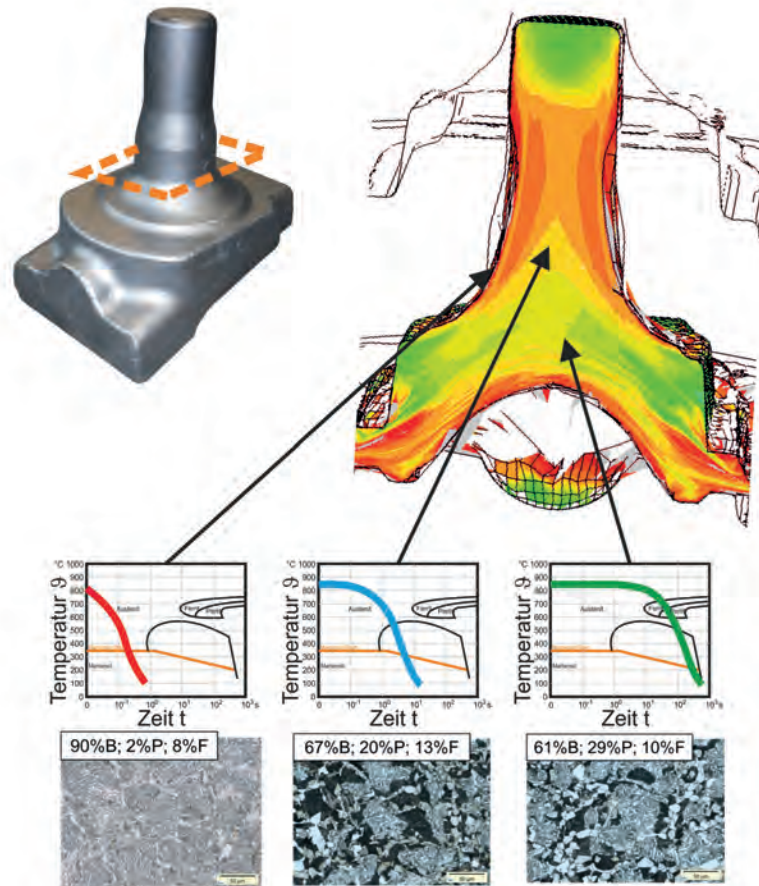




Bewertung ausgewählter Schmiedeparameter in Bezug auf das Ermüdungsverhalten von AFP-Stählen

Moderne Schmiedestähle bieten ein erhebliches Festigkeitspotenzial, welches für massivumgeformte Bauteile im Zuge einer Leichtbauoptimierung zuverlässig erschlossen werden kann. Durch konsequente Werkstoffausnutzung ist es möglich, gesteigerte Anforderungen an Ressourcen und Emissionseinsparungen bei gleichzeitiger Senkung von Herstellungskosten zu erfüllen und damit einen wichtigen Wettbewerbsvorteil für deutsche Schmiedeerzeugnisse im internationalen Konkurrenzumfeld zu erarbeiten. Die Grundlage hierfür bildet ein Bemessungs- und Bewertungskonzept, welches den Einfluss des Fertigungsprozesses auf das quasistatische und zyklische Bauteilverhalten schon in der Konzeptionierungsphase berücksichtigt und damit sowohl die lokalen Werkstoffeigenschaften als auch die erforderlichen Prozessrandbedingungen definierbar macht. Ein kooperatives Forschungsprojekt des Instituts für Eisenhüttenkunde (IEHK) der RWTH Aachen University gemeinsam mit dem Fraunhofer LBF und dem Industrieverband Massivumformung e. V. (IMU) hat hierzu Grundlagen erarbeitet.

AUTOREN



Matthias Hell, M.Eng.

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter
am Fachgebiet Systemzuverlässigkeit,
Adaptronik und Maschinenakustik SAM
an der Technischen Universität Darmstadt



Charline Blankart, M.Sc.,

ist wissenschaftliche Mitarbeiterin
am Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK)
der RWTH Aachen University



Dr.-Ing. Rainer Wagener

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter
am Fachgebiet Systemzuverlässigkeit,
Adaptronik und Maschinenakustik SAM
an der Technischen Universität Darmstadt



Prof. Dr.-Ing. Tobias Melz

ist Leiter des Fachgebiets
Systemzuverlässigkeit, Adaptronik
und Maschinenakustik SAM, Technische
Universität Darmstadt und Leiter des
Fraunhofer-Instituts für Betriebsfestigkeit
und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt



Prof. Dr.-Ing. Ulrich Krupp

ist Institutsdirektor des Instituts
für Eisenhüttenkunde (IEHK)
der RWTH Aachen University

Aufgrund des wachsenden Kostendrucks durch internationale Mitbewerber und Substitutionen im Fertigungsverfahren steht die deutsche Schmiedeindustrie vor der Herausforderung, das Festigkeitspotenzial der derzeit verwendeten Schmiedestähle optimal auszunutzen. Die beanspruchungsgerechte Konstruktion von Bauteilen, welche die spezifischen Mechanismen der Festigkeitssteigerung und der Schädigung berücksichtigt, leistet in diesem Zusammenhang einen signifikanten Beitrag zur Bauteiloptimierung hinsichtlich Materialeinsatz, Gewicht und der Emission von Treibhausgasen bei der Herstellung sowie im Betrieb. Die Voraussetzung hierfür bildet die Bewertung des wechselseitigen Einflusses von Konstruktion, Werkstoff und Fertigung auf das quasistatische und zyklische Werkstoffverhalten mittels experimenteller und numerischer Methoden bereits in der frühen Konzeptionsphase.

Die mikrostrukturellen Mechanismen, welche Wesentliche Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit von Bauteilen und die Beanspruchbarkeit des Werkstoffs haben, werden durch die Prozessführung beim Schmieden von Werkstücken maßgeblich beeinflusst. Als relevante Einflussparameter führen dabei unter anderem der lokale Umformgrad sowie die massenbedingten lokalen Abkühlgradienten dazu, dass die lokalen Werkstoffeigenschaften nicht homogen über den Querschnitt verteilt sind, sondern im Bauteil in Form eines

Eigenschaftsfelds vorliegen [1], [2]. Wird dieser Effekt bei der experimentellen Ermittlung von Werkstoffkennwerten sowie der numerischen Beanspruchbarkeitsanalyse vernachlässigt, birgt dies das Risiko, den Werkstoff signifikant zu unter- oder überschätzen. Hohe Sicherheitsfaktoren aufgrund der damit verbundenen Streuung der Beanspruchbarkeitskennwerte bei experimentellen Freigabeprüfungen verhindern demzufolge die konsequente Ausnutzung des Festigkeitspotenzials günstiger und prozessstabiler Werkstoffentwicklungen [3], [4]. Höchstfeste Stähle und umfangreiche Nachbehandlungen, die erhebliche Mehrkosten nach sich ziehen, werden als Abhilfe ins Feld geführt, obwohl durch eine geeignete Prozessführung das Festigkeits- und dadurch auch das Leichtbaupotenzial der konventionellen Stähle deutlich erhöht werden könnte.

Im Rahmen des Projekts AVIF A308 wurde deshalb zunächst auf Grundlage metallografischer Analysen sowie der mechanischen Prüfung unter quasistatischen und zyklischen Beanspruchungsbedingungen der Einfluss der Temperaturführung untersucht. Zu diesem Zweck wurden Achsschenkel als Demonstratorbauteile aus einem repräsentativen AFP-Stahl auf unterschiedlichen Schmiedepressen und mit unterschiedlichen, praktisch umsetzbaren Abkühlrouten hergestellt. Mikroproben zur Analyse des lokalen Werkstoffgradienten sowie Proben mit Standardgeometrie für Zug- und Schwingversuche wurden anschließend aus dem Bauteil

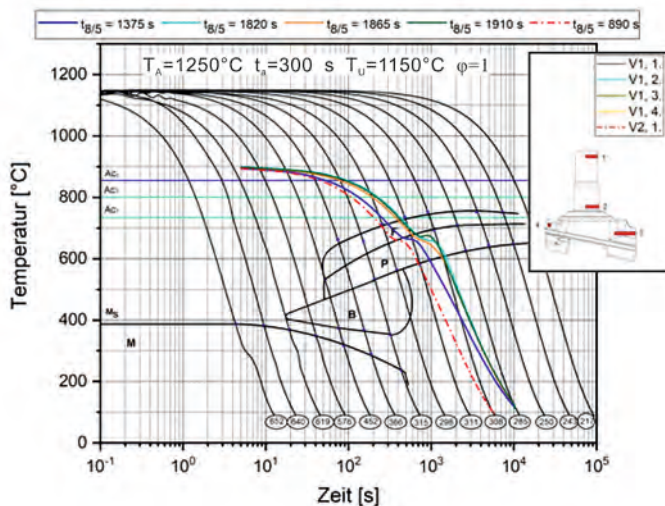


Bild 1: Ergebnisse der Abkühlversuche und Vergleich dieser mit dem UZTU-Schaubild des untersuchten Stahls 38MnVS6

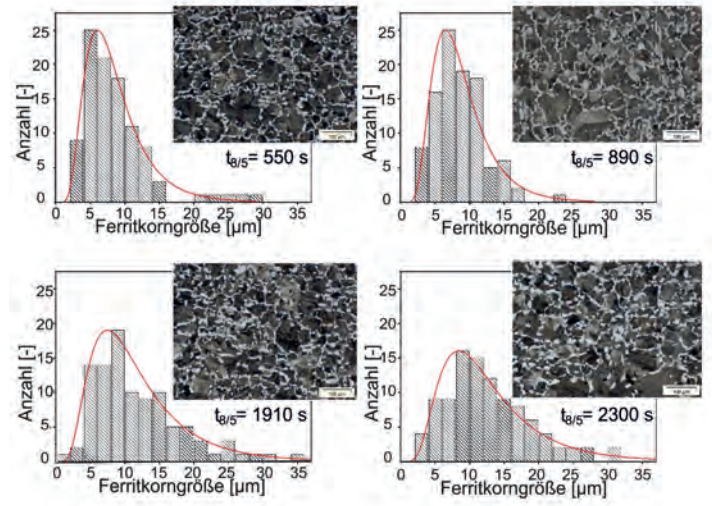


Bild 2: Einfluss der Abkühlbedingungen auf die Gefügeentwicklung

extrahiert, um das mechanische Werkstoffverhalten sowie die mikrostrukturellen Modifikationen durch die unterschiedliche Prozessführung bewerten zu können.

Begleitende Finite-Elemente-Simulationen dienten dazu, lokale Umformgrade und $t_{8/5}$ -Zeiten zu bestimmen und diese als Basis für die Abbildung des Gesamtprozesses im virtuellen Raum in Zusammenhang mit den experimentellen Kennwerten zu bringen. Thermomechanisch simulierte Proben mit definiertem Umformgrad und reduzierter $t_{8/5}$ -Zeit vervollständigten das Versuchsprogramm.

Bei AFP-Stählen wird das Werkstoffverhalten grundsätzlich durch eine gezielte Abkühlung aus der Schmiedehitze kalibriert. Eine zusätzliche Vergütungsstufe entfällt. Um den Einfluss der Abkühlung auf die Werkstoffzusammensetzung zu untersuchen, wurde für den verwendeten Werkstoff ein UZTU-Diagramm erstellt. Die ermittelten $t_{8/5}$ -Zeiten, die während des Schmiedeprozesses am Achsschenkels gemessen wurden, variierten zwischen 890 Sekunden für

eine Abkühlung unter strömender Luft am oberen Zapfenbereich und 1.910 Sekunden für eine Abkühlung an ruhender Luft im unteren massiveren Bauteilbereich. Eine Übertragung der gemessenen Abkühlbahnen in das UZTU-Schaubild des 38MnVS6 zeigt eine gute Übereinstimmung mit der Temperatur der Phasenumwandlung aus den Laborversuchen (Bild 1). Alle Abkühlbahnen befinden sich in einem Bereich, in dem bezüglich der Gefügeanteile keine signifikanten Unterschiede zu erwarten sind. Mittels lichtoptischer Metallographie konnte für alle untersuchten Proben aus unterschiedlichen Entnahmeorten der Achsschenkel der Industrieschmiedungen ein Perlitanteil von ungefähr 80 Prozent und ein Ferritanteil von 20 Prozent bestätigt werden.

In zusätzlichen Laborschmiedungen wurde die $t_{8/5}$ -Zeit zwischen 550 und 2.300 Sekunden untersucht, um den bauteilrelevanten ferritisch-perlitischen Bereich vollständig abzudecken. Der Ferritanteil variierte zwischen 15 und 20 Prozent ohne erkennbare Tendenz bezüglich der Abkühldauer. Hinsichtlich der Ferritkörngröße ließ sich nachweisen, dass

diese mit zunehmender Abkühlgeschwindigkeit abnimmt, was die Korngrößenverteilung in Bild 2 deutlich zeigt. Im untersuchten Abkühlbereich war jedoch in REM-Aufnahmen kein Einfluss der Temperaturführung auf den Perlitlamellenabstand ($\sim 0,15 \mu\text{m}$) und die Koloniegröße ($\sim 5 \mu\text{m}$) festzu-

stellen. Da der Perlit auf Grund seines hohen Anteils festigkeitsbestimmend ist, spiegelt sich dies auch in der Streckgrenze ($\sim 700 \text{ MPa}$) und der Zugfestigkeit ($\sim 950 \text{ MPa}$) des Materials wider, welche mit steigender Abkühldauer nur marginal abnimmt (Bild 3).

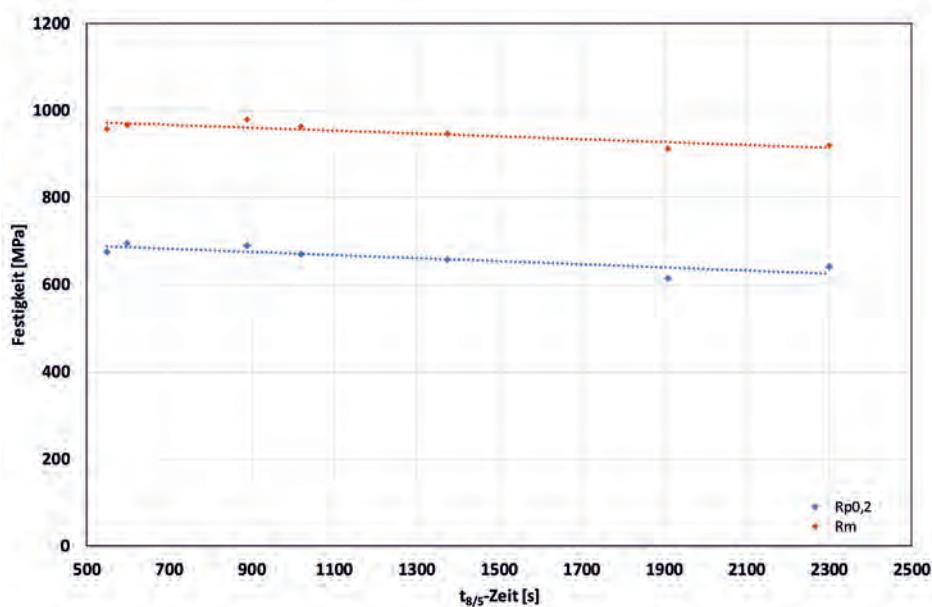


Bild 3: Einfluss der Abkühlbedingungen auf die mechanischen Eigenschaften

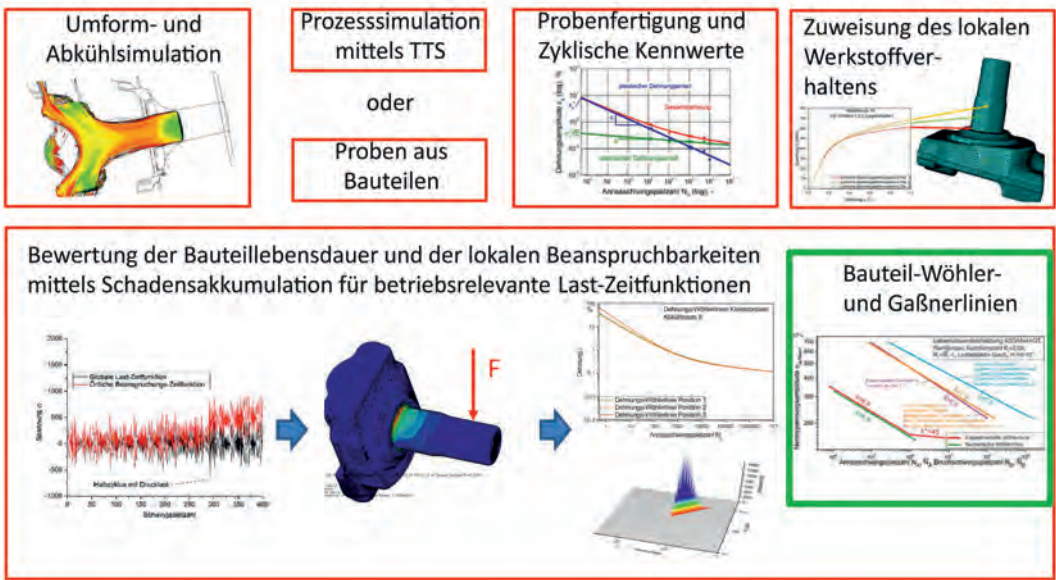


Bild 4: Bewertungsmethode zur Implementierung des prozessbedingten Werkstoffverhaltens in den Ablauf der Lebensdauerabschätzung für Schmiedebauteile

Die Gegenüberstellung der $t_{8/5}$ -Zeiten mit der Schwingfestigkeit sowie dem zyklischen Spannungs-Dehnungsverhalten zeigte keinen nennenswerten Einfluss der Abkühlung oberhalb von $t_{8/5} = 900$ s. Die zyklischen Werkstoffkennwerte der bauteilentnommenen Proben sowie der thermomechanisch simulierten Proben wurden daraufhin bezüglich eines Zusammenhangs zwischen lokalem Umformgrad und Werkstoffverhalten untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen zum einen eine hohe Streuung der Werkstoffkennwerte, zum anderen aber auch einen deutlichen Zusammenhang zwischen dem zyklisch stabilisierten Spannungs-Dehnungsverhalten und dem lokalen betragsmäßigen Umformgrad.

Um auf Grundlage der Versuchsergebnisse zur Abhängigkeit des quasistatischen und zyklischen Werkstoffverhaltens von den Prozessparametern eine Definition von Prozessgrenzen

und eine Abschätzung der Beanspruchbarkeit von Schmiedebauteilen aus dem untersuchten Werkstoff zu gestatten, wurde eine Bewertungsmethode ausgearbeitet, die sowohl experimentelle als auch numerische Elemente vereint (Bild 4). Für die experimentelle Ableitung der Kennwerte zur Beschreibung des lokalen Werkstoffverhaltens kann entweder auf bereits bestehende Bauteile aus dem gleichen Werkstoff oder auf thermomechanisch simulierte Proben zurückgegriffen werden. Um die experimentellen Kennwerte den Prozessparametern zuordnen zu können, ist eine numerische Simulation zur Ermittlung der Umformgrade und der lokalen Abkühlzeiten erforderlich.

Die experimentelle Kennwertermittlung umfasst die Ableitung der Beanspruchbarkeitskennwerte in Form von trilinearen Dehnungswöhlerlinien sowie des Spannungs-Dehnungs-Zusammenhangs als zyklische Spannungs-Dehnungskurve nach Ramberg-Osgood. Durch Zuordnung der Umformgrade

sowie der t8/5-Zeiten zu den zyklischen Werkstoffkennwerten wird über eine Korrelationsanalyse der Zusammenhang zwischen lokalen Werkstoffeigenschaften und lokalen Prozessparametern hergestellt, wie Bild 5 für den zyklischen Verfestigungskoeffizienten zeigt.

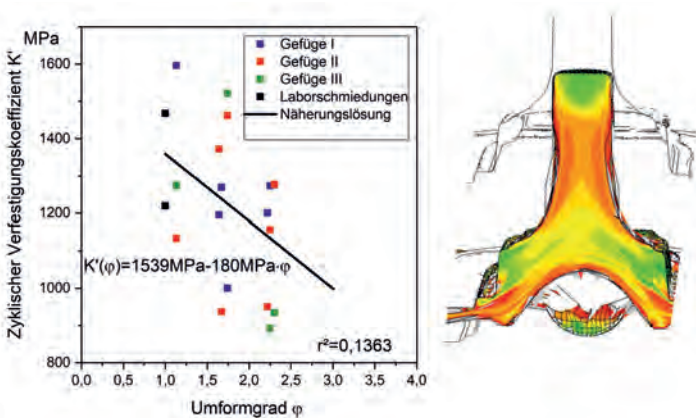


Bild 5: Abhängigkeit des zyklischen Verfestigungskoeffizienten K' vom Umformgrad φ

Mit der so gewonnenen Näherungslösung für die Abhängigkeit der Beanspruchbarkeit und des Spannungs-Dehnungsverhaltens von den Prozessparametern ist das Werkstoffverhalten hinreichend genau definiert, um eine Beanspruchbarkeitsanalyse durchführen zu können.

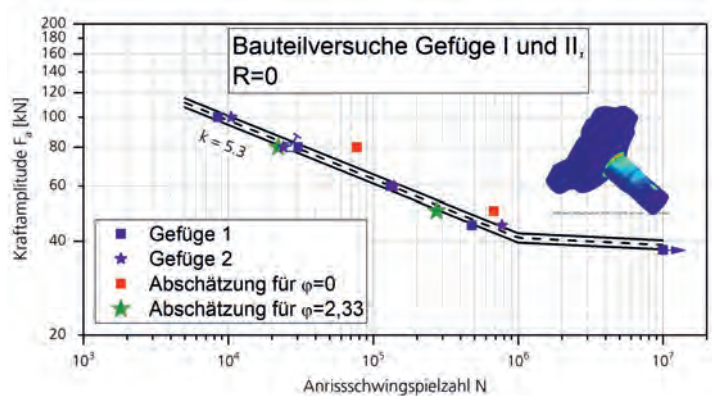


Bild 6: Lebensdauerabschätzung mit Werkstoffkennwerten des Halbzeugs ($\varphi = 0$) und für den geschmiedeten Werkstoff ($\varphi = 2,33$) Bilder: Autoren

Ein numerisches Modell, welches die Näherungslösung für das Spannungs-Dehnungsverhalten, die Bauteilgeometrie sowie die Lastannahme enthält, dient im nächsten Schritt dazu, die lokalen Beanspruchungen infolge äußerer Lasten zu bestimmen. Die Abschätzung der Beanspruchbarkeit erfolgt im Anschluss an die Beanspruchungsermittlung mit der Dehnungswöhlerlinie und mit Schädigungsparametern für konstante Beanspruchungsamplituden. Des Weiteren unter zusätzlicher Anwendung der linearen Schadensakkumulationshypothese für variable Beanspruchungen. Bild 6 zeigt die Gegenüberstellung der Lebensdauerabschätzung mit den Kennwerten für das Halbzeug ($\varphi = 0$, Stand der Technik) sowie mit der Näherungslösung für den lokalen Umformgrad von $\varphi = 2,33$. Durch Berücksichtigung des prozessbedingten Werkstoffverhaltens ist es möglich, die experimentell ermittelten Lebensdauern des Bauteils numerisch abzubilden.



[1] AVIF A 296: Quantifizierung der Betriebsfestigkeit des Gefüges von Schmiedestahl in der Gesenkteilungsebene (Kerbwirkung Gratbahn), Industrieverband Massivumformung, Hagen, 2019

[2] AVIF A245: Einfluss von Faserverlauf und Gefüge auf die Schwingfestigkeit warmmassivumgeformter ausscheidungs-härtender, ferritisch-perlitischer Stähle, Industrieverband Massivumformung, Hagen, 2010

[3] IGF 16874 N: Untersuchungen der Versagenskriterien für Stahl und Aluminium in Hinblick auf die Bemessung von Schmiedeteilen, Industrieverband Massivumformung, Hagen, 2013

[4] AVIF A 276: Lufthärtende, duktile Schmiedestähle mit erhöhten Mangangehalten (LHD-Schmiedestahl), Industrieverband Massivumformung, Hagen, 2016

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Projekt AVIF A308 Prozessbedingte Betriebsfestigkeit wurde der Einfluss verschiedener Umformparameter auf das quasi-statische und zyklische Werkstoffverhalten eines AFP-Stahls untersucht. Die Berücksichtigung dieses Einflusses im Bemessungskonzept führt zu einer Verbesserung der Werkstoffausnutzung im Sinne einer leichtbaugerechten Konstruktion, welche bereits in der numerischen Auslegungsphase durch Anwendung der Näherungslösung gehoben werden kann.

Im Rahmen des Projekts war die Untersuchung auf einen Werkstoff als Referenz für die Gruppe der AFP-Stähle beschränkt. Die Ergebnisse für den untersuchten AFP-Stahl deuten jedoch darauf hin, dass die im Projekt verfolgte Vorgehensweise auch auf weitere Schmiedewerkstoffe übertragbar ist. Es ist deshalb von großem Interesse, entsprechende weitere Untersuchungen durchzuführen.



Dieses Forschungsprojekt AVIF A 308 wurde gefördert von der gemeinnützigen Stiftung Stahlanwendungsforschung im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e. V. Zweck der Stiftung ist die Förderung der Forschung auf dem Gebiet der Stahlverarbeitung und -anwendung in der Bundesrepublik Deutschland. Geprüft wurde das Forschungsvorhaben von einem Gutachtergremium der Forschungsvereinigung der Arbeitsgemeinschaft der Eisen und Metall verarbeitenden Industrie e. V. (AVIF), das sich aus Sachverständigen der Stahl anwendenden Industrie und der Wissenschaft zusammensetzt. Begleitet wurde das Projekt von einem Arbeitskreis des Industrieverbands Massivumformung. Die Langfassung des Abschlussberichts kann über die Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V. beim Wirtschaftsverband Stahl- und Metallverarbeitung, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.