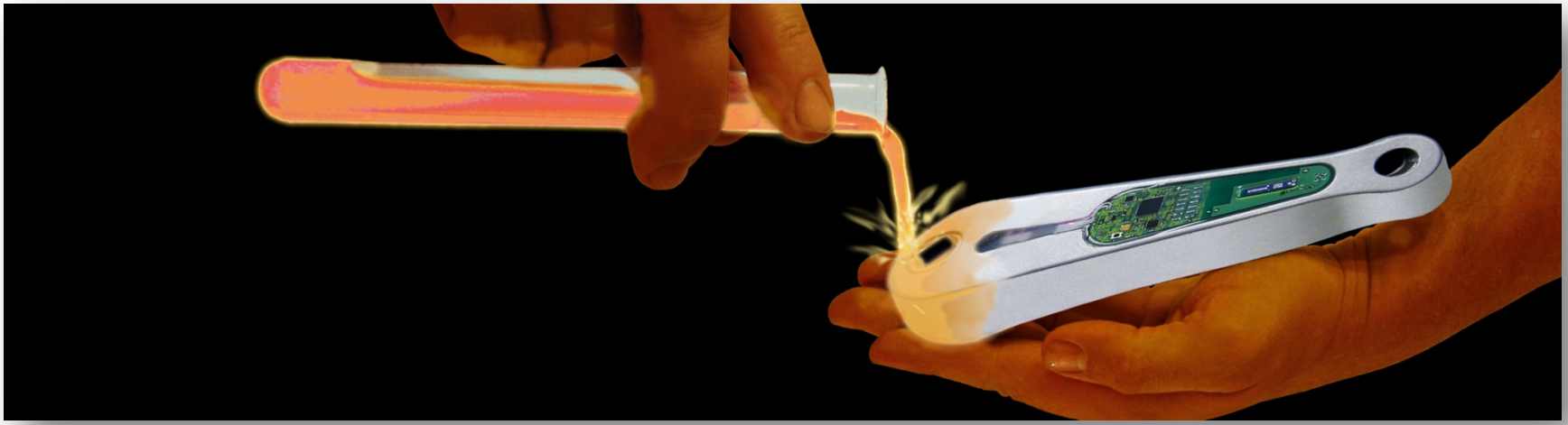
Von der Idee zum gießtechnisch umgesetzten Produkt

Forschung und Entwicklung aus einer Hand



Dipl.-Wi.-Ing. **Christoph Pille**
Dipl.-Ing. **Felix Horch**

© Fraunhofer IFAM

Fraunhofer IFAM

Agenda

- **Kurzvorstellung der Fraunhofer Gesellschaft und des Fraunhofer IFAM**

- Gießereitechnologie
  - Gießtechnische Integration von Sensoren
  - CFK-Aluminium Hybridguss

- Komponentenentwicklung
  - Gießtechnische Herstellung von Spulen
  - Hochintegrierter Radnabenmotor
  - Systemintegration Gesamtfahrzeug

© Fraunhofer IFAM

Die Fraunhofer-Gesellschaft im Überblick

Fraunhofer-Gesellschaft

- Gründung im Jahr 1949
- 60 Fraunhofer-Institute
- 40 Standorte in Deutschland
- 18.000 Mitarbeiter
- 1,65 Mrd. € Forschungsbudget
  - über 1,4 Mrd. € im Leistungsbereich Vertragsforschung
  - 2/3 aus Industrie und öffentlichen Forschungs-projekten
  - 1/3 von Bund und Ländern als Grundfinanzierung

Fraunhofer-Institut IFAM

- Gründung im Jahr 1969
- 2 Standorte in Deutschland
  - Bremen
  - Dresden
- 478 Mitarbeiter
- 35,3 Mio. € Gesamthaushalt (in 2010)
- Institutsteile
  - Formgebung & Funktionswerkstoffe
  - Klebtechnik & Oberflächen

© Fraunhofer IFAM

Fraunhofer IFAM

Das Kompetenzfeld „Gießereitechnologie & Komponentenentwicklung“

Schwerpunkte / Forschungsthemen

Gussteile mit komplexen Geometrien

- Druckguss
- Lost Foam Technologie
- Feinguss
- Verlorene Kerne (Nonpermanentkerne)

Gießereitechnologische Entwicklung

- Material- und Verfahrensentwicklung
- Numerische Simulation
- Bauteilanalytik

Funktionsintegrierte Gussbauteile

- Sensorik / Aktorik
- RFID-Bauteilkennzeichnung

Komponentenentwicklung

- Fahrzeugkonzepte für Elektromobilität
- Radnabenmotor
- Leistungselektronik

© Fraunhofer IFAM

Fraunhofer IFAM

Agenda

- Kurzvorstellung der Fraunhofer Gesellschaft und des Fraunhofer IFAM
- **Gießereitechnologie**
  - **Gießtechnische Integration von Sensoren**
  - **CFK-Aluminium Hybridguss**
- Komponentenentwicklung
  - Gießtechnische Herstellung von Spulen
  - Hochintegrierter Radnabenmotor
  - Systemintegration Gesamtfahrzeug

© Fraunhofer IFAM

Von der Idee zum gießtechnisch umgesetzten Produkt

Sensorfunktion im Gussbauteil

dynamische Lastwechsel

dynamische / statische Verformung

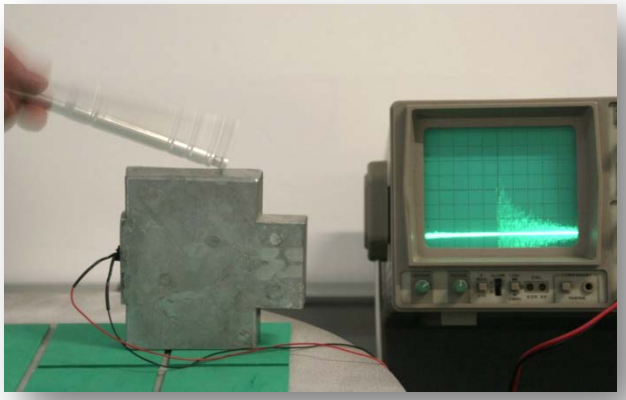
© Fraunhofer IFAM

Fraunhofer IFAM

Gießtechnische Integration von Sensoren

Messung im Gussbauteil herrschender Belastungen

- Mechanische Verformung
- Druck- und Zugspannungen
- Schwingung / Vibration
- Temperatur



Druckguss-Bauteil mit eingegossenem Piezosensor zur Schwingungsanalyse
Bild: IFAM

Anwendung eingegossener Sensoren

- Belastungs- und Zustandsüberwachung von Sicherheitsbauteilen (Structural Health Monitoring)
- Schutz vor mechanischer Überlastung
- Feedback aus dem Bauteil für aktive Regelungs-systeme
- Erkennung von Verzug in Gussbauteilen
- Belastungsgerechte Optimierung von Wartungs-intervallen
- Energy Harvesting
  → Energieerzeugung durch piezoelektrischen Effekt

© Fraunhofer IFAM

Gießtechnische Integration von Sensoren

CAST TRONICS®

Vorteile des Eingießens

- Einsparung zusätzlicher Fertigungsschritte zur Applikation der Elektronik
- Keine Oberflächenbehandlung / mechanische Bearbeitung erforderlich
- „Implantierte“ Elektronik ist geschützt
  - *Verschmutzung / Beschädigung / Verlust*
  - *im betrieblichen Einsatz*

Besondere Vorteile eingegossener Sensoren

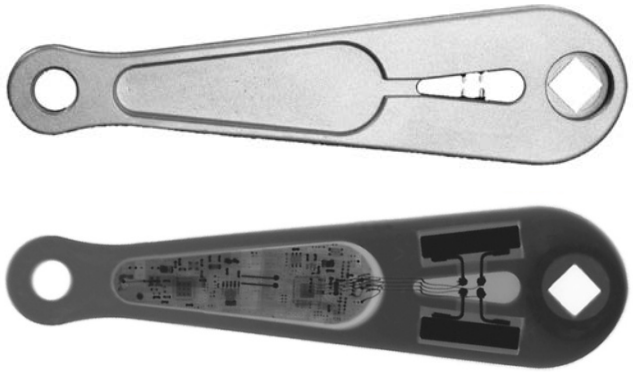
- Messung der Belastungen direkt am Ort ihrer Wirkung / Entstehung
- Optimierte Anbindung der Sensorelemente an die Materialstruktur

© Fraunhofer IFAM

Gießtechnische Integration von Sensoren

Dynamische Lastwechsel im Gussbauteil

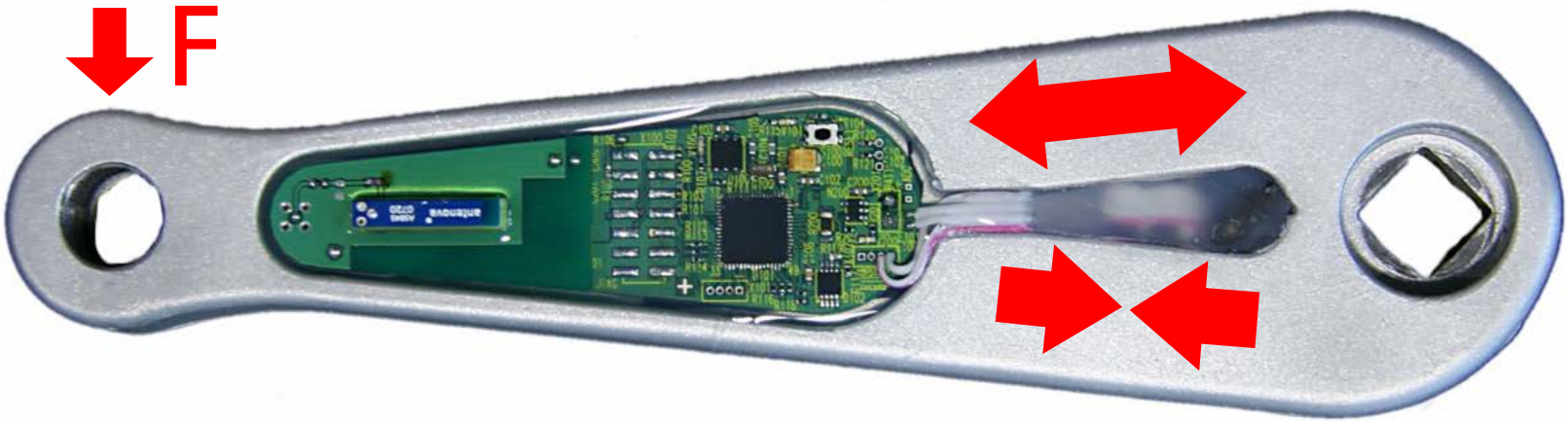
- Eingegossene Piezo-Sensoren messen in das Bauteil eingeleitete Kräfte
- Umrechnung in Wirk- und Verlustkraft in Echtzeit
- Drahtlose Datenübertragung per Funk



Anwendung

➔ Fahrdynamikregelung

➔ Aktive Zustandsüberwachung / Schutz vor Überlast



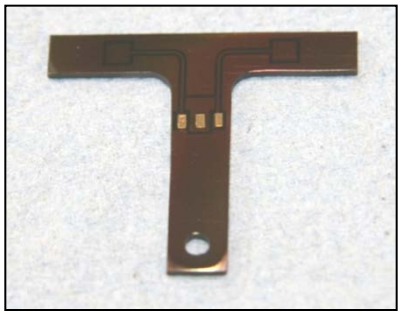
© Fraunhofer IFAM

Fraunhofer IFAM

Gießtechnische Integration von Sensoren

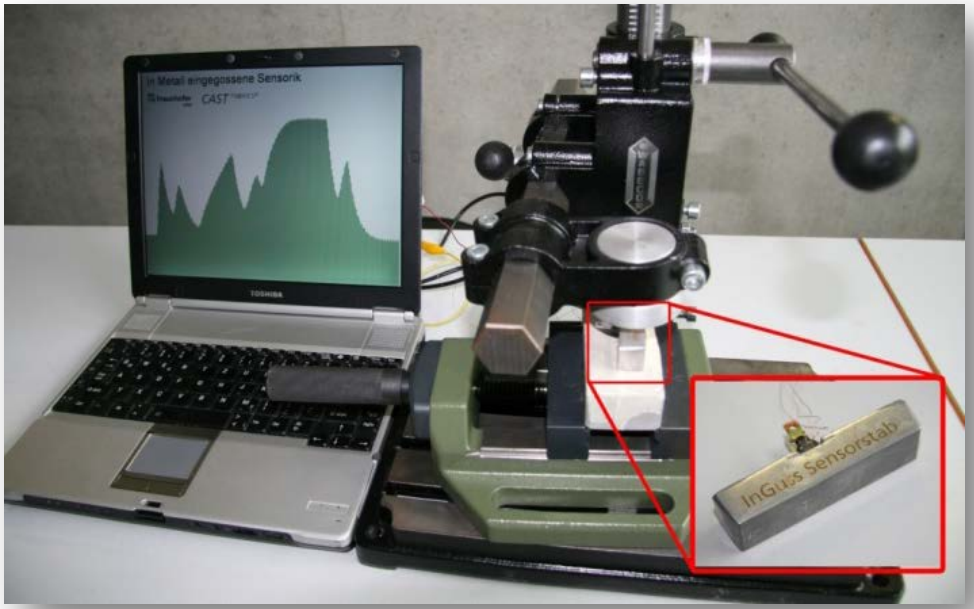
Dynamische + statische Verformung des Gussteils

- Piezoresistive Sensordünnschicht
- Kraftmessung erfolgt über elektrische Widerstandsänderung
- Sensor arbeitet nicht nach Biege-/ Dehnungsprinzip
  → keine Deformation erforderlich
- Echtzeitüberwachung mechanischer Verformung im Gussteil
- statisch + dynamisch



Anwendung

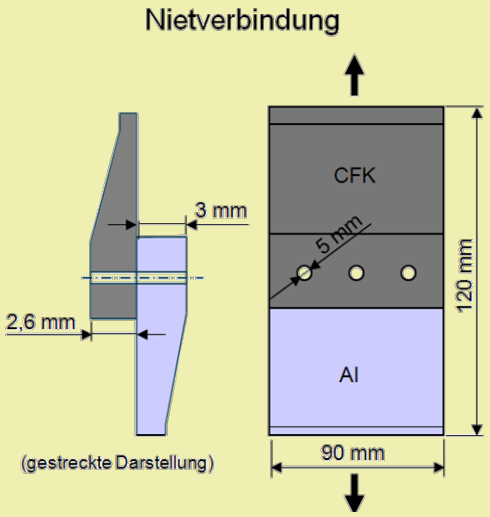
- ➔ Belastungsüberwachung
- ➔ Erkennung und Schutz vor Missbrauchslasten
- ➔ Erkennung von Verzug in Gussbauteilen



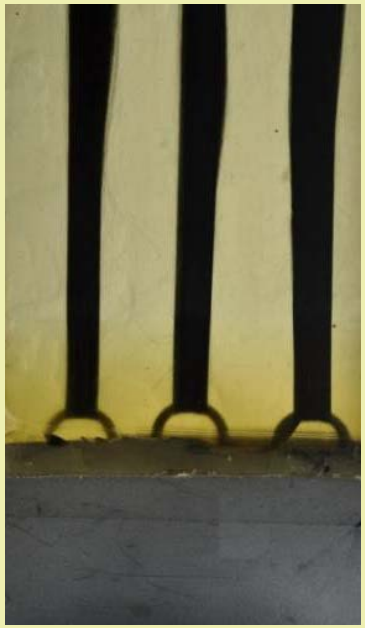
© Fraunhofer IFAM

Fraunhofer IFAM

Von der Idee zum gießtechnisch umgesetzten Produkt



Alternative für CFK-Al-Verbindung



Entwicklung Hybridguss

?

© Fraunhofer IFAM

Fraunhofer IFAM

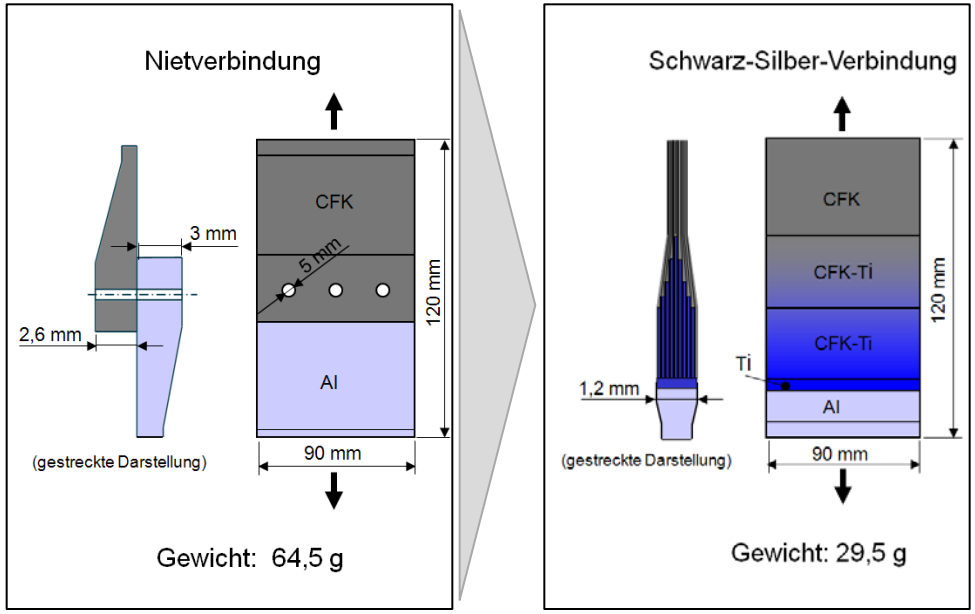
CFK-Aluminium Hybridguss

Motivation

- Trend im modernen Werkstoffleichtbau geht zunehmend in Richtung Mischbauweisen

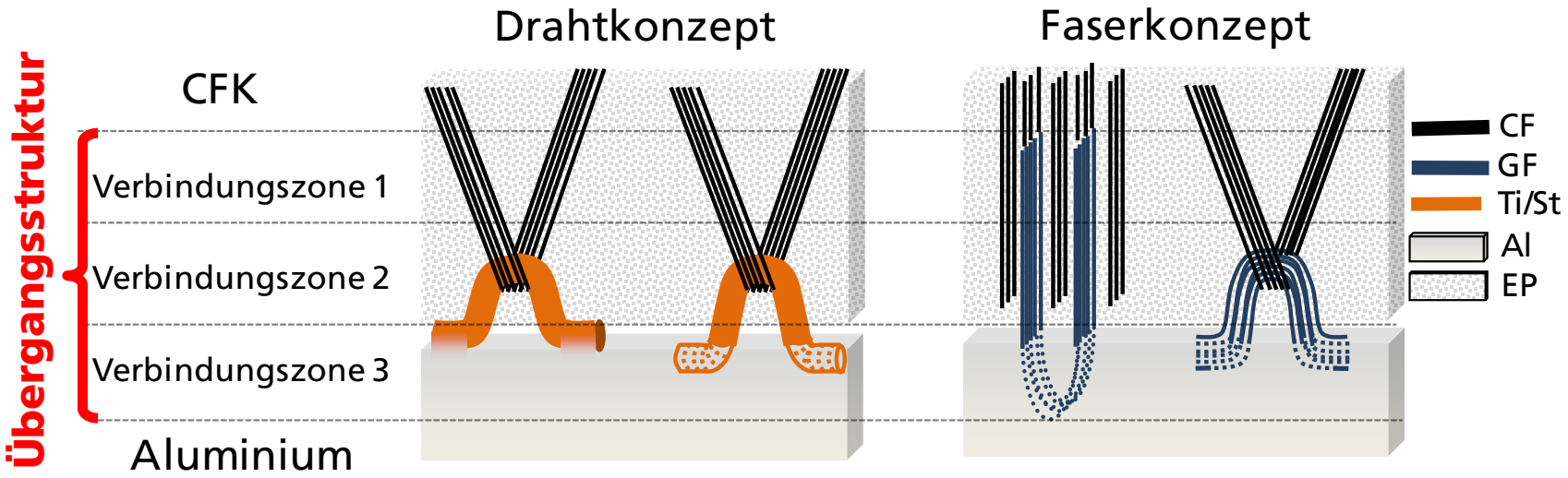
Vorteile einer CFK-Aluminium Verbindung

- geringes Gewicht und kleiner Bauraum
- Verzicht auf konventionelle Verbindungselemente
- faserverbundgerechte Verbindung
- sanfte Eigenschaftsübergänge
- werkstoffgerechte Fertigung



© Fraunhofer IFAM
Fraunhofer IFAM

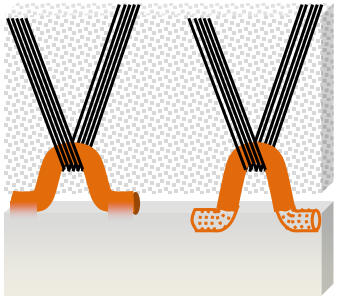
CFK-Aluminium Hybridguss



© Fraunhofer IFAM

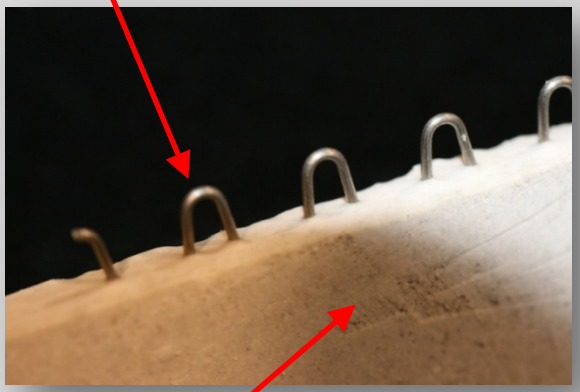
CFK-Aluminium Hybridguss

Drahtkonzept

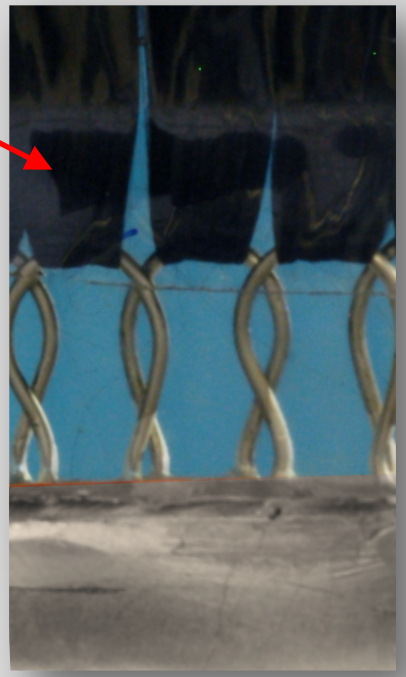


Kohlenstofffaser

Titandrahtschlaufe



Abdeckmaterial

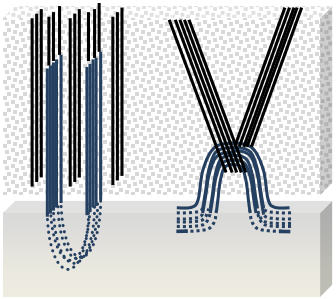


© Fraunhofer IFAM

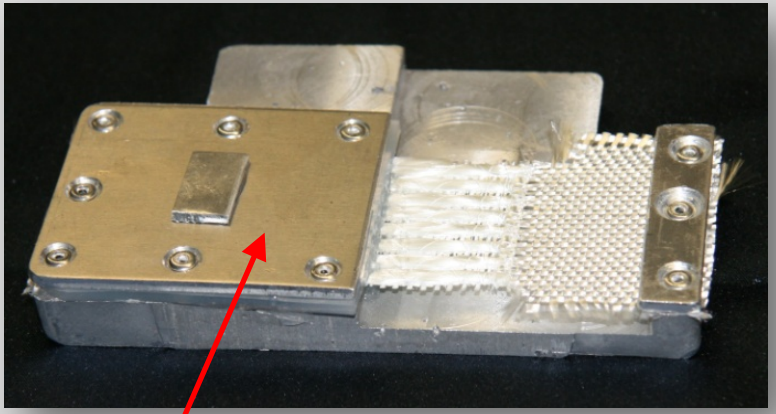
Fraunhofer IFAM

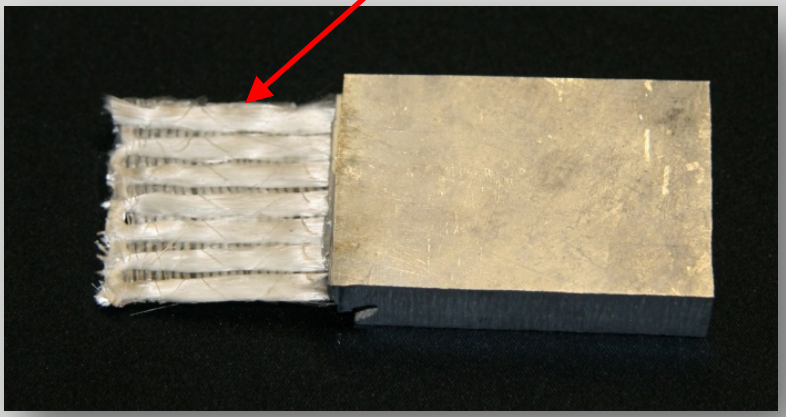
CFK-Aluminium Hybridguss

Faserkonzept



Glasfaser zur Anbindung
an die Kohlenstofffaser





Abdeckplatte

© Fraunhofer IFAM

Fraunhofer IFAM

Komplexe Gussteile und Verfahrensentwicklung

Integration von Wassermantel-Kernen in Gussteilen

- Darstellung von Kühlkanälen in Gussteilen
  - Verlorene Kerne im Druckguss
  - Gehäuse für Elektromotoren im Lost Foam
- Verfahrensentwicklung des Gießprozesses

Gussbauteile mit komplexen Geometrien

- Gießtechnische Spule im Feinguss

© Fraunhofer IFAM

Fraunhofer IFAM

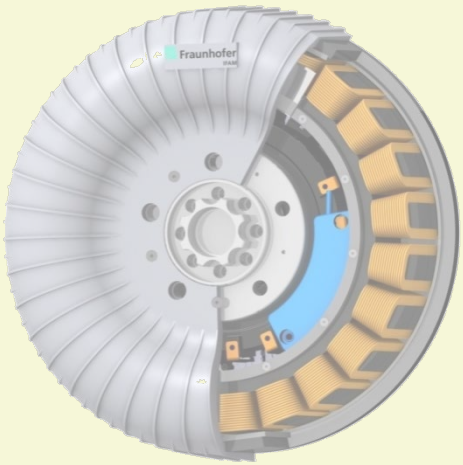
Agenda

- Kurzvorstellung der Fraunhofer Gesellschaft und des Fraunhofer IFAM
- Gießereitechnologie
  - Gießtechnische Integration von Sensoren
  - CFK-Aluminium Hybridguss
- **Komponentenentwicklung**
  - **Gießtechnische Herstellung von Spulen**
  - **Hochintegrierter Radnabenmotor**
  - **Systemintegration Gesamtfahrzeug**

© Fraunhofer IFAM

Von der Idee zum gießtechnisch umgesetzten Produkt

Gegossene Spulen



Radnabenmotor

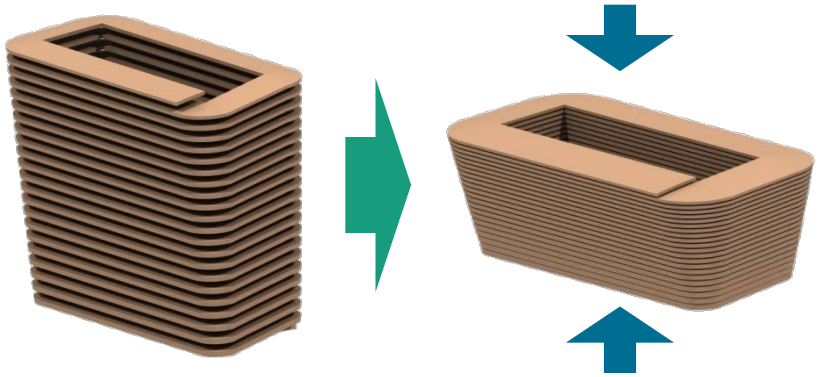
Fahrzeugintegration

© Fraunhofer IFAM

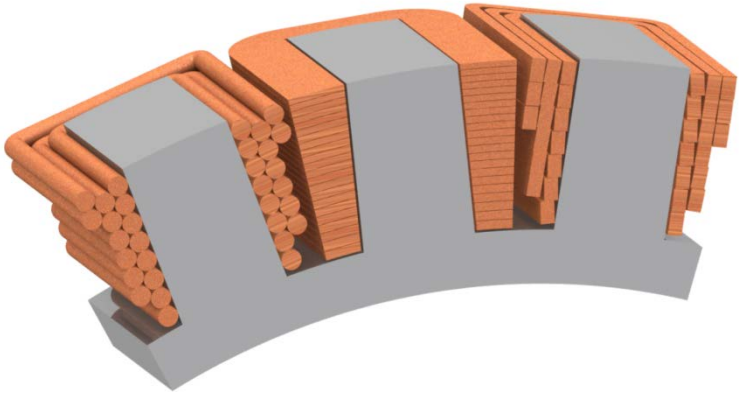
Fraunhofer IFAM

Gießtechnische Herstellung von Spulen

- **Idee:** Spulen werden mit einem geeigneten Gießverfahren hergestellt
  - Exakte Reproduktion der konstruierten Geometrie
  - Variable Querschnittsgeometrie über die Länge des Leiters
- Flache Leiter mit variabler Breite und Höhe in jeder Spulenlage
  - Nutfüllfaktor bis zu 90%
  - Minimierte Stromverdrängungseffekte
- Geometrie wird für den Gießvorgang und die anschließende Isolation auseinandergezogen



Auseinandergezogene und komprimierte Spule



Rundleiter (links), Rechteckleiter (rechts) und gegossene Spulen (mitte) im Schnitt

© Fraunhofer IFAM

Fraunhofer IFAM

Versuchsergebnisse
Aluminium

- Herstellung einer Spule für Einzelzahnwicklung
  - 20 Windungen, 11,4 mm² Leiterfläche
  - Füllfaktor: 88,4%
  - Leiterhöhe: 1,1 mm – 1,6 mm
- Material: Aluminium
- Widerstand: **10,8 mΩ**
- Widerstand einer gewickelten Kupferspule für gleichen Bauraum (67% Füllfaktor): **11,2 mΩ**
- Austausch einer gewickelten Kupferspule durch Aluminiumspule möglich:
  - Gewichtsreduzierung um 50%
  - Rohstoffkostenreduzierung um ca. 85% (Stand 10/2011)
  - Einsparpotenzial ggü. Kupfer durch geringere Energiekosten und leichtere Verarbeitbarkeit beim Gießprozess

Gegossene Aluminiumspule

© Fraunhofer IFAM

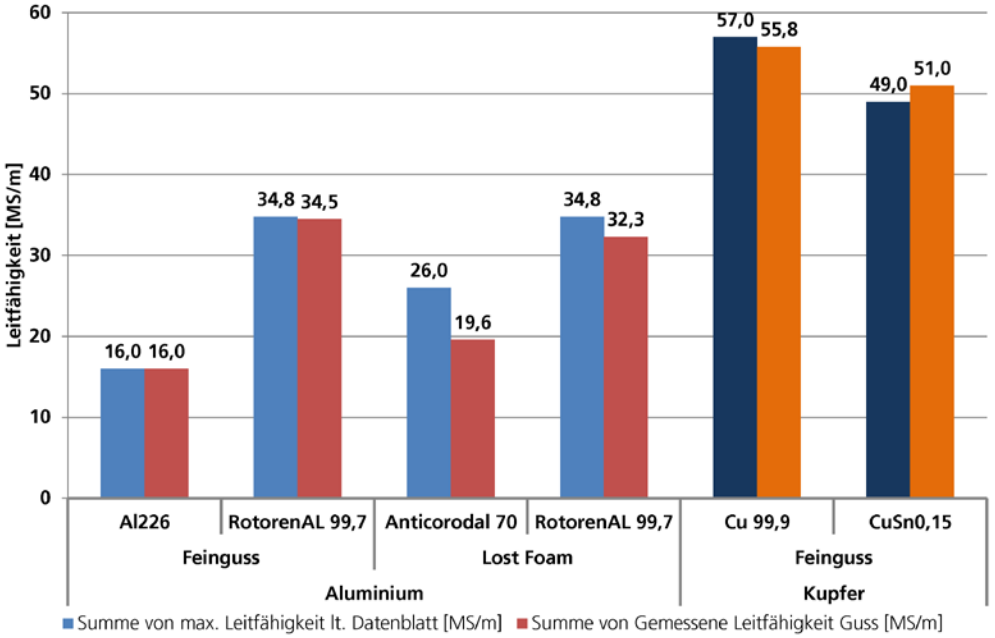
Vergleichsmessungen zur Leitfähigkeit

Durchführung der Messungen

- Mehrere Messreihen mit unterschiedlichen Werkstoffen bzw. Legierungen durchgeführt
- Verwendetes Messprinzip: Vierleitermessung an Probestäben mit konstantem Querschnitt

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

- Gegossene Bauteile weisen i.d.R. eine geringfügig kleinere elektrische Leitfähigkeit auf als das Ausgangsmaterial
- Gewählte Gießverfahren haben direkt Einfluss auf das Maß des Leitfähigkeitsverlustes
- Schmelzeverunreinigungen, Porositäten oder Restasche in Kavität sind vermutlich für den Leitfähigkeitsverlust verantwortlich



Vergleich der Messungen zur Leitfähigkeit für unterschiedliche Legierungen und Gießverfahren

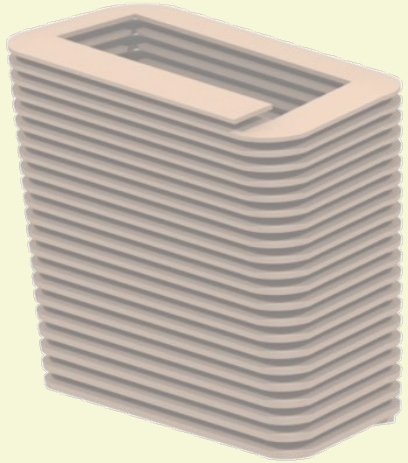
© Fraunhofer IFAM

Vorteile der gießtechnisch hergestellten Spulen

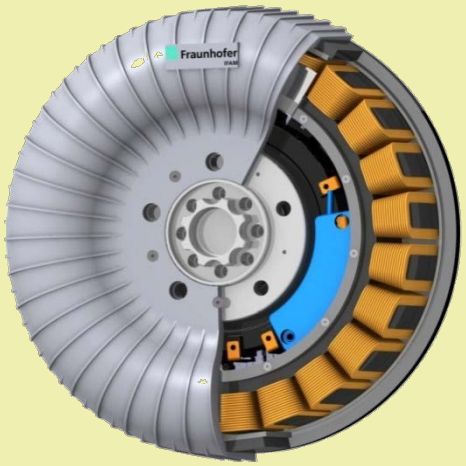
- Deutliche Erhöhung des Nutfüllfaktors ermöglicht erhebliche Steigerung von Drehmomentdichte und Wirkungsgrad
- Fertigungsprozess der Spulen bietet erhebliches Potenzial zur Kostensenkung durch Automatisierung
- Senkung des Maschinengewichts durch Reduzierung der Nut- und Zahnhöhe
- Verbesserte thermische Eigenschaften durch weniger Lufteinschlüsse und Isolationsschichten, zum Zahn besteht ein direkter Pfad zur Wärmeleitung
- Spulen werden zum konstruktiven Element bei der Motorentwicklung
- Minimierung von Stromverdrängungseffekten durch flache Leiteranordnung
- Ersatz des Kupfers durch Aluminium bei gleichbleibender Motorgeometrie, dadurch deutliche Gewichts- und Kostenersparnis

© Fraunhofer IFAM

Von der Idee zum gießtechnisch umgesetzten Produkt



Gegossene Spulen



Radnabenmotor

Fahrzeugintegration

© Fraunhofer IFAM

Fraunhofer IFAM

Entwicklung eines hochintegrierten Radnabenmotors

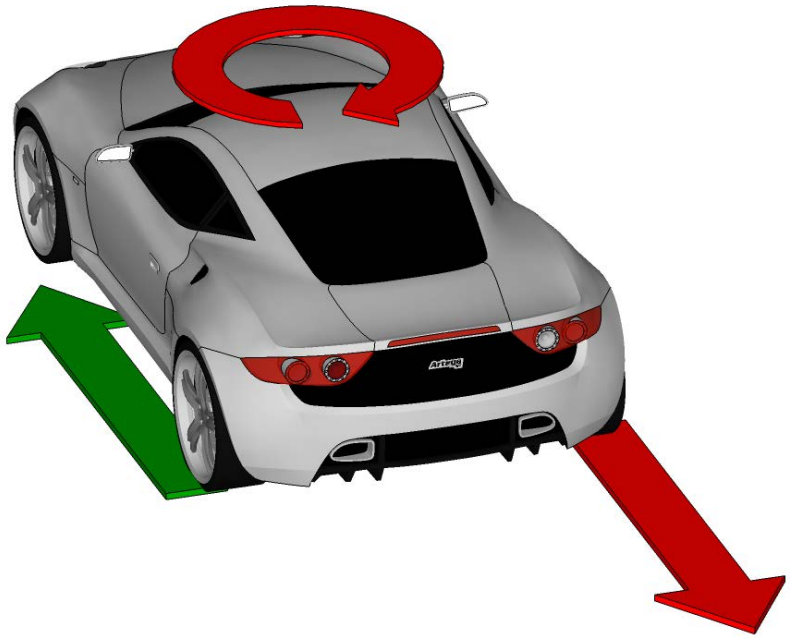
- 6-phasiger permanenterregter Synchronmotor (Außenläufer) mit 55 kW Dauerleistung und ca. 700 Nm Drehmoment im Bemessungsbetrieb
- hohe Leistungs- und Drehmomentdichte
- im Motor integrierte Leistungselektronik
- kurze Leitungswege
- EMV-Sicherheit
- Kombinierte Flüssigkeitskühlung für Spulen und Leistungselektronik
- serientaugliche Fertigung von Einzelkomponenten durch Druckguss bzw. Lost-Foam Gießverfahren

Fraunhofer Radnabenmotor (Schnittdarstellung)

© Fraunhofer IFAM

Sicherheitsaspekte

- Asymmetrische Drehmomentverteilung bei Mehrmotorenantrieb führt zu Giermoment um die Fahrzeughochachse
- Geeignetes Sicherheitskonzept für Fahrzeug erforderlich
  - Reduzierung des Bremsmoments bei elektrischen Fehlern
  - Präzise Regelung des Phasenstroms zur Erhöhung der Drehmomentgenauigkeit
  - Steuergeräte müssen Anforderungen hinsichtlich Funktionaler Sicherheit (ISO 26262) erfüllen
  - Kurzschlussfeste Auslegung des Radnabenmotors

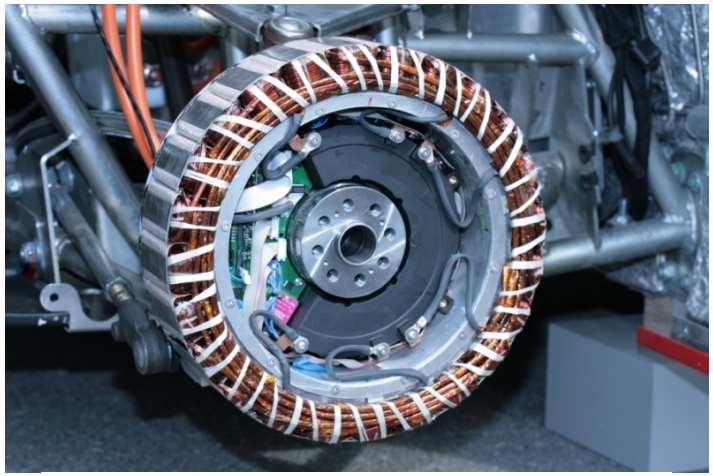


Resultierendes Giermoment bei asymmetrischer Drehmomentverteilung

© Fraunhofer IFAM

Fahrzeugintegration

- Integration von zwei Radnabenmotoren (Hinterachse) in das Demonstratorfahrzeug Frecc0 2.0
- Beibehaltung eines mechanischen Bremssystems
- Neukonstruktion des Fahrwerks
- Package des Radnabenmotors und sämtlicher Zuleitungen im Fahrzeug



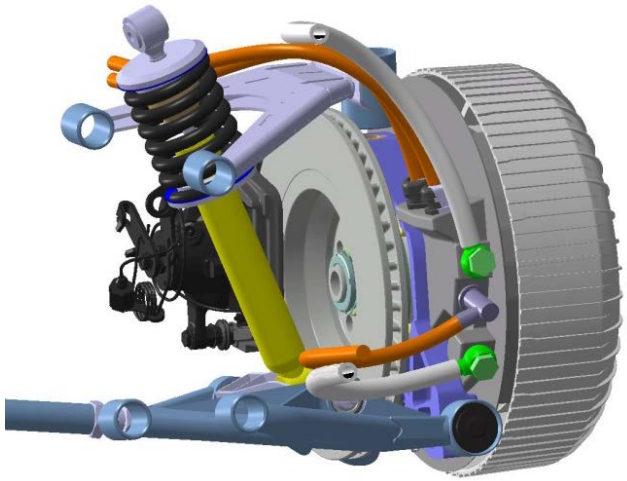


Abb. oben: Montierter Radnabenmotor ohne Rotor

Abb. unten: Package des Radnabenmotors mit Bremse und Anschlussleitungen

© Fraunhofer IFAM

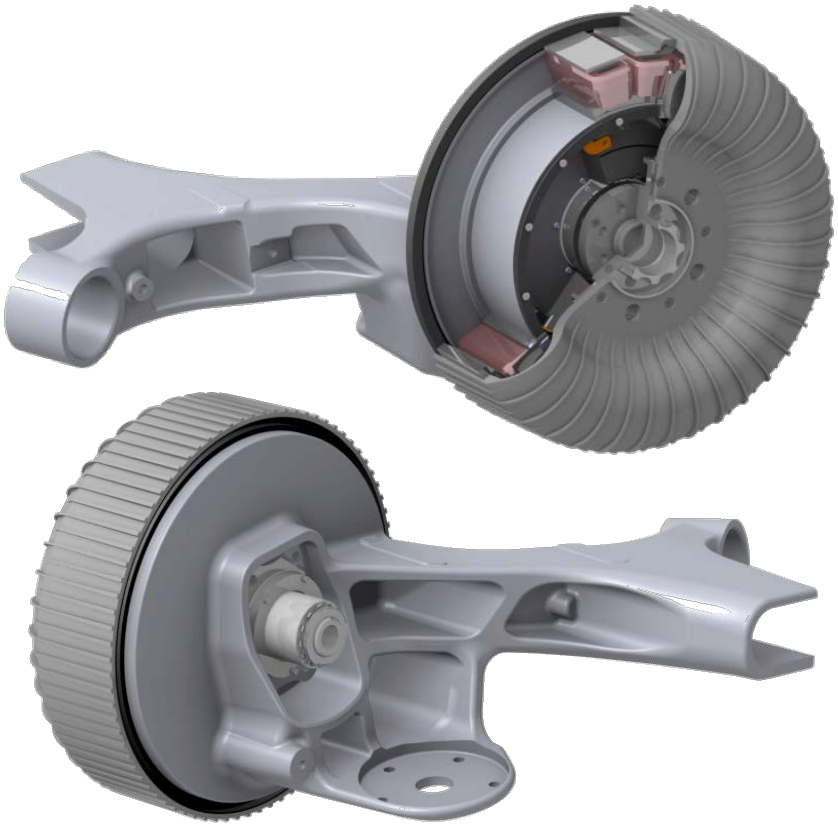
Verbundlenker-Hinterachse mit integriertem Radnabenantrieb

Zielsetzungen

- Integration von funktionalen Elementen eines Radnabenmotors in eine Verbundlenkerachse:
  - Aufnahme des Statorblechpakets
  - Kühlung von Motor und Leistungselektronik
- Integration der Leistungselektronik zur Minimierung von Zuleitungen und Vermeidung von EMV-Problemen
- Verwendung serientauglicher Fertigungsverfahren für alle Komponenten

Anwendungsmöglichkeiten (Auswahl)

- Vollelektrische Stadtfahrzeuge
- Einfache Hybridisierung bestehender Fahrzugkonzepte



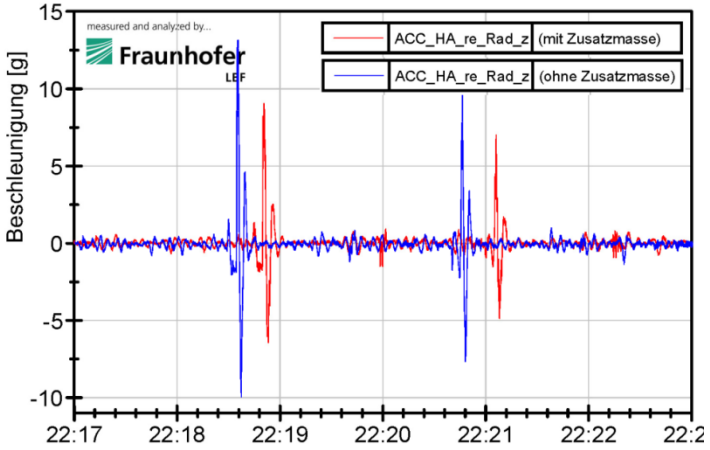
Verbundlenker-Hinterachse mit Radnabenmotor

© Fraunhofer IFAM

Fahrbetriebsmessungen zur Ermittlung des Einflusses ungefederter Massen

- Durchführung von Fahrbetriebs-messungen auf Prüfgelände mit unterschiedlichen Strecken und Geschwindigkeiten
- Ausrüstung eines Artega GT mit Zusatzmassen, Messrädern, Beschleunigungssensorik und DMS
- **Wesentliche Ergebnisse**
  - Erhöhung der dynamischen Radlast um +15%; maßgebliche Größe für den Schädigungseintrag in Bauteile des Fahrwerks und der Karosserie
  - Fahrdynamik und Fahrkomfort annähernd unverändert trotz höherer reifengefederter Massen

Artega GT während der Messfahrten



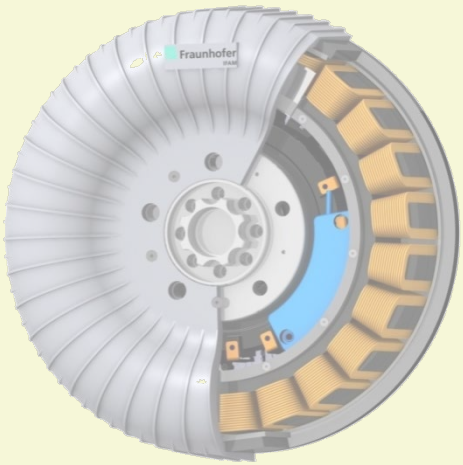
Beschleunigungen am Rad im Vergleich

© Fraunhofer IFAM

Fraunhofer IFAM

Von der Idee zum gießtechnisch umgesetzten Produkt

Gegossene Spulen



Radnabenmotor

Fahrzeugintegration

© Fraunhofer IFAM

Fraunhofer IFAM

Systemintegration / Gesamtfahrzeug

- Aufbau einer Plattform zur Systemintegration der im Rahmen der FSEM entwickelten Komponenten auf Basis des Artega GT
- Demonstratorfahrzeuge bündeln die technologischen Kompetenzen der Fraunhofer-Institute und dienen als wissenschaftliche Integrationsplattformen für Elektrofahrzeug-Komponenten
- Nachhaltige Nutzung für nachfolgende Forschungsprojekte der Fraunhofer-Institute insbesondere mit Industriepartnern

Basisfahrzeug Artega GT

© Fraunhofer IFAM

Wesentliche Aufgaben- und Entwicklungsumfänge innerhalb der Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität

- Spezifikation von Leistungsdaten, Komponenten und Nebenaggregaten
- Durchführung von Gefahren- und Risikoanalysen sowie FMEA zur systematischen Bewertung von Elektrofahrzeugen mit unabhängigen Mehrmotorenantrieben
- Ableitung eines übergreifenden Sicherheitskonzeptes und Umsetzung in der Fahrzeugsteuerung
- Package der Komponenten und Nebenaggregate
- Messfahrten zur Quantifizierung des Einflusses ungefederter Massen auf Fahrverhalten und Fahrsicherheit
- Spezifische Fahrwerksauslegung zur Kompensation erhöhter ungefederter Massen
- Integration und Inbetriebnahme aller Komponenten im Fahrzeug

Package Radnabenmotoren

Prüfgeländeversuche

© Fraunhofer IFAM

Fraunhofer IFAM

Demonstratorfahrzeuge Frecc0 1.0 und Frecc0 2.0

Frecc0 1.0

Auf Basis von Fraunhofer-Komponenten und prototypischer Zukaufteile, u.a.

- Zwei achsnahe Elektromotoren (Nennleistung je ca. 70 kW, Fa. Wittenstein)
- Zweigeteiltes Li-Ionen-Batteriesystem (37,6 kWh, 192 kW Nennleistung, Fa. Akasol)
- Zentrales Steuergerät (Fraunhofer ESK)
- Weitere Nebenaggregate (DCDC-Wandler, Innenraumheizung, Unterdruckpumpe usw.)

Frecc0 2.0

Auf Basis innerhalb der FSEM entwickelten innovativen Komponenten, u.a.

- Zwei Radnabenmotoren mit integrierter Leistungselektronik(55 kW Nennleistung, 700 Nm Nenn-Drehmoment)
- Zentrales Steuergerät
- OnBoard-Ladegerät
- Crashsicheres Batteriesystem

© Fraunhofer IFAM

Fraunhofer IFAM

Von der Idee zum gießtechnisch umgesetzten Produkt

Forschung und Entwicklung aus einer Hand

Fraunhofer IFAM

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM)

Dipl.-Wi.-Ing. Christoph Pille

Gruppenleiter Gießereitechnologie

E-Mail: christoph.pille@ifam.fraunhofer.de
Tel.: +49 (0)421 2246-227

Dipl.-Ing. Felix Horch

Gruppenleiter Komponentenentwicklung

E-Mail: felix.horch@ifam.fraunhofer.de
Tel.: +49 (0)421 2246-171

© Fraunhofer IFAM