



# Steigerung der Leistungsdichte und des Wirkungsgrades von Straßenbahntrieben durch den Einsatz hochdrehender Maschinen

Leonie Heckeles  · Markus Tesar  · Jakob Igelspacher · Jürgen Brunner · Peter Gratzfeld

Eingegangen: 29. November 2021 / Angenommen: 14. Februar 2022  
© Der/die Autor(en) 2022

**Zusammenfassung** Der Einsatz einer hochdrehenden Antriebsmaschine in einem Straßenbahnfahrzeug ermöglicht die Steigerung des Wirkungsgrades und der Leistungsdichte. Aus einem Referenzsystem werden die Anforderungen an den hochdrehenden Motor abgeleitet. Das Referenzsystem bildet ein Bestandsstraßenbahnfahrzeug ab, welches in Zürich eingesetzt wird. Mittels einer systematischen Technologieauswahl werden verschiedene Antriebskonzepte hinsichtlich ihrer Eignung für die Anwendung verglichen. Dabei werden verschiedene Maschinenkonzepte, Konstruktionslösungen sowie Kühlkonzepte betrachtet. Ausgewählt wird eine Asynchronmaschine mit einer Maximaldrehzahl von  $20.000 \text{ min}^{-1}$  und einer S1-Dauerleistung von 75 kW. Die Asynchronmaschine ist als Innenläufermaschine mit Flüssigkeitskühlung ausgeführt, basierend auf dem Anforderungskatalog. Anschließend wird ein Vergleich mit dem Referenzantrieb durchgeführt und zum Schluss ein Prototyp gefertigt.

**Schlüsselwörter** Straßenbahnantrieb · Hochdrehende Maschine · Asynchronmaschine · Wirkungsgrad · Leistungsdichte

## Increasing the power density and efficiency of light rail vehicle drives through the use of high-speed machines

**Abstract** The use of a high-speed machine in a light rail vehicle enables an increase in efficiency and power density. The requirements for the high-speed machine are derived from a reference system. This reference system represents an existing light rail vehicle used in Zurich. By means of a systematic technology selection, different drive concepts are compared with respect to their suitability for the application. Various machine concepts, design solutions, and cooling concepts are taken into account. An induction machine with a maximum speed of 20,000 rpm and an S1 output of 75 kW is selected. The induction machine is designed as an inner rotor machine with liquid cooling, based on the catalog of requirements. Then, a comparison with the reference drive is drawn, and, finally, a prototype is manufactured.

**Keywords** Light rail vehicle drive · High-speed machine · Induction machine · Efficiency · Power density

## 1 Einleitung und Problemstellung

Schienenfahrzeugbetreiber sind an Fahrzeugen mit niedrigen Lebenszykluskosten (LCC) interessiert. Diese werden unter anderem durch den Energieverbrauch und gewichtsabhängige Trassengebühren bestimmt. Eine Modifizierung des Antriebsstrangs erlaubt es, beide Parameter gleichzeitig zu verbessern.

Eine Möglichkeit dazu ist der Einsatz weiter- und neuentwickelter Komponenten, welche die Masse des Antriebsstrangs reduzieren und dessen Wirkungsgrad erhöhen.

L. Heckeles (✉) · M. Tesar · P. Gratzfeld  
Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Bahnsystemtechnik,  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Rintheimer  
Querallee 2, 76131 Karlsruhe, Deutschland  
leonie.heckele@kit.edu

J. Igelspacher · J. Brunner  
VINCORION, JENOPTIK Power Systems GmbH, Altenstadt,  
Deutschland

Durch den Einsatz leichterer Komponenten wird die Masse des Fahrzeuges verringert, was einen geringeren Energieverbrauch erwarten lässt. Zusätzlich können diese neuen Komponenten mit neuartigen, energieeffizienten Technologien ausgerüstet sein, wodurch der Energieverbrauch weiter gesenkt wird.

Der Lösungsansatz zur Massenreduktion und Energieeffizienzsteigerung im vom deutschen Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projekt MTAB (Modellierung und Test neuartiger, hocheffizienter und hochintegrierter Antriebssysteme für Bahnanwendungen) ist eine Erhöhung der verwendeten Drehzahl des Antriebsmotors [1]. Ein solcher Ansatz wird auch bei Projekten im Automobilbereich durchgeführt [2] und mit geringeren Drehzahlen auch bereits im Bahnbereich untersucht [3–5].

Die Scheinleistung ist zum Essonschen Ausnutzungsfaktor, der Drehzahl und dem Volumen proportional.

$$S \approx C \cdot d_{Si}^2 \cdot l_e \cdot n. \quad (1)$$

$$V \sim d_{Si}^2 \cdot l_e \quad (2)$$

Mit:

- $S$  Scheinleistung
- $C$  Essonscher Ausnutzungsfaktor
- $d_{Si}$  Bohrungsdurchmesser
- $l_e$  Ideelle Eisenlänge
- $n$  Drehzahl [6].

Damit ergibt sich für eine gleiche Scheinleistung und gleiche Ausnutzung bei einer Erhöhung der Betriebsdrehzahl eine Reduzierung des Aktivvolumens des Motors [6].

## 2 Methodik

Die elektrische Maschine wird für ein bestehendes Fahrzeug, das sogenannte Referenzfahrzeug, ausgelegt. Die Anforderungen der DIN EN 50155 werden

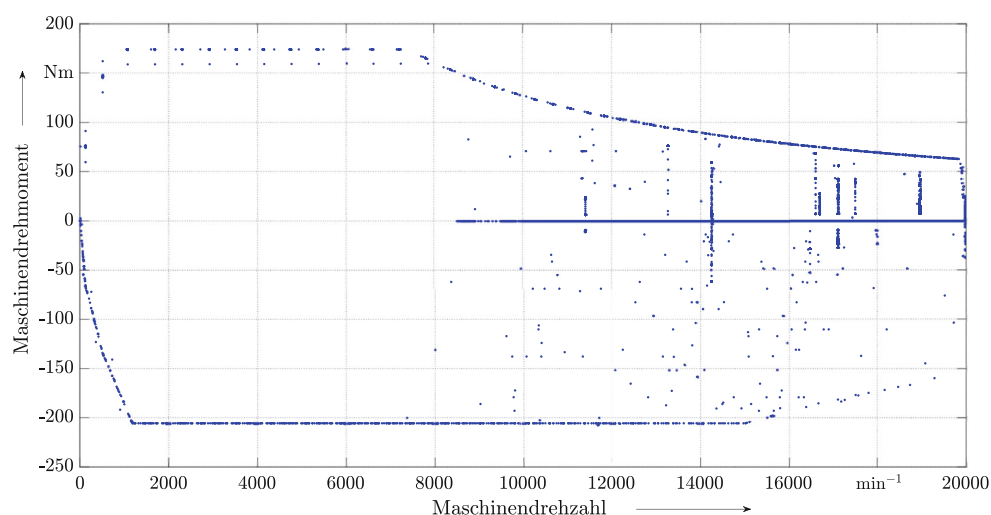
weitestgehend berücksichtigt, eine nachgewiesene Bahntauglichkeit bleibt der Entwicklung einer Serienlösung vorbehalten. Damit wird eine Vergleichbarkeit zwischen den neu entwickelten Komponenten und den im Referenzfahrzeug verbauten Komponenten gewährleistet. Das Referenzfahrzeug ist ein Straßenbahnfahrzeug der Flexity-Baureihe von Alstom (ehemals Bombardier Transportation). Das Referenzsystem hat eine S1-Dauerleistung von 110 kW pro angetriebene Achse, sowie eine maximale Drehzahl von  $4400 \text{ min}^{-1}$  und ein maximales Drehmoment von  $924 \text{ Nm}$  beim Fahren und  $-1269 \text{ Nm}$  beim Bremsen. Die Maximalgeschwindigkeit ist  $60 \text{ km/h}$  und die maximale Beschleunigung  $0,9 \text{ m/s}^2$  [7].

Das neuartige Antriebskonzept soll die gleichen Randbedingungen erfüllen. Antriebe im Straßenbahnbereich haben aktuell Drehzahlen um  $4500$  bis  $6000 \text{ min}^{-1}$  [8]. Um die Masse des Elektromotors zu halbieren, wird eine Erhöhung der Drehzahl auf  $20.000 \text{ min}^{-1}$  festgelegt. Die Drehmoment-Drehzahlanforderung eines Fahrzyklus für eine maximale Drehzahl von  $20.000 \text{ min}^{-1}$  bei  $70 \text{ km/h}$  ist in Abb. 1 zu sehen. Die maximale Leistung liegt bei  $135 \text{ kW}$  im Fahren und  $-335 \text{ kW}$  im Bremsen. Die S1-Dauerleistung muss nicht auf die maximale Leistung ausgelegt werden. Aus den Häufigkeiten und Dauern der auftretenden Leistungen wird abgeleitet, dass eine S1-Dauerleistung von  $75 \text{ kW}$  ausreichend ist.

Um auf Basis der Anforderungen ein passendes Design für den elektrischen Antrieb zu finden, wird dieser in mehrere Funktionsblöcke unterteilt. In den einzelnen Funktionsblöcken werden in Kombination mit den Anforderungen die Hauptmerkmale wie z. B. Stator definiert, die wiederum in Untermerkmale eingeteilt werden. In Abb. 2 sind die einzelnen Hauptfunktionsblöcke mit jeweils beispielhaften Unterfunktionsblöcken dargestellt.

Die Entwicklung des Antriebs wird systematisch anhand eines von VDI 2221 abgeleiteten Prozesses durchgeführt [9]. Um die Übersichtlichkeit zu

**Abb. 1** Drehmoment-Drehzahlanforderung eines Fahrzyklus



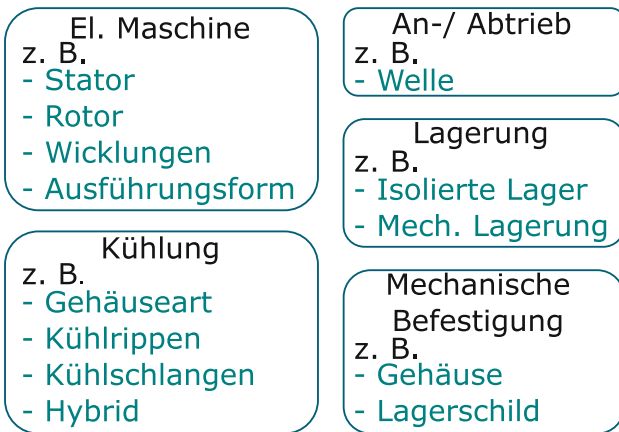


Abb. 2 Übersicht über die Funktionsstruktur eines elektrischen Antriebs

wahren, sind in Abb. 2 die Schnittstellen zwischen den einzelnen Funktionsblöcken sowie nach außen nicht dargestellt. Als Beispiel einer Schnittstelle seien die elektromagnetischen Verluste genannt, die im Funktionsblock *El. Maschine* entstehen und im Block *Kühlung* abgeführt werden.

Die Haupt- und Unterfunktionen werden in einem morphologischen Kasten dargestellt. Der morphologische Kasten ermöglicht das Erarbeiten von Gesamtlösungen durch systematische Kombination [10]. Für jedes Untermerkmal werden die verschiedenen Realisierungsmöglichkeiten nach Stand der Technik aufgelistet. Abb. 3 zeigt einen Ausschnitt aus diesem morphologischen Kasten.

Ein Hauptmerkmal der Funktion *El. Maschine* ist die Ausführungsform, welche als Innen-, als Außen- oder als Scheibenläufer realisiert werden kann. Als Beispiel eines Untermerkmals sei die Wicklung genannt, die unter anderem als verteilte, konzentrier-

te, Hairpin- oder Durchziehwicklung realisiert werden kann. Dieser morphologische Kasten dient dann als Basis, um ein geeignetes Design zur Erfüllung der Anforderungen zu finden.

Hierzu werden alle im Kasten aufgeführten Ausprägungen hinsichtlich mehrerer Kriterien bewertet. Jede Technologie wird nach den fünf Kriterien Kosten, Masse, Volumen, Robustheit und elektrische Spannungsfestigkeit beurteilt. 5 Punkte werden als beste, 3 Punkte als mittlere und ein Punkt als schlechteste Bewertung gegeben. Die Bewertung der jeweiligen Technologie ergibt sich aus der Summe der Bewertungen der einzelnen Kriterien.

Aus der Kombination der am besten bewerteten Technologien für die einzelnen Haupt- und Untermerkmale werden dann zwei mögliche Realisierungsoptionen für einen solchen Antrieb generiert und deren Gesamtbewertung verglichen. Um eine bessere Vergleichbarkeit der Lösungen zu erreichen, werden die zwei bewerteten Lösungen genauer ausgearbeitet. Es handelt sich hierbei um ein Konzept auf Basis einer Asynchronmaschine (ASM) und ein Konzept auf Basis einer permanenterregten Synchronmaschine (PMSM). Für beide Lösungen werden elektromagnetische Entwürfe und Systemsimulationen durchgeführt. Diese dienen als Basis dafür, auf Gesamtsystemebene die passende Auswahl zu treffen.

### 3 Elektromagnetischer Entwurf beider Lösungsansätze

Für beide Lösungsansätze wird ein elektromagnetischer Entwurf ausgearbeitet. Diese Entwürfe orientieren sich zum einen an der definierten S1-Dauerleistung und zum anderen an den Maximalanforderungen an den Antrieb sowie dem Auslegungszyklus. In

Funktion	Hauptmerkmale	Untermerkmale	Ausprägungen							
			1	2	3	4	5	6	7	
E. Maschine	Ausführungsform		Innenläufer	Außenläufer	Scheibenläufer					
		Technologie	Asynchronmaschine	el. Synchronmaschine	PM-Synchronmaschine	Reluktanzmaschine	geschaltete Reluktanzmaschine	Transversalfluss	Unipolarmaschine	
	Stator	Wicklung	verteilt	konzentriert	Hairpin	Durchziehwicklung				
		Wickeldraht	Runddraht	Flachkupfer	Litzendraht	Runddrahtrohllleiter				
		Drahtisolation	Doppellack	Lack mit Glimmer (integriert)	Glimmer-Kapton (umspannen)					
		Eisenkörper	Pulver	Elektroblech 0,35	Elektroblech 0,2					
	Paketierung	Backlack	Fingerpressscheiben	Verschweißen	Kleben	Klammern				
		Polpaarzahl	1 (verteilte Wicklung)	2 (verteilte Wicklung)	viele (bei konzentrierter Wicklung)					
	Kabelauführung	Kabelschwanz	offen	Ausführung Kupfer geschlossen	Steckverbindung	Klemmkasten				
		Nutgeometrie								
Rotor	Eisenkörper	Pulver	Elektroblech 0,35	Elektroblech 0,2	massiv mit Einstiche	hochfestes Blech				
	Paketierung	Backlack	Fingerpressscheiben	Verschweißen	Kleben	Klammern	Zuganker	Korsett		
	Polpaarzahl	s.o.								
	Wicklung	konzentrisch	verteilt	Drehfeldwicklung	Käfigwicklung	keine				
	Wickeldraht	Flachkupfer								
	PM-Geometrie	vergraben (V, U oder flach)	Oberfläche, rechteckig	Oberfläche, rund	Oberfläche, geblecht (Stärke: 2mm)					
	PM-Material	NdFeB	SmCo	Kunststoffmagnet						
	Käfigmaterial	Kupferguss	Kupferstab	Aluminium	Messing					
Käfigpaketierung	Korsett	Ring								
	Geber	Polradlagegeber	Drehzahlgeber	Drehrichtungserkennung	Geberlos/SM	Geberlos/ASM				
Kühlung	Kühlmedium		Wasser	Öl	Luft					

Abb. 3 Ausschnitt des morphologischen Kastens für die Technologieauswahl

**Abb. 4** **a** Querschnitt des Entwurfs für die PMSM, **b** Querschnitt des Entwurfs für die ASM

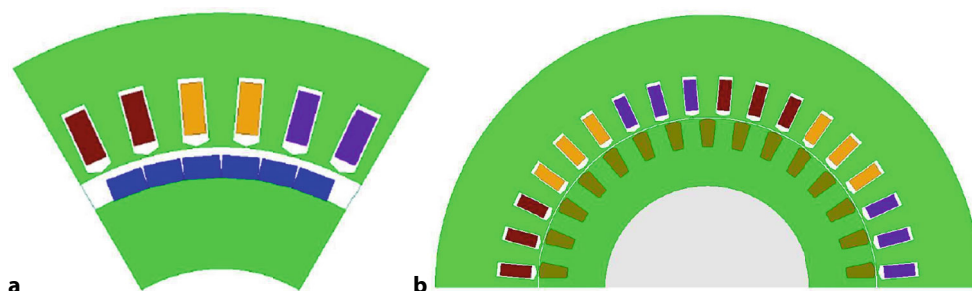


Abb. 4a ist der Querschnitt des Entwurfs der PMSM dargestellt, in Abb. 4b der, der ASM.

Beide Entwürfe werden im Stator mit einer Hairpinwicklung mit geschlossenen Nuten ausgeführt, um die Verluste durch Oberwellen im Rotor zu reduzieren. Die PMSM wird mit einem 6-poligen Design ausgeführt, wobei der Rotor über Oberflächenmagnete verfügt, die dann durch eine entsprechende Bandage gesichert werden. Die ASM verfügt über 4 Pole. Der Kurzschlusskäfig des Rotors besteht aus hochfestem Kupfer und ist in geschlossenen Nuten untergebracht, wodurch keine zusätzliche Sicherung gegen hohe Fliehkräfte erforderlich ist. Die geschlossenen Nuten haben allerdings einen höheren Blindstrom im Stator durch Streufelder zur Folge. Die Lagerung wird mit Rillenkugellagern realisiert.

Für beide Entwürfe werden mit dem Simulationsprogramm *Maxwell 2D* verschiedene charakteristische Lastpunkte berechnet und ausgewertet. Tab. 1 zeigt die Ergebnisse dieser Simulationen.

Die simulierten Arbeitspunkte sind möglichst ähnlich gewählt. Die einzelnen Verlustanteile sind als Gesamtverluste zusammengefasst. Darin sind die Eisenverluste von Stator und Rotor, die Verluste in der Statorwicklung (bei PMSM für 160 °C und bei ASM für 185 °C), die Verluste in den Magneten bei der PMSM bei 100 °C und die Verluste im Kurzschlusskäfig für 225 °C sowie die Reibungsverluste enthalten.

Typisch für permanenterrregte Synchronmaschinen ist der Wirkungsgrad des Antriebs etwas höher. Da der Unterschied aber zum einen maximal 2,7 Prozentpunkte ist und zum anderen sich vor allem bei solchen Betriebspunkten bemerkbar macht, die we-

niger häufig auftreten, überwiegen bei der Entscheidung, welcher Entwurf im Gesamtsystem verwirklicht werden soll, Sicherheitsaspekte. So wird die mögliche Gegenspannung einer permanenterrregten Synchronmaschine bei Ausfall des Umrichters als Entscheidung für die Asynchronmaschine gesehen, da sonst die Halbleitermodule eine deutlich höhere Sperrspannung gewährleisten oder andere Schutzmechanismen integriert werden müssen.

Zur Absicherung des Entwurfs erfolgt ebenfalls eine thermische Betrachtung des Antriebs über den oben gezeigten Fahrzyklus. Dabei wird geklärt, ob eine einfache Flüssigkeitsmantelkühlung ausreichend ist, oder eine aktive Rotorkühlung umgesetzt werden muss. In Abb. 5 sind die Temperaturverläufe der wichtigsten Baugruppen dargestellt.

Hierbei wird im heißesten Punkt der Statorwicklung eine Temperatur von 162 °C erreicht. Der Rotor ist mit einer maximalen Temperatur von 149 °C ebenfalls unkritisch, weswegen auf eine aktive Rotorkühlung verzichtet werden kann. Die Lager erreichen über das gesamte Bauteil eine maximale Temperatur von 121 °C.

Diese Auslegung dient als Basis zur Konstruktion eines Funktionsmusters, mit dem die theoretischen Werte und Simulationen am Prüfstand nachgewiesen und überprüft werden. Abb. 6 zeigt eine 3D-Darstellung des Funktionsmusters. Bei einer maximalen Drehzahl von 20.000 min<sup>-1</sup> erreicht der Rotor eine Umfangsgeschwindigkeit von 129,9 m/s.

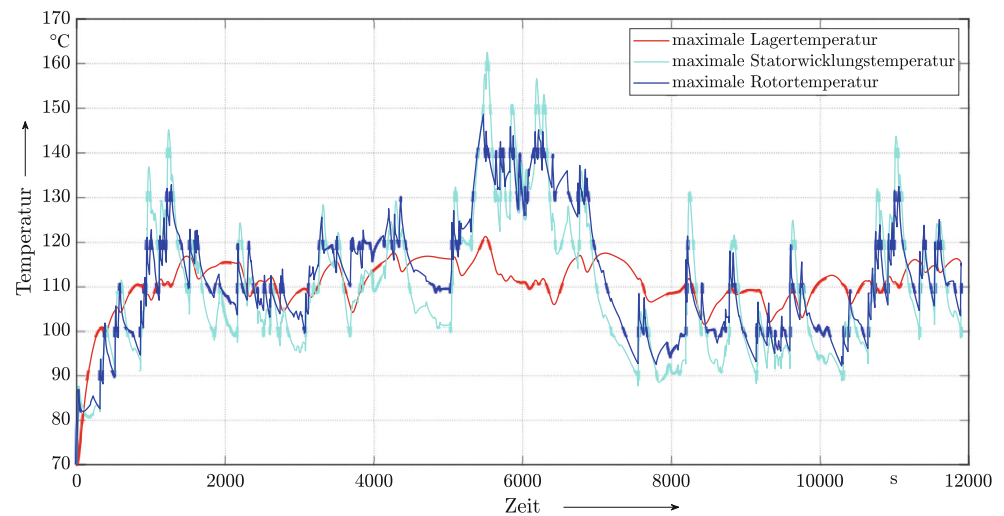
Als Besonderheit der Konstruktion sind die axial angebrachten Öffnungen zu erwähnen, die in dieser Darstellung durch Schrauben verschlossen sind. Diese Öffnungen dienen dazu, bei einer eventuellen Über-

**Tab. 1** Auswertung in verschiedenen Lastpunkten für ASM und PMSM

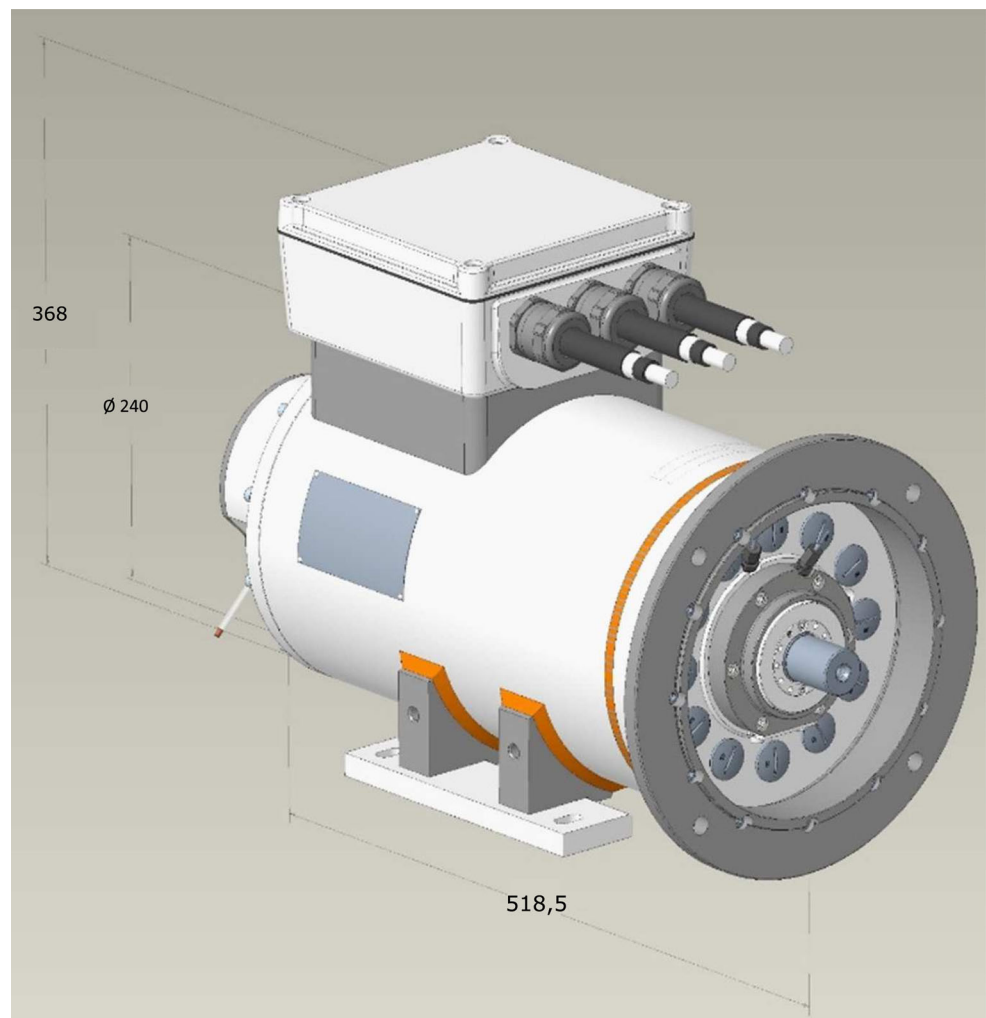
Permanenterrregte Synchronmaschine						
Arbeitspunkt	Leistung in kW	Drehzahl in min <sup>-1</sup>	Spannung (verkettet) in V <sub>AC</sub>	Frequenz in Hz	Gesamtverluste in kW	Wirkungsgrad in %
AP 1	75	15.000	500	750	2,4	96,9
AP 2	170	15.000	500	750	3,7	97,9
AP 3	-430	15.000	600	750	13,2	97,0
AP 4	170	20.000	500	1000	4,1	97,6
Asynchronmaschine mit Kurzschlussläufer						
Arbeitspunkt	Leistung in kW	Drehzahl in min <sup>-1</sup>	Spannung (verkettet) in V <sub>AC</sub>	Frequenz in Hz	Gesamtverluste in kW	Wirkungsgrad in %
AP 1	76	15.000	500	503	2,8	96,4
AP 2	170	15.000	500	750	7,1	96,0
AP 3	-420	15.000	600	750	24,0	94,6
AP 4	170	20.000	500	1000	8,9	94,9



**Abb. 5** Temperaturverläufe der Baugruppen über der Zeit



**Abb. 6** 3D-Darstellung des Funktionsmusters der ASM



hitzung des Motorinnenraums auf dem Prüfplatz Luft zur Kühlung durch die Maschine zu leiten. Dadurch können, sollte die thermische Simulation zu ungenau sein, zumindest die elektromagnetischen und mechanischen Prüfungen des Antriebs vollständig durchgeführt werden. Die Rotorbleche sind aus herkömm-

lichem Elektroblech. Nach Abschluss der Konstruktion werden komplette Wirkungsgradkennfelder berechnet, um eine Simulation der Fahrzyklen zu ermöglichen. Dabei kommt es zu geringen Abweichungen zum ursprünglichen Entwurf, die durch Anpassungen in der Konstruktion zu erklären sind.

### 4 Ergebnis

Das Ziel des Projektes MTAB ist ein hocheffizienter Antriebsstrang. Kennzahlen für die Effizienz eines Antriebs sind sein Wirkungsgrad und seine Leistungsdichte.

Der Wirkungsgrad  $\eta$  ist der Quotient aus der abgeführten Leistung  $P_{ab}$  und der zugeführten Leistung  $P_{zu}$ . Beim Fahren ist die mechanischen Antriebsleistung  $P_{mech}$  die abgeführte Leistung und die elektrische

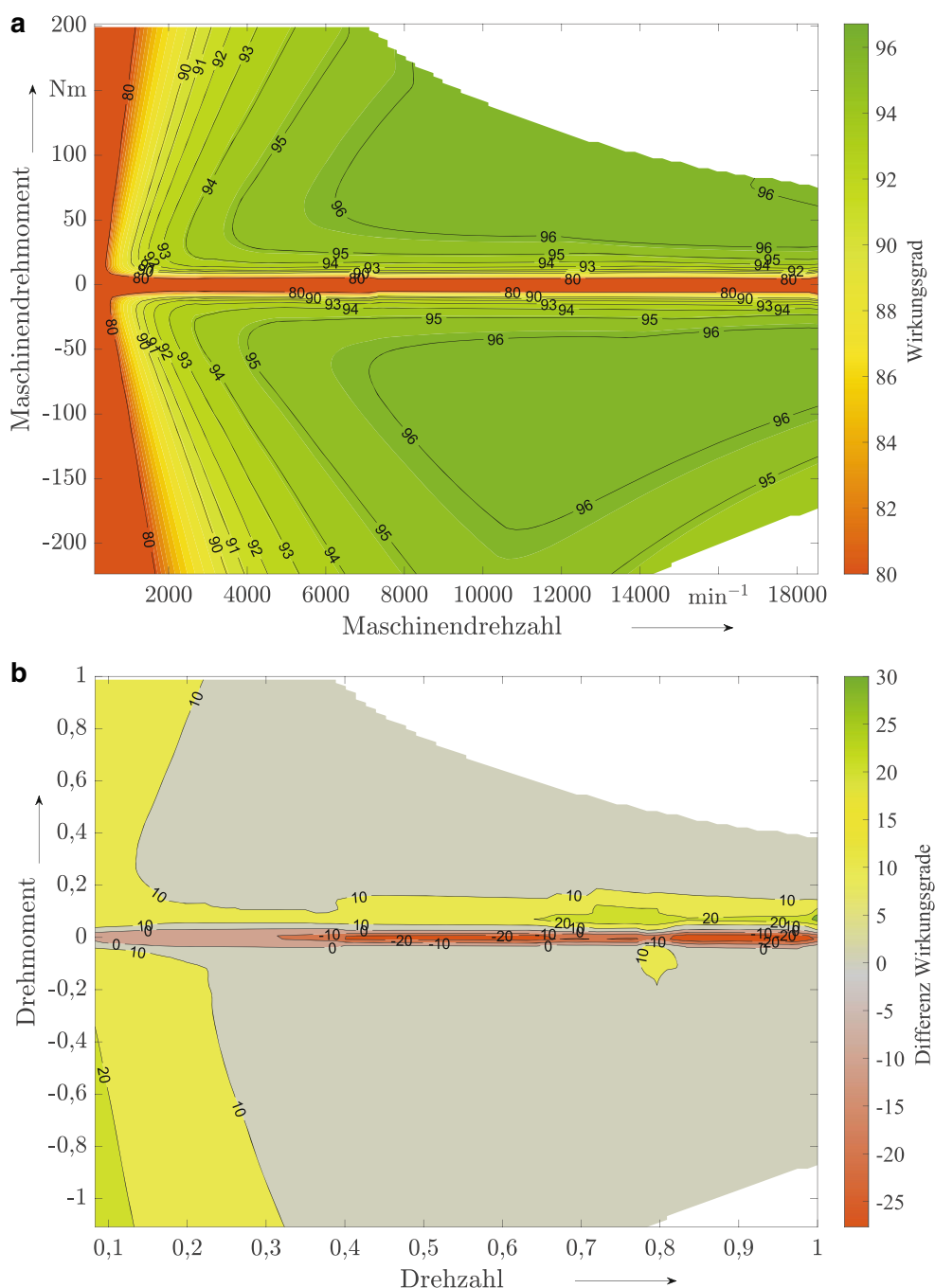
Leistung  $P_{elek}$  die zugeführte. Beim Bremsen ist es umgekehrt.

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} \tag{3}$$

Das Wirkungsgradkennfeld der hochdrehenden Maschine wird dem des Referenzmotors gegenübergestellt.

In der folgenden Abb. 7a ist das Kennfeld der hochdrehenden Maschine zu sehen. Der Wirkungsgrad ist über der Motordrehzahl und dem Motordrehmoment aufgetragen. Das Kennfeld ist nahezu symmetrisch, das heißt, dass sich beim Fahren und beim Brem-

Abb. 7 a Kennfeld hochdrehender Antrieb, b Differenzkennfeld Referenz und hochdrehender Antrieb



sen die gleichen Verluste finden. Der maximale Wirkungsgrad dieser Maschine liegt bei 96,7%. Der maximale Wirkungsgrad tritt im Feldschwächbereich sowohl beim Fahren als auch beim Bremsen auf. Niedrige Wirkungsgrade treten im Grunddrehzahlbereich bei sehr kleinen Drehzahlen und generell bei niedrigen Drehmomenten auf. Im Durchschnitt über alle berechneten Punkte hat die hochdrehende Maschine einen Wirkungsgrad von 91,4%. Über mehrere Fahrspiele gemittelt erreicht diese Maschine einen Wirkungsgrad von 94,0%.

Beim Referenzsystem ist die Verteilung ähnlich, mit einem maximalen Wirkungsgrad von 93,0% und einem durchschnittlichen Wirkungsgrad über alle berechneten Punkte von 85,0%. Über mehrere Fahrspiele gemittelt erreicht diese Maschine einen Wirkungsgrad von 86,0%.

In Abb. 7b ist das Differenzkennfeld aufgetragen, das heißt die Differenz der Wirkungsgrade von Referenzmotor und dem hochdrehenden Motor. Dazu wurden die Drehmomente und Drehzahlen auf ihr Maximum normiert.

Die Auswertung zeigt, dass in 82% der Betriebspunkte die neue Maschine den höheren Wirkungsgrad aufweist. Der Unterschied liegt im Schnitt bei 7 Prozentpunkten. Der Unterschied bei den verschiedenen Fahrspielen ist etwas höher, nämlich 8 Prozentpunkte. Nur in 3% der Betriebspunkte ist die ursprüngliche Maschine besser. Diese Punkte liegen meist im Bereich der sehr kleinen Drehmomente.

Im Anfahrbereich und beim Bremsen mit niedrigen Drehzahlen ist der Wirkungsgrad der hochdrehenden Maschine um bis zu 15 Prozentpunkte höher. Diese Punkte werden beim Beschleunigen häufig angefahren, durch die Steigerung in diesem Bereich kann daher besonders viel Energie gespart werden.

Auch im niedrigen Drehmomentenbereich beim Fahren ist der Wirkungsgrad über alle Drehzahlen um mindestens 10 Prozentpunkte erhöht. Dies sind Betriebspunkte, die bei klassischen Straßenbahnstrecken häufig angefahren werden.

Die Leistungsdichte kann sowohl bezogen auf das Volumen als auch auf die Masse betrachtet werden.

Die volumetrische Leistungsdichte ist der Quotient aus der Leistung der Maschine und ihrem Bauvolumen. Die auf die Masse bezogene Leistungsdichte wird nur als Leistungsdichte bezeichnet. Sie wird aus dem Quotienten der Leistung der Maschine und ihrer Masse bestimmt. Die relevanten Eckdaten der Antriebsmaschinen sind in Tab. 2 zusammengestellt.

Auf der Abb. 8 sind die beiden Motoren nebeneinander aufgebaut zu sehen.

Der Größenunterschied wird dort bereits deutlich. Die Länge der hochdrehenden Maschine beträgt nur noch 78% der Länge der Referenzmaschine und der Durchmesser nur noch 76%.

Das Volumen der hochdrehenden Maschine beläuft sich auf 40% der Referenzmaschine.

Tab. 2 Relevante Eckdaten der Maschinen

	Hochdrehend	Referenz	Faktor
Länge in mm	518	667	0,78
Durchmesser in mm	240	316	0,76
Volumen in dm <sup>3</sup>	21	52	0,40
Masse in kg	131	336	0,39
Leistung in kW	75	110	0,68
Volumetrische Leistungsdichte in kW/dm <sup>3</sup>	3,571	2,115	1,69
Leistungsdichte in kW/kg	0,573	0,327	1,75

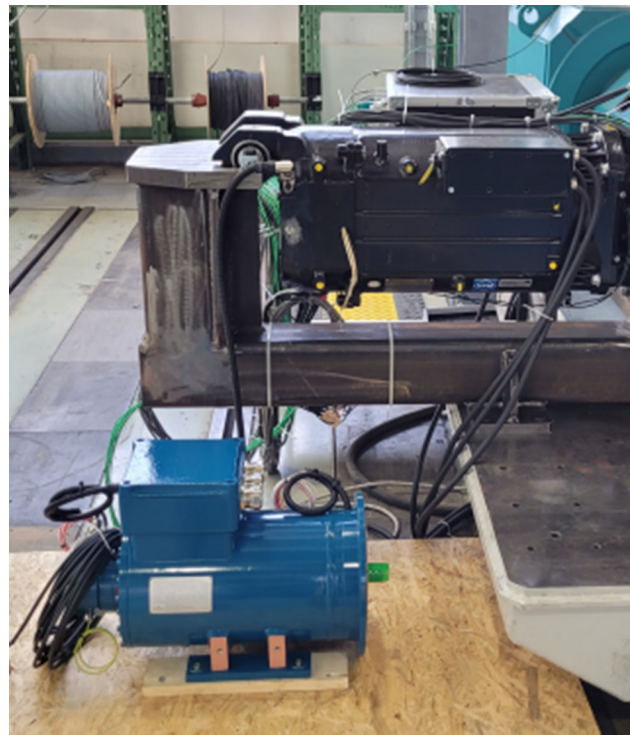


Abb. 8 Größenvergleich Antriebsmaschinen

Die S1-Dauerleistung der hochdrehenden Maschine ist geringer, da die Analyse der Fahrspiele eine genauere Auslegung ermöglicht hat und sie besser überlastet werden kann. Die Masse der hochdrehenden Maschinen beträgt noch 39% der Masse der Referenzmaschine.

Daraus ergibt sich eine 1,69-fach größere volumetrische Leistungsdichte und eine 1,75-fach so große Leistungsdichte.

## 5 Diskussion

Bei einer reinen Betrachtung der Antriebsmaschine sind die Vorteile der hochdrehenden Maschine offensichtlich. Sowohl Wirkungsgrad als auch Leistungsdichten steigen an. Die systematische Vorgehensweise zur Auslegung der Maschine ermöglicht es höhere Wirkungsgrade in den relevanten Betriebspunkten zu erreichen. Der durchschnittliche Wirkungsgrad wird

um 7 Prozentpunkte erhöht, in den relevanten Anfahr- und Fahrbereichen sogar um bis zu 15 Prozentpunkte.

Eine solche gesonderte Betrachtung des Motors ermöglicht keine abschließende Bewertung für den Einsatz in Straßenbahnen. Eine Bewertung kann nur bei einer ganzheitlichen Betrachtung des Antriebsstrangs realisiert werden. Hierbei wird im Rahmen des Projekts MTAB die Nutzung eines Stromrichters mit Siliciumcarbid angestrebt.

Dieser wird durch die hohen Schaltfrequenzen notwendig und hat zusätzlich auch in diesem Bereich einen höheren Wirkungsgrad. Die Kosten steigen durch den Einsatz des teureren Siliciumcarbids [11].

Allerdings wird durch den hochdrehenden Antrieb ein Getriebe mit einer fünfmal so großen Übersetzung benötigt. Dies wird nur durch eine weitere Getriebestufe realisierbar sein, was eine Veränderung des Bau-raums nach sich ziehen wird. Eine weitere Getriebestufe bedeutet einen weiteren Zahneingriff und zusätzliche Lager. Dadurch steigen die Verzahnungs- und Lagerverluste. Zusätzlich gibt es drehzahlabhängige Verluste, die durch die höheren Drehzahlen wichtiger werden [12].

Zur ganzheitlichen Bewertung wird daher im weiteren Verlauf des Projektes MTAB der Wirkungsgrad und der Bauraum des kompletten Antriebsstrangs betrachtet.

Um weitere Herausforderungen wie die Fliehkraftbelastung des Rotors, die Grenzdrehzahlen der Lager, Geräusche, die Wuchtung sowie biegekritische Drehzahlen zu analysieren wird ein Antriebsprüfstand aufgebaut.

## 6 Konklusion

Eine systematische Vorgehensweise bei der Auswahl und Auslegung von Antrieben für Straßenbahnen ermöglicht es, die optimalen Technologien und Konstruktionen zu ermitteln. Die so ausgewählte Asynchronmaschine hat eine gesteigerte Effizienz gegenüber einem herkömmlichen Straßenbahnmotor. In Kombination mit einer höheren Drehzahl wird zudem eine gesteigerte Leistungsdichte sowohl in Bezug auf die Masse als auch auf das Volumen erreicht.

Die Ergebnisse der Verlustleistungsrechnungen müssen noch durch Prüfstandsversuche validiert werden. Außerdem muss für den Einsatz in Straßenbahnfahrzeugen das Gesamtsystem bestehend aus Stromrichter, Maschine und Getriebe betrachtet werden, um den hochdrehenden Antriebsstrang abschließend bewerten zu können.

**Danksagung** Wir bedanken uns beim vom deutschen Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung des Projekts MTAB im Rahmen des Fachprogramms „Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien“. Außerdem danken wir der Firma Alstom für die Fahrzeug- und Maschinendaten.

**Funding** Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

**Open Access** Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

## Literatur

1. MTAB Modellierung und Test neuartiger, hocheffizienter und hochintegrierter Antriebssysteme für Bahnanwendungen. [https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Downloads/P-R/projektsteckbriefe-innovative-fahrzeuge.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=8](https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Downloads/P-R/projektsteckbriefe-innovative-fahrzeuge.pdf?__blob=publicationFile&v=8). Zugegriffen: 12. Nov. 2021
2. Epskamp E (2020) Steigerung der Leistungsdichte von Traktionsantrieben und Aufbau einer hochdrehenden Asynchronmaschine <https://doi.org/10.5445/IR/1000117913>
3. Neudorfer H, Streicher J (2018) Advantages of a high-speed motor-gear unit: The future in modern railway applications. In: VDE/IZBE-Fachtagung Elektrische Fahrzeugantriebe und -ausrüstungen, Dresden
4. Brand J, Koerner O, Kotte Oehler FT (2019) Traction motors with higher rotational speed for electrical multiple units. EB 117(10):397–403
5. Weninger A, Wild S, Walcher M, Neudorfer H (2019) Vorteile von hochdrehenden Traktionsmotoren: Die Zukunft für Anwendungen in modernen Schienenfahrzeugen. *Elektrotech Inftech* 136(2):22–27
6. Bolte E (2018) Elektrische Maschinen. Springer Vieweg, Berlin
7. Flexity. [https://www.stadt-zuerich.ch/content/dam/stzh/vbz/Deutsch/Ueber%20das%20Departement/Publikationen%20und%20Broschueren/Fahrzeuge/Factsheet\\_FLEXITY\\_Zurich\\_DE\\_SELFPRINT.pdf](https://www.stadt-zuerich.ch/content/dam/stzh/vbz/Deutsch/Ueber%20das%20Departement/Publikationen%20und%20Broschueren/Fahrzeuge/Factsheet_FLEXITY_Zurich_DE_SELFPRINT.pdf). Zugegriffen: 12. Nov. 2021
8. Fontanel E, Christeller R, Lacôte F (2020) Rolling Stock in the railway system Bd. 3. PMC Media House, Leverkusen
9. VDI (2019) VDI 2221 Blatt 1 – Entwicklung technischer Produkte und Systeme – Modell der Produktentwicklung. Beuth, Berlin



10. Bender B, Gericke K, Pahl G (2021) Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. Springer Vieweg, Berlin
11. Brenna M, Foadelli F, Zaninelli D, Barlini D (2014) Application prospective of Silicon Carbide (SiC) in railway vehicles. In: AEIT Annual Conference—From Research to Industry: The Need for a More Effective Technology Transfer (AEIT), Trieste, 2014, S 1–6 <https://doi.org/10.1109/AEIT.2014.7002062>
12. Hecke L, Tesar M, Gratzfeld P (2020) Wirkungsgradsteigerung von elektrischen Antriebssträngen mit hochdrehenden Maschinen. EB 118(7–8):282–289



**Leonie Hecke**, Studium Maschinenbau am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und an der INSA Lyon; seit 2018 akademische Mitarbeiterin am Institut für Bahnsystemtechnik, Institut für Fahrzeugsystemtechnik (KIT).



**Markus Tesar**, Studium der Elektro- und Informationstechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT); seit 2018 akademischer Mitarbeiter am Institut für Bahnsystemtechnik, Institut für Fahrzeugsystemtechnik (KIT).



**Jakob Igelspacher**, studierte an der TUM Elektrotechnik mit dem Schwerpunkt Energietechnik. Nach seinem Diplom im Jahr 2004 arbeitete er bei Prof. Herzog am Fachgebiet Energiewandlungstechnik der TUM als Wissenschaftlicher Assistent, wo er auch seinen Dokortitel mit dem Thema „Zur Theorie der Axialfluss-Asynchronmaschine als ausfallsicherer Antrieb“ erwarb. Seit 2014 ist er bei Vincorion im Bereich elektrische Konstruktion für die elektromagnetische und thermische Auslegung der Generatoren und Motoren verantwortlich.



**Jürgen Brunner**, Studium der Feinwerktechnik an der Fachhochschule München. Diverse Tätigkeiten in F&E, Produktmanagement und Anwendungstechnik im Bereich Bearbeitungsgeräte Fotografie. Ab 2005 Produktmarketing und Applikationsmanagement im Bereich Medizinprodukte. Seit 2018 Produktmanagement bei Jenoptik Power Systems.



**Peter Gratzfeld**, Studium der Elektrotechnik und Promotion an der RWTH Aachen; anschließend diverse Managementfunktionen im Engineering, Projektleitung und Geschäftsleitung im Bahnbereich bei BBC, ABB, ABB Henschel, Adtranz und Bombardier Transportation; seit 2008 Professur für Bahnsystemtechnik und Institutsleiter am Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).