

Bild 5: Überwachungsmöglichkeiten für den Zustand des Drehgestells.

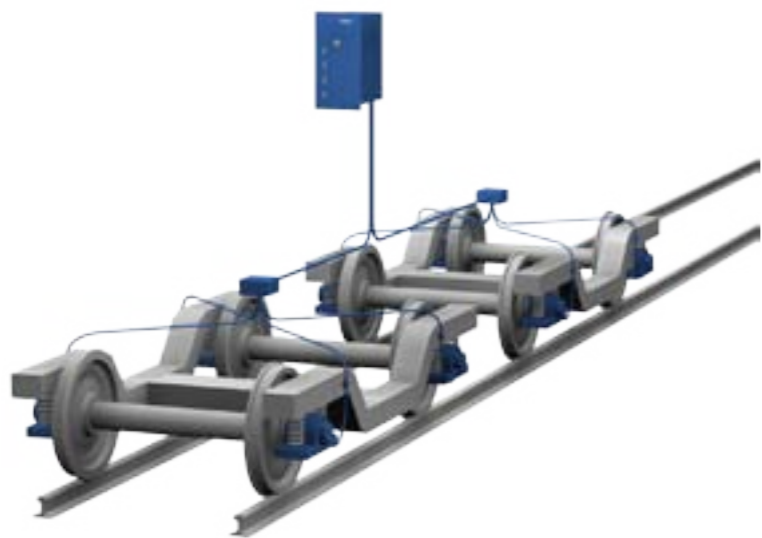


Bild 6: Aufbau eines Drehgestell-Zustandsüberwachungssystems.

chungssysteme. Die SKF Axletronic Lagereinheiten mit integrierten Sensoren für Schienenfahrzeuge sind ein wesentlicher Bestandteil von Überwachungssystemen.

Zustandsüberwachung bei Drehgestellen

Das bordseitige Multilog Radsatzlager-Zustandsüberwachungssystem IMx-R von SKF kann Teil des Zustandsüberwachungssystems des Drehgestells eines Schienenfahrzeugs sein oder als eigenständiges System arbeiten (Bild 5 und 6). Dieses System erfüllt auch die Anforderungen

der Technischen Spezifikation für die Interoperabilität (TSI) gemäß EU-Richtlinie 96/48/EG.

In dieser Spezifikation ist festgelegt, dass das System in der Lage sein muss, eine Zustandsverschlechterung des Radsatzlagers festzustellen, und zwar durch Überwachung der Temperatur und/oder der dynamischen Frequenzen. Die Wartungsanforderung wird vom System generiert und zeigt abhängig vom Ausmaß des Lagerschadens die Notwendigkeit für Betriebseinschränkungen an. Das Erkennungssystem

tem arbeitet an Bord des Zuges vollkommen unabhängig und die Diagnosemitteilungen werden dem Zugführer mitgeteilt. Dieses System erfüllt die Anforderungen der Norm EN 15437-2.

Leistungspakete von SKF

In über 100 Jahren ist SKF zum Synonym für moderne Lagertechnik und zum weltweit führenden Lieferanten der Bahnindustrie geworden. Abgesehen von dieser soliden Wissensbasis ist SKF auch ein führender Anbieter von Produkten und Lösungen in den Bereichen Mechatronik-, Dichtungs- und Schmiersysteme sowie von Dienstleistungen für verschiedene Anwendungen (Bild 1).

Das gegenwärtige und künftige Lieferprogramm von SKF für die Bahnindustrie beinhaltet Radsatzlagereinheiten einschließlich Dichtungslösungen und maßgeschneiderte Radsatzlagergehäuse sowie Mechatronik-Systemlösungen zur Betriebsparametermessung und Drehgestell-Zustandsüberwachung. Zu den Schmiersystemen gehört auch die Spurkranzschmierung zur Verringerung von Reibung und Verschleiß zwischen Rad und Schiene. Die Leistungspakete werden nach den Wünschen der Hersteller und Betreiber von Schienenfahrzeugen geschnürt und beinhalten folgende Elemente: Prüfung, Montage, weltweites Ersatzteilversorgungsamt Service, Wiederinstandsetzung und logistische Dienstleistungen. Dank ihres einzigartigen weltweiten Netzes von Vertriebsleuten, Anwendungsingenieuren und Servicetechnikern kann SKF bei internationalen Projekten eng mit Schienenfahrzeugherstellern und -betreibern zusammenarbeiten.

Schlussfolgerung

In der Vergangenheit war die Entwicklung stark darauf ausgerichtet, geeignete Lagerausführungen zu konstruieren, die nun weiter ver-

Neues Modell zur Berechnung der statischen Tragzahl induktionsgehärteter Lager

SKF arbeitet ständig daran, die Einflüsse von Härteverfahren auf die Lagerleistungsfähigkeit besser zu verstehen. In einer kürzlich durchgeführten Studie haben SKF Ingenieure untersucht, welche Bedeutung die Einhärtungstiefe für die Tragfähigkeit eines Lagers hat.

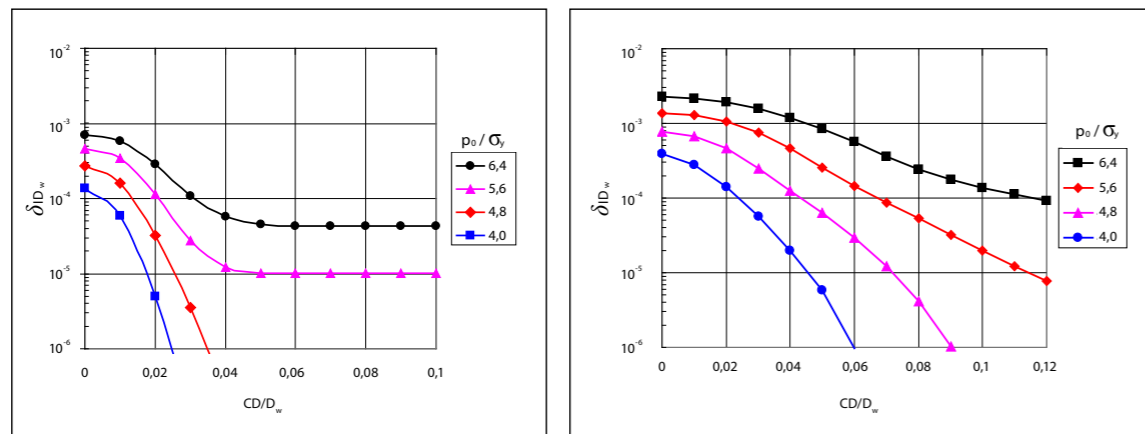
GROSSSCHWENKLAGER werden meist durch induktives Erhitzen oberflächengehärtet. Die Tragfähigkeit von Lagern ist u. a. auch abhängig von der Dicke der Härteschicht, d. h. von der Einhärtungstiefe. Lagerhersteller müssen daher für eine ausreichende Härtungstiefe sorgen, damit die erforderlichen Tragzahlen für die jeweilige Lageranwendung erreicht werden.

Für durchgehärtete Lager sind Berechnungsverfahren für die statischen und dynamischen Tragzahlen verfügbar, die in den ISO-Normen 76 und 281 anerkannt sind. Früher verstand man unter der statischen Tragzahl die einem nicht drehenden Lager aufgebrachte statische Belastung, die zu einer bleibenden Laufbahnverformung von $10^{-4}D_w$ (D_w = Wälzkörperdurchmesser) am schwächsten Punkt der Innen- bzw. Außenring-Laufbahnberührungspunkte des am meisten belasteten Wälzkörpers führt [1]. Später wurden in der ISONorm 76 [2] zur Berechnung der statischen Tragzahl von Wälzlagern folgende Berührungsdrukhöchstwerte eingeführt: 4.000 MPa bei Linienberührung und

4.200 MPa bei Punktberührung.

Im Vergleich zu den durchgehärteten Lagern ist das Berechnungsverfahren für die Tragfähigkeit von randschichtgehärteten Lagern, insbesondere von induktionsgehärteten Lagern, noch immer nicht allgemein anerkannt, obgleich entsprechende Bemühungen unternommen wurden [3, 4]. Dies ergibt sich aus dem komplexen Sachverhalt heraus, dass die Tragfähigkeit eines randschichtgehärteten Lagers auch von der Einhärtungs-Härtungstiefe und der Festigkeit des Kernmaterials abhängig ist. Eine nicht ausreichende Einhärtungs-Härtungstiefe kann ein Durchdrücken des Kerns zur Folge haben. Ein schweres Materialversagen, bei dem sich in der Härteschicht Risse und Ablätterungen bilden, und zwar aufgrund von übermäßigem plastischen Fließen im Kern.

Die durchgeführte Studie behandelt schwerpunktmäßig die statische Tragfähigkeit von Lagern mit induktionsgehärteten Ringen. Zur Bestimmung der statischen Tragfähigkeit eines oberflächengehärteten Lagers müssen zwei Aspekte aufgrund der aufgebrachten statischen Belastung berücksich-



(a): Punktberührung (PC)

(b): Linienberührung (LC)

Bild 1: FE-Berechnungsergebnisse der plastischen Verformungstiefe δ in Abhängigkeit von der Härtungstiefe CD resultierend aus unterschiedlichen statischen Belastungen ausgedrückt durch die Hertz'sche Pressung p_0 . δ und CD werden durch den Wälzkörperdurchmesser D_w normalisiert, während p_0 durch die Dehngrenze des Kernmaterials σ_y normalisiert wird.

sichtigt werden: die bleibende Laufbahnverformung und die Schädigung unter der Oberfläche. Während Erstere für einen ruhigen Lagerlauf sorgt, wird mittels Letzterer sichergestellt, dass die Lagerlaufbahn unverseht bleibt bzw. keine Zerquetschung des Kerns eintritt. Weitere Einzelheiten zu diesem Modell sind in [5] zu finden.

Modellierungen von Oberflächenverformungen

Bleibende Oberflächenverformung
Die bleibende Verformung einer Lagerlaufbahn aufgrund statischer Belastung ist von großer Bedeutung. Um das Materialverhalten von induktionsgehärteten Ringen zu untersuchen, wurde eine Finite-Elemente (FE)-Analyse auf einer induktionsgehärteten Oberfläche durchgeführt, die einen Eindruck von einem Wälzkörper aufwies. Die elastisch-plastischen Eigenschaften der in der FE-Analyse verwendeten Randschicht- und Kernmaterialien wurden experimentell bestimmt. Bild 1 zeigt die Tiefe der plastischen Ver-

formung δ , die daraus resultiert, dass eine Kugel bzw. eine Zylinderrolle in eine flache Oberfläche mit unterschiedlichen Härtungstiefen eingedrückt wird.

Um die plastische Verformung eines induktionsgehärteten Rings zu formulieren, betrachten wir zunächst einen aus homogenem Stahl gefertigten Ring. Hier sind die Härte und Mikrostruktur des Stahls durchgehend einheitlich wie bei einem durchgehärteten bzw. ungehärteten Ring. Die Tiefe der plastischen Verformung (δ) kann mit dem Berührungsdruk (p_0) und der Festigkeit (Dehngrenze) (σ_y) des Materials wie folgt in Beziehung gesetzt werden:

$$\frac{\delta}{D_w} = k \left\langle \frac{\alpha p_0}{\sigma_y} - 1 \right\rangle^2 \quad (1)$$

In Gleichung 1 wird die McCauley-Einschränkung verwendet, d. h., der Ausdruck in der Klammer wird auf Null gesetzt, wenn die enthaltene Größe negativ ist. Der Koeffizient α beruht auf dem Verhältnis zwischen dem Berührungsdruk p_0 und der höchsten von Mises-Spannung $\sigma_{e,max}$ unter der Oberfläche, d. h., $\sigma_{e,max} = \alpha p_0$. Im Falle von Punktberührung (PC) gilt $\alpha =$

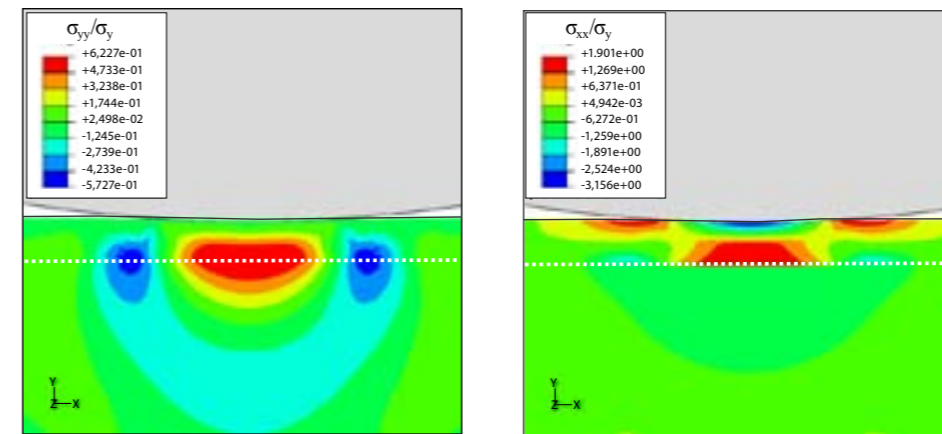
0,62, bei Linienberührung (LC) $\alpha = 0,56$. Der Koeffizient k ist abhängig von der Dehngrenze oder der Härte des Materials und kann durch Anpassung der Gleichung an die FE-Berechnungswerte in Bild 1 bestimmt werden.

Bei einer induktionsgehärteten Oberfläche resultiert die plastische Verformung aus der Randschicht und dem Kern. Die jeweilige Aufteilung zwischen beiden ist abhängig von der Härtungstiefe CD. In Betracht dessen kann Folgendes festgestellt werden:

$$\frac{\delta}{D_w} = \rho \left(\frac{\delta}{D_w} \right)_{core} + (1 - \rho) \left(\frac{\delta}{D_w} \right)_{case} \quad (2)$$

Hierbei stehen $(\delta/D_w)_{case}$ und $(\delta/D_w)_{core}$ für die plastische Verformung der Randschicht („Case“) und des Kerns („Core“), die sich aus Gleichung 1 ergibt. Der Aufteilungsparameter ρ wird bestimmt von der Härtetiefe CD und dem Berührungsdruk p_0 . Ein solches Verhältnis kann wie folgt dargestellt werden:

$$\rho = \exp \left[-C \left(\frac{CD}{D_w} \right)^m \left(\frac{p_0}{p_{ref}} \right)^n \right] \quad (3)$$



(a)

(b)

Bild 2: Schädigung unter der Oberfläche in Form einer plastizitätsinduzierten, senkrecht zur Oberfläche (a) wirkenden Eigenspannung und einer aufgrund einer statischen Belastung parallel zur Oberfläche (b) wirkenden Biegespannung. Die gestrichelte Linie stellt die Trennlinie zwischen Randschicht und Kern dar. In dieser FE-Berechnung ist $CD/D_w = 0,02$, $p_0 = 5,4 \sigma_y$.

wobei p_{ref} für einen auf 1.000 MPa eingestellten Bezugsdruck steht. Die Konstanten C , m und n können bestimmt werden, indem Gleichung 2 zusammen mit Gleichung 3 an die aus den FE-Berechnungen resultierenden plastischen Verformungswerte angepasst werden.

Bei einer allgemeinen ellipsenförmigen Berührung mit den Halbachsen a und b kann die plastische Oberflächenverformung durch eine Linearinterpolation zwischen den beiden extremen Fällen annäherungsweise bestimmt werden:

$$\frac{\delta}{D_w} = \left(\frac{\delta}{D_w} \right)_{PC} \left(\frac{b}{a} \right) + \left(\frac{\delta}{D_w} \right)_{LC} \left(1 - \frac{b}{a} \right) \quad (4)$$

Hierbei steht das tiefgestellte PC für Punktberührung, wobei $b/a = 1$; LC steht für Linienberührung, wobei $b/a = 0$.

Schädigung unter der Oberfläche

Anhand der FE-Analyse kann die Schädigung unter der Oberfläche im Hinblick auf Plastizität und Eigenspannung untersucht werden. Falls die aus einer statischen Belastung resultierende Spannung

die Dehngrenze des Kernmaterials überschreitet, tritt im Kern ein plastisches Fließen auf. Dieses verursacht eine Schädigung unter der Oberfläche, und zwar in Form von Eigenspannungen. Betrachten wir beispielsweise einen Fall mit einer geringen Härtungstiefe ($CD = 0,02 D_w$) und einem Berührungsdruk p_0 , der 5,4-mal die Dehngrenze des Kernmaterials übersteigt. Bild 2a zeigt, dass eine hohe Zugeigenspannung im Übergangsbereich zwischen Randschicht und Kern entsteht, die zu einer Rissbildung oder Delamination an der Schnittstelle Randschicht-Kern führen kann, da die Eigenspannung dort senkrecht zur Oberfläche wirkt. Eine starke Plastizität im Kern schwächt auch die Unterstützung der Randschicht durch den Kern, sodass die Randschicht folglich lastbedingt einer starken Biegebeanspruchung ausgesetzt ist (Bild 2b). Es kann dort zu einer Rissbildung kommen, wenn die Biegespannung in der Randschicht zu groß wird. Das Durchdrücken des Kerns ist eigentlich eine Folge aus der Verschlechterung des Kernzustands auf Grund plastischen Fließens, das eine Schwächung der Unterstützung der Randschicht bedingt. Die Restspannung S im Über-

gangsbereich Randschicht-Kern kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$S = C_1 \sigma_y \times \left[\tan^{-1} \left(C_2 \left\langle \frac{\sigma_e}{\sigma_y} - 1 \right\rangle - C_3 \right) + \tan^{-1}(C_3) \right] \quad (5)$$

wobei σ_y die Dehngrenze des Kernmaterials, σ_e die entsprechende von Mises-Spannung bei linearer Elastizität an der Schnittfläche Randschicht-Kern ist und C_1 , C_2 und C_3 Konstanten sind, die durch Einsetzen der Eigenspannung aus der FE-Analyse in Gleichung 5 bestimmt werden können.

Da das schwächste Glied bereits vorhandene Fehler im Material wie Einschlüsse und Poren sind, werden Risse zunächst von diesen Fehlern ausgehen. Wenn die Fehlergröße $2c$, ist, kann die kritische Spannung S_c am Fehlerort durch Berücksichtigung des Dauerfestigkeitsschwellenwerts eines münzförmigen ausgeprägten Risses von gleicher Größe bestimmt werden, d. h.,

$$S_c = \frac{\Delta K_{th}}{2} \sqrt{\frac{\pi}{c + c_0}} \quad (6)$$

wobei ΔK_{th} für den Dauerfestigkeitsschwellenwert des Kernmate- \rightarrow

rials steht und c_0 folgendermaßen bestimmt wird:

$$c_0 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{\Delta K_{th}}{\sigma_w} \right)^2 \quad (7)$$

wobei σ_w die Dauer(schwing)festigkeit des Kernmaterials darstellt.

Die Ableitung von Gleichung 6 und 7 basiert auf der Spannungsintensitätsfaktorklösung für einen münzförmigen Riss und dem El Haddad-Parameter für kleine Risse [6].

Gleichung 6 definiert die Schädigungstoleranz bezüglich der von der Plastizität an der Schnittstelle Randschicht-Kern induzierten Zugspannung. Diese Toleranz ist abhängig von der maximalen Größe der vorhandenen Fehler in der Schädigungszone.

Experimentelle Überprüfung

Zur experimentellen Untersuchung der entsprechenden Ausfallmechanismen wurde eine sog. „Standing Contact Fatigue“ (SCF)-Prüfung durchgeführt. Dabei handelt es sich um eine Ermüdungsfestigkeitsprüfung am stillstehenden Lager, wobei eine Kugel oder eine Rolle zyklisch in einen flachen Prüfling gedrückt wird [7].

Die Prüflinge waren aus vergüteten 42CrMo4-Stahl gefertigt

und durch induktives Erhitzen randschichtgehärtet. Sie wiesen zwei Einhärtungs-Härtetiefen auf: eine geringe Tiefe von 0,5 mm und eine größere von 1,1 mm. Bei dem bei der SCF-Prüfung verwendeten Eindrückkörper handelte es sich um eine durchgehärtete ballige Zylinderrolle mit einem Durchmesser von 10 mm und einem Krümmungsradius von 98 mm.

Bei den SCF-Prüfungen wurden drei Arten Risse festgestellt und, wie in Bild 3a schematisch dargestellt, als Querriss, Medianriss und Kantenriss bezeichnet. Der Querriss entstand im Übergangsbereich Randschicht-Kern, der Kantenriss an den jeweiligen Berührungskanten, während der Medianriss vom Querriss ausgehend vertikal zur Oberfläche hin verläuft. Bild 3b zeigt einen voll entwickelten Querriss, wobei sich keine Kanten- und Medianrisse gebildet haben. Lage und Form des in Bild 3b dargestellten Querrisses stimmen gut mit der in der FE-Analyse berechneten plastizitätsinduzierten Zugspannung überein (Bild 2a). Die in Bild 3a abgebildeten Kanten- und Medianrisse scheinen auch mit den in Bild 2b dargestellten vorausgerechneten Schädigungsstellen übereinzustimmen.

In Anbetracht dessen, dass der Querriss bei einer geringeren Belastung als die beiden anderen Rissarten

erzeugt werden kann, kann die bei der Entstehung der Querrisse aufgebrachte Belastung als mögliche Grenzbelastung angesehen werden. Beim Prüfling mit der dünneren Randschicht entspricht die Grenzbelastung einer Hertz'schen Pressung von 3,98 GPa, während die Grenzbelastung beim Prüfling mit der stärkeren Randschicht einer nominalen Hertz'schen Pressung von 5,46 GPa entspricht.

Anhand der Gleichungen 1–4 lässt sich die plastische Verformung der SCF-Prüflinge berechnen. Bild 4 zeigt einen Vergleich zwischen den Berechnungen und Messungen mit Werten bei Aufbringung einer einfachen Belastung und einer zyklischen Belastung. Dabei zeigt sich eine Übereinstimmung zwischen Vorausberechnung und Messung.

Die SCF-Prüfung diente auch zur Überprüfung des Modells zur Berechnung der Schädigungstoleranz. Die Grenzbelastung wird anhand der Gleichungen 5–7 berechnet. Die vorausgerechneten Ermüdungsgrenzbelastungen werden mit den bei der SCF-Prüfung in Bild 5 ermittelten Werten verglichen. Die Vorausberechnung stimmt wieder mit dem Versuch überein.

Härtungstiefe und statische Tragzahl

Unter Berücksichtigung der plastischen Verformung der Laufbahn und der Schädigung der Schnittstelle Randschicht-Kern unter der Oberfläche wird ein neues Modell zur Berechnung der statischen Tragzahl induktionsgehärteter Ringe vorgeschlagen.

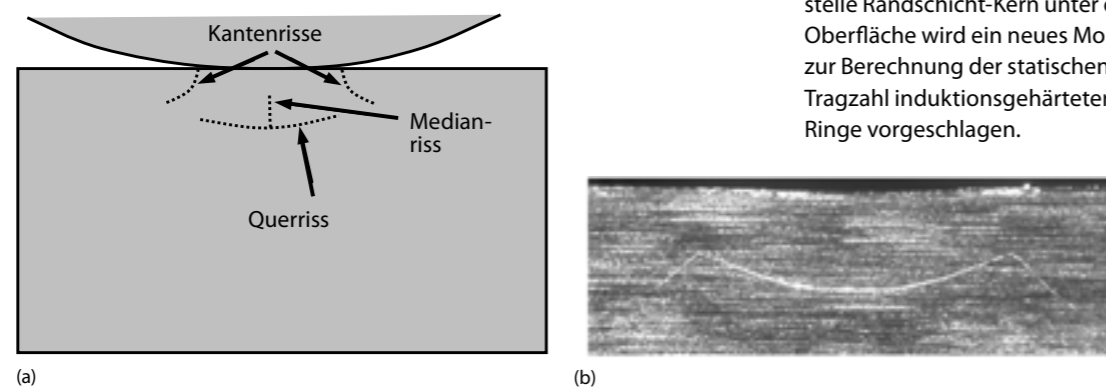


Bild 3: Darstellung der drei Rissarten, die bei den Prüflingen im Rahmen der SCF-Prüfung festgestellt wurden: Querriss, Kantenrisse und Medianriss (a); Abbildung eines voll entwickelten Medianrisses in der Übergangszone Randschicht-Kern des Prüflings (b).

Lassen Sie uns zunächst aufzeigen, dass die berechneten zulässigen Belastungen unter Berücksichtigung der plastischen Oberflächenverformung und der Schädigungstoleranz unter der Oberfläche von der Härtetiefe (CD) und der Materialfestigkeit abhängen. Ein Vierpunktkugellager mit folgender Geometrie wurde für die Berechnungen ausgewählt: Teilkreisdurchmesser $d_m = 615$ mm, Kugeldurchmesser $D_w = 34,925$ mm, Schmiegun $f = 0,52$, Berührungswinkel $\alpha = 45^\circ$. Außerdem werden zwei Kernmaterialien betrachtet: Material A mit einer Dehngrenze von 740 MPa und Material B mit einer Dehngrenze von 330 MPa.

Es wurden mit dem maximalen Berührungsdruck p_0 zur Erzeugung einer plastischen Verformung von $10^{-4} D_w$ für unterschiedliche Härtungstiefen Berechnungen angestellt. Bild 6a zeigt, dass der Berührungsdruck mit der Härtungstiefe zunimmt und sich bei großen Härtungstiefen einem konstanten Wert nähert. Die Unabhängigkeit des zulässigen Berührungsdrucks von der Härtungstiefe zeigt, dass eine Übereinstimmung mit einem durchgehärteten Material vorliegt. Eine Härtungstiefe größer als $0,18 D_w$ ist nahezu gleichzusetzen mit der Situation, in der beide Materialien durchgehärtet sind.

Das vorliegende Modell sagt voraus, dass der Berührungsdruck, der zur Erzeugung einer plastischen Verformung von $10^{-4} D_w$ in der durchgehärteten Laufbahn erforderlich ist, 4.270 MPa beträgt; dies entspricht dem Höchstdruck (4.200 MPa), der für die Berechnung der statischen Tragfähigkeit von Kugellagern [2] gemäß ISO-Norm 76 verwendet wird.

Bild 6b zeigt die berechnete Berührungsbelastung bei Stillstand, die eine Rissbildung unter der Oberfläche in Abhängigkeit von der Härtungstiefe hervorrufen kann. Offensichtlich nimmt die zulässige Belastung mit der Härtungstiefe zu und ist auch abhängig vom Rein-

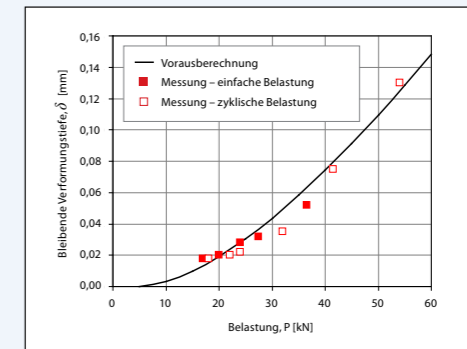


Bild 4: Vergleich zwischen der vorausgerechneten und der gemessenen Restverformung der Oberfläche bei den SCF-Prüflingen (CD = 1,1 mm).

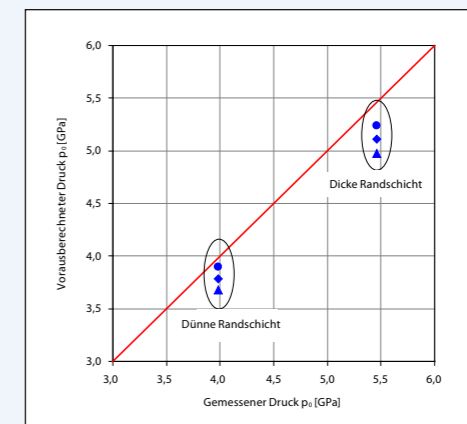


Bild 5: Vergleich zwischen der vorausgerechneten und der gemessenen Berührungsgrenzbelastung bei Stillstand bei der Initiierung von Querrissen unter der Oberfläche des Prüflings mit der dünnen Härtungstiefe (CD = 0,5 mm) und des Prüflings mit der dicken Härtungstiefe (CD = 1,1 mm) im Rahmen der SCF-Prüfung. Bei den Berechnungen wurden unterschiedliche Fehlergrößen angenommen, und zwar ●: kein Fehler, ◆: 60 µm und ▲: 150 µm.

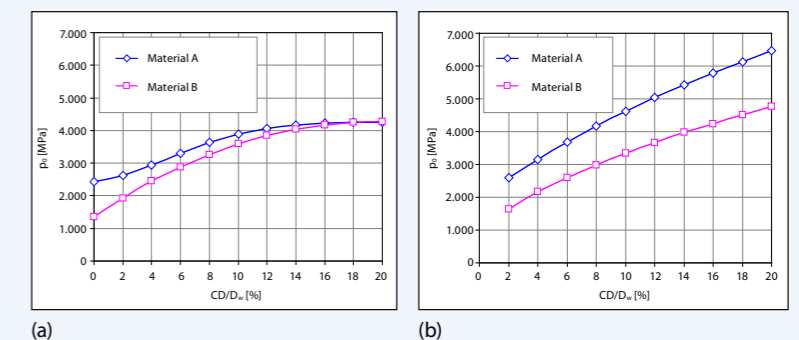


Bild 6: Berechnete statische Belastung in Form eines Berührungsdrucks p_0 , der einem Oberflächeneindruck von $10^{-4} D_w$ entspricht (a), und zulässige statische Belastung in Form eines Berührungsdrucks p_0 , der keine Rissbildung unter der Oberfläche bewirkt (b), bei zwei verschiedenen induktionsgehärteten Ringmaterialien mit unterschiedlichen Härtungstiefen.