EcoForge – Resource-Efficient Process Chains for High-Performance Parts

The AiF flagship initiative “EcoForge” successfully achieved a shortening of the process chain for producing forged parts. A major aspect of this project was the integration of the heat treatment or quenching process in part production on the forging line in order to set defined homogenous grain structures in parts directly from the forging heat. To achieve this, controlled cooling is carried out immediately after the forging process using a spray field adapted to the part geometry. Straight after this, the part undergoes forging in a range between room temperature and industrial warm forging temperature and then machining directly from the forging heat. The part state generated in this way has a positive effect on the processes subsequently carried out on the series component, namely forging at room temperature and machining. These processes utilize the residual heat following controlled cooling from the hot forging temperature.

EcoForge – Ressourceneffiziente Prozessketten für Hochleistungsbauteile

Die AiF-Leitinitiative „EcoForge“ hat erfolgreich Möglichkeiten entwickelt, die Prozesskette zur Herstellung von Schmiedebauteilen einschneidend zu verkürzen. Wesentlicher Bestandteil des Vorhabens war die Integration des Wärmebehandlungs- beziehungsweise Quenchprozesses in die Bauteilfertigung der Schmiedelinie, um so definierte homogene Gefügezustände in Bauteilen direkt aus der Schmiedehitze einstellen zu können. Dafür wird direkt nach dem Schmiedeprozess eine geregelte Abkühlung mittels eines an die Bauteilgeometrie angepassten Sprayfelds durchgeführt. Der so eingestellte Bauteilzustand wirkt sich positiv auf die am Serienbauteil unmittelbar nachfolgenden Prozessschritte Lauwarmumformung und Zerspanung aus, welche unter Ausnutzung der Wärme erfolgen, die nach der geregelten Abkühlung aus der Schmiedehitze verbleibt.

Einleitung

Bei der umformtechnischen Herstellung hochbeanspruchter Komponenten, die zum Beispiel für die Fahrzeugtechnik und den allgemeinen Maschinenbau verwendet werden, werden Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften weitgehend durch energie- und kostenintensive Wärmebehandlungen eingestellt. Wesentlicher innovativer Bestandteil des EcoForge-Vorhabens war die Integration des Wärmebehandlungs- beziehungsweise Quenchprozesses unmittelbar in die Bauteilfertigung der Schmiedelinie (Bild 1), um so definierte Bauteileigenschaften direkt aus der Schmiedehitze für den HDB- (22MnSiCr-6-6-5), AFP- (38MnVS6) und Einsatz-Stahl (18CrNiMo7-8) einstellen zu können. Dafür wird das Bauteil unmittelbar nach dem Schmiedeprozess mittels eines an die Bauteilgeometrie angepassten Sprayfelds sensorkontrolliert und mit anschließender isothermer Haltephase abgeschreckt, um definierte Gefüge im Material einstellen zu können. Die Umformung und spanende Bearbeitung auf Temperatur direkt aus der Schmiedehitze wurden im Anschluss an die Wärmebehandlung evaluiert.

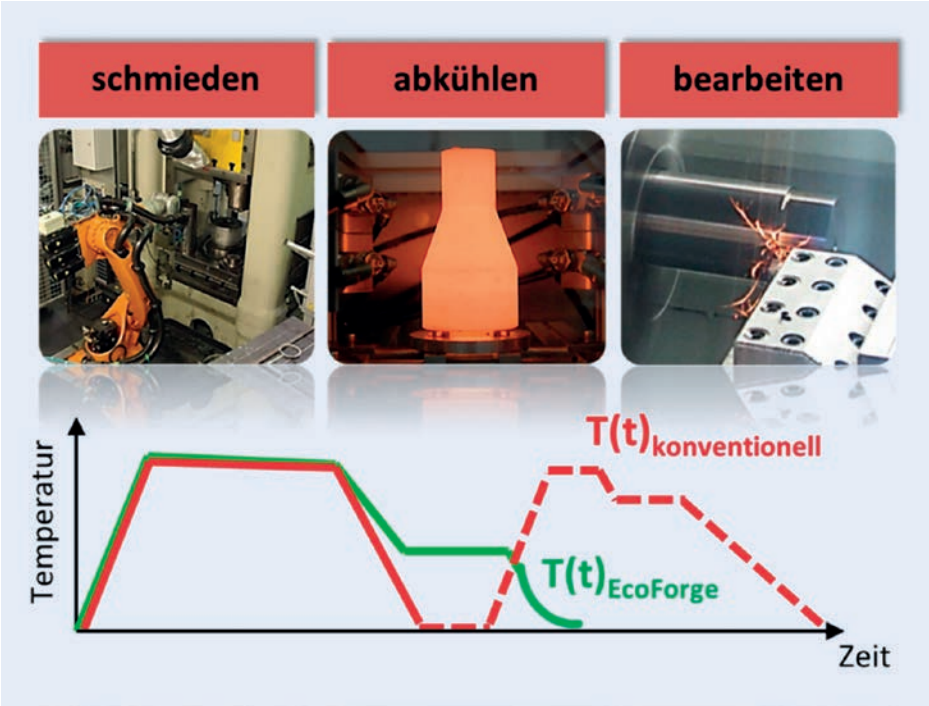

Bild 1: Energieeinsparung durch die optimierte EcoForge Prozesskette.

Am Gemeinschaftsvorhaben EcoForge waren das Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK) der RWTH Aachen, das Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) und das Institut für Werkstoffkunde (IW) der Leibniz Universität Hannover, das Institut für Umformtechnik (IFU) der Universität Stuttgart sowie das Institut für Werkstofftechnik (IWT) Bremen beteiligt.

Die EcoForge Prozesskette im Detail

Am IFUM Hannover wurden numerische und experimentelle Untersuchungen zur integrierten Wärmebehandlung aus der Schmiedehitze durchgeführt. Hierbei wurden zwei Warmmassivumformprozesse entwickelt sowie eine Automatisierung der Prozesse zur Gewährleistung der Reproduzierbarkeit von Prozessparametern aufgebaut (Bild 2).

In den numerischen Untersuchungen wurden die abkühlbedingten Phasenumwandlungen der beiden Warmmassivumformprozesse analysiert. Zur Berechnung der diffusionslosen und der diffusionsgesteuerten Gefügeumwandlungen wurden die zugrunde liegenden Modell-Ansätze Johnson-Mehl-Avrami und Koistinen-Marbuger erweitert und in das FE-Software-System simufact.forming implementiert. Das Dehnungsinkrement wurde zur verbesserten Vorhersage von Maß- und Formänderungen innerhalb einer Abkühlung um den umwandlungsbedingten sowie umwandlungsplastischen Dehnungsanteil erweitert [1].

Für die numerische Simulation der kontrollierten Abkühlung wurden am IW Hannover und dem IWT Bremen (Verfahrenstechnik) ermittelte Daten, zum Beispiel Wärmeübergangskoeffizienten und Temperaturverläufe, in das FE-Modell implementiert. In Bild 3 sind die Ergebnisse einer kontrollierten Abkühlung – zunächst mit Druckluft und anschließend bei freier Konvektion – für die „abgesetzte Welle“ aus HDB-Stahl dargestellt. Die numerischen Ergebnisse zeigen eine bainitische Phasenverteilung mit einem Bainitanteil von 85 bis 100 Prozent. Bei Betrachtung des lokalen Bauteilbereichs Napf sind Martensitanteile bis zu 15 Prozent zu erkennen. Der geringe Martensitanteil konnte in experimentellen Gefügebestimmungen im IEHK Aachen ebenfalls identifiziert werden.

Die Entwicklung angepasster Temperaturbeziehungsweise Abkühlszenarien für die integrierte Wärmebehandlung und gezielte Gefügeeinstellung von Bauteilen im Schmiedeprozess basiert auf den jeweiligen Iso-, U-, ZTU-Diagrammen (IEHK Aachen und IFUM Hannover). Je nach der Gefüge-Zielstellung: Material, Geometrie (nach der Umformung) oder Zustand des Bauteils (Temperaturverteilung nach der Schmiede) wurden unterschiedliche Abkühlszenarien mittels instationärer Wärmeleitungssimulation im IWT Bremen abgeleitet. Für die Simulation sind entsprechende Randbedingungen (Geometrie, Anfangstemperatur, Wärmeübergangskoeffizienten) notwendig, die zunächst durch Messungen bestimmt werden. Die Validierung der simulierten Abkühlszenarien erfolgt mittels Temperaturmessungen

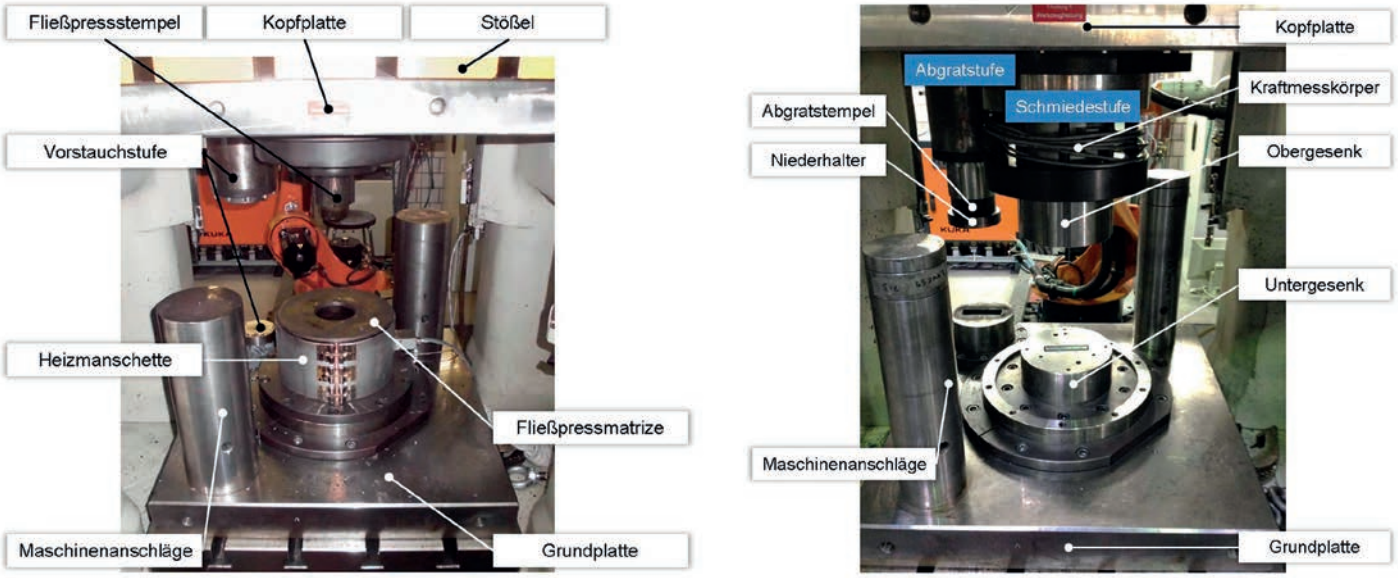

Bild 2: Werkzeugsysteme der Demonstratorprozesse: Werkzeugsystem für die Bauteile „abgesetzte Welle“ (links) und „Common-Rail“ (rechts).

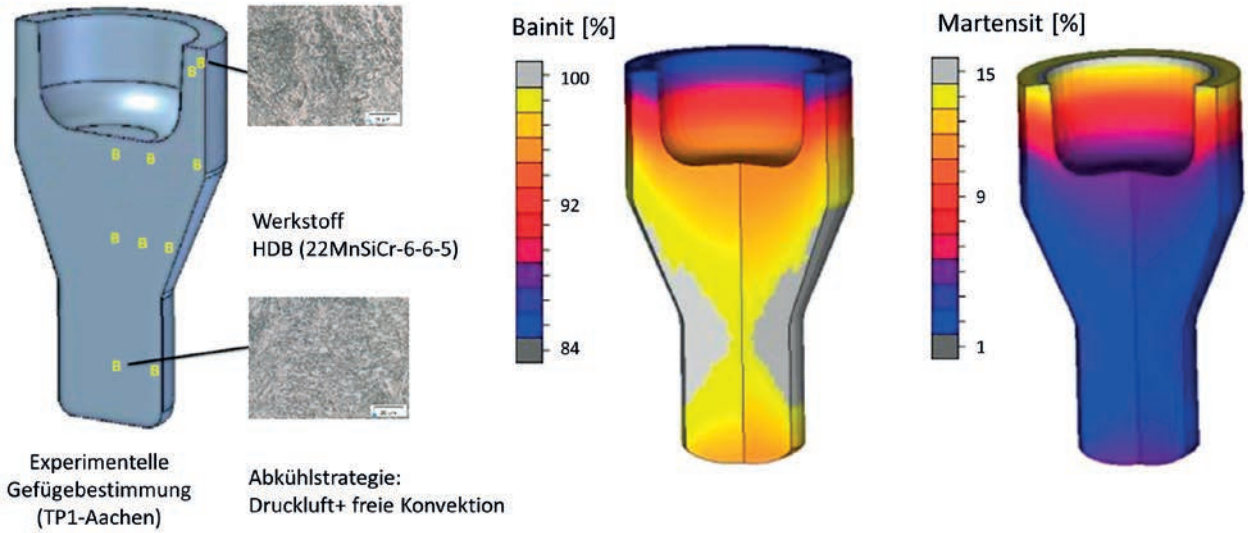

Bild 3: Experimentelle (links) und numerische (rechts) Ergebnisse der Phasenverteilung für eine kontrolliert abgekühlte „abgesetzte Welle“ aus HDB.

an definierten Stellen im Bauteil während des Spray-Quench-Prozesses.

Bei der Sprayabkühlung ist eine starke Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten von der Oberflächentemperatur des Bauteils gegeben [2]. Die Ableitung von Wärmeübergangskoeffizienten erfolgte durch Betrachtung des Temperaturverlaufs im gesamten Bauteil auf der Basis der Lumped-Capacitance-Methode. Auch Wärmestromsensoren an der Bauteiloberfläche oder die nicht-taktile Bestimmung der Oberflächentemperaturen mittels der Thermografie wurden eingesetzt [3].

Eine bauteil- und materialangepasste Abkühlstrategie für das Modell-Bauteil Common Rail ist in Bild 4 in das UZTU-Diagramm für den HDB-Stahl eingetragen. Kritische Stellen wurden gezielt aus der Simulation ausgewertet (Rand bis Kern) und mit Messpunkten zwischen Rand und Kern verglichen. Damit wurde die Simulation qualitativ validiert und die Effekte einer isothermen Wärmebehandlung, zum Beispiel mit einer Isolierung um das Bauteil, mitbetrachtet. Auf diese Weise ergibt sich eine Reduzierung des Martensitanteils von 25 auf größer als 5 Prozent. Die Abkühlstrategie wurde mittels Härteprüfung (IWT Bremen Werkstofftechnik) und Lichtmikroskopie (IEHK Aachen) validiert, wie in Bild 4 rechts und 5 gezeigt. Mit einer zwei- bis vierstufigen Abkühlstrategie wurden Bauteil-Serien an der Schmiedelinie des IFUM hergestellt und kontrolliert abgeschreckt.

Am IW Hannover wurden auf Basis der Wirbelstromtechnik unter Nutzung der Harmonischen Analyse Bainitsensoren entwickelt, die eine berührungslose und zerstörungsfreie Erfassung der Werkstoffumwandlung im Prozessablauf während der Abkühl- und isothermen Haltephasen ermöglichen. Die Bainitsensoren für den Einsatz im Salzbad sind aus hochtemperaturbeständigen Materialien aufgebaut und bis zirka 500 °C einsetzbar, während die Bauteiltemperatur bei den aktiv gekühlten Bainitsensoren bis zu 1.250 °C betragen darf.

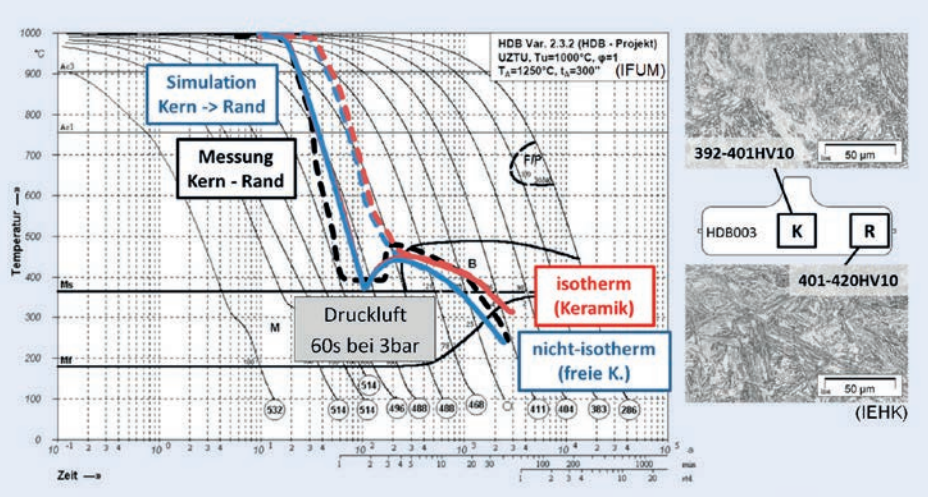

Bild 4: Vergleich zwischen Messung und Simulation für die Auswertung der Abkühlstrategie des „Common Rail“ mit Isolierung in der Haltephase (links) und Ergebnisse der Härteprüfung und Lichtmikroskopie (rechts) für den HDB-Stahl.

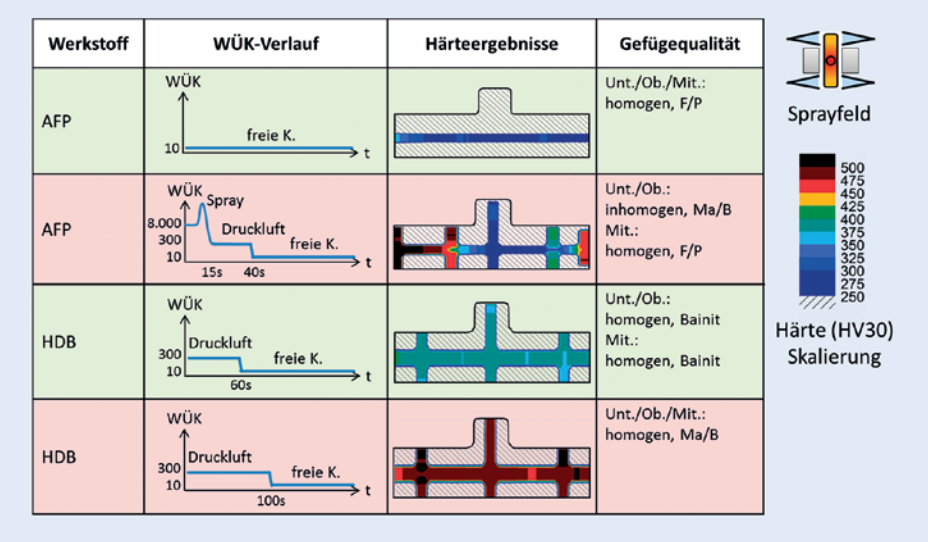

Bild 5: Wärmeübergangskoeffizient (WÜK)-Verläufe und HV30-Werte für das Bauteil „Common Rail“ bei unterschiedlichen Abkühlstrategien.

Das eingesetzte Messsystem ermöglicht eine Mehrfrequenzprüfung mit bis zu vier Frequenzen gleichzeitig. Durch die Variation der Prüffrequenz lässt sich die Eindringtiefe anpassen, sodass die Werkstoffumwandlung im Kernbereich und in der Bauteilrandzone differenziert voneinander betrachtet werden können. Unter Nutzung der Fast Fourier Transformation werden sowohl die Grundwelle als auch die Höherharmonischen des Messsignals, die mit der magnetischen Hysterese und daher mit mechanischen Eigenschaften wie Festigkeit und Härte korrelieren, in Echtzeit ausgewertet [4-5].

Die Amplitude der 1. Harmonischen nimmt aufgrund der wachsenden Anteile von ferromagnetischem Material bei der Abkühlung aus dem Austenitgebiet während der Werkstoffumwandlung stetig zu und erreicht zum Ende der Werkstoffumwandlung ihren Maximalwert. Damit liefert die Amplitude der 1. Harmonischen im zeitlichen Verlauf zuverlässige Informationen über den Umwandlungsbeginn und -verlauf sowie das Ende der Werkstoffumwandlung. Der Verlauf des Arbeitspunkts in der Impedanzebene der 3. Harmonischen beschreibt während der Werkstoffumwandlung eine charakteristische Schleife. Die Phasenlage dieser Schleife ändert sich in Abhängigkeit der Phasen- und Gefügeausbildung und ermöglicht eine Unterscheidung der Ferrit-, Bainit- und Martensitbildung. Kommt es während der Werkstoffumwandlung zur Ausbildung unterschiedlicher Gefüge, dann ist dies in einer Überlagerung der entsprechenden Schleifen in der Impedanzebene der 3. Harmonischen zu erkennen. Durch die kombinierte Auswertung der 1. und 3. Harmonischen wird eine Quantifizierung der gebildeten Gefüge- und Phasenanteile ermöglicht.

Da die Messergebnisse bereits während der Abkühlphase am Mess-PC dargestellt werden, ermöglicht der Einsatz der Bainitsensortechnik eine gezielte Steuerung der Wärmebehandlung. Bild 6 zeigt die sensorkontrollierte Abkühlung der „abgesetzten Welle“ im Sprayfeld des IWT Bremen (Verfahrenstechnik), wobei die Abkühlung solange erfolgte, bis die Martensit-Starttemperatur (MS) in der Randzone unterschritten wurde und eine Umwandlung (UW) im Messsignal erkennbar war.

Die im Fokus des Projekts EcoForge stehenden hochfesten Stähle, wie der HDB – High Strength Ductile Bainite, weisen mit ihren bainitischen Gefügen und der Kombination von Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften [6] hohe Anforderungen an die Material- und Gefügecharakterisierung auf. Am IEHK Aachen wurden die Gefügeumwandlungen im Bainit-Phasenfeld und die resultierenden Mikrostrukturen in den Stählen analysiert. Neben der Betrachtung der Kinetik der Umwandlungsvorgänge mit im Dilato-

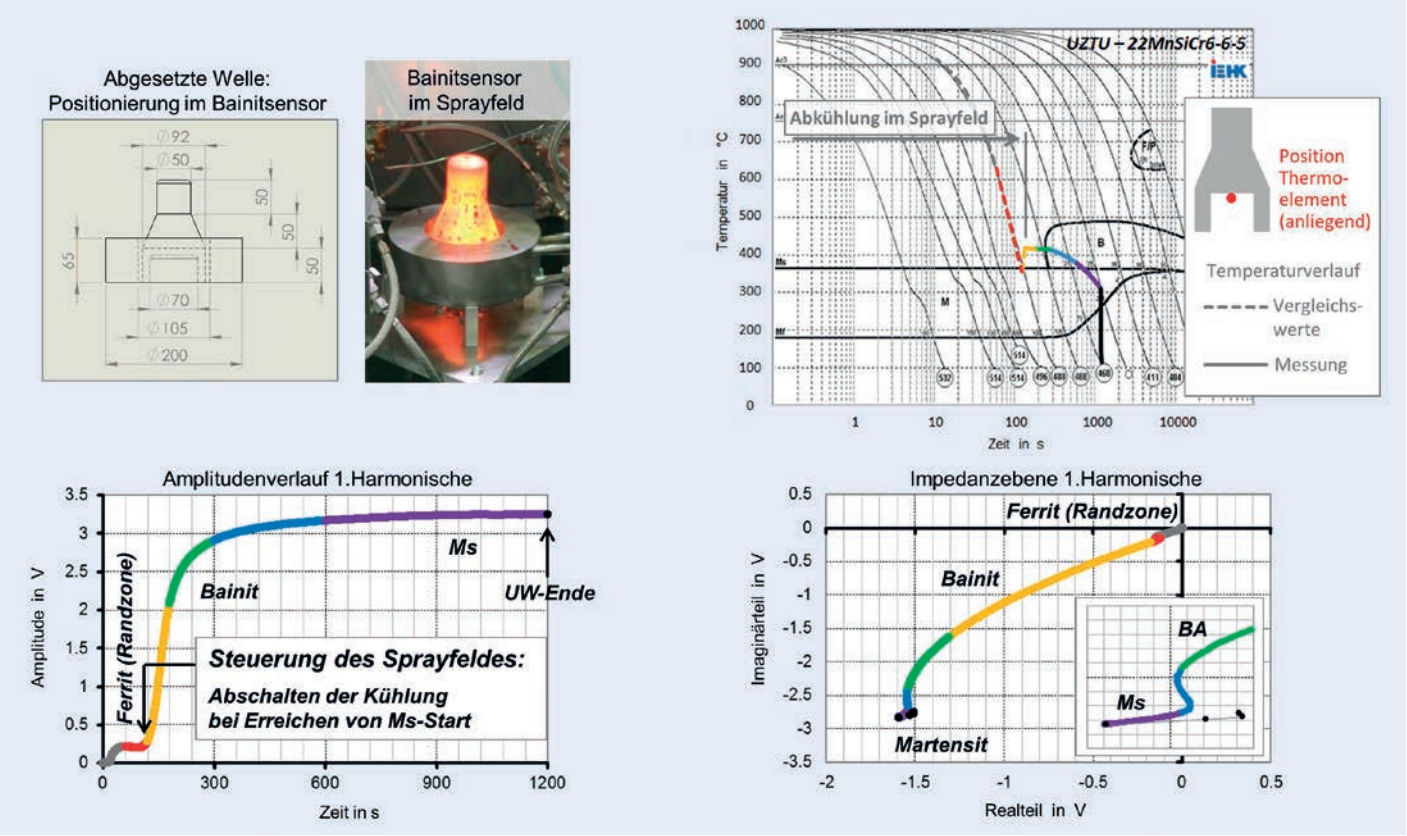

Bild 6: Sensorkontrollierte Abkühlung der „abgesetzten Welle“ im Sprayfeld des IWT.

meter erstellten Umwandlungsschaubildern (Iso-, U-, ZTU) wurden Salzbad-Glühversuche mit Zugversuchs- und Kerbschlagbiegeproben durchgeführt, um den Einfluss der Mikrostrukturen auf die makroskopischen mechanischen Eigenschaften zu analysieren. Für derartige Untersuchungen ist eine exakte Beschreibung der entstehenden Mikrostrukturen notwendig. Die Lichtmikroskopie stößt bei den sehr feinen bainitischen Strukturen jedoch an die Grenzen ihrer Auflösung. Um solche Gefüge dennoch charakterisieren zu können, wurde eine neue Methode zur Bildanalyse von REM-Aufnahmen (SE) entwickelt.

In Bild 7 ist eine Anwendung der IEHK-Bildanalyseroutine auf zwei REM-Bildern dargestellt. Die Proben aus AFP-Stahl wurden in zwei Salzbädern bei 1.000 °C für fünf Minuten austenitisiert, dann bei 340 beziehungsweise 380 °C isotherm umgewandelt und schließlich in Öl abgeschreckt. Die linke Hälfte zeigt das REM-Bild des mit Nital angeätzten Gefüges. Zwei unterschiedliche mikrostrukturelle Komponenten sind zu erkennen: durch die Ätzung tiefer liegender bainitischer Ferrit und erhabene Zementit-Ausscheidungen. In den rechten Bildhälften ist die Erkennung der Bildanalyse-Routine visualisiert. Bainitischer Ferrit ist blau gefärbt, Karbide rot und die Grenzen zwischen erkannten Strukturbestandteilen grün. Rechts im Bild 7 sind die Analyseergebnisse dargestellt. Es sind deutliche Unterschiede zwischen den beiden bainitischen Strukturen erkennbar: Mit höherer Umwandlungstemperatur sind der Anteil an bainitischem Ferrit und die Größe der Bestandteile gestiegen. Diese Veränderungen wirken sich direkt auf die makroskopischen mechanischen Eigenschaften aus, indem die Werkstofffestigkeit sinkt und die Zähigkeit steigt.

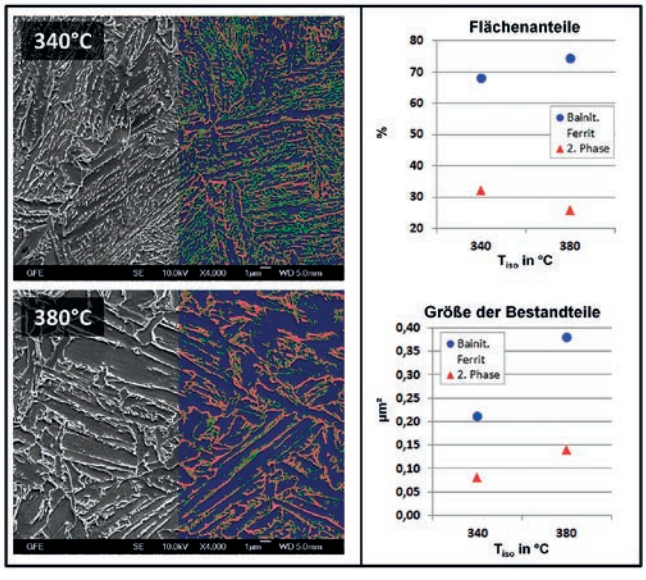

Bild 7: REM-Bilder und Analysen von zwei Salzbadproben des 38MnVS6 (blau = Bainitischer Ferrit, rot = Karbide).

Im Projekt wurden Proben aus Laborglühungen und aus geschmiedeten Demonstrator-Bauteilen für drei Stähle auf diese Weise hinsichtlich Anteilen, Größen, Formen (Länge, Breite, usw.) und Kontext der mikrostrukturellen Bestandteile analysiert. So stehen umfassende Daten zur Verfügung, die die untersuchten Mikrostrukturen im Detail charakterisieren und den Einfluss der Wärmebehandlungsparameter auf die Mikrostruktur sowie die Zusammenhänge zwischen Gefügen und mechanisch-technologischen Eigenschaften zu untersuchen.

Die Lauwarmumformung nach der gezielten Abkühlung aus der Schmiedehitze weist eine für die Massivumformindustrie attraktive Alternative zur Kaltumformung bei Raumtemperatur auf. Die Ergebnisse der Untersuchungen am IFU Stuttgart für die Lauwarmumformung zeigen, dass die Umformhistorie keinen signifikanten Einfluss auf die Bruchdehnung und die Zugfestigkeit hat und Schmiede- und Bainitisierungstemperatur die Kerbschlagbiegearbeit für HDB-Stahl beeinflussen. Die Untersuchung des AFP- und HDB-Stahls ergaben bei einer Steigerung der Umformtemperatur von Raumtemperatur auf 500 °C eine Presskrafteinsparung von bis zu 30 Prozent in Abhängigkeit vom Umformgrad und Umformprozess zum Beispiel Vollvorwärts-Fließpressen oder Verjüngen. Durch Variation des Schmierstoffs konnte eine Reduktion der Prozesskräfte und eine Verbesserung der Oberflächenbeschaffen-

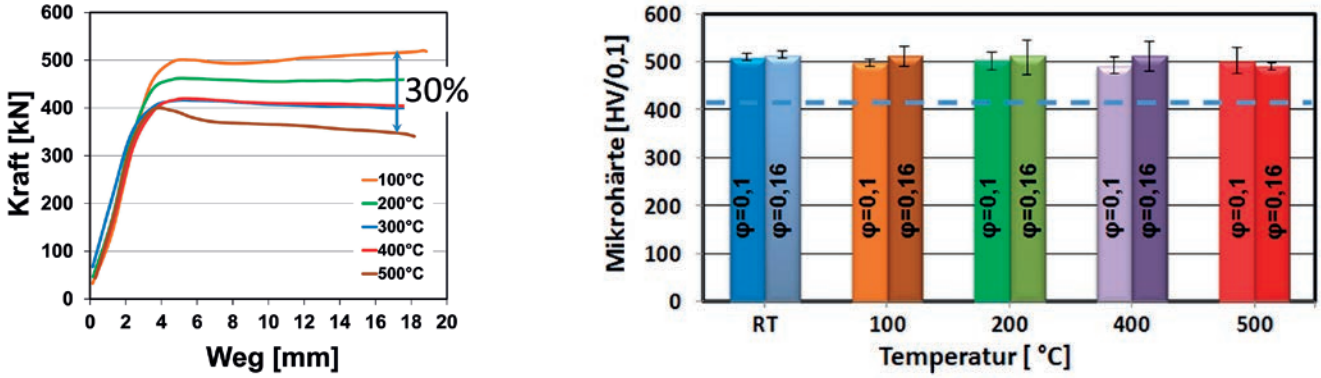

Bild 8: Kraft-Weg-Verlauf beim Vollvorwärts-Fließpressen für AFP-Stahl bei φ = 1,2 (links) und Mikrohärtemessung am mit Beruforge 190 umgeformten Zapfen beim Verjüngen für HDB-Stahl (rechts).

heit erreicht werden. Auch die Umformtemperatur hat nur einen geringen Einfluss auf die gemessene Härte des Bauteils (Bild 8). Ein interessanter Temperaturbereich liegt bei 300 °C, wobei die Krafteinsparung, die Oberflächeneigenschaften und die Härtezunahme, in Verbindung mit dem zur Beschichtung von erwärmten Bauteilen vorteilhaften pulverförmigen Schmierstoff Graphit+MoS2, für die Praxis die höchsten Einsparungen mit sich bringt. Im Temperaturbereich zwischen 370 und 420 °C liegt der Bereich der erhöhten Fließspannung, sodass durch die höhere Temperatur keine Einsparung von Presskraft erreicht wird. Des Weiteren verschlechtert sich durch die höheren Temperaturen die Oberflächentopographie und die Maßhaltigkeit der Bauteile nimmt ab.

Weitere Verarbeitungsschritte zur Einstellung der Bauteilkontur beruhen auf der spanenden Bearbeitung direkt aus der Schmiedehitze. Im Rahmen der Untersuchungen am IWT Bremen (Werkstofftechnik) konnte ermittelt werden, dass die Prozesskräfte beim Außenlängsdrehen von Bainit gegenüber der Bearbeitung bei Raumtemperatur erheblich sinken. So fällt die Schnittkraft im untersuchten Temperaturbereich bis 500 °C um bis zu 25 Prozent geringer aus. Das Absenken der Prozesskräfte hat dabei gleich mehrere wichtige Effekte auf den Bearbeitungsprozess:

- Die Standzeit der thermisch hochbelastbaren beschichteten Hartmetallwerkzeuge erhöht sich um das Dreifache bei einer Bearbeitungstemperatur von 400 °C.
- Der Bauteilverzug ändert sich nur minimal, weil zwar die Steifigkeit des Bauteils bei erhöhten Temperaturen herabgesetzt ist, jedoch auch die Passivkraft bei der Heißzerspanung geringer ausfällt.
- Es wird proportional zur Schnittkraft eine geringere Spindelleistung abgefordert, was die Energieeffizienz des Prozesses verbessert.

Insgesamt konnte aus Gründen der Spanbildung, der Prozesskräfte und des Werkzeugverschleißes für das Heißdrehen von Bainit eine optimale Bearbeitungstemperatur von 400 °C identifiziert werden. Für den dauerhaften Einsatz der Heißzerspanung wurde für die verwendete Werkzeugmaschine ein Lösungsansatz zur thermischen Isolierung und Kühlung des Spannfutters erarbeitet und umgesetzt.

An dem im Rahmen des von EcoForge hergestellten Bauteils „abgesetzte Welle“ wurde die Übertragbarkeit der an bainitisierten zylindrischen Proben aus AFP gewonnen Erkenntnisse auf die aus HDB geschmiedete Welle untersucht. Die Ergebnisse weisen ebenfalls einen signifikant gesteigerten Standweg und geringere Prozesskräfte gegenüber der Zerspanung bei Raumtemperatur auf. Die Tendenzen bezüglich der Spanbildung blieben unverändert (Bild 9).

Zusammenfassung und Ausblick

In der EcoForge-Leitinitiative wurde die direkte Wärmebehandlung aus der Schmiede-

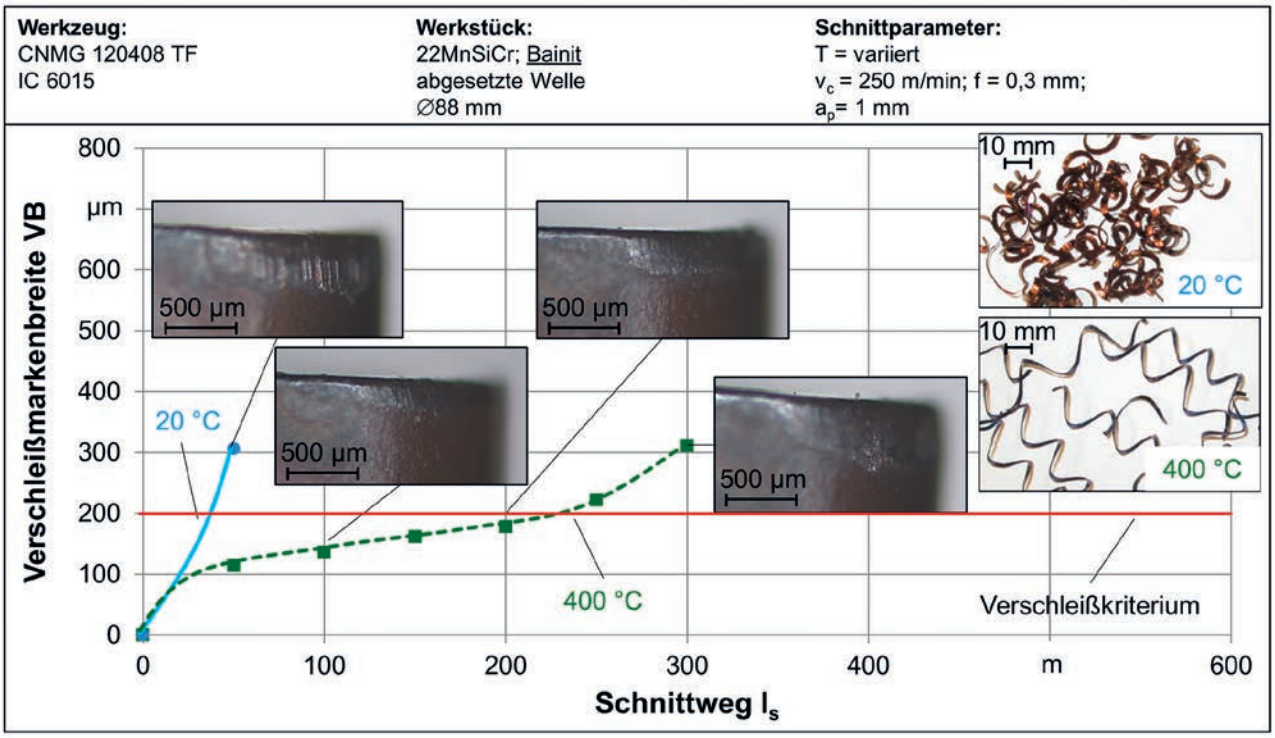

Bild 9: Verschleißmarkenbreite über Schnittweg beim Heißdrehen von Bainit. Bilder: Autoren

hitze zur gezielten Einstellung einer Gefügemikrostruktur und -homogenität hochfester Bauteile abgeleitet. Die Flexibilität einer gesteuerten Abkühlung im Sprayfeld bietet die Möglichkeit einer Anpassung für verschiedene Werkstoffe sowie Bauteilgeometrien. Die Ergebnisse von EcoForge zeigen, dass ein homogenes bainitisches Gefüge im Schmiedeprozess eingestellt werden kann, wenn die Abkühlbedingungen auf der Basis von Simulationsrechnungen angepasst werden und der Abschreckprozess durch eine prozessintegrierte Sensor- und Temperaturmessung kontrolliert wird. Das Potenzial der unmittelbaren Weiterverarbeitung der Bauteile aus der Schmiedehitze mittels Lauwarmumformung und Heißzerspanung konnte demonstriert werden. Hieraus resultieren unmittelbare Potenziale für energie- und ressourceneffiziente Prozessketten für Hochleistungsbauteile.

Weiterführende Arbeiten zwischen den beteiligten Instituten der EcoForge-Leitinitiative sind in Vorbereitung, kooperative Projektideen mit Innovationspotenzial für integrierte Prozessketten wurden identifiziert. Transfermaßnahmen zur Umsetzung der sensorkontrollierten Abkühlung in die industrielle Praxis wurden initiiert und können die Potenziale der EcoForge-Prozesskette in der industriellen Praxis weiterentwickeln. ■

Förderhinweis

Das Forschungsprojekt „EcoForge“ der federführenden Forschungsvereinigung AWT – Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik e. V. wurde über die AiF in der Fördervariante „Leittechnologien für kleine und mittlere Unternehmen“ im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert. Der Schlussbericht kann bei der AWT, Paul-Feller-Str. 1, 28199 Bremen, angefordert werden.

Literatur

[1] Bouguecha, A.; Olle, P.; Hadifi, T.; Behrens, B.-A.: Numerische Simulation zur Berechnung der Gefügeevolution und des Verzuges geschmiedeter Bauteile, Internationale Konferenz „Neuere Entwicklungen in der Massivumformung“, 17. und 18. Mai 2011, Fellbach (bei Stuttgart).

[2] Schüttenberg, S.; Lütjens, J.; Hunkel, M. and Fritsching, U.: Adapted spray quenching for distortion control. Mat.-wiss. u. Werkstofftech., pp.43: 99-104 (2012).

[3] Hornig, N.; Rose, A.; Fritsching, U.; von Hehl, A.: Kontrollierte Abschreckung von Aluminiumbauteilen durch Sprühkühlen. HTM Journal of Heat Treatment and Materials: Vol. 68, No. 4, pp. 179-187 (2013).

[4] Reimche, W.; Zwoch, S.; Bruchwald, O.; Bach, Fr.-W.: Hochtemperatur-Prüftechnik ermöglicht Einblick in die Werkstoffumwandlung und Phasenausbildung bei Hochleistungsbauteilen. In: DGZfP-Jahrestagung 2011 Zerstörungsfreie Materialprüfung, 30. Mai – 1. Juni 2011, Bremen. Berichtsband DGZfP, Berlin, 2011, S. Di3C2.

[5] Hinrichs, B.; Reimche, W.; Bruchwald, O.; Frackowiak, W.; Fritsching, U.; Bach, Fr.-W.: Sensorkontrolliertes Bainitisieren im Spraydüsenfeld. GWI Gaswärme International 3 (2012), S. 77-85.

[6] Keul, C.; Urban M.; Fischer, M.; Hirt, G.; Bleck, W.: New high strength ductile bainitic forging steels; TMS- Annual Meeting & Exhibition, Seattle, 2010.

Die Projektteilnehmer während des Kick-off-Meetings am 3. Februar 2011 in Bremen.

Autoren dieses Beitrags

M. Eng. Thibaud Bucquet und
Prof. Dr.-Ing. habil. Udo Fritsching,
Bremen

Dipl.- Ing. Martin Fischer,
Dipl.-Ing. Hans Henning Dickert und
Univ. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Bleck,
Aachen

Dipl.-Wirt.-Ing. Adis Huskic,
Dipl.-Ing. Mohammad Kazhai,
M. Sc. Tarik Hadifi,
Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Anas Bouguecha
und Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens,
Hannover

Dipl.-Ing. Nadja Labanova,
Dipl.-Ing. Ehsan Hajyheydari,
Dr.-Ing. Alexander Felde und
Prof. Dr.-Ing. Mathias Liewald MBA,
Stuttgart

Dipl.-Ing. Maxim Gulpak,
Dipl.-Ing. Fedor Egorov,
Dipl.-Ing. André Wagner,
Dr.-Ing. Martin Garbrecht,
Prof. Dr.-Ing. habil.
Dr.-Ing. e.h. Ekkard Brinksmeier,
Bremen

Dipl.-Chem. Timo Hoja,
Prof. Dr.-Ing. habil. Franz Hoffmann und
Prof. Dr.-Ing. Hans-Werner Zoch,
Bremen

Dr.-Ing. Wilfried Reimche,
Dipl.-Ing. Oliver Bruchwald,
M. Sc. Wojciech Frackowiak und
Prof. Dr.-Ing. Hans Joachim Maier,
Hannover