

## Fertigungstechnik, Hartwalzen, Lebensdauersteigerung, Lager

# Hartwalzen von Lagerringen zur Lebensdauersteigerung

K. Jahnel, S. Hähnel, T. Grunwald, T. Bergs

## Inhalt

Zur Steigerung der Lagerlebensdauer von Hybridwälzlagern hat das Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie IPT gemeinsam mit CEROBEAR GmbH, HEGENSCHIEDT-MFD (A Member of the NSH-Group) und SCHMITZ-METALLOGRAPHIE GmbH an der Qualifizierung und Implementierung des Verfahrens Hartwalzen in die Prozesskette zur Herstellung von Hybridwälzlagern gearbeitet. Durch die Induzierung von Druckeigenspannungen in die Lagerlaufläche konnte die Lebensdauer nachweislich erhöht werden. Die Arbeiten wurden im Rahmen des geförderten Forschungsvorhabens „Hartwalzen von Lagerringen“ durchgeführt, welches aus Mitteln des europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) gefördert wurde.

## Production engineering, hard rolling, service life, bearings

Hard rolling of bearing rings to increase the service life

To increase the service life of hybrid rolling bearings, the Fraunhofer Institute for Production Technology IPT together with CEROBEAR GmbH, HEGENSCHIEDT-MFD (A Member of the NSH Group) and SCHMITZ-METALLOGRAPHIE GmbH successfully qualified and implemented the hard rolling process in the process chain for the manufacture of hybrid rolling bearings. By inducing residual compressive stresses in the bearing running surface, the service life has been demonstrably increased. The work was carried out as part of the funded research project "Hard Rolling of Bearing Rings", which was supported by the European Regional Development Fund (EFRE).

## 1 Einleitung

Das Hartwalzen ist ein umformendes Fertigungsverfahren, bei dem ein Bauteil mittels einer Rolle oder Kugel plastifiziert und umgeformt wird. Verfahrenstechnisch erfolgt die Unterscheidung nach Glatt- und Festwalzen. Während die Zielstellung des Glattwalzens auf der Herstellung hochwertiger Oberflächen liegt, ist die Zielstellung des Festwalzens die Kaltverfestigung und Einbringung von Druckeigenspannungen in die Randzone. Dadurch trägt das Festwalzen zu einer Steigerung der Lebensdauer von dynamisch beanspruchten Bauteilen bei. Beim Festwalzen kommt es zudem zu einer Glättung der Oberfläche. Die Vorteile des Walzverfahrens liegen in seiner Wirtschaftlichkeit und Ressourceneffizienz, da die einfache Integrierbarkeit des Walzwerkzeuges in konventionelle oder CNC-gesteuerte Werkzeugmaschinen und kurze Bearbeitungszeiten in geringen Energiebedarfen und Investitionskosten resultieren.

Das Verfahren wird bereits in vielen Anwendungen im Automobil- und Motorenbau oder auch bei Schienenfahrzeugen eingesetzt, hingegen liegen nur vereinzelt Ansätze zur Nutzung des Verfahrens bei Wälzlagern vor. Dabei bietet die Wälzlagerindustrie ein hohes Anwendungspotential für den Einsatz des Hochleistungsverfahrens Hartwalzen. Wälzlager gehören zu den am häufigsten eingesetzten Maschinenelementen und beeinflussen häufig das Betriebsverhalten und die Lebensdauer von Produktionsmaschinen und -anlagen. [1-3] Bisher haben fehlende Werkzeugkonzepte für die Bearbeitung typischer Lagergeometrien die Implementierung des Verfahrens in der Wälzlagerindustrie verhindert.

## 2 Motivation

Die Implementierung des Verfahrens Hartwalzen in die Herstellung von Wälzlagern hat die Steigerung der Ermüdungslebensdauer durch gezielte Einbringung von Druckeigenspannungen zum Ziel und ist schematisch in Bild 1 dargestellt. Der Walzkörper erzeugt durch die Normalkraft einen Druck, der zu einer Umformung auf der Werkstückoberfläche führt und das Rauheitsprofil einebnet sowie zusätzlich Spannungen induziert [4]. Die positive Spannungsrichtung  $\sigma_x$  wurde in Vorschubrichtung und  $\sigma_z$  in Normalkraftrichtung festgelegt. Nachweislich stehen Druckeigenspannungen in direktem Zusammenhang zur Lebensdauer von Wälzlagern. Unter anderem erfolgte ein empirischer Nachweis im Rahmen des BMBF-Projektes „PlanPP (FKZ 02PO2330-2335)“ [3, 5]. Die Druckeigenspannungen wirken dem Rissfortschritt im Wälzkontakt entgegen und tragen damit zu einer Erhöhung des Widerstandes gegen Oberflächenzerrüttung und einer Verbesserung der Wälzfestigkeit bei [3, 6, 7],

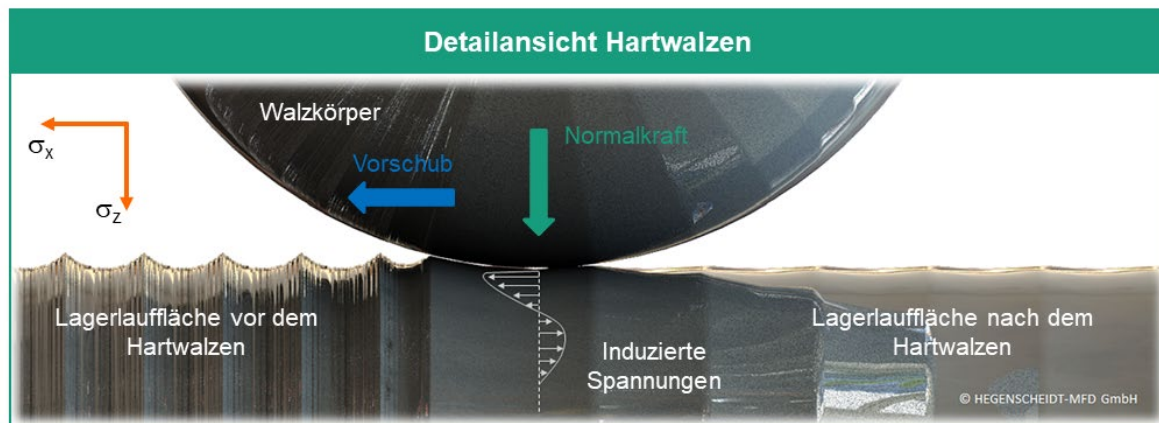


Bild 1. Eingriff Walzkörper auf dem Werkstück vor und nach der Bearbeitung angelehnt an KLOCKE [4]. Bildquelle von HEGENSCHIEDT-MFD GmbH [8]

Hybridwälzlager haben Ringe aus Wälzlagerstahl und Wälzkörper aus Keramik und kommen überwiegend in Anwendungen mit ungünstigen Betriebsbedingungen zum Einsatz. Beispiele sind Rad- und Getriebelagerungen im Motorsport, Anwendungen in der Lebensmittelindustrie, der Medizintechnik und der Luftfahrt. Sie weisen gegenüber konventionellen Stahllagern bessere tribologische Eigenschaften auf, wodurch lagerbedingte Wartungsintervalle erhöht und Kosten reduziert werden können. Die kritische Komponente in Hinblick auf die Lebensdauer sind die Lagerringe. Hierbei sind primär zwei Versagensursachen für eine reduzierte Lebensdauer verantwortlich:

1. Ermüdungsschäden infolge fortlaufender Schwellbelastungen (engl. Spalling), die zu flächigen Materialabschälungen an der Oberfläche führen und damit einen Ausfall des Wälzlagers zur Folge haben [9].
2. Schmierungszustand, z.B. Mangelschmierung mit unzureichender Trennung der Kontaktpartner und infolge dessen ansteigendem Verschleiß mit zeitnahe Lagerausfall.

Diesen beiden Ausfallmechanismen kann durch eine gezielte Auslegung und Fertigung der oberflächennahen Bauteileigenschaften in der Bauteilrandzone entgegengewirkt und somit eine Verlängerung der Lebensdauer erreicht werden. Dies kann durch die Einbringung von oberflächennahen Druckeigenspannungen zur Verhinderung der Rissfortpflanzung und der Verbesserung des Schmierfilmaufbaus durch Oberflächenglättung geschehen. [5, 10, 11] Die Induzierung von Druckeigenspannungen in Lagerringen erfordert die Entwicklung eines neuen Werkzeugkonzeptes, da keines der bestehenden die Zugänglichkeit des Werkzeuges bietet. Zusätzlich ist eine für das Hartwalzen angepasste Prozesskette notwendig.

### 3 Walzverfahren und Werkzeugentwicklung

Im Rahmen der Prozess- und Werkzeugentwicklung wurden zwei Prozesskinematiken betrachtet: das Walzen im Einstichverfahren und das Walzen im Vorschubverfahren. Für beide Varianten wurde durch die Fa. HEGENSCHIEDT-MFD GmbH ein Werkzeug entwickelt und gefertigt. Beide Werkzeuge wurden für Untersuchungen an einfachen Probenkörpern (Axiallagerscheiben) und typischen Schrägkugellagern eingesetzt.

Das Walzen im Einstichverfahren (Bild 2a) erfolgte mit einem großen Wälzkörper, einer Rolle, die eine hohe Überdeckung zur zu bearbeitenden Lauffläche aufwies. Dadurch waren sehr kurze Prozesszeiten realisierbar. Die Bearbeitung von Bauteilen erfolgte bei hohen Walzdrücken, damit bei der hohen Überdeckung genug Druck erzeugt wird, um eine Verfestigung zu realisieren. Durch die hohen Bearbeitungsdrücke und die erforderliche Geometrieangepassung des Wälzkörpers an das zu bearbeitende Bauteil ergaben sich Einschränkungen beim Einsatz des Verfahrens.

Das Vorschubwalzen (Bild 2b) unterscheidet sich vom Einstichverfahren durch den Einsatz einer kleineren Wälzkörpergeometrie. Über einen definierten Vorschub wird die Kontur des Lagerrings mit dem Wälzkörper abgefahren. Dadurch erhöhte sich die Prozesszeit gegenüber dem Einstichverfahren, jedoch nimmt die Flexibilität des Verfahrens in Bezug auf die zu bearbeitenden Bauteile zu.

Bei einer Bearbeitung von gekrümmten Flächen, wie es bei der Laufbahn eines Schrägkugellagers in Bild 2 der Fall ist, war eine kraftbasierte Lagerung des Wälzkörpers erforderlich, sowie ein Werkzeugdesign, welches die Bearbeitung von Innen- und Außenring eines Schrägkugellagers ermöglicht. Im Rahmen des Projektes wurde sowohl ein Werkzeug für das Einstichverfahren verwendet, schematisch in Bild 2a dargestellt und ein Werkzeug für das Vorschubverfahren verwendet, in Bild 2b dargestellt.

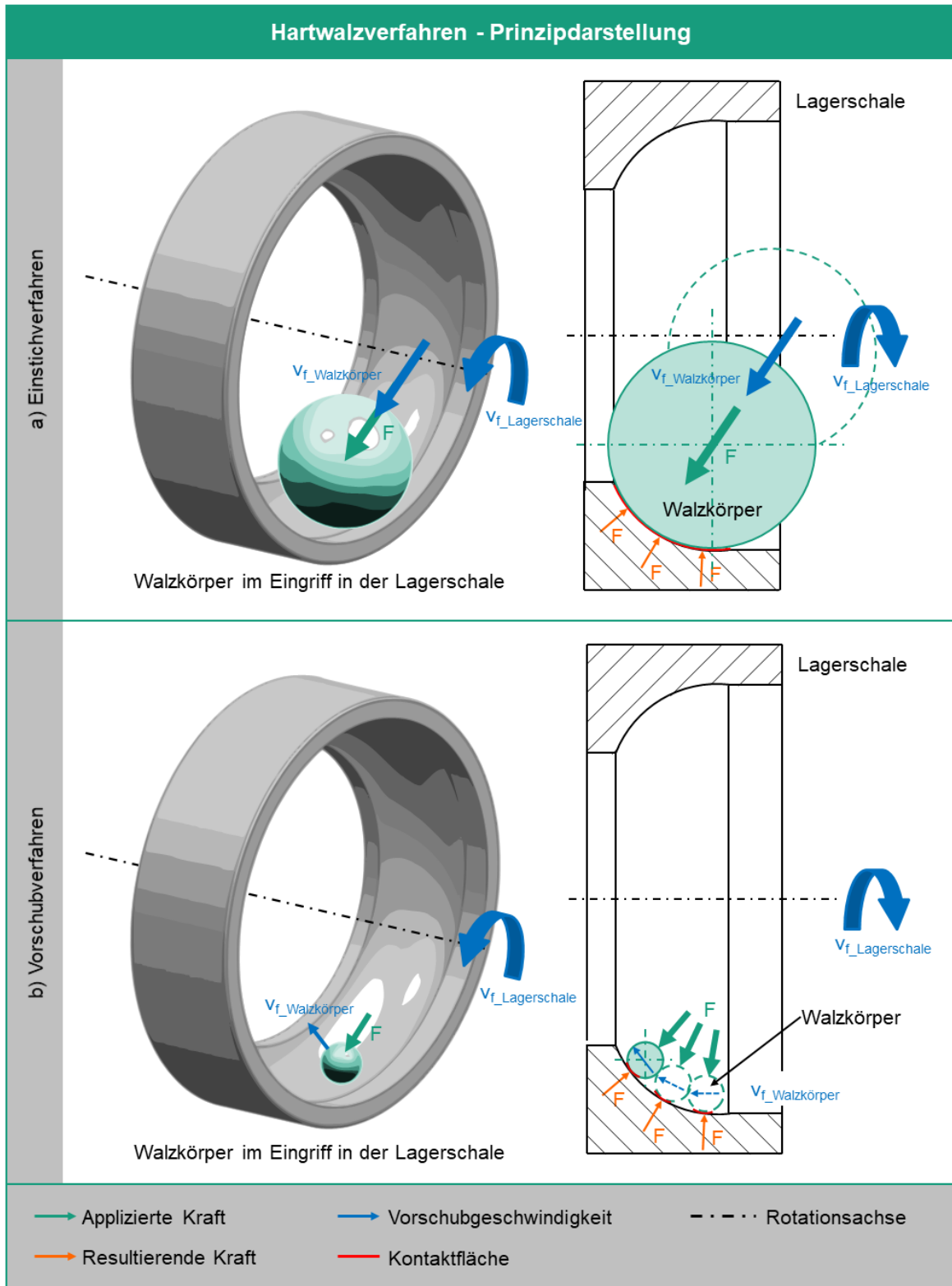


Bild 2. Schematische Darstellung der Hartwalzverfahren Vorschub und Einstich

Das durch die Fa. HEGENSCHIEDT-MFD GmbH für das Vorschubwalzen entwickelte Werkzeug lässt sich mittels geringer Anpassungen in unterschiedlichen Bearbeitungsmaschinen anwenden. Dies war die Voraussetzung, um einen Betrag für ressourceneffiziente Nutzung des Fertigungsverfahrens Hartwalzen zu erfüllen. Aus dem gleichen Grund wurde bei der Auslegung des Werkzeuges auf eine robuste und langlebige mechanische Lagerung ohne den Einsatz von Zusatzmedien geachtet. Neben den geringen Anforderungen an die Bearbeitungsmaschine hinsichtlich notwendiger Walzkraft, kann mittels Schnittstellen der Prozess überwacht werden und der Bearbeitungsaufgabe ressourcenschonend

angepasst werden. [8]

#### 4 Experimentelle Untersuchung

Die Arbeiten erfolgten an Axiallagerscheiben als einfache Probenkörper, die eine hohe Reproduzierbarkeit und damit Vergleichbarkeit der Bearbeitung ermöglichten. Die Charakterisierung umfasste zum einen Merkmale wie Geometrie, Oberflächengüte und Form- und Lagetoleranzen durch die Fa. CEROBEAR GmbH, zum anderen die Randzoneneigenschaften wie Eigenspannungen und Härteprofil. Die Charakterisierung der Randzoneneigenschaften erfolgte durch die Firma SCHMITZ-METALLOGRAPHIE GmbH, die ebenfalls eine Charakterisierung der Randzone mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) durchführte. Die Eigenspannungen wurden zerstörungsfrei mittels Röntgenbeugung (XRD) charakterisiert. Die physikalische Grundlage dieser Röntgenfeinstrukturanalyse ist die Beugung kurzwelliger Röntgenstrahlung an den räumlich regelmäßig angeordneten Netzebenen einer Netzebenenschar, wie in Bild 3 dargestellt.

Die Geometrie der Beugung wird dabei durch das BRAGG Reflexionsgesetz beschrieben. Dabei ist  $\lambda$  die konstante Röntgenstrahlwellenlänge und  $n$  die Beugungsordnung. Der Beugungswinkel  $\vartheta$  steht in Abhängigkeit vom Netzebenenabstand  $d$ . Für jede ganze Zahl  $n$  tritt eine Verstärkung der reflektierten Röntgenstrahlung auf, sofern die BRAGG Reflexionsgleichung erfüllt ist.

Eigenspannungen führen zu einer Dehnung oder Stauchung des Gitters, so dass sich der Winkel ändert, unter dem die Röntgenstrahlung reflektiert wird. Durch Drehen und Schwenken des Prüfkörpers um verschiedene Winkel kann aus den gemessenen Reflexlagen die Eigenspannung mit Hilfe des E-Moduls berechnet werden. Durch elektrolytischen Oberflächenabtrag kann auch das Eigenspannungs-Tiefenprofil charakterisiert werden.

Das verwendete Koordinatensystem für die Spannungsrichtungen ist in Bild 3 dargestellt. Dabei ist die Applikate senkrecht zur Lauffläche des Lagerringes und die Abszisse entlang der Lauffläche angeordnet. Dadurch sind die Abszisse und Ordinate einheitlich festgelegt und dienen als definierte Messrichtung. Ferner kann davon ausgegangen werden, dass die Spannungen in Richtung der Applikate am kleinsten sind und die Annahme eines ebenen Spannungszustandes ermöglichen. Aus den gemessenen Spannungen in  $\sigma_x$  (Abszisse) und  $\sigma_y$  (Ordinate) wurden die Hauptnormalspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  bestimmt, dessen Orientierung mit dem Winkel  $\varphi$  angegeben ist. In dem Projekt Hartwalzen wurden nur die maximalen Druckeigenspannungen unabhängig ihrer Richtung untersucht, da kein Einfluss durch die Spannungsrichtung erwartet wurde und das Werkzeug nicht dafür ausgelegt wurde, Spannungen in eine gezielte Richtung zu applizieren.

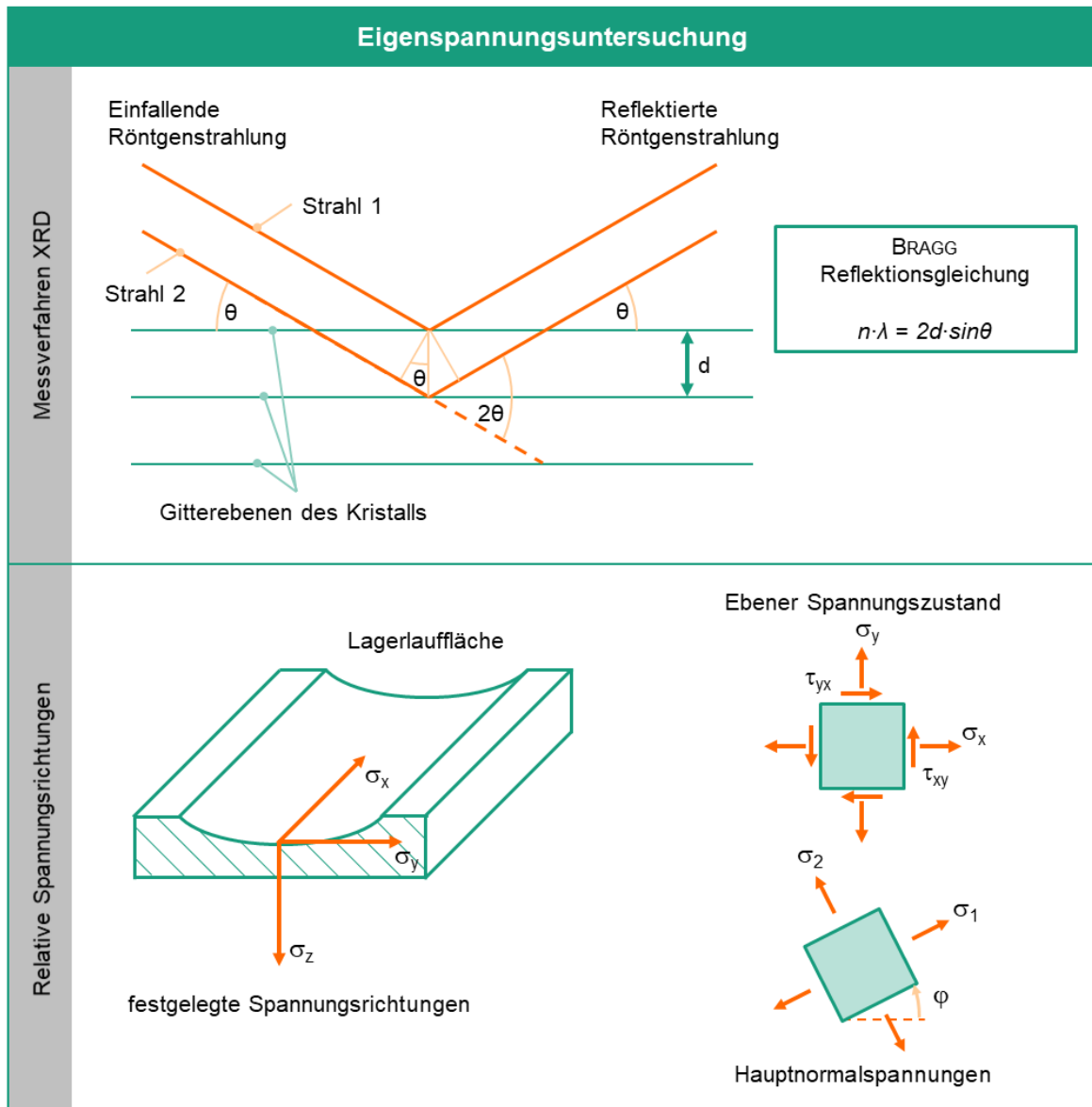


Bild 3. Eigenspannungsmessverfahren und festgelegte Spannungsrichtungen

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundprojektes „Entwicklung eines Planungswerkzeuges zur funktionsgerechten Auslegung und Herstellung von Produkteigenschaften für Prozesse der Hartfeinbearbeitung“ konnten bereits erste Ergebnisse zum Einfluss des Hartwalzens auf die Wälzfestigkeit gewonnen werden [5]. Anhand von Analogiebauteilen wurde nachgewiesen, dass induzierte Druckeigenspannungen zu einer signifikanten Lebensdauererhöhung führen. Ferner bestand Erfahrungswissen aus internen Versuchen der Projektpartner, welches sich in der Wahl der Versuchsparameter für das Hartdrehen und Hartwalzen abbildet. Die größten Einflüsse zur Induzierung von Druckeigenspannungen beim Hartdrehen ergeben sich durch den Vorschub der Schneide und durch den Schneidenradius. Ein Kriterium zur Bewertung des Verfahrens Hartwalzen war der Walzdruck, welcher über die Walzkraft und Kontaktfläche eingestellt wird. Die Kontaktfläche wurde bedingt durch das Werkzeug nicht variiert und nur die Walzkraft hat die Höhe und den Verlauf des Eigenspannungsniveaus beeinflusst.

In Bild 4 ist eine Übersicht der Versuchsparameter für a) das Hartdrehen und b) das Hartwalzen angegeben.

Die Untersuchungen erfolgten an zwei Prozessketten. Diese umfassten die Prozesskette mit dem Verfahren Hartdrehen zur Herstellung metallischer Wälzlagerringe aus einem HNS-Stahl (High nitrogen steel) mit einer Härte von 58 HRC, sowie die Prozesskette mit anschließendem Hartwalzen. Zur Identifikation geeigneter Hartdrehparameter als optimale Vorbereitung der Oberfläche für den nachfolgenden Walzprozess erfolgte eine Variation der Drehparameter. Insgesamt wurden drei verschiedene Parametersätze unter Variation des Vorschubs und des Schneidenradius untersucht: ein Referenzsatz und zwei Versuchsparametersätze. Satz 2 wurde mit höherem Vorschub und größerem Schneidenradius, Satz 3 mit geringerem Vorschub und gleichem Schneidenradius gegenüber der Referenz bearbeitet.

Die anschließende Bearbeitung zum Hartwalzen wurden auf Basis der Hartdrehbearbeitung nach Versuchsparametersatz 2 durchgeführt, da die Bearbeitung auf Grund des Vorschubes und des Schneidentyps schneller

ist, Beide Sätze befanden sich in den geforderten Form- und Lagertoleranzen von Lagerringen, aber Satz 3 wies zusätzlich Ausbrüche auf der Oberfläche auf, die zu Schädigungen im späteren Betrieb und zu weiteren Schädigungen während des Hartwalzens führen könnten. Die Walzkkräfte in den Versuchsparametern zum Hartwalzen sind so gewählt, dass sich ein vergleichbarer Walzdruck für das Einstich- und Vorschubverfahren abhängig ihrer Walzkörpergeometrie ergibt.

Versuchsparameter			
a) Hartdrehen	Untersuchungssatz	Vorschub [%]	Schneidenradius
	HNS Satz 1 (Referenz)	100	Typ 1
	HNS Satz 2	400	Typ 2 > Typ 1
	HNS Satz 3	50	Typ 1
b) Hartwalzen	Untersuchungssatz	Einstichverfahren Walzkraft [N]	Vorschubverfahren Walzkraft [N]
	HNS Satz 2	3560 - 14200	6 - 90

Bild 4. Übersicht der Versuchsparameter für das Hartdrehen und Hartwalzen

Das Hauptkriterium für die Auswahl eines geeigneten Walzdrucks für das Hartwalzen waren die Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen. In Bild 5 sind die Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen an Probenkörpern, die nach dem ausgewählten Versuchsparametersatz 2 bearbeitet wurden, dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass im untersuchten Parameterbereich die Eigenspannungen mit dem Einstichverfahren (Bild 5a) tiefer ins Material eingebracht werden konnten als mit dem Vorschubverfahren (Bild 5b). Der Eigenspannungsverlauf in die Tiefe vom Einstichverfahren wies zwei Maxima auf. Mit dem Vorschubverfahren wurden hingegen höhere Druckeigenspannungen bei nur einem Maximum im Eigenspannungsverlauf erzielt. Die maximalen Druckeigenspannungen wurden bei der Hauptnormalspannung  $\sigma_2$  gemessen. Der Nulldurchgang von Druck- zu Zugspannungen von der Materialoberfläche wurde als Tiefe der Druckeigenspannungen definiert.

Bereits bei geringen Walzdrücken wurde im Vorschubwalzen gegenüber der Vorbearbeitung eine Steigerung der Druckeigenspannungen im Bereich von 40% erreicht. Höhere Walzdrücke führten nicht zu einer weiteren Erhöhung der oberflächennahen Druckeigenspannungen. Die größte Tiefe der Eigenspannungen im Material wurde für eine Walzkraft von 90 N ermittelt. Für die Lebensdaueruntersuchungen von Axialagerscheiben wurde aufgrund der höheren Flexibilität der bearbeitbaren Geometrien und aufgrund des Eigenspannungsverlaufes nur das Vorschubwalzen weiter betrachtet.

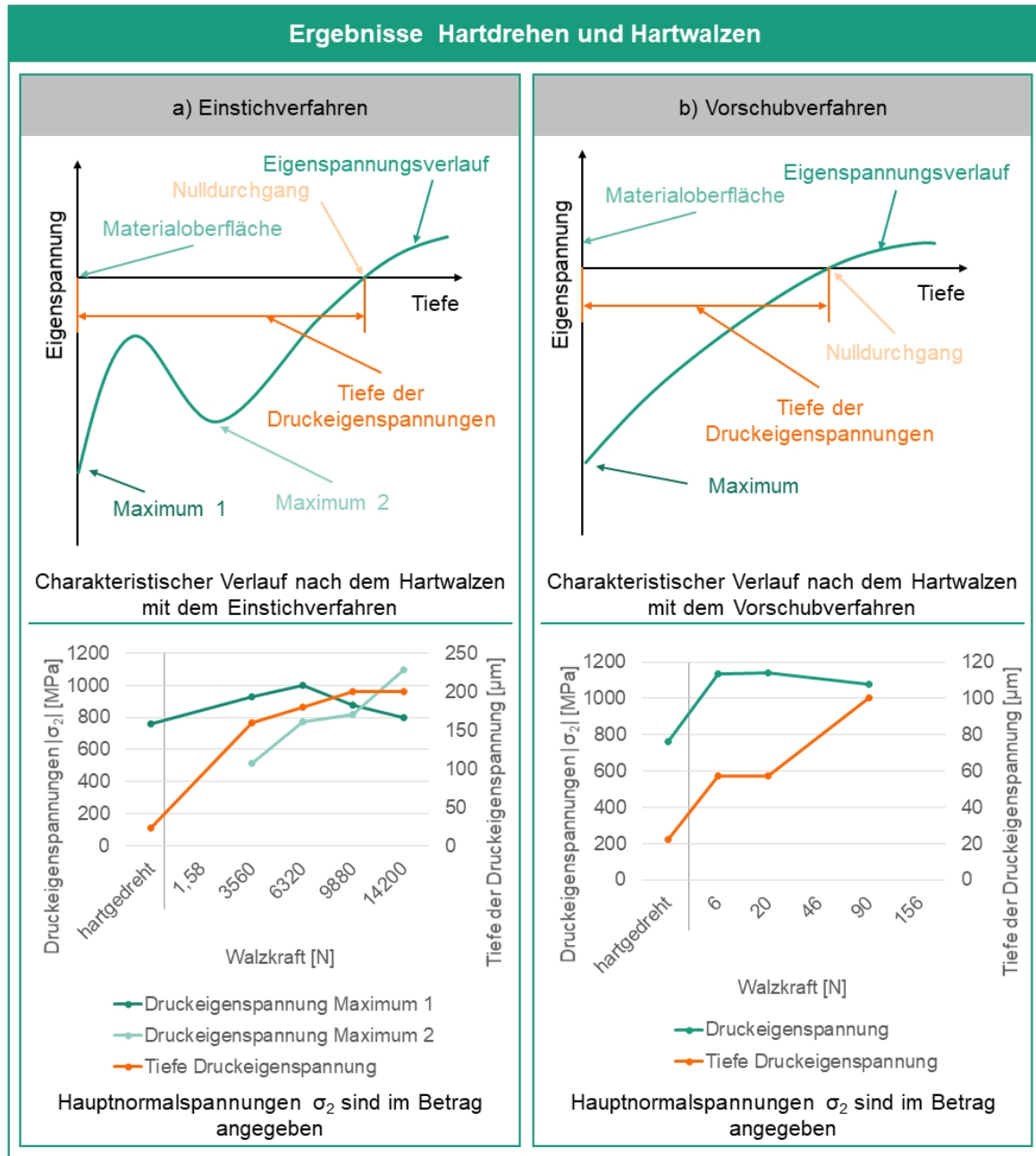


Bild 5. Ergebnisse der Druckeigenspannung vom Hartdrehen und Hartwalzen [12, 13]

## 5 Lebensdaueruntersuchung

An den Axiallagerscheiben (HNS Satz 2), die zur Auswahl und Bewertung einer geeigneten Hart- und Walzbearbeitung eingesetzt wurden, konnte der Einfluss der Prozesskette und der resultierenden Bauteileigenschaften durch Lebensdaueruntersuchungen bei wälzlagertypischer Belastung nachgewiesen werden.

Die Versuche wurden auf speziell für diese Fragestellung entwickelten Wälzlagerprüfständen durchgeführt. Alle Versuche wurden unter festgelegten Bedingungen bei gleichen Parametern (Drehzahl, HERTZ Pressung) und EHD-Schmierung durchgeführt. Durch die Wahl der Schmierung konnte ein Versagen aufgrund von Ermüdung und damit gleichem Ausfallmechanismus sichergestellt werden, dieses Vorgehen resultierte jedoch in langen Versuchszeiten. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte mittels Lebensdaueranalyse nach WEIBULL. Dafür wurde jeweils eine Anzahl Probenkörper definiert, die bis zum Ausfall getestet werden sollen. Die Ergebnisse sind in Bild 6 dargestellt. Aufgrund der hohen Laufzeiten der hartgewalzten Proben stehen die Ergebnisse der Lebensdaueruntersuchungen noch nicht vollständig zur Verfügung, die Auswertung zeigt daher nur eine Tendenz der zu erwartenden Ergebnisse. Dies ist auch in den Ausfällen ersichtlich, da die hartgedrehten und anschließend hartgewalzten Proben nur zwei Ausfälle aufweisen, hingegen zeigen die hartgedrehten Prüfkörper bereits 10 Ausfälle durch Ermüdung. Der Formparameter  $\beta$  gibt an,

welche statistische Verteilung für die Ausfälle angenommen werden kann. Ein Wert größer 1 sagt damit aus, dass die Ausfälle auf Grund von Ermüdung aufgetreten sind und es sich nicht um zufällige Ausfälle oder Verschleißausfälle handelt.

Bei Setzung der Ergebnisse der hartbearbeiteten Proben als Referenz zu 1 ergibt sich durch das Verfahren Hartwalzen nach derzeitigem Stand eine Steigerung der Lebensdauer um den Faktor 3,2.

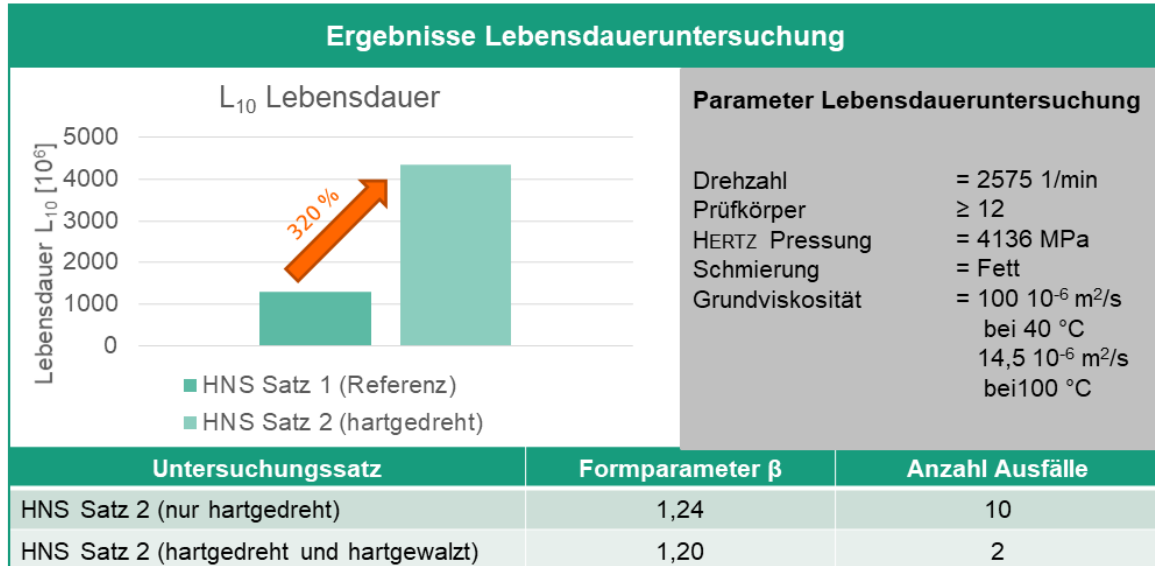


Bild 6. Ergebnisse der Lebensdaueruntersuchung [13]

## 6 Fazit

Für das Hartwalzen von Hybridlagern wurde eine Prozesskette aus Hartdrehen und Hartwalzen entwickelt, die nachweislich eine Erhöhung der Lebensdauer erzielt. Dies wurde ermöglicht durch die Entwicklung eines Hartwalzwerkzeuges für die Bearbeitung von Innen- und Außenring von Lagern. Das Werkzeug ermöglicht die Einbringung von Druckeigenspannungen in die Laufflächen der Lagerringe, was zu einer Verfestigung und Einglättung führt und in einer Lebensdauersteigerung der Lager resultiert. Es wurden zwei Verfahren zum Induzieren von Druckeigenspannungen untersucht, das Einstichverfahren und das Vorschubverfahren. Das Vorschubverfahren erwies sich als bevorzugtes Verfahren, da es bei mehreren Lagertypen verwendet werden kann und die Ergebnisse der Eigenspannungsverläufe eine Erhöhung der Druckeigenspannungen um 40% zeigten. Eine Lebensdaueruntersuchung der Lagerringe, welche mit dem Vorschubverfahren hartgewalzt wurden, wiesen eine Steigerung der Lebensdauer um den Faktor 3,2 im Vergleich zu den nur hartgedrehten Lagerringen auf.

**Stichwörter:** Hartwalzen, Lebensdauersteigerung, Lagerringe

**Danksagung:** Die Autoren danken dem Land Nordrhein-Westfalen unter Einsatz von Mitteln aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) [0800344] 2014-2020 „Investition in Wachstum und Beschäftigung“ für die Bereitstellung der finanziellen Mittel zur Durchführung der den vorgestellten Ergebnissen zugrundeliegendem Forschungsprojekt. Ferner wird dem Projektteam „Hartwalzen von Lagerringen“ gedankt.



**CEROBEAR®** Schmitz  
ceramic bearing technology Metallographie GmbH

### Autorenangabe:

K. Jahnel M.Sc, S. Hähnel M.Sc, T. Grunwald M.Sc, Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs MBA  
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT  
Steinbachstr. 17, 52074 Aachen  
Tel. +49 (0)241 / 8904-127  
E-Mail: Kirk.Jahnel@ipt.fraunhofer.de  
Internet: www.ipt.fraunhofer.de

### Literatur



- [1] Kuhn, M. H.: Verschleißschutzkonzepte für Wälzlager mittels PVD-Beschichtungen. Aachen: Mainz 2006
- [2] Möller, M.: Untersuchungen zur Leistungssteigerung von Hybrid-Wälzlagern im Trockenlauf durch PVD-Beschichtungen. Aachen: Mainz 2001
- [3] Sadeghi, F.; Jalalahmadi, B.; Slack, T. S. et al.: A Review of Rolling Contact Fatigue. *Journal of Tribology* 131 (2009) 4, S. 14
- [4] Klocke, F.; König, W.: *Fertigungsverfahren 4. Umformen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006
- [5] Klocke, F. (Hrsg.): *Methodik zur Identifizierung von funktionsrelevanten Oberflächen- und Randzoneneigenschaften in der Hartfeinbearbeitung*. Ergebnisbericht des BMBF Verbundprojektes PlanPP. Aachen: Apprimus-Verl. 2012
- [6] Czichos, H.; Habig, K.-H. (Hrsg.): *Tribologie-Handbuch*. Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik. Wiesbaden: Springer Vieweg 2015
- [7] Choi, Y.: A study on the effects of machining-induced residual stress on rolling contact fatigue. *International Journal of Fatigue* 31 (2009) 10, S. 1517–1523
- [8] Hegenscheidt-MFD GmbH: Ergebnisse aus dem Projekt Hartwalzen. A Member of the NSH-Group (2020)
- [9] Schaeffler AG: *Wälzlagerschaden. Schadenserkenntung und Begutachtung gelaufener Wälzlager*. Firmenschrift. Schweinfurt 2011
- [10] Kleinlein, E.: *Einsatz von Wälzlagern bei extremen Betriebs- und Umgebungsbedingungen. Optimierung durch geeignete Konstruktion und Entwicklung von Wälzlagern, Schmierung und Abdichtung ; mit 25 Tabellen*. Renningen-Malmsheim: expert-Verl. 1998
- [11] Sommer, K.; Heinz, R.; Schöfer, J.: *Verschleiß metallischer Werkstoffe. Erscheinungsformen sicher beurteilen*. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014
- [12] Schmitz-Metallographie GmbH: Ergebnisse aus dem Projekt Hartwalzen von Lagerringen 2020
- [13] Cerobear GmbH: Ergebnisse aus dem Projekt Hartwalzen von Lagerringen (2020)