

### **Modelle zur anwendungsnahen und schnellen Simulation der mechanischen Eigenschaften ausscheidungshärtender Aluminiumlegierungen**

AiF-Nr.:  
18641 N/1

Obmann:  
Prof. Dr.-Ing Peter Krug

beteiligte Unternehmen  
simufact engineering gmbh, MAGMA  
Gießereitechnologie GmbH, AUDI AG, Airbus  
Operations GmbH, F + E Technologiebroker  
Bremen GmbH, Härtereier TANDLER GmbH &  
Co. KG, Industrieberatung für  
Wärmebehandlungstechnik IBW,  
Ingenieurbüro Tobias Loose, Sennestahl  
GmbH Stahlhärtereier, ZF Friedrichshafen AG

Laufzeit:  
01.04.2015 – 31.03.2018

Erstelldatum:  
27.07.2018

Forschungsstelle:  
Leibniz-Institut für Werkstofforientierte  
Technologien - IWT

Projektleiter:  
Dr.-Ing. Axel von Hehl

Sachbearbeiter:  
Anastasiya Tönjes

Forschungsvereinigung:  
AWT

Projektbegleitender Fachausschuss  
FA 24 (Wärmebehandlung von  
Nichteisenmetallen)

#### **Zielsetzung und Lösungsweg**

Bei der Wärmebehandlung von Aluminiumbauteilen können Angaben in der Literatur derzeit nur als qualitative Orientierungshilfe für die Auslegung von Wärmebehandlungsprozessen dienen. Die Auswirkungen der Ausscheidungshärtungsparameter auf die mechanischen Eigenschaften wurden zwar für diverse Aluminiumlegierungen experimentell untersucht, jedoch sind die Ergebnisse zumeist lückenhaft oder nur auf bestimmte Teilschritte in der Prozesskette der Wärmebehandlung beschränkt. Demnach fokussieren sich auch die wenigen verfügbaren Modelle mit empirisch-phänomenologischen Ansätzen auf einzelne Teilschritte. Eine schnelle und durchgängige Simulation der Eigenschaftsveränderung durch Wärmebehandlung ist somit bislang nicht möglich. Dies hat für potenzielle Anwender aus der Industrie zur Konsequenz, dass die Möglichkeit, Prozesse und Kosten der Wärmebehandlung durch eine anwendungsnahe Simulation zu optimieren, nicht wahrgenommen werden kann. Eine durchgängige Simulation der Ausscheidungshärtung von Aluminiumbauteilen für die industrielle Anwendung ist derzeit nicht verfügbar, würde aber bei der Auslegung neuer Wärmebehandlungsprozesse oder

bei der Optimierung bestehender Prozesse insbesondere für kleine und mittelgroße Unternehmen wesentliche wirtschaftliche und technologische Vorteile bieten.

Ziel des Vorhabens war daher, ein Modell zu erarbeiten, mit dem sich, mit Hilfe von Zeit-Temperatur-Zusammenhängen, die mechanischen Eigenschaften aushärtbarer Aluminiumlegierungen in Abhängigkeit von den Ausscheidungshärtungsbedingungen der Prozessschritte Lösungsglühen, Abschrecken und Auslagern schnell und hinreichend genau berechnen lassen. Die Umsetzung dieses Modellierungsansatzes wurde am Beispiel einer Aluminiumknetlegierung EN AW-6082 gezeigt.

Folgende wissenschaftlich-technische nutzbare Ergebnisse sollten erzielt werden:

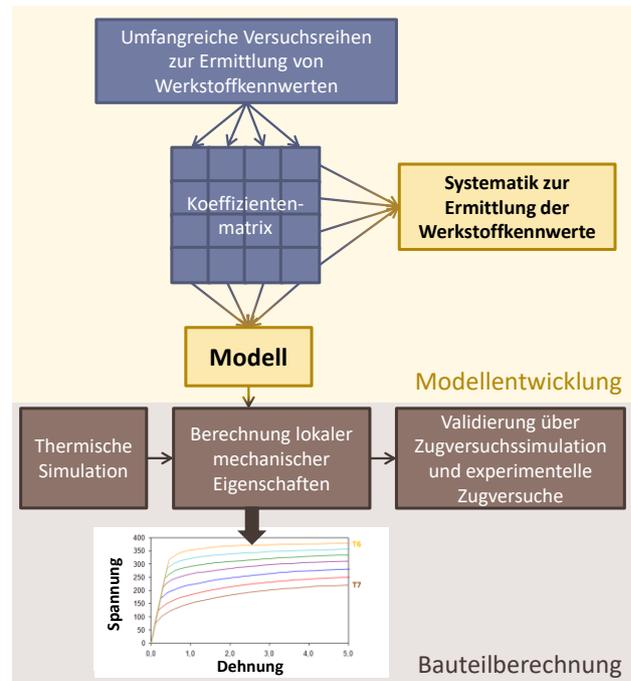
- Detaillierte Kenntnisse über den Einfluss der Prozessparameter bei der Ausscheidungshärtung von Bauteilen aus ausscheidungshärtbaren Aluminiumlegierungen auf die Zielgröße der mechanischen Eigenschaften und modellhafte mathematisch-analytische Beschreibungen der werkstofftechnischen Zusammenhänge.

- Durchgehendes Prozessverständnis vom Prozessschritt Lösungsglühen über das Abschrecken bis hin zum Prozessschritt Warmauslagern einschließlich der Wechselwirkungen zwischen den Prozessschritten.
- Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Beziehung als Zielgröße der berechneten mechanischen Eigenschaften.
- Tiefgehendens Verständnis über den Zusammenhang zwischen der benötigten Mindestmenge an Werkstoffdaten (Datendichte) für das Werkstoffmodell und einer bestimmten, geforderten Mindestgenauigkeit der berechneten Eigenschaften.

Hieraus ergeben sich folgende wirtschaftlich-technologisch nutzbare Ergebnisse:

- Ein validiertes analytisches Werkstoffmodell.
- Eine Systematik, mit der sich für eine bestimmte Ergebnisgenauigkeit des Modells die benötigte Werkstoffdatenbasis in zeit- und kosteneffizienter Weise aufbauen lässt.

Die Methode für die Modellentwicklung ist auf dem Bild 1 schematisch dargestellt.



**Bild 1: Schematische Darstellung der Methode für die Modellentwicklung.**

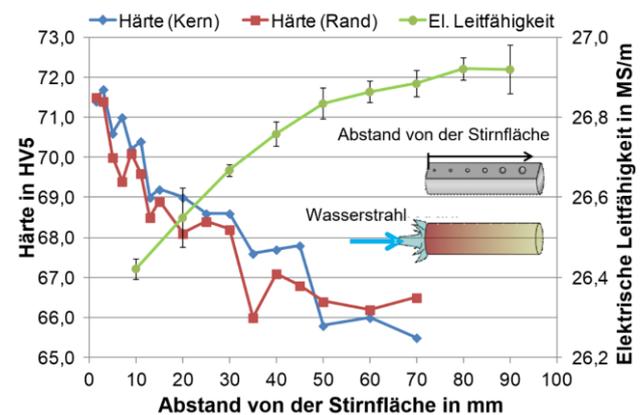
## Ergebnisse

### Ermittlung der Eigenschaften zur Modellentwicklung

Mit Hilfe der Statistiksoftware Cornerstone® wurde ein D-optimaler Versuchsplan erstellt. Als Einflussgrößen auf das Ausscheidungshärtungsergebnis wurden die Ausscheidungshärtungsparameter Lösungsglühdauer und -temperatur, die Abschreckgeschwindigkeit sowie die Auslagerungsdauer und -temperatur miteinander kombiniert und in drei Stufen systematisch variiert. Hierzu wurde eine umfangreiche Versuchsmatrix in einem Parameterkorridor bis knapp über die technisch relevanten Prozessgrenzen hinaus erstellt. Die Kombinationen der Ausscheidungshärtungsparameter außerhalb der technisch relevanten Grenzen sollten der Absicherung des Modells über diese Grenzen hinaus dienen und eine Beschreibung des Werkstoffverhaltens bei unüblichen Ausscheidungshärtungsprozessen ermöglichen. Die meisten Untersuchungen wurden an Flachproben mit Dicken von 2,5 mm durchgeführt. Um genauere Erkenntnisse zum Abschreckverhalten zu bekommen, wurden Jominy-Proben am Prüfstand für Stirnabschreckproben nach DIN EN ISO 642 wärmebehandelt.

An den wärmebehandelten Proben wurden als Zielgrößen die Werkstoffkennwerte (Härte, elektrische Leitfähigkeit und Zugfestigkeit bei Raumtemperatur) ermittelt. Anschließend wurden die gemessenen Daten analytisch bewertet. Anhand der ausgewerteten Daten von Jominy-Proben konnte in einem weiten Spektrum der Einfluss der Aus-

scheidungshärtungsparameter auf die Werkstoffkennwerte Härte und elektrische Leitfähigkeit ermittelt werden. In Bild 2 ist der Zusammenhang zwischen dem Abstand von der Stirnfläche (als Maß für die Abschreckgeschwindigkeit) und der Härte im Kern und am Rand sowie der elektrischen Leitfähigkeit von einer Jominy-Probe dargestellt.



**Bild 2: Zusammenhang zwischen dem Abstand von der Stirnfläche, der Härte im Kern und am Rand sowie der elektrischen Leitfähigkeit von einer Jominy-Probe aus EN AW-6082 (Lösungsglühen: 500 °C, 15 min; Abschreckmedium: Wasser; Warmauslagern: 100 °C, 20 h)**

Im nächsten Schritt wurden die ermittelten experimentellen Ergebnisse systematisch mittels multipler Regressionsanalysen ausgewertet. Hierzu wurden die Einflüsse zwischen den Ausscheidungshärtungsparametern auf die Werkstoff-

kennwerte Härte, elektrische Leitfähigkeit und Zugversuchskenngrößen ermittelt und in funktionalen Zusammenhängen ausgedrückt. Weiterhin wurden die Korrelationen der Werkstoffkennwerte untereinander ermittelt, da Härtewerte und elektrische Leitfähigkeit als Hilfsgrößen zur indirekten Bestimmung der Zugversuchskenngrößen herangezogen werden sollten. Zur Ermittlung der funktionalen Zusammenhänge wurde auf eine kommerzielle Statistiksoftware Cornerstone® zurückgegriffen. Aus dieser systematischen Auswertung der gemessenen Werkstoffkennwerte wurde eine umfassende Koeffizientenmatrix erstellt, die die Eingangparameter für das analytische Modell umfasst. Die Güte der Regressionsmodelle bezogen auf die Zielgrößen (Werkstoffkennwerte) ist in der Tabelle 1 zusammengefasst.

**Tabelle 1: Überblick über die Güte der Regressionsmodelle bezogen auf die Zielgrößen (elektrische Leitfähigkeit, Zugfestigkeit, Bruchdehnung, 0,2-%-Dehngrenze und E-Modul).**

		R-Square	Adj R-Square	RMS Error
Flachproben	Härte	0,9736	0,9521	3,0070
	elektrische Leitfähigkeit	0,9750	0,9710	0,3214
	Zugfestigkeit	0,9827	0,9612	8,4286
	Bruchdehnung	0,5571	0,3707	0,2600
	0,2-%-Dehngrenze	0,9820	0,9696	7,9466
	E-Modul	0,1407	0,1077	9,9153
	Jominy-Proben	Härte im Kern	0,9774	0,9767
Härte am Rand		0,9856	0,9852	1,3175
elektrische Leitfähigkeit		0,9975	0,9974	0,1082

Bei der Härte, der elektrischen Leitfähigkeit, der Zugfestigkeit und der 0,2-%-Dehngrenze wurde ein adjustiertes Bestimmtheitsmaß von > 0,9 erreicht. Das bedeutet, dass die Ausscheidungshärtungsparameter als Einflussgrößen geeignet sind, um die Werkstoffkennwerte als Zielgrößen des Ausscheidungshärtungsprozesses vorherzusagen. Die Modelle besitzen eine hohe Anpassungsgüte. Die Modelle für die Bruchdehnung und den E-Modul haben dagegen nur ein geringes Bestimmtheitsmaß. Letzteres liegt daran, dass in den Daten noch ein nicht identifizierter Faktor verborgen ist. Dadurch lässt sich die Berechnung der beiden Zielgrößen mit den vorhandenen Daten nicht durchführen.

Um die Robustheit des Modells bezüglich der Ausreißer zu prüfen, sollten bewusst „falsche“ Daten unter die experimentellen Ergebnisse gemischt werden. Es konnte festgestellt werden, dass aufgrund der geringen Datenmenge bereits wenige Ausreißer die Genauigkeit des Modells extrem

reduzieren können. So wurde das adjustierte Bestimmtheitsmaß von der elektrischen Leitfähigkeit der Jominy-Proben bereits durch 8 % ausreißer-behaftete Daten von 0,997 auf 0,215 reduziert.

Im Vergleich zu den Flachproben wurde bei der Regressionsanalyse von Jominy-Proben die Einflussgröße „Abstand von der Stirnfläche“ als Maß für die Abschreckgeschwindigkeit verwendet, um im nächsten Schritt von den flachen Proben zu komplexer geformten Proben mit lokal unterschiedlichen Werkstoffkennwerten überzugehen. Die Güte der Regressionsmodelle für die Umrechnung der Hilfsgrößen Härte und der elektrischen Leitfähigkeit in Zugversuchskenngrößen ist in der Tabelle 2 zusammengefasst.

**Tabelle 2: Überblick über die Güte der Regressionsmodelle bezogen auf die Umrechnung der Werkstoffkennwerte Härte und elektrische Leitfähigkeit in Zugversuchskenngrößen.**

		R-Square	Adj R-Square	RMS Error
Flachproben	Zugfestigkeit	0,9498	0,9411	10,3786
	Bruchdehnung	0	0	0,3277
	0,2-%-Dehngrenze	0,9611	0,9475	10,4431
	E-Modul	0,6629	0,4943	7,4643

Die ermittelten funktionalen Zusammenhänge wurden anschließend in eine kommerzielle Simulationssoftware implementiert. Die Qualität des Modells sowie seine Sensitivität in Bezug auf die vorliegenden Eingangsdaten wurden anhand von Inter- und Extrapolationen geprüft. Es wurde festgestellt, dass die Datenbasis noch nicht ausreichend hoch ist, um die Eigenschaften komplexer Bauteile in dem gesamten Versuchskorridor berechnen zu können. Die Steigerung der Bauteilkomplexität ist dadurch erst nach der Erweiterung des numerischen Modells und somit einer Steigerung der Genauigkeit im gesamten Versuchskorridor sinnvoll.

Eine Übertragbarkeit des Modells auf eine Aluminiumgusslegierung ist zurzeit noch nicht möglich, da die Genauigkeit des Modells für die untersuchte Knetlegierung EN AW-6082 noch nicht ausreichend präzise ist. Allerdings konnte aufgezeigt werden, dass die entwickelte Methode für die Modellentwicklung aufgrund deren Schnelligkeit ein großes Potenzial für die Berechnung der Eigenschaften von neuen bzw. wenig untersuchten Aluminiumlegierungen hat. Entscheidend dabei ist die Wahl eines geeigneten Versuchskorridors.

### Zusammenfassung

Ziel des Vorhabens war die Erarbeitung eines Modells am Beispiel einer Aluminiumlegierung EN AW-6082, mit dem sich, mit Hilfe von Zeit-Temperatur-Zusammenhängen, die mechanischen

Eigenschaften aushärtbarer Aluminiumlegierungen in Abhängigkeit von den Ausscheidungshärtungsparametern der Prozessschritte Lösungsglügen, Abschrecken und Auslagern schnell und genau berechnen lassen.

Zur Ermittlung der Werkstoffkennwerte für das Modell wurde eine umfangreiche Versuchsmatrix in einem Parameterkorridor bis knapp über die technisch relevanten Grenzen hinaus erstellt. Die ermittelten experimentellen Ergebnisse wurden systematisch mittels multipler Regressionsanalysen ausgewertet. Es wurden die Einflüsse der Ausscheidungshärtungsparameter (Lösungsglühdauer und -temperatur, Abschreckgeschwindigkeit sowie Auslagerungsdauer und -temperatur) auf die

Werkstoffkennwerte (Härte, elektrische Leitfähigkeit und Zugversuchskenngrößen) ermittelt und in funktionalen Zusammenhängen ausgedrückt. Weiterhin wurden die Korrelationen der Werkstoffkennwerte untereinander ermittelt und über Wechselwirkungsterme abgebildet. Es konnte gezeigt werden, dass die gewählten Prozessparameter als Einflussgrößen geeignet sind, um die Werkstoffkennwerte als Zielgrößen des Ausscheidungshärtungsprozesses vorherzusagen. Um die Genauigkeit des Modells zu erhöhen, ist allerdings eine vergrößerte Datenbasis durch eine Erweiterung des Versuchsplans notwendig.

## Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr. 18641 N/1 der Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik e. V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Es wurde vom Fachausschuss 24 (Wärmebehandlung von Nichteisenmetallen) der AWT betreut.

Kontakt:

Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien - IWT  
Badgasteiner Straße 3  
28359 Bremen

Dr.-Ing. Axel von Hehl  
Tel: +49 421 218-51325  
vonhehl@iwt-bremen.de  
[www.iwt-bremen.de](http://www.iwt-bremen.de)

M. Sc. Anastasiya Tönjes  
Tel: +49 421 218-51491  
toenjes@iwt-bremen.de  
[www.iwt-bremen.de](http://www.iwt-bremen.de)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages