

Stofflicher Leichtbau für den Kfz-Antriebsstrang durch optimierte Werkstoff-Prozess-Kombination

Die steigenden Anforderungen an Sicherheit, Komfort und Fahrleistung von Pkw haben in den vergangenen Jahren zu einer kontinuierlichen Zunahme des Fahrzeuggewichts geführt. Um eine weitere Entwicklung im Bereich der Fahrdynamik bei gleichzeitiger Reduzierung von Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen zu erzielen, wird diesem Trend durch neue Leichtbauideen begegnet, für den Karosserieleichtbau wurde bisher eine Vielzahl von Werkstoffen entwickelt und erfolgreich eingesetzt. Im Antriebsstrang ist es hingegen zu keiner vergleichbaren Gewichtsersparnis gekommen.

AUTOREN

**Clemens Neipp, M.Sc.**

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

**Dr.-Ing. Holger Surm**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien IWT in Bremen

**Christian Weber, M.Sc.**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau (FZG) der TU München

Beim Antriebsstrang setzt nun das Projekt „Leichtbaustähle höherer Beanspruchbarkeit“ des Forschungsverbunds massiver Leichtbau an. Ziel des Projekts war es, Leichtbau von massivumgeformten Bauteilen im Antriebsstrang durch neu entwickelte und optimierte Werkstoffe sowie durch zielgerichtet darauf angepasste Wärmebehandlung zu ermöglichen. Als wesentlicher Gewichtstreiber im Antriebsstrang gilt das Getriebe, dessen Zahnräder wegen der hohen Belastung in der Regel einsatzgehärtet werden. Die Eigenschaftsprofile randschichtgehärteter Bauteile, die durch solche thermochemischen Wärmebehandlungen zu erzielen sind, lassen sich in einem breiten Rahmen an die betriebsspezifischen Anforderungen anpassen. Sie bieten sich daher an, durch eine Abstimmung von Werkstoffauswahl, Verfahrensvariante und Prozessparametern die Leistungsdichte noch weiter zu steigern. Damit finden sich die Inhalte des Projekts in der Schnittmenge von Werkstoffdesign und Prozessdesign.

Das hier genutzte Wärmebehandlungsverfahren *Carbonitrieren* stellt eine Verfahrensvariante des *Einsatzhärtens* dar, bei der zusätzlich zu Kohlenstoff noch Stickstoff in die Randschicht eingebracht wird. Es wurde in der jüngeren Vergangenheit in der Regel auf klassische Einsatzstähle angewendet [1]. Dabei konnte bei den so behandelten Zahnrädern eine signifikante Steigerung der Zahnflanken- und Zahnfußtragfähigkeit (σ_{Hlim} und σ_{Flim}) erzielt werden [2]. Weiteres Potenzial zur Eigenschaftsverbesserung wird in der Entwicklung von neuen Legierungskonzepten gesehen, die speziell auf ein optimiertes Ausscheidungsverhalten von Carbonitriden bei dieser Wärmebehandlung abgestimmt sind. In erster Linie kommen hier die Elemente Aluminium, Niob, Vanadium und Bor in Betracht, die

die Kinetik der Ausscheidungsbildung von Carbonitrierstählen sowie die resultierende Mikrostruktur und die mechanischen Eigenschaften positiv beeinflussen sollen.

VORGEHEN

Am Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK) wurden mehrere auf die Wärmebehandlung angepasste Werkstoffkonzepte entwickelt, von denen zwei für die weiteren Untersuchungen abgegossen und umgeformt wurden. Die chemische Zusammensetzung der beiden Legierungen orientiert sich am großtechnisch etablierten Einsatzstahl 18CrNiMo7-6, der an die Wärmebehandlung Carbonitrieren angepasst wurde durch Zugabe von 0,1 Gew.-% Vanadium und 0,03 Gew.-% Niob; bei der anderen Variante wurden zusätzlich 30 ppm Bor legiert. Das Augenmerk lag dabei auf der Kontrolle des Austenitkornwachstums während des Carbonitrierens, der anschließenden Direkthärtung und damit der resultierenden Martensitstrukturen und auf der Bildung von festigkeitssteigernden Nitriden in der Randschicht.

Das Material wurde anschließend dem gesamten Forschungsverbund für die weiteren Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Für die eigenen Untersuchungen wurden an der Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau (FZG) Pulsatorräder für die Zahnfußprüfung und Laufprüfräder und -ritzel für die Zahnflankenprüfung gefertigt. Die Zahnräder wurden am Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien (IWT) carbonitriert. Hierbei wurden die Parameter C- und N-Gehalt in der Randschicht, Direkthärte- und Anlasstemperatur variiert, um unterschiedliche Gefüge- und Ausscheidungszustände zu erzeugen. Der schematische Verlauf der Wärmebehandlung ist in Bild 1 dargestellt.

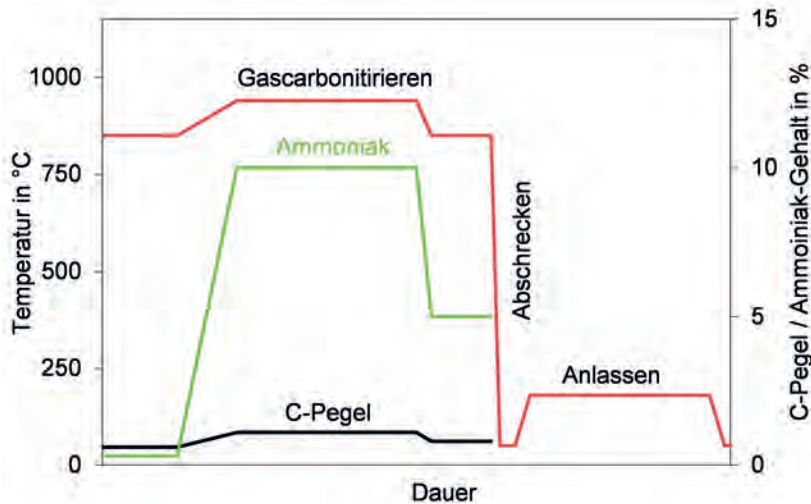


Bild 1: Schematischer Prozessverlauf des durchgeführten Carbonitrierens: Temperaturverlauf, Kohlenstoffpegel und Ammoniakzugabe in Abhängigkeit von der Prozessdauer

Die anschließenden Untersuchungen der thermochemisch behandelten Randschicht konzentrierten sich auf die chemische Zusammensetzung und die Mikrostruktur, bestehend aus Matrix und Ausscheidungen, sowie auf die Tragfähigkeitsprüfungen der Zahnflanke und des Zahnfußes, aus denen sich die Dauerfestigkeitswerte σ_{Hlim} und σ_{Flim} berechnen lassen [3], [4]. Mithilfe dieser beiden Werte lassen sich die Werkstoff-Prozess-Kombinationen mit den industriellen Standards vergleichen und das Leichtbaupotenzial im Vergleich zu einer Referenz berechnen.

Neben den oben beschriebenen neu entwickelten Einsatzstählen wurden weitere Werkstoff-Prozess-Kombinationen geprüft, um als Vergleichswerte zu dienen. Als Referenz wird der bisher verbaute Werkstoff 16MnCr5 im einsatzgehärteten Zustand herangezogen, ein C56E2 boriiert und induktionsgehärtet, sowie ein M50NiL duplexgehärtet und plasmanitriert. Weitere Literaturwerte zu einsatzgehärteten und carbonitrierten Einsatzstählen wurden aus dem Forschungsprojekt FVA 513 I „Carbozahn“ übernommen.

Die gezielte Abstimmung zwischen der Legierung der neu entwickelten Einsatzstähle 18CrNiMoVnB7-6 sowie 18CrNiMoVnBB7-6 und der Wärmebehandlung aus Carbonitrieren mit Direkt härten ermöglichte es, in den Randschichten der Zahnräder ein Gefüge aus angelassenem Martensit, Restaustenit und Nitridausscheidungen zu erzeugen. Durch den hohen Anteil an Ausscheidungen konnte der festigkeitssenkende Effekt des Restaustenits auf die Oberflächenhärten der Zahnflanke und des Zahnfußes – generell als Qualitätsmangel bewertet – ausgeglichen werden. Der Wert liegt nun über dem Niveau eines einsatzgehärteten 18CrNiMo7-6. Gleiches gilt für den Einfluss des Carbonitrierens auf den Dauerfestigkeitswert für die Zahnfuß-Biegeennspannung σ_{Flim} , der durch die Mikrolegierung und Ausscheidungsbildung umgekehrt werden konnte, während der Dauerfestigkeitswert für die Flankenpressung σ_{Hlim} noch einmal weiter gesteigert wurde. Die Ergebnisse der mechanischen Prüfung sind in Bild 2 in die Vergleichsfelder der DIN-Normenreihe 3990 eingetragen, um sie mit Literaturwerten und Industriestandards vergleichen zu können.

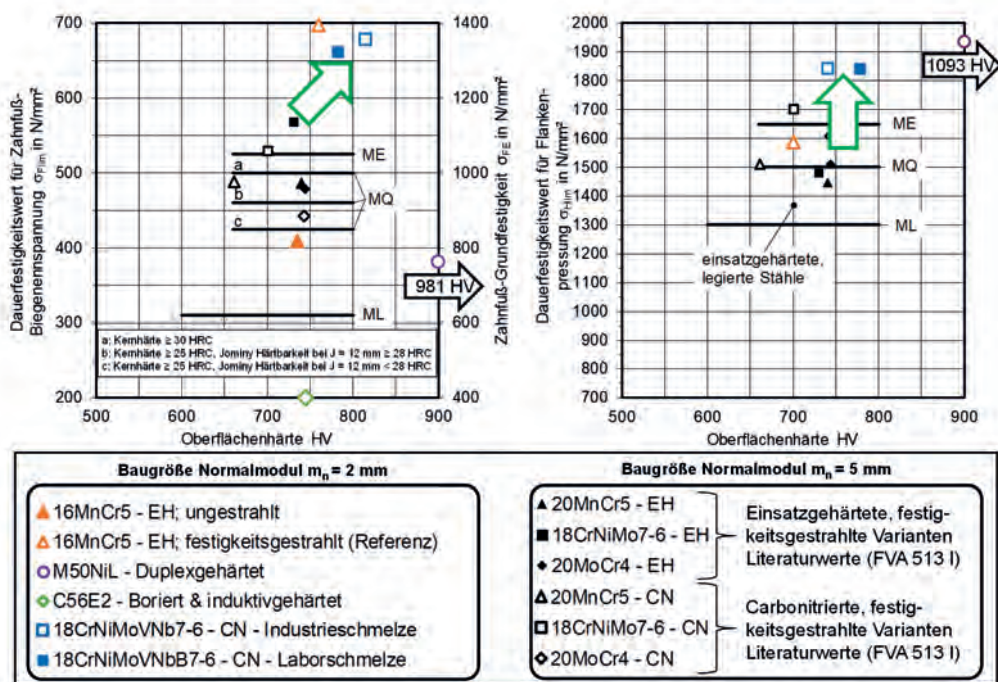


Bild 2: Ergebnisse der Tragfähigkeitsuntersuchungen der neu entwickelten Einsatzstähle 18CrNiMoVnB7-6 und 18CrNiMoVnBB7-6 und der Referenzen, sowie Vergleichswerte aus der Literatur [2]

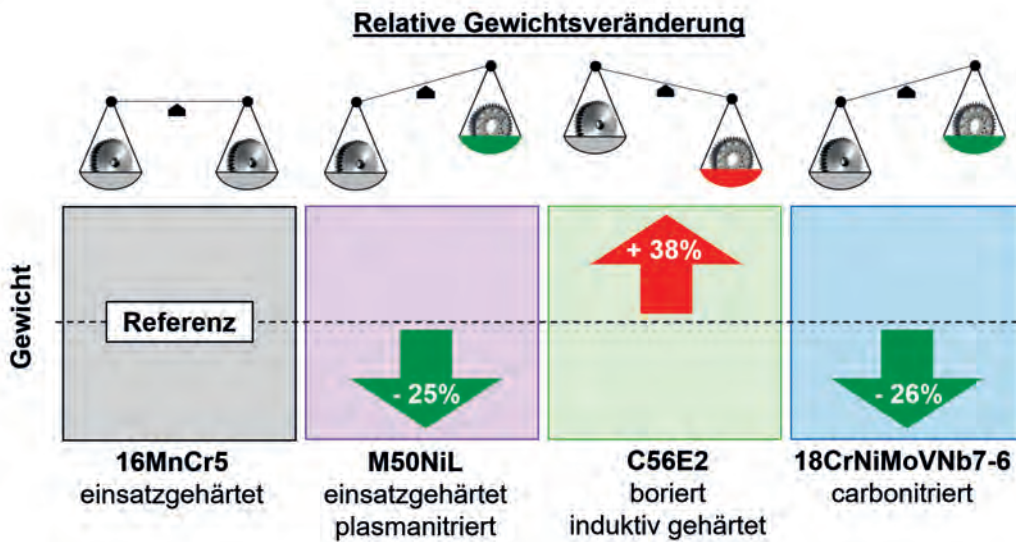


Bild 3: Relatives Leichtbaupotenzial in Bezug auf die realisierbare Verzahnungsbreite b unter Einhaltung einer Mindest-Grübchensicherheit $S_{Hmin} = 1,2$ und einer Mindest-Zahnfußsicherheit $S_{Fmin} = 1,4$
Bilder: Autoren

Für die Abschätzung des Leichtbaupotenzials ist vor allem der Dauerfestigkeitswert der Flankenpressung σ_{Hlim} von Relevanz. Durch den Vergleich der verschiedenen Varianten mit der Referenz wird der relative Breitenfaktor b_{rel} berechnet, mit dem eine Gewichtseinsparung abgeschätzt werden kann.

FAZIT UND AUSBLICK

Mit Hilfe der berechneten Dauerfestigkeitswerte der Flankenpressung σ_{Hlim} lassen sich die relativen Breitenfaktoren b_{rel} und damit die Leichtbaupotenziale im Vergleich zur Referenz 16MnCr5 einsatzgehärtet abschätzen – unter Berücksichtigung der Sicherheitsbeiwerte und der konstruktiven Vorgaben. So ergibt sich für die neuen Einsatzstähle eine Gewichtseinsparung von bis zu 26 Prozent, für den hochlegierten und aufwendig wärmebehandelten M50NiL bis zu 25 Prozent, und bei Nutzung des C56E2 müssten die Zahnräder bei gleicher Belastung circa 38,5 Prozent schwerer ausgelegt werden. Bild 3 fasst die Ergebnisse grafisch zusammen.

Diese Ergebnisse zeigen, dass bereits etablierte Werkstoffe durch geringfügige Anpassungen hinsichtlich Legierung und Wärmebehandlung noch signifikante Leichtbaupotenziale besitzen. Vor allem für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) ist dies interessant, da die Fertigungsprozesse nur geringfügig angepasst werden müssen und die Anlageninvestitionen niedrig gehalten werden. Für den Kfz- und Maschinenbau ergibt sich die Möglichkeit, Bauteile in Antriebssträngen leichter auszulegen und dadurch ein sekundäres Leichtbaupotenzial zu realisieren, was den Einsatz der neuen Werkstoff-Prozess-Kombination noch attraktiver macht.



Das IGF-Vorhaben „Entwicklung von höchstfesten Stählen für alternative Wärmebehandlungen und für die Kaltmasivumformung von Bauteilen im Kfz-Antriebsstrang“, IGF-Projekt 24 LN, der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (FOSTA) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) und Leitinitiative des Forschungsverbunds „Massiver Leichtbau“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages gefördert. Die Langfassung des Abschlussberichts kann bei der FOSTA, Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf angefordert werden.

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie**



IGF
Industrielle
Gemeinschaftsforschung

aufgrund eines Beschlusses
des deutschen Bundestages



[1] Spur, G.; Zoch, H.-W. (Hg.): Handbuch Wärmebehandeln und Beschichten, München, Carl Hanser Fachbuchverlag, 2015, ISBN 978-3446427792

[2] Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.: Carbozahn – Carbonitrieren von verzahnten Getriebebauteilen, Forschungsvorhaben Nr. 513 I, Frankfurt/M., 18. März 2011, FVA-Heft

[3] Deutsches Institut für Normung e.V. 3990-2: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern – Berechnung der Grübchentragfähigkeit, Berlin, Beuth Verlag GmbH

[4] Deutsches Institut für Normung e.V. 3990-3: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern – Berechnung der Zahnfußtragfähigkeit, Berlin, Beuth Verlag GmbH