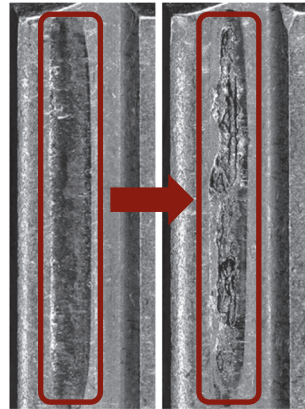


Einfluss von Verschleiß auf die Verdrehkennlinien an Freiläufen

Duchâteau, F.; Lohrengel, A.

Werden Freiläufe im Schaltbetrieb betrieben, führt Verschleiß meist zum Ausfall. Das Schaltverhalten spielt eine essenzielle Rolle bei der Auslegung von Freiläufen für bestimmte Anwendungsfälle. Verschleißbedingt kann es zu erheblichen Abweichungen vom ursprünglichen Ausgangsschaltverhalten über die Lebensdauer kommen, wie anhand einfacher Lebensdauerversuche gezeigt werden kann.



When freewheels are operated in switching mode, wear usually leads to failure. Switching behaviour plays an essential role in the design of freewheels for specific applications. Wear can cause significant deviations from the original initial switching behaviour over the service life, as can be demonstrated by simple life-cycle tests.

Einleitung

Reibschlüssig arbeitende Freilaufkupplungen gehören zu den selbsttätig schaltenden Kupplungen, wobei in eine Richtung Drehmoment übertragen werden kann und in Gegenrichtung Leerlauf zugelassen wird. Grundsätzlich kann ein Freilauf als Rücklaufsperre, Überholkupplung oder Schaltfreilauf eingesetzt werden. Unterschieden werden die reibschlüssig arbeitenden Freiläufe in die zwei Hauptbauarten Klemmrollenfreilauf und Klemmkörperfreilauf. Weitere konstruktive und geometrische Variationen von Klemmrampenform, Innenstern, Außenstern oder Klemmkörpergeometrie ermöglichen eine optimale Anpassung der Schalteigenschaften an die Einsatzbedingungen.

Damit Freiläufe im Sperrzustand Drehmomente zuverlässig übertragen, existieren einige entscheidende Größen, welche einen Einfluss auf die Funktion und das Schaltverhalten im Freilauf ausüben. Aufgrund des Reibschlusses wirken in den Kontaktpunkten von Klemmelement zu Innenring und Außenring Normalkräfte F_n und Tangentialkräfte F_t , siehe Abbildung 1. Zwischen den Kraftvektoren spannt sich der Klemmwinkel α auf.

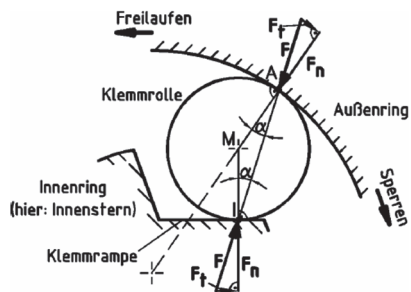


Abbildung 1: Kräfte im Klemmkontakt eines Klemmrollenfreilaufes aus /1/

Hieraus leitet sich das aus /2/ bekannte Funktionskriterium des Freilaufes in Bezug auf den Reibwert ab:

$$\mu > \tan(\alpha) = \frac{F_t}{F_n} \quad (1)$$

Der Klemmwinkel und der durch geometrische Variation beeinflussbare Klemmwinkelverlauf gelten als zentrales Auslegungswerkzeug, um die Schalteigenschaften eines Freilaufes zu beeinflussen. Der Klemmwinkel ist jedoch nicht direkt messtechnisch erfassbar, sodass häufig der Verdrehwinkel zur Analyse der Schalteigenschaften herangezogen wird. Abhängig vom Klemmwinkel ergibt sich der Verdrehwinkel φ , welcher die Verdrehung von Innen- zu Außenring in Sperrrichtung darstellt. Nach /3/ hat auch die Elastizität der Freilaufkomponenten, vornehmlich des Außenrings, einen großen Einfluss auf die Steifigkeit des Systems und beeinflusst das Schaltverhalten maßgeblich mit. Abhängig von der Bauart ergeben sich unterschiedliche und charakteristische Zusammenhänge für Klemmwinkel zu Verdrehwinkel, wie Abbildung 2 skizziert. Entsprechend weisen der Rollenfreilauf mit ebener Rampe, mit Kreisbogenrampe und der Klemmkörperfreilauf individuelle Schaltcharakteristika auf.

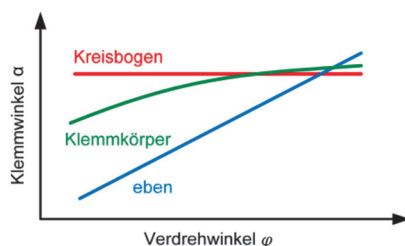


Abbildung 2: Schematischer Zusammenhang von Klemmwinkel und Verdrehwinkel für unterschiedliche Freilaufarten aus /4/

Beim Einsatz von Freiläufen im Schaltbetrieb ist ein präzises Schalten mit hoher Wiederholgenauigkeit erwünscht. Durch häufiges Schalten verschleißt der Freilauf, wodurch Abweichungen vom ursprünglichen Schaltverhalten auftreten. Folgen von Verschleiß am Freilauf im Schaltbetrieb wurden u. a. in /1/, /3/, /5/, /6/, /7/, /8/ und /9/ untersucht. Beim Klemmrollenfreilauf mit ebener Klemmrampe bildet sich nach /1/ durch den kontinuierlichen, abrasiven Verschleiß über die Freilauflebensdauer eine Mulde auf der Klemmfläche. Durch das Abrollen der Klemmrolle durch die Mulde kommt es zu einer Änderung des Klemmwinkels, siehe Abbildung 3. Nach /1/ verringert sich beim Einrollen in die Verschleißmulde der Klemmwinkel (Steifigkeit nimmt ab), beim Verlassen der Rolle aus der Mulde nimmt der Klemmwinkel durch die Steigungsänderung wieder zu (Steifigkeit nimmt zu). Bei fortschreitendem Verschleiß kann es zur Verletzung des Funktionskriteriums nach Gleichung 1 und somit zum Ausfall des Freilaufes kommen.

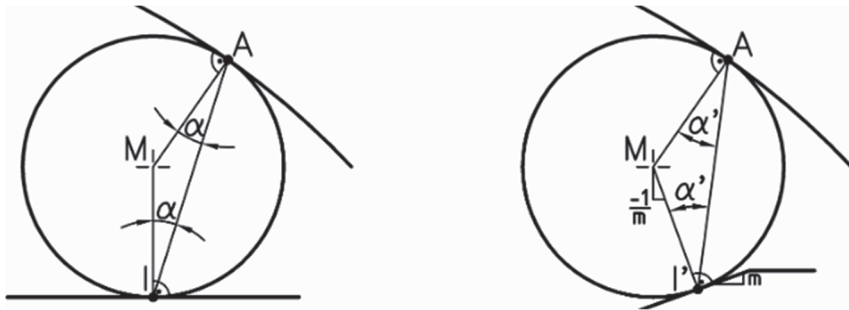


Abbildung 3: Klemmwinkelzunahme durch verschleißbedingte Muldenbildung /1/

Auch bei Klemmkörperfreiläufen wirken Tangential- und Normalkräfte, um im Reibschluss ein Drehmoment zu übertragen. Der Aufbau unterscheidet sich jedoch grundlegend. Der Reibschluss wird durch Verkeilen von speziell geformten Klemmelementen zwischen zylindrischen Ringen erzeugt, siehe Abbildung 4. Im Gegensatz zum Klemmrollenfreilauf, wo die Klemmflächen lokal hoher Belastung und somit starkem Verschleiß ausgesetzt sind, wälzen beim Klemmkörperfreilauf die Klemmelemente über den gesamten Innen- und Außenring ab. Die Freilaufringe werden über den gesamten Umfang gleichmäßig belastet, wohingegen die Klemmelemente stets lokal an denselben Stellen belastet werden und als ausfallkritisches Element im Freilauf gelten. Auch Klemmkörperfreiläufe versagen, sobald die Selbsthemmungsbedingung aus Gleichung 1 nicht mehr erfüllt wird.

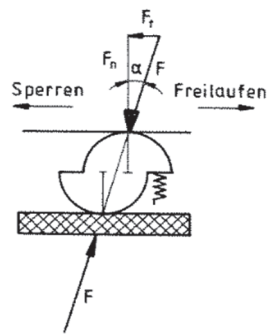


Abbildung 4: Kinematisches Modell eines Klemmkörperfreilaufes

Neben dem Klemmwinkel spielt die Drehfederkennlinie eine große Rolle bei der Betrachtung der Schaltcharakteristik. Die Drehfederkennlinie beschreibt den Zusammenhang zwischen aufgebrachtem Drehmoment und dem sich einstellenden Verdrehwinkel von antreibendem zu abtreibendem Freilauftring. Der Vorteil dieser Größe ist, dass die Kennlinie, im Gegensatz zum Klemmwinkel direkt messtechnisch erfasst und ausgewertet werden kann. Die Verdrehkennlinie zeigt einen progressiven Anstieg bei zunehmendem Verdrehwinkel und hängt mit der Geometrie und der elastischen Verformung der einzelnen Freilaufkomponenten zusammen /9/. Rechnerische Grundlagen für Drehfederkennlinien bei Freilaufkupplungen lassen sich in der Literatur kaum finden. Nur in /2/ und /9/ wurden für Klemmrollen- und Klemmkörperfreiläufe einige Beziehungen abgeleitet. Eine Berechnung von Verdrehfederkennlinien der Freiläufe ist stets mit Fehlern behaftet, da für die Bestimmung der erforderlichen elastischen Dehnungen Vereinfachungen angenommen werden müssen /7/. Daher werden vor allem experimentelle Ergebnisse betrachtet.

Versuchsaufbau und -durchführung

Die Lebensdauer von Freiläufen kann an bewährten Schaltprüfständen ermittelt werden, indem der Freilauf bis zu einem definierten Abschaltkriterium (hier: Erreichen einer Verdrehwinkergrenze, Auftreten von Pop-Outs) betrieben wird. Hierfür schaltet ein Synchronmotor den Freilauf abwechselnd zwischen Freilaufrichtung und Sperrrichtung hin und her, wobei der Winkel in Freidrehrichtung stets größer als in Sperrrichtung ausfällt, um eine vollständige Entlastung des Freilaufes zu garantieren. Der Außenring des Freilaufes ist über eine Drehmomentstütze mit Drehmomentmessung fest eingespannt. Mit zusätzlicher Erfassung des Verdrehwinkels über einen Winkelgeber am Innenring, stehen alle relevanten Daten für die Erstellung von Verdrehkennlinien zur Verfügung. Ein beispielhafter Messschrieb für Torsions- und Winkelmessung ist in Abbildung 5 gezeigt. Gut erkennbar ist die größere Winkelverdrehung in Freidrehrichtung durch den großen negativen Winkel bzw. die Nulllage im Torsionsmessschrieb. Die durchgeführten Lebensdauerversuche erfolgen winkelgeregelt. Das resultierende Torsionsmoment und der Verdrehwinkel am Innenring werden aufgezeichnet. Über die Lebensdauer reduziert sich ohne Korrektur des vorgegebenen Schaltwinkels das resultierende Drehmoment, da die Kontaktflächen im Freilauf abrasiv verschleßen und sich so die Kontaktkräfte reduzieren. Die gemessenen Verläufe und Kennlinien sinken somit über die Lebensdauer ab. Durch die Darstellung des Torsionsmomentes über den Verdrehwinkel kann direkt die Drehfederkennlinie erstellt werden, wie in Abbildung 5 skizziert. Die Drehfederkennlinie gleicht einer Hysterese, da schlupf- bzw. reibungsbedingt Verluste auftreten. Relevant für die Auswertung des Schaltverhaltens sind die in Abbildung 5 blau hervorgehobenen hochlaufenden Äste beim Verdrehen in Sperrrichtung.

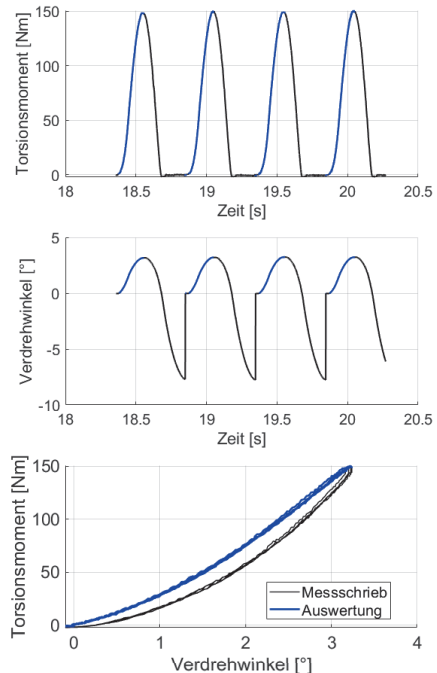


Abbildung 5: Messschrieb eines Freilaufes im Schaltbetrieb (Oben: Torsionsverlauf über Zeit; Mitte: Verdrehwinkel über Zeit; Unten: Verdrehkennlinie)

Über die Lebensdauer reduziert sich ohne Korrektur des vorgegebenen Schaltwinkels das resultierende Drehmoment, da die Kontaktflächen im Freilauf abrasiv verschleßen und sich so die Kontaktkräfte reduzieren. Die gemessenen Verläufe und Kennlinien sinken somit über die Lebensdauer ab. Durch die Darstellung des Torsionsmomentes über den Verdrehwinkel kann direkt die Drehfederkennlinie erstellt werden, wie in Abbildung 5 skizziert. Die Drehfederkennlinie gleicht einer Hysterese, da schlupf- bzw. reibungsbedingt Verluste auftreten. Relevant für die Auswertung des Schaltverhaltens sind die in Abbildung 5 blau hervorgehobenen hochlaufenden Äste beim Verdrehen in Sperrrichtung.

Für die hier durchgeführten Untersuchungen werden Stichversuche an drei Freilauftypen ausgewertet. Es werden ein Klemmrollenfreilauf mit ebener Klemmrampe, ein Rollenfreilauf mit Kreisbogenrampe und ein Klemmkörperfreilauf aus /10/ verwendet. Die verwendeten Prüflinge sind ähnlicher Baugröße mit 30 mm

Innendurchmesser und 62 mm bzw. 41 mm Außendurchmesser für die Rollenfreiläufe mit ebener Klemmrampe bzw. Kreisbogenrampe. Der Klemmkörperfreilauf ist mit 15 mm Innen- und 47 mm Außendurchmesser insgesamt etwas kleiner dimensioniert. Die Versuche wurden jeweils bis zum Versagen durch Verschleiß durchgeführt. Anhand der ausgewählten Versuche soll grundlegend das in der Literatur beschriebene Verhalten der Verdrehkennlinien nachvollzogen werden.

Versuchsauswertung

Im Rahmen von Lebensdauer-Schaltversuchen an Klemmrollen- und Klemmkörperfreiläufen aus /10/ wurden an ausgewählten Versuchen die Verdrehkennlinien aufgezeichnet. Die sich über die Lebensdauer verändernden Verläufe der Drehfederkennlinien werden mit Erkenntnissen der Literatur verglichen. Während der Schaltversuche verändern sich die aufgezeichneten Kennlinien z. T. erheblich, sodass ein großer Einfluss auf das ursprüngliche Schaltverhalten vorliegt. Diese Einflüsse werden im Folgenden gezeigt.

Klemmrollenfreilauf ebene Klemmrampe

Für die Betrachtung der Kennlinienänderungen am Klemmrollenfreilauf mit ebener Klemmrampe wird ein ausgewählter Versuch herangezogen. Abbildung 6 zeigt eine Auswahl der, über die gesamte Lebensdauer in regelmäßigen Abständen erfassten, Drehfederkennlinien. Die Kennlinien wurden jeweils nach der in der Legende angegebenen Lastwechselzahl aufgenommen.

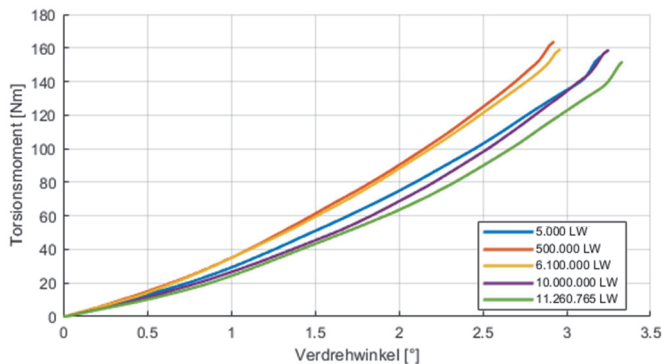


Abbildung 6: Verdrehkennlinien vom Klemmrollenfreilauf mit ebener Klemmrampe und typisches Schadensbild nach Versuchsende

Die Drehfederkennlinien zeigen erwartungsgemäß Abweichungen zueinander. Zunächst liegen die Kennlinien mit zunehmender Lebensdauer erheblich über der Ausgangskennlinie. Gegen Ende der Freilauflebensdauer erfolgt schließlich eine

Absenkung der Lage der Drehfederkennlinie auf zunächst die der Ausgangskennlinie und anschließend, zum Zeitpunkt des Ausfalls, auf unterhalb dieser. Grundsätzlich decken sich die Versuchsergebnisse mit den Angaben der Literatur aus [1] und [4]. Beim Durchrollen der sich ausbildenden Mulde verändert sich die Steifigkeitscharakteristik des Freilaufes. Der erwartete „bauchiger“ werdende Verlauf ist nicht so stark ausgeprägt wie erwartet, kann aber anhand der Kennlinie von „10.000.000 LW“ dennoch im Vergleich zur Ausgangskennlinie erkannt werden. Die Absenkung der Kennlinien gegen Ende der Lebensdauer ist darauf zurückzuführen, dass der vorgegebene Winkel nicht korrigiert wird. Verschleißbedingt kann bei gleichem Winkel weniger Drehmoment übertragen werden. Die Klemmrollen rollen in die Verschleißmulde ab, jedoch nicht mehr bis auf die aufsteigende Flanke hinauf, sodass der erwartete Anstieg durch die Klemmwinkeländerung ausbleibt.

Klemmrollenfreilauf Kreisbogenrampe

Der Klemmrollenfreilauf mit Kreisbogenrampe zeichnet sich durch eine spezielle Rampengeometrie aus. Diese zeigt sich in Abbildung 7 am linearen Verlauf der ersten Messung des Versuches (blauer Verlauf).

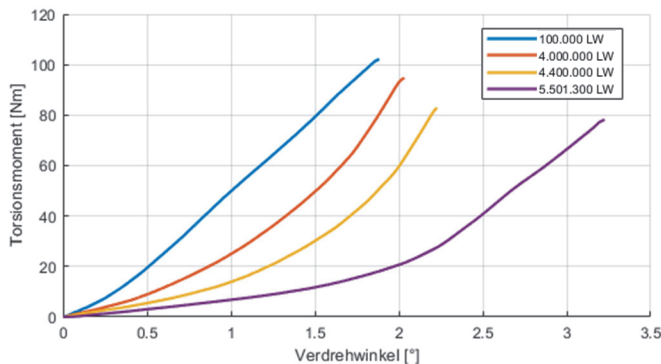


Abbildung 7: Verdrehkennlinien vom Klemmrollenfreilauf mit Kreisbogenrampe und typisches Schadensbild nach Versuchsende

Über die Lebensdauer des Freilaufes weichen die Verdrehkennlinien immer weiter von der Ausgangsform ab und werden bauchiger. Insgesamt wird das Freilaufverhalten weicher, sodass die Verdrehkennlinie absinkt und eine Verschiebung nach rechts auf der Abzisse aufweist. Beim Klemmrollenfreilauf mit Kreisbogenrampe ist die Kennlinienänderung über die Lebensdauer gravierend. Der Verschleiß bedingt eine starke Zunahme des Klemmwinkels, bei gleichzeitiger Abnahme des übertragbaren Drehmomentes und der Steifigkeit. Dieser Effekt ist deutlich stärker ausgeprägt als beim Rollenfreilauf mit ebener Klemmrampe. Dies ist vermutlich auf die Form der Klemmrampe zurückzuführen. Die bogenförmigen Klemmrampen

verstärken die Steigung in der Verschleißmulde zusätzlich, sodass der Klemmwinkel und damit indirekt der Verdrehwinkel größeren Änderungen unterworfen ist.

Klemmkörperfreilauf

Auch der Klemmkörperfreilauf zeigt anfangs den erwarteten typischen Verlauf. Mit zunehmendem Verdrehwinkel wächst das Torsionsmoment progressiv an, wie Abbildung 8 zeigt.

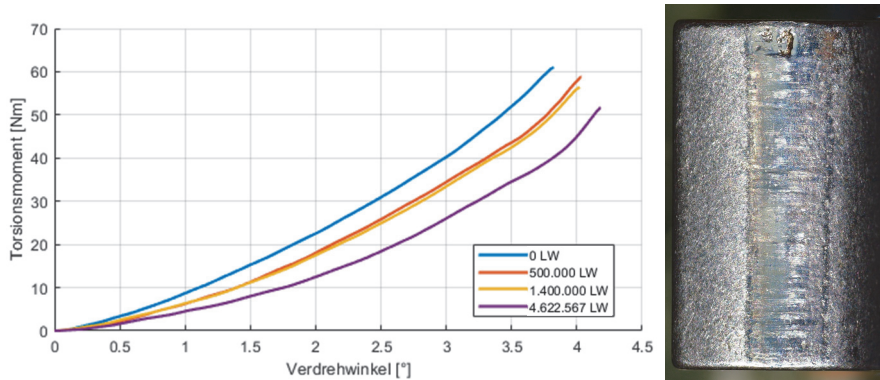


Abbildung 8: Verdrehkennlinien vom Klemmkörperfreilauf und typisches Schadensbild nach Versuchsende

Mit fortschreitender Lebensdauer werden die in Abbildung 8 geplotteten Kurven bauchiger und zeigen das weniger steife Verhalten vom Freilauf mit zunehmendem Verschleiß. Auch hierbei bewirkt der Verschleiß eine Veränderung der Kontaktgeometrie. Anders als beim Rollenfreilauf können beim Klemmkörperfreilauf keine Verschleißmulden entstehen. Durch das Abwälzen der Klemmkörper auf den Freilauftringen verschleifen diese gleichmäßig. Die Klemmelemente selbst weisen hingegen lokal erhöhten Verschleiß auf, sodass sich die Kontaktgeometrie verändert und die Abweichungen in den Kennlinien verursacht werden. Ausfallursache ist bei den Klemmkörperfreiläufen daher oftmals ein Versagen der Klemmelemente selbst.

Zusammenfassung

Anhand einzelner Stichversuche wurden Verdrehkennlinien über die Freilauflebensdauer hinweg ermittelt und untersucht. Die Verläufe entsprechen den aus der Literatur bekannten Angaben. Es wurde gezeigt, dass typabhängig Freiläufe Steifigkeitsänderungen im Schaltverhalten über die Lebensdauer aufweisen bis es zum Versagen der Prüflinge kommt. Die Lage der Ausgangskennlinien zu Beginn der Versuche passt zu den typabhängig üblichen Verläufen, sodass die Messergebnisse als plausibel angenommen werden können. Anhand der Auswertung von jeweils nur einem Prüfling besteht jedoch keine statistische Absicherung. Einfluss

auf die Lage und die Veränderungen der Kennlinien über der Lebensdauer hat die Art der Versuchsdurchführung. Werden die Versuchsparameter verschleißbedingt nachgeregelt, sodass stets ein konstantes Drehmoment erreicht wird, zeigen sich die in der Literatur benannten bauchigen Verläufe mit Endlagen über der ursprünglichen Ausgangslage deutlicher, da dabei die Verschleißmulden stets komplett durchrollt werden. In den dargestellten Versuchen ist der Abfall der Kennlinien durch den Verzicht auf eine Nachregelung verstärkt und die „Bauchigkeit“ weniger ausgeprägt, grundsätzlich gleichen die Ergebnisse aber den Erwartungen. Ergänzend zu den gezeigten Versuchen konnten ähnliche Beobachtungen bzgl. der Verdrehkennlinien auch bei weiteren Versuchen mit baugleichen Prüflingen im Rahmen von /10/ unter reiner Torsion und unter kombinierter Last (Torsion und Radiallast) festgestellt werden.

Literatur

- /1/ Hüllenkremer, M.; Loos, J.: Einfluss von Teilentlastungen auf die Lebensdauer von Klemmfreiläufen im Schaltbetrieb. Forschungsvorhaben FVA 464 I der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. Frankfurt am Main, 2008
- /2/ Stölzle, K.; Hart, S.: Freilaufkupplungen: Berechnung und Konstruktion; Springer-Verlag, 1961, ISBN: 3-64251-094-9
- /3/ Tönsmann, A.; Jorden, W.: Schaltverschleiß bei Rollenfreiläufen. Forschungsvorhaben FVA 103 I der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. Frankfurt am Main, 1989
- /4/ Martinewski, V.; Nagler, N.; Qian, B.; Lohrengel, A.; Ochse, G.: Freilauf Lebensdauer – kombinierte Radial- und Drehmomentenbelastung. Forschungsvorhaben FVA 694 I der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. Frankfurt am Main, 2018
- /5/ Welter, R.; Peecken, H.: Lebensdauer von Klemmkörperfreiläufen im Schaltbetrieb. Forschungsvorhaben FVA 137 I der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. Frankfurt am Main, 1990
- /6/ Deppenkemper, P.; Peecken, H.; Gold, P.W.: Lebensdauer von Klemmkörperfreiläufen im Schaltbetrieb. Forschungsvorhaben FVA 137 II der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. Frankfurt am Main, 1993
- /7/ Deppenkemper, P.; Lohrengel, A.; Gold, P.W.: Lebensdauer von Klemmkörperfreiläufen im Schaltbetrieb. Forschungsvorhaben FVA 137 III der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. Frankfurt am Main, 1999
- /8/ Biemann, W.; Gerve, A.; Vogg, H.: Untersuchungen zum Verschleißverhalten von Klemmfreiläufen mit Radionuklidverfahren. Forschungsvorhaben FVA 21 der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. Frankfurt am Main, 1980
- /9/ Timptner, K.: Berechnung von Drehfederkennlinien und zulässiger Drehmomente bei Freilauf-Kupplungen mit Klemmkörpern. Dissertation, Hochschule Darmstadt, Papierflieger, 1974.
- /10/ Duchateau, F.; Ochse, G.; Lohrengel, A.; Rienäcker, A.: Einfluss kombinierter Zusatzlasten auf die maximale Hertzsche Pressung beim Klemmrollen- und Klemmkörperfreilauf. Forschungsvorhaben FVA 694 II der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. Frankfurt am Main, 2025