



# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Problemstellung

Zur Lagerung von rotierenden Bauteilen werden hydrodynamisch geschmierte Radialgleitlager in vielen unterschiedlichen Technologiebereichen wie beispielsweise im Maschinenbau sowie im Automobilbau, der Energietechnik und in der Luft- und Raumfahrttechnik eingesetzt. Aufgrund ihrer einfachen Bauweise, ihrer Zuverlässigkeit und ihrer günstigen Laufeigenschaften stellen sie die häufigste Bauform dar. Bei der Entwicklung von Verbrennungsmotoren wird das Prinzip „Downsizing“ vorangetrieben. Dabei wird das Ziel verfolgt, bei gleichbleibender Leistung den Hubraum und die Systemmasse der Verbrennungsmotoren zu reduzieren und eine Steigerung des Wirkungsgrades sowie eine Verringerung der Schadstoffemission zu erreichen. Wegen der höheren spezifischen Leistung des Motors steigt insbesondere die Belastung der Lagerstellen des Kurbeltriebs und der Nockenwelle. Unter diesen Bedingungen ist die Kenntnis über die Gleitlagerströmung und deren Verteilung im Lager zur Aufrechterhaltung der Laufeigenschaften besonders wichtig. Bedingt durch diese wachsenden Lasten kann es zu Bauteilschäden kommen. Neben den Schadensursachen wie Korrosion, Reibverschleiß oder mechanische Überbelastung kann das Radialgleitlager massiv durch Kavitation geschädigt werden. Die Kavitation ist maßgeblich von den belastungsabhängigen Strömungsverhältnissen und den Eigenschaften der Schmierflüssigkeit bestimmt. Somit kommt der numerischen Analyse der Strömungsverhältnisse in Radialgleitlagern und insbesondere in deren Ölversorgungen, wie der Ölnut und der Zuführbohrung, eine enorme Bedeutung zu. Da derzeit die Strömungsberechnungen nur mittels 2D-Methoden erfolgen, ist die Kavitationsentstehung in den 3D-Bereichen der Radialgleitlager nicht vollständig verstanden. Hier liefert die vorgelegte Arbeit einen wertvollen Beitrag, sowohl im Bereich der Grundlagenforschung zum Verständnis der Kavitationsentstehung, als auch in der Anwendung der neuen Ansätze auf reale Lagerbeispiele.

### 1.2 Stand des Wissens

Die erste grundlegende Theorie zur Berechnung des hydrodynamischen Druckaufbaus in Radialgleitlagern wurde von O.Reynolds [74] bereits Ende des 19. Jahrhunderts aufgestellt. Die entwickelte Differentialgleichung ist als Reynoldssche Differentialgleichung bekannt. Von entscheidender Bedeutung für die Genauigkeit des Druckverlaufs über den Lagerumfang ist die Wahl der Randbedingung im Bereich des minimalen Schmierpalts am Druckbergende. Eine

Darstellung der Randbedingungen ist in Abbildung 1.1 aufgezeigt. In der Arbeit von Reynolds wird bereits eine stetig differenzierbare Funktion für den Druckverlauf verlangt, die jedoch analytisch nur sehr schwer umsetzbar ist. Es folgten analytische Lösungen für den speziellen Fall, dem unendlich langen Lager, von A.Sommerfeld [83] mit periodischen Randbedingungen. Mit der von Sommerfeld verwendeten Randbedingung werden große negative Drücke nach dem minimalen Schmierpalt berechnet, die von der Schmierflüssigkeit in diesem Maße nicht ertragen werden können. Eine Lösung für dieses Problem wurde von L.Gümbel [42] 1925 aufgestellt, in dem alle negativen Drücke auf Null gesetzt werden und somit das Drucktal abgeschnitten wird. Diese Art der Lösung erzwingt jedoch eine Unstetigkeit im Druckverlauf und verletzt damit die Kontinuitätsbedingung am Druckbergende. Der Spezialfall eines unendlich kurzen Lagers wurde von F.W.Ocvirk [68] analytisch untersucht.

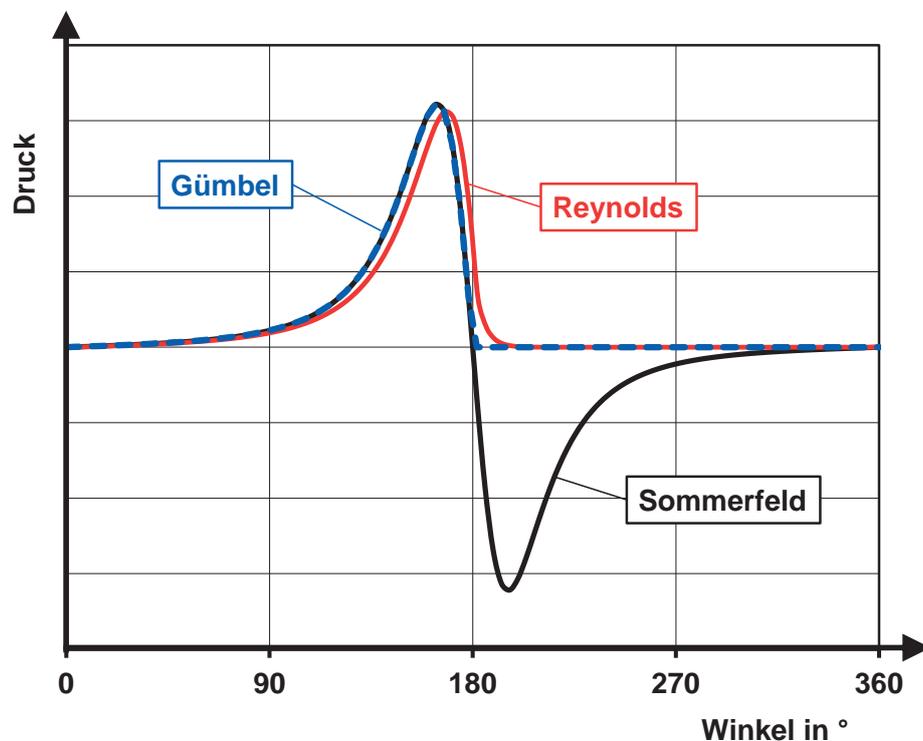


Abbildung 1.1: Theoretische Druckverteilung unterschiedlicher Randbedingungen nach [40]

Die numerische Lösung der Reynoldsschen Differenzialgleichung wurde mit den Methoden der Finiten Differenzen (FDM) einschlägig von H.Sassenfeld und A.Walther [77] umgesetzt. Eine Ölzuführung wurde von H.Dillenkofer [19] berücksichtigt. Weiterentwicklungen der numerischen Methoden von Sassenfeld und Walther und die Erhöhung der Genauigkeit wurden von H.Holland [47] und H.J.Butenschön [11] durchgeführt, wobei die Arbeit von Butenschön als Grundlage für die DIN 31652 [20] dient.

Die erstmalige Umsetzung der Reynoldsschen Differentialgleichung mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) wurde in [2] von J.H.Argyris und D.W.Scharpf aufgezeigt. Eine ingenieurtechnische Abhandlung zu den numerischen Methoden wurde von J.F.Booker und K.H.Hübner [7] veröffentlicht.

Die bislang verwendeten Methoden basieren auf einer flüssigen Phase für den Schmierfilm. Das Aufreißen des Schmierfilms aufgrund negativer Drücke wird dabei nicht betrachtet. Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Kavitation in Gleitlagern wurden durch B.Jakobsson, L.Floberg [49] und K.O.Olsson [71] durchgeführt, um phänomenologisch die Kavitationsgebiete zu beschreiben. Diese Theorie ist heute unter dem Jakobsson-Floberg-Olsson Algorithmus (JFO) bekannt. Numerisch umgesetzt wurde der JFO-Algorithmus mit Hilfe der Finiten-Differenzen-Methode von H.G.Elrod [27]. Ein masseerhaltender Kavitationsalgorithmus wurde von A.Kumar und J.F.Booker in [53], [54] entwickelt, der für die numerische Lösung auf Basis der FEM verwendet werden kann. Darauf aufbauend wurden die Simulationen stetig weiterentwickelt. Bobach untersucht in [6] den Einfluss von Mischreibungseffekten aufgrund der Oberflächenrauigkeiten in Gleitlagern. In [73] und [55] erfolgt eine Charakterisierung von Flusstensen zur Simulation von Mischreibung. Über die Flusstensen werden die durch die Rauigkeit hervorgerufenen Veränderungen des Ölflusses beschrieben.

Die Strömungsverhältnisse in Schmiertaschen wurden von M.J.Braun et al.[9] untersucht. Dabei wird zur Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen die Methode der finiten Volumen eingesetzt. Jedoch werden nur zweidimensionale Gleichungen verwendet, wobei sich die Dimensionen in Umfangs- und Radialrichtung aufteilen. Es wird gezeigt, dass sich Wirbelstrukturen in radialer Richtung in der Schmiertasche ausbilden, die von der Reynoldszahl und der Schmiertastentiefe abhängen. In der Veröffentlichung wird von einer einphasigen Flüssigkeit ausgegangen und ein Phasenwechsel bezüglich Kavitation nicht betrachtet.

Erste Ansätze zur Beschreibung der dreidimensionalen Strömung in Radialgleitlagern von Verbrennungsmotoren mit Kavitation wurde in [57] von R.Mehnert und C.Grüning veröffentlicht. Hauptaugenmerk wird dabei auf die Verbindungsbohrung zwischen Hauptlager und Pleuellager gelegt, um die Schmierstoffversorgung des Pleuellagers zu untersuchen. Dabei wurde eine Kopplung zwischen der 2D-Reynoldsdifferentialgleichung und der Methode der 3D-CFD (Computational Fluid Dynamics) über zwei separate Programme realisiert. Der Schmierpalt wird dabei über die herkömmlichen 2D-Methoden berechnet, da die Berechnungszeiten für eine dreidimensionale Auflösung des Schmierpaltbereiches aufgrund der kleinen radialen Dimensionen zu hoch sind. Lediglich die Verbindungsbohrung wurde über 3D-Methoden abgebildet. Weitere dreidimensionale Berechnungen haben Cupillard et al. [16] und Uhkötter et al. [89] vorgestellt. In der Arbeit von Cupillard et al. [16] wird die Strömung im divergenten Spaltbereich eines Radialgleitlagers untersucht. Unter der Berücksichtigung von Kavitationseffekten werden die numerischen Ergebnisse im Vergleich zum Experiment von Jakobsson/Floberg [49] dargestellt. Dabei liegt das Hauptaugenmerk der Untersuchung darauf, den Einfluss der Exzentrizität und der Drehzahl auf die Form des zungenförmigen Dampfgebietes hinter dem Minimalpalt aufzuzeigen. Weitere dreidimensionale Simulationen der Schmiertaschenströmung wurden von Uhkötter et al. [89] in schnelllaufenden Turbinenlagern durchgeführt. Beide Forschungsarbeiten betrachten dabei weder eine Ölzuführung, noch eine Abführung und damit auch nicht deren Auswirkung auf die Strömungsverhältnisse.

### 1.3 Zielsetzung der Arbeit

Wird die Computerentwicklung der letzten vierzig Jahre betrachtet (vgl. Abbildung 1.2), so steigt die Rechengeschwindigkeit der CPUs (Central Processing Unit) nach dem Mooreschen Gesetz [59] nahezu konstant über den Zeitraum an. Zeitintensive und aufwendige, dreidimensionale, numerische Simulationen sind derzeit effektiv nur auf Hochleistungsrechnern möglich. Für den industriellen Einsatz in den technischen Produktentwicklungsphasen sind diese Methoden aus Sicht der Kosten-/Nutzungsrechnung nicht praktikabel. Effektive zweidimensionale Berechnungsverfahren auf Basis der Reynoldsgleichung finden dagegen hauptsächlich Verwendung bei der Vorentwicklung von Gleitlagern. Wird der Leistungstrend der Rechengeschwindigkeit bis zum Jahr 2025 weitergeführt, können die Leistungen der heutigen Hochleistungsrechner auch in Workstations und normalen Personalcomputern verfügbar sein. Dieser Trend des Mooreschen Gesetzes wird jedoch nach Collwell [15], bedingt durch die betriebswirtschaftlichen und physikalischen Grenzen der CPU-Entwicklung, ab dem Jahr 2020 nachlassen und seine Gültigkeit verlieren.

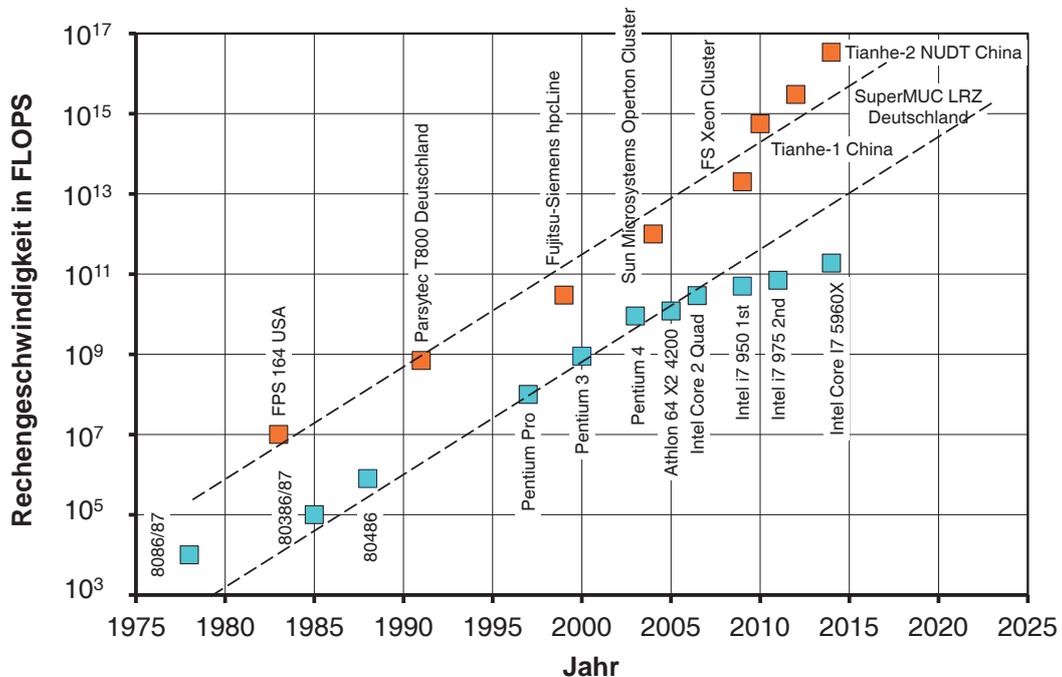


Abbildung 1.2: CPU Entwicklung

Ziel der Arbeit ist die Beschreibung der Dreidimensionalität der Strömung in Verbindung mit der Dampfbildung in Radialgleitlagern unter Verwendung der numerischen Simulation. Darüber hinaus werden Methoden entwickelt, die effektive 2D-Methoden mit den 3D-CFD-Methoden koppeln. Die Validierung der 3D-Simulation soll anhand von experimentellen Messdaten aus einem Gleitlager-Strömungsprüfstand erfolgen. Zum Abschluss werden die neuen Methoden auf eine Radialgleitlager angewendet, um die Aussagefähigkeit der 3D-Simulation an realen Lagergeometrien zu erproben. Es sollen dreidimensionale Simulationen für die Forschung und die Entwicklung und in der industriellen Anwendung nicht nur durch den Mehrertrag an Information, sondern auch durch kürzere Berechnungszeiten attraktiver werden.

## Kapitel 2

# Strömung in Radialgleitlagern

### 2.1 Grundlagen

Die Strömung in einem Radialgleitlager kann in zwei Strömungsformen eingeteilt werden, die im motorischen Radialgleitlager meist überlagert auftreten. Die erste Strömungsform stellt sich durch die Rotation der Welle gegenüber der festen Lagerschale ein. Diese Scherströmung, auch als Couette-Strömung bekannte Strömungsform, ist durch die Spaltweite, die Umfangsgeschwindigkeit der Welle und die Viskosität der Schmierflüssigkeit charakterisiert. Die zweite Strömungsform ist eine Druckströmung, die von dem Druckgradienten im Schmier-spalt bestimmt wird. Der Druckgradient wird zum Einen von der exzentrischen Verlagerung der Welle geprägt und beeinflusst damit die hydrodynamische Wirkungsweise des Gleitlagers. Zum Anderen wird die Strömung durch die Versorgung des Schmier-spalts mit Frischöl getrieben, wodurch eine druckgetriebene Querströmung im Lager entsteht. Typisch für instationär belastete Gleitlager ist eine wechselnde Belastung, die zu einer Wellenverlagerungsbahn und damit zu einer zeitlich veränderlichen Spaltweite führt. Dieser Effekt hat ein Ansaugen oder Verdrängen des Schmieröls im Gleitlager zur Folge und wirkt sich maßgeblich auf den Druckgradienten aus. Zur Charakterisierung der einzelnen Strömungen sind in Abbildung 2.1 die dafür notwendigen geometrischen Kenngrößen im Lager skizziert.

Das Radialgleitlager kann vereinfacht als System aus zwei kreisförmigen Zylindern betrachtet werden. Dabei wird der rotierende Innenzylinder als Welle und der feststehende Außenzylinder als Lagerschale angesehen. Die Zylinder haben eine axiale Breite  $B$ , die als Lagerbreite bezeichnet wird. Die Welle ist gegenüber der Lagerschale exzentrisch um das Maß  $e$  verlagert. Die Versorgung des Lagers mit Frischöl erfolgt über eine Zuführbohrung mit dem Durchmesser  $d_{zu}$  in der Lagermitte, welche in eine Schmiernut mit der radialen Tiefe  $t_{Nut}$  mündet. Die Nut erstreckt sich in den meisten Lagerausführungen über einen Winkel von  $180^\circ$  und weist eine axiale Breite mit dem Durchmesser der Zuführbohrung auf. Die Abführung des Ölstromes erfolgt einerseits über die axialen Lagerenden und andererseits über eine Abführbohrung in der rotierenden Welle. Dabei wird die momentane Position der Abführbohrung über den Winkel  $\phi_{ab}$  beschrieben. Für weitere Betrachtungen werden nachfolgend Lagerkenngrößen definiert.

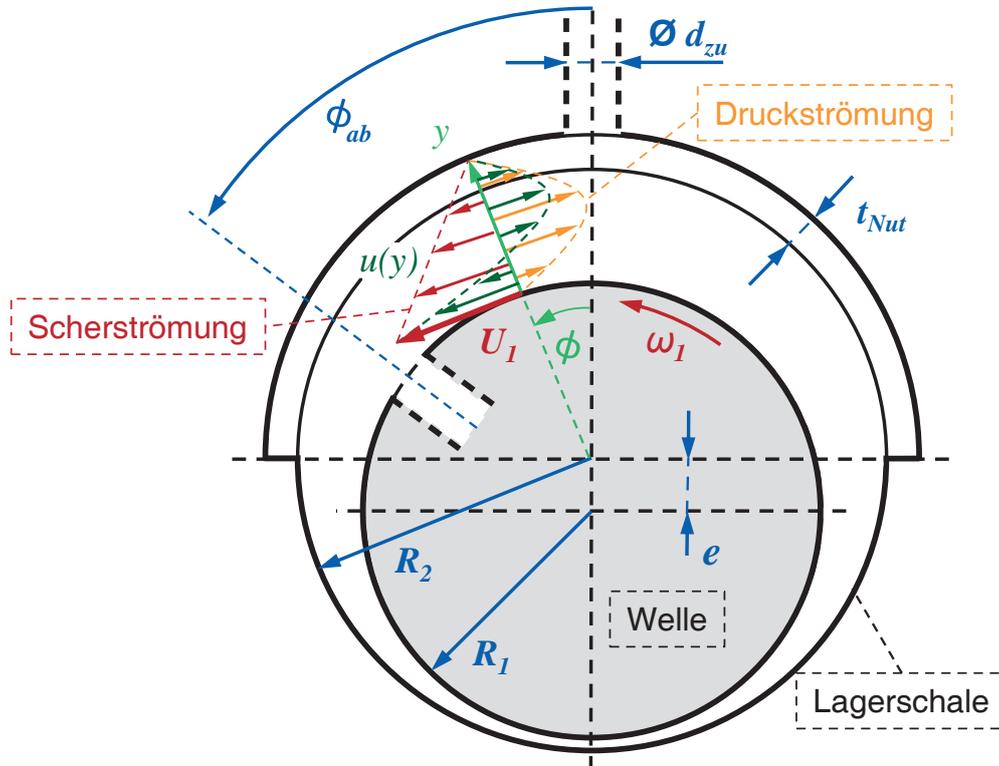


Abbildung 2.1: Geometrische Kenngrößen

Mit den Radien der Welle  $R_1$  und der Lagerschale  $R_2$  wird die Spaltweite  $H_0$  wie folgt definiert:

$$H_0 = R_2 - R_1 \quad (2.1)$$

Das relative Lagerspiel  $\Psi$  und die relative Exzentrizität  $\varepsilon$  ergeben sich folgendermaßen:

$$\Psi = \frac{H_0}{R_1} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon = \frac{e}{H_0} \quad (2.3)$$

Der Schmierölbedarf eines Radialgleitlagers kann durch die Einführung eines Verhältnisses  $\gamma$  zwischen Zufuhrvolumenstrom  $Q_{zu}$  und innerem Volumenstrom  $Q_0$  beschrieben werden [86].

$$\gamma = \frac{Q_{zu}}{Q_0} \quad (2.4)$$

Darin ist der innere Volumenstrom abhängig von der Umfangsgeschwindigkeit der Welle  $U_1$ , der Spaltweite und der Lagerbreite  $B$ .

$$Q_0 = \frac{1}{2} U_1 H_0 B \quad (2.5)$$

Die Umfangsgeschwindigkeit ergibt sich aus dem Radius  $R_1$  und der Winkelgeschwindigkeit der Welle  $\omega_1$  zu:

$$U_1 = \omega_1 R_1 \quad (2.6)$$

Theoretische Betrachtungen zum Schmierstoffbedarf in Gleitlagern wurden von Butenschön [11], Peeken [72] und Noack [63] analytisch und numerisch untersucht. In Abbildung 2.2 ist das Volumenstromverhältnis  $\gamma$  über der normierten Lagerbreite  $B/D_1$  dargestellt. Dabei variiert der Zuführvolumenstrom in einem Bereich von 1 bis 2 mal des inneren Volumenstroms. Typische Breiten-/Durchmesser-Verhältnisse in Radialgleitlagern für die motorische Anwendung liegen zwischen 0.25 und 0.5. Untersuchungsergebnisse von realitätsnahen Experimenten zum Schmierstoffbedarf von Gleitlagern von Knoll et al. [51] liegen leicht über den analytischen Werten.

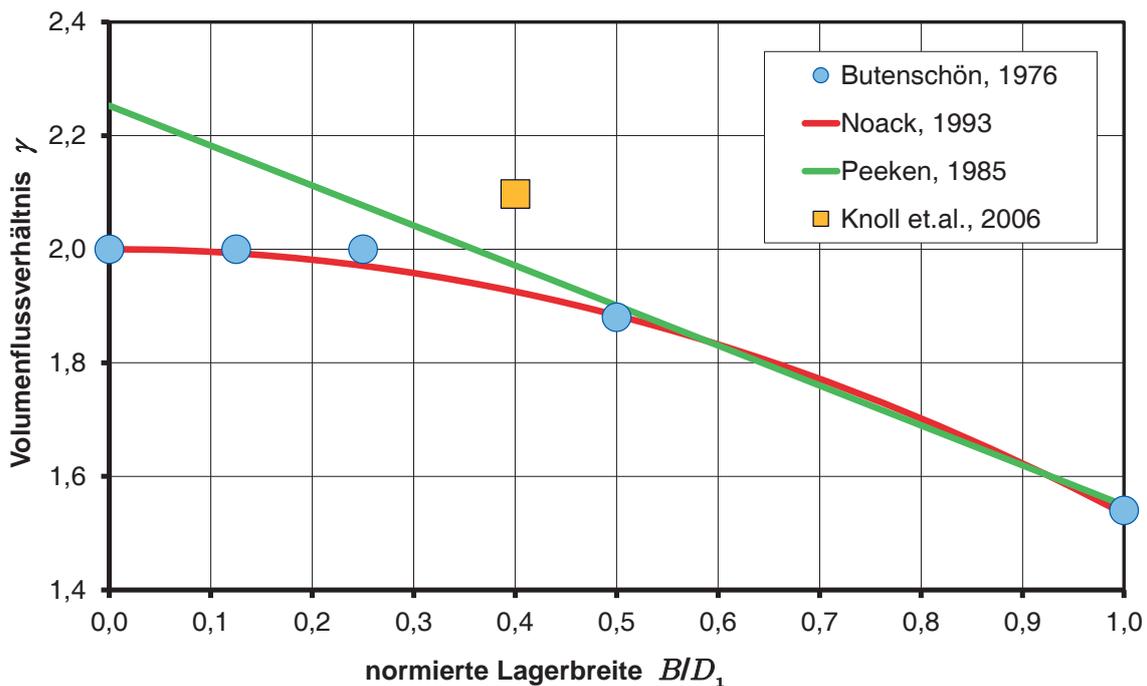


Abbildung 2.2: Schmierstoffbedarf von Gleitlagern nach [86]