Herstellung von Kupferrotoren durch Druckgießen

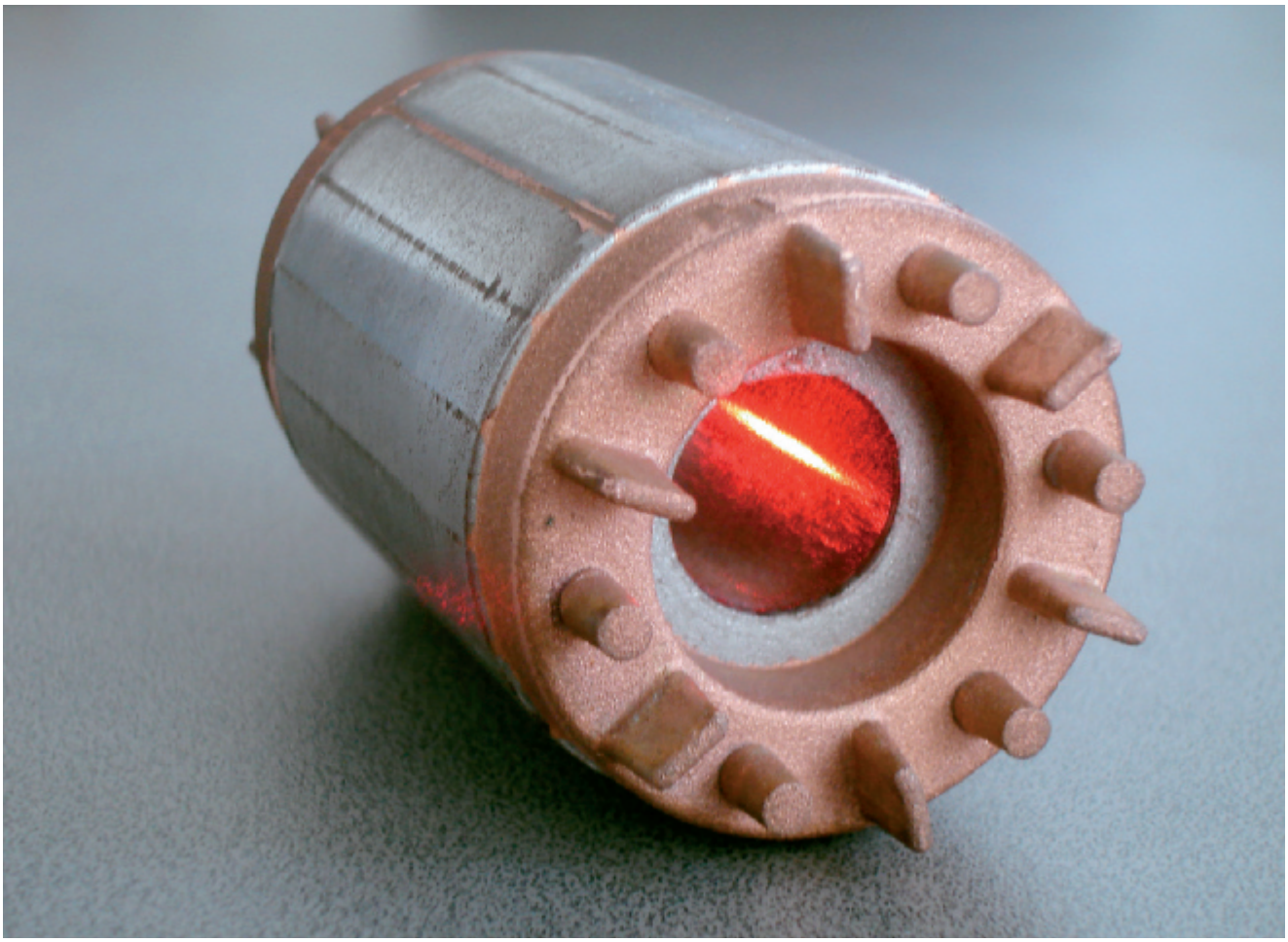


FOTO: FH AALEN

Prinzipiell ist es möglich, Kupferrotoren im Druckgießverfahren mit sehr guter elektromechanischer Qualität herzustellen.

VON LOTHAR H. KALLIEN, THOMAS WEIDLER UND JENS KIMMER, AALEN

Nach einer Analyse des Zentralverbandes Elektrotechnik- und Elektronikindustrie bietet die elektrische Antriebstechnik mit Energiesparmotoren und drehzahlgeregelten Antrieben ein großes Energieeinsparungspotential. Allein im industriellen Bereich könne der Verbrauch pro Jahr um 27 Mrd. kWh reduziert werden. Das entspricht elf Kraftwerksblöcken der 400 MW-Klasse. Somit könnten die Stromkosten der Anwender durch eine energieeffizientere Antriebstechnik um 2,2 Mrd. Euro reduziert werden. Es erfordere lediglich ein höheres Anfangsinvestment, das durch die Energieeinsparung bereits in ein bis zwei Jahren kompensiert werde [1].

Bereits im Jahr 1998 haben die europäischen Hersteller eine freiwillige Vereinbarung mit der EU-Kommission zur Markteinführung von Energiesparmotoren getroffen. Dazu wurde ein System mit den Klassenbezeichnungen EFF3 für Standardmotoren sowie EFF2 und EFF1 für höher effiziente Motoren entwickelt. Dabei werden die besseren Wirkungsgrade durch den Mehreinsatz von Kupfer für die Statorwicklung und Elektroblech erkauft. Heute entsprechen bereits über 85 % der europaweit verkauften Standard-Drehstrommotoren im relevanten Leistungsbereich 1 kW bis 100 kW der Klasse EFF2. Der Bedarf an EFF1-Motoren ist noch nicht so hoch, da die Mehraufwendungen erst ab etwa 4000 Betriebsstunden pro Jahr ökologisch als auch ökonomisch sinnvoll wären [1].

Funktionsweise von Drehstrom-Asynchronmotoren

Drehstrom-Asynchronmotoren sind heute die einzigen rotierenden elektrischen Maschinen, bei denen die Übertragung der elektrischen Energie auf den Rotor nicht elektromechanisch, sondern rein induktiv erfolgt. Stator und Rotor des Asynchronmotors sind mit den Teilen eines Transformators vergleichbar, allerdings ist der Sekundärteil dabei drehbar angeordnet [2].

Die für die Spannungsinduktion in der Rotorwicklung erforderliche Magnetflussänderung wird vom Stator durch ein umlaufendes Feld (Drehfeld) erzeugt. Von dieser Eigenschaft, in einem stillstehenden Gehäuse ein sich drehendes Magnetfeld zu erzeugen, hat der Drehstrom seinen Namen erhalten. Da der Rotor eine Wicklung ohne eigene Stromzufuhr hat, läuft dieser etwas langsamer als das vom Stator erzeugte Drehfeld. Man sagt, er läuft asynchron. Daher auch die Bezeichnung Asynchronmaschine [3].

Aufbau eines Drehstrom-Asynchronmotors

In seiner einfachsten Form besteht ein Rotor heute aus Kupfer-, Bronze- oder Aluminiumstäben, die unisoliert in die Nuten des Magnetmaterials eingebettet und an den beiden Stirnseiten mit Ringen gleichen Materials verbunden, d. h. kurzgeschlossen, sind. Einen solchen Rotor bezeichnet man als Kurzschlussläufer. Damit stellt dieser einen einfachen, mechanisch widerstandsfähigen und betriebssicheren Rotor dar. Sein Name ist von der dauernd kurzgeschlossenen Wicklung abgeleitet. Die Leiterstäbe mit den Kurzschlussringen bilden einen Käfig, nach dem der Läufer oft auch als Käfigläufer und die dazugehörige Wicklung als Käfigwicklung bezeichnet wird (**Bild 1**) [2].

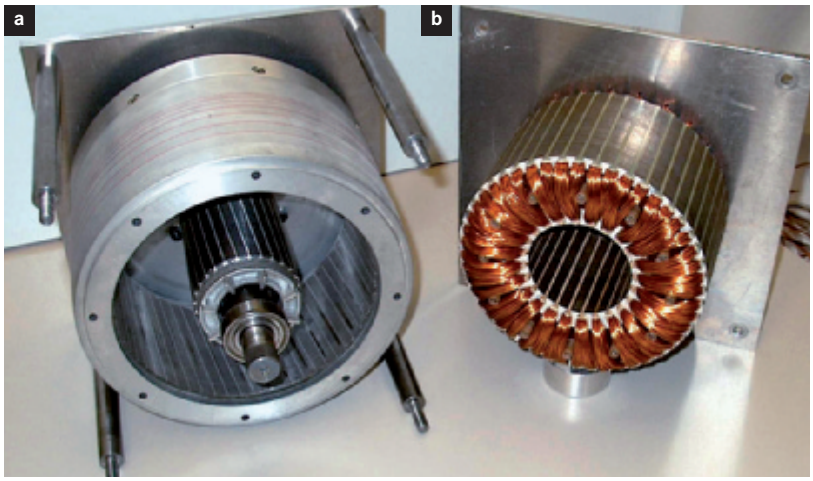


Bild 1: Aufbau eines Drehstrom-Asynchronmotors mit Innen- (a) und Außenläufer (b)

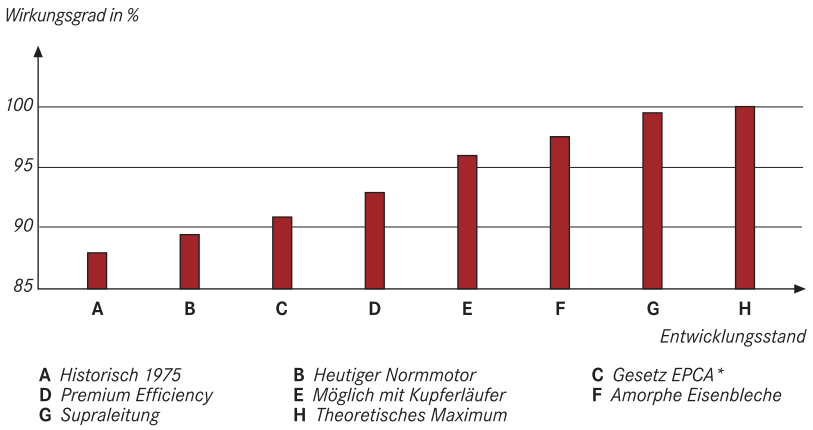


Bild 2: Vergleich der Wirkungsgrade von Drehstromasynchronmotoren nach verschiedenem Entwicklungsstand [5]

**(EPCA) Energy Policy and Conservation Act, US-Gesetz, das für Standardmotoren in Abhängigkeit von Leistung und Polzahl Mindestwirkungsgrade vorschreibt.*

Vorteile von Drehstrom-Asynchronmotoren

Die Vorteile von Asynchronmotoren können wie folgt zusammengefasst werden:

> Lange Lebensdauer (Dauerbetrieb), wartungsarm, kein Bürstenverschleiß;
> kurzzeitig stark überbelastbar; nahezu konstante Drehzahl unter Last, kein Überdrehen im Leerlauf;
> einsetzbar im explosionsgefährdeten Bereich, da keine Bürsten oder Schleifringe vorhanden sind;
> vergleichsweise geringe Herstellungskosten;
> Rotor ist spannungslos und kann somit auch in unterschiedlichen Medien oder im Vakuum laufen [4].

Heute ist es möglich, Drehstrom-Asynchronmotoren mit sehr hohen Wirkungsgraden herzustellen. Um den Wirkungsgrad eines solchen Motors bestimmen zu können, muss das Verhältnis von mechanischer Abgabeleistung und elektrischer Aufnahmeleistung bekannt sein. Aus der Differenz ergeben sich die Verluste. Folglich spielen diese die entscheidende Rolle bei der Verbesserung des Wirkungsgrades (**Bild 2**) [5].

Um die Verluste in Asynchronmotoren noch weiter reduzieren zu können, müssen deren Anteile an den Gesamtverlusten betrachtet werden, die sich jeweils durch ihre physikalischen Ursachen unterscheiden [5].

Einsatz von Leitkupfer in der Rotorenfertigung

Eine Möglichkeit, den Wirkungsgrad eines Asynchronmotors zu steigern, besteht darin, den Widerstand im Rotorkäfig zu verringern. Um dies zu erreichen, verwen-

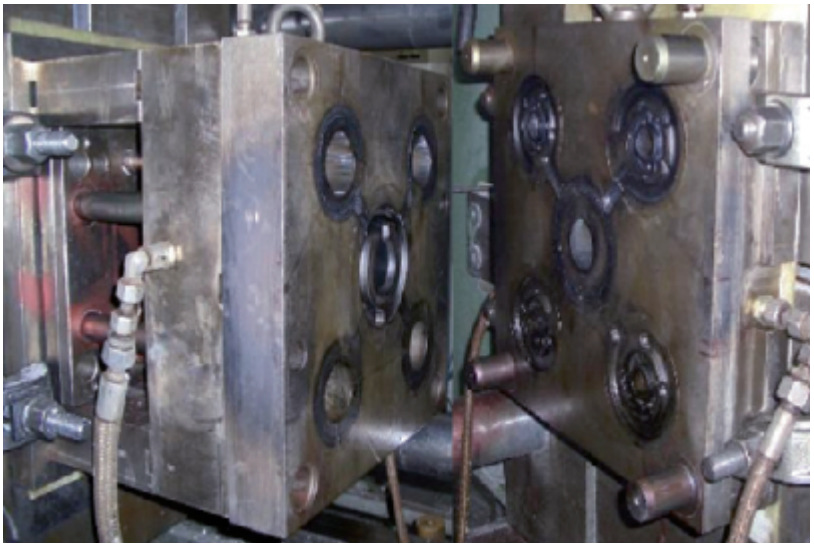


Bild 3: **Druckgießwerkzeug zur Fertigung von Rotoren**

det man als Käfigmaterial nicht das heute gängige Reinaluminium, welches im Druckgießverfahren verarbeitet wird, sondern ersetzt es durch Leitkupfer. Bei Motoren mit Leistungen über 100 kW ist der Kupferkäfig seit jeher im Einsatz, allerdings wird dieser durch Einbringen von Einzelstäben und manueller Verschweißung/Verlötung des Kurzschlussringes hergestellt. Dies beweist die grundsätzliche technische Überlegenheit von Kupferkäfigen, auch wenn dieses Verfahren für kleinere Normmotoren noch nicht wirtschaftlich ist [5].

In der Vergangenheit begründete sich die Wahl der Leiterwerkstoffe durch die entsprechenden Technologien einer rationellen Fertigung. Die um 60 % bessere Leitfähigkeit von Elektrolytkupfer (57 m/W ·mm^2) gegenüber Reinaluminium (35 m/W ·mm^2) machte schon immer die Verwendung von gießbarem Kupfer im Rotor erstrebenswert. Als Problem stellte sich die Frage, ob die dünnen Käfigstäbe auch mit dem hoch schmelzenden Elektrolytkupfer auslaufen, oder ob sich durch den hohen Temperaturgradienten zwischen flüssiger Kupferschmelze und dem relativ kalten Werkzeug eine zu schnelle Erstarrung mit der Folge von Kaltlauf einstellt. Eine weitere Schwierigkeit besteht in der Reinheit der Schmelze und der hohen Gießtemperatur von etwa 1200 °C.

Aufgrund dieser hohen Gießtemperaturen lassen sich eine hohe thermische Schockwirkung und eine thermische Ermüdung der Formmaterialien nicht vermeiden. Warmarbeitsstahl wird aufgrund der hohen Schmelztemperatur von Kupfer stark belastet. Um diesem Problem entgegenzuwirken, sollen neue Formmaterialien eingesetzt werden, die zum einen eine hohe thermische Leitfähigkeit haben, um die auftretenden Spannungen zu reduzieren, oder zum anderen eine hohe Warmfestigkeit besitzen [6].

THT

THT Presses, Inc.
7475 Webster St. • Dayton, OH 45414
(937) 898-2012 • www.thtpresses.com

Druckgießmaschinen zur Herstellung von Kupferrotoren bis 80 kg Kupfer

Besuchen Sie uns:

CWIEME 2007, Berlin
22.-24. Mai
Halle 1.2

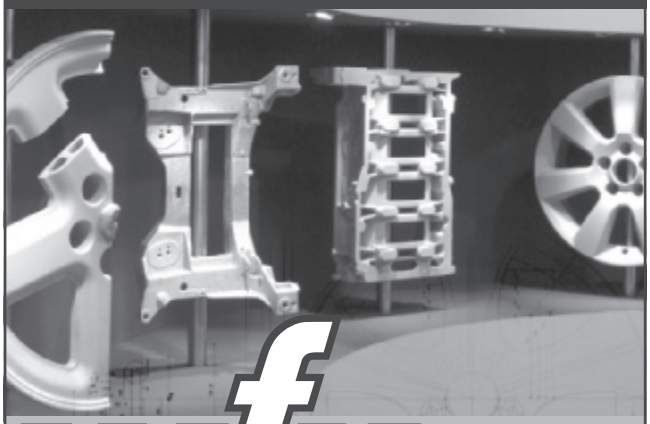
GIFA 2007, Düsseldorf
12.-16. Juni
Halle 11, Stand A19

Kontakt:

Ingenieurbüro & Vertretungen
Dipl.-Ing. Ralf Rogner

Tel. +49 (0) 33 75 50 47 22
Fax +49 (0) 33 75 50 41 14
ralfrogner@aol.com

Besuchen Sie uns auf der GIFA 07. Halle 15, Stand A03



wfv

Spezialisten für Niederdruckguss(ND)-Kokillen

- weltweit tätiges Unternehmen
- Partner der Automobilindustrie
- Produktion von weit mehr als 250 Kokillen pro Jahr

Unsere rund 60 Mitarbeiter, darunter 12 CAD/CAM-Spezialisten, entwickeln gemeinsam mit Ihnen ND-Kokillen für Aluminiumfelgen, Motor-, Achs- und Rahmenteile für den Leichtmetallguss. Auch für Sie finden wir die passende Lösung!

Wir formen Ihren Erfolg!

wfv
Werkzeug-, Formen- und Vorrichtungsbau GmbH & Co. KG
Im Seefeld 10 • D-68623 Lampertheim-Hüttenfeld • Telefon (+49) (0) 62 56 · 83 03-0
Telefax (+49) (0) 62 56 · 83 03-40 • info@wfv-germany.de • **www.wfv-germany.de**

Im Allgemeinen wird sauerstoffhaltiges Kupfer mit 0,02 bis 0,04 % Sauerstoff eingesetzt. Der Sauerstoff liegt als Kupfer(I)-oxid vor und bildet ein Kupfer-Kupfer(I)-oxid-Eutektikum, welches sich an den Korngrenzen der primär erstarrten Kupferkristalle ausbildet. Innerhalb der oben genannten Grenzen hat Sauerstoff nur einen sehr geringen negativen Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit des Kupfers. Da der Sauerstoff andere Verunreinigungen oxidiert, kann seine Anwesenheit deren schädlichen Einfluss auf die Leitfähigkeit vermindern [7].

Für die Herstellung von Rotoren aus Kupferguss muss zwecks Einhaltung einer höchst möglichen elektrischen Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit die Reinheit der Schmelze gewährleistet werden. Wie beim Schmelzen von Stahl- und Aluminiumlegierungen muss auch für Kupfer und Kupferlegierungen der Schmelzprozess so geführt werden, dass eine Wasserstoffaufnahme vermieden und vorhandener Wasserstoff ausgeschieden wird, da sich bei gleichzeitiger Anwesenheit von Wasserstoff und Sauerstoff in gegossenem, unlegiertem Kupfer Wasserdampfporen bilden, die 4 bis 5 % Porenraum erreichen können. Gussstücke werden damit für die Verwendung unbrauchbar [7].

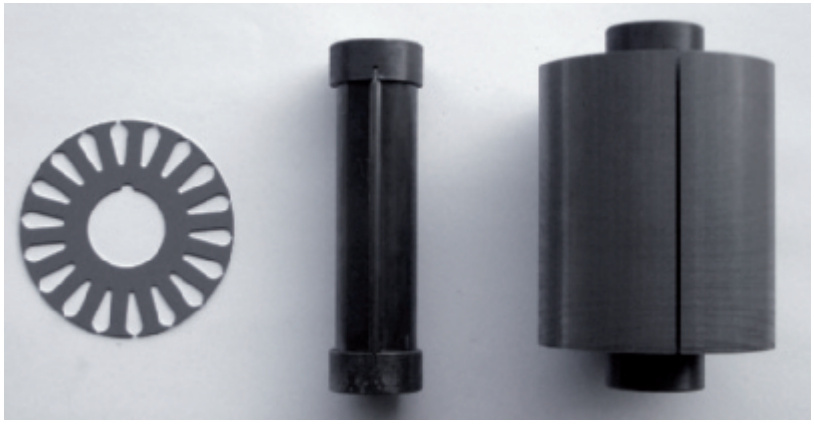


Bild 4: **Blechlamelle, Aufspanndorn und Blechpaket**

Erste Gießversuche mit Kupfer

Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungsprojektes wurde dem Gießereilabor der Hochschule Aalen von der Kienle & Spiess Stanz- u. Druckgiesswerk GmbH, Sachsenheim, ein gebrauchtes Werkzeug (Bild 3) zur Fertigung von Aluminiumrotoren, mitsamt der dafür benötigten Blechpakete (Bild 4), zur Verfügung gestellt. Zur Optimierung des wichtigen Wärmehaushalts wurden Temperierkanäle eingebracht. Darüber hinaus wurde es vom 4-fach- zum 2-fach-Werkzeug umgebaut, damit die Versuche auf einer im Labor vorhandenen 200-t-Kaltkammer-Druckgießmaschine durchgeführt werden konnten.

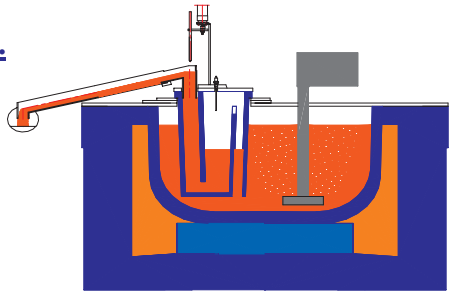
Um den hohen Temperaturen beim Gießen mit Kupfer standzuhalten, wurden Gießkolben aus einer speziellen Legierung mit Bestandteilen von Kupfer, Beryllium, Chrom, Nickel und Silicium auf der Basis des Allper-Ringkolben-Systems verwendet.

Anfänglich wurden zum Aufschmelzen des benötigten Gießvolumens pro Zyklus

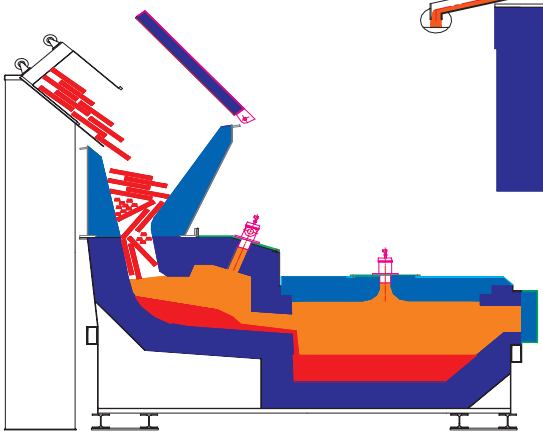
STØTEK

STØTEK Öfen für Schmelzen, Warmhalten und Dosierung von Aluminium.

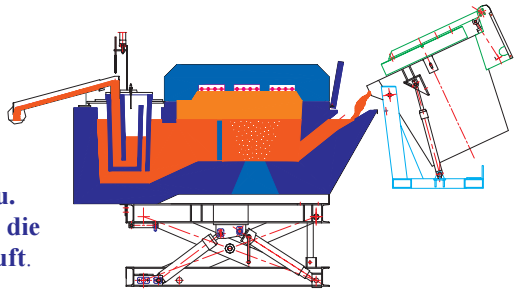
Besuchen Sie uns auf GIFA 07.
Halle 10 Stand Nr:DO7



Ofenprogramm für Aluminium:
Tiegel Schmelz– und Warmhalteöfen
Tiegelloser Warmhalteöfen bis 20.000kg/Al.
Dosieröfen für Druck-, Kokille-& Sandguss.
Kran– und Stapler Transportpfannen.
Schachtschmelzöfen.



Mehr als 30 Jahre
Erfahrung mit Ofenbau.
Über 200 Dosieröfen sind die
letzten 10 Jahren Verkauft.



STØTEK Danmark ApS * RINGSTEDGADE 147 * 4700 NÆSTVED
Tel. +45-55771870 Fax.+45-55771670 mail: stotek@stotek.dk web: www.stotek.dk

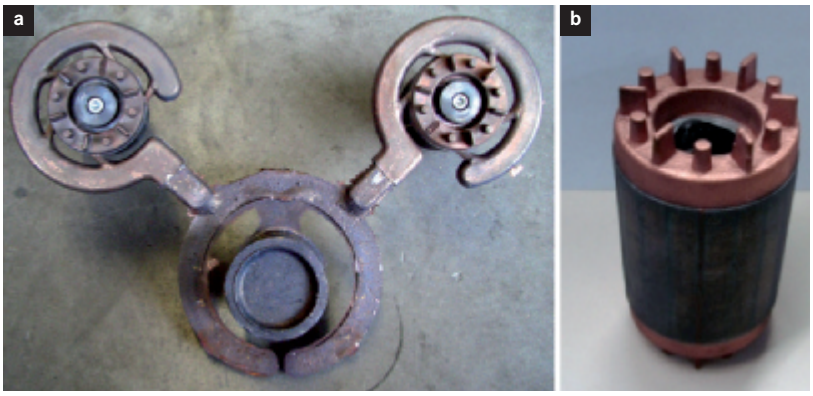


Bild 5: Gussrotoren aus Kupfer (a); Detaildarstellung (b)

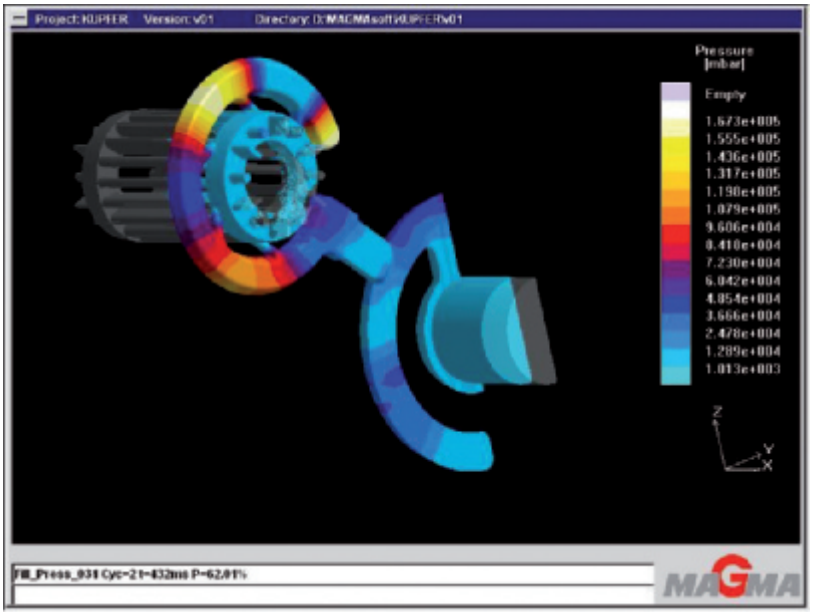


Bild 6: Simulierte Staudrücke im Gussteil während des Formfüllvorgangs

Tongraphit-Schmelztiegel verwendet, mit deren Hilfe die benötigte Menge in einem widerstandsbeheizten Wärmebehandlungsofen geschmolzen wurde.

Zusätzlich wurde die Gießkammer durch Heizpatronen auf eine Temperatur von 180 °C temperiert, um den Temperaturgradienten zwischen Schmelze und Gießkammer zu verringern. Damit konnten eine vorzeitige Erstarrung vermieden und ein vollständiges Formfüllen sichergestellt werden (**Bild 5**). Die auf den Bildern erkennbaren Brandrisse im Bereich des Laufs wurden nicht durch die Kupferversuche verursacht, sondern resultieren aus der vorhergehenden Nutzung des Werkzeugs zur Herstellung von Aluminiumrotoren.

Simulation des Formfüllens

Es war offensichtlich, dass vor allem der für Kupfer viel zu enge Anschnitt im Bereich der Kurzschlussringe vergrößert werden musste. Mit Hilfe der durchgeführten Gießsimulation konnte sehr gut aufgezeigt werden, dass die Anschnitte zu klein ausgeführt waren. Dadurch wurde das Füllen behindert und es kam zu hohen Staudrücken innerhalb des Anschnitts (**Bild 6**). Dies wiederum führte dazu, dass das Gussteil sehr viel langsamer und ungleichmäßiger gefüllt wurde, als es bei einer optimierten Auslegung des Gießsystems der Fall wäre.

Veränderungen am Werkzeug

Aufbauend auf den Ergebnissen der Simulation wurden die verwendeten Formeinsätze optimiert. Zum einen wurde das Gießsystem so ausgelegt, dass sich die Kanäle

INGENIEURBÜRO KRÄMER GMBH
Gießereitechnik Gießereieinrichtungen Gießereibedarf

Gießereitechnik, die passt wie angegossen!

- Konstruktion & Herstellung von Gießereieinrichtungen
- Vorbereitung / Durchführung von Investitionen (Projektierung, Planung, Bauleitung, Inbetriebnahme)
- Auflösung von Gießereien (Betriebsstillegungen und Konkurse)
- Vertrieb von gebrauchten Gießerei-Einrichtungen
- Montage, Reparaturen, Umbauten und Überholungen

GIFA
Halle 15
Stand
15 G 47

ING.-BÜRO KRÄMER GmbH
Ahlefelder Straße 64 · D-51645 Gummersbach
Tel. +49 (0) 22 61/7 26 66 · Fax +49 (0) 22 61/7 26 76
www.ing-kraemer.de · ing.kraemer@t-online.de

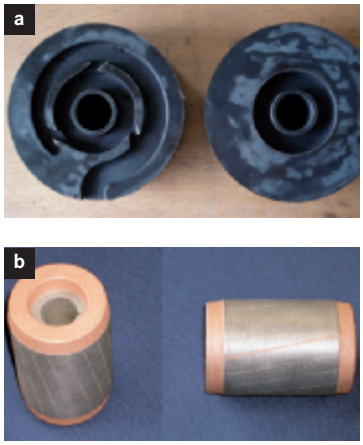


Bild 7: Optimierte Formeinsätze mit geändertem Gießsystem, größerem Anschnitt und ohne Flügel bzw. Zapfen (a); Kupferrotoren, hergestellt mit dem optimierten Werkzeug (b)

mit zunehmendem Weg strömungsgünstig verjüngen, zum anderen wurde die Anschnittquerschnittsfläche vergrößert und die Anzahl der Anschnitte von sechs auf drei reduziert. Waren die ersten Einsätze noch mit Aussparungen für Lüfterflügel und Auswuchtzapfen versehen, wurden diese bei den neuen Einsätzen weggelassen (Bild 7a), da diese elektromechanisch betrachtet, nicht notwendig sind.

Gießversuche mit optimiertem Werkzeug

Nach Anfertigung und Einbau der neuen Einsätze wurde eine neue Versuchsreihe durchgeführt. Als Vormaterial wurde, wie schon bei den Versuchen zuvor, sauerstoffhaltiges Kupfer vom Typ E-Cu 57 gewählt. Bei diesen Gießversuchen wurde die Reinheit der Schmelze gezielt beeinflusst. Zu diesem Zweck wurden drei Serien gegossen. Die erste Serie wurde unter Luftsauerstoff geschmolzen, um die Effizienz der Schutzmechanismen nachfolgender Versuche durch Vergleich zu messen. Die zweite Serie wurde unter einer Schutzatmosphäre aus Argon geschmolzen. Bei der dritten Serie wurden als Desoxidationsmittel Graphitstäbe verwendet, die während des Aufschmelzvorgangs über die Öffnung der Tiegel gelegt wurden. Bei einer makroskopischen Betrachtung der Rotoren nach den Gießversuchen konnten keine Unterschiede mit Blick auf die Schmelzequalität und Formfüllverhalten festgestellt werden (Bild 7b). Deshalb wurden anschließend den Rotoren im Bereich der Kurzschlussringe Proben entnommen und metallographische Schliffe angefertigt.

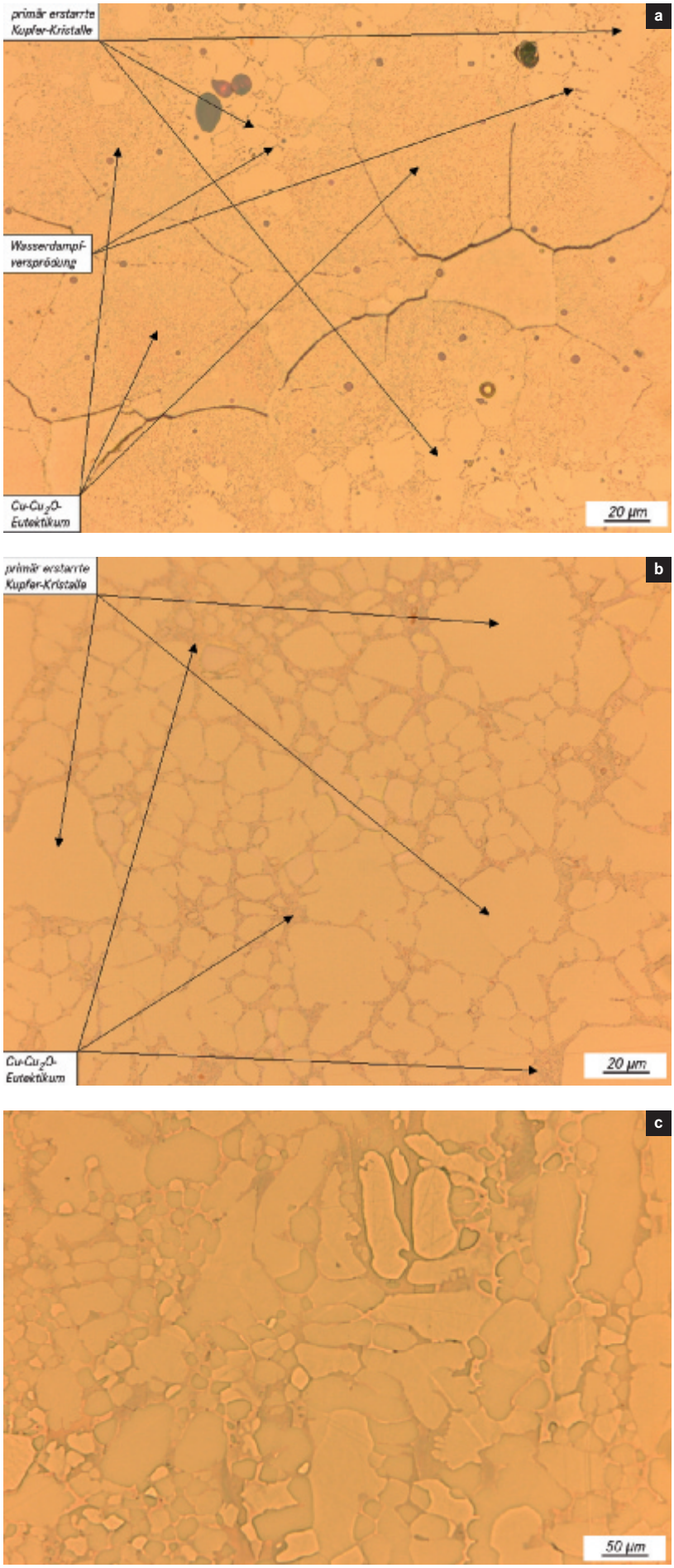


Bild 8: Lichtmikroskopische Aufnahme eines Kupferrotors: a) aus unbehandelter Schmelze; b) aus Argon beaufschlagter Schmelze; c) aus mit Graphit geschützter Schmelze

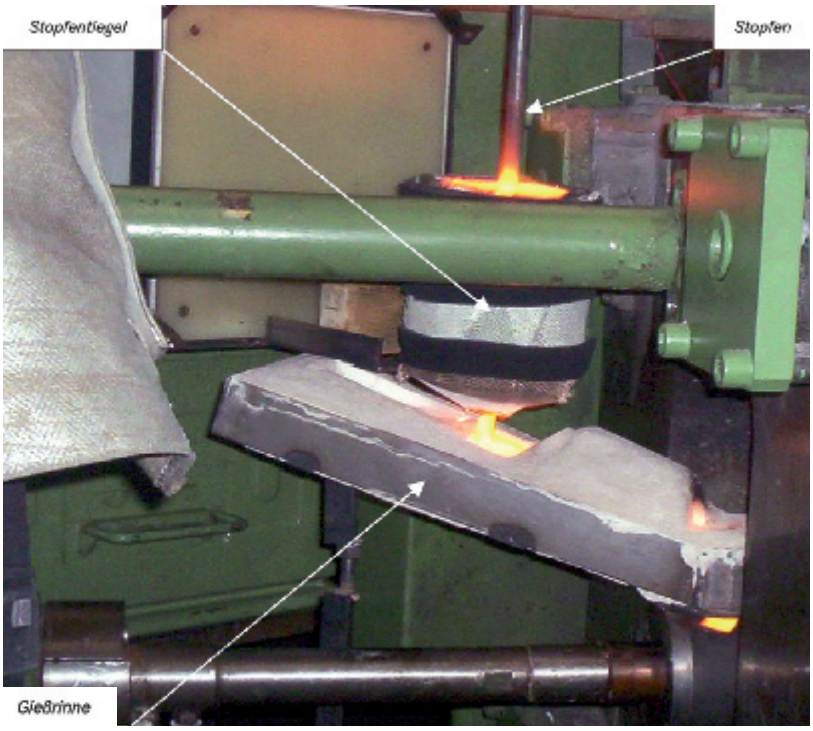


Bild 9: **Versuchsaufbau mit Induktionsofen**

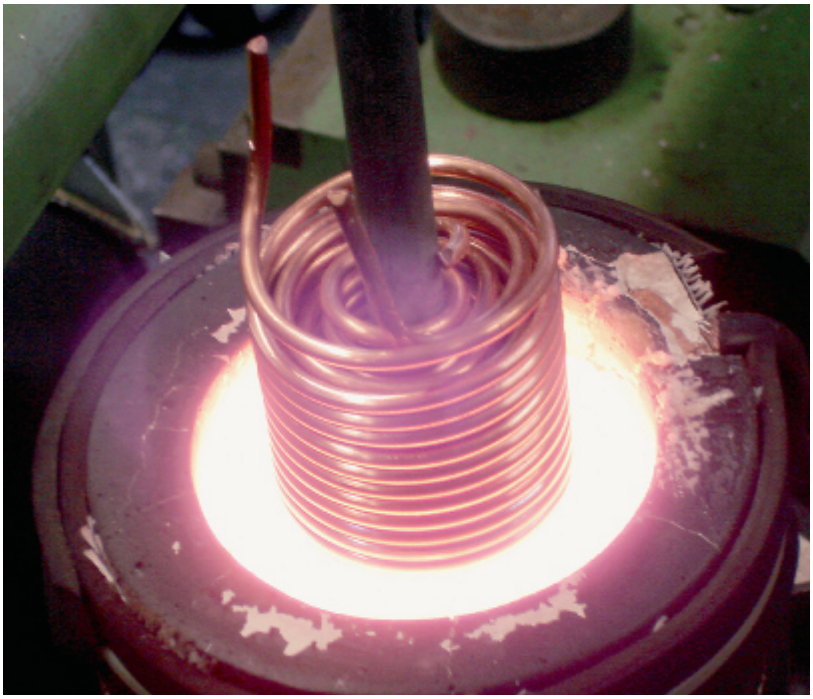


Bild 10: **Gewickelter Kupferdraht als Ausgangsmaterial**

Untersuchung des Erstarrungsgefüges
Ein Rotor aus der Serie mit unbehandelter Schmelze wies sehr viele kleinere Risse auf. Speziell dieser wurde für eine Untersuchung herangezogen, um herauszufinden, ob die Risse von einer Versprödung des Materials aufgrund übermäßiger Oxidbildung im Metall herrühren. Auf der lichtmikroskopischen Aufnahme waren wenige primär erstarrte Kupfer-Kristalle erkennbar. Den größten Teil machte hier vor allem das Cu-Cu_2O-Eutektikum aus, das sich großflächig ausgebildet hatte. Außerdem konnte in geringem Maße Wasserdampfversprödung beobachtet werden (**Bild 8**a) [7].

Betrachtet man den Schliff des Rotors, bei dem die Schmelze unter Argon aufgeschmolzen wurde, fiel sofort auf, dass es zu keiner Wasserdampfversprödung gekommen war. Außerdem war erkennbar, dass der Anteil von primär erstarrtem Kupfer wesentlich höher war als bei dem zuvor untersuchten Rotor. Daraus resultierte ein wesentlich geringerer Anteil von Cu-Cu_2O-Eutektikum (Bild 8b) [7]. Noch positiver fiel der Schliff des Rotors aus, bei dem die Kupferschmelze mit Hilfe der Graphitstäbe vor Oxidation geschützt wurde (Bild 8c). Auch hier konnte die Bildung von Cu-Cu_2O-Eutektikum nicht verhindert werden, allerdings bildeten sich viele große, primär erstarrte Kupfer-Kristalle, die für eine elektrotechnische Anwendung erstrebenswert sind.

Optimierung des Schmelzprozesses
Um einen industriellen Fertigungsprozess zu erreichen, wurde der Schmelzprozess fertigungstechnisch optimiert. Zu diesem Zweck wurde ein Induktionsofen mit einer elektrischen Ausgangsleistung von 20 kW eingesetzt. Mit diesem Ofen wurde eine Schmelzdauer von 3 min errechnet. Die Induktionsspule und der dazugehörige Graphit-Schmelztiegel waren so ausgelegt, dass die Menge für jeweils einen Schuss aufgeschmolzen werden konnte (**Bild 9**), damit das flüssige Kupfer nicht zu lange Kontakt mit dem Luftsauerstoff aus der Umgebung hatte. Um während des Gießvorgangs den Wärmeverlust der Schmelze möglichst gering zu halten, wurde der Tiegel als Stopfentiegel ausgelegt. Dadurch konnte die Kupferschmelze durch Ziehen des Stopfens direkt in die Gießkammer fließen. Zum Beschicken des Ofens wurde Draht aus Leitkupfer der Qualität E-Cu57 verwendet (**Bild 10**).

Auswertung der Untersuchungsergebnisse von gegossenen Rotoren mit induktiver Schmelzeherstellung
Die Kupferrotoren wurden von der Firma Dr.-Ing. Ernst Braun GmbH in Biberach mit Hilfe eines Rotorprüfgeräts einer zerstörungsfreien Induktionsmessung unterzogen. Bei dieser Untersuchung drehen sich die Rotoren je nach Einstellung mit einigen 100 U/min und bewegen sich an einem feststehenden Permanentmagneten vorbei. Dabei werden in den Rotorstäben und Kurzschlussringen Spannungen induziert und es fließt ein Strom, sofern die Stäbe bzw. die Kurzschlussringe nicht vollständig unterbrochen sind. Diese Ströme erzeugen wiederum ein Magnetfeld, das von dem Rotorprüfgerät gemessen wird. Die dargestellten Kurven sind ein Abbild des gemessenen Magnetfeldes bzw. einer in einer Messspule induzierten Spannung **Bild 11**. An der unteren der beiden Wellen ist erkennbar, dass die Rotoren sehr gut ausgegossen waren, wenn das Ergebnis mit der Referenzwelle oben im Bild verglichen wird. Des Weiteren wurden Proben aus den Kurzschlussringen entnommen und Schliffe angefertigt, um fest-

stellen zu können, inwieweit sich der induktive Schmelzvorgang mit dem Induktionsofen auf die Qualität des Gefüges ausgewirkt hatte. Um einen Vergleich aufstellen zu können, wurde zu diesem Zweck eine Schliffprobe aus dem gelieferten Ausgangsmaterial der Qualität E-Cu57 hergestellt (**Bild 12**a). Wie die Aufnahmen zeigen, veränderte sich das Gefüge nach dem Gießen kaum (Bild 12b).

„Die Ergebnisse der Messungen zeigten, dass die Anlaufdrehmomente bei den Kupferrotoren aufgrund des geringeren Widerstands des Elektrolytkupfers gegenüber den aus Reinaluminium gegossenen Rotoren deutlich kleiner waren."

Lediglich die Größe der primär erstarrten Kupferkörner hatte zugenommen, eine Bildung von Cu-Cu_2O-Eutektikum konnte nicht beobachtet werden.

Motortests mit Aluminium- und Kupferrotoren

Der nächste Schritt war der Aufbau eines kompletten Versuchsmotors mit einem Musterstator sowie der Rotoren mit den Wellen (**Bild 13**).

Die Ergebnisse der Messungen zeigten, dass die Anlaufdrehmomente bei den Kupferrotoren aufgrund des geringeren Widerstands des Elektrolytkupfers gegenüber den aus Reinaluminium gegossenen Rotoren deutlich kleiner waren, dafür erhöhte sich das Moment bei der Nenndrehzahl (**Bild 14**). Der Wirkungsgrad verbesserte sich bei der Nenndrehzahl um ca. 2 % gegenüber den Aluminiumrotoren (**Bild 15**), wobei sich hieraus eine Einsparung von 68 kWh bei einer angenommenen Betriebsdauer von 4000 Stunden pro Jahr ergibt.

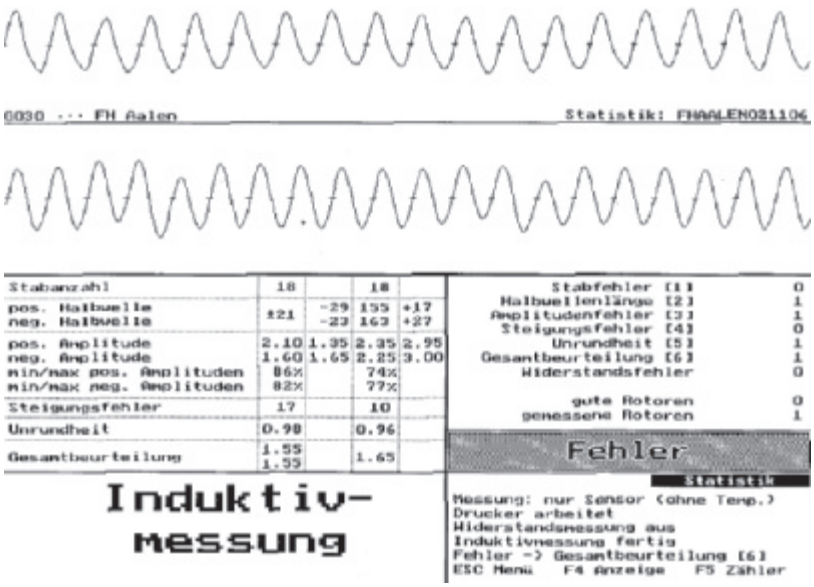


Bild 11: Ergebnis der Widerstandsmessung am Beispiel eines Kupferrotors, bei dessen Herstellung die Schmelze induktiv erzeugt wurde

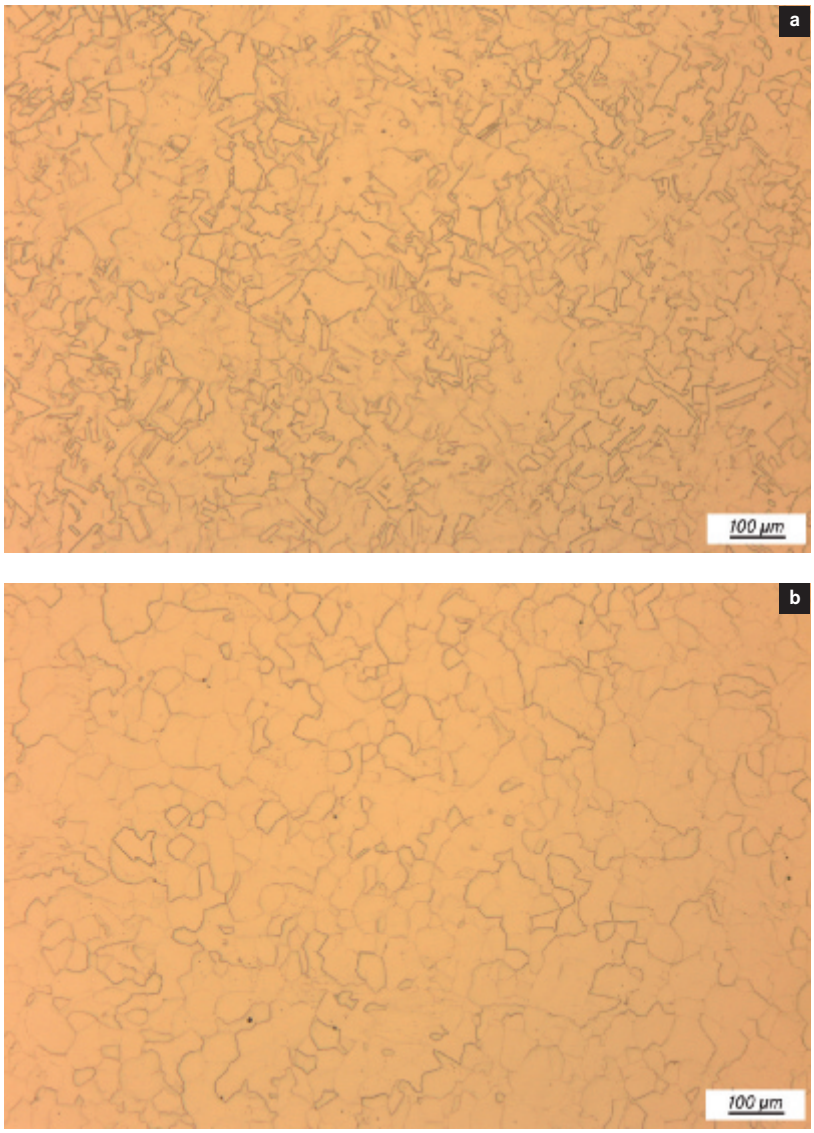


Bild 12: Lichtmikroskopische Aufnahmen des Ausgangsmaterials (a) und einer Probe eines Kupferrotors aus induktiv erzeugter Schmelze (b)

Bild 13: **Aluminium- und Kupferversuchsrotoren auf Wellen**

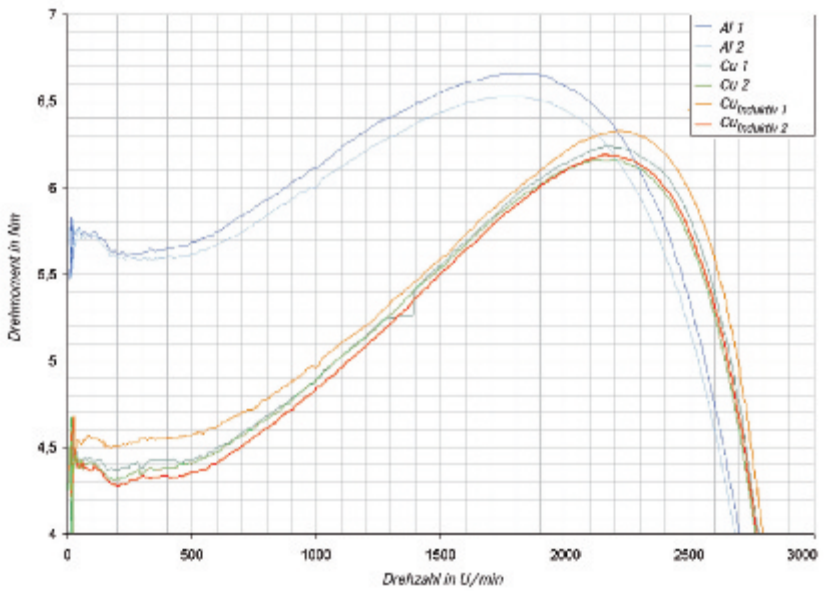


Bild 14: **: Erreichte Drehmomente mit Aluminium- und Kupferrotoren in Abhängigkeit von der Drehzahl**

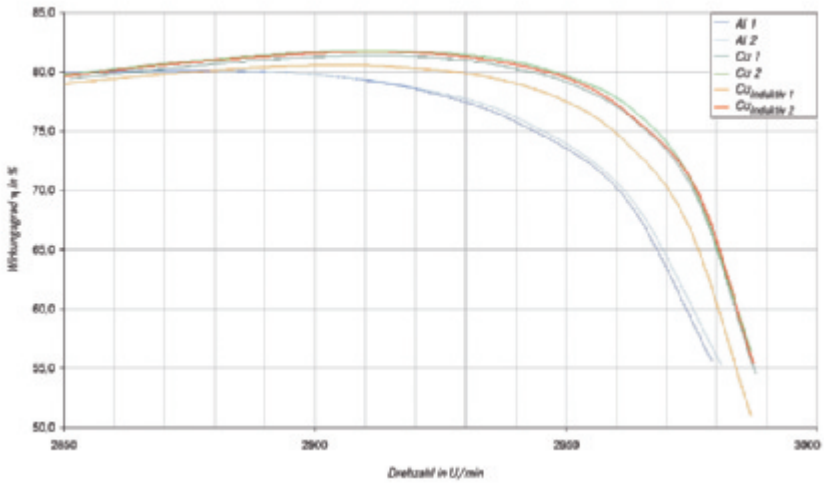


Bild 15: **Erreichte Wirkungsgrade mit Aluminium- und Kupferrotoren in Abhängigkeit von der Drehzahl**

Zusammenfassung und Ausblick

Die Versuche zum Druckgießen von Kupferrotoren haben gezeigt, dass es prinzipiell möglich ist, Kupferrotoren im Druckgießverfahren mit sehr guter elektromechanischer Qualität herzustellen. Dies wurde durch die Labortests an den Rotoren nachgewiesen. Obwohl die Fließkanäle in den Blechpaketen geometrisch sehr gering sind, kam es nicht zu den befürchteten Kaltläufen, sondern alle Kanäle waren durchgehend ausgelaufen.

Da der induktive Schmelzvorgang an der Maschine zeitlich sehr kurz ist, ist die Sauerstoffaufnahme begrenzt. Zusätzlich bietet der Tongraphittiegel eine reduzierende Atmosphäre, was wiederum zu geringen Sauerstoffgehalten und damit minimalen Cu-Cu_2O-Phaseanteilen führt. Dies konnte in den metallographischen Schliffbildern nachgewiesen werden.

Im nachfolgenden Projektzeitraum werden Untersuchungen mit neuen Formmaterialien durchgeführt, um die erhöhte Brandrissneigung durch die erhöhte thermische Belastung des Werkzeugs zu reduzieren.

Die diesem Beitrag zugrunde liegenden Arbeiten wurden mit finanzieller Unterstützung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Hierfür sei an dieser Stelle gedankt. Ein weiterer Dank gilt den beiden am Projekt beteiligten Firmen Kienle + Spiess GmbH und Dr.-Ing. Ernst Braun GmbH.

Prof. Dr.-Ing. Lothar H. Kallien, Dipl.-Ing. (FH) Thomas Weidler und Dipl.-Ing. (FH) Jens Kimmer, Hochschule Aalen

Literatur:

[1] Scharf, A.: Elektrische Antriebstechnik läuft auf Hochtouren. VDI Nachrichten (2006) Nr. 45.

[2] Wosnizok, W.: Rotierende elektrische Maschinen. VEB Verlag Technik, Berlin 1984.

[3] Fortbildungslehrgang Techniker, Fachrichtung Elektrotechnik, Energietechnik. 3. DAG-Technikum, Essen 1990.

[4] Drehstrom-Asynchronmaschine. http://de.wikipedia.org/wiki/Drehstrom-Asynchronmaschine.

[5] Doppelbauer, M.: Wirtschaftliche Motoren dank Kupferrotoren. Technikca (2003) Nr. 13-14.

[6] Greiner, H.: Kupfer-Druckgussläufer für energieeffiziente Drehstrommotoren. Elektrische Maschinen. Verlag Hüthig GmbH & Co. KG, Heidelberg 2003.

[7] Kupfer. Deutsches Kupfer-Institut e. V., Berlin 1982.