

# Geschmiedete Hochleistungsrotorwellen für die Energiewende

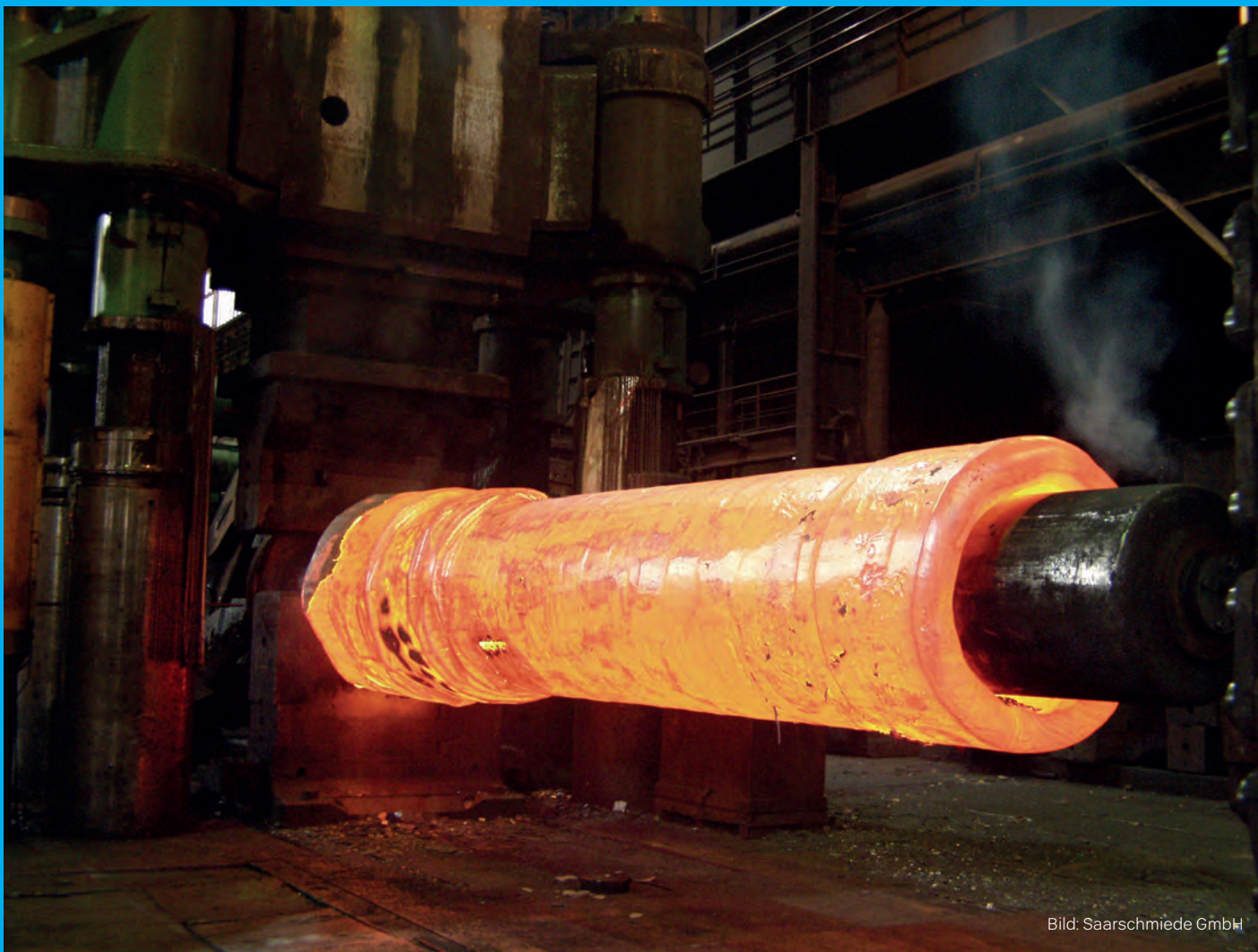


Bild: Saarschmiede GmbH

Geschmiedete Rotorwellen weisen im Vergleich zu Gusswellen aufgrund der besseren mechanischen Eigenschaften ein hohes Leichtbaupotenzial auf. Allerdings treten aufgrund des erforderlichen Hohlbohrens große Materialverluste auf, was die Wellen in den meisten Fällen unwirtschaftlich macht. Eine Lösungsansatz ist die Kombination fortschrittlicher lufthärtender Schmiedestähle welche durch Hohl Schmieden sowie eine Komponentenentwicklung ihr volles Potenzial entfalten.

Nur durch eine kombinierte Werkstoff- und Prozessoptimierung können signifikante Effizienzsteigerungen ermöglicht werden.



**Dr. Alexander Gramlich**

Die Entwicklung materialeffizienter Hohlschmiedeprozesse erfordert eine integrierte Betrachtung von Werkstoff, Prozessführung und Bauteilgeometrie.

**Moritz Gouverneur**

Um das volle Leichtbaupotenzial einer Hohlschmiedewelle zu realisieren, muss das gesamte Rotorlagerungssystem angepasst werden.



**Christian Hollas**

AUTOREN



**Dr.-Ing. Alexander Gramlich**

ist Ober-Ingenieur am Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK) der RWTH Aachen



**Can Akkus, M.Sc.**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK) der RWTH Aachen



**Moritz Gouverneur, M.Sc.**

ist Gruppenleiter Massivformteile am Institut für Bildsamer Formgebung (IBF) der RWTH Aachen



**Christian Hollas, M.Sc.**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am CWD – Chair for Wind Power Drives der RWTH Aachen



**Dr.-Ing. David Bailly**

ist Ober-Ingenieur am Institut für Bildsamer Formgebung (IBF) der RWTH Aachen



**Dr.-Ing. Julian Röder**

ist Ober-Ingenieur am CWD – Chair for Wind Power Drives der RWTH Aachen



**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Jacobs**

ist Institutsleiter des CWD – Chair for Wind Power Drives der RWTH Aachen



**Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil Ulrich Krupp**

leitet das Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK) der RWTH Aachen

Ein Grundbaustein der angestrebten Energiewende in Deutschland ist die Windenergie. Um den steigenden Energiebedarf in Zukunft komplett aus nachhaltigen Quellen decken zu können, ist ein ambitionierter Zubau an Windenergieanlage notwendig, der kürzlich im North Sea Summit 2026 durch die Anrainerstaaten der Nordsee beschlossen wurde. Mittelfristig werden 9,5 Milliarden Euro investiert und 31.000 zusätzliche Arbeitsplätze geschaffen [1]. Für die deutsche Massivumformung ist daher in den kommenden Jahren mit einer steigenden Nachfrage an Hochleistungskomponenten für Windenergieanlagen (WEA) zu rechnen. In Deutschland ist insbesondere der Onshore-Ausbau wichtig, da es über eine geringe Offshore-Fläche verfügt.

Eine der zentralen Komponenten im Rotorstrang der WEA ist die Rotorwelle. Die Wind- und Gewichtslasten der Rotorblätter

erzeugen dabei eine mehrdimensionale Belastung der Rotorwelle, welche durch die hohen Biege- und Torsionsanteile dominiert ist. Eine konstruktive Besonderheit ist, dass die Welle eine zentrale Bohrung als Kabeldurchführung zur Rotornabe und einen großen Flansch zur Aufnahme der Rotorlasten erfordert. Zusammen mit weiteren produktionsbedingten Materialverlusten während des Freiformschmiedens sorgt dies für eine geringe Materialeffizienz bei Massivschmiedewellen. Im Vergleich dazu tritt beim Gießen diese Abwägung von Aufweitung des Innendurchmessers und Materialverlust nicht auf, da Innendurchmesser und Wandstärke über die Gussform nahezu beliebig eingestellt werden können. Dies führt dazu, dass Gusswellen, trotz deutlich schlechteren mechanischen Eigenschaften, mittels einer besseren Materialverteilung höhere Leistungsdichten erreichen und daher heutzutage bevorzugt als Rotorwelle in Windenergieanlagen eingesetzt werden.



Bild 1: Schematischer Ablauf zur iterativen Auslegung von Rotorhohlwellen für Windenergieanlagen aus LHD-Stahl der drei Forschungspartner. oben links: CWD; oben rechts: IBF; unten: IEHK

Da diese Gusswellen häufige aus Asien stammen, ist es von europäischem Interesse eine wirtschaftliche Alternative zu entwickeln. Das abgeschlossene Projekt AVIF A329 hat hierfür erste Vorarbeiten durch eine kombinierte Werkstoff-Prozess-Komponenten-Entwicklung geleistet. Durch die Kombinationen neuer lufthärtender Schmiedestähle [2 – 4] mit fortgeschrittenen Schmiedeprozessen zur Fertigung von Hohlwellen, sowie einer iterativen Optimierung des Rotorlagerungssystems [5] konnte ein Konzept für eine geschmiedete Hohlwelle erarbeitet werden, welches technisch eine höhere Leistungsdichte erreicht und hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei weiterer Optimierung der Randbedingungen mit Gusswellen konkurrieren kann. Das Ineinandergreifen der unterschiedlichen Arbeiten ist in Bild 1 dargestellt.

**LUFTHÄRTENDE DUKTILE SCHMIEDESTÄHLE**

Lufthärtende duktile Schmiedestähle (LHD-Stähle) wurden in den vergangenen 15 Jahren über mehrere IGF-Projekte im Industrieverband Massivumformung zunächst konzipiert und anschließend industrialisiert [2-4]. Aufgrund des Mangengehaltes von ~ 4 Prozent sowie weiterer, Härtebarkeit steigernder Legierungszugaben, zeichnet sich der Werkstoff durch eine verkürzte Prozesskette aus, welche aus einer einfachen Luftabkühlung aus der Schmiedehitze besteht. Trotz der geringen Abkühlraten stellt sich bei den LHD-Stählen aufgrund der hohen Härtebarkeit ein vollständiges martensitisches Gefüge mit entsprechenden Eigenschaften ein. Bislang lag der Entwicklungsfokus auf Ge-

senkschmiedekomponenten (bis zu zirka 300 kg). Da die anvisierten Hohlwellen deutlich größere Abmessungen besitzen, war der Startpunkt der Legierungsoptimierung erneut eine Erhöhung der Härtebarkeit. Zunächst wurden hierfür bisher nicht betrachtete Zugaben von Chrom und Nickel simulativ untersucht und anschließend im Labormaßstab hergestellt. Die chemische Zusammensetzung der hergestellten Legierungen sind in Tabelle 1 abgebildet. Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften konnten insbesondere die Nickellegierungen überzeugen, da diese im Vergleich zu den chromlegierten Varianten deutlich höhere Kerbschlagarbeiten aufwiesen (Tabelle 2).

**HOHLSCHMIEDEPROZESS**

Neben der Berücksichtigung fertigungsbedingter Restriktionen wurde bei der Auslegung des Schmiedeprozesses insbesondere auf die erzielten Wandstärken geachtet, da diese maßgeblich die für den eingesetzten LHD-Stahl erforderliche kritische Abkühlgeschwindigkeit beeinflussen, die wiederum entscheidend für das Erreichen sowohl mechanischer, ökologischer als auch ökonomischer Zielgrößen ist.

Die Analysen der Simulationsergebnisse zeigten, dass sich der überwiegende Anteil des überschüssigen Materials in Bereichen mit großen Durchmessern konzentriert, insbesondere im Flanscbereich (Bild 2a). Zur Verbesserung der Abkühlgeschwindigkeit wie auch Material- und Energieeffizienz wurden daher die axialen Aufmaße im Flanscbereich schrittweise reduziert, wobei minimale Aufmaße von bis zu 50 mm untersucht wurden. Dabei stellte sich jedoch heraus, dass bei Unterschreitung einer kritischen Flanscbreite ein Abknicken des Flansches in Richtung des Manipulators auftritt, was zu einer Unterfüllung der Zielgeometrie führt (Bild 2 b). Ursache hierfür ist ein ausgeprägter axialer Materialfluss, der hohe Querkräfte erzeugt und somit das Abknicken des Flansches begünstigt.

Zur Realisierung weiterer Materialeinsparungen wurde daher eine adaptierte Prozessroute mit einem zusätzlichen Stauch-

	C	Al	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	B
+ Ni	0,14	0,49	0,50	4,01	0,40	0,004	0,003	-	-
++ Ni	0,15	0,50	0,50	3,94	0,68	0,004	0,004	-	-
+ Cr & B	0,16	0,55	0,50	4,05	-	0,002	0,004	1,52	0,0024
repT	0,16	0,50	0,51	4,01	0,67	0,009	0,003	-	-

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzungen der Laborschmelzen +Ni, ++Ni, +Cr & B, sowie des repräsentativen Teilstücks (repT). Alle Angaben in Gew.-%

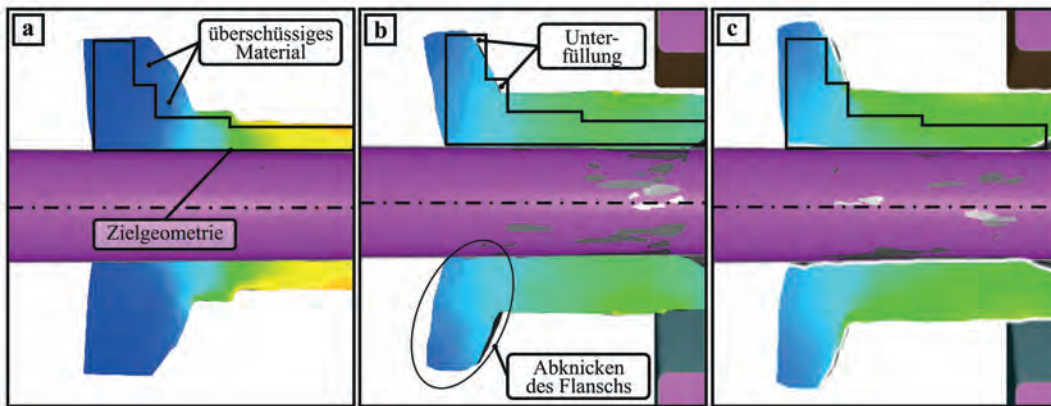


Bild 2: Querschnitt der Hohlwelle nach dem Schmieden des Flanscbereichs: a) ursprüngliche Abmessungen, b) reduzierte Abmessungen, c) angepasste Schmiedestrategie

schritt nach der ersten Schmiedehitze entwickelt. Durch die angepasste Prozessfolge konnte die Schmiedemasse gegenüber der ursprünglichen Auslegung um 17 Prozent reduziert werden. Die resultierende Geometrie weist weiterhin ausreichende Sicherheitsreserven auf und ermöglicht eine sichere Fertigung bei gleichzeitig verbesserter wirtschaftlicher und ökologischer Leistungsfähigkeit (Bild 3 c). Zusätzlich wurde die Einhaltung der kritischen Abkühlgeschwindigkeit mithilfe eines thermisch gekoppelten Simulationsmodells überprüft, wobei realitätsnahe Wärmeübergangskoeffizienten verwendet wurden.

Der thermisch kritischste Punkt mit der geringsten Abkühlgeschwindigkeit befindet sich im Zentrum des Flansches mit größter Wandstärke. Die dort berechnete Abkühlkurve bei bewegter Luft verläuft vollständig vor dem bainitischen Umwandlungsbereich in einem ZTU-Diagramm aus Vorarbeiten, sodass eine vollständige martensitische Umwandlung erreicht werden kann. Da dieser Punkt den ungünstigsten Fall darstellt, ist von ausreichenden Abkühlgeschwindigkeiten in der gesamten Hohlwelle auszugehen. Entsprechend können die lokalen Umformbedingungen sowie die Temperaturführung für die Auslegung des repräsentativen Teilstücks verwendet werden.

**OPTIMIERUNG DER WELLENGEOMETRIE**

Im Projekt wurde das Rotorlagerungssystem (RLS) der Schwachwindanlage maxcap141 (141 m Rotordurchmesser, 2,3 MW Nennleistung) als Demonstrator für eine Hohlschmiedewelle aus LHD-Stahl untersucht. Ausgangspunkt war die Parametrisierung der bereits bestehenden Gusswelle, aus der iterativ eine schmiedegerechte Hohlschmiedewelle abgeleitet wurde. Dabei wurden in enger Abstimmung mit dem IBF und dem

	R <sub>p0,2</sub> (MPa)	R <sub>m</sub> (MPa)	A (%)	KBV (J)	KBV -20°C (J)	Härte (HRC)
+Ni	869	1204	14,3	65	25	-
++Ni	902	1295	12,2	82	47	-
+Cr & B	915	1372	11,5	33	23	-
repT (kritisch)	737	1217	5,4	27	-	41
repT (unkritisch)	795	1257	5,89	23	-	41

projektbegleitenden Ausschuss fertigungstypische Aufmaße angesetzt, insbesondere für den axial schwer kontrollierbaren Materialfluss beim Schmieden.

Auf Basis der Schmiedeparametrisierung und abgeschätzter LHD-Werkstoffkennwerte erfolgte eine Vorauslegung diverser RLS für unterschiedlichen Windenergieanlagen zwischen 1 und 4 MW. Die Ergebnisse zeigen, dass hohlgeschmiedete LHD-Stähle aufgrund der deutlich höheren Festigkeiten höhere Leistungsdichten als Gusseisen ermöglichen. Hingegen begrenzt bei Massivschmiedewellen der fertigungstechnisch realisierbare, kleinere Innendurchmesser die Leistungsdichte, sodass ihre höhere Festigkeit nicht ausgeschöpft werden kann.

Im Anschluss wurden für den maxcap141 Triebstrang zwei RLS-Varianten mit Guss- und LHD-Stahl-Hohlschmiedewellen unter identischen Randbedingungen vorausgelegt und hinsichtlich Leistungsdichte, Herstellungskosten und Herstellungsemissionen (GWP) verglichen. Aufgrund der höheren Festigkeit und besseren Materialverteilung ist die Hohlschmiedewelle mit 10,2 Tonnen etwa 37 Prozent leichter als die Gusswelle mit 16,2 Tonnen. Mit nahezu identischen Lagerlösungen ergibt sich eine Massenersparnis fürs RLS von 16,5 Prozent [5]. Unter Einbeziehung eines generischen Hauptlagerkatalogs konnte die Masse der Hohlschmiedewelle um weitere 1,3 Tonnen reduziert werden. Dies entspricht einer RLS-Massenreduktion von 1,5 Tonnen, da Kataloglager die möglichen Lagersitzdurchmesser beschränken.

Trotz geringerer Bauteilmasse ist der Materialbedarf der LHD-Hohlschmiedewelle aufgrund hoher Schmiedeaufschläge (50 bis 150 mm) mit 26,5 Tonnen höher als bei der Gusswelle (21,4 Tonnen).

Im Vergleich zu Gusswellen sorgen die aktuellen Schmiedeaufmaße dafür, das LHD-Hohlschmiedewellen als WEA-Rotorwelle nicht wirtschaftlich konkurrenzfähig sind. Gegenüber Vergütungsstählen bietet der LHD-Stahl jedoch Kostenvorteile, da

Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften der Laborschmelzen +Ni, ++Ni, +Cr & B, sowie des repräsentativen Teilstücks (repT) im kritischen und unkritischen Bereich (vergleiche Bild 4) entativen Teilstück (repT)

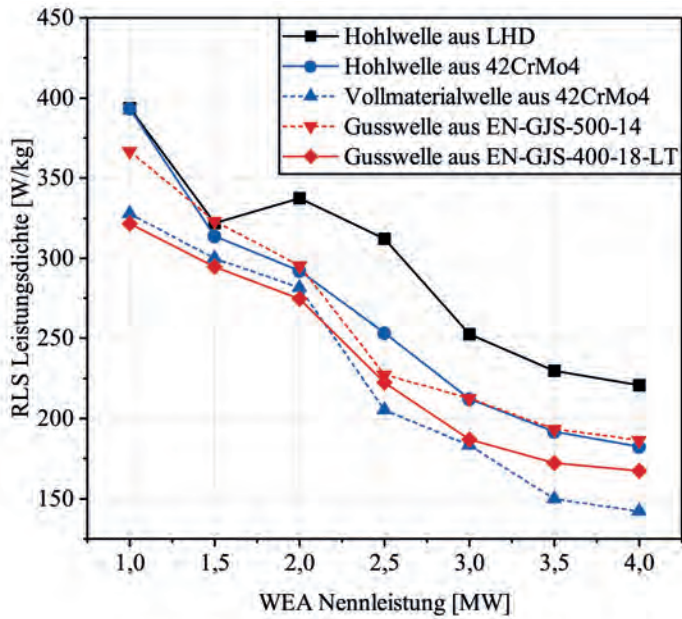


Bild 3: Leistungsdichte vorausgelegter Rotorlagerungssysteme (RLS) über die Windenergieanlagen (WEA) Nennleistung für unterschiedliche Werkstoffe und Fertigungsverfahren [6]

der energieintensive Vergütungsschritt entfällt. Zudem weisen der LHD-Stahl und die Auslegung noch ungenutzte Festigkeitspotenziale auf, da diese Stahlklasse eine höhere Dauerfestigkeit als andere Vergütungsstähle aufweist, was in der aktuellen Auslegungsmethode nicht berücksichtigt wird. Ebenso beachtet die Auslegung derzeit gleichbleibende Werkstoffeigenschaften über den Querschnitt, die nur über die Wandstärke abnehmen. Eine Auslegung der Welle mit lokalen Werkstoffeigenschaften würde hier weiteres Leichtbaupotenzial ermöglichen [7]. Zusätzliche Potenziale zur weiteren Kostensenkung, etwa durch Serienfertigung oder reduzierte Aufschläge, wurden im Rahmen der Untersuchung nicht berücksichtigt.

Die Herstellungsemissionen der LHD-Hohlschmiedewelle betragen etwa 20,7 t CO<sub>2</sub>-Äq. und liegen damit auf einem ähnlichen Niveau wie bei der Gusswelle (20,2 t CO<sub>2</sub>-Äq.). LHD-Hohlschmieden ist somit ökologisch konkurrenzfähig. Weitere Emissionsreduktionen sind durch geringere Schmiedemassen zu erwarten. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass LHD-Hohlschmiedewellen ökologisches Potenzial besitzen, ihre Wirtschaftlichkeit jedoch stark von fertigungstechnischen Optimierungen und zukünftigen CO<sub>2</sub>-Kosten abhängt.

**REPRÄSENTATIVES TEILSTÜCK**

Basierend auf den Ergebnissen der unterschiedlichen Optimierungsprozesse wurde ein repräsentatives Teilstück (repT) am IBF geschmiedet, um den Schmiedeprozess und die Tempera-



turführung an kritischen Bereichen der Rotorhohlwelle nachzustellen. Als Rohblock hat die Saarschmiede GmbH Freiformschmiede hierfür einen 420-kg-Block zur Verfügung gestellt. Der Schmiedeprozess konnte trotz der hohen Legierungszugaben an Mangan erfolgreich durchgeführt werden. Im Anschluss erfolgte eine Beprobung zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften. Die chemische Zusammensetzung des Blocks sowie die ermittelten mechanischen Eigenschaften (für die unterschiedlichen Bereiche) sind in Tabelle 1 sowie in Tabelle 2 zusammengefasst. Wie in Bild 4 ersichtlich, wurden in dem repräsentativen Teilstück zwei Teilbereiche mit unterschiedlichen Umform- und Temperaturhistorien eingebracht: Der dicke „kritische“ Teilbereich unterlag dabei Umformbedingungen vergleichbar zum kritischen Flanschbereich und der dünnere „unkritische“ Teilbereich vergleichbar zum Kupplungsbereich der Rotorhohlwelle.

An den Härtewerten, welche über den gesamten Querschnitt verteilt aufgenommen wurden, ist zu erkennen, dass die Härte über den gesamten Querschnitt homogen ist und somit eine Durchhärtung an Luft stattgefunden hat (Bild 5). Bei genauerer Betrachtung der Mikrostruktur des repräsentativen Teilstücks fällt jedoch auf, dass das Härtungsgefüge primär eine bainitische Struktur aufweist, welche sich sowohl im kritischen als auch im unkritischen Bereich bildet. Die höhere Streckgrenze und Zugfestigkeit an der unkritischen Stelle korreliert gut mit der tendenziell feineren und homogeneren Mikrostruktur.

Bild 4: Kritischer und unkritischer Bereich im geschmiedeten repräsentativen Teilstück (repT)

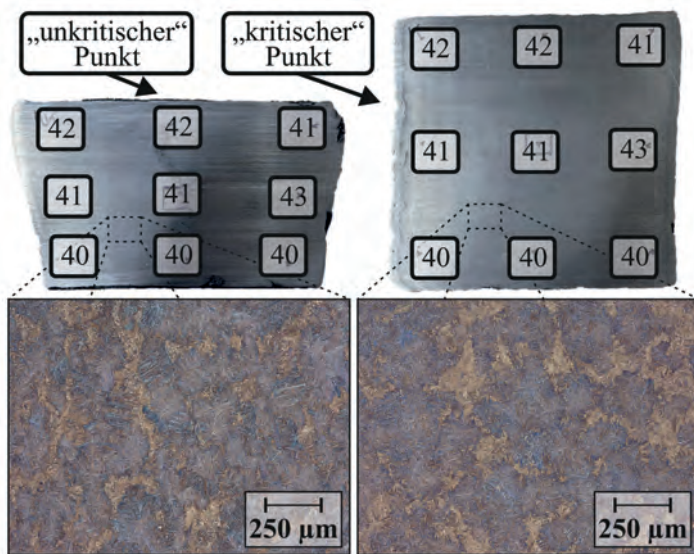


Bild 5: Vergleich der Härte (in HRC) sowie der Mikrostruktur an unterschiedlichen Stellen im Repräsentativen Teilstück, Bilder: Autoren

Die höhere Kerbschlagarbeit an der kritischen Stelle trotz geringerer Festigkeit lässt sich durch die gröbere Mikrostruktur und aus lokalen Gradienten in den mechanischen Eigenschaften erklären, welche durch die Koexistenz der bainitischen und martensitischen Phasenbereiche verursacht werden (Bild 5). Hieraus leiten sich insbesondere für das Legierungssystem, als auch die Temperaturführung während des Schmiedens weitere Optimierungspotenziale ab. Beispielhaft ist insbesondere eine zusätzliche Legierung mit Bor zu nennen, da dies einerseits bereits in der Vergangenheit die Härtebarkeit des Legierungssystems positiv beeinflussen konnte und andererseits eine vergleichsweise günstige sowie klimafreundliche Legierungszugabe ist.

### ZUSAMMENFASSUNG

Im AVIF-Projekt A329 HoRo-LHD konnte erfolgreich nachgewiesen werden, dass hohlgeschmiedete Wellen aus LHD-Stahl prozesstechnisch möglich sind. Aufgrund ihrer deutlich besseren mechanischen Eigenschaften können Hohl schmiedewellen eine Alternative zu gegossenen Wellen sein, insofern die wirtschaftlichen Randbedingungen über eine Reduktion der Hohl schmiedeaufmaße sowie Realisierung ungenutzter Festigkeitspotenziale verbessert werden. Des Weiteren stellen LHD-

Hohlwellen aufgrund der reduzierten Wärmebehandlung eine nachhaltigere Lösung gegenüber Hohlwellen aus klassischen Vergütungsstählen dar. Durch die integrative Auslegung eines repräsentativen Teilstücks konnten zudem weitere Optimierungspotenziale aufgezeigt werden. Insbesondere die Härtebarkeit sowie die Temperaturführung während des Schmiedens bieten hier Optionen, um in zukünftigen Projekten die Eigenschaften weiter zu verbessern.



[1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Joint Off-shore Wind Investment Pact for the North Seas, North Sea Summit 2026, Hamburg

[2] Stieben, A.; Bleck, W.; Schönborn S.: Lufthärtender duktiler Stahl mit mittlerem Mangengehalt für die Massivumformung. *massivUMFORMUNG*, 9 2016, S.50 – 55

[3] Gramlich, A.; Schönborn, S.; Schmiedl, T.; Baumgartner, J.; Krupp, U.: Lufthärtende duktile Schmiedestähle für zyklische Beanspruchung. *massivUMFORMUNG* 5 (2021) 2, S. 64 – 69

[4] Gramlich, A.: Lufthärtende duktile Schmiedestähle – Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emission und des Erdgasverbrauchs durch neue Stahlwerkstoffe. *massivUMFORMUNG* 7 (2023) 2, S.64 – 69

[5] Hollas, C.; Jacobs, G.; Züch, V.; Röder, J.; Gouverneur, M.; Reinish, R.; Bailly, D.; Gramlich, A.: Hollow-forged AHD steel rotor shafts for wind turbines – a case study on power density, costs and GWP. *Wind Energy Science*, 11 (2026) 1, p. 89 – 102, DOI: 10.5194/wes-11-89-2026

[6] Hollas, C.; Jacobs, G.; Züch, V.; Röder, J.; Gouverneur, M.; Reinish, R.; Bailly, D.; Babashahi, M.; Gramlich, A.: Power Density Analysis of Wind Turbine Main Bearing Units by Holistic Optimization of Material, Manufacturing and Design of the Main Shaft. *Journal of Physics: Conference Series*, (2024), DOI: 10.1088/1742-6596/2767/8/082003

[7] Weber, F.; Broeckmann, C.; Züch, V.; Jacobs, G.; Zimmermann, J.; Schröder, K. U.; Bami, Y.; Jakumeit, J.; Bodenbug, M.; Weiß, R.: *Forsch Ingenieurwesen* 87 (2023), DOI: 10.1007/s10010-023-00616-3



Dieses Forschungsprojekt AVIF A 329 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: „Patengruppe HoRo-LHD im Industrieverband Massivumformung e.V.“ Die Langfassung des Abschlussberichts kann über die Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V. beim WSM Wirtschaftsverband Stahl und Metallverarbeitung, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.