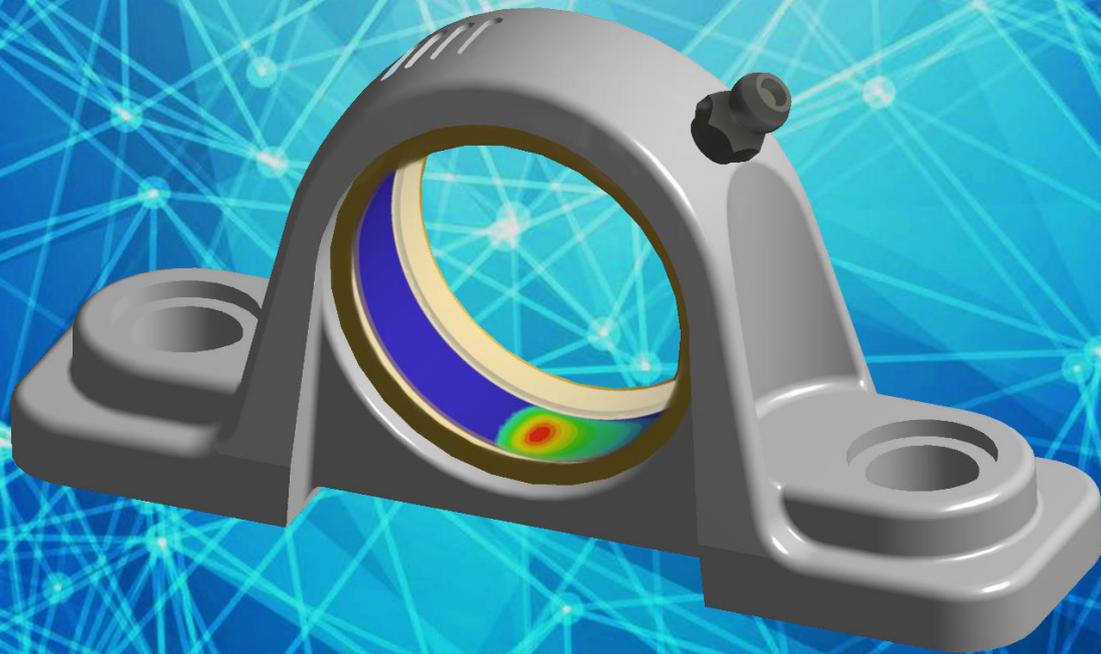


TriboTechnologies
APPLICATIONS FOR HIGHER EFFICIENCY

Optimierung von Gleitlagern mit Tribo-X inside ANSYS



www.tribo-technologies.com

Anwendung von Optimierungsverfahren bei der Auslegung von hochbelasteten Gleitlagern

V. Hoffmann und D. Bartel, Tribo Technologies GmbH; C. Stelzer, CADFEM GmbH

1. Kurzfassung

Mit Hilfe von einem antwortflächenbasierten und einem direkten Optimierungsverfahren wird für ein hochbelastetes Gleitlager in einem mehrdimensionalen Parameterraum ein optimales Design hinsichtlich minimierter Werte für die Reibung, maximale Schmierstofftemperatur und den hydrodynamischen Maximaldruck bestimmt. Bei diesem Gleitlager spielen elastische Verformungen, die Erwärmung des Schmierstoffs und eventuell auftretende Mischreibung eine wesentliche Rolle. Mit Hilfe des Berechnungstools „Tribo-X inside ANSYS“ werden DoE-basierte thermo-elastohydrodynamische Berechnungen durchgeführt, die die Grundlage für eine Optimierung mit „ANSYS DesignXplorer“ liefern.

2. Abstract

In this paper a journal bearing which is exposed to high load is dimensioned in a multidimensional parameter space with the help of a response surface optimization and a direct optimization with regard to minimum values for friction, maximum hydrodynamic pressure and lubricant temperature. Elastic deformations, lubricant heating due to friction as well as possible solid contact pressures resulting from mixed friction play a major role for this kind of journal bearing. DoE-based thermo-elasto-hydrodynamic simulations with the simulation tool “Tribo-X inside ANSYS” are conducted as a basis for an optimization with the tool “ANSYS DesignXplorer”.

3. Motivation und Stand der Technik

Durch die Kombination von mathematischen Optimierungsmethoden mit Simulationsmodellen können ingenieurstechnische Probleme hinsichtlich einer Zielfunktion minimiert oder maximiert werden. Das Ziel besteht darin, Designvarianten für Systeme zu identifizieren, die ein Verbesserungspotential für die technische Anwendung versprechen.

Bei der Auslegung von hydrodynamischen Gleitlagern hat der Konstrukteur diverse Möglichkeiten, das Tragverhalten zu beeinflussen. Dieses wird sowohl durch die Abmessungen des Gleitlagers wie den Durchmesser, die Breite und das Lagerspiel beeinflusst. Auch die elastischen Eigenschaften, die durch die Gestaltung der Lagerumgebung und die Wahl des Lagerwerkstoffs bestimmt werden, spielen genauso wie die Schmierstoffzufuhr eine wesentliche Rolle.

Die Berechnung von Gleitlagern kann mit einfachen analytischen Verfahren [1], [2], die in vielen Fällen nur zu unzureichenden Ergebnissen führen, oder numerisch mit der Reynolds'schen Differentialgleichung (RDGL) [3] oder der CFD erfolgen [4].

Im Vergleich zur aufwendigen CFD-Simulation ist die erforderliche Zeit zur Modellerstellung und Berechnung bei der RDGL deutlich geringer. Bei hoch belasteten Gleitlagern treten einerseits elastische Verformungen infolge des im Schmier-spalt wirksamen hydrodynamischen Drucks auf. Andererseits kann es zum Kontakt der Oberflächenrauheiten von Welle und Gleitlager und somit zu Mischreibung kommen. Eine zuverlässige Berechnung dieser hoch belasteten Gleitlager erfordert eine Erweiterung der Reynolds'schen Differentialgleichung um eine elasto-hydrodynamische Kopplung und ein Mischreibungsmodell wie in [7].

Numerische Berechnungsmethoden kommen im täglichen Auslegungsprozess für Gleitlager bereits in vielen Bereichen zum Einsatz. Hierbei wird in der Regel so vorgegangen, dass einzelne Designvarianten entworfen werden, für die die Simulationen durchgeführt werden. Auf Basis einer besser/schlechter-Aussage erfolgt dann eine Auswahl des Gleitlagers für die Anwendung. Mit der simulationsbasierten Optimierung existiert ein Verfahren, mit Hilfe dessen verschiedene Designvarianten innerhalb vorgegebener Grenzen automatisiert erzeugt werden können. Eine hinreichend schnelle Lösung des Berechnungsmodells vorausgesetzt, ist es somit möglich, das Systemverhalten für hydrodynamische Gleitlager in den vorgegebenen Grenzen effizienter zu bewerten und die bestmögliche Lösung abzuleiten. Für die Optimierung technischer Systeme in ANSYS können zwei verschiedene Verfahren eingesetzt werden. Im Rahmen der antwortflächenbasierten Optimierung werden basierend auf einem Design of Experiments (DoE)-Ansatz und einem parametrisierten Gleitlagermodell eine Vielzahl von Varianten mit Hilfe des zugrundeliegenden Simulationsmodells automatisiert berechnet. Zwischen diesen Designvarianten erfolgt eine mathematische Interpolation. Werden hinreichend viele Stützpunkte bzw. Gleitlagerdesigns für das Problem berechnet, kann das Systemverhalten innerhalb der vorgegebenen Grenzen abgebildet und auf Basis dieser Kenntnis eine anforderungsabhängige, optimale Lösung abgeleitet werden. Ein wesentlicher Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass bei geänderten Zielstellungen und einer bekannten Antwortfläche ohne erneute Durchführung von aufwändigen Berechnungen eine optimale Lösung für ein anderes Optimierungsziel im gleichen Parameterraum abgeleitet werden kann. Bei der direkten Optimierung werden ausgehend von einem initial erzeugten Satz von Designvarianten sequentiell die Parameter so lange variiert, bis die Ergebnisgrößen den gewünschten Optimierungszielen entsprechen. Ein nachträglich geändertes Optimierungsziel erfordert eine erneute Optimierung mit entsprechendem Berechnungsaufwand.

Nachfolgend wird für ein hoch belastetes Gleitlager eine simulationsbasierte Optimierung auf Basis der antwortflächenbasierten und direkten Optimierung durchgeführt. Für die Berechnung kommen die Simulationstools „Trib-X inside ANSYS“ (thermo-elasto-hydrodynamische Gleitlagerberechnung, ANSYS Extension) sowie „ANSYS DesignXplorer“ (Optimierung, in ANSYS Mechanical Enterprise bereits enthalten) zum Einsatz. Die Berechnung des Gleitlagers basiert auf einer erweiterten Reynolds'schen Differentialgleichung und berücksichtigt elastische Verformungen, thermische Effekte und Mischreibungszustände.

4. Optimierungsziele für ein hochbelastetes Gleitlager

Neben der Gewährleistung einer ausreichenden Tragfähigkeit besteht ein wesentliches Ziel bei der Auslegung von Gleitlagern häufig darin, die Reibungsverluste zu reduzieren, um den Gesamtwirkungsgrad der Maschine zu erhöhen. Zudem dürfen einerseits zulässige Grenztemperaturen des Schmieröls nicht überschritten werden, um eine kontinuierliche Einsatzfähigkeit und gewünschte Ölwechselintervalle zu gewährleisten, andererseits müssen auch die hydrodynamischen Drücke unterhalb von vorgegebenen Grenzwerten der Gleitlagerwerkstoffe bleiben, um einer Beschädigung der Lageroberflächen vorzubeugen. Ziel der hier vorgestellten Optimierung ist eine Reduktion der Reibungsverluste des Gleitlagers bei gleichzeitiger Minimierung der hydrodynamischen Drücke und Schmierstofftemperaturen. Die Zielparameter für das gewählte Beispiel sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Zielstellung der Optimierung

Zu optimierende Ergebnisgröße	Symbol	Ziel
Reibungsverluste	P_{Reib}	minimieren
Max. Schmierstofftemperatur	T_{max}	minimieren
Max. hydrodynamischer Druck	p_{max}	minimieren

Bei der Auslegung des Gleitlagers kann der Konstrukteur zumeist nicht frei agieren, sondern muss den Gestaltungsspielraum innerhalb von konstruktiven Restriktionen ausschöpfen. Hierbei können Beschränkungen hinsichtlich des zur Verfügung stehenden Bauraums oder des maximalen Schmierstoffzufuhrdrucks bestehen, mit dem das Gleitlager versorgt werden kann. Bei anderen Einflussgrößen ist nicht bekannt wie sich diese auf das Tragverhalten auswirken. Wie sollte die Lagerumgebung gestaltet werden, um das Tragverhalten des Gleitlagers möglichst günstig zu beeinflussen? Wie sollte das Lagerspiel in Verbindung mit der Rauheit der Wellen- und Lageroberfläche gewählt werden, wenn ein Betrieb des Systems im Bereich der Mischreibung erwartet wird?

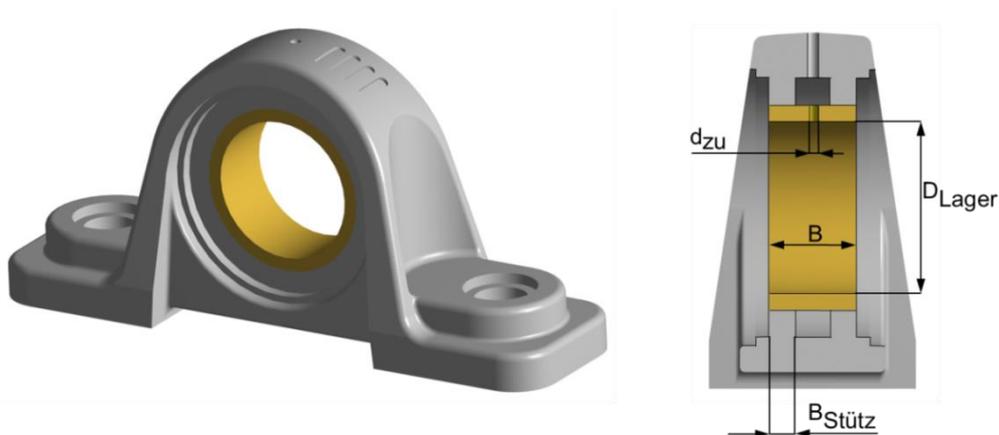


Abbildung 1: Bronzegleitlager in einem Gusseisengehäuse

In Abbildung 1 ist ein Bronzegleitlager dargestellt, das über eine Doppelstegkonstruktion in einem Stehlagergehäuse aus Gusseisen abgestützt wird und mit einem ISO-VG 46 Öl versorgt wird. Dieses Gleitlager wird für einen stationären Betriebspunkt und einen mehrdimensionalen Parameterraum optimiert. Die dazugehörigen Daten sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Parameterraum und Betriebspunkt

Eingangsparameter	Symbol	von	bis	Einheit
Lagerdurchmesser	D_{Lager}	80	100	mm
Lagerbreite	B	30	50	mm
Lagerspiel	ψ	1	2,5	‰
Durchmesser der Schmierstoffzuführbohrung	d_{zu}	3	8	mm
Versorgungsdruck	p_{zu}	1	5	bar
Relative Breite des abstützenden Stegs	$B_{\text{Stütz}}$	20	45	%
Quadratische Mittenrauheit der Welle	R_{qWelle}	0,7	0,9	μm
Betriebspunkt				
Belastung	F	10		kN
Drehzahl	N	500		1/min
Schmierstoffzuführtemperatur	T_{zu}	60		$^{\circ}\text{C}$
Schmierstoff	ISO-VG 46			

Hierbei werden Abmessungen des Gleitlagers (Lagerdurchmesser, Breite, Lagerspiel), die Schmierstoffzufuhr (Zuführdruck, Durchmesser der Zuführbohrung) sowie oberflächen-spezifische Parameter (quadratische Mittenrauheit der Welle) variiert.

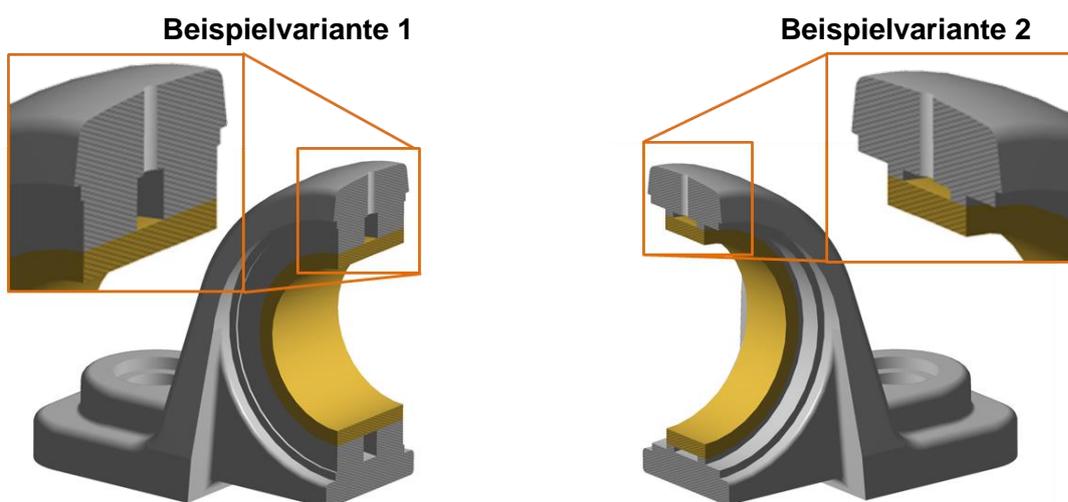


Abbildung 2: Exemplarische Geometrievarianten des parametrischen CAD-Modells

Die Oberfläche des Gleitlagers wird mit einer konstanten quadratischen Mittenrauheit von $R_{qLager}=1,2\ \mu\text{m}$ angenommen. Durch eine Variation der relativen Breite der Stege, die das Gleitlager abstützen, werden dabei auch die elastischen Eigenschaften der Lagerumgebung beeinflusst. Der Parameter $B_{Stütz}$ ergibt sich aus dem Verhältnis der Breite des Steges bezogen auf die Breite des gesamten Gleitlagers. Da Tribo-X inside ANSYS mit CAD-Daten arbeitet, ist ein parametrisiertes Modell des Gleitlagers samt Umgebung erforderlich, mit dem der gesamte Parameterraum abgebildet werden kann. In Abbildung 2 sind zwei verschiedene Geometrievarianten des Parameterraums exemplarisch dargestellt, bei denen die Breite, der Lagerdurchmesser und die relative Breite des abstützenden Steges verschieden sind.

5. Thermo-elastohydrodynamische Simulation des Gleitlagers

Infolge der hohen Belastungen wird die Tragfähigkeit des Gleitlagers maßgeblich durch die elastischen Verformungen der Lageroberfläche bestimmt. Außerdem ist zu erwarten, dass das Lager in der Mischreibung laufen kann, bei der ein Teil der Belastung durch den Kontakt von Oberflächenrauheiten aufgenommen wird und die Schmierfilmtemperatur durch die entstehende Grenzreibung in der Kontaktzone maßgeblich beeinflusst wird. Eine richtige Abbildung des Systems erfordert daher eine thermo-elastohydrodynamische (TEHD) Berechnung unter Berücksichtigung von möglichen Mischreibungszuständen. Hinzu kommt, dass für die Optimierung des beschriebenen Gleitlagers im gegebenen Parameterraum die Lösung einer Vielzahl von Varianten notwendig und somit ein effizientes Berechnungswerkzeug erforderlich ist.

Die Strömungsberechnung der Gleitlager erfolgt auf Basis der verallgemeinerten Reynolds'schen Differentialgleichung. Durch eine Kopplung mit der Finite-Elemente-Methode wird die elastische Verformung der spaltberandenden Oberflächen und der Lagerumgebung mit berücksichtigt. Die elastischen Deformationen des Schmierspalts werden hierbei auf Basis einer Nachgiebigkeitsmatrix ermittelt, die durch eine statische Reduktion unmittelbar aus dem FE-Modell in Abbildung 3 abgeleitet werden kann.

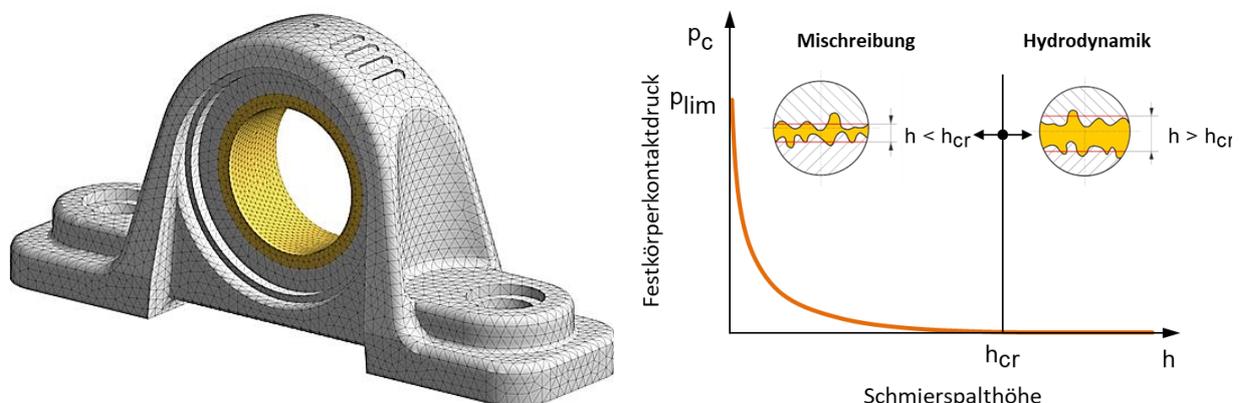


Abbildung 3: FE-Modell des Stehlagers zur Ableitung der Nachgiebigkeitsmatrix (links) und integrale Festkörperkontaktdruckkurve (rechts)

Mit Hilfe von Mischreibungskennfeldern, die durch eine integrale Festkörperkontakt-druckkurve für den Kontakt der rauen Oberflächen sowie Druck- und Scherflussfaktoren zur Berücksichtigung mikrohydrodynamischer Effekte an den Rauheiten beschrieben werden [8], ist die Berechnung von Gleitlagervarianten möglich, die sich in der Mischreibung oder am Mischreibungsübergang befinden. Um für diese Untersuchung eine schnelle Variation der Oberflächenrauwerte der Welle durchführen zu können, wird auf einen analytischen Ansatz zur Bestimmung der Mischreibungskennfelder zurückgegriffen [9], der neben der quadratischen Mittenrauheit von Welle und Gleitlager auch vom plastischen Fließdruck p_{lim} der gegenüber der Welle weicheren Lageroberfläche abhängt. In Abbildung 3 ist exemplarisch eine Festkörperkontakt-druckkurve dargestellt, aus der die kritische Schmier-spalthöhe h_{cr} hervorgeht, unterhalb derer das Lager in der Mischreibung laufen würde. Zusätzlich werden die im Schmier-spalt auftretenden Temperaturen durch Lösung der Energiegleichung bestimmt. Hierbei wird sowohl die Erwärmung des Öls infolge der Flüssigkeitsreibung als auch durch die ggf. auftretende Grenzreibung (Festkörperreibung) in der Kontaktzone sowie die Wärmeabgabe an die Lagerumgebung berücksichtigt. Die Abhängigkeit der dynamischen Viskosität des Schmieröls von der Temperatur wird in dem Simulationsmodell durch die Vogel-Gleichung abgebildet. Alle für die Optimierung berechneten Lagerdesigns basieren somit auf einer vollständigen thermo-elasto-hydrodynamischen Berechnung.

6. Antwortflächenbasierte Optimierung

Für das hoch beanspruchte Gleitlager wird zunächst eine antwortflächenbasierte Optimierung mit dem „ANSYS DesignXplorer“ vorgestellt. Eine Antwortfläche stellt den Zusammenhang zwischen Eingangsparametern und auszuwertenden Ergebnisgrößen dar. Ist diese Funktion für ein System bekannt, kann bei jeder beliebigen Änderung eines Parameters die Auswirkung auf das Systemverhalten vorhergesagt werden. Eine antwortflächenbasierte Optimierung erfordert die Berechnung von Stützstellen (Gleitlager-designs mit zuvor festgelegten Parametern), die als Grundlage für die Ableitung einer Antwortfläche dienen. Die Ermittlung dieser Stützstellen erfolgt für die in diesem Manuskript vorgestellte Untersuchung mit Hilfe eines „Design of Experiments“ (DoE) auf Basis eines Latin Hypercube Samplings in Verbindung mit einem Central Composite Design. Hierbei wird das Parameterfeld in Intervalle aufgeteilt, in die jeweils eine Berechnungsstützstelle gelegt wird. Ausgehend davon werden im Umfeld dieser zentralen Berechnungsstützstellen weitere sogenannte Sternstützstellen verteilt, mit Hilfe derer der Anstieg der Antwortfunktion im jeweiligen Intervall approximiert werden kann. Für die 7 Eingangsparameter und 3 auszuwertenden Ergebnisgrößen des zu optimierenden Gleitlagers werden auf diese Weise insgesamt 79 Berechnungen durchgeführt, die als Grundlage für die Generierung der Antwortfläche und der anschließenden Optimierung dienen. Antwortflächen können mit Hilfe unterschiedlicher Funktionsansätze und Methoden gebildet werden. Für die hier vorgestellte Untersuchung wird die Methode „Neuronales Netz“ verwendet.

Ob ein Funktionsansatz bzw. eine Methode für die Abbildung des Systems geeignet ist, kann mit Hilfe des Determinationskoeffizienten ermittelt werden. Dieser ist für alle untersuchten Ergebnisgrößen aus Tabelle 1 mit 0,98 oder höher als gut einzuschätzen, wobei ein Optimum von 1 anzustreben ist.

Aus den Ergebnissen der 79 berechneten Stützstellen lässt sich prinzipiell das Lagerdesign ermitteln, das entweder über die geringste Reibung oder die geringste reibungsbedingte Temperaturerhöhung des Schmierstoffs oder den geringsten maximalen hydrodynamischen Druck verfügt. Diese Lösung entspräche jedoch nur der besten Lösung innerhalb der Stützstellen und stellt zudem nur das Optimum im Hinblick auf ein formuliertes Ziel dar. Das hinsichtlich dreier Zielgrößen gesuchte - für den definierten Parameterraum optimale Gleitlager - ist nicht in dieser Auswahl enthalten, sondern liegt zwischen den Stützstellen im Parameterraum. Das Ziel der antwortflächenbasierten Optimierung besteht darin, dieses Gleitlager mit Hilfe einer abgeleiteten Antwortfläche zu bestimmen.

Diese Antwortfläche hat für das vorgestellte Beispiel infolge der 7 Eingangsparameter und 3 Ergebnisgrößen insgesamt 10 Dimensionen und ist daher nicht mehr grafisch darstellbar. Es lässt sich aber eine Ergebnisgröße über zwei Eingangsparameter wie in den Diagrammen in Abbildung 4 darstellen. Die in den Diagrammen abgebildeten Punkte sind berechnete Stützstellen. Dass nicht alle Punkte direkt auf der Antwortfläche liegen bedeutet dabei nicht, dass die Antwortfläche das Systemverhalten nicht richtig abbildet. Eine tatsächliche Einschätzung der Abbildungsgenauigkeit ist erst bei Berücksichtigung aller 7 Eingangsparameter möglich. In Abbildung 4 links ist die Reibleistung über der Lagerbreite und dem – durchmesser abgebildet.

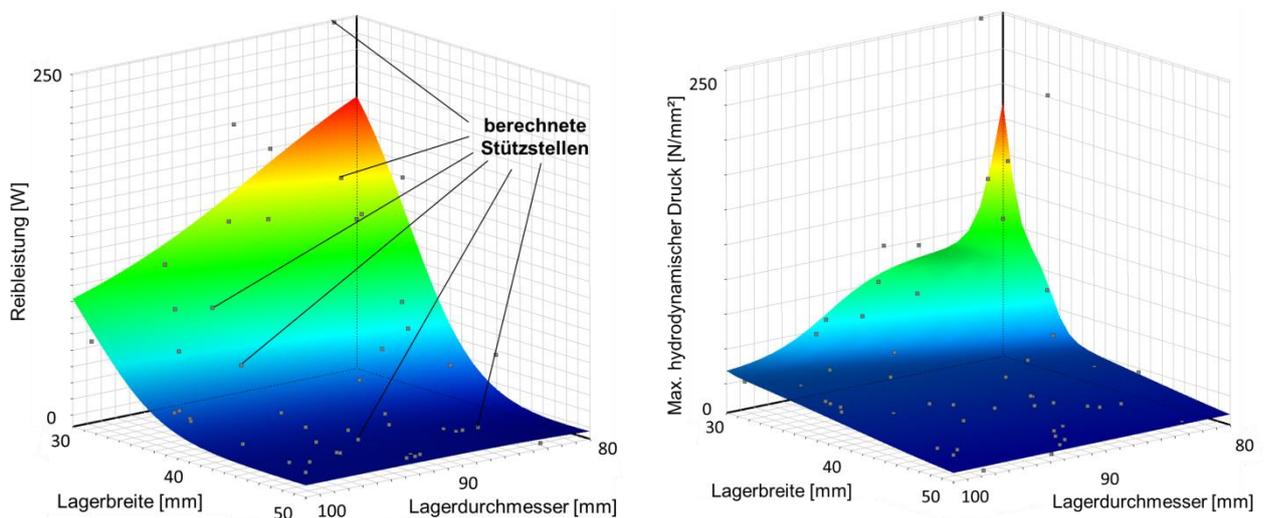


Abbildung 4: Reibleistung über Lagerbreite und –durchmesser (links); max. hydrodyn. Druck über Lagerbreite und -durchmesser (rechts)

Infolge der geringen hydrodynamischen Tragfähigkeit bei geringer Lagerbreite und – durchmesser (roter Flächenbereich) befinden sich die resultierenden Gleitlagervarianten in der Mischreibung, woraus sich hohe Reibungsverluste ergeben.

Sind sowohl der Lagerdurchmesser als auch die Lagerbreite groß werden die Gleitlager nicht mehr in der Mischreibung betrieben und es resultieren deutlich geringere Reibleistungen. Mit Hilfe der Antwortfläche kann der Parameterbereich mit den geringsten Verlusten bestimmt werden. Für den untersuchten Betriebspunkt liegt dieser in dem blauen Flächenbereich bei großen Lagerbreiten. In Abbildung 4 rechts ist der hydrodynamische Druck über der Lagerbreite und dem Lagerdurchmesser abgebildet. Deutlich erkennbar ist die Zunahme der maximalen hydrodynamischen Drücke bei geringen Lagerbreiten und –durchmessern (roter Bereich). Nehmen Lagerdurchmesser und -breite zu, nimmt der maximale hydrodynamische Druck ab. Bei großen Lagerbreiten hat der Lagerdurchmesser keinen nennenswerten Einfluss mehr auf den Maximalwert des hydrodynamischen Drucks.

Mit Hilfe der Antwortfläche und einer Multiparameterauswertung wurden die Eingangsparameter hinsichtlich der in Tabelle 1 formulierten Zielstellungen für den gegebenen Betriebspunkt optimiert. Das Ergebnis dieser Optimierung ist das in Tabelle 3 beschriebene Lagerdesign. Durch eine abschließende TEHD-Berechnung mit den aus der antwortflächenbasierten Optimierung gewonnenen Lagerparametern werden die erhaltenen Ergebnisse verifiziert. Hierbei kann eine gute Übereinstimmung für den maximalen hydrodynamischen Druck und die Temperatur erreicht werden. Die tatsächliche Reibleistung weicht um ca. 19% ab.

Tabelle 3: Optimiertes Gleitlager (Antwortflächenbasierte Optimierung)

Parameter (antwortflächenbasierte Opt.)	Optimum		Einheit
Lagerdurchmesser	80		mm
Lagerbreite	45		mm
Lagerspiel	1		‰
Durchmesser der Schmierstoffzufuhrbohrung	3		mm
Versorgungsdruck	1		bar
Rel. Breite des abstützenden Stegs	32		%
Quadr. Mittenrauheit der Welle	0,73		µm
Ergebnisgröße	Antwortfläche	Verifizierung	
Reibungsverluste	29,2	34,9	W
Maximale Temperatur	60,7	60,6	°C
Max. hydrodyn. Druck	6,9	6,8	MPa
Festkörpertraganteil	<0,1	0	%

Das im Rahmen der Optimierung erhaltene Gleitlager weist somit eine Verlustleistung von 34,9 W auf, die erwartete Schmierstofftemperatur liegt nur knapp über der Zuführtemperatur von 60 °C und der maximal auftretende Druck beträgt 6,8 MPa. Damit liegen die Ergebnisse für das optimierte Gleitlager am unteren Ende der im Parameterraum berechneten Reibungsverluste (33 bis 250 Watt), maximalen Schmierstofftemperatur (60 bis 95 °C) und maximalen hydrodynamischen Drücke (5,8 bis 55 MPa).

7. Direkte Optimierung

Vergleichend zur antwortflächenbasierten Optimierung soll das Gleitlager mit Hilfe der direkten Optimierung dimensioniert werden. Für die direkte Optimierung wird der Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) des „ANSYS DesignXplorer“ genutzt. Dabei handelt es sich um einen evolutionären Algorithmus. Diese bieten im Vergleich zu klassischen gradientenbasierten Verfahren den Vorteil, dass sie auch bei stark nichtlinearen Systemen nicht nur ein lokales, sondern das globale Optimum finden. Auch bei der direkten Optimierung werden mehrere Stützstellen berechnet. Ein initialer Satz Stützstellen (erste Generation) wird bezüglich der erreichten Ergebnisgrößen bewertet. Bei der Bildung einer nachfolgenden Generation werden nur diejenigen Stützstellen berücksichtigt, die hinsichtlich der definierten Zielgrößen die besten Ergebnisse liefern. Über mehrere Generationen hinweg ist es somit möglich ein optimiertes Lagerdesign zu finden, das einer Vielzahl von Zielgrößen gerecht wird. Für die direkte Optimierung des Gleitlagers werden insgesamt 360 Berechnungen durchgeführt, die über 6 Generationen verteilt sind. Der Rechenaufwand liegt damit deutlich über dem antwortflächenbasierten Verfahren. Die Parameter des optimierten Gleitlagers sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Optimiertes Gleitlager (Direkte Optimierung)

Parameter (Direkte Optimierung)	Optimum	Einheit
Lagerdurchmesser	82	mm
Lagerbreite	48	mm
Lagerspiel	1,56	‰
Durchmesser der Schmierstoffzufuhrbohrung	3	mm
Versorgungsdruck	1,6	bar
Rel. Breite des abstützensden Stegs	25	%
Quadr. Mittenrauheit der Welle	0,75	µm
Ergebnisgröße		
Reibungsverluste	33,1	W
Maximale Temperatur	60,5	°C
Max. hydrodyn. Druck	7,3	MPa
Festkörpertraganteil	0	%

Beide mit Hilfe der Optimierungsverfahren bestimmten Gleitlagerdesigns verfügen über einen ähnlich großen Lagerdurchmesser und Lagerbreite. Unterschiede bestehen hinsichtlich des Lagerspiels, das mit 1,56 ‰ deutlich höher als das des Lagers aus der antwortflächenbasierten Optimierung mit 1,0 ‰ ist. Die Werte für die ermittelten Zielgrößen unterscheiden sich geringfügig voneinander. Während für das Gleitlagerdesign aus der direkten Optimierung eine geringere Reibleistung im Vergleich zum Design aus der antwortflächenbasierten Optimierung ermittelt wird, ergibt sich bei der direkten Optimierung ein höherer maximaler hydrodynamischer Druck.

8. Zusammenfassung

Ziel jeder Gleitlagerauslegung ist es, einen zuverlässigen Betrieb der Maschine oder technischen Anwendung sicherzustellen. Die numerische Simulation in Verbindung mit Optimierungsverfahren stellt einen modernen und zukunftsorientierten Ansatz für den Auslegungsprozess von Gleitlagern dar. Dieser Prozess wird mit Hilfe einer antwortflächenbasierten und einer direkten Optimierung am Beispiel eines hochbelasteten Gleitlagers dargestellt. Dafür notwendige Stützstellen (Lagerdesigns) werden mit Hilfe von thermoelastohydrodynamischen Berechnungen und unter Berücksichtigung von möglichen Mischreibungszuständen erzeugt. Die Optimierungsverfahren werden auf ein Gleitlager angewendet, das durch einen Doppelsteg im Gehäuse abgestützt wird. Dabei werden die Abmessungen des Gleitlagers und die Rauwerte der Welle, die Schmierstoffzufuhr und die Lagerumgebung variiert.

Die antwortflächenbasierte Optimierung wurde auf Basis von insgesamt 79 berechneten Stützstellen durchgeführt. Mit der durch Regression erzeugten Antwortfläche konnte ein optimiertes Gleitlagerdesign abgeleitet werden, wobei eine im Nachgang durchgeführte Berechnung zur Verifizierung eine Abweichung von 19 % zu der von der Antwortfläche prognostizierten Reibleistung ergeben hat. Die Antwortfläche erlaubt im Nachgang auch eine Neuformulierung des Optimierungsziels ohne neuen Berechnungsaufwand, solange der vorgegebene Parameterraum nicht geändert wird.

Die direkte Optimierung basierte auf insgesamt 360 Berechnungen. Da nur tatsächlich berechnete Stützstellen in dem Optimierungsprozess berücksichtigt werden, treten bei diesem Verfahren keine Abweichungen infolge durchgeführter Regressionen auf. Es muss jedoch infolge der hohen Anzahl an berechneten Stützstellen eine höhere Rechenzeit in Kauf genommen werden. Eine Neuformulierung des Optimierungsziels erfordert erneuten Berechnungsaufwand.

Mit beiden Verfahren ist es möglich für den vorgegebenen Parameterraum hinsichtlich mehrerer formulierter Ziele ein optimiertes Gleitlagerdesign zu ermitteln. Trotz teils abweichender Lagerparameter gleichen sich die mit den beiden Optimierungsverfahren ermittelten Lagerdesigns hinsichtlich der berechneten Ergebnisgrößen. Geringe Abweichungen treten hinsichtlich Reibleistung und maximalem Druck auf.

Beide Verfahren können Konstrukteuren bei einer zielgerichteten Auslegung von Gleitlagern sowohl in der Flüssigkeits- als auch in der Mischreibung helfen. Im Vergleich zum herkömmlichen Auslegungsprozess kann mit Optimierungsverfahren nicht nur die Tragfähigkeit für ein Lagerdesign nachgewiesen, sondern es kann für einen gegebenen Bauraum und andere Restriktionen ein optimales Design bestimmt werden. Dieses gibt Aufschluss darüber wie Lagerabmessungen, Schmierstoffzufuhr, Materialauswahl und Oberflächenrauheiten für einen gegebenen Anwendungsfall gewählt werden sollten.

9. Literaturhinweise

- [1] DIN 31652: Gleitlager - Hydrodynamische Radial-Gleitlager im stationären Betrieb, 2017.
- [2] ISO 7902: Hydrodynamic plain journal bearings under steady-state conditions - Circular cylindrical bearings - Part 1: Calculation procedure, 2013.
- [3] Bobach, L.; Bartel, D.; Deters, L.: Das dynamisch belastete Radialgleitlager unter dem Einfluss elastischer Verformungen der Lagerumgebung, Tribologie und Schmierungstechnik, 54(1), S. 5-13, 2007.
- [4] Hoffmann, V.; Bartel, D.: 3D-CFD-Simulation eines Gleitlagers mit Versorgungsnut unter Berücksichtigung von Mischreibung, VDI-Berichte Nr. 2348, Düsseldorf: VDI Verlag, S. 129-140, 2019.
- [5] Moßmann, T.: Ein Beitrag zur Elastohydrodynamik des instationär belasteten Radialgleitlagers, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1993.
- [6] Schwarze, H.: Beitrag zur Erfassung der Schmierverhältnisse im Pleuellager, Dissertation, Technische Universität Clausthal, 1992.
- [7] Bartel, D.; Bobach, L.; Illner, T.; Deters, L.: Simulating transient wear characteristics of journal bearings subjected to mixed friction. Journal of Engineering Tribology 226 , S. 1095-1108, 2012.
- [8] Bartel, D.: Simulation von Tribosystemen – Grundlagen und Anwendungen, Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2010.
- [9] Patir, N.; H.S. Cheng, H.S.: An average flow model for determine effects of three dimensional roughness on partial hydrodynamic lubrication. ASME J. Lubr. Technol. 100, S. 12-17, 1978.
- [10] Bowden, FP; Tabor, D.: Friction and lubrication of solids, revised edition, Clarendon, Oxford, 2001.