

# Optimierung von Ultraschallinstrumenten



## Anwendungsgebiete

- A Luft- und Raumfahrt
- B Audio & Akustik
- C Automobilentwicklung
- D Datenspeicher
- G Vibrometrie Allgemein
- M Mikrostrukturen/-systeme
- P Fertigungsprüfung
- S Wissenschaft & Medizin
- T Strukturuntersuchungen
- U Ultraschalltechnik

## Sichere Auslegung und Optimierung von Ultraschallinstrumenten für medizinische Anwendungen

Ultraschallbasierte bildgebende Verfahren sind als unverzichtbares diagnostisches Werkzeug schon seit Jahrzehnten Standard in Krankenhäusern und heute auch in fast jeder Praxis niedergelassener Ärzte zu finden. Der nächste Schritt ist die Verwendung ultraschallunterstützter oder ultraschallbasierter Instrumente im Operationssaal und in der ambulanten Behandlung.

### Das Ziel: nachweisbar sichere Auslegung medizinischer Ultraschallinstrumente

Zu unterscheiden sind zwei Anwendungsfälle:

1. Invasive Instrumente
2. Instrumente mit indirekten Wirkmechanismen

Zur ersten Gruppe zählen ultraschallunterstützte Skalpelle, Koagulatoren, Instrumente zur intravenösen Beseitigung von Thrombosen oder zur Liposuktion, aber auch Instrumente zur dentalen Plaqueentfernung<sup>1</sup>. Ihnen ist gemeinsam, dass sie direkt mit dem Gewebe in Berührung kommen. Versagt ein Instrument, beispielsweise durch einen Ermüdungsbruch, können Trümmer im Körper des Patienten verbleiben und akute oder langfristige Schäden verursachen. Dies wird durch eine richtige Auslegung des Instruments verhindert.

Zur zweiten Gruppe zählen Geräte zur Stoßwellentherapie und zur Einbringung fokussierter Ultraschallenergie (HIFU). Hier sind die Orte der Ultraschallausbringung und der Wirkung räumlich voneinander getrennt. Effizienz und örtliche Präzision spielen eine größere Rolle.

Das Risiko bei einem mechanischen Versagen des Ultraschallerregers ist wesentlich geringer.

### Einsatz von Laser-Doppler-Vibrometern

Für die Entwicklung von Ultraschallinstrumenten in der Medizin sind folgende Eigenschaften der laserbasierten Schwingungsmessung von großem Vorteil:

- **Völlige Rückwirkungsfreiheit:** Die Schwingung des Prüflings wird vom Messinstrument nicht beeinflusst.
- **Hohe Ortsauflösung:** Wegen der hohen Frequenzen und der oft filigranen Strukturen müssen Schwingformen örtlich genau aufgelöst gemessen werden. Der Laser ist, mit wenigen  $\mu\text{m}$  Durchmesser, in der Lage, beispielsweise auf dünnen Schneiden oder Drähten zu messen.
- **Messungen sind auch in transparenten Medien möglich,** um beispielsweise Dämpfungen zu berücksichtigen.
- **Die Fähigkeit, hohe Frequenzen zu messen:** prinzipiell gibt es kaum Beschränkungen in der Frequenz. Derzeit liegen die höchsten messbaren mechanischen Schwingfrequenzen bei 1,2 GHz.

Polytec GmbH  
Optische Messsysteme  
Applikationsnote  
VIB-U-01

Oktober 2011

## Verifikation von Finite-Elemente-Modellen mit Scanning-Vibrometrie

Bei der Auslegung eines Ultraschallwerkzeugs verwendet man in der Regel ein Simulationsmodell, das im Verlauf der Prototypenphase verifiziert wird. Der ultraschallbasierte Schneidprozess arbeitet mit hohen Energien, daher ist beim Schneiden ein nicht lineares Verhalten anzunehmen, was der Test bestätigen kann.

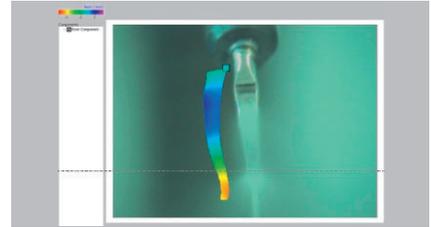
Zu einer solchen Verifikation von FE-Modellen bietet die scannende Vibrometrie ideale Voraussetzungen:

- Das Verfahren ist punktorientiert. Ein Laser (bzw. bei 3D-Verfahren drei Laser) tastet die Oberfläche des Messobjekts an vorgegebenen Punkten automatisch ab und erfasst die lokale Schwingung. Die Punktmessungen werden dann zu einer Schwingform zusammengesetzt.
- Das Messgitter wird direkt aus einem FE-Netz gewonnen. Wird der Prototyp breitbandig angeregt, erhält man für alle Anregungsfrequenzen die Schwingformen. Nach einer Modenextraktion in einem Modalanalyseprogramm wird die Übereinstimmung mit dem Modell bestimmt, beispielsweise als MAC-Wert (Modal Assurance Criterion).

## Beispiel für ein Instrument zur Zahnsteinentfernung (Dental Descaler)



Der Laser des Scanning Vibrometers vermisst die Oberfläche eines zahnmedizinischen Ultraschallscalers.



Momentaufnahme der 3D-Darstellung, überlagert mit dem Videobild der Scaler-Spitze

## Anwendungsbeispiele bei invasiven Instrumenten

### FE-Model Update

Da die Messwerte direkt an den Knotenpunkten des FE-Gitters aufgenommen werden, ist ein sehr gutes Model Update unter Berücksichtigung der gemessenen Parameter, beispielsweise von Dämpfungswerten, möglich.

Ein großer Vorteil dabei ist, dass die Vibrometer-Messungen auch Eigenschaften abbilden, die sich nur schwer modellieren lassen. Beispielsweise besteht bei dünnen Bauteilen wie Drahtaktoren (Wire Actuators) oder Klingen die Gefahr der Modenkopplung. D.h. die eigentlich gewünschte Mode des Aktu-

ators regt eine parasitäre Mode (z. B. eine Biegemode) an, die dann zu hohen Spannungen im Bauteil und damit zum vorzeitigen Versagen führt.

Da diese Kopplung abhängig von Dämpfungseigenschaften ist, ist eine Modellierung nur schwer durchzuführen.

Die Messung mit dem Scanning Vibrometer zeigt dieses Verhalten direkt und liefert Ansätze für eine Optimierung des Bauteils.

### Effizienzoptimierung

Anhand der Verteilung der Amplituden in den verschiedenen Moden wird auch die optimale Betriebsfrequenz sichtbar. Zum einen erhält man Aussagen zur Uniformität der Schwingform, zum anderen ist direkt erkennbar, ob für eine bestimmte Frequenz wirklich die maximale Energie am gewünschten Ort, beispielsweise an der Schneide, eingebracht wird. Damit lässt sich überprüfen, ob sich an der aktiven Fläche ein Schwingungsbau ausbildet.

### Betriebsfestigkeit

Sicherheit steht bei medizinischen Geräten an oberster Stelle. Der Bruch einer Schneide während der Operation kann fatale Folgen haben. Deshalb ist die Betriebsfestigkeit und damit die Bestimmung der maximalen Spannungen im Betriebszustand eine unverzichtbare Aufgabe. Wichtig ist auch die Dokumentation dieses Schritts, um bei immer häufiger werdenden Schadensersatz-

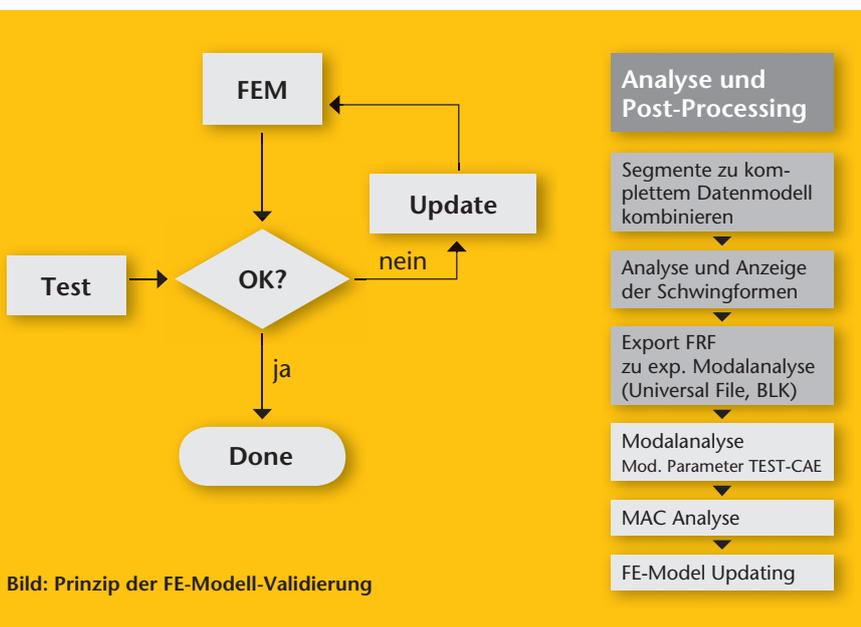
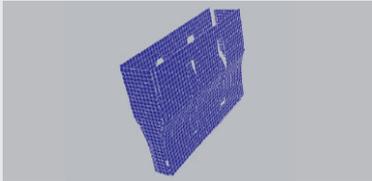
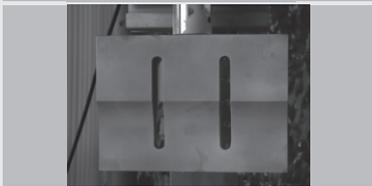


Bild: Prinzip der FE-Modell-Validierung

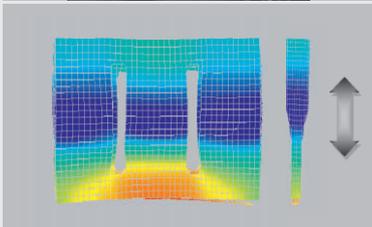
## Methoden-Tool: Einbinden von 3D-Messgittern



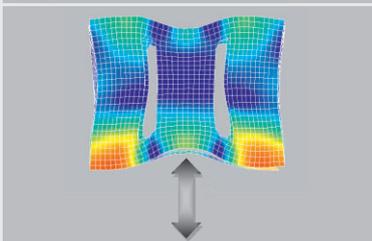
Messgitter einer Ultraschall-Werkzeugspitze. Das Messgitter wurde in diesem Fall durch genaue Geometriemessung mittels Triangulation der drei Laserstrahlen des PSV-3D ermittelt.



Gitterimport: Ein Gitter kann aus dem FE-Programm in das Messsystem importiert werden und dann anhand einiger Referenzpunkte mit der Lage des Messobjekts abgeglichen werden.



Beispiel für gewünschte Schwingformen: Die bei 20 kHz gemessene Schwingform entspricht weitgehend der gewünschten Schwingung, die für die Anwendung notwendig ist (Pfeilrichtung). Die Bewegung ist über die ganze Länge der aktiven Fläche weitgehend einheitlich.



Beispiel für unerwünschte Schwingformen: Bei einer etwas höheren Frequenz tritt eine andere Mode in den Vordergrund, die der aktiven Bewegung eine Biegeeigenform überlagert. Dies lässt unbefriedigende Ergebnisse erwarten.

prozessen den Beweis antreten zu können, dass das Produkt nach dem Stand der Technik ausgelegt war.

Die 3D-Scanning-Vibrometrie bietet zusätzlich auch die Möglichkeit, dynamische Spannungs- und Dehnungsverteilungen zu messen und mit den berechneten Werten zu vergleichen.

Dazu wird aus den gemessenen dynamischen Verschiebungen unter Verwendung der Messgittergeometrie die relative

Dehnung zwischen den Messpunkten berechnet und damit eine Spannungs- und Dehnungsverteilung dargestellt.

### Verifikation von Spezifikationen

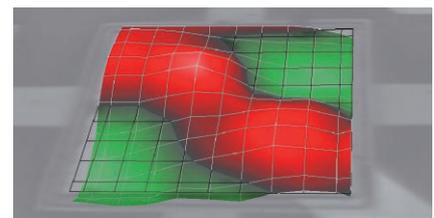
Sollparameter wie Frequenz und Amplitude lassen sich durch Einpunkt-Laservibrometer einfach und sicher nachweisen. Das gilt sowohl während der Entwicklungsphase als auch in der Produktion, so dass für jedes Teil ein 100%-iger Nachweis der Spezifikationen möglich ist.

## Anwendungsbeispiele bei Instrumenten mit indirekten Wirkmechanismen

Im Unterschied zu den invasiven Instrumenten sind diagnostische Ultraschallinstrumente und bildgebende Verfahren in der Regel mit einer Sende- und Empfangseinheit ausgestattet, deren beider Schwingungsverhalten charakterisiert werden kann.

Als Sender dienen beispielsweise mikrogefertigte Ultraschall-Transducerarrays (kapazitive cMUTs oder piezoelektrische pMUTs). Hier liefert die Laservibrometrie Detailaufnahmen des zeitlichen Verhaltens, die für Wellenfrontkorrekturen genutzt werden können, aber auch Informationen zum Übersprechverhalten<sup>2</sup> solcher Bauteile.

In verschiedenen Arbeitsgruppen wird eine experimentelle Überprüfung der Modellierung mit Hilfe von Laservibrometern als Schritt zu einem schnelleren FE-Model Update durchgeführt. Die so gewonnenen realistischen Messwerte lassen den Einfluss von Umgebungsparametern und Fertigungsabweichungen leichter abschätzen<sup>3</sup>.



Messung der Schwingung eines cMUT<sup>4</sup> mit dem MSA-500 Micro System Analyzer

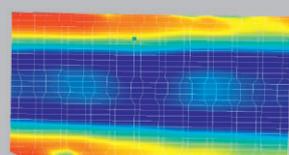
Die heute mit dem Ziel erhöhter Auflösung verwendeten hohen Frequenzen stellen hierbei kein Hindernis dar. Das UHF-120 Ultrahochfrequenz-Vibrometer erlaubt mit einer maximalen Bandbreite von 1,2 GHz auch die Analyse von Primäraktoren im hohen MHz-Bereich inklusive der Harmonischen. Durch das scannende Verfahren werden die Schwingmoden eines Arrays flächenhaft erfasst. Die erreichbare Ortsauflösung liegt dabei unter einem  $\mu\text{m}$ .

Die Schallverteilung ausgehend vom Ultraschallsender lässt sich ebenfalls mit Scanning-Laservibrometern messen.

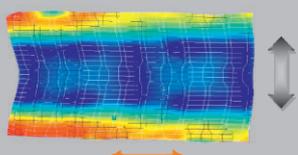
## Beispiele Ultraschall-Messer<sup>5</sup>



Klinge eines Ultraschallmessers



RMS-Verteilung (Effektivwerte der Amplitude) der Schwingung nach Messung mit dem 3D-Scanning Vibrometer



Schwingform bei 22,4 kHz: Sichtbar ist eine Bewegung fast rein in Pfeilrichtung (orange). Die Bewegung verläuft 90° zur Schneidrichtung (grau)

## Instrumentierung

Je nach Anwendungsbereich stehen unterschiedliche Messinstrumente bereit. Einpunkt-Vibrometer erlauben die Messung der Amplitude an einem Punkt und finden ihren Einsatz bei der Verifikation spezifizierter Leistungsmerkmale (Amplitude, Frequenz). Sie unterscheiden sich in der Bandbreite und in der Einsatzrichtung der Messung (In-plane oder Out-of-plane).

Scanning Vibrometer dienen der Messung kompletter Schwingformen, abhängig von der Frequenz. Durch das flächenhafte Messprinzip sind die gewonnenen Daten zum Abgleich von FE-Berechnungen geeignet. Hier stehen Out-of-plane-Systeme (PSV-400) und dreidimensional messende Systeme, deren Messdaten wiederum zur Berechnung der dynamischen Spannungs- und Dehnungsverteilung verwendet werden können, zur Verfügung.

Vibrometer-Modell	PSV-400	PSV-400-3D-M	OFV-534 / OFV-5000	OFV-3320	UHF-120-SV
<b>Eigenschaft</b>					
Out-of-plane-Messung	•	•	•		•
In-plane-Messung		•		•	
Flächenhafte Messung	•	•			•
Punktmessung	•	•	•	•	•
>1 MHz Schwingfrequenz	•		•		•
>24 Mhz Schwingfrequenz					•
Laserspotgröße <2 µm			•		•
Messung in Flüssigkeiten	•	•	•	•	•
<b>Anwendung</b>					
FE-Abgleich	•	•			•
Modenkopplung		•			
Verifikation Parameter (Amplitude, Frequenz)	•	•	•	•	•
Timing	•	•	•	•	•
Bildgebende Arrays (cMUT, pMUT)	•		•		•
Schallfeldvisualisierung	•				
HIFU (hohe Schwingamplituden)	•				•

## Zusammenfassung

Als Werkzeug zur Verifizierung von FE-Simulationen, sowohl bei invasiven als auch bei diagnostischen Ultraschallwerkzeugen für den medizinischen Bereich, ist die Laservibrometrie sehr gut geeignet. Durch ihre Linearität bis in den hohen MHz-Bereich und die völlige Rückwirkungsfreiheit, gepaart mit einer hohen lateralen Auflösung, lässt sich diese Technologie für fast alle strukturdynamischen

Aufgabenstellungen verwenden. Von der Grundtechnologie abgeleitete Berechnungsmethoden zur Schallfeldvisualisierung und zur Betriebsfestigkeit (Dehnung/Spannung) erschließen weitere Anwendungsfälle.

Damit ist die Laser-Doppler-Vibrometrie ein geeignetes Werkzeug für die Entwicklung effizienter, betriebssicherer und effektiver Werkzeuge für den Arzt.

### Referenzen

- 1 Lea, S., Laser-Vibrometrie hilft die Wirksamkeit zahnmedizinischer Ultraschallwerkzeuge zu verbessern, LM INFO Special 2/2005, Polytec, Waldbronn 2005.
- 2 Zhuang et al., "Biocompatible coatings for CMUTs in a harsh, aqueous environment", J. Micromech. Microeng. 17 (2007) 994-1001
- 3 Dooby et al., Modeling and characterization of CMOS-fabricated cMUTs, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 20, No. 1, Feb. 2011
- 4 Chou et al, Vibrational Analysis of Ultrasonic Transducers for Medical Imaging, InFocus – Magazin für Optische Messsysteme, Ausgabe 1/2010 – ISSN 1864-918
- 5 W. Littmann, J. Twiefel, „Modellierung und Messung von Dämpfung in der Ultraschalltechnik“, 2. VDI-Fachtagung Schwingungsdämpfung, VDI-Berichte 2164, S. 81 ff. (2011)

Weitere Informationen zu Polytec-Vibrometern finden Sie auf unserer Website, oder lassen Sie sich durch unsere Produktspezialisten beraten: oms@polytec.de

**Polytec GmbH**  
Polytec-Platz 1-7  
76337 Waldbronn  
Tel. +49 7243 604-0  
Fax +49 7243 69944  
info@polytec.de

**Polytec GmbH**  
**Vertriebs- und**  
**Beratungsbüro Berlin**  
Schwarzschildstraße 1  
12489 Berlin  
Tel. +49 30 6392-5140  
Fax +49 30 6392-5141