

FORMGEBUNG UND FUNKTIONSWERKSTOFFE





ELEKTROMOBILE ENTWICKLUNGEN – VORSPRUNG DURCH SYSTEMFORSCHUNG

Am 2. September 2011 war es soweit: Die neuen Komponenten des »Fraunhofer electric concept car« – kurz Frecc0 – gingen auf Probefahrt. Zahlreiche Besucher konnten sich auf dem Abschlussevent in Papenburg auf der ATP-Teststrecke von der erfolgreichen Elektrifizierung des Antriebsstrangs zweier Demonstratorfahrzeuge überzeugen. Basis dieser beiden Elektroautos ist der Artega GT. In den Frecc0 1.0 wurde marktverfügbare Technik integriert und das Zusammenspiel dieser Komponenten optimiert. Im Frecc0 2.0 stecken von den Fraunhofer-Wissenschaftlern neu entwickelte Komponenten. Aufgebaut wurde ein funktionstüchtiges Elektroauto mit Fahrzeugkomponenten für Antrieb, Batteriesystem, Fahrzeugsteuerung und Netzintegration. Aber nicht nur den Fraunhofer-Wissenschaftlern dient der Frecc0 als Testplattform: Künftig können auch Automobilhersteller und Zulieferer den Frecc0 nutzen, um neue Komponenten zu testen oder weiterzuentwickeln.

Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität

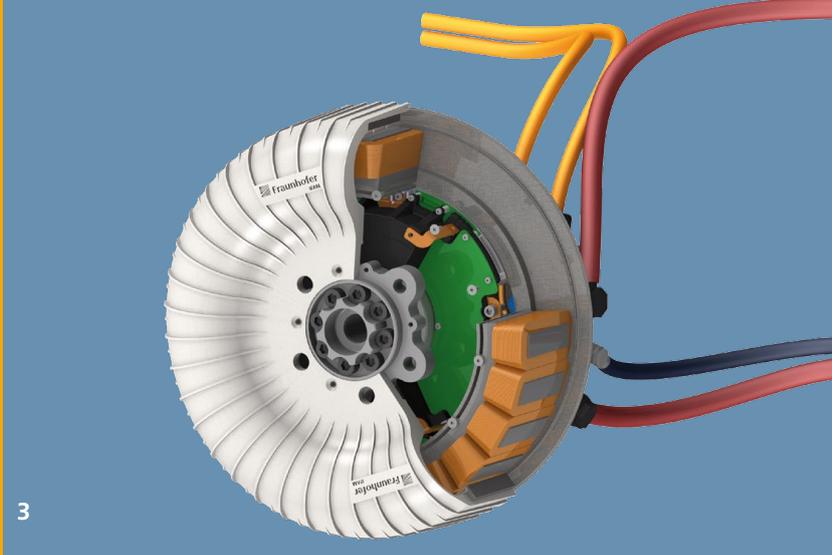
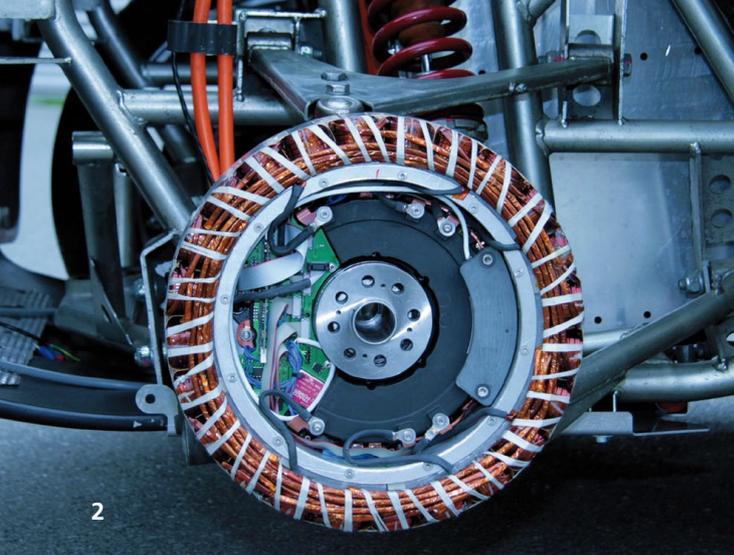
Mit der seit Sommer 2009 im Rahmen des Konjunkturpakets II durch den Bund geförderten »Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität – FSEM« wurde das Ziel verfolgt, im Zusammenwirken von über 30 Fraunhofer-Instituten innerhalb von knapp zwei Jahren ein Systemverständnis für die Elektromobilität zu erarbeiten. Das Fraunhofer IFAM war maßgeblich an der Entwicklung von Radnabenmotoren sowie dem Fahrzeugaufbau und der Systemintegration der innerhalb der FSEM entwickelten Fahrzeugkomponenten in das »Fraunhofer e-concept car type 0 – Frecc0« beteiligt. Die Entwicklung der Radnabenmotoren erfolgte in enger Zusammenarbeit der IFAM-Mitarbeiter mit den Fraunhofer-Instituten LBF, IWM und IISB. Am Aufbau der Demonstratorfahrzeuge arbeiteten neben Mitarbeitern des Fraunhofer IFAM Wissenschaftler des ESK, des LBF und des IISB zusammen.

Radnabenmotoren

■ Eine neue Generation von Radnabenmotoren

Ein wesentliches Ziel der FSEM war, einen Radnabenmotor mit integrierter Leistungselektronik als Traktionsantrieb für Elektrofahrzeuge unter serientauglichen Gesichtspunkten zu entwickeln. Die größte Herausforderung lag im Bau eines Motors mit einem zu herkömmlichen Antrieben vergleichbaren Drehmoment bei minimalem Gewicht, um die Höhe der ungefederten Masse und damit die fahrdynamischen Auswirkungen zu minimieren. Vor allem die Integration der notwendigen Leistungselektronik in den Bauraum des Motors stellte eine besondere Aufgabe, die darin bestand, den Radnabenmotor auch in einer 15-Zoll-Felge unterbringen zu können. Die

1 Fraunhofer-Demonstratorfahrzeug Frecc0 2.0 auf Testfahrt
(Foto: Ingo Daute, © Fraunhofer).



Freiheiten des unabhängigen Antriebs jedes einzelnen Rads, die sich durch den Einsatz von Radnabenantrieben ergeben, erhöhen die Anforderungen an die Sicherheit des Antriebsystems sowie des Gesamtfahrzeugs. Hierfür sind sowohl auf Seiten des Motordesigns sowie der Auslegung als auch bei der Motor- und Fahrzeugsteuerung entsprechende Maßnahmen wie Redundanz von Teilsystemen und entsprechende Rückfallebenen zu berücksichtigen.

Die geforderte hohe Leistungsdichte machte eine Flüssigkeitskühlung von Motor und Leistungselektronik erforderlich, für die ein geeignetes Dichtsystem entwickelt wurde, welches die auftretenden hohen Umfangsgeschwindigkeiten ertragen kann. Ebenso war die Konstruktion spezieller, den auftretenden Lasten standhaltender und gleichzeitig extrem leicht laufender Radlagereinheiten nötig. Bei der Fertigung aller Teilkomponenten war zu beachten, dass serientaugliche Verfahren eingesetzt werden können, sodass die Umsetzung der neuen Technologie zur Anwendung in großen Serien von Anfang an mit geringem Aufwand möglich ist.

Fahrverhalten mit Radnabenmotoren

Die Tests am realen Fahrzeug fingen nicht erst mit Fertigstellung der FreccO-Prototypen an. Bereits im Vorfeld ihrer Entwicklung wurden mit einem konventionell angetriebenen Artega GT umfangreiche Fahrbetriebsmessungen durchgeführt. Diese Tests erfolgten mit den Fragestellungen: Wie belasten die zusätzlichen reifengefederten Massen der Radnabenmotoren das Fahrwerk und wie wird dadurch die Fahr动力学 beeinflusst? Wie werden Gesamtfahrzeug und Einzelkomponenten bei realistischem Fahrbetrieb beansprucht? Die Fahrzeuge wurden für die Tests mit umfangreicher Sensorik ausgestattet, um Belastung und Fahrverhalten durch Messdaten objektiv zu bewerten. So wurde in einer Parameterstudie untersucht, welchen Einfluss die zusätzlichen Massen der Radnabenmotoren auf die Belastung des Fahrwerks haben. Die Masse der Radnabenmotoren wurde während dieser Tests mit

Zusatzgewichten am Radträger simuliert. Hierbei stellte sich heraus, dass sich die Kräfte im Rad und Fahrwerk durch die Zusatzmasse leicht erhöhen. Diese Zunahme ist aus Sicht der Betriebsfestigkeit der Komponenten zwar zu beachten, erfordert aber keine nennenswerten konstruktiven Änderungen am Fahrwerkskonzept. Die Beschleunigungsamplituden des Rads senken sich im Gegensatz zu den Lasten sogar leicht ab, was sich positiv auf die Lebensdauer der Leistungselektronik im Radnabenmotor auswirkt. Aus Sicht der Fahr动力学 kann durch die Montage der Radnabenmotoren-Zusatzmasse an der Hinterachse keine spürbare Verschlechterung des Fahrverhaltens festgestellt werden.

Fertigungstechnische Optimierung

Der Fraunhofer-Radnabenmotor ist als permanentmagnet-erregte Synchronmaschine in Außenläuferbauweise realisiert. Die verwendeten Hochleistungsmagnete auf Basis von Neodym-Eisen-Bor ermöglichen ein hohes Drehmoment bei geringem Gewicht und gutem Wirkungsgrad. Die innen liegenden Spulen werden durch das flüssigkeitsdurchströmte Statorgehäuse aus Aluminium gekühlt, um die auf kleinem Raum anfallende Verlustwärme sicher abzuführen. Das funktionsintegrierte Statorgehäuse dient gleichzeitig zur Aufnahme und Kühlung der Elektronikeinheit mit Leistungselektronik und Motorsteuergerät.

Zur Herstellung des Statorgehäuses kam das »Lost-Foam-Gießverfahren« zum Einsatz. Es ermöglicht die endkonturnahe Fertigung von komplexen Bauteilen mit Hinterschneidungen und erlaubt damit die direkte Integration von Kühlkanälen in das Statorgehäuse. Die Anzahl der erforderlichen Dichtflächen reduziert sich auf ein Minimum und es können die für die

2 Stator des Radnabenmotors montiert am FreccO 2.0 ohne Rotorglocke.

3 Schnittmodell des Radnabenmotors in der Konstruktion.



4



5

hohe Leistungsdichte notwendigen, hohen Kühlleistungen realisiert werden. Das »Lost-Foam-Verfahren« eignet sich gleichermaßen für die Fertigung von Prototypen und großen Stückzahlen, was eine direkte Überführung des Statorgehäuses in eine Serienproduktion möglich macht. Die Rotorglocke wurde druckgussgerecht ausgelegt, um im späteren Verlauf eine kostengünstige Fertigung im Druckgussprozess zu ermöglichen. Durch die Gewichtsoptimierungen in Statorgehäuse und Rotorglocke konnte das Gesamtgewicht der Gehäusekomponenten auf ein Minimum reduziert werden.

Bauraum optimal genutzt

Zur Erhöhung der funktionalen Sicherheit wurde der Motor aus zwei voneinander weitgehend unabhängig betreibbaren Teilsystemen aufgebaut. Trotz des erhöhten Komplexitätsgrads durch die Integration von zwei Umrichtern und Wicklungssystemen gelang der Einbau ohne eine Erhöhung des Bauraumbedarfs. Mögliche auftretende Fehler wurden bei der elektromagnetischen Auslegung berücksichtigt, sodass ein unzulässiges Bremsen oder sogar Blockieren des Rads beispielsweise bei einem Kurzschluss ausgeschlossen werden kann.

Durch die vom Fraunhofer IISB entwickelte integrierte Leistungselektronik wird die Anzahl der notwendigen Zuleitungen zum Betrieb des Motors minimiert. Ein zentrales Steuergerät agiert im Fahrzeug als Drehmomentkoordinator, der den durch Lenkwinkel, Gas- und Bremspedal vorgegebenen Fahrerwunsch unter Einbezug der fahrdynamischen Anforderungen, dem Batteriezustand und der aktuellen Temperatur von Motor und Leistungselektronik an die Radnabenmotoren überträgt. Als Übertragungsprotokoll wird der im Kfz-Bereich etablierte CAN-Bus verwendet. Zur Ansteuerung des Motors kommt ein modernes, wirkungsgradoptimiertes Regelungsverfahren zum Einsatz. Die geschwindigkeits- und drehmomentabhängigen Arbeitspunkte wurden durch die elektromagnetischen Auslegungsrechnungen und Messungen an der Maschine ermittelt und berücksichtigen Temperatur- und Sät-

tigungseinflüsse. Neben einer Steigerung des Wirkungsgrads ist so auch sichergestellt, dass das vom Fahrer gewünschte Drehmoment reproduzierbar und mit hoher Genauigkeit an den Rädern ankommt. Dies ist aus Sicherheits- und Fahrkomfortgründen ein wichtiger Aspekt.

Herausforderung Dichtungskonzept

Eine wesentliche Herausforderung bestand in der Entwicklung eines Dichtungskonzepts für den Radnabenmotor. Bedingt durch die Außenläuferbauweise und die glockenartige Rotor-konstruktion ist die zuverlässige Abdichtung gegen Eindringen von Schmutz und Feuchtigkeit auf einem großen Außendurchmesser mit entsprechend hohen Umfangsgeschwindigkeiten von bis zu 30 m/s notwendig. Dies muss für den dynamischen Fall im Fahrbetrieb, aber auch im Stillstand, z. B. beim Abstellen des Fahrzeugs in einer Pfütze, gewährleistet sein. Für den Radnabenmotor wurden verschiedene Dichtungskonzepte und Materialpaarungen systematisch untersucht, optimiert und im Praxisbetrieb erprobt.

Strangzahl der Wicklung	6
Dauerleistung	55 kW
Bemessungsdrehmoment bei 550 U/min	700 Nm
Maximales Drehmoment (kurzzeitige Überlast)	900 Nm
Nutzahl des Stators	24
Polzahl des Rotors	22
Außendurchmesser gesamter Radnabenmotor	364 mm
Tiefe gesamt	105 mm
Axiale Bautiefe (Abstand Radträger zu Felgenflansch)	88 mm
Gesamtmasse	42 kg
Gesamtwirkungsgrad im Bemessungspunkt	92 %

Tab. 1: Technische Daten des Fraunhofer-Radnabenmotors.



■ Bewährungsproben auf dem Teststand

Über den gesamten Entwicklungsprozess wurde der Radnabenmotor durch numerische Simulationen konstruktionsbegleitend den im Rad zu erwartenden mechanischen und elektrischen Lasten ausgesetzt, um alle Anforderungen hinsichtlich Betriebsfestigkeit und Zuverlässigkeit zu erfüllen. Die elektromagnetische Auslegung erfolgte ebenfalls mithilfe numerischer Simulationsverfahren, um die Leistungsdaten unter den gegebenen Randbedingungen zu optimieren. Zum Abschluss der Arbeiten erfolgten intensive Prüfstandtests. Zunächst wurde auf dem sechsachsigen Reifenprüfstand W/ALT des Fraunhofer LBF das Verhalten der Prototypen unter realistischen Radaufstands- und Seitenkräften geprüft. Die auftretende Verformung von Lager, Rotorglocke und die resultierende Verformung des Luftspalts konnten aufgenommen und mit den numerischen Simulationen verglichen werden. Dabei zeigten sich keine unzulässigen Verformungen. Anschließend wurde das elektrische Betriebsverhalten des Radnabenmotors auf dem Motorenprüfstand am Fraunhofer IFAM an einer simulierten Batterie getestet.

Demonstratorfahrzeuge Frecc0 1.0 und 2.0

■ Chance für neue Fahrzeugkonzepte

Aus heutiger Sicht wird der Verbrennungsmotor auch in den nächsten Jahren als Antrieb in Kraftfahrzeugen zum Einsatz kommen und weiter optimiert werden. Seine Bedeutung als alleinige Lösung zur Erzeugung von Antriebsenergie wird jedoch abnehmen. Derzeit bedienen Umbauten von konventionellen Fahrzeugen oder Kleinserien die Nachfrage nach Elektrofahrzeugen. Das führt dazu, dass die Mehrzahl der existierenden Elektrofahrzeuge die seit den Anfängen des Automobilbaus bekannte Antriebstopologie besitzen: Ein zentraler Motor erzeugt das Antriebsmoment, das über Getriebe

und Differenzial auf zwei oder mehr anzutreibende Räder übertragen wird. In der Konsequenz bedeutet die zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstrangs eine Umstellung für die Produktions- und Fertigungstechnik und ein Wandel im Produktportfolio. Elektromobilität wird zu einem Umdenken und einer Neuausrichtung in vielen Branchen führen. Mit dieser Umstellung werden intelligente Fahrzeugkonzepte entwickelt und es bietet sich die Chance, »das Auto neu zu denken«.

■ Aufbau der Fahrzeuge

Die Frecc0-Demonstratoren basieren auf einem Artega GT, wobei im Fahrzeug Frecc0 1.0 am Markt verfügbare Komponenten für die Umrüstung zum Elektrofahrzeug zum Einsatz kamen. Auch Batteriesystem und Ladeinfrastruktur sind mit marktverfügbarer Technologie umgesetzt worden. Der Frecc0 1.0 verfügt über zwei radnahe, getriebeübersetzte Antriebsmotoren. Der Frecc0 2.0 basiert auf den Komponenten, die innerhalb der Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität entwickelt wurden. Hierzu zählen Radnabenmotoren mit hoher Drehmomentdichte, ein Batteriesystem sowie ein On-Board-Ladegerät und ein externes Schnellladegerät. Die Kommunikation der Komponenten untereinander erfolgt über ein zentrales Steuergerät. Beim Frecc0 2.0 mit seinen Radnabenmotoren waren besondere Anpassungen erforderlich: Gemeinsam mit der Artega Automobil GmbH, dem Hersteller des Basisfahrzeugs, haben die Fraunhofer-Forscher ein Fahrwerkskonzept entwickelt, das die Verwendung der mechanischen Serienbremsanlage auf der Innenseite des Radträgers ermöglicht. Dabei ist es gelungen, eine Fahrdynamik zu erhal-

- 4 Montierter Radnabenmotor am Frecc0 2.0 mit Felge und Bereifung.
- 5 Fraunhofer-Demonstratorfahrzeug Frecc0 2.0 auf dem ATP-Prüfgelände in Papenburg (Foto: Ingo Daute, © Fraunhofer).
- 6 Fraunhofer-Demonstratorfahrzeuge Frecc0 1.0 und 2.0 im Vergleich auf dem ATP-Prüfgelände (Foto: Ingo Daute, © Fraunhofer).

ten, die dem Verhalten des Serienfahrwerks gleicht. Mit den beiden Frecc0-Versionen konnte erstmals ein Antriebskonzept mit Radnabenmotoren und mit zwei radnahen Motoren untersucht werden. Da sich beide Konzepte unterscheiden, bringt ihre Erprobung im realen Fahrzeug Erkenntnisse für die optimale Gestaltung künftiger Elektroautos. Die Ladeinfrastruktur im Frecc0 2.0 ermöglicht zudem eine umfassende Netzintegration und die praktische Erprobung eines Schnellladekonzepts. Mit mehreren verteilten statt eines zentralen Motors kann beispielsweise »Torque Vectoring« umgesetzt werden. Bei dieser Technik bringt eine angepasste Drehmomentverteilung an den Rädern der Hinterachse ein verbessertes Fahrverhalten in der Kurve. Da die Steuerung hierfür ausgiebig erprobt werden musste, sind beide Prototypen mit einem Mehrmotorenantrieb ausgestattet.

Funktionale Sicherheit

Der Frecc0 verfügt über eine modular aufgebaute Bordelektronik auf Grundlage des bestehenden Artega-GT-Bordnetzes, die eine einfache Integration neuer Komponenten ermöglicht. Dies erfordert die detaillierte Abstimmung der Schnittstellen und der Kommunikation von Komponenten untereinander. Die Funktion der übergreifenden Fahrzeugsteuerung übernimmt im Frecc0 das vom Fraunhofer ESK entwickelte Zentrale Steuergerät (ZSG). Als zentrale Steuereinheit interpretiert es den Fahrerwunsch und setzt ihn über die Antriebssteuerung im Fahrzeug entsprechend um. Es steuert die Anbindung der Fraunhofer-Komponenten an das bestehende Fahrzeug, übernimmt das zentrale Zustandsmanagement, die Ansteuerung der Kühlsysteme für Radnabenmotoren und Batteriesystem und kontrolliert die Zwischenkreisvorladung.

Weiterhin musste berücksichtigt werden, dass bei Elektrofahrzeugen zunehmend sicherheitskritische Funktionen wie die Motorsteuerung und die Batteriesysteme rein über Software angesteuert werden. Die Bordnetz-Architektur des Frecc0 ist daher so sicher gestaltet, dass ein Fehlverhalten einer Komponente

keine kritischen Systeme beeinflussen kann bzw. fehlerhafte Systeme erkannt und abgeschaltet werden. Das Sicherheitskonzept basiert auf einer detaillierten Gefahrenanalyse und Risikobewertung nach dem neuen ISO (DIS) Standard 26262 bzw. IEC 61508 (DIN EN) für funktionale Sicherheit. Für jede der Fraunhofer-Komponenten wurde – maßgeblich durch das Fraunhofer LBF – eine Fehler-Möglichkeiten- und Einflussanalyse (FMEA) nach VDA-Standard durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Sicherheitskonzept für den Frecc0 berücksichtigt.

Mehrwert durch Systemforschung

Künftige Generationen von Elektrofahrzeugen müssen für ihre Nutzer mindestens genauso zuverlässig, sicher und komfortabel sein wie konventionell betriebene Fahrzeuge. Gleichzeitig soll ihre Produktion wirtschaftlich sein. Zahlreiche Aspekte müssen hierfür bearbeitet werden – von neuen Antriebskonzepten, über das Batterie- und Ladesystem hin zur Fahrzeugsteuerung und der Anbindung der Fahrzeuge an die Infrastruktur.

Die intensive Kommunikation der Fraunhofer-Mitarbeiter untereinander hat das gegenseitige Verständnis der jeweiligen inhaltlichen und technischen Herausforderungen gesteigert und Synergieeffekte hervorgerufen, die schneller zu technisch ausgereifteren Entwicklungen führen. Nur so können die Entwicklungsziele bei der Herstellung und dem Betrieb des Fahrzeugs herausgearbeitet und innovative Fraunhofer-Lösungen entwickelt werden.

In der Bildung thematischer Cluster und in der themenspezifischen Projektzusammenarbeit innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft liegt ein Schlüssel für die Formulierung neuer Fragestellungen für Forschungsarbeiten zur Elektromobilität im Allgemeinen und zur Entwicklung von Komponenten im Speziellen. Beide Demonstratorfahrzeuge konnten Anfang

7



8



September 2011 im Rahmen einer Abschlussveranstaltung der Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität auf dem ATP-Prüfgelände in Papenburg vorgestellt und getestet werden.

Entwicklungsplattformen für die Elektromobilität

Dank Frecc0 1.0 und 2.0 als wissenschaftliche Integrations- und Testplattformen profitieren künftige Arbeiten von den gesammelten Erfahrungen, den kompletten CAD-Datensätzen für das »Gesamtsystem Elektrofahrzeug«, dem Zugriff auf die Steuerungssoftware sowie auf alle fahrzeuginternen Kommunikationsstrukturen. Getestet und verglichen werden können aktuelle Fraunhofer-Entwicklungen auf dem Gebiet der Elektromobilität mit entsprechenden Produkten kommerzieller Anbieter ebenso wie kundeneigene Neuentwicklungen. Durch den modularen Aufbau der Testplattformen sind auch extern entworfene Fahrzeugkomponenten in der Regel leicht in das System zu integrieren und im praktischen Fahrzeugeinsatz zu testen. Mit den institutsübergreifenden Kompetenzen in thematisch orientierten Fraunhofer-Konsortien werden auf der Basis dieser Entwicklungsplattformen gegenwärtig sowohl eigene, weiterführende Fragestellungen, wie beispielsweise der optimierten Absicherung des Fahrverhaltens bei Mehrmotorenantrieb in kritischen Situationen, als auch völlig neue Entwicklungsprojekte der Elektromobilität gemeinsam mit Partnern aus der Industrie bearbeitet.

Auftraggeber

Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung.



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

KONTAKT

Dipl.-Ing. Franz-Josef Wöstmann

Telefon +49 421 2246-225

franz-josef.woestmann@ifam.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. Felix Horch

Telefon + 49 421 2246-171

felix.horch@ifam.fraunhofer.de

Dr. Hermann Pleteit

Telefon +49 421 2246-199

hermann.pleteit@ifam.fraunhofer.de

Institut

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und

Angewandte Materialforschung IFAM,

Bereich Formgebung und Funktionswerkstoffe, Bremen

7 *Montierter Radnabenmotor am Frecc0 2.0 mit Felge und Bereifung.*

8 *Fraunhofer-Demonstratorfahrzeug Frecc0 2.0 auf dem ATP-Prüfgelände in Papenburg (Foto: Ingo Daute, © Fraunhofer).*