



Elektrische Antriebstechnologie für Hybrid- und Elektrofahrzeuge

Elektrische Antriebstechnologie für Hybrid- und Elektrofahrzeuge

**Wer jedes Risiko ausschalten will,
der zerstört auch alle Chancen.**

Hans-Olaf Henkel

Dr.-Ing. Heinz Schäfer (Hrsg.)
und 79 Mitautoren

Elektrische Antriebstechnologie für Hybrid- und Elektrofahrzeuge

Haus der Technik Fachbuch Band 149
Herausgeber:
Prof. Dr. Werner Klaffke · Essen



expert ›

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen
Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.dnb.de> abrufbar.



© 2019 · expert verlag GmbH
Dischingerweg 5 · D-72070 Tübingen

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Alle Informationen in diesem Buch wurden mit großer Sorgfalt erstellt. Fehler können dennoch nicht völlig ausgeschlossen werden. Weder Verlag noch Autoren oder Herausgeber übernehmen deshalb eine Gewährleistung für die Korrektheit des Inhaltes und haften nicht für fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Internet: www.expertverlag.de
eMail: info@verlag.expert

Printed in Germany

ISBN 978-3-8169-3483-7 (Print)
ISBN 978-3-8169-8483-2 (ePDF)

Haus der Technik Fachbuch

Herausgeber der Reihe
Prof. Dr. Werner Klaffke

Geschäftsführendes Vorstandsmitglied des Hauses der Technik e.V.

Die Konkurrenzfähigkeit einer rohstoffarmen Volkswirtschaft hängt ganz wesentlich vom Faktor „Wissen“ ab. Verbunden mit kreativem Gestaltungswillen wird aus Wissen Kompetenz.

Kompetenzvermittlung ist der zentrale Aspekt des Hauses der Technik, die über 90 Jahre schon praxisorientiert und disziplinenüberschreitend durch Tagungen, Symposien, Seminare und Workshops qualitativ hochstehend dargestellt wird. Damit arbeiten wir an den Grundlagen für neue Produkte und Dienstleistungen, deren Vermarktung zu Innovationen und damit zu Wertschöpfung führen. Mehr als 70% der erfolgreichen Innovationen, ob inkrementell oder radikal, entstehen aus der Verknüpfung häufig bereits bekannter Elemente, weshalb es geradezu essentiell ist, akademische Schubladen zu verlassen und die Elemente der Kompetenzen intelligent und bedarfsorientiert zu kombinieren.

Das geschieht in branchenübergreifenden Innovationsnetzwerken und Technologieclustern, die sich in neuen Wertschöpfungsketten zusammenfinden. Neue Elemente der Netzwerkbildung belebt durch die zunehmende Digitalisierung der Arbeitswelt gesellen sich zu den traditionellen Informationsquellen, zu denen auch die vorliegende Publikation gehört.

Die bewährten *Haus der Technik Fachbücher* befassen sich mit den wichtigen Themen der Technik, der Wirtschaft und angrenzender Gebiete, wie Medizintechnik, Biotechnik und neue Medien. Das Beste, das oft mühsam und mit viel Aufwand von den Veranstaltungsreferenten zusammengetragen wurde, wird damit einem größeren Fachpublikum zugänglich gemacht. Die *Haus der Technik Fachbücher* dienen den Teilnehmern als nützliches Nachschlagewerk und anderen Interessenten beim Selbststudium zu beruflichem Nutzen und Erfolg.

Beim vorliegenden Band liegt der Focus auf dem aktuellen Thema „Elektrische Antriebstechnologie für Hybrid- und Elektrofahrzeuge“. Hierzu wird unter Leitung von Herrn Dr.-Ing. Heinz Schäfer im September 2019 eine Tagung in Würzburg durchgeführt.

Vorwort

Neue Herausforderungen an die elektrische Antriebstechnik sind vor allen Dingen durch den zukünftigen Einsatz von „Autonomen Fahrzeugen“ am Markt zu beobachten.

Hierbei handelt es sich hauptsächlich um stark gestiegene Anforderungen an die Lebensdauer sowie immer höhere Sicherheitsstandards.

Durch die extrem steigenden Stückzahlen in den nächsten Jahren spielen auch die Materialverfügbarkeit sowie das Recycling bzw. die Wiederverwertbarkeit besonders der sogenannten „Seltene Erden“ eine große Rolle.

Viele Automobilhersteller denken deshalb bereits über einen „Antriebsmix“ aus unterschiedlichen EM-Technologien bei mehrmotorigen Antrieben nach. Auch stehen weiterhin elektrische Maschinen mit reduziertem Magnetanteil bzw. magnetlose elektrische Maschinen im Fokus.

Bei der Leistungselektronik befasst man sich seit geraumer Zeit auch wieder, bei Spannungen um die 800V, mit Siliziumcarbid-Halbleitern, kurz SIC. Diese bieten neben vielen Vorteilen jedoch noch einen entscheidenden Nachteil, nämlich die immensen Kosten. Diese müssen natürlich ganzheitlich an den Systemkosten gespiegelt werden.

Die großen Herausforderungen werden aber in den nächsten Jahren der Aufbau der „Ladeinfrastruktur“ bei batteriebetriebenen Fahrzeugen sowie bei Fahrzeugen mit Brennstoffzellen der Aufbau der „Wasserstofftankstellen“ bleiben. Auf den elektrischen Antrieben haben die unterschiedlichen Energiespeichersysteme jedoch keinen nennenswerten Einfluss.

Der vorliegende Themenband möge dazu beitragen, ein vertieftes Systemverständnis der elektrischen Antriebe zu erreichen, um einen optimalen Einsatz in den jeweiligen Fahrzeugvarianten zu gewährleisten.

Besonderer Dank gilt Herrn Bernd Hömberg vom Haus der Technik e.V. für die Vorbereitung der Veranstaltung sowie Frau Koranyi vom expert verlag für die verlegerische Betreuung des Buches.

Herzlichen Dank auch allen Mitautoren für ihre Bereitschaft, einen Beitrag zu diesem Themenband zu liefern sowie allen, die zum Gelingen des Buches beigetragen haben. An dieser Stelle möchte ich mich besonders bei Frau Friederike Zinser von hofer eds und Herrn Florian Müller von hofer hp bedanken, die mich bei den Vorbereitungen immer tatkräftig unterstützt haben.

Würzburg, im Herbst 2019

Dr.-Ing. Heinz Schäfer

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

1	Influencing Factors to the Electrical Drive by using SIC-Power Semiconductors.....	1
	Heinz Schäfer	
2	Maximierung der Leistungsdichte elektrischer Maschinen durch elektromagnetische und thermische Maßnahmen.....	13
	Tobias Engelhardt, Johannes Lange, Stefan Oechslen, Axel Heitmann	
3	Einsatz segmentierter E-Maschinen in einem Kfz-Antriebsstrang – Einfluss der Segmentierung auf die Maschinenperformance.....	25
	Sebastian Schulte, Markus Henke, Robert Plikat, Bartosch Czapnik	
4	Radnabenmotoren mit hohem Kupferfüllfaktor durch umformtechnisch hergestellte Spulen.....	35
	Florian Pauli, Michael Schröder, Kay Hameyer	
5	Novel Rotor Design for Traction Machines with Improved Utilizations of Rare Earth Magnet Materials	48
	Gurakuq Dajaku	
6	Axial Flux Machines: Suitable Traction Motors for Electrified Drivetrains?.....	60
	Malte Jaensch, Dominik Grosch, Victor Escamilla	
7	Vergleich von Axial- und Radialflussmaschine bei modularer Bauweise mit U-Kernblechen.....	79
	Alexander Kleimaier	
8	Auslegung hochtouriger elektrischer Antriebe mit hoher Leistungsdichte	92
	Andreas Neubauer, Wolfgang Thaler, Stefan Heinz	
9	Ein Mild Hybrid für den Rennsport auf 48V Basis.....	104
	Martin Berger, Hugh R. Blaxill, Robert E. Vischer, Rupert Tull de Salis	

10	Doppelzweipunktwechselrichter für Elektrofahrzeuge – Systemeigenschaften und Steuerung	114
	Johannes Büdel, Johannes Teigelkötter	
11	NVH für die E-Mobilität	128
	Matthias Pohl, Sonja Wolf	
12	Wasserstoff und Brennstoffzelle – ein wichtiger Bestandteil zukünftiger emissionsfreier Mobilität	144
	Armin Diez	
13	hyPowerRange – Direktgekoppelter hybrider Energiespeicher für Elektrofahrzeuge – Entwicklung, Systemintegration, Energie- & Thermomanagement	148
	Matthias Puchta, Michael Schwalm, Philipp Jankowski, Florian Miller, Uwe Jörg Blume, Florian Fritzsche, Thomas Mückenhoff, Rüdiger Zinke, Andreas Rupp, Stefan Kater, Felix Wachter, Michael Sonnekalb, René Schmerer, Pascal Best	
14	Gebrauchte Batterien aus E-Fahrzeugen als stationäre Energiespeicher wiederverwenden	156
	Jürgen Kölch	
15	Two-Drive-Transmission with Range-Extender (DE-REX) powertrain results and potentials of the designed electrical machine	166
	Yves Gemeinder, Andreas Binder, Jeongki An, Andreas Viehmann, Stephan Rinderknecht	
16	Der Planetenmotor mit integrierter Elektronik und mechanischer Feldschwächung als neuer Antrieb für Elektro-Kfz	180
	Manfred Schrödl, Andreas Brunner, Richard Spießberger	
17	Quantifizierung von Einflussfaktoren auf die Drehmomentgenauigkeit in elektrischen Antrieben mittels Sensitivitätsanalyse	199
	Matthias Braband, Andreas Wilhelmi, Matthias Scherer	
18	Energieeffiziente Regelung von Fahrzeugantrieben mit permanenterregten Synchron- und Asynchronmotoren unter Berücksichtigung von Umrichter, Eisenverlusten und Sättigung	218
	Thomas Windisch, Wilfried Hofmann	
19	Elektromagnetische Verträglichkeit von E-Antrieben / Hochvoltssystemen Aktueller Stand, Weiterentwicklung, Messverfahren	238
	Jakob Mooser	

20	Modulares Simulationswerkzeug zur Analyse dynamischer Vorgänge in Hochvolt-Bordnetzen	245
	Sebastian Raab, Michael Hoerner, Ansgar Ackva, Armin Dietz	
21	Optimized electrified drivetrains and duty cycle testing methods related to future autonomous driving vehicle concepts	258
	Christian Kajinski, Ralf Wörner, Lino Pott, Mathias Lutz, Harald Scheihing, Christoph Pasler	
22	High-Performance Cast Rotors with zero porosity	265
	Péter Szilágyi, David Schmitz, Michael Breuckmann, Sören Tilders, Sören Miersch, Uwe Schuffenhauer, Thomas Schuhmann	
23	Smart Laser Systems and Innovative Welding Technologies Enable Large Scale Drivetrain Electrification	270
	Matthias Beranek, Oliver Bocksrocker	
24	Spezielle Magnetisieretechnologie für optimierte Fertigungsabläufe	278
	Jonas Walter	
25	Quo Vadis Elektrofahrzeuge: Rückschau – Status Quo – Vorschau	290
	Fabian Schüppel, Jan Gacnik	
	Die Autoren	299

1 Influencing Factors to the Electrical Drive by using SIC-Power Semiconductors

Heinz Schäfer

Abstract

In existing traction drive applications, mainly IGBT's will be used for the power semi-conductors.

For future applications with a demand on higher switching frequencies greater than 10 kHz, the so-called switching losses are also increased. This will have a negative impact to the efficiency of the electrical drive.

By using SIC-power semiconductors, these switching losses can be reduced.

On the other hand, by using SIC-power semiconductors, the impacts to the electrical machine, e.g. winding isolation (aging) and bearing (bearing currents) has to be considered.

Impact regarding EMC and NVH of the electrical drive will be also evaluated.

Further, the impact on the efficiency of the electrical drive in different working points should be investigated.

Kurzfassung

Derzeit kommen für Leistungshalbleiter im Traktionsbereich hauptsächlich IGBTs zum Einsatz.

Für zukünftige Applikationen, die eine höhere Schaltfrequenz als 10 kHz erfordern, steigen jedoch die sogenannten Schaltverluste stark an, was sich nachteilig auf den Wirkungsgrad des Antriebs auswirkt.

Mit SIC-Leistungshalbleiter kann dieser Nachteil bei hohen Schaltfrequenzen jedoch reduziert werden.

Beim Einsatz von SIC-Leistungshalbleiter müssen besonders die Einflüsse auf die elektrische Maschine, wie Wicklungsisolation (Alterung) und Lager (Lagerströme), beachtet werden.

Beachtung finden aber auch die Einflüsse auf die EMV und NVH des elektrischen Antriebes.

Ferner soll natürlich auch der Einfluss auf den Wirkungsgrad des elektrischen Antriebes in unterschiedlichen Lastpunkten untersucht werden.

1 Typical electrical drive train

In figure 1, a typical electrical drive train is depicted. Not considered in this figure is the battery charger and the mechanical transmission.

Normally the energy storage will be a Li-Ion-battery with a nominal voltage of approx. 300 V to 800 V. A typical inverter will be a three phase inverter based on IGBT-power switches with a switching frequency of approx. 10 kHz. The electrical machine for an axle drive can be a PSM, FSM or IM, tailored to the application.

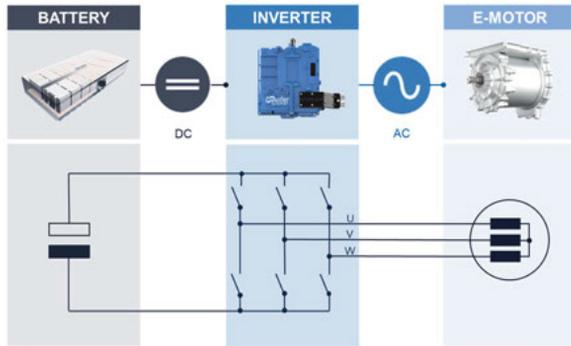


Fig. 1: Typical electrical drive

2 Typical power losses within power semiconductors

In figure2, there is a typical switching behavior including the related power losses within a power semiconductor depicted.

The switching losses are dominant compared to the conducting losses. Therefore the “overlapping time” between current and voltage should be as short as possible in order to reduce the “turn on” and “turn off” switching losses.

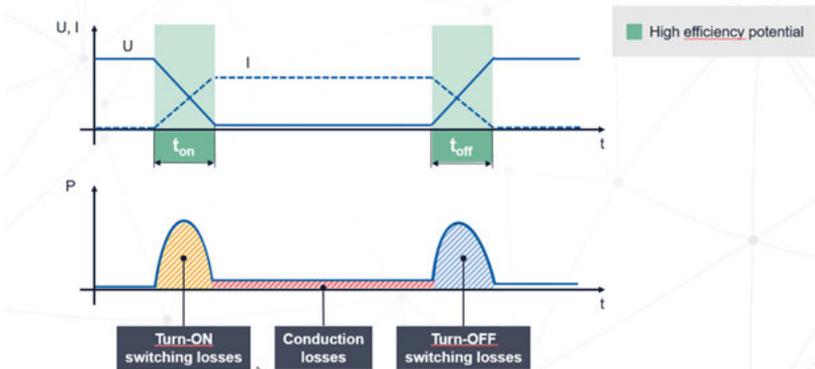


Fig. 2: Typical electrical drive

3 Motivation for using power-switches based on SiC-semiconductors

The power for a typical electrical traction drive is in a range of 80 to 300 kW. The typical losses within the electrical drive is in a range of 3% to 7% related to the total losses of the electrical car.

Compared to the existing Si-technology (IGBT), the SiC-Technology can provide many advantages like, higher reverse voltages, higher switching frequencies, lower switching – and conducting losses. Together with a higher thermal conductivity, we can achieve a very compact and efficient power electronic for drive train applications.

The improvement of power, power density and efficiency in relation with a simultaneous reduction of the total assembly space, weight and costs are big advantages for future electrical cars.

4 SiC-semiconductors for compact and efficient electrical drives

4.1 Advantages of SiC-semiconductors

The semiconductor material of SiC has a big band gap compared to the other materials. These offers many advantages.

In figure 3 the material properties of two different semiconductors are depicted.

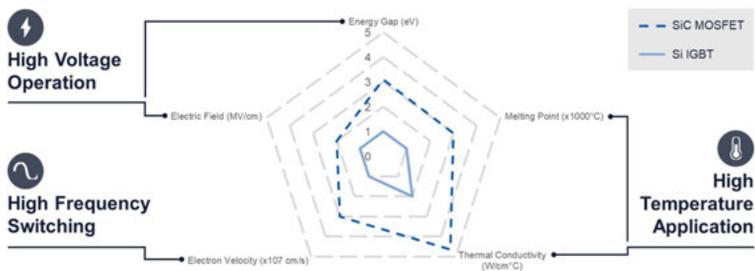


Fig. 3: Comparison of power semiconductors

As well as silicon carbide as gallium nitride to have better electrical properties as silicon and enable higher switching frequencies and lower one state resistance especially within partly load. Further SiC has excellent thermal properties whereby very high operation temperature are possible and the demand for cooling can be reduced.

If we compare two power devices (1200 V / 300 A) based on silicon or silicon carbide directly, it can be depicted in figure 4, that especially the switching losses within the SiC-module is much lower. But the voltage drop related to the nominal current is higher. Besides the lower switching losses the high board thermal capacity of the SiC-components is also a further advantages. Especially, with an inverter with high efficiency, the demand for cooling can be reduced significantly and therefore also the installation space, the weight and system costs.

1 Influencing Factors to the Electrical Drive by using SiC-Power Semiconductors

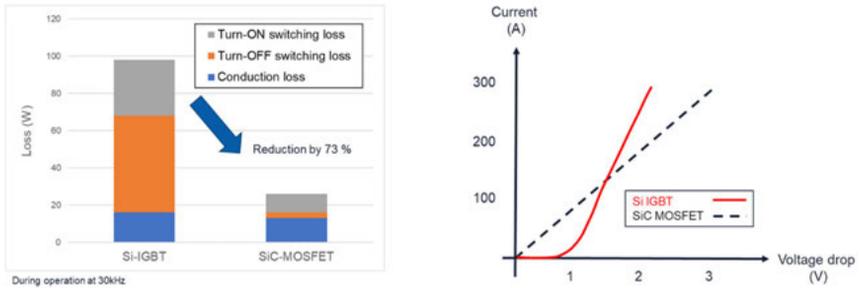


Fig. 4: Comparison of power losses

And in figure 5 there is shown a comparison for a given application realized with IGBT and SiC.



Fig. 5: Technical comparison

4.2 Disadvantages of SiC-semiconductors

The practical implementation of the “positive” technical properties to economical products and applications also some “negative” properties has to be considered:

- The manufacturing process of silicon carbide crystals is very expensive at this time
- SiC- wafer to this day contains 5 - 10 defects per cm^2 (micropipes). That means, an acceptable yield will only be possible for small chips.
- SiC-wafer are with 3” much lower as Si-Wafer with 6” to 8”
- Also the „parasitics“ will be more important compared to existing solutions (see figure 6 and 7)

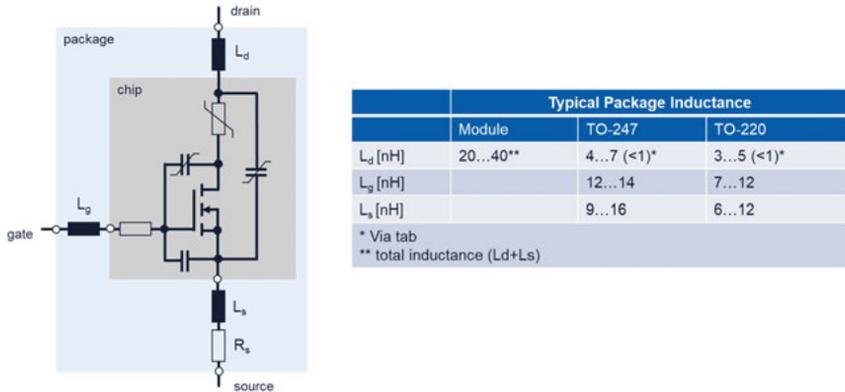


Fig. 6: Parasitics of a power semiconductor

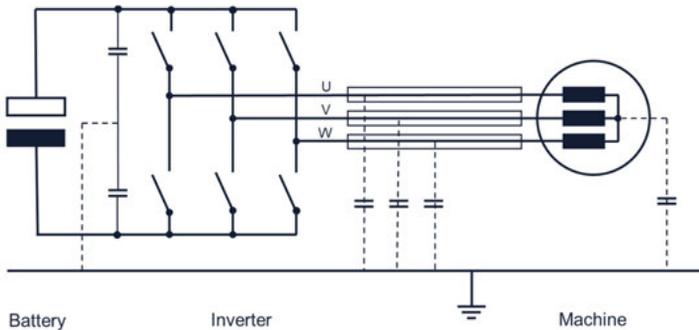


Fig. 7: Parasitics Capacities

Summary:

SiC-Chips have many advantages, but are more expensive as Si-Chips. Therefore, it is very important to consider the system costs in total.

5 Reduction of current ripple in an electrical machine

As very well known, the power density of an electrical machine can be increased by increasing the speed of the electrical machine. That means, it is possible to reduce the installation space by increasing the speed under remaining the peak power of the electrical machine. For such kind of applications, we have to adapt the number of pole pairs of the electrical machine and also the switching frequency of the inverter.

For typical existing applications a switching frequency of approx. 4 kHz to 10 kHz will be applied in order to achieve a max. fundamental frequency of approx. 1 kHz. Typical

voltage /current-characteristics are depicted in figure 8. For a higher speed of the electrical machines it makes sense to increase the switching frequency.

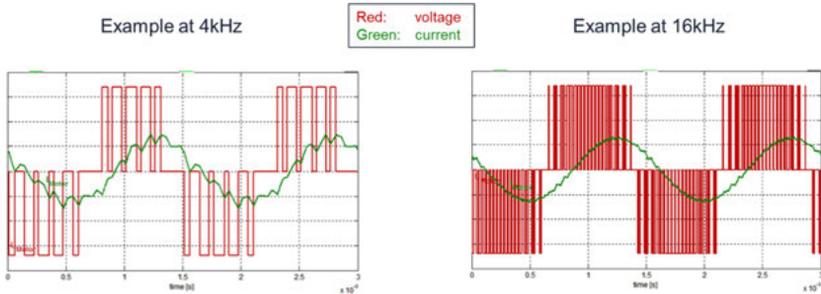


Fig. 8: Current Characteristic: Influence of switching frequency

Especially for high-speed applications the inductance within high-utilized electrical machines are comparable low. Because the inverter has a switching operation, the phase current in the electrical machine have many harmonics. These current harmonics produce additional ohmic losses within the electrical machine and will contribute to heat up the machine.

Usually the electrical parameters (resistance, inductivity and magnetic flux) are treated as constants. However, especially the inductivity may vary in a range up to 40%, depending on the actual rotor position and the stator currents. The reason for the high variation of the inductance will also be described as saturation of the iron within the magnetic circuit (see figure 9).

The comparable low inductance within the saturation area leads also to higher amplitudes of the current harmonics.

Saturation in electric machines

SOLUTION ▶

Increasing the switching frequency

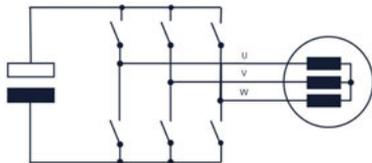
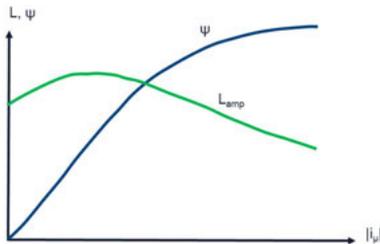


Fig.9: Saturation within an electrical machine

6 Influences regarding the winding insulation (aging) of the electrical machine

The development of compact and efficient electrical machines is connected with the improvement of the properties of the insulation system, especially in relation to the electrical, thermal, chemical and mechanical stress.

For example, the wire insulation of the winding within the electrical machine, will be stressed with approx. 2 times of the DC-Link voltage.

The reason for this over voltage is the super position of the reflected voltage wave with the inverter output voltage.

A so-called travelling wave will arise, if a rectangular voltage with a very high rising edge (in a range of ns), that means very high frequency.

This so-called “reflected wave phenomena” will arise, if the wave impedance will change during the direction of a wave.

In the figure 10 the reflection and refraction of a voltage travelling wave are depicted.

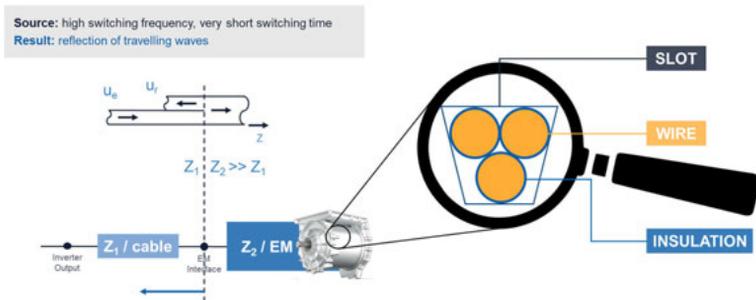


Fig. 10: Impact to winding insulation

The grade of reflection can be determined with the following equation:

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

r : Reflection coefficient

Z_1 : Wave impedance of the cable

Z_2 : Wave impedance of the electric machine

The relation between rise time t_r , and the critical cable length l_{crit} is

$$l_{crit} \approx \frac{v_{cable} \cdot t_r}{2}$$

$$l_{crit} (IGBT) \approx 3,75m$$

$$l_{crit} (SIC) \approx 0,75m$$

v_{cable} : wave speed within the cable (typical 150 m/ μ s)

t_r : rise time (IGBT $\approx 0,05 \mu$ s)(SSIC $\approx 0,01 \mu$ s)

This voltage overshoot at the terminal of the electrical machine can lead to a so-called “partial discharge” within the winding of the electrical machine and can accelerate the aging of the insulation material.

7 Influences regarding EMI

The pulsating operation behavior of the power electronics can lead to the following challenges:

- Disturbance of sensor or radio receiver
- Non-admission of a car due to EMC-regulations and norm
- Bearing currents in the electrical machine and transmission

The following considerations are based on an electrical powertrain depicted in figure 11. [1]

The power electronics linked the DC-site to the AC-site. The transformation from DC-voltage to the three-phase system take place via pulse with modulation or space vector modulation for example. This is the reason for the conducted HF-disturbance signals, transmitted from the power electronics.

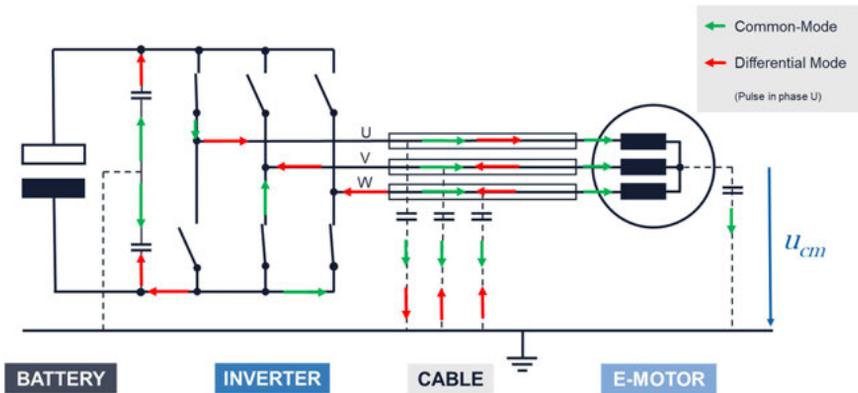


Fig. 11: CM/DM in a 3 Phase system

The reason for the common mode voltage is the super position of the three phases. The definition of the common mode voltage can be described as the average of the three phase voltages related to Ground (see figure 12).

$$u_{cm} = \frac{u_{u0} + u_{v0} + u_{w0}}{3}$$

u_{cm} contains only discrete values.

$$u_{cm} = \pm \frac{u_d}{2}, \pm \frac{u_d}{6}$$

1 Influencing Factors to the Electrical Drive by using SIC-Power Semiconductors

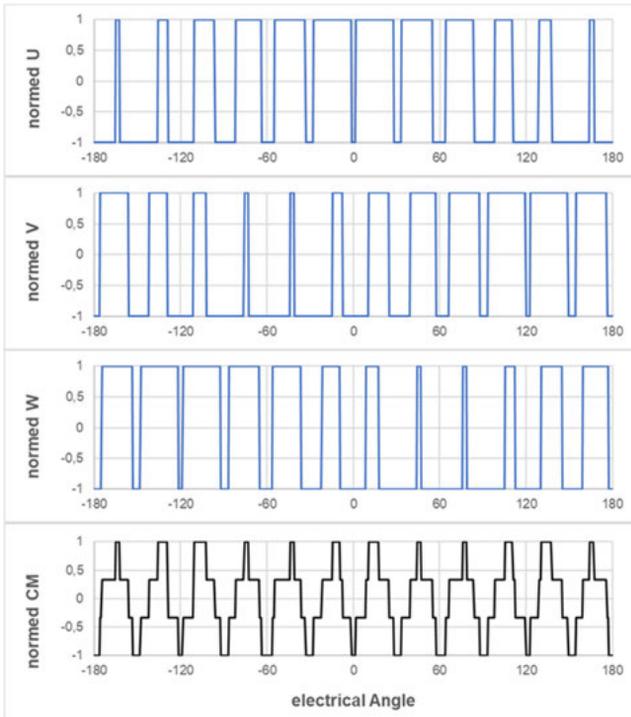


Fig. 12: Generation of CM voltage (normed to $U_{d/2}$)

The EMI behaviour of the power electronics can be characterized for a typical pulse. In figure 13 the related frequency spectrum is depicted.

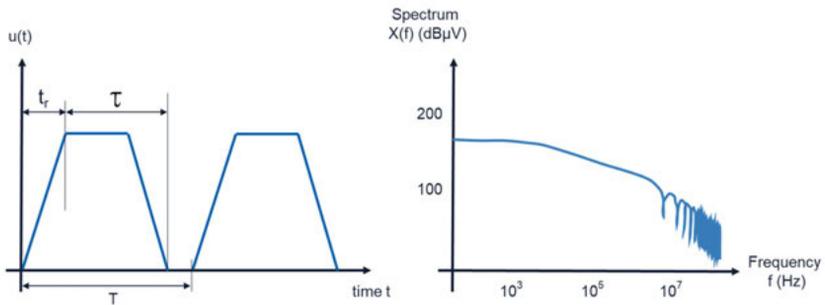


Fig. 13: Spectrum of a typical pulse

The disturbance spectrum is given by the following equation:

$$X(f) = 2U_d * \frac{\tau}{T} * \frac{\sin(\pi * f * \tau)}{\pi * f * \tau} * \frac{\sin(\pi * f * t_r)}{\pi * f * t_r}$$

U_d : DC – link voltage
 τ : Pulse time
 t_r : Rise time
 T : Switching time
 f : Frequency

The spectrum is initially constant until a frequency of 10 kHz. Over $f = 10$ kHz, the frequency will be decreased with 20 dB per decade. Over a frequency $f > 1,6$ MHz, the spectrum will be decreased to 40 dB.

The second cut off frequency is resulting from the term:

$$\frac{\sin(\pi * f * t_r)}{\pi * f * t_r}$$

If we are increase the rise time t_r , that means to reduce the voltage step less also the value of the spectrum will be reduced in the higher frequency range.

8 Technical reasons for special bearing currents in the EM

There are mainly two reasons for high frequency bearing currents within inverter supplied electrical machines. On the one hand leads the rectangular output voltage of the inverter to a common mode voltage, on the other the design of a three phase electrical machine built up a common mode circuit, mainly consisting of distributed capacities and supplied from the common mode voltage, see figure 14.

In this paper exemplary, the capacitive current also described as a du/dt -current will be considered.

[1]

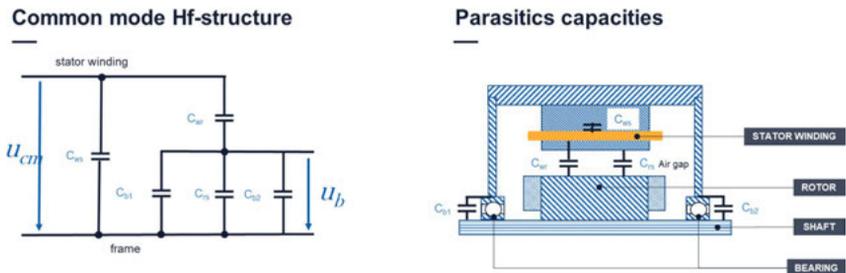


Fig. 14: HF-structure of an electrical machine

9 Reduction of the common mode voltage via special space vector modulation

As mentioned, the reason for appearing the capacitive injected interferences (voltages, currents) can be found in the existence of a common mode voltage U_{cm} .

Due to the fact, that the generation of the common mode voltage is given by pulsing in the power electronics it makes sense to change the used pulse pattern in order to reduce the common mode voltage on the one hand and reduce the number of switching ramps within the common mode voltage.

A new approach to utilize both possibilities without influencing the grad of modulation provides the method of “Sequential Impulse Placement” (SIP). The SIP is based on the basic classical space vector modulation depicted in figure 15.

The modification of the pulse pattern consists in a replica of a reference voltage space vector based on two border vectors in combination with yours against vectors.

For example to build up a reference voltage space vector within sector 1.

A possible switching sequence could be $\underline{u}_1, \underline{u}_2, \underline{u}_5$ as described in the figure 15.

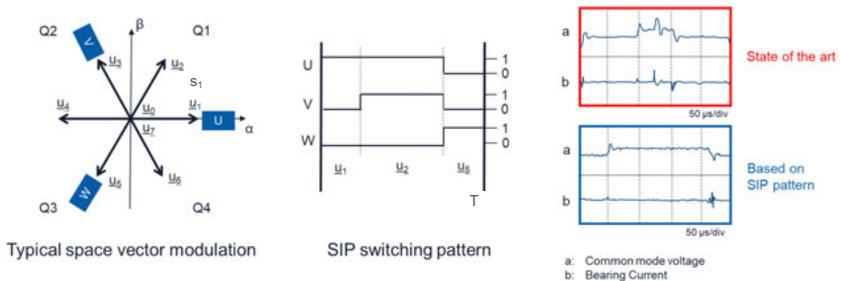


Fig. 15: Reduction of bearing currents: SIP-space vector modulation

The advantages is to neglect the zero vectors as used in the classical space vector modulation, therefore the common mode voltage can be reduced if the SIP - method will be applied.

In the figure 15, the measurement results confirm the use of SIP in view of a reduced common mode voltage and bearing current.

[2]

10 Summary

Especially for high power electrical traction drives in relation with high-utilized electrical machines, it is possible to achieve a very compact and efficient power electronics by using SIC.

In this context by using SIC, it is very important to know also the impacts to an electrical drive regarding over voltages (aging of winding insulation), EMI-behavior and bearing currents and also to know counter measures in order to reduce these “negative” impacts.

Concerning cost issues, we have to consider the total costs of an electrical drive system and not only the costs for the power modules.

Reference

- [1] Bastian Heidle: EMV-gerechte Gestaltung einer elektrischen Maschine für Hybrid- und Elektrofahrzeuge. Cuvillier Verlag Göttingen 2017; ISBN 978-3-7369-9671-7
- [2] Johann Zitzelsberger: Optimierte Raumzeigermodulation zur Verringerung gleichtaktbedingter Lagerströme. Shaker Verlag Aachen 2007; ISBN 978-3-8322-6646-2

2 Maximierung der Leistungsdichte elektrischer Maschinen durch elektromagnetische und thermische Maßnahmen

Tobias Engelhardt, Johannes Lange, Stefan Oechslen, Axel Heitmann

Abstract

Electric motors are suitable for sports cars due to their power density. The increasing power density however is a challenge to the thermal layout of the motor, since there is a conflict of objectives between the peak and the continuous power. Another conflict of objectives is between maximum torque and maximum speed, even though both are required to reach the performance of the vehicle. Porsche has aimed at improving all conflicting objectives significantly.

This paper describes the requirements and the actual design of the electric motor. Conflicts of objectives are discussed. The implemented measures for reaching the objectives are described and their effect is demonstrated by measurements on the test bench. It is shown, that considerable measures are necessary to increase the continuous power due to the high power density of the motor.

Evaluation parameters like the power density or Esson's utilization factor are discussed and found insufficient for evaluating the full performance of the electric motor. Thus, two alternatives are proposed. The described evaluation parameters are used to compare Porsche's electric motor to competitors.

Kurzfassung

Elektrische Maschinen eignen sich für den Einsatz in Sportwagen aufgrund ihrer hohen Leistungsdichte. Mit steigender Leistungsdichte steigen allerdings die Anforderungen an die thermische Auslegung der elektrischen Maschine, da zwischen der Steigerung der Kurzzeit- und der Dauerleistung ein Zielkonflikt besteht. Ein weiterer Zielkonflikt besteht zwischen dem maximalen Drehmoment und der maximalen Drehzahl, obwohl beide Größen für die Erreichung der gewünschten Fahrleistungen erforderlich sind. Die Porsche AG hat es sich zum Ziel gemacht, alle Zielgrößen gegenüber dem Stand der Technik deutlich zu erhöhen.

In diesem Beitrag werden zunächst die Anforderungen und dann die Umsetzung der entwickelten elektrischen Maschine beschrieben. Im Anschluss werden wichtige Zielkonflikte zwischen den verschiedenen Zielgrößen der Auslegung diskutiert. Die umgesetzten Maßnahmen zur Erreichung der Ziele werden beschrieben und deren Auswirkung anhand von Messungen an einem Hochdrehzahlprüfstand dargelegt. Dabei zeigt sich, dass aufgrund der hohen kurzzeitigen Leistungsdichte umfangreiche Maßnahmen zur Erhöhung der Dauerleistung getroffen werden müssen.

Im Anschluss werden mögliche Bewertungsgrößen, wie beispielsweise die Leistungsdichte oder die Esson'sche Ausnutzungsziffer, diskutiert und für eine umfassende Bewertung der Performance als nicht ausreichend eingeschätzt. Zur Ergänzung werden deshalb zwei alternative Bewertungsgrößen vorgeschlagen. Zuletzt werden die beschriebenen Bewertungsgrößen eingesetzt, um die von der Porsche AG entwickelte elektrische Maschine mit Wettbewerbern zu vergleichen.

1 Einleitung

Die in diesem Beitrag gezeigten Untersuchungen sind Teil eines Vorentwicklungsprojektes der Porsche AG. In diesem Vorentwicklungsprojekt wird eine hochintegrierte Achsantriebseinheit mit dem Ziel entwickelt, die kurzzeitige und dauerhafte Leistungsdichte deutlich anzuheben.

2 Anforderungen

Die hochintegrierte Achsantriebseinheit ist als Vorderachsantrieb für einen elektrischen Sportwagen vorgesehen. Dazu müssen bestimmte Anforderungen bezüglich des Achsdrehmoments sowie der kurzzeitig und dauerhaft verfügbaren Leistung erfüllt werden. Nach umfangreichen Voruntersuchungen leiten sich daraus für die elektrische Maschine die in Tabelle 1 aufgelisteten Anforderungen ab.

Im Folgenden sind mit „Leistung“ immer die maximale, kurzzeitig abrufbare Leistung und mit „Drehmoment“ das maximale Drehmoment gemeint.

Tabelle 1: Anforderungen elektrische Maschine

Anforderung	Wert	Einheit
max. Drehmoment	160	Nm
max. Drehzahl	24.000	1/min
max. Leistung	140	kW
max. Dauerleistung	120	kW

3 Beschreibung der elektrischen Maschine

Die elektrische Maschine ist eine permanenterregte Synchronmaschine mit Doppel-V-Anordnung der Magnete und einer verteilten Zweischichtwicklung aus Runddrähten. Die Magnete sind NdFeB-Magnete und die Blechpakete bestehen aus lasergeschnittenen NO20-Blechen. Die elektrische Maschine wird im Folgenden PAG-PSM genannt.

Primärziel bei der Auslegung ist die Einhaltung der Anforderungen. Dabei ist es eine besondere Herausforderung, die Zielkonflikte zwischen Drehmoment, Leistung, Drehzahlfestigkeit und Dauerleistung aufzulösen. Eine Abhandlung der entstehenden Zielkonflikte befindet sich im folgenden Kapitel. Darüber hinaus wird hoher Wert auf die Drehmomentwelligkeit und den Wirkungsgrad gelegt, insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten und höheren Lasten.

4 Zielkonflikte bei der Auslegung elektrischer Maschinen

Die Auslegung elektrischer Maschinen ist komplex und umfasst viele Disziplinen. Besonders wenn produktionstechnische und wirtschaftliche Faktoren mit einbezogen werden, ergeben sich zahlreiche Zielkonflikte. Im Folgenden wird ein kleiner Ausschnitt dieser Zielkonflikte aufgegriffen und beschrieben, der für die spätere Interpretation der gezeigten Ergebnisse erforderlich ist. Die beschriebenen Zielkonflikte entstehen aus hohen Anforderungen an die Performance bei kleinen Bauraumvorgaben:

- Drehmoment ↔ Leistung

Der Kompromiss zwischen Drehmoment und Leistung wird über die Windungszahlen eingestellt. Mit steigenden Windungszahlen bei gleichem maximalen Inverterstrom steigen die Durchflutung und damit das Drehmoment an [1]. Im Umkehrschluss sinkt mit steigenden Windungszahlen der stationäre Kurzschlussstrom und damit auch die Leistung, insbesondere bei hohen Drehzahlen [2].

$$M_{max} \sim w_{str} \quad (1)$$

$$P_{max}(n_{max}) \sim \frac{1}{w_{str}} \quad (2)$$

- Leistung/Drehmoment ↔ Maximaldrehzahl

Mit zunehmender Drehzahl erhöhen sich die mechanischen Spannungen infolge der Zentrifugalkräfte im Rotor quadratisch. Insbesondere in den Stegen zwischen den Magneten und zwischen den Magneten und dem Luftspalt führen diese Spannungen zu einer hohen Materialbeanspruchung und eventuell zum Ausfall des Rotors. Trotz einer spannungsoptimalen Auslegung der Flussbarrieren, muss die Stegbreite mit steigender Maximaldrehzahl angehoben werden. Dadurch kommt es zu höheren Streuverlusten an den Magnetenden und dadurch auch zu einer Reduzierung des Drehmoments sowie der Leistung [3].

- Drehmoment ↔ Dauerleistung

Die Dauerleistung hochdrehender elektrischer Maschinen ist oft durch die Grenztemperatur des Rotors (Magnete) bestimmt. Eine in dieser Art thermische begrenzte Maschine wird als rotorkritisch bezeichnet. Da der Rotor grundsätzlich schwieriger zu kühlen ist als der Stator, ist es deshalb entscheidend die Rotorverluste zu minimieren. Ein sehr wirksames Mittel zur Reduzierung der Rotorverluste ist eine Vergrößerung des Luftspalts. Insbesondere bei elektrischen Maschinen mit vergrabenen Magneten und hoher Reluktanzmomentnutzung führt dies allerdings zu einer Reduzierung des Drehmoments.

- Dauerleistung ↔ Leistung/Drehmoment

Die Grenztemperatur des Rotors entspricht häufig der maximal zulässigen Magnettemperatur. Diese maximal zulässige Magnettemperatur wird so definiert, dass im Falle eines Kurzschlusses, und den damit eintretenden transienten Kurzschlussströmen, die Feldstärke in den Magneten nicht zur Entmagnetisierung führt. Mit steigender

Magnettemperatur sinkt die zulässige Feldstärke. Bei gleicher Qualitätsstufe weisen Magnete mit hoher Widerstandsfähigkeit gegen Entmagnetisierung eine geringere Remanenzflussdichte auf, wodurch das Drehmoment und insbesondere die Leistung sinken.

Eine weitere Herausforderung ergibt sich durch die mit steigender Leistungsdichte zunehmenden Oberschwingungen, die aus den Spannungspulsen des Inverters entstehen. Diese Oberschwingungen führen insbesondere zu einer deutlichen Erhöhung der Magnetverluste [4], was bei rotorkritischen elektrischen Maschinen zu einer Reduzierung der Dauerleistung führen kann.

5 Messergebnisse

Die Messungen erfolgen an einem Hochdrehzahlprüfstand mit Lastmaschine und Übersetzungsgetriebe. Der Prüfling wird über einen Universal-Inverter betrieben und die Rotortemperatur mittels Telemetriesystem übertragen. Aus Bauteilschutzgründen wird das Temperaturniveau für die Messungen um 50 K abgesenkt, woraus sich korrigierte Grenztemperaturen für Stator und Rotor ergeben. Daraus ergibt sich ein Fehler bei den Absolutwerten der ermittelten Daten. Die Aussage über die Effektivität der vorgestellten Maßnahmen bleibt erhalten.

5.1 Kurzzeitige Leistung

Bild 2 zeigt die Messung der Leistung (10s) und des Drehmoments. Die Anforderungen werden erfüllt und die Leistung ist bei mittleren Drehzahlen deutlich über den geforderten 140 kW. Die geforderte Maximaldrehzahl von 24.000 1/min kann dauerhaft innerhalb der Grenzwerte für Schwingungen gefahren werden. Daraus berechnet sich bei 650V DC-Spannung eine Leistungsdichte von 10,6 kW/kg, bezogen auf die Masse der Aktivteile.

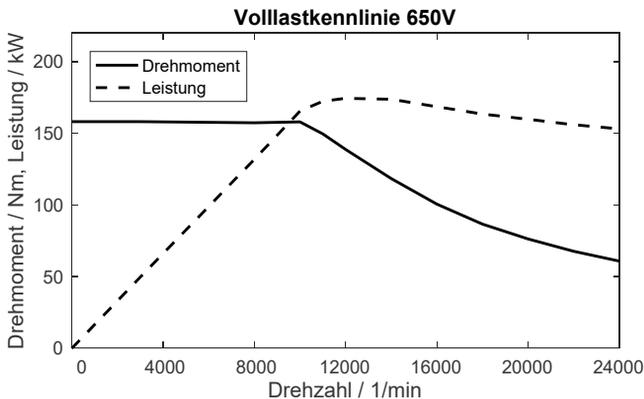


Bild 2: PAG-PSM, 10s, 650V

5.2 Dauerleistung mit herkömmlicher Kühlung

Alle zunächst beschriebenen Varianten haben eine herkömmliche Wassermantelkühlung und keine separate Rotorkühlung. Die Messungen der Dauerleistung (S1) am ersten Prototypen (Evo1) zeigen eine sehr geringe Dauerleistung (siehe Bild 3 und 4). Insbesondere bei 800V DC-Spannung kann bereits bei 11.000 1/min kein Drehmoment mehr dauerhaft gefahren werden. Die Maschine ist in dieser Konfiguration rotorkritisch, d.h. die Grenztemperatur der Magnete wird erreicht. Die sehr geringen Dauerleistungswerte der Evo1 sind auf die in Kapitel 3 erwähnten Oberschwingungsverluste zurückzuführen, wodurch auch die deutliche Abhängigkeit von der DC-Spannung zu erklären ist.

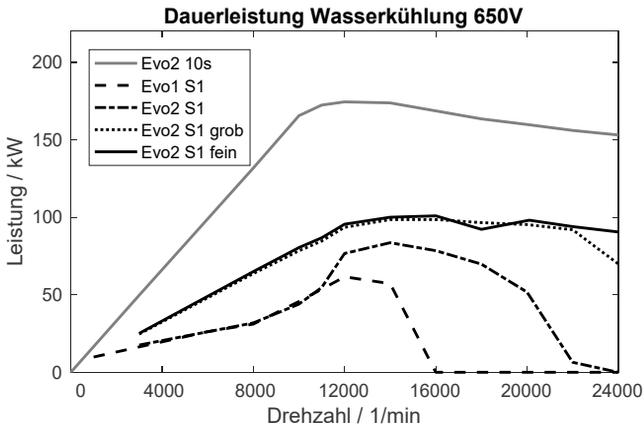


Bild 3: PAG-PSM, S1, 650V

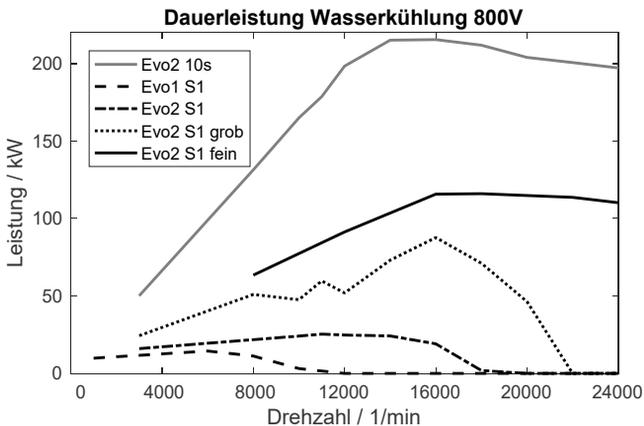


Bild 4: PAG-PSM, S1, 800V

Eine Verbesserung der Dauerleistung wurde durch die Weiterentwicklung des Blechschnitts (Evo2) mit einer deutlichen Reduzierung der Rotorverluste erreicht. Bei 800V DC-Spannung ist die gemessene Dauerleistung aber immer noch sehr niedrig.

Durch eine Segmentierung der Magnete können die durch Oberschwingungen erzeugten Wirbelstromverluste deutlich reduziert werden [5]. Um dies zu untersuchen, wurden zwei weitere Varianten des Rotors mit verschiedener Segmentdicke aufgebaut (siehe Bild 5). Die Magnete bestehen jeweils aus vielen kleinen miteinander verklebten Segmenten. Die Segmentierungsrichtung ist tangential (in der Bildebene) ausgeführt.

Durch die Segmentierung der Magnete steigt die Dauerleistung deutlich an. Bei 650V DC-Spannung (siehe Bild 3) und grober Segmentierung ist die Maschine bis kurz vor der Maximaldrehzahl bei 24.000 1/min statorkritisch, d.h. der Rotor erreicht in keinem S1-Betriebspunkt seine Grenztemperatur. Aufgrund des Anstiegs der Oberschwingungsverluste in Abhängigkeit der DC-Spannung ist bei 800 V die feine Magnetsegmentierung notwendig. In diesem Fall ist die Dauerleistung durch die auftretenden Wicklungstemperaturen beschränkt (statorkritisch). Die Segmentierung der Magnete ist eine sehr wirkungsvolle Maßnahme zur Erhöhung der Dauerleistung bei inverterbetriebenen elektrischen Maschinen mit hoher Leistungsdichte.

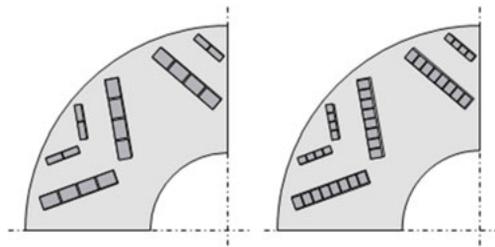


Bild 5: Segmentierung der Magnete, links "grob", rechts "fein"

5.3 Dauerleistung mit verbesserter Kühlung

Durch die Segmentierung der Magnete kann erreicht werden, dass die Maschine in allen Betriebspunkten statorkritisch ist. Um die Dauerleistung weiter zu steigern, muss folglich die Kühlung des Stators verbessert werden. Dazu wurde bei der Porsche AG eine Direktkühlung des Stators entwickelt, bei der ein dielektrisches Kühlmedium über den Wickelkopf, durch die Nuten entlang der Leiter und über den anderen Wickelkopf wieder aus der Maschine heraus geleitet wird [5]. Der Stator ist dabei durch eine dünne Hülse vom Luftspalt getrennt. Dichtungen in den Lagerschilden dichten zwischen der Hülse und dem Gehäuse ab. Durch den direkten Kontakt des Kühlmediums mit den Leitern ist die abführbare Wärmemenge deutlich höher als bei einer konventionellen Wassermantelkühlung. Zusätzlich zur Stator-Direktkühlung wurde der Prototyp mit einer Rotorkühlung mit Öl-Lanze in einer hohlen Rotorwelle ausgestattet.

2 Maximierung der Leistungsdichte elektrischer Maschinen durch elektromagnetische und thermische Maßnahmen

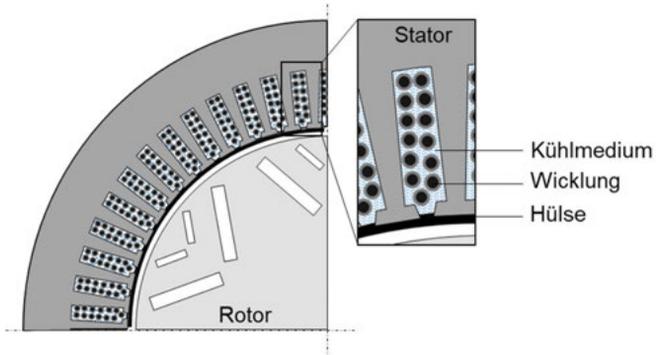


Bild 6: Stator-Direktkühlung mit Hülse

Die Bilder 7 und 8 zeigen die Dauerleistung des Prototyps mit verbesserter Kühlung („Evo2 Öl“), dessen Rotor zusätzlich mit der feinen Segmentierung der Magnete ausgestattet ist. Die Maschine bleibt in allen Betriebspunkten und Spannungslagen unterhalb der Grenztemperaturen für Rotor und Stator. Die Abweichung zur 10s-Kennlinie resultiert aus der höheren Magnettemperatur während der S1-Messung. Die dauerhaft fahrbare Leistungsdichte – die Dauerleistungsdichte – ist somit größer 10 kW/kg, bezogen auf die Masse der Aktiveile. Die Effektivität des verbesserten Kühlkonzepts wird dadurch verdeutlicht.

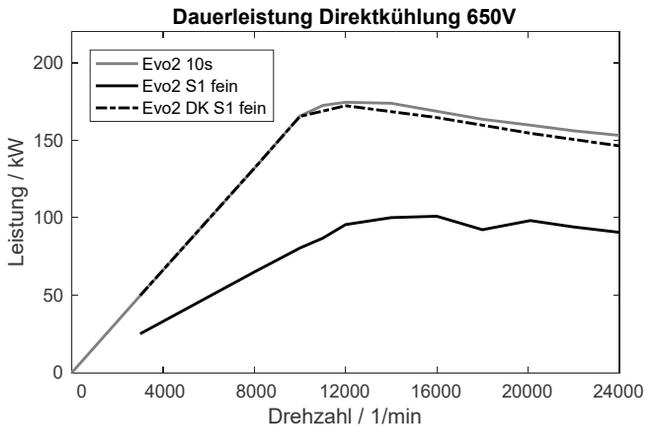


Bild 7: PAG-PSM, S1, 650V, mit Stator-Direktkühlung und Rotorkühlung