

# Aktuelle Probleme der numerischen Simulation des hydrodynamischen und hydrostatischen Verhaltens von Spaltströmungen<sup>1</sup>

Roland Wegmann, Klaus Brökel

Lehrstuhl Konstruktionstechnik / CAD, Universität Rostock

Albert-Einstein-Str. 2, D-18059 Rostock

Email: kontakt@rolandwegmann.de, klaus.broekel@uni-rostock.de;

Internet: <http://www.kt.uni-rostock.de/ktc>

**Inhalt:** Das überarbeitete Programm SIRIUS zur Simulation hydrodynamischer Gleitlager wird vorgestellt. Die Zuverlässigkeit bei der Berechnung von Verlagerungsbahnen wurde verbessert. Verschiedene Programmversionen wurden zu einem einheitlichen Programmbaukasten zusammengefasst und neu gegliedert in Preprozessor, Solver und Postprozessor. Im Preprozessor wurde eine Unterstützung der Eingabe durch ein System von Steuerparametern, durch eine Plausibilitätsprüfung der Eingabedaten und freie Navigation zwischen den Eingabemasken organisiert. Die grafische Ausgabe wurde verbessert. Die Leistungsfähigkeit des Programms wird an ausgewählten Demonstrationsbeispielen gezeigt.

**Abstract:** The revised program SIRIUS for the simulation of hydrodynamic journal bearings is presented. The stability of the shaft orbit calculation has been improved. Different versions of the program are connected and the program gets a new structure. It is divided into Preprozessor, Solver and Postprozessor. The Preprozessor supports the input of data with a system of control parameters, with plausibility tests and with a free navigation between the input menus. The graphical output has also been improved. Some examples show the performance of the program.

**Stichwörter:** Radialgleitlager, hydrodynamisch, hydrostatisch, Kavitation, Verlagerungsbahnberechnung, Schmiernutanordnung, verkantete Welle im Lager, Formabweichungen.

**Keywords:** journal bearing, hydrodynamic, hydrostatic, cavitation, lubrication, grooves, misaligned shaft, differences in the ideal shape of the bearing.

---

<sup>1</sup> Die Online-Version des Vortrages wurde gegenüber der gedruckten Version [0] um das Bild 0 ergänzt. Außerdem wurden ein Inhaltsverzeichnis, ein Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen, ein Verzeichnis der verwendeten Symbole und zu den Beispielen Tafeln mit den Berechnungsparametern hinzugefügt.

---

1	Motivation .....	2
2	Fähigkeiten des überarbeiteten Programms .....	3
3	Struktur des überarbeiteten Programms .....	4
3.1	Preprozessor .....	5
3.2	Solver .....	6
3.3	Postprozessor .....	6
4	Einige Demonstrationsbeispiele .....	7
4.1	Lager mit zwei Schmierlöchern und umlaufender Last konstanter Größe .....	7
4.2	Lager mit wechselnder Lagerbelastung .....	9
4.3	Lager mit unrunder Welle bei konstanter Belastung .....	10
4.4	Hydrostatisches Lager mit Verkantung .....	12
5	Zusammenfassung und Ausblick .....	14
	Literatur .....	15
	Anhang .....	16
	Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen .....	16
	Liste der Verwendeten Symbole .....	17
	Tafel 1: Liste der Parameter zu Demonstrationsbeispiel Abschnitt 4.1 .....	18
	Tafel 2: Liste der Parameter zu Demonstrationsbeispiel Abschnitt 4.2 .....	19
	Tafel 3: Liste der Parameter zu Demonstrationsbeispiel Abschnitt 4.3 .....	20
	Tafel 4: Liste der Parameter zu Demonstrationsbeispiel Abschnitt 4.4 .....	21

## 1 Motivation

Neben der Beschäftigung mit den eigentlichen wissenschaftlichen Fragen nimmt die Herstellung der dazu erforderlichen "Werkzeuge" einen großen Raum ein. Heute sind das neben den experimentellen Einrichtungen in großem Umfang auch Programme zur Berechnung und Simulation des Forschungsobjekts.

Die Konstruktionstechnik der Universität Rostock befasst sich seit den 1970-er Jahren in unterschiedlicher Intensität mit der Gleitlagerforschung. Parallel dazu wurde das Berechnungsprogramm "SIRIUS" entwickelt und Schritt für Schritt ergänzt. Da das Programm nicht für die kommerzielle Nutzung eines breiten Anwenderkreise entwickelt wurde, wurden je nach Bedarf immer wieder kleine Programmteile angestrickt oder eine

---

andere Variante abgeleitet, so dass es in mehreren Versionen existiert. Dabei wurde es bisher ausschließlich für die Berechnung hydrodynamischer Radialgleitlager benutzt. Aktueller Anlass, wieder auf dieses Programmpaket zurückzugreifen, ist das Projekt HYDROS. Hier sollen hydrostatische Schiffswellenlager für Pod-Antriebe entwickelt werden. Um für dieses Projekt ein effektives Werkzeug zur Verfügung zu haben, wurde im Vorfeld das Programm SIRIUS grundlegend überarbeitet. Ziel der Überarbeitung war es, alle bisher existierenden relevanten Varianten zusammenzuführen und das Programm fit für die neuen Aufgaben zu machen. Dazu musste die Datenstruktur und das Baukastensystem überarbeitet werden. Für die immer größer werdende Menge möglicher Eingabedaten, von denen aber immer nur eine begrenzte Anzahl erforderlich ist, mussten neue Eingabemasken erzeugt werden einschließlich einer umfangreichen Plausibilitätsprüfung. Außerdem gab es bei der Berechnung von Verlagerungsbahnen noch Probleme beim stabilen Ablauf der Iterationen.

## **2 Fähigkeiten des überarbeiteten Programms**

Das Programm "SIRIUS" berechnet den Druckverlauf und weitere daraus resultierenden Größen für das endlich breite stationär und instationär belastete Radialgleitlager.

Aus einer vorgegebenen Lagerbelastung kann die resultierende Wellenverlagerung berechnet werden und umgekehrt. Das ist sowohl für den stationären als auch für den instationären Fall möglich. Im Rahmen der Überarbeitung wurde die Berechnung der Verlagerungsbahn aus einer instationären Lagerbelastung verbessert. Wesentlich verbessert werden konnte dabei die Stabilität der Iteration, wenn die Welle bei einem Lastrichtungswechsel bei unvollständig gefülltem Schmierspalt von einer Lagerseite auf die entgegenliegende Seite „fällt“.

Es kann wahlweise mit der Reynoldsschen Differentialgleichung gerechnet werden, wobei die Gümbelschen Randbedingungen angenommen werden, als auch mit der erweiterten Schmiertheorie nach Wegmann [1], die Kavitation im Gebiet des sich erweiternden Schmierspalts berücksichtigt.

Es können Formabweichungen der Welle und der Lagerschale von der kreisrunden Form berücksichtigt werden. Diese Formabweichungen können über den Umfang und/oder in axialer Richtung auftreten. Das können z.B. elliptische oder "dreieckige" Wellen oder Lagerschalen sein. Ballige oder konische Lagerteile sind möglich. Auch punktweise gegebene Geometrien der Oberflächen können leicht implementiert werden.

Die Lage der Welle in der Lagerschale kann verkantet sein. Außerdem kann die Biegung der Welle infolge eines Wellenbiegemoments berücksichtigt werden. Verkantung und Biegung können über die Zeit variieren.

Es können vollständig oder nur teilweise umschließende Lagerschalen angenommen werden.

Es können beliebige Schmiernutanordnungen im Lager berücksichtigt werden. Das ist besonders für die Modellierung hydrostatischer Gleitlager eine wichtige Voraussetzung.

Am Lagerrand und in den Schmiernuten bzw. Schmiertaschen können beliebige Drücke vorgegeben werden. Im Rahmen der zukünftigen Berechnung hydrostatischer Lager sind weitere Möglichkeiten der gesteuerten und geregelten Ölzuführung in die Schmiernuten bzw. Schmiertaschen in Arbeit. Mit dieser Erweiterung des Programms wird es möglich, nicht nur entweder hydrodynamische oder hydrostatische Lager zu berechnen, sondern in einem Radiallager beide Effekte gleichzeitig zu simulieren.

### 3 Struktur des überarbeiteten Programms

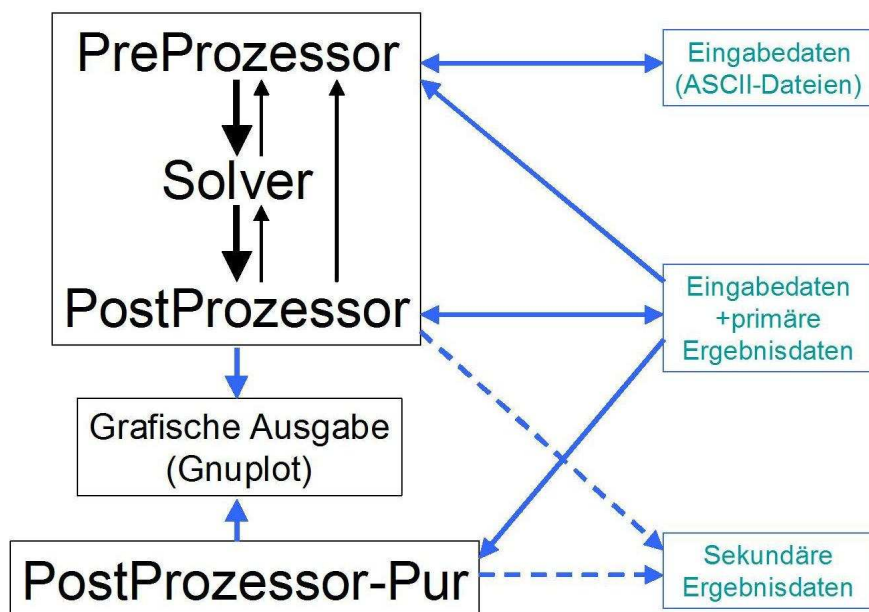


Bild 0: Programmstruktur

Ähnlich den komplexen FEM-Programmen ist das Programm in 3 Teilprogramme gegliedert, den Preprozessor, den Solver und den Postprozessor. Als eigenständiges Programm wurde der "PostProzessor-Pur" mit den gleichen Funktionalitäten wie der Postprozessor geschaffen. Hier kann unabhängig von der Berechnung zu einem späteren Zeitpunkt die Auswertung der Ergebnisse erfolgen.

### 3.1 Preprozessor

Der Preprozessor organisiert die Eingabe aller erforderlichen Daten für die Berechnung, führt eine Plausibilitätsprüfung durch und komplettiert die notwendigen internen Parameter für die folgende Berechnung im Solver. Zur Sicherung der Widerspruchsfreiheit der Eingabedaten kann eine Berechnung erst nach komplettem Durchlauf der Eingabe ausgeführt werden.

Bild 1 zeigt die erste Eingabemaske des Preprozessors. Hier werden die Steuerparameter definiert, die die Art und Weise der Berechnung steuern.

```

=====
PRE-PROZESSOR: Bearbeitung der Eingabedaten
=====

-1- Datensatz auf Standardwerte zuruecksetzen
-2- Datensatz aus Datei einlesen
    <Direkt zur Berechnung gehen z.Z. nicht möglich,
    da kein vollstaendiger Eingabedatensatz vorliegt>
-4- Gehe ohne vorhergehende Berechnung direkt zum PostProzessor
    <w> W e i t e r zur Bearbeitung der Eingabedaten
Eingabe:

-----
Festlegungen zur Theorie, zum Berechnungsverlauf und zum Lagertyp:
-----
-1- Erweiterte Reynoldssche Differentialgleichung    <theo = 2>
-2- Lagerbelastung vorgegeben                      <last = 2>
-3- Vollstaendig umschlossenes Lager                <vollum = 1>
-4- Asymmetrisches Lager                            <sym = 2>
-5- Welle mit Formabweichungen                      <welle = 2>
-6- Lagerschale mit Formabweichungen                <schale = 2>
-7- Verkantetes Lager                              <kante = 2>
-8- Druch Biegemoment gekrueemte Welle              <biege = 2>
-9- Hydrostat. Kapillarsteuerung, konst. Oelstrom   <oelzu = 4>

-10- Evtl. einige Eingabeparameter zeitabhaengig   <dynamic = 2>
-11- Zeitschritte DT konstant                       <schrittVar = 1>
-12- Omega konstant                                <omegaVar = 1>
-14- Belastung variabel, Eingabe So<IT>,XSo<IT>      <lastVar = 3>
-15- Wellenverkantung konstant                      <kantVar = 1>
-16- Wellenbiegung konstant                         <biegVar = 1>

-a- Zurueck zum Anfang der Dateneingabe
-z- Zurueck <zum Anfang der Dateneingabe>
<w> W e i t e r zur Bearbeitung der konstanten Parameter
Waehle Nummer fuer gewuenschte Aenderung:

```

Bild 1: Eingabemaske zur Definition der Steuerparameter des Programms

Der Anwender kann den Ablauf der Berechnung ohne Kenntnis des Belegungsschlüssels der Steuerparameter im Klartext auswählen. Neben der Steuerung der Berechnung steuern diese Parameter im Preprozessor auch die nachfolgende Abfrage der erforderlichen Eingabedaten. Das verkürzt die Eingabe und erhöht die Übersicht. Das ist besonders bei den Parametern von Vorteil, die über die Zeit variieren und deshalb evtl. für jeden Zeitpunkt eingegeben werden müssen. Von den vielen möglichen Parametern

werden nur die abgefragt, die vorher als zeitabhängig festgelegt wurden. Im Rahmen der Erweiterung der Berechnungsmöglichkeiten ist das System der Steuerparameter erweiterungsfähig.

Das Programm kontrolliert den Durchlauf aller erforderlichen Eingabemasken. Es kann jederzeit in bereits durchlaufene Menüs zurückgesprungen werden.

Eingabedatensätze können nach Abschluss der Eingabe für spätere Berechnungen gesichert werden oder zur Ableitung weiterer Berechnungsvarianten abgespeichert und wieder eingelesen werden.

### **3.2 Solver**

Der Solver führt die eigentlichen zeitintensiven Berechnungen aus. Während der Simulation werden im Solver nur die primären Ergebnisdaten berechnet und in Feldern gespeichert. Das sind im wesentlichen die Druckverteilungen  $P(X,Z,T)$  im Schmierspalt über die Zeitpunkte  $IT=1$  bis  $NT$  und bei gegebener Lagerbelastung  $F1(T)$ ,  $F2(T)$  die Wellenverlagerungsbahn  $E1(T)$  und  $E2(T)$  bzw. bei gegebener Verlagerungsbahn die resultierenden Lagerbelastungen über die Zeit. Alle anderen sekundären Ergebnisdaten werden auf Anforderung erst im Postprozessor berechnet.

Da bei anspruchsvollen Simulationen die Berechnung einige Zeit in Anspruch nimmt, können die Berechnungen beginnend bei  $IT=1$  über ausgewählte Teilintervalle ausgeführt werden und zwischendurch die bisherigen Ergebnisse kontrolliert werden. So können bei auftretenden Instabilitäten der Berechnungen Maßnahmen eingeleitet werden und danach die weitere Berechnung an einem ausgewählten Zeitpunkt fortgesetzt werden. Eine Maßnahme kann z.B. sein, in kritischen Bereichen der Verlagerungsbahn die Zeitschrittweite vorübergehend zu verkürzen.

### **3.3 Postprozessor**

Nach Beendigung der Berechnung werden im Postprozessor die primären Ergebnisdaten gemeinsam mit den Eingabedaten in einer Datei gesichert. Auch Teilergebnisse einer vorzeitig abgebrochenen Simulation können hier gesichert werden, um zu einem späteren Zeitpunkt die Eingabedaten und die bisherigen Ergebnisse wieder aufzurufen und die Berechnung fortzusetzen.

Die Ergebnisse werden in Textdateien speichert mit einem Druckbild, so dass die Ergebnisse mit einem üblichen Texteditor manuell gelesen werden können, aber auch als Datenschnittstelle zu anderen Programmen verwendet werden können.

Die Hauptaufgabe des Postprozessors ist die Berechnung und Aufbereitung der sekundären Ergebnisdaten zur Auswertung der Ergebnisse. Zur Auswertung getrennt von der Berechnung wurde auch ein Postprozessor-Pur entwickelt, der als Standalone-Version die gleichen Funktionalitäten besitzt, wie der integrierte Postprozessor.

Zur grafischen Darstellung der Ergebnisse wird die freie Software Gnuplot [5] genutzt. Die Kommunikation zwischen dem Postprozessor und der Grafik-Software erfolgt über mehrere Textdateien als Datenschnittstellen.

Vermittelt über die Software Gnuplot können Videodateien zur Animationen des zeitlichen Ablaufs der Simulationsergebnisse erzeugt werden. Die hier im Artikel leider nicht gezeigt werden können. Die im Vortrag gezeigten Animationen zu den nachfolgenden Demonstrationsbeispielen finden Sie im Internet auf der Homepage des Autors unter [http://www.rolandwegmann.de/aachen\\_kt2008/](http://www.rolandwegmann.de/aachen_kt2008/) .

## **4 Einige Demonstrationsbeispiele**

Anhand einiger Demonstrationsbeispiele soll nun die Leistungsfähigkeit des Programms gezeigt werden. Drei der vier Beispiele wurden mit der erweiterten Reynoldsschen Differentialgleichung berechnet. Dadurch kann auch die Verteilung des Öls im Schmierpalt gezeigt werden. Es ist aber eine Anlaufrechnung erforderlich. Auch wenn der zu berechnende Zustand des Lagers in allen Punkten stationär ist.

### **4.1 Lager mit zwei Schmierlöchern und umlaufender Last konstanter Größe**

Für ein Lager mit der relativen Lagerbreite  $B=0,5$  und zwei seitlichen Schmierlöchern wurden bei konstanter umlaufender Belastung  $S_o=2$  und stillstehender Welle  $\Omega=0$  (Bild 2 linkes Diagramm) die Verlagerungsbahn  $E_1(T)$ ,  $E_2(T)$  bzw.  $E(T)$ ,  $X_{So}(T)$  (Bild 2, rechtes Diagramm) mit Hilfe der erweiterten Reynoldsschen Differentialgleichung berechnet.

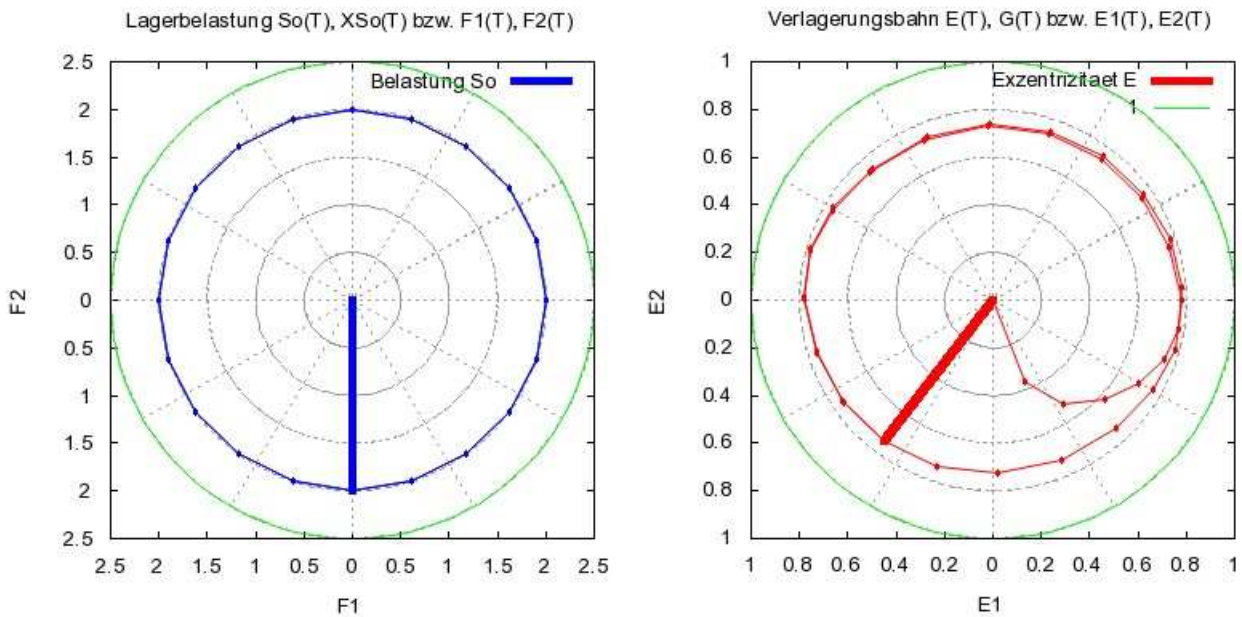


Bild 2: Lagerbelastung (links) und Verlagerungsbahn bei umlaufender Lagerbelastung

In der Darstellung der Verlagerungsbahn sind auch die Werte der notwendigen Anlaufrechnung dargestellt. In diesem Beispiel ist nach weniger als einem halben Umlauf der Belastung der geschlossene Verlagerungszyklus erreicht. Hier wird der Einfluss des Schmierlochs auf den Druckberg gezeigt, wenn dieser über das Schmierloch hinweggeht. (Bild 3 und Bild 4)

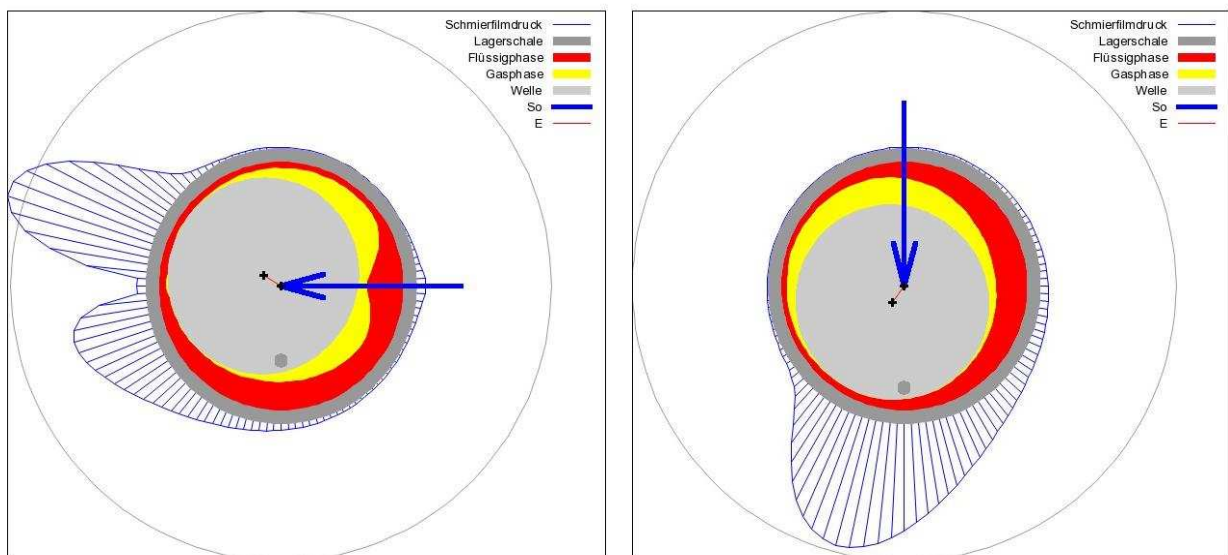


Bild 3: Druckverlauf  $P(X)$  und Ölverteilung  $FH(X)$  in Lagermitte nach 1,75 Lastumläufen (links) bzw. 2 Lastumläufen (rechts)

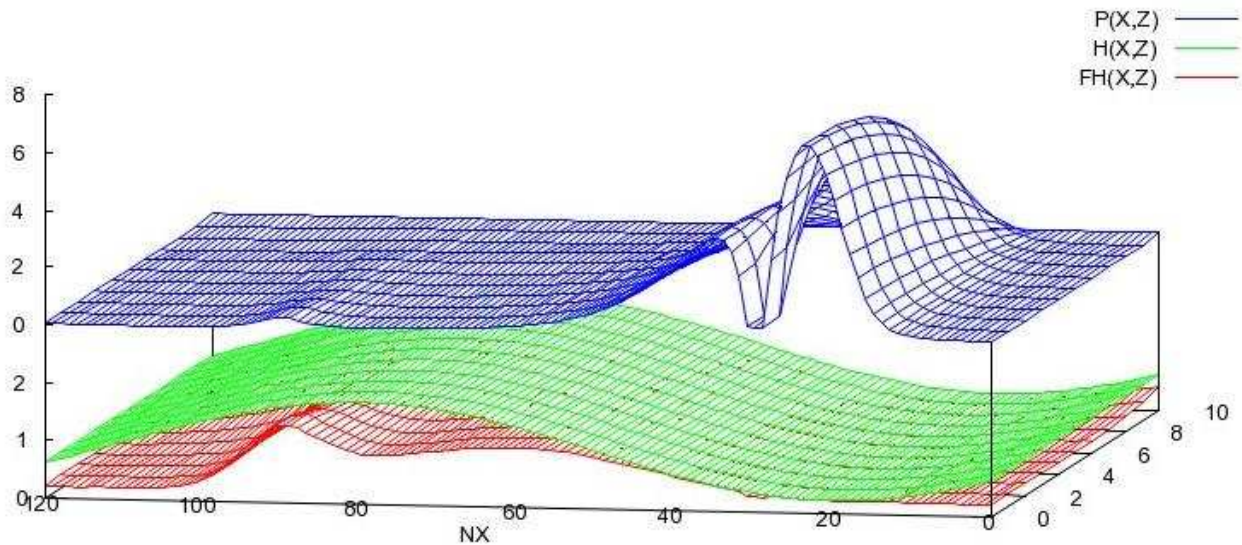


Bild 4: Druckverlauf  $P$ , Spaltgeometrie  $H$  und Ölverteilung  $FH$  im abgewickelten Schmierspalt nach 1,75 Lastumläufen

Da die erweiterte Theorie auch die Verteilung des Öls im Schmierspalt liefert, kann außerdem beobachtet werden, wie im Unterdruckgebiet der Spalt durch das andere Schmierloch und vom Lagerrand her wieder aufgefüllt wird. Durch das Übereinanderlegen der Funktionen des Druckverlaufs  $P(X,Z)$ , der Spalthöhe  $H(X,Z)$  und der lokalen Ölverteilung  $FH(X,Z)$  im Schmierspalt über die abgewickelte Schmierspaltfläche (Bild 4) werden die Verhältnisse im Spalt sehr anschaulich dargestellt. Das Volumen unter der Fläche  $FH(X,Z)$  repräsentiert die flüssige Phase des Schmiermittel-Gas-Gemischs im Schmierspalt, während das Volumen zwischen den Flächen  $H(X,Z)$  und  $FH(X,Z)$  die Gasphase repräsentiert. Im Bild 4 wird nur eine Hälfte des abgewickelten Schmierspalts dargestellt, wobei der dem Betrachter zugewandte Rand des Diagramms die Lagermitte darstellt.

#### 4.2 Lager mit wechselnder Lagerbelastung

Im zweiten Demonstrationsbeispiel wurde eine wechselnde Belastung  $S_o(T)$  angenommen, die pro Wellenumdrehung einmal einen vollständigen Zyklus durchläuft. Um den Belastungsverlauf besser darstellen zu können, wurde die vertikale Hauptlastrichtung  $F_2(T)$  mit einer kleinen horizontalen Komponente  $F_1(T)$  überlagert. (Bild 5, links). Das rechte Diagramm zeigt wieder die Verlagerungsbahn einschließlich Anlaufrechnung. Hier ist der stationäre Verlagerungszyklus nach ca. einer Umdrehung erreicht. Bild 6 zeigt die Verhältnisse im abgewickelten Schmierspalt zu einem ausgewählten Zeitpunkt  $T = 1,15$ .

Das entspricht 1,15 Umdrehungen seit Beginn der Berechnung. Dieser Zeitpunkt entspricht der in Bild 5 hervorgehobenen Belastung  $S_0$  und Verlagerung  $E$ .

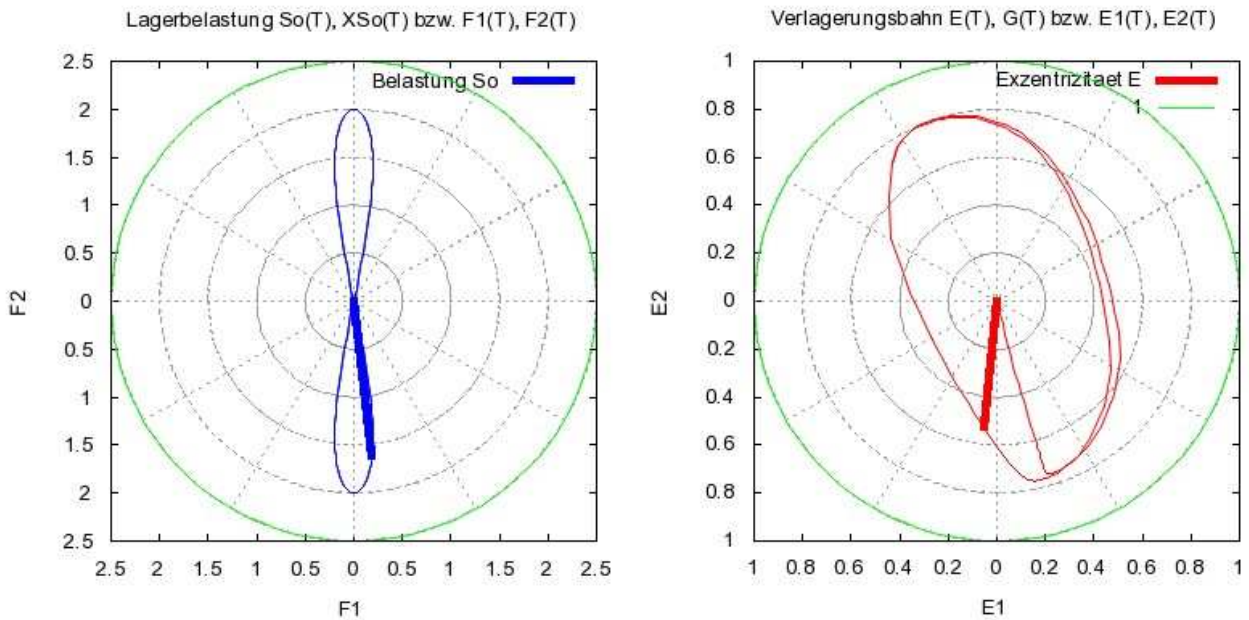


Bild 5: Lagerbelastung  $F_1(T)$ ,  $F_2(T)$  und Verlagerungsbahn  $E_1(T)$ ,  $E_2(T)$

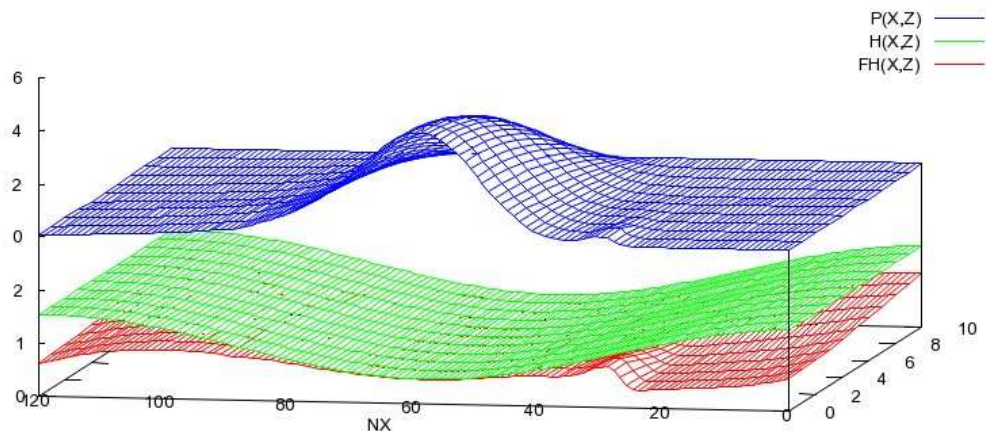


Bild 6: Schmierfilmdruck  $P$ , Spaltgeometrie  $H$  und Ölverteilung  $FH$  im abgewickelten Schmierspalt nach 1,15 Umdrehungen

### 4.3 Lager mit unrunder Welle bei konstanter Belastung

Bild 7 zeigt den Druckverlauf und die Ölverteilung in der Lagermitte zu zwei ausgewählten Zeitpunkten eines Lagers mit der Breite  $B=0,5$  und unrunder Welle.

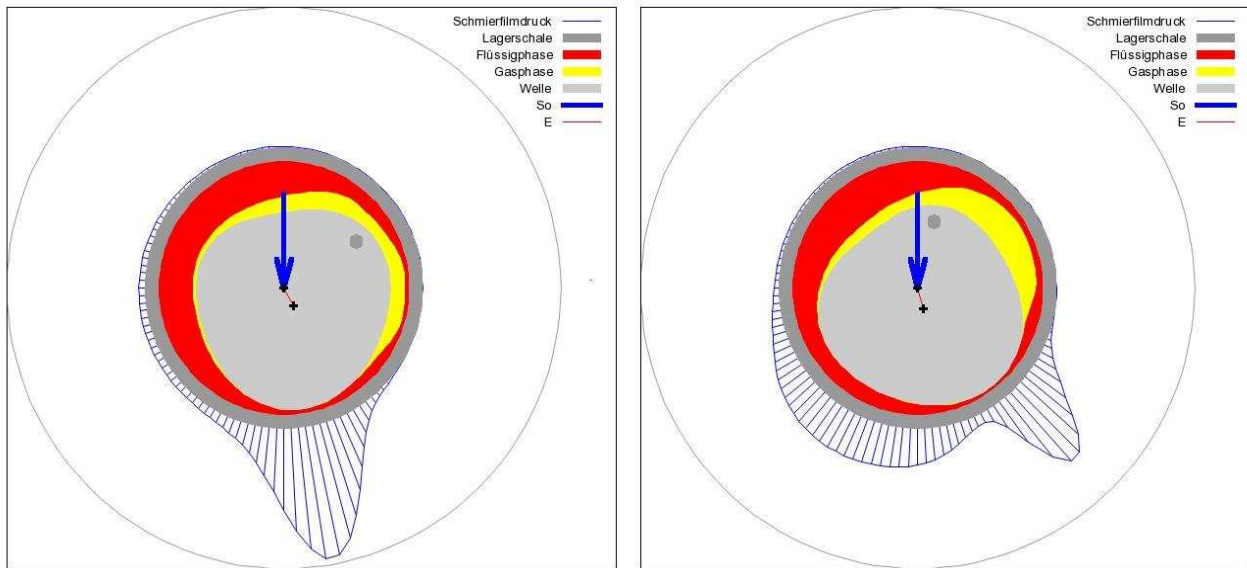


Bild 7: Druckverlauf  $P(X)$  und Ölverteilung  $FH(X)$  in Lagermitte nach 1,34 Umdrehungen (links) bzw. 1,46 Umdrehungen (rechts)

Die Welle ist "dreieckig" mit einer Abweichung von der ideal runden Form von nur 20% der mittleren Spaltdicke. Diese Art der Unrundheit stellt übrigens den Fall dar, wo allein durch Dickenmessung der Welle die Unrundheit nicht feststellbar ist.

Obwohl die Lagerbelastung mit  $So=2$  konstant ist, ist die Druckentwicklung im Schmierpalt instationär und es entwickelt sich eine Verlagerungsbahn gemäß Bild 8, rechts, die pro Umdrehung drei mal durchlaufen wird.

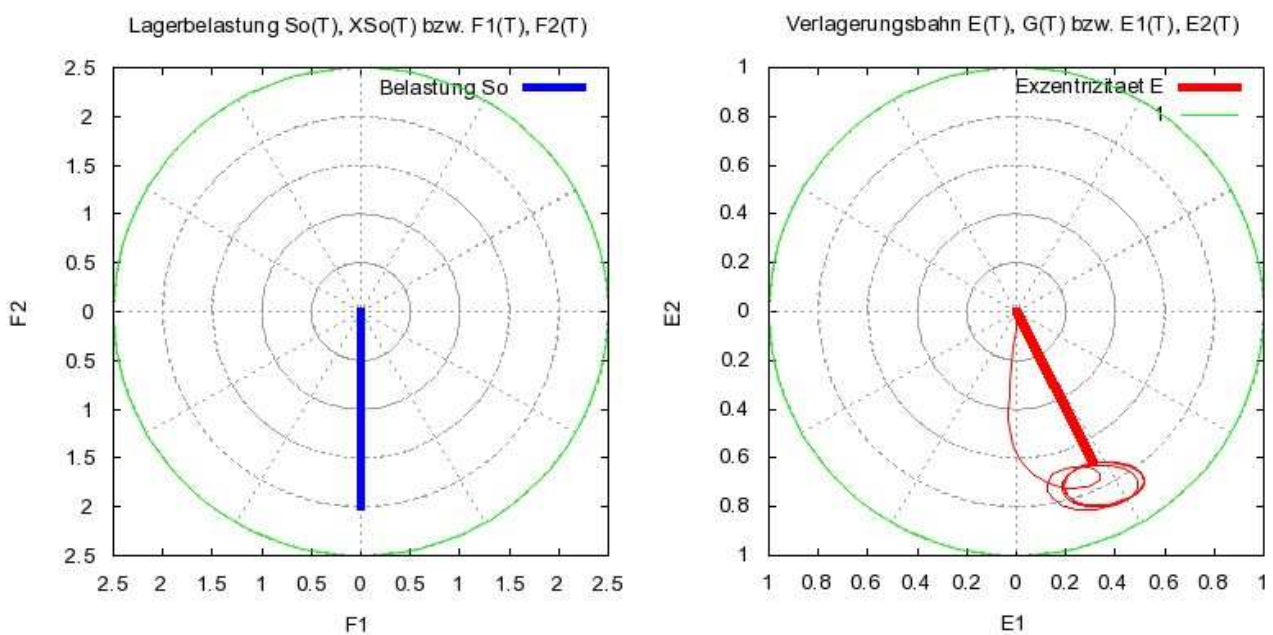


Bild 8: Verlagerungsbahn (rechts) trotz stationärer Belastung (links) beim Lager mit unrunder Welle

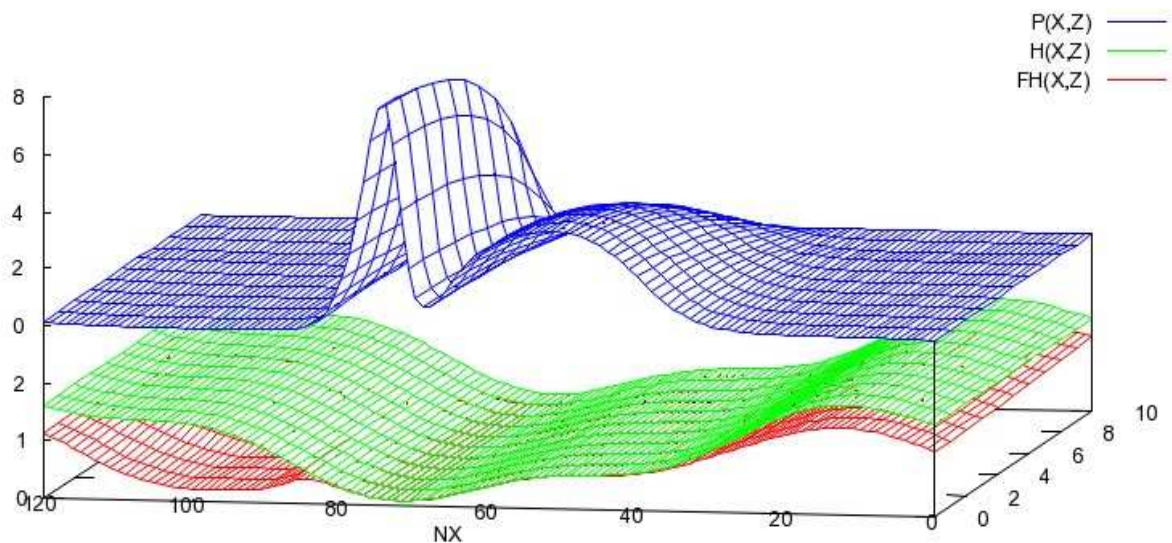


Bild 9: Schmierfilmdruck  $P$ , Spaltgeometrie  $H$  und Ölverteilung  $FH$  im abgewickelten Schmierspalt nach 1,46 Umdrehungen

Bei diesem Beispiel treten Zustände auf, wo die Berechnung des Druckverlaufs zur Instabilität neigt. Das ist dann der Fall, wenn sich der Druckberg plötzlich teilt und sich dazwischen kurzzeitig ein kleines Unterdruckgebiet bildet. Dem kann abgeholfen werden, indem der Gitterabstand  $DX$  und/oder die Zeitschrittweite  $DT$  verringert wird. Prinzipiell kann die Anfälligkeit der Berechnung gegen numerische Instabilitäten bei der Anwendung der erweiterten Schmiertheorie durch Verwendung einer großen Mischungskonstanten  $C$  verringert werden, weil dadurch die berechneten Druckverläufe runder werden.

Bild 9 zeigt die Verhältnisse im abgewickelten Schmierspalt zu einem Zeitpunkt, an dem der Druckberg geteilt ist.

#### 4.4 Hydrostatisches Lager mit Verkantung

Im letztes Beispiel wird ein hydrostatisches Lager ( $B=0,5$ ) mit einer durch Kapillardrosseln geregelten hydrostatischen Ölversorgung simuliert. Außerdem wird angenommen, dass eine mit der Wellendrehung umlaufende Verkantung von 30% des Lagerspiels über die Lagerbreite auftritt. Die Lagerbelastung liegt bei  $So=2$ . Die zehn auf dem Umfang verteilten Schmieraschen sind klein, so dass noch eine relativ große Spaltfläche für einen hydrodynamischen Druckaufbau zur Verfügung steht.

Die Bilder 10 und 11 zeigen den Druckverlauf  $P(X,Z)$  und die Spalthöhe  $H(X,Z)$  zu zwei Zeitpunkten, die um eine halbe Drehung versetzt sind. Da die Spaltgeometrie und damit auch die Druckverteilung im Schmierpalt nicht mehr symmetrisch zur Lagermitte sind, musste hier die Berechnung über die gesamten Schmierpaltbreite erfolgen.

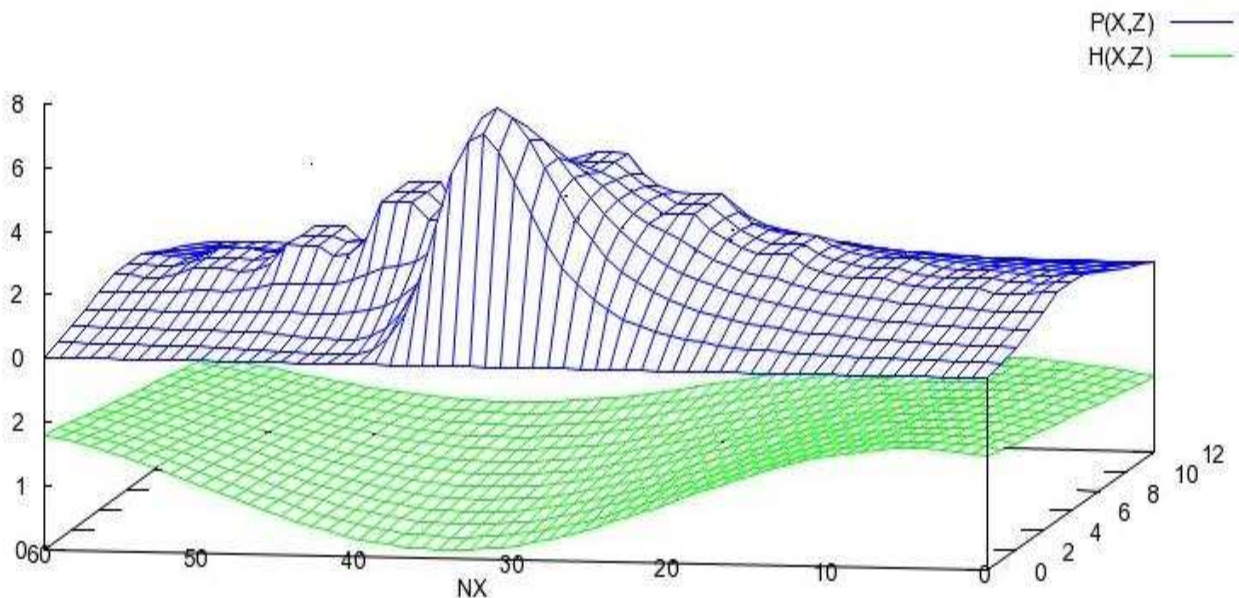


Bild 10: Schmierfilmdruck  $P$  und Spaltgeometrie  $H$  im abgewickelten Schmierpalt bei umlaufender Verkantung der Welle

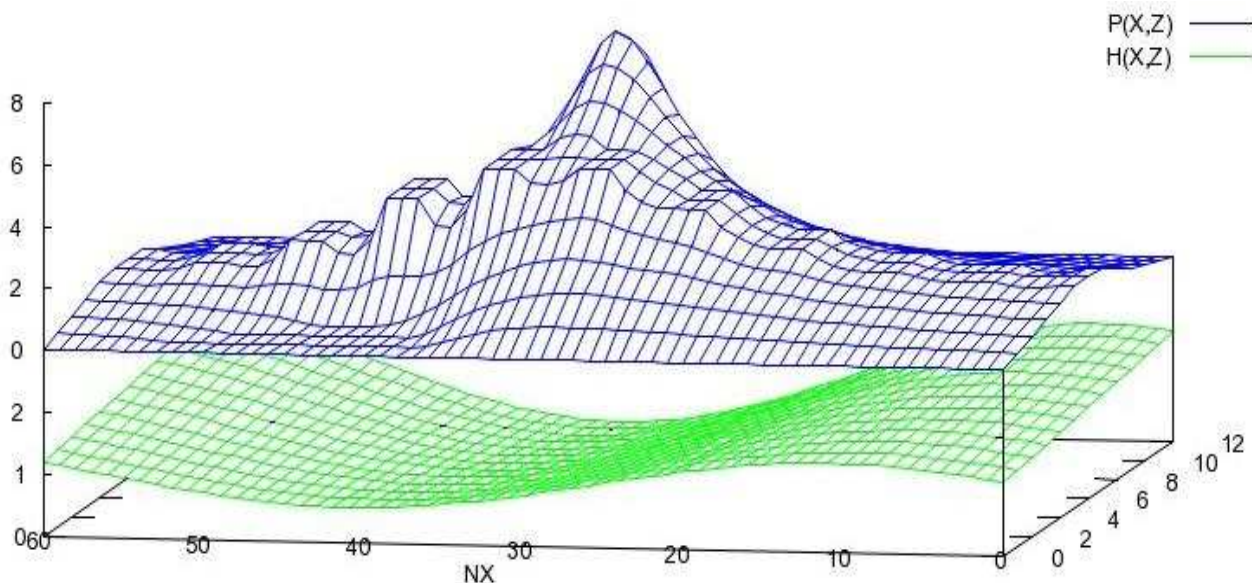


Bild 11: Schmierfilmdruck  $P$  und Spaltgeometrie  $H$  im abgewickelten Schmierpalt bei umlaufender Verkantung der Welle eine halbe Umdrehung später

Andererseits ist es hier ausreichend mit der Reynoldsschen Differentialgleichung zu rechnen, weil durch die reichliche Översorgung des hydrostatischen Lagers kaum

Unterdruckgebiete auftreten. Deshalb kann hier auch keine Ölverteilung im Schmierpalt angezeigt werden, weil bei Anwendung der Reynoldssche Gleichung stets ein vollständig gefüllter Schmierpalt vorausgesetzt wird.

## **5 Zusammenfassung und Ausblick**

Trotz der umfangreichen Überarbeitung des Programms SRIUS ist dieses Werkzeug zur Simulation der Strömung im Schmierpalt nach wie vor ein Programm zur ausschließlichen wissenschaftlichen Nutzung, dessen Anwender sich intensiv in der Theorie der hydrodynamischen Schmierung auskennen müssen und bleibt deshalb weiter hin einem kleinen Expertenkreis zur Nutzung vorbehalten. Andererseits ist es in mehrfacher Hinsicht wie ein für die breite Nutzung strukturiertes Programm gestaltet. Das betrifft insbesondere die umfangreiche Unterstützung und Absicherung der Eingabe und den modulare Aufbau als erweiterbares Baukastensystem.

Während der Überarbeitung hat sich der Autor gelegentlich gefragt, ob dieser Aufwand für ein wissenschaftliches Spezialprogramm überhaupt gerechtfertigt ist. Die bisherige Arbeit mit dem neuen Programm rechtfertigte diesen Aufwand. Durch die Anwenderfreundlichkeit dieses inzwischen komplexen Programms ist ein schnelles, fehlerfreies und reproduzierbares Arbeiten möglich, so dass im Rahmen der eigentlichen wissenschaftlichen Arbeit schnell und systematisch viele Varianten durchgerechnet werden können. Das ermöglicht einen schnelleren Überblick über die Variantenvielfalt der Prozesse im Schmierpalt und unterstützt die Suche nach optimalen Lösungen.

Damit ist ein vielseitiges Simulationswerkzeug zur Berechnung der Prozesse im Schmierpalt entstanden. Im Rahmen der Anwendung des Programms im Projekt HYDROS ist ein weiterer Ausbau der Simulation hydrostatischer Lager zu erwarten.

Die praxisbezogene Anwendung des Programms könnte durch die Verbindung mit FEM-Berechnungen der Lagerbauteile erweitert werden, so dass der Einfluss der Verformung des Lagers auf die Spaltgeometrie auch berücksichtigt wird. Die Voraussetzungen im Programm sind dafür bereits gegeben, da beliebige Spaltgeometrien im Lager berücksichtigt werden können. Um auch für instationäre Lagerbelastungen die zeitlich veränderliche Verformung des Lagers mit vertretbarem Aufwand berücksichtigen zu können, müsste hier mit einer vorgelagerten FEM-Berechnung die Elastizitätsmatrix aller Oberflächenpunkte des Schmierpalts berechnet werden, die dann in die Berechnung der

---

aktuellen Spalthöhe über eine zusätzliche externe Iteration oder direkt im Gleichungssystem berücksichtigt werden könnte.

## Literatur

- [0] Wegmann, Roland; Brökel, Klaus: *Aktuelle Probleme der numerischen Simulation des hydrodynamischen und hydrostatischen Verhaltens von Spaltströmungen*. in Brökel, Feldhusen, Grote, Rieg, Stelzer (Hrsg): *6. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2008 / Nachhaltige und effiziente Produktentwicklung*. Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionsmethodik, Shaker Verlag, Aachen, 2008. S.291-303 ISBN: 978-3-8322-7544-0.
- [1] Wegmann, Roland: *Erweiterung der hydrodynamischen Schmiertheorie durch Einbeziehung des Unterdruckgebietes in die Berechnung instationär belasteter Gleitlager*. Dissertation Universität Rostock 1978. [http://www.rolandwegmann.de/dissertation\\_rw/](http://www.rolandwegmann.de/dissertation_rw/)
- [2] Brökel, Klaus: *Das schwellend belastete Radialgleitlager unter Berücksichtigung der Verformung und eines Schmierstoff-Gas-Gemischs bei beliebiger Spaltgeometrie*. Dissertation Universität Rostock 1980.
- [3] Barenthin, Torsten: *Ermittlung der hydrodynamischen Verhältnisse im Stevenrohrlager unter Berücksichtigung einer gekrümmten Welle und beliebiger Nutgeometrie*. Dissertation Universität Rostock 2005.
- [4] Radev, Nedyalko: *Individuelle Anpassung von CAD-Systemen und Modellierung eines Pre-Prozessors für spezielle Berechnungs-Software*. Dissertation Universität Rostock 2006.
- [5] Gnuplot Version 4.2.3 <http://www.gnuplot.info>, 2008.

## Anhang

### Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Bild 0: Programmstruktur

Bild 1: Eingabemaske zur Definition der Steuerparameter des Programms

Bild 2: Lagerbelastung (links) und Verlagerungsbahn bei umlaufender Lagerbelastung

Bild 3: Druckverlauf  $P(X)$  und Ölverteilung  $FH(X)$  in Lagermitte nach 1,75 Lastumläufen (links) bzw. 2 Lastumläufen (rechts)

Bild 4: Druckverlauf  $P$ , Spaltgeometrie  $H$  und Ölverteilung  $FH$  im abgewickelten Schmierpalt nach 1,75 Lastumläufen

Bild 5: Lagerbelastung  $F_1(T)$ ,  $F_2(T)$  und Verlagerungsbahn  $E_1(T)$ ,  $E_2(T)$

Bild 6: Schmierfilmdruck  $P$ , Spaltgeometrie  $H$  und Ölverteilung  $FH$  im abgewickelten Schmierpalt nach 1,15 Umdrehungen

Bild 7: Druckverlauf  $P(X)$  und Ölverteilung  $FH(X)$  in Lagermitte nach 1,34 Umdrehungen (links) bzw. 1,46 Umdrehungen (rechts)

Bild 8: Verlagerungsbahn (rechts) trotz stationärer Belastung (links) beim Lager mit unrunder Welle

Bild 9: Schmierfilmdruck  $P$ , Spaltgeometrie  $H$  und Ölverteilung  $FH$  im abgewickelten Schmierpalt nach 1,46 Umdrehungen

Bild 10: Schmierfilmdruck  $P$  und Spaltgeometrie  $H$  im abgewickelten Schmierpalt bei umlaufender

Tafel1: Liste der Parameter zu Demonstrationsbeispiel Abschnitt 4.1

Tafel2: Liste der Parameter zu Demonstrationsbeispiel Abschnitt 4.2

Tafel3: Liste der Parameter zu Demonstrationsbeispiel Abschnitt 4.3

Tafel4: Liste der Parameter zu Demonstrationsbeispiel Abschnitt 4.4

## Liste der Verwendeten Symbole

Alle Parameter sind dimensionslos. Definition der dimensionslosen Parameter siehe [1]

B	Relative Lagerbreite
C	Mischungskonstante
E	Exzentrizität der Welle
E1, E2	Komponenten der Exzentrizität E im lagerschalenfesten Koordinatensystem 1-2
F1, F2	Komponenten der Lagerbelastung im lagerschalenfesten Koordinatensystem 1-2
F	örtlicher Füllungsgrad, Verhältnis des Volumens der flüssigen Phase im Schmierpaltelement zum Volumen des Schmierpaltelements
H	Schmierpalthöhe
IT	Nummer des aktuellen Zeitpunkts der Berechnung
NT	Anzahl der berechneten Zeitpunkte
NX, NZ	Anzahlen der Stützstellen im Netz der Berechnungspunkte in x- bzw. z-Richtung
P	Schmierfilmdruck
So	Sommerfeldzahl, dimensionslose Lagerbelastung
T	Zeit
X, Z	Koordinaten des lagerschalenfesten Koordinatensystems x-z
XSo	Stelle (Richtung) der resultierenden Lagerbelastung
DT	Zeitschrittweite
$\Omega$	relative Winkelgeschwindigkeit zwischen Welle und Lagerschale

**Tafel 1: Liste der Parameter zu Demonstrationsbeispiel Abschnitt 4.1**

Alle Parameter sind dimensionslos. (Definition der dimensionslosen Parameter siehe [1])

$B = 0,5$	relative Lagerbreite
$C = 0,1$	Mischungskonstante
$F1 = 2 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot T)$	horizontale Komponenten der Lagerbelastung im lagerschalenfesten Koordinatensystem 1-2 über die Zeit T
$F2 = 2 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot T + \pi/2)$	vertikale Komponenten der Lagerbelastung im lagerschalenfesten Koordinatensystem 1-2 über die Zeit T
$NT = 41$	Anzahl der berechneten Zeitpunkte
$NX = 120$	Anzahlen der Stützstellen im Netz der Berechnungspunkte in x-Richtung (vollumschließende Lagerschale)
$NZ = 11$	Anzahlen der Stützstellen im Netz der Berechnungspunkte in z-Richtung
$So = 2$	Sommerfeldzahl, dimensionslose Lagerbelastung
$XSo = 2 \cdot \pi \cdot T$	Stelle (Richtung) der resultierenden Lagerbelastung $So$ über die Zeit T
$DT = 0,05$	Zeitschrittweite
$\Omega = 0$	relative Winkelgeschwindigkeit zwischen Welle und Lagerschale
$Pr1 = 0,2$	(absoluter) Druck am Lagerrand
$Pr2 = 0,4$	(absoluter) Druck in den Schmierlöchern

Zur Berechnung wurde die erweiterte Reynoldssche Differentialgleichung verwendet [1].

Aus einer vorgegebenen Lagerbelastung  $F1(T)$ ,  $F2(T)$  wird die Verlagerungsbahn  $E1(T)$ ,  $E2(T)$  berechnet.

Welle und Lagerschale werden als ideal zylindrisch angenommen.

Welle und Lagerschale sind achsparallel.

## Tafel 2: Liste der Parameter zu Demonstrationsbeispiel Abschnitt 4.2

Alle Parameter sind dimensionslos. (Definition der dimensionslosen Parameter siehe [1])

$B = 0,5$	relative Lagerbreite
$C = 0,1$	Mischungskonstante
$F1 = 0,2 \cdot \sin(4 \cdot \pi \cdot T)$	horizontale Komponenten der Lagerbelastung im lagerschalenfesten Koordinatensystem 1-2 über die Zeit T
$F2 = 2 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot T)$	vertikale Komponenten der Lagerbelastung im lagerschalenfesten Koordinatensystem 1-2 über die Zeit T
$NT = 201$	Anzahl der berechneten Zeitpunkte
$NX = 120$	Anzahlen der Stützstellen im Netz der Berechnungspunkte in x-Richtung (vollumschließende Lagerschale)
$NZ = 11$	Anzahlen der Stützstellen im Netz der Berechnungspunkte in z-Richtung
$So = \text{Sqrt}(F1^2 + F2^2)$	Sommerfeldzahl, dimensionslose Lagerbelastung
$DT = 0,01$	Zeitschrittweite
$\Omega = 2 \cdot \pi$	relative Winkelgeschwindigkeit zwischen Welle und Lagerschale
$Pr1 = 0,2$	(absoluter) Druck am Lagerrand
$Pr2 = 0,4$	(absoluter) Druck in den Schmierlöchern

Zur Berechnung wurde die erweiterte Reynoldssche Differentialgleichung verwendet [1].

Aus einer vorgegebenen Lagerbelastung  $F1(T)$ ,  $F2(T)$  wird die Verlagerungsbahn  $E1(T)$ ,  $E2(T)$  berechnet.

Welle und Lagerschale werden als ideal zylindrisch angenommen.

Welle und Lagerschale sind achsparallel.

**Tafel 3: Liste der Parameter zu Demonstrationsbeispiel Abschnitt 4.3**

Alle Parameter sind dimensionslos. (Definition der dimensionslosen Parameter siehe [1])

B = 0,5	relative Lagerbreite
C = 0,05	Mischungskonstante
F1 = 0	horizontale Komponenten der Lagerbelastung im lagerschalenfesten Koordinatensystem 1-2
F2 = 2	vertikale Komponenten der Lagerbelastung im lagerschalenfesten Koordinatensystem 1-2
NT = 201	Anzahl der berechneten Zeitpunkte
NX = 120	Anzahlen der Stützstellen im Netz der Berechnungspunkte in x-Richtung (vollumschließende Lagerschale)
NZ = 11	Anzahlen der Stützstellen im Netz der Berechnungspunkte in z-Richtung
So = 2	Sommerfeldzahl, dimensionslose Lagerbelastung
XSo = 0	Stelle (Richtung) der resultierenden Lagerbelastung So
DT = 0,01	Zeitschrittweite (teilweise Schrittweite auf 0,005 reduziert)
$\Omega = 2 \cdot \pi$	relative Winkelgeschwindigkeit zwischen Welle und Lagerschale
Pr1 = 0,2	(absoluter) Druck am Lagerrand

$\Delta H = -0,2 \cdot \cos(3 \cdot (X - \Omega \cdot T))$  Abweichung der Welle von der ideal zylindrischen Form

Zur Berechnung wurde die erweiterte Reynoldssche Differentialgleichung verwendet [1].

Für eine vorgegebene konstante Lagerbelastung So wird die Verlagerungsbahn E1(T), E2(T) berechnet.

Die Lagerschale wird als ideal zylindrisch angenommen. Die Welle weicht von der idealzylindrischen Form um  $\Delta H$  ab

Welle und Lagerschale sind achsparallel.

#### Tafel 4: Liste der Parameter zu Demonstrationsbeispiel Abschnitt 4.4

Alle Parameter sind dimensionslos. (Definition der dimensionslosen Parameter siehe [1])

B	= 1	relative Lagerbreite
F1	= 0	horizontale Komponenten der Lagerbelastung im lagerschalenfesten Koordinatensystem 1-2
F2	= 2	vertikale Komponenten der Lagerbelastung im lagerschalenfesten Koordinatensystem 1-2
NT	= 101	Anzahl der berechneten Zeitpunkte
NX	= 60	Anzahlen der Stützstellen im Netz der Berechnungspunkte in x-Richtung (vollumschließende Lagerschale)
NZ	= 13	Anzahlen der Stützstellen im Netz der Berechnungspunkte in z-Richtung
So	= 2	Sommerfeldzahl, dimensionslose Lagerbelastung
XSo	= 0	Stelle (Richtung) der resultierenden Lagerbelastung So
DT	= 0,02	Zeitschrittweite (teilweise Schrittweite auf 0,005 reduziert)
$\Omega$	= $2 \cdot \pi$	relative Winkelgeschwindigkeit zwischen Welle und Lagerschale
Pr1	= 0,2	(absoluter) Druck am Lagerrand
XKant	= 0,3	Verkantung der Welle in der Lagerschale

Zur Berechnung wurde die Reynoldssche Differentialgleichung mit Gumbelschen Randbedingungen verwendet [1].

Für eine vorgegebene konstante Lagerbelastung  $S_o$  wird die Verlagerungsbahn  $E_1(T)$ ,  $E_2(T)$  berechnet.

Welle und Lagerschale werden als ideal zylindrisch angenommen.

Die Welle ist zur Lagerschale verkantet. Die Verkantung läuft mit der Winkelgeschwindigkeit  $\Omega$  der Welle um.