

# MODELLIERUNG DER AUSSCHIEDUNGS- KINETIK EINER CU-LEGIERUNG

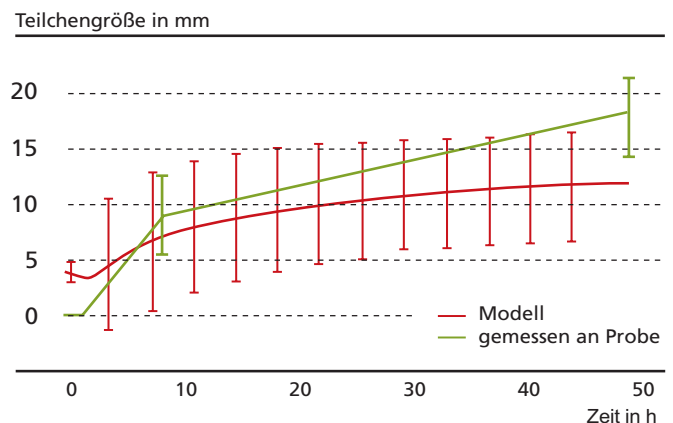
Dr. Wulf Pfeiffer | Telefon +49 761 5142-166 | wulf.pfeiffer@iwm.fraunhofer.de

Viele Werkstoffe erreichen ihre guten mechanischen Eigenschaften durch den Mechanismus der Ausscheidungshärtung. Dies gilt beispielsweise für ausscheidungsgehärtete Aluminiumlegierungen, die bei geringem Gewicht hohe Festigkeiten erreichen, oder für Nickellegierungen, die dadurch auch bei hohen Temperaturen gute Festigkeits- und Kriecheigenschaften besitzen. In Kupferlegierungen nutzt man diesen Mechanismus, da dadurch gute Festigkeits- und Relaxationseigenschaften mit hoher elektrischer Leitfähigkeit einhergehen. Diese Eigenschaftskombination erfüllt die hohen Anforderungen an eine gute und sichere Kontaktierung, die beispielsweise bei Steckverbindern besonders wichtig sind.

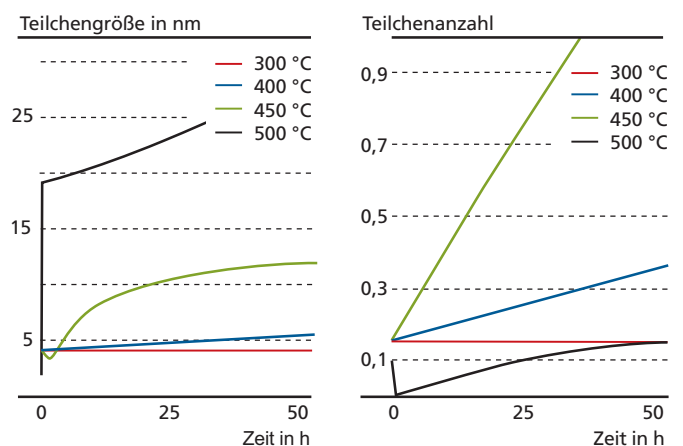
## Entwicklung von Ausscheidungsgrößen

Die Ausscheidungsgröße und -verteilung hat einen wesentlichen Einfluss auf die resultierenden mechanischen Eigenschaften. Diese Gefügeeigenschaften lassen sich nach einer Lösungsglühung beispielsweise durch eine Anpassung der Auslagerungstemperatur und -dauer sowie der Walzparameter einstellen. Dabei sind jeweils die Möglichkeiten der Temperaturführung im gesamten Herstellungsprozess mit zu beachten.

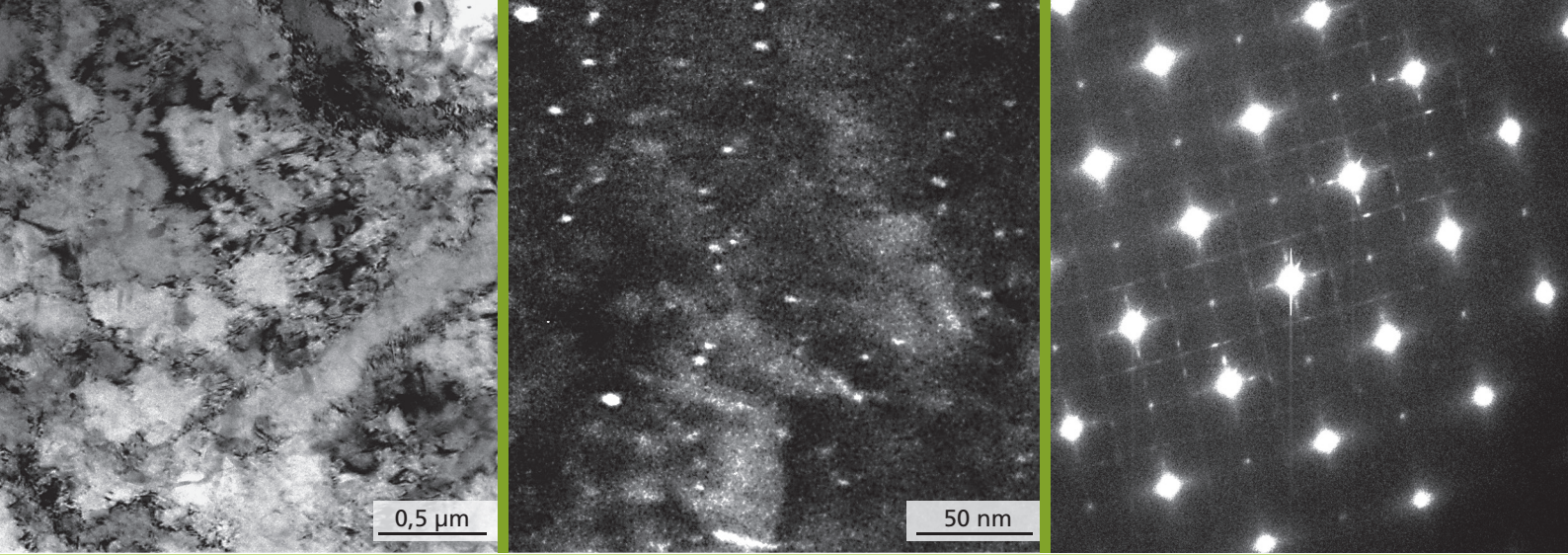
Im Rahmen eines AiF-geförderten Projekts wurde am Fraunhofer IWM an hochleitfähigen Cu-Ni-Si-Legierungen zunächst die Ausscheidungsverteilung von verschiedenen Zuständen analysiert. Dazu wurden Proben mit unterschiedlichen Glühparametern entnommen, ihre Eigenschaften ermittelt und die Ausscheidungsverteilung im Transmissionselektronenmikroskop (TEM) vermessen. In der Abbildung oben rechts sind TEM-Aufnahmen wiedergegeben, anhand derer sich charakteristische Eigenschaften der Mikrostruktur



1 Ausscheidungsdurchmesser, berechnet auf Grundlage eines thermodynamisch-kinetischen Modells und gemessen im TEM.



2 Anhand des Modells lassen sich die Ausscheidungsentwicklung nach dem Lösungsglühen und die Auslagerung bei verschiedenen Temperaturen berechnen.



TEM-Hellfeldaufnahme einer ausscheidungsgehärteten Cu-Legierung mit Versetzungszellen (links). Per Dunkelfeldkontrast verdeutlichte Ausscheidungen (helle Punkte, Mitte). Per Beugungsanalyse bestimmter Ausscheidungstyp (hier  $\text{Ni}_2\text{Si}$ , rechts).

ermitteln lassen. Beispielsweise zeigt eine Dunkelfeldaufnahme Ausscheidungen, die ausgemessen oder analysiert werden können. Über Elektronenbeugung lässt sich der Ausscheidungstyp bestimmen, im Beispiel konnte  $\text{Ni}_2\text{Si}$  identifiziert werden. Für die Anwendung von Kontaktwerkstoffen für Steckverbinder sind Kupferbleche mit kleinen, fein verteilten Ausscheidungen in einer homogenen Mischkristallmatrix wünschenswert.

### Thermodynamische Modellierung

Die Ausscheidungsverteilung wurde mit geeigneten Methoden modelliert, um den Einfluss von Glühparametern während der Herstellung oder den Einfluss erhöhter Anwendungstemperaturen auf die Ausscheidungsmorphologie während des Einsatzes berechnen zu können. Die Entwicklung der Ausscheidungsverteilung über die Zeit lässt sich mithilfe thermodynamisch-kinetischer Modelle berechnen. Wichtig für eine solche Berechnung ist eine gute Kenntnis der thermodynamischen Parameter. Dies sind im Wesentlichen die Gibbs-Energie-Funktionen für die einzelnen Phasen (hier Ausscheidungen und Matrix) in Abhängigkeit von der Temperatur und Legierungskonzentration. Diese Informationen sind häufig in öffentlichen oder kommerziellen Datenbanken für verschiedene Legierungsklassen verfügbar. Ebenso sind kinetische Parameter notwendig, wie die Diffusionskoeffizienten der einzelnen Komponenten in der Mischkristallmatrix. Am Fraunhofer IWM sind verschiedene Softwarepakete (Thermocalc, Matcalc) verfügbar, um Berechnungen zur Teilchenkinetik durchführen zu können. Ebenso wurden in den letzten Jahren am Fraunhofer IWM eigene Materialcodes entwickelt, die je nach Fragestellung angepasst oder erweitert werden können.

Es wurde auf Basis von Literaturdaten einer Cu-Ni-Si-Legierung ein Materialmodell aufgestellt, wobei generell nur sehr wenige Parameter (zur Nukleation oder Grenzflächenenergie) angepasst wurden. Das Modell berücksichtigt Nukleation, Wachstum und Auflösung von Partikeln in einer Matrix. In Abbildung 1 ist die zeitliche Entwicklung der Ausscheidungsgröße wiedergegeben und mit TEM-Messungen verglichen worden. In Abbildung 2 ist die Entwicklung der mittleren Ausscheidungsgröße sowie der relativen Teilchenanzahl bei unterschiedlichen Auslagerungstemperaturen dargestellt. Im gezeigten Beispiel wachsen bei Temperaturen bis  $400\text{ °C}$  die Ausscheidungen aufgrund niedriger Diffusion sehr langsam. Bei  $500\text{ °C}$  hingegen entstehen rasch sehr große, einzelne Partikel. Bei  $450\text{ °C}$  entsteht eine Vielzahl fein verteilter Partikel, was zu hohen Festigkeiten führt.

### Ausblick

Das entwickelte Modell kann mit der Anpassung weniger Parameter die Ausscheidungsentwicklung gut vorhersagen. In weiteren Schritten wird das Modell mit verschiedenen Parametern aus der Produktion abgeglichen. Durch die Implementierung der Ausscheidungsgröße in mechanischen Werkstoffmodellen kann unter anderem die Langzeitstabilität von Legierungen deutlich besser vorhergesagt werden.

Dr. Johannes Preußner