

1 Einleitung

Die von Airbus (2014) prognostizierte jährliche Zunahme des Luftverkehrs um durchschnittlich 4,7 % in den kommenden Jahren bei gleichzeitig zunehmendem Bewusstsein für die negativen Auswirkungen der Emissionen für Mensch und Umwelt stellen die Hersteller von Flugtriebwerken vor große Herausforderungen. Um insbesondere das ambitionierte Ziel, den CO₂-Ausstoß pro Passagierkilometer bis zum Jahr 2050 um 75 % gegenüber dem Stand vom Jahr 2000 (ACARE, 2011) zu reduzieren, ist eine weitere Steigerung des Gesamtwirkungsgrads der Flugtriebwerke notwendig. Dies kann durch eine Erhöhung des thermischen Wirkungsgrads und durch eine Erhöhung des Vortriebswirkungsgrads erreicht werden.

Eine Erhöhung des thermischen Wirkungsgrads erfordert höhere Verdichtungsverhältnisse und höhere Turbineneintrittstemperaturen. In der Folge steigen die Temperaturen und Drücke im Inneren eines Triebwerks und damit die Anforderungen an die sekundären Komponenten wie das Sekundärluftsystem und das für die Kühlung und Schmierung der Lager relevante Ölsystem. Eine Erhöhung des Vortriebswirkungsgrads resultiert im Wesentlichen aus einer Vergrößerung des Fandurchmessers. Da dieser durch die Blattspitzengeschwindigkeit begrenzt wird, setzen neue Triebwerkskonzepte zunehmend auf den Einsatz eines Leistungsgetriebes (Rolls-Royce, 2014), das die Drehzahl für den Fan reduziert und gleichzeitig eine hohe Drehzahl und damit einen hohen Wirkungsgrad der antreibenden Niederdruckturbine ermöglicht. Obwohl die Getriebe sehr hohe Wirkungsgrade aufweisen, entstehen aufgrund der hohen übertragenen Wellenleistung große Wärmemengen, die ebenso über das Ölsystem abgeführt werden müssen. Die steigenden Anforderungen an das Ölsystem eines Flugtriebwerks erfordern daher die optimale Auslegung aller darin enthaltenen Komponenten.

Im Allgemeinen verfügt jedes Triebwerk über ein eigenes Ölsystem, das für die Kühlung und Schmierung sämtlicher Lager und Getriebe verantwortlich ist. Das Schmieröl wird über verschiedene Leitungen den Lagern und Zahnrädern zugeführt. Nach der Abfuhr des Öls aus dem Inneren des Triebwerks sorgen Ölkühler und Wärmeübertrager für eine Rückkühlung des Schmieröls. Um Größe und Gewicht dieser und weiterer Komponenten des Ölsystems möglichst gering zu halten, muss der Ölstrom innerhalb des Triebwerks so niedrig wie möglich gehalten werden, ohne dass es durch erhöhte Temperaturen zu einer vorzeitigen Alterung des Öls kommt. Die Lagerkammern als Schnittstelle zwischen Öl- und Sekundärluftsystem stellen dabei ein kritisches Element im Ölsystem dar.

Als Lagerkammern werden die ringförmigen Hohlräume um die Lager bezeichnet, die von der rotierenden Welle im Zentrum und nicht rotierenden Wänden gebildet werden. In Abbildung 1.1 ist die Lage der Lagerkammern im Triebwerk und ihr grundsätzlicher Aufbau schematisch dargestellt. Lagerkammern fangen das Schmieröl auf, nachdem es durch die Lager geströmt ist. Durch die zur Abdichtung gegen Ölaustritt erforderliche Sperrluft bildet sich in den Kammern eine Zweikomponenten-Zweiphasenströmung mit freien Oberflächen zwischen Öl und Luft aus. Die Ölströmung wird beim Durchströmen der Lagerkammer dabei im Wesentlichen von zwei Kräften beeinflusst: von der Schwerkraft, die das Öl als Volumenkraft immer nach unten treibt, und von der rotierenden Luftströmung, die, angetrieben durch die rotierende Welle, über Schubspannungen

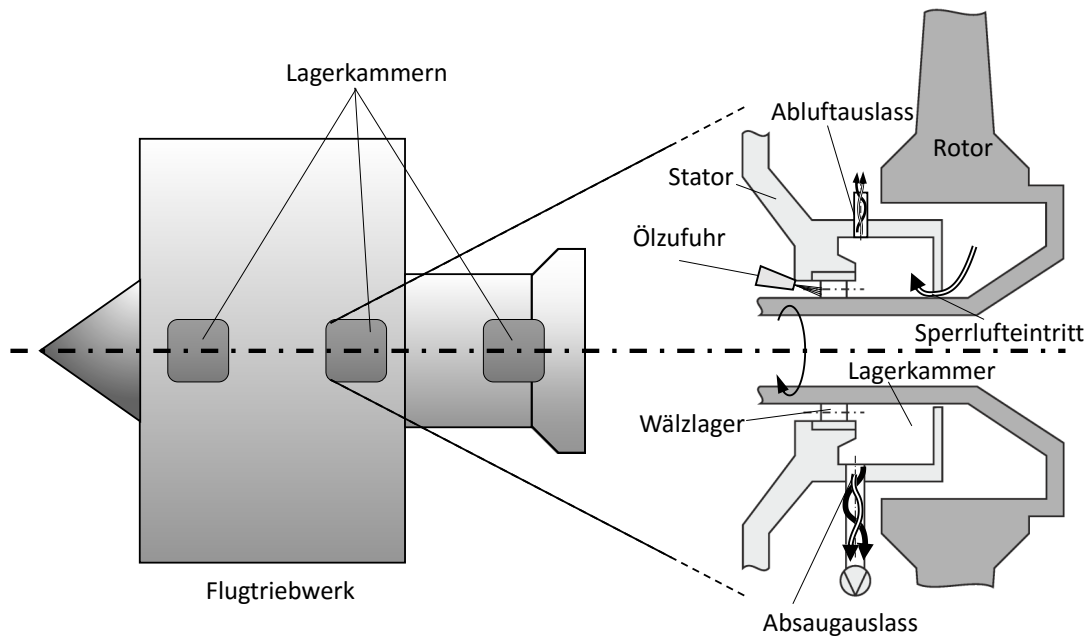


Abbildung 1.1: Lage der Lagerkammern im Triebwerk und grundlegender Aufbau

an der freien Oberfläche bzw. der Phasengrenzfläche zwischen Öl und Luft auf die Ölströmung einwirkt.

Die daraus entstehende Gas-Flüssigkeits-Zweiphasenströmung ist äußerst komplex. Im Gegensatz zu anderen technisch relevanten Zweiphasenströmungen wie z.B. Wasser-Wasserdampf-Strömungen in Verdampferrohren oder Flüssigkeitssprays in Brennkammern treten in Lagerkammern die verschiedenen Phänomene simultan auf. Es finden sich sowohl im Öl gelöste Luftbläschen als auch eine tropfenbeladene Luftströmung, sowohl sehr dünne als auch wellige, dicke Filme bis hin zu nahezu stagnierenden Ölsammlungen. Die Gründe dafür liegen in der Ringgestalt einer Lagerkammer und in den Ein- und Auslässen der Luft und des Öls. Zusammen mit der Wellenrotation ergibt sich dadurch keine eindeutige Durchströmungsrichtung.

Viele Aspekte der Zweiphasenströmung in Lagerkammern und des damit einhergehenden Wärmeübergangs sind noch nicht verstanden, was zu hohen Unsicherheiten bei der Auslegung und als Konsequenz zu einer Überdimensionierung des Ölsystems und oft kostspieligen Anpassungen zu einem sehr späten Zeitpunkt im Entwicklungsprozess führt. Dies liegt einerseits an der eben beschriebenen Komplexität der Strömung, die experimentelle Untersuchungen erschwert und die sehr hohe Anforderungen an numerische Modellierungen und die dafür erforderliche Rechenkapazität stellt. Andererseits werden Lagerkammern - im Gegensatz zu den Hauptkomponenten eines Flugtriebwerks - erst seit ungefähr 20 Jahren systematisch untersucht.

Obwohl zahlreiche Versuchsreihen von verschiedenen Autoren durchgeführt wurden, lässt sich nach wie vor nicht zufriedenstellend vorhersagen, wie sich der Ölfilm in einer Lagerkammer verteilt und was für ein Wärmeübergang zur Kammerwand sich aus der Ölfilmströmung ergibt.

Hier setzt die vorliegende Arbeit an mit dem Ziel, für den Wandwärmeübergang in Lagerkammern einen allgemeingültigen Berechnungsansatz zu erarbeiten. Im Gegensatz zu früheren

Ansätzen soll dabei nicht versucht werden, sich an Nußeltzahlkorrelationen für Rohrströmungen zu orientieren, sondern es sollen gezielt die spezifischen Effekte der Zweiphasenströmung in einer Lagerkammer berücksichtigt werden. Um den neuen Ansatz auf Basis konsistenter Daten entwickeln zu können, wurden zahlreiche Versuchsreihen am Lagerkammerprüfstand des Instituts für Thermische Strömungsmaschinen durchgeführt, der dafür entsprechend angepasst wurde.

Die Arbeit gliedert sich wie folgt: In Kapitel 2 wird zunächst der aktuelle Stand der Wissenschaft diskutiert und die Notwendigkeit für neue Untersuchungen anhand einer Analyse der existierenden Korrelation nachgewiesen. Des Weiteren wird ein Überblick über die aktuellen numerischen Ansätze gegeben, die in nicht allzu ferner Zukunft eine zuverlässige Simulation der Lagerkammerströmung ermöglichen werden. In Kapitel 3 werden die genaue Zielsetzung und die Vorgehensweise zu deren Erreichung vorgestellt. Wie bereits erwähnt, wurden die experimentellen Untersuchungen an einem Lagerkammerprüfstand durchgeführt, der in Kapitel 4 detailliert beschrieben wird. Für die messtechnische Erfassung der relevanten Größen wie Filmdicken, Filmtemperaturen und Wandwärmeströme wurden existierende Messmethoden weiterentwickelt und für die Anwendung im Prüfstand eigens Sensoren gebaut, die erläutert und hinsichtlich der zu erwartenden Messgenauigkeiten diskutiert werden. In Kapitel 5 werden die Messergebnisse vorgestellt und interpretiert. Mit Hilfe von Filmdickenmessungen konnte das Zweiphasenströmungsregime in verschiedenen Kammergeometrien identifiziert und einer dimensionslosen Größe zugeordnet werden. Darauf aufbauend werden die gemessenen lokalen Wandwärmeübergänge mit dem Strömungsregime in Beziehung gesetzt. Wie sich zeigen wird, reicht diese Betrachtung nicht aus, da die Ölfilme lokal sehr unterschiedliche Temperaturen aufweisen können. Um diese Gegebenheiten zu erfassen, werden neue Kennzahlen identifiziert und die erarbeiteten Hypothesen anhand der Messdaten überprüft. Die neu gewonnenen Erkenntnisse werden schließlich in Kapitel 6 zusammengefasst und ein Ausblick wird gegeben.

2 Wissenschaftlicher Kenntnisstand

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den Stand der Technik von Lagerkammern in Flugtriebwerken und den aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstand bezüglich ihrer Erforschung. Zum besseren Verständnis der Randbedingungen und Anforderungen an eine Lagerkammer werden in Kapitel 2.1 zunächst Lagerkammern im Gesamtsystem Flugtriebwerk beschrieben und eingeordnet. Anschließend wird der aktuelle Kenntnisstand der Forschung zu Flugtriebwerkslagerkammern vorgestellt. Dieser beruht hauptsächlich auf den Ergebnissen experimenteller Untersuchungen. Zunehmend rücken numerische Methoden zur Simulation und Vorhersage der Strömungen in Lagerkammern in den Fokus, die deshalb im dritten Unterkapitel 2.3 diskutiert werden.

2.1 Lagerkammern im Gesamtsystem Flugtriebwerk

Zum Verständnis der Funktion und der Anforderungen an eine Lagerkammer ist es notwendig, sie im Gesamtsystem Flugtriebwerk bzw. dessen Ölsystem zu betrachten. Daraus werden anschließend die Herausforderungen abgeleitet, die sich für die Auslegung einer Lagerkammer ergeben.

2.1.1 Ölsystem eines Flugtriebwerks

Lagerkammern sind Teil des Ölsystems eines Flugtriebwerks, dessen Grundfunktionen zunächst vorgestellt werden. In Flugtriebwerken wird Schmieröl für verschiedene Aufgaben verwendet. Es dient der Schmierung der Wälzlager und Getriebe und stellt gleichzeitig einen Korrosionsschutz dar. Darüber hinaus versorgt es die Quetschöldämpfer mit Öl, dient als Spülmedium für die Abfuhr von Feinabrieb und Kontaminationen und unterstützt ggf. die Dichtwirkung von Karbondichtungen (Linke-Diesinger, 2008). Die Hauptaufgabe des Öls besteht laut Hart (2008) darin, die Wälzlager und Getriebe zu kühlen, indem das Öl Wärme aufnimmt und abführt. Für die Schmierung allein wäre eine deutlich geringere Menge ausreichend.

Das Schmierölsystem eines Flugtriebwerks ist normalerweise als Trockensumpf-Druckumlaufschmierung ausgelegt (Engmann, 2007). Hierbei fließt das Öl in einem geschlossenen Kreislauf vom Tank über Druckpumpen zu den zu schmierenden Stellen wie Lager oder Getriebe. Dort wird es in Sumpfen, die bei Lagern als Lagerkammern bezeichnet werden, aufgefangen. Rückölpumpen pumpen das Öl aus den Lagerkammern sofort wieder ab und führen es über Rückölleitungen in den Tank zurück. Daher ist der Sumpf bei Triebwerksstillstand „trocken“.

Das Schmieröl wird in der Lagerkammer über Öldüsen entweder direkt auf die Wälzkörper gespritzt oder unter den Innenring des Lagers gebracht. Im zweiten Fall wird es von dort über Bohrungen entweder direkt durch den Innenring an die Wälzkörper (Unterflurschmierung) oder über Bohrungen seitlich der Wälzkörper an einen geeignet geformten Lagerkäfig und schließlich an die Wälzkörper (Unterkäfigschmierung) geführt. Im Lager dient das eingebrachte Öl der

Schmierung und der Kühlung der Lagerkomponenten. Die im Lager durch Reibung entstehende Wärme wird durch das Öl kontinuierlich abgeführt. Das Öl tritt aus dem Lager aus und wird in den Lagerkammern aufgefangen. Die Lagerkammern sind Ringkammern, die die Lager umschließen. Sie sind in ihrer Grundform rotationssymmetrisch ausgeführt und werden am inneren Radius durch die sich drehende Rotorwelle begrenzt.

Da sich Lagerkammern im Inneren eines Flugtriebwerks befinden, muss ein Ölaustritt aus den Kammern in andere Bereiche des Triebwerks verhindert werden. Zur Abdichtung der Lagerkammern strömt normalerweise Sperrluft aus dem Sekundärluftsystem über Dichtspalte, die als Labyrinthdichtungen, Bürstendichtungen oder Karbondichtungen ausgeführt sein können, in die Lagerkammern. In den Lagerkammern liegt daher stets ein Zweiphasen-Zweikomponenten-Gemisch aus Öl und Luft vor.

Zur Rückführung des Öls aus einer Lagerkammern zurück in den Tank dient eine Rückölpumpe. Die Rückölpumpe ist über eine Rohrleitung mit der Auslassöffnung der Lagerkammer verbunden, die sich meist am unteren Totpunkt der Kammer befindet. Das Fördervolumen der Rückölpumpen ist größer als die Ölzuführstrom dimensioniert, um die Rückführung des Öls in allen Fluglagen und bei allen Betriebsbedingungen zu gewährleisten und eine übermäßige Ölsammlung in den Lagerkammern zu vermeiden. Ein Teil des Sperrluftstroms verlässt die Lagerkammer daher über die Rückölleitung.

Nicht berührende Labyrinthdichtungen benötigen für eine zuverlässige Abdichtung größere Sperrluftströme, für die ein zusätzlicher Auslass, die Abluftöffnung, in der Lagerkammer bereitgestellt werden muss. Durch die Abluftöffnung kann je nach Betriebsbedingungen ein nicht unerheblicher Anteil des der Lagerkammer zugeführten Öls abgeführt werden. Die Abtrennung des Öls aus der Abluft geschieht im sogenannten Breather. Die Abluft wird in die Umgebung ausgeblasen. Dabei geht immer etwas Öl verloren, sodass der Ölverbrauch eines Triebwerks zwischen 0,1 und 0,5 l/h (Bräunling, 2009) bzw. 0,1 und 0,8 l/h (Engmann, 2007) liegt.

Berührende Karbondichtungen dagegen erlauben es, auf den zusätzlichen Abluftauslass zu verzichten. In diesem Fall einer Lagerkammer ohne Abluftauslass verlassen sowohl der gesamte Sperrluftstrom als auch der gesamte Ölzuführstrom die Lagerkammer durch den Auslassöffnung.

Das Schmieröl erfährt beim Durchströmen einer Lagerkammer eine Temperaturänderung durch Wärmeerzeugung durch Reibung und Wärmeübertragung. Wärmeerzeugung durch Reibung führt immer zu einer Temperaturzunahme und tritt in Lagerkammern hauptsächlich im Lager sowie in den Quetschöldämpfern, ggf. in Karbondichtungen, in den Ölpumpen und laut Streifinger (1998) durch Verwirbelungen, das sogenannte „churning“, auf.

Wärmeübertragung beim Kontakt des Öls mit Wänden oder mit Sperrluft kann je nach Temperaturniveau entweder zu einer Wärmezufuhr oder zu einer Wärmeabfuhr führen. Durch den Wärmeübergang an heißen Wänden einer Lagerkammer ist in den meisten Fällen mit einer Wärmezufuhr und damit einer Temperaturerhöhung des Schmieröls zu rechnen, da sich abgesehen von der Frontlagerkammer unmittelbar neben dem Fan alle Lagerkammern in „heißen“ Bereichen des Triebwerks befinden. Die Temperatur der dem Verdichter an verschiedenen Stufen entnommenen Sperrluft liegt meist über der mittleren Öltemperatur, da durch die Verdichtung der Luft im Verdichter deren Temperatur erheblich ansteigt. Somit erfährt das Öl durch den Kontakt zur