

Design for Energy Saving - Berechnungswerkzeug zur Abschätzung der Wälzlagerreibung zur Unterstützung des Konstruktors in frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses

Thomas Stahl und Sandro Wartzack
*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik;
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*

1 Einleitung

Das aktuelle Bestreben den CO₂-Ausstoß signifikant zu senken, führt zu einer zunehmend kritischeren Betrachtung von Maschinen und Anlagen hinsichtlich der Optimierung ihrer Energieeffizienz. Da Wälzlager in zahlreichen Maschinen Anwendung finden, kommt ihnen hierbei besondere Bedeutung zu. Bislang hat die energetische Betrachtung von Wälzlagern eine eher untergeordnete Rolle gespielt. Entwicklungen der letzten Jahre, wie z. B. energieeffiziente Lager großer Lagerhersteller, zeigen aber deutlich die wachsende Sensibilität für die Energieverluste in Wälzlagern. Um Wälzlagerungen energieeffizient auslegen zu können, ist die genaue Kenntnis der Verlustleistung, d.h. der Reibung unter den vorliegenden – in der Regel instationären – Betriebsbedingungen notwendig. Existierende Berechnungsmodelle erlauben eine solche Ermittlung bislang allerdings nur für stationäre Betriebsbedingungen. Der vorliegende Beitrag beschreibt die methodische Entwicklung eines Werkzeuges, das dem Konstrukteur bereits in frühen Phasen des Konstruktionsprozesses die Ermittlung der Wälzlagerreibung unter

instationären Betriebsbedingungen erlaubt. Hierdurch kann die Auslegung der Wälzlagerung optimiert und der Grad der Energieeffizienz gesteigert werden.

2 Stand der Technik

2.1 Auslegungsprozess

Die Auswahl von Wälzlagern erfolgt in der Regel nach der geforderten Lebensdauer, dem zur Verfügung stehenden Bauraum und falls vorhanden weiteren geforderten Eigenschaften, wie z.B. der Abdichtung. In Abhängigkeit des gewählten Wälzlagers wird anschließend die gesamte Wälzlagerung, d.h. die Einbauumgebung des Wälzlagers festgelegt. Werden hinterher im Betrieb zu hohe Temperaturen am Wälzlager festgestellt, so muss die Wälzlagerung modifiziert werden. Dies geschieht entweder durch die Wahl eines reibungsärmeren Lagers bzw. Lagertyps oder durch zusätzliche Maßnahmen an der Wälzlagerung wie beispielsweise Kühlrippen oder externe Kühlaggregate. Diese Iterationsschleife führt zu einem deutlichen Mehraufwand, insbesondere deshalb, da die entstehende Temperatur erst im Betrieb empirisch ermittelt werden kann. Durch die frühe Kenntnis der entstehenden Reibung und Temperaturen kann das Produkt wesentlich kostengünstiger optimiert werden. Für *stationäre* Betriebsbedingungen werden dem Konstrukteur deshalb bereits Berechnungswerkzeuge zur Verfügung gestellt, die eine frühzeitige Berechnung der Wälzlagerreibung erlauben.

2.2 Berechnungswerkzeuge

Bild 1 zeigt die Oberfläche der Berechnungssoftware nach SKF [1]. Dabei erfolgt auf der linken Seite die Eingabe der Betriebsbedingungen. Auf der rechten Seite werden die resultierenden Reibmomente und die Temperatur nach der Berechnung ausgegeben.

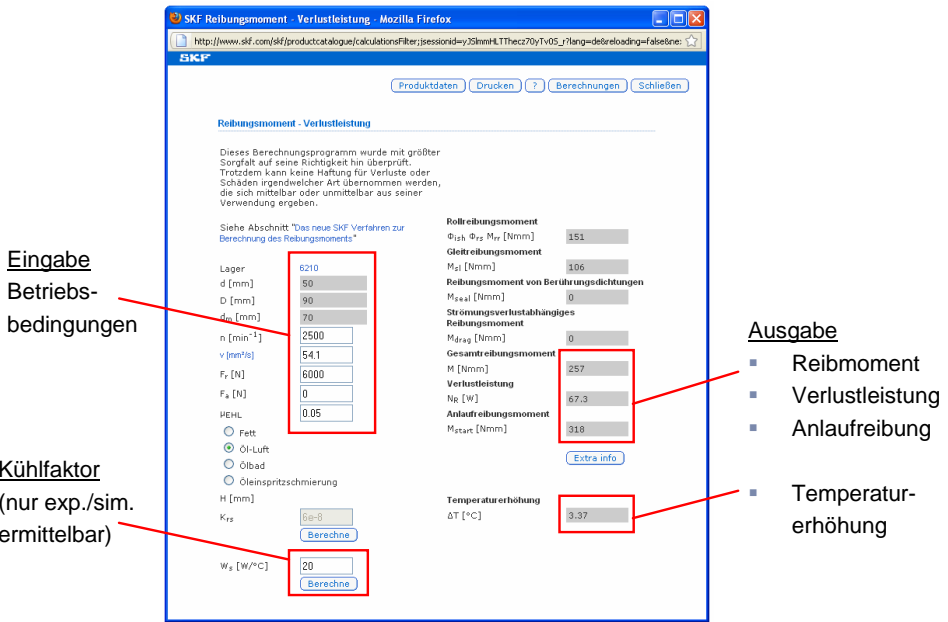


Bild 1: Oberfläche der Berechnungssoftware nach SKF [1]

Mit diesem Werkzeug kann die Wälzlagerreibung in der Entwurfsphase schnell und einfach ermittelt werden. Nachteilig hieran ist jedoch, dass zum einen der anzugebende Kühlfaktor meist nur aus Versuchen oder simulativ ermittelt werden kann, wodurch keine frühzeitige Bestimmung der entstehenden Temperatur möglich ist. Zum anderen erlaubt diese Software nur die Berechnung stationärer Betriebsbedingungen. Drehzahl- und Lastkollektive, die sehr häufig in der Praxis vorliegen, können hierdurch nicht berücksichtigt werden, wodurch die tatsächlichen Bedingungen nur unzureichend erfasst werden und keine genauen Aussagen über Reibung und Temperatur mehr getroffen werden können.

Es ist deshalb erforderlich dem Konstrukteur ein Werkzeug zur Verfügung zu stellen, das diese Faktoren beachtet, aber dennoch eine einfache Anwendung in frühen Phasen ermöglicht. Hierfür wurde der „Bearing Friction Calculator (BFC)“ entwickelt. Diese Software erlaubt die Ermittlung der Wälzlagerreibung und Temperatur in frühen Phasen unter dem Einfluss von Drehzahl- und Lastkollektiven.

3 Bearing Friction Calculator

3.1 Berechnungsmodell

Für die Entwicklung des „Bearing Friction Calculators“ ist zunächst die genaue Kenntnis des Einflusses von Kollektiven auf die Wälzlagerreibung erforderlich. Im Unterschied zu stationären Betriebsbedingungen, bei denen sich ein Gleichgewichtszustand zwischen zugeführter und abgeführter Energie am Wälzlager einstellen kann, liegt unter Drehzahl- und Lastkollektiven aufgrund der sich ändernden Betriebsbedingungen ein solcher Zustand nicht vor. Lagertemperatur und Schmierstoffviskosität sind somit nicht konstant, weshalb hierdurch und aufgrund der Änderung der Betriebsbedingungen folglich auch die Reibleistung eine veränderliche Größe über die Zeit darstellt.

Daneben wird die Temperatur im Lager nicht unwesentlich von der Wärmeabfuhr am Lager beeinflusst. Diese findet hauptsächlich über die Lagersitzflächen und den Schmierstoff statt. Diese Wärmeabfuhr kann zwar für jede Lagerung näherungsweise als lineare Funktion der Temperaturdifferenz angenommen werden, die Temperaturdifferenz ändert sich allerdings ebenfalls in Abhängigkeit der aktuellen Betriebsbedingungen.

Zur Erfassung des Reibmoments und der Temperatur im Wälzlager unter instationären Betriebsbedingungen ist es nun erforderlich ein Modell zu verwenden, in dem die zeitliche Veränderung der Betriebsbedingungen in der Reibungsberechnung Berücksichtigung findet. Ein Ansatz dazu ist die Verwendung eines quasistationären Reibmomentmodells, das die Betrachtung der Reibung für infinitesimal kleine Zeitabschnitte als stationär betrachtet. Wichtig ist, bei der Verwendung eines quasistationären Modells, dass die einzelnen Zeitabschnitte nicht unabhängig voneinander betrachtet werden, sondern dass die Ausgangsgrößen des vorhergehenden Zeitabschnitts die Eingangsgrößen des nachfolgenden Zeitabschnitts darstellen.

Das hier verwendete quasistationäre Modell geht von der allgemeinen Grundlage aus, dass die innere Energie eines Systems durch die Summe der eingehenden Energie abzüglich der Summe der ausgehenden Energie bestimmt wird. Von der inneren Energie eines Systems kann anschließend auf die Temperatur des Systems geschlossen werden. Für infinitesimal kleine Zeitabschnitte ermittelt sich die innere Energie eines Körpers folglich aus der pro Zeitabschnitt zugeführten Leistung abzüglich des in diesem Zeitabschnitt abgeführten Wärmestroms (vgl. Gl. 1).

$$\Delta U = W - Q = \int_{t_i}^{t_{i+1}} P(t) dt - \int_{t_i}^{t_{i+1}} \dot{Q}(t) dt \quad \text{Gl. 1}$$

Die zugeführte Leistung, bezogen auf das Wälzlager die Reibleistung, wird bestimmt durch die äußeren, instationären Betriebsbedingungen, die aktuelle Temperatur und damit durch die vorhandene Viskosität, und weitere, aber konstante Parameter. Die äußeren instationären Betriebsbedingungen werden durch die Drehzahl- und Lastkollektive vorgegeben und können somit als bekannt angenommen werden. Die Temperatur resultiert aus dem Energieverlauf und den Betriebsbedingungen und muss für jeden Zeitabschnitt neu bestimmt werden. Um dies zu realisieren wird im vorliegenden Modell die sich einstellende Endtemperatur im vorhergehenden Zeitabschnitt als Starttemperatur für den folgenden Zeitabschnitt angenommen. Die Veränderung der Temperatur ergibt sich im Modell aus der Differenz der Eingangs- und der Ausgangsleistung. Wird dem System mehr Leistung zugeführt als abgeführt, so erhöht sich die innere Energie und folglich die Temperatur des Systems. Die Endtemperatur des infinitesimalen Zeitabschnitts ist die Starttemperatur zuzüglich der Temperaturänderung.

$$\mathcal{G}_{i+1} = \mathcal{G}_i + \Delta \mathcal{G} \quad \text{Gl. 2}$$

Durch diese Vorgehensweise ist die Berechnung der sich im Betrieb einstellenden Temperatur, der Viskosität und der Reibleistung für Wälzlager unter dem Einfluss von Drehzahl- und Lastkollektiven möglich. Werden die Zeitabschnitte hinreichend klein gewählt, ist der Fehler, der sich aus der Reduktion des dynamischen Vorgangs zu einem quasistationären Vorgang ergibt, vernachlässigbar gering.

Mit diesem Ansatz wurde auf Basis physikalischer und kalorischer Gleichungen ein Berechnungsmodell entwickelt [2], welches die Ermittlung der Wälzlagerreibung unter Kollektiveinfluss erlaubt.

Die anschließende Umsetzung dieses Berechnungsmodells in ein Software-Werkzeug, den BFC, erlaubt es dem Konstrukteur, eine automatisierte Berechnung durchzuführen.

3.2 Softwareseitige Unterstützung

Anders als bei bestehenden Werkzeugen, bei denen nur das Lager bei stationären Betriebsbedingungen betrachtet wird, erlaubt der BFC zusätzlich die Berücksichtigung von Drehzahl- bzw. Lastkollektiven, sowie der individuellen Einbausituation. Dazu ist der BFC in drei Menüs unterteilt. Im ersten Menü erfolgt die Eingabe des Belastungskollektivs. Zur Visualisierung wird im rechten Bereich des Menüs das vorliegende Kollektiv grafisch dargestellt.

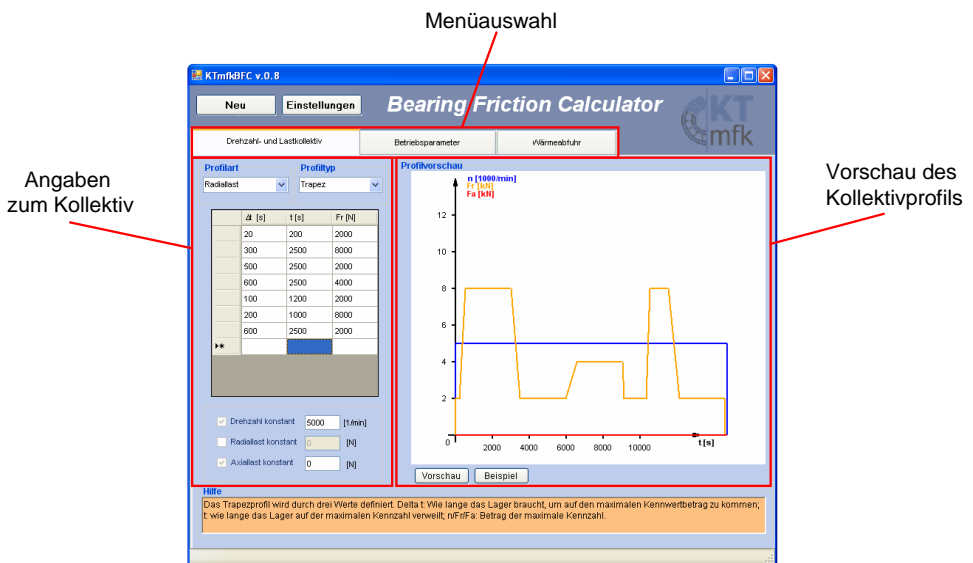


Bild 2: BFC - Menü 1

Über die Reiter können die nächsten Menüs angewählt werden. Im Menü „Betriebsparameter“ (vgl. Bild 3) werden alle Angaben zum gewählten Lager, zur Lagerdichtung und zur Schmierung vorgenommen.

Im dritten Menü (vgl. Bild 4) wird die Einbaumgebung berücksichtigt. Hierbei wurde besonderer Wert darauf gelegt, die Einbaumgebung auf Basis weniger, elementarer Parameter zu erfassen. Um auf Grundlage dieser wenigen Parameter dennoch quantitativ gute Ergebnisse zu erzielen, wird im Berechnungsalgorithmus auf Näherungsgleichungen zurückgegriffen, die aus der Literatur bekannt (z.B. [3], [4], [5]) und entsprechend verifiziert sind.

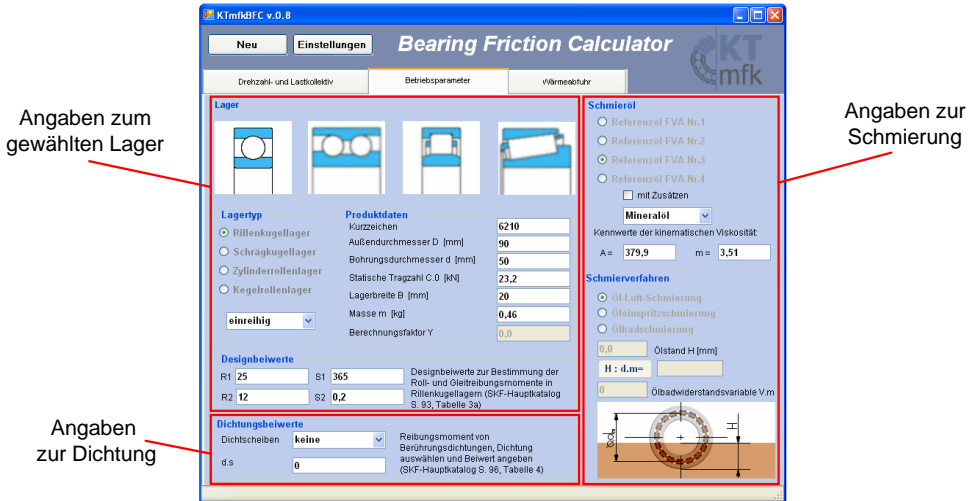


Bild 3: BFC – Menü 2

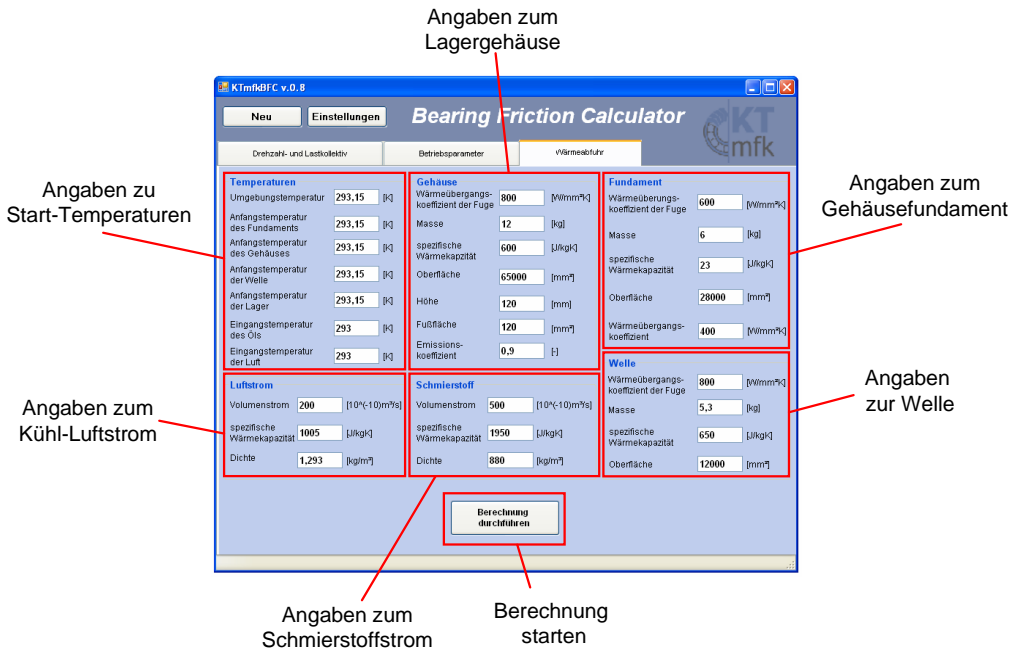


Bild 4: BFC – Menü 3

Erforderliche Angaben der Einbaumgebung sind Daten zu den Starttemperaturen, zum Gehäuse, dem Gehäusefundament, der Welle und zum Luft- und Schmierstoffstrom. Anschließend kann mit dem BFC eine automatische Berechnung der Reibung und der Temperatur im Betrieb durchgeführt werden. Dadurch werden aufwändige, manuelle Rechnungen überflüssig und der Konstrukteur kann durch die frühzeitige Kenntnis von Reibung und Temperatur eine optimierte Auslegung der Wälzlagerung – auch unter instationären Betriebsbedingungen – vornehmen.

4 Validierung

Die Validierung der Berechnung mittels „Bearing Friction Calculator“ erfolgt anhand experimenteller Versuche. Da in der Praxis die meisten Kollektive bei Wahl entsprechend kleiner Zeitintervalle auf Rechteck bzw. Trapezkollektive zurückgeführt werden können, lag der Schwerpunkt der Untersuchung auf diesen Kollektivformen. Dabei müssen die verschiedenen Parameter, die ein Trapezkollektiv definieren, beachtet werden. Diese sind in Bild 5 zu sehen.

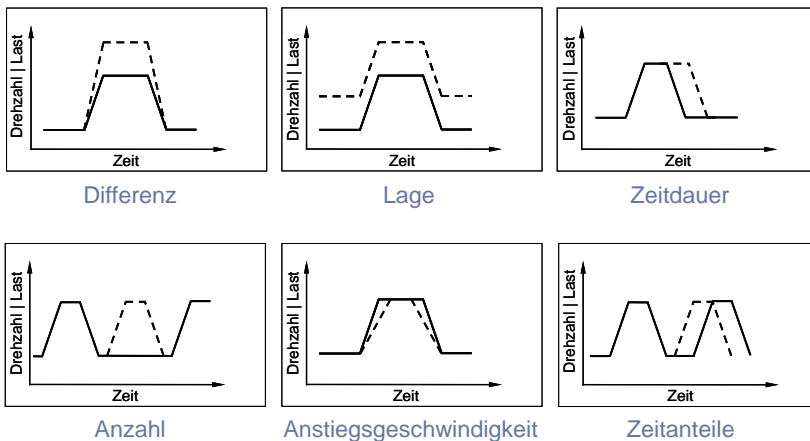


Bild 5: Parameter eines Belastungskollektivs

Für eine umfassende Validierung werden alle Kollektivparameter systematisch für Drehzahl-, Radiallast- und Axiallastkollektive untersucht. Nachfolgend wird auszugsweise am Beispiel eines Radiallastkollektivs der Einfluss von Kollektiven auf die Reibung von Wälzlager, sowie die Veri-

fizierung der Berechnung mit dem BFC gezeigt. Bild 6 zeigt den Reibmomentverlauf im Wälzlager für drei verschiedene Kollektive, bei denen der Parameter „Differenz“, d.h. die Differenz zwischen niedrigem und hohem Belastungsniveau, variiert wurde. Dabei ist die untere Laststufe für alle drei Kollektive konstant, die obere Laststufe variiert. Man erkennt deutlich die Abhängigkeit des Reibmoments von der Laststufe, sowie die zeitliche Veränderung des Reibmoments bei konstanter Laststufe.

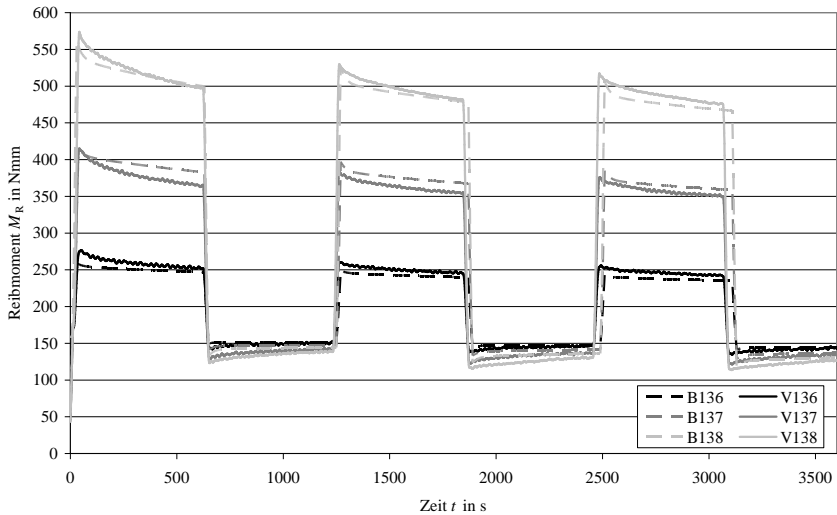


Bild 6: Reibmomentverläufe verschiedener Radiallastkollektive

Die zeitliche Abhängigkeit des Reibmoments resultiert aus dem Temperaturverlauf im Lager, der in Bild 7 für alle drei Kollektive zu sehen ist.

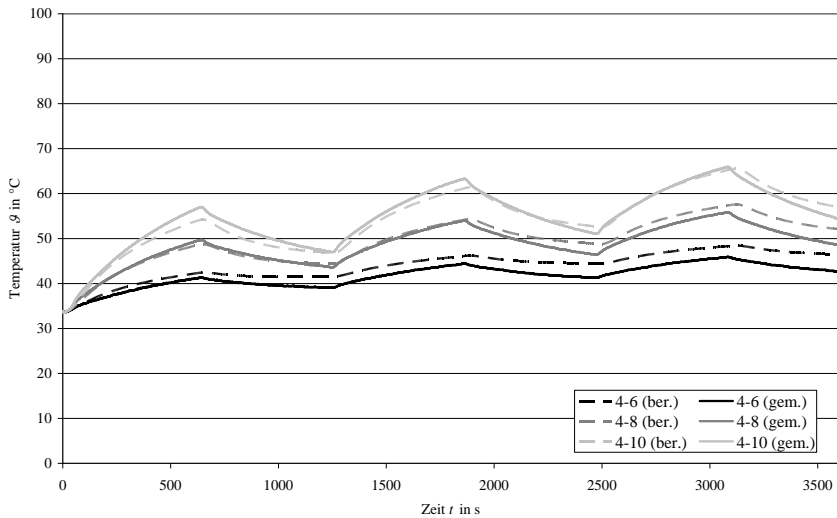


Bild 7: Temperaturverläufe verschiedener Radiallastkollektive

Des Weiteren ist in Bild 6 festzustellen, dass das Reibmoment im niedrigen Belastungsniveau trotz gleicher Betriebsbedingungen voneinander abweicht. Dies ist auf die unterschiedliche Vorbelastung der Lager zurückzuführen, welche über die Temperatur im weiteren Verlauf einen Einfluss auf die Reibmomententwicklung ausübt.

In den Bildern 6 und 7 sind neben den gemessenen Reibmoment- und Temperaturverläufen auch die berechneten Verläufe – gestrichelt – dargestellt. Man erkennt hierbei eine gute Übereinstimmung von Messung und den mit dem BFC berechneten Verläufen.

Nachfolgend sei noch die Validierung für einen weiteren Lagertyp, hier dem Pendelkugellager unter einem Drehzahlkollektiv von 2000 min^{-1} auf 5000 min^{-1} bei gleichen Zeitanteilen gezeigt.

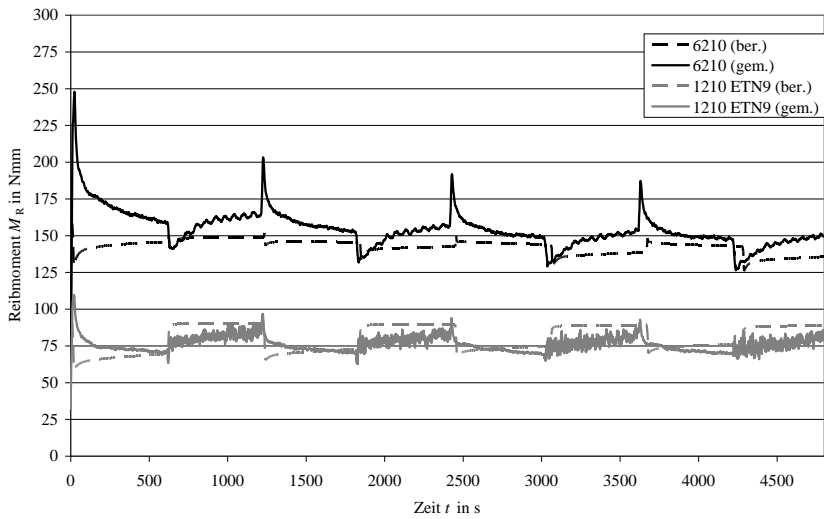


Bild 8: Vergleich von Rillenkugellager und Pendelkugellager (Reibmoment)

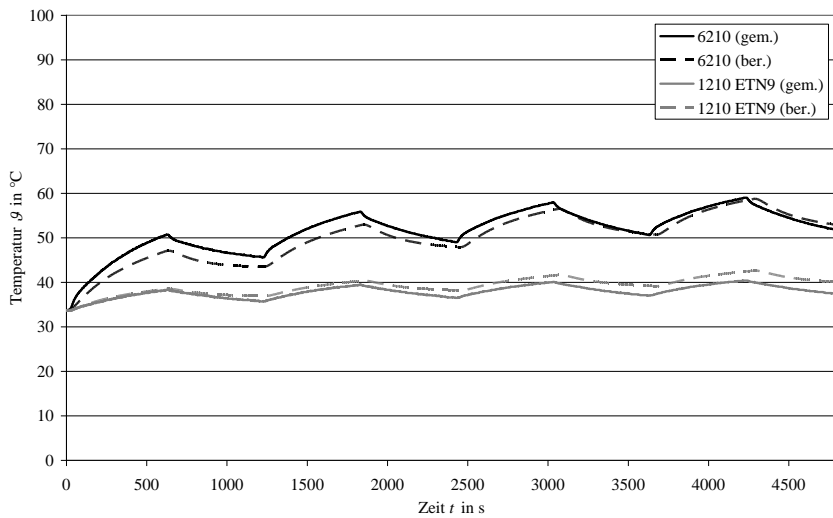


Bild 9: Vergleich von Rillenkugellager und Pendelkugellager (Temperatur)

Mit Ausnahme der Startphase des Reibmoments, in der Beschleunigungseffekte besonders zum Tragen kommen, erkennt man auch hier eine gute Übereinstimmung von Messwerten und den errechneten Werten.

5 Zusammenfassung

Mit dem „Bearing Friction Calculator“ wird dem Konstrukteur ein Werkzeug zur Verfügung gestellt, welches die Berechnung der Wälzlagerreibung sowie der entstehenden Temperatur bereits in frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses erlaubt. In Erweiterung zu bestehenden Werkzeugen kann hierbei erstmalig auch der Einfluss von niederfrequenten instationären Betriebsbedingungen, in Form von Drehzahl- und Lastkollektiven erfasst werden. Des Weiteren bietet das Werkzeug die Möglichkeit der Berechnung der Wärmeabfuhr an der Wälzlagerung auf Basis vereinfachter, aber hinreichend genauer und zudem verifizierter Näherungsgleichungen. Damit wird dem Nachteil bestehender Modelle Rechnung getragen, auch die Wärmeabfuhr bereits in frühen Phasen zu ermitteln. Experimentelle Untersuchungen zeigen gute Übereinstimmung der gemessenen mit den mit dem „Bearing Friction Calculator“ berechneten Reibmoment- und Temperaturverläufen.

Literatur

- [1] SKF GmbH: Interaktiver Lagerungskatalog. URL <http://www.skf.com/portal/skf/home/products?maincatalogue=1&newlink=first&lang=de>. – Aktualisierungsdatum: 22.07.2010.
- [2] Stahl, Thomas ; Tremmel, Stephan ; Meerkamm, Harald ; Wartzack, Sandro: The influence of speed and load spectra on the friction of rolling bearings. In: 65th STLE Annual Meeting & Exhibition (Hrsg.) : 65th STLE Annual Meeting & Exhibition (65th STLE Annual Meeting & Exhibition, Las Vegas, 16.-20.05.2010). 2010.
- [3] Winter, H.; Michaelis, K.: Untersuchungen zum Wärmehaushalt von Getrieben. Antriebstechnik. Band 20 (1981) Nr. 3, S. 70/74.
- [4] Funck, G.: Wärmeabführung bei Getrieben unter quasistationären Betriebsbedingungen. Technische Universität München. Dissertation. 1985.
- [5] Leimann, D.-O.: Wärmeentstehung und Wärmeabfuhr bei Getrieben. 1. Auflage. Würzburg: Vogel-Druck 1982.