

# Schlussbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 19385 BG

## Thema

Betriebssichere aerodynamische Folienlager für die Lagerung schnell laufender Rotoren

## Berichtszeitraum

01.03.2017-31.08.2019

## Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. - FVV Lyoner Straße 18, 60528 Frankfurt/Main

## Forschungsstelle(n)

Forschungsstelle 1: Technische Universität Braunschweig

Institut für Adaptronik und Funktionsintegration, Langer Kamp 6, 38106 Braunschweig

Forschungsstelle 2: Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg

Lehrstuhl Verbrennungskraftmaschinen und Flugantriebe, Siemens-Halske-Ring 14,

03046 Cottbus

Braunschweig, den 21.01.2020

Prof. Dr.-Ing. M. Sinapius

Cottbus, den 22.01.2020

Prof. Dr.-Ing. Heinz Peter Berg

---

Ort, Datum

---

Name und Unterschrift aller Projektleiter der Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:

## **Zusammenfassung: Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

Aerodynamische Feder- und Folienlager werden bevorzugt zur Lagerung hochtouriger, leichter Rotoren eingesetzt. Die für die Auslegung und Berechnung solcher Lager erforderlichen Berechnungstools wurden – ausgehend von den Ergebnissen des vorangegangenen Forschungsprojekts „Folienlager I“ – um Module für weitere Lager (z.B. radiales Spirallager) ergänzt und speziell zur Berechnung des aktuellen Leaf-type Folienlagers und Bump-type Folienlagers weiterentwickelt.

Zur Validierung der Tools wurden Prüfstände für die Anfahr- und Hochgeschwindigkeitsversuche, zur Messung der Dynamikkoeffizienten und Reibmomente, zur Messung der Impedanz des radialen Leaf-type und Bump-type Folienlagers sowie zur Messung der Tragfähigkeit axialer Bump-type Folienlager aufgebaut.

Anhand des Lagerreibmoments (Stribeck-Kurve) konnte die Abhebedrehzahl relativ genau lokalisiert werden. Daneben wurden auf einem Prüfstand mit einem auf dem Rotor schwimmend angeordneten Testlager die Steifigkeits- und Dämpfungskoeffizienten in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz, der Lagerlast und der Drehzahl ermittelt. Die Kraft-, Beschleunigungs- und Bewegungssignale des Testlagers wurden mittels Analyseverfahren aus der Literatur ausgewertet und die Dynamikkoeffizienten ermittelt. Dabei war besonders die Querbeschleunigungsempfindlichkeit der Beschleunigungssensoren und die Eigenfrequenz der Stinger zu beachten.

Die Berechnungstools konnten anhand von Literaturwerten und der Messungen an den genannten Prüfständen im Wesentlichen validiert werden. Wegen der starken Profilierung der Laufflächen zeigten beide Folienlagertypen im Versuch eine hohe Abhebedrehzahl. Parametervariationen am Bump-type und Leaf-type Folienlager wurden durchgeführt mit dem Ziel der Lageroptimierung für eine möglichst niedrige Abhebedrehzahl und hohe Stabilitätsgrenze. Wie die bisher durchgeführten FE-Analysen zeigten, hatten lokale, druckbedingte Folienverformungen einen relativ geringen Einfluss auf den Druckaufbau, da der globale Spalthöhenverlauf im Leaf-type Folienlager konstruktiv von der Foliendicke bestimmt wird und im Bump-type Folienlager durch die für Lagerstabilität benötigte starke Profilierung der Foliensegmente.

Als Strukturmodell für das Bump-type Folienlager wurde das sogenannte NDOF-Modell aus der Literatur verwendet, das sich wegen seiner Genauigkeit im Vergleich zu FE-Ergebnissen bewährt hat. Dieses Modell müsste in einem zukünftigen Projekt bezüglich der Foliennachgiebigkeiten

(einschließlich der Top-Folie) und zur Berücksichtigung der reibungsbedingten Dämpfungseffekte genauer gefasst werden.

Die am Leaf-Type und Bump-type Folienlager gemessenen dynamischen Kennwerte sind deutlich frequenzabhängig, werden aber nur wenig durch Drehzahl und Lagerbelastung beeinflusst. Die Übereinstimmung der Rechen- und Messwerte ist für das Leaf-type Lager zufriedenstellend. Dagegen zeigte sich beim Bump-type Folienlager eine relativ große Diskrepanz zwischen Rechen- und Messwerten, was eventuell auf die Querbeschleunigungsempfindlichkeit der Beschleunigungssensoren zurückzuführen ist.

Die Unwuchtantwort eines in Folienlagern gelagerten Rotors sollte experimentell erfasst werden, um diese mit derjenigen aus einer entsprechenden rotordynamischen Berechnung zu vergleichen. An dem mit einer definierten Unwucht versehenen Rotor wurden die lateralen Bewegungen der Welle in zwei Ebenen, die erreichte Drehzahl und die sich einstellende Lagertemperatur gemessen. Wie aus den Wasserfalldiagrammen ersichtlich zeigten sich beim Bump-type Folienlager bei etwa 90000 U/min subsynchrone Wirbel mit relativ großen Schwingungsamplituden, die auch bei Drehzahlabenkung bis auf 78000 U/min bestehen blieben. Das Leaf-type Folienlager zeigte dagegen im betrachteten Drehzahlbereich (bis  $n = 100.000$  U/min) kaum Neigung zu subsynchronen Schwingungen.

Mit den Ergebnissen konnte die Zuverlässigkeit der Berechnungstools anhand der Rotordynamikrechnungen mit MADYN auf der Grundlage der für Leaf-type und Bump-type Folienlager berechneten Kennwerte im abgehobenen Zustand grundsätzlich nachgewiesen werden, für das Leaf-type Folienlager auch im Anfahrbereich. Am Axiallagerprüfstand sollte die maximale Tragfähigkeit eines axialen Bump-Folienlagers bei verschiedenen Drehzahlen ermittelt werden. Ein sprunghafter Anstieg des Lagerreibmoments ließ auf den Festkörperkontakt zwischen Spurscheibe und Axiallager und auf Überschreiten der maximalen Lagertragfähigkeit schließen. Die maximale Tragfähigkeit bei  $n=40000$  U/min betrug dabei ca. 50 kPa. Diese Werte waren vergleichbar zu dem Berechnungsergebnis bei einem minimalen Schmierpalt von 2  $\mu\text{m}$ . Im Test aufgetretene, ungleichmäßig verteilte Kratzspuren auf der Lagerfläche waren auf eine Schiefstellung der Spurscheibe relativ zur Lagerscheibe infolge ungenauer Lagermontage zurück zu führen. Eine FFT-Analyse der Kraft- und Drehmoment-Messung wies hier außerdem auf eine Resonanz in der eingesetzten Druckkammer zur Axialkraftherzeugung hin.