

Lufthärtende duktile Schmiedestähle

Neue Potentiale für Leichtbau, Emissionsreduktionen und Kreislaufwirtschaft

Alexander Gramlich, Ulrich Krupp

Lufthärtende duktile Schmiedestähle haben das Potential, durch eine verkürzte Wärmebehandlung und gegenüber vergleichbaren Vergütungsstählen erhöhte Festigkeiten, die CO₂-Bilanz von geschmiedeten Stahlprodukten deutlich zu reduzieren. Solche neuen Stähle sind vorwiegend mit 4 Massen-% Mangan legiert, welches eine martensitische Umwandlung durch Luftabkühlung ermöglicht und somit die Vergütungsbehandlung nach dem Schmieden obsolet macht. Das Konzept wurde zunächst im Labormaßstab entwickelt und die Potentiale anschließend im industriellen Pilotversuch verifiziert. Die Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt.

Während der letzten zehn Jahre wurden in Deutschland jährlich rund 750.000 Tonnen Gesenkschmiedeprodukte aus Stahl gefertigt [1]. Unter der Annahme eines durchschnittlichen CO₂-Äquivalents von 1,45 Tonnen CO₂ je Tonne Stahl [2] resultiert allein die benötigte Menge Stahl der Schmiedekomponenten in einer jährlichen Menge von 1.087.500 Tonnen CO₂ (Verschnitt, Zunderverluste oder Ähnliches nicht berücksichtigt). Wenn die ambitionierten Klimaziele der Europäischen Union erreicht werden sollen, stehen sowohl die stahlerzeugende als auch die stahlverarbeitende Industrie vor weitreichenden strukturellen Änderungen. Die alleinige Umstellung der primären Stahlerzeugung von der Hochofenroute auf die Erzeugung von direkt reduziertem Eisen (DRI) mit anschließender Stahlerzeugung über den Elektrolichtbogenofen, was alleine betrachtet schon ein ambitioniertes Vorhaben ist, wird nicht ausreichen. Um die CO₂-Emissionen entlang der Prozesskette signifikant zu reduzieren, muss von der Stahlerzeugung über Weiterverarbeitung und Produktdesign bis zur Bauteillebensdauer der Status Quo in Frage gestellt werden und es müssen neben der Stahlerzeugung auch energieintensive Prozesse sowie Recyclingkonzepte kritisch hinterfragt werden.

Im automobilen Karosseriebau spielt Leichtbau schon seit langem eine wichtige Rolle und geht zwingend mit der Verwendung von Stählen einher, was in der Vergangenheit im Zuge der Entwicklung hochfester Blechwerkstoffe (AHSS-Stähle, engl. Advanced High Strength Steels) eindrucksvoll nachgewiesen werden konnte [3]. Durch die Initiative Massiver Leichtbau [4] wurde der Blickwinkel im Stahlleichtbau von Flachprodukten auf Langprodukte der Massivumformung geweitet und in einer Reihe von Projekten konnten bemerkenswerte Erfolge erzielt werden. Während für Karosserien auf mittlerweile drei Generationen AHSS zurückgegriffen werden kann [3], ist die Werkstoffauswahl für hochfeste Schmiedeprodukte deutlich überschaubarer. Dies verhindert die Umsetzung ambitionierter Designkonzepte, da schlichtweg kein Werkstoff vorhanden ist, der eine ideale Kombination aus

Prozessierbarkeit und mechanischen Eigenschaften erzielt. Klassische Vergütungsstähle erreichen zwar die notwendigen mechanischen Kennwerte, jedoch erschweren auftretende Bauteilverzüge während des Abschreckens sowie die hohen Emissionen und Kosten des Vergütungsprozesses den Einsatz dieser Stähle. Die Bauteile könnten zwar alternativ verzugsarm aus ausscheidungshärtenden ferritisch-perlitischen Stählen (AFP-Stähle) gefertigt werden, jedoch erreichen diese Legierungen nicht die notwendigen Kennwerte, da die ferritisch-perlitische Mikrostruktur nur eine begrenzte Festigkeit ermöglicht.

Lufthärtende duktile Schmiedestähle

Abhilfe können die kürzlich entwickelten lufthärtenden duktilen Schmiedestähle (LHD-Stähle, gelistet unter 1.5132) schaffen [5], da diese ein martensitisches Gefüge durch Luftabkühlen aus der Schmiedehitze erzielen. Erreicht wird dieses durch die Zugabe von 4 % Mangan sowie weiterer Legierungselemente, wodurch die diffusionsgesteuerte Phasenumwandlung verzögert wird. Der Unterschied in der Wärmebehandlung zu den Vergütungs- und AFP-Stählen ist schematisch in **Bild 1** dargestellt. Während bei Vergütungsstählen nach dem Abschrecken eine Anlassbehandlung durchgeführt werden muss, um den durch die Kohlenstoffzwangslösung sehr spröden Martensit in einen technisch beanspruchbaren Werkstoff mit fein ausgeschiedenen Karbiden zu überführen, erhalten die lufthärtenden Stähle ihre endgültige Mikrostruktur direkt durch das Abkühlen aus der Schmiedehitze. Neben Mangan sind vorwiegend Silizium und Aluminium legiert, um die Karbidausscheidung während der Luftabkühlung zu steuern und vor allem deren Wachstum zu bremsen. Aufgrund des erhöhten Mangangehalts muss des Weiteren mit Legierungselementen gearbeitet werden, welche die ehemaligen Austenitkorngrenzen vor einer Anreicherung durch Mangan und der hieraus resultierenden Manganversprödung schützen. Die ersten Konzep-

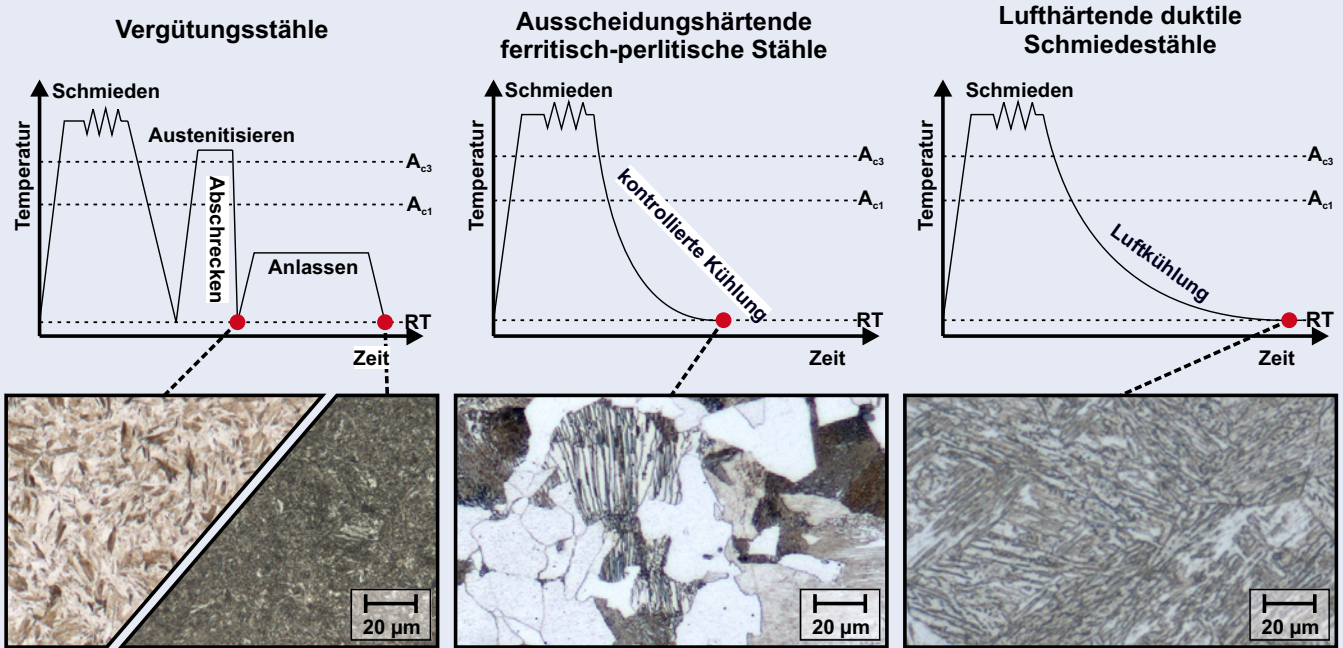


Bild 1: Vergleich der Wärmebehandlungsprozesse von Vergütungsstählen, AFP-Stählen und LHD-Stählen inklusive der zu erwartenden Mikrostruktur. (Quelle: RWTH Aachen)

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der industriellen Pilotschmelze eines LHD Stahls (Massenanteile in %).

C	Si	Mn	P	S	Al	Mo	Ti	Nb	B	N
0,15	0,50	3,90	0,004	0,002	0,52	0,24	<0,001	0,030	0,0025	0,006

te für den neuen lufthärtenden Schmiedestahl wurden im Labormaßstab entwickelt und anschließend im industriellen Pilotversuch abgegossen und zu Bauteilen geschmiedet. Zur Verbesserung der Kerbschlagarbeit werden geringe Mengen an Bor (ca. 30 ppm) und Molybdän (ca. 0,2 %) mikrolegiert. Dies erfolgte in einem kürzlich abgeschlossenen IGF-Projekt (industrielle Gemeinschaftsforschung), in dem iterativ 80kg-Laborschmelzen unter Variation der Elemente Aluminium, Bor und Molybdän in einem Vakuum-Induktionsofen erschmolzen wurden. Die Begleitelemente wurden hierbei so eingestellt, dass die Qualität von industriellem Material präzise gespiegelt wird. Hierdurch wird eine Übertragbarkeit der Ergebnisse im Labormaßstab auf die spätere Pilotphase gewährleistet. Im Anschluss an die Erschmelzung wurden die Gussblöcke von einem Ausgangsquerschnitt von 140x140mm² auf 60x60mm² im robotergestützten Semi-Pro-

duct Simulation Center des IEHK heruntergeschmiedet, um das Material in industrielles Halbzeug zu überführen. Auf der Basis der erzielten Eigenschaften wurde im Anschluss an die Laborphase eine 50-Tonnen-Pilotschmelze bei der BGH Edelstahl Siegen GmbH im Blockguss erschmolzen. Die einzelnen Blöcke wurden daraufhin vorgeblockt und je nach anvisiertem Bauteil direkt geschmiedet oder zunächst gewalzt. Die hergestellten Bauteile umfassen Federbügel für LKW, Standard-Pleuel für Verbrennungsmotoren, LKW-Achsschenkel, und Planetenträger für Planetengetriebe mit einer Gewichtsspanne von 2 bis 226 kg. Die chemische Zusammensetzung der Pilotschmelze ist in **Tabelle 1** zu sehen, die mechanischen Eigenschaften der unterschiedlichen Bauteile sind in **Tabelle 2** dargestellt. Für die dünneren Bauteile Federbügel und Pleuel konnten hohe Streckgrenzen und Zugfestigkeit ($R_{p0,2}$ zwischen 850-900 MPa sowie R_m ca.

Tabelle 2: Mechanisch-technologische Eigenschaften verschiedener Schmiedeprodukte aus LHD-Stahl

	$R_{p0,2}$	R_m	$R_{p0,2}/R_m$	A_3	A_5	KV bei RT
Federbügel	900	1377	0,65	5,3	14,8	76
Pleuel	847	1341	0,63	4,0	12,3	37
Planetenträger	791	1161	0,68	6,1	12,0	27
Achsschenkel	744	1181	0,63	4,3	14,7	27
Federbügel (wärmebehandelt)	851	951	0,89	15,0	25,4	-

1350 MPa) sowie Kerbschlagarbeitswerte erreicht werden, welche die gesetzten Mindestwerte deutlich überschreiten. Die dickeren Bauteile Achsschenkel und Planetenträger weisen leicht niedrigere Kennwerte auf, was vorwiegend an der unvollständig abgelaufenen Martensitumwandlung und dem hieraus resultierenden Mischgefüge aus Martensit und Bainit liegt. Abhilfe könnte hier eine Anpassung der chemischen Zusammensetzung liefern, beispielsweise durch ein Anheben des Bor-Gehaltes.

Interkritische Glühung

Während die mechanisch-technologischen Eigenschaften eines Vergütungsstahls wenig Freiheitsgrade aufweisen und lediglich eine Variation der Anlasstemperatur genutzt werden kann, um den bekannten Zielkonflikt von Festigkeit und Duktilität aufzulösen, weisen die LHD-Stähle ein großes Spektrum möglicher mechanischer Kennwerte auf. Die große Vielseitigkeit beruht ebenfalls auf dem Mangangehalt, welcher das sogenannte interkritische Zweiphasengebiet (zwischen A_1 - und A_3 -Temperatur und unterschiedlichen Austenit-Ferrit-Anteilen) zu tiefen Temperaturen verschiebt und somit ein energieeffizientes Glühen ermöglicht. Während der Wärmebehandlung im Zweiphasengebiet kommt es zunächst zu einer Neubildung von Austenitkörnern aus dem martensitischen Ausgangsgefüge. Im weiteren Verlauf der Wärmebehandlung wachsen diese Austenitkörner und reichern sich zusätzlich mit den Elementen Mangan und Kohlenstoff an, da die Löslichkeit dieser Elemente im Austenit deutlich höher ist als es im Martensit bzw. Ferrit der Fall ist. Durch die Anreicherung dieser Elemente wird der duktile Austenit soweit stabilisiert, dass er auch nach Abkühlung auf Raumtemperatur noch vorhanden ist. Das resultierende mehrphasige Gefüge, bestehend aus angelassenem Martensit und Austenit, weist im Vergleich zum luftgehärteten Zustand zwar leicht reduzierte Festigkeiten auf; Zähigkeit und Duktilität erreichen jedoch ein Vielfaches gegenüber dem luftgehärteten Referenzzustand (siehe **Tabelle 2**). Der Effekt des Austenits beschränkt sich hier nicht nur auf das Vorhandensein einer zweiten weichen Phase. Unter mechanischer Last wandelt der Austenit zu neuem Martensit um (TRIP-Effekt, engl. transformation induced plasticity), was einerseits die verbesserte Duktilität erklärt und andererseits positive Auswirkung auf die Ermüdungsfestigkeit infolge schwingender Beanspruchung hat. Liegen die Austenitkörner in der richtigen Größe und Morphologie vor, können der TRIP-Effekt bzw. die bei der Umwandlung des Austenits zu Martensit entstehenden Druckspannungen dazu genutzt werden, Ermüdungsrisse im Material zu schließen, was mit einer Erhöhung der Lebensdauer einhergeht. Die Änderung der mechanischen Eigenschaften eines exemplarischen LHD-Stahls mit zugehörigen EBSD-Mappings der Phasenverteilung sind in **Bild 2** dargestellt (EBSD, engl. electron back-scatter diffraction, zur ortsaufgelösten Messung der kristallographischen Orientierung und Phase im Rasterelektronenmikroskop). Wie zu erkennen ist, sind vor allem feine globulare Restaustenit-Körner (hier dargestellt in blau) die Ursache für die herausragenden mechanisch-technologischen Eigenschaften der interkritisch geglühten Variante. Überschreitet die Wärmebehandlungstemperatur ein Optimum, im vorliegenden Fall 650 °C, steigen zwar Zugfestigkeit und Duktilität weiter an, jedoch sinkt die Streckgrenze rapide, was die Werkstoffe für Anwendungen in der Massivumformung weniger attraktiv macht.

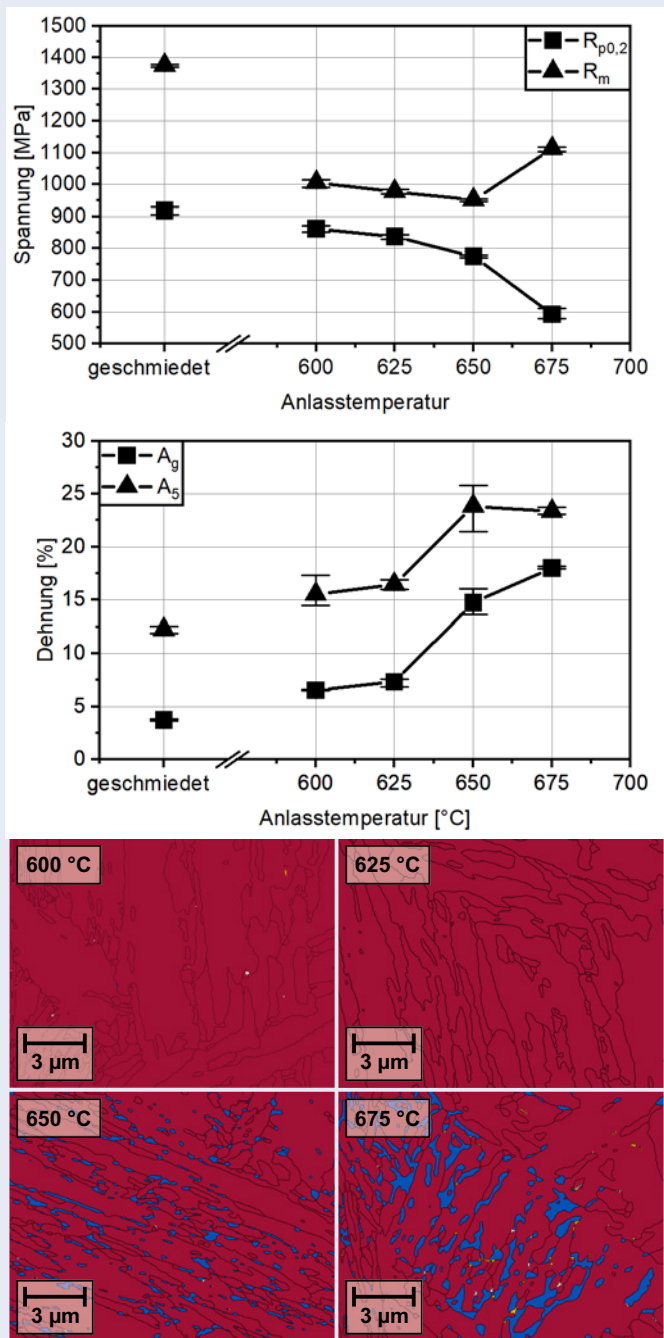


Bild 2: Einfluss einer interkritischen Glühung (bei unterschiedlichen Temperaturen für je 60 min) auf die Kennwerte im Zugversuch (oben) sowie die Mikrostruktur (unten). Die Phasenanteile an angelassenem Martensit (rot) sowie Restaustenit (blau) wurden durch Elektronenrückstreubeugung (EBSD) im Rasterelektronenmikroskop ermittelt. (Quelle: RWTH Aachen)

Kreislaufwirtschaft und Emissionen

Die neu entwickelten lufthärtenden Schmiedestähle (LHD-Stähle) haben im Kontext Nachhaltigkeit konkrete Vorteile in dreierlei Hinsicht: (i) Leichtbau, (ii) Emissionen und im weiteren Sinne (iii) Kreislaufwirtschaft.

Leichtbau: Der Hauptvorteil der LHD-Stähle im Vergleich zu den klassischen Vergütungsstählen liegt in der erhöhten

zyklischen Festigkeit. Sowohl die Untersuchung von Werkstoffproben als auch die Durchführung von Bauteilversuchen zeigten, dass die zyklische Festigkeit im Vergleich zu Referenzwerkstoffen deutlich erhöht werden konnte (+50 % für Werkstoffproben im Vergleich zum Referenzvergütungsstahl 42CrMo4, sowie + 100 % bei Bauteilversuchen im Vergleich zum Vergütungsstahl 33MnCrB5-2). Durch die erzielten Festigkeiten ergeben sich neue konstruktive Leichtbauoptionen, die durch die verzugsarme Abkühlung auch fertigungstechnisch umsetzbar sind.

Emissionen: Wie Studien des Industrieverbands Massivumformung zeigen [6], befinden sich die größten Potentiale zur Einsparung von CO₂ in der Schmiedeindustrie bei den Wärmebehandlungsprozessen sowie in den eingesetzten Werkstoffen. Durch eine Umstellung von klassischen Vergütungsstählen auf LHD-Stähle lassen sich Emissionen sowohl durch die Verringerung des Materialbedarfs als auch durch den Wegfall der energieintensiven Wärmebehandlung einsparen. Vorläufige Ergebnisse einer durchgeführten Fallstudie [7] an geschmiedeten Federbügeln zeigen, dass die Substitution von Vergütungsstählen zu einer Reduktion des Product-Carbon-Footprint (PCF) zwischen 29-32 % führen kann. In diesem konkreten Fall sind 17-22 % auf den Wegfall der Vergütungsbehandlung zurückzuführen und die restlichen Anteile auf das reduzierte Bauteilgewicht.

Kreislaufwirtschaft: Während für Konstrukteure die große Werkstoffauswahl ein Glücksfall ist und eine maßgeschneiderte Anpassung der Werkstoffe an die jeweiligen Anforderungen zulässt, sorgt die Vielfalt an unterschiedlichen Stahllegierungen beim Recycling für Probleme. Zwar ist Stahl im Elektrolichtbogenofen theoretisch unendlich oft recyclebar, jedoch können aus dem Schrott eingeschleppte Legierungselemente sich negativ auf Prozess und resultierende Eigenschaften auswirken. Als klassisches Beispiel ist hier Kupfer zu nennen, das zu Heißrissen während der Warmumformung und zu Versprödung führen kann. Kupfer ist metallurgisch kaum aus der Stahlschmelze zu entfernen und wird nur durch Verdünnen tolerierbar. Für einige Stahlgüten konnte nachgewiesen werden, dass Kupfer durch eine gezielte Wärmebehandlung zu einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften beitragen kann.

Aus Sicht der Kreislaufwirtschaft und des Stahlrecyclings wäre eine Verringerung der industriell verwendeten Stahlvarianten sinnvoll und eine Nutzung von Stahlgüten mit einem breiten Spektrum an Eigenschaften zu befürworten. LHD-Stähle weisen durch die oben beschriebenen Prozessergänzungen für diese Zielsetzung ein großes Potential auf.

Fazit

Lufthärtende duktile Schmiedestähle (LHD-Stähle) weisen interessante Kombinationen der mechanisch-technologi-

schen Eigenschaften auf und haben das Potential, die Massivumformung hinsichtlich Leichtbaus, Emissionen und Kreislaufwirtschaft deutlich nachhaltiger aufzustellen. Durch die Verkürzung der Wärmebehandlung können große Mengen an CO₂-Emissionen sofort eingespart werden, ohne dass Änderungen der Bauteilgeometrien notwendig sind. Die Vielseitigkeit des Werkstoffs birgt zusätzliche positive Effekte für die Kreislaufwirtschaft der Zukunft. Zu weiteren Aspekten, wie bspw. die Eignung für das Plasmanitrieren und Resistenz gegenüber Wasserstoffversprödung, zeigten erste Experimente vielversprechende Ergebnisse, jedoch sind weitere Untersuchungen notwendig und in Zukunft geplant.

Literatur

- [1] Genesis-Online, Datenlizenz by-2-0. 2021
- [2] Wirtschaftsvereinigung Stahl (Hrsg.) Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland: 2020.
- [3] Bleck, W.; Moeller, E.: Handbuch Stahl – Auswahl, Verarbeitung, Anwendung. Carl Hanser Verlag 2017
- [4] Wurm, T.; Busse, A.; Raedt, H.-W.: Initiative Massiver Leichtbau - Phase III: Werkstofflicher Leichtbau für Hybrid-Pkw und schweren Lkw. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, 121 (2019) 3, 16-23, DOI: 10.1007/s35148-018-0236-8
- [5] Gramlich, A.; Schönborn, S.; Schmiedl, T.; Baumgartner, J.; Krupp, U.: Lufthärtende duktile Schmiedestähle für zyklische Beanspruchung. massivUMFORMUNG, 5 (2021) 2, 64-69
- [6] Raedt, H.-W.: Klimapfad Massivumformung – Wege zu CO₂-freien Komponenten. ATZ, 124 (2022) 2-3, 26-31
- [7] Gramlich, A.; Hagedorn, W.; Krupp, U.; Greiff, K.: Nachhaltigkeit im Spannungsfeld zwischen Material Prozess und Produkt. DGM-Fachausschuss Circular Materials, 25.11.2021

Autoren



Alexander Gramlich, M.Sc.

Institut für Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen University
Aachen
0241/80-95784
alexander.gramlich@iehk.rwth-aachen.de



Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Krupp

Institut für Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen University
Aachen