

Die vollständige Bauteildurchleuchtung verspricht eine enorme Performance-Steigerung für Elektromotoren.

Vollständige CTs komplexer Bauteile

Gegossene Rotoren für den elektrischen Asynchronmotor

Die Elektromobilität stellt die Automobilbranche vor viele neue Herausforderungen und neue Komponenten benötigen manchmal auch neue Prüfmethode, um Funktionalität und Sicherheit zu gewährleisten. Nun ist erstmals der CT-Blick in das Innenleben gegossener Rotoren gelungen.

VON CHRISTOPH PILLE, BREMEN UND
GABRIELE MÄURER, HAMBURG

Die Kenntnis, dass gießtechnisch hergestellte Rotoren für elektrische Asynchronmotoren vielfach unter Lunkern und Porosität leiden, ist ebenso alt wie die Technologie zum Gießen von Rotoren selbst. Bei einer sogenannten Asynchronmaschine (Bild 1), wie sie beispielsweise im AUDI e-tron zum Einsatz kommt, wird der Rotor vom elektrischen Feld der Spulen angetrieben und

überträgt die im Elektromotor erzeugte Kraft über die Welle auf die Räder. Eine gesicherte Material- und Produktqualität ist entsprechend wichtig, damit das Elektroauto höchste Performance und Fahrspaß bietet. Während im Bereich der Industrieantriebe jahrzehntelang die Kenntnis über Gussfehler in Rotoren akzeptiert war und geringe Leistungsverluste vernachlässigt werden konnten, stellt seit dem rasanten Wachstum in der Elektromobilität der Bereich Automotive deutlich höhere Anforderungen an Qualität und

gesicherte Performance. Hier laufen Forschung und Entwicklung auf Hochtouren und Partnerschaften finden Lösungen, die die aktuellen Grenzen des Machbaren deutlich verschieben.

Gießen von Rotoren für Asynchronmotoren

Gegossene Rotoren werden vorzugsweise im Aluminium-Druckgießen hergestellt. Gegossen wird dabei ein zylindrisches Stahlblechpaket mit axial durchgängigen

Audi e-tron S

Twin-Motor
Twin motor
02/20



Bild 1: Schematische Darstellung eines Elektromotors mit gegossenem Rotor.

Aussparungen, den elektrischen Nutleitern. Diese werden aus einzelnen, zumeist 0,3 – 0,8 mm dicken gestanzten Elektroblechen gestapelt. Beim Gießen wird zunächst ein stirnseitiger Kurzschlussring an das Blechpaket angegossen, über den anschließend nahezu zeitgleich alle Nutleiter mit Schmelze durchströmt und ausgefüllt werden, die abschließend den gegenüberliegenden zweiten Kurzschlussring füllen.

Aufgrund ihrer hohen Wandstärke neigen die Kurzschlussringe zu erstarrungsbedingten Lunkern, insbesondere der dem Anguss gegenüberliegende Kurzschlussring kann kaum noch über den Anguss nachverdichtet werden. Denn durch die hohen thermischen Verluste beim Durchströmen der vergleichsweise dünnen Nutleiter verliert die Aluminiumschmelze schnell Temperatur und es können sich Vorerstarrungen im Nutleiterbereich innerhalb des Blechpaketes bilden. Nicht zuletzt bedingt das Gießen mit hochreinem „Rotorenaluminium“ in der Qualität 99,5 – 99,7 ein kurzes Erstarrungsintervall, das im Gegensatz von höher legiertem Aluminium kaum Zeit zur Nachverdichtung und Vermeidung von erstarrungsbedingten Lunkern lässt.

Qualitätsprüfung gegossener Rotoren

Eine zerstörungsfreie Qualitätsprüfung von Rotoren war bislang limitiert auf zwei Methoden, den experimentellen Prüfstand und die Durchleuchtung. Die elektrische Leistungsprüfung auf speziellen

Prüfständen liefert zwar Rückschlüsse über die effektive Leistungsfähigkeit, jedoch keinen direkten Anschluss über die Gussqualität bzw. Gussfehler. Die für die Hersteller wichtige bildgebende Prüfung mittels Computertomografie hingegen war bislang beschränkt auf eine Durchleuchtung der außen freiliegenden Kurzschlussringe aus Aluminiumguss, deren Materialdichte mit $2,7 \text{ g/cm}^3$ vergleichsweise gering ist gegenüber dem dickwandigen inneren Blechpaket aus Stahl (Dichte $\sim 7,6 \text{ g/cm}^3$). Diese Kurzschlussringe sind jedoch elektrisch betrachtet von nachrangigem Interesse.

Wesentlich wichtiger und aus elektrischer Sicht kritischer ist die Detektion von Defekten in den Nutstableitern aus Aluminiumguss, die innerhalb des Blechpaketes verborgen liegen und die beiden äußeren Kurzschlussringe

elektrisch miteinander verbinden. Liegen hier Gussfehler vor, die zu Verengungen des effektiven Leiterquerschnitts führen oder gar zu unterbrochenen Nutstäben aufgrund von Kaltläufen oder eingeschlossenen Fließfront-Oxidschichten,

GRAFIK: AUDI AG



FOTO: YXLON

Bild 2: Der von YXLON International entwickelte und gefertigte Zeilendetektor CTScan-3.

dann leidet unmittelbar die elektrische Performance des gesamten Motors inkl. thermischer Probleme. Das heißt, Gussfehler und Inhomogenitäten in diesen Bereichen führen zu Leistungsverlusten sowie einseitigem magnetischem Zug und damit zu einer ungleichen Drehung des Rotors. Damit einhergehen können erhöhte Lagerbelastung und Schäden an der elektrischen Maschine, insbesondere bei hohen Drehzahlen. Ein vollständiger CT-Scan eines Rotors ist also wünschenswert, war aber aufgrund der ungünstigen Materialpaarung aus Stahlblechpaket, hoher Dichte und Aluminiumguss-Nutleitern geringer Dichte bisher nicht umsetzbar.

Computertomografie-System YXLON-FF85-CT

Das Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM beschäftigt sich langjährig mit der gießtechnischen Herstellung und Qualitätssteigerung von Rotoren. In Zusammenarbeit mit YXLON International wurden erstmalig Rotoren in Größe elektrischer Pkw-Traktionsantriebe im neuen Computertomografie-System YXLON-FF85-CT erfolgreich mit 600 kV und dem hochauflösenden Zeilendetektor YXLON-CTScan-3 gescannt und Einblicke in die inneren Details eines Druckguss-Rotors gewonnen, die bislang nicht möglich waren.

Der von YXLON International entwickelte und gefertigte Zeilendetektor CTScan-3 (Bild 2) wurde bereits 2018 eingeführt und erstmals im Computertomografie-System CT-Compact eingesetzt. Durch maschinelle Unterstützung beim Schneiden der Kristalle ist die Gleichförmigkeit der Kristalle um den Faktor 5 verbessert worden. Dies führt zur Reduzierung von Ringartefakten und die hohe Wiederholbarkeit des Signals erlaubt eine optimale Kalibrierung. Aufgrund des hö-

heren Dynamikumfangs und der besseren Signalstabilität ist ein größerer Materialdickenbereich bei gleicher Röntgenphotonenenergie prüfbar. Das massive Gehäuse ist besonders unempfindlich gegenüber Temperaturschwankungen und sorgt für eine optimierte Kühlung der Elektronik. Gleichzeitig sorgt diese Materialkomposition für eine sehr geringe Streustrahlung innerhalb des Detektors, was zu wesentlich schärferen Bildern, sauberen Kanten und einer stark verbesserten Detailerkennbarkeit führt (Bild 3).

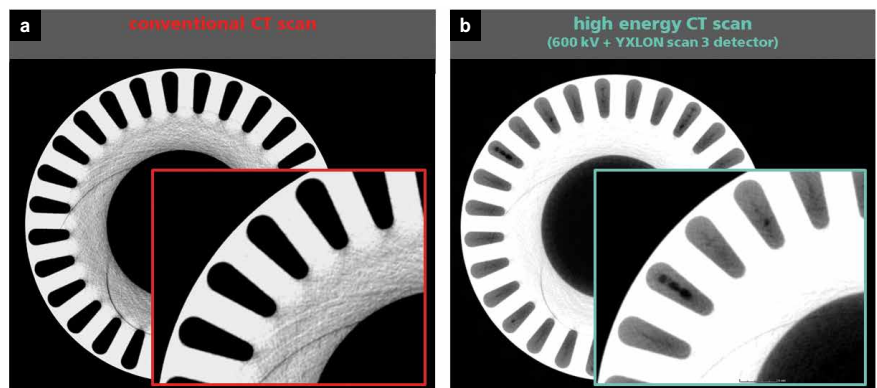
Qualitätsvorhersage und -anpassung

Dieser neue Erfolg bei der bildgebenden Qualitätsprüfung durch den hochauflösenden Zeilendetektor YXLON-CTScan-3 ermöglicht nun neue Wege in der Entwicklung und Serienfertigung gegossener Rotoren. Bisher war die Auslegung von Gießwerkzeugen auf klassische Simulationen zur Formfüllung und Erstarrung beschränkt. Zukünftig können aber bereits in der frühen Prototypenphase abgegossene Musterteile Aufschluss geben, ob Angusskonzepte zum gewünschten Ziel führen und ob sich veränderte Prozesspa-

rameter zur Reduzierung der Gussfehler auswirken. Ebenso kann eingeschlossene Gasporosität erkannt werden, die aufgrund von Abbrand bzw. thermischer Ausgasung der Elektroblech-Isolationsbeschichtung beim Gießen entstanden ist. Begleitend zur Serienfertigung ist es möglich, anhand von Stichproben die Einhaltung der Qualität zu kontrollieren sowie Veränderungen durch Werkzeugverschleiß oder aufgrund von Änderungen in der Lieferqualität der Elektrobleche frühzeitig zu erkennen.

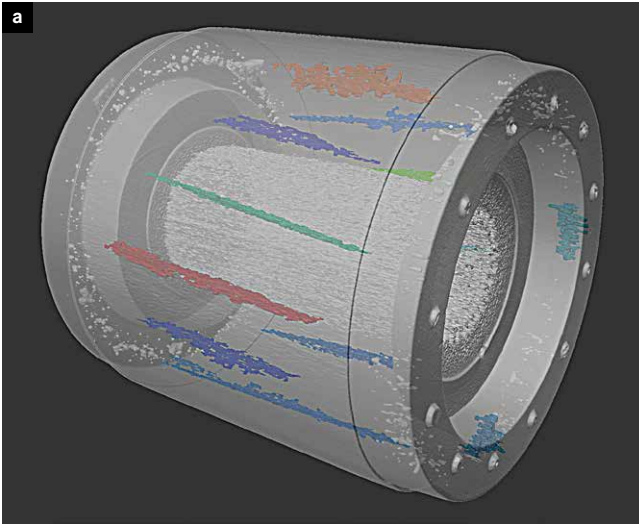
Ein weiterer Zukunftsschritt für die Rotorenprüfung kann ab jetzt mithilfe der 3-D-Darstellung der Gussdefekte gegangen werden (Bild 4). Am Fraunhofer IFAM wird an der computerbasierten Vorhersage der realen Performance von Rotoren unter Berücksichtigung der Gussfehler gearbeitet. Hierzu wird das zuvor gescannte Porositäts-Modell des Rotors in eine Software eingelesen, mit der die Auswirkungen der durch Poren, Lunker und Gießfehler reduzierten elektrischen Leiterquerschnitte in den Nutstableitern in einem Simulationsmodell untersucht werden. Die berechneten reduzierten Leistungswerte lassen sich mit denen eines idealen Rotors vergleichen. Auf diese Weise soll ein „Ausschussfaktor“ ermittelt werden, bis zu welchem Grad an Gussdefekten ein Rotor noch die geforderten Leistungswerte liefert.

Unterschiede in der Fehlerverteilung („homogene Feinverteilung“ vs. „lokal inhomogene Anhäufung“) wirken sich dabei nicht nur auf die elektrische Performance, das Drehmoment sowie die Entwärmung aus. Auch die sog. Magnetische Exzentrizität ist ein Resultat ungleich verteilter Porosität im Rotor. Aus mechanischer Sicht werden diese resultierenden Unwuchten derzeit auf einfache Weise aufgehoben, indem die Rotoren analog zum „Räderwuchten“ individuell vermessen und gewuchtet werden. Aus elektrischer



GRAFIK: YXLON / FRAUNHOFER IFAM

Bild 3: a) Konventioneller CT-Scan eines Rotors mit unzureichender Auflösung der Nutstableiter. b) CT-Scan von YXLON International mit 600 kV Leistung und Zeilendetektor CTScan-3, der die axial durchgängigen Fadenlunker im Nutstab zeigt.



GRAFIK: YXLON / FRAUNHOFER IFAM

Bild 4: a) Dreidimensionale Darstellung der Gussdefekte und Fehlerverteilung aus der High-Energy-CT. b) Foto des optisch vermeintlich fehlerfreien Rotors.

Sicht ist das Problem jedoch bisher nicht gelöst, weil inhomogene Nutstableiter zu einem einseitigen „magnetischen Zug“ führen und der Rotor im Betrieb ungleich dreht. Welligkeiten im Drehmoment, unruhiger und akustisch auffälliger Lauf v.a. bei hohen Drehzahlen und erhöhte Lagerbelastung der Rotorwelle sind die Folgen.

Dieser Beitrag wurde erstmalig veröffentlicht in englischer Sprache bei Inspect International, Subscription Number 247, <https://www.inspect-online.com/en/magazine>.

Christoph Pille, Gruppenleiter Gusskomponenten Elektromobilität, Fraunhofer In-

stitut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, Bremen und Gabriele Mäurer, Regional Sales Manager & Key Accounts, YXLON International, Hamburg

*www.ifam.fraunhofer.de/casting,
www.yxlon.com*