

**Silke Rösch**

**Thermochemisches Verfahren  
zur wirtschaftlichen Oberflächen-  
behandlung von größeren Bauteilen**

# **Thermochemisches Verfahren zur wirtschaftlichen Oberflächenbehandlung von größeren Bauteilen**

Dem Fachbereich Produktionstechnik  
der  
UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades  
Doktor-Ingenieur  
genehmigte

Dissertation  
von  
Dipl.-Ing. Silke Rösch

Gutachter: Prof. Dr. Franz Hoffmann

Prof. Dr. Ulrich Krupp, Osnabrück

Tag der mündlichen Prüfung: 9.Juni 2017

„Man muss stets dahingehen, wo die Freude ist.“

Judith Holofernes

Berichte aus der Werkstofftechnik

**Silke Rösch**

**Thermochemisches Verfahren zur wirtschaftlichen  
Oberflächenbehandlung von größeren Bauteilen**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag  
Aachen 2017

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Bremen, Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5595-5

ISSN 0945-1056

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Vorwort

Die Themenstellung für die vorliegende Arbeit geht auf meine Tätigkeit bei dem Wälzlagerhersteller Schaeffler, Standort Schweinfurt (ehemals FAG), zurück. Untersuchungen an Lagern aus durchhärtebarem Wälzlagerstahl 100Cr6 hatten Vorteile für den carbonitrierten und gehärteten, im Vergleich zu nur martensitisch durchgehärteten Zuständen aufgezeigt, insbesondere für den Betrieb mit kontaminierten Schmiermitteln. Es stellte sich die Frage, ob sich diese Vorteile auch auf Lager aus Einsatzstahl übertragen lassen, welche Stahlzusammensetzung sich dafür empfiehlt und ob die Fertigung wirtschaftlich sinnvoll gestaltet werden kann. Zu keinem der Gesichtspunkte waren systematische Untersuchungen verfügbar.

Die Arbeiten begannen im Rahmen eines industriellen Gemeinschaftsvorhabens der Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA), gefördert über die Arbeitsgemeinschaft der Vorindustriellen Forschung (AViF). Ich selbst betreute das Projekt bei Schaeffler als industrieller Mitarbeiter. Die Gesamtleitung lag bei Dr.-Ing. W. Trojahn, Schaeffler Schweinfurt. Die wissenschaftliche Betreuung des Projekts lag bei der Stiftung Institut für Werkstofftechnik (IWT), Bremen, unter der Federführung von Herrn Prof. Dr. F. Hoffmann, unter Beteiligung von Frau Prof. Dr. B. Clausen, Dr. P. Pouteau und Dr. N. Sotirov. Die in der Stiftung Institut für Werkstofftechnik (IWT), Bremen, betreuten Untersuchungen wurden vor und nach Durchführung in der Arbeitsgruppe abgesprochen und diskutiert. Die bei Projektsitzungen präsentierten Ergebnisse sind in dieser Arbeit gekennzeichnet. Die Ergebnisse dieses Teils der Arbeit sind nachzulesen im Abschlussbericht des AViF-Forschungsvorhabens A 209 bzw. des Vorhabens FVA-Nr. 454 I, Forschungsheft der Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA) (2008) Heft 855 [ABB].

Das Forschungsprojekt wurde finanziell gefördert von der Arbeitsgemeinschaft der Eisen und Metall verarbeitenden Industrie e. V. (AViF). Die Förderung

erfolgte über die antragstellende Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA).

Weitere Untersuchungen erfolgten in von mir geleiteten Projekten bei Schaeffler. Außerdem wurden Untersuchungen bei der Georgsmarienhütte GmbH von mir durchgeführt. Bei der thermodynamischen Simulation unterstützte mich mein Kollege Herr Dipl.-Ing. H. Dickert.

## Kurzfassung

Wälzlager gehören neben Zahnrädern zu den am höchsten belasteten Maschinenelementen. Dabei sind in den letzten Jahren die Anforderungen an kritische Bauteile wie Wälzlager aufgrund von Leistungssteigerungen, Downsizing und Gewichtsreduzierung deutlich gestiegen [TROJ4]. Durch die Erhöhung der Leistungsfähigkeit konnte die Wirtschaftlichkeit von Maschinen erheblich gesteigert werden [VOLK1, RÖSC, TROJ4]. Jedoch müssen Frühausfälle von Lagern, die ungeplante Stillstandzeiten nach sich ziehen und hohe Kosten bis in Höhe von mehreren Millionen Euro verursachen können, unbedingt vermieden werden [FAG3, WELT]. Insgesamt wird geschätzt, dass den Industrieländern durch den Stillstand und Ausfall von Maschinen ein volkswirtschaftlicher Schaden entsteht, der ca. 5% des Bruttosozialproduktes entspricht [DICH].

Wälzlager - auch einsatzgehärtete - fallen immer wieder unvorhergesehen durch zu frühe Ermüdung der Oberfläche aus. Die Einleitung dieses frühen Ermüdungsschadens kann sowohl durch eine thermische Schädigung der Oberfläche als Konsequenz einer unzureichenden Schmierung, als auch durch eine mechanische Beschädigung der Laufbahn durch harte Schmutzpartikel, die im Wälzkontakt in die Oberflächen der Wälzpartner eingedrückt werden, verursacht sein.

Es ist festzustellen, dass die bestehenden Behandlungen und Werkstoffkombinationen bei hohen Belastungen und ungünstigen Betriebsbedingungen, wie Mangelschmierung und/oder verschmutztem Schmiermittel, keinen ausreichenden Schutz vor Betriebsstörungen durch Lagerausfall bieten. Weiterhin ist festzustellen, dass die Lager unter diesen Belastungen insgesamt keine ausreichende Kombination aus Festigkeit, Zähigkeit und Stabilität aufweisen.

Ziel dieser Arbeit war es zu klären, ob durch eine Carbonitrierbehandlung die gehärtete Randschicht in Bezug auf Festigkeit, Zähigkeit und thermische

Stabilität optimiert werden kann. Das hierfür zu entwickelnde Wärmebehandlungsverfahren und der eingesetzte Werkstoff sollten dabei aufeinander abgestimmt werden. Die notwendigen Prozessdauern sollten möglichst verkürzt, zumindest nicht verlängert werden. Da klassische Carbonitrierbehandlungen bei niedrigeren Temperaturen durchgeführt werden als bei Einsatzhärtebehandlungen, sollten die verwendeten Prozesstemperaturen möglichst hoch sein und im Rahmen von Aufkühlungstemperaturen liegen.

Das Carbonitrieren bei erhöhter Prozess Temperatur zur Erzeugung einer Randschicht mit erhöhter Schadenstoleranz bzw. erhöhtem Widerstand gegen Versagen durch Ermüdung aufgrund der Hertzsche Pressung wurde in dieser Arbeit an elf Einsatz- und Vergütungsstählen eingesetzt, um eine, bezüglich Prozesssicherheit, Kosten, Stabilität und Lebensdauer optimale Paarung zu ermitteln. Nach einer Vorauswahl aufgrund der Untersuchungsergebnisse der Carbonitrierbehandlungen bei 10% und 20% Ammoniakzugabe wurde die thermische und mechanische Stabilität der erzeugten Restaustenitgehalte an den Stählen 18CrNiMo7-6, SAE 4320, 23MnCrMo5, 32CrMoV13 und 32MnCrMo6-4-3 untersucht.

Anhand der Ergebnisse wurde der 32MnCrMo6-4-3 als geeignetster Stahl ausgewählt. Die mechanischen Kennwerte des Zugversuches sowie die Kerbschlagarbeit dieses Stahls im blindgehärteten Zustand wurden deshalb im Rahmen dieser Arbeit ermittelt.

Durch den Umbau des Lebensdauerprüfstandes zu einem Scheibenüberrollprüfstand konnten, mit Ausnahme des Stahles C15, der aufgrund des geringen Legierungsgehaltes eine zu geringe Einhärtetiefe aufwies, zehn carbonitrierte Stähle bei hohen Flächenpressungen überrollt werden. Somit war es möglich die einzelnen, carbonitrierten Stähle in Bezug auf die Überrollfestigkeit zu unterscheiden. Hierbei wurden für den Stahl

32MnCrMo6-4-3 in der Kombination Lebensdauer und Wirtschaftlichkeit die besten Ergebnisse von allen untersuchten Stählen erzielt.

Anschließend wurden in der Lebensdauerprüfung von Schrägkugellagern unter Bedingungen von simulierter Mangelschmierung und Partikelüberrollung die Stähle 18CrNiMo7-6, SAE 4320 und 32MnCrMo6-4-3 im carbonitrierten Zustand einer einsatzgehärteten Variante des Stahles SAE 4320 gegenübergestellt. Die Randschichtzustände der drei carbonitrierten Varianten waren deutlich besser als durch die Lebensdauerberechnung erwartet. Die carbonitrierten Zustände fielen bei der bisher üblichen Laufzeit von 1500 Stunden und einer Flächenpressung von 2200 MPa zu vereinzelt aus, um die Ausfallwahrscheinlichkeiten bestimmen zu können. Allein die Weibullgerade für den nur einsatzgehärteten Stahl SAE 4320 konnte ermittelt werden. Aus diesem Grunde wurde ein weiterer Lebensdauerversuch an Schrägkugellagern unter Bedingungen von simulierter Mangelschmierung und Partikelüberrollung mit einer moderaten Anhebung der Flächenpressung durchgeführt, wobei eine einsatzgehärtete Variante des Stahles 32MnCrMo6-4-3 einer carbonitrierten Variante gegenübergestellt wurde. Dabei konnten die Ausfallwahrscheinlichkeiten für beide Varianten bestimmt werden. Zusätzlich wurde eine Lebensdauerprüfung an Schrägkugellagern an einer carbonitrierten Variante des Stahles 32MnCrMo6-4-3 bei Vollschmierung durchgeführt und mit einer Standardvariante des Stahles 100Cr6 verglichen. Damit sollte untersucht werden, ob Wälzlager aus dem Stahl 32MnCrMo6-4-3 auch bei günstigen Schmier- und Betriebsbedingungen gute Lebensdauern erreichen können.

Als ein direktes Ergebnis dieser Arbeit wird das Verfahren Carbonitrieren bei erhöhter Temperatur und hoher Wirtschaftlichkeit mit dem Ziel einer verbesserten Wälzfestigkeit - insbesondere unter ungünstigen Einsatzbedingungen - von in Serie gefertigten Lagern bis zu einer Größe von 600 mm Außendurchmesser genutzt.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
1.1	Ausgangsbasis .....	1
1.2	Forschungsziel .....	2
2	Kenntnisstand .....	4
2.1	Belastungen im Wälzlager bei Mischreibung und bei Verunreinigungen 4	
2.2	Maßnahmen zur Lebensdauererhöhung .....	13
2.3	Das Carbonitrieren .....	21
2.3.1	Definition .....	21
2.3.2	Verfahren .....	21
2.3.2.1	Reaktionen in der Gasatmosphäre .....	23
2.3.2.2	Reaktionen an der Grenzfläche Atmosphäre-Stahl .....	29
2.3.2.3	Reaktionen im Festkörper .....	31
2.3.3	Einfluss der chemischen Analyse des Werkstoffs .....	38
2.3.4	Einfluss der Carbonitrierung auf Härte und Härbarkeit .....	47
2.3.5	Einfluss der Carbonitrierung auf den Restaustenitgehalt .....	48
2.3.6	Eigenspannungen .....	53
2.3.7	Verzug .....	55
2.3.8	Verschleiß .....	56
3	Werkstoffe und Proben .....	59
3.1	Versuchsstähle .....	59
3.1.1	Eingangskontrolle der verwendeten Stähle .....	60
3.1.1.1	Chemische Analyse .....	60
3.1.1.2	Härtbarkeit .....	62

3.1.1.3	Reinheitsgraduntersuchungen .....	63
a.	Makro-Reinheitsgraduntersuchung nach SEP 1927 .....	63
b.	Mikro-Reinheitsgraduntersuchung nach DIN 50602 .....	63
c.	Mikro-Reinheitsgraduntersuchung nach ASTM 2283 .....	64
3.1.1.4	Ausgangsgefüge .....	66
3.2	Verwendete Probengeometrien.....	71
3.2.1	Scheiben .....	71
3.2.2	Scheiben zur Prüfung im Überrollprüfstand .....	71
3.2.3	Lagerinnenringe .....	71
4	Versuchseinrichtungen .....	73
4.1	Wärmebehandlungseinrichtungen.....	73
4.2	Überrollprüfstand .....	74
4.3	Lebensdauerprüfstand .....	75
5	Versuchsdurchführung.....	76
5.1	Kalibrierung der Ofenatmosphäre .....	76
5.2	Carbonitrierbehandlungen .....	78
5.2.1	Einfluss der Legierungselemente auf das Carbonitrierergebnis ...	79
5.2.2	Untersuchungen zur Stabilität der Carbonitrierschichten.....	81
5.2.3	Carbonitrierung der Überrollscheiben und Schrägkugellager für die Lebensdauerprüfungen.....	82
5.3	Untersuchungsmethoden .....	83
5.3.1	Lichtmikroskopische Untersuchung .....	84
5.3.1	Mikrosondenuntersuchung .....	85
5.3.2	Härtemessung und Härtetiefenverläufe .....	86
5.3.3	Martenshärtemessung.....	86

5.3.4	Analyse mittels Glimmentladungsspektroskopie (GDOS).....	87
5.3.5	Analyse mittels optischer Emissionsspektroskopie ( OES ).....	89
5.3.6	Thermodynamische Berechnungen .....	90
5.3.7	Röntgenographische Feinstrukturanalyse.....	90
5.3.8	Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung.....	92
5.4	Charakterisierung des optimierten Werkstoffs 32MnCrMo6-4-3 .....	92
5.4.1	Zugversuch.....	93
5.4.2	Kerbschlagbiegeversuch .....	93
5.5	Optimierung des Carbonitrierprozesses.....	94
5.6	Lebensdauer carbonitrierter Bauteile .....	94
5.6.1	Lebensdauerprüfung an Scheiben .....	94
5.6.2	Klassische Lebensdauerprüfung an Innenringen des Schrägkugellagers 7205B .....	96
6	Ergebnisse .....	101
6.1	Ergebnisse der Atmosphärenkalibrierung .....	101
6.2	Beurteilung der Seigerungen mittels Mikrosonde.....	105
6.3	Ergebnis der Carbonitrierbehandlungen .....	110
6.4	Gefügecharakterisierung der carbonitrierten Stähle .....	132
6.5	Ergebnisse der thermodynamischen Berechnung mit JMatPro .....	137
6.6	Ergebnisse der röntgenographischen Feinstrukturanalyse .....	141
6.7	Schichtstabilität.....	148
6.7.1	Thermische Stabilität.....	149
6.7.2	Untersuchung der mechanischen Stabilität durch Kugelstrahlen	161
6.8	Werkstoffeigenschaften des optimierten Werkstoffs 32MnCrMo6-4-3 im blindgehärteten Zustand.....	167

6.8.1	Kerbschlagbiegeversuch .....	167
6.8.2	Zugversuch.....	168
6.9	Lebensdauerprüfung .....	169
6.9.1	Scheibenüberrollung .....	175
6.9.2	Lebensdauerprüfung an Schrägkugellagerinnenringen .....	188
7	Diskussion.....	194
7.1	Regelverhalten .....	194
7.2	Einfluss der Legierungselemente .....	195
7.3	Überrollverhalten .....	201
7.4	Wirtschaftlichkeit.....	210
8	Zusammenfassung .....	211
9	Ausblick.....	214
10	Literatur.....	216