

Carbonitrierte Wälzlager unter dem Aspekt der Elektromobilität

Klaus Buchner, Thomas Orth

Neben dem generellen Trend des kompakten Leichtbaus in der Automobilindustrie sieht sich die Lagerindustrie, bedingt durch die Elektromobilität, mit steigenden Anforderungen bezüglich Leistungsdichte, Drehzahl und Temperatur konfrontiert. Zusätzlich zur Werkstoffoptimierung erlebt auch der Wärmebehandlungsprozess des Carbonitrierens von Wälzlagering eine Renaissance. Der vorliegende Bericht skizziert die Vorteile und Chancen des Carbonitrierens und gibt Hinweise auf die anlagentechnischen Aspekte der zugehörigen Thermoprozessanlagen.

Wenngleich Automobile konventioneller Antriebstechnik noch das Straßenbild prägen, so gewinnen Elektro- und Hybridfahrzeuge zunehmend an Bedeutung. Hierbei verleiht der Aspekt sinnvoller Reichweiten in Bezug auf die Elektrobatterie dem generellen Trend zu Leichtbau und Downsizing einen weiteren Schwung. Aufgrund dieser Entwicklungen sieht sich die Wälzlagerindustrie mit steigenden Qualitätsanforderungen hinsichtlich Leistungsdichte, Drehzahl und Temperatur konfrontiert.

Wälzlager in der Automobilindustrie

Wälzlager sind höchst belastete, einbaufertige Maschinenelemente und bestehen aus Wälzkörpern, die zwischen Innen- und Außenring abrollen, sowie einem Käfig, der die Wälzkörper auf Abstand zueinander hält. Wälzlagering unterliegen im Allgemeinen einer mehrdimensionalen Beanspruchung kombiniert aus Zug, Biegung und Hertzscher Pressung. Die dabei gestellten technischen Anforderungen an ein Lager bedingen hohe Härte, Wälzfestigkeit, Verschleißfestigkeit, Gefügestabilität und ausreichende Zähigkeit. Hierbei hat sich der weltweit häufig eingesetzte Wälzlagerstahl ISO 100Cr6 bzw. SAE 52100 als Werkstoff der Wahl etabliert [1]. Aufgrund von wirtschaftlichen Gesichtspunkten wird dieser üblicherweise martensitisch gehärtet und niedrig angelassen (i. A. < 180 °C). **Tabelle 1** fasst die verschiedenen Anlassvarianten, die für die Automobilindustrie von Bedeutung sind, zusammen.

Darauf aufbauend werden auch Stähle mit modifiziertem Mn- und Si-Gehalt eingesetzt, da die durchhartbaren Bauteildicken des 100Cr6 mit ca. 25 mm beschränkt sind. Durch Mangan lässt sich die Austenitumwandlung verzögern und damit die Durchhärbarkeit erhöhen.

Tabelle 1: Zusammenfassung verschiedener Anlassvarianten [1]

Anlasstemperatur (Bezeichnung)	Mikrogefüge	Härte [HRC]	Zulässige Betriebstemperatur
150 bis 180 °C (SN-Stabilisierung)	Martensit < 15 % Restaustenit	> 62	120 °C
220 °C (S0-Stabilisierung)	Martensit < 3 % Restaustenit	58 bis 62	150 °C
240 °C (S1-Stabilisierung)	Martensit < 1 % Restaustenit	57 bis 61	200 °C

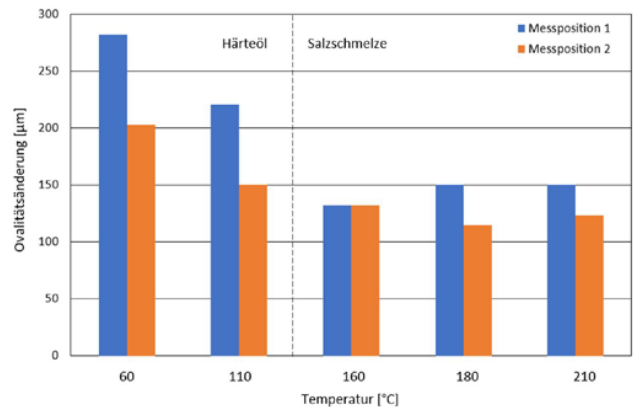


Bild 1: Formänderung: Ovalität des Außenrings [4]

Betreffend der Verzugsthematik kommt dem Abschreckmedium bzw. der Gestaltung der Abschreckeinrichtung in Abhängigkeit von der Dimension der Wälzlagering eine wesentliche Bedeutung zu, wobei Härtepressen eine Sonderform darstellen. Die Grundlagen hinsichtlich der Mechanismen der Verzugsentstehung werden in der Literatur ausführlich diskutiert [2-3]. Als konventionelle Ausführung können Öl- und Salzbad angesehen werden, wobei **Bild 1** einen Vergleich hinsichtlich der Formänderung bei diesen beiden Abschreckmedien zeigt. Darüber hinaus sei an dieser Stelle auch auf die Polymerabschreckung und die Problematik bei dünnwandigen Lagerringen hingewiesen [5]. Speziell bei geringen Wandstärken stellt die Hochdruckgasabschreckung eine interessante Alternative hinsichtlich verbessertem Verzugsverhalten und Entfall der Nachreinigung dar.

Seitens der Wälzlagerindustrie werden für die klassische Wärmebehandlung von Wälzlager sowohl Kammerofenlinien als auch kontinuierliche Thermoprozessanlagen eingesetzt, wobei sich bei letzterer Anlagenkonfiguration Rollenherdöfen im Bereich von Serienteilen bewährt haben. **Bild 2** ist als repräsentative Thermoprozess-

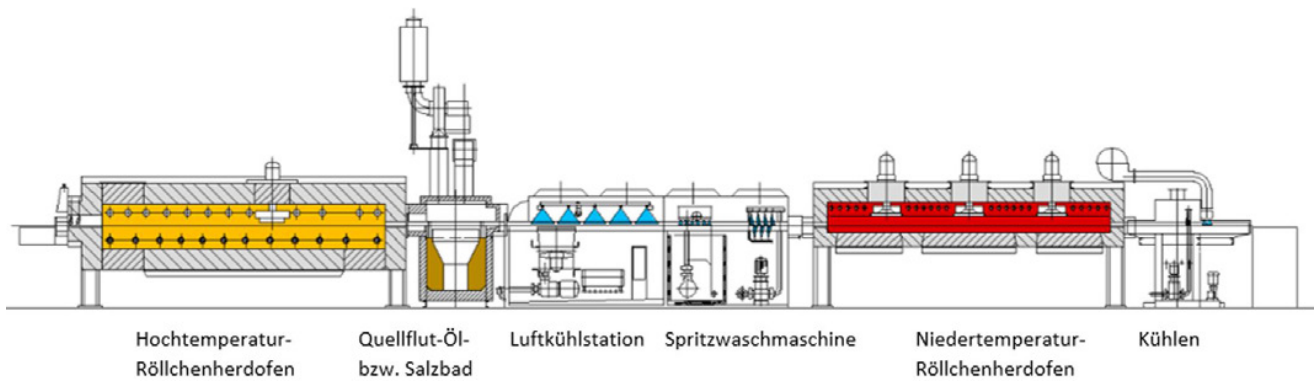


Bild 2: Schematische Darstellung einer Anlage zum Härten und Anlassen von Wälzlageringern [6]

anlagentechnologie anzusehen, wobei hier auf die Besonderheit der Abschreckeinrichtung, die sowohl für die Öl- als auch für die Salzabschreckung geeignet ist, eingegangen werden soll.

Im gezeigten Beispiel kommt, im Hinblick auf die Verzugsminimierung, eine spezielle Abschrecktechnik zum Einsatz, das sogenannte Quellfluten (**Bild 3**). Dabei strömt das jeweilige Abschreckmedium von unten durch die Charge. Die Strömung wird über geeignete Umwälzaggregate erzeugt und durch Leiteinrichtungen zu den Ringen geführt. Dadurch ist eine für alle Ringe stets gleichmäßige Anströmung gewährleistet. Durch die typischerweise einlagige Fahrweise wird so jeder Ring in immer gleicher Art und Weise abgeschreckt. Darüber hinaus kann noch eine Pendelbewegung des Rollganges in horizontaler Richtung für eine weitere Optimierung genutzt werden. Zusätzlich vereinfacht das Quellflutkonzept die Anlagentechnik, da das komplexe Zusammenspiel von absenkbarer Bühne mit angetriebenen Transportrollen vermieden werden kann.

Carbonitrierte Wälzlager

Dem Trend der Elektromobilität folgend, bringt die Elektrifizierung des Antriebsstrangs neue Herausforderungen für die Wälzlagerindustrie. Stand in der Vergangenheit noch die Traglast im Vordergrund, so gilt es nun, zusätzliche Anforderungen (Kriechströme, Geräuschminimierung, Drehzahlbelastung, ...) zu berücksichtigen. Während übliche Drehzahlen von konventionellen Verbrennungsmotoren im Bereich von 800 bis 8.000 min⁻¹ liegen, so sieht man sich bei Elektromotoren mit

Drehzahlen von > 20.000 min⁻¹ konfrontiert; auch die veränderte Drehmomentcharakteristik und die steigenden Lagertemperaturen gilt es zu beachten. Demzufolge konnten sich einerseits neue Ansätze behaupten (z. B. Hybrid Ceramic Bearings mit keramischen Wälzkörpern, die neben verbessertem Verschleißverhalten auch Lösungsmöglichkeiten für die Problematik der Kriechströme darstellen), andererseits erleben alternative Wärmebehandlungsprozesse eine gewisse Renaissance.

Ausgehend von der Problematik der Mangelschmierung bzw. Verschmutzung von Schmierstoffen bis hin zu Einsatzbedingungen mit stoßartigen Belastungen haben sich bereits in der Vergangenheit unterschiedliche Wärmebehandlungsprozesse in Kombination mit geänderten Werkstoffen erfolgreich auf dem Markt etabliert. Hierzu zählen neben dem bainitischen Härten von 100Cr6 [7-8] auch das Carbonitrieren von Wälzlagerstählen und das Einsatzhärten [9-11] – einerseits durchgehärtete kleinere Lager, andererseits größere Lager, die überwiegend aus Einsatzstählen gefertigt werden.

Basierend auf diesen Erkenntnissen können carbonitrierte Wälzlager, in Bezug auf die Elektromobilität, auch dort eingesetzt werden, wo eine erhöhte Leistungsdichte aufgrund von Downsizing vorliegt. Durchgehärtete carbonitrierte 100Cr6 Wälzlager können wie folgt charakterisiert werden [10]: Höhere Restaustenitgehalte und Anteile an globularen Carbiden kombiniert mit Nitriden und Carbonitriden im Randbereich führen zu einer Steigerung der Lebensdauer. Hinsichtlich einer eintretenden Schädigung bewirken

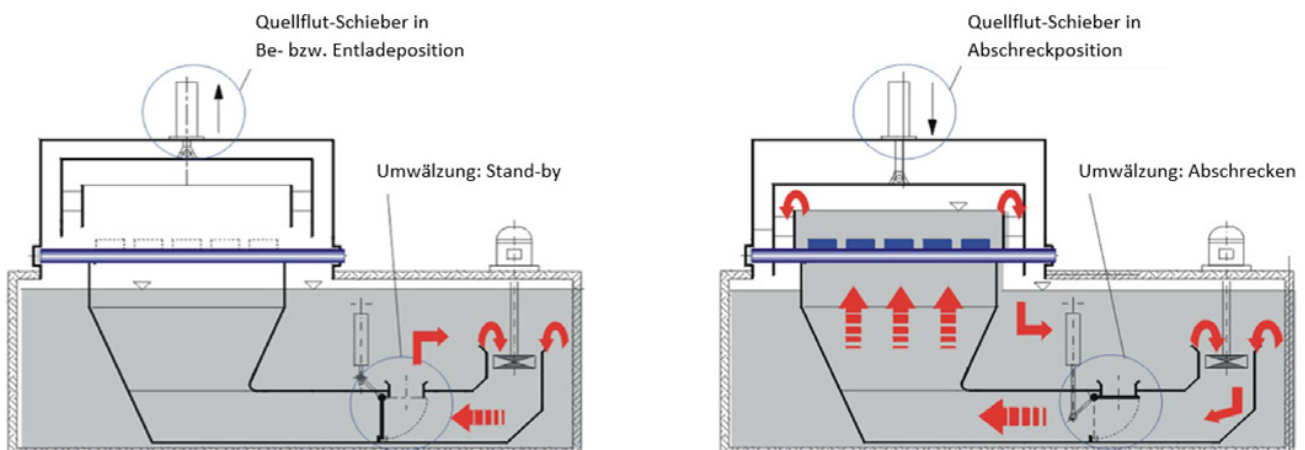


Bild 3: Schematische Darstellung eines Quellflutbades mit Funktionsprinzip [6]

die hohen Spannungen im Bereich der Risspitze bei höheren Restaustenitgehalten eine spannungsinduzierte Martensitbildung, die mit der Bildung von Druckeigenstress einhergeht. Festzuhalten ist, dass der erhöhte Restaustenitgehalt nur für den Randbereich zutreffend ist, der Kern weist ähnliche Restaustenitgehalte, wie es einem üblichen Gefüge nach Standardwärmebehandlung entspricht, auf. Probleme mit der Maß- und Formhaltigkeit sind daher nicht zu erwarten. Der eindiffundierte Stickstoff führt dabei zu einer Stabilisierung des Restaustenits.

Hinsichtlich der Prozessatmosphäre wird der Kohlenstoffpegel so geregelt, dass weder eine merkliche Aufkohlung noch eine Abkohlung auftritt. Zu beachten ist, dass durch das zusätzliche Einbringen von Stickstoff die lokale Kohlenstoffaktivität beeinflusst wird, was sich in einer Absenkung des Kohlenstoffgehaltes in der äußeren Randschicht zeigt. Zusätzlich werden Carbide in Carbonitride umgebaut. Der angestrebte Randstickstoffgehalt liegt in der Größenordnung von 0,2 %. Somit kann durch das Carbonitrieren einerseits eine gesteigerte Oberflächenhärte und Anlassbeständigkeit erzielt werden, andererseits zeigt die restaustenitstabilisierte Randschicht einen positiven Einfluss hinsichtlich des Ermüdungsverhaltens nach lokaler Überlastung. Obwohl nachfolgende Untersuchungsergebnisse nicht als Industriestandard anzusehen sind, so zeigen sie doch, dass durch den Carbonitrierprozess eine signifikante Steigerung der Lebensdauer – im vorliegenden Fall eine Verdoppelung der Standzeit – gegeben ist. **Bild 4** zeigt die metallografischen Ergebnisse [12], wobei der Referenzzustand REF1 und die Variante RA2 wie folgt definiert sind:

- REF1: Austenitisieren bei 840 °C für 20 Minuten
- RA2: Carbonitrieren bei 880 °C für 6 Stunden und Absenken auf 840 °C Härtetemperatur (CPN = 1,15 %, NH₃ ≥ 20).

In beiden Fällen erfolgte eine Ölhärtung bei 60 °C und ein Anlassen unter Luft bei 170 °C für 2 Stunden.

Industrieller Standard für carbonitrierte Wälzlager auf 100Cr6-Basis

Im Gegensatz zu den vorab angeführten Versuchsvarianten kann eine mögliche industrielle Behandlung wie folgt gekennzeichnet werden [10]: Carbonitrieren bei 850 °C für 5 Stunden (CPN = 1,15 %, NH₃N = 8 %) mit Ölhärtung und Anlassen unter Luft bei 250 °C für 2 Stunden. Durch die erhöhte Anlassstemperatur findet eine teilweise Umwandlung des erhöhten Restaustenits in Bainitstufen unter Bildung von Druckeigenstress im Randbereich statt.

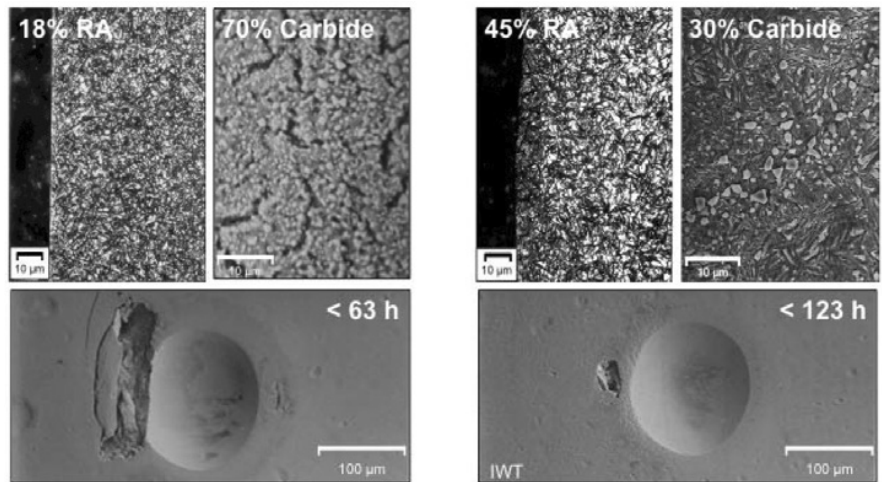


Bild 4: Rand- und Kerngefüge sowie rasterelektronenmikroskopische Analyse der ausfallverursachenden Pittings [12]; links: Referenzzustand REF1, rechts: Carbonitriervariante RA2

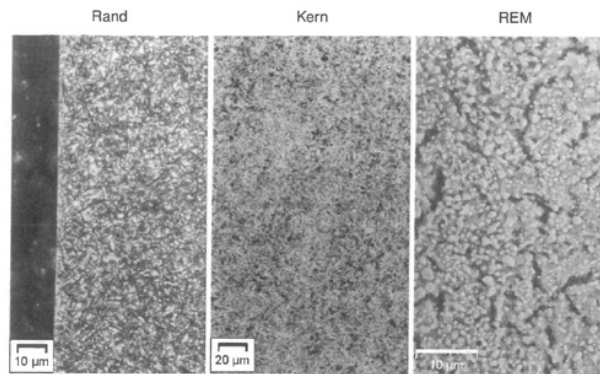


Bild 5: Rand- und Kerngefüge (Rand – Kern – REM) [10]

Bild 12.
Rand- und Kerngefüge der Variante O1 - SH-Behandlung - Längsschliff
Fig. 12.
Microstructure of the surface zone and the core, variant O1 - SH-treated - longitudinal cut

Der Restaustenitgehalt im Randbereich beträgt rund 19 %, im Kern 6%. Der metallografische Schliff (**Bild 5**) zeigt ein recht gleichmäßiges martensitisches Gefüge, im Kern feinnadelig ausgeprägt, mit globularen Carbidausscheidungen (Carbiddichte ca. 60-70%) und einem gewissen Anteil an Restaustenit am Rand.

Wenngleich das Carbonitrieren von Wälzlageringern als bewährtes Wärmebehandlungsverfahren angesehen werden kann, so ist doch auf die verlängerte Prozesszeit gegenüber dem klassischen Härteprozess hinzuweisen. Demzufolge bedingt eine Prozessumstellung an bestehenden kontinuierlichen Wärmebehandlungsanlagen eine Reduktion der Produktionskapazität – vor- bzw. nachgelagerte Aggregate sind nicht mehr optimal ausgelastet. Bei Neuanlagen (bevorzugt Rollenherdöfen) kann dies durch eine abgestimmte Länge des Hochtemperaturofens berücksichtigt werden. Alternativ dazu haben sich seitens der Wälzlagerindustrie auch Kammerofenlinien für Carbonitrierprozesse als wirtschaftliche Anlagentechnik erwiesen. Die Darstellung eines Mehrzweckkammerofens mit Salzbadabschreckung in **Bild 6** verdeutlicht die Vorteile dieses Anlagentyps hinsichtlich der Flexibilität. Wenngleich der Schwerpunkt dieser Thermoanlagenanlage beim klassischen martensitischen Härten bzw. Carbonitrieren von klassischen Wälzlagerstählen liegt, so lässt das Anlagendesign auch ein Einsatzhärten bzw. bainitisches Härten zu.



Bild 6: Mehrzweckkammerofen zur Wärmebehandlung von Wälzlager

Kennzeichnend für den Mehrzweckkammerofen, der für Arbeitstemperaturen bis 1.050 °C ausgeführt ist, ist die integrierte gasdichte Abschreckschleuse mit Salzbad. Die Prozessgasatmosphäre basiert auf einer Stickstoff-Methanol-Begasung mit Propan und Ammoniak als Zusatzgase. Anzumerken ist, dass hinsichtlich des Carbonitrierprozesses die C-Pegelregelung ausschließlich mittels Sauerstoffsonde erfolgt, eine Nitrierpotenzial- (N-Pegel-) Messung bzw. Regelung [13] ist nicht implementiert – dem Wärmebehandlungsprozess liegen konstante Ammoniakmengen zugrunde. Aufgrund der Möglichkeit des bainitischen Härtens dienen die Kammeranlass- und Vorwärmöfen auch zur isothermischen, bainitischen Umwandlung. Nach dem Abschrecken der Charge im Salzbad wird diese mittels beheiztem Transportwagen in die Niedertemperaturöfen umgesetzt. Als Prozessmodifikation sei an dieser Stelle auch auf die Möglichkeit der verkürzten Wärmebehandlung hingewiesen [8]. Während die konventionelle bainitische Umwandlung durch Abschrecken und Halten bei einer konstanten Temperatur knapp oberhalb der MS-Temperatur erfolgt, kann alternativ dazu am Prozessende die Temperatur zur Verkürzung der Wärmebehandlungsdauer angehoben werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, zuerst auf eine Temperatur unterhalb der MS-Temperatur abzuschrecken (Ankeimungseffekt) und anschließend bei einer Temperatur oberhalb von MS isothermisch zu behandeln. Festzuhalten ist, dass sich durch die Prozessvarianten unterschiedliche Gefügeausprägungen einstellen: Neben bainitischen Strukturen liegen auch martensitische Anteile vor, der Restaustenitgehalt ist generell erhöht.

Fazit

Speziell unter dem Aspekt der Elektromobilität, aber auch bedingt durch den generellen Trend des Downsizings, sind Wälzlager einer zunehmend steigenden Belastung ausgesetzt. Hierbei zeigt sich, dass der Prozess des Carbonitrierens eine sinnvolle industrielle Ergänzung darstellt. Hinsichtlich durchgehärteter carbonitrierter 100Cr6 Wälzlagerringe zeigt sich bei homogenen, globularen Carbidausscheidungen und einem gewissen Anteil an stabilisiertem Restaustenit im Randbereich eine Steigerung der Ermüdungslebensdauer. Der Prozess als solches ist technisch abgesichert, die länge-

ren Prozesszeiten – bezogen auf den Hochtemperaturofen – sind jedoch zu berücksichtigen. Betreffend der Anlagentechnik haben sich sowohl Rollenherdofenanlagen als auch Kammerofenlinien etabliert, wobei sich letztere durch ihre Flexibilität auszeichnen.

Literatur

- [1] Hengerer, F.: Walzlagerstahl 100Cr6 – ein Jahrhundert Werkstoffentwicklung. In: HTM 57 (2002) 3, S. 144-155
- [2] Sturm, H.; Rath, J.: Mechanismen der Verzugsentstehung bei Wälzlagerringen aus 100Cr 6. In: HTM 67 (2012) 5, S. 291-303
- [3] Clausen, B.; Frerichs, F.; Goch, G.; Klein, D.; Lübben, T.; Nowag, L.; Prinz, C.; Sackmann, T.; Stöbner, D.; Sturm, H.; Zoch, H.-W.: Verzugsentstehung von Wälzlagerringen – Eine prozesskettenübergreifende Analyse. In: HTM 61 (2006) 6, S. 309-319
- [4] Volkmuth, J.; Wahl, G.; Hengerer, F.: Auswirkungen der Abkühlbedingungen beim Härten auf die Maß- und Formänderung von Bauteilen. In: HTM 48 (1993) 1, S. 5-12
- [5] Wolfrath, T.; Lübben, T.; Frerichs, F.: Vergleichende Untersuchung von Öl- und Polymerabschreckung hinsichtlich des Verzugs von dünnwandigen Wälzlagerringen. In: HTM 69 (2014) 4, S. 221-234
- [6] Jennes, R.: Roller hearth furnaces for piece goods. In: Beneke, F.; Nacke, B.; Pfeifer, H. (Hrsg.): Handbook of Thermoprocessingtechnologies. Essen, Vulkan-Verlag GmbH, 2015, S. 448-451
- [7] Trojahn, W.; Dinkel, M.: Bainitic bearings for demanding applications. In: HTM 72 (2017) 6, S. 365-370
- [8] Dong, J.; Kohlmann, R.; Hirsch, T.; Vettters, H.; Zoch, H.-W.: Härten von Wälzlagerstählen durch verkürzte Wärmebehandlung in der unteren Bainitstufe. In: HTM 60 (2005) 2, S. 77-86
- [9] Stangner, H.; Zoch, H.-W.: Wälzfestigkeit einsatzgehärteter Bauteile. In: HTM 45 (1990) 4, S. 223-229
- [10] Günther, D.; Hoffmann, F.; Mayer, P.: Steigerung der Gebrauchsdauer von wälzbeanspruchten Bauteilen unter verschmutztem Schmierstoff. In: HTM 59 (2004) 2, S. 98-112
- [11] Rösch, S.; Trojahn, W.; Clausen, B.: Carbonitrieren von Einsatz- und Vergütungsstählen für Lageranwendungen. In: HTM 71 (2016) 1, S. 51-63
- [12] Steinbacher, M.; Hoffmann, F.; Zoch, H.-W.: Thermochemische Wärmebehandlung von Wälzlagern und Zahnrädern für „smart Material“ Eigenschaften der Randschicht. In: GETPRO 5. Kongress, 25./26. März 2015 (Band I), FVA (2015), S.181-194
- [13] Winter, K. M.: Independently controlled carbon and nitrogen potential: A new approach to carbonitriding processes. In: Journal of Materials Engineering and Performance 22 (2013) 7, S. 1.945-1.956

Autoren



Dr. Klaus Buchner
Aichelin Holding GmbH
Mödling, Österreich
+43 (0)2236 / 236-46-384
klaus.buchner@aichelin.com



Thomas Orth
Aichelin Holding GmbH
Mödling, Österreich
+43 (0)2236 / 236-46-272
thomas.orth@aichelin.com