



Arbeitsgemeinschaft

Wärmebehandlung + Werkstofftechnik e.V.

## Arbeitsblatt

## Steigerung der Dauerfestigkeit von Einsatzstählen durch Carbonitrieren

AiF-Nr.:  
16176 N

Obmann:  
Hubert Bomas

beteiligte Unternehmen  
Aichelin, ECOROLL AG, Hanomag Härtecenter,  
Air Liquide Deutschland GmbH, Schwäbische  
Härtetechnik Ulm, KERN-LIEBERS

Laufzeit:  
01.08.2009 - 30.11.2012

Erstelldatum:  
17.07.2013

Forschungsstelle:  
Stiftung Institut für Werkstofftechnik Bremen

Projektleiter:  
Prof. Dr.-Ing. habil. Franz Hoffmann

Dr. rer. nat. Hubert Bomas

Sachbearbeiter:  
Dipl.-Ing. Christoph Stöberl

Forschungsvereinigung:  
Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und  
Werkstofftechnik e. V. (AWT)

Projektbegleitender Fachausschuss  
FA 21 Gefüge und Eigenschaften

### Zielsetzung und Lösungsweg

Um die Schwingfestigkeit und Verschleißbeständigkeit zu verbessern, werden viele Bauteile Behandlungen unterworfen, welche die Härte der Randschicht steigern und gleichzeitig Druckeigenstress erzeugen. Das Einsatzhärten ist ein solches Verfahren und wird deshalb mit Erfolg in Bereichen eingesetzt, in denen hohe Schwingfestigkeit und Verschleißbeständigkeit gefordert werden. Eine Variante des Einsatzhärtens ist das Carbonitrieren, bei dem gleichzeitig Kohlenstoff und Stickstoff in die Bauteilrandschicht diffundieren. Hinweise aus der Literatur deuten darauf hin, dass das Wärmebehandlungsverfahren Carbonitrieren das Potenzial bietet, eine Steigerung der Dauerfestigkeit durch eine Optimierung der Prozessführung zu erzielen [1,2,3]. Die Auswirkung des Carbonitrierens auf die Dauerfestigkeit wurde am Beispiel carbonitrierter Biegeproben aus den Stählen 18CrNiMo7-6 und 20MnCr5 untersucht. Die Ausgangswerkstoffe lagen als geschmiedetes Rundmaterial mit einem Durchmesser von 220 mm und mit einem ferritisch-perlitischen Grundgefüge vor. Bild 1 zeigt die Geometrie der in Längsrichtung zum Halbzeug und in jeweils 6 Lagen aus dem Randbereich entnommen Proben.

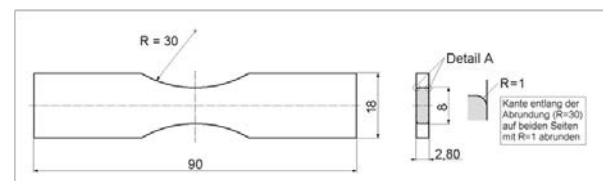


Bild 1: Geometrie der Biegeproben

Aus den Rohlingen wurden je Werkstoff 4 Varianten hergestellt, die sich in der Wärme- und der Oberflächenbehandlung unterscheiden. Neben der konventionellen Gasaufkohlung wurden carbonitrierte Proben mit einem niedrigen Randstickstoffgehalt von 0,2 % und mit einem erhöhten Randstickstoffgehalt von 0,45 % sowie eine nach dem Carbonitrieren geschliffene Variante hergestellt, deren Dauerfestigkeiten ermittelt und deren Oberflächen- und Randzustände unter den Gesichtspunkten Rauheit, Gefüge und Eigenspannungen charakterisiert wurden.

### Ergebnisse

#### Wärmebehandlung

Für die Wärmebehandlung der Proben wurde ein Verfahren angewendet, welches bereits von Bischoff et al. zur Erzeugung reproduzierbarer Kohlenstoff- und Stickstoffverläufe durch Regelung

des Ammoniakgehalts im Abgas erfolgreich eingesetzt wurde [4]. Die Behandlung der Proben erfolgte in einem Glockenofen der Bauart SOLO in der Größe 300 x 300 x 300 mm<sup>3</sup>. Je Charge wurden 90 Proben, die hängend in 2 Lagen chargiert wurden, behandelt. Das Gasaufkohlen erfolgte mit Hilfe der gasförmigen Medien Stickstoff, Methanol und Propan. Für das Carbonitrieren wurde Ammoniak zugesetzt. Die vier Varianten je Werkstoff sind nachfolgend mit den Bezeichnungen Gasaufkohlen, Carbonitrieren 1, Carbonitrieren 2 und Carbonitrieren 3 versehen. Dabei stehen die Bezeichnung Gasaufkohlen für die Varianten ohne Stickstoffzugabe, die Bezeichnung Carbonitrieren 1 für die Varianten mit einem niedrigen Randstickstoffgehalt von 0,2 %, die Bezeichnung Carbonitrieren 2 für die Varianten mit erhöhtem Randstickstoffgehalt von 0,45 % und die Bezeichnung Carbonitrieren 3 für die Varianten mit einer Schleifbearbeitung nach der Wärmebehandlung. Um unterschiedliche Randstickstoffgehalte zu erzielen, wurden sowohl der Ammoniakgehalt als auch die Austenitisierungstemperatur variiert: Letztere betrug bei den Varianten Gasaufkohlen und Carbonitrieren 1 930°C, bei den Varianten Carbonitrieren 2 und Carbonitrieren 3 840 °C. Der Sollwert des Ammoniakgehalts, der im Abgasstrom gemessen und geregelt wurde, betrug bei Variante Carbonitrieren 1 700 ppm, bei den Varianten Carbonitrieren 2 und Carbonitrieren 3 1.000 ppm. Alle Proben wurden in 60°C warmem Öl abgeschreckt, auf Raumtemperatur abgekühlt und anschließend für 2 h bei 180°C angelassen. Bild 2 zeigt die Kohlenstoff- und Stickstoffprofile der Proben, welche mit Hilfe der Optischen Emissionsspektroskopie mit Funkenanregung (SOES) ermittelt wurden. Es ist zu erkennen, dass sich die Varianten deutlich im Randstickstoffgehalt unterscheiden. Bei Variante Carbonitrieren 3 wird durch den nachgelagerten Schleifprozess die stickstoffreiche Randschicht teilweise entfernt, so dass die Varianten Carbonitrieren 1 und Carbonitrieren 3 sehr ähnliche Gehalte aufweisen.

**Schwingversuche**

Die Bestimmung der Dauerfestigkeiten erfolgte durch einstufige Wöhlerversuche mit wegeregelter Wechselbiegemaschinen. Die Grenzschnitzspielzahl wurde auf 10<sup>7</sup> Schwingspiele festgelegt, die Belastungsfrequenz betrug 23 Hz. Die Biegeproben wurden einer wechselnden und einer schwellenden Belastung unterzogen. Bei der wechselnden Belastung mit R = -1 werden beide Probenseiten abwechselnd mit einer betragsmäßig gleichgroßen Zug- und Druckspannung belastet. Bei der Belastung mit R = 0 wird eine Probenseite schwellend auf Zug die andere schwellend auf Druck belastet. Je Variante wurden 3 bis 4 Belastungshorizonte untersucht und zugehörige

Bruchwahrscheinlichkeiten der Proben bestimmt. Anschließend wurde auf der Grundlage der ermittelten Bruchwahrscheinlichkeiten und mit Hilfe der Weibull-Verteilung die Dauerfestigkeit der jeweiligen Variante für eine Bruchwahrscheinlichkeit von 50 % ermittelt.

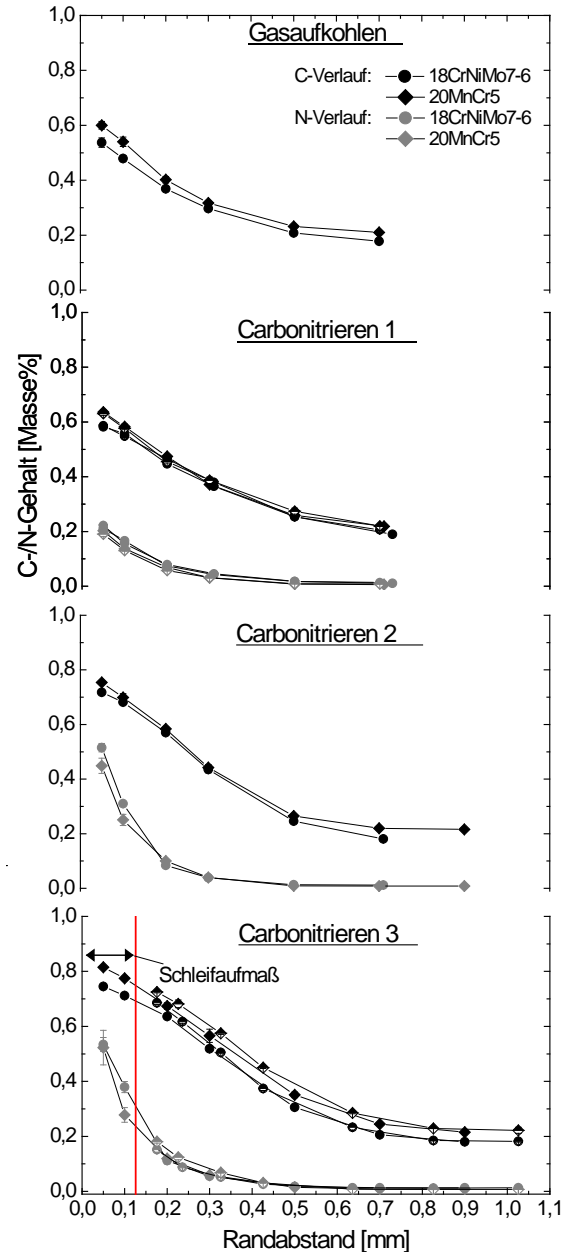


Bild 2: Kohlenstoff- und Stickstoffprofile der untersuchten Randschichten

Bild 3 zeigt die ermittelten Dauerfestigkeiten S<sub>D</sub>, aufgetragen über den zugehörigen Mittelspannung S<sub>m</sub>. Für den Belastungsfall R = -1 ist die Mittelspannung gleich Null, für R = 0 gilt S<sub>D</sub> = S<sub>m</sub>. Aus Bild 3 geht hervor, dass für die Varianten Gasaufkohlen, Carbonitrieren 1 und Carbonitrieren 2 die Dauerfestigkeit mit steigendem Randstickstoffgehalt tendenziell zunimmt. Ein deutlicher Anstieg der Dauerfestigkeit wird bei den geschliffenen Varianten beobachtet. Hier ist jedoch

anzumerken, dass bei den hohen Beanspruchungen an der Probenoberfläche mit einem plastisches Fließen des Werkstoffs zu rechnen ist, so dass von einem Unterschied zwischen der dargestellten Nenndauerfestigkeit  $S_D$  und der örtlichen Dauerfestigkeit auszugehen ist.

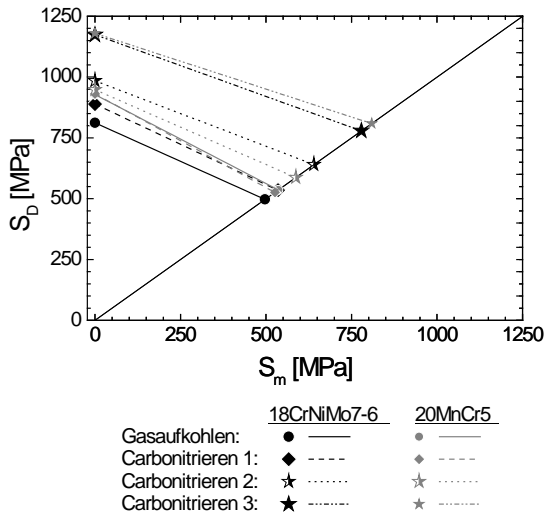


Bild 3: : Haigh-Diagramm der untersuchten Varianten

Die Bruchflächen der Ermüdungsproben wurden mit einer Stereolupe und in Einzelfällen mit dem Rasterelektronenmikroskop untersucht. Die chemische Zusammensetzung der nichtmetallischen Einschlüsse, die für die Rissbildung und das Probenversagen verantwortlich waren, wurde mit Hilfe von EDX-Analysen ermittelt. Bei den Varianten Gasaufkohlen, Carbonitrieren 1 und Carbonitrieren 2 entstehen die Ermüdungsrisse für beide Belastungsarten überwiegend an der Probenoberfläche. Vereinzelt begünstigten aluminiumhaltige oxidische Einschlüsse an der Probenoberfläche die Rissbildung. Eine Rissbildung an Einschlüssen im Probenvolumen kann bei diesen Varianten nicht beobachtet werden. Bei der geschliffenen Variante Carbonitrieren 3 unter der Beanspruchungsart  $R = -1$  tritt die Rissbildung häufig an oxidischen Einschlüssen im Probenvolumen auf. Bei der Schwellbelastung dieser Variante ist zu beobachten, dass die Rissbildung häufig an der Fase der Probe erfolgt (Bild 1). Diese Versagensart wurde bei der Bestimmung der Dauerfestigkeiten nicht berücksichtigt.

### Charakterisierung der Randschichtzustände

In der metallografischen Untersuchung zeigen alle Varianten ein martensitisches Gefüge mit Restaustenit. In der Reihung Gasaufkohlen, Carbonitrieren 1, Carbonitrieren 2 und Carbonitrieren 3 sind im Schlibbild zunehmende Restaustenitgehalte zu erkennen, wobei für beide Werkstoffe bei den Varianten Gasaufkohlen und Carbonitrieren 1 der Unterschied im Restaustenitgehalt sehr gering erscheint. Die Varianten Gasaufkoh-

len, Carbonitrieren 1 und Carbonitrieren 2 besitzen eine Randoxidationszone, welche mit maximal  $10 \mu\text{m}$  jedoch sehr gering ist. Bei der Variante Carbonitrieren 3 tritt eine geringfügige Neuhärtungszone, hervorgerufen durch den Schleifprozess, auf. Ein negativer Einfluss der Neuhärtungszone auf die zyklischen Eigenschaften konnte jedoch nicht festgestellt werden.

An den Schliften wurden Härteprofile sowohl an unbelasteten Proben als auch an Durchläufern aus den Schwingversuchen aufgenommen. Die ermittelten Einsatzhärtungstiefen für die Grenzhärte von 575 HV liegen bei  $0,4 \pm 0,1 \text{ mm}$ . Die Verwendung der erhöhten Grenzhärte von 575 HV statt 550 HV ist auf die relativ hohe Kernhärte der dünnen Proben von etwa 450 HV zurückzuführen. Bei beiden Werkstoffen ist bei den Varianten Gasaufkohlen und Carbonitrieren 1 keine signifikante Veränderung der Randhärte durch die zyklische Belastung zu beobachten. Hingegen kann bei den Varianten Carbonitrieren 2 und Carbonitrieren 3 nach der zyklischen Belastung an der Oberfläche tendenziell eine leichte Härtezunahme von 10 bis 20 HV beobachtet werden. Diese kann in einer spannungsinduzierten Restaustenitumwandlung oder in einer plastischen Deformation der Oberfläche begründet sein.

Es wurden ebenfalls an unbelasteten Proben und an Durchläufern die Eigenspannungen in Probenlängsrichtung und die Restaustenitgehalte röntgenographisch ermittelt. Bild 4 und 5 zeigen die Eigenspannungen im Martensit. Aufgrund der geringen Probendicke und des elektrolytischen Abtrages der Proben bei der Ermittlung der Tiefenverläufe werden mit zunehmender Abtragstiefe zu hohe Eigenspannungen ermittelt. Für die unbelasteten Proben und für die schwellend beanspruchten Proben sind in Bild 4 und 5 die nach einem Verfahren von Moore und Evans korrigierten Werte dargestellt [5]. Aus den Bildern geht deutlich hervor, dass durch die Beanspruchung sehr hohe Druckeigenspannungen erzeugt werden können. In Bild 6 und 7 sind die ermittelten Restaustenitgehalte dargestellt. Hieraus geht hervor, dass nur bei Variante Carbonitrieren 3 eine Veränderung im Restaustenitgehalt nach der Belastung auftritt. Für die Varianten Carbonitrieren 2 und Carbonitrieren 3 wurden ferner die Eigenspannungen im Austenit ermittelt. Hier konnte festgestellt werden, dass insbesondere durch die schwellende Belastung ( $R = 0$ ) hohe Druckeigenspannungen aufgebaut werden. Im Ausgangszustand liegen in der Randzone die Eigenspannungen im Austenit in einem Bereich von +10 bis -100 MPa, nach der schwellenden Belastung werden Eigenspannungen bis -500 MPa gemessen.

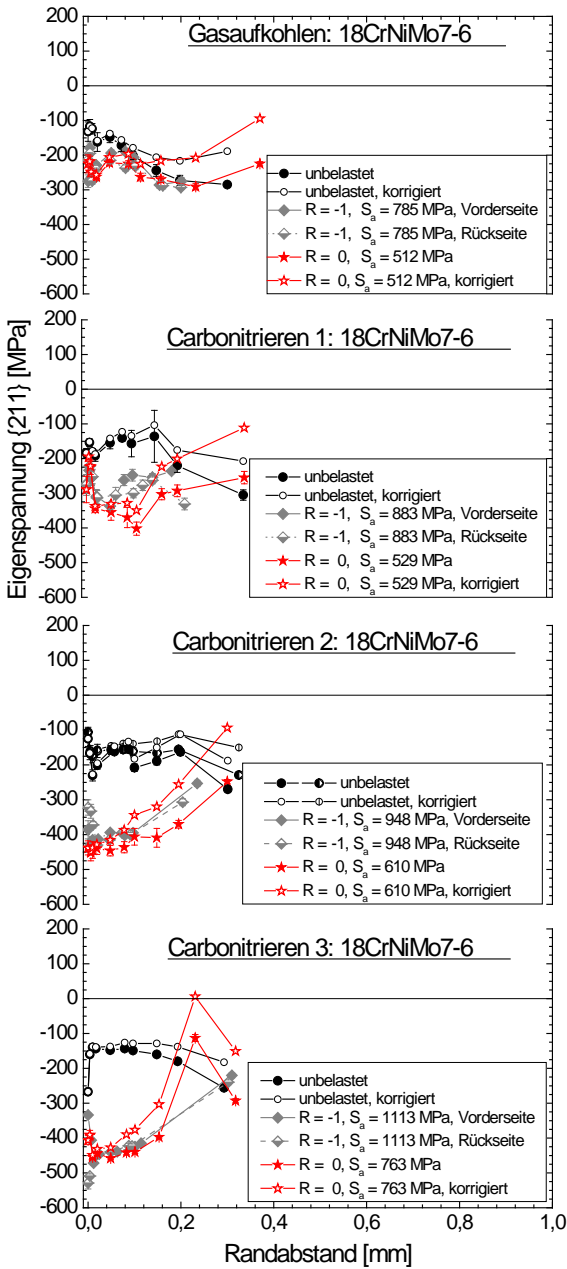


Bild 4: Längseigenspannungen im Martensit für die Varianten des Stahls 18CrNiMo7-6

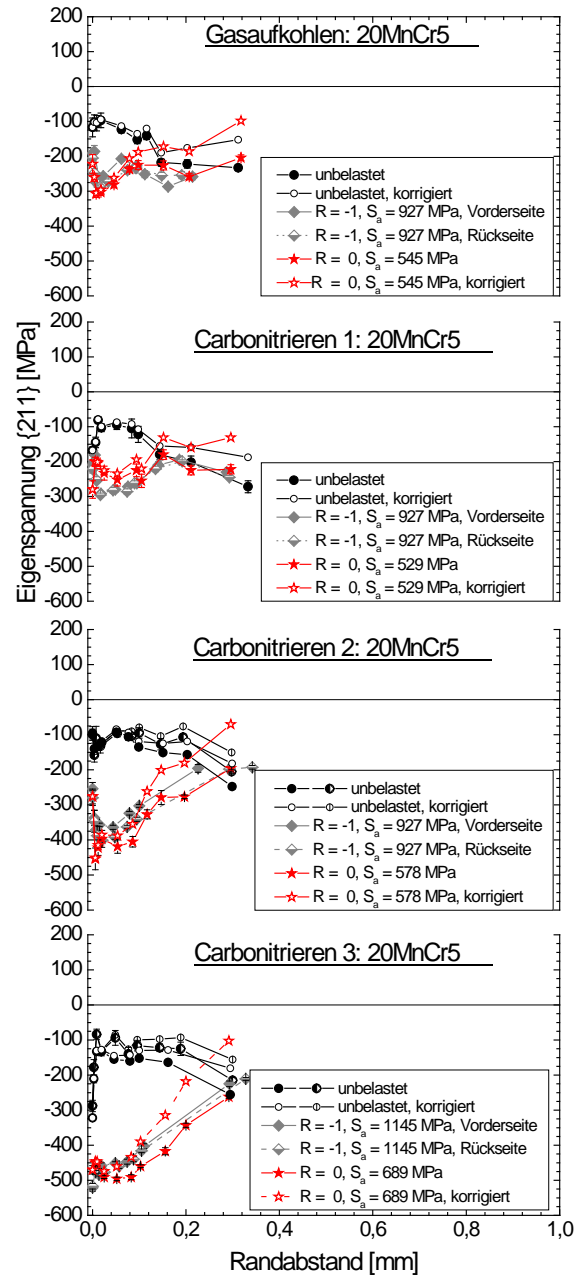


Bild 5: Längseigenspannungen im Martensit für die Varianten des Stahls 20MnCr5

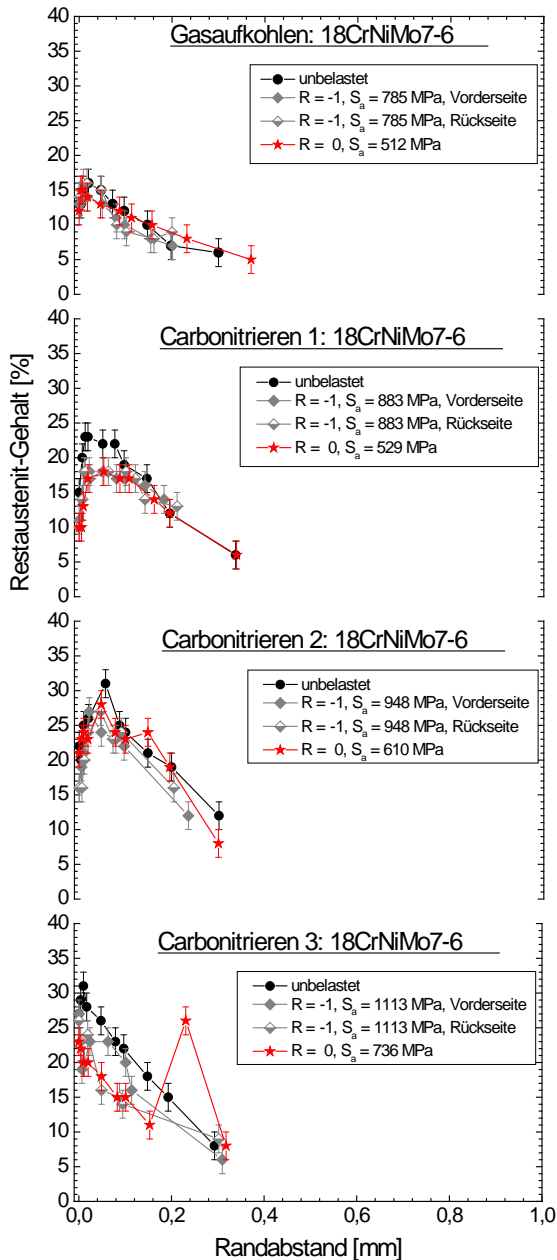


Bild 6: Restaustenitgehalte der Varianten des Stahls 18CrNiMo7-6

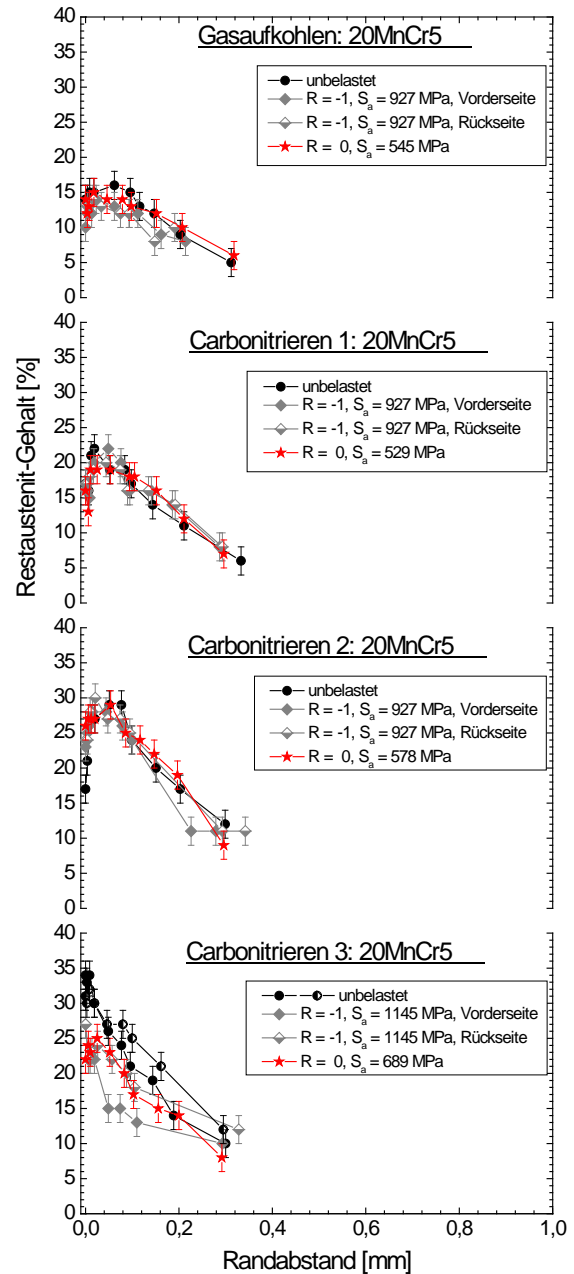


Bild 7: Restaustenitgehalte der Varianten des Stahls 20MnCr5

### Zusammenfassung

Die Erhöhung des Randstickstoffgehalts hat in den durchgeführten Versuchen einen positiven Einfluss auf die Schwingfestigkeit. Sehr hohe Dauerfestigkeiten werden bei der geschliffenen Variante Carbonitrieren 3 beobachtet. Diese können einerseits auf die Verbesserung der Oberflächengüte durch die Reduzierung der Rauheit sowie die Entfernung der Randoxidationszone, und andererseits auf den Aufbau von hohen Druckeigenstressungen während der Belastung zurückzuführen werden.

## Literatur

[1] Cameron, T. B.: A perspective on the performance of carburized steels. SAE Special Publication 584 (1984), 43–56

[2] Přenosil, B.: Eigenschaften von durch Diffusion des Kohlenstoffs und Stickstoffs im Austenit entstehenden karbonitrierten Schichten. Härterei-Technische Mitteilungen 21 (1966), 24-33 und 124-137

[3] Razim, C.: Restaustenit – zum Kenntnisstand über Ursache und Auswirkungen bei einsatzgehärteten Stählen. Härterei-Technische Mitteilungen 40 (1985), 150–165

[4] Bischoff, S.; Klümper-Westkamp, H.; Hoffmann, F.; Zoch, H.-W.: Geregelt Carbonitrieren – Entwicklung eines Sensorsystems für das Carbonitrieren im Gas Teil 2. HTM – J. Heat Treatm. Mat. 67 (2012), 217-222

[5] Totten, G.; Howes, M.; Inoue T.: Handbook of Residual Stress and Deformation of steel. Materials Park, Ohio, ASM International, 2002

## Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr. 16176N der Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstoff-

technik e. V. (AWT) wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Es wurde vom Fachausschuss 21 Gefüge und Eigenschaften der AWT betreut.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Kontakt:

Prof. Dr.-Ing. habil. Franz Hoffmann  
(hoffmann@iwt-bremen.de)