

# WIE VERBESSERT MAN DIE FESTIGKEIT VON KUPFERLEGIERUNGEN, OHNE IHRE ELEKTRISCHE LEITFÄHIGKEIT ZU VERSCHLECHTERN?

>> von **Andreas Zilly, Ursula Christian, Dorothea Nobiling, Simon Kött, Norbert Jost** > Im Alltagsleben nutzen wir eine Vielzahl von meist sehr praktischen Geräten, deren Funktionalität nicht nur auf der sinnvollen Anordnung der einzelnen Bauteile, sondern auch auf der Verwendung geeigneter Materialien beruht. Als Konsument muss man sich um solche Fragen nicht kümmern, für die Ingenieure ist es dagegen eine dauernde Herausforderung, leistungsfähigere Bauteile und Materialien zu entwickeln. Dabei steht in der Regel nicht ein „revolutionärer Durchbruch“ im Vordergrund, sondern das stetige Verbessern in kleinen Schritten, weil man auf einer langen Entwicklungsreihe bewährter Techniken und Materialien aufsetzen kann. An der Hochschule Pforzheim kann die anwendungsbezogene Forschung im Bereich Werkstoffkunde inzwischen eine Reihe von bemerkenswerten Erfolgen aufweisen, die in Industrie und Wissenschaft eine zunehmende Beachtung finden. Dies gilt auch für ein aktuelles Projekt, das in der einschlägigen Fachpresse ausführlich vorgestellt worden ist<sup>1</sup> und über das im Folgenden kurz berichtet werden soll.

In der Elektrotechnik und Elektronik finden Kupferbasislegierungen schon seit vielen Jahrzehnten Verwendung. Speziell Kupfer-Magnesium-Legierungen werden für Leitungsdrähte, elektrische Anschlüsse, stromführende Federn sowie Relaisbauteile eingesetzt und haben dabei das umweltschädliche Kupfer-Cadmium verdrängt. Ein besonderer Anwendungsfall für Kupfer-Magnesium sind die Fahrleitungen für Eisenbahnen und hier insbesondere für die Hochgeschwindigkeitsstrecken moderner Schnellzüge wie z.B. den ICE (*Abb. 1*).



**Abb. 1**  
Hochgeschwindigkeitsbahnstrecke  
Quelle: Deutsche Bahn AG / Claus Weber

Aufgrund des komplexen physikalischen Verhaltens des Systems Stromabnehmer/Fahrleitung muss mit einer Erhöhung der Geschwindigkeit der Züge die Vorspannung der Fahrleitungen erhöht werden. Das stößt wegen der begrenzten Festigkeiten bisheriger konventioneller Kupferlegierungen aber an eine physikalische Grenze, die als „catenary barrier“ oder als „Oberleitungsgrenze“ bezeichnet wird. Eine Verbesserung der Festigkeit solcher Hochspannungsleitungen ging mit den bisherigen Herstelltechnologien indes mit einer Verringerung der elektrischen Leitfähigkeit einher – ein klassischer Zielkonflikt.

Um diesen Zielkonflikt zu lösen, wurde in dem hier vorgestellten Forschungsprojekt versucht, die Festigkeit dieser Werkstoffe durch eine sogenannte Ausscheidungshärtung gezielt zu erhöhen. Einfach formuliert geht es dabei darum, aus dem übersättigten homogenen Mischkristallgefüge der Kupfer-Magnesium-Legierung durch Wärmebehandlungen feine, mikroskopisch kleine Partikel auszuscheiden. Um den Grund dafür zu verstehen, muss man wissen, dass die Leitfähigkeit von Kupfer umso höher ist, je reiner es ist. Reines Kupfer hat indes eine sehr niedrige Festigkeit und fast jede Maßnahme, die Festigkeit zu erhöhen, führt zu einer Erniedrigung der Leitfähigkeit. Bis auf eine einzige Maßnahme, und dies ist eben die Ausscheidungshärtung. Ihre Anwendung hätte gleich zwei Vorteile:

- 1.) Sehr feine Ausscheidungen bewirken eine Verfestigung des Gefüges, da sie zu starken Verspannungen des Metallgitters führen.
- 2.) Die Gefügematrix würde hingegen in ihren Eigenschaften den niedrig magnesiumhaltigen Legierungen ähneln, was zu einer Erhöhung der Leitfähigkeit führen würde.

Da höher magnesiumhaltige Kupferlegierungen bisher nur zu Forschungszwecken eingesetzt wurden, wurde mit der Herstellung von Gussproben im Labormaßstab begonnen. Für diesen Zweck wurde eine Mini-Vakuum-Gießanlage (*Abb. 2*) eingesetzt, mit der hochreines Kupfer mit dem entsprechenden Mg-Gehalt in einem graphitbeschichteten Keramiktiegel versetzt und erschmolzen wurde.

Diese höher magnesiumhaltigen Legierungen verhalten sich beim Schmelzen und Vergießen sehr ungünstig, was zum einen an dem großen Erstarrungsintervall und zum anderen an der hohen Sauerstoffaffinität von Magnesium liegt, so dass eine Erschmelzung unter Schutzgasatmosphäre naheliegt. Praktisch zeigte sich, dass das Vergießen von Magnesium unter Vakuum nicht praktikabel ist. Versuche mit einer Schutzgasatmosphäre aus Argon führten zu einer unzureichenden Oberflächengüte und Schlackenbildung. Unter Begasung mit reinem Stickstoff überzog sich das zu erschmelzende Magnesium dagegen mit einer gelblichen Magnesiumnitridschicht, die das Abdampfen des Magnesiums bei Temperaturen unterhalb des Schmelzpunktes sehr effektiv verringert. Da der Schmelzpunkt von Kupfer mit 1083°C deutlich über dem Schmelzpunkt von Magnesium liegt, ist diese Schutzschicht von großem Vorteil.



Abb. 2  
Mini-Vakuum-Gießanlage  
Foto: Andreas Zilly

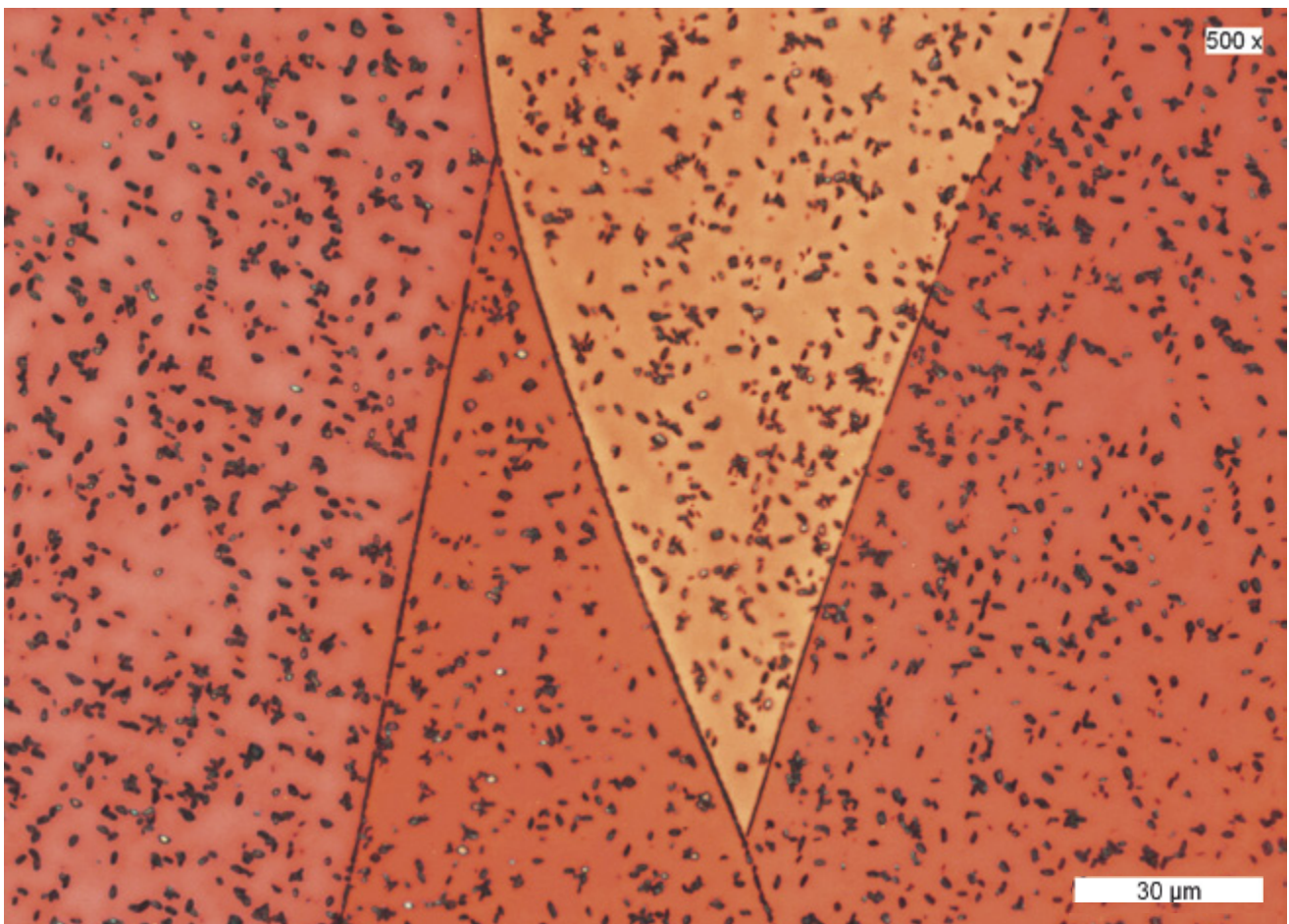
### Wärmebehandlungen

Die gegossenen Proben wurden bei einer Temperatur von 720°C vollständig homogenisiert. Aufgrund der geringen Probengröße kam für die anschließende Ausscheidungsbehandlung ein horizontales Schubstangendilatometer zum Einsatz. Dies hatte den Vorteil, dass neben der sehr reinen Schutzgasatmosphäre und dem genau regelbaren Temperaturverlauf gleichzeitig noch die grundsätzliche Eignung der Dilatometrie (Messung der thermischen Längenänderungen) zur Analyse der Ausscheidungsprozesse überprüft werden konnte. Die nicht ausscheidungsfähigen Kupfer-Magnesium-Legierungen zeigten bei Voruntersuchungen mit dem Dilatometer keine signifikanten Unterschiede zu reinem Kupfer. Im Gegensatz dazu wiesen die ausscheidungsfähigen Legierungen zunächst ein deutlich anderes Ausdehnungsverhalten auf, welches erst nach einer gewissen Zeit wieder dem von reinem Kupfer ähnlich war. Dieser Vorgang war bei höheren Legierungsgehalten schneller abgeschlossen, da aufgrund einer höheren Sättigung des Mischkristalls die Diffusionswege kürzer sind. Diese Ausscheidungsbehandlungen wurden bei verschiedenen Temperaturen zwischen 350°C und 550°C durchgeführt. Die sich dabei bildenden Ausscheidungen unterscheiden sich in Abhängigkeit von der Temperatur und Glühdauer sowohl in ihrer Art (kontinuierlich und diskontinuierlich) als auch in ihrer Größe.

### Werkstoffkundliche Untersuchungen

Der Werkstoff Kupfer ist in der metallographischen Probenpräparation relativ anspruchsvoll. Kupfer in reiner Form und mit geringen Legierungsgehalten ist sehr weich, zäh, leicht verformbar und neigt schnell zur Kratzerbildung. Vor allem bei Proben mit sehr großen Abmessungen gestaltet sich die Herstellung einer hohen Oberflächengüte als sehr aufwändig. Kupferlegierungen sind zwar deutlich härter als reines Kupfer, aber bei der Präparation von Kupfer-Magnesium kommt es aufgrund der aus dem Verband gelösten Partikel der härteren Ausscheidungsphase schneller zu Kratzern. Das Einbetten der Proben wurde mit einer automatischen Einbettpresse vorgenommen. Beim anschließenden Schleifen wurde entsprechend den Probengrößen mit Nassschleifpapieren gearbeitet. Das darauf folgende Diamantpolieren muss so lange durchgeführt werden, bis alle Verformungen und eventuell eingedrückte Schleifpartikel verschwunden sind. Das chemisch-mechanische Endpolieren ist besonders wichtig, da damit eine fast kratzerfreie Oberfläche erzielt wird. Für die werkstoffkundlichen Untersuchungen wurden spezielle Ätzverfahren verwendet. Die Abb. 3 zeigt das Gefüge der Legierung CuMg<sub>2</sub>, welche nach dieser Methode präpariert wurde. >

Abb. 3  
CuMg<sub>2</sub>, 500-fach, Farbätzung nach Klemm III  
Foto: Andreas Zilly



## Leitfähigkeitsmessungen

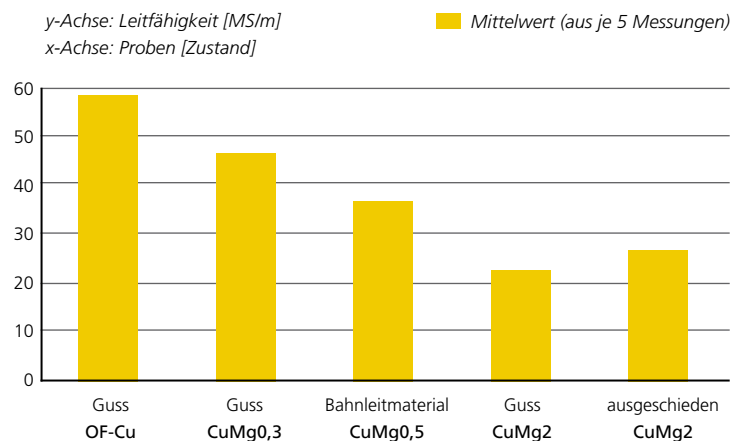
Die höhere Festigkeit sollte wie erwähnt mit einer verbesserten elektrischen Leitfähigkeit einhergehen. Da bereits geringe Veränderungen der Leitfähigkeit bei der Optimierung von Stromleitern möglichst genau und reproduzierbar erfasst werden müssen, wurde darauf besonderes Augenmerk gerichtet. Der Einsatz konventioneller Messmethoden führte bei wiederholten Messungen zu Unterschieden bei den Ergebnissen, als besser geeignet erwies sich das Wirbelstromverfahren. Durch die phasensensitive Messsignalbewertung ist auch eine berührungslose Messung, beispielsweise unter einer nichtleitenden Oberflächenbeschichtung, möglich. Da der Einfluss der Oberflächenrauheit nur minimal ist, lässt sich die Leitfähigkeit auch unmittelbar an Proben nach einer Wärmebehandlung ermitteln, bei denen lediglich die Oxidschicht mechanisch entfernt wurde. Damit lassen sich auch verhältnismäßig kleine Probengeometrien, wie sie bei diesen Untersuchungen vorliegen, noch sehr genau messen. Da auch an einem eingebetteten, präparierten und geätzten Schliff die Leitfähigkeit noch sehr genau bestimmt werden kann, reduziert sich zudem die benötigte Probenanzahl für die verschiedenen Untersuchungen. Bei den ausscheidungsgeglühten Proben der Legierung CuMg<sub>2</sub> konnte eine maximale Leitfähigkeit von 25,8 MS/m ermittelt werden. Durch eine weitere gezielte Gefügeoptimierung ist hier noch eine Steigerung zu erwarten. Die Abb. 4 zeigt diesen Wert im Vergleich zu reinem OF-Cu und zu bisher verwendetem Leitmaterial.

Die bisherigen theoretischen und darauf basierenden phänomenologischen Untersuchungen lassen in den ausscheidungsfähigen Kupfer-Magnesium-Legierungen ein hohes Optimierungspotential vermuten. Trotz der derzeit noch zu großen Ausscheidungen konnten schon deutliche Härtesteigerungen erreicht werden. Die metallographische Gefügepräparation erwies sich als verhältnismäßig anspruchsvoll. Die mit dem Wirbelstromverfahren durchgeführten Leitfähigkeitsmessungen zeigten Leitfähigkeitserhöhungen, die mit den künftigen experimentellen Versuchsreihen noch deutlich gesteigert werden sollen.

## Literatur:

<sup>1</sup> Andreas Zilly / Ursula Christian / Dorothea Nobiling / Simon Kött / Norbert Jost  
**Herstellung von ausscheidungsfähigen CuMg-Legierungen und deren metallographische Untersuchung**  
 Erscheint in: Praktische Metallographie, München, 2011.

Abb. 4 – Leitfähigkeitswerte von CuMg



Tab.: Andreas Zilly

### M. Sc. Andreas Zilly

ist Laboringenieur im Werkstoffkundelabor des Studiengangs Maschinenbau an der Fakultät für Technik und promoviert an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg.

### Ursula Christian und M. Sc. Simon Kött

sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Institut für Angewandte Forschung.

### Dipl.-Ing. (FH) Dorothea Nobiling

ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Schmucktechnologischen Institut.

### Prof. Dr.-Ing. Norbert Jost

ist Professor im Studiengang Maschinenbau an der Fakultät für Technik und leitet dort mehrere Forschungsvorhaben mit werkstoffkundlichen Schwerpunkten.