

Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit von Weißmetallgleitlagerbeschichtungen

(Determination of fatigue strength of plain bearings coated with white metal alloys)

Zusammenfassung

Die Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit von Gleitlagerlegierungen in Bauteilversuchen ist zeitintensiv, da Schwingenspielzahlen zwischen 10 Mio. und 100 Mio. Lastwechseln als Grenzwerte für eine Ermüdungsfestigkeit gelten. Zur Reduzierung der Versuchszeit wurde ein Axialgleitlagerkonzept mit beschichteter Spurscheibe eingesetzt. Für eine Bewertung dieses Konzeptes wurden Versuche an Ermüdungsprüfständen für Axial- und Radialgleitlager durchgeführt. Die Ergebnisse werden mithilfe von Simulationen der elasto-hydrodynamischen Kontaktbedingungen der beiden Lagerbauarten miteinander sowie mit Literaturwerten verglichen. Es wird gezeigt, ob und unter welchen Bedingungen dieser Ansatz zur Verkürzung der Ermüdungsversuche gelingt.

Abstract

The determination of fatigue strength of plain bearing materials is time consuming. In most cases the fatigue strength is tested until a limit of 10 Mio. or 100 Mio. load cycles is reached. A thrust bearing test rig with coated washer instead of coated segments to reduce the testing time was used in this study. An assessment of this concept is done by a comparison of fatigue tests performed on a thrust and a journal bearing test rig. Elasto-hydrodynamic simulations are the basis to compare the results of different bearing designs to one another. Furthermore, results of the testing are compared to results documented in literature. The applicability of the new concept to reduce the time of fatigue tests is discussed.

Schlagwörter

Ermüdungsfestigkeit, Dauerfestigkeit, Materialprüfung, Gleitlager, Weißmetall

1 Einleitung

In hydrodynamisch betriebenen Gleitlagern können verschiedene Materialien zur Beschichtung einer der Gleitflächen eingesetzt werden. Aufgabe einer Gleitschicht ist die Minderung von Reibung sowie Verschleiß im Betrieb.

Auslegungsgrenzen dieser Gleitschichten sind die Quetschgrenze $\sigma_{d0,2}$ oder die Streckgrenze $R_{p0,2}$ mit Sicherheitsfaktoren für statische und dynamische Belastungen (Verein Deutscher Ingenieure, 1992). Die Auslegung anhand dieser Kennwerte soll eine plastische Verformung aufgrund unzulässiger Lasten vermeiden. Diese plastischen Verformungen führen zu einer Veränderung der Geometrie im Gleitkontakt und letztendlich zum Versagen des Gleitlagers (Hilgers, W., 1992).

Neben einer veränderten Kontaktgeometrie als Ursache für das Versagen von Gleitlagern ist bei dynamisch beanspruchten Lagern ebenfalls die Ermüdungsfestigkeit von großer Relevanz. Ein größerer Sicherheitsfaktor bei dynamischen Belastungen im Vergleich zu statischen Belastungen soll einer möglichen Ermüdung des Gleitlagermaterials Rechnung tragen.

Die Untersuchung des Ermüdungsverhaltens von Gleitlagerbeschichtungen ist mitunter sehr aufwendig. Die Grenzschwingspielzahl N_G , ab der Dauerfestigkeit vorliegt, ist werkstoffabhängig. Für Stahl liegt diese zwischen 2 Mio. und 10 Mio. Lastwechseln (LW) und für Aluminiumlegierungen bei 100 Mio. LW (Bargel H.-J., 2012). Zur Erreichung dieser Schwingspielzahlen sind hohe Versuchszeiten erforderlich. Ein Prüfstandkonzept zur Reduzierung der Versuchszeiten wurde von KORING (Koring R., 2010) vorgeschlagen. In diesem Konzept wird eine variable Anzahl von unbeschichteten Axialsegmenten gegen eine rotierende Spurscheibe, welche mit dem Gleitlagerwerkstoff beschichtet ist, gepresst.

In dieser Arbeit wurden Untersuchungen an Weißmetallen als Beschichtungsmaterialien durchgeführt. Die eingesetzten Ermüdungsprüfstände sind ein Axial- und ein Radialgleitlagerprüfstand.

Die Bewertbarkeit der Versuchsergebnisse des neuen Prüfstandkonzepts hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit von Weißmetallbeschichtungen und die Übertragbarkeit dieser auf Radialgleitlager werden diskutiert.

2 Materialeigenschaften

Fokus dieser Arbeit sind die Weißmetalllegierungen nach Tabelle 1. Für weitergehende Informationen sei auf (ECKA Granulate Essen GmbH, (1) 2015) und (ECKA Granulate Essen GmbH, (2) 2015) verwiesen.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der untersuchten Weißmetallbeschichtungen [m%]

	Zinn (Sn)	Antimon (Sb)	Kupfer (Cu)	Zink (Zn)	Silber (Ag)
SnSb12Cu6ZnAg	bal.	12.0	6.0	0.6	0.1
SnSb8Cu4	bal.	7.5	3.5	-	-

Die formfeste Legierung SnSb12Cu6ZnAg weist gegenüber der zähen Legierung SnSb8Cu4 eine höhere BRINELL-Härte auf. Je höher die Härte desto höher ist die Belastbarkeit des Werkstoffes. Eine niedrige Härte steht für eine bessere Einbettungsfähigkeit von Fremdpartikeln. Unter dynamischen Belastungen soll die Legierung SnSb12Cu6ZnAg für hohe Belastungsfrequenzen geeignet sein, wohingegen SnSb8Cu4 bei schlagartigen Beanspruchungen zu wählen ist. (Hilgers, W., 1992)

Die Eigenschaften der Legierungen können wie in Tabelle 2 zusammengefasst werden.

Tabelle 2: Legierungseigenschaften

		BRINELL- Härte	Einbettungs- fähigkeit	Belastungs- frequenz	Schlagbean- spruchung
SnSb12Cu6ZnAg	formfest	↑	↓	↑	↓
SnSb8Cu4	zäh	↓	↑	↓	↑

3 Auslegungskriterien

In der Auslegung von Gleitlagern nach VDI-Richtlinie 2204 (Verein Deutscher Ingenieure, 1992) ist die Überprüfung der drei Kriterien Temperatursicherheit, Verschleißsicherheit und Werkstofffestigkeit vorgesehen. Werden alle drei Kriterien erfüllt, wird von einer Betriebssicherheit ausgegangen (Peeken, H. und Salm, T., 1992).

Im Folgenden wird näher auf die Werkstofffestigkeit als Kriterium für eine Belastungsgrenze von Gleitlager eingegangen.

Die Prüfung der Werkstofffestigkeit erfolgt anhand des Vergleichs einer spezifischen Flächenpressung mit einem Kennwert, der die Festigkeit beschreibt. Im Radialgleitlager wird die spezifische Flächenpressung \bar{p} bestimmt, indem die Spitzenbelastung F_{Amp} auf die projizierte Fläche, das Produkt aus Lagerbreite B und –durchmesser D , bezogen wird. Im Axialgleitlager wird die Belastung ins Verhältnis zur Fläche aus der Summe aller Segmente Z gesetzt, siehe Tabelle 3.

Tabelle 3: Berechnung der spezifischen Flächenpressung im Gleitlager

	spezifische Pressung	Fläche
Radialgleitlager	$\bar{p} = F_{\text{Amp}}/A$	$A = B \cdot D$
Axialgleitlager, Keilflächen	$\bar{p} = F_{\text{Amp}}/A$	$A = B \cdot L \cdot Z$
Axialgleitlager, Kreisgleitschuh	$\bar{p} = F_{\text{Amp}}/A$	$A = \pi \cdot D^2 \cdot Z/4$

Der Kennwert, gegen den die spezifische Flächenpressung verglichen wird, wird aus der Quetschgrenze σ_{df} des Werkstoffes bei der Betriebstemperatur des Gleitlagers abgeleitet. Die Quetschgrenze beschreibt dabei diejenige Druckbelastung, unter der erstmals eine plastische Verformung auftritt, siehe Abbildung 1.

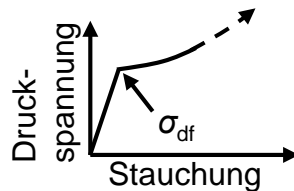


Abbildung 1: Quetschgrenze von Werkstoffen

Die Vergleichskennwerte für die Prüfung der Werkstofffestigkeit sind in Tabelle 4 für verschiedene Temperaturen T gegeben. Mit $\sigma_{\text{d}0.2}(T)$ ist die Druckspannung bezeichnet, bei der 0.2 % plastische Dehnung auftritt.

Tabelle 4: Vergleichskennwerte für die Werkstofffestigkeit [MPa]

	$\sigma_{\text{d}0.2}(T)$		Vergleichskennwert			
			statisch		dynamisch	
	20 °C	100 °C	$1/3 \sigma_{\text{d}0.2}(T)$	$1/6 \sigma_{\text{d}0.2}(T)$	20 °C	100 °C
SnSb12Cu6ZnAg	90	50	30	16.6	15	8.3
SnSb8Cu4	47	27	15.7	9	7.8	4.5

4 Ermüdungsfestigkeitsprüfung

Die Ermüdungsfestigkeit wird anhand der WÖHLER-Kurve beurteilt. Die Grenzschwingspielzahl N_G , bei welcher der abfallende Ast der WÖHLER-Kurve in einen waagerechten Verlauf übergeht, definiert eine dauerhaft ertragbare Spannungsamplitude σ_A , siehe Abbildung 2. Die Schwingspielzahl N_G variiert von Werkstoff zu Werkstoff. Je nach Werkstoff liegt keine ausgeprägte Dauerfestigkeitsgrenze, wie bei kubisch-flächenzentrierten(kfz)-Stählen und den meisten kfz-Legierungen vor. Bei Werkstoffen mit einer ausgeprägten Dauerfestigkeit beträgt N_G ca. 10 Mio. LW, andernfalls wird üblicherweise bis $N_G = 100$ Mio. LW geprüft. (Bargel H.-J., 2012) (Bürgel, R., Maier, H. J. und Niendorf, T., 2011)

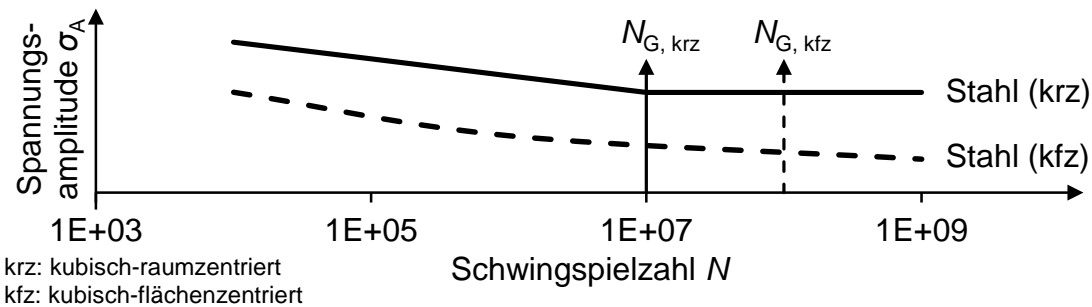


Abbildung 2: WÖHLER-Kurve für verschiedene Werkstoffe

Für Weißmetalle ist eine Einteilung in die Bereiche Zeitfestigkeit ($N < N_G$) und Dauerfestigkeit ($N \geq N_G$) nicht sinnvoll. Dies kann durch die niedrige Schmelztemperatur der Weißmetalle erklärt werden. Das temperaturbedingte Werkstoffverhalten wird anhand der homologen Temperatur in zwei Bereiche unterteilt. Die homologe Temperatur $T_H = T/T_s$ ist definiert als der Quotient aus der aktuellen Temperatur T und der Schmelztemperatur T_s . Der Bereich einer homologen Temperatur $T_H < 0.4$ wird Tieftemperaturbereich, während der Bereich $T_H \geq 0.4$ Hochtemperaturbereich genannt wird. Im Hochtemperaturbereich kann entgegen dem Tieftemperaturbereich keine zyklische Dauerfestigkeit bestimmt werden. (Bürgel, R., Maier, H. J. und Niendorf, T., 2011)

Für übliche Einsatztemperaturen von weißmetallbeschichteten Gleitlagern von 80 °C bis 120 °C ist $T_H > 0.4$, vgl. Tabelle 5. Somit werden Weißmetalle im Hochtemperaturbereich eingesetzt. Für diesen Temperaturbereich ist eine Einteilung der Ergebnisse aus Ermüdungsversuchen in Low-Cycle-Fatigue (LCF) ($N < 10^4$ - 10^5) und High-Cycle-Fatigue (HCF) ($N \geq N_{LCF}$) üblich. Für Weißmetalle wird als obere Grenzwertschwingenzahl daher $N_G = 100$ Mio. LW gewählt.

Tabelle 5: Schmelztemperaturen der betrachteten Weißmetalle

	T_s		$0.4T_s$	
	[K]	[°C]	[K]	[°C]
SnSb12Cu6ZnAg	508	235	203	-70
SnSb8Cu4	506	233	202	-69

4.1 Ermüdungsprüfstände

Für die Untersuchungen der Ermüdungsfestigkeiten der betrachteten Weißmetalllegierungen wurden ein Axial- und ein Radialgleitlagerprüfstand eingesetzt. Die Kenndaten des Axialgleitlagerprüfstandes sowie des Vergleichsprüfstandes von KORING (Koring, R., 2010) sind in Tabelle 6 zusammengefasst. In dem Axialgleitlagerprüfstand, siehe Abbildung 3, werden Kreisgleitschuhe (KGS) genutzt, deren Anzahl variabel ist.

Tabelle 6: Daten des Axialgleitlagerprüfstandes

	D_{KGS} [mm]	D_M [mm]	n [min ⁻¹]	U [m/s]	# KGS [-]	f_{Last} [Hz]	R [-]	ISO VG [-]	N_G [-]
SOUS, C.	25	120	2500	15.7	3	125	0	100	1e8
KORING, R.	k.A.	80	2880	12	3	144	0	220	1e6

Das Beschichtungsmaterial im Axiallagerprüfstand wird rein schwellend belastet. Das Spannungsverhältnis R aus unterer und oberer Spannung ist konstruktivbedingt Null.

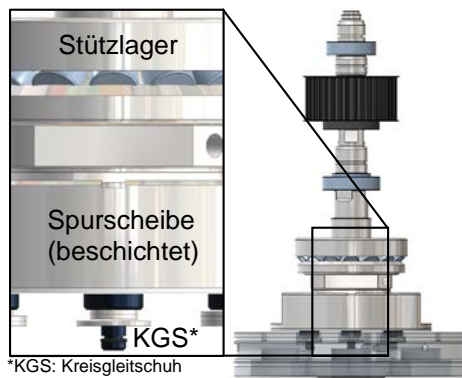


Abbildung 3: Axialgleitlagerprüfstand (Sous)

Ein Lagerschaden wird über die Messung der Temperatur an der Rückseite der Gleitfläche eines KGS bestimmt. Ein entsprechender Schaden ist in Abbildung 4 gezeigt.



Abbildung 4: Lagerschaden an einer Axialgleitlagerprobe

Die Kenndaten des Radiallagerprüfstandes sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Daten des Radialgleitlagerprüfstandes

B [mm]	D [mm]	n [min^{-1}]	U [m/s]	f_{Last} [Hz]	R [-]	ISO VG [-]	N_G [-]
28	70	3000	11	49	0	100	$1e8$

Die verwendeten Radialgleitlager, siehe Abbildung 5, sind mit Bohrungen 2 mm unterhalb der Gleitlagerschicht versehen. An diesen Stellen kann die Temperatur des Lagers gemessen und als Kriterium für einen Lagerschaden herangezogen werden.

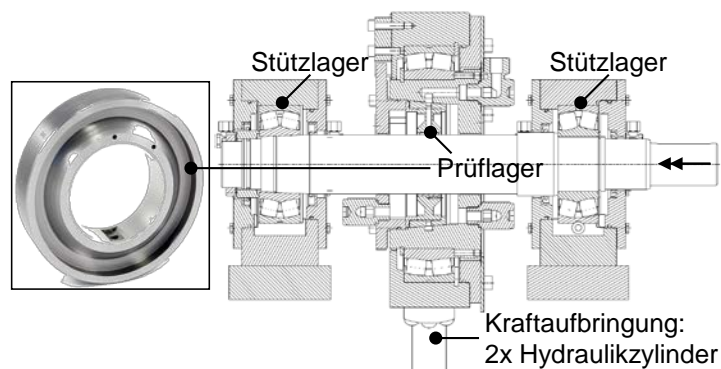


Abbildung 5: Radialgleitlagerprüfstand

Eine dynamische Belastung wird mittels zwei um 45° zur Vertikalen verkippt angeordneten Hydraulikzylindern realisiert. Die Hydraulikzylinder belasten das Gleitlager in Phase mit Druckkräften. Der Verlauf der Druckbelastung ist so gewählt, dass $R \approx 0$ ist.

4.2 Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der Untersuchungen an beschichteten Spurscheiben sind in Abbildung 6 zusammengestellt. Die Versuchspunkte werden auf der ersten Ordinate mit der spezifischen Pressung abgetragen, welche aus der maximalen dynamischen Kraftamplitude resultiert. Auf der zweiten Ordinate ist die maximale Pressung im Kontakt abgetragen. Weiterhin sind die Ermüdungsfestigkeitsgrenzen (horizontale Grenzen) nach KORING (Koring, R., 2010) für die beiden Werkstoffe sowie die Grenzwahrscheinlichkeiten (vertikale Grenzen) der verschiedenen Untersuchungen eingetragen.

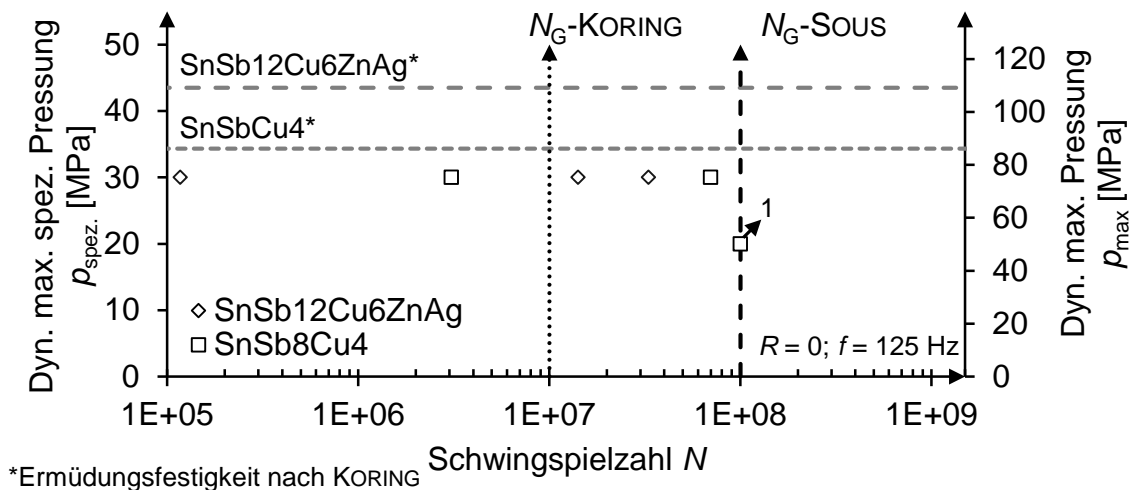


Abbildung 6: Ergebnisse der Axialgleitlageruntersuchungen

Anhand der ertragenen Lastwechsel können die Ermüdungsfestigkeiten der untersuchten Weißmetalle in den HCF-Bereich eingeordnet werden. Deutlich zu erkennen sind die Unterschiede zwischen den prognostizierten dauerhaft zu ertragenen Lasten sowie den in den Versuchen für diese Arbeit ertragenen Lasten. Die eingezeichneten Ermüdungsfestigkeitsgrenzen sind in der Literatur als maximale Pressungen angegeben. Die Umrechnung des spezifischen Druckes der Versuche auf den zugehörigen Spitzendruck erfolgt anhand von Simulationsergebnissen. Die eingesetzte Software ist AVL EXCITE POWER UNIT Version 2014.1. In den Simulationen wurde ein elastohydrodynamisches Modell sowohl für das Axial- als auch für das Radialgleitlager erstellt. Die Beziehung von Spitzendruck zu spezifischem Druck ist in Abbildung 7 exemplarisch für das Radiallager dargestellt.

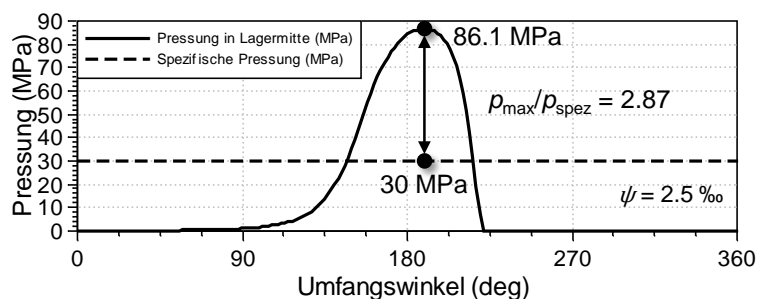


Abbildung 7: Ergebnis der elastohydrodynamischen Simulationen des Radialgleitlagers

Der Verlauf des Verhältnisses von Spitzendruck zu spezifischem Druck ist in Abbildung 8 in Abhängigkeit des spezifischen Druckes dargestellt.

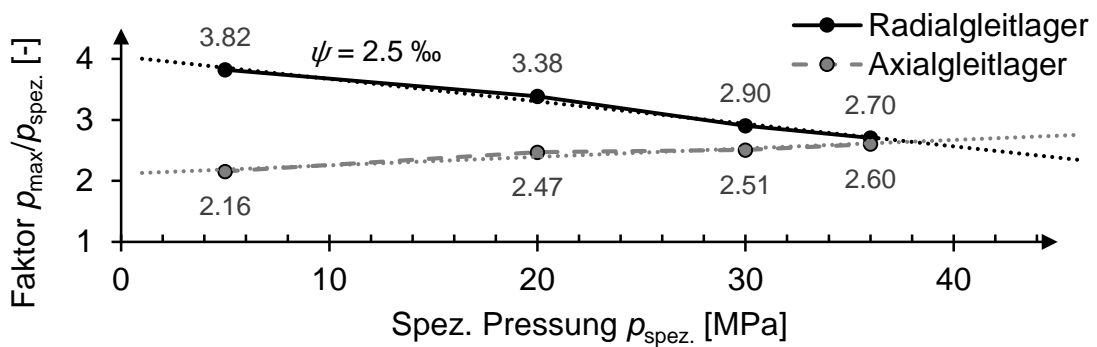


Abbildung 8: Faktor zwischen Spitzendruck und spezifischem Druck für Axial- und Radialgleitlager

In Abhängigkeit des Lagerspiels variiert beim Radiallager bei gleichen Belastungen der Faktor zwischen Spitzendruck und spezifischem Druck, siehe Tabelle 8. Für die Umrechnungen in dieser Arbeit wurden die Werte für ein Lagerspiel von 2.5 ‰ genutzt.

Tabelle 8: Faktor zwischen Spitzendruck und spezifischem Druck für Axial- und Radialgleitlager

	Lagerspiel ψ [‰]	Spezifischer Druck $p_{spez.}$			
		5 MPa	20 MPa	30 MPa	36 MPa
Radiallager	2.5	3.82	3.38	2.90	2.70
Radiallager	2.1	3.55	3.12	2.70	2.53
Radiallager	1.8	3.30	2.86	2.49	2.35
Axiallager	-	2.16	2.47	2.51	2.60

Am Radialgleitlagerprüfstand wurden in mehreren Forschungsvorhaben Gleitlagerproben getestet, siehe unter anderem (Jacobs, G. et al., 2011). In Abbildung 9 sind die Ergebnisse dargestellt. Die Ergebnisse bei Schwingspielzahlen unter 100 Mio. LW repräsentieren Versuche mit einem Ermüdungsschaden. Bei den Radialgleitlagerversuchen ist der Prüfstufe eine Einlaufphase bestehend aus drei Laststufen mit den Amplituden 5 MPa, 10 MPa und 20 MPa zu je 4 Mio. LW vorangestellt. In der Ergebnisdarstellung sind diese insgesamt 12 Mio. LW nicht enthalten.

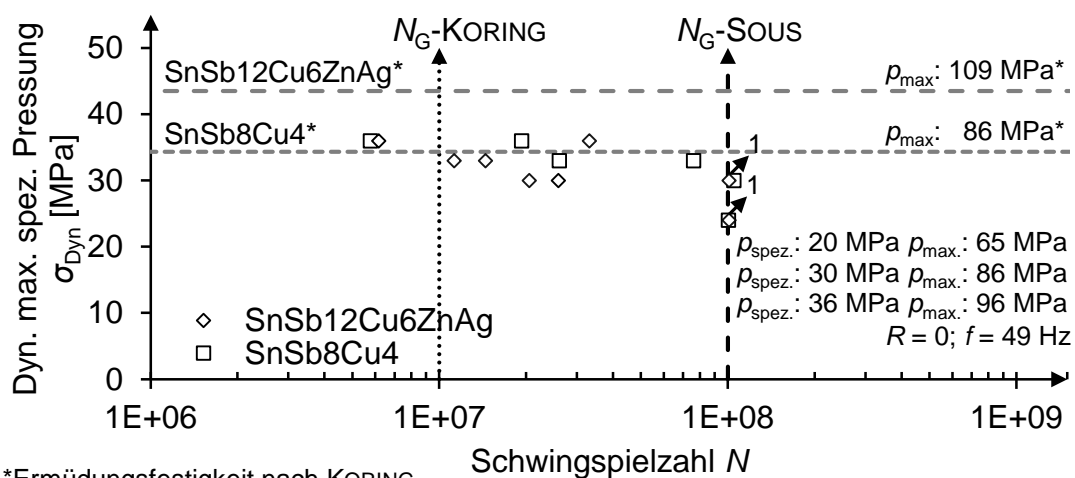


Abbildung 9: Ergebnisse der Radialgleitlageruntersuchungen

Die Ergebnisse der Radialgleitlager bestätigen, wie schon die Axiallageruntersuchungen, dass für Weißmetalle eine Grenzschwingspielzahl N_G von 10 Mio. LW zu gering gewählt

ist, da es auch bei deutlich höheren Lastwechseln noch zu Schäden kommt. Die maximalen Belastungen, bei denen die Proben in den Versuchen ohne Schaden 100 Mio. LW ertragen haben, sind für beide untersuchten Werkstoffe gleich.

5 Diskussion

Eine Ermüdungsfestigkeit von Gleitlagermaterialien kann nicht bei allen Werkstoffen einer Dauerfestigkeit gleichgesetzt werden. Es gilt zu prüfen, bei welcher werkstoff-spezifischen homologen Temperatur die Prüfung erfolgt. Abhängig von der homologen Temperatur kann keine zyklische Dauerfestigkeit erwartet werden. Anhand der Versuchsergebnisse für Axial- und Radialgleitlager wurde gezeigt, dass auch jenseits der bei Werkstoffprüfungen häufig genutzten 10 Mio. Lastwechselgrenze Ermüdungsschäden bei den Weißmetallen SnSb₁₂Cu₆ZnAg und SnSb₈Cu₄ auftreten. Für diese Werkstoffe kann demnach nur eine Zeitfestigkeit angegeben werden.

Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse von Axiallagerversuchen auf Radiallager sollte anhand des Spitzendruckes erfolgen. In Abbildung 8 und Tabelle 8 wurde gezeigt, dass das Verhältnis von Spitzendruck zu spezifischem Druck je nach Lagerbauart und -geometrie variiert. Der Spitzendruck ist zur Bewertung einer Werkstoff- bzw. Ermüdungsfestigkeit besser geeignet als eine spezifische Belastung. Eine Umrechnung der spezifischen Belastung in eine Spitzenbelastung bietet somit eine Vergleichsgrundlage. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse des Axiallagerprüfstandes auf das Radiallager ist jedoch nur beschränkt möglich.

Ein Vergleich der Ermüdungsversuche von SnSb₁₂Cu₆ZnAg für das Axial- und das Radiallager auf Basis des gleichen Spitzendruckes zeigt einen Ermüdungsschaden im Axiallager sowie einen Radiallagerversuch ohne Schaden. Beide Versuchsergebnisse weisen die ungefähr gleiche maximale Pressung von 75 MPa auf. Das Radiallager erreichte 100 Mio. LW wohingegen die Zeitfestigkeit des Axiallagers bei 33 Mio. LW liegt. Anhand des Axiallagers wird demzufolge die Ermüdungsfestigkeit zur sicheren Seite hin abgeschätzt.

Es kann verschiedene Ursachen für Unterschiede in den ertragbaren Schwingspielzahlen der betrachteten Lagerbauarten auf demselben Lastniveau geben. Einerseits weichen die Prüfbedingungen, wie die Belastungsfrequenz und die Gleitgeschwindigkeit, voneinander ab. Andererseits werden für die Lagerherstellung unterschiedliche Verfahren genutzt. Die Axiallager werden im Standguss- und die Radiallager im Schleudergussverfahren gefertigt. Dies kann Auswirkungen auf das ausgebildete Mikrogefüge und die Werkstofffestigkeit haben. Weiterhin wird im Axiallager jeder Punkt auf der Laufbahn einer zyklischen Belastung ausgesetzt, wohingegen im Radiallager die stets gleiche Stelle belastet wird. Dementsprechend sind statistisch verteilte Fehlstellen im Beschichtungsmaterial im genutzten Axiallagerkonzept kritischer als im Radiallager.

Eine weitere Ursache kann der Belastungsanstieg im Lager sein. Im Radiallager wird die Belastung durch die Hydraulikzylinder sinusoidal aufgeprägt. Der Belastungs- und Entlastungsanteil des Lastzyklus dauern jeweils einen halben Zyklus. Hingegen tritt im Axiallager ein weiterer belastungsfreier Anteil auf, siehe Abbildung 10, da die Belastung nur durch das Überstreichen eines Axialsegmentes erfolgt. Hierdurch erfolgt der Belastungsanstieg im Axiallager deutlich schneller als im Radiallager. Dies gilt sobald die Belastungsfrequenz des Axiallagers der des Radiallager entspricht. Da die Belastungsfrequenz im Axiallagerprüfstand höher ist als im Radiallager, wird dieser Effekt zusätzlich verstärkt.

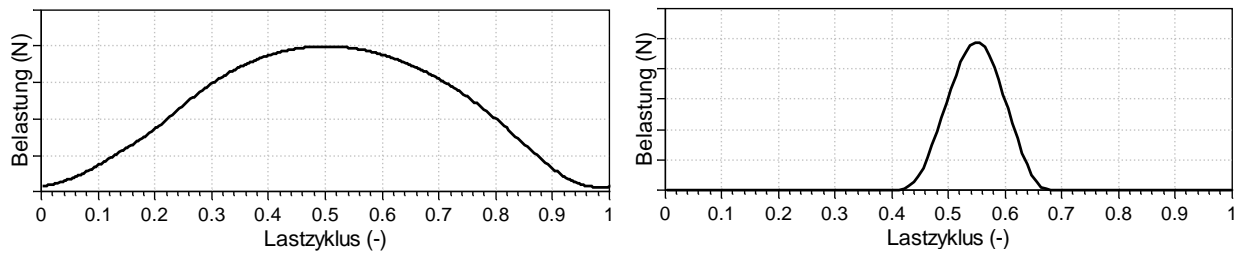


Abbildung 10: Vergleich des Belastungsverlaufs in Radial- (links) und Axiallager (rechts)

Der Belastungshorizont, bei dem eine Grenzschwingspielzahl von 100 Mio. Lastwechseln in beiden Prüfständen erreicht wurde, ist um Faktor vier höher als nach VDI 2204 (Verein Deutscher Ingenieure, 1992) erlaubt. Laut VDI 2204 darf ein dynamisch belastetes Gleitlager mit SnSb8Cu4 bei 100 °C bis 4.5 MPa spezifischem Druck belastet werden. In den Versuchen wurden bei dieser Temperatur Lastwechselzahlen von 100 Mio. bei 20 MPa spezifischem Druck (65 MPa Spitzendruck) erreicht. Die Plastizitätsgrenze σ_{df} beträgt bei diesen Bedingungen 27 MPa. Ein möglicher Grund für diese hohe Belastbarkeit unter dynamischen Belastungen ist das Spannungsverhältnis R . Dieses wurde im Versuch zu $R \approx 0$ gesetzt. Bei einem Spannungsverhältnis von $R > 0$ steigt die konstant anliegende Mittellast. Bei konstanten (Spitzen-)Belastungen oberhalb der Plastizitätsgrenze wird ein großer Einfluss auf die Versuchsergebnisse erwartet.

6 Fazit

- Es wurden zwei Weißmetalle (SnSb12Cu6ZnAg und SnSb8Cu4) hinsichtlich ihrer Ermüdungsfestigkeit untersucht.
- Untersuchungen erfolgten an Radial- sowie Axialgleitlagern. Im Axialgleitlager ist die Spurscheibe beschichtet.
- Mit dem Konzept einer beschichteten Spurscheibe im Axialgleitlager zur Reduzierung der Versuchszeit konnte diese durch eine erhöhte Belastungsfrequenz verkürzt werden.
- Die Grenzschwingspielzahl N_G in Ermüdungsfestigkeitsprüfungen muss werkstoffspezifisch in Abhängigkeit der homologen Temperatur festgelegt werden. Für Weißmetalle sollte $N_G \geq 100$ Mio. Lastwechseln sein.
- Weißmetalle besitzen keine Dauerfestigkeit. Es kann lediglich eine Zeitfestigkeit im High-Cycle-Fatigue-Bereich angegeben werden.
- Die Versuchsergebnisse für Axialgleitlager ergaben Zeit- bzw. Ermüdungsfestigkeitswerte, die stets unter denen der Radialgleitlager lagen. Somit wird die Ermüdungsfestigkeit des Lagermaterials am Axialgleitlagerprüfstand zur sicheren Seite hin abgeschätzt.
- Die Ermüdungsfestigkeit sollte in Verbindung mit den ertragenen Lastwechseln sowie dem maximalen Druck im Schmierpalt angegeben werden.
- Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse von Axial- auf Radialgleitlager ist nur eingeschränkt möglich.
- Belastungshorizonte, bei denen eine Grenzschwingspielzahl von 100 Mio. Lastwechseln erreicht wurde, lagen über den zulässigen Werten nach VDI 2204 (Verein Deutscher Ingenieure, 1992). Eine mögliche Begründung hierfür wird in dem Spannungsverhältnis von $R \approx 0$ gesehen.
- Signifikante Unterschiede im Betriebsverhalten der beiden untersuchten Lagermaterialien SnSb12Cu6ZnAg und SnSb8Cu4 konnten in den Untersuchungen nicht festgestellt werden.

7 Danksagung

Die Datenbasis der Versuchsergebnisse stammt zum Teil aus dem Forschungsvorhaben DFG JA 1940/4-1 FVV 1143. Das Forschungsvorhaben wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) in Kooperation mit der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV) gefördert. Weitere Ergebnisse wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens FVA 383-V der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) gewonnen, welches über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) unter der Nummer 17736 N gefördert wird.

Wir danken für die großzügige Unterstützung in den genannten Forschungsvorhaben.

8 Literaturverzeichnis

- Bargel, H.-J., „Werkstoffprüfungen“, in Bargel, H.-J. (Hrsg.) und Schulze, G., (Hrsg.), *Werkstoffkunde*, Berlin, Springer Verlag, 2012, S. 119-173.
- Bürgel, R., Maier, H. J. und Niendorf, T., *Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik: Grundlagen, Werkstoffbeanspruchungen, Hochtemperaturlegierungen und -beschichtungen*, 4. überarbeitete Auflage, Wiesbaden, Vieweg+Teubner Verlag, 2011, S. 201-203.
- ECKA Granulate Essen GmbH (1), *Gleitlagerlegierung TEGOSTAR*, ECKA Granulate Essen GmbH, Essen, 2015
- ECKA Granulate Essen GmbH (2), *Gleitlagerlegierung TEGOTENAX*, ECKA Granulate Essen GmbH, Essen, 2015
- Hilgers, W., „Gleitlagerwerkstoffe“, in Th. Goldschmidt AG, *Gleitlagertechnik*, Essen, TH. Goldschmidt AG, 1992, S. 7-25.
- Jacobs, G. et al., „Dauerfestigkeitsnachweis hydrodynamisch belasteter Weißmetalllager“, *Reibung, Schmierung und Verschleiß: Forschung und praktische Anwendungen, Tagungsband der 52. Tribologie-Fachtagung, Band 2*, Göttingen, Deutschland, Gesellschaft für Tribologie e.V., 2006, S.45/1-45/17
- Koring, R., *Gleitlagertechnik im Wandel – Praxis innovativer hydrodynamischer Gleitlager*, Renningen, expert Verlag, 2010, S. 47-64.
- Peeken, H. und Salm, T., „Neuer Berechnungsgang zur Bestimmung der Sicherheit gegenüber Kriechen im Rahmen der betriebssicheren Auslegung stationär belasteter Radialgleitlager“, in Th. Goldschmidt AG, *Gleitlagertechnik*, Essen, TH. Goldschmidt AG, 1992, S. 95-106.
- Verein Deutscher Ingenieure, „Auslegung von Gleitlagerungen“, *VDI 2204*, Düsseldorf, 1992.

Autoren

- Christopher Sous, M.Sc., orcid.org/0000-0002-9481-021X, Institut für Maschinenelemente und Maschinengestaltung, Schinkelstraße 10, 52062 Aachen, +49 (0)241 80-95832, sous@ime.rwth-aachen.de
- Dipl.-Ing. Gero Burghardt, M.Sc., orcid.org/0000-0002-2584-001X, Institut für Maschinenelemente und Maschinengestaltung, Schinkelstraße 10, 52062 Aachen
- Univ.-Prof., Dr.-Ing. Georg Jacobs, orcid.org/0000-0002-7564-288X, Institut für Maschinenelemente und Maschinengestaltung, Schinkelstraße 10, 52062 Aachen