



© Dynamic E Flow

## Prüfstandsmaschinen für die E-Motorenentwicklung

Mit der stetigen Weiterentwicklung von Hybrid- und Elektrofahrzeugen kommen neue Herausforderungen auch auf die Prüfstandtechnik zu. Die Performanceengstelle aktueller Prüfstandsmaschinen ist die abführbare Wärmeleistung. Dynamic E Flow hat daher einen Prüfstand mit einem neuen Kühlkonzept entwickelt.

Die Forderung der Automobilindustrie nach mehr Leistung und höheren Drehzahlen (bis zu 30.000/min) führt in der Prüfdienstleistung dazu, dass unter erhöhtem Aufwand Getriebe eingesetzt werden müssen, um die geforderten Lastpunkte zu realisieren.

Derzeit gibt es keine Prüfstandsmaschinen mit hohen Drehzahlen und hohen Momenten. Dies liegt an den physikalischen Grenzen des Rotors. Da hohe

Drehzahlen hohe Zentrifugalkräfte zur Folge haben, steigt die Materialbelastung mit steigender Drehzahl stark. Um konstruktiv die Kräfte zu minimieren, werden Rotoren mit besonders kleinem Durchmesser angestrebt. Das hohe Drehmoment muss somit über eine größere aktive Länge erkauf werden. Gleichzeitig erfordert die hohe Drehzahl einen besonders steifen Rotor, sodass die biegekritischen Resonanzfrequenzen bezie-

ungsweise Resonanzdrehzahlen über dem regulären Betriebsbereich liegen. Hohe Steifigkeit wird durch kurze Entfernungen zwischen den Lagerstellen, also durch eine kurze aktive Länge erreicht. Dieser Anforderungskonflikt führte bisher zur Spezialisierung der Prüfstandsmaschinen entweder auf hohe Drehzahlen oder auf hohe Drehmomente.

Die hochdynamischen Permanentmagnet-Synchron-Prüfstandsmaschinen von

AUTOR



**Michael Naderer**  
ist Geschäftsführer der Dynamic E Flow GmbH in Valley.

Dynamic E Flow (DEF) lösen den Anforderungskonflikt durch Anwendung einer neuen Motorkühlung. Durch eine bessere Kühlung kann eine elektrische Maschine – bei gleichem Drehmoment – so kompakt ausgelegt werden, dass deutlich höhere Drehzahlbereiche abgedeckt werden können. Je länger die Welle ist, umso niedriger ist die Resonanzfrequenz/Steifigkeit.

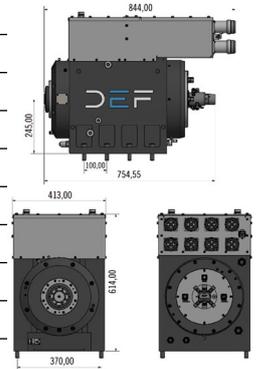
Die DEF setzt zum Testen der Prüflinge auf die HC400-Prüfstandsmaschinen-Baureihe, die unabhängig von Umrichterherstellern Drehmomente bis 800 Nm und gleichzeitig Drehzahlen bis 25.000/min erreichen kann. Dadurch können verschiedenste Prüflinge auf einem Prüfstand getestet werden. Zurzeit zählt die Baureihe drei Maschinentypen, die unterschiedliche Drehmoment- und Strombereiche abdecken. Alle Maschinen teilen sich die gleiche Rotor- und Magnettopologie, welche eine hohe Drehzahlfestigkeit, Lebensdauer und Anschlussbelastung garantierten, **TABELLE 1**.

Zur Steigerung der Kühlleistung wird die selbst entwickelte Hohlleitertechnik, genannt Capcooltech, verwendet. Durch Einsatz der Hohldrahttechnik können Stromdichten bis über 70 A/mm<sup>2</sup> dauerhaft in der Wicklung realisiert werden. Dies ist eine Steigerung der Stromdichte um Faktor 2 bis 3, verglichen mit etablierten Kühlmethode wie beispielsweise der reinen Wassermantelkühlung. Die Stromdichte geht zwar quadratisch in die Verluste ein, aber die Reduktion des Kupfervolumens bei höherer Ausnutzung bedeutet, dass die Verluste mit der Stromdichte nur proportional wachsen.

### DIE CAPCOOLTECH-TECHNOLOGIE

Die Capillaries-Cooling-Technologie (Capcooltech) ist ein simpler Ansatz. Die Spulen einer E-Maschine werden mit einem hohlen Draht gewickelt. Dieser hohle Draht wird als Strom- und Kühlmittelleiter verwendet. Durch die zentrische Öffnung im Draht wird Kühlmittel geführt. Dadurch steht das Kühlmedium in direktem Kontakt zur Hauptwärmequelle des Motors (der Kupferwicklung). Der Wärmestrom muss somit nur einen äußerst kurzen Weg durch das Kupfer selbst von der Wärmequelle zur Wärmesenke überwinden. Da neben dem kurzen Weg auch der Transit durch jegliche (Wärme-)Isolatoren wie die elektrische Isolationsschicht vermieden wird, zeigt Capcooltech auch

Spezifikation	Einheit	Wert
Breite	mm	400
Höhe	mm	534
Länge	mm	762
Achshöhe	mm	245
Gewicht	kg	580
Nennspannung	V <sub>rms</sub>	495 bei 25.000/min
Leerlaufspannung	V <sub>rms</sub>	687 bei 25.000/min und 25 °C
Nennstrom	A <sub>rms</sub>	1.180
S6-Überlaststrom	A <sub>rms</sub>	1.220
S1-Leistung	kW	637
S1-Nennmoment	Nm	580 240 bei 25.000/min
S6-Drehmoment	Nm	600
Nenn Drehzahl	1/min	10.500
Maximale Drehzahl	1/min	25.000
Rotor Massenträgheit	kgm <sup>2</sup>	0.092
Minimale Inverter-Schaltfrequenz	kHz	12
Anzahl der Polpaare	-	2
Motortyp	-	Permanentmagnet-Synchronmotor

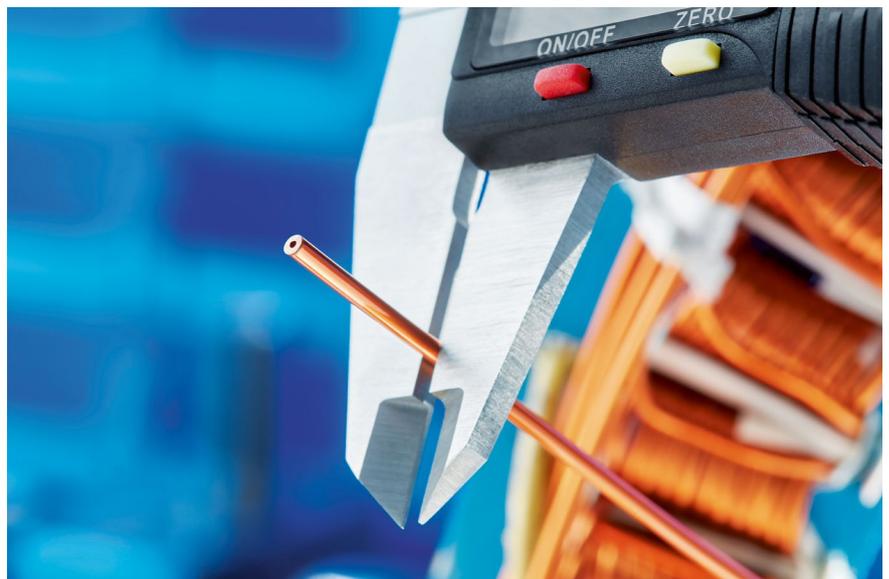


**TABELLE 1** Spezifikation des Motors der HC400-Baureihe (© Dynamic E Flow)

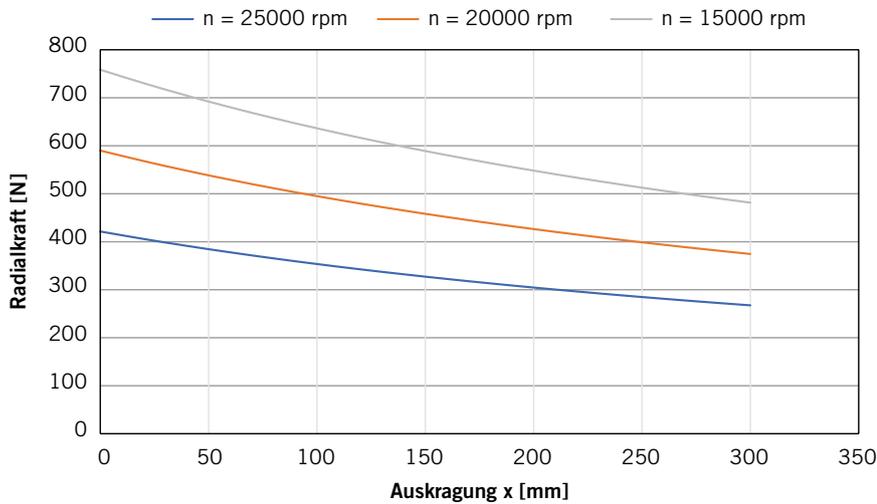
einen kleineren Wärmetransportwiderstand als neu entwickelte, konkurrierende Direktkühlkonzepte.

Die Herstellung der Wicklung unterscheidet sich trotz der neuen Kühlmethode nicht grundlegend von der Herstellung konventioneller Wicklungen. Der

Hohldraht, **BILD 1**, kann auf bestehenden Werkzeugen in alle bestehenden Wicklungstypen geformt werden. Neben Einzelzahnwicklungen, sowie einlagigen und mehrlagigen verteilten Wicklungen, ist auch die Herstellung von Hohldraht-Hairpin-Motoren eine Option.



**BILD 1** Die Spulen der elektrischen Maschine werden mit einem Hohldraht gewickelt, der in alle bestehenden Wicklungstypen geformt werden kann (© Dynamic E Flow)



**BILD 2** Maximal zulässige externe Kräfte auf die Welle in Abhängigkeit der Entfernung zum Wellenende (© Dynamic E Flow)



**BILD 3** Hydraulikaggregat für HC 430-054 (© Dynamic E Flow)

## AKTIVTEILE UND KÜHLUNG

Die HC400-Statorwicklung ist als verteilte Wicklung ausgeführt, wie sie in hochdrehenden Maschinen üblich ist. Je nach Größe der Maschine sind Leistungen von 600 kW bis 1000 kW möglich. Die Maschinen sind für eine max. Drehzahlen bis 29.000/min ausgelegt. Aus den Aktivteilen kann mit einem einstellbaren Temperaturdelta die komplette Wärmeleistung, die elektromagnetisch entstehen kann, abgeführt werden. Damit sind Probleme durch Wärmeeintrag in Lager und Mechanik gelöst. Über eine Mantelkühlung mit Kühlflüssigkeit können alle frequenzabhängigen Eisenverluste abgeführt werden. Für gewöhnlich soll die Mantelkühlung gleichzeitig die Kupferverluste abführen, weshalb in E-Maschinen die Einstellung eines thermisch stationären Gleichgewichts oft lange dauert.

Die Wellen aller Maschinen sind besonders steif und robust ausgeführt. Die Welle wird von innen mit einer Wasser-Glykol-Mischung gekühlt. Die Lager verwenden nach den Konstruktionsprinzipien der Werkzeugmaschinen-Spindeltechnik eine Öl-Luft-Schmierung, die gleichzeitig kühlt. Die Lagerung wurden für eine Lebensdauer von 7.000 Betriebsstunden unter besonders hohen Radialkräften ausgelegt. Somit sind alle Baugruppen, die im Betrieb Wärme erzeugen, direkt beim Wärmeübergang mit der entsprechenden Kühlung ausgestattet, was eine bis dahin unerreichte Leistungsdichte und Dynamik erlaubt.

**BILD 2** zeigt die zulässigen Lasten, Auskräglängen und Drehzahlen zur Erreichung der Lebensdauer.

Die Hochlaufmessungen der bereits ausgelieferten Maschinen zeigen den Effekt dieses kombinierten Kühlsystems. Unter Vollastbedingungen konnte eine maximale Kupfertemperatur von unter 110 °C zeitlich unbegrenzt gehalten werden. Trotzdem wird jede Prüfstandsmaschine mit Temperatursensoren versehen. Die Sensoren sind über alle Phasen der Wicklung, sowie Rotortemperatursensoren welche die Temperaturentwicklungen in allen Bauteilen in Echtzeit überwachen verteilt, sodass auch bei permanentem Hochlastbetrieb eine Überhitzung unter allen Umständen ausgeschlossen werden kann.

Die Rotorsensorik wird dabei durch eine kontaktlose Signalübertragung aus-

gelesen. Die kontaktlose Signalübertragung konnte in Zusammenarbeit mit den jeweiligen Herstellern in die angeflanschte Drehmomentenmesswelle integriert werden.

Neben der passenden Drehmomentenmesswelle bietet DEF eine Hydraulikversorgungseinheit an, **BILD 3**, welche direkt auf die Bedürfnisse der Maschine angepasst wird. Die Hydraulikversorgung kann neben der Ansteuerung der Hohlleiterkühlung auch die Versorgung der Wellen- und Wassermantelkühlung übernehmen. In diesem Fall beschränkt sich das prüfstandsseitige Interface auf den Kühlwasseranschluss, die Versorgung mit elektrischer Leistung sowie Druckluft. Alles Weitere wird von der Hydraulikversorgung selbst übernommen. Das Titelbild des Artikels zeigt das Hydraulikaggregat eines Prüfstandsbaus bei der Firma APL Landau mit einem HC 430-045. Wie auch die Maschine selbst wurde die Hydraulikversorgung von DEF selbst entwickelt und produziert.

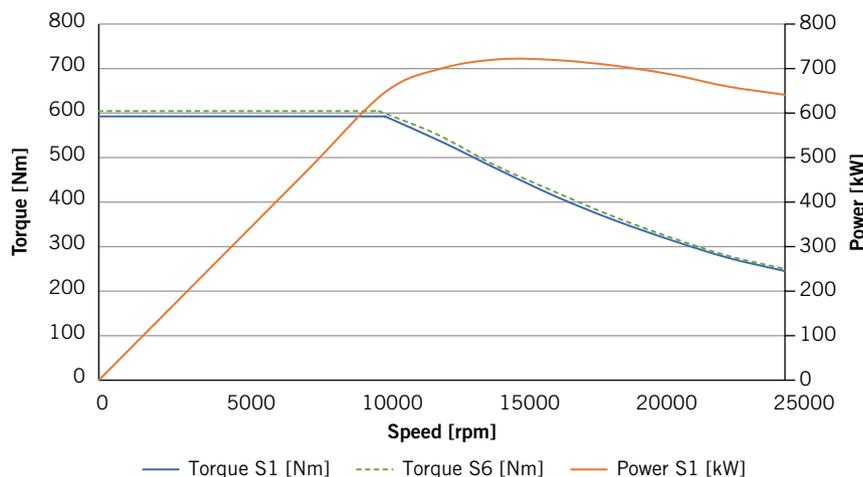
## BAUREIHENENTWICKLUNG

Die HC400-Baureihe zählt zum aktuellen Zeitpunkt drei Maschinentypen, die schrittweise aus der vorherigen Maschine entwickelt wurden. Der erste Maschinentyp HC430-054 erreichte mit  $1.000 A_{\text{rms}}$  Phasenstrom und 750 V Zwischenkreisspannung ein Drehmoment von 460 Nm, eine Leistung von 605 kW und eine Maximaldrehzahl von 25.000/min.

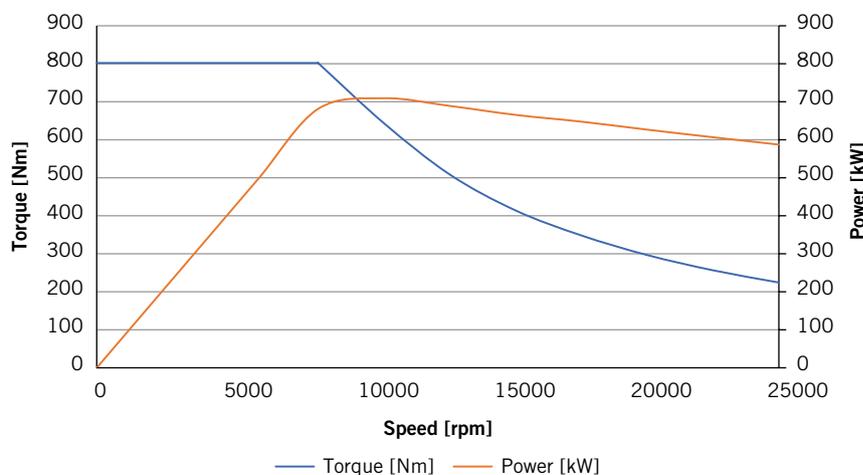
Durch weitere Optimierung des Designs konnte ein Uprating dieser Maschine auf  $1.180 A_{\text{rms}}$  Phasenstrom bei gleicher Zwischenkreisspannung vorgenommen werden, sodass ein maximales Drehmoment von 600 Nm realisiert werden kann.

**BILD 4** zeigt die Maximalkennlinie der HC430-054-Maschinen.

Maschinen dieses Typs nutzen eine zweilagige, verteilte Hohlleiterwicklung, die in einen geschrägten Stator eingelegt wird. Das Wickelschema sowie die Schrägung sorgen für einen ruhigen Lauf mit besonders niedrigen Torque-Rippeln. Durch die niedrigeren Wicklungstemperaturen sowie ein mehrschichtiges Isolationskonzeptes sind diese Maschinen besonders resistent gegen Teileentladung und Isolationsdurchschläge. Das Verröbeln der Drähte hält die Wechselstromverluste in den Leitern klein und steigert den Wirkungsgrad.



**BILD 4** Kennlinie der HC 430-054 (© Dynamic E Flow)



**BILD 5** Kennlinie HC 450-144 Niedervolt (© Dynamic E Flow)

Als Nachfolger zur HC430-054 entstand die Modellvariante HC450-144. Durch Anpassungen am Design der Aktivteile liefert diese Maschine ein maximales Drehmoment von 800 Nm und eine Maximalleistung von 700 kW. Die Maximaldrehzahl von 25.000/min kann trotz der Leistungssteigerung beibehalten werden. Abhängig von dem am Prüfstand verfügbaren Umrichter kann eine Hochvolt-Variante gewählt werden, die anstatt der bisherigen Zwischenkreisspannung von 700 VDC eine Zwischenkreisspannung von 900 VDC benötigt, allerdings das maximale Drehmoment schon bei einem Phasenstrom von  $1.130 A_{\text{rms}}$  liefert. Die Niedervolt-Variante benötigt einen Phasenstrom von  $1.700 A_{\text{rms}}$ , **BILD 5**.

Die geplante HC600-Baureihe soll den Betriebsbereich bis zu einem maximalen Drehmoment von 1.200 Nm und

einer Maximaldrehzahl von 20.000/min abdecken.

## ZUSAMMENFASSUNG

Durch den Einsatz von Hohl Drahttechnik können die physikalischen Grenzen in E-Maschinen noch mehr ausgereizt werden. Aktivteile werden somit kleiner gebaut und dadurch höhere Drehzahlen realisiert. Die Kombination von Hohlleiterkühlung und Bauteilen aus der Spindel haben sich als geeignete Ansatz für Lastmaschinen im Prüfstandsektor erwiesen.



DIESER BEITRAG IST IM E-MAGAZIN VERFÜGBAR UNTER:

[www.emag.springerprofessional.de/atz](http://www.emag.springerprofessional.de/atz)