.Sc. Janna Hofmann  
Telefon: +49 721/608-28285  
E-Mail: Janna.Hofmann@kit.edu

## Neue Produktionsverfahren für Leichtbauelektromotoren

Im Rahmen des vom BMWi geförderten Verbundprojekts ProLemo wurden Produktionstechniken für effiziente Leichtbauelektromotoren entwickelt. Der im Projekt entwickelte Motor ist eine Weiterentwicklung eines permanentmagneterragten Synchronmotors der Firma Wittenstein cyber motor GmbH aus Igersheim. Ausgehend von einem Referenzmotor mit ca. 75 kW Dauerleistung wurden die Produktionsprozesse für Stator, Rotor und Gehäuse/Kühlung analysiert und neue Ansätze realisiert.

Gegenüber dem klassischen Aufbau des Rotors aus gestapeltem Elektroblech wurde die Prozesskette stark vereinfacht. Anstelle der Prozessschritte Elektroblech Spalten, Stanzen, Blech Stapeln und Verbinden tritt nur ein einziger Spritzgussprozess zur Herstellung eines Rotorabschnitts. Ermöglicht wird dies durch die Verarbeitung eines mit weichmagnetischem Material gefüllten Kunststoffes, welcher auf einer Spritzgussmaschine verarbeitet werden kann. Neben der Verkürzung der Prozesskette ergeben sich durch das neue Verfahren große Vorteile hinsichtlich der Wirbelstromverluste im Motor.

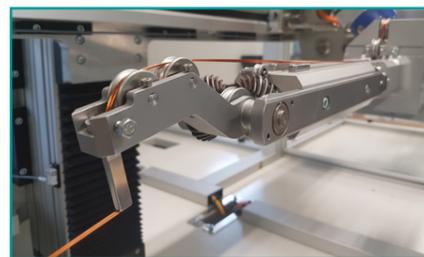
Das komplexe Wickelschema der Statorwicklung wurde bisher in einem aufwändigen manuellen Prozess von Hand hergestellt.



2 Komponentenspritzgusswerkzeug

Erstmals wurde die Wicklung im Projekt automatisiert durch eine Nadelwickelmaschine hergestellt. Die Automatisierung des Prozesses erlaubte es, den Stator insgesamt kompakter auszuführen. Durch den automatisierten Nadelwickelprozess kann der mechanische Füllgrad um bis zu 20 % gesteigert werden. Möglich wird dies durch den konstanten Drahtzug während des Bewickelns.

Eine aus CFK hergestellte Rotorwelle ersetzt die schwere Stahlwelle des Rotors und spart somit 40 % Gewicht gegenüber der Ursprungsausführung ein. Zur Herstellung der CFK-Welle wurden am Institut die Werkzeuge gefertigt und eine Anlage zum Schleudern der Leichtbauwelle aufgebaut. Außerdem kommt im Bereich des Gehäuses



Nadelträger der Nadelwickelmaschine

ein weiteres CFK-Bauteil zum Einsatz: ein CFK-Kühlmantel. Die Kühlung des Motors wird durch sehr einfach herstellbare und skalierbare Bauteile zwischen dem Stator und dem CFK-Kühlmantel hergestellt. Aufwändige Aluminiumdruckguss-Werkzeuge oder Fräsoperationen werden nicht mehr benötigt. Nach vier Jahren Projektlaufzeit endet ProLemo im Dezember 2016 Die aufgebaute Prozesskette zur Herstellung der Motoren ist im Produktionstechnischen Labor E-Antriebe (PTLEA) am Campus Nord untergebracht. Am 12. Dezember wurde das PTLEA eröffnet.

**Ansprechpartner:**  
M. Sc. Manuel Peter  
Telefon: +49 721/608-28311  
E-Mail: Manuel.Peter@kit.edu

## Demontagegerechte elektrische Kontaktierung von Lithium-Ionen Batterien

Im Elektrofahrzeug werden unter anderem aufgrund ihrer guten Energiedichte Lithium-Ionen Zellen eingesetzt. Zur Erreichung einer ausreichenden Ausgangsspannung, die zum Antrieb eines Elektrofahrzeugs benötigt wird, werden mehrere dieser Zellen zu einem Zellmodul verschaltet. Hieraus wird wiederum ein Batteriesystem erstellt, das dann in der Fahrzeugkarosserie verbaut wird. Die Verschaltung der Einzelzellen bedingt mehrere elektrische Kontaktierungsstellen, welche momentan durch nicht lösbare Schweißverbindungen realisiert werden. Falls das Batteriemodul des Elektrofahrzeugs aufgrund eines technischen Defekts repariert werden muss oder das Lebensdauerende erreicht ist, ist es wünschenswert, dass einzelne Zellen aus dem Batteriemodul demontiert werden können. So können einzelne Zellen getauscht und damit das Batteriemodul repariert werden bzw. das Modul aufbereitet oder recycelt werden. Grundvoraussetzung für die Demontage der Batteriemodule ist der Einsatz von wiederlösbaren elektrischen Verbindungen. Aus diesem Grund hat es sich das wbk zur Aufgabe gemacht, diese Verbindungen näher

zu untersuchen. Betrachtet werden neben elektrisch leitfähigen Klebstoffen auch Fließlochschrauben. Leitfähige Klebstoffe beinhalten elektrisch leitfähige Partikel, wie Silber oder Platin, die innerhalb des Klebstoffes ein elektrisch leitfähiges Netzwerk ausbilden. Dadurch kann eine elektrisch leitfähige Fügenaht zur Kontaktierung der Zellen erzeugt werden. Zur Bewertung der technischen Eignung für das Einsatzgebiet Batterie werden experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um beispielsweise das Auftragsverhalten und die notwendige Klebermenge zu bestimmen. Letzteres ist aus Gründen der Wirtschaftlichkeit elementar. Neben dem Auftragsverhalten werden auch die Übergangswiderstände sowie das Demontageverhalten durch Wärmezufuhr untersucht. Fließlochschrauben, die aufgrund von Wärmeentwicklung (siehe Abbildung) während des Einschraubvorgangs eine stoffschlüssige Verbindung mit dem zu verschraubenden Material ausbilden, werden ebenfalls hinsichtlich ihres Montageaufwands bewertet. Zudem wird ein Versuchsstand aufgebaut, mit dem unter anderem der Übergangswiderstand dieser Schraubverbindung

untersucht wird. Die Demontage soll teilautomatisiert an einem Versuchsstand erprobt werden. Nachdem unterschiedliche elektrisch leitfähige Kleber als auch Fließlochschrauben verschiedener Hersteller untersucht worden sind, werden die beiden Kontaktierungsverfahren mit dem aktuellen Verbindungsverfahren „Schweißen“ verglichen und hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz im Batteriemodul für das Elektroauto bewertet.



Schematische Darstellung einer Fließlochschraube, in Gelb ist die stoffschlüssige Verbindung gekennzeichnet.

**Ansprechpartner:**  
M. Sc. Ramona Singer  
Telefon: +49 721/608-28314  
E-Mail: Ramona.Singer@kit.edu

## wbk-Demonstrator zur Einzelblattstapelbildung von Batterien auf der Automatica

Auf der diesjährigen „AUTOMATICA – Fachmesse für Automation und Mechatronik“ stellte das wbk Institut für Produktionstechnik seinen Bereich „Produktionstechnik für die Elektromobilität“ auf dem Gemeinschaftsstand der MHI – Gesellschaft für Montage, Handhabung und Industrierobotik e.V. vom 21.06. bis 24.06 vor. Im Fokus des Messeauftritts stand die Vorstellung eines Demonstrators zur „Funktionsintegrierten Stapelbildung für die Herstellung von



wbk- Demonstrator Einzelblattstapelbildung auf dem MHI-Messestand

Lithium-Ionen-Zellen“. Unter dem Motto Ideen gemeinsam umsetzen zeigte die MHI auf der AUTOMATICA neue Anwendungsge-

bote für Großroboter, die Robotersteuerung mit Kinect und Smartphone. Einer der Gründe für die hohen Kosten von großformatigen Lithium-Ionen-Zellen liegt in den noch unausgereiften Fertigungsprozessen für deren Herstellung und der damit verknüpften, hohen Komplexität der eingesetzten Produktionstechnik. Besonders die sogenannte Zellstapelbildung gilt in diesem Zusammenhang als eine große Herausforderung. Derzeit werden bei der Einzelblattstapelbildung, der abwechselnden Anordnung von Separator, Anode, Separator, Kathode, die kontinuierlichen Bahnmaterialien konfektioniert und die erzeugten Einzelblätter zunächst in Magazine abgelegt. Aus diesen werden sie in einem weiteren Prozessschritt mittels Pick&Place-Prozessen übereinandergestapelt. Diese Vorgehensweise benötigt hohe Investitionen in Sensorik und Kinematik zur Positionserkennung und genauen Positionierung der Einzelblätter, sodass oftmals keine wirtschaftliche Produktion möglich ist. Deshalb verfolgt das wbk die Entwicklung einer Maschine zur

Herstellung von Einzelblattstapeln einer Lithium-Ionen-Zelle mit niedrigen Investitions- und Betriebskosten. Den Kern des Entwicklungsansatzes stellen funktionsintegrierte Stanzmodule dar, die innerhalb eines einzigen Prozessschritts das Ausschneiden der Blattsegmente mit höchster Fertigungsqualität ermöglichen und gleichzeitig deren Handhabung und hochgenaue Ablage durch den Einsatz von integrierten Handhabungssystemen auf der Basis von Vakuumgreifern erlauben. Diese greifen das Einzelblatt im Moment des Zuschnitts und halten es in seiner definierten Position und Orientierung fest. Anschließend erfolgt die präzise Ablage durch das nach unten geöffnete Stanzmodul auf einem Maschinenschlitten, welcher die drei Module (Anode, Separator und Kathode) miteinander verknüpft.

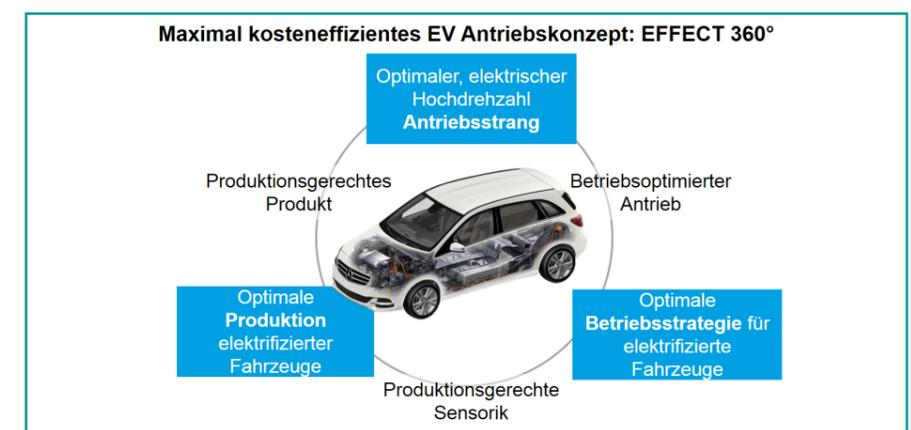
**Ansprechpartner:**  
Dipl.-Ing. Sebastian Haag  
Telefon: +49 721/608-28286  
E-Mail: Sebastian.Haag@kit.edu

## Wirtschaftliche Industrialisierung elektrischer Antriebstechnik

Das vom BMBF geförderte Projekt „EFFECT 360°“ (Energieeffiziente und flexibel industriell herstellbare Elektrofahrzeugantriebe) ist Teil des Spitzenclusters „Elektromobilität Süd-West“, der mit rund 80 Akteuren aus Industrie und Wissenschaft als einer der bedeutendsten regionalen Verbünde auf dem Gebiet der Elektromobilität gilt.

Um der gegenwärtigen Diskussion um elektrifiziertes Fahren Rechnung zu tragen, haben alle namhaften Automobilunternehmen bereits begonnen, ihre Modellpaletten um Hybridfahrzeuge zu erweitern. Parallel hierzu schreitet auch die Weiterentwicklung von rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen auf Basis von Batterien oder Brennstoffzellen voran. Neben einer reinen Kostensenkung des Fahrzeugs liegt der Fokus hier vor allem auf einer Erhöhung der Energie- und Leistungsdichten im Antriebsstrang, um die Konkurrenzfähigkeit des elektrifizierten Antriebs im Vergleich zum Verbrennungsmotor zu verbessern.

Um Potentiale unter anderem hinsichtlich des Wirkungsgrads, der Kosten und des Bauraums zu realisieren, wird im Projekt ein Hochdrehzahlelektromotor mit speziell dafür ausgelegtem Getriebe entwickelt. Zur möglichst optimalen Nutzung des elektrischen Antriebsstrangs, wird eine effizienzorientierte Betriebsstrategie entwickelt.



Durch die Verbindung mit optimal auf den Antriebsstrang abgestimmter Sensorik wird ein höchsteffizienter Fahrzeugbetrieb erreicht, der insbesondere im städtischen Verkehr sein Potenzial aufzeigt. Um die wirtschaftliche industrielle Umsetzung von Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang zu gewährleisten, wird eine integrative Bewertung von Produkt-, Betriebs- und Produktionskonzept durchgeführt. Im Bereich der Produktion wird vor allem die Fahrzeugendmontage fokussiert. Für eine wirtschaftliche Endmontage muss der Modell-Mix verschiedener Fahrzeugarchitekturen und Antriebskonzepte auf einer Montagelinie realisiert werden können.

Eine zentrale Anforderung ist daher eine stark ausgeprägte Wandlungsfähigkeit des Endmontagesystems. Auf dieser Grundlage soll ein geeignetes Montagekonzept erarbeitet werden, um eine möglichst hohe Stückzahlflexibilität unter Berücksichtigung der Unsicherheit des Modell-Mixes zu erreichen. Hierdurch wird eine kosteneffiziente Industrialisierung unterschiedlicher Antriebskonzepte und Fahrzeugvarianten bei gleichzeitig hohen Stückzahlen ermöglicht.

**Ansprechpartner:**  
M.Sc. Johannes Fisel  
Telefon: +49 721/608-44153  
E-Mail: Johannes.Fisel@kit.edu