

## Bestimmung von Anwendungsreibungswerten stirnseitig befestigter Freiläufe



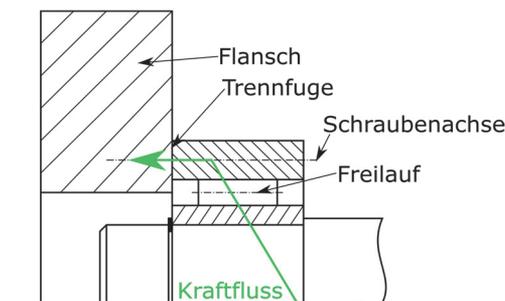
Krahl, S.; Lohrengel, A.

*Für eine sichere Auslegung der Mehrschraubenverbindung zwischen Freilaufaußenring und angrenzendem Flansch ist eine möglichst genaue Kenntnis des Reibwertes in der Trennfuge erforderlich. Dieser Artikel gibt einen Überblick über die Ermittlung von Anwendungsreibungswerten an Flachproben, welche eine ähnliche Oberflächentopographie aufweisen wie der Freilaufaußenring. Untersucht wird der Einfluss von verschiedenen Betriebsstoffen, Oberflächenzuständen und Schmiermitteln. Zudem wird eine Aussage bezüglich der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Einbausituation getroffen.*

*For a reliable dimensioning of the multi-bolt connection between the freewheel outer ring and the adjacent flange, it is necessary to know the coefficient of friction in the contact zone as accurately as possible. This article provides an overview of the determination of friction coefficients on flat specimens with a surface topography similar to that of the freewheel outer ring. The influence of different surface conditions and lubricants is investigated. In addition, a statement is made regarding the transferability of the results to the installation circumstances.*

### Einleitung

Prinzipbedingt entstehen beim Einsatz von Freiläufen hohe Normalkräfte, welche zu einer Aufweitung des Freilaufaußenringes führen können. Bei stirnseitig verschraubten Freiläufen, siehe Abbildung 1, kann es durch die Aufweitung zum frühzeitigen Lösen der Schraubenverbindung zwischen Freilauf und Flansch kommen /1/.

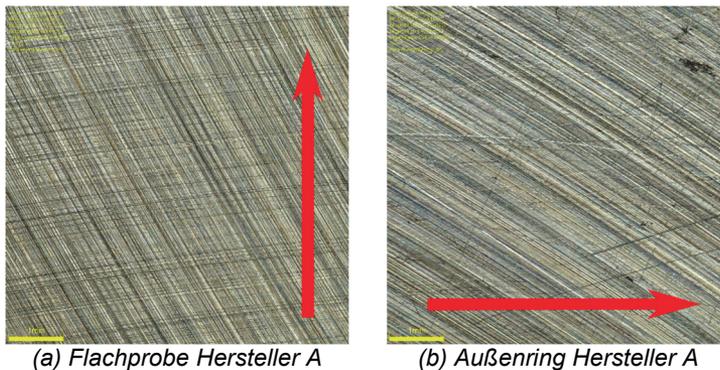


**Abbildung 1:** Schematischer Aufbau bei stirnseitig verschraubtem Freilauf nach /1/

Neben den Kräfteverhältnissen ist der sich einstellende Haftreibungswert in der Trennfuge von entscheidender Bedeutung für das übertragbare Sperrmoment. Eine genaue Kenntnis von Anwendungsreibungswerten unter Einfluss verschiedener Betriebsstoffe und Oberflächenzustände ist deshalb unabdingbar für die sichere Auslegung der Mehrschraubenverbindung. Der Haftreibungswert wird im Folgenden an Flachproben ermittelt. Außerdem wird überprüft, ob die Ergebnisse auf den Kontakt Freilaufaußenring-Flansch übertragbar sind.

### Untersuchungen an Flachproben

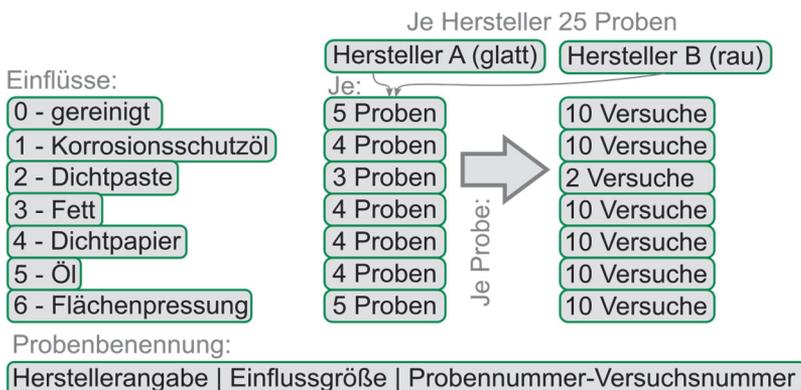
Es wurden rechteckige Flachproben aus 16MnCrS5 mit einsatzgehärteter und geschliffener Oberfläche untersucht. Die Proben des Herstellers B weisen eine rauere Oberfläche auf. In Abbildung 2 ist die Oberflächentopographie der Proben zusammen mit der des Freilaufaußenringes exemplarisch für den Hersteller A zu sehen.



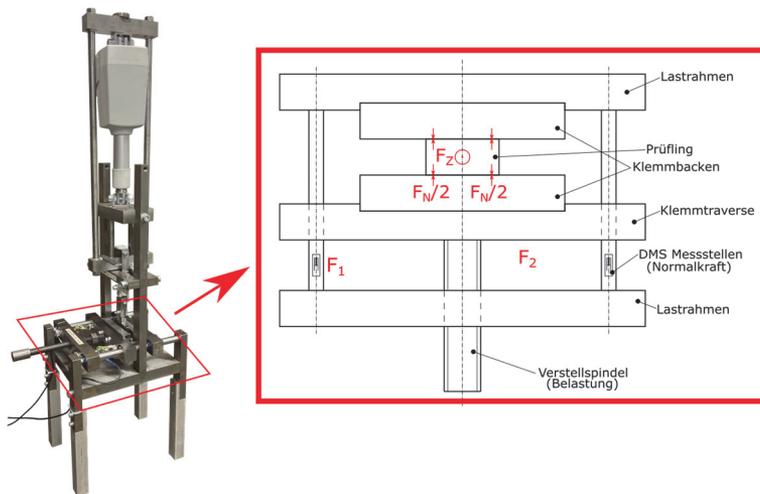
**Abbildung 2:** Oberflächenbeschaffenheit und Belastungsrichtung Flachproben (Prüfkraft) und Außenringe (Drehmoment in Umfangsrichtung) im Vergleich

Als Kontaktpartner dienen ungehärtete Klemmbacken aus 42CrMo4+QT welche den Flansch als Kontaktpartner des Freilaufaußenringes abbilden sollen. Aus Abbildung 3 ist der Versuchsplan zusammen mit der Benennung der Behandlungszustände ersichtlich. Die Versuche werden am Reibwerttester des IMW durchgeführt. Hierbei werden, wie in Abbildung 4 zu sehen, die verspannten Flachproben unter einer Querkraft aus dem Klemmspalt gezogen. Während der Versuche wird jeweils der Rutschweg laseroptisch aufgenommen und die Normalkräfte  $F_1$  und  $F_2$ , sowie die Zugkraft  $F_Z$  an DMS-Messstellen aufgezeichnet. Aus den Kräften lässt sich mit Gleichung (1) der gesuchte Reibwert  $\mu$  ermitteln.

$$\mu = \frac{F_Z}{2 \cdot F_N} = \frac{F_Z}{2 \cdot (F_1 + F_2)} \quad (1)$$

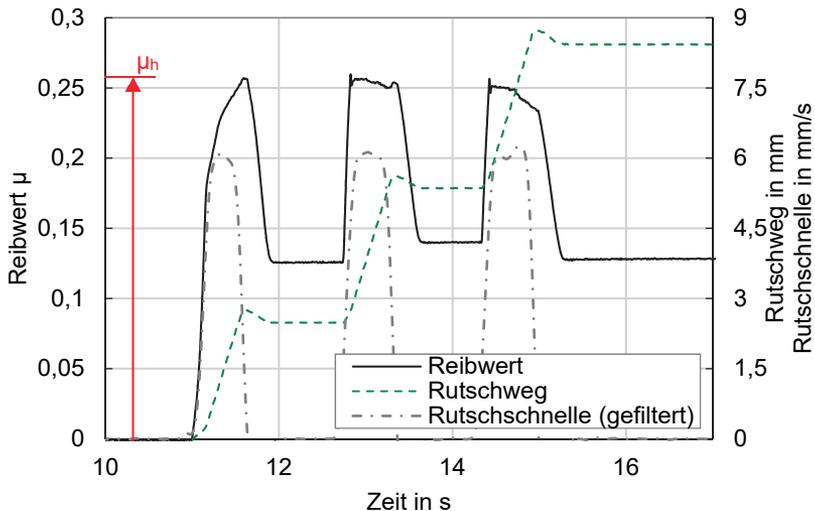


**Abbildung 3:** Versuchsplan und Benennung der Einflüsse und Proben



**Abbildung 4:** Reibwerttester des IMW, real und schematisch nach /1/

Aus den aufgenommenen Werten kann der in Abbildung 5 exemplarisch dargestellte Verlauf abgeleitet werden. Hierbei ist zusätzlich die als zeitliche Ableitung des Rutschweges ermittelte Rutschschnelle geglättet dargestellt. Es wird während eines Versuches dreimal an der Probe gezogen, sodass sich drei Peaks ergeben. Der erste Peak steht hierbei aufgrund des stetig über dem Rutschweg zunehmenden Kraftverhältnis nicht im Zusammenhang mit einem Rutschvorgang. Vielmehr lässt sich hier die elastische Verformung des Prüfstandes erkennen. Beim zweiten und dritten Ziehen an der Probe bilden die jeweils ersten lokalen Maxima den gesuchten Haftreibungswert ab, sodass prinzipiell zwei Datenpunkte pro Versuch aufgenommen werden können.

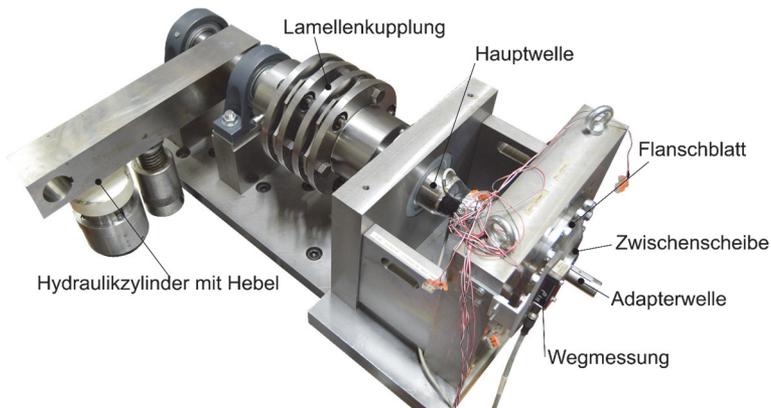


**Abbildung 5:** Auswertung eines Reibversuches am Beispiel A05 Versuch 10

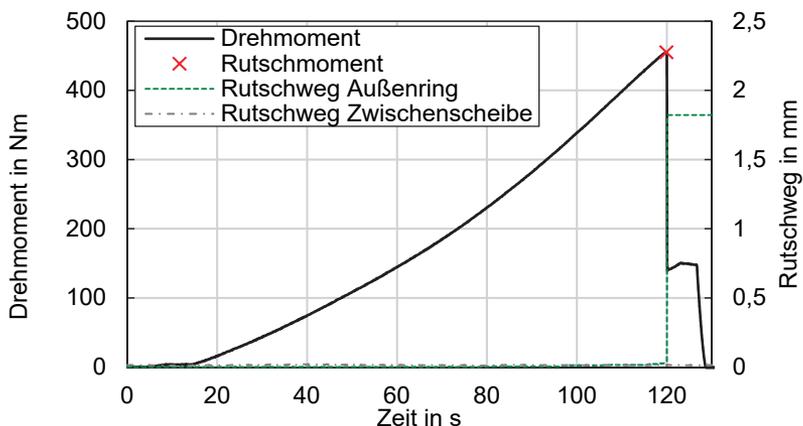
Bei einigen der Versuchsreihen zeigt sich durch die signifikant veränderte Oberflächenstruktur (z. B. durch Fett) ein abweichendes Verhalten im Verlauf des Reibwertes. Hierdurch können nicht für jede Versuchsreihe zwei Datenpunkte pro Versuch ermittelt werden. Generell wird jedoch über alle Versuchsreihen der Peak beim zweiten Ziehen an der Probe ausgewertet, um die Versuche untereinander vergleichbar zu machen. Bei nahezu allen Versuchen handelt es sich hier auch um den *worst-case*, welcher das übertragbare Sperrmoment am Freilauf definiert.

### Untersuchungen am Freilauf

Stichprobenartig werden statische Rutschversuche am Prüfling M1-08, einem Freilauf des Herstellers A, durchgeführt. Deren Ergebnisse sollen eine Aussage bezüglich der Übertragungsfähigkeit der an den Proben ermittelten Anwendungseibwerte auf die eigentliche Einbausituation des stirnseitig verschraubten Freilaufes ermöglichen. Als Kontaktpartner dient eine Zwischenscheibe aus 42CrMo4+QT, welche den Flansch abbilden soll. Für gereinigte Oberflächen werden die Haftreibwerte aus durchgeführten Versuchen extrahiert. Zusätzlich werden Untersuchungen mit Öl in der Trennfuge durchgeführt. Die Rutschmomente wurden am Freilaufprüfstand aus Abbildung 6 unter Beaufschlagung des Freilaufes mit einem quasi-statischen Torsionsmoment ermittelt. In Abbildung 7 ist ersichtlich, dass sich im Momentenverlauf eine explizite Rutschgrenze ausbildet, an der das Rutschmoment und somit auch der Haftreibwert bestimmt werden kann.



**Abbildung 6:** Prüfstand für Rutschversuche mit stirnseitig befestigten Freiläufen

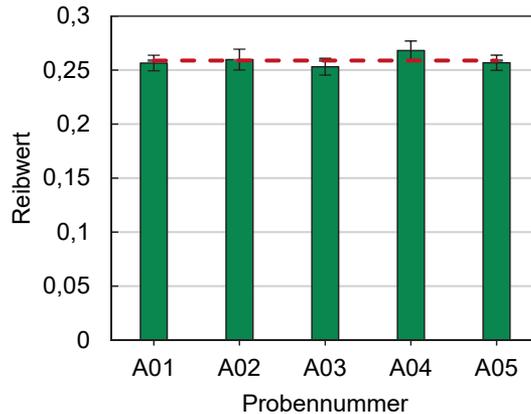


**Abbildung 7:** Exemplarischer Verlauf eines Rutschversuches am Freilaufprüfstand

## Ergebnisse

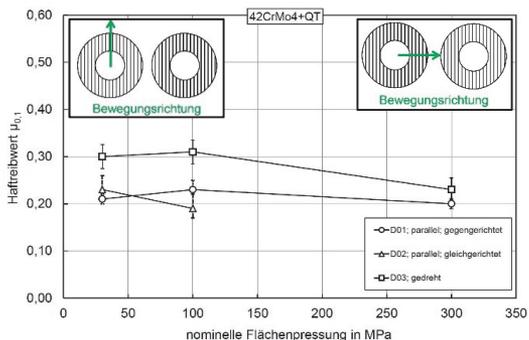
Sowohl für die ermittelten Haftreibungswerte an den Flachproben, als auch an den Freiläufen selbst zeigt der Kolmogoroff-Smirnov Test /2/ für jede der Versuchsreihen eine Normalverteilung der Beobachtung. Für die einzelnen Proben und Versuchsreihen kann somit neben dem arithmetischen Mittelwert und der Standardabweichung der Stichprobe, der Bereich bestimmt werden, in dem der Haftreibungswert für einen Vertrauensbereich von 95 % liegt. Aufgrund des endlichen Stichprobenumfangs wird dafür die Student-t-Verteilung herangezogen /4/. Exemplarisch sind die ermittelten Werte für die Proben des Herstellers A in der Versuchsreihe mit gereinigten Oberflächen in Abbildung 8 dargestellt. Neben den

als Balken dargestellten Mittelwerten, ist die Streuweite der Probe jeweils als Fehlerindikator eingetragen. Es zeigt sich, dass der Probeneinfluss gering ist, sodass eine Auswertung auch auf Ebene der Versuchsreihen durchgeführt werden kann.

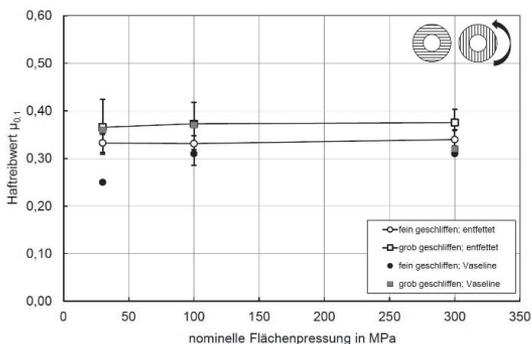


**Abbildung 8:** Mittelwerte der Haftreibwerte für Proben des Herstellers A, gereinigte Oberflächen

Die an den Flachproben ermittelten Haftreibwerte sind nicht direkt auf die eigentliche Einbausituation übertragbar. In /5/ und /6/ wird aufgezeigt, dass der Haftreibwert von der Belastungsart und -richtung, sowie der Anordnung der oberflächlichen Riefen der Kontaktpartner zueinander abhängig ist. Aus Abbildung 9 ist ersichtlich, dass im Allgemeinen für eine Torsionsbelastung ein höherer Haftreibwert vorliegt. Die Riefen spielen bei der Torsionsbelastung eine untergeordnete Rolle. Für eine Belastung durch eine Querkraft zeigt sich hingegen eine Abhängigkeit des Haftreibwertes bei zunehmender Flächenpressung, je nach Riefenausrichtung. Folglich kann aus den Ergebnissen an den Flachproben nur eine Handlungsempfehlung abgeleitet werden. Dieser liegt die Annahme zu Grunde, dass die Verhaltensweisen unter verschiedenen Oberflächeneinflüssen identisch sind und nur die Höhe des Haftreibwertes zwischen den unterschiedlichen Belastungsarten variiert.



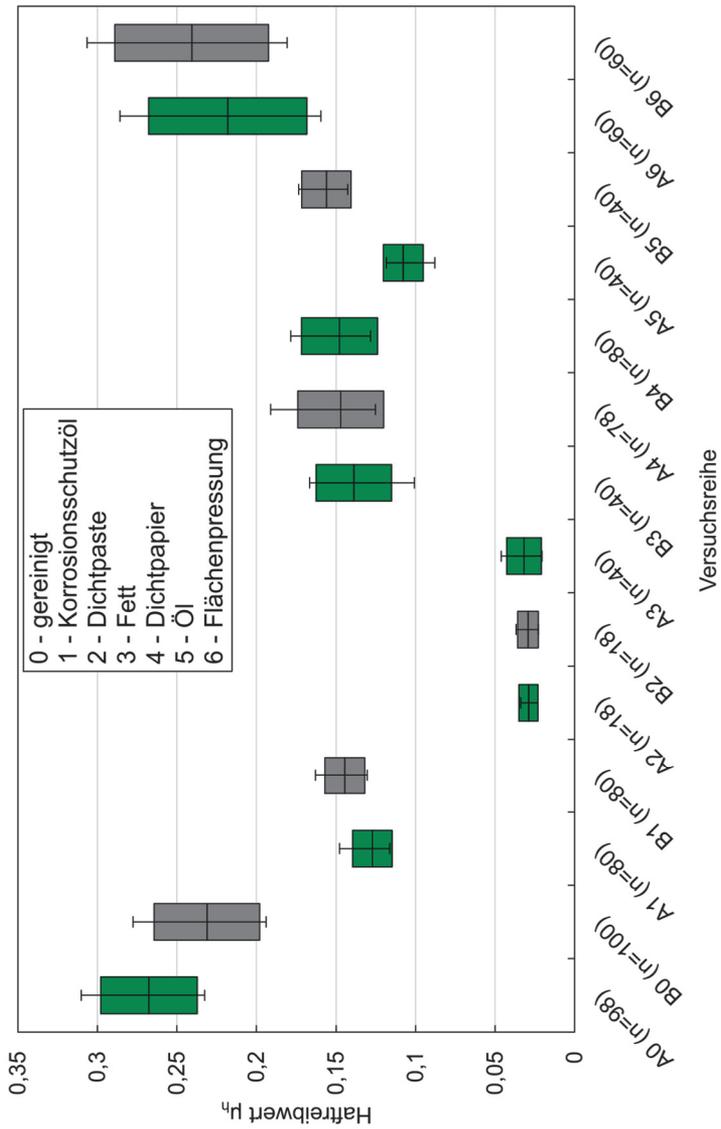
(a) Querkraftbelastung



(b) Torsionsbelastung

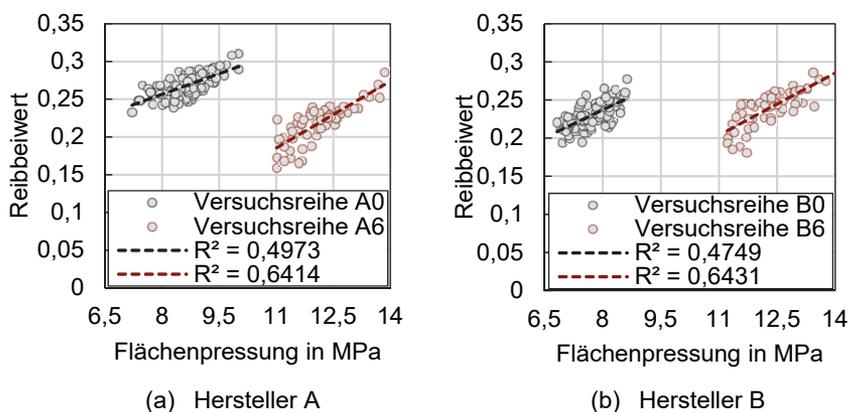
**Abbildung 9:** Haftreibwert in Abhängigkeit der nominellen Flächenpressung; 42CrMo4+QT in Selbstpaarung; geschliffene Probenkörper /5/

Die Ergebnisse aller Untersuchungen sind in Abbildung 10 in Form eines Box-Plots dargestellt. Die Boxen werden dabei durch die ermittelten Grenzen für das 2,5 % bis 97,5 % Quantil der angenommenen Normalverteilung begrenzt. Die mittlere horizontale Linie innerhalb einer Box zeigt den Haftreibmittelwert für eine Versuchsreihe. Als horizontale Linien außer-/innerhalb der Box sind jeweils die beobachteten Maxima und Minima des Haftreibwertes eingezeichnet. Auf der Abzissenachse findet sich neben der Bezeichnung der Versuchsreihen auch der jeweilige Stichprobenumfang. Die Freilaufversuche sind jeweils mit M1-08 bezeichnet (vgl. /1/ und /2/ zur Prüflingsbezeichnung) und bestätigen die oben getroffene Annahme, dass die Verhaltensweisen z. B. unter Einfluss von Öl identisch für Flachprobe und Freilauf sind.



**Abbildung 10:** Übersicht Versuchsergebnisse

Es ist ersichtlich, dass für Versuche mit Zwischenmedium bei den raueren Flachproben des Herstellers B ein höherer Haftreibwert zu beobachten ist. Ausgenommen hiervon sind die Versuchsreihen mit Dichtpapier und Dichtpaste in der Trennfuge, da hier die Oberflächentopographie signifikant abgeändert wird. Bei beiden Zwischenmedien ist kein Einfluss der Rauheit vorhanden. Unter Einfluss der Öle zeigt sich, dass rauere Oberflächen zu bevorzugen sind. Gerade bei Kontamination durch das unadditivierte Mineralöl (Reihe 5) ist dadurch eine relativ hohe Steigerung des Haftreibwertes möglich. Kann die Rauheit des Freilaufaußenringes eingestellt werden, so lässt sich hierüber der Haftreibwert im kontaminierten Kontakt steuern. Falls eine Dichtung des ölgeschmierten Freilaufes nötig ist, empfiehlt es sich, ein Dichtpapier zwischen die Kontaktpartner zu legen, da die Dichtpaste den Haftreibwert stark herabsetzt.



**Abbildung 11:** Haftreibwert der Probenkörper in Abhängigkeit der Pressung

Zur Maximierung des Sperrmoments ist eine Reinigung und Entfettung der Kontaktflächen vorzusehen. Aus Abbildung 10 ist ersichtlich, dass durch die Reinigung im Mittel eine Steigerung des Haftreibwertes um das ca. Zweifache, im Vergleich zur mit Korrosionsschützöl kontaminierten Oberfläche, möglich ist (z. B. A1 zu A0). Zwischen den Versuchsreihen bei niedriger Flächenpressung (0) und hoher Flächenpressung (6), mit jeweils gereinigten Oberflächen, lassen sich im Mittel für die raueren Proben B keine größeren Unterschiede feststellen. Werden Haftreibwert und Flächenpressung für eine Versuchsreihe zueinander betrachtet, zeigt sich, dass der Haftreibwert innerhalb der Versuchsreihe mit zunehmender Pressung steigt, vgl. Abbildung 11. Wobei für die glatten Proben der Haftreibwert im Mittel mit zunehmender Pressung sinkt. Eine eindeutige Aussage bezüglich der Korrelation von Rauheit, Flächenpressung und Haftreibwert ist somit nicht möglich. Ein Grund für den im Mittel niedrigeren Haftreibwert der Proben A bei hoher Pressung kann der bereits diskutierte Einfluss der Riefenausrichtung sein (Abbildung 9), welche für die einzelnen Proben A zum Teil stark unterschiedlich ist.

## Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen, dass für die Kontaktfläche des Freilaufes an dessen Außenring eine deutliche Reibwertabnahme bei Verunreinigung mit üblichen Ölen und Fetten zu erwarten ist. Zeitgleich kann durch saubere und entfettete Oberflächen ein hoher Haftreibwert realisiert werden. Eine hohe Oberflächenrauheit wirkt sich bei gereinigten Kontaktflächen eher negativ auf das zu maximierende Sperrmoment aus. Bei verunreinigten Oberflächen hingegen kann der Haftreibwert durch eine große Rauheit des Freilaufaußenringes gesteigert werden.

## Danksagung

Der Autor bedankt sich bei der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) und ihren Mitgliedern für die inhaltliche Betreuung sowie bei der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) für die finanzielle Unterstützung des Projekts „Stirnseitige Befestigung von Freiläufen“ (FVA-Nr. 704II, IGF-Nr. 20671 N/1).

## Literatur

- /1/ Hofmann, S.: Eine Theorie der behinderten radialen Aufweitung am stirnseitig befestigten Freilauf. Dissertation. Technische Universität Clausthal, Institut für Maschinenwesen, 2019
- /2/ Klügel, N.: Stirnseitige Befestigung von Freiläufen, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben FVA 704 II, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (erscheint demnächst)
- /3/ Sachs, L.: Angewandte Statistik. Bd. 10, Springer Verlag, 2002
- /4/ Klein, B.: Versuchsplanung-DoE: Einführung in die Taguchi/Shainin-Methodik. Bd. 4, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2014
- /5/ Gräfensteiner, M.; Leidich, E.: GECKO-TP I: Analyse und Synthese charakterisierender Kennwerte zur funktionsgerechten Gestaltung von Wirkflächenpaaren in reibschlüssigen Verbindungen; Abschlussbericht; In: FVV-Heft Bd. 1077, Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., 2015
- /6/ Hahne, H.: Der Einfluss der Oberflächenrauheit auf das gegenseitige Haften von Werkstücken aus Stahl bei Querpressverbindungen, Dissertation, TU Braunschweig, 1969