



SCHLÜSSELMATERIALIEN IM E-MOTOR

KRITISCHE RESSOURCEN IM
SPANNUNGSFELD TECHNOLOGISCHER
ENTWICKLUNG UND
GLOBALER ABHÄNGIGKEITEN



GRUSSWORT	4
EINLEITUNG	5
SELTENE ERDEN	12
KUPFER	16
ELEKTROBLECH	20
ALUMINIUM	24
HALBLEITER	28
ISOLATIONSMATERIAL	32
AUSWIRKUNGEN VON MATERIALKRITIKALITÄT AUF TRENDS BEIM E-MOTOR-DESIGN	36
LITERATURVERZEICHNIS	40
IMPRESSUM	43



RWTHAACHEN
UNIVERSITY



Moritz Stöckler, Jonas Dudzik

EINLEITUNG

In der Elektromobilität liegen Schlüsseltechnologien für die Zukunft der deutschen Industrie, doch ihre Erfolgchancen stehen immer mehr im Spannungsfeld globaler Rohstoffabhängigkeiten.¹ Neben der Batterie ist vor allem der Traktionsmotor als Herzstück des elektrischen Antriebsstranges auf Materialien wie Magnetwerkstoffe aus seltenen Erden, Kupfer oder Halbleiter für die Leistungselektronik angewiesen, die als kritisch gelten.^{2,3} Angesichts der aktuellen geopolitischen Spannungen und wachsender Nachfrage, schafft dieses Whitepaper eine Übersicht zu Vulnerabilität und Versorgungsrisiken der einzelnen Materialien im Elektromotor.

DER ELEKTROMOTOR IM SPANNUNGSFELD GLOBALER MATERIALSTRÖME

Die Verknappung künftig strategisch wichtiger Materialien steht im direkten Zusammenhang mit der Transformation von Verbrennungsmotoren zu elektrifizierten Antriebssystemen. Dominierten dabei lange Zeit Rohstoffe der Hochvoltbatterie wie Lithium oder Kobalt den politischen und gesellschaftlichen Diskurs, rückten zuletzt aufgrund des Zollstreits zwischen der EU, den USA und China weitere Materialien in den Fokus. Allen voran die Exportkontrollen von seltenen Erden und das Zurückhalten von Mikrochips durch die Volksrepublik bedrohten den nahtlosen Fortlauf der europäischen Automobilproduktion – und offenbarten dadurch dessen Anfälligkeit. Der Elektromotor ist auf besondere Weise von dieser Entwicklung betroffen: Galt er lange Zeit als „ausgeforscht“ und in der Wertschöpfung als uninteressant, rückt er nun ins Zentrum des Interesses, denn seine Funktionsweise aus Wechselwirkung von Rotor- und Statormagnetfeld zur Erzeugung von Drehmoment ist von den speziellen Eigenschaften der kritischen Materialien abhängig.

Seltene Erden wie Neodym und Dysprosium werden für besonders leistungsstarke Magnete benötigt.⁴ Halbleiter wie Silizium, Siliziumkarbid oder Galliumnitrid sind für die Leistungselektronik unverzichtbar und beeinflussen die Effizienz der Antriebsstränge.⁵ Doch auch die übrigen Werkstoffe – etwa hochreines Kupfer (mindestens 99,9 Prozent), Elektroblech aus speziellen Eisen-Silizium-Legierungen, Aluminium und Hochleistungskunststoffe als Isolationsmaterial der Einzelleiter, zwischen Wicklung und Blechpaket sowie zum Trennen einzelner Blechpaketlamellen – sind in ihrer Funktion schwierig substituierbar und oftmals untrennbar mit der globalen Förderung und Verarbeitung verbunden.

Die einzelnen Abschnitte dieses Whitepapers beziehen sich jeweils auf eines dieser Materialien und gehen der Frage nach, inwieweit es als kritisch gilt. Dazu wird jeweils eine umfassende Analyse des aktuellen Forschungs- und Entwicklungsstands präsentiert und um Erkenntnisse einer am RWTH-Lehrstuhl PEM vorgenommenen Erhebung mittels Fragebogen und Interviews mit Experten der Industrie ergänzt. Bevor die einzelnen Materialien im Fokus stehen, wird die generelle Entwicklung der Rohstoffnachfrage eingeordnet und der Begriff der Materialkritikalität definiert.

Liebe Leserinnen, liebe Leser,

der Elektromotor rückt im Zuge der Mobilitätswende und der dadurch stark gestiegenen Nachfrage im Bereich der Schlüsselmaterialien wie seltene Erden, Kupfer oder Halbleiter in den Mittelpunkt der industriellen und politischen Diskussion. Globale Lieferketten stehen derzeit unter erheblichem Druck: Die handelspolitischen Spannungen zwischen den großen Wirtschaftsräumen verstärken die Unsicherheit, und zentrale Rohstoffströme werden zu wichtigen Einflussfaktoren im geopolitischen Wettbewerb. Aus diesem Umfeld haben sich in den vergangenen Jahren jedoch Innovationen entwickelt, die den Materialeinsatz von Traktionsantrieben deutlich effizienter machen. Obwohl die Technologie seit rund 200 Jahren bekannt ist und lange Zeit als ausgereift galt, zeigen aktuelle Analysen bemerkenswerte Fortschritte im ressourcenschonenden Einsatz von Materialien bei gleichzeitig steigender Leistungsfähigkeit.

In Deutschland trifft diese Entwicklung auf eine Phase, in der unser industrieller Standort häufig mit Skepsis betrachtet wird. Die öffentliche Debatte richtet den Blick vielfach auf Risiken, während unsere Stärken weniger Beachtung finden. Eine nüchterne Betrachtung zeigt jedoch, dass wir weiterhin über ausgeprägte Kompetenzen in der Produktionstechnik, der Werkstoffkunde und den elektrischen Antriebssystemen verfügen. Besonders im Hinblick auf den effizienten Umgang mit kritischen Materialien ergeben sich daraus relevante Spielräume für die deutsche Industrie.

In den kommenden Jahren wird entscheidend sein, wie gut sich Effizienzgewinne mit einem bewussteren und langfristig orientierten Umgang mit Ressourcen verbinden lassen. Der wachsende Bedarf an Kupfer, Magnetwerkstoffen, Halbleitern und Isolationsmaterialien macht deutlich, dass tragfähige Lösungen verstärkt auf robuste und zugleich kreislauforientierte Wertschöpfungsstrukturen angewiesen sein werden. Dieses Whitepaper möchte dabei helfen, die aktuelle Lage einzuordnen und aussichtsreiche Ansatzpunkte herauszustellen, an denen Industrie, Forschung und Politik gemeinsam weiterarbeiten können.

Wir wünschen Ihnen eine erkenntnisreiche und richtungsweisende Lektüre!

Prof. Dr. Achim Kampker
Gründer und Leiter des Lehrstuhls
PEM der RWTH Aachen

Prof. Dr. Heiner Hans Heimes
Mitglied der Institutsleitung
PEM der RWTH Aachen

Einflussfaktor	Vorgehen
Marktgröße	Aktuelle Zahlen und Trends auf Basis der PEM-Metastudie
xEV-Anteile	Aktuelle Zahlen und Trends auf Basis der PEM-Metastudie
Anteile der Fahrzeugklassen	Aktuelle Zahlen und Trends auf Basis der PEM-Metastudie
Motorleistung	Trends auf Basis aktueller Zahlen ua aus der ADAC-Datenbank
Anteile der Typologien	Aktuelle Zahlen und Trends auf Basis der PEM-Metastudie
Materialbedarf pro Typologie	Trends auf Basis der A2Mac1-Datenbank-Analyse
Materialanteile im Magneten	Eigene Definition von Trends auf Basis von Prognosen

Abbildung/Tabelle 1: Vorgehen für die Bestimmung der Einflussfaktoren

EFFIZIENZGEWINNE WIEGEN DEN MATERIALBEDARF NICHT AUF

Um die Entwicklung der Rohstoffnachfrage einordnen zu können, wird eine umfassende Szenario-Analyse vorgenommen, deren Betrachtungsraum auf Europa festgelegt wird. Anschließend werden relevante Einflussfaktoren identifiziert, die den Materialbedarf der kommenden Jahre bestimmen. Dazu zählen die erwarteten Fahrzeugabsätze, der zunehmende Anteil elektrischer Traktionsantriebe, die Veränderungen der Fahrzeugsegmente und Fahrzeuggrößen, die Leistungsdichten der künftigen Motoren sowie zu erwartende technologische Verbesserungen.

Zur Quantifizierung dieser Einflussgrößen stützt sich die Analyse auf Daten, die am Lehrstuhl PEM aufbereitet wurden – basierend auf der Teardown-Datenbank A2Mac1, statistischen Fahrzeugmarktdaten sowie PEM-Metastudien. Diese Metastudien fußen auf Prognosen von Forschungsinstituten und Behörden, wissenschaftlichen Veröffentlichungen, externen Studien sowie Experteneinschätzungen. Anhand dieser Quellen wurden für jeden Einflussfaktor aktuelle Referenzwerte und Zukunftsprojektionen hergeleitet. Jeder dieser Faktoren wird nicht pauschal, sondern in einem pessimisti-

schon, einem konservativen und einem optimistischen Szenario abgebildet. Auf diese Weise entsteht ein breiter, aber strukturierter Korridor zwischen den möglichen Entwicklungspfaden. Für die Berechnung des künftigen Rohstoffbedarfs wird unter anderem der Materialeinsatz pro Kilowatt als Grundlage benötigt. Dazu wurden 48 Elektromotoren aus der A2Mac1-Datenbank aus den Jahren 2018 bis 2023 untersucht.⁶ Die Analyse konzentrierte sich aufgrund der Datenverfügbarkeit auf Kupfer, Elektroblech und Magnetmaterialien. Die daraus abgeleiteten Trends sind in einer Grafik dargestellt.

Die Werte zeigen einen deutlichen Rückgang des Materialeinsatzes pro Kilowatt. Beim Elektroblech sank der spezifische Bedarf zwischen 2020 und 2023 von 210 Gramm auf 144 Gramm je Kilowatt. Dies entspricht einer Reduktion von rund 31 Prozent. Der Kupferbedarf ging im selben Zeitraum von 54 Gramm auf 29 Gramm pro Kilowatt zurück, was einer Abnahme von etwa 46 Prozent entspricht. Auch der Bedarf an Magnetmaterialien reduzierte sich – von 15 Gramm auf zehn Gramm je Kilowatt, gleichbedeutend mit einer Reduktion von rund 28 Prozent. Diese Entwicklungen verdeutlichen die kontinuierlichen Effizienzsteigerungen der vergangenen Jahre und zeigen, dass sowohl das Wicklungs-

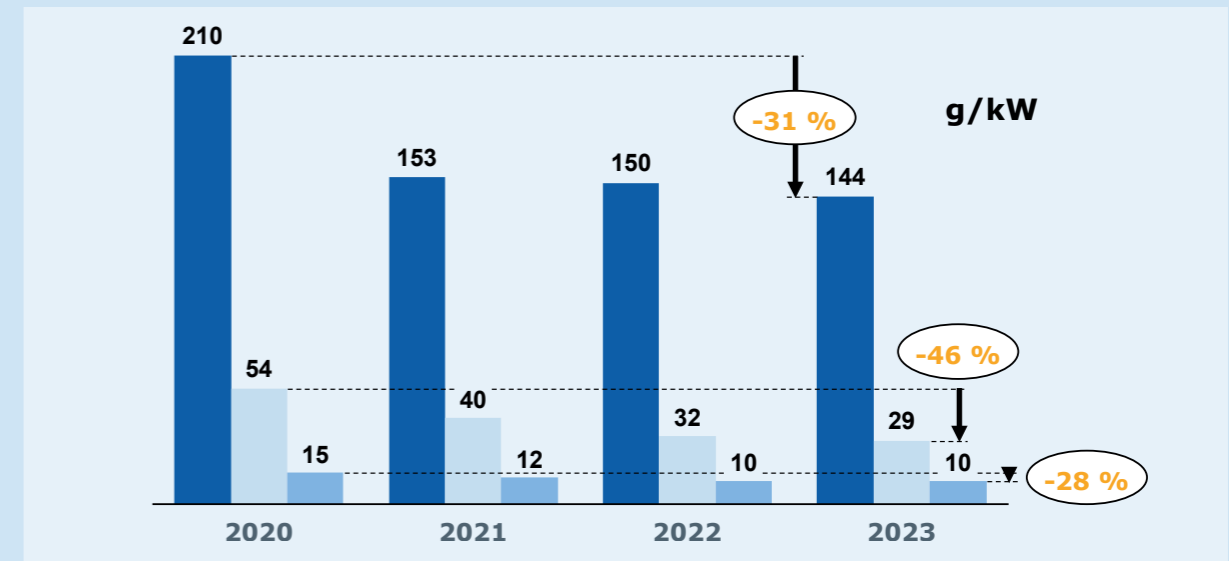


Abbildung 2: Entwicklung des Materialgewichts pro Kilowatt im elektrischen Traktionsmotor

design als auch die magnetische Auslegung der Motoren zunehmend materialschonender werden. Auf Grundlage dieser historischen Trends und unter Einbeziehung aktueller wissenschaftlicher Veröffentlichungen, werden die künftigen Materialintensitäten in drei Entwicklungspfade überführt, die jeweils einen pessimistischen, einen konservativen und einen optimistischen technologischen Fortschritt der kommenden zehn Jahre abbilden.

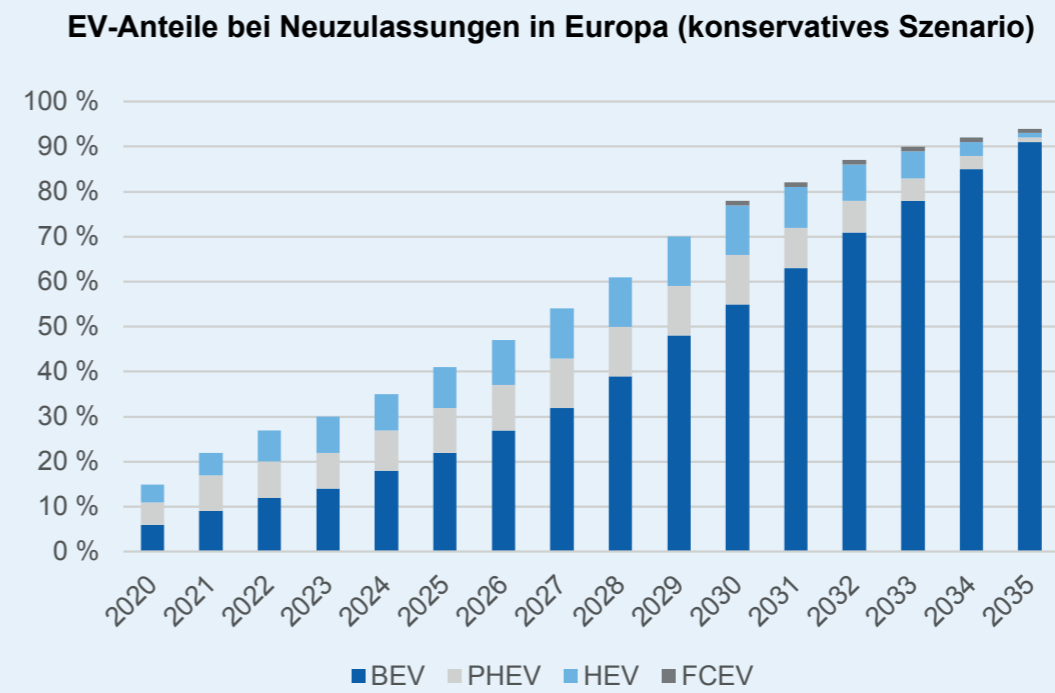
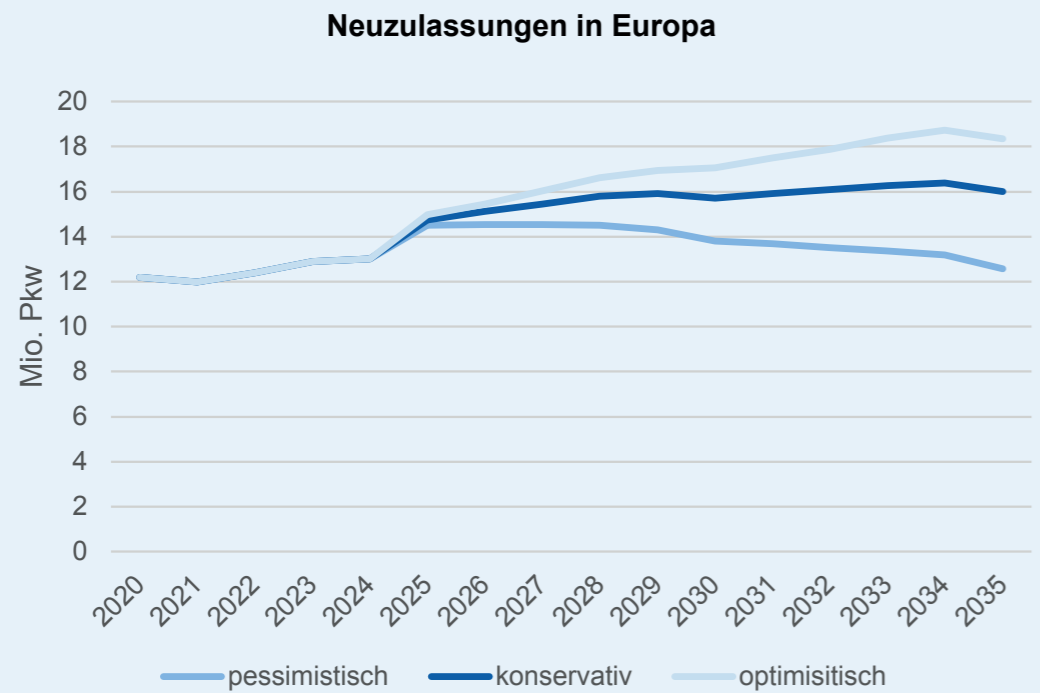
Durch die Kombination aus Marktgröße, Elektrifizierungsanteilen und allen weiteren modellierten Einflussgrößen sowie der angenommenen Entwicklung der Materialintensitäten entstehen die finalen Ergebnisse der Analyse. Die resultierenden Bedarfskurven zeigen, wie stark die Nachfrage je nach Szenario variieren kann. Dennoch steigt der Kupferbedarf durch Elektromotoren bis 2035 in sämtlichen Annahmefällen und erreicht Werte von etwa 50.000 bis mehr als 70.000 Tonnen. Die Elektroblechnachfrage entwickelt sich ähnlich dynamisch und bewegt sich zwischen rund 200.000 und fast 400.000 Tonnen. Auch der Bedarf im Bereich der Magnetmaterialien steigt deutlich und liegt im Jahr 2035 je nach Entwicklungspfad zwischen ungefähr 8.000 und fast 16.000 Tonnen. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass der Materi-

bedarf trotz sinkender Materialintensitäten pro Kilowatt in allen entwickelten Szenarien weiterhin steigt. Besonders der deutliche Wachstumskurs bei Kupfer, Elektroblech und Magnetmaterialien unterstreicht, dass die Elektrifizierung des Fahrzeugmarktes eine deutliche Ausweitung der absoluten Rohstoffnachfrage erzeugt. Dieser steigende Bedarf bildet eine zentrale Grundlage für die Bewertung der künftigen Materialrisiken, da eine wachsende Nachfrage die bestehenden Rohstoffketten zusätzlich belastet und damit potenzielle Engpässe verstärken kann. Die Materialkritikalität wird jedoch nicht allein durch eine wachsende Nachfrage definiert. Für eine finale Einschätzung spielen auch andere Dimensionen eine Rolle.

WANN GILT EIN MATERIAL ALS KRITISCH?

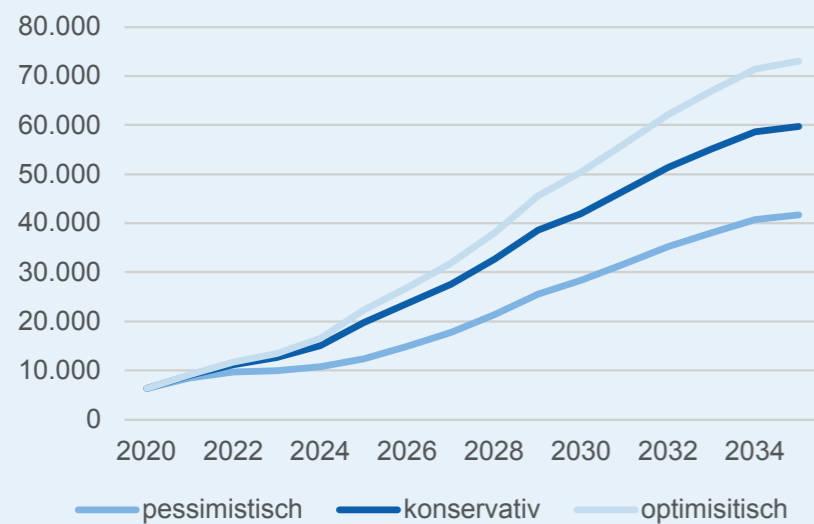
Die klassische Kritikalität eines Materials ergibt sich aus zwei miteinander verknüpften Dimensionen, die sich in einer Kritikalitätsmatrix darstellen lassen. Dabei handelt es sich um die Vulnerabilität und die Versorgungsrisiken.^{7,8}

Die Vulnerabilität beschreibt, wie empfindlich die Wertschöpfungskette auf Störungen reagiert.⁹ Entscheidend sind dabei die strategische Bedeutung des Materials im

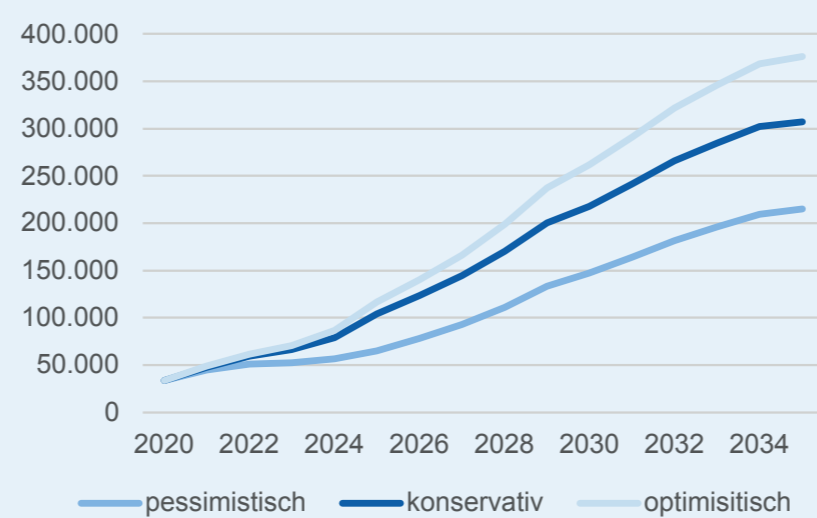


Weitere Einflussfaktoren

Kupfernachfrage (t) durch Elektromotoren in Europa



Elektroblechnachfrage (t) durch Elektromotoren in Europa



Magnetnachfrage (t) durch Elektromotoren in Europa

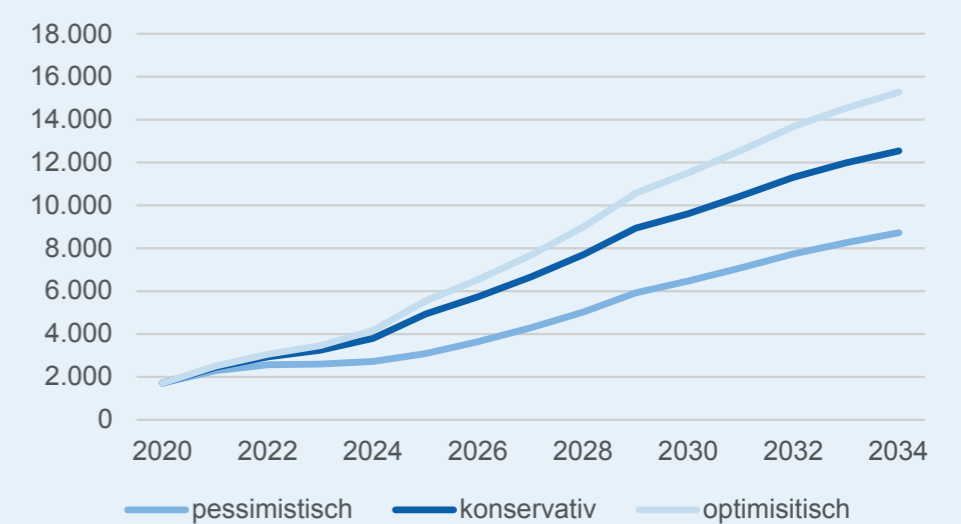


Abbildung 3: Szenario-Analyse der Marktentwicklung und materialbezogenen Rohstoffnachfrage elektrischer Traktionsantriebe in Europa bis 2035

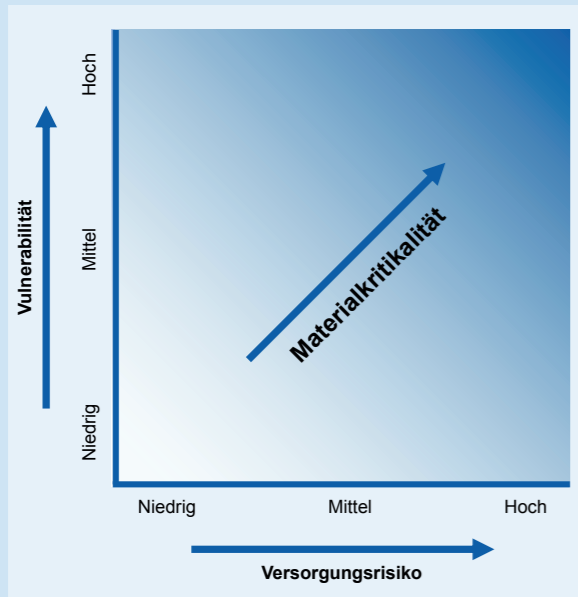


Abbildung 4: Klassische Materialkritikalitätsmatrix

Traktionsmotor, seine Substituierbarkeit und die wirtschaftlichen Auswirkungen eines Ausfalls. Je weniger technische Alternativen es gibt und je stärker das Material in bestehende Fertigungsprozesse eingebettet ist, desto höher fällt die Vulnerabilität aus.

Die Versorgungsrisiken gliedern sich in Rohstoffverfügbarkeit und Lieferkettenkritikalität. Die Rohstoffverfügbarkeit adressiert geologische Vorkommen, das Zusammenspiel aus globaler Nachfrage, Förderkapazitäten und Recycling-Potenzialen sowie regulatorische oder ökologische Einschränkungen, die den

Zugang zu Primär- und Sekundärquellen begrenzen können.^{10, 11} Vor allem bei Kupfer, seltenen Erden oder Halbleitermaterialien können die steigenden Bedarfe der Elektromobilität zu dynamischen Engpassrisiken führen.

Die Lieferkettenkritikalität betrachtet strukturelle Risiken entlang der globalen Versorgung – zum Beispiel hohe Weltmarkt- oder regionale Konzentrationen, geopolitische Spannungen, Exportkontrollen sowie die Resilienz logistischer Netze.¹² Viele für Traktionsmotoren relevante Materialien weisen eine starke regionale Abhängigkeit bei der Raffination und Weiterverarbeitung auf, was sie für politische oder wirtschaftliche Schocks anfällig macht.^{3, 10}

SELTENE ERDEN SIND DIE KRITISCHSTEN MATERIALIEN

Basierend auf der klassischen Materialkritikalität, wurden Unternehmen aus unterschiedlichen Bereichen der Industrie in die Analyse einbezogen, um eine grundlegende erste Einschätzung zu gewinnen. Die Befragung zeigt eindeutig, dass die Unternehmen vor allem bei Seltenerdmetallen eine hohe Kritikalität sehen. Die Rohstoffe werden aufgrund ihrer hohen Nachfrageentwicklung, ihrer eingeschränkten globalen Förderstrukturen und ihrer starken geopolitischen Abhängigkeiten als kritisches Material eingestuft. Mit einer durchschnittlichen Gesamtkritikalität von 9,83 von zehn Punkten erreichen sie in allen drei betrachteten Dimensionen Spitzenwerte. Kupfer folgt mit



Abbildung 5: Dimensionen der Materialkritikalität

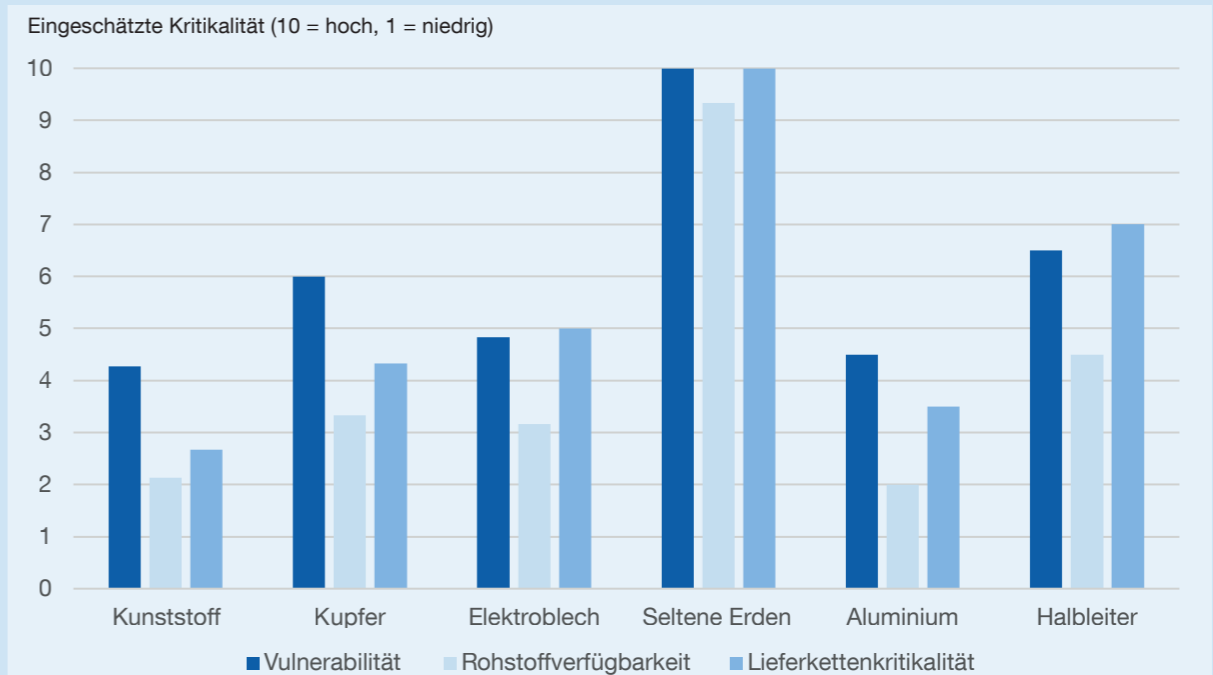


Abbildung 6: Experteneinschätzungen zur Kritikalität von Materialien in elektrischen Traktionsmotoren

einer mittleren Kritikalität und fällt besonders durch seine hohe Lieferkettenanfälligkeit auf, während Kunststoffe eine vergleichsweise geringe Kritikalitätsbewertung erhalten. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Materialgruppen detailliert betrachtet.



Moritz Stöckler

„Die Betrachtung der Materialkritikalität wird immer relevanter, da die steigende Nachfrage trotz enormer Effizienzgewinne im Materialeinsatz nicht vollständig kompensiert werden kann und diese Entwicklung gleichzeitig in ein Umfeld geopolitischer Spannungen und protektionistischer Tendenzen fällt.“

Michael Nankemann

SELTENE ERDEN

Zu den Seltenen Erden zählen insgesamt 17 chemische Elemente, deren globaler Bedarf – getrieben durch Elektromobilität, Windenergie und Verteidigungsanwendungen – derzeit in jedem Jahr um sechs bis acht Prozent steigt.^{15, 16} Gleichzeitig verschärfen geopolitische Spannungen und chinesische Exportkontrollen die Versorgungsrisiken für die europäische und die US-amerikanische Automobilindustrie.

GEOLOGISCHE VORKOMMEN UND RESERVEN

Seltene Erden sind entgegen ihrer Bezeichnung nicht notwendigerweise rar, sondern kommen vor allem fein verteilt und mit anderen Materialien vermischt vor.¹⁷ Weltweit werden die Reserven auf mehr als 90 Millionen Tonnen Seltenerd-Oxide (REO) geschätzt. Die größten Vorkommen befinden sich mit 44 Millionen Tonnen in China, mit 21 Millionen Tonnen in Brasilien und mit 6,9 Millionen Tonnen in Indien.¹⁸ Die wichtigsten Lagerstättentypen sind Carbonatite (zum Beispiel „Bayan Obo“ in der Inneren Mongolei), alkaline Gesteine („Mount Weld“ in Australien) und Ionen-Absorptions-Tone in Südchina. Letztgenannte sind besonders wert-

voll, da sie einen höheren Anteil schwerer seltener Erden enthalten, die für Hochleistungsanwendungen benötigt werden.

Eine kritische Unterscheidung besteht zwischen leichten seltenen Erden (Lanthan, Cer, Neodym, Praseodym) und schweren seltenen Erden (Dysprosium, Terbium, Yttrium). Für Permanentmagnet-Synchronmotoren (PSM) in Elektrofahrzeugen sind vor allem Neodym und Praseodym sowie Dysprosium und Terbium von zentraler Bedeutung. Während leichte seltene Erden in den meisten Lagerstätten dominieren, sind schwere seltene Erden rarer, wertvoller und kommen nur in wenigen Lagerstätten in nennenswerten Konzentrationen vor.^{17, 15, 19}

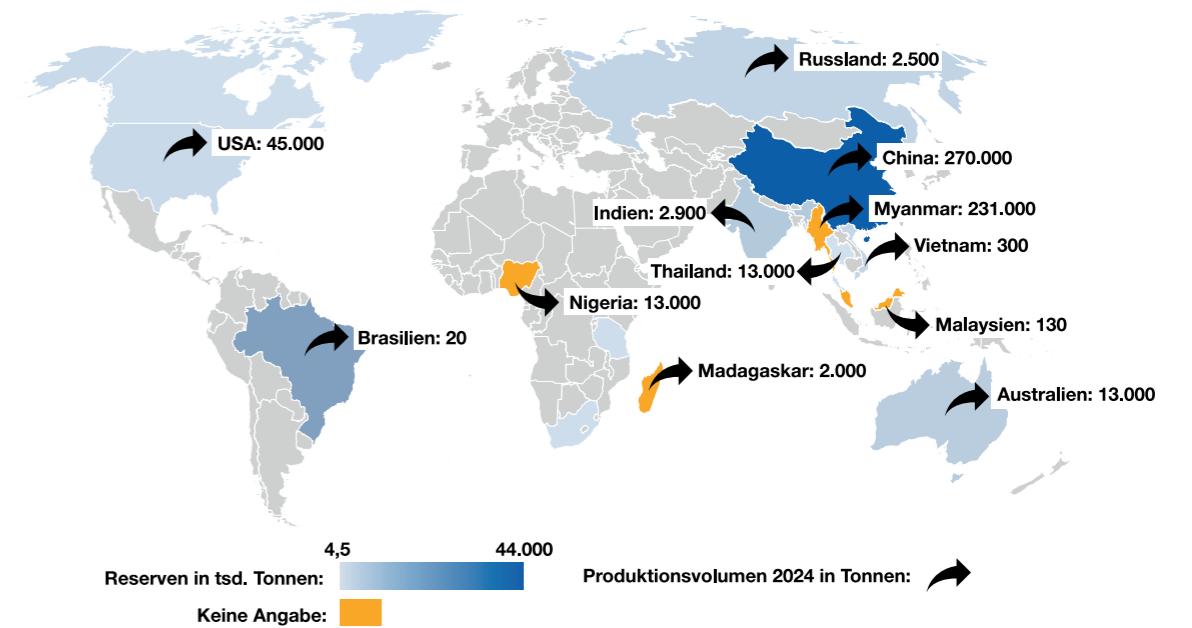


Abbildung 7: Globale Verteilung der Reserven und Produktion



Permanentmagnet-Synchronmaschinen (PSM) erzeugen ihr Rotorfeld durch eingebaute Neodym-Eisen-Bor-Magnete.¹³ Das konstante Magnetfeld ermöglicht hohe Leistungsdichten und sehr gute Wirkungsgrade, da keine Erregerströme benötigt werden. Dieser Umstand macht PSM zur am

häufigsten eingesetzten Topologie für Traktionsantriebe. Die typischen NdFeB-Magnete bestehen überwiegend aus Eisen und zu 29 bis 32 Prozent aus Neodym, ergänzt durch geringe Bor- und häufig Dysprosium-Anteile zur Temperaturstabilität.¹⁴ Dadurch entsteht eine starke Abhängigkeit von seltenen Erden.

BERGBAU UND AUFBEREITUNG

China dominiert jedoch nicht nur bei den Reserven, sondern vor allem bei der Förderung mit etwa 70 Prozent der weltweiten Produktion von 390.000 Tonnen REO jährlich.¹⁸ Der Abbau erfolgt, je nach Lagerstättentyp, durch konventionellen Tagebau, In-situ-Leaching bei Ionen-Absorptions-Tonen oder Seifenbergbau.¹⁵

Die Aufbereitung unterscheidet sich in Abhängigkeit vom jeweiligen Ausgangsmaterial, ist jedoch in jedem Fall technisch anspruchsvoll und mit großen Umweltbelastungen verbunden. Verallgemeinernd zusammengefasst, wird das Erz nach mechanischer Zerkleinerung chemisch aufgetrennt, typischerweise durch Säureaufschluss. Die anschließende Trennung der einzelnen seltenen Erden erfolgt durch mehrstufige Verfahren zur Lösungsmittelextraktion. Dieser Prozess muss teilweise hundertfach wiederholt werden, um die chemisch ähnlichen seltenen Erden voneinander zu trennen. Sie werden anschließend als Salz ausgefällt und bei Temperaturen von bis zu 1.000 Grad Celsius zu handelbaren Oxiden umgewandelt.^{20, 21, 15} Die Folgen sind großflächige Landschaftszerstörung, massive Wasserverschmutzung durch Schwermetalle und Säuren, radioaktive Kontamination durch Thorium und Uran als Begleitelemente sowie ein hoher Energieverbrauch von zehn bis 15 Megawattstunden pro Tonne Seltenerd-Oxid.^{22, 23}

VERARBEITUNG UND RAFFINATION

Die Verarbeitungskapazitäten sind indes noch stärker konzentriert als die Erz-Förderung: China kontrolliert 85 bis 90 Prozent der weltweiten Kapazitäten zur Herstellung von Seltenerd-Oxiden und bis zu 99 Prozent der Produktion schwerer seltener Erden.^{24, 25}

Nach der Trennung werden die reinen Oxide durch Schmelzflusselektrolyse oder metallothermische Reduktion zu Metallen verarbeitet. Für Permanentmagnete werden NdFeB-Legierungen durch Pulvermetallurgie hergestellt. Die Etablierung wettbewerbsfähiger Verarbeitungskapazitäten erfordert Kapitalinvestitionen von mehr als 100 Millionen US-Dollar für einzelne Anlagen, zwischen 1,5 und zwei Milliarden Dollar für vollintegrierte Anlagen, spezialisierte Expertise in Lantha-

niden-Chemie und mehrstufigen Extraktionsprozessen sowie aufwendige Systeme zur Abwasserbehandlung. Diese hohen Eintrittsbarrieren tragen maßgeblich zur gegenwärtigen Marktkonzentration bei.^{26, 27, 24}

Außerhalb Chinas existieren nur wenige Kapazitäten: So betreibt „Lynas Rare Earths“ in Malaysia eine Verarbeitungsanlage mit 10.500 Tonnen REO pro Jahr, während „MP Materials“ in den USA 2025 mit der kommerziellen Produktion von NdPr-Metall begonnen hat und Europa über keine nennenswerte Verarbeitung verfügt. Der Aufbau neuer Kapazitäten schreitet langsam voran, da hohe Investitionskosten und technologische Herausforderungen erhebliche Hürden darstellen.^{28, 29, 30}

ANWENDUNGEN UND NACHFRAGE

Permanentmagnete dominieren mit mehr als 30 Prozent die Nachfrage im Bereich seltener Erden. NdFeB-Magnete ermöglichen aufgrund ihrer überlegenen magnetischen Energiedichte kompakte, hocheffiziente E-Motoren in Elektrofahrzeugen sowie direktangetriebene Windturbinen. Die Elektromobilität treibt das Wachstum, wobei der Neodym-Bedarf mit einer durchschnittlichen Wachstumsrate von 9,2 Prozent am stärksten steigt und dies in Anbetracht der zunehmenden Elektrifizierung von Verkehr und Energie weiter tun wird. Katalysatoren folgen als zweitwichtigste Anwendung bei Erdölraffinerien und Fahrzeugabgasreinigung, deren Bedeutung jedoch durch die E-Mobilität sinkt. Weitere bedeutende Einsatzgebiete sind Elektronik und Optik – darunter LED-Leuchtstoffe, optische Gläser und Laser – sowie Batterien, metallurgische Zusätze und Glasveredelung.^{31, 15}

GEOPOLITISCHE ASPEKTE UND VERSORGUNGSRISIKEN

China kontrolliert die gesamte Wertschöpfungskette und hat diese Position bereits mehrfach politisch genutzt, beispielsweise 2010 durch Exportbeschränkungen während eines Konflikts mit Japan sowie aktuell im Handelskonflikt mit den USA. Konkret hat China im April und im Oktober 2025 weitreichende Exportkontrollen eingeführt, die eine Lizenzpflicht für mittlere und schwere seltene Erden vorsehen. Die Versorgungsrisiken umfassen daher geopolitische

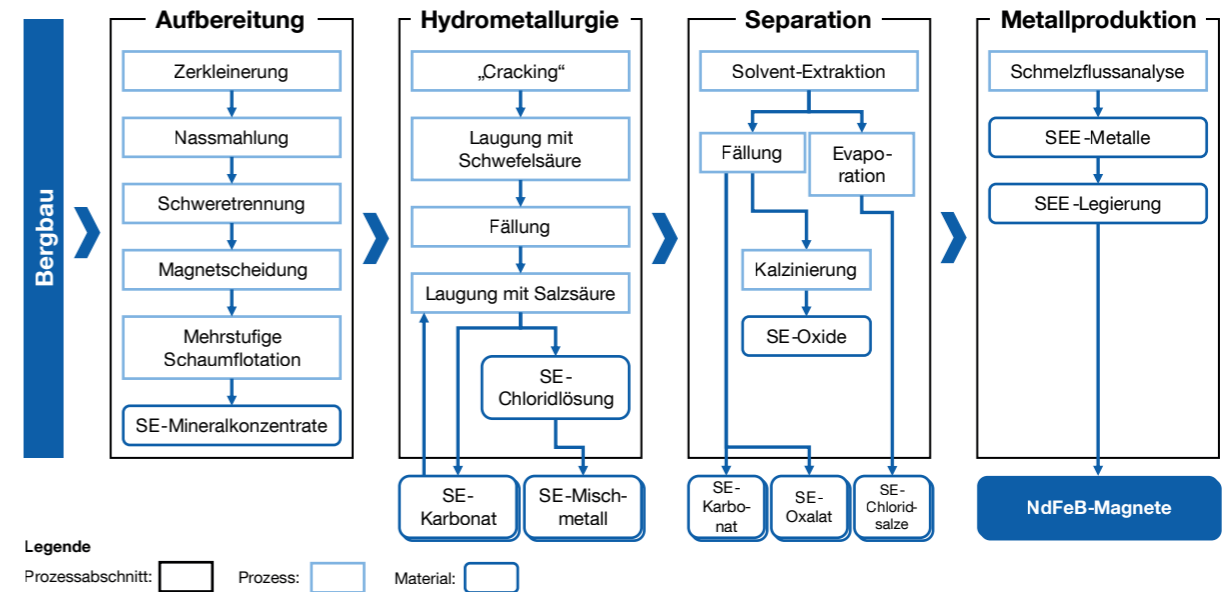


Abbildung 8: Prozessflussdiagramm von der Lagerstätte zum Endprodukt

Spannungen und Preisvolatilität, die vor dem Hintergrund langer Projektlaufzeiten von zehn bis 15 Jahren von der Exploration bis zur Produktion und aufgrund verschärfter Umweltauflagen schwierig zu beheben sind.^{32, 33}

Die westliche Politik versucht, mit strategischen Initiativen wie dem „EU Critical Materials Act“ und Investments in die US-Produktion gegenzusteuern. Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen bleibt angesichts der Herausforderungen abzuwarten. Recycling bietet theoretisches Potenzial zur Deckung der Nachfrage, ist aber durch umfangreiche Sammellogistik, Einschränkungen im Produktdesign und limitierte Wirtschaftlichkeit nur in begrenztem Maße relevant. Realistisch betrachtet, lassen sich mittelfristig zehn bis 15 Prozent des Seltenerdbedarfs durch Recycling abdecken. Neue biotechnologische Ansätze – beispielsweise

gentechnisch modifizierte Viren zur REE-Extraktion – befinden sich derzeit in der Entwicklung.^{34, 35, 36}

FAZIT

Während seltene Erden für Energiewende und Digitalisierung unverzichtbar sind, hat sich vor allem die EU in eine erhebliche strategische Abhängigkeit von China begeben. Geologische Ressourcen existieren weltweit ausreichend, doch die technische Komplexität, hohe Investitionskosten und Umweltauflagen erschweren den Aufbau alternativer Lieferketten. Dieser Umstand erfordert massive öffentliche und private Investitionen, langfristiges politisches Engagement und eine realistische Zeitplanung von zehn bis 15 Jahren für die Transformation der Lieferketten.

„Die Herausforderung bei seltenen Erden liegt weniger in ihrer geologischen Verfügbarkeit als in der komplexen Verarbeitung – und der daraus entstandenen Marktkonzentration. Wer die Verarbeitung kontrolliert, kontrolliert die Zukunftstechnologien.“



Michael Nankemann

Tim Franitza

KUPFER

Kupfer zählt zu den wichtigsten Rohstoffen unserer Gesellschaft. Ohne das rötliche Metall wären moderne Energie- und Informationsnetze, Gebäude-Infrastrukturen und zahlreiche industrielle Anwendungen nicht denkbar. Besonders Technologien des Energiewandels und die umfassende Elektrifizierung der Mobilität sind stark von Kupfer abhängig: Leitungen, Spulen, Kontakte und Kühlstrukturen basieren auf dessen hervorragenden elektrischen und thermischen Eigenschaften.

ESSENZIELLER BAUSTEIN DER ENERGIEWENDE

Dementsprechend steigt die weltweite Kupferverarbeitung seit Jahren kontinuierlich. Zu den größten Nachfragetreibern zählen die Energie- und die Bauwirtschaft sowie die Elektro- und die Automobilindustrie. Durch die Elektromobilität wird für die kommenden Jahre ein deutlicher Anstieg der Nachfrage erwartet, denn ein Elektrofahrzeug benötigt etwa zwei- bis dreimal so viel Kupfer wie ein herkömmliches Verbrennermotor-Auto. Zusätzlich treibt der Ausbau von Windparks, Stromnetzen und Speichertechnologien den Bedarf weiter in die Höhe. Diese Dynamik führt dazu, dass Kupfer in Europa als kritischer Rohstoff eingestuft

wird. Schaut man innerhalb des Elektrofahrzeugs jedoch spezifisch auf den E-Motor, relativiert sich die Materialkritikalität. Die künftig für den Elektromotor als Hauptantrieb benötigten Mengen sind im Vergleich zu vielen anderen Branchen gering (siehe Abbildung „Vorhersage: Kupferverbräuche in der EU“).

WESHALB KUPFER IM E-MOTOR UNVERZICHTBAR BLEIBT

Die Preisentwicklung von Kupfer bildet einen instabilen Faktor in der Kalkulation von Bauteil- und vor allem Motorpreisen. Elektromotoren für automobiler Anwendungen enthalten pro Stator typischerweise zwei bis sieben Kilogramm Kupfer.⁶ Zwar lässt sich durch Innovationen im

Fremderregte Synchronmaschinen (FSM) erzeugen das Rotorfeld nicht mit Hilfe von Magneten, sondern durch gezielte Einspeisung eines Erregerstroms in Rotorwicklungen.⁴ Dies erlaubt eine präzise Feldregelung und vermeidet vollständig den Einsatz seltener Erden.

Das Funktionsprinzip erfordert jedoch Wicklungen aus Kupfer sowie Schleifsysteme oder kontaktlose Übertragungssysteme. FSM werden daher häufig dort eingesetzt, wo hohe Regelbarkeit und materialstrategische Unabhängigkeit im Vordergrund stehen.

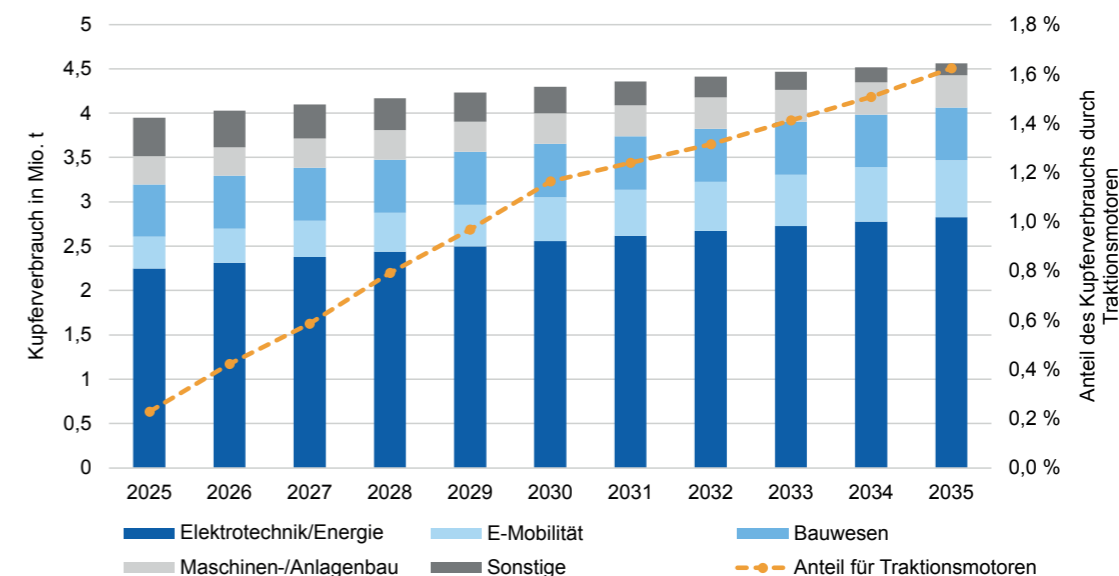


Abbildung 9: Vorhersage: Kupferverbräuche in der EU

Antrieb, beispielsweise durch eine optimierte Kühlung, die benötigte Kupfermenge pro Kilowatt Leistung senken; der übergreifende Trend zur Elektromobilität mit stark steigenden Stückzahlen treibt den absoluten Kupferbedarf für Traktionsmaschinen dennoch deutlich nach oben.

Für Statorwicklungen ist Kupfer aus physikalischen Gründen schwierig zu substituieren: Es besitzt nach Silber die höchste elektrische Leitfähigkeit aller Metalle und zugleich eine hohe Wärmeleitfähigkeit.^{37, 38} Beides ist zentral, um Wicklungsverluste zu reduzieren und Wärme effizient abzuführen. Aluminium bietet sich als günstigere, leichtere Variante an, verfügt jedoch über eine rund 35 Prozent geringere elektrische Leitfähigkeit.³⁹ Um gleiche Leistungsdaten zu erreichen, sind größere Querschnitte notwendig, wodurch die Energiedichte sinkt, die Verluste steigen und das Statorblechpaket größer dimensioniert werden muss – was den Preisvorteil relativiert.⁴⁰ Dementsprechend gibt es im Automobilsektor bislang keine Anwendung mit Aluminium-Statorwicklung. In stationären, hochdrehenden Aggregaten – etwa Kompressoren in Kühlschränken – sind hingegen erste Aluminiumwicklungen zu finden. Diese technischen und marktseitigen Effekte überlagern sich mit volatilen Rohstoffkursen –

ein zentrales Risiko für Planung, Einkauf und Preissetzung entlang der gesamten Wertschöpfungskette.

EUROPAS KUPFERABHÄNGIGKEIT

Bei der Prozesskette vom Erz bis zum Primärkupfer wird aus europäischer Perspektive die internationale Abhängigkeit deutlich: Die Produktionskonzentration ist zwar weniger stark als bei seltenen Erden, dennoch entfällt mehr als die Hälfte des globalen Kupferabbaus auf Chile, Peru, China und die Demokratische Republik Kongo. Diese Bündelung schafft Verwundbarkeiten gegenüber geopolitischen Spannungen, Export-Restriktionen und logistischen Störungen. Mit vielen großen Abbauländern bestehen jedoch feste Kooperationen und langfristige Lieferverträge, die die Planbarkeit und Versorgungssicherheit erhöhen.⁴¹

Zudem wirkt es sich positiv aus, dass ein relevanter Teil der Partnerländer politisch stabil und westlich-demokratisch geprägt ist, was die Verlässlichkeit der Lieferbeziehungen tendenziell stärkt (siehe Abbildung „Risiko Kupferabbau“). Insgesamt bleibt Primärkupfer damit für die EU zwar kritisch, aber durch Diversifizierung und belastbare Partnerschaften grundsätzlich beherrschbar, was im Rahmen der Experteninterviews bestätigt wurde.



Tim Frantza

„Bei einem schon heute hohen Konsum in Europa, kann das derzeitige Kupfer zu einem großen Anteil unseren Bedarf der Zukunft decken. Um es in hoher Qualität wiederverwenden zu können, müssen wir allerdings an effizienten Recycling-Strategien arbeiten.“

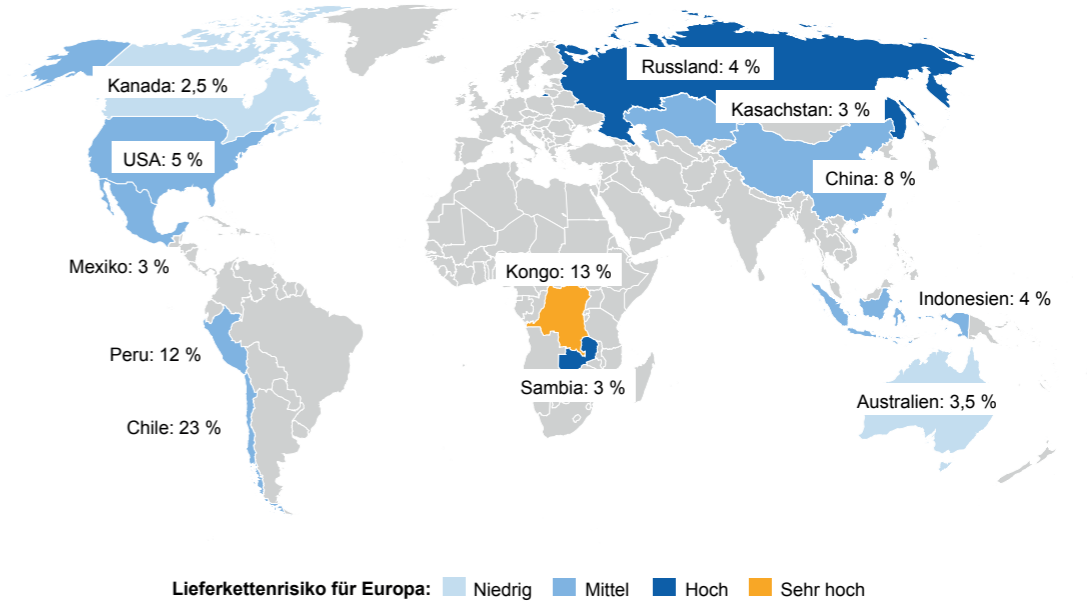


Abbildung 10: Europäisches Lieferkettenrisiko für Kupfer nach Abbauland

KREISLAUFWIRTSCHAFT ALS ERFOLGSGARANT

In Deutschland stützt sich die Versorgung derzeit sowohl auf Primärquellen als auch auf Recycling-Prozesse. Die Recycling-Quote ist jedoch noch vergleichsweise niedrig. Das liegt einerseits daran, dass ein großer Teil des bisher produzierten Kupfers in langlebigen Anwendungen wie der Gebäudetechnik gebunden ist. Andererseits wird nur ein kleiner Teil des Kupfers sortenrein getrennt und wiederverwendet. Mit der Elektromobilität steigt der Bedarf indes kurzfristig an. Aufgrund des durchweg verhältnismäßig hohen Verbrauchs stehen in Zukunft jedoch große Mengen Sekundärkupfers bereit. Langfristig eröffnet das die Chance auf eine geschlossene Kreislaufwirtschaft und damit auf einen hohen Deckungsanteil am Kupferkonsum. Kurz- und mittelfristig muss die wachsende Nachfrage allerdings durch Importe gedeckt werden.

Eine besondere Hürde für hohes Kupfer-Recycling ist die sortenreine Trennung von Materialien. In der Praxis sind Komponenten häufig komplex aufgebaut oder miteinander

vermischt, was das Recycling erschwert. Die Folge ist häufiges Downcycling – das zurückgewonnene Material eignet sich nicht mehr für hochwertige Anwendungen, und die Abhängigkeit von Primärkupfer bleibt bestehen. Um die Materialkritikalität von E-Motoren und der Elektromobilität insgesamt zu entschärfen, sind daher bessere Ansätze für ein „Design for Recycling“ sowie effiziente Rücknahme- und Demontageprozesse notwendig.

Rhesa Tendean

ELEKTROBLECH

Der Einsatz von Elektroblech ist im Kontext der Mobilitätswende von entscheidender Bedeutung. Elektroblech ist aufgrund seiner zentralen Rolle in der Funktionalität, Leistung und Energieeffizienz ein wichtiger Bestandteil von E-Motoren. Angesichts des stark steigenden Bedarfs und der dominanten Marktposition asiatischer Produktion gewinnt eine nachhaltige, regional abgesicherte Elektroblechproduktion zunehmend strategische Bedeutung.

CHANCEN UND RISIKEN IN DER GLOBALEN WERTSCHÖPFUNG

Elektroblech – auch als „Elektroband“ bezeichnet – wird in nahezu allen Motortopologien verwendet. Dabei handelt es sich um einen weichmagnetischen Werkstoff, der überwiegend für die Herstellung von Stator und Rotor eingesetzt wird. Unter äußerer magnetischer Einwirkung lässt sich Elektroblech besonders einfach magnetisieren und entmagnetisieren, was eine effiziente Energienutzung in elektromechanischen Systemen ermöglicht und die hohe Notwendigkeit dieses Werkstoffs verdeutlicht. Für den Einsatz in Elektrofahrzeugen kommt vor allem nicht-kornorientiertes (NO-) Elektroblech aufgrund seiner isotropen magnetischen Eigenschaften infrage.⁴² Mit einem Gesamtmassenanteil von etwa 75 Prozent stellt Elektroblech das Gros der im E-Motor verbauten Aktivkomponenten dar^{43, 44}, was seine zentrale Rolle im Ressourcenverbrauch unterstreicht.

Dem „Joint Research Centre“ (JRC) der Europäischen Kommission zufolge existiert aufgrund der guten globalen Verteilung der Elektroblechproduktion nur ein geringes Versorgungsrisiko für verarbeitetes Elektroblech. Dennoch entfallen rund 88 Prozent der globalen Produktion ausschließlich auf China, Japan und Südkorea.⁴⁵ Ein hohes Versorgungsrisiko

besteht hingegen beim Rohstoff Siliziummetall, das bis zu 6,5 Prozent der Masse von Elektroblech ausmachen kann.⁴⁵ Obwohl die Siliziumvorkommen ausreichend sind, ist die Verarbeitung zu Siliziummetall – insbesondere in hoher Reinheit – kapital- und energieintensiv. Zusätzlich wird das Risiko durch die starke Nachfrage in anderen Anwendungsfeldern – beispielsweise der Photovoltaik-Industrie – sowie durch die dominante Position Chinas entlang der Wertschöpfungskette verstärkt. Mit einem Anteil von 76 Prozent an der globalen Produktion von Siliziummetallen nimmt China die führende Stellung ein.⁴⁶

Darüber hinaus existieren Studien, die die Versorgungslage des verarbeiteten Elektroblechs deutlich kritischer bewerten. Da mehr als 70 Prozent des europäischen Bedarfs von asiatischen Importen gedeckt werden, sieht der deutsche Verband der Elektro- und Digitalindustrie (ZVEI) ein hohes Versorgungsrisiko.⁴⁷ Besonders hervorgehobene Herausforderungen für die Industrie sind potenzielle Versorgungsengpässe und damit verbundene Produktionsrisiken sowie eine strukturelle Veränderung der Arbeitsplätze infolge eines Wandels der Wertschöpfung.

Darüber hinaus wird das Versorgungsrisiko durch fehlende Substitutionsmöglichkeiten



Rhesa Tendean

„Aufgrund seines hohen Massenanteils im E-Motor hat Elektroblech einen maßgeblichen Einfluss auf die ökologische Gesamtbilanz – und damit auch auf die Wettbewerbsfähigkeit europäischer Hersteller.“

verschärft. In einer Studie zur Ressourcenknappheit bei der Herstellung von Elektromotoren wird Elektroblech als einzige Subkomponente ohne vergleichbare Ersatzmöglichkeit identifiziert.⁴⁸ Die Autoren der Analyse kommen zu dem Schluss, dass Elektromotoren besonders stark von potenziellen Versorgungsunterbrechungen bei Siliziummetall, Eisen oder Elektroblech betroffen wären.

ASIEN DOMINIERT DEN WETTBEWERB

Im Rahmen von Experteninterviews wird deutlich, dass Asien – und hier primär China – hinsichtlich Produktionskapazitäten, Materialqualität und technologischem Fortschritt führend ist, was durch eine hohe Rohstoffverfügbarkeit, den frühzeitigen Einstieg in die Elektromobilität sowie hohe Investitionen und staatliche Subventionen begünstigt wurde. Trotz bestehender Importbeschränkungen aus China stehen europäische Hersteller von Elektroblechen unter Wettbewerbsdruck und müssen ihre Lieferpreise häufig an das asiatische Preisniveau anpassen.

Obwohl Europa in bestimmten Nischen – etwa bei der Herstellung von Dünnscheiben mit beispielsweise 0,15 Millimetern Dicke – weiterhin

Vorteile besitzt, bleiben die Serienproduktion sowie die durchgängige Produktionsüberwachung hinter den asiatischen Standards zurück. Trotz des Wunsches einiger europäischer Kunden nach regionalen oder nachhaltigeren Lieferketten, dominieren in der Praxis häufig Kosten- und Qualitätsaspekte, so dass die Entscheidung oftmals zugunsten asiatischer Zulieferer ausfällt.

CO₂-NEUTRALITÄT DURCH PRODUKTION IN DEUTSCHLAND

Der hohe Anteil von Elektroblech im Elektromotor hat entlang der gesamten Wertschöpfungskette einen signifikanten Einfluss auf die ökologische Gesamtbilanz. Diese Wirkung wird sich in den kommenden Jahren weiter verstärken, da die Produktions- und Verkaufszahlen von Elektrofahrzeugen stetig zunehmen.

Zur Bewertung der ökologischen Auswirkungen der Elektroblechproduktion wird das Treibhauspotenzial herangezogen – auch als „Global Warming Potential“ (GWP) bekannt. Durch den Einsatz von in Deutschland hergestelltem Elektroblech lässt sich das GWP₁₀₀ aller untersuchten Motortopologien indes um mehr als zwölf Prozent reduzieren.

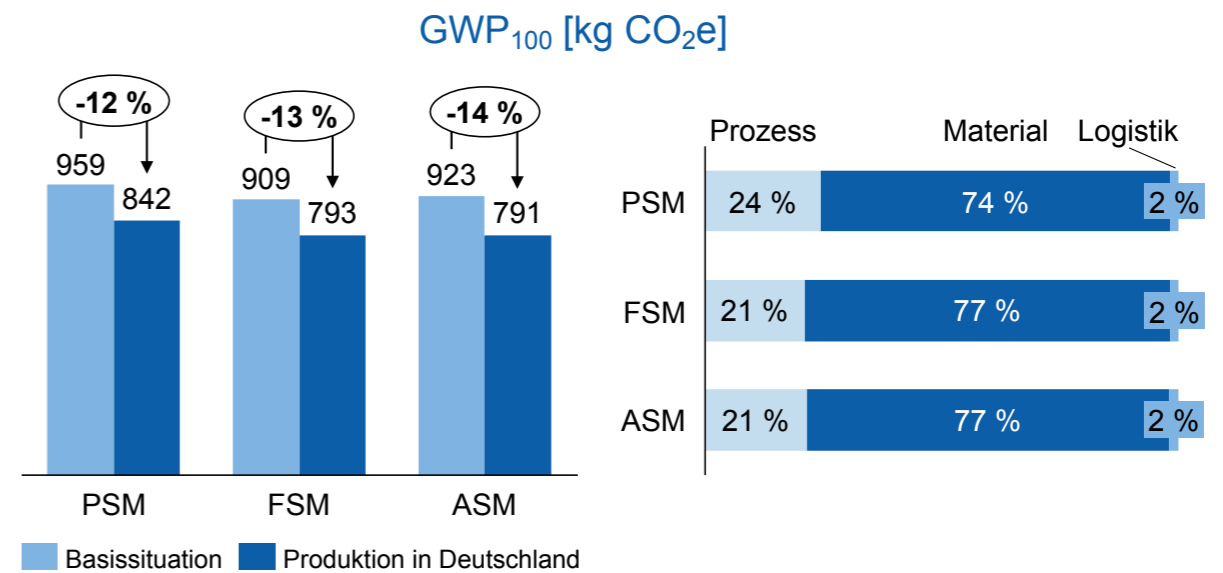


Abbildung 11: Reduktion des „Global Warming Potential“ bei einer Produktion in Deutschland und Anteil der Produktionsfaktoren je Topologie

Till Backes

ALUMINIUM

Aluminium zählt zu den bedeutendsten Werkstoffen der modernen Industrie. Es kommt in nahezu allen Bereichen zum Einsatz, von der Bauwirtschaft über die Luft- und Raumfahrt bis hin zur Elektromobilität. Vor allem im Fahrzeugbau gewinnt das Leichtmetall immer mehr Bedeutung, da es durch sein geringes Gewicht zur Reduzierung des Energieverbrauchs und damit zur Steigerung der Gesamteffizienz beiträgt. Auch in elektrischen Traktionsmotoren, Gehäusen und Batteriepacks wird Aluminium häufig verwendet. Eigenschaften wie Korrosionsbeständigkeit und Formbarkeit machen Aluminium außerdem zu einem vielseitigen und unverzichtbaren Werkstoff für Strukturbauteile.

WERKSTOFF IN STRUKTUR UND FUNKTION

Mit einer weltweiten Jahresproduktion von mehr als 90 Millionen Tonnen zählt Aluminium zu den meistverarbeiteten Metallen. Der Bedarf steigt stetig, insbesondere durch den zunehmenden Einsatz von Aluminium in der Automobil- und in der Energiewirtschaft. Diese Entwicklung wird vor allem durch den Ausbau von Technologien rund um erneuerbare Energie und den Trend zur Leichtbauweise angetrieben. Die Versorgungslage von Aluminium gilt als stabil, ist jedoch mit einigen strukturellen Risiken verbunden. Zwar ist Bauxit als Ausgangsmaterial für Aluminium weltweit reichlich vorhanden, doch die Raffination zu Aluminiumoxid und die anschließende Elektrolyse zu Primäraluminium sind energieintensiv und regional stark konzentriert. Etwa 60 Prozent der globalen Aluminiumproduktion entfallen auf China, während Europa lediglich rund 15 Prozent abdeckt.^{51, 52}

RECYCLING VON ALUMINIUM

Europa setzt zunehmend auf Recycling und den Einsatz von Sekundäraluminium, um die Abhängigkeit von Primäraluminium zu verringern. Sekundäraluminium benötigt nur etwa fünf Prozent der Energie, die zur Herstellung

von Primäraluminium erforderlich ist, und weist damit eine deutlich bessere Umweltbilanz auf.⁵³ Rund die Hälfte des in der Europäischen Union verwendeten Aluminiums stammt bereits aus recycelten Quellen.⁵⁴ Dieser Anteil wird in den kommenden Jahren weiter steigen, da immer mehr Endprodukte wie Fahrzeuge oder Gebäudekomponenten das Ende ihrer Lebensdauer erreichen und wiederverwertet werden können. In Europa liegt die Recycling-Effizienz-Rate (RER) für Aluminium insgesamt laut dem „International Aluminum Institute“ (IAI) bei 81 Prozent, was dem globalen Höchstwert entspricht. Die Herausforderung beim Recycling liegt in der für die Anwendung benötigten Materialqualität. Üblicherweise sinkt sie im Verlauf der Recycling-Zyklen aufgrund von Verunreinigungen durch andere Bestandteile und disqualifiziert das Material für die erneute Nutzung in der ursprünglichen Anwendung. Beispielsweise werden bei aktuellen Elektromotor-Modellen fünf Prozent des verbauten Aluminiums recycelt, während 77 Prozent dem Downcycling zu kommen, also für Anwendungen mit geringeren Anforderungen bereitgestellt werden. Im Vergleich dazu werden bei Kupfer lediglich drei Prozent recycelt, und 90 Prozent werden dem Downcycling zugeführt.

Asynchronmaschinen (ASM) arbeiten mit einem induzierten Rotorfeld: Das im Stator erzeugte Drehfeld induziert Ströme im Kurzschlussläufer, typischerweise einem Aluminiumkäfig mit einer Reinheit von mehr als 99 Prozent.⁴⁹ Das robuste, einfache Funktionsprinzip benötigt weder Magnete noch

Erregerwicklungen und macht ASM vollständig unabhängig von seltenen Erden. Aluminium dominiert aufgrund der Kosten und guter Gießeigenschaften, führt allerdings zu höheren Rotorverlusten und geringerer Leistungsdichte im Vergleich zu den anderen Topologien.⁵⁰

Mit Blick auf die Kritikalität von Aluminium hat das „Joint Research Centre“ (JRC) der Europäischen Kommission – zusätzlich zur EU-Verordnung – eine Studie zu kritischen Rohstoffen veröffentlicht, die die Ressourcen und ihre Verwendung in strategischen Technologien und Sektoren näher betrachtet. Im Abschnitt zu elektrischen Traktionsmotoren werden Kupfer, Siliziummetall als Bestandteil von Elektroleuchten sowie einzelne Komponenten der Permanentmagneten als strategisch relevante Rohstoffe definiert. Aluminium wird – anders als in der Europäischen Verordnung (CRMA) – lediglich als „kritisch“ eingestuft.⁴⁵ Hinzu kommt, dass Aluminium hauptsächlich im Gehäuse der Motoren verwendet wird und daher nicht immer als Material der Motoren aufgefasst wird.⁵⁷ Für die Zeit bis zum Jahr 2030 wird ein Anstieg der globalen Aluminium-Nachfrage um 40 Prozent erwartet, wobei Sekundäraluminium einen wachsenden Anteil übernimmt.⁵⁸

ALUMINIUM IN ELEKTROMOTOREN

Über die Verwendung für Strukturbauteile wie das Motorgehäuse hinaus, kann Aluminium auch in den Aktivkomponenten des Elektromotors zum Einsatz kommen. So ist die Verwendung von Aluminium-Endplatten für Rotoren von FSM und PSM zur Abdichtung der Wicklungsnuten und Magnettaschen sowie zum

späteren Wuchten weit verbreitet. In ASM-Rotoren ist darüber hinaus die Verwendung von Aluminium als Leitermaterial im Rotorkäfig etabliert. Zur Fertigung des Kurzschlusskäfigs in ASM existieren unterschiedliche Möglichkeiten, wobei der Druckguss gegenüber denjenigen Verfahren dominiert, bei denen vorgefertigte Stäbe durch Fügeprozesse verbaut werden. Beim Druckguss werden Kupfer oder Aluminium als Schmelze in Rotornuten gespritzt und durch Abkühlen gehärtet. Die Vorteile von Aluminium liegen vor allem in der günstigen Kombination von elektrischer Leitfähigkeit, Gewicht und Kosten. Im Vergleich zu Kupfer ist die Leitfähigkeit zwar reduziert, allerdings stehen dem die genannten Vorteile entgegen.^{59, 60}

Vor allem mit Blick auf die Kosten weist Aluminium nicht nur einen reduzierten Rohstoffpreis, sondern auch eine stabilere Preisentwicklung auf. Da außerdem die Versorgung mit Kupfer begrenzt ist, werden derzeit Aluminiumkäfige mit verbesserten Eigenschaften untersucht. Das Ziel ist es, mit Hilfe innovativer Aluminiumlegierungen die Nachteile der elektrischen Leitfähigkeit zu kompensieren.⁶¹

Jenseits der genannten Anwendungsgebiete lässt sich auch das in den Statorwicklungen verwendete Kupfer durch Aluminium substituieren.

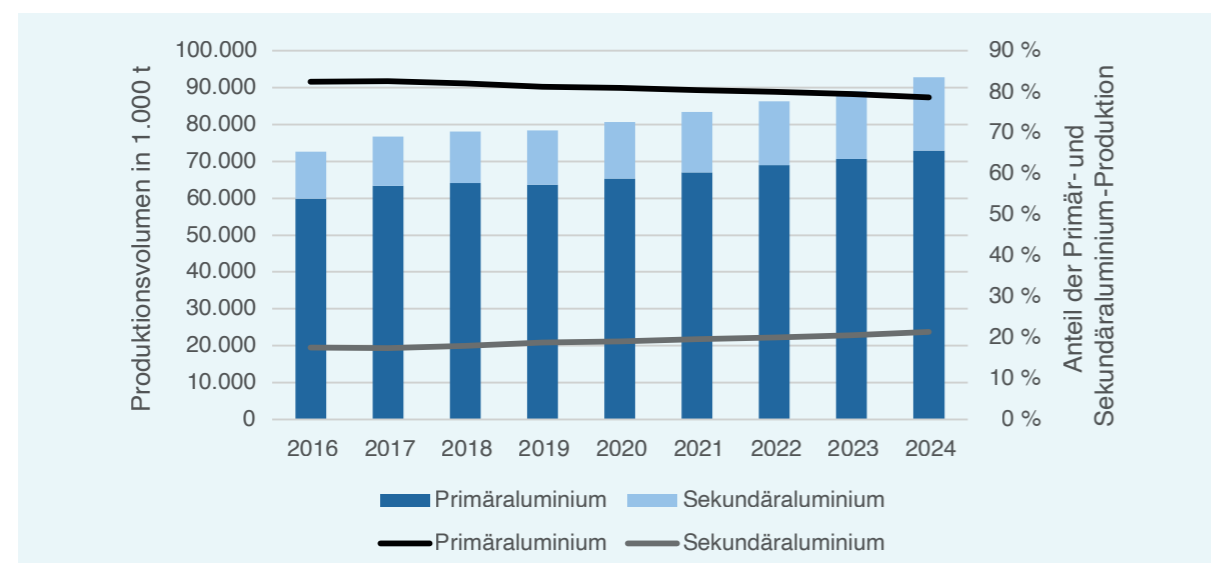


Abbildung 12: Gesamtproduktionsvolumen Aluminium sowie Anteil Primär- und Sekundärmaterial^{55, 56}

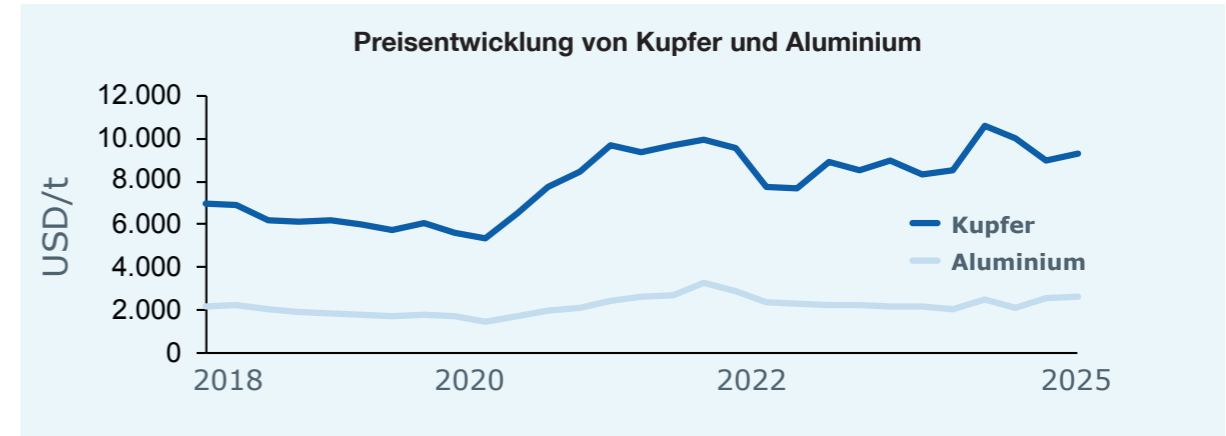


Abbildung 13: Rohstoffpreisentwicklung von Kupfer und Aluminium (PEM-Metastudie)

ren. Das birgt großes Potenzial, da alle Motortopologien – PSM, FSM und ASM – prinzipiell den gleichen Statoraufbau besitzen. Im Gegensatz zu den Aluminiumrotoren, besteht dadurch ein Substitutionspotenzial für den gesamten Markt und nicht nur für den ASM-Sektor. Es ist jedoch zu beachten, dass sich die Unterschiede der beiden Rohstoffe sowohl auf die Produktions- als auch auf die Produkt-Performance auswirken. Bereits bei der Herstellung von isoliertem Aluminiumdraht bilden die veränderten Haftungseigenschaften aufgrund der Oxidschichtbildung eine Herausforderung. Im weiteren Produktionsverlauf, zum Beispiel bei der Fertigung von Hairpin-Statoren, ergeben sich hingegen keine wesentlichen Schwierigkeiten, wie die PEM-Studie zeigt. Bei der Produkt-Performance werden Masse, Volumen und Effizienz der Motoren stark vom Wechsel des Werkstoffs beeinflusst.⁴⁸ Erste Versuche zeigen – trotz verringerter Leitfähigkeit – Effizienzpotenziale im

Hochfrequenzbetrieb von Aluminium-Hairpin-Statoren. Dennoch ist derzeit kein weitreichender Umstieg auf Aluminium in Statorwicklungen zu erwarten.⁶² Nimmt der Kostendruck auf die Komponenten zu und werden Abzüge in der Effizienz des Motors für bestimmte Anwendungen toleriert, kann Aluminium eine effektive Alternative zu Kupfer sein.



Abbildung 14: Hairpin-Stator mit Wellenwicklung aus Aluminium-Lackdraht vom Lehrstuhl PEM der RWTH Aachen

Sebastian Hartmann

HALBLEITER

Halbleiter bilden die Grundlage moderner Technologien und kommen in nahezu allen elektronischen Geräten in Form von Chips und Mikrochips zum Einsatz. Sie gelten als Herzstück der digitalen Transformation, denn in Computern, Unterhaltungselektronik, Fahrzeugtechnik, Medizintechnik, Transport und Logistik sowie im Bereich erneuerbarer Energie sind Halbleiter die Grundlage für unseren aktuellen Fortschritt und künftige Innovationen. Inzwischen wären ganze Kommunikations- und Energiesysteme ohne Halbleiter nicht funktionsfähig. Die Entwicklungen in den Bereichen des „Internet of Things“ (IoT), der künstlichen Intelligenz, der schnellen Datenübertragung und der nachhaltigen Mobilität haben in den vergangenen Jahren zu einem weltweit starken Anstieg der Nachfrage geführt, der sich fortsetzt. Dementsprechend sind Halbleiter eine der kritischen Ressourcen unserer Zeit.^{63, 64}

KLEINE CHIPS MIT GROSSER WIRKUNG

In modernen Fahrzeugen kommen zahlreiche Halbleiter für unterschiedliche Anwendungen zum Einsatz (**Abbildung 15**). Rund 1.000 bis 3.000 Halbleiterchips regeln Funktionen wie Beleuchtung, Geschwindigkeit oder Sicherheit. Bei modernen Hybrid- und Elektrofahrzeugen kommen die Überwachung der Batterie und des Ladezustands sowie die Verteilung der Energie und die Steuerung des elektrischen Antriebs mit Hilfe der Leistungselektronik hinzu.^{65, 66}

In Halbleitern wird vorwiegend Silizium (Si) verwendet. Es ist weltweit in großen Mengen vorhanden, ist dementsprechend kostengünstig und lässt sich in den meisten elektronischen Geräten vergleichsweise einfach verbauen.^{67, 68} Zuerst wurde Germanium (Ge) als Halbleitermaterial eingesetzt, bevor es größtenteils von Silizium abgelöst wurde. Insbesondere Anwendungen mit hohen Geschwindigkeiten und hoher Präzision, beispielsweise Infrarot-Optiken und Hochfrequenz-Schaltkreise, basieren jedoch immer noch auf dem ansonsten weitgehend substituierten Germanium.⁶⁸

Das inzwischen am zweithäufigsten verwendete Halbleitermaterial ist Galliumarsenid (GaAs) und kommt aufgrund seiner überlegenen elektrischen Eigenschaften gegenüber Silizium vorwiegend in der Hochgeschwindigkeitselektronik und der Optoelektronik zur Anwendung.⁶⁹

ABHÄNGIGKEIT DURCH ASIATISCHE MARKTDOMINANZ

Aktuelle Schätzungen gehen für das Jahr 2030 von einem globalen Marktvolumen für Halbleiter von mehr als einer Trillion US-Dollar aus, gleichbedeutend mit einer Steigerung von rund 66 Prozent gegenüber dem Jahr 2021. Das größte Wachstum wird indes für die Bereiche Kommunikation, Datenverarbeitung und -speicherung sowie Elektronik für Automobil-Anwendungen erwartet.⁷⁰

Der Blick auf die Halbleiter-Wertschöpfungskette zeigt vor allem für die Schritte der Auslegung und der Herstellung von Halbleitern eine starke Fokussierung auf wenige zentrale Akteure, die einen großen Teil des globalen Bedarfs bedienen. Zu den wichtigsten Marktteilnehmern zählen die Intel Corporation, Samsung Electronics, TSMC, NVIDIA und Qualcomm.⁶⁴

Im Jahr 2023 lag der globale Marktanteil der Top-5-Halbleiterhersteller bei etwa 31 Prozent. Der Hauptsitz zahlreicher Unternehmen der Lieferkette liegt im ostasiatischen Raum⁷¹. Diese lokale Fokussierung der Produktion und Distribution von Halbleitern insbesondere auf Taiwan, Südkorea und China erzeugt eine hohe Abhängigkeit bei anderen Marktteilnehmern. Unterdessen erfolgen nur rund zehn Prozent der weltweiten Chip-Produktion in Europa.⁷²

Die Kritikalität dieser Abhängigkeit von asiatischen Lieferketten wurde vor allem während der

Corona-Pandemie deutlich, als Unterbrechungen in der Halbleiterproduktion zu massiven Engpässen in der europäischen Automobilindustrie geführt hatten. Ein Beispiel aus der jüngsten Vergangenheit zeigt die temporäre Übernahme des Chip-Herstellers Nexperia durch die niederländische Regierung. Da die Endbearbeitung der Chips nicht in den Niederlanden, sondern in China erfolgt, hat dieser Umstand theoretisch als Druckmittel verwendet werden können. Hätte die niederländische Regierung die zwischenzeitliche Übernahme nicht zurückgenommen, hätte ein Lieferstopp von Nexperia-Halbleitern drohen können, was wiederum massive Produktionsausfälle in der europäischen Automobilindustrie zur Folge gehabt hätte. Der tatsächliche Sachwert lag dabei im Bereich weniger Cents, hätte jedoch in gigantischen finanziellen Schäden resultieren können.⁷³ Auch daran zeigt sich: Die hohe Abhängigkeit von asiatischen Lieferketten ist ein besonderes Erfolgsrisiko bei der Elektrifizierung der Mobilität in Europa.

SOUVERÄNITÄT AUFBAUEN – ABHÄNGIGKEITEN ABBAUEN

Um der drastischen Abhängigkeit entgegenzuwirken, werden in der Europäischen Union bereits Gegenmaßnahmen ergriffen. Ein zentrales Instrument ist dabei der „European Chips Act“ – mit dem erklärten Ziel, das Halbleiter-Ökosystem in der EU auszubauen, externe Abhängigkeiten zu reduzieren und die Resilienz der Lieferketten zu steigern. Dazu sollen kritische Teile der Lieferkette sowie das zugehörige Know-how direkt in Europa aufgebaut und im Rahmen von innereuropäischen Lieferanten-Netzwerken verfestigt werden. Als Ergebnis dieser Maßnahmen strebt Europa eine Verdopplung des weltweiten Halbleiter-Marktanteils auf 20 Prozent an.⁷⁴ Darüber hinaus setzt Europa auf den Ausbau internationaler Partnerschaften, um die überwiegende Abhängigkeit von einzelnen Regionen oder Staaten zu reduzieren und langfristig technische Souveränität im Bereich der Halbleiterproduktion zu erlangen.

Diesem Vorhaben steht die aktuelle Ausgangssituation mit einem massiven Vorsprung im Know-how asiatischer Marktteilnehmer mit bereits vorhandenen Produktionskapazitäten gegenüber, den es zunächst aufzuholen gilt. Hinzu kommt, dass die übrigen Marktteilnehmer in dieser Zeit nicht untätig sind und somit auch in Asien sowie den USA ein Ausbau der Fertigungskapazitäten und weiterer technologischer Fortschritt zu erwarten sind. Eine weitere Herausforderung liegt im sinnvollen Einsatz der geplanten Investitionen mit Blick auf das angestrebte Marktsegment: Schafft es die EU nicht, die passenden Anreize zu setzen – etwa in Form einer Produktion von High-End-Chips mit der Fokussierung auf technologisch anspruchsvolle Zukunftsanwendungen –, besteht das Risiko, dass die Investitionen in Produktionskapazitäten für einfache oder veraltete Chips fließen und dadurch das Ziel der technologischen Souveränität verfehlt wird.⁷⁵

UMWELTSCHÄDLICHE PROZESSE WERDEN AUSGELAGERT

Neben dem eigentlichen Ausbau von Produktionskapazitäten dürfen Klima- und Umweltaspekte nicht ausgeblendet werden. Vor allem die frühen Schritte der Wertschöpfungskette – beispielsweise der Materialabbau und die Front-End-Fertigung – sind energieintensiv, mit einem erheblichen Wasserverbrauch verbunden und setzen wesentliche Mengen von Chemikalien frei, die den Treibhauseffekt zusätzlich beschleunigen und in Zukunft nicht mehr abgebaut werden können.^{76, 77} Hersteller wirken diesem Umstand bereits mit dem Einsatz erneuerbarer Energie, mit nachhaltigen Fertigungskonzepten und mit geschlossenen Wasserkreisläufen entgegen. Gleichzeitig wird an der Entwicklung neuer Halbleitermaterialien gearbeitet, die nachhaltiger produziert und effizienter betrieben werden können.⁷⁸

„Der Einsatz von Halbleitermaterialien in Elektroantrieben ist alternativlos. Im Sinne der Versorgungssicherheit müssen wir in Europa Technologiesouveränität und Produktionskapazitäten aufbauen.“



Sebastian Hartmann

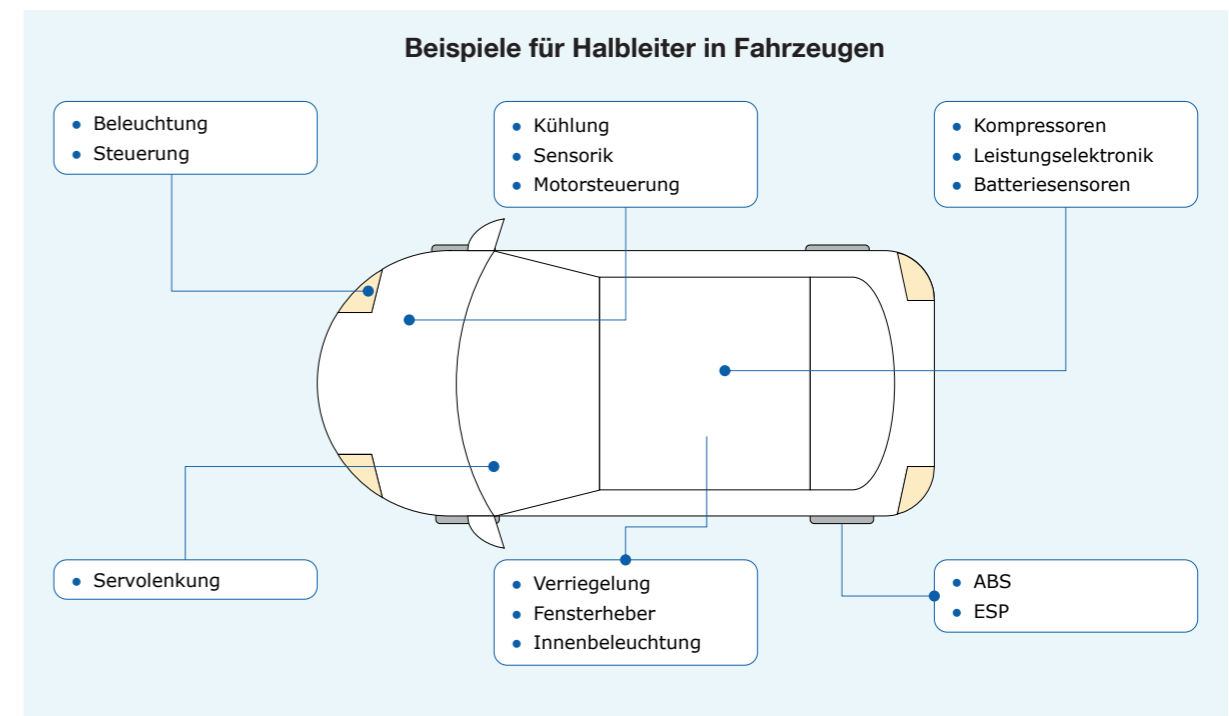


Abbildung 15: Rohstoffpreisentwicklung von Kupfer und Aluminium (PEM-Metastudie)

David Drexler

ISOLATIONSMATERIAL

Kunststoffe sind zur elektrischen Isolierung, zur elektromagnetischen Abschirmung, zur mechanischen Stabilisierung oder zum mechanischen Schutz entscheidende Bestandteile sicherer, effizienter, langlebiger und leistungsstarker E-Motoren. Insbesondere bei der elektrischen Isolierung und der Trennung der unterschiedlichen elektrischen Potentiale innerhalb der Stator- und Rotorwicklung ergeben sich für die eingesetzten Kunststoffe zahlreiche Anforderungen. So sind die Leiterisolierung der Stator- und Rotorwicklung, das Nutgrund-Isolationpapier sowie eventuell verwendete Imprägnierharze je nach Motordesign gleichzeitig chemischen, mechanischen, thermischen und elektrischen Belastungen ausgesetzt.

FÜR HÖHERE EFFIZIENZ UND LEISTUNGSDICHTE

Die Anforderung nach einer hohen Leistungsdichte des Elektromotors verlangt, dass die Isolationsmaterialien ihre jeweiligen Charakteristika bei möglichst geringen Schichtdicken über die gesamte Lebensdauer hinweg erfüllen. Um diesen vielfältigen Ansprüchen gerecht zu werden, kommen vor allem im Bereich der elektrischen Traktionsantriebe Hochleistungskunststoffe zum Einsatz, die sich durch eine hohe Temperaturbeständigkeit von 200 Grad Celsius oder mehr sowie durch eine hohe chemische Beständigkeit und eine hohe elektrische Isolationsfähigkeit auszeichnen.^{79, 80, 81, 82}

EINGESCHRÄNKTE POLYMER-AUSWAHL DURCH LOKALE GESETZGEBUNG

Neben den anwendungsbezogenen Anforderungen wird die Wahl des Isolationsmaterials durch die Materialkosten, durch seine Eignung für das jeweilige Fertigungskonzept sowie durch lokale und globale Gesetzgebungen bestimmt.⁶ Vor allem der letztgenannte Aspekt ist der Grund dafür, dass sich bei der Anwendung von Hochleistungskunststoffen in Isolationssystemen elektrischer Traktionsantriebe regionale Unterschiede feststellen lassen. Im europäischen Raum wird für die Isolation

der Statorwicklung vorwiegend auf Polyamideimide (PAI) und Polyetheretherketone (PEEK) gesetzt. Insbesondere PEEK zeichnen sich durch eine ausgeprägte Temperatur- und Chemikalienbeständigkeit sowie mechanische Stabilität aus. Zudem weisen sie eine hohe Wärmeleitfähigkeit und Teilentladungsbeständigkeit auf. Im asiatischen Raum werden zur Isolation der Statorwicklung hingegen vermehrt Polyimide (PI), Polyetherimide (PEI) oder Kombinationen dieser mit anderen Isolationsmaterialien in mehrschichtigen Aufbauten bevorzugt. Neben der guten chemischen und thermischen Beständigkeit sowie den hervorragenden elektrischen Isolationseigenschaften zeichnen sich PI vor allem durch einen geringeren Materialpreis im Vergleich zu den in Europa verbreiteten PEEK aus.^{81, 82}

Die geringe Verbreitung von PI als Isolationsmaterial für die Statorwicklung im europäischen Raum ist unter anderem auf die seit 2007 rechtskräftige „REACH-Verordnung (EG) Nr. 1907/2006“ zurückzuführen. Sie regelt den Umgang mit chemischen Stoffen, um Mensch und Umwelt vor Risiken zu schützen und die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Chemie-Industrie zu verbessern. So sorgt die REACH-Verordnung beispielsweise dafür, dass die zur Herstellung von PI-Lacken notwendigen

„Hochleistungspolymere sind ein entscheidender Baustein effizienter Elektroantriebe. Mit Blick auf die Materialverfügbarkeit stellen sie allerdings keine kritische Komponente dar.“



David Drexler

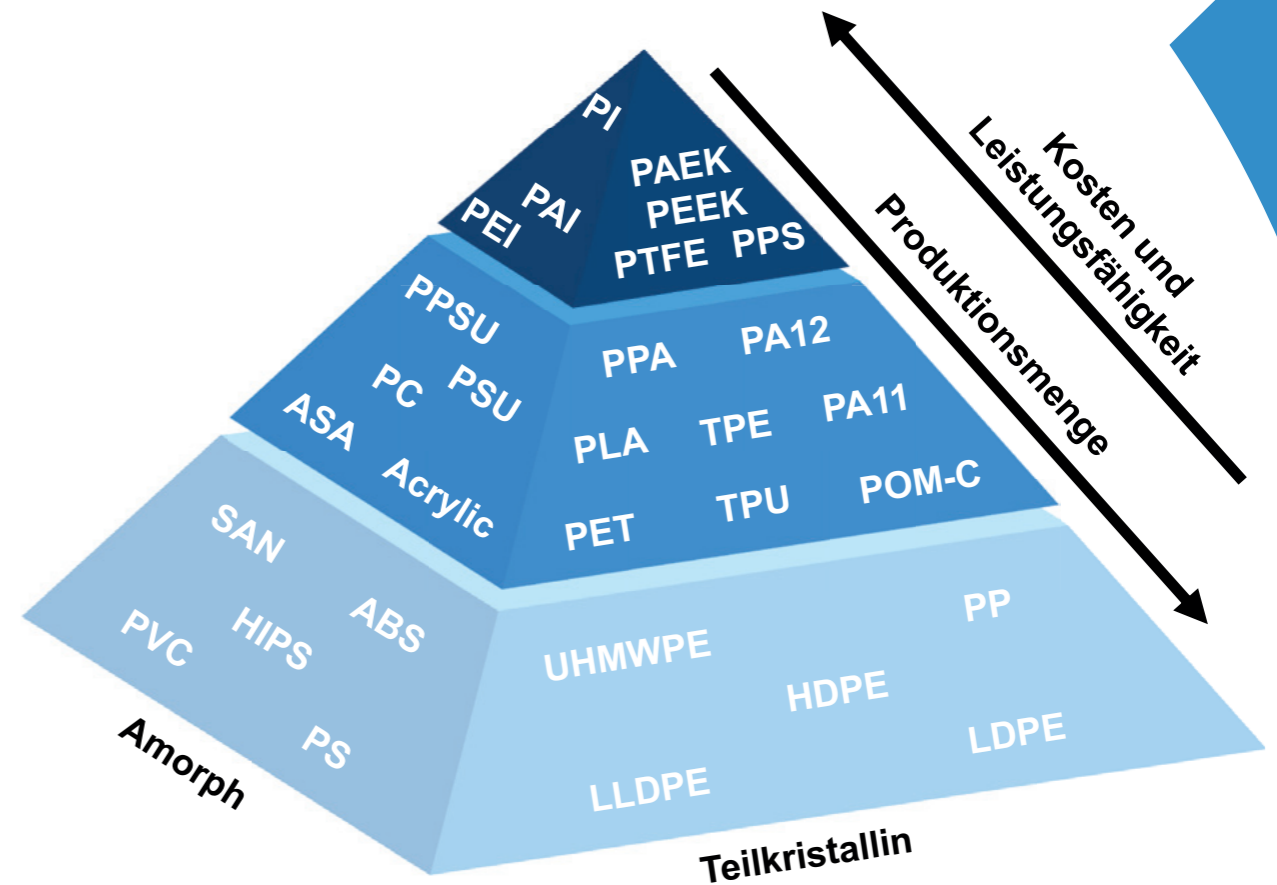
Lösemittel als „Substance of Very High Concern“ eingestuft werden und deren Verwendung einer gesonderten Informations- und Zulassungspflicht unterliegt. Die dadurch entstehenden Kosten sind unter anderem der Grund dafür, dass eine Herstellung von PI-Lacken in Europa bisher nur bedingt wirtschaftlich ist. Ein direkter Import des PI-Lacks als Gebinde wird darüber hinaus durch seine Empfindlichkeit gegenüber Feuchtigkeit, Temperatur, Licht und Sauerstoff sowie durch die möglichen Folgen für die Viskosität des Materials oder dessen elektrische Isolationseigenschaften eingeschränkt.

GERINGE KRITIKALITÄT DURCH MATERIALVIELFALT

Trotz lokaler oder globaler Einschränkungen der Verwendung durch die jeweilige Gesetzgebung und trotz des Spannungsfeldes aus unterschiedlichen Anforderungen an die Hochleistungskunststoffe bei der Verarbeitung und im späteren Motorbetrieb weisen sie im Vergleich zu metallischen Rohstoffen eine niedrige Materialkritikalität auf. Die internationalen Produktionskapazitäten sind global verteilt, so dass eine

Versorgungssicherheit des Gesamtmarktes grundsätzlich gewährleistet ist. Auch Destillationskolonnen zur Herstellung der chemischen Basis dieser Materialien – also petrochemische Grundstoffe – sind weltweit langfristig verfügbar. Die Versorgungssicherheit des Marktes mit diesen Materialien ist somit weniger von seltenen, lediglich lokal verfügbaren Rohstoffen und den zugehörigen Lieferketten abhängig, sondern in erster Linie von der allgemeinen Entwicklung und dem Ausbau der chemischen Industrie sowie von den globalen Erdölmärkten.^{82, 83}

Auch wissenschaftliche Marktanalysen und Befragungen der Kunststoffindustrie zeigen, dass das Risiko von Versorgungsstörungen und -engpässen sowie von unvorhersehbaren Preissprüngen gering ist. Dies ist vor allem in Europa auf etablierte Lieferketten und langfristige Rohstoffverträge zurückzuführen. Darüber hinaus existiert für die meisten Isolationmaterialien eine große Auswahl möglicher Substitute beziehungsweise Ersatzstoffe. Somit ließen sich im Fall von Versorgungsstörungen, Engpässen oder Preissprüngen alternative Kunststoffe mit ähnlichen technischen Eigenschaften verwenden.⁸³



Hochleistungskunststoffe

Technische Kunststoffe

Standardkunststoffe

Abbildung 16: Kunststoff-Pyramide

Tim Franitza, David Drexler

AUSWIRKUNGEN VON MATERIALKRITIKALITÄT AUF TRENDS BEIM E-MOTOR-DESIGN

Um die Abhängigkeit von kritischen Materialien wie Kupfer oder seltenen Erden zu reduzieren, können Designer und Entwickler aktueller elektrischer Antriebe derartige Materialien mit weniger kritischen ersetzen oder die benötigte Menge reduzieren. Grundsätzlich lassen sich im Bereich elektrischer Antriebe – je nach Komponente und Material – beide Strategien feststellen. Aufgrund der notwendigen spezifischen Eigenschaften des Materials, wegen gesetzlicher Restriktionen, die den Einsatz bestimmter Materialien limitieren, oder aufgrund des hohen Kostendrucks wird die Reduktion der benötigten Materialmenge jedoch häufiger realisiert.

Vor diesem Hintergrund wird versucht, die Effizienz und die Leistungsdichte der gesamten Antriebseinheit beispielsweise durch eine Steigerung der Motorsystemspannung, verbesserte Stator- und Rotorkühlsysteme, eine höhere Rotordrehzahl oder optimierte Getriebe sowie Leistungselektroniken zu steigern. Auf diese Weise lässt sich bei gleichbleibender oder erhöhter Leistung der Materialeinsatz reduzieren. Solche Bemühungen äußern sich darin, dass die Effizienz der Materialausnutzung in den vergangenen Jahren sukzessive gestiegen ist. Das gilt vor allem für die Aktivkomponenten des Elektromotors, den Rotor und den Stator, sowie die in diesen Komponenten benötigten Materialien. Deutlich wird die gesteigerte Effizienz der Materialausnutzung in einem abnehmenden Quotienten aus Material pro Kilowatt-Peak Leistung der elektrischen Traktionseinheiten.⁶

Aufgrund der großen Abhängigkeit vom chinesischen Markt ist bei Permanentmagneten das Bestreben groß, den Einsatz von seltenen Erden grundsätzlich zu reduzieren. Daneben ist – je nach Anwendung – zunehmend die Substitution von Neodym- durch Ferritmagnete oder die Kombination beider Magnetarten zu erkennen.

Dieses Vorgehen wird allerdings durch die deutlich geringere Leistungsstärke von Ferritmagneten gegenüber solchen limitiert, die auf seltenen Erden basieren, so dass dies eher in Anwendungen mit geringeren Anforderungen an die Leistungsdichte praktiziert wird. Die geringe Leistungsdichte hat darüber hinaus zur Folge, dass die Substitution von Neodym durch Ferritmagnete mit signifikanten Änderungen im Design verbunden ist und daher Anpassungen auf Seiten des Produkts erforderlich werden.

Hinsichtlich des Verzichts auf seltene Erden gelten fremderregte Synchronmaschinen (FSM) und Asynchronmaschinen (ASM) als Alternativen zu permanenterregten Synchronmaschinen (PSM), da die beiden Motortopologien gänzlich ohne seltene Erden auskommen und stattdessen elektromagnetische Felder nutzen, die bei FSM durch gewickelte Spulen und bei ASM durch einen Kurzschlusskäfig hervorgerufen werden. Die Teilnehmenden der Experteninterviews schätzen das Innovationspotenzial bei fremderregten Synchronmaschinen für die kommenden Jahre als besonders hoch ein und erachten FSM als Treiber zur Reduktion der Abhängigkeit von seltenen Erden für Elektromo-

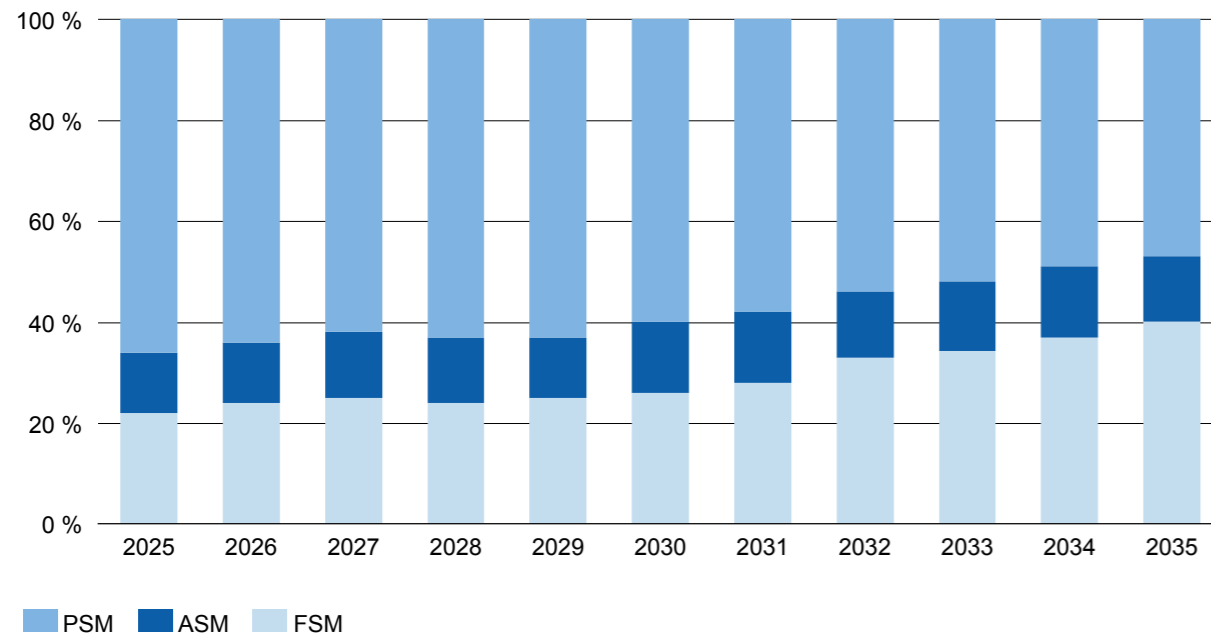


Abbildung 17: Trends im Design bis 2035 („S&P Global Mobility“-Studie)

toren in Europa. Derzeit setzen mit Renault und BMW bereits zwei Automobilhersteller im Bereich der E-Motoren auf FSM für ihre hauptsächlichen Traktionsantriebe.^{84, 85} Basierend auf der aktuellen Lieferkettensituation in Europa ist davon auszugehen, dass weitere europäische Hersteller ihre permanenten Synchronmaschinen in neuen Fahrzeuggenerationen durch fremderregte Synchronmaschinen ersetzen. Einer Marktstudie von „S&P Global“ zufolge steigt der Marktanteil fremderregter Synchronmaschinen als Traktionsantrieb in Europa bis zum Jahr 2035 auf rund 40 Prozent. Der Anteil der Asynchronmaschinen, die neben FSM oder PSM häufig als günstige Zusatz-Traktionsantriebe zum Einsatz kommen, wird für die nächsten zehn Jahre als gleichbleibend eingeschätzt.

Die Nachteile von FSM ergeben sich aus einer niedrigeren Leistungsdichte und der geringeren Effizienz im Vergleich mit PSM sowie aus dem Verschleiß der Schleifkontakte zur Übertragung des Stroms in die Rotorwicklung. Zahlreiche Automobilhersteller und -zulieferer sowie Entwicklungsdienstleister entwerfen dahingehend Lösungen und Innovationen. So erarbeiten die

Unternehmen Valeo und MAHLE derzeit gemeinsam eine fremderregte Synchronmaschine mit induktiver Leistungselektronik⁸⁶, um den Schleifkontakt zur Stromübertragung hinfällig werden zu lassen.

Neben der Materialreduktion auf Ebene der Komponenten – beispielsweise beim Rotor und Stator sowie bei deren Bestandteilen wie die Wicklung oder das Blechpaket – wird dieses Bestreben auch auf der gesamten Ebene der Antriebseinheit sichtbar. Mit der Bezeichnung „3in1“ wurden in der Vergangenheit zunehmend Motor, Reduziergetriebe und Leistungselektronik in einer möglichst kompakten Einheit integriert, um Strukturredundanzen zu minimieren und somit den Bauraum, den Materialeinsatz und die Kosten zu reduzieren. Derzeit lässt sich darüber hinaus ein Trend zu „Xin1“-Antriebseinheiten erkennen: Dabei werden zusätzlich der DC/DC-Konverter, die „Battery Control Unit“ (BCU), die „Vehicle Control Unit“ (VCU), das „Vehicle Thermal Management“ (VTM), die „Power Distribution Unit“ (PDU) oder auch der On-Board-Charger in die Antriebseinheit integriert, um weitere Materialeinsparungen zu erzielen.^{87, 88, 89} Aktuelle Prognosen zufolge wird sich dieser Trend in

Zukunft verstärken, so dass „3in1“- und „Xin1“-Achsen im Jahr 2037 einen Marktanteil von knapp 85 Prozent aufweisen.⁹⁰ Die Materialdiversität, die Komplexität und hohe Integration der Komponenten sowie die Vielzahl der Verbindungselemente erschweren eine „saubere“ Separation von Elektromotoren. Eine sortenreine Demontage und Wiedergewinnung von Bestandteilen und Materialien zur Wiederverwendung ist daher aktuell nicht wirtschaftlich möglich.⁹¹ Daher kommt für das Recycling von Elektromotoren ein Schredder-Prozess gemeinsam mit unterschiedlichen Separier- und Sortierprozessen zur Anwendung. Aufgrund der Verbindungen, der Varianz in den gleichzeitig miteinander geschredderten Produkten sowie der Grobheit der zerkleinerten Partikel sind die Rückgewinnungsraten der Materialien in hoher Reinheit und Qualität niedrig.⁹² Wegen der geringen Qualität des Sekundärmaterials ist die Leistungsfähigkeit von darauf basierenden Komponenten niedriger als bei solchen aus Primärmaterial⁹¹, weshalb sie selten in Anwendungen mit hohen Anforderungen zum Einsatz kommen.

Ein gezieltes „Design for Recycling“ (DfR) ist daher von zentraler Bedeutung für die Senkung der Materialkritikalität im Elektromotor. Die frühe Einbindung der sogenannten 9R-Prinzipien in den Produktentstehungsprozess⁹³ kann eine konsequente Wiedergewinnung und Wiederverwendung von Materialien und Komponenten ermöglichen, was die Autonomie in der Rohstofflieferkette erhöht und dabei hilft, CO₂-Emissionen zu reduzieren. In den Normen zu elektrischen Motoren wird dieser Aspekt jedoch bisher nicht betrachtet. Der Fokus liegt dort einzig auf der Erhöhung der Effizienz zur Steigerung der allgemeinen Nachhaltigkeit.⁹⁴ Aktuelle Konzepte und Entwicklungen aus der Industrie sind in Serienprodukten noch nicht umgesetzt. Die Aspekte „DfR“, „Wiederverwendungseignung“ und „Recycling-Tauglichkeit“ stehen derzeit hauptsächlich im Fokus von Forschungs- und Entwicklungsprojekten⁹², die sich mit dem allgemeinen Aufbau von Elektromotoren und Rotoren, mit der Fixierung von Magneten⁹⁵ und mit allgemeinen Recycling-Strategien für Elektromotoren und Magnete beschäftigen.



LITERATURVERZEICHNIS

- 1 **International Energy Agency**, „Global EV Outlook 2021“, 2021
- 2 **K. Binnemans et al.**, „Recycling of rare earths: a critical review“, *Journal of Cleaner Production*, vol. 51, pp. 1–22, 2013, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.12.037
- 3 **L. Grandell, A. Lehtilä, M. Kivinen, T. Koljonen, S. Kihlman, and L. S. Lauri**, „Role of critical metals in the future markets of clean energy technologies“, *Renewable Energy*, vol. 95, pp. 53–62, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.03.102
- 4 **A. Kampker und H. H. Heimes, Hrsg.**, *Elektromobilität: Grundlagen einer Fortschrittstechnologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Nature, 2024. Online: <https://library.oapen.org/bitstream/id/4fc4cf93-ca30-4f17-bd34-85b7e62683b6/978-3-662-65812-3.pdf>
- 5 **X. She, A. Q. Huang, O. Lucia, and B. Ozpineci**, „Review of Silicon Carbide Power Devices and Their Applications“, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 10, pp. 8193–8205, 2017, doi: 10.1109/TIE.2017.2652401
- 6 **D. Drexler, A. Kampker, H. Born, M. Nankemann, S. Hartmann, and T. Kulawik**, „Advances in electric motors: a review and benchmarking of product design and manufacturing technologies“, *Elektrotech. Inftech.*, vol. 142, no. 5, pp. 312–345, 2025, doi: 10.1007/s00502-025-01331-3
- 7 **Economy, Committee on Critical Mineral Impacts of the U.S.; Resources, Committee on Earth; Council, National Research; Division on Earth and Life Studies; National Research Council, Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy.** Washington: National Academy Press, 2008. Online: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=3378344>
- 8 **T. E. Graedel, E. M. Harper, N. T. Nassar, P. Nuss, and B. K. Reck**, „Criticality of metals and metalloids“, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 112, no. 14, pp. 4257–4262, 2015, doi: 10.1073/pnas.1500415112
- 9 **U. Blum und I. Labucay**, „Governance vulnerabler strategischer Wertschöpfungsketten im Zeichen der Deglobalisierung“, *SIRIUS – Zeitschrift für Strategische Analysen*, vol. 5, no. 3, pp. 239–260, 2021, doi: 10.1515/sirius-2021-3004
- 10 **H. Mayer and B. Gleich**, „Measuring Criticality of Raw Materials: An Empirical Approach Assessing the Supply Risk Dimension of Commodity Criticality“, *NR*, vol. 06, no. 01, pp. 56–78, 2015, doi: 10.4236/nr.2015.61007
- 11 **H. U. Sverdrup, K. V. Ragnarsdottir, and D. Koca**, „On modelling the global copper mining rates, market supply, copper price and the end of copper reserves“, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 87, pp. 158–174, 2014, doi: 10.1016/j.resconrec.2014.03.007
- 12 **G. A. Blengini et al.**, „EU methodology for critical raw materials assessment: Policy needs and proposed solutions for incremental improvements“, *Resources Policy*, vol. 53, pp. 12–19, 2017, doi: 10.1016/j.resourpol.2017.05.008
- 13 **P. Campbell**, *Permanent Magnet Materials and their Application*: Cambridge University Press, 2012
- 14 **S. Glöser, M. Pfaff, L. Tercero Espinoza and M. Faulstich**, „Dynamische Materialfluss-Analyse der Magnetwerkstoffe Neodym und Dysprosium in Deutschland“, 2016
- 15 **N. Haque, A. Hughes, S. Lim, and C. Vernon**, „Rare Earth Elements: Overview of Mining, Mineralogy, Uses, Sustainability and Environmental Impact“, *Resources*, vol. 3, no. 4, pp. 614–635, 2014, doi: 10.3390/resources3040614
- 16 **International Energy Agency**, „Global Critical Minerals Outlook 2025“, 2025
- 17 **Z.-Y. Wang, H.-R. Fan, L. Zhou, K.-F. Yang, and H.-D. She**, „Carbonate-Related REE Deposits: An Overview“, *Minerals*, vol. 10, no. 11, p. 965, 2020, doi: 10.3390/min10110965
- 18 **U.S. Geological Survey**, „Mineral Commodity Summaries“, pp. 144–145, 2025
- 19 **Deutscher Bundestag**, „Seltene Erden als wichtige Ressource“, *Wissenschaftliche Dienste*, 2022
- 20 **T. Cheisson and E. J. Schelter**, „Rare earth elements: Mendeleev's bane, modern marvels“, *Science*, vol. 363, no. 6426, pp. 489–493, 2019, doi: 10.1126/science.aau7628
- 21 **K. Lyon et al.**, „Enhanced Separation of Rare Earth Elements“, *International Mineral Processing Congress*, 2016
- 22 **Jost Wübbele**, „Bergbau in der Inneren Mongolei: Umweltverschmutzung und Konflikte“, 2012
- 23 **D.-C. Popa and L. Szabó**, „Overcoming Catch-22 for rare earth metals in green transition: Solutions in electrical machine manufacturing“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 207, 2025, doi: 10.1016/j.rser.2024.114917
- 24 **G. Baskaran and M. Schwartz**, „Developing Rare Earth Processing Hubs“, *Center for Strategic and International Studies*, 2025
- 25 **China Power**, Does China Pose a Threat to Global Rare Earth Supply Chains? Online: <https://chinapower.csis.org/china-rare-earths/>
- 26 **D. Brown, B.-M. Ma, and Z. Chen**, „Developments in the processing and properties of NdFeb-type permanent magnets“, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 248, no. 3, pp. 432–440, 2002, doi: 10.1016/S0304-8853(02)00334-7
- 27 **S. Pramanik, S. Kaur, I. Popovs, A. S. Ivanov, and S. Jansone Popova**, „Emerging Rare Earth Element Separation Technologies“, *Eur J Inorg Chem*, vol. 27, no. 25, 2024, doi: 10.1002/ejic.202400064
- 28 **Lynas rare earths**, „2024 Environmental, Social and Governance (ESG) Reports“, 2024
- 29 **MP Materials**, *MP Materials Restores U.S. Rare Earth Magnet Production*. Online: <https://mpmaterials.com/news/mp-materials-restores-u-s-rare-earth-magnet-production/>
- 30 **World Economic Forum**, From chips to turbines: Europe depends on these critical rare earth materials. Online: <https://www.weforum.org/stories/2025/10/from-chips-to-turbines-europe-depends-on-critical-raw-materials/>
- 31 **Mordor Intelligence**, *Rare Earth Elements Market Size & Share Analysis*. Online: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/rare-earth-elements-market>
- 32 **F. W. Yang**, China's Rare-Earth Resource Nationalism. Online: https://www.globalasia.org/v17no4/cover/chinas-rare-earth-resource-nationalism-learning-from-japans-experiences_florence-w-yang
- 33 **European Parliamentary Research Service**, „China's rare-earth export restrictions“, 2025
- 34 **Europäische Union**, „Schaffung eines Rahmens zur Gewährleistung einer sicheren und nachhaltigen Versorgung mit kritischen Rohstoffen“, in *Amtsblatt der Europäischen Union*, 2024
- 35 **Public Law 119-21**, 2025
- 36 **A. Perry and K. van Veen**, „Recovering Rare Earth Elements from E-Waste: Potential Impacts on NdFeB Magnet Supply Chains and the Environment“, *Journal of International Commerce and Economics*, 2024
- 37 **J. Robinson et al.**, „Electrical Conductivity of Additively Manufactured Copper and Silver for Electrical Winding Applications“, *Materials (Basel, Switzerland)*, vol. 15, no. 21, 2022, doi: 10.3390/ma15217563
- 38 **J. Li et al.**, „Ultrahigh Oxidation Resistance and High Electrical Conductivity in Copper-Silver Powder“, *Scientific reports*, vol. 6, p. 39650, 2016, doi: 10.1038/srep39650
- 39 **A. Selema, M. N. Ibrahim, and P. Sergeant**, „Electrical Machines Winding Technology: Latest Advancements for Transportation Electrification“, *Machines*, vol. 10, no. 7, p. 563, 2022, doi: 10.3390/machines10070563
- 40 **C. Zhao, H. Zhao, J. Li, X. Zhang, Y. Ruan, and H. Wang**, „Aluminum Windings and Their Manufacturing Technologies in Electrical Machines: A Review“, 27th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 1523–1530, 2025, doi: 10.23919/ICEMS60997.2024.10921067
- 41 **Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe**, „Kupfer: Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe“, Hannover, 2021
- 42 **D. You and H. Park**, „Developmental Trajectories in Electrical Steel Technology Using Patent Information“, *Sustainability*, vol. 10, no. 8, p. 2728, 2018, doi: 10.3390/su10082728
- 43 **A. Heintzel, Hg.**, *Experten-Forum Powertrain: Komponenten und Kompetenzen zukünftiger Antriebe 2022*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2023
- 44 **A.-M. Tillman et al.**, „Elmaskiner för fordon i en cirkulär ekonomi“, *CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA*, 2020. Online: https://research.chalmers.se/publication/520636/file/520636_Fulltext.pdf
- 45 **S. Carrara et al.**, *Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU: A foresight study*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023. Online: [https://op.europa.eu/o/opportal-service/download-handler?identifier=9e17a3c2-c48f-11ed-a05c-01aa75ed71a1&format=pdf&language=en&productionSystem=cellar&part=](https://op.europa.eu/o/opportal-service/download-handler?identifier=9e17a3c2-c48f-11ed-a05c-01aa75ed71a1&format=pdf&language=en&productionSystem=cellar&part=46)
- 46 **M. Grohlo and C. Veeh**, *Study on the critical raw materials for the EU 2023: Final report*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023. Online: [https://op.europa.eu/o/opportal-service/download-handler?identifier=57318397-fdd4-11ed-a05c-01aa75ed71a1&format=pdf&language=en&productionSystem=cellar&part=](https://op.europa.eu/o/opportal-service/download-handler?identifier=57318397-fdd4-11ed-a05c-01aa75ed71a1&format=pdf&language=en&productionSystem=cellar&part=47)
- 47 **ZVEI e.V.**, „Elektroband – Das Hightech-Stahlprodukt für die Klimaneutralität in Europa“, 2022. Online: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2022/Mai/ZVEI-Positionspapier_Elektroband_-_Das_Hightech-Stahlprodukt_fuer_die_Klimaneutralitaet_in_Europa/ZVEI-Positionspapier_Elektroband_-_Das_Hightech-Stahlprodukt_fuer_die_Klimaneutralitaet_in_Europa.pdf
- 48 **H. André and M. Ljunggren**, „Short and long-term mineral resource scarcity impacts for a car manufacturer: The case of electric traction motors“, *Journal of Cleaner Production*, vol. 361, p. 132140, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132140
- 49 **A. Marfoli, M. DiNardo, M. Degano, C. Gerada, and W. Jara**, „Squirrel Cage Induction Motor: A Design-Based Comparison Between Aluminium and Copper Cages“, *IEEE Open J. Ind. Applcat.*, vol. 2, pp. 110–120, 2021, doi: 10.1109/OJIA.2021.3073820
- 50 **A. Karle**, *Elektromobilität*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2022
- 51 **H. Alamdari**, „Aluminium Production Process: Challenges and Opportunities“, *Metals*, vol. 7, no. 4, p. 133, 2017, doi: 10.3390/met7040133
- 52 **M. E. Schlesinger**, *Aluminum Recycling*: CRC Press, 2006
- 53 **M. Langhorst, R. G. Billy, C. Schwotzer, F. Kaiser, and D. B. Müller**, „Inertia of Technology Stocks: A Technology-Explicit Model for the Transition toward a Low-Carbon Global Aluminum Cycle“, *Environmental Science & Technology*, vol. 58, no. 22, pp. 9624–9635, 2024, doi: 10.1021/acs.est.4c00976
- 54 **G. Jarrín Jácome, M. F. Godoy León, R. A. F. Alvarenga, and J. Dewulf**, „Tracking the Fate of Aluminium in the EU Using the MaTrace Model“, *Resources*, vol. 10, no. 7, p. 72, 2021, doi: 10.3390/resources10070072
- 55 **International Aluminum Institute**, *Worldwide primary aluminum production from 2000 to 2024 (in 1,000 metric tons) Graph*. Online: <https://www.statista.com/statistics/1372840/worldwide-primary-aluminum-production/>
- 56 **Precision Business Insights**, *Production volume of recycled aluminum worldwide from 2016 to 2020, with a forecast from 2022 to 2027, by region (in 1,000 metric tons) Graph*. Online: <https://www.statista.com/statistics/1113774/recycled-aluminum-production-worldwide-by-region/>
- 57 **C. Schmölling, G. E. Albiéri und M. Rehmann**, „Technischer Vergleich von Traktionsmaschinen in Elektrofahrzeugen“, in *Proceedings, Experten-Forum Powertrain: Komponenten und Kompetenzen zukünftiger Antriebe 2022*, A. Heintzel, Ed., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2023, pp. 1–12
- 58 **Z. Aljanabi, J. Carrere, and C. Cruz**, „Opportunities for aluminium in a post-Covid economy“, 2022
- 59 **R. Thomas, H. Husson, L. Garbuio, and L. Gerbaud**, „Comparative study of the Tesla Model S and Audi e-Tron Induction Motors“, 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Sofia, Bulgaria, 2021, pp. 1–6
- 60 **A. Kampker**, *Elektromobilproduktion*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014
- 61 **A. Yavaş, C. Cilingir, A. Turk, and E. Celik**, „Production and Characterization of Highly Conductive Aluminum Metal for Electric Motor Applications“, *J. of Mater Eng and Perform*, vol. 34, no. 2, pp. 1705–1716, 2025, doi: 10.1007/s11665-024-09154-7
- 62 **N. Tazi et al.**, „Initial analysis of selected measures to improve the circularity of critical raw materials and other materials in passenger cars“, *Europäische Kommission, Luxemburg*, EUR EUR 31468 EN, 2023. Online: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/0a04af44-fdcf-11ed-a05c-01aa75ed71a1>
- 63 **RS Components**, „Was sind Halbleiter: Eine Einführung: Dieser Leitfaden fasst zusammen, was Halbleiter sind, wie sie funktionieren und warum sie in der heutigen Welt von zentraler Bedeutung sind.“, Online: <https://de.rs-online.com/web/content/discovery-portal/produktanbieter/was-sind-halbleiter>
- 64 **Vidushi Saxena**, *Understanding the Semiconductor Industry: The Backbone of Modern Technology*. Online: <https://www.bisinfotech.com/understanding-the-semiconductor-industry-the-backbone-of-modern-technology/#:~:text=The%20Role%20of%20Semiconductors%20in,resource%20in%20the%20global%20economy>
- 65 **Mein-Autolexikon**, *Leistungsselekttronik*. Online: [view-source://https://www.mein-autolexikon.de/antrieb-hybrid/leistungsselekttronik.html](https://www.mein-autolexikon.de/antrieb-hybrid/leistungsselekttronik.html)
- 66 **Polar Semiconductor**, *How Many Semiconductor Chips Are in a Car?* Online: <https://polarsemi.com/blog/blog-semiconductor-chips-in-a-car/#:~:text=So%2C%20here's%20the%20typical%20range,things%20they're%20responsible%20for> (accessed: Nov. 21 2025)

- 67 Sizen Limited**, Your Essential Guide to Semiconductor Materials: From Silicon to Gallium and Germanium. Online: <https://www.aemdeposition.com/blog/semiconductor-materials-guide.html>
- 68 IEEE**, IRDS: International Roadmap for Devices & Systems. Online: <https://irds.ieee.org/semiconductor-materials/#:~:text=What%20are%20the%20most%20used,common%20semiconductor%20in%20use%20today>
- 69 Hitachi High-Tech Corporation**, Semiconductor Room: 3. The semiconductor material silicon. Online: <https://www.hitachi-high-tech.com/global/en/knowledge/semiconductor/room/about/silicon.html#:~:text=The%20material%20most%20frequently%20used,natural%20water%2C%20trees%20and%20plants>
- 70 Ondrej Burkacky and Bill Wiseman**, „McKinsey on Semiconductors: Creating value, pursuing innovation, and optimizing operations“, pp. 16–20, 2024
- 71 Gartner**, Gartner Says Worldwide Semiconductor Revenue Declined 11% in 2023. Online: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2024-01-16-gartner-says-worldwide-semiconductor-revenue-declined-11-percent-in-2023>
- 72 Jan-Peter Kleinhans and Dr. Nurzat Baisakova**, „The Semiconductor Value Chain“, pp. 21–23, 2020. Online: https://www.interface-eu.org/storage/archive/files/the_global_semiconductor_value_chain.pdf
- 73 Helmut Martin-Jung und Stephan Radomsky**, Mangel an Halbleitern: Wenn diese Chips fehlen, steht die Welt still. Online: <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/chips-lieferkette-industrie-nexperia-li.3331317>
- 74 Europäische Kommission**, Europäisches Chip-Gesetz. Online: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/de/policies/european-chips-act>
- 75 Pablo Valerio**, Qualcomm Beats Earnings, New U.S. and EU Chip Policies. Online: <https://www.eetimes.com/qualcomm-beats-earnings-new-u-s-and-eu-chip-policies/>
- 76 Julia Christina Hess**, „Ökologischer Fußabdruck der Chipproduktion: Kartierung der Klima- und Umweltauswirkungen“, vol. 2024, pp. 15–47. Online: https://www.interface--eu-org.translate.google.com/publications/chip-productions-ecological-footprint?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=de&_x_tr_hl=de&_x_tr_pto=sge#conclusion
- 77 Eike Kühn**, Ökobilanz der Chipindustrie: Die schmutzige Seite der Chipherstellung. Online: <https://www.zeit.de/digital/internet/2024-06/oekobilanz-chipindustrie-intel-tsmc-klimaschutz-nachhaltigkeit>
- 78 MRL Group**, Sustainability in Semiconductor Industry: Towards Greener Chip Production. Online: <https://www.mrlcg.com/resources/blog/sustainability-in-semiconductor-industry--towards-greener-chip-production/>
- 79 M. Mokhtari, E. Archer, N. Bloomfield, E. Harkin Jones, and A. McIlhagger**, „A review of electrically conductive poly(ether ether ketone) materials“, Polymer International, vol. 70, no. 8, pp. 1016–1025, 2021, doi: 10.1002/pi.6176
- 80 L. Yuan, X. Zheng, W. Zhu, B. Wang, Y. Chen, and Y. Xing**, „Study on the Electrical Insulation Properties of Modified PTFE at High Temperatures“, Polymers, vol. 16, no. 3, 2024, doi: 10.3390/polym16030316
- 81 S. Akram, I. U. Haq, J. Castellon, and M. T. Nazir**, „Examining the Mechanism of Current Conduction at Varying Temperatures in Polyimide Nanocomposite Films“, Energies, vol. 16, no. 23, p. 7796, 2023, doi: 10.3390/en16237796

- 82 T. Scherzer, M. Wolf, K. Werum, H. Ruckdäschel, W. Eberhardt, and A. Zimmermann**, „Dielectric Properties of PEEK/PEI Blends as Substrate Material in High-Frequency Circuit Board Applications“, Micromachines, vol. 15, no. 6, 2024, doi: 10.3390/mi15060801
- 83 H. Li et al.**, „High-performing polysulfate dielectrics for electrostatic energy storage under harsh conditions“, Joule, vol. 7, no. 1, pp. 95–111, 2023, doi: 10.1016/j.joule.2022.12.010
- 84 T. Langenbacher**, Renault und Valeo entwickeln „Elektromotor der nächsten Generation“. Online: <https://ecomoto.de/2023/10/27/renault-und-valeo-entwickeln-elektromotor-der-naechsten-generation/>
- 85 C. Gleich**, Strom erregt: BMWs fünfte E-Motoren-Generation für Elektroautos. Online: <https://www.heise.de/hintergrund/Strom-erregt-BMWs-fuenfte-E-Motoren-Generation-fuer-Elektroautos-7542381.html>
- 86 MAHLE GmbH**, Valeo und MAHLE erweitern ihre Produktportfolios magnetfreier E-Motoren für obere Fahrzeugsegmente. Online: <https://newsroom.mahle.com/press/de/press-releases/valeo-und-mahle-erweitern-ihre-produktportfolios-magnetfreier-e-motoren-fur-obere-fahrzeugsegmente-106048#>
- 87 E. Harmon**, „Valeo new high voltage Xin1 eAxle range: A modular and scalable approach from 40 kW to 300 kW“, Baden-Baden, 2024. Online: <https://elibrary.vdi-verlag.de/de/document/view/pdf/uuid/80323716-e387-3997-b42f-a4b8d6d2be4d?page=1>
- 88 Schaeffler Technologies AG & Co. KG**, New drive for electric mobility: The 4in1 electric axle from Schaeffler. Online: https://www.schaeffler.de/de/news_medien/pressemitteilungen/pressemitteilungen_detail.jsp?id=87822378&ref=rss
- 89 Nissan Motor Co., Ltd.**, Next-generation X-in-1 electric powertrain. Online: <https://www.nissan-global.com/EN/INNOVATION/TECHNOLOGY/ARCHIVE/XIN1/>
- 90 M. Southcott**, „The Future of Electric Motors in a Changing Electrification Landscape“, Reutlingen, 2025
- 91 E. Kasagga and A. EL-Refaie**, „Recyclable Electrical Machine Designs: Current Approaches and Perspectives“, 2024 International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp. 1–7, 2024, doi: 10.1109/ICEM60801.2024.10700498
- 92 M. Katona and T. Orosz**, „Circular Economy Aspects of Permanent Magnet Synchronous Reluctance Machine Design for Electric Vehicle Applications: A Review“, Energies, vol. 17, no. 6, p. 1408, 2024, doi: 10.3390/en17061408
- 93 M. Benfer et al.**, „A Circular Economy Strategy Selection Approach: Component-based Strategy Assignment using the Example of Electric Motors“, 2022, doi: 10.15488/12133
- 94 EN 60034-30-1:2014**: Rotating Electrical Machines - Part 30-1: Efficiency Classes of Line Operated AC Motors (IE-Code), EN 60034-30-1:2014, European Committee for Electrotechnical Standardization, 2014
- 95 G. Du et al.**, „Influence of Rotor Sleeve on Multiphysics Performance for HSPMSM“, IEEE Trans. on Ind. Applicat., vol. 59, no. 2, pp. 1626–1638, 2023, doi: 10.1109/TIA.2022.3227531

IMPRESSUM

Herausgeber

Production Engineering of E-Mobility Components | RWTH Aachen University
Bohr 12
52072 Aachen

Telefon +49 241 80 27406

E-Mail info@pem.rwth-aachen.de

Web www.pem.rwth-aachen.de

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker,
Prof. Dr. Heiner Hans Heimes,
Henrik Born

Einleitung: Moritz Stöckler, Jonas Dudzik

Seltene Erden: Michael Nankemann

Kupfer: Tim Franitza

Elektroblech: Rhesa Tendean

Aluminium: Till Backes

Halbleiter: Sebastian Hartmann

Isolationsmaterial: David Drexler

Auswirkungen von Materialkritikalität

auf Trends beim E-Motor-Design: Tim Franitza, David Drexler

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt ausschließlich bei den Autoren.

Projektmanagement: Moritz Stöckler, Yazan Bajah

Lektorat: Mischa Wyboris

Konzept und Layout: Patrizia Cacciotti

Dieses Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt.

Bildnachweise

Titel-/Rückseite: AdobeStock/283063095

Andere Bildquellen: AdobeStock (Seite 12)

AdobeStock (Seite 16)

AdobeStock (Seite 20)

PEM der RWTH Aachen (Seite 24)

AdobeStock (Seite 28)

Syensqo und Essex (Seite 32)

Toyota (Seite 36)

Fotos der Autoren: Patrizia Cacciotti, PEM der RWTH Aachen

Haftungsausschluss

Die Informationen des Lehrstuhls „Production Engineering of E-Mobility Components“ (PEM) der RWTH Aachen stammen aus ausgewählten öffentlichen Quellen. Bei der Bereitstellung dieser Publikation gehen der Lehrstuhl PEM und seine Partner davon aus, dass die verwendeten Informationen aus zuverlässigen Quellen stammen, übernehmen jedoch keine Gewähr für die Richtigkeit oder Vollständigkeit dieser Informationen, die ohne vorherige Ankündigung geändert werden können, und nichts in diesem Dokument ist als solche Gewährleistung auszulegen. Die Aussagen in dieser Publikation spiegeln die aktuellen Ansichten der Autoren der jeweiligen Artikel oder Beiträge wider und entsprechen nicht zwangsläufig den Ansichten des Lehrstuhls PEM. Darüber hinaus lehnt PEM jede Haftung ab, die sich aus der Nutzung dieses Dokuments oder seines Inhalts ergibt. Die Bildrechte verbleiben zu jeder Zeit bei den jeweiligen Urhebern. PEM haftet nicht für Schäden, die durch die Nutzung der in dieser Veröffentlichung enthaltenen Informationen entstehen.

