

# Innengekühlte Hohldrähte

## Verdopplung der Leistungsdichte von E-Motoren



© dynamic E flow

### AUTOREN



**Prof. Dr. Dipl.-Ing. Edmund Nitsche**

ist unabhängiger Berater der dynamic E flow GmbH in Kaufbeuren.



**Mag. Michael Naderer**

ist Produktmanager und Geschäftsführer der dynamic E flow GmbH in Kaufbeuren.

Mit dem Umbau auf Hohldrahttechnik hat dynamic E flow die Drehmomentdichte eines bestehenden Traktionsmotors aus der automobilen Großserie im Dauerbetrieb und unter Spitzenleistungen verdoppelt. Dies gelingt, weil die hohlen Spulendrähte von innen gekühlt werden. Den Nachweis führen Messungen auf den Prüfständen der Universität der Bundeswehr München. Ebenfalls bestätigt ist, dass die Maschinen bis zu 50 % kleiner gebaut werden können – Synchronmotoren (auch fremderregte) sowie Asynchron- und Reluktanzmotoren.



## INNOVATIONSSPRUNG

Hohlleiter sind im Bereich der Grenzleistungsturbogeneratoren in Kraftwerken schon seit weit über 50 Jahren Stand der Technik. Die Entwicklung ging von der Luftkühlung über die Wassermantelkühlung und die indirekte Ölkühlung bis zur direkten Hohlleiterkühlung. Diese Entwicklung wird jetzt auch beim Bau kleiner elektrischer Maschinen wichtig.

Der Einsatz von Hohldrähten (Capooltech) für das konventionelle Wickeln elektromagnetischer Spulen beweist mit aktuellen Messungen der Universität der Bundeswehr München neue Dimensionen im industriellen Elektromaschinenbau. Die signifikant höhere Materialausnutzung ermöglicht wesentliche Einsparungseffekte. Neue Leistungsdimensionen in üblichen Spannungsbereichen – aber insbesondere auch im Niedervoltbereich – können erzielt werden.

## STAND DER TECHNIK

Die Kühlung spielt für alle Antriebsmaschinen, seien es Verbrennungskraftmotoren oder Elektromotoren, für die Leistungsdichte und Materialausnutzung eine entscheidende Rolle. Im kleinen elektrischen Maschinenbau ist bisher ausschließlich die indirekte Kühlung vorherrschend. Dabei wird die Wärme an der Peripherie des Aggregats (Wassermantel, Luftrippen) möglichst nah an den Nuten, auch im Rotor (Öldurchflu-

zung) abgeführt. Mit der direkten Kühlung kann nun die kritische Wärme da abgeführt werden, wo sie entsteht.

## DIE HOHLDRAHTTECHNIK – CAPCOOLTECH

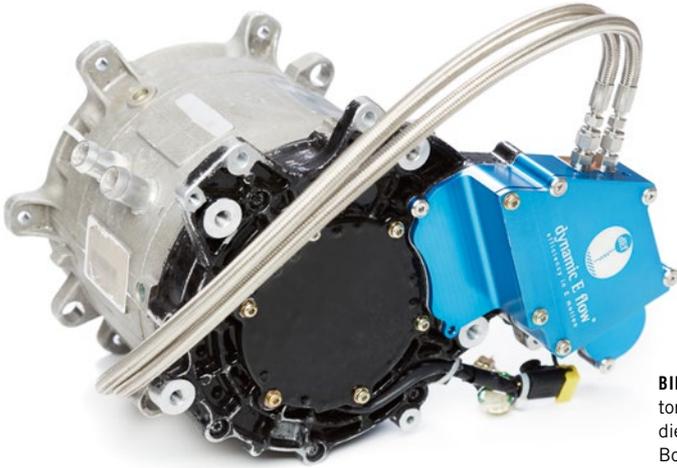
Bei der Capillaries Cooling Technology (Capooltech) werden elektromagnetische Spulen von innen gekühlt. Damit kann die Wärme effektiv abgeführt werden, was positive Effekte auf die thermische Belastung aller Komponenten eines elektromagnetischen Systems mit sich bringt. Stromdichten bis über 50 A/mm<sup>2</sup> und entsprechende Leistungen sind hier erreichbar. Der Grund liegt im hervorragenden Wärmeleitwert des Kupfers [400 W/(m\*K)], **BILD 1**, sowie einem hervorragenden Wärmeübergang auf Flüssigkeiten. Bei der indirekten Kühlung sind die Barriere der Isolation [0,4 W/(m\*K)] und der wesentlich schlechtere Wärmeübergang auf die umgebende Luft zu bedenken.

Die Capooltech ist eine übergreifende Technik und unabhängig von der gewählten Maschinentopologie einsetzbar. Sie besteht aus zwei Komponenten: dem Hohldraht mit Durchmessern zwischen 1 bis über 3 mm und der Anschlussbox (alias Capooltech-Box). Diese beiden Komponenten sind frei adaptierbar und bedingen die einwandfreie Funktion der Technik.

Die im Kupfer entstehenden Verluste können bis zu 100 % abgeführt werden.

**BILD 1** Nutvergleich und Querschnitt des Leiters mit Wärmeleitwertangaben  
(© dynamic E flow)





**BILD 2** Umgebauter Elektromotor alias B1; zu erkennen ist die zugebaute Capcooltech-Box (Blau) (© dynamic E flow)

Die Größe der möglichen Spitzen- und Dauerleistungsdichten erhöht sich dadurch signifikant. Abhängig von der abzuführenden Wärme kann die entsprechende Kühlmittelversorgung (Medium, Druck, Volumenstrom) eingestellt werden. Die Kombination mit der indirekten Kühlung für die Eisenverluste ist möglich, und je nach Einsatz sinnvoll.

Die direkte Kühlung ist in Grenzleistungsturbogeneratoren erfolgreich eingesetzt worden und Stand der Technik [1, 2]. Sie ermöglicht es, Leistungen bis über 1,5 GW in einer Einheit umzusetzen. Jede Teilwindung wird einzeln an eine Kühlmittelversorgung angeschlossen. Bei der Capcooltech wird die gesamte Windungslänge mit Kühl-

mittel durchflutet. Die elektrische Ausnutzung eines direkt gekühlten Grenzleistungs-Turbogenerators liegt in etwa beim Zehnfachen gegenüber einem luftgekühlten Aggregat. Trotz erhöhter Stromdichten haben die Wirkungsgrade dieser Maschinen aufgrund entsprechenden Designs nicht gelitten. Wirkungsgrade bei Großmaschinen liegen bei 99 %.

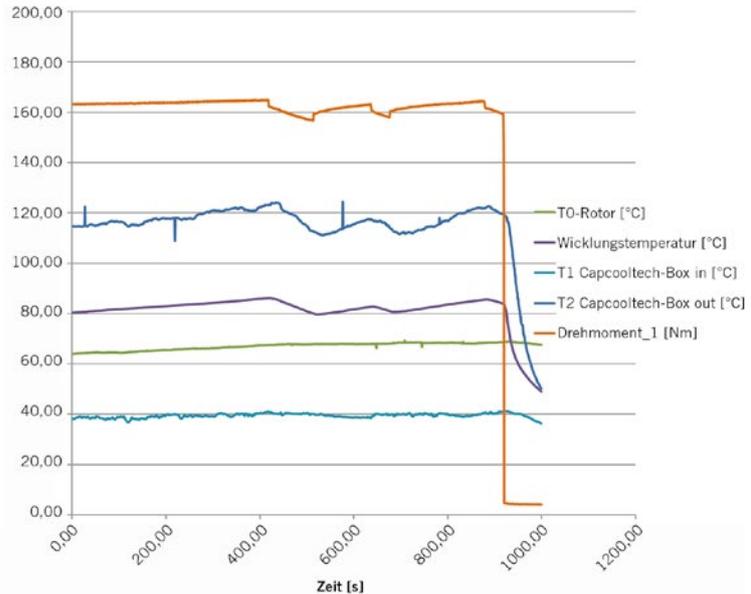
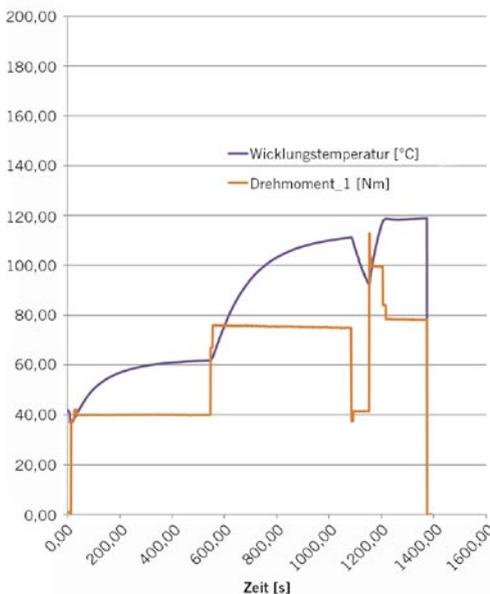
Die Stromdichte geht zwar quadratisch in die Verluste ein, aber die Reduktion des Kupfervolumens bei höherer Ausnutzung bedeutet, dass die Verluste letztendlich mit der Stromdichte nur proportional wachsen. Zudem senkt die direkte Kühlung die Wicklungstemperatur beträchtlich, was den Widerstand wieder

rum absenkt. Es wird dort gekühlt, wo entscheidende Verluste entstehen: nämlich bei der Wicklung, der über den Luftspalt benachbarten Poloberfläche, den Magneten und den benachbarten Zähnen.

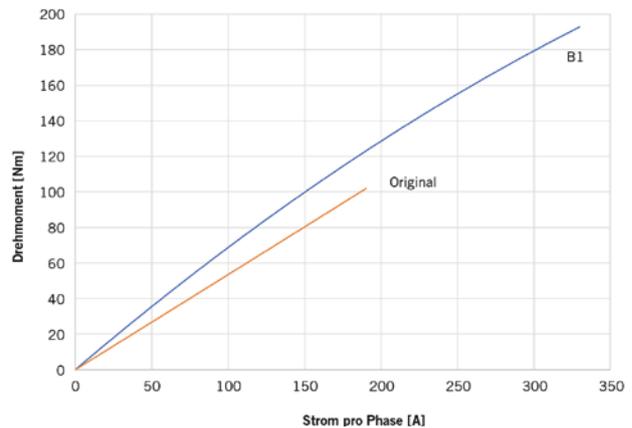
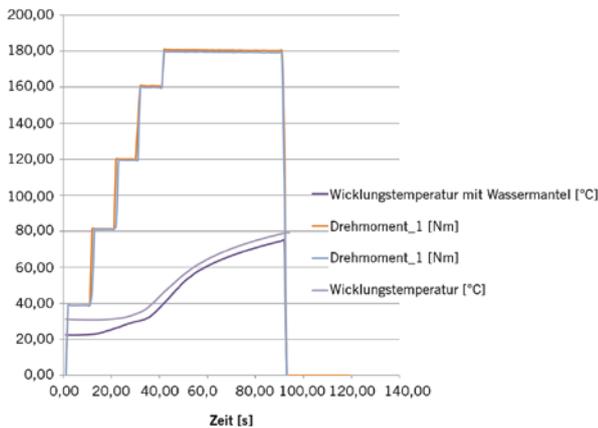
**UMBAU EINES BESTEHENDEN GROSSERIEN-TRAKTIONSMOTORS**

Zur Bewertung der Möglichkeiten der Hohl Drahttechnik wurde ein hochwertiges und weit verbreitetes Traktionsserienaggregat umgewickelt, das in Magnetkreis, Materialausnutzung und Teilkomponentenauswahl sehr gut abgestimmt ist. Das Aggregat wurde am Markt erworben und zerlegt. Die Wicklung wurde entfernt und anschließend das Blechpaket neu bewickelt. Dynamic e Flow passte auch die Anschlussbox an die Form der Maschineninfrastruktur an. Nach dem Zusammenbau wurden der Originalmotor und der adaptierte Motor (alias B1), **BILD 2**, vermessen und verglichen.

Die Ausgangsmaschine ist ein permanentmagneterregter Synchronmotor beziehungsweise ein Traktionsmotor (400 V, DC) mit einer Eckdrehzahl von 4500/min und einem gemessenen Moment von 78 Nm bei circa 120° Wicklungstemperatur. Das angegebene Spitzenmoment liegt bei 200 Nm. Das Aggregat ist wassermantelgekühlt und wiegt 30 kg. Es hat hiernach 78 Nm/30 kg = ~2,6 Nm/kg – demgegenüber



**BILD 3** Vergleich zwischen dem Originalmotor bei circa 80 Nm (links) und dem B1 (rechts) bei 165 Nm, jeweils bei 4500/min (© dynamic E flow)



**BILD 4** Drehmomenterhöhung bei 500/min (links) und das Drehmoment über dem Strom pro Phase (rechts) (© dynamic E flow)

weist der B1 wie abgebildet circa  $165 \text{ Nm}/32 \text{ kg} = \sim 5,2 \text{ Nm/kg}$  auf.

Zur Kühlmittelversorgung wurde eine in der Industrie eingesetzte Hydraulikeinheit für hohe Drücke und niedrige Volumenströme eingesetzt, die nicht für Mobilitätsanwendungen optimiert ist. Die Hohldrahttechnik erfordert fallweise relativ hohe Drücke bis über 100 bar, dafür aber sehr niedrige Volumenströme, diese sind in ml/min angegeben. Bei geringen Leiterlängen – wie in 48-V-Applikationen – sind Drücke von bis 5 bar für signifikante Leistungssteigerungen ausreichend.

Die entsprechende Anschlusstechnik (hohe Ströme, hohe Temperaturdeltas, hohe Druckdeltas, Kopplung und Entkopplung von elektrischen und hydraulischen Strömen) bildet die technische Herausforderung für den Einsatz der Hohldrahttechnik.

Es wurden circa 80 Messreihen, Leerlaufmessungen, Beharrungsmessungen sowie Spitzenbelastungsmessungen auf der Originalmaschine und dem umgebauten Aggregat durchgeführt. Das Hauptaugenmerk lag auf der Performancesteigerung des B1 und der Ermittlung der Unterschiede zum Original. Eine Randbedingung lag insbesondere auch im verfügbaren Strom der Leistungselektronik.

### BEHARRUNGS- BEZIEHUNGSWEISE DAUERMESSUNGEN

Der Originalmotor weist bei einer Drehzahl von 4500/min und 78 Nm eine Wicklungstemperatur von 118 °C auf.

**BILD 3** zeigt den Vergleich zwischen dem Originalmotor bei circa 80 Nm (links) und dem B1 (rechts) bei 165 Nm, jeweils bei 4500/min. Demgegenüber lieferte der

B1 ein Drehmoment von 165 Nm bei einer Wicklungstemperatur von 85 °C. Diese Messung wurde mehrmals auf 90/min wiederholt. Die Kühlmittelausgangstemperatur lag bei 40 °C und die Kühlmittelausgangstemperatur bei 120 °C (delta T 80 K), **BILD 3**. Die Wicklungstemperatursensoren entsprechen den standardmäßig eingesetzten Sensoren auf den Wicklungen.

Dieses Ergebnis wurde mit 70 bar und 2200 ml/min mit Wärmeträgeröl erzielt. Die Pumpe benötigt rechnerisch circa 260 W. 430 W (ohne CPU) wurden gemessen, wobei damit eine Leistung von 78 kW gefahren wurde. Die gemessene Pumpenleistung entspricht in diesem Fall 0,55 % der Leistung. Damit wurden hier circa 5,5 kW dauerhaft aus der Wicklung abgeführt.

Eine regelungstechnische Optimierung für den Zyklus kann die Verluste minimieren; Messungen mit Pumpenleistungen von schon circa 10 W zeigen ebenfalls deutliche Effekte. Der Rotor blieb auch bei dieser Belastung kalt, was insbesondere daran lag, dass die entsprechenden Wärmeströme zur Poloberfläche hin wegfallen.

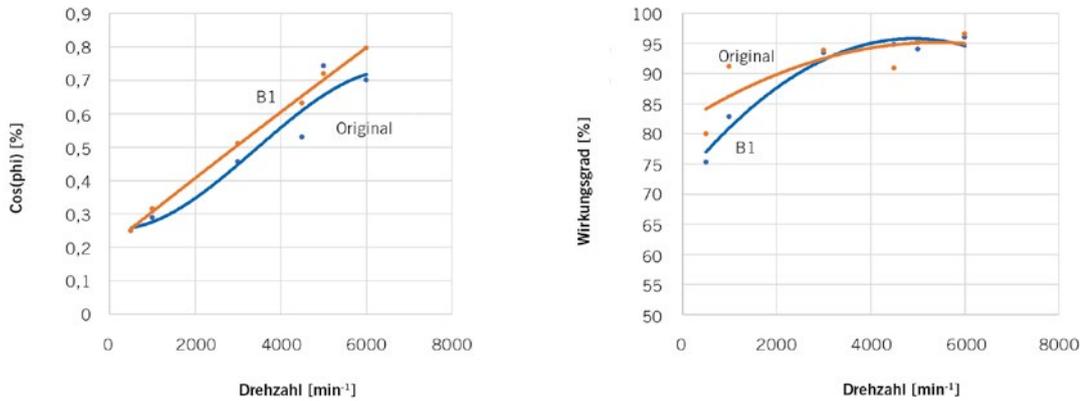
Die Kühlung führt die gesamte Wärme ab, in Leerlaufversuchen konnte auch gemessen werden, dass ein sehr kleiner Teil der Eisenverluste abgeführt werden kann. Die Spitzenmessungen bei 500/min zeigen, dass für bestimmte Kurzbelastungszyklen die Wassermantelkühlung bei entsprechender Auslegung sogar weggelassen werden kann. **BILD 4** zeigt eine Drehmomenterhöhung bei 500/min (links) und das Drehmoment über dem Strom pro Phase (rechts).

### MESSUNGEN ZUR SPITZENBELASTUNG

Das im Original angegebene Spitzenmoment kann bei der Capcooltech sozusagen als Dauermoment angegeben werden. Die möglichen neuen Spitzenmomente liegen, bei darauf abgestimmtem Maschinendesign entsprechend gleichfalls weit höher. Bei den vorliegenden Messungen wurde bei verschiedenen Drehzahlen das Drehmoment stufenweise auf 180 Nm erhöht. **BILD 4** zeigt eine Messreihe bei 500/min und einem eingestellten Druck von 50 bar und circa 1.800 ml/min im Mittel, bei gemessener Pumpenleistung von 250 W, beziehungsweise 360 W inklusive CPU. Einmal mit direkter Kühlung und Wassermantel (circa 14 l/min), einmal nur mit direkter Kühlung. Das Ergebnis zeigt, die Belastungsdynamik bekommt eine Langzeitkomponente, die Wassermantelkühlung macht einen marginalen Unterschied.

### VERGLEICH DES LEISTUNGSFAKTORS

Das Diagramm zeigt den Vergleich des Leistungsfaktors zwischen dem Originalmotor und der direktgekühlten Maschine bei 80 Nm, **BILD 5**. Der Vorteil beim B1 ist dadurch begründbar, dass die Bewicklung mit dem Hohldraht eine höhere Windungszahl möglich machte. Dabei konnte wegen der vorgegebenen Geometrie die vorhandene Nut nicht einmal ideal befüllt werden. Der magnetische Kreis beider Maschinen ist völlig ident. Die Ausgleichskurven zeigen, dass der Leistungsfaktor bei den kleinen Drehzahlen bei beiden Maschinen etwa gleich ist,



**BILD 5** Leistungsfaktor (links) und Wirkungsgrad (rechts) (© dynamic E flow)

weil die Magnete kaum zur notwendigen inneren Spannung beitragen. Das wird mit höherer Drehzahl besser. Im Feldschwächebereich gelten wieder neue Gegebenheiten, weil das Feld über den Längsstrom zusätzlich eingestellt wird.

Der Bereich des Stroms geht beim B1 bis 330 A, beim Originalmotor wegen der erreichten Grenztemperatur bis 190 A. Eine größere Belastung führt, wie bei Synchronmaschinen üblich, zu erhöhtem Magnetisierungsbedarf und damit zu einer Reduktion des Leistungsfaktors. Es zeigt sich, dass ein exaktes Wicklungsdesign mit angepasster magnetischer Ausnutzung den Magnetisierungsbedarf und damit den  $\cos(\phi)$  beziehungsweise die Gesamtausnutzung einer PSM günstig beeinflusst. **BILD 5** zeigt den Vergleich des Leistungsfaktors (links) und des Wirkungsgrads (rechts) zwischen beiden Maschinen.

Bei geringer elektrischer Ausnutzung ist das erzielbare Moment proportional zum Strom. Die Vektorregelung versucht, diesem Prinzip, das eigentlich schon von der Gleichstrommaschine her bekannt ist, regelungstechnisch gerecht zu werden, indem die Querkomponente des Strombelags optimal zum Feld ausgerichtet wird. Nun wissen wir von der Gleichstrommaschine, dass es bei großen Belastungsströmen zu einer Beeinträchtigung des Feldes kommen kann und das Moment nicht mehr linear mit dem Strom ansteigt. Dies verdeutlicht **BILD 4** (Momentenvergleich), wo der B1 auf 330 A ausgefahren wird. Die beiden Kurven zeigen den jeweiligen für den B1 und das Original aus den Messwerten ermittelten Zusammenhang zwischen Strom und Moment. Das höhere Moment ergibt sich wiederum für den B1 aus der höheren Windungszahl pro Phase – teil-

weise sogar in einem besseren Verhältnis, weil die höhere Windungszahl nicht nur einen größeren Ankerstrombelag bei gleichem Strom bewirkt, sondern auch das magnetische Feld entsprechend besser vom Stator aus unterstützt wird.

## VERGLEICH DES WIRKUNGSGRADS

Die Evaluierung des Wirkungsgrades auf Basis des bestehenden Versuchsträgers lässt indirekt Schlüsse zu, da in einen bestehenden Blechschnitt hineingewickelt wurde und dieser Ansatz damit nicht für eine Wirkungsgradoptimierung gedacht war. Aus dem B1 wird das Vielfache des Moments herausgeholt, die entsprechende Wirkungsgradveränderung kann daher messtechnisch nicht direkt mit dem Originalaggregat verglichen werden.

Selbstverständlich ist der Nutzfüllfaktor bei Direktkühlung kleiner, weil ein Teil der Leiterfläche für das Kühlmittel verloren geht. Demgegenüber ergeben kühlere Wicklungen einen wesentlich niedrigeren Widerstand. Die dickeren Leiter können als Argument wegen der Zusatzverluste ins Feld geführt werden, was zumindest bei hohen Frequenzen nicht unberechtigt ist. Allerdings kann man auch die Probleme von feindrahtig parallel geführten Leitern nicht außer Acht lassen [1], deren Schleifenströme ebenfalls Verluste verursachen. Bei vielen Teileitern in der Nut ist die Teileleitorisolierung, die nicht mehr dünner gemacht werden kann, als Verminderung des Nutzfüllfaktors zu bedenken. Und bei direkt nicht kühlbaren Stecksystemen liegen solche Herausforderungen in der Isolierung und den Zusatzverlusten bei höheren Drehzahlen.

Bei einem messtechnischen Vergleich der Wirkungsgrade darf in unserem Fall

nicht auf der Basis des Stroms verglichen werden, denn die unterschiedliche Phasenwindungszahl spielt beim Widerstand und der Momentenerzeugung eine Rolle. Die Definition des Wirkungsgrades lässt nur einen adäquaten Vergleich über die Leistungen oder die Momente zu, denn der Wirkungsgrad ist definiert über Ausgangsleistung an der Welle zur eingehenden elektrischen Leistung an den Klemmen. Durch das höhere Moment ist der Wirkungsgrad des B1 durchaus herzeigbar im Vergleich zum Originalmotor. Bei 1000/min ist der Durchsatz der Leistung gegenüber den Verlusten noch geringer, deshalb auch der moderate Wirkungsgrad beider Maschinen. Bei 4500/min hat dynamic E flow, den Messungen gemäß, sogar Vorteile beim B1. Bei 4500/min und 80 Nm hat der B1 einen Wirkungsgrad von 94,4 % gegenüber 94,1 % beim Original. Das Wirkungsgraddiagramm ergibt sich nach polynomischer Mittelung, **BILD 5**. Bei 165 Nm weist der B1 noch immer einen Wirkungsgrad von 90 % auf. Diese Vorteile gleichen sich bei höheren Eingangstemperaturen und Strömen, sowie höheren Drehzahlen und damit höheren Frequenzen wieder an. Ein zielgerichtetes Maschinendesign lässt durchaus gute Wirkungsgrade zu.

## FREQUENZ- UND LASTABHÄNGIGE ZUSATZVERLUSTE

Hinsichtlich der Frequenz und lastabhängigen Zusatzverluste (Nutzstrefeld, Poloberflächen) ist anzumerken, dass diese im hohen Drehzahlbereich beim B1, wie erwartet, stärker ansteigen; diese sind aber über die Kühlung zu beherrschen. In der vorliegenden Maschine haben die Drähte einen Außendurchmesser von 1,6 mm. Der Verlust an Kupferfüll-

lung in der Nut durch den Kühlkanal, die niedrigere Wicklungstemperatur und die geordnete Wicklung zeigen beispielsweise dennoch bei 1000/min niedrigere Zusatzverluste als beim Original. Ein geeignetes Maß zwischen Teillastbetrieb und Maximalbelastung wird bei ausgewähltem Design entsprechende Erfolge zeitigen.

Die für den Einsatz der Hohldrahttechnik benötigte Pumpenleistung ist gering. Es wurden bei den Versuchen drei Druckstufen gefahren: 70, 50 und 30 bar. Als Volumenströme wurden bei 75 °C mittlerer Kühlmitteltemperatur bei 70 bar circa 2200 ml/min und bei 50 bar circa 1800 ml/min und bei 30 bar circa 1400 ml/min gemessen. Der Leistungsbedarf der Pumpe lag jeweils bei 430, 250 und 120 W (ohne CPU).

Des Weiteren soll hier erwähnt werden, dass die Abwärme im Fahrzeug als effektive Nutzwärme verwendet werden kann. Innerhalb von wenigen Sekunden ist es möglich, das Öl in entsprechenden Temperaturen zurückzuführen, womit die Auslegung des Gesamtfahrzeugs bezüglich Heizung, Ventilation und Klima berücksichtigt werden kann. Es können auch Wärmepumpensysteme eingesetzt werden. Im gegebenen Fall wurden, wie dargelegt, bei 165 Nm Dauermoment und 4500/min mit circa 450 W Pumpenleistung circa 5,5 kW Wärme direkt aus der Wicklung herausgeführt.

## AUSBLICK

Die technische Realisierung der Hohldrahttechnik eröffnet Verbesserungspotenziale in der Automobiltechnik. Die signifikanten Material- und Kosteneinsparungsmöglichkeiten sowie die einfache Adaption der industriellen Wickeltechnik sind maßgeblich. Die E-Maschinen können bis zu 50 % kleiner gebaut werden. Das Elektromotorendesign hat damit neue Freiheitsgrade im Sinne einer Gesamtoptimierung – auch im vollelektrischen Bereich dürfte die capcooltech schon jetzt einige Prozent an zusätzlicher Batteriekapazität rechtfertigen – insbesondere wenn man auch die Nutzung der Wärme in Betracht zieht.

Der wesentliche Entwicklungsschritt wurde gemacht, weitere inkrementelle Optimierungen und Innovationen insbesondere auch für die Kühlmittelversorgung in den kommenden Jahren realisiert werden können. Elektromotoren (zum Beispiel Haupt- und Hilfsantriebe, Nebenag-

gregate), Aktuatoren (zum Beispiel Fahrwerkstabilisierung) sowie auch Transformatoren (beispielsweise induktives Laden) sowie die gesamte Elektromobilität profitieren von der Hohldrahttechnik.

Hohe Momente und hohe Leistungsdichten lassen sich direkt, ohne den Weg über Drehzahlen und Getriebe, erzielen. Das bedeutet Einsparungspotenziale und Effizienzgewinne:

- Wassermantelkühlungen können mit entsprechendem Design eingespart werden.
- Hybridantriebe profitieren durch die hohen Dauerleistungen in Downsizing und Treibstoffeinsparung, insbesondere im Nutzfahrzeugbereich.
- Die Abwärme kann als effektive Nutzwärme eingesetzt werden. Sichere Niedervoltaggregate erreichen gänzlich neue Leistungsbereiche.
- Direktantriebe werden signifikant kompakter und einfacher.

Alle Maschinentypen, auch fremderregte Maschinen sowie Asynchronmotoren und Reluktanzmaschinen, profitieren. Die

Optimierung der Systeme und die Bereitstellung damit abgestimmter Systemkomponenten erlauben einen breiten Einsatz. Es ist anzunehmen, dass sich capcooltech langfristig im automotiven Bereich als Breitentechnik durchsetzen wird.

## LITERATURHINWEISE

- [1] Bauer, D.; Nolle, E.; Reuss, H.-C.: Einfluss von Stromverdrängung bei elektrischen Maschinen für Hybrid- und Elektrofahrzeuge. Tag des kooperativen Promotionskolleg Hybrid, 11.11.2014, Stuttgart, Deutschland. Online: [http://www.ivk.uni-stuttgart.de/IVK/fileadmin/media/dokumente\\_pdf/aktuelles-veranstaltungenPaper\\_TdPKH/1.1\\_TdPKH\\_2014\\_Bauer.pdf](http://www.ivk.uni-stuttgart.de/IVK/fileadmin/media/dokumente_pdf/aktuelles-veranstaltungenPaper_TdPKH/1.1_TdPKH_2014_Bauer.pdf), aufgerufen am 20.03.2017
- [2] Fischer, F.: Thermische Fehlerdiagnose der wassergekühlten Statorwicklung von Grenzleistungsturbogeneratoren, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik der Bergischen Universität-Gesamthochschule Wuppertal, Diss. 1999. Online: <http://elpub.bib.uni-wuppertal.de/edocs/dokumente/fb13/diss1999/fischer/d139906.pdf>, aufgerufen am 20.03.2017
- [3] Online: [https://de.wikipedia.org/wiki/Turbogenerator/media/File:BalakovoNPP\\_tb.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Turbogenerator/media/File:BalakovoNPP_tb.jpg), aufgerufen am 20.03.2017



## READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge:  
[www.ATZelektronik-worldwide.com](http://www.ATZelektronik-worldwide.com)



## NovaCarts

### Investitionssichere Lösungen für anspruchsvolle Testing-Anwendungen

- » XiL-Plattform ermöglicht flexible Kombination unterschiedlicher Testphasen
- » Offene, standardisierte Schnittstellen, z. B. ASAM XIL-API, AUTOSAR
- » Umfangreiche SiL-Tests in frühem Entwicklungsstadium
- » Für innovative Anwendungsbereiche, z. B. Autonomes Fahren, Elektromobilität





[www.novacarts.de](http://www.novacarts.de)