

Schlussbericht des Verbundes

- öffentlich einsehbar -

InnoBlech

Bleche und Komponenten aus magnetischen und Struktur-
Werkstoffen für hocheffiziente E-Antriebe

Zuwendungsempfänger: Siemens AG Ford-Werke GmbH Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) Technische Universität Darmstadt (TUDa) assoziierter Projektpartner: EKRA Automatisierungssysteme GmbH	Förderkennzeichen: 01MV21021A 01MV21021B 01MV21021D 01MV21021E
Kontakt Konsortialführer: Dr. Gotthard Rieger	Tel.: +49 89 780522366 Email: gotthard.rieger@siemens.com
Laufzeit des Vorhabens: von: 01.07.2021 bis: 31.12.2024	
Datum Bericht: 14.07.2025	

Inhalt

1.	Kurzddarstellung.....	3
1.1.	Aufgabenstellung	5
1.2.	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	5
1.3.	Planung und Ablauf des Vorhabens	5
1.4.	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	6
	Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden.....	7
	Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste	7
1.5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
2.	Eingehende Darstellung	7
2.1.	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	7
2.2.	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	10
2.3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	12
2.4.	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	13
2.5.	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	15
2.6.	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 11 der Nebenbestimmungen.....	16

1. Kurzdarstellung

Die Herstellung von Blechen und Komponenten aus kombinierten magnetischen und Strukturwerkstoffen wurde für E-Antriebe im Industriebereich (Reluktanzmotor) und im Elektrofahrzeug (PSM-Motor) entwickelt. Für den Anwendungsfall eines neuartigen 2K-Rotordesigns für einen Reluktanzmotor konnten entsprechend des Arbeitsplans die Materialauswahl der co-sinterfähigen magnetischen und nicht-magnetisierbaren Sinterstähle (Pulver) durch Untersuchungen zum Schwindungsverhalten bei den Projektpartnern IFAM, TUDa und Siemens zunächst eingegrenzt werden. Insbesondere wurde auf Basis neuer Erkenntnisse zum Einfluss des Schwindungs-Onsets in der Sinterung neue ferritische Eisenlegierungen untersucht. Die unmagnetische Legierung, die vom Unterauftragnehmer GKN Sintermetals erprobt wurde, musste wegen der auftretenden Entkohlung in der Sinteratmosphäre mit Nickel angereichert werden. Dieser modifizierte Edelstahl wurde später nochmals als Legierung hergestellt und als gasverdüstertes Pulver bereitgestellt. Durch den Ersatz von Kohlenstoff als Austenitbildner durch weitere Nickelanteile wurde ein wichtiger Schritt zur prozessstabilen Übertragbarkeit auf die Anlagen und Prozesse bei Siemens gelegt. In Zusammenarbeit der Entwicklungspartner für die Prozessierung (IFAM und Siemens) wurden eine Vielzahl von Proben aus eisenbasierten Entwicklungspulver und unmagnetischen Stählen (434L, 316L) hinsichtlich der Schwindung und Phasenanteilen des Austenits und Ferrits charakterisiert. Bei der TU Darmstadt lag der Fokus auf der Material- und Sinteroptimierung des Fe-Co für das Motordesign von FORD (s. folgende Abschnitte). Das Ziel der Optimierung der magnetischen Kennwerte bei gleichzeitiger Kompatibilität während der Co-Sinterung wurde durch Änderung der Zusammensetzung und Wärmebehandlung von Fe-Co Proben durchgeführt.

Co-gesinterte hybride Rotorbleche mit Reineisen und Fe-Co konnten bei Verwendung von vorlegierten Eisenkobaltpulvern erfolgreich hergestellt werden. Die magnetischen Eigenschaften der Fe-Co Bleche blieben jedoch deutlich hinter den Erwartungen zurück. Darauf aufbauend wurde die Prozessierung von Fe-Co-Blechen bei Verwendung von Elementarpulver in den Fokus genommen. Mit diesem Ansatz konnte nachgewiesen werden, dass sintertechnisch hergestellte Fe-Co Bleche vergleichbare magnetische Eigenschaften wie kommerziell erhältliche gestanzte Bleche haben.

Der ursprüngliche Ansatz die Zusammensetzung über die Mischung von Kobalt und Eisen Elementpulvern zu optimieren wurde jedoch verworfen, da die Pulverbeschaffenheit und Legierungszusätze einen wesentlichen Einfluss auf die Sintereigenschaften haben. Die Zusammenarbeit zwischen dem IFAM und der TU Darmstadt führte zu einer Anpassung des Sinterprozesses für das Fe-Co- und Fe-Si System. Durch die Kombination zweier kommerziell erhältlicher Pulver konnte eine erfolgreiche Ko-Sinterung realisiert werden. Die zunächst auftretende Porosität nach dem Sintern konnte durch angepasste Temperatur und Haltezeit verbessert werden. Allerdings zeigte die Charakterisierung der magnetischen Eigenschaften mittels ringförmiger Proben im Wechselfeld sowie der Kerr-Mikroskopie noch Optimierungspotenzial. Die magnetischen Kenngrößen liegen in einem technisch annehmbaren Bereich, sind jedoch noch von den kommerziellen magnetisch-optimierten Fe-Si und Fe-Co Blechen entfernt.

Von den Partnern IFAM und Siemens konnte mit den vom Unterauftragnehmer Fa. Koenen bereitgestellten Sieben, Druckversuche und Sinterserien durchgeführt werden und schließlich mit dem Zieldesign des Reluktanzrotors gearbeitet werden. Dies führte zur erfolgreichen Bereitstellung durch

Siebdruck und Co-Sinterung der hybriden Strukturen, die eine Einsatzfähigkeit für einen Demonstratoraufbau erkennen ließen.

Zur Charakterisierung der eingesetzten Materialien in verschiedenen Stufen der Prozessierung wurden sowohl makroskopische als auch mikroskopische Untersuchungen durchgeführt. Im unmagnetischen Austenit wurde die unerwünschte Ferrit-Bildung mittels Röntgendiffraktometrie an der TU Darmstadt untersucht und die Phasenanteile bestimmt.

Bezüglich der magnetischen Eigenschaften wurde der Aufbau zur lokalen Messung von magnetischen Eigenschaften vom Unterauftragnehmer Brockhaus Messtechnik unter Koordination von FORD für die Prüfung der Legierungen genutzt. Mit Messungen zum Spannungseinfluss an konventionellen Blechen wurde die Möglichkeit auch für gedruckte Bleche geschaffen, die insbesondere bei Druckspannung höhere Verlusteigenschaften zeigen.

Mit Hilfe eines Stanzteilesensors (Fa. Brockhaus) bei Siemens wurden vergleichende magnetische Eigenschaften von Hybridblechen bestimmt. Dies wurde zunächst zur Bestimmung der Ferritanteile, im Verlauf des Projektes dann aber überwiegend zur Überwachung und Sicherstellung der Einhaltung der magn. Spezifikation genutzt.

Die mechanischen Festigkeiten in dünnen gesinterten Blechen liegen - vermutlich durch Querschnittsschwankungen und/oder Poren- unterhalb der Werte des Massivmaterials. Bei zusätzlicher Priorisierung einer ausreichenden Dehnung von > 5% ergeben sich für den Stahl 434I mit erhöhtem Nickelgehalt Festigkeiten, die schon nahe an der Spezifikation liegen und aus Sicht der Motorauslegung für Prototypen geeignet sind.

Zur Bestimmung der Dauerfestigkeit wurden für die gewählten Komponenten-Materialien mit einem vorhandenen Messplatz im Siemens Konzern Ausfall-Statistiken in Form von Wöhlerkurven bestimmt, die nach Abschluss der Serien für die Einzelmaterialien und das 2k System ausgewertet wurden. Dabei wurde für die Eisenkomponente eine Dauerfestigkeit (mit > 10^6 Lastzyklen) von knapp 50% der statischen Festigkeit bestimmt.

In mehreren Druckserien im finalen Reluktanzrotor-Design wurde eine ausreichende Zahl von Gutteilen für den Aufbau eines Demonstratormotors hergestellt. Das Rotor-Blechpaket wurde im Musterbau des Motorenwerks aufgebaut und auf Endmaß bearbeitet, mit Welle versehen und die Unwucht beseitigt (s. Abb. 2.1).

Im Rahmen dieses öffentlich geförderten Projekts wurde die Anwendung von hybriden Werkstoffen in Rotoren von Permanentmagnet-Synchronmotoren (PSM) für Elektrofahrzeuge untersucht. Ziel war es, durch den gezielten Einsatz von teuren, hochperformanten FeCo-Legierungen in Kombination mit kostengünstigeren FeSi-Legierungen die magnetischen Eigenschaften zu optimieren und gleichzeitig den Bauraum zu verkleinern oder das Drehmoment zu erhöhen. Simulationsergebnisse zeigten ein Potenzial von etwa 7 % Verbesserung in diesen Bereichen. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Entwicklung von miniaturisierten Testmethoden zur Charakterisierung der magnetischen Eigenschaften der neuartigen, gesinterten Werkstoffkombinationen, da konventionelle Testverfahren aufgrund der geringen Probengrößen nicht geeignet waren.

Die Ergebnisse zeigten, dass FeSi-Werkstoffe gut mittels Siebdrucks verarbeitet und gesintert werden können. Die Verarbeitung von FeCo erwies sich jedoch als deutlich anspruchsvoller als erwartet, was zu Überlegungen führte, alternative, amagnetische Werkstoffe in Betracht zu ziehen. Trotz der Herausforderungen konnten Rotorbleche im hybriden Design hergestellt werden. Diese wiesen jedoch

noch Schwachstellen wie Risse und Verzug auf, sodass ein vollständiger Rotor-Aufbau und eine anschließende Überprüfung nicht möglich waren. Durchgeführte Öleinlagerungstests zeigten jedoch, dass die Hybridbleche in Kombination mit ATF (Automatic Transmission Fluid) keine Korrosion aufweisen, was einen wichtigen Aspekt für die spätere Anwendung darstellt. Die Gewichtszunahme der Bleche nach der Öleinlagerung deutet auf die Porosität der gesinterten Materialien hin.

1.1. Aufgabenstellung

Der Bedarf an hocheffizienten Elektromotoren steigt rasch an: sowohl für den Bereich der Industriemotoren durch die fortschreitende Automatisierung von Produktionsanlagen und Robotik als auch für Antriebe in der dynamischen Entwicklung der Elektromobilität. Bereits geringe Effizienzsteigerungen haben daher ein Einsparpotenzial an CO₂ in der Größenordnung von 100.000 Tonnen CO₂ allein in Deutschland. Die unterschiedlichen Motortypen benötigen allesamt hocheffiziente Elektrobleche, die mit der im Projekt entwickelten Technologie erheblich verbessert werden können.

Die Bereitstellung verbesserter mechanischer und magnetischer Blechpakete für Rotoren für Reluktanz- oder PMSM-/IPM-Motoren ist zentrales Entwicklungsziel des Projektes. Basierend auf der Drucktechnologie sollen 2-komponentige Bleche entwickelt werden, die neben der Leistungsdichte zur Verringerung der Geräuschentwicklung in Reluktanzmotoren beitragen können, eine Verbesserung der Stabilität in unterschiedlichsten Umgebungsbedingungen zeigen, sowie hinsichtlich thermischer und mechanischer Belastungsgrenzen verbessert sind sowie eine wirtschaftlichere Herstellung und flexiblerer Wechsel auf individuelle Kundendesigns ermöglichen.

Dies führt u.a. zu folgenden Aufgaben.

- Steigerung der mechanischen Stabilität
- Verringerung der magnetischen Streuverluste

Die geringere Stabilität aktueller Reluktanz- und IPM-Blechschnitte limitiert die Drehzahl und damit die Leistung. Diese führt zu Schwingungen (Geräuschentwicklung) und begrenzt die Wechsellastfähigkeit.

1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt deckt einen großen Teil der Wertschöpfungskette ab: Systemhersteller in der Automatisierungstechnik und Automobilhersteller mit eignen Abteilungen zum Elektromotorendesign und zur additiven Herstelltechnik (Siemens, Ford). Dieses industrielle Konsortium wurde durch hochkompetente Forschungseinrichtungen und Technologielieferanten komplettiert (IFAM, TuDa). Zusätzlich wurde das Konsortium durch drei Unterauftragnehmer aus dem Bereich Pulver, Drucktechnik und magnetische Messtechnik ergänzt.

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Zu Beginn des Projektes werden in enger Abstimmung aller Verbundpartner die Rahmenbedingungen und Spezifikationen der herzustellenden Elektrobleche festgelegt. In einer ersten Entwicklungsphase wird der Verdichtungs- und Schwindungsprozess im Hybridwerkstoff simuliert (Siemens), um gezielt geeignete Pulverfraktionen bzw. Sinterhilfsmittel für eine verzugsfreie Ko-Sinterung auswählen zu können. Dazu werden geeignete Basisuntersuchungen zum Schwindungsverhalten und weiteren

Einflüssen durchgeführt und bereitgestellt (IFAM). Die Materialauslegung, insbesondere für die hochmagnetisierbaren Fe-Co Legierungen wird durch Arbeiten and der TU Darmstadt vorbereitet.

In einer nachfolgenden Entwicklungsphase wird das Hybridmaterial in Drucktechnik weiterentwickelt, um großformatigere Elektrobleche bzw. Rotor-Blechschnitte (Durchmesser bis max. 200 mm) zuverlässig herstellen zu können. Bei den Technologietreibern Siemens und IFAM werden dazu Siebdruckpasten entwickelt, Testmuster gedruckt und gesintert. Im Themenfeld „Charakterisierung und Zuverlässigkeitstests“ werden Testproben und endkonturnahen Rotorbleche elektrisch, magnetisch und mechanisch charakterisiert und die Eigenschaften hinsichtlich Langzeitstabilität untersucht und bewertet (Siemens, Ford, TU Darmstadt).

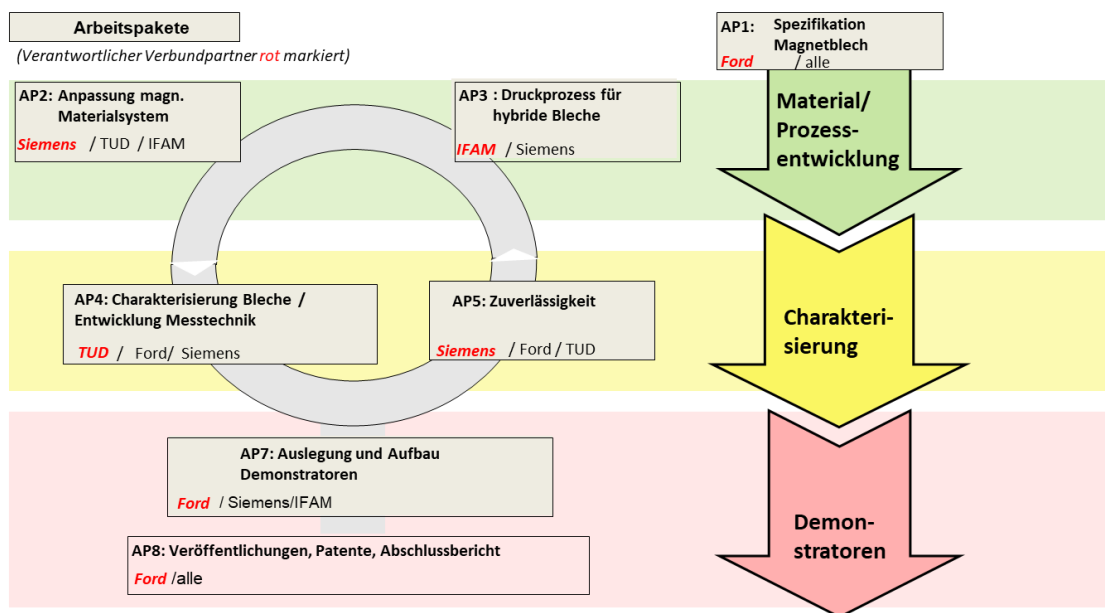


Abb. 1.1. Planung Arbeitspakete, Aufgabenverteilung und Ablauf des Projektes

1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Elektrische Maschinen sind -wie in Kap. 1.1. beschrieben- von großer Bedeutung für die Antriebstechnik. Den höchsten Marktanteil besitzt der Asynchronmotor mit ca. 90 %. In den letzten Jahren haben jedoch Antriebe mit Nutzung des Reluktanzprinzips, d.h. Reluktanz - bzw. IPM-Maschinen, zunehmend an Bedeutung gewonnen. Die Rotor-Blechstapel werden im Stand der Technik aus einem homogenen weichmagnetischen Material (meist FeSi) ausgeführt und besitzen aufgrund dieser Bauweise starke Einschränkungen. In Reluktanzmotoren müssen Luftschlitze eingebracht werden die als Flussperren dienen und eine magnetische Anisotropie, die die Drehmomentbildung bedingt, aber die Stabilität einschränkt. Hier -wie in anderen Blechschnitten- führen direkte magnetische Verbindungen zu unerwünschten Streuflüssen.

Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Diverse Verfahren und Schutzrechte sowohl für die Herstelltechnik als auch das Design (z.B. EP000002876784)

Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

diverse Fachliteratur

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zusammenarbeit mit der Begleitforschung (u.a. Veröffentlichungen zu Konsortialtreffen).

2. Eingehende Darstellung

2.1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Im Folgenden sind die Teilvorhaben der Partner mit den Buchstaben A-E gekennzeichnet. Aufgrund des Ausscheidens eines Partners fehlt das Teilvorhaben C.

Teilvorhaben A (Siemens): Material-Simulation, Zuverlässigkeit und Motor-Demonstrator

Tabelle 2.1: Verwendung Teilvorhaben A

Geplantes Ergebnis	Erzieltes Ergebnis
Motor-Demonstrator (Reluktanz) mit erhöhtem Drehmoment, geringen Verlusten und verminderter Geräuschemission	Ergebnisse erst nach Abschluss des Projektes
Tool zur Ableitung von geeigneten Material- und Pulvereigenschaften: Sintersimulationsmodell für Hybridkomponenten	Das Sintermodell nach Olevsky wurde implementiert und für Multi-Material Ansätze erweitert
Optimierte magnetische Flussführung, geringe Eisenverluste und hohe Zugfestigkeit bzw. Streckgrenze (Rp0.2 > 450 MPa)	Modifizierter Stahl 434L-Ni: Rmax (UTS): ~520 MPa, Rp0.2: 340 MPa; Dehnung: ~6%
Stabilität der hybriden Komponenten in beschleunigten Lebensdauertests (> 20.000 Betriebsstunden)	Erreicht: Dauerfestigkeit der Einzelkomponenten (mit > 10 ⁶ Lastzyklen) ~ 50% der statischen Festigkeit, vergleichbar zu konv. Elektroblechen

Mit Hilfe experimenteller Untersuchungen zum Schwindungsverhalten und der Simulation zu mechanischen Belastungen aus Schwindung und bei hohen Drehzahlen wurde ein optimiertes Design entwickelt und durch Materialanpassung planar gesinterte 2-komponenten Bleche mit den erforderlichen Eigenschaften hergestellt.

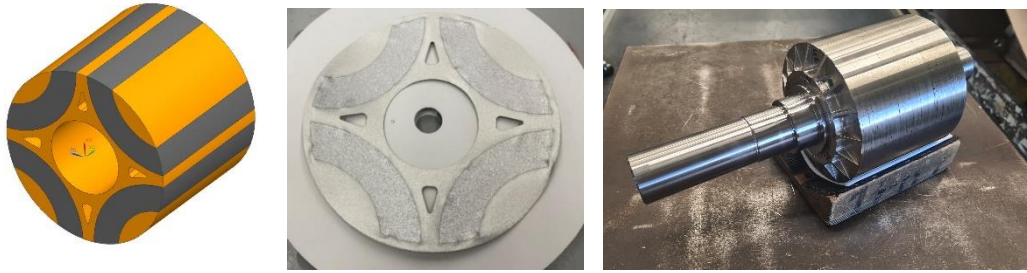


Abb 2.1 Hybriddruck des 2k-Rotorblechs im finalen Reluktanz-Design und Aufbau des Rotors (links: CAD-Design, Mitte: 2K-Einzelblech, rechts: final aufgebauter Rotor mit Welle)

Teilvorhaben B (Ford)

Tabelle 2.2: Verwendung Teilvorhaben B (Ford)

Geplantes Ergebnis	Erzieltes Ergebnis
Erarbeitung von Design-Richtlinien für siebgedruckte hybride Elektrobleche für Traktionsmotoren (Größe, Dicke, Materialkombination, Schnittebenen)	Verständnis von Randbedingungen-/Beschränkungen für Materialeigenschaften und Fertigungstoleranzen hybrider Elektrobleche
Erarbeitung von funktions- und fertigungsgerechten Elektroblech-Lösungen gemäß Punkt 1, die später als Vorlage für den Siebdruck dienen	Demonstrator im Hybriddesign für PSM-Rotor erstellt und an Fraunhofer IFAM zum Drucken übergeben
Prüfstandards/Prüfmethodik zur Messung lokaler elektro-magnetischer Eigenschaften (bspw. Vollmaterial, Übergangsbereich, Außenkanten).	Vier verschiedene Prüfmethoden sowie deren Prüfkörper wurden auf die Bedürfnisse des Siebdrucks adaptiert. Dies beinhaltet lokale und globale Eigenschaften (SST, Stress-SST, LFS, RPT)
Verbesserung der Leistungsfähigkeit von E-Motoren mit siebgedruckten Elektroblechen (verbesserte Flussführung, geringere Eisenverluste...)	Nachweis mittels FEM-Simulation: bis zu 7% höheres Drehmoment bei gleichem Bauraum basierend auf einem Ford-Elektromotor aus der aktuellen Produktpalette
Erarbeitung eines Kostenverständnisses für hybride Elektrobleche, welche im Siebdruck-Verfahren hergestellt werden	Verfahren aufgrund hoher Investitionen und langsamer Prozessgeschwindigkeit noch nicht wirtschaftlich im Vergleich zu konventioneller Herstellung im Automobilbereich

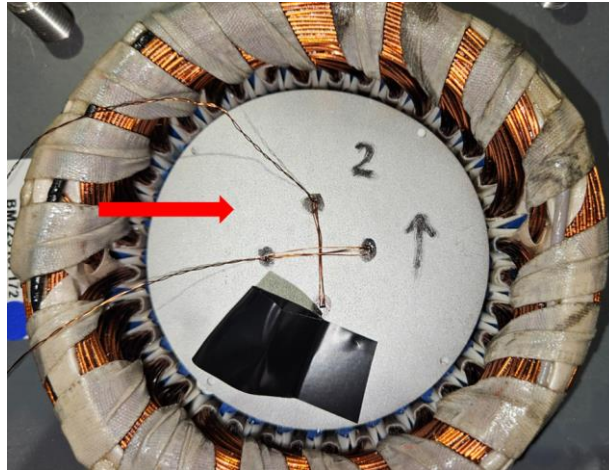


Abbildung 2.2: Beispielhafte Darstellung einer entwickelten Prüfmethode: Prüfaufbau mit siebgedruckten runden Probekörper (roter Pfeil) für die Charakterisierung der Eigenschaften unter rotatorischen Magnetfeldern

Teilvorhaben D (IFAM)

Tabelle 2.3: Verwendung Teilvorhaben D (IFAM)

Geplantes Ergebnis	Erzieltes Ergebnis
Entwicklung Druckpasten und Druckprozess für weichmagnetische und amagnetische Pulversysteme	Für die untersuchten Legierungen wurden wässrige Pastensysteme entwickelt und Testbleche aufgebaut. Das Pastensystem und der Druckprozess wurde zum Projektpartner Siemens transferiert.
Bestimmung der Materialparameter ausgewählter Legierungen für die Verdichtungssimulation	Die Materialparameter (Dilatometerkurven, Hochtemperaturviskosität, Ausdehnungskoeffizienten usw.) wurden bestimmt an Siemens zur Simulation übergeben.
Herstellung von hybriden Rotorblechen in der Materialkombination weichmagnetisch-weichmagnetisch	Die angestrebte Materialkombination Fe-Si mit Fe-Co lässt sich aufgrund des unterschiedlichen Verdichtungsverhalten nicht verzugsfrei verdichten. Als Ersatz wurden erste verzugsfreie Rotorbleche in der Kombination Reineisen- Fe-Co hergestellt.
Flussverstärkung im Blech der Einsatz von hochperformanten Fe-Co Blechen	Bei Verwendung von Elementarpulvern konnte nachgewiesen werden, dass die magnetischen Eigenschaften von siebgedruckten Einzelblechen vergleichbar mit konventionell hergestellten Blechen sind.

Teilvorhaben E (TU Darmstadt)

Tabelle 2.4: Verwendung Teilvorhaben E (TU Darmstadt)

Geplantes Ergebnis	Erzieltes Ergebnis
Materialentwicklung Legierung im Hinblick auf das Sinterverhalten in einfachen und Hybridsystemen	Die mechanischen und magnetischen Eigenschaften der Bleche hängen von der Sinterung ab. Die Verdichtung verursacht Porosität, die die mechanischen Eigenschaften

	verschlechtert und die magnetische Sättigung sowie Verluste beeinflusst. Unterschiede in Schwindung und Ausdehnungskoeffizient führen zu Spannungen und Deformation. Kommerzielle Fe-Co- und Fe-Si-Pulver konnten gemeinsam gedruckt und gesintert werden, sind jedoch einzeln weder mechanisch noch magnetisch optimiert, sodass weiteres Potenzial besteht.
Entwicklung eines magnetischen und elektrischen Charakterisierungsverfahrens für Materialeigenschaften	Die makroskopische magnetischen Eigenschaften wurden mittels Vibrationsmagnetometer und als ringförmige Proben im Wechselfeld charakterisiert. Diese Methoden dienen der absoluten Quantifizierung der Eigenschaften. Die lokalen magnetischen Eigenschaften wurde über die Kerr Mikroskopie untersucht, welche einen „Footprint“ in Form der magnetischen Domänen hinterlassen.
Entwicklung Prüfmethode zur Messung lokaler (und globaler) magnetischer und elektrischer Eigenschaften mit einer raschen Bewertungsmöglichkeit für Rotorbleche	Ein Bindeglied zwischen makroskopischen und lokalen magnetischen Eigenschaften stellt das neu-installierte Weitwinkel Kerr Mikroskop dar. Dieses wird mit eine gleichzeitigen Einzelstreifen-Messung und angelegter Zuglast kombiniert und ermöglicht die Quantifizierung der magnetischen Eigenschaften.

2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Teilvorhaben A (Siemens):

Die Gesamtausgaben der Siemens AG lagen mit insgesamt 5% minimal unter dem bewilligten Gesamtbudget.

Entsprechend des von Siemens erstellten zahlenmäßigen Nachweises stellen die Personalkosten die größte Kostenposition dar.

F0837 Personal/ F0856 innerbetriebliche Leistungen

Siemens war als Projektkoordinator in den Arbeitspaketen 1-5, 7 und 8 aktiv und hatte die Leitung von AP2 und AP5.

Es wurden ursprünglich 59 PMs beantragt und diese wurden auch geleistet (detaillierte Erläuterung s. unten).

Die innerbetrieblichen Leistungen für den Musterbau wurden ebenfalls wie geplant durchgeführt.

F0813 Material

Die Materialkosten fielen aufgrund gestiegener Preise ca. 9% höher aus als ursprünglich geplant.

F0838 Reisekosten

Abweichend zur ursprünglichen Planung fielen die Reisekosten viel geringer aus als beantragt.

Aufgrund der Corona-Pandemie und den daraus resultierenden veränderten Arbeitsbedingungen fand ein Großteil der Arbeits- und Konsortialtreffen virtuell statt, was zu reduzierten Reisekosten führte.

F0823 FE-Fremdleistungen / F0850 Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten

Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten sowie FuE-Fremdleistungen lagen $\sim 20 - 30\%$ unter dem ursprünglichen Budget.

Teilvorhaben B (Ford-Werke GmbH)

F0837 Personal: Alle PM konnten wie geplant abgearbeitet werden. Dementsprechend wurden 100 % der im Budget veranschlagten Personalkosten beantragt.

F0823 FE-Fremdleistungen: Die im Rahmen des Unterauftrags an Brockhaus Messtechnik vergebenen Arbeiten wurden vollständig und planmäßig innerhalb der Projektlaufzeit erbracht. Die dafür angefallenen Kosten wurden zu 100 % im Projektzeitraum verausgabt.

F0838 Reisekosten

Die Corona-Pandemie erforderte eine Anpassung der Arbeitsweise, wodurch ein Großteil der Arbeits- und Konsortialtreffen virtuell stattfand. Dies führte zu einer deutlichen Reduktion der Reisekosten um ca. 40 % im Vergleich zum ursprünglich beantragten Budget.

Abgesehen von den Reisekosten, die unter dem veranschlagten Budget lagen, erfolgte die Verausgabung aller anderen Mittel im Einklang mit der ursprünglichen Projektplanung. Die Budgetdisziplin wurde somit über den gesamten Projektzeitraum hinweg eingehalten.

Teilvorhaben D (IFAM):

Die beantragten Fördermittel wurden seitens IFAM vollständig abgerufen.

F0837 Personal: Diese Kostenkategorie wurde minimal überzogen, da die Entwicklung der Wärmebehandlung für das Fe-Co-System aufwendig war als ursprünglich angenommen.

F0813 Material: Aufgrund von Synergien bei den Druckformen und bei den Pulvern zwischen IFAM und Siemens wurde die Mittel nicht vollständig ausgeschöpft.

F0838 Reisekosten: Die Corona-Pandemie erforderte eine Anpassung der Arbeitsweise, wodurch ein Großteil der Arbeits- und Konsortialtreffen virtuell stattfand. Dies führte zu einer deutlichen Reduktion der Reisekosten um ca. 50 % im Vergleich zum ursprünglich beantragten Budget.

Teilvorhaben E (TU Darmstadt):

Die Gesamtausgaben der TU Darmstadt konnten mit dem bewilligten Gesamtbudget gedeckt werden. Entsprechend des von TU Darmstadt erstellten zahlenmäßigen Nachweises stellen die Personalkosten die größte Kostenposition dar.

F0812 Personal und 0820 MTArb: TU Darmstadt war in den Arbeitspaketen 1-5 und 7 aktiv. Es wurden ursprünglich 59 PMs beantragt und diese wurden auch geleistet. Routinearbeiten im Labor konnten durch die Unterstützung der Studentischen Hilfskräften übernommen werden. Dadurch wurde das Budget der SHK überschritten, aber gesamt betrachtet blieb das Gesamtpersonalkostenbudget unverändert.

F0842 Sonst allg. Verw.-Ausgaben: Die Materialkosten fielen aufgrund gestiegener Preise ca. 9% höher aus als ursprünglich geplant.

F0846 Reisekosten: Abweichend zur ursprünglichen Planung fielen die Reisekosten viel geringer aus als beantragt. Aufgrund der Corona-Pandemie und den daraus resultierenden veränderten Arbeitsbedingungen fand ein Großteil der Arbeits- und Konsortialtreffen virtuell statt, was zu reduzierten Reisekosten führte.

2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Teilvorhaben A:

Nach der Erstellung der Spezifikationen für die Materialkombinationen des neuartigen Reluktanzmotors wurde intensiv am 2-Komponentendruck für magnetische und amagnetische Blechbereiche geforscht, die sowohl grundlegende Sintersimulationen erforderten als auch umfangreiche Qualitätstests zum Nachweis der Machbarkeit einer Prototypfertigung. Zusätzlich wurden die magnetischen und mechanischen Eigenschaften stichprobenartig untersucht sowie Lebensdaueruntersuchungen mit Lastwechseltests durchgeführt.

Die Notwendigkeit ergibt sich auch aus dem hohen technisch-wirtschaftlichen Risiko, das mit den Vorhaben verbunden war. Die Arbeiten wurden entsprechend der Planung durchgeführt, wobei die Motortests noch nach Projektende fortgeführt wurden.

Teilvorhaben B:

Die Optimierung von Traktionsmotoren für Elektrofahrzeuge ist entscheidend, um Reichweite und Effizienz zu steigern. Das Projekt adressierte die dringende Notwendigkeit, Ummagnetisierungs- und Wirbelstromverluste in Elektroblechen zu reduzieren. Der Fokus auf metallischen Siebdruck und hybride Werkstoffkonzepte (FeSi und FeCo) ist ein vielversprechender Weg, magnetische Eigenschaften gezielt zu verbessern und gleichzeitig Materialeinsatz und Kosten zu optimieren. Die Entwicklung miniaturisierter Testmethoden war unerlässlich, um die Eigenschaften der neuartigen Werkstoffe valide zu charakterisieren. Die Arbeiten sind von hoher Relevanz für die Weiterentwicklung der Elektromobilität und die Erreichung der Klimaziele.

Die gewählte Methodik, die eine Kombination aus simulationsgestützter Werkstoffauswahl, Designoptimierung und experimenteller Validierung umfasst, war für die Zielsetzung des Projekts angemessen. Die Festlegung auf den Rotor als Fokusbereich, die Erarbeitung eines Pflichtenhefts mit klaren Anforderungsprofilen und der Vergleich mit konventionellen Fertigungstechniken (Stanzen) ermöglichten eine zielgerichtete und effiziente Bearbeitung der Forschungsfragen. Obwohl die Verarbeitung von FeCo sich als herausfordernder erwies als ursprünglich angenommen und die Herstellung eines vollständigen Rotors nicht gelang, lieferten die durchgeführten Arbeiten wertvolle Erkenntnisse über die Eignung des metallischen Siebdrucks für die Herstellung von Elektroblechen und die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Werkstoffen im hybriden Design. Die Anmeldung von Schutzrechten durch Ford belegt zudem die Innovationshöhe und das kommerzielle Potenzial der entwickelten Verfahren und Materialien.

Teilvorhaben D:

Mit Blick auf die Komplexität des Themas, die Simulation der Ko-Sinterung von Materialien, die Entwicklung der Legierungen sowie der komplexe Druck- und Wärmebehandlungsschritt wird die Erforderlichkeit der Zusammenarbeit unter Nutzung der Kompetenzen aller beteiligter Projektpartner deutlich. Das Fraunhofer IFAM hat für beiden Materialkombinationen die wesentlichen Materialparameter bestimmt und anschließend den Druckprozess für ausgewählte Legierungen entwickelt.

Teilvorhaben E:

Die durchgeführten Arbeiten waren notwendig und angemessen, um die zentralen Herausforderungen bei der Entwicklung von Fe-Co-Legierungen für den Siebdruck zu bewältigen. Die Einschätzung des Potenzials und die Vorauswahl geeigneter Legierungen (AP1) basierten auf einer umfangreichen Analyse der Literatur und kommerzieller Datenblätter, wobei aufgrund der starken Eigenschaftsabhängigkeit von Verarbeitung und Wärmebehandlung weiterführende experimentelle Untersuchungen erforderlich waren. Die Anpassung des Materialsystems (AP2) und die Optimierung der Wärmebehandlung (AP3) erwiesen sich als komplexe, aber essenzielle Schritte, da zahlreiche Parameter die finalen Materialeigenschaften beeinflussen. Die Entwicklung reproduzierbarer Pasten und Prozessparameter war entscheidend für eine zuverlässige Materialcharakterisierung, wobei die Wahl der Probenherstellung am IFAM und deren anschließende Analyse an der TU Darmstadt als geeigneter Kompromiss zwischen Reproduzierbarkeit und Effizienz diente, auch wenn dies den Gesamtprozess verlangsamte. Die Charakterisierung der magnetischen Eigenschaften (AP4) erforderte die Entwicklung und Anpassung geeigneter Messmethoden. Während makroskopische Messungen an ringförmigen Proben zuverlässige Ergebnisse lieferten, stellte sich die Untersuchung lokaler magnetischer Eigenschaften als herausfordernd dar, sodass die Anpassung der Messmethodik, insbesondere durch den Einsatz eines neuen Weitwinkel-Kerr-Mikroskops, eine notwendige Maßnahme zur vollständigen Erfassung der Materialeigenschaften war. Für die Bewertung der Rotorbleche im Rahmen der Zuverlässigkeit (AP5) waren temperaturabhängige E-Modul-Messungen unerlässlich, um fundierte Daten für Simulationen bereitzustellen. Die Arbeiten an der TU Darmstadt trugen zudem zur Vorbereitung des Demonstrators (AP7) bei, dessen Bau sich jedoch verzögert hat, sodass die geplanten Messungen an den tatsächlichen Rotorblechen noch ausstehen. Insgesamt waren die durchgeführten Arbeiten aufgrund der komplexen Material- und Prozessanforderungen sowohl notwendig als auch angemessen, um die wissenschaftlichen und technischen Herausforderungen des Projekts zu adressieren.

2.4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Es wurden seit Beginn der Projektlaufzeit bei Siemens fünf Erfindungsmeldungen mit Bezug zum Vorhaben eingereicht. Die Patentanmeldung EP 4249150 A1 ist bereits offengelegt.

Tabelle 2.5: Verwertung Teilvorhaben A

Projektergebnis/ Inhalt	Nutzen/ Verwertung
Simulationsmodell mit experimentellen Eingangsgrößen für das Ko-Sintern der Fe-Basiswerkstoffe	Anwendung auf allgemeine metallische Multimaterial Sinterwerkstoffe im Rahmen der NX- und PLM Software der Siemens Digital Industries
Erhöhte Performance des inversen Reluktanz Motors mit siebgedruckten Multimaterialblechen	Erweiterung des Anwendungsbereichs der Reluktanzmotoren in Geräusch-sensitiver Umgebung und ggf. Ersatz von einzelnen Typen SE-haltiger Servomotoren

Teilvorhaben B

Die im Projekt erzielten Fortschritte führten zu drei Erfindungsmeldungen, die von Ford beim Deutschen Patent- und Markenamt eingereicht wurden. Die Veröffentlichung der Anmeldungen DE102022115198 (Verfahren zum Herstellen eines Rotorelements für einen Rotor einer elektrischen Maschine, Rotorelement, Rotor, elektrische Maschine und Kraftfahrzeug) und DE102022119376 (Elektroblech für eine elektrische Maschine sowie Verfahren zur Herstellung eines Elektroblechs) unterstreicht das Innovationspotenzial der entwickelten Technologien.

Tabelle 2.6: Verwertung Teilvorhaben B

Projektergebnis/ Inhalt	Nutzen/ Verwertung
Entwicklung und Anwendung miniaturisierter Testmethoden zur Charakterisierung der magnetischen Eigenschaften von gesinterten Elektroblechen.	Ermöglicht die valide und effiziente Materialcharakterisierung von neuartigen Werkstoffen, welche mit konventionellen Methoden nicht zugänglich sind; die Entwicklung und Optimierung neuer Elektroblechlegierungen und -prozesse werden somit beschleunigt.
Erkenntnisse über die Eignung des metallischen Siebdrucks für die Herstellung von Elektroblechen und die Herausforderungen bei der Verarbeitung hybrider FeCo-FeSi Schichten	Fundierte Entscheidungsgrundlage für die zukünftige Entwicklung und Anwendung des metallischen Siebdrucks in der Elektromotorenfertigung. Identifizierung von Forschungsbedarf und potenziellen Lösungsansätzen zur Überwindung der Herausforderungen bei der FeCo-Verarbeitung.
Anmeldung von Schutzrechten (Patenten) durch Ford im Bereich der Elektroblechherstellung und Rotorkonstruktion	Schutz der entwickelten Technologien und Verfahren vor Nachahmung. Kommerzielles Potenzial durch Lizenzierung oder eigene Nutzung der Patente. Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit von Ford im Bereich der Elektromobilität.

Tabelle 2.7: Verwertung Teilvorhaben E / TU Darmstadt

Projektergebnis/ Inhalt	Nutzen/ Verwertung
Erkenntnisse zum Sinterverhalten der Materialkombinationen und Optimierung des Siebdruckprozesses	<ul style="list-style-type: none"> • Bedeutung der Messmethoden Dilatometer und RFDA, um das Sinterverhalten zu beschreiben • Identifizierung der Probleme während des Sinterns als Ansatz für weitere magnetische Charakterisierung und Optimierung
Kerr-Mikroskops mit der gleichzeitigen Quantifizierung magnetischer	<ul style="list-style-type: none"> • Bindeglied zwischen globalen und lokalen magnetischen Eigenschaften • Verständnis der Demagnetisierungsprozesse

Eigenschaften und Einfluss von Zugspannungen	<ul style="list-style-type: none"> • konkretes Beispiel welches in der Lehre zum Verständnis eingebracht werden kann • Ansatzpunkt für weitere Förderprojekte
Stärkung der Forschungsgruppe Funktionale Materialien durch die Erweiterung der Kompetenzen im Bereich Weichmagnete und deren Prozesstechnik	<ul style="list-style-type: none"> • InnoBlech hatte einen wesentlichen Beitrag zum Ausbau und zur Verstärkung der Forschung im Bereich der Weichmagnete • Langfristige Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit durch Erfahrungen und Weiterentwicklung der Messmethodik
2K-Rotor Bleche und Motor Design	<ul style="list-style-type: none"> • Startpunkt für weitere Arbeiten, um Bereich der Prozesstechnik (speziell Additive Fertigung) und Vereinigung mit den derzeitigen Forschungen im Bereich der Permanentmagnete

2.5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Teilvorhaben A:

Der Einsatz von Materialkombinationen in Rotoren von E-Motoren wird ansatzweise untersucht, z.B. durch Aufbau des Rotors aus Duplex-Stählen (Welle) mit Edelstahlhülsen in Zusammenhang mit vergrabenen Permanentmagneten in PM-Synchronmaschinen [1]. Nachteile sind dort die geringe Sättigungsinduktion sowie die unzureichende Unterdrückung der Wirbelströme aufgrund fehlender Blechpaket- Struktur in der Welle.

[1] B. Löhlein, G. Huth, «Permanentmagnet-Synchronmotoren in Duplexstahl-Technik», e&i, Heft 2.2016, S. 82–87, Springer Verlag.

Teilvorhaben B:

Während der Durchführung des Vorhabens sind keine Fortschritte auf dem Gebiet des FeCo-Siebdrucks und hybrider magnetisch-magnetischer Materialkombinationen für Rotoren/Statoren bei anderen Stellen bekannt geworden, die für die Zielsetzung oder die Ergebnisse des Projekts von wesentlicher Bedeutung wären.

Teilvorhaben D:

Während der Projektdurchführung sind keine Ergebnisse Dritter zu siebgedruckten Elektroblechen bekannt geworden.

Teilvorhaben E:

Während der Projektdurchführung sind keine Ergebnisse Dritter zu siebgedruckten Elektroblechen oder Charakterisierungsmethoden von weichmagnetischen Blechen bekannt geworden.

2.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 11 der Nebenbestimmungen

Tabelle 2.8: Veröffentlichungen Teilvorhaben Konsortialführer

Titel	Datum	Ort (Zeitungsname, ISBN, ggf. Link etc.)	Inhalt (kurz)
Potential of Multi-Material (MM) printing for improved Rotor Performance - torque, speed, noise	29.11.2022	in: Magnetic Metal-Matrix-Composites for Printed Rotor Laminates, EDPC 2022, Regensburg	Technologiepräsentation der additiv gedruckten Magnetbleche: Proof-of-concept und Prozess-Upscaling. Darstellung des Potentials für Mehrkomponenten-Magnetbleche
Use of simulation tools in optimization of component design in el. machines	geplant		Darstellung des Potentials von verbessertem lateralem Rotordesign mit 2K- Materialien durch Spannungsreduktion

Tabelle 2.9: Veröffentlichungen Teilvorhaben B

Titel	Datum	Ort (Zeitungsname, ISBN, ggf. Link etc.)	Inhalt (kurz)
Screen-Printing of E-Steel Laminations "InnoBlech"	01.10.2024	Berlin (E-Motor Tech Summit, Konferenz)	Siebdruck von magnetischen Materialien, insbesondere FeCo und FeSi für Anwendungen in Elektromotoren und anderen magnetischen Bauteilen mit Fokus auf den magnetischen Eigenschaften, den Verlusten und den Oberflächeneigenschaften der siebgedruckten Schichten
Screen Printing of Magnetic Materials for Electrical Machines	04.06.2025	Bad Nauheim (Automotive Circle / Additive Manufacturing, Konferenz)	Diese Präsentation wird die Ergebnisse des öffentlich geförderten Projekts zum Siebdruck magnetischer Materialien für Anwendungen in Elektromotoren zusammenfassen und stellt die erreichten Fortschritte in Bezug auf Materialien, Eigenschaften, Messtechnik und Anwendungsbereiche vor

Tabelle 2.10: Veröffentlichungen Teilvorhaben D / IFAM

Titel	Datum	Ort (Zeitungsname, ISBN, ggf. Link etc.)	Inhalt (kurz)
Additive manufacturing of Highly Efficient Electric Sheets of Fe _{6,5} Si by 3D Screen-Printing	22.10.2022	WorldPM 2022, Lyon	Magnetische Eigenschaften von siebgedruckten Fe-Si Einzelblechen

Ressource-efficient manufacturing of high-performance Fe-Co electrical steel sheets	17.09.2025	EuroPM 2025 Glasgow	Magnetische Eigenschaften von siebgedruckten Fe-Co Einzelblechen

Tabelle 2.11: Veröffentlichungen Teilvorhaben E / TU Darmstadt

Titel	Datum	Ort (Zeitungsname, ISBN, ggf. Link etc.)	Inhalt (kurz)
Multi-component sheets and the influence on microstructure and magnetic properties	Folgejahr nach Projektabschluss	Beispiel: JMMM IEEE Tran Magn. Acta Materialia	Gegenüberstellung der aus InnoBlech resultierenden Siebdruckbleche aus Fe-Si, Fe-Co und 2-Komponenten Bleche mittels Dömanenstruktur, Mikrostruktur und magnetischer Kenngrößen

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel InnoBlech - Bleche und Komponenten aus magnetischen und Struktur-Werkstoffen für hocheffiziente E-Antriebe	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Schäfer, Lukas Koch, Raphael Reuter, Kay Denneler, Stefan Rieger, Gotthard	5. Abschlussdatum des Vorhabens Dezember 2024
	6. Veröffentlichungsdatum August 2025
	7. Form der Publikation Bericht (TIB Hannover)
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Siemens AG, , 81739 München Ford Werke GmbH, 52072 Aachen Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM), 01277 Dresden Technische Universität Darmstadt (TUDa), 64289 Darmstadt	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 01MV21021
	11. Seitenzahl 17
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 2
	14. Tabellen 11
	15. Abbildungen 3
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Online	
18. Kurzfassung Die Material- und Pulverauswahl für gedruckte Reluktanzrotoren und Blechstrukturen für vergrabenen Magnete in E-Antrieben für Automobile wurde durch Untersuchungen zum Schwindungsverhalten beim Sintern eingegrenzt. Die Siebdrucktechnik wurde auf einen zwei-Komponentendruck erweitert und die Druckpasten entsprechend optimiert. Die intensive Zusammenarbeit zwischen IFAM, TUDa, Ford und Siemens führte zu einer erfolgreichen Co-Sinterung, (lokalen) Messfähigkeit der magnetischen Eigenschaften und Optimierung der Geometrie der Bleche. In gezielten Optimierungsläufen wurden Proben hinsichtlich Schwindung, Dichte und magnetischen Eigenschaften charakterisiert. Die mechanischen Festigkeiten und Dauerfestigkeit der Materialien und Materialkombinationen wurden ebenfalls umfassend bestimmt, so dass eine ausreichende Anzahl von Gutteilen für den Aufbau eines Demonstrator-Motors bereitgestellt werden konnte. Dieser wurde anschließend in Testbetrieb genommen.	
19. Schlagwörter Motor, Reluktanzrotor, Magnetblech, Siebdruck, Co-Sintern	
20. Verlag TIB, Hannover	21. Preis ---

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN scheduled	2. type of document (e.g. report, publication) report
3. title InnoBlech - Sheets and components made of magnetic and structural materials for high-efficient electrical drives	
4. author(s) (family name, first name(s)) Schäfer, Lukas Koch, Raphael Reuter, Kay Denneler, Stefan Rieger, Gotthard	5. end of project December 2024
	6. publication date August 2025
	7. form of publication report
8. performing organization(s) (name, address) Siemens AG, 81739 München Ford Werke GmbH, 52072 Aachen Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM), 01277 Dresden Technische Universität Darmstadt (TUDa), 64289 Darmstadt	9. originator's report no.
	10. reference no. 01MV21021
	11. no. of pages 17
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) 53107 Bonn	13. no. of references 2
	14. no. of tables 11
	15. no. of figures 3
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) Online	
18. abstract The choice of materials and powders for printed reluctance rotors and sheet metal structures for integrated permanent magnets (IPM) in automotive electric drives was narrowed down by shrinkage behavior studies. The metal screen-printing technology has been extended to two-component printing and the printing pastes have been optimized accordingly. The intensive cooperation between IFAM, TUDa, Ford and Siemens led to successful co-sintering, (local) measurement capability of the magnetic properties and optimization of the geometry of the sheets. In targeted optimization runs, samples were characterized in terms of shrinkage, density and magnetic properties. The mechanical strengths and fatigue strength of the materials and material combinations were also comprehensively determined, so that enough functional parts could be provided to build a demonstrator motor. This motor was then put into test operation.	
19. keywords Motor, reluctance rotor, magnetic sheet, screen printing, co-sintering	
20. publisher TIB Hannover	21. price ---