

# Partnerspezifischer Schlussbericht zum BMW-Verbundprojekt

## Leichte, effiziente Traktionsantriebe durch federnde Rotorkomponenten (fedeRo)

Schlussbericht der RWTH Aachen

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



---

Verbundprojekt im Fachprogramm

„Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie

## **Leichte, effiziente Traktionsantriebe durch federnde Rotorkomponenten (fedeRo)**

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energies (BMWi) gefördert und vom Projektträger TÜV Rheinland betreut.

Förderkennzeichen:

**19I21041E**

**RWTH Aachen**

**Laufzeit:** 01.10.2021 bis 31.12.2024

---

## **Autorenliste in alphabetischer Reihenfolge**

|                       |             |
|-----------------------|-------------|
| Butterweck, Daniel    | RWTH Aachen |
| Thul, Andreas         | RWTH Aachen |
| Lauerburg, Maximilian | RWTH Aachen |

**Bitte noch fehlende Autoren ergänzen.**

## Inhaltsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Inhaltsverzeichnis .....   | 4  |
| Abbildungsverzeichnis .....  | 5  |
| 1 Kurze Darstellung (wird veröffentlicht!).....  | 6  |
| 1.1 Aufgabenstellung.....  | 6  |
| 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....  | 8  |
| 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens .....   | 8  |
| 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand.....  | 9  |
| 2 Eingehende Darstellung (wird veröffentlicht!).....   | 12 |
| 2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit<br>Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele .....                             | 12 |
| 2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....  | 13 |
| 2.2.1 Personalmittel.....  | 13 |
| 2.2.2 Reisekosten.....   | 13 |
| 2.2.3 Investitionen .....  | 13 |
| 2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....   | 13 |
| 2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwendbarkeit des Ergebnisses im<br>Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans .....                     | 13 |
| 2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt<br>gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen..... | 14 |
| 2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses .....  | 14 |
| Literaturverzeichnis .....   | 15 |

## Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1 Arbeitsstrukturplan.....   | 8  |
| Abbildung 2 Prüftechnik zur Vermessung von Ringkernproben (links oben), sowie dem Einfluss uniaxialer (links unten) und multiaxialer mechanischer Spannung (rechts) auf die elektromagnetischen Materialeigenschaften. ....      | 10 |
| Abbildung 3 Einfluss einer uniaxialen Spannung auf die Magnetisierungskurve von weichmagnetischem Material (links) [1] und Prinzipskizze des am IEM vorhandenen Single-Sheet Tester mit uniaxialer Spannungsbeaufschlagung. .... | 10 |
| Abbildung 4 Messaufbau zur Vermessung von Traktionsantrieben am Achsprüfstand des IEM. ....  | 11 |

# 1 Kurze Darstellung (wird veröffentlicht!)

## 1.1 Aufgabenstellung

Das Hauptziel des Förderprojekts ist die Umsetzung und Prüfstandserprobung eines Leichtbau-rotors mit federnden Komponenten, die neben Leichtbaupotenzialen auch Potentiale zur Steigerung der der Effizienz und Senkung der Kosten zukünftiger Antriebssysteme bieten.

Aus dem Hauptziel lassen sich sowohl aus technischer als auch aus wissenschaftlicher Sicht nachstehend beschriebene Beiträge zu den förderpolitischen Zielen des Fachprogramms: „Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien“ ableiten.

Der erste Beitrag ist aus technischer Sicht formuliert und fokussiert auf die zukünftige Verbesserung der Masseigenschaften des Rotors. Die federnde Rotorwelle bietet hierbei im Vergleich zu den etablierten Verfahren eine Leichtbautechnologie mit erheblichem Potenzial zur Senkung des Rotorgewichts.

Ein weiterer Beitrag (ebenfalls aus technischer Sicht) adressiert die Nutzung der Potentiale einer neuen Fügetechnik, die sich aus der Gestaltanpassung ergeben. Diese soll dazu beitragen, die Energie- und Kosteneffizienz der Montage von Rotoren zu steigern.

Die ersten beiden Beiträge adressieren gleichsam das Teilziel „Leichtbau“ der Förderrichtlinie durch eine größere Designfreiheit zur Einbringung von Kavitäten in den spannungsreduzierten Blechabschnitten und Auslegung des Massenträgheitsmoments für verbesserte Beschleunigungsvorgänge (Abbildung 4). Die höhere Drehzahlstabilität bietet das Potenzial, die Leistungsdichte zu steigern, indem die Motorbaugröße reduziert wird. Innerhalb des Projektes werden daher Antriebsmotoren für Traktionsantriebe betrachtet, welche in heutigen Grenzdrehzahlbereichen bis max. 20.000 min<sup>-1</sup> eingesetzt werden. Parallel hierzu werden Bandagierung und Anforderungen an die Wuchtgüte von elektrischen Verdichtern betrachtet, bei denen die Drehzahlen funktionsbedingt in einem Bereich von bis zu 200.000 min<sup>-1</sup> liegen können.

Ein dritter Beitrag widmet sich der Steigerung der Effizienz im Betrieb durch das zu erforschende Rotor-konzept. Das geänderte Rotordesign ermöglicht die Umsetzung höherer Drehzahlen und damit eine Steigerung der Leistungsdichte. Durch eine Reduzierung der Emissionen und die Optimierung von Bedarf, Umwandlung und Speicherung der Energie wird das zweite Teilziel „Innovative Antriebstechnik“ der Förderrichtlinie adressiert.

Als vierter Beitrag wird im Rahmen des Förderprojekts aus wissenschaftlicher, entwicklungsmethodischer Sicht ein gekoppeltes Modell von elektromagnetischen, strukturellen und thermischen Teil-modellen erforscht. Die Methodik soll so erarbeitet werden, dass die physikalischen Wirkzusammenhänge vertieft untersucht und bewertet werden können. Eine verbesserte Übereinstimmung der Simulationen mit den Ergebnissen der Vermessung physisch aufgebauter Prototypen soll durch das erforschte Modell im Vergleich zum aktuellen Stand der Wissenschaft erreicht werden. Dieser Beitrag trägt somit dem Teilziel „Hochwertige Simulations- und Modellierungsverfahren“ der förderpolitischen Ziele Rechnung.

Ein fünfter Beitrag, welcher auf die Erreichung des Hauptziels abzielt, wird aufbauend auf dem vierten Beitrag aus wissenschaftlicher Sicht formuliert: Durch den Einsatz multiphysikalischer Modelle lassen sich gezielt Produkteigenschaften entwickeln. Hierfür ist es erforderlich, die Gestalt-Funktions-Zusammenhänge zu beschreiben und diese mit den Herstellprozessen zu korrelieren, um diese in der Gestaltung und Auslegung berücksichtigen zu können. Durch die

Untersuchung mittels gekoppelter Modelle wird die Erkenntnis gewonnen, welchen Einfluss die erforschten innovativen Fügeverfahren auf die elektromagnetischen Eigenschaften der Maschine haben. Diese Erkenntnis ist für die beteiligten Industriepartner essenziell um deren innovative Produktideen am Markt etablieren zu können.

Vor Beginn des Projekts wurden bereits erste Funktionsmuster der federnden Rotorkomponenten hergestellt und erste Kalt-Füge-Versuche durchgeführt. Der Technologiereifegrad der Rotorkomponenten liegt bei TRL 34. Zum Projektende soll ein prototypischer Demonstrator aufgebaut und unter Simulation der Connected Systems [3] in einer gemischt physisch-virtuellen Testumgebung validiert sein, dies entspricht TRL 6 (Tabelle 1).

Schließlich wird ein sechster Beitrag für die prozesssichere und taktzeitoptimierte Umsetzung des Leichtbaurotors durch Einbringung eines innovativen Schleuderkonzepts mit aktivem Auswuchtsystem geleistet. Das angewendete Verfahren greift auf existierende Subsysteme der Fa. Hofmann zurück und gewährleistet, dass Setzerscheinungen der gefertigten Rotoren bereits in der Produktionsphase berücksichtigt und kompensiert werden. Da die Subsysteme der Schleuderspindel und des aktiven Auswuchtsystems bereits als eigenständige, funktionsfähige Systeme bei der Fa. Hofmann existieren, wird für die Zusammenführung der Systeme von einem TRL Level von 3 zu Beginn und 6 zum Abschluss des Projekts ausgegangen.

Das IEM ist maßgeblich verantwortlich für die elektromagnetische Bewertung des Referenzsystems. Zur Erfassung des Status-Quo wird eine elektromagnetische FE-Simulation des Referenzmotors mit konventioneller Welle und Blechpaket durchgeführt. Neben der Überführung der Geometriedaten der Referenzmaschine in die FE-Umgebung sind die spannungsabhängigen Materialmodelle für die elektromagnetische FEM zu parametrieren.

Dazu wird das im Referenzmotor verwendete weichmagnetische Elektroband messtechnisch erfasst. Hierzu werden die Polarisation und die Verluste unter Zug-Druckspannungen am IEM gemessen und die Materialparameter aus den Messungen bestimmt. Unter Einprägung der in simulierten lokalen mechanischen Spannungen wird letztlich die Referenzmaschine im gesamten Betriebskennfeld simuliert. Hierdurch lassen sich Aussagen zur lokalen Verlustverteilung und globalen Effizienz des Referenzantriebs treffen.

Zudem ist das IEM für die Neuauslegung und Optimierung des Rotorblechschnitts verantwortlich. Das FEM-Simulationsmodell des Referenzmotors wird um die federnde Rotorwelle und die entwickelte Magnetfixierung erweitert. Die Messergebnisse der hartmagnetischen Materialvermessungen von MS werden in die simulative Untersuchung eingebracht.

Durch eine enge Kopplung von elektromagnetischer und mechanischer Simulation wird der Rotor im Hinblick auf das Verlustverhalten und der Gewichtsreduzierung unter Einhaltung der mechanischen Festigkeitsgrenzen projektbegleitend iterativ optimiert.

Außerdem untersucht das IEM die federnde Magnetfixierung. Mittels Ringkernproben sollen die elektromagnetischen Eigenschaften und Verlustparameter verschiedener Werkstoffe durch das IEM ermittelt werden.

Es erfolgt eine betriebspunktabhängige Abschätzung der Zusatzverluste durch Einsatz der federnden Magnetfixierung. Zusammen mit den ermittelten Verlustparametern wird diese Abschätzung genutzt, um betriebspunktabhängige zusätzliche Verlustanteile zu ermitteln.

MS ermittelt die für die elektromagnetischen Simulationen erforderlichen Materialeigenschaften der Hartmagnete.

## 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Automobilindustrie geht davon aus, dass die Elektrifizierung des Antriebsstranges in den kommenden Jahren wesentlich intensiviert werden wird. Das Bewusstsein für ein klimafreundlicheres Verhalten, welches insbesondere bei jungen Menschen sehr stark ausgeprägt ist, aber auch die immer schärferen gesetzlichen Forderungen, erfordern von den OEMs die Entwicklung alternativer Antriebe massiv voran zu treiben. Es sollte davon ausgegangen werden, dass spätestens ab 2040 Verbrennungsmotoren nicht mehr in höheren Stückzahlen produziert werden und die Bauzahlen bis dahin kontinuierlich abnehmen. Dieser Trend wird sich sicherlich in Asien und Europa deutlich früher materialisieren als in Nordamerika. Aktuelle Ankündigungen zeigen, dass diese Änderungen eher beschleunigt als verlangsamt werden. Hybridisierte Antriebe sind eher als Zwischenstadium zu betrachten um die Schadstoffemissionen temporär und zumindest moderat zu reduzieren.

Um zudem einen ressourcenschonenden Umgang zu erreichen, gibt es nach [1] den Trend bei aktuellen Traktionsantrieben hin zu einem Hochdrehzahlbetrieb. Durch die Steigerung der Rotordrehzahl wird erreicht, dass die gleiche Ausgangsleistung bei geringeren Antriebsabmessungen ermöglicht wird. Dies geht sowohl mit der Steigerung der Leistungsdichte als auch der Reduzierung der Menge an Permanentmagnetmaterial einher. Die federnden Rotorkomponenten adressieren diese Zielsetzungen. Die Polygonwelle erlaubt es zum einen, dass die Fügekraft zwischen dem Rotorblechpaket und der Welle reduziert wird. Zum anderen, führt die Polygonform zu einer Aufweitung der Welle unter Drehzahl, sodass der zylindrische Pressverband eine Steigerung der Abhebedrehzahl im Vergleich zu einem zylindrischen Pressverband ermöglicht. Die federnde Welle kann unter Raumtemperatur in die Bohrung des Rotorblechpakets gefügt werden, sodass energiekritische Fertigungsschritte, wie das thermische Fügen, vermieden werden können.

Die federnde Permanentmagnetfixierung erlaubt es die vergrabenen Permanentmagnete bei dem Lebensdauerende des Antriebs zerstörungsfrei dem Rotor zu entnehmen. Hierdurch können aufwendige chemische Trennverfahren zur Separierung der Materialbestandteile vermieden werden und damit ein Beitrag zu den klimapolitischen Zielen geleistet werden.

## 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

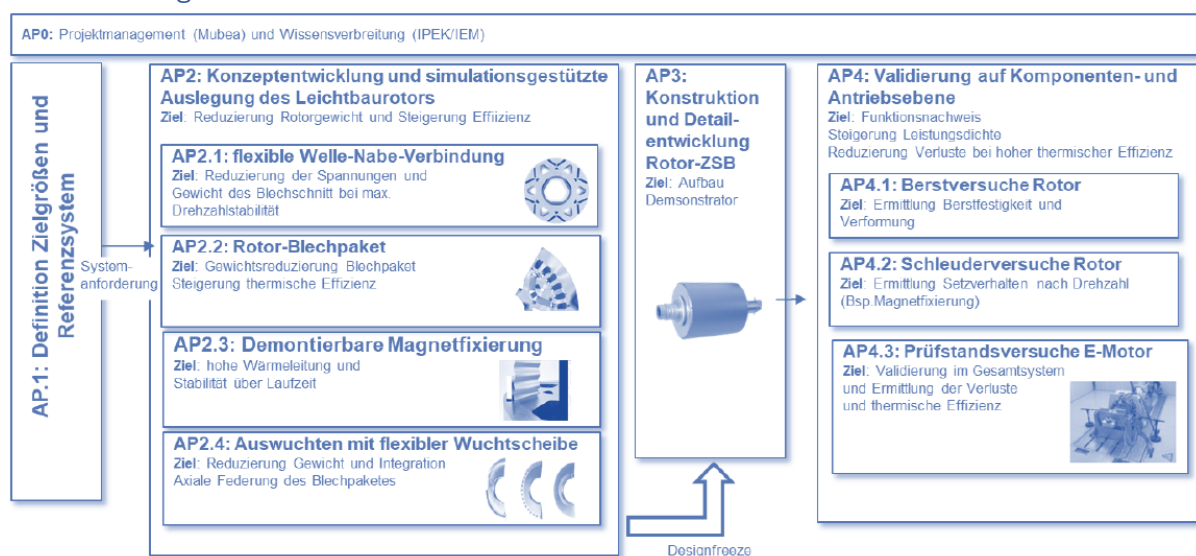


Abbildung 1 Arbeitsstrukturplan.

In Analogie zu den Gesamt- und Hauptzielen wird das Projekt in vier Hauptarbeitspaketen bearbeitet. Zunächst werden in AP 1 mit allen Konsortialpartnern und dem assoziierten Partner ZF die Zielgrößen für das ausgewählte Referenzsystems definiert und weiter spezifiziert. Basierend auf den festgelegten Ziel-größen erfolgt in AP2 die Analyse des Serienrotors und die Konzeptentwicklung und simulationsgestützte Auslegung der federnden und demontierbaren Komponenten des Leichtbaurotors. In AP 3 wird parallel die Konstruktion und Detailentwicklung der Rotorbaugruppe gestartet. Nach einem Designfreeze erfolgt die Zeichnungsableitung zur Fertigung und Montage der Rotorkomponenten zu einem Hardware-Demonstrator. In enger Abstimmung mit den simulativ und physisch ermittelten Versuchsergebnissen aus AP 2 und AP 3 werden die Validierungsumgebungen auf Antriebsebene aufgebaut. Anschließend wird der Demonstrator in AP 4 auf Komponenten und Antriebsebene validiert. Hierzu erfolgen zunächst Berstversuche, um die elastische und plastische Verformung des Rotors zu messen und die Grenzdrehzahl zu ermitteln. Parallel zu der gezielten Weiterentwicklung der federnden Rotorkomponenten in AP 2 und AP 3 erfolgt ebenfalls die Entwicklung eines neuartigen Schleuder- und Prüftechnik mit einem integrierten automatischen Auswuchtsystem, um ebenfalls in AP 4 eine taktzeitoptimale Ermittlung der Setzeffekte des Rotors bei Drehzahlbeaufschlagung zu erzielen. Schließlich wird der Demonstrator in den E-Motor eingebaut und in Bezug auf Performance, Thermik, NVH und Effizienz charakterisiert.

Am IEM wurden zunächst die weichmagnetischen Materialproben unter mechanischen Spannungen charakterisiert und Materialmodelle erstellt. Die Angaben zu dem Verhalten der Permanentmagnete wurde gemäß den Datenblättern des assoziierten Konsortialpartners übernommen.

Des Weiteren fand zu Beginn des Forschungsvorhabens ein Abgleich der Simulationsergebnisse des IEM mit den Angaben des assoziierten Konsortialpartners zu dem Referenzsystem statt. Die geringe Abweichung der Simulationsergebnisse erlaubt daher die frühzeitige Plausibilisierung der Randbedingungen in der elektromagnetischen Simulation, sodass diese für die Auslegung der innovativen Rotorkomponenten verwendet werden konnten.

Zu Beginn der domänenübergreifenden Simulationsstudie fanden zunächst verschiedene Einflussanalysen statt. Hierbei wurde zunächst untersucht, inwiefern die Änderung der mechanischen Spannungsverteilung im Rotor zu einer geänderten elektromagnetischen Charakteristik führt. Es konnte gezeigt werden, dass der magneto-elastische Effekt im Rotor der Referenzmaschine für die domänenübergreifende Simulationsstudie vernachlässigbar gering ist. Dies führt dann zu einer deutlichen Aufwandsreduzierung.

Zudem wurde untersucht, inwiefern die Luftspaltkräfte an der Rotoroberfläche zu einer Änderung der mechanischen Spannungsverteilung im Rotor führen. Hierbei zeigte sich, dass die Luftspaltkräfte im Vergleich zu den Fliehkräften vernachlässigbar gering sind. Durch diese beiden Einflussanalyse konnte daher der Simulationsaufwand im Vorhinein bereits deutlich reduziert werden.

Im weiteren Verlauf des Projekts wurde der Einfluss der federnden Rotorkomponenten sukzessive abgeleitet. Zunächst wurden die Auswirkungen der Polygonwelle und danach die der federnden Permanentmagnetfixierung im Hinblick auf die Elektromagnetik diskutiert.

#### 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Es gab die folgenden Vorarbeiten zu dem vorliegendem Forschungsprojekt durch das IEM hinsichtlich der Charakterisierung von weichmagnetischen Materialien. Hierzu stehen am Institut zahlreiche Prüfstände und Messeinrichtungen bereit. Insbesondere kann das IEM auf

Prüftechnik zur Vermessung der magnetischen Eigenschaften von ferromagnetischen Materialien unter dem Einfluss von uniaxialen oder multiaxialen mechanischen Spannungen zurückgreifen (siehe Abbildung 2).

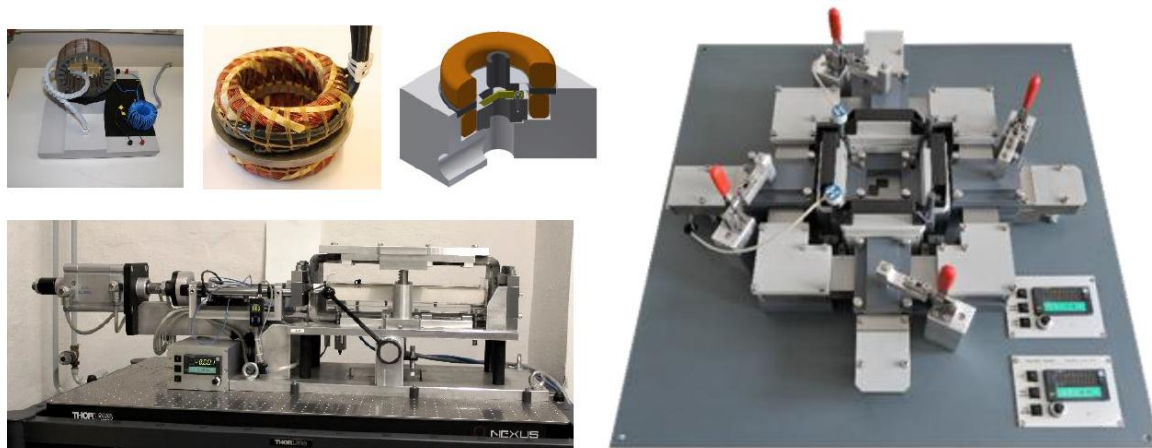


Abbildung 2 Prüftechnik zur Vermessung von Ringkernproben (links oben), sowie dem Einfluss uniaxialer (links unten) und multiaxialer mechanischer Spannung (rechts) auf die elektromagnetischen Materialeigenschaften.

Das generelle Funktionsprinzip der uniaxialen Vermessung sowie einige Messergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt. Der Probekörper in Form einer Elektroblechtafel wird dabei mit einer mechanischen Kraft beaufschlagt, welche eine Spannung im Material von 0 MPa bis  $-20$  MPa hervorruft. Durch die Bestromung einer Primärspule wird der Prüfkörper mit magnetischer Feldstärke beaufschlagt. Die sich ergebende Flussdichte variiert in Abhängigkeit der eingepprägten mechanischen Spannungen. Folglich wird der Energiewandlungsprozess in der elektrischen Maschine durch die sich ergebenden mechanischen Spannungen beeinflusst. Ein grundlegendes Verständnis des Einflusses wurde am IEM bereits in vorherigen Arbeiten untersucht [2] [3] und soll im vorliegenden Projekt auf einen Rotor mit federnder Welle angewendet werden.

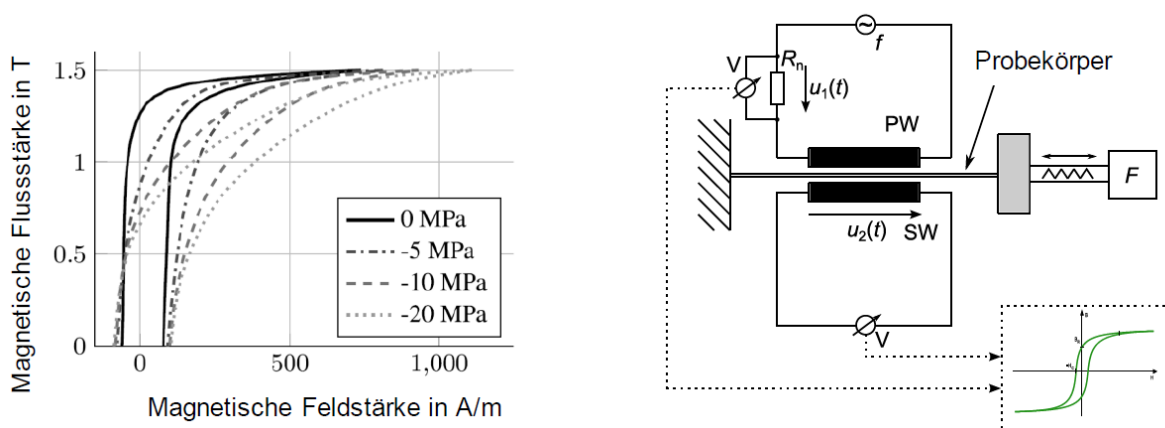


Abbildung 3 Einfluss einer uniaxialen Spannung auf die Magnetisierungskurve von weichmagnetischem Material (links) [2] und Prinzipskizze des am IEM vorhandenen Single-Sheet Tester mit uniaxialer Spannungsbeaufschlagung.

Im Zuge von abgeschlossenen bilateralen Voruntersuchungen zwischen dem IEM und Mubea wurden bereits marktverfügbare Traktionsantriebe nach dem Stand der Technik auf Prüfständen des IEM vermessen (Abbildung 4). Die entwickelte Methodik zur Charakterisierung von Rotorkonzepten dient als Basis für die Erforschung innovativer Rotorkonzepte. Die Ergebnisse der Voruntersuchungen bilden die Grundlage für die in diesem

Projekt zu erforschenden Innovationen. Dabei wurden verschiedene Schwachstellen aktueller Rotordesigns festgestellt:

- Die geringe Drehzahlfestigkeit der Welle-Nabe-Verbindung aktueller Designs stellt einen limitierenden Faktor in der Maschinenauslegung dar.
- Das fehlende Verständnis der multiphysikalischen Wirkzusammenhänge birgt hohe Entwicklungsrisiken, welche in einer bilateralen Zusammenarbeit nicht umfassend beantwortet werden können.

Die hier vorgeschlagene federnde Rotorwelle adressiert diese Schwachstellen.

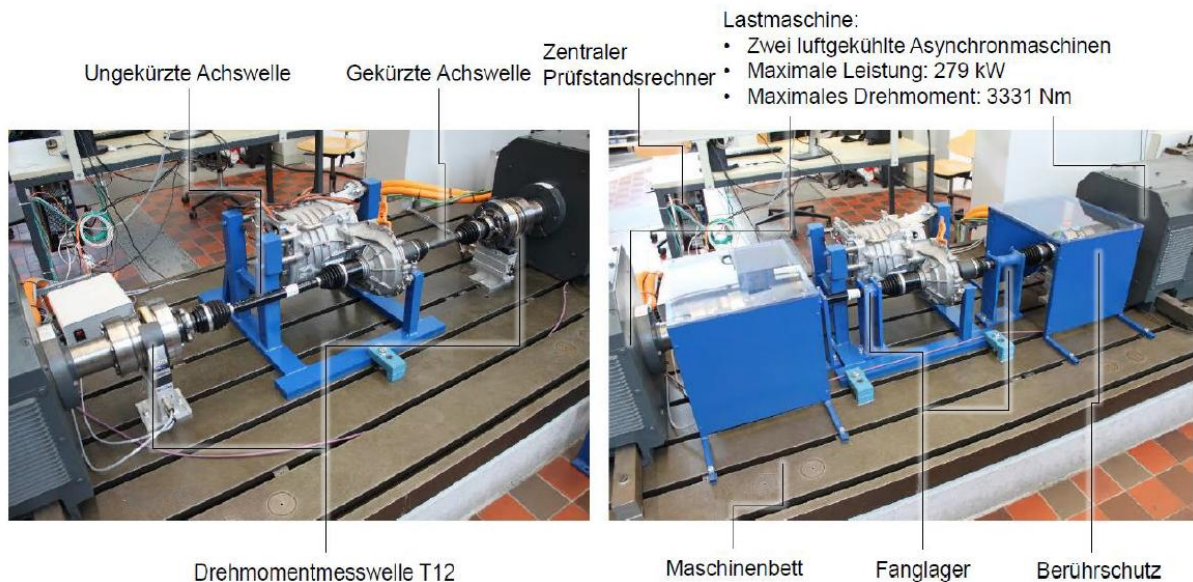


Abbildung 4 Messaufbau zur Vermessung von Traktionsantrieben am Achsprüfstand des IEM.

## 2 Eingehende Darstellung (wird veröffentlicht!)

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

Das Gesamtziel des Vorhabens fedeRo ist es, Antriebsmotoren für zukünftige Fahrzeuge mit höchster Effizienz, einem geringen Gewicht und einem optimalen Package zu entwickeln. Der Stellhebel hierzu liegt bei der ganzheitlichen Entwicklung des Antriebs durch innovative Komponenten.

Das Hauptziel des Förderprojekts ist daher die Umsetzung und Prüfstandserprobung eines Leichtbaurotors mit federnden Komponenten, die neben Leichtbaupotenzialen auch Potentiale zur Steigerung der der Effizienz und Senkung der Kosten zukünftiger Antriebssysteme bieten.

Im Zuge der domänenübergreifenden Simulationsstudie konnte der Einfluss der federnden Rotorkomponenten auf das elektromagnetische Verhalten näher rausgearbeitet werden. Es wurde gezeigt, dass die Polygonwelle keinen Einfluss auf das elektromagnetische Verhalten besitzt. Mechanische Spannungsänderungen im Rotorquerschnitt durch die Einbringung der Polygonwelle im Vergleich zur konventionellen zylindrischen Wellenform haben bei der untersuchten Maschinentopologie keinen Einfluss auf die Energiewandlung. Dies liegt daran, dass der magneto-elastische Effekt vor allem dann zu geänderten Materialeigenschaften führt, wenn das Elektroband noch nicht gesättigt wird. Bei permanentmagneterregten Maschinen sind die Magnetstegbreiten zwecks Reduzierung von magnetischen Streuflüssen jedoch schon so weit reduziert, dass das Material dort stark gesättigt ist. Der magneto-elastische Effekt besitzt daher keinen Einfluss auf die Streuflüsse innerhalb des Rotors von permanentmagneterregten Synchronmaschinen. Die Eisenverluste treten bei dieser Maschinentopologie unterhalb der Rotoroberfläche in Folge von Nutpulsationen auf. In manchen Betriebspunkten ist das Elektroband in diesem Bereich des Rotors nicht vollständig gesättigt, weshalb es hier zu einem geänderten Materialverhalten durch mechanische Spannungsänderungen des polygonförmigen Wellenquerschnitts kommt. Die Zunahme der Eisenverluste im Rotor ist allerdings bezogen auf die Wirkungsgradänderung des Referenzsystems vernachlässig klein. Insgesamt zeigt die Simulationsstudie, dass es durch die Einbringung der Polygonwelle im Rotorquerschnitt einer permanentmagneterregten Synchronmaschine entsprechend keinen Einfluss auf das elektromagnetische Verhalten gibt.

Die federnde Magnetfixierung erfordert zur Integration dieser die Aufweitung der Magnettaschen im Vergleich zu geklebten Permanentmagneten. Der sekundäre Luftspalt in den Magnettaschen von Rotoren mit vergrabenen Permanentmagneten beträgt bei adhäsiven Fixierungsverfahren in der Regel nur ein Zehntel von einem Millimeter. Dieser Luftspalt ist allerdings nicht ausreichend für die Einbringung der Wellblechfeder. Daher muss die Magnettasche vergrößert werden. Durch die federnde Wirkung der Magnetfixierung wirkt eine zusätzliche Kraft auf den Rotorquerschnitt. Je kleiner die Aufweitung der Magnettasche ist, desto größer ist die Federkraft und damit die Zunahme der mechanischen Spannungen in den Magnetstegen. Da die Magnetstegbreite zwecks Reduzierung von magnetischen Streuflüssen minimiert ist, kann diese Zunahme der der mechanischen Spannungen dazu führen, dass nun die Materialgrenzen bei der maximalen Rotordrehzahl überschritten werden und damit ein Bersten des Rotors nicht mehr ausgeschlossen werden kann. Aus diesem Grund muss die Magnetstegbreite bei Bedarf eventuell vergrößert werden. Bei der Simulationsstudie wurden unterschiedlichen Kombinationen zwischen geringfügig aufgeweiteter Magnettasche sowie eine deutlichere Vergrößerung der Magnetstegbreiten und die gegensätzliche Anpassung beider Geometrien verglichen. Hierdurch konnte gezeigt werden, dass die Aufweitung der

Magnetstege stets minimiert werden sollte. Daher ist die Aufweitung der Magnettasche daher zielführender. Dies hat allerdings aus elektromagnetischer Sicht zur Folge, dass sich hierdurch der Luftspalt im Magnetkreis vergrößert. Der Betriebspunkt des Permanentmagneten wandert in Folge dessen hin zu geringen Flussdichten, sodass der Strombedarf zu Drehmomenterzeugung im Grunddrehzahlbereich zunimmt. Im Feldschwähebereich sind jedoch der Strombedarf, da auf Grund der reduzierten Flussverkettung zum Stator weniger Strom zur Feldschwächung notwendig wird. Da das Wellblechfedermaterial jedoch ferromagnetisch ist, führt dies dazu, dass sich die Rotorvariante mit der federnden Permanentmagnetfixierung nur geringfügig von dem Referenzsystem unterscheidet und damit die nachteilige Aufweitung der Magnettasche durch die Wellblechfeder selbst wieder kompensiert wird. Es konnte gezeigt werden, dass es in der Wellblechfeder bei den betrachteten Betriebspunkten nicht zu Wirbelstromverlusten kommt.

## 2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Zuwendungen wurden für die folgenden drei Kostenstellen genutzt: Personalmittel, Reisekosten und Investitionen.

### 2.2.1 Personalmittel

Ein Anteil der Zuwendungen wurde verwendet für die Finanzierung der wissenschaftlichen Bearbeitung der Arbeitspakete durch die Mitarbeiter. Die Mitarbeiter konnten jeweils wissenschaftliche studentische Hilfskräfte anstellen, welche deren Bearbeitung unterstützt haben.

### 2.2.2 Reisekosten

Im Rahmen des Forschungsvorhabens fanden Konsortialtreffen statt. Die Sachbearbeiter und die Vorgesetzten haben hierbei an diesen Treffen zwecks Austausches teilgenommen. Die Zuwendungen bei dieser Kostenstelle wurde hier für die An- und Abreise und die Übernachtung verwendet.

### 2.2.3 Investitionen

Die Durchführung der domänenübergreifenden Simulationsstudie bedarf großer Rechenleistung. Aus diesem Grund wurde ein Teil der Zuwendungen für die Anschaffung eines Rechenservers mit 196 Kernen genutzt. Dies erlaubt es, die Rechenzeit durch Parallelisierung signifikant zu reduzieren und damit den Erkenntnisgewinn zu den federnden Rotorkomponenten zu beschleunigen.

## 2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Untersuchungen haben ein tiefergehendes Verständnis für die Kopplung der Domänen Elektromagnetik, Mechanik und Thermik geschaffen. Daher waren die geleisteten Arbeiten sowohl notwendig als auch angemessen.

## 2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwendbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Auf wissenschaftlicher Ebene garantiert die Beteiligung der Forschungspartner, dass die Ergebnisse und die sich während der Forschungsarbeit ergebenden weiterführenden Fragestellungen in die Ausbildung neuer Experten sowie in die zukünftige Grundlagenforschung im Bereich Leichtbau und innovativer Antriebskomponenten in Deutschland einfließen. Die durchzuführenden Arbeiten stellen konsequente Fortsetzungen der bisherigen Forschungsaktivitäten der Institute dar. Die Projektergebnisse sollen Eingang in die Vorlesungen der beteiligten Institute finden, um den Studierenden eine Ausbildung über den aktuellen Stand der Technik hinaus zu ermöglichen. Darüber hinaus sollen im Rahmen des Projektes Studien- und Abschlussarbeiten durchgeführt werden, welche die vorgesehenen Arbeitspakete wissenschaftlich ergänzen. Um eine qualitativ hochwertige

Sicherung und Dokumentation der Forschungsergebnisse zu gewährleisten, sollen diese ebenfalls in Promotionsvorhaben einfließen. Weiterhin werden studentische Hilfskräfte unterstützend in den verschiedenen Arbeitsbereichen eingesetzt, sodass zukünftige Generationen von Wissenschaftlern und Ingenieuren anhand relevanter, praxisnaher Forschungsaktivitäten gefördert werden. Abschließend können die Projektergebnisse ebenfalls Eingang in Weiterbildungsmaßnahmen für die Industrie finden, welche an den beteiligten Instituten durchgeführt werden und somit zur Akquirierung neuer Projekte beitragen.

Diese Aspekte dienen als Beitrag zur Sicherung beziehungsweise Stärkung des Standorts Deutschland hinsichtlich der Entwicklung und Produktion effizienter, emissionsarmer und ressourcenschonender Antriebe.

## 2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während dem Verlauf des Forschungsprojekts ist es den Autoren nicht bekannt, dass externe Veröffentlichungen zu dem Themengebiet von federnden Rotorkomponenten getätigt wurden. Weitergehende Untersuchungen zu dem Einfluss von mechanischen Spannungen auf die Elektromagnetik wurden am IEM durchgeführt, jedoch noch nicht veröffentlicht.

## 2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Die Ergebnisse zu den federnden Rotorkomponenten werden veröffentlicht. Unter anderem ist eine Veröffentlichung mit dem Titel Einfluss multiphysikalischer Wechselwirkungen im Rahmen der simulationsgestützten Entwicklung von Rotoren für BEV-Hauptantriebe in der VDI-Tagung SIMVEC – Auslegung und Absicherung von Fahrzeugsystemen im November 2024 geplant.

Die Ergebnisse zu der Polygonwelle sollen auf der VDI-Fachtagung Wellen & Welle-Nabe-Verbindungen im November 2024 vorgestellt werden.

## Literaturverzeichnis

1

- [1] A. Krings, „Review and Trends in Electric Traction Motors for Battery Electric and Hybrid Vehicles,“ *ICEM*, pp. 1807-1813, 2020.
- [2] J. Karthaus, „Mechanical stress distribution and the utilisation of the magneto-elastic effect in electrical machines,“ *COMPEL*, Bd. 38, Nr. 4, pp. 1085 - 1097, 2019.
- [3] M. Schröder, „Einfluss von parasitären Effekten und Fertigungsabweichungen auf die Kräfte in elektrischen Maschinen,“ *e&i Elektrotechnik und Informationstechnik*, Bd. 134, Nr. 2, pp. 127 - 138, 2017.

2