

## KURZBERICHT

## Beryllium-Ersatz in Kupferlegierungen

### Motivation

Kupferlegierungen finden unter anderem als Steckverbinder ein breites Einsatzgebiet. Ob in der Elektrik heutiger Automobile, in Kommunikationsnetzen oder der Unterhaltungselektronik, Kupferlegierungen werden bevorzugt eingesetzt. Durch die fortschreitende Entwicklung und der damit einhergehenden Miniaturisierung steigen die Anforderungen an die verwendeten Werkstoffe. Auch rücken zunehmend umwelttechnische und gesundheitliche Aspekte bei der Werkstoffauswahl in den Fokus. Besonders betroffen sind hierbei berylliumhaltige Kupferlegierungen. Diese besitzen zwar hervorragende mechanische und elektrische Eigenschaften, werden jedoch aufgrund ihres Berylliumanteils in zweierlei Hinsicht als kritisch eingestuft. Neben der karzinogenen Wirkung des Berylliums können die bei der Bearbeitung berylliumhaltiger Werkstoffe entstehenden Stäube schwere Lungenerkrankungen hervorrufen. Auch wird Beryllium in nur wenigen außereuropäischen Ländern und Firmen produziert, wodurch ein ungünstiges Abhängigkeitsverhältnis für den europäischen Wirtschaftsstandort besteht. Aufgrund dieser Prämisse wird an Alternativen zu Cu-Be-Legierungen geforscht. Da die konventionelle Werkstoffentwicklung jedoch sehr zeit- und kostenaufwendig ist, rücken heute vermehrt sogenannte High-Throughput-Methoden in den Fokus. Eine solche Methode wurde am fem in einem Vorgängerprojekt entwickelt und erfolgreich angewandt. Dabei konnte das System Cu-Ni-Al als potentiell vielversprechend für die Entwicklung neuer hochfester Legierungen identifiziert werden.

### Zielsetzung

Im nun abgeschlossenen Gemeinschaftsprojekt von fem, IWM und NMI galt es, ausscheidungshärtende Legierungen aus diesem System materialwissenschaftlich zu charakterisieren, entsprechend den Anforderungen des Marktes zu entwickeln und auf den Industriemaßstab zu übertragen. Erklärte Ziele waren die Steigerung der elektrischen Leitfähigkeit bei gleicher oder höherer Festigkeit im ersten Projektabschnitt und die Fertigung ausgewählter Legierungen im Rahmen eines Demonstrators bei den Projektpartnern aus der Industrie im zweiten Projektabschnitt. Die Werkstoffentwicklung sollte durch Simulationen unterstützt werden.

### Durchführung

Auf Basis thermodynamischer und kinetischer Simulationen, durchgeführt am IWM, wurde herausgearbeitet, inwiefern das Legieren eines vierten Legierungspartners einen Einfluss auf die erreichbaren technischen Eigenschaften hat. Berücksichtigt

wurden Elemente, die als nicht kritisch bezüglich der wirtschaftlichen Bedeutung und des Versorgungsrisikos gelten. Mit Hilfe umfangreicher automatisierter Simulationen konnten ohne groß angelegte Versuchsreihen vielversprechende Legierungen ausgewählt werden. Anschließend wurden diese am fem nach einer industrietypischen Prozessroute hergestellt und prozessbegleitend charakterisiert. Diese deckt das Gießen, die Weiterverarbeitung zu Blechen und anschließende Wärmebehandlungen ab. Insbesondere die Entwicklung der Härte, der elektrischen Leitfähigkeit und der Mikrostruktur in Abhängigkeit der Prozessparameter und Legierungszusätze standen hierbei im Fokus. Am NMI fanden TEM-Untersuchungen zur Beschreibung der Nanostruktur statt. Die Erkenntnisse dienten dem Abgleich der Simulationsmethodik und zur Beschreibung der im Werkstoff ablaufenden Prozesse. Denn ein vertieftes Verständnis für die Legierung ist eine Voraussetzung um diese hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und Herstellroute optimieren zu können.

Ferner fand die genannte Screening-Methode auf Basis von Diffusionsproben in modifizierter Form Anwendung um feiner aufgelöste Zusammensetzungsbereiche beschreiben zu können. Insbesondere der Einfluss vierter Legierungselemente wurde über diese Methode beurteilt. Ausgewählte Legierungen wurden in der zweiten Projekthälfte bei Industriepartnern durch Stranggießen und Feingießen hergestellt, weiterverarbeitet und am fem hinsichtlich ihrer technologischen Eigenschaften untersucht. Hierzu gehörten das Verhalten unter mechanischer Last, die Beschichtbarkeit, die Korrosionsbeständigkeit und das Verschleißverhalten. Ferner wurde das Stanzverhalten bei einem der Industriepartner untersucht.

### Ergebnisse

Hergestellt wurden Legierungen mit Gehalten an Ni zwischen 8 und 18 Gew.-% sowie Al-Gehalten zwischen 1 und 4 Gew.-%. Als vierte Legierungselemente wurden Co, Cr, Fe und Mn systematisch untersucht, da diese in den thermodynamischen Simulationen am aussichtreichsten waren hinsichtlich der Ausbildung an härtender Ni<sub>3</sub>Al-Phase (Abb. 1) und hinsichtlich der Reinheit der Kupfermatrix, wodurch eine hohe elektrische Leitfähigkeit erwartet wird. Weitere Elemente (Ge, Nb, Si, Sn, Ti und Zn) wurden in einzelnen Abgüssen stichprobenartig geprüft. Die Legierung CuNiAl sowie deren quaternäre Varianten erwiesen sich als gut gießbar, walzbar und härtbar. Durch eine Kombination aus einem Kaltwalz- und einem Auslagerungsprozess konnten die mechanischen wie auch die elektrischen Eigen-

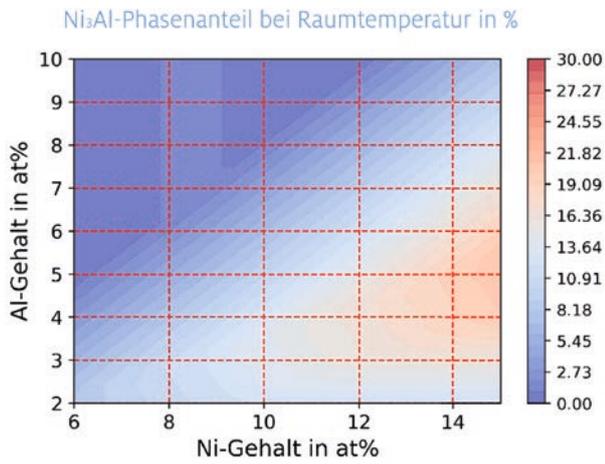


Abb. 1: Berechneter Phasenanteil an  $Ni_3Al$ -Ausscheidungen in  $CuNiAlCr1$ -Legierungen in Abhängigkeit des Al- und Ni-Gehaltes

schaften gesteigert werden. Die Legierungen überraschten mit einem schnellen Anstieg der Härte bereits nach einer kurzen Auslagerungsdauer von 15 Minuten bei  $500^\circ C$  und dem Aufrechterhalten dieser Härte über eine Dauer von ca. 100 h. Dargestellt ist dies in einem Auslagerungsschaubild für die Ausgangslegierung  $CuNi15Al2$  und optimierte ternäre und quaternäre Varianten in Abbildung 2, oben. Unter den quaternären Legierungen zeichneten sich solche mit Zusätzen an Cr durch eine Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit und Härte bzw. Festigkeit aus (Abb. 2, unten). Auch der Einfluss optimierter Legierungszusammensetzungen auf die Härte gehen daraus

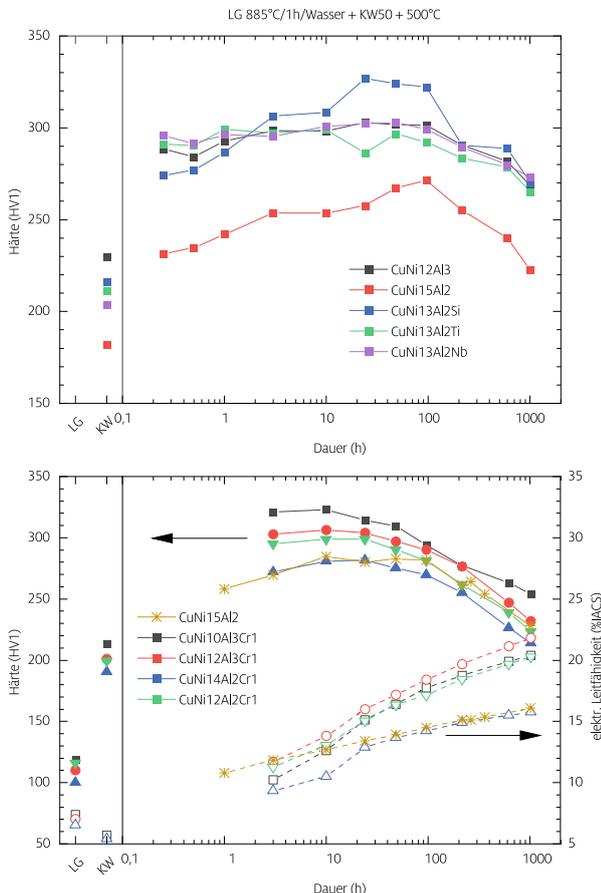


Abb. 2: Auslagerungsschaubilder ausgewählter  $CuNiAl$ -Legierungen

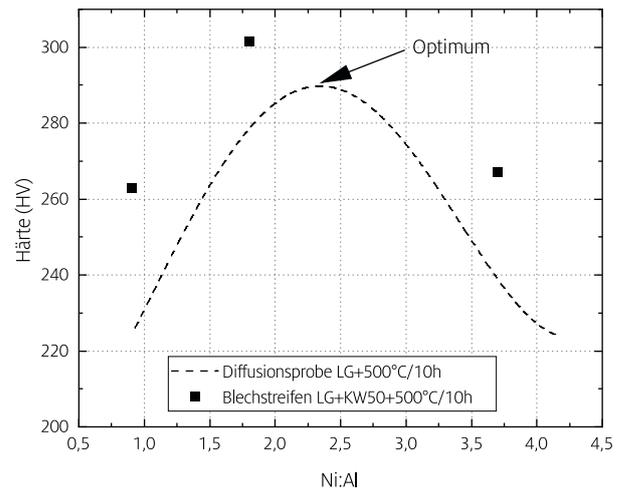


Abb. 3: Einfluss des Ni:Al-Verhältnis auf die erreichbare Härte bei einem Cu-Gehalt von 80 At.-%

hervor. So konnte diese gegenüber der Ausgangslegierung, bei gleicher bzw. leicht verbesserter elektrischer Leitfähigkeit, um etwa 50 HV bzw. 20 % gesteigert werden. Mit Hilfe einer Diffusionsprobe konnte der Einfluss des Verhältnisses aus den beiden Legierungspartnern Ni und Al fein aufgelöst untersucht werden. Wie aus Abbildung 3 hervorgeht, existiert bei einem atomaren Ni:Al-Verhältnis von etwa 2,4 ein Optimum hinsichtlich der erreichbaren Härte. Das Eigenschaftsprofil der entwickelten  $CuNiAl$ -Legierungen ist denen kommerzieller und experimenteller Kupferbasiswerkstoffen in Abbildung 4 gegenübergestellt. Die entwickelten  $CuNiAl$ -Legierungen zeichnen sich durch ihre besonders hohe Festigkeit aus und weisen dennoch eine moderate elektrische Leitfähigkeit auf. Dies beruht, wie festgestellt werden konnte, auf der Bildung feiner Ausscheidungen vom Typ  $L_{12}-(Ni, Cu)_3Al$  mit einer Größe von 10 nm bis 20 nm (Abb. 5). Daneben wurden, bevorzugt an Korngrenzen, Ausscheidungen des gleichen Typs teils in grober Ausprägung beobachtet welche einen vermutlich nur geringen Beitrag zur Härtesteigerung aufweisen.

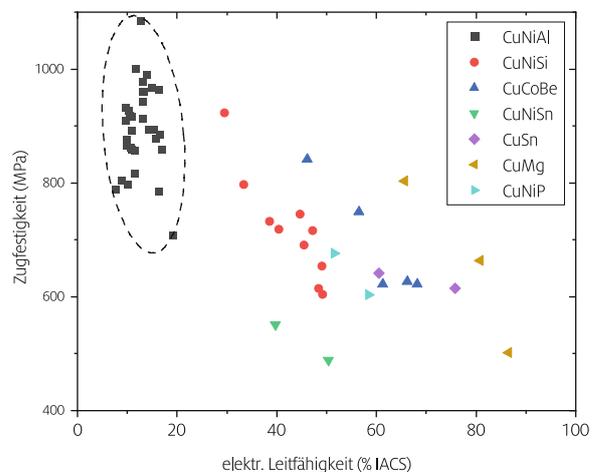


Abb. 4: Eigenschaftsprofil verschiedener Kupferwerkstoffklassen

Die Demonstratorversuche bei den Projektpartnern aus der Industrie verliefen erfolgreich. Es konnte sowohl Rundmaterial als

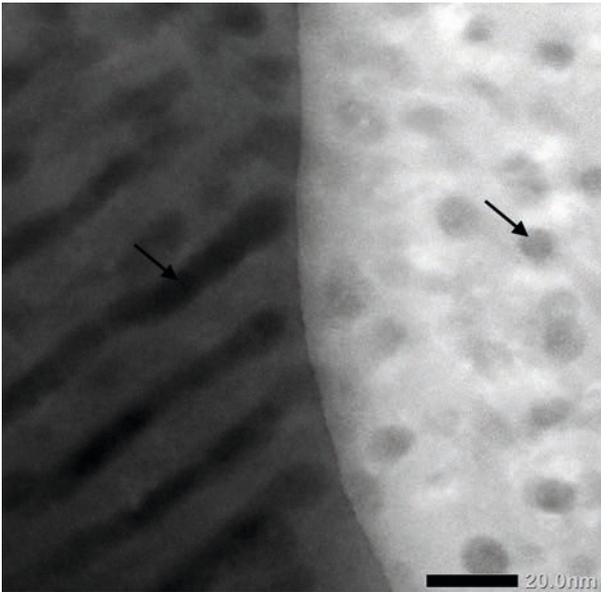


Abb. 5: Ni<sub>3</sub>Al-Ausscheidungen in unterschiedlicher Orientierung zur Abbildungsachse

auch Flachmaterial stranggegossen und zu Draht bzw. Blech weiterverarbeitet werden. In vergleichenden technologischen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass CuNiAl-Legierungen hinsichtlich der galvanischen Verzinnbarkeit, der Korrosionsbeständigkeit im Salzsprühnebel und der Verschleißbeständigkeit gleichwertig waren oder die Eigenschaften von CuBe sogar übertreffen. Auch konnten Bleche aus CuNiAl-Legierungen mit üblichen Werkzeugen gestanzt werden.

### Zusammenfassung

Legierungen auf der Basis von CuNiAl konnten im Rahmen des Forschungsprojektes umfangreich simuliert, charakterisiert und erfolgreich optimiert werden. Auch die Übertragbarkeit der im Labor hergestellten Legierungen in den Industriemaßstab konnte gezeigt werden. Durch angepasste Legierungsgehalte und ein viertes Legierungselement konnten die Härte und die elektrische Leitfähigkeit wie erhofft gesteigert werden. CuNiAl-Legierungen zeichnen sich durch eine sehr gute Beständigkeit gegenüber Überalterung aus. Auch weisen sie trotz höchster Festigkeit ein hohes Verformungsvermögen auf. Sie sind sowohl als Knetlegierung als auch als Gusslegierung einsetzbar. Erste Untersuchungen legen nahe, dass sie beschichtbar sowie vergleichsweise beständig gegenüber Korrosion und mechanischem Verschleiß sind. Auch die Stanzbarkeit ist gegeben. Darüber hinaus hat das Projekt erheblich zum Verständnis der Zusammenhänge zwischen den Materialeigenschaften, der Verarbeitungsgeschichte und der Mikrostruktur beigetragen und bietet damit eine gute Ausgangslage für eine industrielle Adaption.

### Danksagung

Wir danken dem Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg, das im Rahmen der Förderung der „Innovativen Rohstoffnutzung in KMU“ das vorliegende Projekt finanziell unterstützt hat.



**Baden-Württemberg**

MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, ARBEIT UND WOHNUNGSBAU

3-4332.62-FEM/46

6.12.2018 – 31.12.2020

#### INDUSTRIEPARTNER

Agosi AG | Robert Bosch GmbH | G. RAU GmbH & Co. KG | Indutherm Erwärmungsanlagen GmbH | Nonnenmacher GmbH  
Wieland-Werke AG | Deutsches Kupferinstitut Berufsverband e.V.

#### FORSCHUNGSPARTNER

IWM | Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik, Freiburg  
NMI | Naturwissenschaftliches und Medizinisches Institut an der Universität Tübingen, Reutlingen

#### ANSPRECHPARTNER

fem | Forschungsinstitut Edelmetalle + Metallchemie | Katharinenstraße 17 | 73525 Schwäbisch Gmünd | Deutschland  
Dr. Ulrich Klotz, klotz@fem-online.de | Dr. Miriam Eisenbart, eisenbart@fem-online.de, T +49 7171 1006-704