

# Serienflexible Technologien für elektrische Antriebe von Fahrzeugen



Eine gemeinsame Initiative von

## Impressum

### Bestellung

Forschungskuratorium Maschinenbau e.V. (FKM) im VDMA  
Lyoner Straße 18  
60528 Frankfurt am Main  
info@effizienzfabrik.de

### Redaktion

Alexander Raßmann (FKM), Frankfurt am Main  
Dr. Claudia Weise (rubicondo), Eppstein

### Gestaltung

Alexandra Webers (rubicondo), Eppstein

### Druck

Boschen Offsetdruck GmbH, Frankfurt am Main

### Bildnachweis

Titelseite und Seite 7: fotolia  
Seiten 4 und 7: VDMA  
Seite 5: BMBF  
Seiten 8 bis 21: Verbundprojekte

# Inhaltsverzeichnis

4 / 5	<b>Grußworte</b>
6 / 7	<b>Effizienzfabrik – Innovationsplattform für die Produktion</b>
8 / 9	<b>AnStrom:</b> Antriebsstrangproduktion für zukünftige Mobilität – integrierte Prozesskette der Blechpaketherstellung
10 / 11	<b>ESKAM:</b> Skalierbare Module aus Antrieb und Achse für die Elektromobilität
12 / 13	<b>GroAx:</b> Großserientaugliches Herstellverfahren für neuartige elektrische Axialflussmotoren
14 / 15	<b>HeP-E:</b> Hochflexible Produktionssysteme für effizienzgesteigerte E-Traktionsantriebe
16 / 17	<b>PriMa3D:</b> Siebgedruckte Komponenten für elektrische Antriebe
18 / 19	<b>ProStaR:</b> Produktionstechnologie für die serienflexible Herstellung von Stator- und Rotorpaketen
20 / 21	<b>SeRiel:</b> Serienfähige, hocheffiziente Radnabenmotoren mit integrierter Leistungselektronik
22 / 23	<b>Unsere Projektpartner</b>

**Hartmut Rauen**  
Stellvertretender Hauptgeschäftsführer  
des Verbands Deutscher Maschinen- und  
Anlagenbau e.V. VDMA



Hinter dem weltweiten Erfolg der Produkte und Technologien des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus steht vor allem eins – eine international einzigartige Innovationskultur. Sie zeichnet sich durch eine enge Zusammenarbeit von Wissenschaft und Industrie aus. Verbundprojekte oder die industrielle Gemeinschaftsforschung bieten seit vielen Jahrzehnten den institutionellen Rahmen dafür. Und alle profitieren davon: die Industrie durch technologische Innovationen, die ihre Wettbewerbsfähigkeit verbessern; die Wissenschaft durch neue Impulse für ihre Forschungsarbeit; junge Wissenschaftler durch eine praxisorientierten Ausbildung und sehr gute Perspektiven für den Einstieg in die Industrie.

Zudem treiben die technischen Lösungen die gesellschaftliche Entwicklung voran. Die Elektromobilität ist ein aktuelles Beispiel dafür. Nur mit effizienten Produktionstechnologien gelingt es uns, die Herstellkosten für Elektromotoren zu senken und damit eine der wichtigsten Hürden bei der Realisierung elektrifizierter Welten zu beseitigen. Unter dem Dach der Effizienzfabrik haben rund 50 Partner aus Industrie und Wissenschaft ihren Teil dazu beigetragen. Die Broschüre zieht eine beeindruckende Bilanz von dreieinhalb Jahren Forschungsarbeit für elektrische Antriebstechnologien.

Gemeinsam mit dem Bundesministerium für Bildung und Forschung haben wir 2009 die Innovationsplattform Effizienzfabrik ins Leben gerufen. Mit Transfermaßnahmen wie dieser ist es erstmals gelungen, die Verbundprojektpartner untereinander sowie mit potenziellen Anwendern außerhalb der Projekte intensiver zu vernetzen. Fördergelder können auf diese Weise eine noch größere Wirkung vor allem in Bezug auf die Innovationskraft kleiner und mittelständischer Unternehmen entfalten.

**MinDir Prof. Dr. Wolf-Dieter Lukas**  
Abteilungsleiter Schlüsseltechnologien –  
Forschung für Innovationen  
im Bundesministerium  
für Bildung und Forschung



Die Mobilität der Zukunft ist elektrisch! Zukünftige Fahrzeuge mit elektrischen Antrieben verringern die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen und tragen dazu bei, die CO<sub>2</sub>- und Schadstoffemissionen zu senken. Jedoch ist der Anteil der Elektrofahrzeuge am Gesamtfahrzeugbestand zurzeit noch gering. Elektroautos müssen attraktiver werden, Preis, Reichweite und Komfort sind die entscheidenden Parameter. Dies erreicht man am besten durch Investitionen in Forschung für neue Batteriekonzepte, neue Produktionsverfahren und einen ganzheitlichen Innovationsansatz für die Mobilität der Zukunft, die zunehmend elektrisch und autonom sein wird.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt unter dem Dach der Hightech-Strategie der Bundesregierung im Programm „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“ die Entwicklung neuer Produktionstechnologien für die Elektromobilität. Konkrete Beispiele stellen die in dieser Broschüre porträtierten sieben Verbundprojekte dar. Das BMBF hat sie mit über 20 Millionen Euro im Rahmen der Bekanntmachung „Serienflexible Technologien für elektrische Antriebe von Fahrzeugen“ gefördert. In den Verbundprojekten haben Partner aus Industrie und Wissenschaft eng zusammengearbeitet, sodass Forschung und Anwendung Hand in Hand gehen konnten. Die Transferplattform Effizienzfabrik, eine gemeinsame Initiative des BMBF und des VDMA, leistet dabei einen wichtigen Beitrag, die neuen Technologien bei den produzierenden Unternehmen bekannt zu machen und dort umzusetzen.

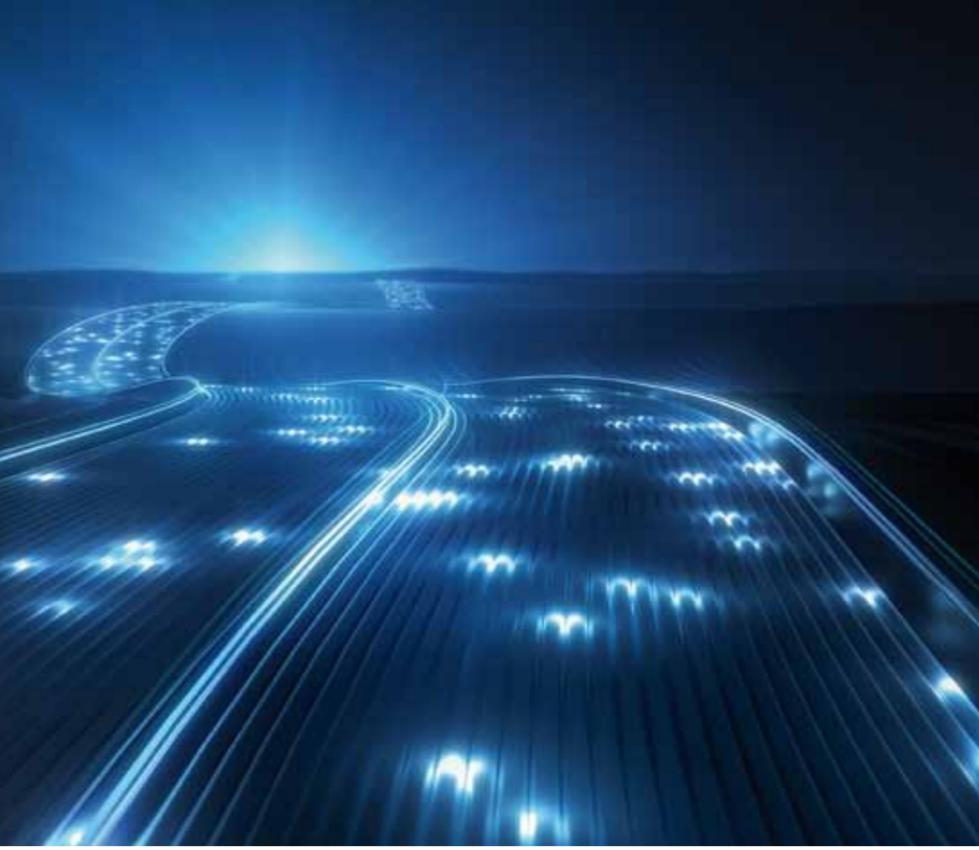
Die erzielten Projektergebnisse ermöglichen einen weiteren wichtigen Schritt in Richtung Elektromobilität „Made in Germany“. Doch wir sind noch nicht am Ziel – bleiben Sie also dran!

Ich wünsche allen Mitstreitern weiterhin gutes Gelingen!

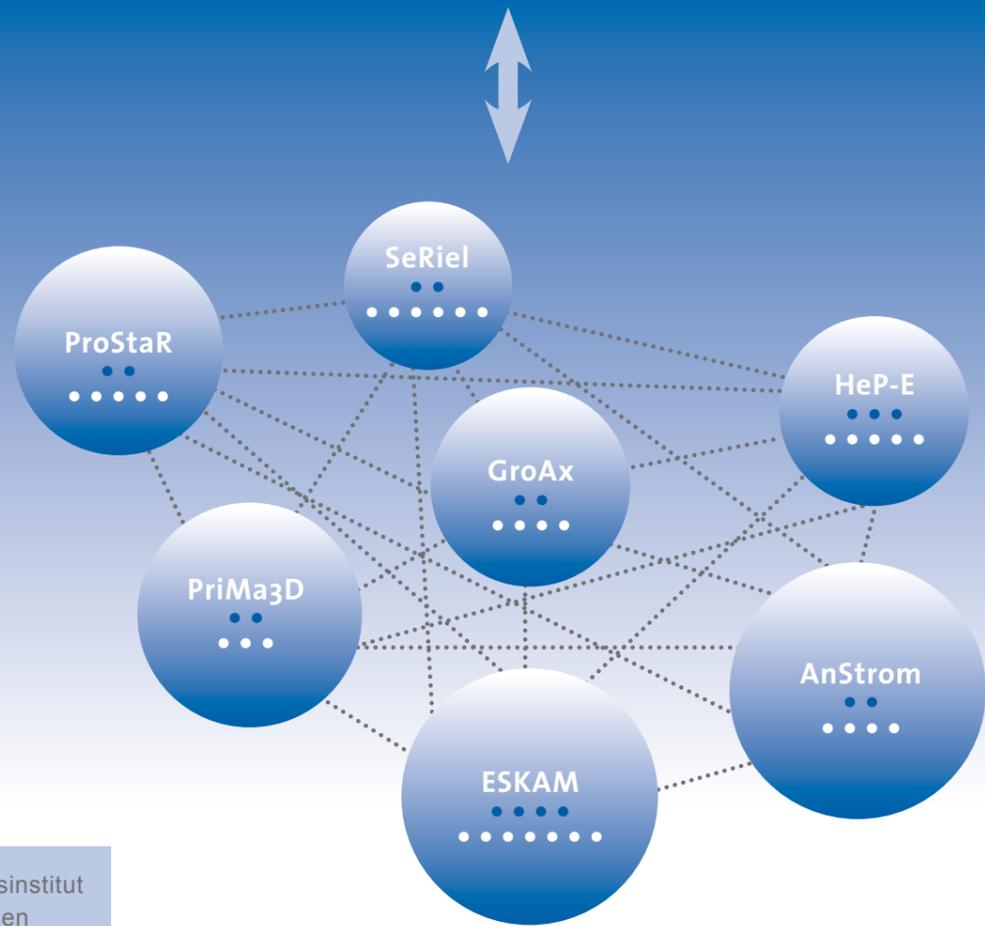
# Effizienzfabrik – Innovationsplattform für die Produktion

**Ansprechpartner:**  
**Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. VDMA**  
 Alexander Raßmann  
 Projektleiter der Effizienzfabrik  
 Lyoner Straße 18  
 60528 Frankfurt am Main  
 Telefon: 069 6603-1820  
 E-Mail: alexander.rassmann@vdma.org

**Projekträger Karlsruhe**  
**Karlsruher Institut für Technologie (KIT)**  
 Claudius Noll  
 Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
 76344 Eggenstein-Leopoldshafen  
 Telefon: 0721 608-24953  
 E-Mail: claudius.noll@kit.edu



## Fachöffentlichkeit und Anwender



## Das Verbundprojekte-Netzwerk

Die Effizienzfabrik ist eine gemeinsame Initiative des VDMA und des BMBF. Sie informiert über neueste Ergebnisse aus Forschungsprojekten und bietet Produktionstechnikexperten eine Plattform für den fachlichen und persönlichen Austausch im Bereich Ressourceneffizienz und Elektromobilität.

Das Ziel der Produktionsforschung für Elektromobilität ist, effiziente und qualitativ hochwertige Elektromotoren zu günstigen Kosten auch in größeren Stückzahlen bei gleichzeitiger Variantenflexibilität zu fertigen.

Dazu leisten die sieben Verbundprojekte, die mit 20 Millionen Euro im Rahmen der BMBF-Bekanntmachung „Serienflexible Technologien für elektrische Antriebe von Fahrzeugen“ gefördert wurden, einen beachtlichen Beitrag. Unter dem Dach der Effizienzfabrik haben 49 Partnern aus Industrie und Wissenschaft dreieinhalb Jahre lang an der Entwicklung dieser Technologien geforscht.

## Vernetzung und Forschungstransfer

Die Effizienzfabrik sorgt mit ihren Aktivitäten insbesondere im Bereich Öffentlichkeitsarbeit dafür, dass potenzielle Anwender der innovativen Technologien schneller die Projekte und Lösungen finden, die ihnen bei ihren Fragestellungen weiterhelfen. Zudem ergeben sich für die Verbundprojekte vielfältige Möglichkeiten, sich intensiv miteinander zu vernetzen. Auch über die Antriebsprojekte hinaus berichtet die Effizienzfabrik über aktuelle Trends und Themen rund um die Produktionsforschung für Elektromobilität und veröffentlicht sie auf ihrer Website und in den regelmäßig erscheinenden Newsletters.

Transfermaßnahmen wie die Effizienzfabrik tragen damit effektiv dazu bei, dass öffentliche Fördergelder eine noch größere Wirkung entfalten können.

## Produktionsforschung für Elektromobilität geht weiter

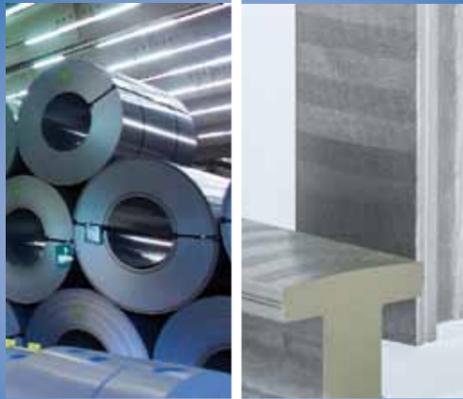
Die Ergebnisse der Projekte stellen bereits wichtige Lösungen dar, um Elektro-

mobilität in Deutschland produzierbar zu machen. Sie bieten zudem auch wichtige Impulse für zukünftige Projekte, denn viele technische Herausforderungen bleiben bestehen. Dazu zählen:

- die Optimierung des Gesamtprozesses der Elektromotorenproduktion
- die Wickeltechnologie als einzelner, wichtiger Prozessschritt
- die Qualitätssicherung in der Produktion mit hohen Stückzahlen
- die Bauweise der Elektromotoren durch die Integration von Komponenten wie Leistungselektronik, E-Maschine und Getriebe kompakter zu gestalten

Einen weiteren wichtigen Aspekt stellen Untersuchungen zum Einfluss und zu den Möglichkeiten dar, die sich durch eine digitalisierte Produktion bzw. Industrie 4.0 ergeben. Der Austausch entlang der gesamten Wertschöpfungskette und über verschiedene Branchen hinweg ist bei allen Forschungsaktivitäten ein erfolgsentscheidender Faktor. Plattformen wie die Effizienzfabrik bieten optimale Möglichkeiten, um diesen Austausch nachhaltig zu institutionalisieren.

# [Glückliche Fügung]\*



\*Antriebsstrangproduktion für zukünftige Mobilität – integrierte Prozesskette der Blechpaketherstellung

## Koordinator

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

wbk Institut für Produktionstechnik

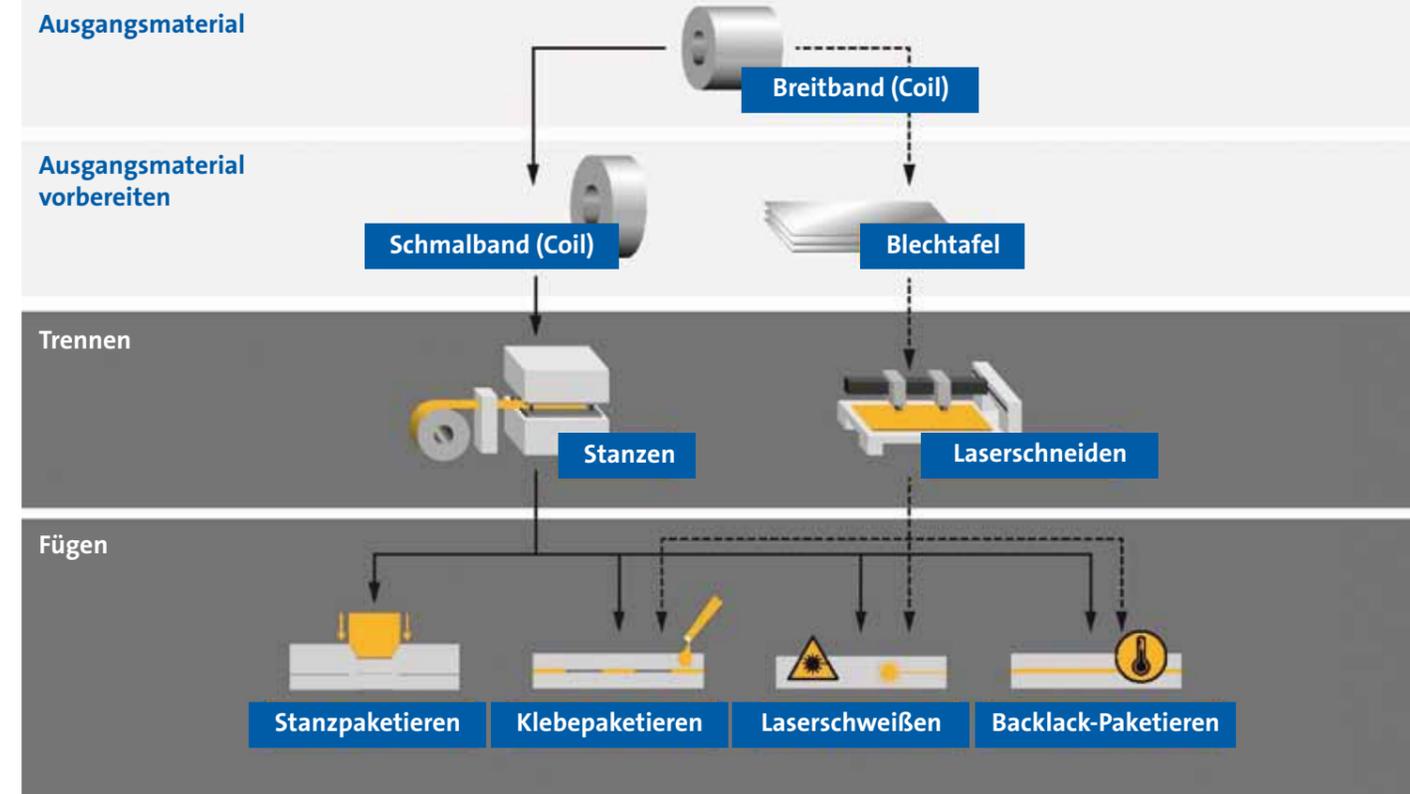
Prof. Dr. Gisela Lanza

Kaiserstraße 12

76131 Karlsruhe

Telefon: 0721 608-44017

E-Mail: gisela.lanza@kit.edu



# AnStrom

## Highlights

- systematische Untersuchung alternativer Prozessketten und unterschiedlicher Werkstoffe zur Herstellung von Blechpaketen für den automobilen Antriebsstrang
- durchgängige Betrachtung und Optimierung der alternativen Prozessketten durch prototypisch getestete Qualitätskriterien, Mess- und Prüftechnik, detaillierte Analysen der Kostentreiber sowie eine Analyse der fertigungsbedingten Eisenverluste
- Durchführung einer Umweltqualifizierung zur Simulation der extremen Umweltbedingungen getriebeintegrierter Traktionsantriebe
- Auswahlhilfe für konkurrierende Technologien zur Herstellung von Blechpaketen für Hybrid- und Traktionsmotoren in Bezug auf Qualität, Kosten und Ressourceneinsatz

## Projektpartner mit Aufgaben

- **Daimler AG**  
Anforderungsdefinition (Lastenheft), Umweltqualifizierung
- **Kienle + Spiess GmbH**  
Stumpfstanzuntersuchungen, Klebepaketierung, Herstellung der Probekörper
- **KIT wbk**  
Kosten- und Ressourcenbewertung, Planung serienflexibler Produktionslinien, geometrische Messungen
- **KIT Hybridelektrische Antriebe HEV**  
Entwicklung eines Messplatzes für Einzelzahn-Blechpakete, elektromagnetische Messungen
- **Robert Bosch GmbH**  
Prozessentwicklung Laserschweißen, Betriebsfestigkeitskonzept laser-geschweißter Pakete
- **TRUMPF Sachsen GmbH**  
Laserschneiden von Elektrolech; Maschinenkonzept für kleine Blechgeometrien

## Motivation

Eine Hauptkomponente des Elektromotors bilden die aus einzelnen Blechen zusammengesetzten Elektrolechpakete. Die Produktionsschritte bei der Herstellung dieser Blechpakete können zu einer elektrischen Verbindung der voneinander isolierten Elektroleche und damit zu zusätzlichen Wirbelstromverlusten führen, die im hohen Drehzahlbereich des Elektromotors den dominierenden Teil der Eisenverluste ausmachen.

Unterschiede in der Qualität und Dicke der Bleche für diese Blechpakete haben jedoch nicht nur Auswirkungen auf die Eisenverluste, sondern auch darauf, wie diese Bleche in den jeweiligen Fertigungsverfahren verarbeitet werden können. Für eine optimale Auslegung der gesamten Produktionskette ist es dringend erforderlich, eine Gesamtbewertung der Prozessalternativen im Hinblick auf minimale Eisenverluste unter Berücksichtigung der Produktionskosten vorzunehmen.

## Herangehensweise

Ziel der Forschungsarbeiten ist es, zu ermitteln, in welchem Ausmaß die Eigenschaften der Elektrolechpakete von den durch die Fertigungsverfahren und die Designvorgaben beeinflussbaren Parametern abhängen, und dies quantitativ bewertbar zu machen. Im Fokus der Untersuchungen steht der systematische Vergleich Stanzen gegen Laserschneiden von Elektrolech in Kombination mit den Verbindungsverfahren Stanzpaketieren, Klebepaketieren, Backlack-Paketieren und Laserschweißen.

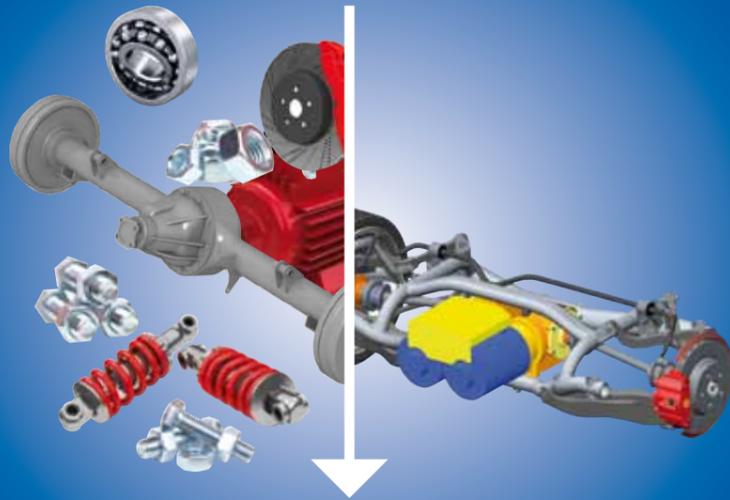
Ein umfangreicher Versuchsplan bildet die folgenden Untersuchungsumfänge ab: Trenn- und Fügeinflüsse auf die spezifischen Eisenverluste, geometrische Maßhaltigkeit (Form- und Lagetoleranzen), mechanische Festigkeitsuntersuchungen sowie die Kosten-/Ressourcenbewertung unterschiedlicher Prozessketten.

## Ergebnisse

Entlang der Prozesskette wurden alternative Fertigungsverfahren im Wechselspiel mit unterschiedlichen Werkstoffen erprobt und ertüchtigt. Die Forschungsergebnisse von AnStrom zeigen einen systematischen Vergleich der konkurrierenden Verfahren zur Herstellung von Blechpaketen mit dem Einsatz in automobilen Traktionsantrieben. Neben zahlreichen Probekörpern für spezifische Einzeluntersuchungen wurde auch eine Realgeometrie für einen Einzelzahn definiert, um eine realitätsnahe Bewertung zu ermöglichen.

Es konnte gezeigt werden, dass sich alle Verfahrensalternativen grundsätzlich für die Produktion von Blechpaketen eignen. Die Auswahl muss jedoch gemäß den technischen Anforderungen sowie den Kostenzielen der individuellen Anwendung getroffen werden.

# [Auf Achse]\*



\*Skalierbare Module aus Antrieb und Achse für die Elektromobilität

## ESKAM

### Highlights

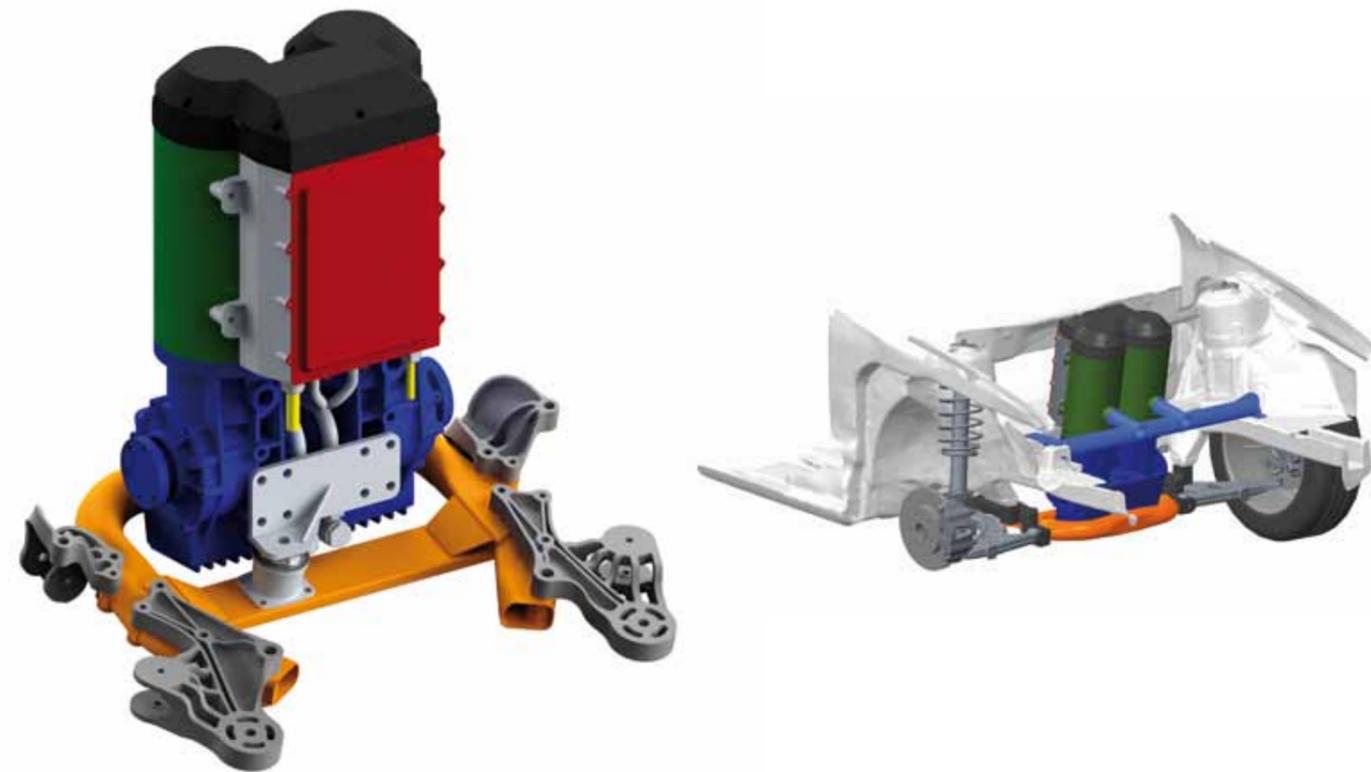
- Entwicklung, Bau und Erprobung eines elektrischen Antriebs, hochintegriert mit Motor, Getriebe und Elektronik, aufgebaut auf einem innovativen Subframe
- Minimierung von Gewicht, Bauraum und Kosten
- hohe Leistungsdichte, hoher Wirkungsgrad
- maximale Skalierbarkeit von Kleinfahrzeug bis Bus und Truck
- parallele Entwicklung von Technologien für die Großserie

### Koordinator

**Groschopp AG** • Wolfgang Pflug  
Greefsallee 49 · 41747 Viersen  
Telefon: 02162 374-102  
E-Mail: pflug@groschopp.de

### Projektpartner mit Aufgaben

- **Ebm Maschinenbau GmbH**  
Betriebsmittel und Werkzeugbau, Prototyp-Pressen
- **Fraunhofer IWU Chemnitz**  
Leichtbau-, Hohlwellen- und Verzahnungstechnologien, elektromagnetische Umformung von Hybridteilen
- **Groschopp AG**  
Motorkonzept, Wicklungsstrategie, Entwicklung des Synchronreluktanzmotors
- **Hirschvogel Umformtechnik GmbH**  
Umformtechnologien, Prozessauslegung, Herstellung von Getriebekomponenten
- **Hochschule Aalen**  
Konstruktion der Achsen, Integration des Antriebsmoduls ins Fahrzeug, Aufbau des Achs- und Fahrzeugdemonstrators
- **Hochschule Düsseldorf**  
Numerisches, analytisches und thermisches Modell, Läuferkonstruktion, Regelungskonzept
- **REFU Elektronik GmbH**  
Schaltungsentwurf, Regelungs- und Steuerungskonzept, Kühlung
- **Salzgitter Hydroforming GmbH**  
Herstellung von Subframe und Achsträger, Konstruktion des Hydroforming-Werkzeugs
- **Uni Stuttgart/ILEA**  
Schaltungs-Topologie, Lebensdaueruntersuchung, Fahrzyklus-Design
- **Vogel Antriebstechnik GmbH**  
Getriebekomponenten, Kühl-/Schmierkonzept, Bau und Prüfung des Gesamtgetriebes
- **Wilhelm Funke GmbH**  
Leichtbau-Gehäuse-Modul, Gießtechnologie



### Motivation

Elektromotoren gehört die Zukunft. Dennoch sind die Fortschritte in Deutschland noch zu gering. Viele Entwicklungen bleiben in der Prototypphase hängen oder sind extrem teuer. Der Grund: Es fehlt an geeigneten Technologien für eine Serienfertigung. Auch bezüglich Wirkungsgrad und Leistungsdichte ist noch nicht das Optimum erreicht.

Reserven gibt es auch bezüglich Kompaktheit und Gewicht. Meist bezieht sich die Entwicklung auf ein ganz spezifisches Fahrzeug, die Übertragbarkeit des Konzepts auf andere Typen ist nicht gewährleistet, es muss wieder neu entwickelt werden. Viele Lösungen gibt es bereits für Pkw. Insbesondere bei Nutzfahrzeugen, speziell auch bei Kommunal- oder Agrarfahrzeugen, gibt es jedoch kaum brauchbare Lösungen. Zur Eliminierung möglichst all dieser Defizite wurde das Projekt ESKAM initiiert.

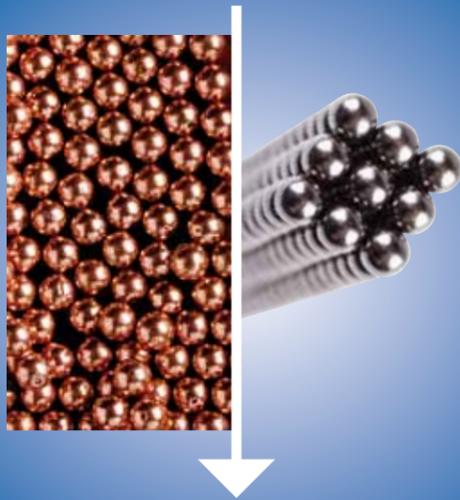
### Herangehensweise

Der zu entwickelnde elektrische Antrieb sollte sehr kompakt und leicht gestaltet sein. Das Herzstück des Antriebsmoduls umfasst dabei zwei schnell drehende elektrische Maschinen mit je einem mechanischen Getriebe und gemeinsamer angeflanschter Leistungselektronik. Die kurze Verbindung zu den Rädern übernimmt ein innovativer Subframe. Wesentliche Zielstellung des Gesamtkonzepts war eine maximale Skalierbarkeit der Komponenten. Dies gilt einerseits für die bauraumabhängigen Einbaubedingungen (Vorder- und Hinterachse – bei weitgehender Freiheit bezüglich der Wahl der Winkellage), andererseits jedoch auch für die Einstellung der Leistungsparameter, die für Kleinfahrzeuge oder auch Busse und Trucks benötigt werden. Die Auslegung der Komponenten basiert auf realitätsnahen Fahrzyklen, wobei ein geringer Kosten- und Materialaufwand sowie eine hohe Energieeffizienz angestrebt wurden. Die Technologien für die einzelnen Bauteile von Motor und Getriebe sollten für den Leichtbau geeignet und absolut serientauglich sein.

### Ergebnisse

Zur Projektdokumentation dienen ein Achs- und ein Fahrzeugdemonstrator. Die fremd erregten Synchronmaschinen zeichnen sich durch eine hohe Leistungsdichte aus und können energie- und wirkungsgradoptimal betrieben werden. Als Motorleistung wurden 2 x 20 kW im Dauerbetrieb mit einer maximalen Drehzahl von 20.000/min konzipiert und erzielt. Die erstellten Demonstratoren, die besonders geeignet sind für Kommunalfahrzeuge, wurden erfolgreich getestet und sind konzeptionell bezüglich der Parameter absolut skalierbar auf andere Fahrzeugvarianten, bis hin zu Bussen und Trucks. Zwei gleichwertige Regler steuern die E-Maschinen unabhängig, sodass auf ein Differenzial verzichtet werden kann und das Fahrzeug auch mit nur einer Antriebsseite manövrierfähig bleibt. Durch neuartige Hohlwellen- und Verzahnungstechnologien, die auch für eine Großserie geeignet sind, lassen sich bis zu 30 % Einsatzmaterial einsparen, das Bauteilgewicht reduziert sich um bis zu 25 %, die Herstellkosten sind um bis zu 15 % geringer.

# [Alles im Fluss]\*



\*Großserientaugliches Herstellverfahren für neuartige elektrische Axialflussmotoren

## GroAx

### Highlights

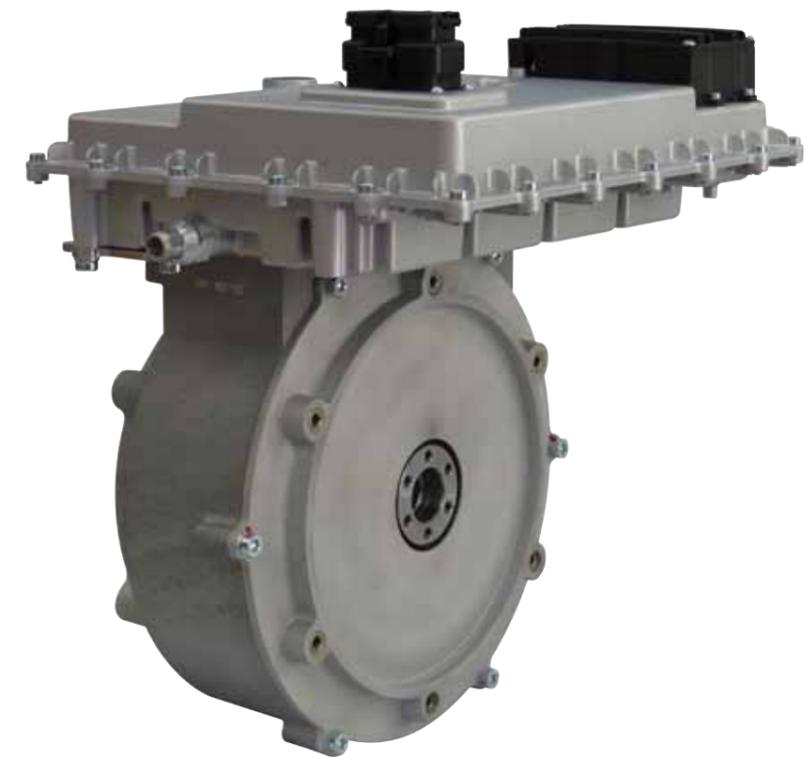
Entwicklung eines neuartigen elektrischen Antriebssystems, das:

- aus einem 3-phasigen permanenterregten Elektromotor auf Basis einer Transversalflussmaschine besteht
- eine integrierte Leistungselektronik aufweist
- an verschiedenen Positionen bei Hybridfahrzeugen verwendet werden kann
- extrem einfach und sehr kompakt aufgebaut ist
- auf 48-V- und Hochvolt-Anwendungen anpassbar ist
- durch Skalierung von Länge und Durchmesser auf andere Leistungsklassen übertragen werden kann

### Koordinator

#### Compact Dynamics GmbH

Oliver Schwab  
Moosstraße 9  
82319 Starnberg  
Telefon: 08151 9043-74  
E-Mail:  
oliver.schwab@compact-dynamics.de



### Projektpartner mit Aufgaben

- **CirComp GmbH**  
Herstellung eines Rotors im 3D-Nasswickelverfahren
- **Compact Dynamics GmbH**  
Herstellung einer Tangentialwicklung, Statorträger mit integriertem Kühler, Produktionsplanung
- **Hochschule Landshut**  
Entwicklung einer sensorlosen Motorregelung
- **Institut für Verbundwerkstoffe GmbH**  
Auslegung und Entwicklung des 3D-Nasswickelverfahrens für die Rotorherstellung
- **MS Schramberg GmbH & Co. KG**  
Herstellung eines Magnettrings als Komplettring
- **TU Chemnitz**  
Entwicklung duroplastischer Statorverguss/Statorumspritzung

### Motivation

Mit dem neuen Fahrzyklus „Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicle Test Procedure“ (WLTP) werden die Anforderungen an Hybridkomponenten deutlich steigen. Es sind kleine, leichte und einfach herzustellende Elektromotoren mit einer Leistung von deutlich mehr als 15 kW gefragt, um zukünftig die Flottenziele hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu erreichen.

Die Transversalflussmotoren der DYNAX®-Familie bieten für die verschiedenen Motorentopologien eine sehr gute Basis für zukünftige Entwicklungen. Sie können sowohl in der Spannungsklasse < 60 V als auch im Bereich der Hochspannung eingesetzt werden. Das geringe Gewicht, die kleine Bauform und die hohe Leistungsdichte ermöglichen den Einsatz in einer Vielzahl von Anwendungen.

Eine einfache Anpassung von Durchmesser und aktiver Länge gestattet zudem auch den Einstieg in andere, höhere Leistungsklassen. Die Fertigung der Motoren erfolgt aufgrund der derzeit noch geringen Stückzahlen überwiegend manuell und ist daher entsprechend teuer.

### Herangehensweise

Um die Grundlage für eine großserientaugliche Fertigung zu schaffen, wurden die kostentreibenden Schlüsselkomponenten Rotor, Magnete, Stator und Kühler überarbeitet, um die Anforderungen der Industrialisierbarkeit zu erfüllen.

Dazu zählen die Entwicklung eines Prozesses zur vereinfachten Herstellung der Tangentialwicklung, die Herstellung der Rotorglocke im 3D-Nasswickelverfahren, die Herstellung der Magnetringe in Form eines Komplettrings aus anisotropem, kunststoffgebundenem Magnetpulver, die Umsetzung einer sensorlosen Motorregelung sowie eine optimierte Statorisolation und -kühlung.

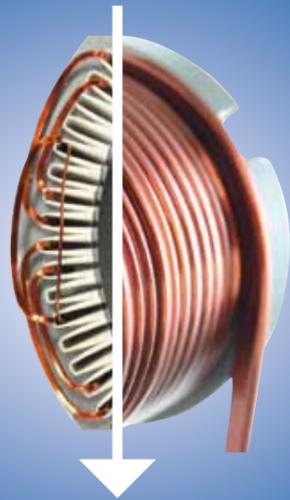
Bei der Entwicklung wurde auf bewährte Technik und neue Erkenntnisse aus der Wissenschaft Wert gelegt. Mithilfe von Simulationen gelang es beispielsweise, die Auswirkungen der axialen Krafteinleitung auf die Adhäsion der Wickellagen zu überprüfen.

### Ergebnisse

Eine Vielzahl von signifikanten Prozessverbesserungen schafft wichtige Grundlagen für die großserientaugliche Fertigung. Dazu zählt die deutlich vereinfachte Herstellung des Stators. Sie gelingt durch die Optimierung der Herstellung des Statorträgers und des Verbindungsprozesses von Statorträger und -ringen. Zukünftig ist es zudem auch möglich, zwei Rotoren in einem Fertigungsprozess zu wickeln und zu härten. Darüber hinaus konnte die sensorlose Motorregelung erfolgreich über den kompletten Betriebsbereich des DYNAX®-Antriebs adaptiert werden.

Diese Ergebnisse bilden die Grundlage für wissenschaftliche Folgeprojekte. Die Demonstration einer geschlossenen Entwicklungskette bis zum fertigen Demonstrator bietet hierbei auch hervorragende Möglichkeiten zur Erschließung neuer Anwendungen.

# [Gut gewickelt]\*



\*Hochflexible Produktionssysteme für effizienzgesteigerte E-Traktionsantriebe

## HeP-E

### Highlights

- Entwicklung und Produktion kompakter, leichter, effizienter und leistungsstarker E-Maschinen
- wissenschaftliche Durchdringung der Wechselwirkung von Produktions-/Prüfmethodik und Produkteigenschaft
- Entwicklung flexibler Produktionsverfahren zur Realisierung Automotivtauglicher E-Traktionsmaschinen
- Steigerung des Automatisierungsgrads der Fertigungsprozesse zur Verbesserung von Prozesssicherheit, Produktqualität sowie Wettbewerbsfähigkeit der Produktion am Standort Deutschland

### Koordinator

#### BMW AG

Dr. Florian Risch  
80788 München  
Telefon: 089 382-15678  
E-Mail: florian.risch@bmw.de

### Projektpartner mit Aufgaben

#### - BMW AG

Innovative Fertigungsverfahren und Aufbau leistungsgesteigerter E-Maschinen

#### - Essex Germany GmbH

Flexible und hochfeste elektrische Isolierung von Wickeldrähten

#### - Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS)

Roboterbasierte Wickelverfahren für Stator in E-Traktionsantrieben

#### - RF Plast GmbH

Verfahren zur Thermo- bzw. Duroplast-Isolation für die Anwendung bei E-Traktionsantrieben

#### - risomat Otto Rist GmbH & Co. KG

Verfahren zur Herstellung von Stator mit signifikant erhöhtem Nutzfüllgrad

#### - Scansonic MI GmbH

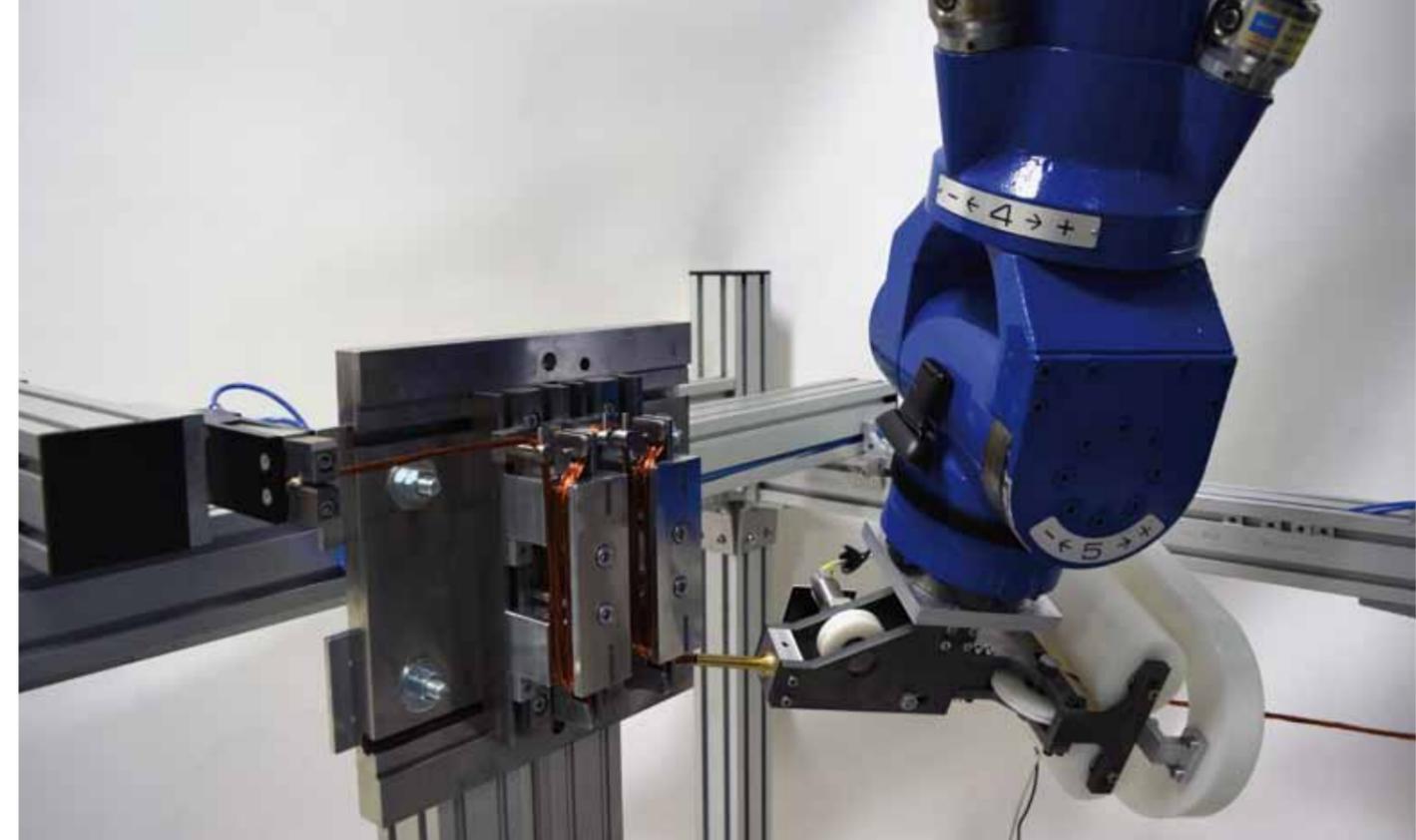
Scannersysteme zur laserbasierten Kontaktierung von E-Traktionsantrieben

#### - Technische Universität München (TUM), Lehrstuhl für Hochspannungs- und Anlagentechnik (HSA)

Beanspruchungsorientierte Isoliersysteme und Prüfverfahren für E-Traktionsantriebe

#### - Technische Universität München, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg)

Umformtechnisch hergestellte segmentierte Formstäbe zur Steigerung des Nutzfüllgrads



### Motivation

Trotz langjähriger Erfahrungen im Elektromaschinenbau besteht beim Einsatz von elektrischen Traktionsantrieben erheblicher Optimierungsbedarf. Insbesondere im Automotive-Bereich müssen E-Traktionsantriebe einen hohen Wirkungsgrad bei gleichzeitig geringem Bauraum und Gewicht aufweisen.

Um die Herstellkosten im Vergleich zu konventionellen Antriebsaggregaten möglichst gering zu halten, müssen für die Produktion künftiger E-Motoren-Generationen für Elektrofahrzeuge stückzahl- und variantenflexible Produktionstechnologien entwickelt werden. Nur durch entsprechend innovative Ansätze ist es möglich, bei den derzeit noch unsicheren Absatzpotenzialen eine hohe Kundenakzeptanz zu erreichen und damit international konkurrenzfähig zu sein.

### Herangehensweise

Im Projekt wurden Methoden zur flexiblen und dabei möglichst vollautomatischen Produktion von E-Motoren erforscht und erprobt. Zum einen wurden die fertigungstechnischen Engpässe in Bezug auf eine flexible Automatisierung durch die Entwicklung neuartiger Isolationskonzepte und Kontaktierungsverfahren gezielt adressiert. Zum anderen wurden die Leistungsdichte und der Wirkungsgrad des elektrischen Antriebssystems durch innovative Wickelverfahren gesteigert.

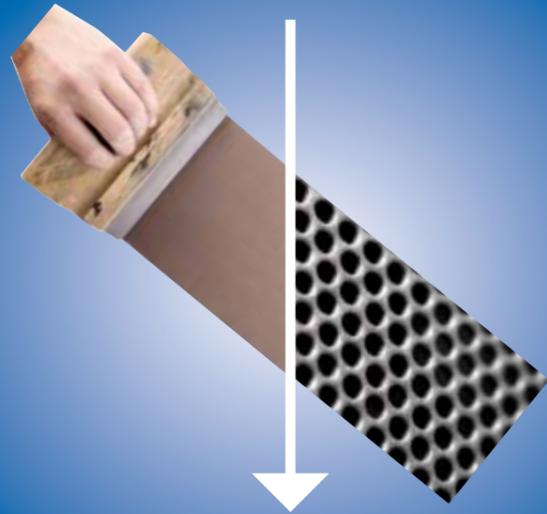
Durch die angestrebten automatisierten Fertigungskonzepte wurde zudem eine hohe Reproduzierbarkeit und damit einhergehend eine wesentliche Qualitätssteigerung erreicht. Dies konnte nur in einem ganzheitlichen, interdisziplinären Ansatz bestehend aus Prozess-, Material- und Isoliersystembetrachtungen aller vor- und nachgelagerten Fertigungsschritte erreicht werden.

### Ergebnisse

Die Industrialisierbarkeit dieser Ansätze wurde mit Demonstratoren der neuen E-Motoren-Generation nachgewiesen. Die in diesem Projekt verfolgte ganzheitliche Betrachtung der automatisierten Montage, Isolierung und Kontaktierung der Kupferleitungen bietet nicht nur Chancen zur signifikanten Reduzierung der Produktkosten bei Pkw-Anwendungen, sondern generell große Wertschöpfungspotenziale für Elektromotorenbauer und Anlagenhersteller.

Die Erkenntnisse aus dem Förderprojekt können somit branchenübergreifend auch für die Fertigung anderer Elektromotoren angewendet werden und tragen nachhaltig zur Sicherung von Produktionskapazitäten und Arbeitsplätzen entlang der gesamten Wertschöpfungskette im Inland bei. Dies ist gerade in der Phase des Umbruchs zu elektrischen Formen der Mobilität für den Automobilstandort Deutschland von zentraler Bedeutung.

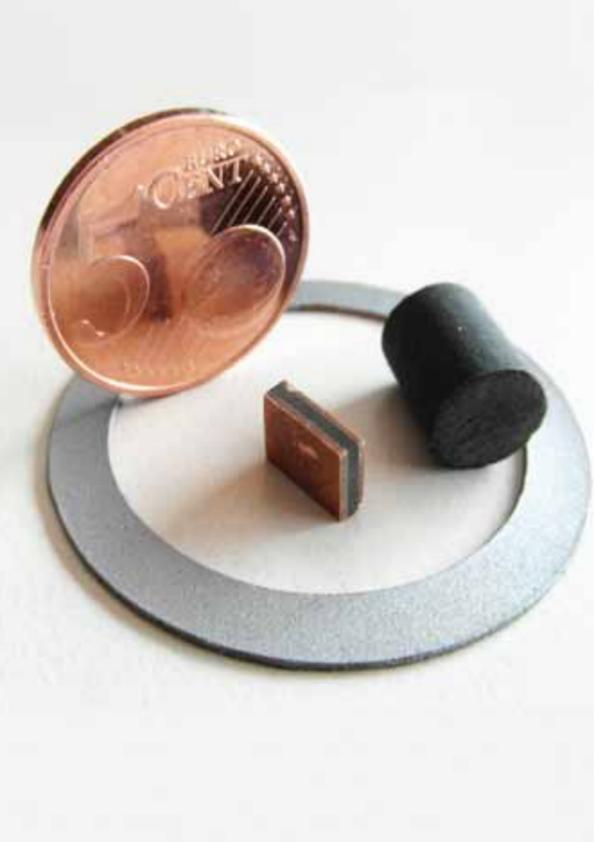
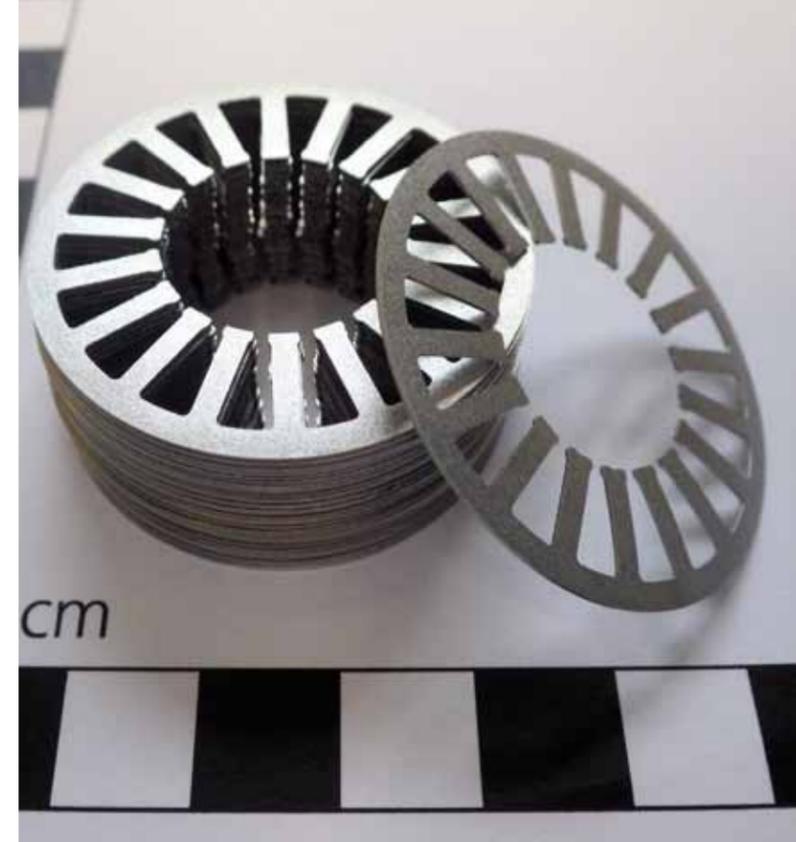
# [Wie gedruckt]\*



\*Siebgedruckte Komponenten für elektrische Antriebe

## Koordinator

**EKRA**  
**Automatisierungssysteme GmbH**  
Gerd Krause  
Zeppelinstraße 16  
74357 Bönningheim  
Telefon: 07143 8844-150  
E-Mail: gerd.krause@ekra.com



# PriMa3D

## Highlights

- Anwendung der additiven Fertigungstechnologie 3D-Siebdruck auf funktionale Komponenten für elektrische Maschinen, insbesondere, aber nicht ausschließlich Wicklungen und magnetische Kerne, die bisher kaum generativ herstellbar sind
- Ausnutzen der hohen Gestaltungs- und Materialfreiheit des 3D-Siebdrucks, um innovative Designs und leistungsfähigere Motoren zu fertigen
- Nachweis der Übertragbarkeit in den Automotive-Bereich sowie in alternative Applikationen durch Tests der Komponenten in Elektromotoren und eine Gegenüberstellung mit konventioneller Technik möglich
- paralleler Aufbau einer neuartigen industrietauglichen 3D-Siebdruckmaschine

## Projektpartner mit Aufgaben

- **EKRA**  
**Automatisierungssysteme GmbH**  
Konzeption, Entwicklung und Aufbau einer automatischen Demonstratoranlage für den 3D-Siebdruck
- **Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM), Institutsteil Dresden**  
3D-Siebdruckentwicklung, Materialsynthese und Bauteilfertigung
- **MP & L Produktions GmbH**  
Entwicklung und Herstellung der Drucksiebe für den 3D-Siebdruck
- **Technische Universität Chemnitz, Professur elektrische Energiewandlungssysteme und Antriebe**  
Berechnung und Auslegung von durch 3D-Siebdruck gefertigten Antriebsmotoren, Komponentenprüfung
- **WITTENSTEIN AG**  
Erstellung von Anforderungsprofilen an den 3D-Siebdruckprozess, Maschinenmontage und -prüfung

## Motivation

Elektrische Maschinen – insbesondere in der E-Mobility – unterliegen zunehmend höheren Anforderungen bezüglich Bau- raum, Wirkungsgrad, Leistungsdichte, Einsatztemperatur oder Fertigungskosten. Mit konventionellen Fertigungsmethoden konnten diesbezüglich nur kleine Fortschritte erzielt werden. Die Hauptgründe dafür liegen in der beschränkten Werkstoffauswahl, den geringen Gestaltungsfreiheiten, dem axialsymmetrischen Magnetkreislaufbau, den zahlreichen Nachbearbeitungsschritten und deren Auswirkung auf die Materialien sowie den teils komplizierten und händischen Montagearbeiten.

Generative Fertigungstechnologien überwinden eine Vielzahl dieser Einschränkungen. Dabei zeigt sich der 3D-Siebdruck als besonders geeignet, weil er als nahezu einzige Methode die Verarbeitung von Kupfer, Eisen und Keramik ermöglicht – für wettbewerbsfähige Motoren unabdingbare Materialien. Darüber hinaus eignet sich das Verfahren zur Serienproduktion.

## Herangehensweise

Zunächst wurde das bisher für mechanische Komponenten eingesetzte 3D-Siebdruckverfahren hinsichtlich der neuen Funktionswerkstoffe eingerichtet. Dazu gehörte neben der Auswahl geeigneter und zueinander passender Werkstoffe und der Ermittlung von Druck- und Sinterparametern auch die Entwicklung geeigneter Drucksiebe. Die Hauptschwerpunkte lagen in der Ausarbeitung des bisher wenig erforschten Zwei-Komponenten-Drucks und des Co-Sinterns sowie in der Herstellung ungewöhnlich großer Strukturen.

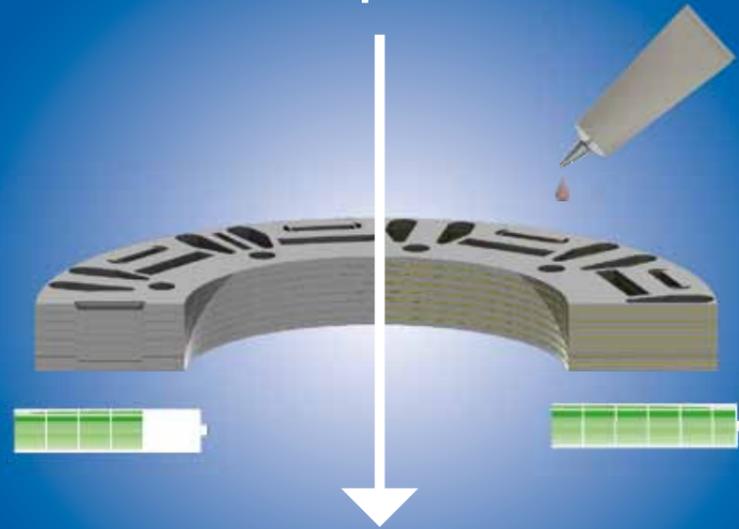
Die Werkstoffeigenschaften wurden iterativ verbessert, wobei kontinuierliche Materialprüfungen erfolgten. Die neuen Erkenntnisse flossen direkt in die Entwürfe von Prototypen und Konzeptstudien, die den Vergleich zwischen gedruckten und konventionellen Komponenten aufzeigen. Eine industrietaugliche 3D-Siebdruckmaschine wurde entwickelt und aufgebaut, die auch in der Projektlaufzeit zur Bauteilfertigung verwendet werden konnte.

## Ergebnisse

Es wurden verschiedene Motoren mit siebgedruckten Magnetkreisen fertiggestellt. Diese zeichnen sich durch eine verbesserte Magnetisierbarkeit und damit höhere Leistungsdichten gegenüber konventionellen Komponenten aus. Außerdem wurden erfolgreich teilporöse Magnetkreise erprobt, deren Wirkungsgrad deutlich höher als der vergleichbarer Vollmaterialien ist.

Kupferleiter und Keramikisolatoren können mit sehr guten Eigenschaften hergestellt werden. Es gelang, beide gemeinsam zu drucken und mechanisch stabil zu sintern. Momentan geht dabei jedoch die Isolationsfähigkeit verloren, sodass in den Motoren noch konventionelle Wicklungen zu finden sind. Mit zunehmender Weiterentwicklung sind komplexere Motordesigns (z.B. Transversal-Asynchronmaschinen) denkbar, die die Vorteile des 3D-Siebdrucks stärker ausnutzen. Die neue kommerziell verfügbare Druckmaschine wird zukünftig die Verbreitung der Fertigungstechnologie vorantreiben.

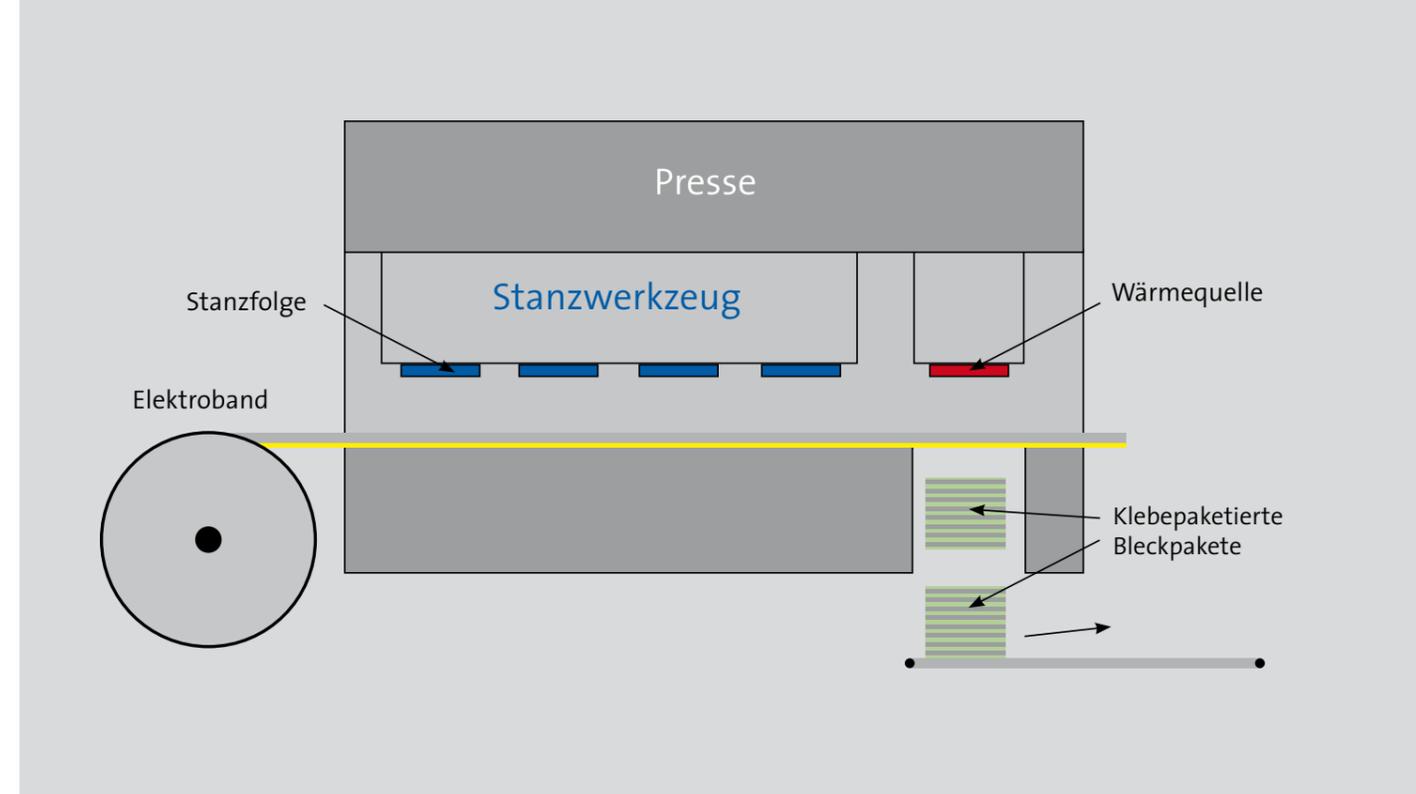
# [Kraftpaket]\*



\*Produktionstechnologie für die serienflexible Herstellung von Stator- und Rotorpaketen

## Koordinator

**Volkswagen AG**  
Dr. Michael Alsmann  
Dr. Rudolf-Leiding-Platz 1  
34225 Baunatal  
Telefon: 0561 490-4980  
E-Mail:  
michael.alsmann@volkswagen.de



# ProStaR

## Highlights

- integrierter Klebepaketierprozess im Stanztakt für die vollflächige Verklebung
- innovative Klebstoffsysteme für das integrierte Klebepaketieren
- Plasmapolymersationsschichten zur Isolation und zum Korrosionsschutz
- wirkungsgradoptimierte Elektromotoren aufgrund erhöhter Designfreiheit

## Projektpartner mit Aufgaben

- **Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM**  
Plasmapolymersation und Entwicklung raumtemperaturhärtender Klebepaketierprozess
- **Kienle + Spiess GmbH**  
Entwicklung Klebepaketierwerkzeug
- **Plasmatrete GmbH**  
Plasmapolymersation von Isolationsbeschichtungen
- **Schuler Pressen GmbH**  
Entwicklung von Pressen für integrierten Klebepaketierprozess
- **Universität Kassel, Fachgebiet tff (Trennende und Fügende Fertigungsverfahren)**  
Entwicklung des thermischen Klebepaketierprozesses
- **voestalpine Stahl GmbH**  
Entwicklung von optimiertem Elektroband
- **Volkswagen AG**  
Rotor- und Statorgeometrie, E-Motoren, Fahrzeugprüfung

## Motivation

Elektrofahrzeuge bieten die Möglichkeit, umweltbewusst mobil zu sein. Im Projekt ProStaR dreht sich alles um die Herstellung der Herzstücke des Elektromotors, des Stators und des Rotors. Diese wandeln die elektrische Energie in Bewegungsenergie um. Sie sind dabei aus einer Vielzahl von Elektroblechlamellen zu einem Paket gebündelt. Die Anforderungen an die Lamellenpakete hinsichtlich des Wirkungsgrads, der Leistungsdichte und des Leistungsgewichts sind enorm hoch. Der Wirkungsgrad eines solchen Elektromotors steigt, wenn die geometrische Form von Rotor und Stator optimiert wird, die Bleche von Stator- und Rotorstapel möglichst dünn sind und gleichzeitig eine hohe Isolation zwischen den Blechen realisiert werden kann. Bislang konnten sich Elektrofahrzeuge noch nicht am Markt durchsetzen, weil sie zum einen in ihrer Reichweite eingeschränkt und zum anderen zu teuer sind. Einen deutlichen Anteil an den Herstellungskosten hat dabei die Fertigung der Stator- und Rotorpakete. Um diesem Problem zu begegnen, sind neue Fertigungstechnologien erforderlich.

## Herangehensweise

Der Innovationsansatz liegt in der Integration des Klebepaketierens in den Stanzprozess, sodass eine vollflächige Einzelblechverklebung im Stanztakt ermöglicht wird.

Durch das flächige Verkleben der einzelnen Lamellen wird der Freiheitsgrad bei der Auslegung und dem Design der Blechgeometrie erhöht, was die Herstellung wirkungsgradoptimierter Elektromotoren ermöglicht. Zusätzlich sollen dünnere und innovative Isolationschichten durch Plasmapolymersation realisiert werden, die den Wirkungsgrad zusätzlich steigern und mit denen ein höherer Stapelfaktor der Lamellenpakete erzielt werden kann. Durch die Integration der verschiedenen Prozessschritte ist eine deutliche Kostenreduktion in der Fertigung und eine Effizienzsteigerung der Elektromotoren zu erwarten.

## Ergebnisse

Zur Umsetzung der innovativen Klebepaketierertechnologie wurde ein Klebepaketierwerkzeug entwickelt und aufgebaut, mit dem eine vollflächige Verklebung im Pressentakt möglich ist. Bei der Entwicklung wurden zwei Klebstoffstrategien berücksichtigt. Zum einen wurde ein kommerziell erhältlicher, raumtemperaturhärtender Epoxid-Klebstoff untersucht, der UV-aktivierbar ist. Zum anderen wurde ein wärmeaktivierbarer Klebstoff (Backlack) entwickelt und getestet, der die besonderen Prozessanforderungen des integrierten Klebepaketierens berücksichtigt. Dieser Klebstoff zeichnet sich vor allem durch eine kurze Reaktionszeit, eine hohe Temperaturbeständigkeit und gute Isolationseigenschaften aus. Zudem wurden plasmapolymere Schichten entwickelt, die zur Isolation sowie zum Korrosionsschutz beitragen. Der Auftrag der Schichten wurde hinsichtlich der Beschichtungsbreite und -geschwindigkeit entsprechend der Rahmenbedingungen des Klebepaketierens optimiert und in das Versuchswerkzeug integriert.

# [Große Räder drehen]\*



\*Serienfähige, hocheffiziente Radnabenmotoren mit integrierter Leistungselektronik

## Koordinator

**Heinzmann GmbH & Co. KG**

Bernd Becker

Am Haselbach 1

79677 Schönau

Telefon: 07673 8208-712

E-Mail: be.becker@heinzmann.de



# SeRiel

## Highlights

- Entwicklung eines serienfähigen, hocheffizienten Radnabenmotors mit hohem Drehmoment (1.300 Nm) und hoher Leistungsdichte (80 kW)
- Entwicklung von serienfähigen Gießverfahren für den Rotor und Stator
- serienfähige Miniaturisierung der integrierten Leistungselektronik
- Entwicklung eines beschichteten, energieeffizienten und serienfähigen Dichtungssystems für Gleitgeschwindigkeiten von bis zu 50 m/s
- Entwicklung einer reibarmen integrierten Lagereinheit mit beschichteten Hybridkugellagern
- Entwicklung eines serienfähigen Konzepts zum Aufbau und zur Montage der elektrischen und mechanischen Komponenten bis hin zur Spulenwicklung
- Integration des Radnabenmotors in ein Demonstratorfahrzeug

## Projektpartner mit Aufgaben

- **Audi AG**  
Spezifikation und Prüfung des Radnabenmotors
- **AVL Software and Functions GmbH**  
Leistungselektronik
- **Cerobear GmbH**  
Konstruktion und Herstellung der Lagereinheit
- **Fraunhofer IFAM**  
Konstruktion und Auslegung des Radnabenmotors, Integration der Leistungselektronik
- **Fraunhofer IWM**  
Strukturmechanische Auslegung des Radnabenmotors, Beschichtung von Dichtungen und Lager
- **Freudenberg Sealing Technologies GmbH & Co. KG**  
Dichtungen
- **Heinzmann GmbH & Co. KG**  
Auslegung und Herstellung des Radnabenmotors
- **KSM Castings Group GmbH**  
Gehäuse

## Motivation

Die Entwicklung der Elektromobilität bietet durch den Einsatz von Radnabenmotoren (RNM) die Möglichkeit, komplett neue Fahrzeugkonzepte zu realisieren, da durch den Wegfall des Bauraums für den Antriebsstrang eines Zentralmotors viele Beschränkungen bei der Gesamtgestaltung eines Automobils entfallen. Darüber hinaus bieten Radnabenantriebe ein hohes Potenzial zur Leichtbau- und Funktionsintegration sowie zur Erhöhung des Wirkungsgrads des Antriebsstrangs, da Reibungsverluste aufgrund des getriebelosen Antriebs minimiert werden können.

Dieses Potenzial kann für den Bau leichter und effizienterer Fahrzeuge genutzt werden. Bisher sind allerdings keine Radnabenmotoren verfügbar, die die Anforderungen der Automobilhersteller hinsichtlich Zuverlässigkeit, Robustheit, Ausfallsicherheit sowie Leistungs- und Drehmomentdichte erfüllen und die gleichzeitig kostengünstig in Großserie gefertigt werden können.

## Herangehensweise

Ziel des Projekts war es, einen serienfähigen Radnabenmotor mit integrierter Leistungselektronik für den Einsatz in Personenkraftfahrzeugen zu entwickeln und zu erproben, der diese Anforderungen erfüllt. Ausgehend von einem Radnabenmotorkonzept, das im Rahmen der Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität FSEM entwickelt worden war, sollte im Projekt SeRiel ein RNM mit höheren Drehmomenten (1.300 Nm) und Leistungsdichten (80 kW) unter der Prämisse der Serienfähigkeit weiterentwickelt werden. Hierbei standen insbesondere die kostengünstige serientaugliche Fertigung der Einzelkomponenten und die Montage des Motors sowie die Fahrzeugintegration im Vordergrund. Dazu wurden für die Herstellung der Gehäusekomponenten, der Leistungselektronik, des Dichtungssystems und der elektromagnetisch aktiven Bauteile bereits großserienfähige und in anderen Anwendungsbereichen erprobte Herstellungsverfahren vorhabenspezifisch angepasst und entsprechend der besonderen Anforderungen an Radnabenmotoren weiterentwickelt.

## Ergebnisse

Die Herstellung des RNM-Gehäuses erfolgte in einem serientauglichen Gießverfahren mit sehr wenigen Einzelteilen. Für die elektronischen Komponenten ist neben der Erschütterungsbeständigkeit eine zuverlässige und langlebige Abdichtung notwendig, was bei einem Radnabenmotor eine besondere Herausforderung darstellt. Für die Abdichtung wurde daher ein Dichtungssystem entwickelt, das sowohl im Stillstand eine Abdichtung gegen Schmutz und Flüssigkeiten als auch bei hohen Geschwindigkeiten eine Minimierung der Reibung gewährleistet. Eine Lagereinheit mit integrierten beschichteten Schrägkugellagern ermöglicht niedrige Reibwerte, schafft zusätzlichen Bauraum für die Leistungselektronik und gewährleistet eine einfache Montage und Wartung.

Durch die prototypische Integration in einen Audi A6 mit anschließenden Tests und Erprobungsfahrten wird die Realisierung der kompletten Entwicklungskette dargestellt.

# Unsere Projektpartner

## AnStrom

DAIMLER

Kienle Spiess

wbk  
Institut für Produktionstechnik

HEV  
Hybrid Electric Vehicles

BOSCH  
Technik fürs Leben

TRUMPF

## ESKAM

Ebm  
Wir formen Ihre Zukunft  
We shape your future

Fraunhofer  
IWU

GROSCHOPP

Hirschvogel  
Automotive Group

Hochschule Aalen  
Technik und Wirtschaft

HSD  
Hochschule Düsseldorf  
University of Applied Sciences

REFUdrive

SALZGITTER  
HYDROFORMING  
Ein Unternehmen der Salzgitter Gruppe

ILEA

VOGEL  
ANTRIEBSTECHNIK

WILHELM FUNK  
GmbH & Co. KG

## GroAx

CirComp

Compact  
Dynamics

HOCHSCHULE  
LANDSHUT

Institut für  
Verbundwerkstoffe

SCHRAMBERG  
Magnet- und Kunststofftechnik

TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
CHEMNITZ

## HeP-E

BMW

ESSEX  
A DIVISION OF SUPERIOR ESSEX

FAPS

RF  
RF FLAST

risomat

scansonic  
mechatronic innovation

Lehrstuhl für  
Hochspannungs-  
und Anlagentechnik

utg

## PriMa3D

EKRA  
Screen Printing Technologies

Fraunhofer  
IFAM

MP+L

TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
CHEMNITZ

WITTENSTEIN

## ProStaR

Fraunhofer  
IFAM

Kienle Spiess

plasmatreat  
solutions on top

SCHULER

tff  
trennen, fügen, fertig

voestalpine  
ONE STEP AHEAD.

Volkswagen

## SeRiel

Audi  
Vorsprung durch Technik

AVL  
SOFTWARE AND  
FUNCTIONS

CEROBEAR  
ceramic bearing technology

Fraunhofer  
IFAM

Fraunhofer  
IWM

FREUDENBERG  
INNOVATING TOGETHER

HEINZMANN

KSM  
Castings

Die in der Broschüre vorgestellten Verbundprojekte wurden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Bekanntmachung „Serienflexible Technologien für elektrische Antriebe von Fahrzeugen“ gefördert und vom Projektträger Karlsruhe betreut. Der Aufbau der Innovationsplattform Effizienzfabrik wurde ebenfalls mit Mitteln des BMBF gefördert.

[www.effizienzfabrik.de](http://www.effizienzfabrik.de)

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

BETREUT VOM



PTKA  
Projektträger Karlsruhe  
Karlsruher Institut für Technologie