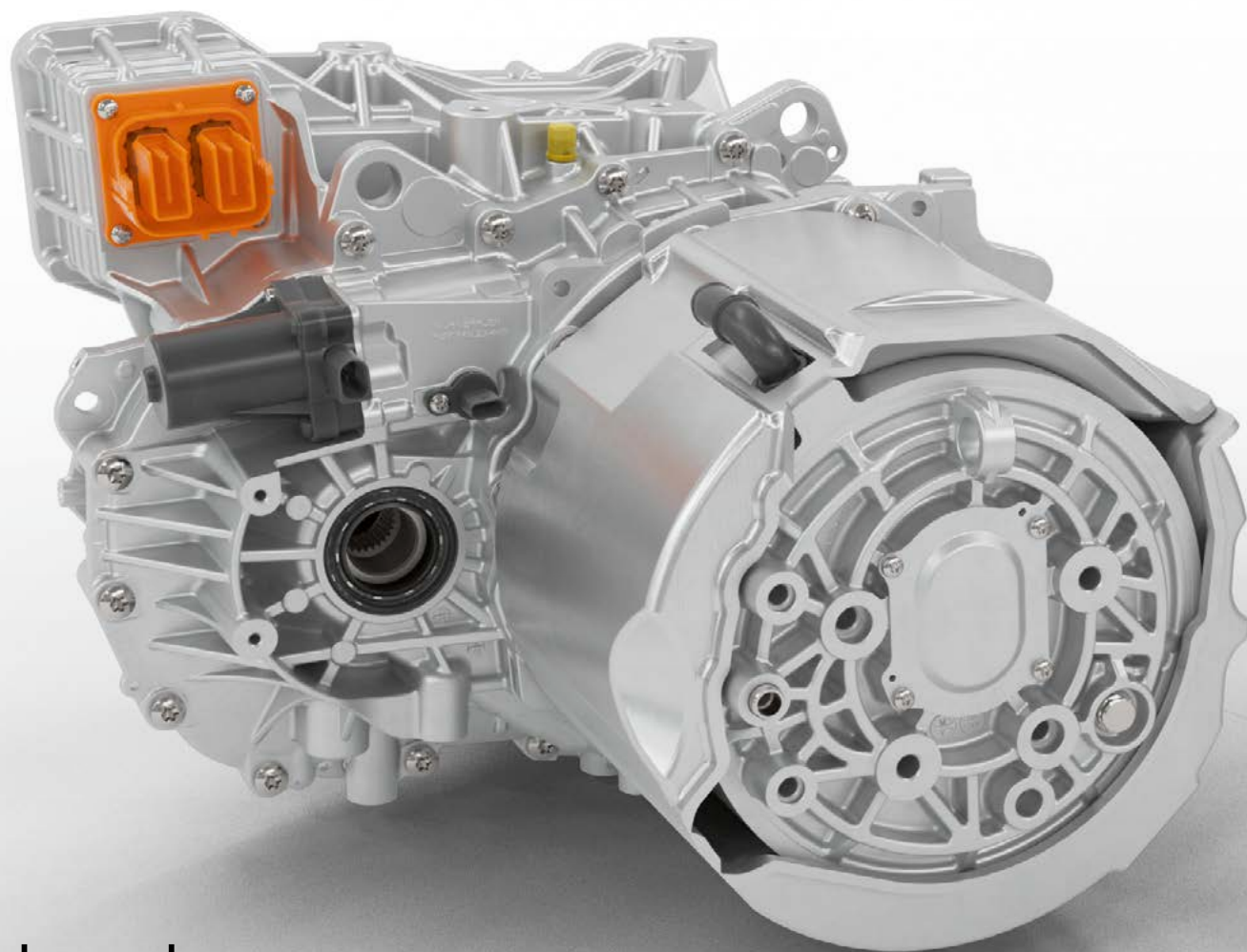


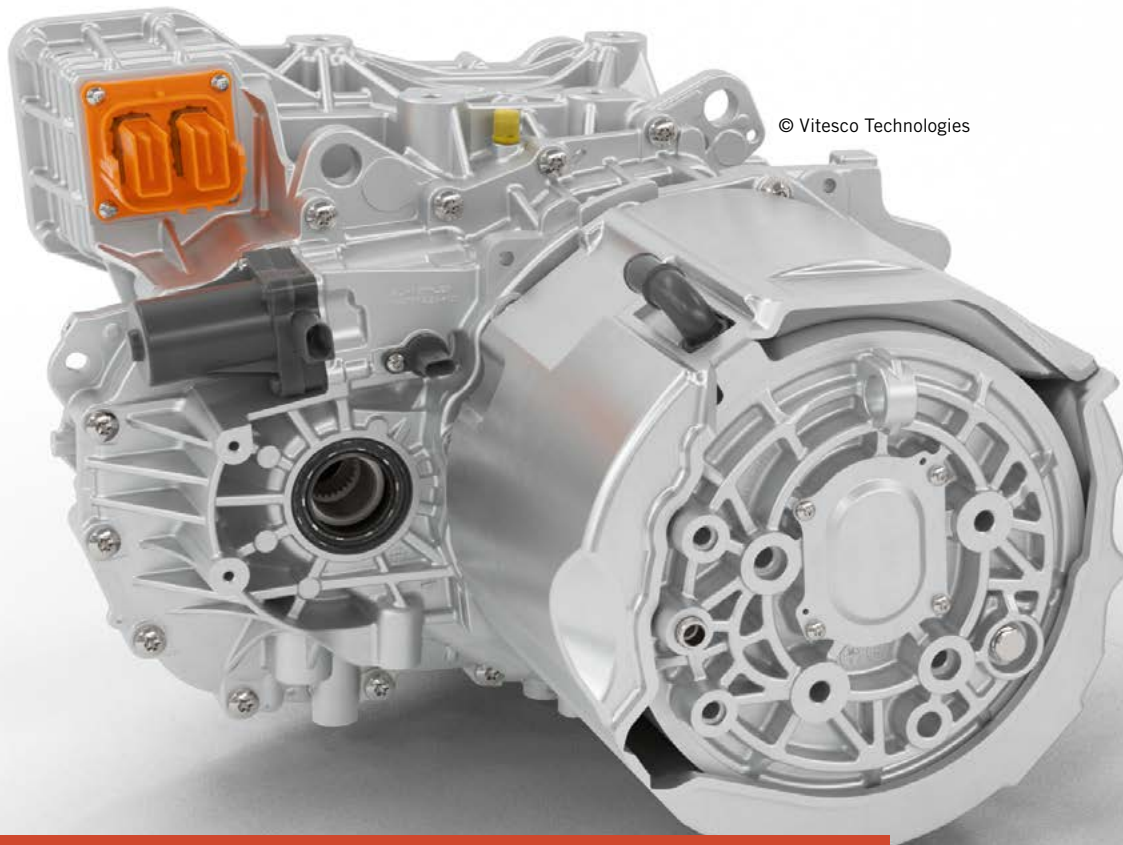
MTZ extra



Elektromotoren

Magnetfreier Rotor als Option für die EMR4-Plattform

vitesco
TECHNOLOGIES



© Vitesco Technologies

Magnetfreier Rotor als Option für die EMR4-Plattform

Elektrische Traktionsmaschinen ohne Permanentmagnete weisen eine Reihe von Stärken auf, die für aktuelle und künftige Anforderungen der weltweiten Elektrifizierung an Bedeutung gewinnen. Vitesco Technologies hat daher einen fremderregten Rotor für seine Achsantriebsplattform EMR4 (Electronics Motor Reducer der 4. Generation) entwickelt. Diese neue Option hat nahezu Plug-and-Play-Merkmale. Simulationen und Tests des Rotors sowie der zugehörigen Komponenten zeigen, dass verbreitete technische Grundannahmen zu fremderregten Maschinen nicht länger dem Entwicklungsstand entsprechen.

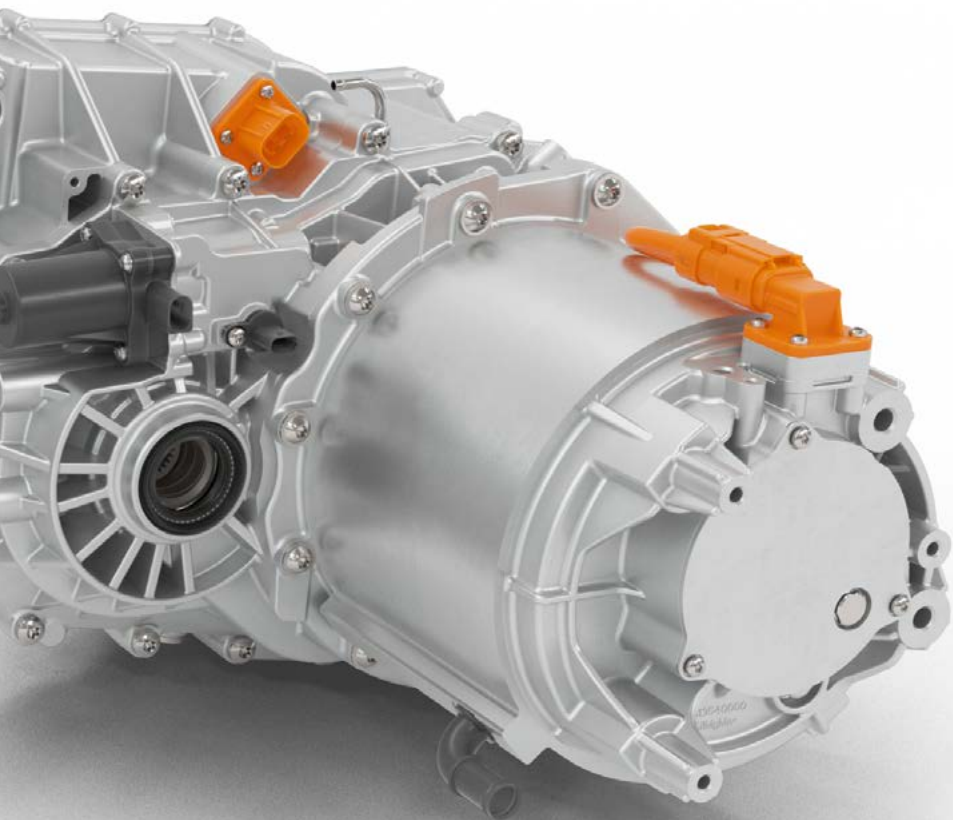
VERFASST VON

**Gunter Mühlberg**

ist Leiter des Produktmanagements
Hochvoltantriebe bei Vitesco
Technologies in Berlin.

**Dr.-Ing. Sachar Spas**

ist Manager für Produktentwicklung
und technische Akquisition
Hochvoltantriebe bei Vitesco
Technologies in Berlin.



■ Es ist gerade der Erfolg der weltweiten Fahrzeugelektrifizierung, der elektrische Maschinen ohne Permanentmagnete zurück auf die Tagesordnung gebracht hat. Aktuell sind Synchronmaschinen mit Permanentmagneten (Permanent Magnet Synchronous Machines, PSM) klar der De-facto-Standard in Elektrofahrzeugen (Electric Vehicle, EV). Ihre Leistungsmerkmale und Herstellungskosten haben zu dieser Marktdurchdringung geführt. Die Faktoren, die ihren Erfolg begründen, ändern sich jedoch. Die ersten Generationen von EVs wurden tendenziell für kürzere Strecken und niedrige bis mittlere Geschwindigkeiten optimiert.

Inzwischen hat die Automobilindustrie große Fortschritte bei der Reichweite von EVs erzielt, sodass sich das Nutzungsprofil in Richtung

Langstrecke erweitert. Damit wird die Traktionsmaschine häufiger und länger bei hohen Drehzahlen und hohen Leistungen betrieben. Hinzu kommt, dass leistungsfähigere Batterien auch einen Anhängerbetrieb ermöglichen. Damit rückt ein wesentliches Merkmal der PSM in den Vordergrund: Wegen der unveränderbaren Magnetisierung muss das Optimum einer PSM fest für einen bestimmten Drehzahl- und Leistungsbereich definiert werden. Bisher war das Ziel hier, dem Fahrer vor allem Drehmoment und Leistung im unteren Geschwindigkeitsbereich anbieten zu können. Bei hoher Drehzahl und Leistung läuft eine so optimierte PSM nicht mehr im effizientesten Betriebsbereich.

Hinzu kommt, dass Werkstoffe für PSM wie Neodym (Nd) und Praseodym (Pr) in mehrfacher Hinsicht schwer kal-

kulierbar sind. Ein Rückblick zeigt, wie volatil die Preisentwicklung beispielsweise bei NdPr war, **BILD 1**. Der schwierigste Aspekt in diesem Zusammenhang ist, dass die enormen Preisschwankungen politische Ursachen haben und daher unabhängig von Marktmechanismen sind. Im Umkehrschluss bedeutet diese Volatilität, dass neue Marktteilnehmer im Bereich Permanentmagnete vor großen Herausforderungen bei ihrem Geschäftsplan stehen. Die Gewinnchancen sind ungewiss, was den Markteintritt neuer Akteure behindert.

Mit der wachsenden Zahl an EVs gewinnt auch das Global Warming Potential (GWP) des Elektroantriebs an Bedeutung. EVs müssen ebenfalls CO₂-Vorgaben erfüllen. Permanentmagnete beispielsweise treiben den GWP-Wert eines Fahrzeugs deutlich nach oben, weil ihre Gewinnung mit Umweltbelastungen verbunden ist. Ein Vergleich zwischen extern erregten Synchronmaschinen (Externally Excited Synchronous Machines, EESMs) und PSMs ergab bei dem GWP-Wert einen Vorteil von 6 % für die EESM [1]. Letztlich kommt noch hinzu, dass inzwischen viele Branchen auf Permanentmagnete zugreifen, um elektrifizierte Produkte anbieten zu können. Damit ist anzunehmen, dass die Nachfrage auf lange Sicht das Angebot übersteigen wird.

In Summe haben diese Entwicklungen eine Neubewertung magnetfreier elektrischer Antriebe ausgelöst. In diesem Bereich verfügt Vitesco Technologies dank mehr als 100.000 Antrieben im Markt über umfangreiche Felderfahrungen, die bis ins Jahr 2011 zurückreichen, und hat dieses Know-how genutzt, um ein neues Rotorkonzept ohne Magnete zu entwickeln. Dieser EESM-Rotor bildet eine neue Option in der skalierbaren Achsantriebsplattform EMR4. Im Zuge der Entwicklung wurden verbreitete Annahmen zu Hürden bei der Komplexität, den Fertigungskosten und der Effizienz von EESMs widerlegt. Schon auf dem aktuellen Serienentwicklungsstand sind die Preis- und Leistungsparität zu PSM in greifbarer Nähe, und die Entwicklung geht weiter.

Das schlägt sich auch in den Aussichten für die Marktbedeutung von EESMs nieder. Bei aller Vorsicht, die bei Vorhersagen über Trends angebracht ist, gehen die Verfasser davon aus, dass diese bis zum Jahr 2030 in einem stark wachsen-



BILD 1 Kostenkurven für die unterschiedlichen Permanentmagnetpreisniveaus der Jahre 2020 bis 2023 (© Vitesco Technologies)

den Gesamtmarkt einen Anteil von etwa 8 % der elektrischen Antriebe erreichen können, **BILD 2**. Sollten allerdings geopolitische Verwerfungen auftreten, die eine Knappheit und/oder Verteuerung von Seltenen Erden verursachen, könnte dieser Marktanteil deutlich höher ausfallen und auf bis zu 40 % steigen.

EESM ALS TEIL EINER PLATTFORM

Die Achsantriebsplattform EMR4 ist eine modulare, skalierbare Entwicklung, deren Serienanlauf für Mitte 2024 vorgesehen ist. Ein Serienanlauf mit EESM-Rotor ist voraussichtlich Ende 2026 möglich. Mit der EMR4 lassen sich Fahrzeugplattformen und -segmente durchgängig mit einem Achsantrieb ausrüsten, da die Leistung in der Spanne zwischen 100 und 250 kW durch geeignete, mittels multi-kriteriellen Methoden ermittelte Skalierungsoptionen mit einem festem Außendurchmesser definiert wird. Mit der jeweils dafür optimierten Inverter-Option (Si oder SiC) sind sowohl 400 als auch 800 V Systemspannung darstellbar.

Der neu entwickelte Rotor stellt eine Erweiterung dieser modularen Plattform dar. Bei gleichem Rotordurchmesser und damit plattformeinheitlichem Stator-Außendurchmesser von 208 mm kann der Fahrzeughersteller nahezu nach dem Plug-and-Play-Prinzip innerhalb der EMR4-Achsantriebsplattform zwischen Aggregaten mit oder ohne Magnete wählen, **BILD 3**. So lassen sich unterschiedliche Märkte und/oder Fahrzeugtypen gezielt mit dem jeweils

optimalen Antrieb ausrüsten. Auch ein Wechsel von einem PSM-Antrieb zu einem magnetfreien Antrieb wird damit während der Laufzeit eines Fahrzeugmodells möglich. Der Sinn des EMR4-Plattformkonzepts liegt darin, dem Fahrzeughersteller Wahlfreiheit bei minimalem Änderungsaufwand zu bieten. Der EESM-Rotor ist also eine Ergänzung, kein Ersatz für die PSM-Option, da beide ihre Stärken haben.

Bei dem PSM-Rotor stehen Vorteile bei der Leistungsdichte, dem Bauraum,

der bereits erreichten Kostenoptimierung und der Effizienz im Vordergrund, während die genannten Risiken bei den Magnetpreisen, der Verfügbarkeit und der Nachhaltigkeit eher zu den Schwachstellen der PSM gehören. Für den EESM-Rotor spricht, dass seine Leistungsmerkmale inzwischen nahezu gleichauf mit der PSM-Variante liegen, die Preisstabilität und Liefertreue gegeben sind und die Nachhaltigkeit besser ist. Außerdem kann ein EESM-Rotor nahezu ohne Verzögerung entmagnetisiert werden, was bei PSM unmöglich ist. Für die Magnetisierung des Rotors ist eine zusätzliche Erregerstufe im Inverter erforderlich. Einen gewissen Kompromiss erfordert der EESM-Rotor bei der Baulänge, weil auf der y-Achse Raum für die Energieübertragung des Erregersystems benötigt wird. Aktuell wird eine Reduktion der Baulänge um 25 mm durch ein verändertes Integrationskonzept vorbereitet. Damit wird der Bauraumzuwachs gegenüber einer PSM auf voraussichtlich 30 bis 40 mm sinken.

LEISTUNG UND EFFIZIENZ DES EESM-ROTORS

BILD 4 und **BILD 5** zeigen eine Gegenüberstellung von Drehmoment und Leistung für PSM und EESM als Simulation in einem D-Segment-Fahrzeug. Beim EESM-

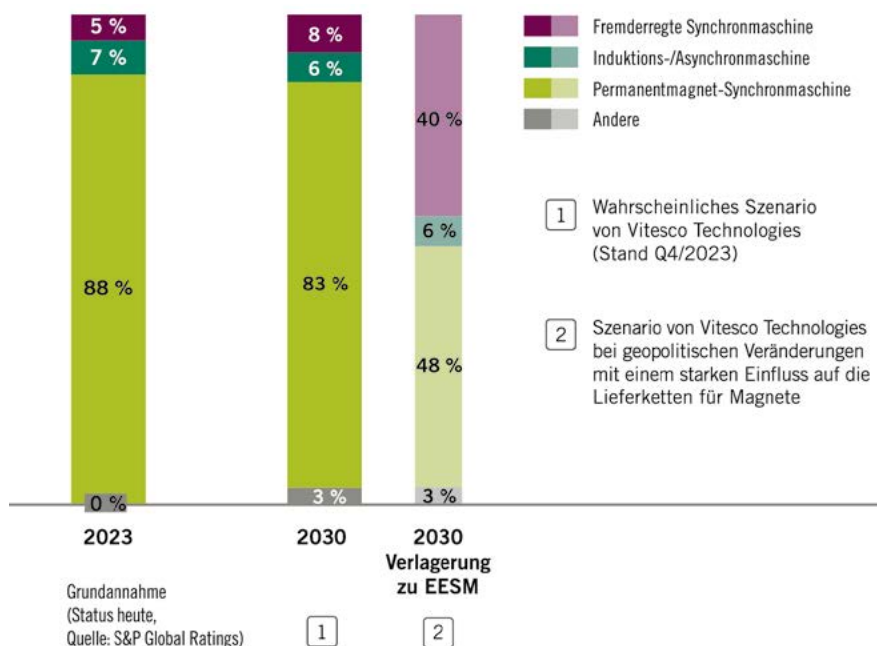


BILD 2 Mögliche Szenarien der weltweiten EESM-Marktentwicklung mit und ohne den Einfluss geopolitischer Verwerfungen (© Vitesco Technologies)



BILD 3 EMR4-Achsantriebsplattform mit den Rotoroptionen PSM und EESM (© Vitesco Technologies)

Rotor kann das Rotorfeld bei hohen Drehzahlen reduziert werden, um so die induzierte Gegenspannung (Back Electromotive Force, Back-EMF) über die Erregerwicklung einzustellen. Mit dieser Möglichkeit lässt sich bei hohen Drehzahlen ein höheres Drehmoment als bei PSM erreichen. Ähnlich ist es bei der Leistung. Zwar hat die PSM einen kleinen Vorteil in der Spitze, da-

für bietet die EESM ein nahezu konstantes Leistungsangebot selbst bei hohen Drehzahlen. Das wirkt sich insbesondere auf die Elastizität des Fahrzeugs im Geschwindigkeitsbereich von 80 bis 120 km/h positiv aus. Gerade Forderungen der OEMs nach konstant bleibenden Leistungen bei höheren Drehzahlen lassen sich daher mit EESM eher erfüllen. Bei der PSM muss dagegen wegen ihres

Leistungsabfalls im Feldschwächebereich die Maximalleistung über dem ursprünglich geforderten Nennwert liegen, was Kostennachteile mit sich bringt.

Bei der Dauerleistung hat die PSM leichte Vorteile, da hier die Rotorverluste geringer sind. Deshalb beginnt bei EESMs der Bereich früher, ab dem über die Wassermantelkühlung hinausgehende, leistungsfähige Kühlkonzepte nachgedacht werden muss. Bei EESM ist dies ab etwa 50 kW Dauerleistung der Fall, bei PSM ab etwa 70 kW. Als Lösung bietet sich beispielsweise eine aktive Ölkühlung des Rotors an.

Im realen Fahrbetrieb spielen einzelne Spitzenwerte keine so große Rolle, hier sind in den Lastenheften der Fahrzeughersteller durch konkrete Betriebspunkte definierte Drehzahlbänder wichtiger.

BILD 6 zeigt einen Vergleich zwischen den beiden Rotoroptionen der EMR4 im Hinblick auf die Verläufe von Drehmoment und Leistung. Der Grafik liegt zugrunde, dass weitere Rotoroptimierungen bei gleicher Aktivlänge und statorseitig gleicher Erregung das Magnetfeld der EESM stärken werden, wodurch das Drehmoment über PSM-Niveau ansteigt. Damit eröffnet sich das Potenzial, die Aktivlänge des EESM-Rotors zu verringern, um so wieder Leistungsparität mit der PSM einzustellen, gleichzeitig jedoch 10 % an Motoraktivmaterialkosten aus der EESM zu nehmen. Dieses Entwicklungsziel soll in der nächsten Musterstufe umgesetzt und in Tests nachgewiesen werden.

Alles in allem ist im unteren Drehzahlbereich insbesondere bei mittleren und hohen Lasten und Drehmomenten die PSM effizienter, weil sie keinen Erregerstrom benötigt und damit keine Stromwärmeverluste im Rotor entstehen. Die EESM ist dagegen im mittleren Drehzahlbereich bei sehr niedrigen Lasten und Drehmomenten unter 15 Nm effizienter. Dies setzt sich mit steigender Drehzahl auch bei höheren Drehmomenten fort. Da im WLTC und bei zunehmenden Langstreckenfahrten häufig Leistung bei höheren Drehzahlen gefordert wird, ist die EESM für dieses Fahrprofil überlegen.

Durch eine optimal gewählte, variable Rotorerregung werden die zusätzlichen Verluste in der Erregerwicklung durch die deutlich reduzierten Ummagnetisierungsverluste im Stator der EESM überkompensiert. Dadurch, dass diese

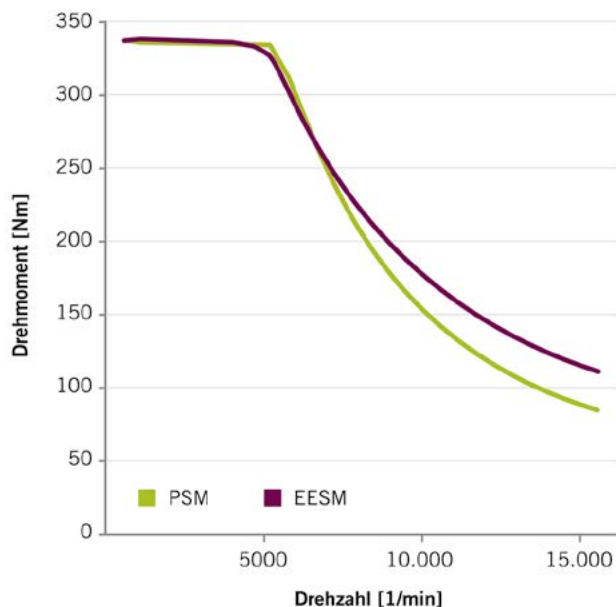


BILD 4 Drehmomentverlauf von PSM und EESM als Simulation in einem D-Segment-Fahrzeug (© Vitesco Technologies)

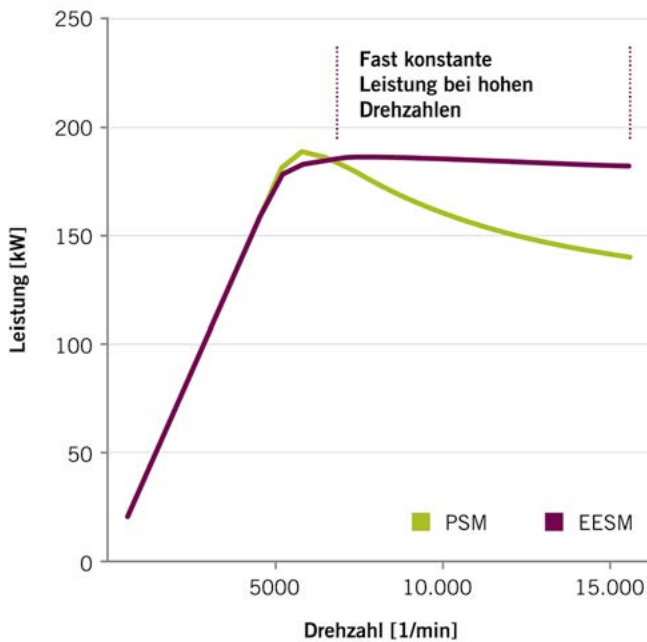


BILD 5 Leistungskurve von PSM und EESM als Simulation in einem D-Segment-Fahrzeug (© Vitesco Technologies)

deren Ursachen zugesprochen, was eine Effizienzsteigerung behindert. Im WLTC ist die EESM in Summe besser, sobald man beide Effekte berücksichtigt. Bei Fahrprofilen mit größeren Landstraßen- oder Autobahnanteilen bietet sie tendenziell höhere Effizienzvorteile.

ENERGIEÜBERTRAGUNG AUF DEN EESM-ROTOR

Grundsätzlich gibt es zwei Wege, um den Erregerstrom auf die rotierende Welle zu übertragen: kontaktlos durch induktive Einkopplung oder konduktiv mit Bürstenkontakten und Schleifringen auf der Welle. Vitesco Technologies hat sich aufgrund der praktischen Erfahrungen mit einem optimierten Bürstensystem für die konduktive Übertragung entschieden. Diese hat sich schon bei den ersten beiden EMR-Generationen als Lösung für die gesamte Nutzungsdauer des Antriebs bewährt (300.000 km/15 Jahre). Verschleiß und Robustheit des Übertragungselements Bürste wurden dazu in Dauerlaufversuchen durch Optimierung der Materialpaarung, Anpresskraft und weiterer Parameter für die geforderte Lebensdauer bestätigt. Zudem ist ein Bürstensystem fähig, einen Boostbetrieb mit kurzzeitig erhöhtem Erregerstrom zu übertragen, während ein induktives System stets nur den definierten Maximalstrom übertragen kann.

Ein ausgereiftes Bürstensystem hat den Vorteil, ein erhebliches Maß an

Verluste überproportional frequenz- beziehungsweise drehzahlabhängig sind, kann die EESM den Vorteil der variablen Rotorerregung hin zu höheren Drehzahlen immer effektiver ausspielen und bleibt auch bei höheren Drehmomenten effizienter als die PSM, **BILD 7**.

Darüber hinaus zeigen Messungen, dass die harmonischen Verluste einer EESM, die durch den Betrieb der Maschine am Pulswechselrichter hervorgerufen werden, geringer ausfallen als die harmonischen Verluste einer PSM

mit gleicher Stator-Windungszahl und gleicher Aktivlänge. Dieser Effekt wirkt sich stark auf die Effizienz aus, weil die Bedeutung der harmonischen Verluste für die Gesamtverluste eines Elektroantriebs höher ist als bisher angenommen. Messergebnisse zeigen, dass die vom gepulsten Inverterstrom verursachten harmonischen Verluste mehr als ein Viertel der Gesamtverluste im WLTC bei einem PSM-Aggregat ausmachen können. Da harmonische Verluste schwer zu messen sind, wird dieser Verlustanteil häufig an-

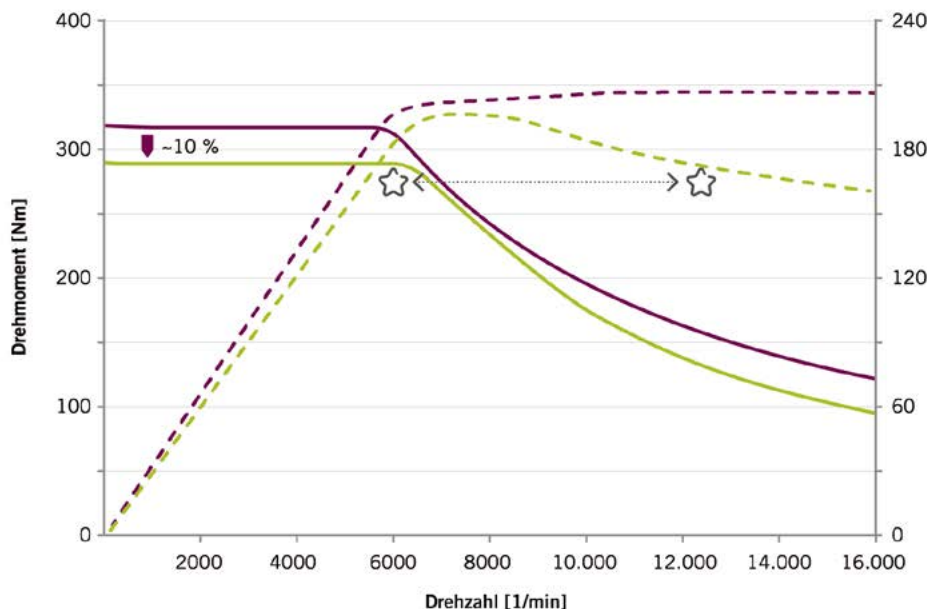


BILD 6 Vergleich der Kurven für Drehmoment und Leistung im Band zwischen relevanten Betriebspunkten (© Vitesco Technologies)

EMR4 EESM
120 mm, w = 16,
I_{ph} = 600 A, 360 V

PSM
120 mm, w = 16,
I_{ph} = 600 A, 360 V

— Drehmoment EESM

— Drehmoment PSM

- - - Leistung EESM

- - - Leistung PSM

☆ Vom OEM definierte Betriebspunkte

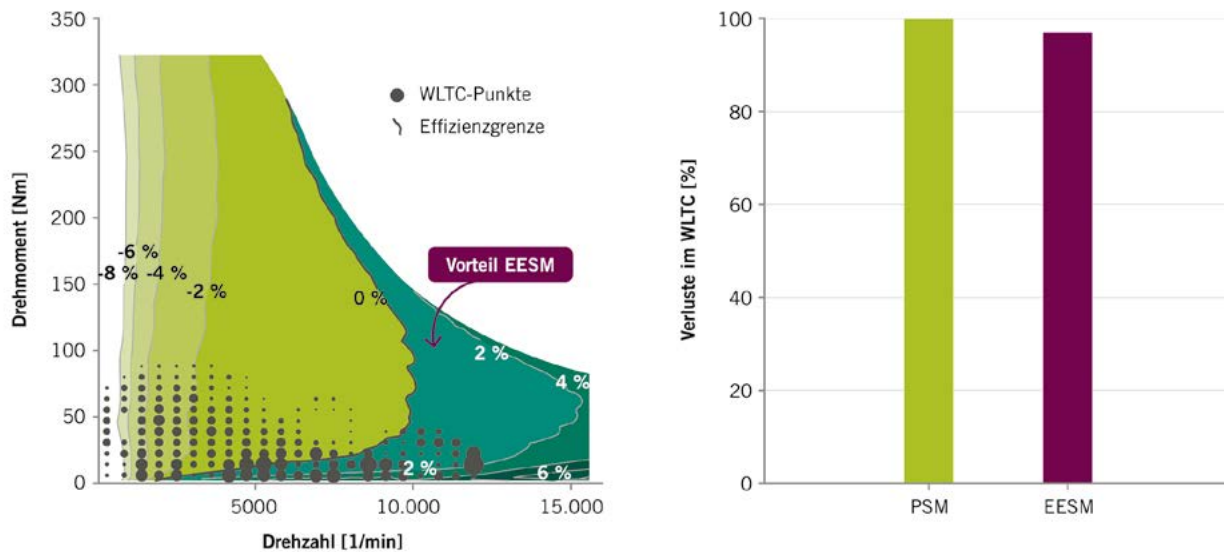


BILD 7 Effizienz und Verluste von PSM und EESM im Vergleich (links) und kumulierter Energieverbrauch von PSM und EESM im WLTC (rechts)
(© Vitesco Technologies)

Komplexität und damit Kosten aus dem EESM-Antrieb zu nehmen. Ein induktives Übertragungssystem beinhaltet unter anderem einen rotierenden Transformator und einen rotierenden Gleichrichter, um die Erregerwicklung mit Gleichstrom zu versorgen. Diese Bauteile müssen für entsprechende Fliehkräfte bei der Maximaldrehzahl des Rotors ausgelegt sein, sodass auf dem aktuellen Stand der Entwicklung ein induktives Übertragungssystem geschätzt um den Faktor 3 teurer ist als eine Lösung mit Kontaktbürsten. **BILD 8** zeigt das EESM-Übertragungssystem

des EMR2 mit zwei Bürstenringen. Im unteren Teil ist die daraus resultierende Vereinfachung des Gesamtsystems deutlich sichtbar. Neben der gesenkten Komplexität bietet das Bürstensystem Wirkungsgradvorteile bei steigenden Erregerströmen, weil die induktive Übertragung hoher Erregerströme über den Luftspalt höhere Verluste mit sich bringt. Auch deshalb fiel die Entscheidung erneut für ein Bürstensystem. Grundsätzlich bleibt festhalten, dass beide Systeme prinzipielle Vorteile haben, bei induktiver Erregerstromübertragung jedoch noch deut-

licher Optimierungsbedarf besteht, um tatsächlich Vorteile gegenüber der Bürste zu bieten.

KOSTENVERGLEICH EESM UND PSM

Die unterschiedliche Charakteristik von PSM und EESM im Hinblick auf Betriebsbereiche (Drehzahl/Drehmoment) wirkt sich auch auf die Gesamtkosten für einen Achsantrieb aus. Grundsätzlich gilt: Je leistungsstärker die Maschine sein muss, desto höher werden die Systemkosten einer PSM, weil die Masse der teuren Permanentmagnete mit der geforderten Leistung steigt. Ab einer gewissen Leistungsklasse kompensiert dieser Effekt die Zusatzkosten, die bei der EESM für die zusätzliche Erregerstufe im Inverter, das Übertragungssystem sowie den aufwendiger zu produzierenden Rotor anfallen.

Beim heutigen Stand der Entwicklung kann man davon ausgehen, dass die EESM bei etwa 150 kW Preisparität zur PSM erreicht. Bei höheren Leistungen wird die EESM günstiger, da sie nach heutiger Einschätzung noch Kostenreduktionspotenziale von etwa 8 bis 12 % bietet. Im Jahr 2024 wird die Preisparität zwischen EESM und PSM für den Leistungsbereich um 120 kW erwartet. Realistischerweise muss man jedoch sagen, dass diese Preisparität zwischen beiden Rotorty-



BILD 8 EESM-Übertragungssystem mit wartungsfreien Bürstenringen
(© Vitesco Technologies)

pen immer auch eine Momentaufnahme ist, da sich die extrem schwankenden Preise für Seltene Erden vor allem bei leistungsstarken elektrischen Maschinen erheblich auswirken, **BILD 9**.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der neue EESM-Rotor von Vitesco Technologies ist eine zusätzliche Option in der modularen, skalierbaren Achsantriebsplattform EMR4. Er kann nahezu nach dem Plug-and-Play-Prinzip in der bestehenden mechanischen Architektur der EMR4 verwendet werden. Er passt in die Aufnahme des Achsantriebs und erfordert lediglich wegen der Länge auf der Längsachse eine Gehäusevariante. Die Erregerstufe für den Rotor wird im Inverter integriert. Das Bürstensystem überträgt den Erregerstrom über die Rotorwelle in die Rotorwicklung. Da der Rotor ohne Magnete funktioniert, entfallen die Kosten für NdPr und schwere Seltene Erden wie Dysprosium oder Terbium sowie der mögliche Einfluss der Preisvolatilität.

Wegen des steuerbaren Magnetfelds im Rotor hat die EESM gegenüber der PSM Vorteile bei hohen Drehzahlen und hohem Drehmoment. Außerdem weist die EESM weniger harmonische Verluste auf, die bei der PSM im WLTC bis zu einem Viertel und mehr der Gesamtverluste ausmachen können. Zu einem späteren Zeitpunkt ist ein fokussierter Bericht über die Ursachen dieses Effektes geplant.

Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung hat die EESM-Option für die EMR4 im mittleren Leistungsbereich nahezu Leistungsparität mit der PSM erreicht. De facto ist sie der PSM jedoch im Hinblick auf den wachsenden Langstreckenanteil und höhere Lasten in den entsprechenden Betriebsbändern überlegen. Entscheidend für die Bewertung sind hier die Arbeitspunkte der Fahrzeughersteller, da einzelne Spitzenwerte weniger aussagekräftig sind als die relevanten Betriebsbereiche zwischen Arbeitseckpunk-

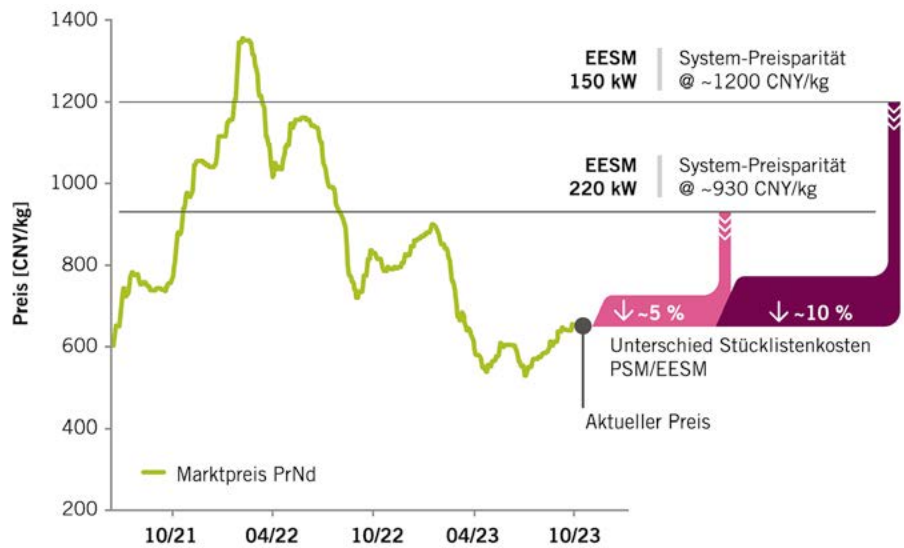


BILD 9 Einfluss der Preise für NdPr (in Renminbi, CNY) auf die Preisparität zwischen PSM und EESM (© Vitesco Technologies)

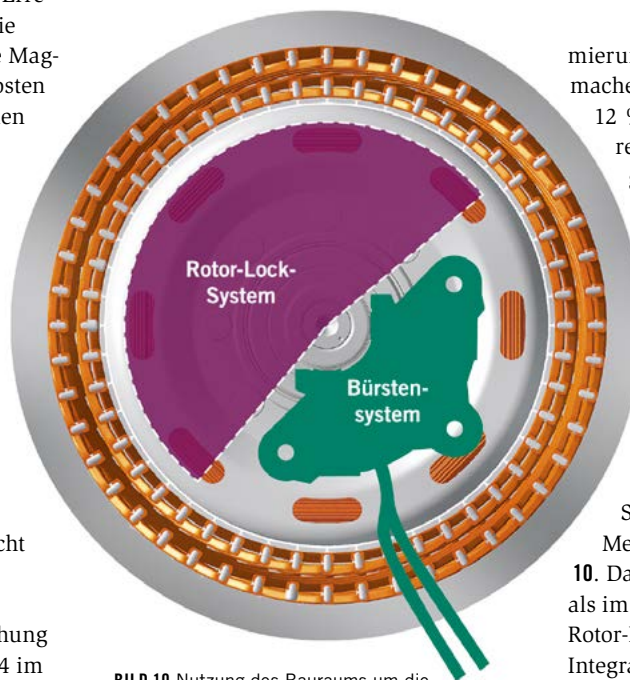


BILD 10 Nutzung des Bauraums um die Bürsten für die Integration eines Rotor-Lock-Systems anstelle einer Parking-Lock-Mechanik im Getriebe (© Vitesco Technologies)

mierung des Rotors kompakter zu machen, so ließen sich auch 8 bis 12 % an Materialkosten reduzieren. Damit entfiel bereits ein großer Teil der Zusatzkosten für eine EESM gegenüber einer PSM. Für die Wahl zwischen den Plattformoptionen PSM und EESM sind technische und kommerzielle Vorteile in Kombination entscheidend. Künftig ließe sich der Bauraum um die Bürsten beispielsweise für die Integration eines Rotor-Lock-Systems anstelle der Parking-Lock-Mechanik im Getriebe nutzen, **BILD 10**. Da die Kräfte im Rotor geringer sind als im Getriebe, lässt sich ein kompakter Rotor-Lock unterbringen. Eine solche Integration bringt Bauraumvorteile an anderer Stelle, was die Zusatzlänge für das Bürstensystem nahezu ausgleichen würde.

LITERATURHINWEIS

[1] Mühlberg, G.; Daun, N.; Haakvoort, H.: Series Concept of an Externally Excited Synchronous Machine as a Magnet-Free Option in the integrated E-Axis Platform EMR4. 31. Aachener Kolloquium, Aachen, 2022

ten. Die EESM kann bei hoher Effizienz einen breiteren Drehzahl- und Drehmomentbereich abdecken als die PSM.

Im Hinblick auf die Kosten hat die EESM noch Potenzial. Gelingt es wie erwartet, die Maschine durch Opti-

IMPRESSUM

Sonderausgabe 2024 in Kooperation mit Vitesco Technologies GmbH, Postfach 200230, 93061 Regensburg; Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Postfach 1546, 65173 Wiesbaden, Amtsgericht Wiesbaden, HRB 9754, USt-IdNr. DE81148419

GESCHÄFTSFÜHRER:

Stefanie Burgmaier | Andreas Funk | Joachim Krieger

PROJEKTMANAGEMENT: Anja Trabusch

TITELBILD: © Vitesco Technologies

IHRE ZUKUNFT IST UNSER ANTRIEB.

UNSER ZIEL IST EINE SAUBERE
UND NACHHALTIGE MOBILITÄT.

Unsere Antriebe sind Wegbereiter nachhaltiger Mobilität.

Ob E-Auto, Hybrid oder elektrifizierter Verbrenner:

Vitesco Technologies liefert moderne Antriebstechnik
für saubere und effiziente Fahrzeuge.

Antrieb für Generationen – Vitesco Technologies.

