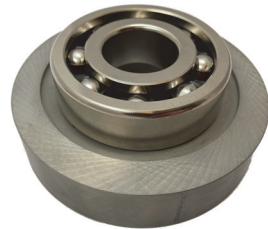


Druckkamlagerung: Eingrenzung der Verlustleistungsreduktion bei optimaler Wälzlagerwahl

Heinrich, C.; Lohregel, A.

Untersucht werden Wälzlagerverlustleistungen und -kosten für Konfigurationen mit und ohne Druckkamlagerung. Aus dem gesamten Herstellerkatalog werden jeweils die verlustleistungs- oder kostenoptimalen Lager für eine umfangreiche Variation von Randbedingungen gewählt.



Roller bearing power loss and cost are analyzed for configurations with and without thrust collars. Optimal bearings concerning efficiency or cost are selected from the entire manufacturer's catalogue for an extensive variation of situations.

Untersuchungsziel

Heß demonstrierte in /1/ theoretisch und in /2/ experimentell mögliche Wirkungsgradgewinne beim Einsatz von Druckkämmen in schrägverzahnten Getrieben, welche aus der Entlastung der Wälzlager resultierten. Die zitierten Untersuchungen erfolgten an Einzelfällen; in diesem Artikel soll eine universellere Analyse erfolgen.

Die zu untersuchende Hypothese lautet, dass die beim Druckkammeinsatz wegfallende Axialbelastung der Wälzlager ausgenutzt werden kann, um leichtere, effizientere Lager einzubauen, ohne die Lagerlebensdauer negativ zu beeinflussen. Heß untersuchte im Speziellen den Wechsel von Kegelrollenlagern auf Rillenkugellager. Neben dem Tragfähigkeitsunterschied werden die Kegelrollenlager in der druckkammlosen Konfiguration wegen der besseren Führungsgenauigkeit der angestellten Lagerung gewählt; dieser Aspekt wird beim Druckkammeinsatz ebenfalls nicht verschlechtert, da die Druckkämme das Verzahnungskippmoment kompensieren (vgl. dazu auch /3/).

Neben dem Wechsel von Kegelrollenlagern auf Rillenkugellager gilt es, weitere Ausgangssituationen und Motivationen zu untersuchen. So interessiert z. B. ebenfalls, was für ein Wälzlagerverlustleistungsverhältnis sich einstellt, wenn die Wälzlager beim Druckkammeinsatz nicht im Vergleich zur konventionellen Ausgangssituation getauscht werden, oder wenn der Lagertyp (Kugel, Zylinderrollen, Kegelrollen) gleichbleibt. Ebenfalls existieren neben der Wirkungsgradmaximierung weitere Ziele bei der Lagerwahl, wie z. B. eine Kostenminimierung. Neben den zu untersuchenden qualitativen Veranlassungen zur Wahl bestimmter Lager gibt es

quantitative, d. h. diverse Getriebemomente, Drehzahlen, und Geometrien. Eine allgemeingültige Untersuchung dieses weiten Felds stellt eine methodische Herausforderung dar.

Methodik

Da die Wälzlagerauslegung und -verlustleistungsberechnung mit unaufwändig auswertbaren analytischen Gleichungen durchgeführt werden kann, ist die Nutzung eines Brute-Force-Ansatzes d. h. die tatsächliche Berechnung diverser Konfigurationen anstelle des Versuchs, allgemeingültige Zusammenhänge aus wenigen Berechnungen oder durch Analyse von Gleichungen zu finden, praktikabel. Der Brute-Force-Ansatz wird für sinnvoll befunden, da die diversen am Markt verfügbaren Wälzlager keinen einfachen Funktionszusammenhängen folgen, sondern höchstens abschnittsweise leicht beschreibbar sind. Die Ergebnisse der Berechnungen werden dann mit statistischen Methoden ausgewertet.

Wenn eine große Menge von Wälzlagern in diversen Lastsituationen etc. berechnet werden soll, bietet sich dafür die algorithmische Umsetzung auf einem Computer an. Zu diesem Zweck müssen die Wälzlagerdaten in einer vom Berechnungsprogramm ansprechbaren Datenbank vorliegen. Eine solche öffentlich zugängliche direkt computernutzbare Datenbank existiert nach dem Wissen des Autors nicht; stattdessen liegen die Daten in gedruckten bzw. PDF-Katalogen und auf den Webseiten der Hersteller vor. Die Auswertung von Webseiten hat sich als einfacher umsetzbar als die Auswertung von PDF-Katalogen herausgestellt, da hierfür bessere Softwarewerkzeuge existieren und in Folge weniger manuelle Datenaufbereitung erforderlich ist.

Um die Daten von den Herstellerwebseiten automatisiert in eine im Berechnungsprogramm nutzbare Form zu überführen, wird die Methode des sog. Web Scraping („Schürfen des Internets“) genutzt. Ein Programm ruft die Herstellerwebseite in einem Webbrowser auf und arbeitet sich an einer dort verfügbaren Liste von Links zu einzelnen Detailseiten spezifischer Wälzlager vor. Die Struktur der Detailseiten ist immer gleich, so dass aus dem HTML-Code reproduzierbar spezifische Daten zum Lager über XPath-Ausdrücke extrahiert werden können. Es werden die Python-Bibliotheken Beautiful Soup /4/ und Selenium /5/ genutzt. Zur Untersuchung der Wahl des jeweils kostengünstigsten Lagers wird eine Händlerwebseite analog gescraped. Bei Lagern, die von verschiedenen namhaften Herstellern verfügbar sind, wird jeweils das günstigste in die Datenbank eingetragen.

Wegen der am einfachsten scrapebaren Webseitenstruktur wurde die Webseite des Herstellers SKF (skf.com) und die des Händlers eKugellager (eKugellager.de) zur Erstellung der Datenbank genutzt (Daten aus Juli 2021).

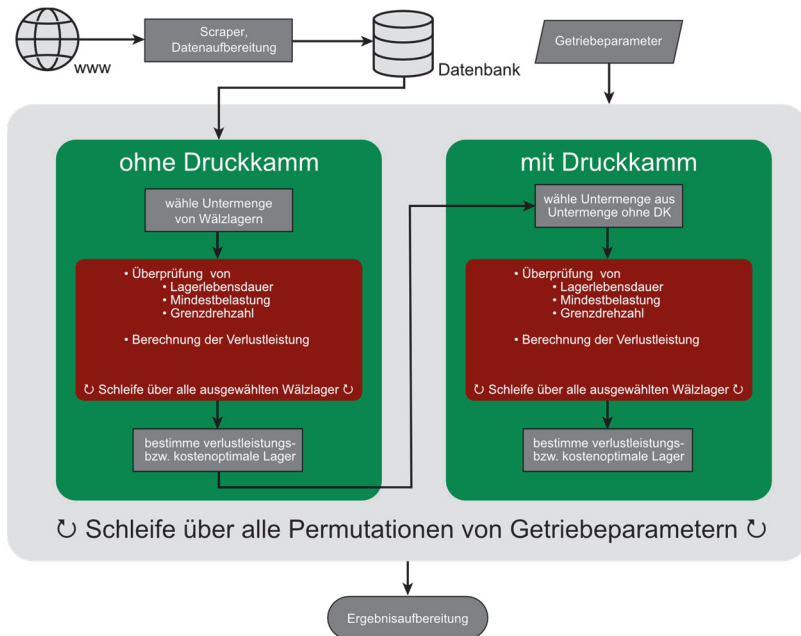


Abbildung 1: Flussdiagramm der Analyse

Die Datenbank enthält 1910 Rillenkugellager, 1921 Zylinderrollenlager und 571 Kegelrollenlager, davon 34 % mit Kosten.

Die Lagerverlustleistungsberechnung wird nach SKF-Verfahren /6/ und die Lebensdauerberechnung nach ISO 281 /7/ durchgeführt. Neben der Überschreitung der erforderlichen rechnerischen Lebensdauer wird die Einhaltung der Mindestbelastung und der Grenzdrehzahl geprüft. Kegelrollenlager werden ohne Vorspannung betrachtet. Da mit einer vorgegebenen Betriebsviskosität und nicht mit einer rechnerischen temperaturabhängigen Viskosität eines vorgegebenen Öls gearbeitet wird, werden Verlustleistungsunterschiede überschätzt, wenn sich in einem Getriebe mit vorgegebenem Öl für die Konfigurationen mit und ohne Druckkamm deutlich unterschiedliche Betriebstemperaturen einstellen, was die Verlustleistung der wärmeren Konfiguration senken würde.

Die Bestimmung der Lagerkräfte erfolgt nach den Methoden der technischen Mechanik. Unter der Annahme, dass das Zahnrad mittig zwischen den beiden Lagern sitzt, kann die Lagerbelastung für eine Getriebekonfiguration über die Nenn-Umfangskraft und das Verhältnis von Wälzkreisradius r zu Lagerabstand l mit einer Minimalmenge von Variablen bestimmt werden.

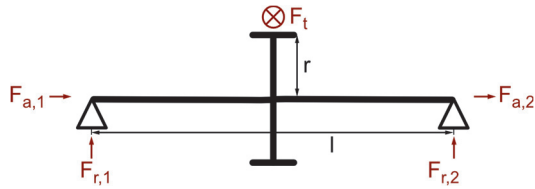


Abbildung 2: Wälzlagerkräfte

ohne Druckkamm		mit Druckkamm	
$F_{r,1} = \sqrt{\left(\frac{F_t}{2}\right)^2 + \left(\frac{F_t \cdot \tan \beta \cdot r}{l} + \frac{F_t \cdot \tan \alpha_n}{2 \cdot \cos \beta}\right)^2}$	(1)	$F_{r,1} = \sqrt{\left(\frac{F_t}{2}\right)^2 + \left(\frac{F_t \cdot \tan \alpha_n}{2 \cdot \cos \beta}\right)^2}$	(2)
$F_{r,2} = \sqrt{\left(\frac{F_t}{2}\right)^2 + \left(\frac{F_t \cdot \tan \beta \cdot r}{l} - \frac{F_t \cdot \tan \alpha_n}{2 \cdot \cos \beta}\right)^2}$	(3)	$F_{r,2} = \sqrt{\left(\frac{F_t}{2}\right)^2 + \left(\frac{F_t \cdot \tan \alpha_n}{2 \cdot \cos \beta}\right)^2}$	(4)
$F_{a,1} = F_t \cdot \tan \beta$	(5) bzw. für Kegelrollenlager in Abh. der Radiallast	$F_{a,1} = 0$	(6) bzw. für Kegelrollenlager in Abh. der Radiallast
$F_{a,2} = 0$	(7)	$F_{a,2} = 0$	(8)

(mit $\alpha_n=20^\circ$)

Ein Flussdiagramm der Analyse ist in Abbildung 1 dargestellt.

Es werden die folgenden Fragestellungen untersucht:

- ① Verlustleistungsverhältnis bei freier Wahl des jeweils effizientesten tragfähigen Lagers
- ② Verlustleistungsverhältnis bei der Wahl des jeweils effizientesten tragfähigen Lagers für die Konfiguration ohne Druckkamm und gleichbleibendem Bohrungsdurchmesser für die Konfiguration mit Druckkamm
- ③ Verlustleistungsverhältnis bei freier Wahl des effizientesten Lagers in der druckkammlosen Konfiguration und keinem Wechsel für die Druckkammkonfiguration
- ④ Verlustleistungsverhältnis bei freier Wahl des effizientesten Lagers in der druckkammlosen Konfiguration und keinem Wechsel des Lagertyps für die Druckkammkonfiguration
- ⑤ Verlustleistungsverhältnis bei der Wahl des effizientesten Kegelrollenlagers in der druckkammlosen Konfiguration und Wahl des effizientesten Lagers beliebigen Typs in der Druckkammkonfiguration
- ⑥ Kostenverhältnis bei freier Wahl des jeweils effizientesten tragfähigen Lagers
- ⑦ Kostenverhältnis bei freier Wahl des jeweils günstigsten tragfähigen Lagers

In Abstufungen wird der folgende Parameterraum untersucht:

- Nenn-Umfangskraft der Verzahnung F_t 1e0-1e5 N
- Schrägungswinkel β 10-30°
- Drehzahl n 1e3-1e4 1/min
- nominelle Solllebensdauer $L_{10h_{soll}}$ 4e3-4e4 h
- tatsächliche kinematische Schmierstoffviskosität ν 25-250 mm²/s²
- Verhältnis Wälzkreisradius zu Lagerabstand r_l 1-4

Das Übersetzungsverhältnis ist nicht enthalten; stattdessen wird nur die Hälfte einer Verzahnungsstufe (d. h. nur die langsamlaufende oder nur die schnelllaufende Welle) untersucht. Dies senkt die Anzahl der zu berechnenden Permutationen; die Auswirkungen im Getriebe können so separat betrachtet werden. Die Wellen mit Rad und Ritzel unterscheiden sich durch unterschiedliche r_l -Verhältnisse.

Ausgewertet werden bei Verlustleistungsbetrachtungen die Wälzlagerverlustleistungsverhältnisse ohne Druckkammverlustleistung. Die Ergebnisse stellen somit den höchstmöglich erreichbaren Gewinn dar. Die Druckkammverlustleistung kann bezogen auf die Wälzlagerverlustleistung in der Lagerungssituation ohne Druckkamm zu den Verhältnissen addiert werden, um die Gesamtlagerungskonzepte zu vergleichen. In /1/ lag die rechnerische Druckkamm-verlustleistung bei etwa 8 % der Wälzlagerleistung in der Lagerungssituation ohne Druckkamm; in /2/ lag sie darunter (es wurde ein weites Kennfeld von Drehzahlen und Drehmomenten untersucht). Hierbei muss beachtet werden, dass die Druckkammverlustleistung für die komplette Getriebestufe gilt, in der vorliegenden Analyse jedoch nur jeweils eine von zwei Wellen einer Getriebestufe betrachtet werden.

Analog stellt das Kostenverhältnis das Verhältnis der Wälzlager ohne Druckkamm dar. Zu den Druckkamm-Fertigungskosten liegen keine repräsentativen Werte vor.

Auswertung

Die Ergebnisse werden in den Abbildungen 3-5 ausgewertet. Abbildung 3 zeigt die Verlustleistungsverhältnisse bzw. Kostenverhältnisse verschiedener Fragestellungen (bezeichnet durch die Zeilennummierungen ①-⑦) ausgewertet als spaltenweise Variation jeweils eines Parameters und Mittelwertbildung über die restlichen. Die Verhältnisse werden durch Division des Ergebnisses für die Druckkamm-Wälzlagerkonfiguration durch die druckkammlose Wälzlagerkonfiguration gebildet, d. h. Werte kleiner 1 bedeuten geringere Leistungen bzw. Kosten in der Druckkamm-Wälzlagerkonfiguration.

Während in Abbildung 3 die Streuung der Ergebnisse untersucht werden kann, zeigen Abbildungen 4 und 5 die Interaktionen von jeweils zwei Faktoren, wobei die Ergebnisse über die restlichen Faktoren gemittelt werden.

Die Interaktions-Konturplots sind platzsparend in Dreiecksmatrizen sortiert, wobei die Fragestellung der jeweiligen oberen bzw. unteren Dreiecksmatrix (grau markierte Bereiche) durch die Nummer in der oberen linken Ecke des Dreiecks angegeben wird. Die Achsenbeschriftungen gelten zeilen- bzw. spaltenweise.

Grundsätzlich liegen die mittleren Verhältnisse für alle betrachteten Fragestellungen unter 1. Das Verlustleistungsverhältnis ist für die von Heß bearbeitete Motivation des Austauschs von Kegelrollenlagern ⑤ am geringsten (im Mittel bei 0,22). Bei der komplett freien Lagerwahl ① liegt das Verlustleistungsverhältnis im Mittel bei 0,35. Werden die verlustleistungsoptimal gewählten Lager der druckkammlosen Konfiguration für den Druckkammeinsatz nicht getauscht, liegen die Wälzlagerverlustleistungsverhältnisse im Mittel zwar merklich über den Varianten mit frei für den Druckkammeinsatz gewählten Lagern, jedoch unter 1 bei 0,6 (③).

Plausibel sind sinkende Verhältnisse bei steigendem Verzahnungsschrägungswinkel β oder großem Hebelarm (beschrieben durch l/l_0).

Das mittlere Verlustleistungsverhältnis hängt wenig von der Umfangskraft ab. Es ist bei niedrigen Drehzahlen und Viskositäten kleiner als bei hohen.

Die Streuung der Ergebnisse ist begrenzt, so dass eine Auswertung der Tendenzen über Mittelwerte sinnvoll ist. In Ausnahmefällen (beschrieben durch Min/Max-Linien) können auch kontraproduktive Fälle, d. h. mit Verlustleistungsverhältnissen größer 1 oder extreme Gewinne mit Verlustleistungsverhältnissen nahe 0 auftreten.

Bei hohen Lasten und Drehzahlen ist der Kostenunterschied besonders hoch, wobei hier in Frage gestellt werden muss, ob die Inklusion der zusätzlichen Kosten durch den Druckkamm nicht das Gesamtkostenverhältnis wieder deutlich über 1 schieben würde.

Fazit

Die Erkenntnis zur Möglichkeit der Beeinflussung der Wälzlagerverluste beim Druckkammeinsatz wurde verallgemeinert und erweitert. Wenn auch die vorher betrachtete Ausgangssituation mit Kegelrollenlagern den Best Case darstellt, so sind auch unter anderen Umständen Wirkungsgradgewinne möglich.

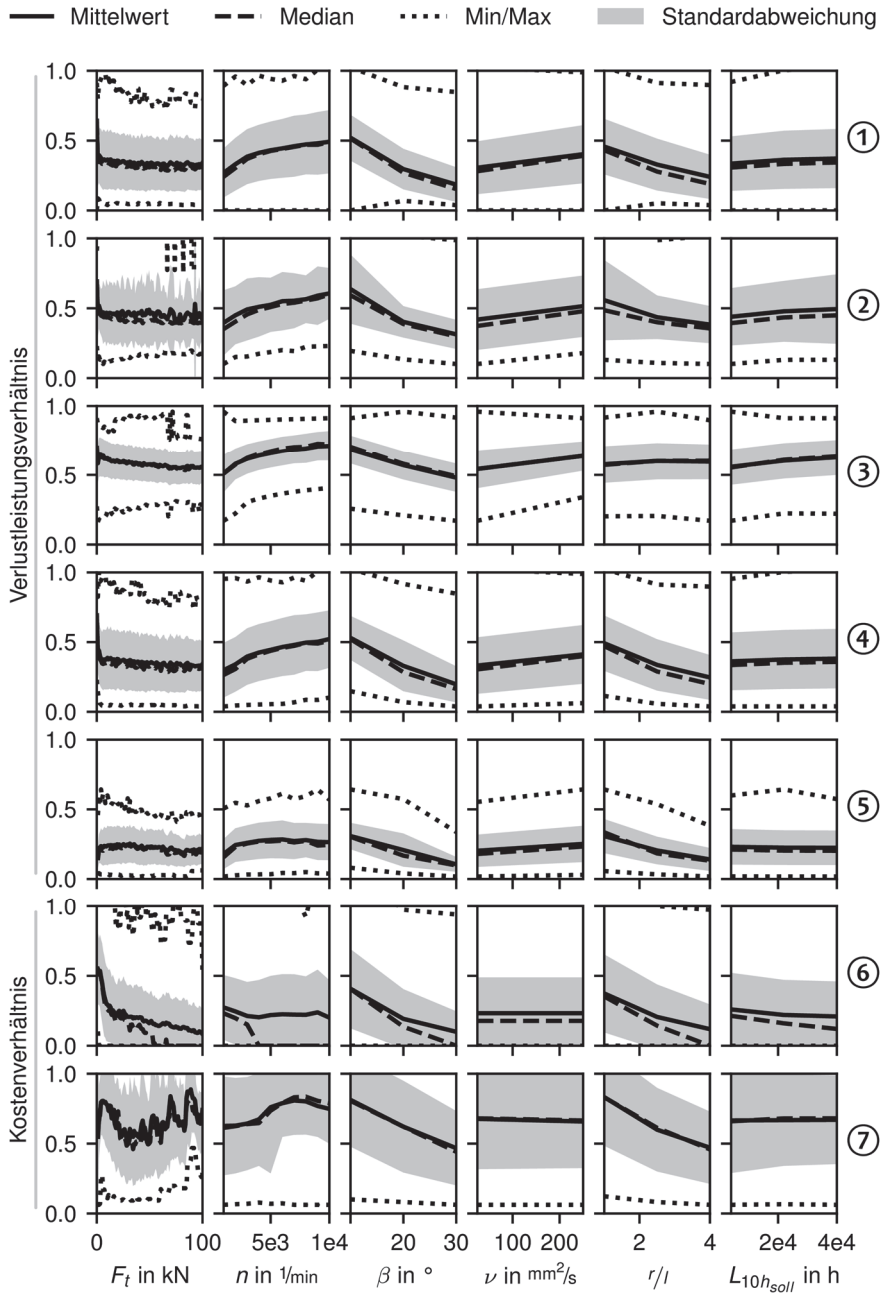


Abbildung 3: Wälzlagerverlustleistungs- & -kostenverhältnisse – Streuung

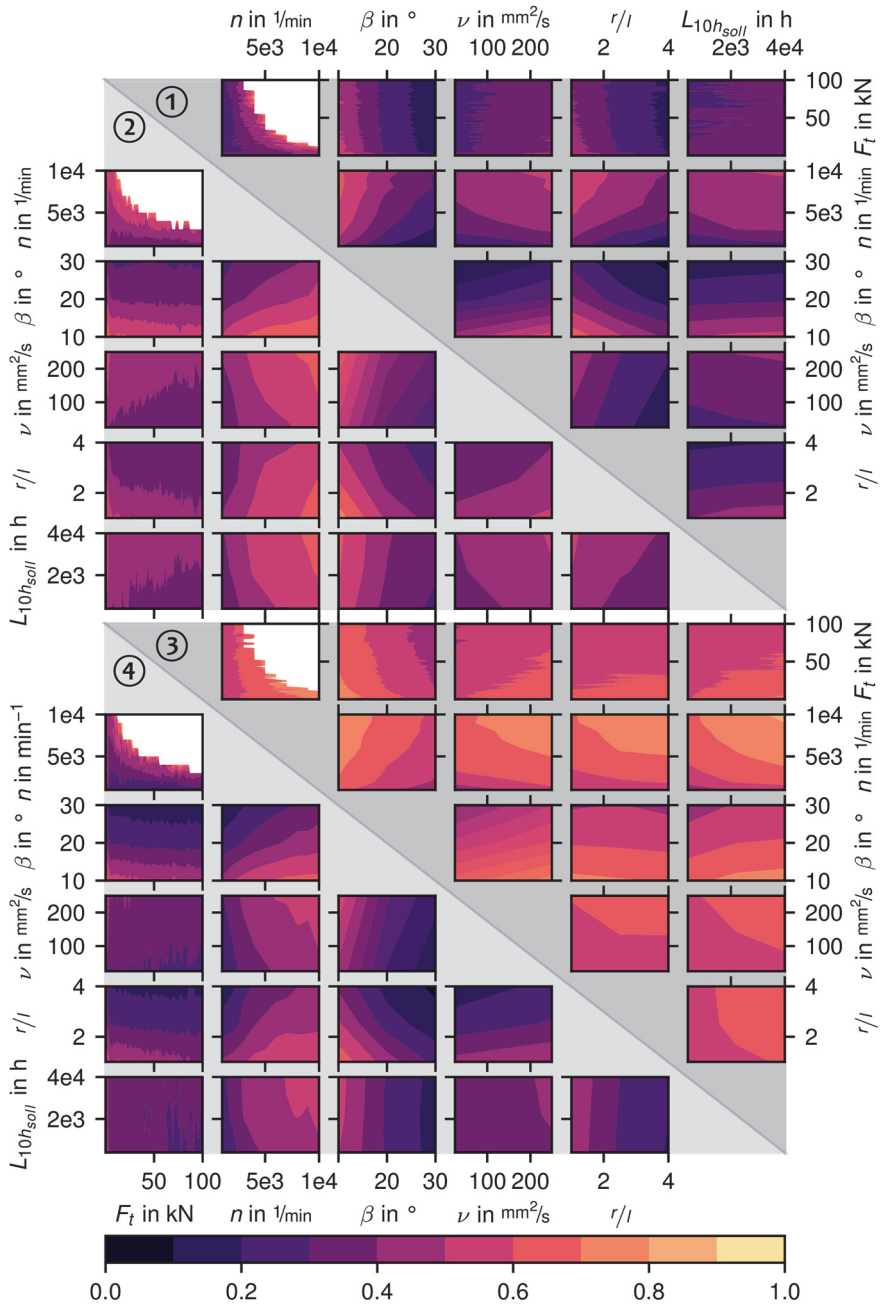


Abbildung 4: Wälzlagerverlustleistungsverhältnisse – Faktorinteraktion

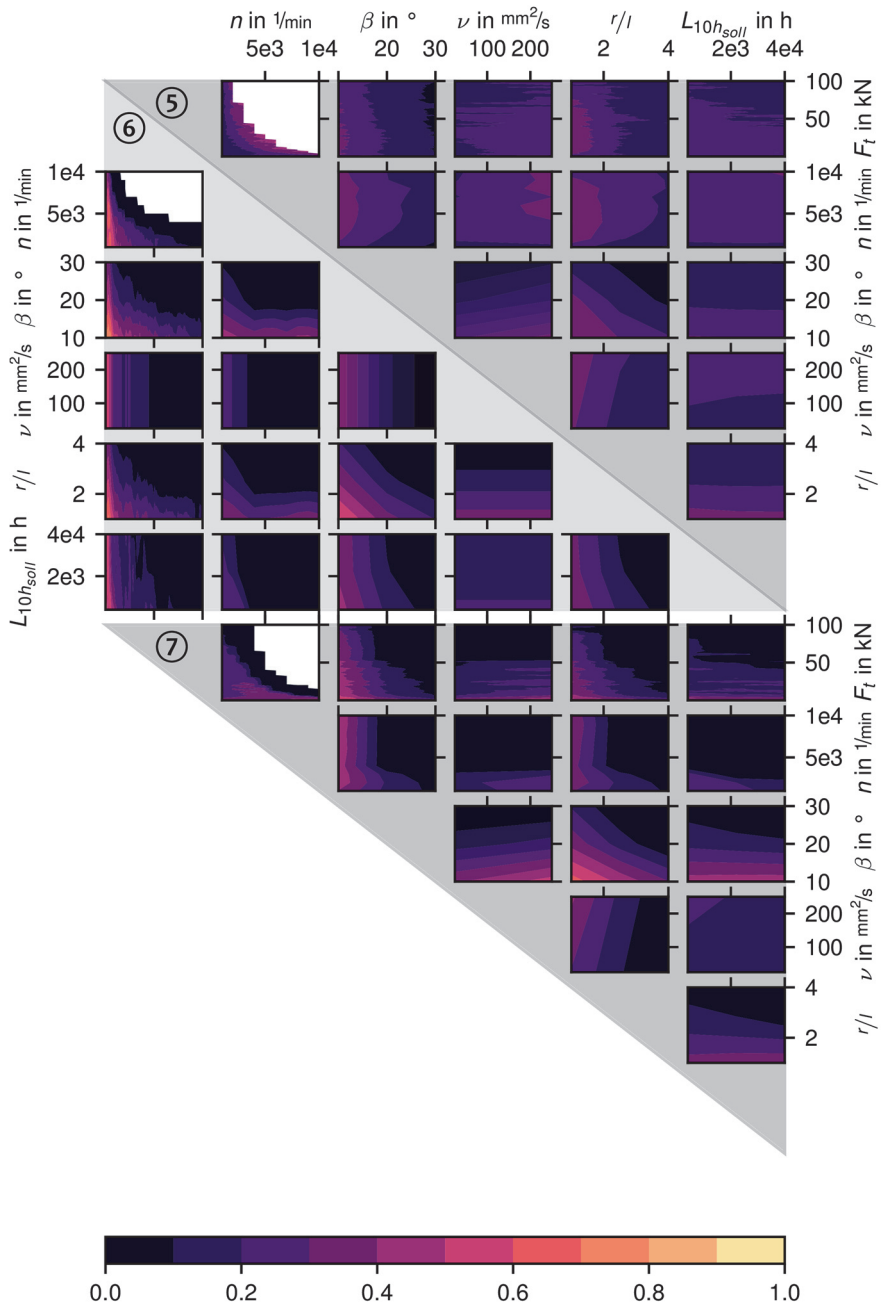


Abbildung 5: Wälzlagerleistungs- & -kostenverhältnisse – Faktorinteraktion

Literatur

- /1/ Heß, M.: Beeinflussung der Reibungsverluste in schrägverzahnten Getrieben durch Druckkamm lager. In: Institutsmitteilung Nr. 39, S. 33–44, IMW TU Clausthal, 2014
- /2/ Heß, M.: Einsatz von Druckkämmen zur Effizienzsteigerung von schrägverzahnten Getrieben, Dissertation TU Clausthal, 2018
- /3/ Heinrich, C.: Steigerung des Verzahnungswirkungsgrads im Teillastbereich durch Druckkammeinsatz. In: Institutsmitteilung Nr. 44, S. 5–12, IMW TU Clausthal, 2019
- /4/ Richardson, L.: Python-Bibliothek Beautiful Soup, <https://www.crummy.com/software/BeautifulSoup/>, 2021
- /5/ Selenium HQ: Python-Bibliothek Selenium, <https://github.com/SeleniumHQ/selenium/tree/trunk/py>, 2021
- /6/ SKF Gruppe: Hauptkatalog. SKF Group, Göteborg, 2014
- /7/ DIN ISO 281:2010-10: Wälzlager - Dynamische Tragzahlen und nominelle Lebensdauer (ISO 281:2007)