

Einfluss von oberflächennahen Parametern auf die Lebensdauer von Klemmrollenfreiläufen

Duchâteau, F.; Lohrengel, A.

Der Einfluss der oberflächennahen Parameter Einhärtetiefe, Rauheit und Elastizitätsmodul (in Form von Hartmetalleinlagen) können nach heutiger Erkenntnis nicht genau beschrieben werden und stehen in keiner Berechnungsgrundlage zur Auslegung von Klemmrollenfreiläufen zur Verfügung. Die Parameter wurden im Rahmen eines Forschungsvorhabens hinsichtlich einer möglichen Steigerung der Lebensdauer experimentell und simulativ untersucht, um Vorschläge für eine optimierte Auslegung vorzunehmen.



The influence of the near-surface parameters hardness depth, roughness and modulus of elasticity (in the form of hard metal inserts) cannot be described precisely according to current knowledge and are therefore not available in any calculation basis for the design of freewheels. The parameters were investigated experimentally and simulatively as part of a research project with regard to a possible increase in life in order to make suggestions for an optimized design.

Einleitung und Problemstellung

Freiläufe zählen zu den drehrichtungsabhängig selbsttätig schaltenden Kupplungen. Vorwiegend werden im industriellen Umfeld reibschlüssige Freiläufe (Klemmrollen- und Klemmkörperfreiläufe) eingesetzt, bei denen die Drehmomentübertragung in Abhängigkeit der Relativbewegung von An- und Abtriebsseite, in Form des Verdrehwinkels φ , erfolgt. Neben hoher Schaltpräzision wird von Freiläufen eine hohe Lebensdauer gefordert. Die Lebensdauer gilt als erreicht, wenn das Drehmoment nicht mehr zuverlässig und mit anhaltender Präzision übertragen werden kann. Im normalen Schaltbetrieb ist als häufigste Ausfallursache vor allem die Materialermüdung verantwortlich. Betroffen ist in erster Linie der Innenstern vom Klemmrollenfreilauf. Durch geeignete Wahl der Materialparameter Einhärtetiefe, Elastizitätsmodul und Rauheit im Klemmkontaktbereich des Innensterns kann die Lebensdauer erfahrungsgemäß gesteigert werden. Diese Materialparameter des oberflächennahen Bereiches bleiben bei der Auslegung bisher jedoch unberücksichtigt. Hersteller greifen daher auf Erfahrungswissen zurück, was zu einer Überdimensionierung der Freiläufe führt. Aus diesem Grund besteht dringender Forschungsbedarf in diesem Bereich, der im Rahmen eines FVA-Vorhabens erstmals betrachtet wurde.

Theorie der Freilauflebensdauer

Die Prognose der Lebensdauer von Klemmrollenfreiläufen erfolgt in der Praxis anhand des Lebensdauermodells nach Welter /1/, Deppenkemper /2, 3/ und Lohrengel /4/ auf Grundlage des Ansatzes nach Lundberg und Palmgren /5/. Analog zum Vorgehen bei der Lebensdauerprognose bei Wälzlagern, wird bei Freiläufen die Lebensdauer anhand der Beanspruchung (Hertzische Pressung) im Wälzkontakt zwischen Außen- und Innenring zur Klemmrolle bestimmt. Dabei ist zwischen Klemmrolle und Stern nach /6/ der kritische Kontakt zu erwarten. Ergänzend wirken bei Freiläufen, im Gegensatz zu Wälzlagern, neben den üblichen Normalkräften F_N Tangentialbelastungen F_{tan} , die zu einer zusätzlichen Schubbeanspruchung des Werkstoffes führen und aus der Übertragung des Drehmomentes T resultieren, wie in Abbildung 1 dargestellt. Die im Folgenden betrachteten oberflächennahen Materialparameter Einhärtetiefe (Eht), Elastizitätsmodul (E-Modul) und Rauheit werden in bisherigen Lebensdauerabschätzungen nicht berücksichtigt. Die Lebensdauer von Freiläufen wird aktuell über Erlebenswahrscheinlichkeiten abgeschätzt, wobei die im Kontakt wirkende Hertzische Pressung p_{Hertz} verwendet wird, siehe Gleichung 1. Der Proportionalitätsfaktor U und die Exponenten d und c sind zuvor experimentell zu bestimmen.

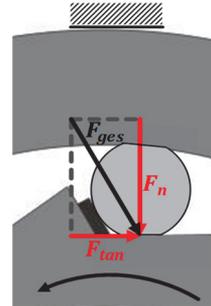


Abbildung 1: Kontaktbeanspruchung im Klemmrollenfreilauf /7/

$$\ln\left(\frac{1}{S}\right) = U \cdot N^d \cdot \int_A p_{Hertz}^c dA \quad (1)$$

Durch das Verrechnen der Einzelerlebenswahrscheinlichkeiten für Innenring, Klemmrollensatz und Außenring, kann die Erlebenswahrscheinlichkeit des Gesamtfreilaufs berechnet werden. Durch Umstellen der Gleichung 1 nach der Zyklenzahl N und der Definition der enthaltenen Parameter, kann die Lebensdauer LW abgeschätzt werden:

$$LW = a_{Frl} \left(\frac{K}{M_T / \tan(\alpha_i)} \right)^{p_{Frl}} \quad (2)$$

Einfluss der Einhärtetiefe und Rauheit

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen in Form von Schaltversuchen durchgeführt. Im Folgenden wird der Einfluss unterschiedlicher Eht dargestellt und verglichen. Ein möglicher Einfluss durch Rauheitsunterschiede wird ebenfalls betrachtet. Für die Untersuchung der Eht-Variation wird als Vergleich ein Standardfreilauf mit einer Eht von 0,6 mm

verwendet. Betrachtet werden Variationen mit einer Eht von 0,3 mm und 0,1 mm. Es liegen zwei Varianten der Rauheit ($Rz \approx 3 \mu\text{m}$ und $Rz \approx 8 \mu\text{m}$) vor, die jeweils verglichen werden. Herstellungsbedingt unterliegen die Eht-Angaben z. T. starken Schwankungen, wie der Auszug in Tabelle 1 zeigt.

Tabelle 1: Einhärtetiefen für Sollwert und Istwerte nach dem Härteprozess aus /7/

	Soll Eht	Erreichte Eht		
Standard	0,6	0,70	0,75	0,77
Variante 1	0,3		0,15	0,19
Variante 2	0,1	0,19	0,22	0,34

Die Messungen wurden für beide Rauheitsvarianten durchgeführt. Die tatsächlich erreichten Einhärtetiefen lassen keine ausreichende Differenzierbarkeit zwischen den Varianten zu, wie die Werte in Tabelle 1 zeigen. Die Versuchsergebnisse zwischen den Eht-Varianten 0,3 mm und 0,1 mm mit der Rauheit $Rz \approx 3 \mu\text{m}$ bestätigen die mangelnde Differenzierbarkeit, sodass die Versuche der Varianten 1 und 2 zu einer gemeinsamen Versuchsreihe zusammengefasst werden. Die Ergebnisse der durchgeführten Eht-Versuche sind Abbildung 2 zu entnehmen.

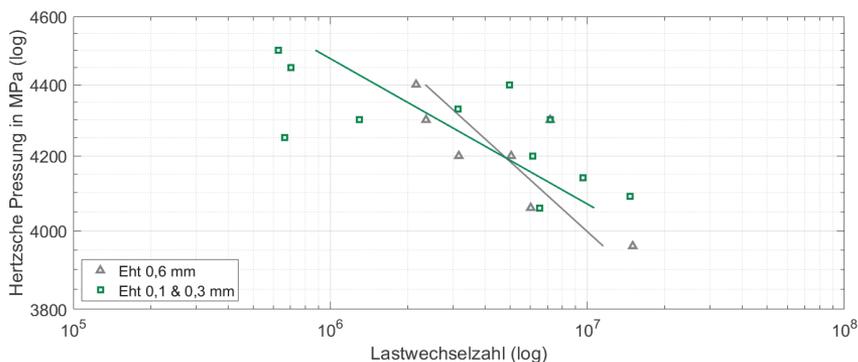


Abbildung 2: Auswahl Eht-Versuchsergebnisse nach /7/ mit Soll-Eht

Die mangelnde Differenzierbarkeit der Eht-Varianten hat zu keiner wesentlich unterscheidbaren Lebensdauer bei den Versuchen geführt. Eine Veränderung der Lebensdauer zwischen den Variationen (Eht 0,1 mm und 0,3 mm) und der Standardvariante (Eht 0,6 mm) ist ebenfalls nicht erkennbar. Die Unterschiede der Regressionsgeraden zueinander sind primär auf die geringe Versuchsanzahl zurückzuführen. Eine Eht im Bereich von 0,15 mm bis 0,77 mm scheint keinen feststellbaren Einfluss auf die Lebensdauer aufzuweisen, wobei die Versuche nicht als statistisch abgesichert angenommen werden können. Eine Betrachtung der

Oberflächen im Wälzbereich der Innensterne weisen hingegen unterschiedliche Schadensbilder auf, wie Abbildung 3 zeigt.

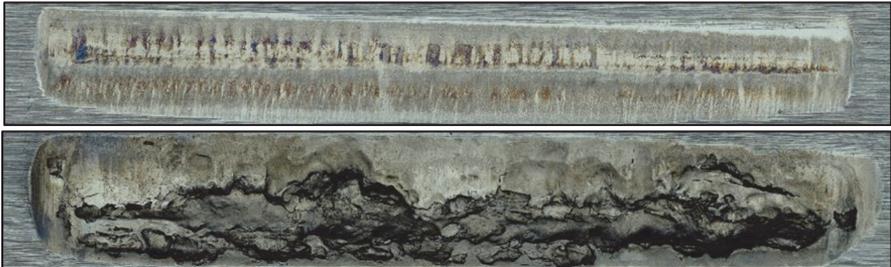


Abbildung 3: Charakteristische Oberfläche bei vergleichbarer Last & Zyklenzahl, oben: Standardprüfling (Eht 0,6 mm); unten: Variante 2 (Eht 0,1 mm) nach /7/

Die Klemmflächen des Standardprüflings (Eht 0,6 mm) weisen in der Regel nur wenige lokale Ausbrüche auf, während entsprechende Flächen von Prüflingen mit Eht 0,1 mm vermehrt über die gesamte Breite zerstört sind. Insgesamt konnte festgestellt werden, dass Prüflinge mit geringerer Eht vermehrt kleine lokale Ausbrüche, Mikropittings und größere Ausbrüche aufwiesen. Diese Art der Schäden konnte nur in wenigen Fällen und weniger stark ausgeprägt beim Standardprüfling festgestellt werden. Analysierte Schlibfbilder in /7/ lassen vermuten, dass das Versagen infolge von Ermüdung auftritt. Wird neben den Einhärtetiefen die Rauheit variiert, lassen sich weitere Erkenntnisse hinsichtlich des Einflusses des oberflächennahen Einflussparameters „Rauheit“ ableiten. Hierfür werden in einer weiteren Versuchsreihe die bereits genannten Variationen mit einer Rauheit von $Rz \approx 8 \mu\text{m}$ durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuche sind in Abbildung 4 dargestellt. Der besseren Übersicht halber werden jeweils alle Eht-Varianten mit derselben Rauheitsklasse zusammen dargestellt.

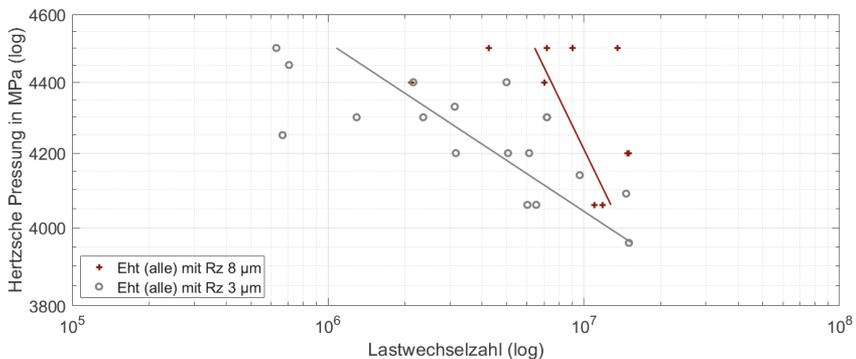


Abbildung 4: Auswahl Eht- und Rauheitsversuche nach /7/ mit Sollwerten

Festzustellen ist eine Lebensdauersteigerung bei erhöhter Rauheit, besonders im Bereich hoher Pressungen. Es liegt folglich ein starker Einfluss aufgrund der Rauheit vor. Eine mögliche Erklärung für den Einfluss der Rauheit könnte sein, dass bei erhöhter Rauheit im Klemmvorgang die ebenfalls erhöhten Kontaktspannungen zu einer früheren plastischen Verformung führen und so die Kontaktspannungen in nachfolgenden Belastungszyklen geringer ausfallen.

Einfluss des Elastizitätsmoduls

Einen weiteren Einfluss auf die Freilauflebensdauer von Klemmrollenfreiläufen stellt die Möglichkeit des Einsatzes von Hartmetallen dar, welche sich durch ein erhöhtes E-Modul im Vergleich zu konventionellem Stahl auszeichnet (ca. 470 – 700 GPa). Hierzu werden auf den Klemmflächen des Sterns Hartmetalleinlagen eingesetzt, wie Abbildung 5 zeigt. In Freiläufen werden Hartmetalle dann eingesetzt, wenn hohe dauerhaft reproduzierbare Schaltgenauigkeit notwendig ist. Durch die Reduktion der Wälzverschleißintensität bleibt die Schaltgeometrie länger in ihrer Ausgangsform bestehen. Zwar bedeutet ein höheres E-Modul bei gleicher Belastung eine steigende Beanspruchung auf der Klemmrampe, jedoch überwiegt der positive Effekt der ebenfalls höheren Drucksteifigkeit des Hartmetalls, sodass eine Lebensdauersteigerung erreicht werden kann. Der Vorteil von Hartmetallen (HM) liegt nicht in einer gesteigerten Leistungsdichte, sondern viel mehr in der Verbesserung des Verschleißverhaltens. Für die Untersuchungen wurden Einsätze mit einem E-Modul von 570 GPa verwendet. Die durchgeführten Versuche sind zum Vergleich der erreichten Lebensdauern zusammen mit den Standardprüflingen in Abbildung 6 dargestellt.

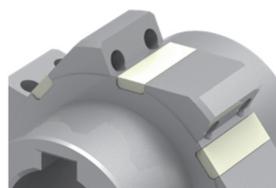


Abbildung 5: Darstellung der Hartmetalleinsätze

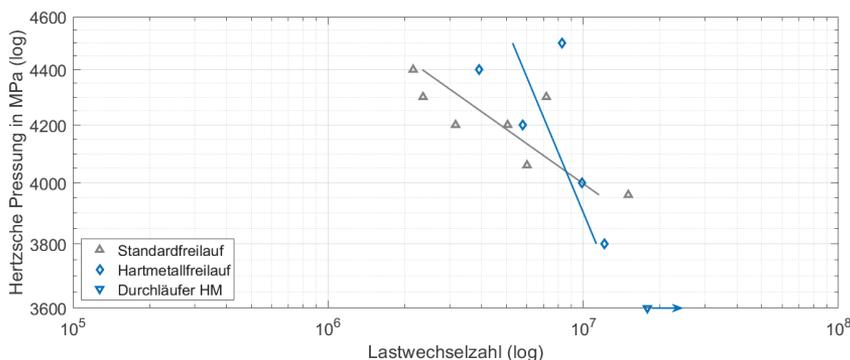


Abbildung 6: Auswahl Eht- und Rauheitsversuche aus /7/ mit Sollwerten

Die Neigung der Regressionsgerade der Prüflinge mit Hartmetalleinsätzen weicht stark von der der Standardfreiläufe ab. Anhand der für die Versuche definierten

Ausfallkriterien (Pop-Outs und Erreichen einer Verdrehwinkelgrenze), konnte keine deutliche Steigerung der Lebensdauer bei Hartmetalleinsätzen ermittelt werden, jedoch treten auch im niedrigen Pressungsbereich noch Durchläufer auf. Die Betrachtung der Oberflächenschäden zeigte auch hier eine deutliche Abweichung gegenüber der Standardprüfung. Üblicherweise kommt es bei Freiläufen in Folge von Verschleiß durch Muldenbildung auf der Wälzfläche des Innensterns zu einer Veränderung des Verdrehwinkels und daraus folgend zu einem Ausfall. Bei Versuchen mit Hartmetalleinsätzen konnte, trotz Änderung des Verdrehwinkels, auf den Wälzflächen des Sterns keine ausgeprägte Muldenbildung oder andere Oberflächenschäden festgestellt werden, siehe Abbildung 7 links. Rauheitsmessschriebe über die Wälzfläche aus /7/ zeigen, dass es in Folge der Überwälzungen lediglich zu einer Glättung der Oberfläche kam. Folglich ist der veränderte Verdrehwinkel auf andere Freilaufkomponenten zurückzuführen. Weitere Untersuchungen zeigen, dass die Ausfallursache auf die veränderte Klemmrollenkontur zurückzuführen ist, wie Abbildung 7 rechts zeigt. Die zum Teil stark von der Ausgangsform abweichende Kontur der Klemmrollen, kann in entsprechender Lage im Klemmkontakt zu einem Ausfall führen.

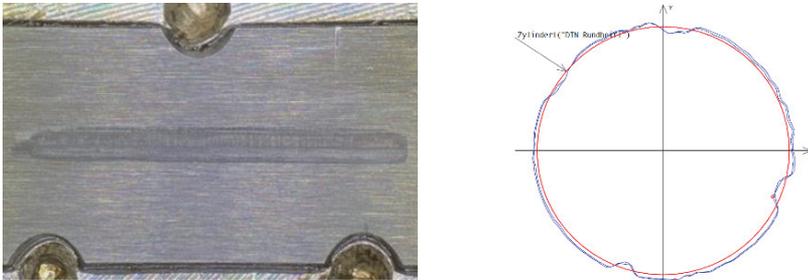


Abbildung 7: Schadensbild einer Klemmfläche und Rollenkontur von einem Freilauf mit Hartmetalleinsatz nach Versuchsende aus /7/

Simulative Untersuchung

Im Rahmen des Vorhabens wurde für ergänzende Simulationen unter anderem ein FE-Modell aufgebaut, um den Belastungszustand beim mehrmaligen Abrollvorgang zu simulieren. Durch Nachbildung der Freilaufkomponenten (Innenstern, Klemmrolle und Außenring) und die Möglichkeit der extrem feinen Aufschlüsselung von Materialeigenschaften auf insgesamt 50 Schichten im unmittelbaren Wälzbereich, ist eine genaue Berücksichtigung der Materialparameter in Abhängigkeit des Abrollvorganges möglich. Für eine realitätsnahe Simulation werden im elastisch-plastischen Simulationsmodell insgesamt 10 Lastschritte ausgeführt, sodass der Einfluss plastischer Verformungen mit berücksichtigt wird. In Abbildung 8 sind beispielhaft die Vergleichsspannungen unterhalb der Oberfläche des Klemmkontaktes für die Variation der Einhärtetiefe abgebildet.

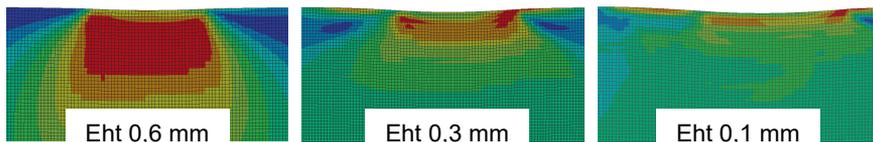


Abbildung 8: Gegenüberstellung der Vergleichsspannung für Eht-Variationen im zehnten Lastschritt (Beginn des roten Bereichs: 2000 MPa) /7/

Die Simulationen ergaben, dass der von hohen Vergleichsspannungen betroffene Bereich aufgrund plastischer Deformation schrumpft und in Richtung Oberfläche wandert. Dieses Verhalten unterstützt die experimentellen Ergebnisse hinsichtlich kaum vorhandener Unterschiede in den Lebensdauern bei Eht-Variation. Bei Hartmetalleinlagen handelt es sich um extrem druckfestes, sprödes Material, wo vornehmlich das Maximum der Hauptspannungsrichtung als Versagensgrenze gilt, sodass der Verlauf der Hauptspannung betrachtet wurde. Es konnte wiederum ermittelt werden, dass die Beanspruchung unterhalb der Beanspruchbarkeit liegt, sodass für die Hartmetalleinlagen weitere potenzielle Reserven vorliegen. Die Beanspruchung des umgebenen Materials um die Hartmetalleinlagen weist eine Beanspruchung von lediglich 100 MPa auf und wird daher als unkritisch angesehen, sodass auch hier die experimentellen Erkenntnisse bestätigt werden konnten.

Berücksichtigung im Lebensdauermodell

Die Berücksichtigung der Parameter des oberflächennahen Bereiches (Eht, Rauheit, E-Modul) kann prinzipiell auf verschiedene Arten in der Lebensdauerberechnung integriert werden. Für die Berücksichtigung von Eht und Rauheit ergaben Anpassungen über weitere Konstanten bei der Kontaktpressung durch eine Integration des plastischen Anteils oder bei der Anpassung der Verdrehfederkennlinie durch Beachtung der elastisch-plastischen Deformation und dem damit veränderten Abrollverhalten zielführende Methoden. Das E-Modul wird grundlegend bereits in entsprechenden Auslegungsprogrammen berücksichtigt. Aufgrund des stark abweichenden Werkstoffverhaltens von Hartmetall ist eine direkte Verwendung und Übertragung jedoch nicht möglich. Die Lebensdauer von Hartmetallen weist eine stochastische Abhängigkeit vom überwälzten Volumen auf, sodass dieses möglichst geringgehalten werden sollte /7/.

Zusammenfassung

Die vorgenommenen Untersuchungen zu den Einflussgrößen Oberflächenrauheit, Einhärtetiefe und Elastizitätsmodul (Hartmetalleinsätze) steigern das Verständnis für die Vorgänge im Klemmrollenfreilauf enorm. Eine Variation der Einhärtetiefe (Eht 0,3 mm bis 0,7 mm) führt zu keiner signifikanten Beeinflussung der Lebensdauer, sodass vermutlich mit geringerer kostenintensiver Einhärtetiefe

bereits hohe Lebensdauern erreicht werden können. Eine zusätzliche Lebensdauersteigerung verspricht hingegen eine erhöhte Rauheit der Wälzfläche, da sich vermutlich infolge von plastischen Verformungen eine zueinander verbesserte Kontaktsituation einstellt. Beim Einsatz von Hartmetalleinsätzen zeigen erste Erkenntnisse, dass eine verkürzte Rollenbreite (Reduktion des überwälzten Volumens) zu einer Lebensdauersteigerung führen kann. Gleichzeitig kristallisiert sich heraus, dass nicht die Hartmetalleinlage das lebensdauerkritische Element darstellt, sondern die Klemmrollen des Freilaufs. Für eine exakte Berücksichtigung der Parameter in der Lebensdauerberechnung, müssen weitere Versuche zur statistischen Absicherung sowie umfangreiche Simulationen durchgeführt werden. Aus diesem Grund sind weitere Vorhaben geplant, um die Einflussparameter des oberflächennahen Bereiches getrennt voneinander beschreibbar zu machen und zukünftig, in Berechnungsprogramme implementiert, zur Verfügung stellen zu können.

Danksagung

Der Autor bedankt sich bei der mit beteiligten Forschungsstelle (MSE der RWTH Aachen) für die Zusammenarbeit sowie 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 „Rollenfreilauf Härteprofil“ (FVA 776 I, IGF-Nr. 18505/N).

Literatur

- /1/ Welter, R., Peeken, H.: Lebensdauer von Klemmkörperfreiläufen im Schaltbetrieb Forschungsvorhaben Nr. 137 I, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Heft 319, Abschlussbericht, IGF-Nr. 6763, Frankfurt am Main 1990
- /2/ Deppenkemper, P., Peeken, H., Gold, P.W.: Lebensdauer von Klemmkörperfreiläufen im Schaltbetrieb Forschungsvorhaben Nr. 137 II, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Heft 383, Abschlussbericht, IGF-Nr. 7923, Frankfurt am Main 1993
- /3/ Deppenkemper, P., Lohrengel, A., Gold, P.W.: Lebensdauer von Klemmkörperfreiläufen im Schaltbetrieb
- /4/ Lohrengel, A., Gold, P.W.: Freilauflebensdauer-Klemmrollen Forschungsvorhaben Nr. 287, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Heft 614, Abschlussbericht, IGF-Nr. 10422 N, Frankfurt am Main, 2000
- /5/ Lundberg, G.; Palmgren, A.: Dynamic Capacity of Rolling Bearings Acta Polytechnica, Mechanical Engineering Series, Vol. 1, Nr. 3, 7, 1947
- /6/ Daners, R.: Lastverhalten und Lebensdauer von Außensternfreiläufen im Vergleich mit anderen Bauformen
- /7/ Sous, C.; Lohrengel, A.; Guzman, G.; Martinewski, V.; Dreiseidler, S.: Abschlussbericht zum FVA-Projekt 776 I Freilauf Härteprofil; RWTH Aachen, Technische Universität Clausthal; 2022