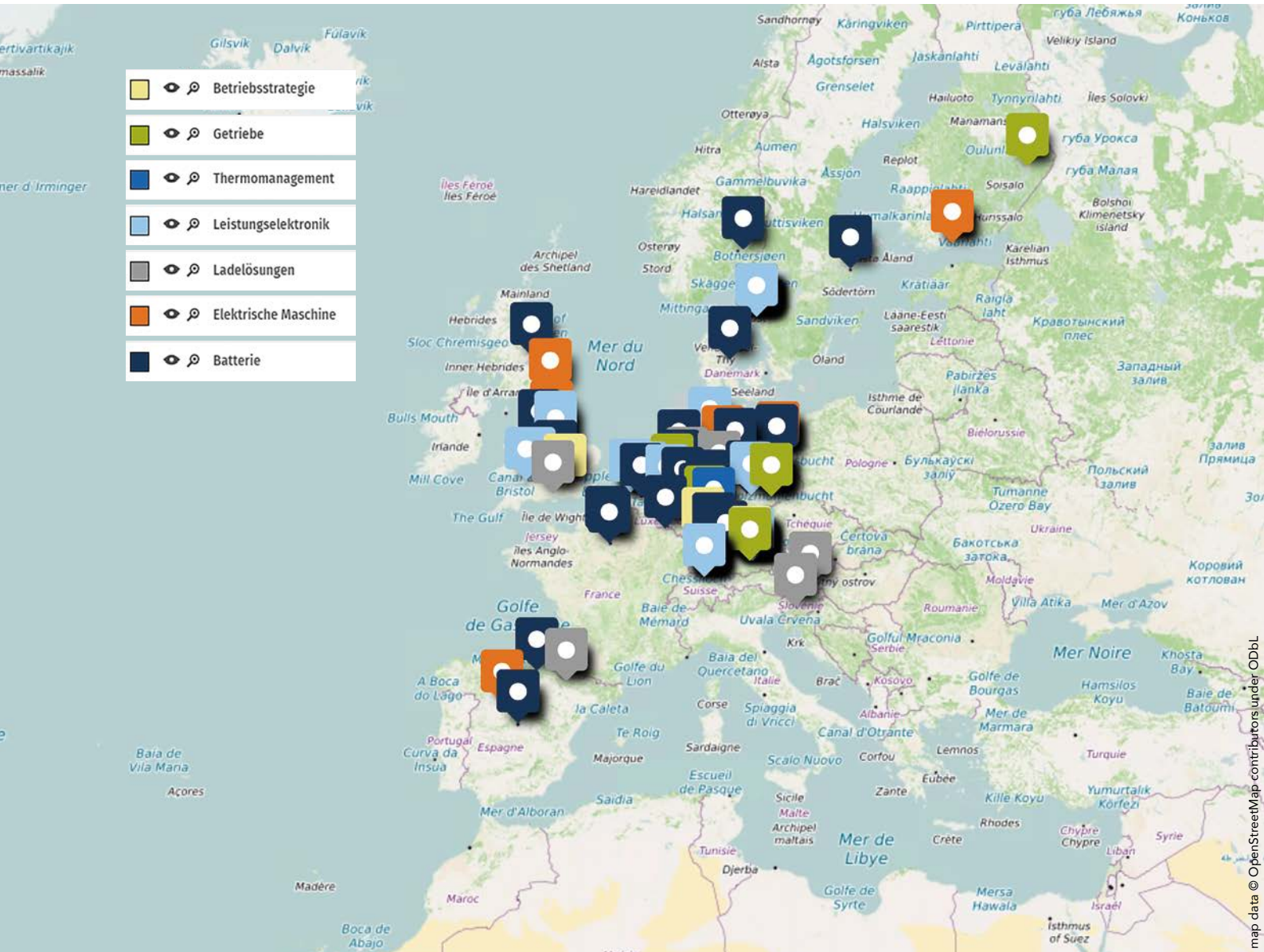


SCALE-UP E-DRIVE



Meta-Analyse Forschungsaktivitäten Scale-up E-Drive

Die vorliegende Meta-Analyse wurde im Rahmen des BMWK-geförderten Projekts „Transformations-Hub Scale-up E-Drive“ durch die TUM (Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik – FTM) erarbeitet. Die Analyse befasst sich mit den Forschungsaktivitäten im Bereich des elektrischen Antriebsstrangs. Sie gliedert sich in zwei Hauptaspekte: Zunächst werden die einzelnen AntriebsstrangkompONENTEN betrachtet, anschließend erfolgt eine Untersuchung hinsichtlich der Forschungsstandorte. Diese Analy-

se dient als Ergänzung zum Forschungsmonitor, der ebenfalls im Rahmen des Projekts „Transformations-Hub Scale-up E-Drive“ erstellt wurde (<https://www.hub-edrive.de/transformation-wissen/forschungsmonitor>).

Insgesamt wurden im Rahmen der Recherche 247 Forschungsaktivitäten dokumentiert – diese werden im Folgenden analysiert und interpretiert.

Autoren:

Jan Koloch, M.Sc.; Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Nico Rosenberger, M.Sc.; Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik (FTM); Technische Universität München

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

**SCALE-UP
E-DRIVE**

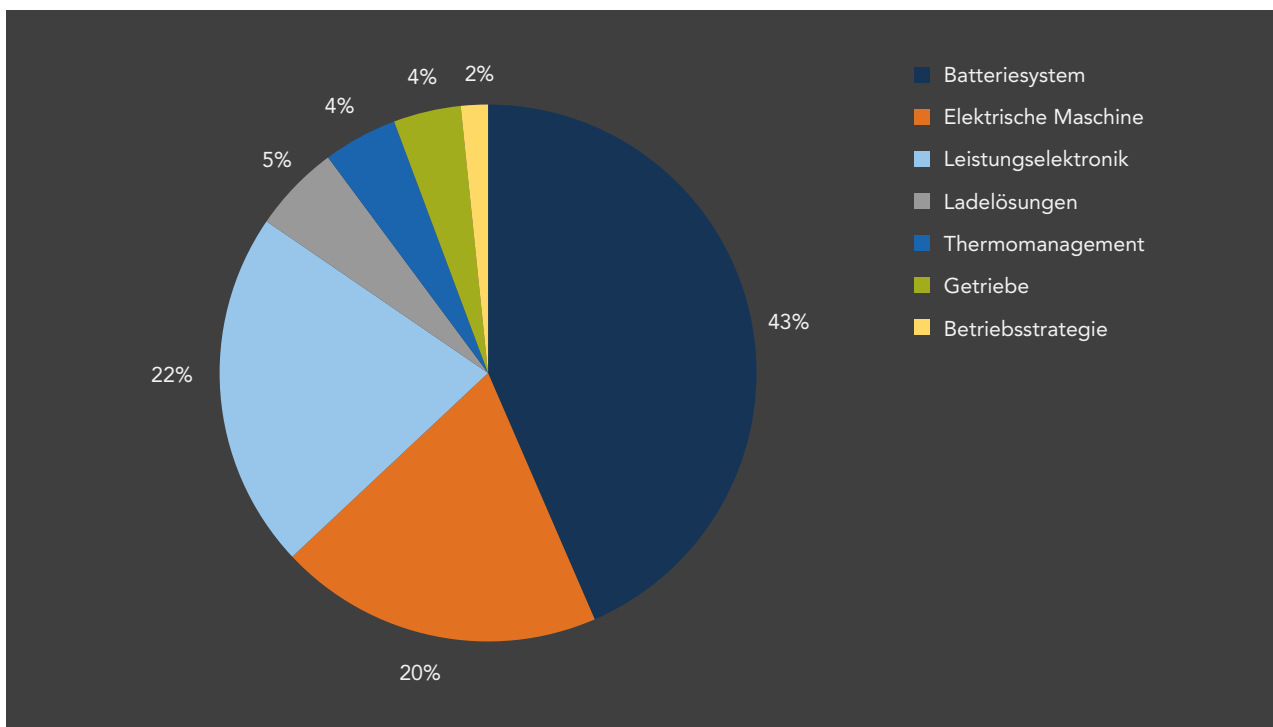
1. Analyse der Antriebsstrangkomponenten

Der erste Gegenstand der Forschungsaktivitäten, der genauer untersucht wird, sind die Antriebsstrangkomponenten und deren statistische Verteilung.

Von den 247 identifizierten Forschungsaktivitäten befassen sich 107 Projekte mit dem Batteriesystem des elektrischen Antriebsstrangs, was 43% der aufgelisteten Projekte und damit fast der Hälfte entspricht. Es konnten 53 Forschungsaktivitäten gefunden werden, die sich mit der Weiterentwicklung der Leistungselektronik beschäftigen, womit sie einen Anteil von 22% ausmachen. Den Schwerpunkt auf die elektrische Maschine legen 48 Projekte, damit bilden sie einen Anteil von 20% an allen Forschungsaktivitäten. Die Ladeinfrastruktur wird von 13 Projekten erforscht, was einem Anteil von 5% entspricht. For-

schungsaktivitäten zum Thermomanagement bilden mit elf Projekten nur einen Anteil von 4%. Der Weiterentwicklung des Getriebes widmen sich zehn Forschungsprojekte, sie weisen folglich einen Anteil von 4% auf. Lediglich vier Projekte forschen am Betriebssystem des elektrischen Antriebsstrangs und bilden damit einen Anteil von 2%.

Diese statistische Verteilung ist nachfolgend graphisch in Form eines Kreisdiagramms abgebildet. Dieses stellt den Anteil jeder Antriebsstrangkomponente an allen Forschungsaktivitäten, die bei der Recherche gefunden wurden, dar.



Quelle: Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik (FTM); Technische Universität München

Abbildung 1: Gesamte Verteilung nach Antriebsstrangkomponente

Anhand dieser Daten ist eindeutig zu erkennen, dass der Schwerpunkt der Forschung zu den Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs auf dem Batteriesystem liegt. Innerhalb der Batterieforschung können ebenfalls verschiedene Schwerpunkte nachgewiesen werden. Grundsätzlich kann man zwischen den Projekten, die sich auf eine Weiterentwicklung und Verbesserung der Lithium-Ionen-Batterien fokussieren, und jenen, die auf eine Alternativtechnologie zur Lithium-Ionen-Batterie setzen, unterscheiden. Beide Forschungstrends verlaufen parallel zueinander – im Rahmen dieser Meta-Analyse wird diese Entwicklung innerhalb der gesammelten Forschungsaktivitäten verglichen.

Die Forschungsaktivitäten, die der Antriebsstrangkomponente Batteriesystem zugeordnet werden können, lassen sich in folgende drei Bereiche aufteilen: Forschungen zu Lithium-Ionen-Batterien, Forschungen zu Alternativtechnologien zu Lithium-Ionen-Batterien und allgemeine Forschungen zum Batteriesystem. Diese Verteilung ist in Abbildung 2 dargestellt.

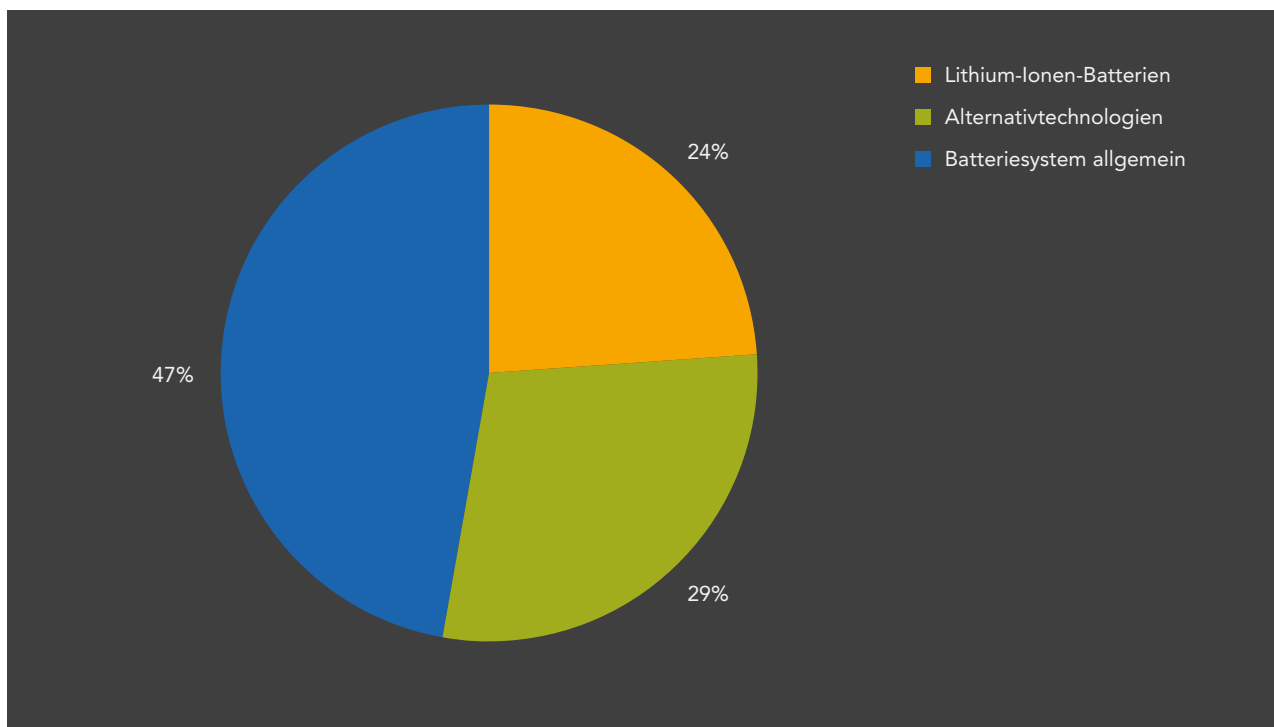


Abbildung 2: Verteilung der Schwerpunkte (Batteriesystem)

Der Erforschung der Lithium-Ionen-Batterie lassen sich 26 Forschungsprojekte zuordnen. Dazu gehören u.a. Projekte, die Sensorimplementierung, Reduktion der Dendritenbildung und die Fähigkeit zur selbstinitiierten Reparatur in Lithium-Ionen-Batterien erforschen. Damit bilden diese Forschungsprojekte einen Anteil von 24% in Bezug auf alle Projekte zur Antriebsstrangkomponente Batterie.

Einen Anteil von 29% bilden die 31 Forschungsprojekte, die an Alternativtechnologien zur Lithium-Ionen-Batterie forschen. Neben Festkörperbatterien beschäftigen sich diese Projekte u.a. mit Natrium-Ionen-Batterien oder mit auf Nickel basierenden Elektroden.

Die verbleibenden 50 Forschungsprojekte lassen sich nicht eindeutig einem dieser zwei Schwerpunkte der Batterieforschung zuordnen, sondern erforschen u.a. die Batteriezellproduktion, Cell-to-pack-Ansätze oder Methoden zur Klassifizierung von Beschichtungsfehlern. Damit bilden diese Projekte einen Anteil von 47% an allen Forschungsaktivitäten zum Batteriesystem.

Die Projekte, die sich intensiv mit den Lithium-Ionen-Batterien beschäftigen, bilden in dieser Gegenüberstellung den kleinsten Anteil, jedoch ist zu berücksichtigen, dass bei den Alternativtechnologien viele verschiedene Technologien und Materialzusammensetzungen erforscht werden. Somit bilden die Lithium-Ionen-Batterien immer noch die am häufigsten untersuchte Batterietechnologie – mit dem Ziel, diese weiterzuentwickeln. Innerhalb dieser Meta-Analyse hat sich bei den Alternativtechnologien keine bestimmte Technologie als eindeutiger Schwerpunkt erwiesen.

Die Daten können dahingehend interpretiert werden, dass noch keine klare Alternativtechnologie zu Lithium-Ionen-Batterien erkennbar ist. Jedoch lässt der höhere Anteil an Forschungsprojekten zu Alternativtechnologien darauf schließen,

dass Lithium-Ionen-Batterien langfristig von einer als effizienter erachteten Technologie abgelöst werden. Im Rahmen dieser Meta-Analyse lässt sich jedoch keine Aussage darüber treffen, welche Technologie die Lithium-Ionen-Batterie ablösen könnte.

Diese Beobachtung spiegelt sich auch in der gespaltenen Einstellung der Forschungsinstitute in den USA zu dieser Thematik wider. Zwei renommierte Forschungsinstitute veröffentlichten ihre Erkenntnisse aus der Batterieforschung und nennen darin unterschiedliche Batterietechnologien für die Zukunft der Elektromobilität.

Einerseits veröffentlichte die U.S. National Science Foundation im November 2023 einen Artikel, in dem dargestellt wird, dass die aktuellen Ziele der US-Regierung in Bezug auf Elektromobilität aufgrund der begrenzten Speicherkapazität und der hohen Produktionskosten konventioneller Lithium-Ionen-Batterien nicht erreicht werden können. Deshalb investiert die US-Regierung unter anderem in Forschungsprojekte zu Festkörperbatterien, von denen man sich eine kompaktere Größe, geringeres Gewicht und größere Speicherkapazität erhofft. [1]

Andererseits verkündete das Argonne National Laboratory im September 2022 einen möglichen Durchbruch bei der Entwicklung von Lithium-Ionen-Batterien mithilfe einer neuen Materialzusammensetzung der Kathode. Ein Nickel-Magnesium-Kobalt-Oxid soll langlebige und sichere Batterien ermöglichen, die Elektroautos größere Reichweiten gewährleisten können. [2]

Zur Verdeutlichung der Interpretation dieser Ergebnisse werden im Folgenden jeweils zwei Forschungsaktivitäten repräsentativ für die Lithium-Ionen-Technologien und die Alternativtechnologien in knapper Form vorgestellt und anschließend noch ein Beispielprojekt, das unter die Kategorie Batteriesystem allgemein fällt.

Das Karlsruher Institut für Technologie ist an einem Forschungsprojekt zur Verbesserung der Lithium-Ionen-Batterie beteiligt, das von der irischen Universität Limerick koordiniert wird und auf europäischer Ebene finanziell gefördert wird. Das Forschungsprojekt SIGNE hat das Ziel, die Energiedichte von Lithium-Ionen-Batterien zu erhöhen und gleichzeitig die Ladezeiten zu reduzieren, indem Silikon im Anodenmaterial implementiert wird und elektrisch leitend mit dem Graphitmaterial verbunden wird. Außerdem soll ein innovativer Separator entwickelt werden, der auf nachhaltigem Fasermaterial basiert. Durch diese Verbesserungen soll die Lithium-Ionen-Batterie weiterhin wettbewerbsfähig bleiben und den Batteriemarkt für Elektroautos dominieren. [3]

Ein weiteres Beispiel für ein Forschungsprojekt, das sich auf Lithium-Ionen-Batterien konzentriert, trägt den Titel SENSIBAT und wurde von dem spanischen Forschungsinstitut IKERLAN betreut; es gilt seit 2023 als abgeschlossen. Das Ziel dieses Projekts bestand darin, eine Sensortechnologie zu entwickeln, die in eine Lithium-Ionen-Batterie integriert werden kann und deren Temperatur, Druck und Leitfähigkeit in Echtzeit misst. Diese Daten können genutzt werden, um Degradations- und Ausfallerscheinungen zu prognostizieren und diesen dann frühzeitig entgegenwirken zu können. [4]

Die folgenden zwei Projekte forschen an Alternativtechnologien zur Lithium-Ionen-Technologie.

Die University of Oxford betreut das Projekt SOLBAT, dessen Ziel es ist, die Realisierbarkeit von Festkörperbatterien zu demonstrieren. Dabei soll gezeigt werden, dass Festkörperbatterien beim Einsatz in Elektrofahrzeugen eine höhere Leistungsdichte als Lithium-Ionen-Batterien aufweisen. Ebenfalls soll im Rahmen des Projekts geprüft werden, ob Festkörperbatterien dazu beitragen, die Reichweite zu erhöhen, Ladezeiten zu verkürzen und das Risiko für Sicherheitsbedenken in Bezug auf Elektrofahrzeuge minimieren. [5]

Am Fraunhofer Institut wird ebenfalls zu Alternativtechnologien zu Lithium-Ionen-Batterien geforscht. Das Forschungsprojekt PRONTO – Produktion von Natrium-Ionen-Batterien setzt seinen Fokus auf ein neuartiges und innovatives Trockenbeschichtungsverfahren für die Herstellung der Elektroden von Natrium-Ionen-Batterien. Einer der ausschlaggebenden Vorteile von Natrium-Ionen-Batterien gegenüber Lithium-Ionen-Batterien ist der Verzicht auf die kritischen Rohstoffe Lithium und Kobalt, wodurch eine Lieferkettenstabilität ermöglicht wird. Das Projekt PRONTO erhofft sich durch diese Alternativtechnologie zu Lithium-Ionen-Batterien einen Fortschritt in der Entwicklung von Elektroautos, unter anderem durch eine Senkung der Produktionskosten. [6]

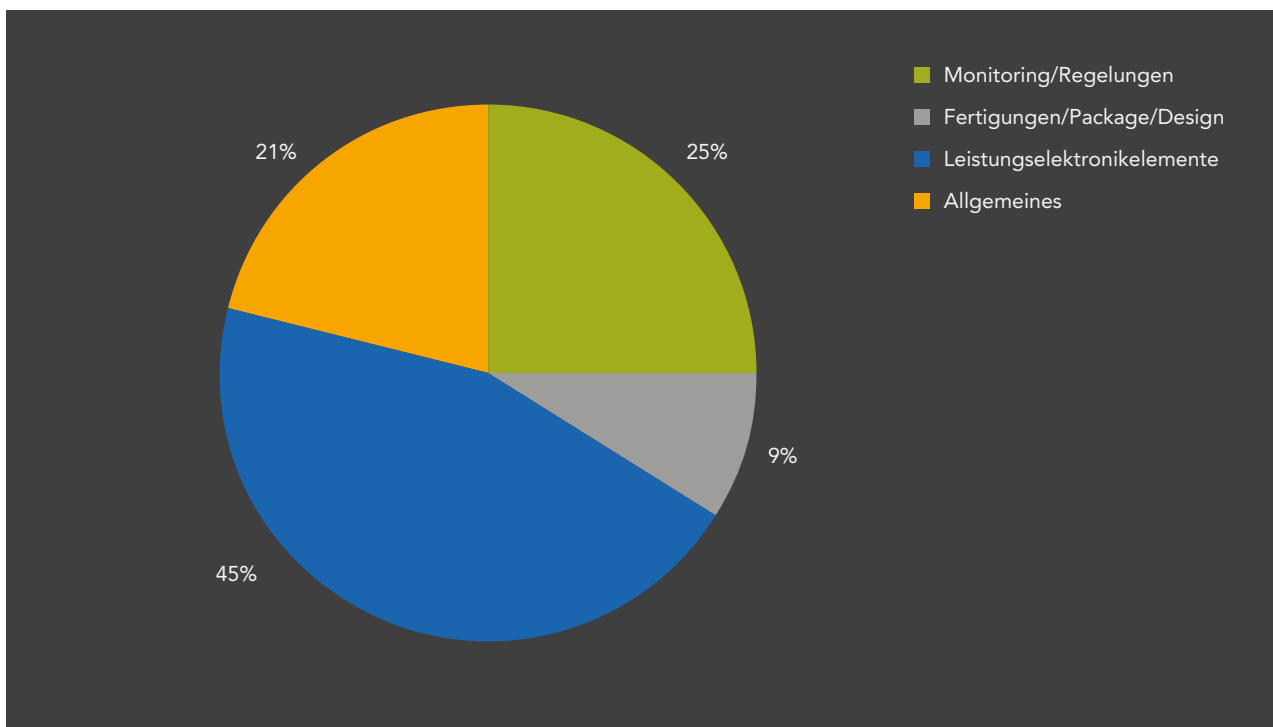
An der RWTH Aachen wird allgemein zum Batteriesystem und zu dessen Verbesserung geforscht. Ein Beispiel dafür ist das Projekt KritBatt, das an einem Klassifizierungssystem von Beschichtungsfehlern bei der Elektrodenherstellung arbeitet. Es soll dabei helfen, den Ausschuss während der Produktion zu minimieren, wodurch Materialkosten eingespart werden können. Zur Analyse der Beschichtungsfehler soll ein Laser-Speckle-Photometrie-System eingesetzt werden. [7]

Diese Meta-Analyse zeigt ebenso wie die fünf Beispielprojekte, dass in der Wissenschaft intensiv zum Batteriesystem in Elektroautos geforscht wird. Es ist aus den untersuchten Forschungsprojekten kein klarer Trend in der Batterietechnologie für zukünftige Elektrofahrzeuge zu erkennen.

Leistungselektronik

Die Forschungsaktivitäten zur Antriebsstrangkomponente Leistungselektronik bilden mit 22% knapp den zweitgrößten Anteil an allen 107 Forschungsaktivitäten. Daraus lässt sich ableiten, dass diese Komponente eine wichtige Rolle für die Weiterentwicklung der Leistungsfähigkeit des elektrischen Antriebsstrangs darstellt. Die Forschungsaktivitäten zum Batteriesystem bilden mit 44% jedoch einen doppelt so großen Anteil. Im Folgenden konzentriert sich die Meta-Analyse auf die Verteilung der Schwerpunkte innerhalb der Forschungskomponenten zur Leistungselektronik. Es konnten vier Schwerpunkte identifiziert werden, denen die 53 Forschungsprojekte jeweils zugeordnet werden können. Die statistische Verteilung der Themenschwerpunkte der Leistungselektronik ist in Abbildung 3 dargestellt.

Die Forschungsaktivitäten zu den Komponenten der Leistungselektronik belaufen sich auf eine Anzahl von 24 und bilden damit einen Anteil von 45% an der Gesamtzahl. Der Überbegriff „Leistungselektronikkomponenten“ umschließt Forschungen und Experimente zu Bauteilen der Leistungselektronik, wie zum Beispiel Transistoren, Wechselrichter, Superkondensatoren und Matrixwandler. Den zweitgrößten Anteil bilden mit 13 Projekten und einem Anteil von 25% die Forschungsaktivitäten zu Modellierung, Monitoring und Regelung der Leistungselektronikkomponenten. Fünf Projekte beschäftigen sich mit Forschungen zur Produktion der Leistungselektronik und deren Package und Design. Damit bilden sie mit 9% den geringsten Anteil. Abschließend lassen sich elf Forschungsaktivitäten der allgemeinen Forschung zur Leistungselektronik zugeordnen, sie formen einen Anteil von 21%. Im Folgenden wird



Quelle: Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik (FTM); Technische Universität München

Abbildung 3: Verteilung der Schwerpunkte (Leistungselektronik)

auf die einzelnen Kategorien nochmal genauer mithilfe jeweils eines konkreten Beispiels einer Forschungsaktivität eingegangen.

Die Leistungselektronik ist ein sehr vielfältiger Bereich des elektrischen Antriebsstrangs, was sich auch in den Schwerpunkten der Forschung zur Leistungselektronik widerspiegelt. Deswegen werden im Folgenden zwei Forschungsaktivitäten vorgestellt, damit die Diversität der Leistungselektronikkomponenten besser repräsentiert wird.

Das erste Beispiel für die Forschung an einer Leistungselektronikkomponente stammt von der Texas Tech University und trägt den Projektnamen „Entwicklung von Halbleitern aus kubischem Bornitrid (c-BN) mit sehr breiter Bandlücke“. Im Rahmen dieses Projekts werden Halbleiterscheiben aus kubischem Bornitrid entwickelt, die ideale Eigenschaften unter extremen Temperaturen und Bedingungen aufweisen sollen. Dadurch könnten höhere Spannungen und Ströme verarbeitet werden und damit Fortschritte in der Entwicklung elektrischer Fahrzeuge erzielt werden. [8]

Ein weiteres Forschungsprojekt zu einer Leistungselektronikkomponente wird von der University of Notre Dame in den USA durchgeführt und trägt den Namen „Vertikaler GaN Kern-Schale-Nanofin-Transistor (CoNVerT): eine neue Richtung für die Leistungselektronik“. Ziel dieses bis 2025 laufenden Projekts ist die Entwicklung eines neuen Designs für Leistungstransistoren. Diese sollen kostengünstiger sein und dadurch innovativ im Anwendungsbereich für mittlere Spannungen genutzt werden können, wozu auch die Branche der Elektromobilität zählt. [9]

Den nächstgrößeren Anteil an den Forschungsaktivitäten zur Leistungselektronik bilden Projekte, die sich mit dem Monitoring und der Regelung der Leistungselektronikkomponenten beschäftigen. Darunter fallen auch Projekte, die daran forschen, Künstliche Intelligenz in die Steuerung der Leistungselektronik zu integrieren.

Ein Beispiel dafür ist das abgeschlossene Projekt der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen mit dem Titel „ZuLeSELF – Zustandsüberwachung von Leistungselektronik für Serien-Elektrofahrzeuge“. Im Rahmen dieses Projekts wurde daran geforscht, eine kontinuierliche Zustandsüberwachung von Leistungselektronikelementen zu realisieren. Diese erlaubt eine frühzeitige Störungs- und Fehlererkennung, sodass kurzfristig und automatisiert darauf reagiert werden kann. Das Ziel des Projekts bestand darin, ein Monitoring-System zu entwickeln, das in die Leistungstransistoren integriert werden kann. [10]

Mit 9% bilden die Forschungsaktivitäten zu Produktion und Design der Leistungselektronik den geringsten Anteil der erfassten Projekte zur Leistungselektronik. Eine Methode, die in diesem Bereich vielfach genannt wird, ist der Einsatz additiver Fertigung. Zum Beispiel forscht die University of Maryland im Rahmen des Projekts „Synteris“ an additiver Fertigung für die Produktion von Leistungselektronikmodulen. Dafür sollen 3D-Keramikgehäuse gedruckt werden, die als elektrische Isolatoren und Wärmetauscher für das Dielektrikum dienen. Dadurch sollen verbesserte Leistung, Lebensdauer und Herstellbarkeit der Leistungselektronikmodule erreicht werden. [11]

Im Rahmen der restlichen 21% der Projekte wird allgemein zur Leistungselektronik geforscht. Darunter fallen u.a. Recherchen zur Verlängerung der Lebensdauer von Leistungselementen, ganzheitliche Untersuchungen von gekoppelten AC-DC-Netzen und Experimente zu den Eigenschaften elektrischer Kontakte.

Die Qualität der Leistungselektronik beeinflusst die Effizienz und Leistungsfähigkeit von Elektrofahrzeugen. Die Meta-Analyse zeigt die Relevanz der Leistungselektronik insofern, als die Forschungsaktivitäten zur Leistungselektronik den zweitgrößten Anteil an allen Forschungsaktivitäten bilden. Ebenfalls kann mithilfe der Meta-Analyse die Komplexität und Vielseitigkeit der Leistungselektronik gezeigt werden.

Elektrische Maschine

Dieser Abschnitt der Meta-Analyse beschäftigt sich mit der Analyse der Forschungsaktivitäten zur elektrischen Maschine, die mit 20% den drittgrößten Anteil an allen Forschungsaktivitäten bilden. In Elektroautos werden Asynchronmaschinen, fremderregte und permanenterregte Synchronmaschinen eingesetzt und, wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, hat sich keine dieser drei Technologien bislang eindeutig branchenweit durchgesetzt. [12] Deswegen wird in der Meta-Analyse überprüft, inwiefern diese Beobachtung auch in den vorliegenden Forschungsaktivitäten erkennbar ist. Von den 48 Forschungsprojekten beschäftigen sich sieben vertieft mit der Erforschung neuer Werkstoffe und Materialien für die permanenterregte Synchronmaschine und bilden damit einen Anteil von 15%. Einen Fokus auf die fremderregte Synchronmaschine

legen hingegen lediglich drei Forschungsaktivitäten und Formen dadurch einen Anteil von 6% an den insgesamt 48 Forschungsaktivitäten. Die Asynchronmaschine wird in zwei Forschungsprojekten intensiv erforscht und weiterentwickelt. Diese zwei Forschungsprojekte bilden damit einen Anteil von 4% an allen Forschungsaktivitäten zur elektrischen Maschine. An dem Einsatz einer Axialflussmaschine im elektrischen Antriebsstrang forschen ebenfalls nur zwei Projekte. Bislang werden fast ausschließlich Radialflussmaschinen eingesetzt, weshalb diese Entwicklung einen neuen, innovativen Ansatz liefert – ebenfalls mit einem Anteil von 4%. Der Großteil der insgesamt 48 Projekte forscht allgemein zur elektrischen Maschine und lässt sich keiner der bereits genannten Kategorien zuordnen. Diese 34 Forschungsaktivitäten bilden einen Anteil von 71%. Diese statistische Verteilung ist in Abbildung 4 graphisch dargestellt.

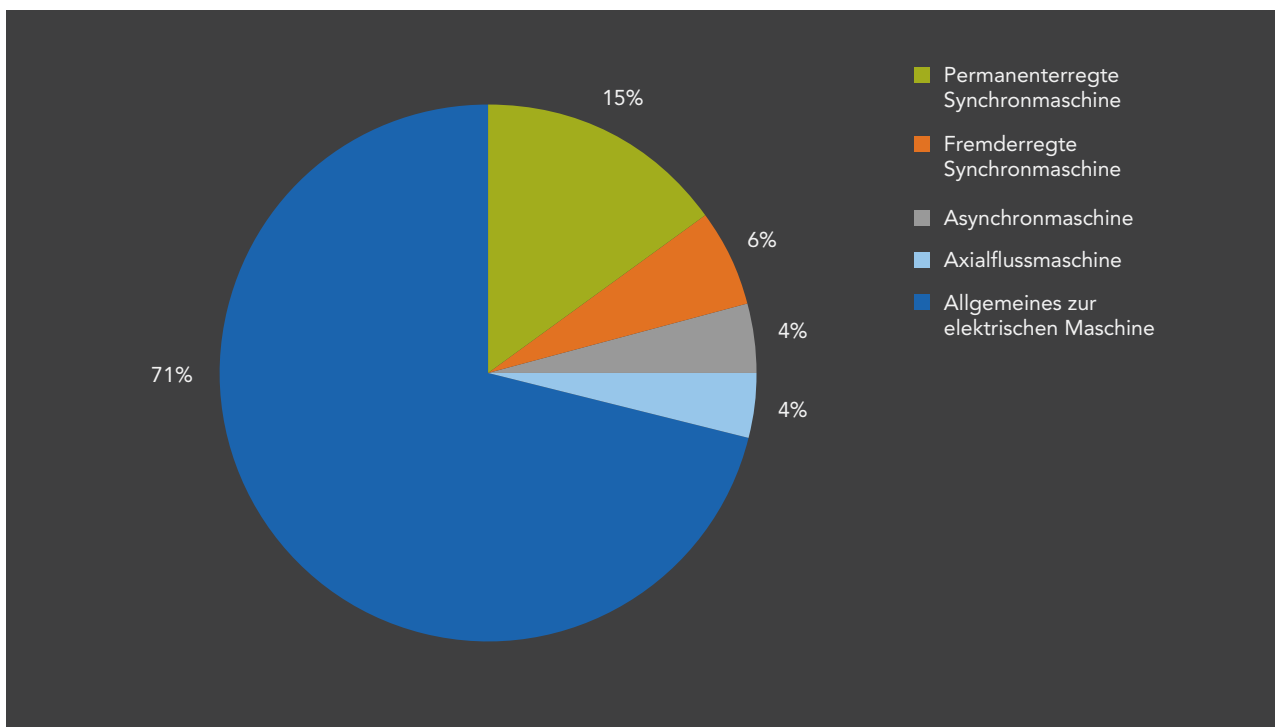


Abbildung 4: Verteilung der Schwerpunkte (elektrische Maschine)

Im Folgenden werden die Schwerpunkte innerhalb der Forschung zur elektrischen Maschine anhand von jeweils einer Forschungsaktivität vorgestellt. Anschließend werden die Ergebnisse der Meta-Analyse interpretiert und in den Kontext des aktuellen Standes der Technik eingeordnet.

Das Fraunhofer Institut forschte im Projekt „HOMAG“ an der Weiterentwicklung von permanenterrregten Synchronmaschinen. Das Ziel war es, das Gewicht und die benötigte Baugröße der elektrischen Maschine zu reduzieren, indem statt herkömmlicher Permanentmagnete SmCo-Dauermagnete zum Einsatz kommen. Diese weisen als Vorteile eine erhöhte Temperaturstabilität, eine hohe Energiedichte und geringe Kosten auf. Im Rahmen des Projekts wurden solche SmCo-Dauermagnete für Anwendungen im Automobil- und Flugzeugantrieb getestet und erforscht. [13]

Die britische Newcastle Universität forschte im Rahmen des Projekts „Null-Magneten-Elektroantrieb für Elektrofahrzeuge (Z-M-Antrieb)“ an einer fremderregten Synchronmaschine, die nicht mehr auf Magnete angewiesen ist. Dadurch soll eine umweltschonende Lösung für den elektrischen Antriebsstrang gefunden werden, die gleichzeitig kostengünstig ist und so die Marktverbreitung von Elektroautos steigern soll. [14]

Ein Beispiel für die Forschung zur Asynchronmaschine bildet das Projekt „Matrixumrichter für feldorientierten Betrieb der Asynchronmaschine“ des Karlsruher Instituts für Technologie. Es kombiniert die beiden Antriebsstrangkomponenten „elektrische Maschine“ und „Leistungselektronik“, da im Rahmen des Projekts ein Matrixumrichter für Asynchronmaschinen entwickelt werden soll, der die Besonderheit aufweist, keinen Zwischenkreiskondensator zu erfordern. Dadurch würde weniger Bauraum benötigt und das Gewicht könnte reduziert werden. [15]

An dem innovativen Ansatz, Axialflussmaschinen statt Radialflussmaschinen in Elektroautos zu integrieren, forschte das Pro-

jekt „CliMAFlux“ der belgischen Universität in Gent. Die Wissenschaftler versprechen sich von diesem Ansatz eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit des elektrischen Antriebsstrangs durch Verringerung der thermischen Verluste und die Reduktion von Seltenerdmaterialien. [16]

71% der Forschungsaktivitäten beschäftigen sich allgemein mit der elektrischen Maschine. Nachfolgend wird ein Beispielprojekt der Universität von Adelaide knapp beschrieben, um einen Einblick in die allgemeinen Forschungsaktivitäten zur elektrischen Maschine zu geben.

Dieses Projekt mit dem Titel „Wirkungsgradkarten für elektrische Maschinen in Elektrofahrzeugen“ wurde Ende des Jahres 2022 abgeschlossen und forschte daran, den Wirkungsgrad von elektrischen Maschinen zu verbessern. Dafür wurde die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von dem Betriebspunkt der elektrischen Maschine untersucht. Die Experimente fanden an Synchronmaschinen und Asynchronmaschinen statt. [17]

Andere Forschungsaktivitäten dieser thematischen Kategorie entwickeln Produktionsabläufe und Werkzeuginnovationen für Elektromotoren, additiv gefertigte Wicklungen oder nutzen KI-Methoden zur Regelung von elektrischen Maschinen.

Die Ergebnisse dieser im Rahmen der Meta-Analyse gesammelten Daten und Inhalte der Forschungsaktivitäten zeigen, dass zur elektrischen Maschine in eine Vielzahl verschiedener Richtungen geforscht wird und sich kein eindeutiger Fokus der Forschung abzeichnet. Die meisten spezifischen Forschungsaktivitäten forschen zur permanenterrregten Synchronmaschine, jedoch formen diese mit 15% dennoch einen geringen Anteil. Daraus lässt sich keine eindeutige Überlegenheit dieser Technologie ableiten. Ganz im Gegenteil, die Meta-Analyse zeigt, dass noch keine Prognose darüber getroffen werden kann, welche Technologie für die elektrische Maschine sich

letztendlich auf dem Markt für Elektroautos durchsetzen wird. Die Ergebnisse der Meta-Analyse spiegeln die derzeitige Situation der elektrischen Maschine in Elektroautos wider. Alle drei vorgestellten Technologien von elektrischen Maschinen der Kategorie Radialflussmaschine kommen zum Einsatz und werden in verschiedenen Kombinationen von Anordnungen in Elektroautos verbaut. Beispielsweise kommt ein permanent-erregter Synchronmotor im Porschemodell „Taycan“ jeweils an der Hinter- und der Vorderachse zum Einsatz. Währenddessen setzt Audi im Modell „E-Tron“ auf Asynchronmotoren an Hinter- und Vorderachse. Im Modell „Zoe“ der Automarke Renault ist hingegen ein fremderregter Synchronmotor verbaut. Die Marke Tesla kombiniert in ihrem Modell „Model X“ einen permanent-erregten Synchronmotor an der Vorderachse mit einem Asynchronmotor an der Hinterachse. [18]

Somit lassen sich die Inhalte der Meta-Analyse zur elektrischen Maschine dahingehend interpretieren, dass sie mit der tatsächlichen aktuellen Marktsituation übereinstimmen. Daraus lässt sich jedoch kein eindeutiger Forschungs- oder Entwicklungstrend für die elektrische Maschine für die kommenden Jahre ableiten.

Thermomanagement

Zur Antriebsstrangkomponente „Thermomanagement“ konnten im Rahmen dieser Meta-Analyse nur elf Forschungsaktivitäten gefunden werden. Aufgrund dieser geringen Anzahl können diese elf Projekte nicht weiter in verschiedene Schwerpunkte unterteilt werden. Trotzdem werden beispielhaft zwei der Forschungsaktivitäten zum Thermomanagement vorgestellt.

Das Karlsruher Institut für Technologie hat ein Projekt namens „SprayCEM – Sprühnebelkühlung E-Maschine“ ausgeführt und im Jahr 2022 abgeschlossen. Das Ziel bestand darin, ein Modell für einen Elektromotor zu entwickeln, dessen Thermomanagement mithilfe einer Öl-Sprühnebelkühlung reguliert werden kann. Dadurch soll die ungleichmäßige Wärmeabfuhr des Wickelkopfs des Elektromotors ausgeglichen und die Bildung von Wärme-Hotspots vermieden werden. [19]

Einen anderen Fokus des Thermomanagements weist das Projekt „MAXITHERM“ des Unternehmens MAXITEX GmbH auf. Im Rahmen dieses Projekts wird an einem Heizsystem für den Innenraum von Elektrofahrzeugen geforscht, das den Komfort der Fahrzeuginsassen gewährleistet. Gleichzeitig kann dieses Heizsystem den Energiebedarf um 30% gegenüber aktuellen konventionellen Heizmethoden in Elektroautos senken. MAXITHERM ist ein innovatives Heizsystem, das auf einem speziellen technischen Gewebe basiert. Dieses Gewebe besteht aus einer Kombination von elektrisch leitenden und nichtleitenden Fasern und wird direkt in die Fahrzeugstruktur integriert. Dadurch kann es den Fahrgästen schnell und unmittelbar Wärme zuführen. Außerdem ist es kosteneffizienter als die aktuellen Heizlösungen auf dem Markt. [20]

Getriebe

Ähnlich zum „Thermomanagement“ fällt das Ergebnis der Meta-Analyse zur Antriebsstrangkomponente „Getriebe“ aus. Es liegen kaum Forschungsaktivitäten im Bereich des Getriebes im elektrischen Antriebsstrang vor. Im Folgenden werden potenzielle Gründe hierfür erläutert.

Im Vergleich zu Autos mit Verbrennungsmotor ist bei Elektrofahrzeugen kein komplexes mehrstufiges und -gängiges Getriebe mehr zwingend notwendig. Grundsätzlich benötigen Elektroautos nur ein simples Einganggetriebe. Der Hintergrund dazu ist detailliert in Kapitel 2.1.5 dargestellt. Aufgrund dieser Reduktion von Komplexität und in Kombination mit den Ergebnissen der Meta-Analyse kann interpretiert werden, dass ein geringerer Bedarf an Forschung zu Getrieben nötig ist als in dem Zeitraum, in dem der Verbrennungsmotor noch im Fokus stand. Inzwischen besteht allerdings der Ansatz, dass für Elektroautos trotzdem vermeintlich bessere Lösungen als ein einfaches Ein-Gang-Getriebe existieren und ein Zweiganggetriebe größere Höchstgeschwindigkeiten ermöglicht. [21] Deswegen gibt es Forschungsaktivitäten, die an neuen Getriebeeigenschaften und -arten forschen, wovon zwei auch im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Ein Beispiel für eine Forschungsaktivität ist das Projekt „MEM-DG“ des finnischen Start-ups Quantum Electronic OY. Im Rahmen dieses Projekts wurde ein Modell für ein Elektromotorsystem mit integriertem Digitalgetriebe entwickelt. Das Digitalgetriebe erhöht den Wirkungsgrad des Elektromotors und eliminiert gleichzeitig die Anfälligkeit für Erosion und Beschädigung gegenüber einem mechanischen Getriebe. Das digitale Getriebe kann zusätzlich die Batterielebensdauer und die Reichweite des Elektroautos erhöhen [22].

Die University of Technology in Sydney forscht an einem kuppungslosen Lastschaltgetriebe für Hybrid- und Elektrofahrzeu-

ge. Durch Simulationen und Experimente wird unter stationären und transienten Bedingungen dieses innovative Getriebe getestet und geprüft, ob mit ihm Effizienzverluste reduziert werden können. [23]

Diese Beispielprojekte zeigen, dass Forschung zur Antriebsstrangkomponente Getriebe stattfindet und innovative Ideen erforscht und umgesetzt werden, jedoch nicht in einem so zahlreichen Umfang wie zu anderen Komponenten des Antriebsstrangs. Die Meta-Analyse hat ergeben, dass die Forschungslandschaft zu Getrieben für den elektrischen Antriebsstrang nicht stark ausgeprägt ist und ein möglicher Grund dafür die geringe Relevanz eines komplexen Getriebes innerhalb des Antriebsstrangs ist.

Ladelösungen

Unter dem Begriff „Ladelösungen“ werden alle Forschungsaktivitäten zusammengefasst, die sich mit dem Lademanagement und der Ladeinfrastruktur „on board“ beschäftigen. Ein Beispiel dafür ist das Projekt „SALM“ der Universität Kassel. Mithilfe von Künstlicher Intelligenz sollen die Ladevorgänge so geregelt werden, dass das Gesamtsystem aus Ladesäulen und Elektrofahrzeugen effizient betrieben werden kann. Durch adaptives Lernen kann das System sich an bestimmte Bedingungen und Situationen anpassen. [24]

Ein weiteres Beispielprojekt erforscht den Aufbau eines Ladeinfrastrukturmodells in Singapur. Dafür werden Lademuster und -verhalten prognostiziert, um auf deren Grundlage eine effiziente und benutzerfreundliche Infrastruktur der Ladestationen aufzubauen. An diesem Projekt arbeitet die Nanyang Technological University gemeinsam mit der Forschungsstiftung TUMCREATE, die die TUM in Singapur gegründet hat. [25]

Der Fokus dieser Meta-Analyse liegt nicht auf der Antriebsstrangkomponente Ladelösungen. Es ist fraglich, inwiefern La-

delösungen überhaupt als Komponente des elektrischen Antriebsstrangs gesehen werden können. Trotzdem wurden 13 Forschungsaktivitäten in die Meta-Analyse aufgenommen, um einen Einblick in den aktuellen Stand der Forschung zu diesem Bereich zu geben. Wie schon erwähnt, sind die gefundenen Projekte sehr unterschiedlich und weisen breit gefächerte Schwerpunkte auf. Daher ist es schwer, einen konkreten Fokus der aktuellen Forschung in Bereich Ladelösungen festzulegen. Dafür benötigt es eine komplette, ausführliche Meta-Analyse mit dem Schwerpunkt lediglich auf Ladelösungen.

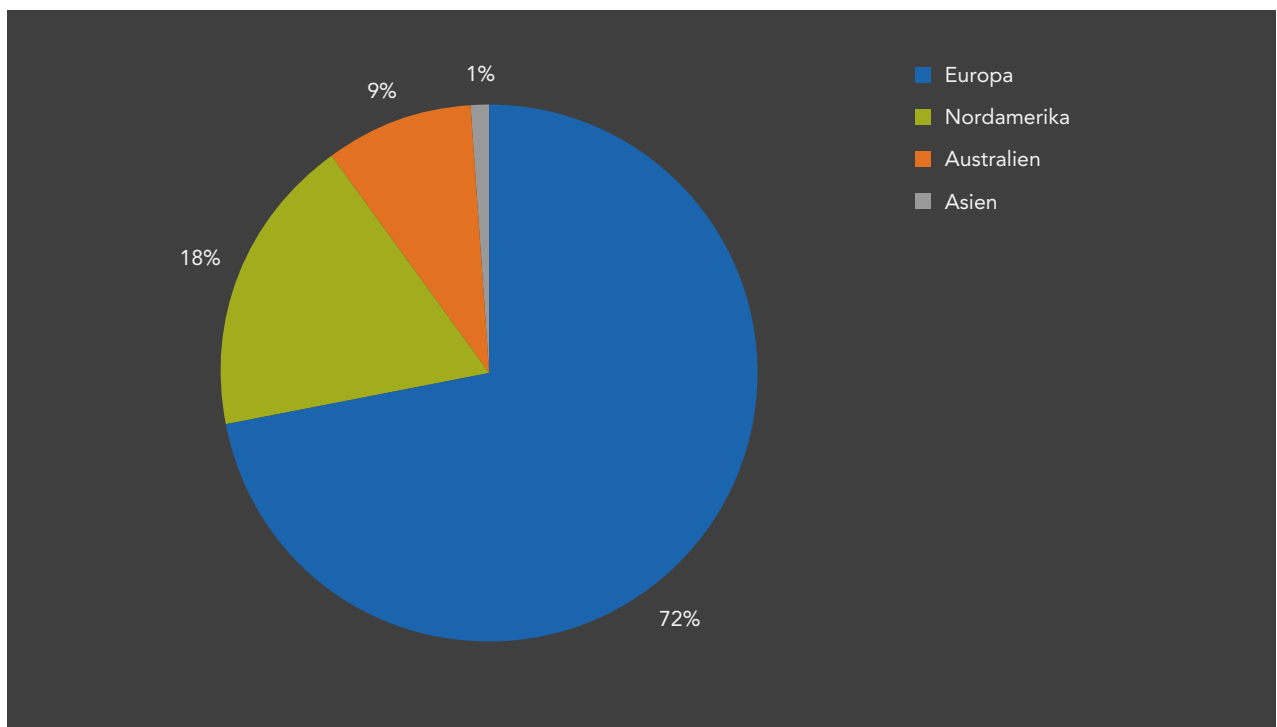
Fazit

Der Schwerpunkt der Forschung zu den Antriebsstrangkomponenten liegt eindeutig auf dem Batteriesystem. Es folgen mit fast gleichen Anteilen die Forschungsaktivitäten zur Leistungselektronik und zur elektrischen Maschine, was ebenfalls auf eine große Relevanz für den elektrischen Antriebsstrang folgern lässt. Mit größerem Abstand und deutlich geringeren Anteilen folgen dann die Forschungsschwerpunkte Thermomanagement, Ladelösungen, Getriebe und Betriebssystem, zu denen deutlich weniger Forschungsprojekte auffindbar waren, was darauf schließen lässt, dass auch tatsächlich weniger Forschung zu diesen Themen stattfindet.

2. Analyse des Forschungsstandortes

Nachdem im Rahmen der Meta-Analyse die Verteilung der Antriebsstrangkomponenten und ihrer Schwerpunkte untersucht wurde, soll im Folgenden die Verteilung der Forschungsstandorte genauer betrachtet werden.

Zunächst wird die Verteilung der Forschungsaktivitäten auf die Kontinente untersucht. Auf nur vier der sieben Kontinente können Forschungsaktivitäten zum elektrischen Antriebsstrang beobachtet werden, nämlich in Europa, Nordamerika, Australien und Asien. Die Verteilung der insgesamt 247 Forschungsaktivitäten auf diese vier Kontinente sieht folgendermaßen aus:



Quelle: Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik (FTM); Technische Universität München

Abbildung 5: Verteilung der Forschungsaktivitäten auf die Kontinente

Den deutlich größten Anteil an allen Forschungsaktivitäten bilden mit 72% jene, die in Europa durchgeführt werden. Insgesamt werden 177 Projekte von europäischen Forschungsinstitutionen und Universitäten betreut und durchgeführt. Später wird noch genauer auf die Verteilung der Forschungsprojekte innerhalb Europas eingegangen. Mit 18% bilden die Forschungsprojekte in Nordamerika den zweitgrößten Anteil. Innerhalb Nordamerikas können zwei der insgesamt 44 Forschungsaktivitäten Mexiko zugeordnet werden, an den restlichen 42 Projekten in Nordamerika wird in den USA geforscht. Die 22 Forschungsaktivitäten aus Australien formen einen Anteil von 9%. Lediglich 1% der Forschungsaktivitäten können asiatischen Institutionen zugeordnet werden und entsprechen drei Projekten, an denen in Singapur geforscht wird.

Ebenfalls interessant ist die Verteilung auf die Kontinente innerhalb der einzelnen Antriebsstrangkomponenten.

Zunächst wird die weltweite Verteilung der Forschungsstandorte zur Antriebsstrangkomponente „Batterie“ betrachtet. Dabei zeigt sich eine ähnliche Verteilung wie bei der aller Forschungsaktivitäten. In Europa wird in 88 Projekten zum Batteriesystem geforscht, was einem Anteil von 82% entspricht. Des Weiteren sind 13 Forschungsprojekte Nordamerika zuzuordnen und bilden einen Anteil von 13%. Einen deutlich kleineren Anteil von 5% formen die fünf Forschungsprojekte zum Batteriesystem, die in Australien koordiniert werden. Mit 1% ist Asien an dieser Verteilung mit einem einzigen Forschungsprojekt beteiligt. Ersichtlich ist das in Abbildung 6.

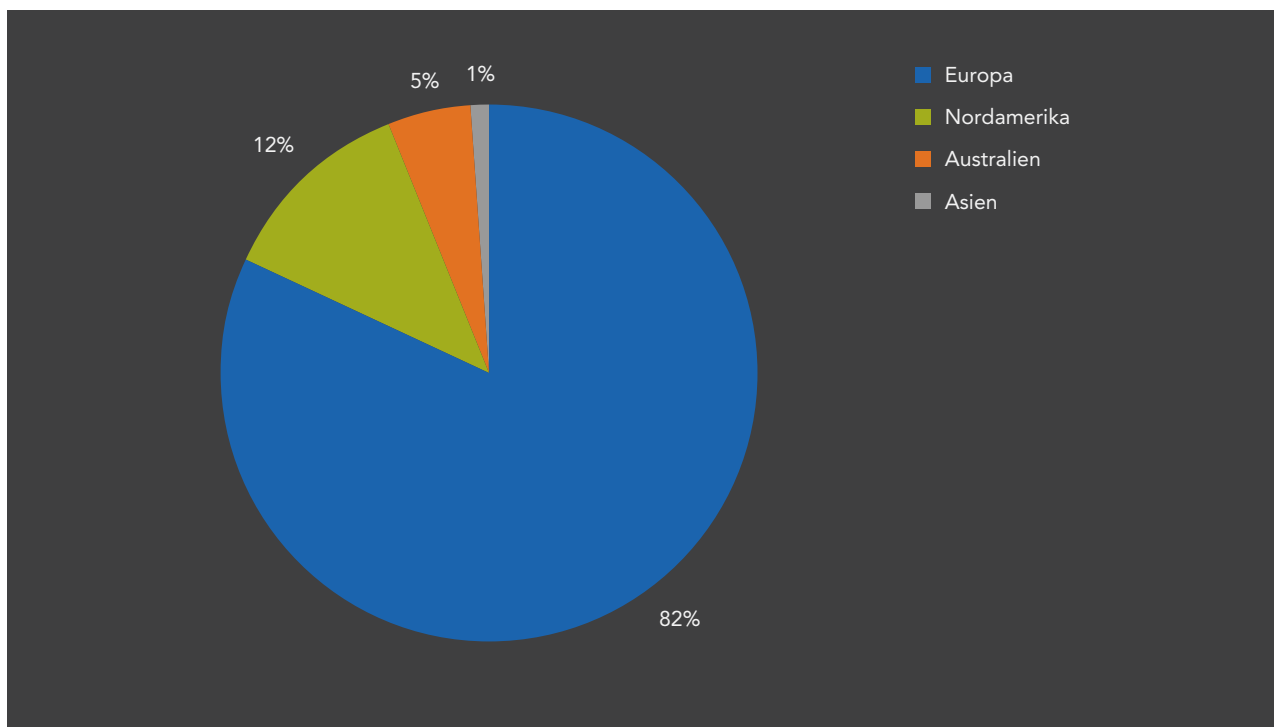
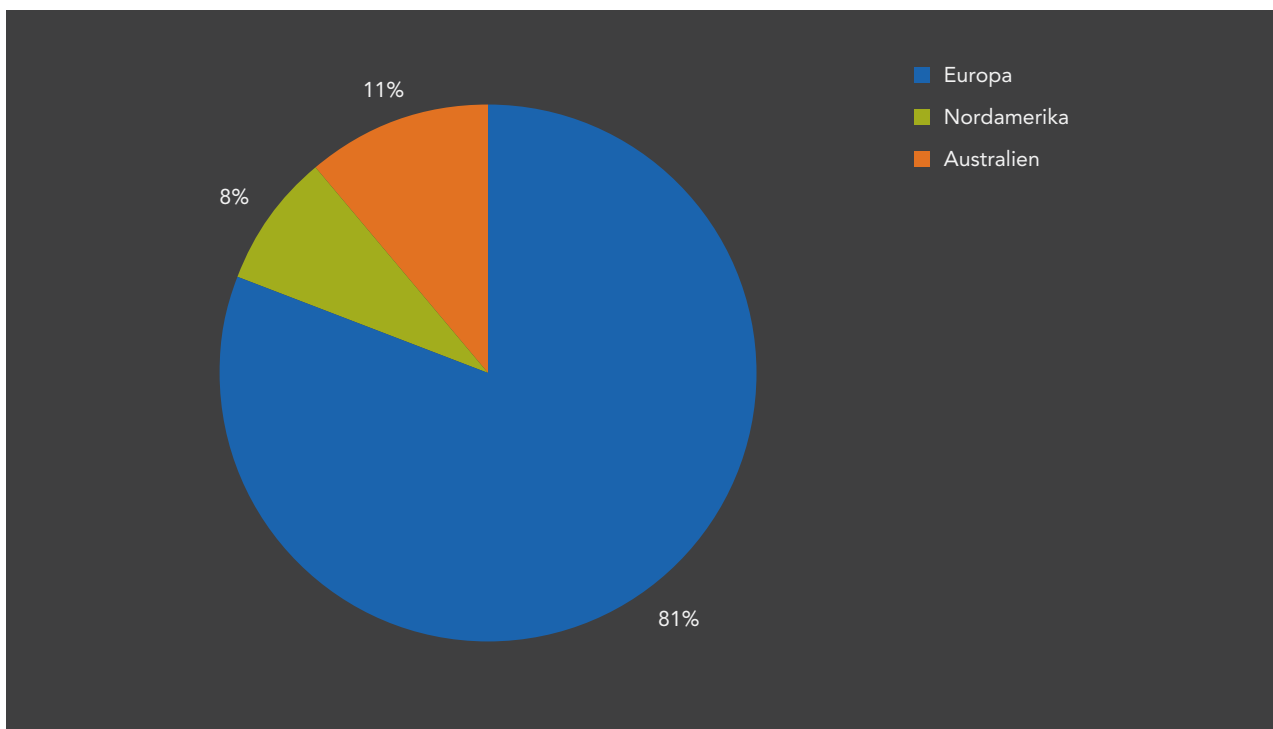


Abbildung 6: Verteilung der Forschungsaktivitäten zum Batteriesystem auf die Kontinente

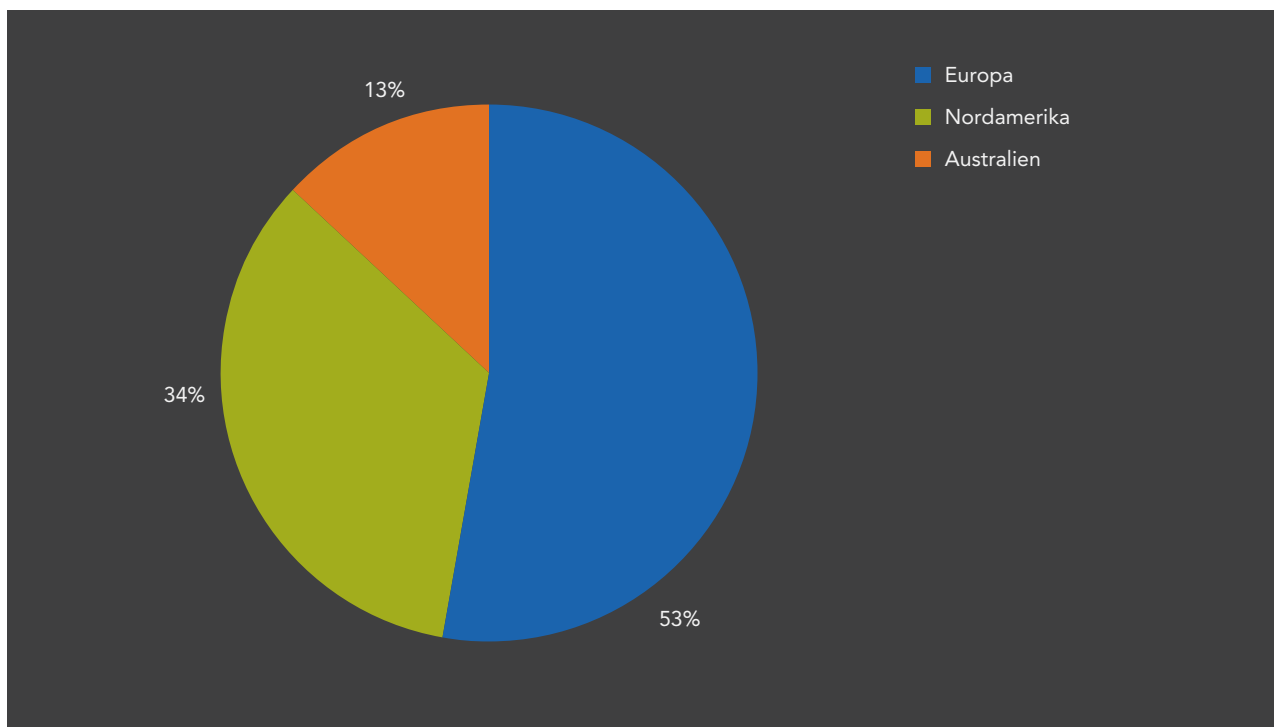
Das nächste Diagramm in Abbildung 7 zeigt die statistische Verteilung der Forschungsaktivitäten zur elektrischen Maschine auf die Kontinente. Hierzu weisen die im Rahmen der Meta-Analyse gesammelten Daten keine Projekte in Asien auf. Daher beschränkt sich die Verteilung auf Europa, Nordamerika und Australien. Mit 81% und 39 Projekten weist Europa hier abermals die deutliche Mehrheit auf. Im Gegensatz zum Batteriesystem liegt hier Australien mit 11% der Projekte auf Platz zwei, knapp vor Nordamerika, das lediglich 8% der Forschungsaktivitäten aufweist. In absoluten Zahlen ist jedoch nur ein Projekt mehr Australien als Nordamerika zuzuordnen, weil fünf Forschungsaktivitäten in Australien und nur vier in Nordamerika stattfinden.



Quelle: Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik (FTM); Technische Universität München

Abbildung 7: Verteilung der Forschungsaktivitäten zur elektrischen Maschine auf die Kontinente

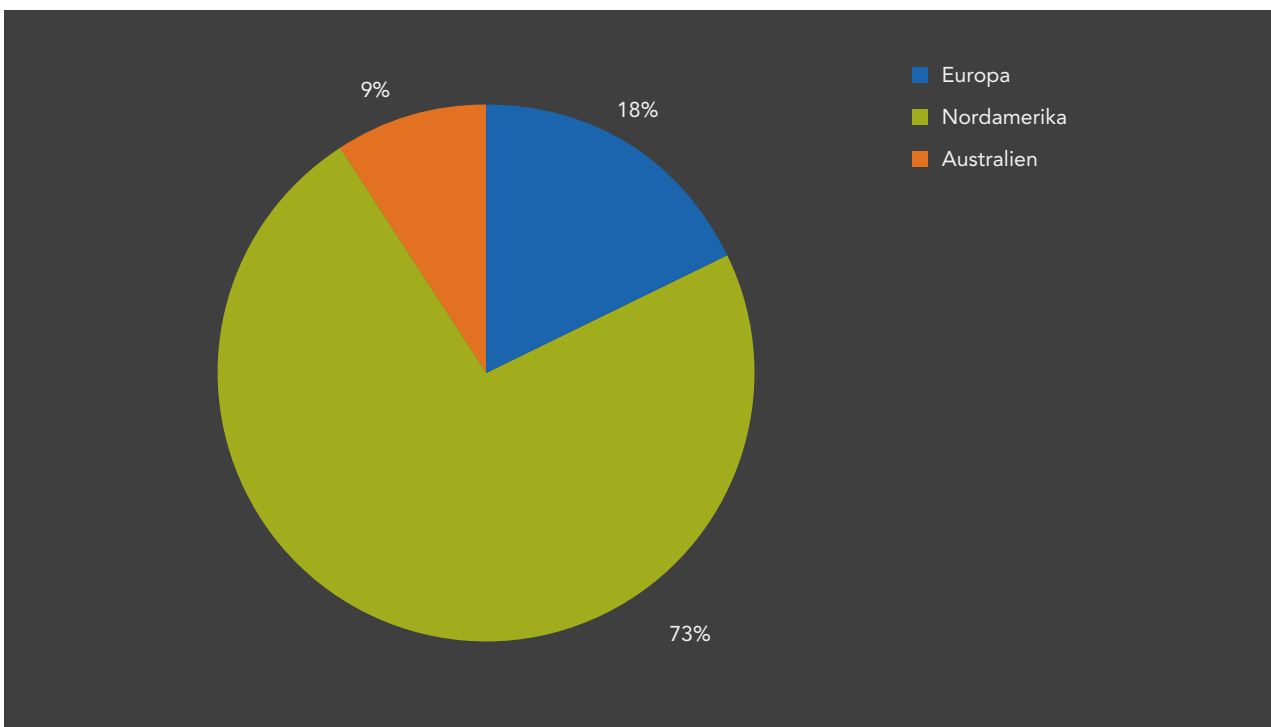
Als Nächstes wird die Verteilung der Forschungsaktivitäten zur Leistungselektronik betrachtet. Dabei zeigt sich, dass im Vergleich zum Batteriesystem und zur elektrischen Maschine die 28 Projekte innerhalb Europas zwar zahlenmäßig überwiegen, mit 53% im Vergleich zu den zuvor betrachteten Forschungsaktivitäten aber einen geringeren Anteil ausmachen. Mit 34% und einer Anzahl von 18 werden etwas mehr als ein Drittel der Forschungsprojekte in Nordamerika durchgeführt. Australien ist Forschungsstandort für sieben Projekte zur Leistungselektronik, die einen Anteil von 13% ausmachen. Abermals sind keine Forschungsaktivitäten zu dieser Antriebsstrangkomponente in Asien zu beobachten.



Quelle: Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik (FTM); Technische Universität München

Abbildung 8: Verteilung der Forschungsaktivitäten zur Leistungselektronik auf die Kontinente

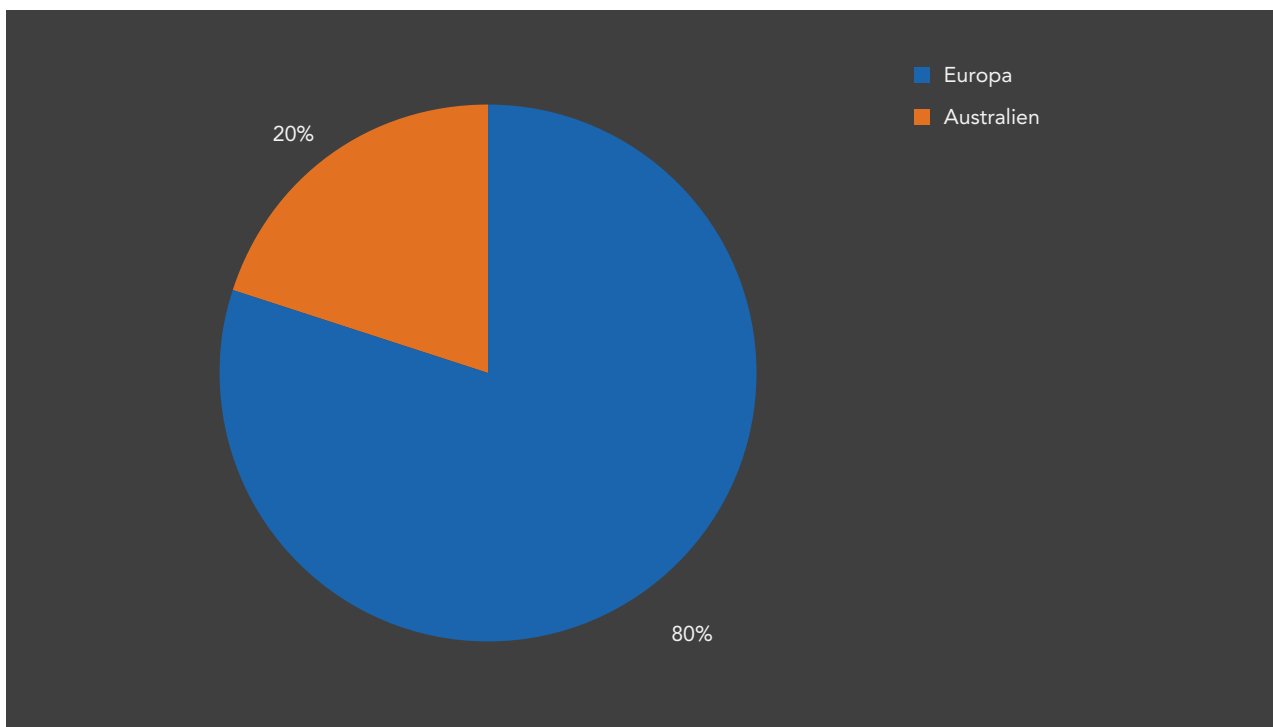
Von den elf Projekten, die zum Thermomanagement des elektrischen Antriebsstrangs forschen, haben acht Projekte ihren Forschungsstandort in Nordamerika. Damit bildet bei dieser Antriebsstrangkomponente erstmals und auch einmalig Nordamerika mit 73% den größten Anteil. An zwei weiteren Projekten wird in Europa geforscht, wodurch ein Anteil von 18% entsteht. Die verbleibenden 9% bildet ein australisches Forschungsprojekt. Die Recherche ergab keine Forschungsaktivitäten zum Thermomanagement in Asien. Die beschriebene statistische Verteilung ist in Abbildung 9 graphisch dargestellt.



Quelle: Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik (FTM); Technische Universität München

Abbildung 9: Verteilung der Forschungsaktivitäten zum Thermomanagement auf die Kontinente

Die Forschungsstandorte für Projekte zum Getriebe beschränken sich auf Europa und Australien. In Asien und Nordamerika waren keine solchen auffindbar. Mit acht von zehn Projekten und damit 80% dominiert bei dieser Antriebsstrangkomponente Europa. In Australien wird im Rahmen von zwei Forschungsaktivitäten am Getriebe geforscht, wodurch sich ein Anteil von 20% ergibt. Zu entnehmen ist diese Verteilung dem Kreisdiagramm aus Abbildung 10.



Quelle: Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik (FTM); Technische Universität München

Abbildung 10: Verteilung der Forschungsaktivitäten zum Getriebe auf die Kontinente

Die letzte Antriebsstrangkomponente, zu der im Rahmen dieser Meta-Analyse recherchiert wurde, betrifft die Ladelösungen. Insgesamt weisen acht Forschungsaktivitäten ihren Standort in Europa auf und formen somit einen Anteil von 62%. Je zwei Projekte werden in Asien und Australien durchgeführt und bilden damit jeweils einen Anteil von 15%. Die verbleibenden 8% werden einem Forschungsprojekt in Nordamerika zugeordnet. Daraus ergibt sich graphisch folgende Verteilung.

Die vier Forschungsaktivitäten zur ganzheitlichen Betrachtung des Betriebssystems des elektrischen Antriebsstrangs weisen alle als Forschungsstandort Europa auf. Somit beträgt hier der Anteil Europas als Standort 100%. Zusammenfassend lässt sich aus diesen Verteilungen eindeutig interpretieren, dass Europa als Forschungsstandort im Bereich elektrischer Antriebsstrang

gegenüber den anderen Kontinenten dominiert. Bei allen Antriebsstrangkomponenten außer dem Thermomanagement bildet der Anteil europäischer Projekte mindestens die Hälfte mit 50%. Die einzige Ausnahme bildet das Thermomanagement mit einem großen Anteil an nordamerikanischen Projekten. Die Forschungsaktivitäten zum Thermomanagement beinhalten jedoch nur elf von insgesamt 243 Projekten, was einem Anteil von knapp 5% entspricht. Deshalb kann trotzdem die Schlussfolgerung aus dieser Analyse gezogen werden, dass Europa den Schwerpunkt der Forschungsstandorte zum elektrischen Antriebsstrang darstellt. Gefolgt wird Europa von Nordamerika und dann Australien. Ein kleiner Anteil von insgesamt nur 1% der Forschungsprojekte weist einen Standort in Asien auf.

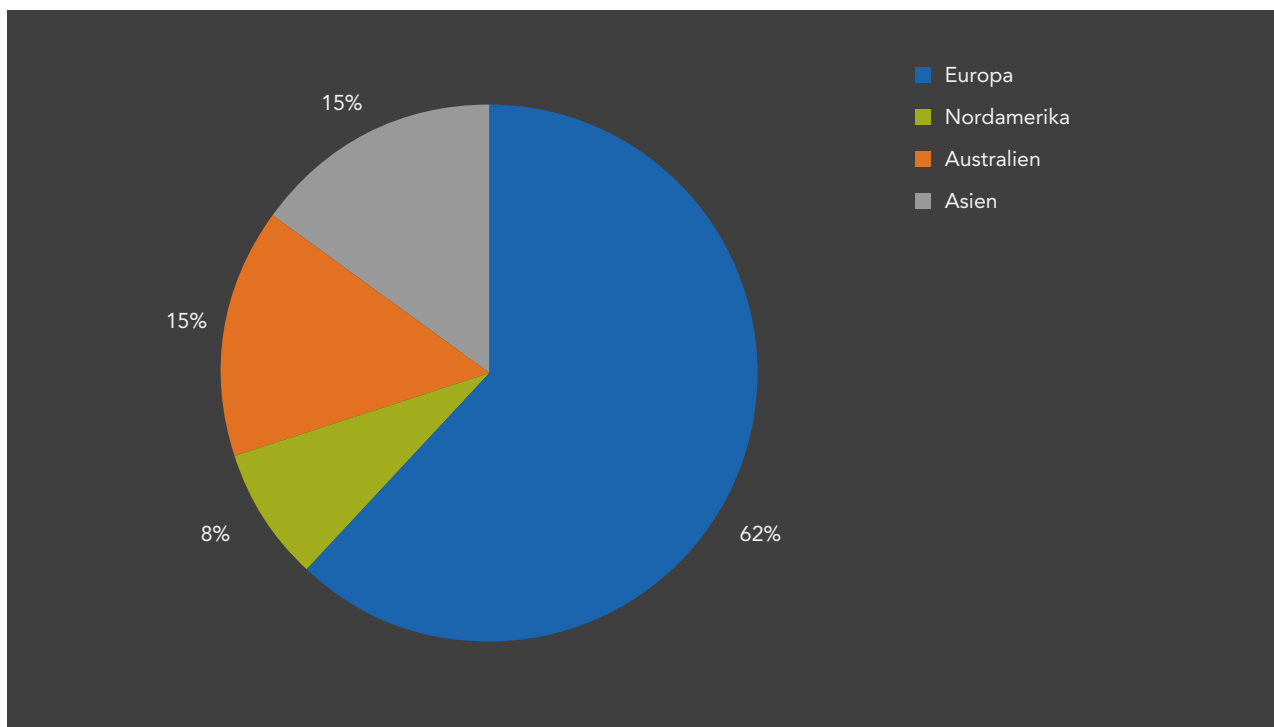
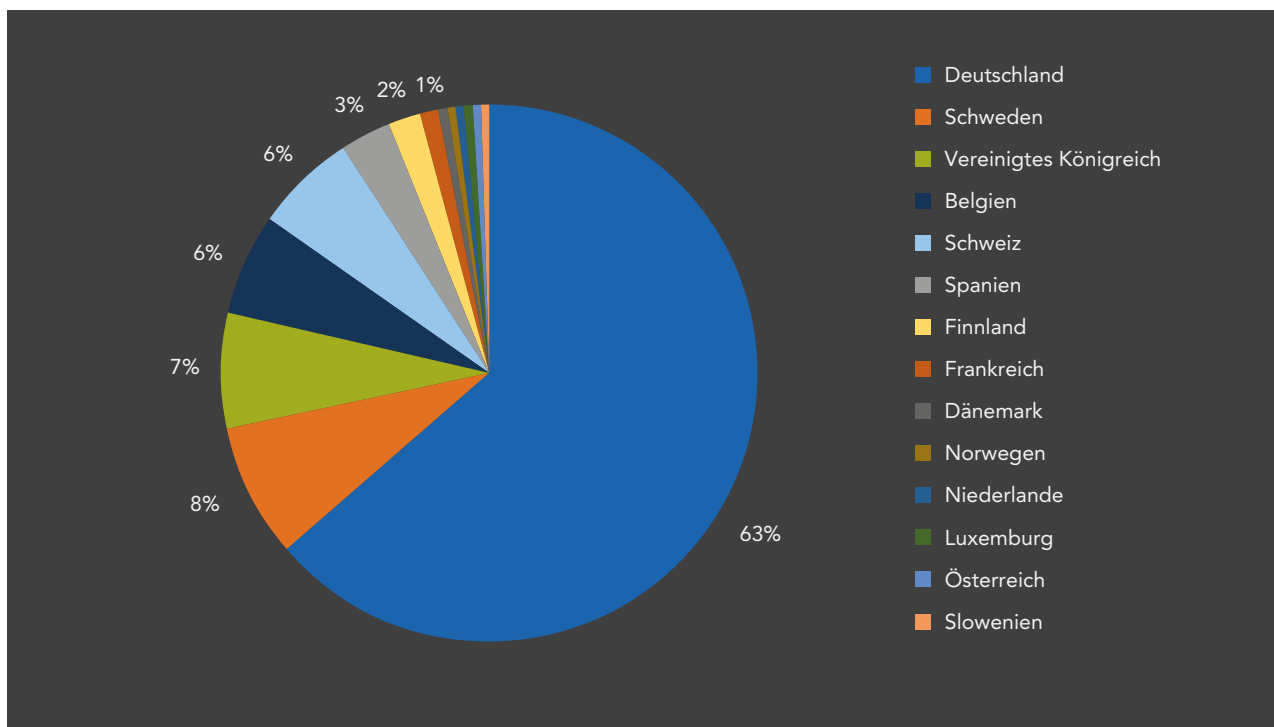


Abbildung 11: Verteilung der Forschungsaktivitäten zu Ladelösungen auf die Kontinente

Als Schwerpunktstandort wird Europa noch genauer analysiert. Im Folgenden wird die statistische Verteilung der Forschungsaktivitäten des elektrischen Antriebsstrangs innerhalb Europas untersucht. Dazu wird verglichen, in welchen europäischen Ländern Forschungsaktivitäten stattfinden und wie viele. Es wird jedoch nicht erneut einzeln auf jede Antriebsstrangkomponente und deren Verteilung innerhalb Europas eingegangen.

Insgesamt verteilen sich die 173 europäischen Forschungsaktivitäten auf 14 Länder. In folgenden Ländern wird jeweils nur ein Forschungsprojekt betreut: Dänemark, Luxemburg, Niederlande, Norwegen, Österreich und Slowenien. Dadurch beträgt der Anteil dieser Länder an der Gesamtverteilung weniger als 1% und wird deswegen nicht zahlenmäßig in dem folgendem Kreisdiagramm dargestellt.

Mit 63% bildet Deutschland den eindeutigen Standortschwerpunkt für Forschungsaktivitäten zum elektrischen Antriebsstrang innerhalb Europas. 111 Forschungsprojekte werden oder wurden an deutschen Instituten oder Universitäten durchgeführt. Deutlich weniger, aber mit 14 Projekten und 8% dennoch die zweitmeisten Projekte, werden in Schweden betreut. Anschließend folgt das Vereinigte Königreich mit 13 Projekten, die einen Anteil von 7% bilden. Mit jeweils elf Projekten und somit 6% betreuen die Schweiz und Belgien Forschungsprojekte zum elektrischen Antriebsstrang. Die sechs Forschungsaktivitäten in Spanien bilden einen Anteil von 3%. Finnland formt mit drei Forschungsaktivitäten einen Anteil von 2%. In Frankreich wird in Form von zwei Projekten zum elektrischen Antriebsstrang geforscht, was einem Anteil von 1% entspricht.



Quelle: Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik (FTM); Technische Universität München

Abbildung 12: Verteilung der Forschungsaktivitäten Europas auf die Länder

Aufgrund der klar erkennbaren Dominanz Deutschlands als Forschungsstandort wird die Verteilung der Forschungsaktivitäten innerhalb Deutschlands noch genauer betrachtet.

Das folgende Kreisdiagramm zeigt die Anteile der sechs untersuchten Antriebsstrangkomponenten innerhalb Deutschlands:

Es zeigt sich eine ähnliche Verteilung wie in Abbildung 1, die die gesamte, weltweite Verteilung der Antriebsstrangkomponenten und deren Forschungsaktivitäten darstellt. Den größten Anteil mit 55% bilden Projekte zum Batteriesystem, ihre Anzahl beträgt 61. Sehr ähnliche Anteile bilden die 18 Projekte zur elektrischen Maschine mit 16% und die 17 Projekte zur Leistungselektronik mit 15%. Die sieben Forschungsaktivitäten zum Getriebe formen einen Anteil von 6% und liegen damit um zwei Prozentpunkte über dem weltweiten gesamten Anteil der Projekte zum Getriebe. Während jedoch weltweit insgesamt 5% der Projekte am Thermomanagement forschen, beträgt der Anteil in Deutschland nur 2% mit zwei Projekten. Drei deutsche Projekte forschen an Ladelösungen und bilden damit einen Anteil von 3%. Weltweit liegt dieser Anteil bei 5%. Ebenfalls einen Anteil von 3% formen die drei Forschungsprojekte zur Betriebsstrategie.

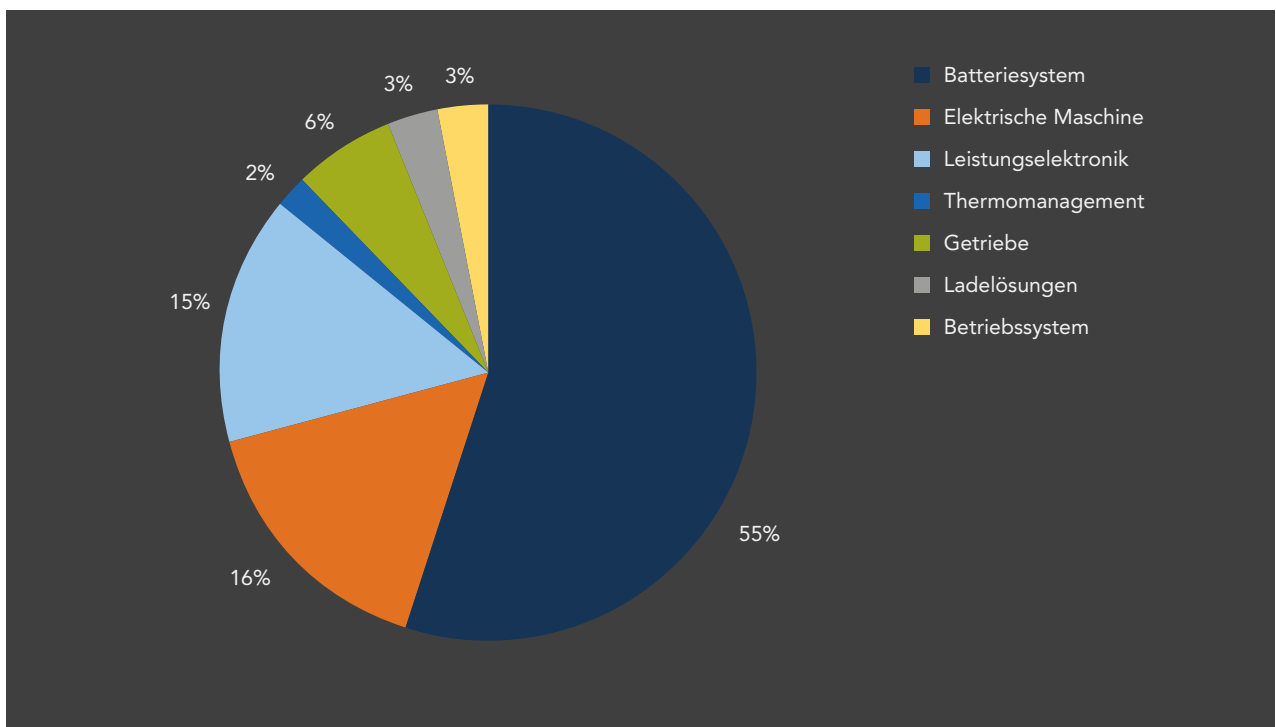


Abbildung 13: Verteilung der Forschungsaktivitäten zu den Antriebsstrangkomponenten innerhalb Deutschlands

Fazit

Im weltweiten Vergleich hebt sich Europa als Schwerpunktstandort für die Forschung zum elektrischen Antriebsstrang hervor. Außerdem hat sich ergeben, dass weltweit – und ebenso in Europa wie in Deutschland – die Forschungsaktivitäten zur Antriebsstrangkomponente Batteriesystem den größten Anteil bilden. Daraus lässt sich ableiten, dass aktuell der Fokus der Forschung in Bezug auf Elektromobilität auf dem Batteriesystem liegt.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gesamte Verteilung nach Antriebsstrangkomponente	4
Abbildung 2: Verteilung der Schwerpunkte (Batteriesystem)	5
Abbildung 3: Verteilung der Schwerpunkte (Leistungselektronik)	8
Abbildung 4: Verteilung der Schwerpunkte (elektrische Maschine)	11
Abbildung 5: Verteilung der Forschungsaktivitäten auf die Kontinente	16
Abbildung 6: Verteilung der Forschungsaktivitäten zum Batteriesystem auf die Kontinente	17
Abbildung 7: Verteilung der Forschungsaktivitäten zur elektrischen Maschine auf die Kontinente	18
Abbildung 8: Verteilung der Forschungsaktivitäten zur Leistungselektronik auf die Kontinente	19
Abbildung 9: Verteilung der Forschungsaktivitäten zum Thermomanagement auf die Kontinente	20
Abbildung 10: Verteilung der Forschungsaktivitäten zum Getriebe auf die Kontinente	21
Abbildung 11: Verteilung der Forschungsaktivitäten zu Ladelösungen auf die Kontinente	22
Abbildung 12: Verteilung der Forschungsaktivitäten Europas auf die Länder	23
Abbildung 13: Verteilung der Forschungsaktivitäten zu den Antriebsstrangkomponenten innerhalb Deutschlands	24

Literatur

- [1] U.S. National Science Foundation. „Researchers develop promising approach to smaller, more powerful, safer electric vehicle batteries.“ Zugriff am: 9. Juni 2024. [Online.] Verfügbar: <https://new.nsf.gov/news/researchers-develop-promising-approach-smaller>
- [2] J. E. Harmon. „New cathode design solves major barrier to better lithium-ion batteries.“ Zugriff am: 9. Juni 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.anl.gov/article/new-cathode-design-solves-major-barrier-to-better-lithiumion-batteries>
- [3] Europäische Kommission. „Composite Silicon/Graphite Anodes with Ni-Rich Cathodes and Safe Ether based Electrolytes for High Capacity Li-ion Batteries.“ Zugriff am: 17. Juni 2024. [Online.] Verfügbar: <https://cordis.europa.eu/project/id/101069738/de>
- [4] IKERLAN Technology Research Centre. „SENSIBAT.“ Zugriff am: 22. Juni 2024. [Online.] Verfügbar: <https://sensibat-project.eu/project-introduction/>
- [5] N. Cadman. „SOLBAT – Solid State Metal Anode Batteries.“ Zugriff am: 22. Juni 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.faraday.ac.uk/research/beyond-lithium-ion/solid-state-batteries/>
- [6] O. Fitz. „PRONTO – Produktion von Natrium-Ionen-Batterien in Baden-Württemberg.“ Zugriff am: 17. Juni 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/pronto.html>
- [7] A. Scheibe. „Elektrodenherstellung: PEM trägt zur Klassifizierung von Beschichtungsfehlern bei.“ Zugriff am: 22. Juni 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.pem.rwth-aachen.de/go/id/shrmi>
- [8] Arpa-Energy. „Development of Cubic Boron Nitride (c-BN) Ultrawide Bandgap Semiconductors.“ Zugriff am: 18. Juni 2024. [Online.] Verfügbar: <https://arpa-e.energy.gov/technologies/projects/development-cubic-boron-nitride-c-bn-ultrawide-bandgap-semiconductors>
- [9] Arpa-Energy. „GaN Core-shell Nanofin Vertical Transistor (CoNVerT): A New Direction for Power Electronics.“ Zugriff am: 19. Juni 2024. <https://www.arpa-e.energy.gov/technologies/projects/gan-core-shell-nanofin-vertical-transistor-convert-new-direction-power>
- [10] RTWH Aachen ISEA. „Zustandsüberwachung von Leistungselektronik für Serien-Elektrofahrzeuge.“ Zugriff am: 19. Juni 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.isea.rwth-aachen.de/go/id/bxdrk?#aaaaaaaaabxeqk>
- [11] Arpa-Energy. „Breaking the Board: Bringing 3 Dimensional Packaging and Thermal Management to Power Electronics.“ Zugriff am: 19. Juni 2024. [Online.] Verfügbar: <https://arpa-e.energy.gov/technologies/projects/breaking-board-bringing-3-dimensional-packaging-and-thermal-management-power>
- [12] A. Kampker und H. H. Heimes. Elektromobilität. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2024.
- [13] Fraunhofer Gesellschaft. „Hochleistungsmagnetmaterialien auf Basis von SmCo und CoFe für hocheffiziente elektrische Automobilantriebe und Flugzeugmotoren.“ Zugriff am: 18. Juni 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.iwks.fraunhofer.de/de/iwks-abteilungen/magnetische-materialien/homag.html>

- [14] Newcastle University. „Revolutionising electric drives for a Net Zero Future.“ Zugriff am: 18. Juni 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.ncl.ac.uk/press/articles/latest/2023/09/zero-magnetelectricdrive/>
- [15] A. Stahl. „Matrixumrichter für feldorientierten Betrieb der Asynchronmaschine.“ Zugriff am: 18. Juni 2024. [Online.] Verfügbar: https://www.eti.kit.edu/mitarbeiter_projekt_matrix-umrichter.php
- [16] H. Vansompel. „Circular design and manufacturing techniques for next-generation highly-efficient integrated axial flux motor drives for electric vehicles.“ Zugriff am: 18. Juni 2024. [Online.] Verfügbar: <https://research.ugent.be/web/result/project/56836cfd-15ff-4709-a545-11b2ce867ee7/details/climaflux-41p07824-circular-design-and-manufacturing-techniques-for-next-generation-highly-efficient-integrated-axial-flux-motor-drives-for-electric-vehicles/en>
- [17] Australian Research Council. „Efficiency maps for electric machines in electric vehicles.“ Zugriff am: 18. Juni 2024. [Online.] Verfügbar: <https://dataportal.arc.gov.au/NCGP/Web/Grant/Grant/DP170103343>
- [18] P. Ilg. „Welcher ist der beste Elektromotor?“ Zugriff am: 18. Juni 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.nzz.ch/mobilitaet/auto-mobil/elektromotoren-permanenter-regt-fremderregt-oder-asynchron-ld.1599507>
- [19] M. Doppelbauer. „SprayCEM – Sprühnebelkühlung E-Maschine.“ Zugriff am: 19. Juni 2024. [Online.] Verfügbar: https://www.eti.kit.edu/oeffentliche_projekte_3731.php
- [20] Europäische Kommission. „Innovating textile-based heating system for technical applications with a special focus on Electric Vehicles.“ Zugriff am: 22. Juni 2024. [Online.] Verfügbar: <https://cordis.europa.eu/project/id/733732>
- [21] M. Gebhardt. „So funktioniert das Getriebe in Elektroautos.“ Zugriff am: 19. Juni 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.handelsblatt.com/mobilitaet/motor/auto-technik-so-funktioniert-das-getriebe-in-elektroautos/26207158.html>
- [22] Europäische Kommission. „Modular Electric Motor technology with integrated Digital Gears for increased driving performance.“ Zugriff am: 19. Juni 2024. [Online.] Verfügbar: <https://cordis.europa.eu/project/id/761851>
- [23] Australian Research Council. „Dual input clutchless power-shifting transmission for hybrid vehicles.“ Zugriff am: 22. Juni 2024. [Online.] Verfügbar: <https://dataportal.arc.gov.au/NCGP/Web/Grant/Grant/DP150102751>
- [24] I. Müller. „Lademanagement mit Künstlicher Intelligenz: Projekt SALM.“ Zugriff am: 18. Juni 2024. <https://www.uni-kassel.de/uni/aktuelles/sitemap-detail-news/2021/06/28/lademanagement-mit-kuenstlicher-intelligenz-projekt-salm?>
- [25] T. Massier. „PRIMO – Platform for Integrated Microgrid Operation.“ Zugriff am: 18. Juni 2024. [Online.] Verfügbar: https://www.tum-create.edu.sg/research/project/primoplatform-integrated-microgrid-operation#sec_c77149b6d7fc9f952848ad44a4da38a4

Hintergrund

Das Projekt „Transformations-Hub Scale-up E-Drive“ wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert. Mit dem Transformations-Hub Scale-up E-Drive werden insbesondere kleine und mittlere Unternehmen befähigt, neue Technologietrends aufzunehmen, geeignete Partner zu finden und sich neue Geschäftsfelder zu erschließen. Dafür vermittelt der bundesweit agierende Hub vorwettbewerbliche und fachspezifische Inhalte, zeigt neue Chancenfelder in Bezug auf den elektrischen Antriebsstrang auf und initiiert durch gezielte Vernetzung neue Kooperationen. Kennen Sie schon unsere Angebote?

Kompetenzlandkarte

Auf unserer digitalen Kompetenzlandkarte ist die E-Drive-Community branchenübergreifend verzeichnet. Darunter finden sich Forschungseinrichtungen, Industrieunternehmen, Verbände und Kammern. Erhalten Sie Sichtbarkeit, treten Sie in direkten Austausch mit Akteuren der E-Drive-Community und legen Sie den Grundstein für eine zukünftige Zusammenarbeit.



Dezentrales Testcenter

Suchen Sie gezielt nach Prüf- und Testkapazitäten für Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs, für Leistungselektronik, Batterie und Brennstoffzelle. Tragen Sie sich als Anbieter von Prüfständen ein und erhöhen Sie Ihre Sichtbarkeit.



Mobiles Schaufenster

Der Transformations-Hub macht durch das mobile Schaufenster Wissen rund um das Thema des elektrischen Antriebsstrangs erlebbar. Ziel ist es, Forschungsergebnisse auf Messen und individuellen Events mittels eines Anhängers zu präsentieren und den direkten Dialog mit insbesondere kleineren und mittleren Unternehmen zu fördern. Das mobile Schaufenster ermöglicht durch seine modulare Bauweise eine flexible Anpassung an verschiedene Veranstaltungen und Zielgruppen. Es kombiniert theoretisches Wissen, das durch Poster und Multimedia-Elemente vermittelt wird, mit praktischen, interaktiven Exponaten wie z.B. verschiedenen Antriebsstrangkomponenten.



Haben Sie Interesse an einer gemeinsamen Veranstaltung oder möchten das mobile Schaufenster in Ihr Event integrieren? Nehmen Sie gerne Kontakt mit uns auf.

Jan Koloch
Telefon +49 89 289 10337
E-Mail: jan.koloch@tum.de

Nico Rosenberger
Telefon +49 89 289 15906
E-Mail: nico.rosenberger@tum.de

Monitoring des Technologiewandels im Antriebsstrang – Transformations-Hub „Scale-up E-Drive“

- Vermittlung von branchenspezifischem Wissen durch **Transformations-Dashboards**
„Kompakt, leicht verständlich, auf einen Blick“
- Fokus: Unterstützung und **Befähigung von KMU** in der Transformation
- Fokus auf **Trends und Entwicklungen** in allen relevanten Bereichen der Transformation



Wertschöpfungspotenzial E-Motoren Europa | 2020 vs. 2030

2020: 1,0 Mrd. € | 2030: **6,8 Mrd. €**

Einsatz von Seltenerdmetallen je E-Motor

2020: 1,93 kg | 2022: 1,58 kg
Preis: 83,41 EUR/kg | 202,94 EUR/kg

Strategische Abhängigkeiten von China

Seltenerdmetalle: **98%** | Permanentmagnete: **85%**

Relevante E-Motor Komponenten, Bauteile und Werkstoffe | Eigenfertigung des OEM vs. Zukunft

Komponente/Bauteil	Werkstoff	Werkstoff	Herstellung E-Motor
Statorpaket	x	Eisenblech	200-700
Isolation	x	Papier (Kunststoff) Lack / Vergewärtigt	1-48-54
Drehachse	x	Kupfer	4-9 kg
Welle	x	Stahl	1
Wellennut	x	Eisenblech	200-700
Lager	x	Kunststoff	2
Magnete	x	Seltenerdmetalle, Neodym-Eisen-Bor o.ä.	1-40-236
Kommutator	x	Kunststoff	2
Isolation	x	Papier (Kunststoff) Lack / Vergewärtigt	1-4-4
Drehachse	x	Kupfer	4-5-14
Schaltkontakte	x	Aluminium / Kupfer	1
Drehblech	x	Aluminium	1
Drehblechblech	x	Aluminium	1
Temperaturerreg.	x	Aluminium	1
Lebensdrehmoment	x	Aluminium	1
Hochdruckpumpe	x	Aluminium	1
Analytische Kühlkanäle	x	Aluminium	1

Entwicklungsziele

- Kostenreduktion
- Reduktion Materialverlust | Kontingenzfreie Werkstoffe
- Substitution von seltenen Erden durch Baualternativen (Magneten PSM/ASM statt PSM)
- Package- und Gewichtsoptimierung
- Erhöhung Drehmoment/Laufgeschwindigkeit
- Wirkungsgradoptimierung über gesamten Kraftfeld

Wichtige technologische Trends

- Hoch-Synchronisierung
- Erhöhung der Drehzahlen
- Kontaktfreie Energieübertragung in den Rotor (PSM)
- Neue Kühlkonzepte (Wärmenanagement)
- Neue Halbleitertechnologien
- Verbesserte Magnete
- Modulintegration

Markanteil E-Motor-Typen bei Fahrzeugmodellen in DE

2020: **64%** PSM, **29%** FSM, **7%** ASM

Prozessschritte und Fertigungskompetenzen | Stator | Rotor | Gehäuse

- Blanche stanzen und polieren
- Zuschneiden, Falz und Einschub der Magnetisierungen
- Blanche stanzen, polieren
- Einschleifen des Rotors, ggf. Führung oder Schwellung, Montage der Rotorlager
- Verschlebung, Integration und elektrische Prüfung
- Fliegen von Palast und Welle, Auswuchten
- Montage Stator, Wellen- und Kühlkanäle, Anschluss, End-of-Line Prüfung

Produktionsstandorte in Europa

Bestand elektrifizierter Pkw (in Mio weltweit)

2017: 3,2 Mio. | 2022: **27 Mio.**

Neuzulassungen elektrifizierter Pkw Hersteller | weltweit | 1. Hj. 2023

Hersteller	BEV	FCEV	PHEV
BYD	~100	~5	~10
Volvo	~80	~2	~8
Mercedes-Benz	~70	~1	~7
BMW	~60	~1	~6
Hyundai/Kia	~50	~1	~5
Stellantis	~40	~1	~4
GM	~30	~1	~3
VW Group	~20	~1	~2
Renault	~15	~1	~1.5

Neuzulassungen 2022 vs. 2020 | Kunden | CO2-Vorgaben | Nettoabsatzwert | Lieferantensatzen

Hersteller	2020	2021	2022
BYD	~100,000	~200,000	~400,000
Volvo	~50,000	~100,000	~150,000
Mercedes-Benz	~40,000	~80,000	~120,000
BMW	~30,000	~60,000	~90,000
Hyundai/Kia	~20,000	~40,000	~60,000
Stellantis	~15,000	~30,000	~45,000
GM	~10,000	~20,000	~30,000
VW Group	~8,000	~15,000	~22,000
Renault	~5,000	~10,000	~15,000

Produktionseffizienz

- Stator 17,0%
- Thermenagement 14,3%
- Gehäuse, Konnektoren 10,7%
- Produktionsprozesse 7,9%

Trendentwicklung FuE-Anteile ausgewählter EM-Typen 2011-2022

2022: **21%** ASM, **9%** PSM, **70%** FSM

Herstellerliste

Brose GmbH & Co. KG	118
Thyssen Krupp AG	78
Maife GmbH	63
FEV Europe GmbH	48
MAN Truck & Bus SE	48
Magna Powertrain	44
AVV GmbH	41
Grob-Werke GmbH	15
Knorr-Bremse AG	15
Infinion AG	15

SCALE-UP E-DRIVE

Herausgeber

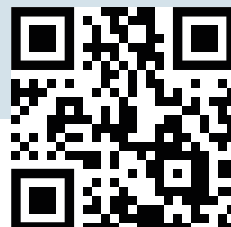
Transformations-Hub Scale-up E-Drive

c/o e-mobil BW GmbH

Leuschnerstraße 45, 70176 Stuttgart

Telefon +49 711 892385-43

hub-edrive@e-mobilbw.de



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages