

Rotordynamikuntersuchung eines abschaltbaren Dämpfungselements

Hanse, M.; Lohrengel, A.

Im Rahmen des Verbundprojektes „TurboGetEff“ mit der PILLER Blowers & Compressors GmbH wurden Rotordynamikversuche an einem neu entwickelten Dämpfungselement durchgeführt. Das neue Element ermöglicht ein sicheres Durchfahren der Eigenfrequenz eines Versuchsrotors, welcher dieselbe Eigenfrequenz aufweist, wie die vom Industriepartner konstruierten Ausgangswellen eines Turboverdichters. So ist eine realitätsnahe Prüfung der Baugruppe möglich. Das Besondere des Dämpfungselements ist die Möglichkeit, es oberhalb der Eigenfrequenz abzuschalten und so die Effizienz im stationären Betrieb von Turboverdichtern signifikant zu steigern.



As part of the project “TurboGetEff” with PILLER Blowers & Compressors GmbH, rotor dynamic tests were performed on a newly developed damping element. The new element enables a reliable machine runup through the resonance frequency of a test rotor, which has the same resonance frequency as the output shafts of a turbocompressor designed by the industrial partner. This allows the assembly to be tested under realistic conditions. The special benefit of the damping element is that it can be switched off above the resonance frequency in order to significantly increase efficiency in the stationary operation of turbocompressors.

Motivation

Ziel des Forschungsvorhabens „TurboGetEff“ ist es, die Effizienz von Turboverdichtern zu erhöhen, ohne die rotordynamische Sicherheit zu reduzieren, oder die Lautstärke zu erhöhen. Dazu wird ein Konzept verfolgt, welches die Verwendung von Druckkammern und eine Optimierung der Verzahnung, der Wälzlagerungen und der Laufradlagerung vorsieht.

In Abbildung 1 ist links der Antriebsstrang eines serienmäßig eingesetzten Turboverdichters zu sehen, dessen Laufrad mit quetschöldämpften Wälzlagern gelagert ist. Die Verlustleistung des Systems kann deutlich reduziert werden, wenn diese beiden schnell laufenden Wälzlager eingespart werden können, die nur für die Quetschöldämpfung benötigt werden. In der rechten Hälfte ist aus diesem Grund der Quetschöldämpfer durch ein abschaltbares Dämpfungselement ersetzt. Durch dieses Element kann sowohl eine sichere Resonanzdurchfahrt gewährleistet werden, als auch im Betrieb (oberhalb der Eigenfrequenz; Dämpfungselement ist abgeschaltet) die Verlustleistung des Antriebsstrangs reduziert werden.

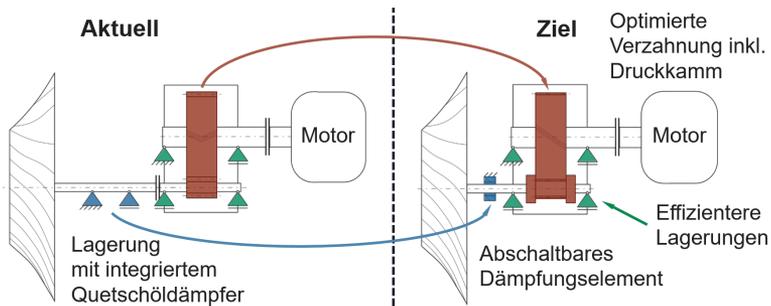


Abbildung 1: Projektziel von „TurboGetEff“ /1/

Zur Überprüfung der rotordynamischen Sicherheit des Dämpfungselements wurden Rotordynamiksimulationen durchgeführt. Anschließend wurde ein Miniaturrotor (geringere Rotormasse bei gleicher Eigenfrequenz und gleichen Umfangsgeschwindigkeiten am Dämpfungselement gegenüber der Originalgeometrie) experimentell untersucht.

Rotordynamiksimulation

Die Rotordynamiksimulation wurde von der Firma Piller Blowers & Compressors GmbH mit der Simulationssoftware ANSYS durchgeführt. In Abbildung 2 ist der Miniaturrotor bestehend aus 2 Stehlagern, der Riemenscheibe, dem abschaltbaren Dämpfungselement und der Rotormasse dargestellt. Der gekennzeichnete Auswertepunkt stimmt mit der Messung im Experiment überein.

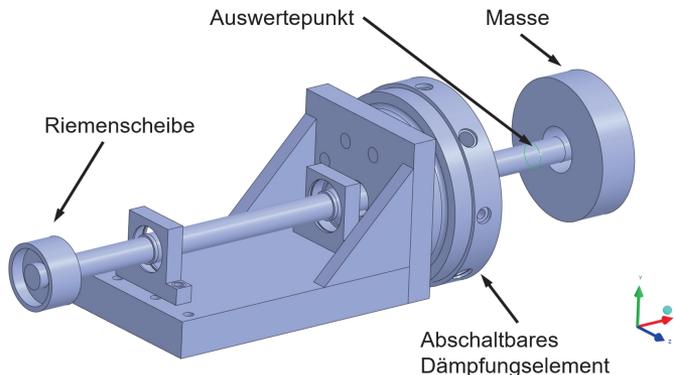


Abbildung 2: Geometrie Miniaturrotor und ausgewertete Stelle vor Masse

Zunächst wurde eine Modalanalyse zur Abstimmung der Eigenfrequenz des Miniaturrotors analog zur späteren Verdichtergeometrie durchgeführt und die Wellenlänge und der Durchmesser entsprechend angepasst. Anschließend wurde

eine harmonische Analyse durchgeführt, um diese den experimentellen Ergebnissen gegenüber zu stellen. Hierbei wurde der gewuchtete Miniaturrotor mit und ohne zusätzliche Unwuchtmassse sowie mit und ohne Dämpfungselement untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt. Durch das Dämpfungselement soll eine Reduktion der Schwingamplitude um den Faktor 3,5 erreicht werden. Zudem wird die Eigenfrequenz des Systems zu höheren Drehzahlen verschoben. Die Drehzahl wird auf die gemessene Eigenfrequenz des Rotors ohne Dämpfungselement und zusätzliche Unwucht bezogen. Die Schwingamplitude wird auf die im Experiment maximal zulässige Schwingamplitude des Rotors am Auswertepunkt bezogen.

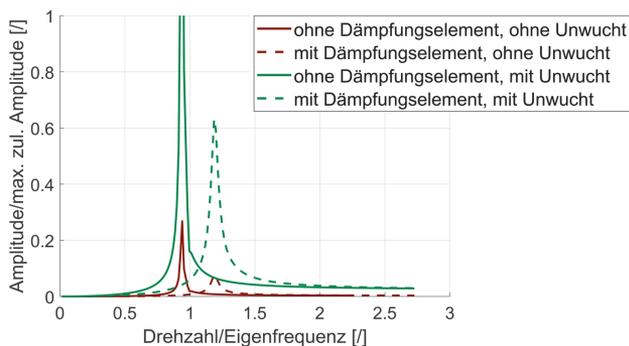


Abbildung 3: Simulationsergebnisse, Schwingamplitude in vertikaler Richtung

Rotordynamikversuche

Aufgrund der neuartigen Funktionsweise des abschaltbaren Dämpfungselements wurden die Versuche auf dem Rotordynamikprüfstand am Institut für Maschinwesen durchgeführt, wobei der Prüfstand in einem speziell gesicherten Raum aufgebaut ist. Der vorhandene Antriebsmotor hat eine Antriebsleistung von 22 kW bei einer maximalen Drehzahl von 2940 1/min. Beim Einsatz einer Übersetzung von 4,125 von der Riemenscheibe am Motor auf den Rotor können Drehzahlen bis 12000 1/min am Rotor erreicht werden. Andere maximale Drehzahlen sind durch Austausch der Riemenscheiben möglich. Zudem kann der Anlauf sowie Auslauf des Rotors gesteuert werden. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4 dargestellt. Links ist der komplette Aufbau zu sehen, rechts eine Draufsicht auf die beiden Stehlager der Rotorwelle.

Zur Untersuchung der Wirksamkeit des abschaltbaren Dämpfungselements wurden die Schwingungsamplituden am Auswertepunkt berührungslos gemessen. Zur Überwachung der Sicherheit des Dämpfungselements wurden an 4 Stellen im Dämpfer sowie an den Stehlagern Temperatursensoren eingebracht. Zudem wurde an den Stehlagern des Rotors die Beschleunigung in horizontaler und vertikaler Richtung am vorderen Lager sowie die Temperaturen beider Lager gemessen. Außerdem wurde die Temperatur in der Ölversorgung erfasst.

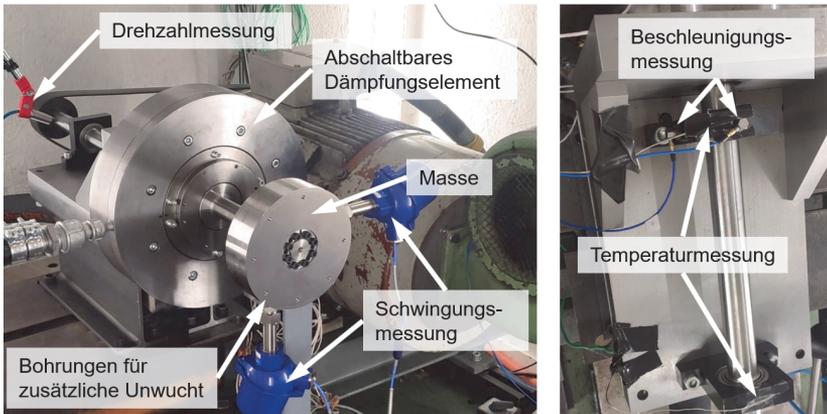


Abbildung 4: Aufbau Rotordynamikversuch am Miniaturrotor

Zu Beginn wurde überprüft, ob das Dämpfungselement unterhalb der kritischen Drehzahl sicher zu- und abgeschaltet werden kann. Anschließend wurde das System in einen thermisch stationären Zustand unterhalb der Eigenfrequenz gebracht, um die sich einstellende maximale Temperatur im Dämpfer zu erfassen. Nach diesen Voruntersuchungen wurden die Experimente zur Durchfahrt der Eigenfrequenz unternommen. Hierbei wurde zunächst durch die Eigenfrequenz zügig hochgefahren und dann langsam kontinuierlich heruntergefahren. Letzteres wurde aufgezeichnet, die Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt. Es wurden folgende Untersuchungen (analog zur Simulation) durchgeführt:

- **ohne** zusätzliche Unwucht Masse und **ohne** Dämpfungselement
- **ohne** zusätzliche Unwucht Masse und **mit** Dämpfungselement
- **mit** zusätzliche Unwucht Masse und **ohne** Dämpfungselement
- **mit** zusätzliche Unwucht Masse und **mit** Dämpfungselement

Zudem wurde mehrfaches Schalten oberhalb der Eigenfrequenz untersucht. Hierbei wurden die Temperaturverläufe und die Schwingamplituden ausgewertet, die Ergebnisse sind in Abbildung 6 dargestellt.

Ergebnisse

Beim Durchfahren der Eigenfrequenz (Abbildung 5) sind Unterschiede in der Eigenfrequenz sowie der Amplitude vorhanden. Gründe könnten hier eine Unsicherheit in der Steifigkeit des gesamten Aufbaus, teilweise schwer zu quantifizierenden Einflüssen der einzelnen Bauteile des abschaltbaren Dämpfungselements auf die Gesamtdämpfung der Baugruppe¹ oder eine unbekannte

¹ Die dämpfenden Eigenschaften einzelner Bauteile der Baugruppe wurden vorab durch Fußpunktanregung der Bauteile und Messung der Dämpfung untersucht.

Restunwucht des Rotors sein. Deutlich wird, dass durch das abschaltbare Dämpfungselement eine signifikante Reduktion (Faktor 4,7) der maximal auftretenden Schwingamplitude erzielt werden kann. Mit zusätzlicher Unwucht kann die Eigenfrequenz ohne Dämpfungselement nicht sicher durchfahren werden (deshalb Abbruch des Versuchs beim Hochfahren, als die maximale Schwingamplitude erreicht wurde). Mit Dämpfungselement kann die Eigenfrequenz sicher durchfahren werden. Das Dämpfungselement erzielt die erhoffte Wirkung und kann somit zur Effizienzsteigerung des Antriebsstrangs signifikant beitragen.

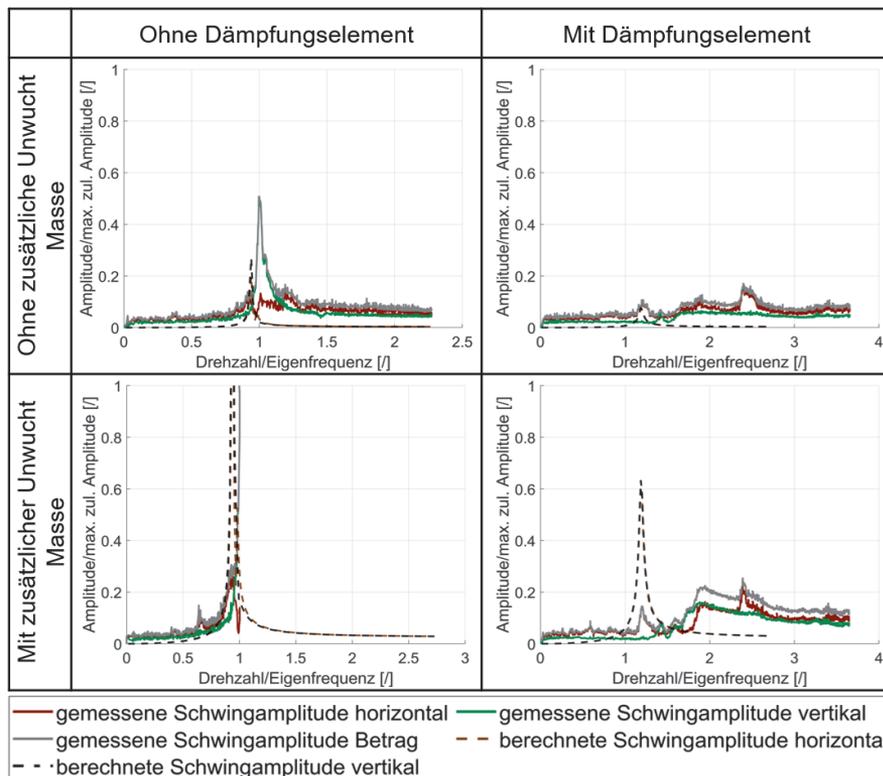


Abbildung 5: Schwingungsamplitude über Drehzahl

In Abbildung 6 sind die Temperaturverläufe sowie die Schwingamplituden über der Zeit beim Schalten des Dämpfungselements oberhalb der Eigenfrequenz dargestellt. In den Temperaturverläufen ist ersichtlich, dass an allen 4 Messstellen ein nahezu identischer Temperaturverlauf vorliegt und die Maximaltemperatur drehzahlabhängig ist. Die maximal zulässige Temperatur (90°C) wird jedoch nicht erreicht. Zudem fällt die Temperatur im Dämpfungselement zügig nach Abschaltung wieder ab. Beim Ein- und Ausschalten des Dämpfungselements wird das System

angeregt. Dies ist in der rechten Abbildung deutlich zu erkennen. Die Schwingungsamplituden übersteigen dabei nicht die zulässige maximale Schwingung. Das Schalten kann somit als zuverlässig und betriebssicher bewertet werden. Da die Schwingungsamplitude kurzzeitig beim Schalten hoch ist, wird in Zukunft der Schaltvorgang optimiert und beispielsweise ein langsames Schalten geprüft.

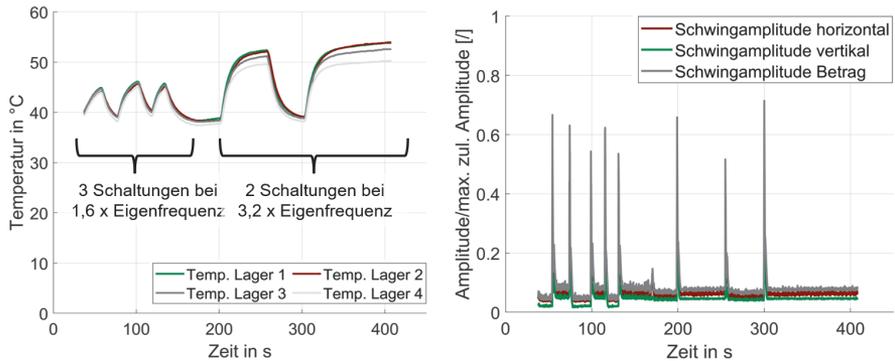


Abbildung 6: Mehrfaches Schalten des Dämpfers oberhalb der Eigenfrequenz

Zusammenfassung

Auf dem Rotordynamikprüfstand des IMWs konnten erfolgreich Rotordynamikversuche bis 8000 1/min zur Prüfung eines abschaltbaren Dämpfungselements durchgeführt werden. Das Dämpfungselement ist sowohl thermisch im stationären Zustand unterhalb der maximal zulässigen Temperatur betreibbar als auch oberhalb der Eigenfrequenz sicher schaltbar. So kann im stationären Zustand oberhalb der Eigenfrequenz gegenüber der herkömmlichen Bauweise (nicht abschaltbare, quetschölgedämpfte Laufradlagerung) signifikant Verlustleistung eingespart werden. Beim Durchfahren kann durch das Dämpfungselement die Schwingamplitude des Rotors um Faktor den 4,7 gesenkt werden, wodurch ein sicheres Durchfahren der Eigenfrequenz möglich ist.

Danksagung

Die Arbeiten wurden im Rahmen des Vorhabens TurboGetEff (FKZ:03EN4037A-B) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert. Die Autoren danken der PILLER Blowers & Compressors GmbH für die bisherige und zukünftige Zusammenarbeit sowie dem BMWK für die finanzielle Unterstützung.

Literatur

- /1/ Heinrich, C.; Lohrengel, A.; Piller Blower & Compressors GmbH: Vorhabenbeschreibung „TurboGetEff“. (unveröffentlicht), 2022.