Notwendigkeit der intensiven Analyse des bauteilgebundenen Werkstoffverhaltens von Kupfer-Legierungen

Loos, D. (1); Barti, E. (1); Wagener, R. (2); Melz, T. (2, 3)

Obwohl elektromechanische Energiewandler seit über 180 Jahren entwickelt werden [1], stellt der Einsatz von elektrischen Traktionsmaschinen für Hybrid- und Elektrofahrzeuge Forschung und Industrie vor neue Fragestellungen und Herausforderungen. Nahezu alle Maschinentypen beinhalten Kupfer-Legierungen aufgrund deren hoher elektrischen Leitfähigkeit für die Erzeugung eines magnetischen Feldes. Um den aus dem Fahrzeugeinsatz resultierenden Betriebsbeanspruchungen gerecht zu werden, ist eine Bauteiloptimierung unter Beachtung der Betriebsfestigkeit mit Hilfe von zuverlässigen numerischen Bewertungsmethoden notwendig. Dies erfordert eine intensive Analyse des bauteilgebundenen Werkstoffverhaltens der Kupfer-Legierungen unter Beachtung des zyklischen Werkstoffverhaltens bis in den Bereich hoher Schwingspielzahlen sowie unter variablen und konstanten Amplituden.

Aufgrund einer zunehmenden Elektrifizierung von Straßenfahrzeugen und des Preisentwicklungsrisikos von seltenen Erden rücken magnetlose E-Maschinen immer mehr in den Fokus der Entwicklung. Die bekanntesten und aktuell meistens eingesetzten Maschinentypen, die auf den Einsatz von Permanentmagneten verzichten, sind Asynchronmaschinen und stromerregte Synchronmaschinen. Erstere zeichnen sich durch einen Kurzschlusskäfig im Rotor aus, in dem eine elektrische Spannung durch das Statordrehfeld induziert und somit das Rotormagnetfeld erzeugt wird. Dieser kann unter anderem gegossen oder durch das Einbringen von Kupferstäben in die Nuten des Blechpakets, die anschließend miteinander durch beispielsweise Schweißen oder Löten kontaktiert werden, hergestellt werden. Letztere zeichnen sich dadurch aus, dass Kupferdrähte, die um die Zähne des Rotorblechpakets gewickelt werden, für die Erzeugung des Rotormagnetfeldes verwenden werden. Beide Bauformen sind in Bild 1 dargestellt.

Einsatzbedingungen und Herausforderungen

Im Gegensatz zum nahezu stationären Betrieb, der beispielsweise in Kraftwerken vorliegt, erfahren elektrische Maschinen im Personenkraftwagen hohe variable mechanische sowie thermische Belastungen, wodurch ein breites Spektrum an Betriebspunkten entsteht. Folglich gilt es, die aus der Kundennutzung resultierenden Belastungen und Umwelteinflüsse auf das Werkstoffverhalten zu untersuchen, um es bei der Auslegung berücksichtigen zu können. In Abhängigkeit des vorliegenden Betriebspunktes können Temperaturen von über 200 °C vorliegen, sodass Kriechvorgänge im Auslegungsprozess näher untersucht werden müssen [2].
Zudem werden hochdrehende E-Maschinenkonzepte näher betrachtet, um den Anforderungen bezüglich hoher Leistungsdichte und einem sehr guten Wirkungsgrad bei möglichst geringen Kosten sowie Baumraumbedarf gerecht zu werden. Die Leistung einer elektrischen Maschine definiert sich aus dem Produkt aus Moment und Drehzahl, wobei sich der Betrag des Moments aus dem Aktivteil der Maschine ergibt. Der Aktivteil der Maschine bezeichnet den Anteil an Kupfer, Eisen und Magneten.

$$\text{Leistung} \sim \text{Moment} * \text{Drehzahl}$$

Durch eine Drehzahlerhöhung können zum einen bei gleichbleibender Leistung Gewicht, Kosten und Größe der Traktionsmaschine reduziert und zum anderen bei gleichbleibendem Aktivteil die Leistung gesteigert werden. Hieraus resultieren jedoch höhere Fliehkraftbelastungen.

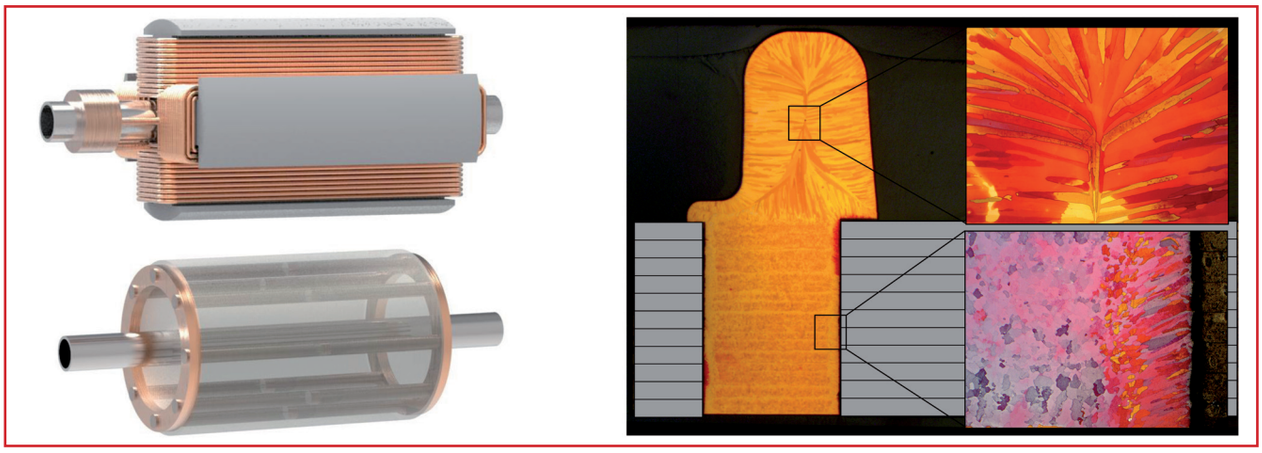

Bild 1: Schematische Darstellung einer stromerregten Synchronmaschine (links oben) und Asynchronmaschine (links unten), Mikrostruktur in einem gegossenen Kurzschlusskäfig (rechts)

Folglich gilt es, ein Optimum zwischen realisierbarer Leistung und Bauteilfestigkeit zu finden. Dies spiegelt sich auch in der Werkstoffauswahl wieder. Durch Beimischen von zusätzlichen Elementen können die mechanischen Eigenschaften der daraus resultierenden Kupferlegierungen gezielt eingestellt werden. Dies reduziert jedoch gleichzeitig die elektrische Leitfähigkeit, sodass je nach Anwendungsfall die passende Legierung oder nahezu reines Kupfer ausgewählt werden muss.

Zur Vielfalt der in Frage kommenden Materialien kommt hinzu, dass herstellungsbedingt unterschiedliche Mikrostrukturen vorliegen. Bild 1 zeigt ausschnittsweise das Gefüge eines gegossenen Kurzschlusskäfigs. Im sogenannten Kurzschlussring liegen grobe Körner vor, wohingegen das Gefüge in der Nut des Blechpakets feinkörnig ist. Weiterhin können durch den Herstellungsprozess lokal Gefügeumwandlungen durch beispielsweise Walzen, Schweißen oder Löten stattfinden.

Um die Betriebsfestigkeit zukünftiger elektrischer magnetloser Maschinen bewerten zu können, bedarf es zum einen der Identifikation auslegungsrelevanter Schädigungsmechanismen und zum anderen validierte numerische Methoden zur Lebensdauerabschätzung. Zyklische Werkstoffkennwerte bilden hierfür die Grundlage. Die folgenden Abschnitte zeigen das zyklische Werkstoffverhalten von kaltverfestigtem Kupfer mit einem Massengehalt ≥ 99,99% (Cu-OFE) unter variablen und konstanten Beanspruchungsamplituden. Die zyklischen Versuche wurden hierbei dehnungsgeregelt durchgeführt. Die ermittelten Kenngrößen bilden unter anderem die Grundlage für eine Lebensdauerabschätzung nach dem örtlichen Konzept, bei dem die lokal im Bauteil vorliegenden Beanspruchungen anhand des zugehörigen Werkstoffverhaltens bewertet werden [3].

Zyklisches Werkstoffverhalten bei konstanten Amplituden

Das zyklische Werkstoffverhalten wird mit Hilfe der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve und der Dehnungswöhlerlinie abgebildet. Im Allgemeinen wird erstere mathematisch nach Ramberg-Osgood [4] und letztere nach Basquin, Coffin und Manson [5], [6], [7] beschrieben. Ramberg und Osgood definieren die Gesamtdehnungsamplitude $\varepsilon_{a,t}$ als Summe der elastischen und plastischen Dehnungsamplitude, Gleichung 1. Der elastische Anteil $\varepsilon_{a,e}$ wird aus dem Quotienten aus Spannungsamplitude σ_a und Elastizitätsmodul E berechnet. Der plastische Anteil $\varepsilon_{a,p}$ wird durch das mit dem Kehrwert des zyklischen Verfestigungsexponenten n' potenzierten Verhältnis aus zyklischem Festigkeitskoeffizient K', der der Spannungsamplitude bei 100 % plastischer Dehnung entspricht, und Elastizitätsmodul beschrieben.

$$\varepsilon_{a,t} = \varepsilon_{a,e} + \varepsilon_{a,p} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{K'}{E}\right)^{\frac{1}{n'}} \quad (1)$$

Die Dehnungswöhlerlinie lässt sich in dem untersuchten Lebensdauerbereich mit der Formulierung von Basquin, Coffin und Manson zutreffend beschreiben, Bild 2. Diese basiert auf dem E-Modul sowie den vier zyklischen Werkstoffkennwerten, Schwingfestigkeitskoeffizienten σ'_f, Schwingfestigkeitsexponent b, Duktilitätskoeffizienten ε'_f und Duktilitätsexponent c, und lautet wie folgt. [5], [6], [7]

$$\varepsilon_{a,t} = \varepsilon_{a,e} + \varepsilon_{a,p} = \frac{\sigma'_f}{E}(2\,N_i)^b + \varepsilon'_f\,(2\,N_i)^c \quad (2)$$

Mithilfe der Kompatibilitätsbedingungen, Gleichung 3 und 4, können hieraus die Kennwerte K' und n' der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve, Bild 2, berechnet werden.

$$K' = \frac{\sigma'_f}{\varepsilon'^{\,n'}_f} \quad (3)$$

$$n = \frac{b}{c} \quad (4)$$

Die Ermittlung der Dehnungswöhlerlinie mit dehnungsgeregelten Wöhlerversuchen ist zeit- und kostenintensiv.

Zyklisches Werkstoffverhalten bei variablen Amplituden

Der sogenannte Incremental Step Test (IST), der 1969 von Landgraf [8] vorgestellt wurde, bietet die Möglichkeit, das zyklische Spannungs-Dehnungsverhalten unter Betriebsbeanspruchung anhand von nur einer Probe zu ermitteln. Hierbei wird die maximal zu prüfende Dehnungsamplitude $\varepsilon_{a,max}$ festgelegt sowie diese in vordefinierten Inkrementen solange reduziert, bis diese Null ist. Anschlie-

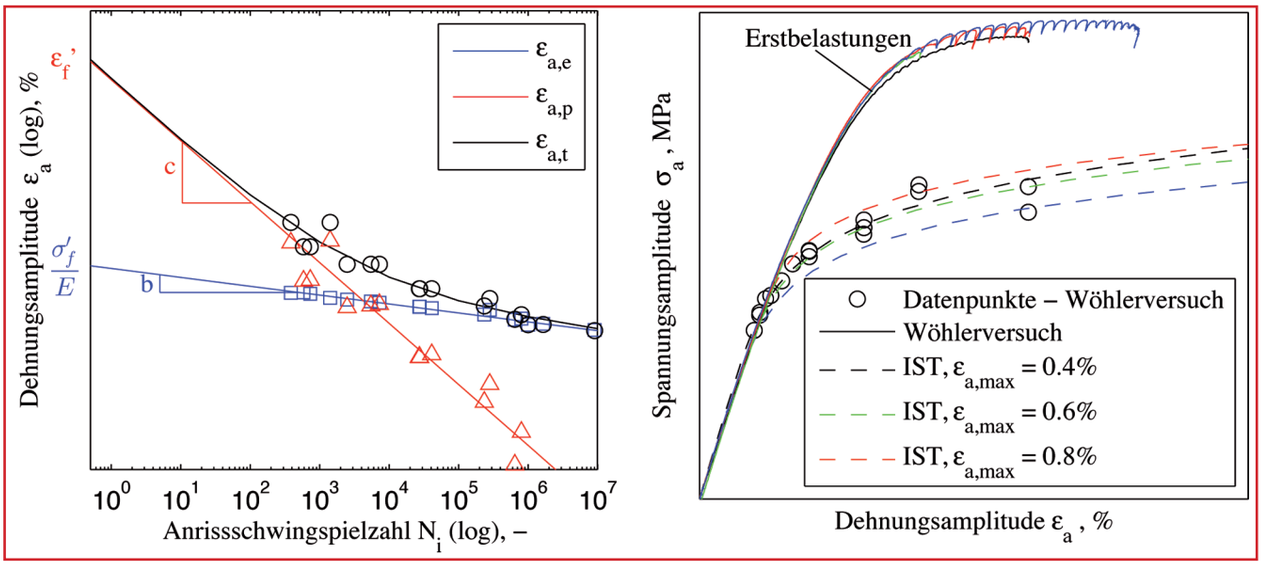

Bild 2: Dehnungswöhlerlinie von Cu-OFE (links), zyklische Spannungs-Dehnungskurven: Vergleich Incremental Step Tests – Wöhlerversuche (rechts)

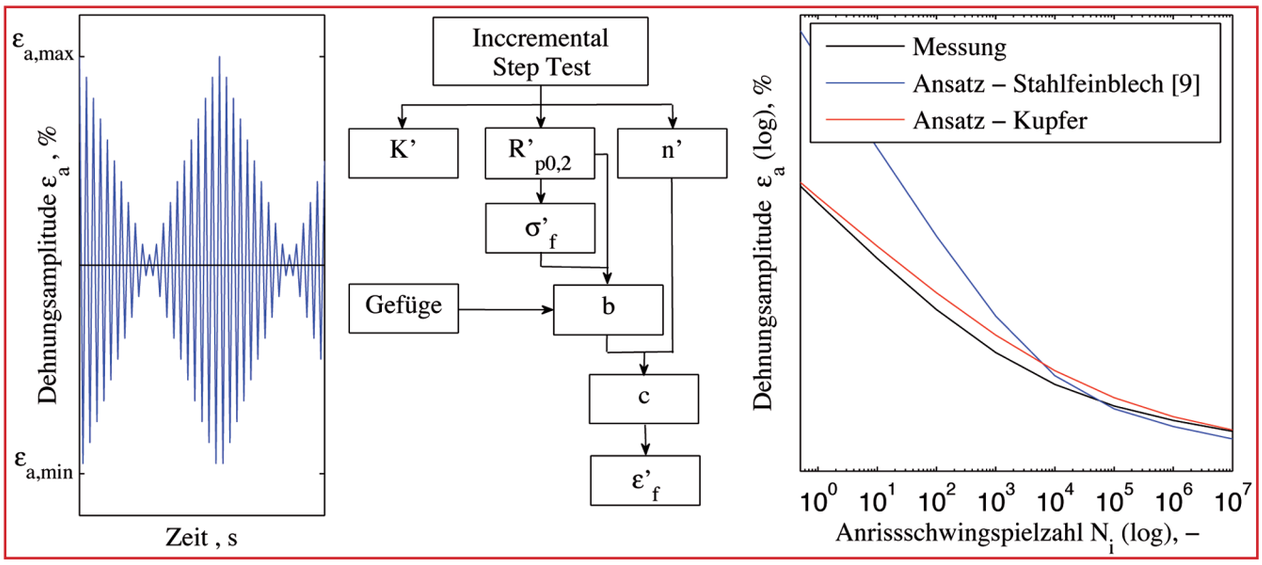

Bild 3: Exemplarische Belastungsfolge eines Incremental Step Tests (links), Bestimmung der Dehnungswöhlerlinie anhand eines Incremental Step Tests [9] (Mitte), experimentelle und abgeschätzte Dehnungswöhlerlinien für Cu-OFE (rechts)

ßend wird sukzessive bis zur maximalen Amplitude erhöht. Dieser Vorgang wird bis zum Versagen wiederholt, und das Spannungs-Dehnungs-Verhalten bei halber Anrisslebensdauer ausgewertet, Bild 3 [9].

Die zugehörigen Werkstoffkennwerte werden mithilfe der folgenden Gleichung 5 aus den Umkehrpunkten der Hysteresen bestimmt.

$$\varepsilon_{a,p} = \left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{\frac{1}{n'}} \qquad (5)$$

In der vorliegenden Untersuchung wurde mit der maximalen Dehnungsamplitude begonnen, um anhand der Erstbelastung Rückschlüsse auf das transiente Werkstoffverhalten ziehen zu können. Zudem wurden drei unterschiedliche Kollektivhöchstwerte verwendet, um deren Einfluss auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten zu quantifizieren. Die aus den IST und Einstufenversuchen resultierenden zyklischen Spannungs-Dehnungskurven sind in Bild 2 dargestellt.

Die Erstbelastungskurven stimmen bei allen Varianten sehr gut überein. Zudem verlaufen die zyklischen Spannungs-Dehnungskurven parallel, wobei der Versatz zwischen den Graphen mit einer statistisch bedingten Streuung der Messwerte begründet werden könnte. Folglich ist die von Landgraf vorgestellte Vorgehensweise zur Bestimmung der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve auch für Kupfer-Legierungen eine geeignete Methode zur Reduktion der Versuchszeit.

Abschätzung der Dehnungswöhlerlinie aus den Ergebnissen eines Incremental Step Tests

In [9] wurde eine Möglichkeit zur Ableitung der Dehnungswöhlerlinie auf Basis eines IST für Stahlfeinblechlegierungen aufgezeigt. Diese basiert auf empirisch ermittelten Zusammenhängen zwischen den zyklischen Werkstoffkennwerten,

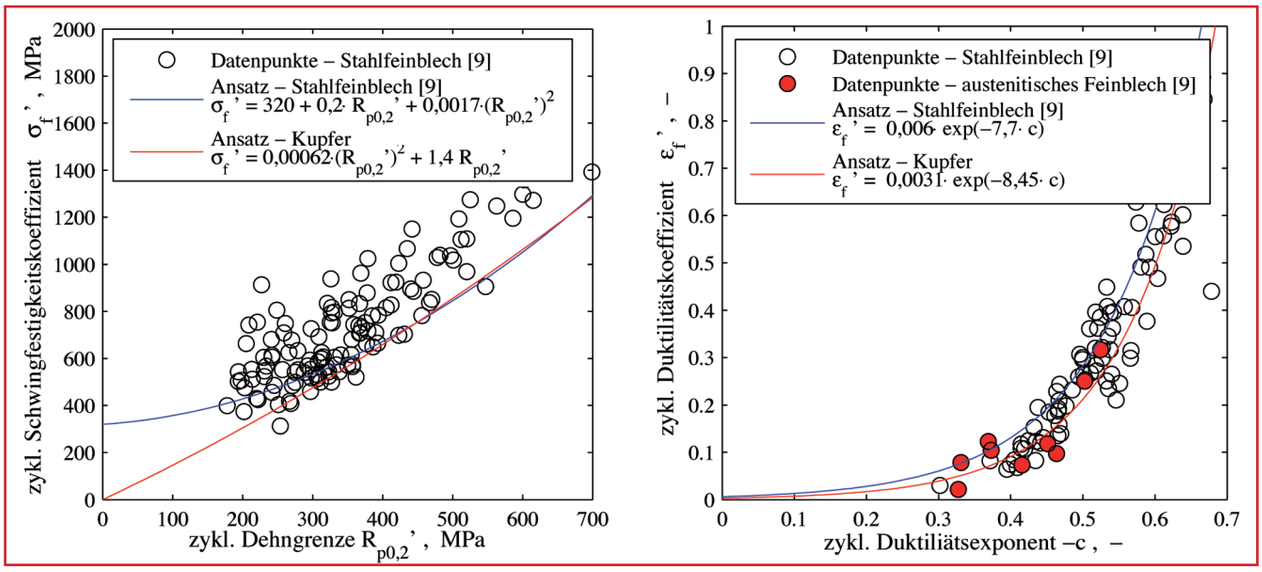

Bild 4: Zusammenhang zwischen zyklischem Schwingfestigkeitskoeffizient und zyklischer Dehngrenze (links), Zusammenhang zwischen zyklischen Duktilitätskoeffizient und Duktilitätsexponent (rechts)

Bild 4, und wurde auf die vorliegenden Versuchsergebnisse angewendet. Die resultierende Wöhlerlinie ist neben der experimentell bestimmten Kurve in Bild 3 dargestellt.

Die ertragbare Dehnungsamplitude wird vor allem für Schwingspiele bis 10^4 überschätzt, sodass ein direkter Übertrag der Vorgehensweise nicht zielführend ist. Nachfolgend wird diese modifiziert, sodass die in Einstufenversuchen ermittelte Wöhlerlinie angenähert werden kann, Bild 3.

Aufgrund der unterschiedlichen Werkstofffestigkeiten wurde der empirisch ermittelte Zusammenhang zwischen σ'_f und $R_{p0,2}'$ um den $R_{p0,2}'$ - Bereich kleiner 200 MPa erweitert, Bild 4.

Die Bestimmung des zyklischen Schwingfestigkeitsexponent b erfolgt entsprechend der Vorgehensweise für ferritische Stähle [9], Gleichung 6.

$$\frac{\sigma_f}{b} = 227{,}1 - 29\, R_{p0,2} \qquad (6)$$

Da im Gegensatz zu den Feinblechen [9] kein signifikanter Einfluss der variablen Amplitude auf den Verlauf der zyklischen Spannungsdehnungskurve erkennbar ist, wird die Komptabilitätsbedingung, Gleichung 4, zur Abschätzung des zyklischen Duktilitätsexponenten herangezogen.

Auf Basis der Stahlfeinblechdaten wurde ein neuer Zusammenhang zwischen zyklischem Duktilitätskoeffizienten sowie zyklischem Duktilitätsexponent ermittelt. Hierfür wurde das plastische Dehnungsverhalten der austenitischen Stähle zugrunde gelegt, da diese Stähle wie Kupfer eine kubisch flächenzentrierte Gitterstruktur aufweisen, Bild 4.

Zusammenfassung

Der Einsatz von Elektromotoren als Hauptantrieb für Fahrzeuge stellt neue Herausforderungen an ihre Bemessung. Eine ausreichende Betriebsfestigkeit kann mit Hilfe des örtlichen Konzeptes auf Basis von zyklischen Werkstoffkennwerten nachgewiesen werden, wofür zeit- und kostenintensive dehnungsgeregelte Wöhlerversuche notwendig sind. Der Incremental Step Test ermöglicht eine Versuchszeitreduktion, jedoch kann die Dehnungswöhlerlinie anhand einer modifizierten Näherungslösung abgeschätzt werden.

Literatur

[1] M. Faraday, „Erste Beschreibung einer rotierenden elektrischen Maschine von P.M.," Philosophical Magazine, Bd. 3, pp. 161-162, 1832.

[2] W. D. Jenkins und T. G. Digges, „Creep of High-Purity Copper," Journal of Research of the National Bureau of Standards, Bd. 45, Nr. 2, pp. 153-173, 1950.

[3] D. Radaj, C. M. Sonsino und W. Fricke, Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches, Woodhead Publishing, 2006.

[4] W. Ramberg und W. R. Osgood, „Description of stress strain-strain curves by three parameters," NACA Technical Note No. 902, Washington, 1943.

[5] O. H. Basquin, „The Exponential Law of Endurance Tests," American Society for Testing and Materials Proceedings, Vol. 10, pp. 625-630, 1910.

[6] L. A. Coffin, „A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal," Trans. ASME, Bd. 76, pp. 931-950, 1954.

[7] S. S. Manson, „Fatigue: A complex subject - some simple approximations," Experimental Mechanics 5, Nr. 7, pp. 45-87, 1965.

[8] R. W. Landgraf, J. Morrow und T. Endo, „Determination of the cyclic stress-strain curve," Journal of Materials, Nr. 4, pp. 176-188, 1969.

[9] R. W. Wagener, Zyklisches Werkstoffverhalten bei konstanter und variabler Beanspruchungsamplitude, Dissertation TU Clausthal, 2007.

(1) BMW Group, München

(2) Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt

(3) Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik, Technische Universität Darmstadt

Erweiterung der Produktpalette um Dünnstbänder aus Kupfer

MKM und AML beschließen langfristige Partnerschaft

5. Okt. 2016 – Die Mansfelder Kupfer und Messing GmbH (MKM), Hettstedt, hat eine langfristige Zusammenarbeit mit Azienda Metalli Laminati S.p.A. (AML), Quargnento, abgeschlossen. Das norditalienische Unternehmen fertigt Dünnstbänder für die Kabelindustrie, für Wärmetauscher und für Kondensatoren. Mit der Partnerschaft baut MKM sein Produktportfolio für seine Kunden aus, erweitert seine Vertriebskanäle und gewährleistet auf Basis der Kupfer-Vorbänder von MKM eine gleichbleibend hohe Qualität.

Durch die Partnerschaft wird MKM seine Produktpalette um den Abmessungsbereich von 0,025 bis 0,10 mm bei einer Breite von 3 bis 500 mm ergänzen. MKM ist bereits Marktführer bei Kabelwickelband mit Dicken ab 0,10 mm. „Wir arbeiten bereits seit 2005 eng mit MKM zusammen und freuen uns, dass wir durch unsere strategische Partnerschaft das Geschäftsvolumen ausbauen können. Als wichtigen ersten Schritt haben wir bereits in neue Schneidkapazitäten investiert", so Jacopo Colonna, CEO von AML. „Durch unsere Partnerschaft werden wir nicht nur das Angebot für unsere Kunden in Europa erweitern, sondern erwarten Wachstumsimpulse aus weiteren Zielmärkten wie Indien, USA und dem mittleren Osten", betont Roland Harings, CEO von MKM.

Max Brandt, Geschäftsleiter Vertrieb, Marketing sowie F&E, unterstreicht: „Die Partnerschaft mit AML ist ein weiterer Schritt, mit dem wir sowohl unser Produktportfolio als auch unsere Vertriebskanäle erweitern werden. Damit erfüllen wir den Wunsch zahlreicher Kunden, unsere Produktvielfalt mit MKM-Qualität weiter auszubauen."

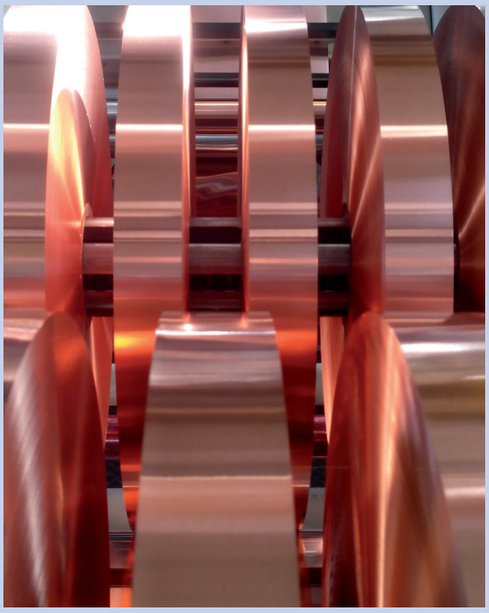

Foto: MKM

MKM erweitert Produktportfolio um Dünnstbänder