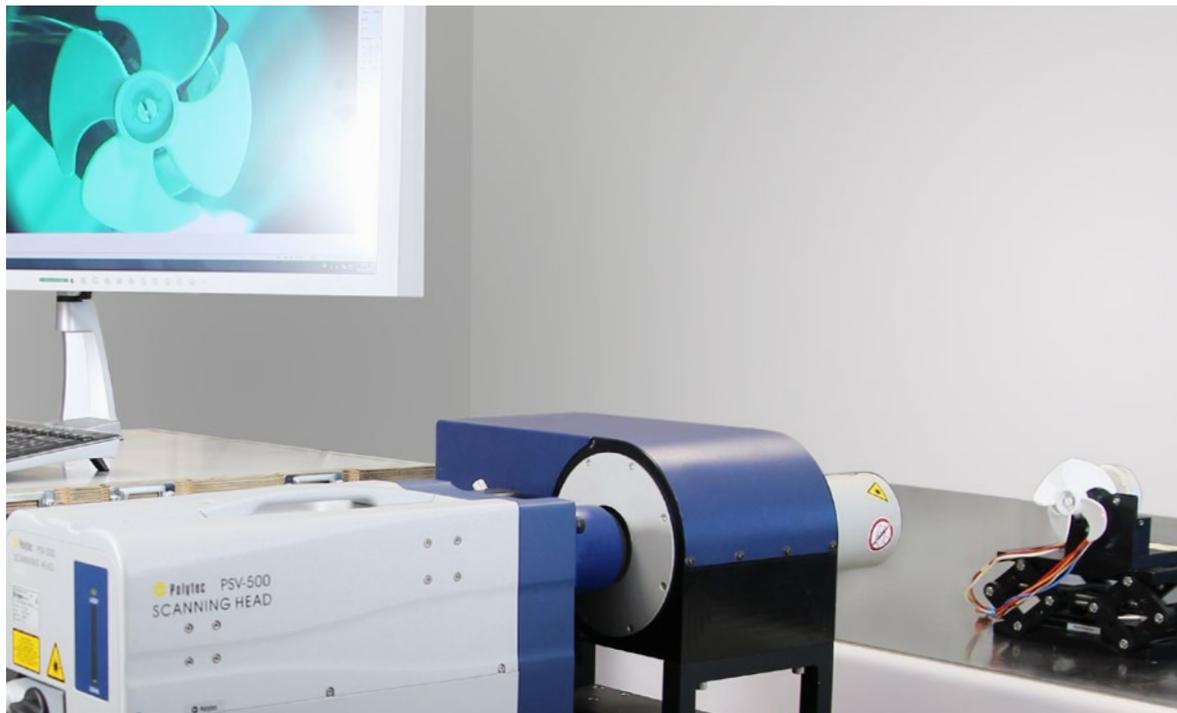
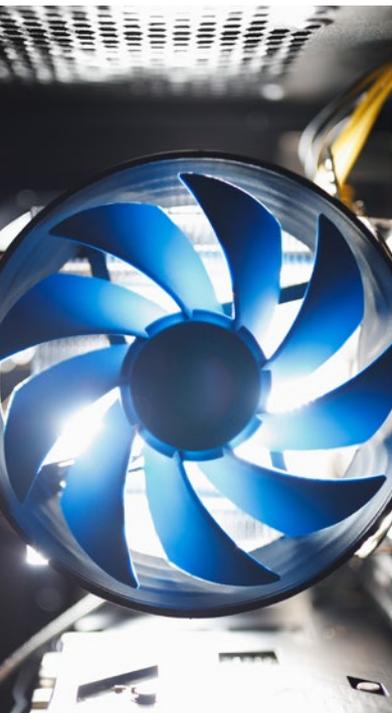


# Optischer Derotator

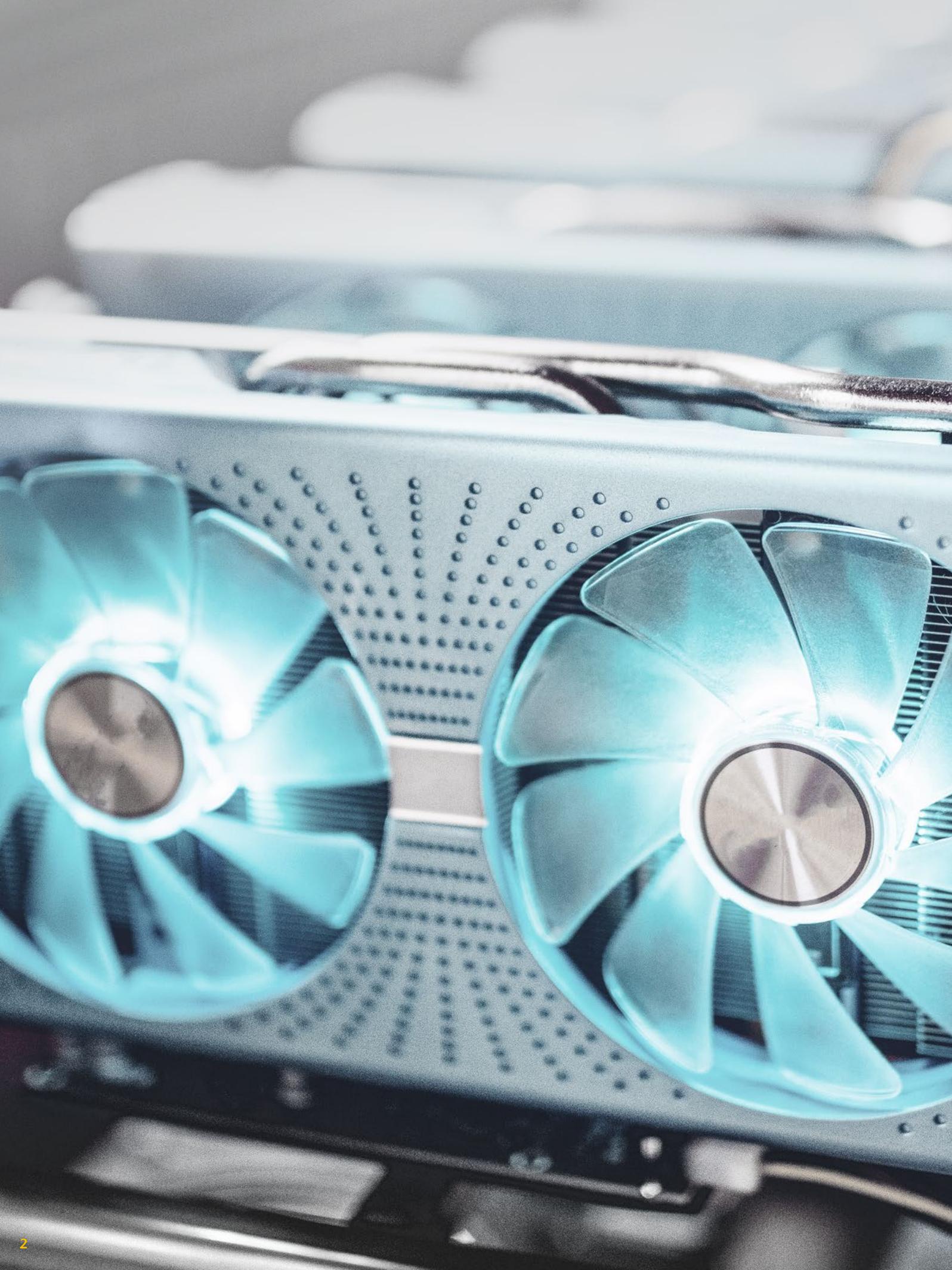


## Optischer Derotator

Flächenhafte Schwingungsmessung  
an rotierenden Bauteilen

Applikationsnote





# Anwendung des PSV-A-440 Optischen Derotators zur berührungslosen Betriebsschwingungsanalyse

**Diese Applikationsnote beschreibt die Messung von Schwingformen und Hochläufen von rotierenden Bauteilen mit Scanning Laser-Doppler Vibrometern (SLDV). Scanning Vibrometer eignen sich hervorragend zur schnellen und sicheren Messung von Schwingformen. Dabei wird ein vorher definiertes Messgitter von einem Laserstrahl abgetastet und punktwise die Systemantworten gemessen. Die Messdaten des SLDV können dann auch bei Bedarf als Eingangsdaten für eine experimentelle Modalanalyse und zur Modellvalidierung verwendet werden.**

Die Vorhersage des Schwingungsverhaltens mit heutigen Simulationsmethoden ist immer noch limitiert durch die eingeschränkte Kenntnis der Materialparameter des realen Objektes. Durch einen experimentellen Modaltest können die berechneten und gemessenen Schwingformen, Eigenfrequenzen und modalen Dämpfungen miteinander verglichen werden.

Mit dem PSV-A-440 Optischen Derotator werden axiale Messungen auf rotierenden Bauteilen mit nahezu beliebigen Geometrien möglich. Bei rotierenden Teilen verändern sich die modalen Parameter durch Versteifung, so dass im Stillstand gemessene Eigenfrequenzen in der Regel nicht mit denen unter Betriebsbedingungen auftretenden übereinstimmen. Außerdem ist die tatsächliche Anregung im Betrieb nur schwer vorzusagen.

Die Ermittlung der Betriebsschwingformen und Betriebseigenfrequenzen war daher bisher bei rotierenden und besonders bei segmentierten rotierenden Teilen gar nicht oder nur unter hohem Aufwand und mit großen Einschränkungen möglich.

## Funktionsweise

Im Folgenden wird ein Messverfahren unter Einbeziehung eines Optischen Derotators beschrieben. Der Derotator ermöglicht es, mit einem Scanning Vibrometer die Schwingform rotierender Teile, wie Lüfter für Consumer-Produkte, Turbinen, Pumpenläufer oder Reifen, unter realen Bedingungen bei Drehzahlen bis 24.000 U/min zu messen. Alle Versteifungseffekte, die tatsächliche Schwingform/-frequenz und die aus der Anregung bei Rotation resultierende Amplitude, werden dabei erfasst.



### Bestandteile des PSV-A-440 Optischen Derotators

- Rotationseinheit
- Regelung
- Grundgestell mit Höhen-, Winkel- und lateraler Positionskorrektur für den Abgleich der Drehachse des Messobjektes mit der des Derotators
- Sensorik

Der Laserstrahl wird dazu mit einer präzise geregelten optischen Rotationseinheit dem rotierenden Objekt nachgeführt. Eine flexible Regelung für fixe Drehzahlen oder Hochläufe koppelt den Derotator an ein Encodersignal, das vom Prüfling kommt. Die Schwingungsmessung mit dem Vibrometer folgt dann dem Standardverfahren, da durch die Synchronisierung das Messobjekt scheinbar stillsteht. Gleichmaßen sind die Definition des Messgitters und der Scanvorgang genauso einfach wie bei einem stehenden Objekt. Ein zweites (Referenz-)Laservibrometer, dessen Strahl ebenfalls den Derotator durchläuft, dient als Phasenreferenz zur Darstellung der Schwingform. Betreibt man das Scanning Vibrometer im Einzelpunkt-Modus, können Hoch- und Auslaufversuche für eine Ordnungsanalyse gemacht werden.

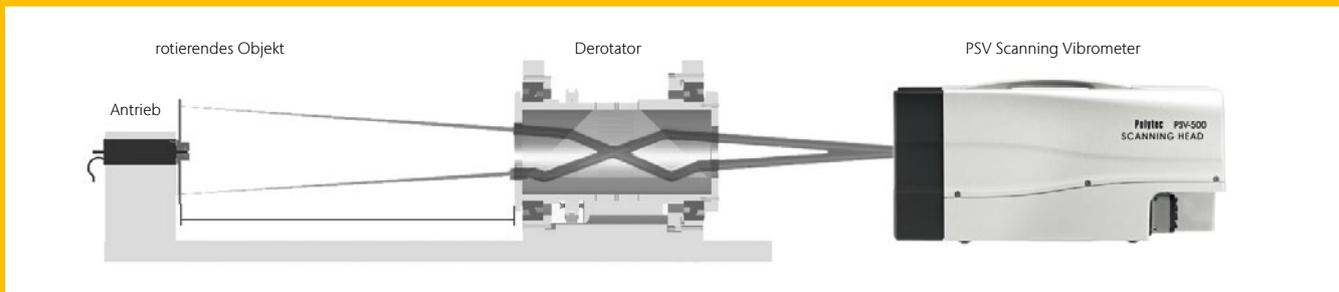
Das Hauptelement des PSV-A-440 Optischen Derotators ist die Rotationseinheit. Sie enthält ein sogenanntes Dove-Prisma, das mit halber Drehzahl des Messobjektes rotiert. Die Funktionsweise der Optik ist in Bild 2 wiedergegeben. Die Rotationseinheit ist elektronisch über einen Regler mit dem Messobjekt verbunden.

Die Drehzahl des Messobjektes liefert ein Encoder. Um eine vollständige optische Derotation zu erreichen, müssen die Drehachsen des Messobjektes und der Rotationseinheit übereinstimmen. Hierzu ist die Rotationseinheit mit Scankopf und Referenzlaser in 4 Freiheitsgraden einstellbar.

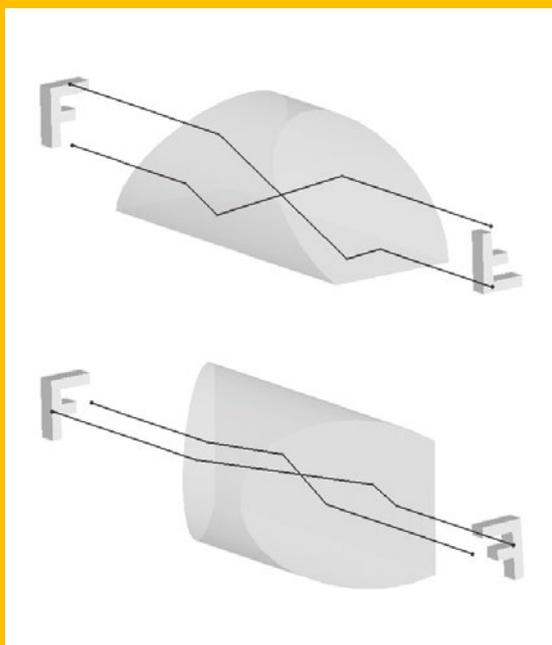
### Unterschied zwischen Standardmessung und derotierter Messung

Um die Ergebnisse einer Messung mit und ohne Derotator vergleichen zu können, muss ein Objekt mit durchgängiger Oberfläche gewählt werden, da nur dieses auch ohne Derotator gemessen werden kann. Segmentierte Messobjekte wie Lüfter, Turbinen etc., die das Hauptanwendungsfeld des Derotators repräsentieren, können ohne ihn nicht gemessen werden. Um den Vergleich durchführen zu können, wurde ein scheibenförmiges Objekt gewählt. In diesem Fall ist es eine CD, die an einem Motor mit Encoder (500 Striche/U) befestigt ist.

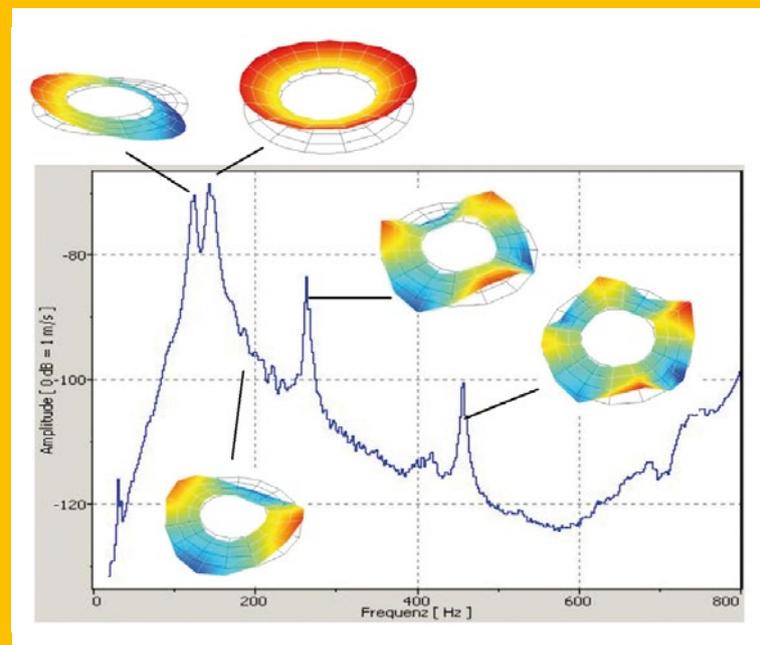
**1**  
Prinzipieller Aufbau des PSV-A-440 Optischen Derotators



**2**  
links:  
Funktionsweise eines Dove-Prismas: bei Drehung um 90° wird das Abbild um 180° gedreht



**3**  
rechts:  
Spektrum und Schwingformen der CD im Stillstand



### 1 CD im Stillstand (Schallanregung)

Als Grundlage für die folgenden Untersuchungen wird die CD im Stillstand vermessen und so ihre Eigenschwingformen und Eigenfrequenzen in diesem Zustand aufgenommen. Angeregt wurde breitbandig mit einem Lautsprecher. Bild 3 zeigt das Ergebnis. Zum resultierenden gemittelten Spektrum über die Scanpunkte sind auch die zu den Resonanzen gehörenden, gemessenen Schwingformen dargestellt.

### 2 Hochlaufversuch mit Derotator

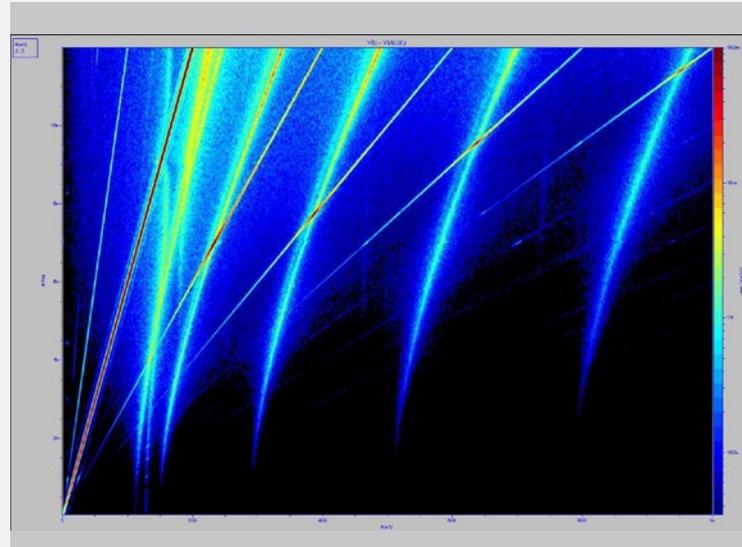
Als nächstes wird ein Hochlaufversuch mit Verwendung des Derotators durchgeführt. Der Laserstrahl wird mit dem rotierenden Objekt mitgeführt und verbleibt auf einem festen Oberflächenpunkt, wodurch die Schwingung wie auf einem stehenden Teil gemessen werden kann. Das Campbell-Diagramm (Bild 3) zeigt zum einen die Ordnungen (gerade Linien mit Schnittpunkt im Ursprung), also Vielfache der Drehfrequenz, die zu erzwungenen Schwingungen durch eine starke Anregung führen, zum anderen die Strukturresonanzen. Diese sind bei diesem Bauteil keine senkrechten Linien, sondern krümmen sich bei steigender Drehzahl zu höheren Frequenzen hin. Die Erklärung dafür ist eine Versteifung des relativ weichen Polycarbonat-Materials durch die zunehmenden Fliehkräfte. Dieses Ergebnis zeigt sehr deutlich den Nutzen des Derotators: zum einen wird der Versteifungseffekt erfasst, zum anderen die resultierende Amplitude bei Betriebsbedingungen.

### 3 Schwingformen unter Last/Rotation

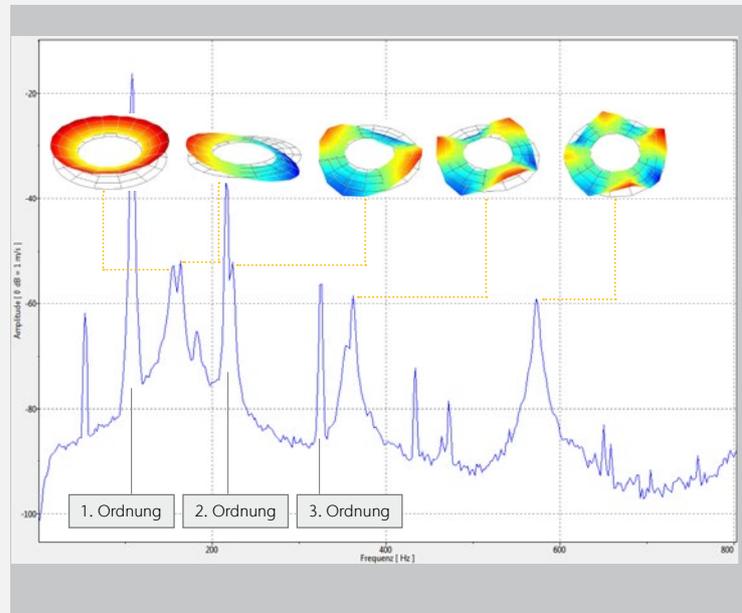
Bei einer festen Drehzahl (6.500 U/min) wurde ein Scan durchgeführt, um zusätzlich zu den verschobenen Resonanzfrequenzen die zugehörigen Betriebsschwingformen aufzuzeigen.

Wie erwartet ergeben sich die gleichen Schwingformen wie bei Lautsprecheranregung im Stillstand, jedoch bei den Frequenzen, die aus dem Campbell-Diagramm mit Derotator bei 6.500 U/min ersichtlich sind (Bild 5).

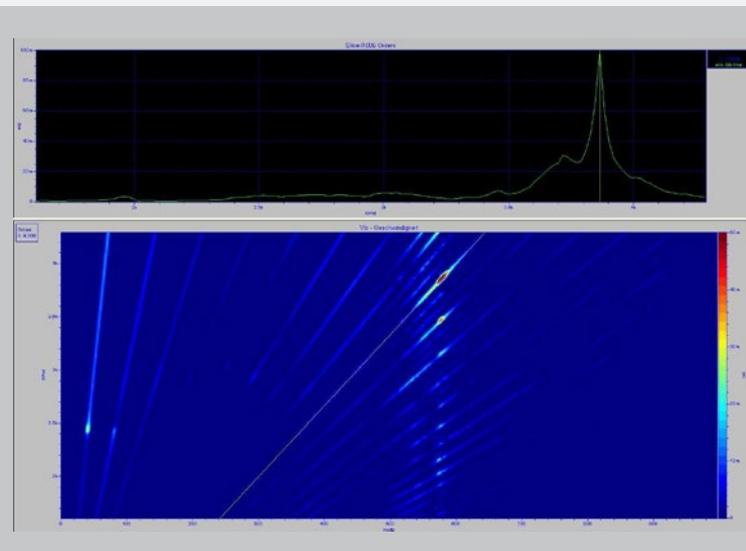
Von links nach rechts erscheint im Spektrum (nach einer Linie bei der halben Drehzahl) zuerst eine Linie bei der Frequenz der ersten Ordnung. Dies entspricht einer erzwungenen Schwingung aufgrund der starken Anregung durch die 1. Ordnung. Als nächstes taucht dann die rotationssymmetrische Schwingform auf, die bei Anregung im Stillstand bei einer höheren Frequenzen lag als die Schwingform mit 1 Maximum. Dies wird auch aus dem Campbell-Diagramm ersichtlich: die Resonanz mit 1 Maximum ändert ihre Steifigkeit stärker als die rotationssymmetrische, so dass sich die beiden Linien bei ca. 5.000 U/min kreuzen.



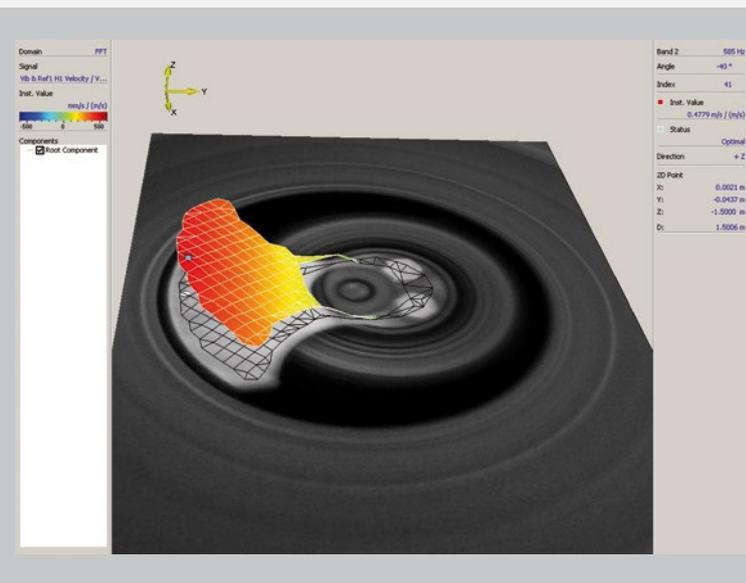
4  
Hochlauf mit  
Derotator



5  
Schwingform  
und Spektrum  
mit Derotator bei  
fester Drehzahl,  
6.500 U/min



6  
Campbell-  
Diagramm der  
Messungen am  
Pumpenläufer



7  
Zugehörige  
Schwingform  
des Ausgleichs-  
gewichts

Bei höheren Drehzahlen tritt also die rotationssymmetrische Resonanz bei kleineren Frequenzen auf. Dies wird durch den Scan bestätigt, der ja direkt die Schwingform aufzeigt. Dies macht die Interpretation der Daten sehr viel einfacher und anschaulicher. Zu höheren Frequenzen hin taucht dann als nächstes die Schwingform mit einem Maximum auf, danach die erzwungene Schwingung durch die 2. Ordnung, direkt oberhalb davon die Resonanz mit zwei Maxima auf einem Umfang. Ihre Amplitude ist deshalb bei dieser Drehzahl auch recht hoch, da eine starke Anregung (nahe der 2. Ordnung) auf die Strukturresonanz (bei dieser Drehzahl, Stichwort Steifigkeitsänderung) trifft. Dies ist durch Simulationen vermutlich schwer vorher zu sagen. Die Messung mittels Derotator liefert hier auf einfache Weise ein anschauliches und auch quantitativ korrektes Ergebnis über Amplitude, Schwingform und Resonanzfrequenzen.

Als nächstes taucht die Resonanz mit drei Maxima auf, danach die durch die 3. Ordnung erzwungene Schwingung und schließlich bei ca. 560 Hz die Resonanz mit vier Maxima, die bei Lautsprecheranregung bei ca. 460 Hz zu finden war. Der Vorteil der Scanning Vibrometrie ist, dass die verschobenen Resonanzstellen anhand der Schwingformen leicht zuzuordnen sind.

### Beispiel Pumpenläufer

An einem Ausgleichsgewicht eines Pumpenläufers zeigen sich nach einiger Betriebszeit Risse an der Aufhängung des Gewichts. Zur Überprüfung werden Hochlaufmessungen mit dem Optischen Derotator gemacht. Dazu wird mit dem Scanning Vibrometer ein Punkt angefahren und dann die Drehzahl des Pumpenläufers bis zur maximalen Prüfdrehzahl erhöht. Der Derotator hält dabei die Position des Laserstrahls auf dem Ausgleichsgewicht konstant. Die parallel aufgenommene Drehzahl und die Zeitdaten werden mit dem Programm VSI Rotate ausgewertet, das direkt die binären Messdaten des Scanning Vibrometers einlesen kann. Im Campbell-Diagramm zeigt sich, dass u.a. die 9. Ordnung eine Eigenfrequenz anregt.

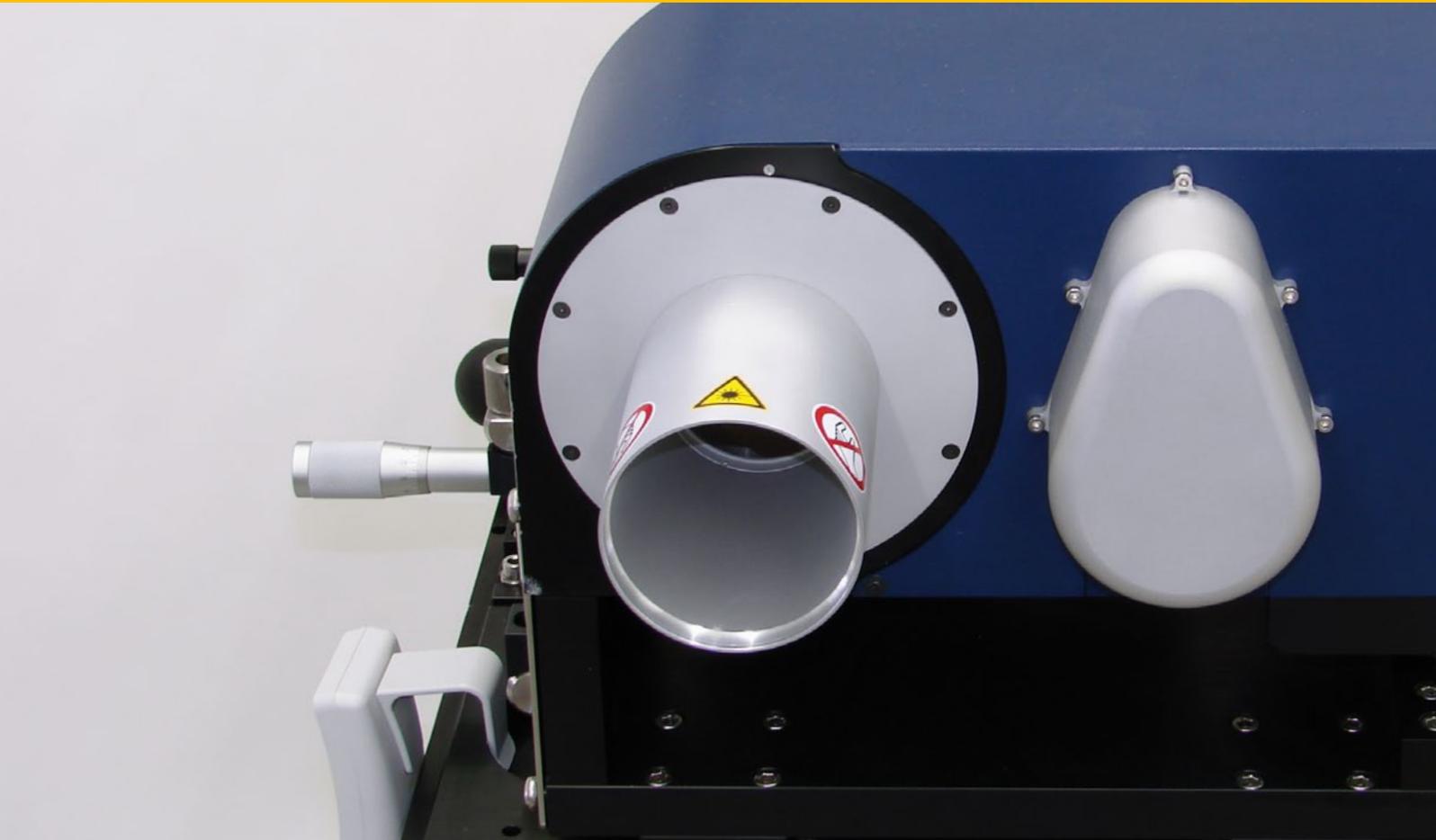
Um die genaue Auswirkung der Resonanz zu ermitteln, wird eine flächenhafte Messung mit dem Scanning Vibrometer durchgeführt. Dazu wird die Läuferdrehzahl eingestellt, die beim Hochlauf die höchste Amplitude bei der 9. Ordnung erregte.

Die Betriebsschwingform bei der vorher ermittelten Resonanz ist eine Biegeeigenform des Ausgleichsgewichts. Wie eine anschließende Messung im Stillstand zeigt, lässt sich diese Eigenform auch dort nachweisen. Durch die geringe Biegesteifigkeit an der Ankopplungsstelle kommt es zu hohen Auslenkungen und damit zu einem frühzeitigen Versagen des Bauteils.

## Zusammenfassung

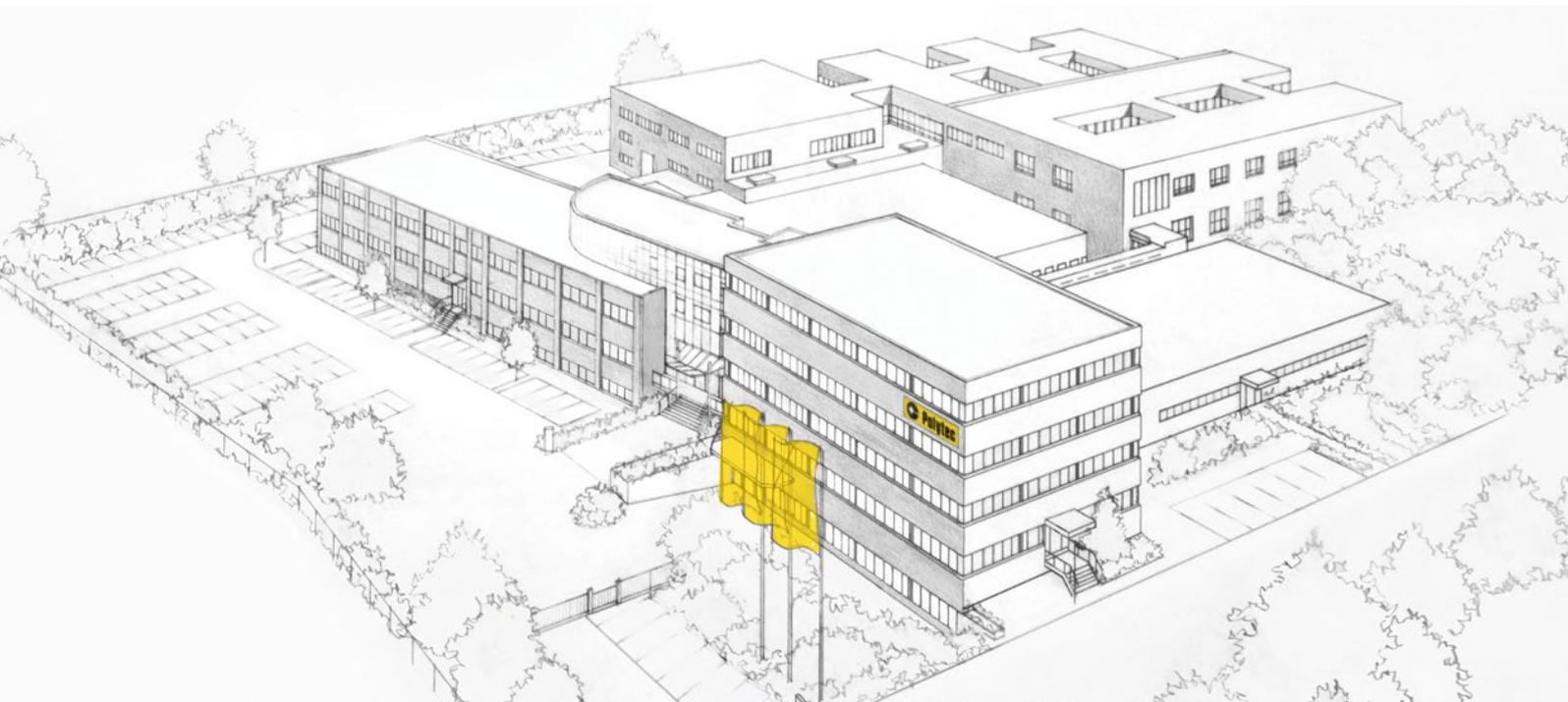
Mit der Kombination der berührungslosen Scanning Vibrometrie und dem optischen Derotator ist eine Ermittlung von Fehlerursachen möglich, die bei statischer Betrachtung nicht sichtbar gewesen wären. Zum einen erfolgt die Messung ohne Massebehaftung des Prüflings, zum anderen wird die Messung unter

tatsächlichen Betriebszuständen durchgeführt, so dass geeignete Eingangsdaten für die Überprüfung der Simulation vorhanden sind. Verschobene Resonanzen bei höheren Drehzahlen, speziell bei Bauteilen aus Kunststoff, sind leicht zu erkennen und die angeregten Schwingformen können mit denen von Modaltest und Simulation verglichen und quantifiziert werden.



## Autor

Dr. Jochen Schell  
Leitung Applikation  
Geschäftsbereich Optische Messsysteme



## Zukunft seit 1967

Hightech für Forschung und Industrie.  
Vorreiter. Innovatoren. Perfektionisten.

Den Ansprechpartner für Ihre  
Region finden Sie unter:  
**[www.polytec.com/contact](http://www.polytec.com/contact)**

**Polytec GmbH**  
Polytec-Platz 1-7 · 76337 Waldbronn  
Tel. +49 7243 604-0 · [info@polytec.de](mailto:info@polytec.de)