

VDI-Wissensforum

Moderne Gleitlager

Vortrag

Vergleich von Hochleistungskunststoff-, Metall-Kunststoff- Verbund und Bronzegleitlagern im geschmierten Einsatz

Ingenieurbüro Dr.-Ing. Martin Berger

Akazienweg 12

75038 Oberderdingen

Tel.: +49 (0)7258 92 64 81

Fax.: +49 (0)7258 92 64 82

E-mail: martin.berger@tribodoc.de

www.tribodoc.de

1 EINLEITUNG.....	3
2 KENNZAHLEN	3
3 VERGLEICH DER TRAGFÄHIGKEIT BEI GLEICHER SCHMIERSPALTHÖHE.....	4
4 VERGLEICH DER SCHMIERSPALTHÖHE BEI GLEICHER TRAGFÄHIGKEIT.....	5
5 VERGLEICH DER ELASTOHYDRODYNAMISCHEN DRUCKVERTEILUNG.....	6
6 REIBUNGSVERHALTEN IM MISCHREIBUNGSGEBIET.....	7
7 FESTSITZ DER LAGER IM GEHÄUSE.....	8
8 ZUSAMMENFASSUNG UND MATRIX ZUR VARIANTENAUSWAHL.....	9
9 LITERATUR.....	10

BEZEICHNER UND SYMBOLE

Benennung	Symbol	Einheit
Lagerbreite	B	mm
Lagerspiel (Durchmesserspiel)	C	mm
Lagerdurchmesser	D	mm
Gehäuseaußendurchmesser	D_H	mm
E -Modul Lagerwerkstoff	E_B	N/mm ²
E -Modul Gehäusewerkstoff	E_H	N/mm ²
Last	F	N
Auspresskraft des Lagers	F_{pf}	N
Relative minimale Schmierpalhöhe	h^*_{min}	-
Minimale Schmierpalhöhe	h_{min}	µm
Relative zulässige minimale Schmierpalhöhe	$h^*_{min,lim}$	-
Überdeckungsmaß Lager zum Gehäuse	I	µm
Reibmoment	M_f	Nm
Dimensionsloser maximaler Schmierfilmdruck	p^*_{max}	-
Fugenpressung des Presssitzes	p_F	N/mm ²
Maximaler Schmierfilmdruck	p_{max}	N/mm ²
Relative Verkantung in vertikaler Richtung	q_{rv}^*	-
Gemittelte Rautiefe Lager	$R_{z,B}$	µm
Gemittelte Rautiefe Welle	$R_{z,J}$	µm
Wanddicke der Radialgleitlagerbuchse	s	mm
Tragfähigkeitskennzahl (Sommerfeldzahl)	So	-
Maximal zulässige Temperatur	T_{max}	°C
Hydrodynamisch wirksame Geschwindigkeit	U	m/s
Relative Exzentrizität	ϵ	-
Dynamische Viskosität	η	Pa·s
Dichte des Werkstoffs	ρ	kg/m ³
Druckfließgrenze	σ_D	N/mm ²
Winkelgeschwindigkeit	ω	s ⁻¹
Relatives Lagerspiel	ψ	-

1 Einleitung

Das Konstruktionselement Gleitlager bietet Konstrukteuren und Ingenieuren viele Möglichkeiten, eine Lagerstelle zu gestalten. Dabei existiert eine Vielzahl von Gleitlagertypen mit unterschiedlichen Eigenschaften, woraus sich in Kombination mit Schmierstoffen eine große Anzahl von Varianten ergibt. Ursprünglich wurden Gleitlager aus Bronze- oder Weißmetalllegierungen hergestellt und waren somit durch die Eigenschaften dieser Metalle gekennzeichnet. Der Einsatz von Hochleistungskunststoffen, sei es als Metall-Kunststoff-Verbund oder als Vollkunststofflager, bedingt neue Betrachtungsweisen, damit gezielt spezifische Vorteile genutzt werden können. Jedoch ist das Verständnis zu den Stärken und Schwächen solcher Gleitlagervarianten die Voraussetzung für einen sinnvollen und nutzbringenden Einsatz. Dieser Beitrag soll dazu dienen, die Eigenschaften der Lagervarianten gegenüber zu stellen und damit dem Anwender die Vorauswahl einer Werkstoffvariante zu ermöglichen. Dabei werden bewusst extreme Bedingungen betrachtet um die Unterschiede zu verdeutlichen und die Potenziale aufzuzeigen.

2 Kennzahlen

Zum Vergleich der Werkstoffvarianten im vollgeschmierten Einsatz sollen gebräuchliche Kennzahlen nach DIN31652-1 eingesetzt werden. Dies sind im Einzelnen:

- relatives Lagerspiel
$$\psi = \frac{C}{D} \quad (1)$$

- relative minimale Schmierstalthöhe
$$h_{\min}^* = \frac{h_{\min} \cdot 2}{C} \quad (2)$$

- Tragfähigkeitskennzahl
$$So = \frac{F \cdot \psi^2}{B \cdot D \cdot \eta \cdot \omega} \quad (3)$$

- Reibungszahl
$$f = \frac{M_f \cdot 2}{F \cdot D} \quad (4)$$

Die Werkstoffvarianten wurden bewusst so gewählt, dass Unterschiede hervorgehoben werden können:

- Bronze (Kupfer-Zinn-Legierung CuSn12)
- Metall-Kunststoff-Verbund (Stahl-Bronzesinterschicht-modifiziertes PTFE)
- Hochleistungskunststoff (PEEK+Aramidfasern+PTFE)

Für den Vergleich sollen die Lasten, Drehzahlen, Rauheiten von Welle und Lager, Schmierstoffviskositäten und die Wärmeabgabebedingungen gleich gehalten werden. Das relative Lagerspiel (1) soll ebenfalls konstant sein und lässt sich bei allen Varianten durch mechanische Nacharbeit herstellen. Die Wandstärke der Buchsen beträgt danach 1,5 mm. In Tabelle 1 sind einige Werkstoffkennwerte aufgeführt.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Werkstoffvarianten (bei 90°C)

Werkstoffvariante	E_B [N/mm ²]	σ_D [N/mm ²]	T_{\max} [°C]	ρ [kg/m ³]
Stahl z.B. Ck45	210000	370-500	≈ 1000	7850
Bronze	110000	120	350	8800
Metall-Kunststoff-Verbund	≈ 10000	185	280	7800
Hochleistungskunststoff	6000	55	290	1390

Aus diesen Eigenschaften ergeben sich spezifische Leistungsmerkmale, welche anschließend verglichen werden sollen.

3 Vergleich der Tragfähigkeit bei gleicher Schmierpalhöhe

Für die Auslegung eines Gleitlagers ist die Kenntnis darüber, wie stark es belastet werden kann, ausschlaggebend. Der Tragfähigkeitsvergleich soll deshalb anhand der Sommerfeldzahl So (3) erfolgen. Die hier verwendete Sommerfeldzahl beinhaltet den EHD-Anteil (Elastohydrodynamik) durch elastische Verformung der Werkstoffe, was zu einer Tragfähigkeitssteigerung führt. Würde der elastische Verformungsanteil keine Berücksichtigung finden, könnten die Werkstoffeinflüsse nicht gegenübergestellt werden. Die relative minimale Schmierpalhöhe h^*_{min} (2) soll im Folgenden als Bezugsgröße gewählt werden, um die Abhängigkeiten weiterer Kennzahlen zu betrachten. Abbildung 1 stellt die Sommerfeldzahlen der Werkstoffvarianten in Abhängigkeit von der minimalen Schmierpalhöhe h^*_{min} gegenüber.

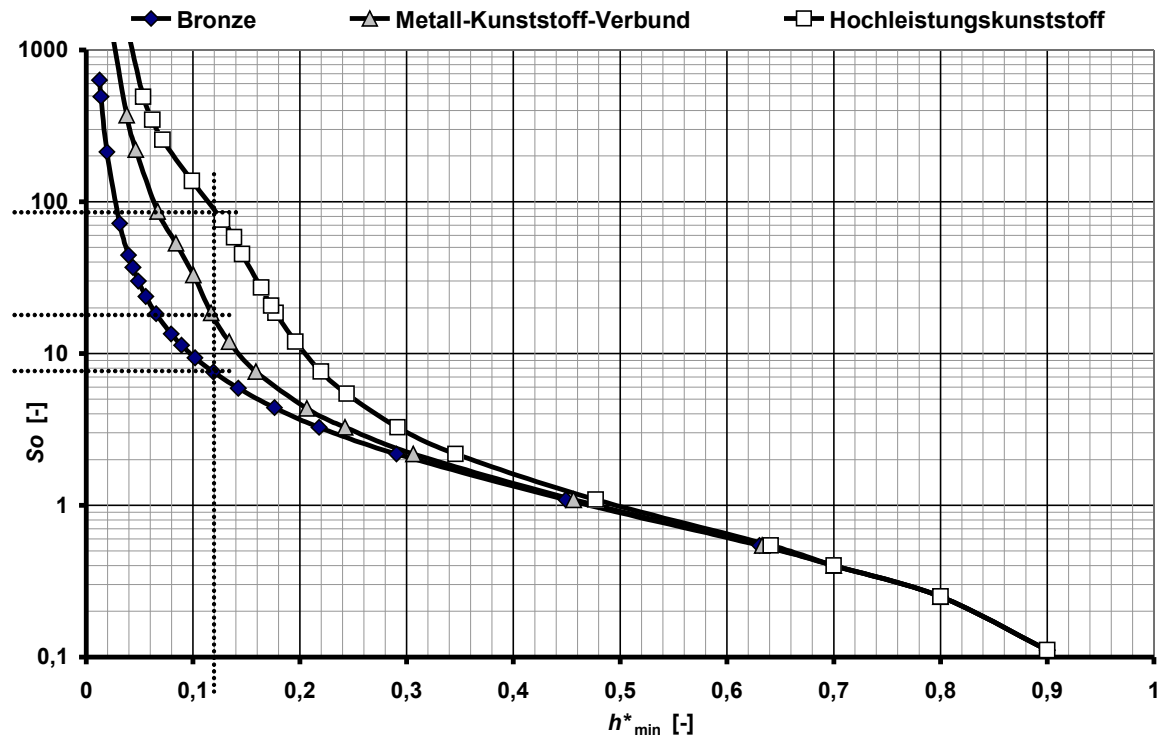


Abbildung 1: Sommerfeldzahl als Funktion von h^*_{min} (Beispiel: konstante Schmierpalhöhe $h^*_{min} = 0,12$)

Bis zu einer relativen minimalen Schmierpalhöhe von $h^*_{min} \approx 0,5$ sind keine nennenswerten Unterschiede zu erkennen. Bis Spalthöhen von $h^*_{min} > 0,5$ verhalten sich die Lagervarianten bezüglich der Tragfähigkeiten gleichwertig. Die Lagerauslegung kann daher nach konventionellen Methoden erfolgen und es müssen keine EHD-Effekte berücksichtigt werden.

Deutliche Unterschiede ergeben sich bei kleineren relativen Schmierpalhöhen. Hier hat die Elastizität des Werkstoffs maßgeblichen Einfluss auf die sich einstellenden Spalthöhen bzw. die erreichbaren Tragfähigkeiten. Wählt man z.B. $h^*_{min} = 0,12$, um zu betrachten welche Sommerfeldzahlen sich ergeben, werden die Unterschiede der gewählten Werkstoffvariante sichtbar. Die Ergebnisse werden in Tabelle 2 gegenübergestellt.

Tabelle 2: Vergleich der Sommerfeldzahlen bei $h^*_{min} = 0,12$

Werkstoffvariante	h^*_{min} [-]	So [-]
Bronze	0,12	7,8
Metall-Kunststoff-Verbund	0,12	18
Hochleistungskunststoff	0,12	85

4 Vergleich der Schmierstalthöhe bei gleicher Tragfähigkeit

In der Regel wird der Konstrukteur eine Last und die Lagerabmessungen aus einem Pflichtenheft vorliegen haben und einen Lagerwerkstoff auswählen. Dann ist eine relevante Kenngröße bei der Auslegung der Lagerstelle, die sich einstellende relative minimale Schmierstalthöhe h^*_{min} . Sie ist ein Maß dafür, ob eine ausreichend dicke Schmierstoffschicht zwischen Welle und Lagerbuchse vorhanden ist. Ist die Schmierstalthöhe h^*_{min} bekannt, wird diese mit einer zulässigen Schmierstalthöhe $h^*_{min,lim}$ verglichen. Dabei werden dann Rauheiten der Gleitpartner, Fluchtungsfehler und Deformationen mit einbezogen. Formabweichungen der Welle wurden bei diesem Vergleich nicht berücksichtigt. Damit ein verschleißbarer Betrieb gewährleistet werden kann, sollte die zulässige minimale Schmierstalthöhe stets kleinere Werte wie die minimale Schmierstalthöhe annehmen ($h^*_{min,lim} < h^*_{min}$). Beim Einsatz weicher Schichten ergibt sich zudem folgende Vereinfachung. Diese Werkstoffe sind im Vergleich zur Welle (meist Stahl) sehr flexibel (siehe auch Tabelle 1). Diese Elastizität in Verbindung mit einer ausreichenden Schichtdicke reicht aus, den Rauheiten des Gegenkörpers auszuweichen. Die Rauheit des Lagerwerkstoffs kann deshalb bei solchen Werkstoffen vernachlässigt werden. Mit dieser Annahme konnten bei eigenen Versuchen und in der Praxis sehr gute Erfahrungen gemacht werden. Die ermittelten relativen zulässigen minimalen Schmierstalthöhen sind in Tabelle 3 aufgelistet.

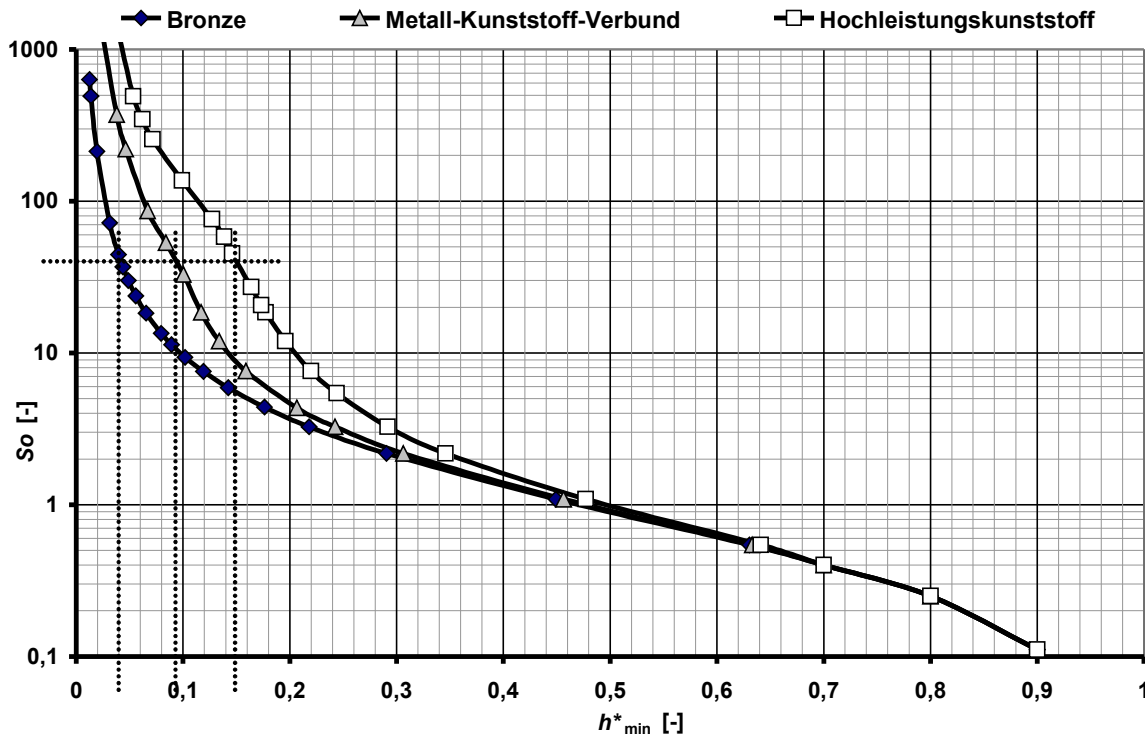


Abbildung 2: Sommerfeldzahl als Funktion von h^*_{min} (Beispiel: konstante Sommerfeldzahl $So = 40$)

Es wird deutlich, dass die relative minimale Schmierstalthöhe abhängig vom gewählten Lagerwerkstoff unterschiedlich ist. Dies lässt sich auf die elastischen Eigenschaften der Werkstoffe und den damit verbundenen EHD-Effekten zurückführen. Zudem können die zulässigen Schmierstalthöhen bei elastischeren Werkstoffen kleiner gewählt werden. Solche Lagerwerkstoffe besitzen daher im Bereich kleiner Spalthöhen Vorteile. Bei der Bronzevariante wäre die Schmierstalthöhe nicht ausreichend. Eine solche Lagerstelle würde im Mischreibungsbereich laufen und verschleifen.

Tabelle 3: Vergleich der relativen Schmierstalthöhen bei konstanter Sommerfeldzahl

Werkstoffvariante	So [-]	h^*_{min} [-]	$h^*_{min,lim}$ [-]
Bronze	40	0,040	0,050
Metall-Kunststoff-Verbund	40	0,093	0,014
Hochleistungskunststoff	40	0,149	0,014

5 Vergleich der elasto-hydrodynamischen Druckverteilung

In diesem Kapitel soll versucht werden zu klären, woraus sich die Tragfähigkeitssteigerungen ergeben. In Abbildung 3 ist die hydrodynamische Druckverteilung dargestellt. Diese wurde durch numerische Lösung der Reynoldsschen Differentialgleichung berechnet, wobei die Deformationen von Lagerwerkstoff und Welle berücksichtigt wurden.

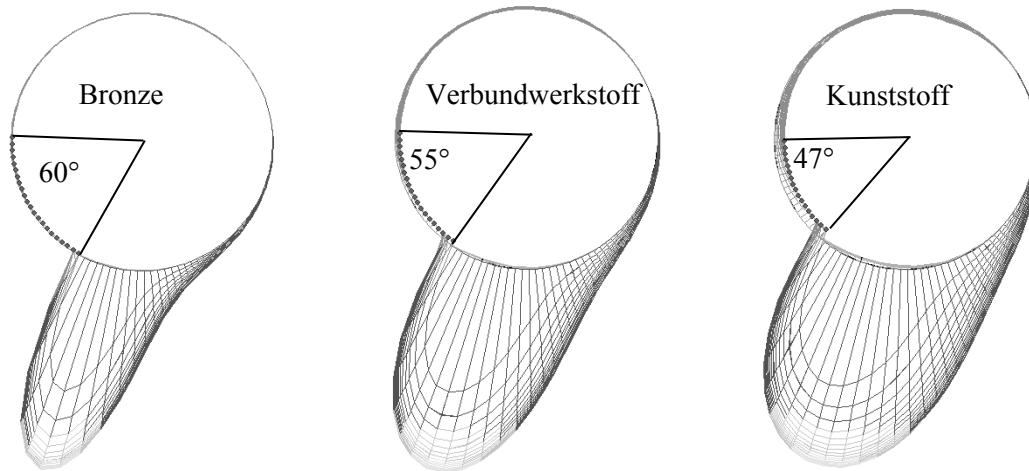


Abbildung 3: Vergleich dimensionlose Druckverteilung und Unterdruckgebiet (normiert)

Die Ausdehnung des hydrodynamischen Druckgebiets ist unterschiedlich groß. Der Grund für dieses Verhalten ist auf die Elastizität der Werkstoffe zurück zu führen. Der Werkstoff weicht durch die Druckbeanspruchung zurück. Je kleiner der Elastizitätsmodul, desto größer ist diese Verformung. Das hydrodynamische Druckverteilungsgebiet wird dadurch größer. Die Tragfähigkeit eines Radialgleitlagers ergibt sich aus dem Integral der hydrodynamischen Drücke über die Fläche. Wird das Druckgebiet größer steigt bei gleichen Maximaldrücken die Tragfähigkeit bzw. bei gleicher Belastung sind die Schmierstalthöhen größer.

Für den Schmierstoff bedeuten größere Schmierstalthöhen ebenfalls eine geringere Belastung. Er wird dadurch weniger geschert.

Die Größe des Unterdruckgebiets im Lager (Punkte) ist ebenfalls unterschiedlich. In diesen Bereichen kann es zu Kavitationserscheinungen kommen, was eine Schädigung des Lagerwerkstoffs erzeugen kann. Das Kunststofflager besitzt das größte elastische Verformungspotenzial. Dies ergibt sich aus der Kombination des niedrigen Elastizitätsmoduls in Verbindung mit einer relativ dicken Schicht. Bei der Metall-Kunststoff-Verbundvariante ist das Verformungsverhalten ähnlich gut, allerdings nicht ganz so hoch, da die Kunststoffschicht nur einige Mikrometer dick ist.

Wenn das elastische Verhalten des Lagerwerkstoffs ein unterschiedliches EHD-Verhalten der Lagervarianten bedingt, soll auch der Einfluss des Werkstoffs auf den Fall einer Verkantung betrachtet werden. In Abbildung 4 ist dieser Fall als Abwicklung einer verkanteten 360°-Lagerbuchse dargestellt.

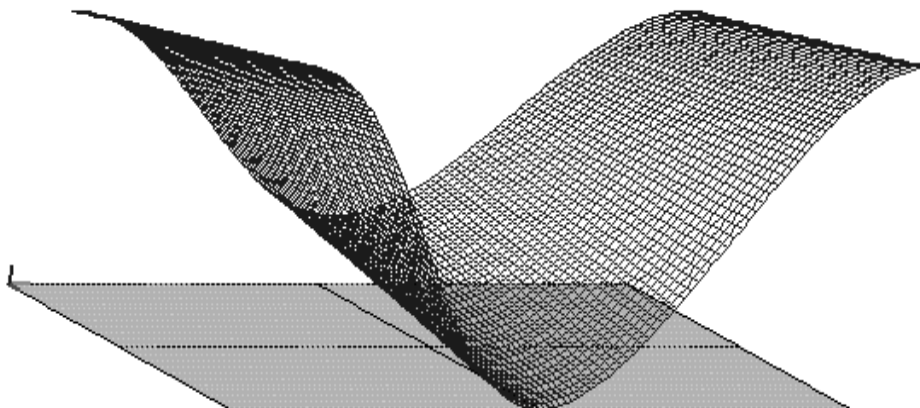


Abbildung 4: Spaltgeometrie eines abgewickelten verkanteten 360°-Lagers

In Abbildung 5 wird die hydrodynamische Druckverteilung der Werkstoffvarianten gegenübergestellt.

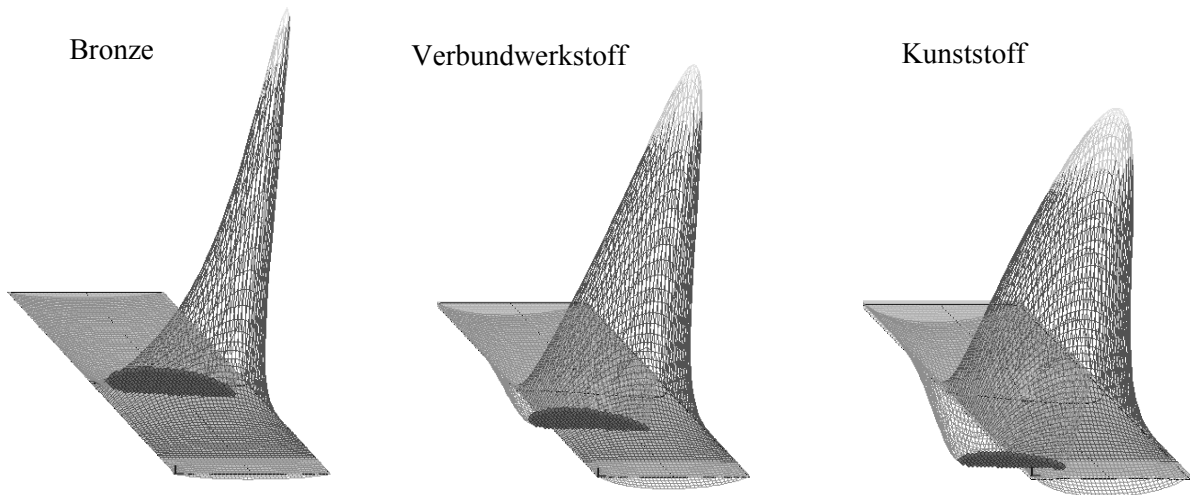


Abbildung 5: Hydrodynamische Druckverteilung bei Verkantung eines Lagers (normiert mit p^*_{max})

Die Unterschiede sind deutlich zu erkennen. Werkstoffe mit kleinem E-Modul können durch ihr Verformungsverhalten Verkantungen entschärfen und hohe hydrodynamische Druckspitzen reduzieren. Dies bedeutet sowohl für den Lagerwerkstoff, als auch für den Schmierstoff eine geringere Beanspruchung.

6 Reibungsverhalten im Mischreibungsgebiet

Anschließend soll noch das Reibungsverhalten anhand der Reibungszahl f verglichen werden. Dazu werden in Tabelle 4 die Haftreibungszahlen der Werkstoffe aufgeführt. Diese haben einen Einfluss auf das Anlaufverhalten einer geschmierten Anwendung. Es wird stets eine möglichst geringe Reibungszahl angestrebt, wodurch die Reibungsverluste und damit die Temperaturen in der Kontaktzone klein gehalten werden. Die in Abbildung 6 dargestellte dynamische Reibungszahl f ist in Abhängigkeit von der relativen minimalen Schmierstalthöhe h^*_{min} aufgetragen.

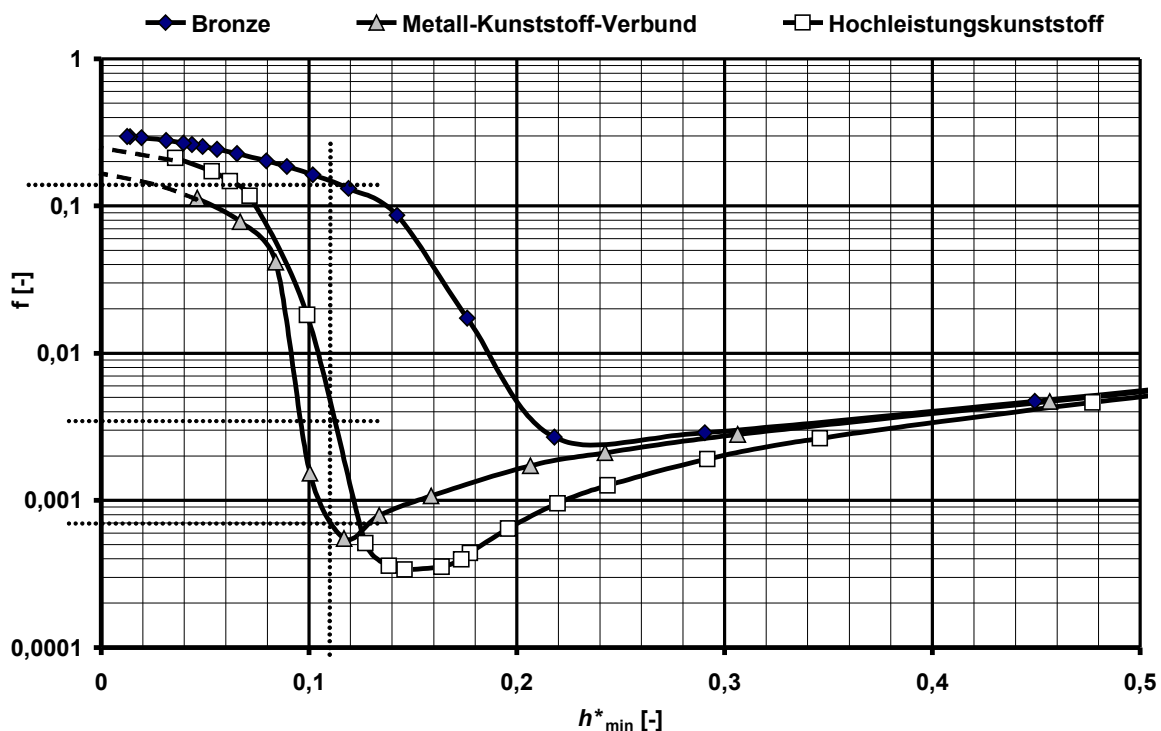


Abbildung 6: Dynamische Reibungszahl der Lagervarianten

Beim Vergleich der Werkstoffvarianten werden wieder die Unterschiede deutlich. Das Reibungsminimum, mit seinem Extrema und der dazugehörigen Lage, ist durch die jeweiligen Minimalwerte der Reibungszahl gut zu erkennen. Die Reibungszahlen für das Beispiel können aus Tabelle 4 entnommen werden.

Tabelle 4: Vergleich der Reibungszahlen

Werkstoffvariante	h^*_{\min} [-]	f_{dyn} [-]	f_{stat} [-]
Bronze	0,11	0,1500	$0,30 \pm 0,12$
Metall-Kunststoff-Verbund	0,11	0,0007	$0,15 \pm 0,07$
Hochleistungskunststoff	0,11	0,0035	$0,24 \pm 0,10$

Die Vorteile des Metall-Kunststoff-Verbunds werden bei diesem Vergleich deutlich. Solche Verbundwerkstoffe zeichnen sich durch die Kombination der Komponenten Metall und Kunststoff aus. Er nutzt seine geringe Anlaufreibung in Verbindung mit seinem elastischen Verhalten. Dies führt dazu, dass dieser Verbund im Vergleich zu metallischen Lagerwerkstoffen mit kleineren Schmierpalhöhen operieren kann. Solche Vorteile können dann z.B. bei Anwendungen mit geringen Gleitgeschwindigkeiten oder kleinen Viskositäten eingesetzt werden. Ähnlich verhält es sich mit Hochleistungskunststoffen, wobei sich die Anlaufreibung, bei der ausgewählten Werkstoffvariante, auf einem höheren Niveau befindet.

7 Festsitz der Lager im Gehäuse

Ein Gleitlager soll nicht nur die Betriebsbedingungen optimal umsetzen, sondern meist durch einen Presssitz mit Überdeckung montiert, fest im Gehäuse verbleiben und darf nicht auswandern. Wenn grundlegend unterschiedliche Werkstoffvarianten gegenübergestellt werden, soll auch der Festsitz der Lagerbuchse im Gehäuse betrachtet werden.

Dazu wird im Anschluss die Fugenpressung p_F (siehe Abbildung 7) der Lagerwerkstoffe in unterschiedlichen Gehäusen bei verschiedenen Temperaturen gegenübergestellt.

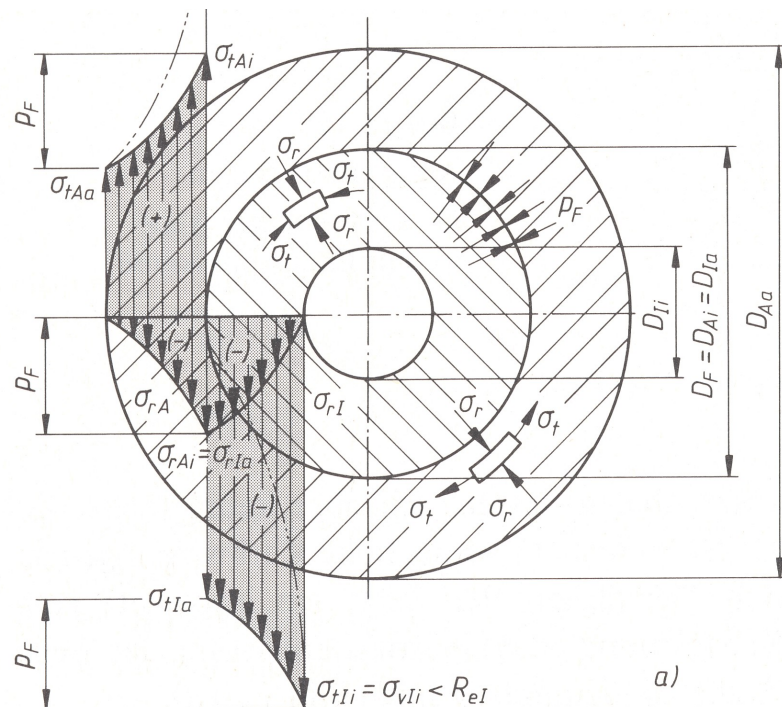


Abbildung 7: Spannungsverteilung eines Pressverbundes

Die Berechnungen in Tabelle 5 basieren auf einer Lagerbuchse mit den Abmessungen ($D = 40\text{mm}$; $B = 30\text{mm}$; $s = 2\text{mm}$). Der Gehäuseaußendurchmesser wurde mit $D_H = 80\text{mm}$ willkürlich festgelegt.

Tabelle 5: Festsitz der Lagervarianten in unterschiedlichen Gehäusewerkstoffen

Werkstoffvariante	Gehäuse	E_H [N/mm ²]	T [°C]	I [µm]	P_F [N/mm ²]	F_{pf} [N]
Bronze	Stahl	210000	-30	56	15,0	5659
			20	72	19,3	7281
			130	107	28,7	10851
	Aluminium	65000 – 70000	-30	103	23,2	8721
			20	92	20,6	7753
			130	67	14,9	5624
	Magnesium	44000- 46000	-30	108	21,8	7983
			20	92	18,1	6807
			130	57	11,2	4223
Metall-Kunststoff-Verbund	Stahl	210000	-30	64	30,1	11326
			20	64	30,1	11326
			130	64	30,1	11326
	Aluminium	65000 – 70000	-30	111	38,8	14619
			20	84	29,2	11011
			130	24	8,2	3084
	Magnesium	44000- 46000	-30	116	33,2	12494
			20	84	24,0	9045
			130	14	4,0	1495
Hochleistungskunststoff	Stahl	210000	-30	162	3,4	1266
			20	192	3,1	1170
			130	258	1,4	540
	Aluminium	65000 – 70000	-30	189	3,9	1458
			20	192	3,1	1156
			130	198	1,1	412
	Magnesium	44000- 46000	-30	194	3,9	1473
			20	192	3,0	1145
			130	188	1,0	391

Lager aus Kunststoff, oder allgemein ausgedrückt Lagerwerkstoffe mit kleinem Elastizitätsmodul, können durch Pressverbund mit Übermaß nicht den gleichen Festsitz erzeugen wie metallische Lagerwerkstoffe. Der Vorteil hinsichtlich der Schmierpalthehöhen und des Reibungsverhaltens im Betrieb wird an dieser Stelle zum Nachteil. Sollen solche Werkstoffe eingesetzt werden, sollte durch konstruktive Maßnahmen ein Auswandern der Lagerbuchsen vermieden werden.

Zusätzlich macht sich bei dicken Polymerschichten die starke thermische Dehnung nachteilig bemerkbar. Dies muss auch bei der Spielauslegung über den gesamten Temperaturbereich Berücksichtigung finden. Beim Metall-Kunststoff-Verbund und der Bronze existieren diese Nachteile weniger.

8 Zusammenfassung und Matrix zur Variantenauswahl

Wie diese Gegenüberstellung zeigt, ist bei Ausnutzung von Elasto-Hydro-Dynamische-Effekten die genaue Kenntnis der Werkstoffeigenschaften des Lagermaterials zwingend erforderlich. Sind die Werkstoffwerte vorhanden, können die Potenziale einer solchen Lagerstelle für kritische Anwendungen genutzt werden. Elastische Lagerwerkstoffe können z.B. dazu genutzt werden, Verkantungsprobleme zu entschärfen oder den Einsatz von Schmierstoffen mit geringer Viskosität zu ermöglichen. Die Dimensionierung einer solchen Lagerstelle muss daher immer unter Anwendung der spezifischen Werkstoffkennwerte erfolgen. Der Lagerwerkstoff reagiert durch seine mechanischen Eigenschaften dabei sehr individuell auf die Betriebsbedingungen. Auch beim Festsitz der Lagerbuchse, durch Pressverbund, gilt es die Festigkeitsunterschiede zu berücksichtigen.

Tabelle 6 soll Anwendern eine Hilfestellung geben, welche Werkstoffvariante im direkten Vergleich für den spezifischen Einsatzfall Vorteile und Nachteile bietet.

Dabei wird folgende vereinfachende Einstufung vorgenommen:

(+ = Vorteil, ○ = Kompromiss, - = Nachteil).

Tabelle 6: Matrix zur Werkstoffvorauswahl

Kriterium Betriebsbedingung	Bronze	Verbund- werkstoff	Kunststoff- Compound
kleine Schmierstalthöhen $h^*_{\min} < 0,3$	-	+	+
niedrige Viskositäten ¹⁾	-	+	+
niedrige Gleitgeschwindigkeiten ²⁾	-	+	+
Fluchtungsfehler und Kantenlasten	-	○	+
dynamische Lasten	+	+	○
hohe Temperaturen	+	+	-
niedrige Anlaufreibung	-	+	○
Gewichtsreduktion	-	○	+
Werkstofffliessen	○	+	-
Festsitz im Gehäuse	+	+	-

1) z.B. niedrig viskose Schmierstoffe z.B. Wasser, Wasser-Glykol-Mischung, biologisch abbaubare Öle etc.

2) z.B. langsam drehende Anwendungen, häufiger An- und Auslauf

9 Literatur

- VDI 2204 (Blatt 2) Auslegung von Gleitlagerungen , Berechnung
VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb
September 1992
- DIN31652-1 Hydrodynamische Radial-Gleitlager im stationären Betrieb
Mai 2002
- Berger. M.: Numerische Lösung der Reynoldsschen Differentialgleichung zur Berechnung
von Gleitlagerdaten.
Diplomarbeit Fachhochschule Düsseldorf 1995
- Domininghaus. H.: Die Kunststoffe und Ihre Eigenschaften. 5. Aufl.
Düsseldorf: VDI Verlag 1998
- Spiegel. K.: Über den Einfluss elastischer Deformationen auf die Tragfähigkeit von
Radialgleitlagern.
Schmiertechnik + Tribologie 20 (1973) 1, 3-9
- W. Matek; D. Muhs; Roloff/Matek Maschinenelemente
H. Wittel.: Braunschweig:Vierweg & Sohn Verlagsgesellschaft. 11.Auflage 1987