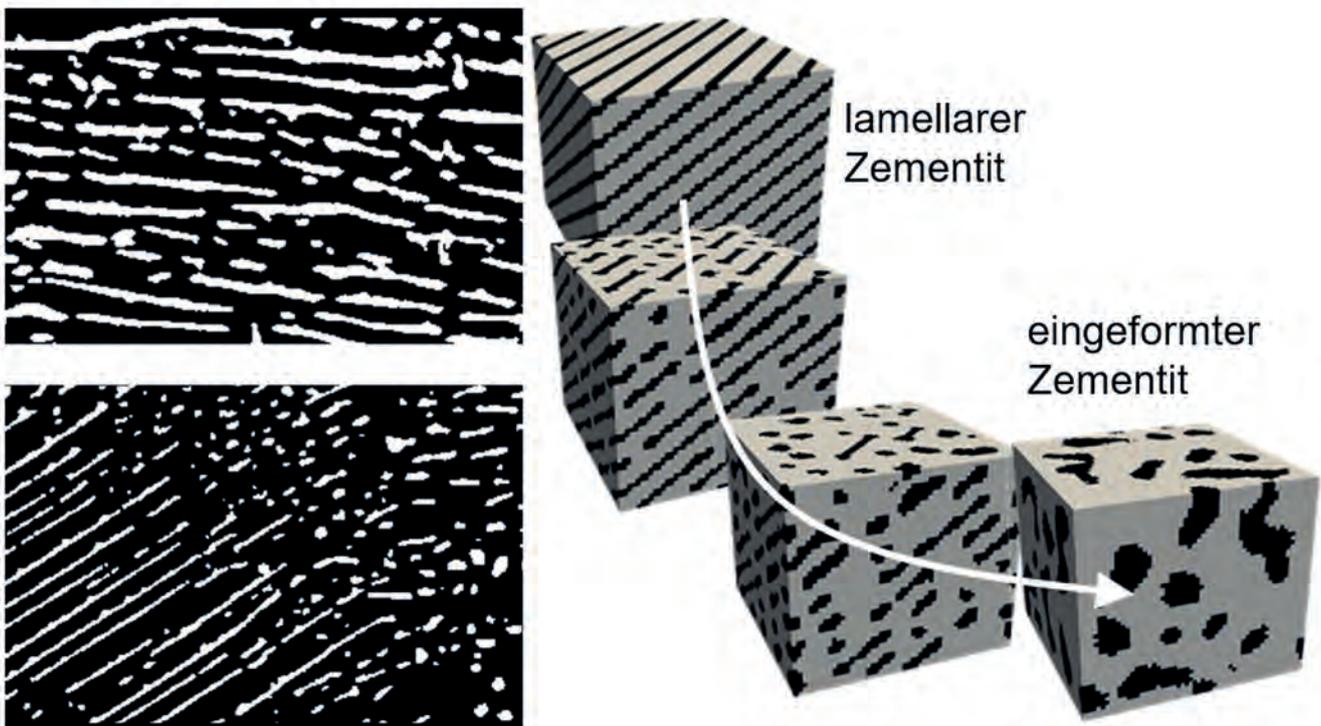


# Optimierte Wärmebehandlung von hochfesten Stählen für das Kaltfließpressen

Leichtbaukonzepte im Bereich des Fahrzeugbaus beeinflussen die Gestaltung fließgepresster Bauteile und die Anwendung von Werkstoffen zu deren Fertigung. Um die dafür geeigneten hochfesten Stähle kaltumformtechnisch mit ausreichender Werkzeugstandzeit einsetzen zu können, muss der Draht als Halbzeug vor der Kaltumformung üblicherweise einer GKZ-Glühbehandlung unterzogen werden, um seine Zerspanbarkeit und Kaltumformbarkeit zu verbessern. In einem Forschungsvorhaben wurde das bestehende Wärmebehandlungsverfahren optimiert.



## AUTOREN



**Dipl.-Ing. Frank Hoffmann**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und Leiter der Gruppe „Stahl und andere Schwermetalle“ am Institut für Metallformung (IMF) an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg



**Eva Augenstein, M.Sc**

ist wissenschaftliche Mitarbeiterin des Teams „Massivumformung“ am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM in Freiburg



**Dr. Maksim Zapara**

leitet das Team „Massivumformung“ am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM in Freiburg



**Dr.-Ing. Sergey Guk**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und Leiter der Gruppe „Werkstoffkennwerte bei Kaltumformung“ am Institut für Metallformung (IMF) an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg



**Prof. Dr.-Ing. Ulrich Prah**

ist Institutsdirektor des Instituts für Metallformung (IMF) an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

Den gegenwärtigen Stand der Technik zur Herstellung hochbeziehungsweise höchstfester Kaltumformteile repräsentiert die konventionelle Herstellungstechnologie über das Vergüten von C-Stählen und niedriglegierten C-Stählen, über die heute noch der größte Teil der Produktion solcher Bauteile realisiert wird. Als Halbzeug wird vielfach Walzdraht eingesetzt. Für eine gute Kaltumformbarkeit und ausreichende Werkzeugstandzeiten wird der Walzdraht vor der Kaltumformung üblicherweise einer sogenannten GKZ-Glühbehandlung (**G**lügen auf **K**ugeligen **Z**ementit) unterzogen. Als Kriterium für eine ausreichende Glühdauer gilt derzeit ein Gefüge mit kugelig eingeformtem Zementit, welches einem Achsenverhältnis der Zementitteilchen unterhalb von 1:3 entspricht. Dabei soll das Verhältnis des Volumenanteils des eingeformten Zementits zu seinem Gesamtvolumenanteil – der Einfornungsgrad – oberhalb von 90 Prozent liegen. Die Nachteile des GKZ-Glühens bestehen vor allem in den hohen Kosten aufgrund der langen Wärmebehandlungszeiten von länger als 12 Stunden. Durch diese können zudem Randentkohlung und Verzunderung auftreten.

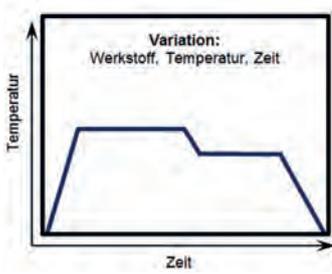
Neben diesen Nachteilen führt das GKZ-Glügen zu einem Gefüge mit relativ groben Karbidteilchen, sodass nach der abschließenden Wärmebehandlung (Härten und Anlassen) im Endgefüge zum Teil noch grobe Karbidausscheidungen vorhanden sein können. Diese beeinträchtigen die Ermüdungsfestigkeit und verringern somit bei zyklischer Belastung im Betrieb die Lebensdauer von Bauteilen. Aus Sicht der Verarbeitungseigenschaften wird der mit sehr hohem Energieaufwand eingestellte Gefügebau mit kugelig eingeformtem Zementit nicht für jede Bauteilkomponente benötigt. Tatsächlich ließe sich die Glühzeit der Behandlung signifikant verkürzen oder für jede Art der jeweiligen

Komponente aus Draht gezielt abstimmen. Voraussetzung ist ein im Voraus bekannter Zusammenhang zwischen dem Einfornungsgrad des Zementits und den verarbeitungsrelevanten Eigenschaften wie beispielsweise der Fließspannung oder der Zugfestigkeit. Dahinter steht der Wunsch, das bis jetzt praktizierte GKZ-Glügen auf einen üblicherweise sehr hohen Einfornungsgrad durch das wirtschaftlich vorteilhafte Weichglügen auf ausreichende Fließigenschaften wissenschaftlich fundiert und vorausschauend zu ersetzen.

### VORGEHENSWEISE

Am Beispiel der Werkstoffe 35B2, 23MnB3, 42CrMo4 (Walzdrahtabmessung 12,5 mm) und 32CrB4 (14,5 mm) wurde eine technologische Alternative zum derzeit praktizierten GKZ-Glügen auf hohen Einfornungsgrad entwickelt. Aufbauend auf thermodynamischen Simulationen zur Entwicklung des Wärmebehandlungskonzepts wurden optimierte Glühparameter vorgeschlagen und experimentell validiert. In Abhängigkeit der eingestellten Prozessvariationen, die mittels Dilatometer experimentell nachgefahren wurden, erfolgte eine Charakterisierung der Einfornungszustände mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM). Ferner wurden die ermittelten Mikrostrukturparameter in Bezug auf die simulative Bestimmung des Materialfließverhaltens auf der Gefüge-Ebene untersucht.

Nach einer Validierung im Labormaßstab war eine einfache Vorhersage der mechanischen Eigenschaften der Versuchswerkstoffe nach den Weichglühprozessen sowie eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf ähnliche Werkstoffe und Werkstoffzustände möglich. Im Abschluss wurden die Ergebnisse unter industriellen Bedingungen erfolgreich validiert.



## Teilaustenitisierung:

**Temperatur:** 35B2; 42CrMo4; 23MnB3: 730 °C; 750 °C; 770 °C  
32CrB4: 750 °C; 770 °C; 790 °C

**Zeit:** Alle Werkstoffe: 10 min; 60 min

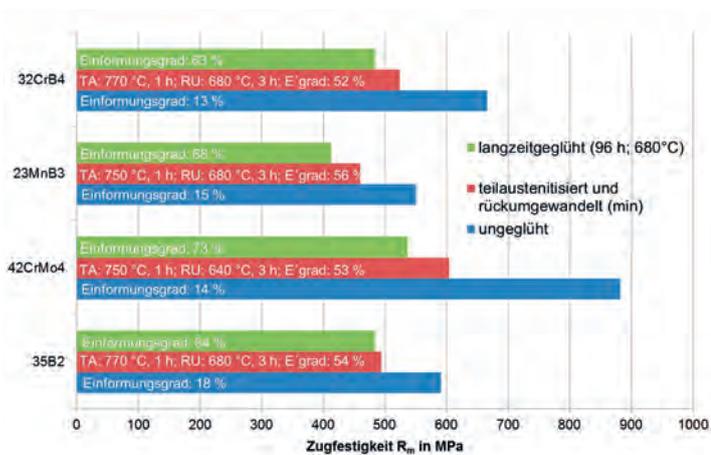
**Luftabkühlung auf Rückumwandlungstemperatur**

**Rückumwandlung:**

**Temperatur:** Alle Werkstoffe: 640 °C, 680 °C;

**Zeit:** Alle Werkstoffe: 10 min, 60 min, 180 min

Bild 1: Versuchsprogramm zur Validierung der Bedingungen der Teilaustenitisierung und Rückumwandlung an Laborproben



Die Berechnungen der Gleichgewichtsbedingungen der Phasenumwandlung an allen vier Werkstoffen zur Ermittlung des Teilaustenitisierungsbereichs erfolgten mit der Software Themo-Calc. Im Anschluss daran wurde die Kinetik des Auflösungsverhaltens des Zementits in Abhängigkeit von der Partikelgröße im Bereich des teilaustenitischen Zustands mit der Software DICTRA berechnet.

Physikalische Simulationen auf einem Dilatometer (DIL 805) konnten bestätigen, dass die gewählten Teilaustenitisierungstemperaturen sowie Rückumwandlungstemperaturen bei entsprechender Haltezeit die Einstellung des Zweiphasengebiets mit anschließender Rückumwandlung des Austenits gewährleisten.

Um die mechanischen und technologischen Eigenschaften zu bestimmen, wurden Probestäbe aller Werkstoffe verschiedenen Wärmebehandlungen unter Variation der Teilaustenitisierungs- und Rückumwandlungsbedingungen unterzogen. Bild 1 zeigt die Versuchsmatrix.

## EIGENSCHAFTEN NACH OPTIMIERTER WÄRMEBEHANDLUNG

Die Ergebnisse der mechanischen Werkstoffprüfung zeigen, dass für alle Werkstoffe Bedingungen gefunden werden konnten, die den Eigenschaften nach einer Langzeitglühung (680 °C, 96 h) nahezu entsprechen oder diese teilweise sogar übertreffen. Das Bild 2 erläutert diese Ergebnisse beispielhaft für die Zugfestigkeit (a) und die Brucheinschnürung (b) als Vergleich zwischen dem ungeglühten Walzdraht, den besten hier erreichten Eigenschaften und einem langzeitgeglühten Draht.

Querfließpressversuche konnten die gute Kaltumformbarkeit der Werkstoffe nach verkürzter Glühtechnologie bestätigen. Sie wurden an Drähten, die unter diesen Bedingungen wärmebehandelt waren, sowie vergleichend an den langzeitgeglühten Drähten durchgeführt.

Die quantitative mikrostrukturelle Charakterisierung der Einformungszustände des Zementits stellt das wichtige Bindeglied zwischen dem Glühprozess und den mechanischen

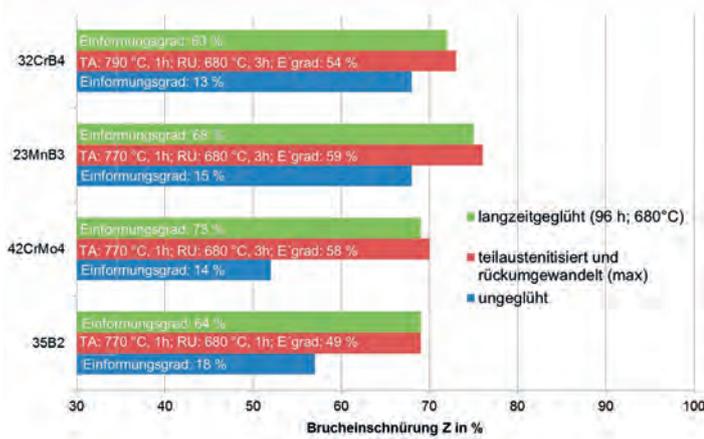


Bild 2: Vergleich der Zugfestigkeit (a) bzw. der Brucheinschnürung (b) der ungeglühten, teilaustenitierten und rückumgewandelten sowie der langzeitgeglühten Proben

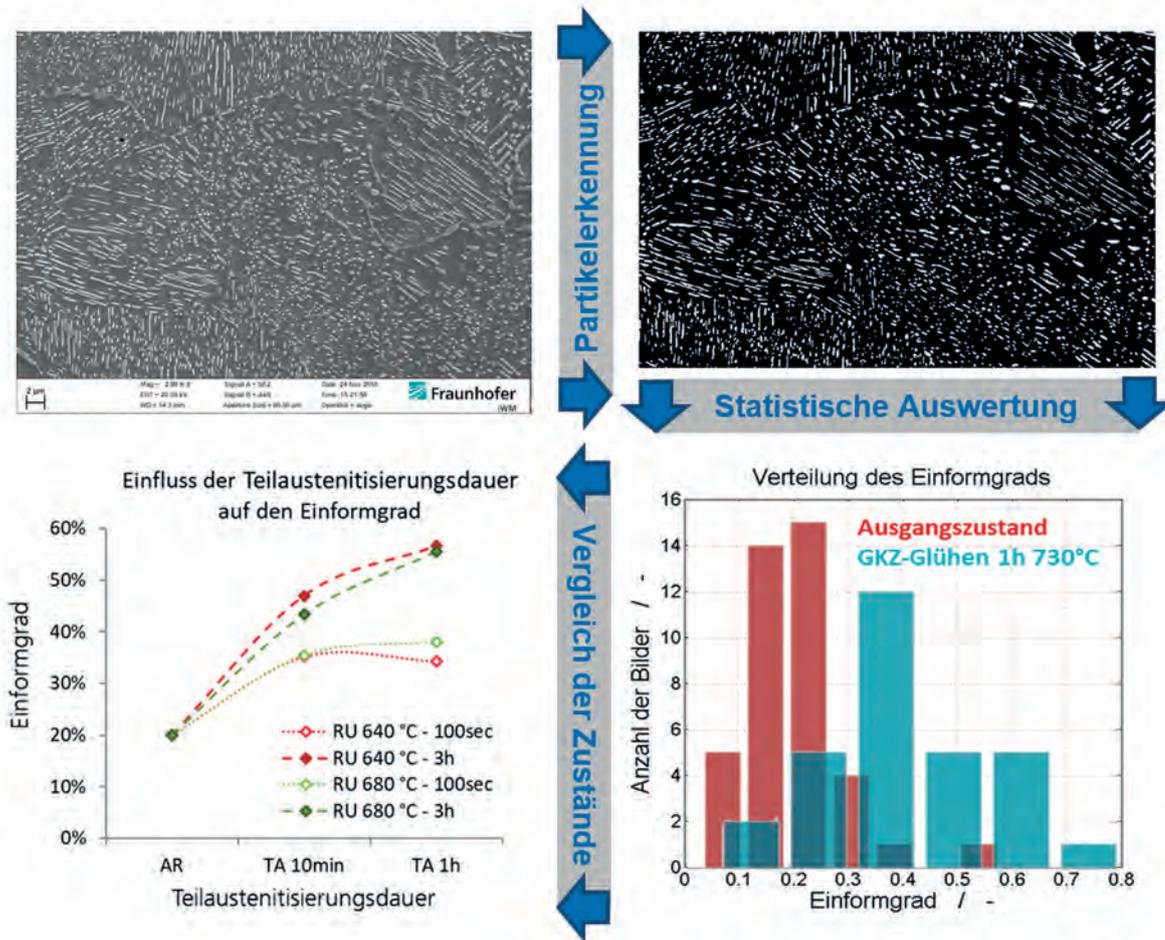


Bild 3: Automatisierte Mikrostrukturauswertung

Materialeigenschaften dar. Damit der Einformungszustand eindeutig, reproduzierbar und effizient analysiert werden kann, entwickelte das Fraunhofer IWM ein automatisiertes Analysewerkzeug, welches folgende Möglichkeiten umfasst:

- Erkennung von Partikeln mittels geeigneter Filter und Binarisierungsmethode
- Quantitative Analyse der folgenden Partikeleigenschaften: Fläche, Orientierung, Umfang, Länge, Rundheit, Aspekt-Verhältnis und Einformungsgrad

Der Einformungszustand lässt sich anhand der letztgenannten Parameter charakterisieren (Bild 3).

Um die mechanischen Eigenschaften von Kaltfließpressstählen in den unterschiedlichen Glühzuständen im Voraus berechnen zu können, wurden numerische Simulationen des Werkstoffverhaltens unter verschiedenen Belastungszuständen auf zwei Größenskalen durchgeführt. In der Mikro-Skala tritt Perlit als zweiphasiges Gefüge auf, bestehend aus Ferrit und

zum Teil eingeformtem Zementit. Auf der Meso-Skala wurde ein zweiphasiges Gefüge betrachtet, das aus Ferrit und Perlit besteht. Zur digitalen Abbildung des Perlitgefüges wurde die mathematische Methode nach Torquato zur Rekonstruktion zufälliger heterogener Mikrostrukturen verwendet.

Um aus einer zweidimensionalen Mikrostrukturaufnahme dreidimensional die Mikrostruktur zu rekonstruieren, haben Wissenschaftler am Fraunhofer IWM eine entsprechende Strategie entwickelt und validiert. Nach der Anpassung der mechanischen Eigenschaften der beiden Phasen (Ferrit und Zementit) können an den repräsentativen Volumenelementen (RVE) die mechanischen Eigenschaften des Gesamtgefüges in Abhängigkeit des Einformungsgrads des Zementits berechnet werden. Entsprechende Validierungen zeigen, dass die durchgeführten Simulationen realistische Ergebnisse für das mechanische Verhalten des lamellaren und eingeformten Zementits ergeben. Die Fließeigenschaften des Perlitgefüges aus den Simulationen auf der Mikro-Skala fungieren als Ein-

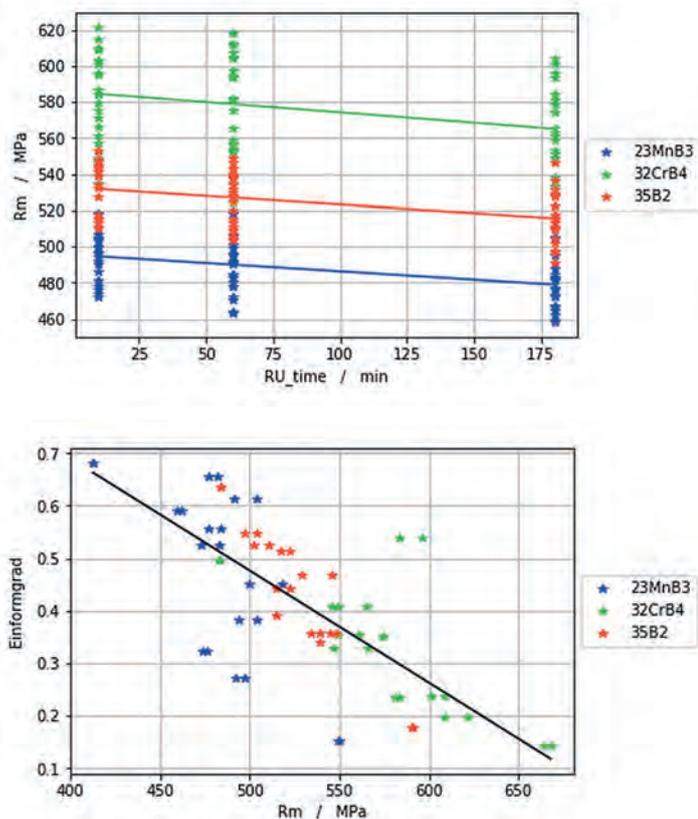


Bild 4: Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der Rückumwandlungsdauer für die untersuchten Werkstoffe (a) und materialübergreifende Korrelation zwischen dem Einformungsgrad und der Zugfestigkeit (b) Bilder: Autoren

gangsgrößen für die Werkstoffsimulationen. Damit sind auf den Werkstoff zugeschnittene Parameter der Wärmebehandlung durch virtuelle Experimente wirtschaftlich günstig zu ermitteln.

Basierend auf den experimentellen Ergebnissen sowie den Erkenntnissen der Werkstoffsimulation ließen sich Korrelationen zwischen der Mikrostruktur, den Glühzeiten und den untersuchten verfahrenstechnischen Einflussparametern der Drahtwärmebehandlung auf der einen Seite und den resultierenden mechanischen Werkstoffeigenschaften auf der anderen Seite herstellen. Um die Menge der zu korrelierenden Daten, wie zum Beispiel Prozessdaten und mechanische Kennwerte, effizient gegeneinander plotten zu können, wurde ein Skript entwickelt, das die Datenkorrelation teilautomatisiert durchführt. Neben den Diagrammen gibt dieses Skript Parameter für die ausgewählten Fit-Funktionen samt mittlerer Abweichung zwischen Modell- und Datenpunkten aus.

Auf der Basis erstellter Zusammenhänge zwischen Glühparametern und mechanischen Eigenschaften und mithilfe eines geeigneten Optimierers erfolgte eine anschließende Anpassung des empirischen Modells. Bild 4a zeigt, dass die Datenpunkte durch eine lineare Funktion bereits mit vertretbarer Genauigkeit beschrieben werden können. Die Abweichungen zwischen Modell und Daten sind ähnlich groß wie die Streubreite der Versuchsdaten selbst. Die Rückumwandlungsdauer  $RU\_time$  wirkt sich bei allen untersuchten Werkstoffen in sehr ähnlicher Form näherungsweise linear auf die Zugfestigkeit  $R_m$  aus.

Trotz der insgesamt sowohl bei den Mikrostrukturgrößen als auch bei den mechanischen Kennwerten großen Streuung sowie des Einflusses des Matrixmaterials wurde für die betrachteten Werkstoffe eine materialübergreifende Korrelation zwischen den partikelbezogenen Mikrostrukturgrößen und den mechanischen Kennwerten gefunden, die einen materialunabhängigen Zusammenhang zwischen dem Einformungsgrad und der Zugfestigkeit  $R_m$  beschreibt (Bild 4b).

Anschließend erfolgte beispielhaft am Werkstoff 23MnB4 eine durchgängige industrielle Validierung der Glühtechnologie eines Bunds im Haubenofen bis zur Serienfertigung eines Verbindungselements. Während der Herstellung der Bauteile (zirka 120.000 Stück) waren keine negativen Auswirkungen der verkürzten Glühtechnologie festzustellen – die Bauteile ließen sich fehlerfrei herstellen. Die Werkzeugstandzeiten für den Fließprozess des Napfens einer Hülse entsprachen denen der industriellen Fertigung desselben Bauteils aus konventionell geglühtem Material. Untersuchungen zum Querfließpressverhalten unter identischen Bedingungen wie an den Laborproben bestätigten eine problemlose Umformbarkeit.

## PRAKTISCHER NUTZEN

Die wirtschaftliche Bedeutung der erzielten Forschungsergebnisse liegt einerseits in einer kostenrelevanten signifikanten Reduzierung der Glühdauer bei gleichzeitiger Sicherstellung des erforderlichen Umformvermögens des Werkstoffs. Dadurch ergibt sich eine Flexibilität bei der Auswahl von Glühaggregaten und Belegungszeiten, die sich wiederum in den Kosten widerspiegeln. Andererseits lassen sich durch die erlangten Kenntnisse das Verfestigungsverhalten der Werkstoffe während der Umformung und somit die Werkzeugstandzeit genauer vorher sagen.

Das ermöglicht es im Sinne des Leichtbaus, neue höherfeste Stahlwerkstoffe ohne die Anschaffung leistungsfähigerer Umformanlagen zu bearbeiten. Weiterhin werden höherfeste Werkstoffe durch die optimierten und kostengünstigeren Glühverfahren im Vergleich zu den niedriglegierten Werkstoffen wieder wettbewerbsfähig. Darüber hinaus können die Werkzeugkosten beim Einsatz des gleichen, aber jetzt preisgünstiger geglähten Materials reduziert werden mit dem Effekt, dass die Werkzeugeinsparung sogar vielfach höher ist als die zusätzlichen Glühkosten. Schließlich leistet die Verkürzung der Glühdauer und die damit verbundene Energieeinsparung auch einen Beitrag zur Nachhaltigkeit – der Aspekt, der heute stark an Bedeutung gewonnen hat.



Das IGF-Vorhaben 18925 BG der Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V. (FSV) 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. Die Langfassung des Abschlussberichts kann bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.

Gefördert durch:



**Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie**

**IGF**  
Industrielle  
Gemeinschaftsforschung

aufgrund eines Beschlusses  
des deutschen Bundestages