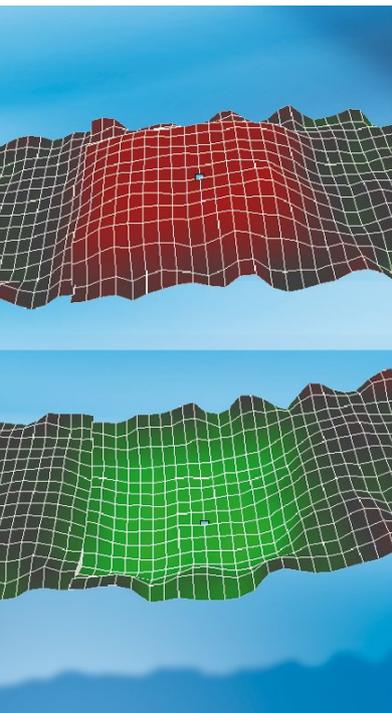


## Flächige Schwingungsmessung im Ultrahochfrequenz-Bereich



## Flächige Schwingungsmessung im Ultrahochfrequenz-Bereich

Performance von Mikrosystemen verifizieren  
Applikationsnote



# Flächige Schwingungsmessung an Ultraschallsensoren mit dem UHF-120 Ultrahochfrequenz-Vibrometer.

Ein zunehmender Anteil mikrogefertigter Sensoren, Aktoren und Komponenten schwingt heute mit Frequenzen im hohen MHz-Bereich und darüber. Als Beispiele für solch hochfrequent schwingende Systeme seien hier genannt: MEMS (Mikro-Elektromechanische Systeme), NEMS (Nano-Elektromechanische Systeme) sowie Surface Acoustic Wave (SAW)-Filter und Ultraschallsensoren, wie sie beispielsweise zur Bildgebung in der Medizin eingesetzt werden. Um die Funktionalität dieser Bauteile zu testen, bestehende Simulationsmodelle zu überprüfen und das Design der Systeme zu optimieren, muss man das dynamische Verhalten der Systeme messen. Eine der wenigen verfügbaren Lösungen für die Schwingungsmessung an solchen Systemen ist der Einsatz eines Laservibrometers, das berührungslos und nahezu rückwirkungsfrei misst.

Die Laser-Doppler-Vibrometrie erlaubt dabei eine berührungslose und dadurch rückwirkungsfreie Charakterisierung über alle Frequenzen und auch bei breitbandiger Anregung. Die Schwingformen lassen sich dabei eindrucksvoll visualisieren. Auch Transienten und Relaxationsverhalten können untersucht werden. Die Herausforderung für ein solches Messinstrument liegt in den kleinen Schwingungsamplituden und kurzen akustischen Wellenlängen ( $< 10 \mu\text{m}$ ).

## Messprinzip und Aufbau des UHF-120 Ultrahochfrequenz-Vibrometers

Das Funktionsprinzip des UHF-120 basiert wie bei allen anderen Vibrometern von Polytec auf der Laser-Doppler-Interferometrie. Trifft der Messstrahl des Vibrometers auf ein bewegtes Objekt, wird die Frequenz bzw. Phase des zurückgestreuten Lichts durch den Doppler-Effekt verschoben. Diese Frequenz- bzw. Phaseverschiebung wird interferometrisch bestimmt.

Im Mikroskop-basierten Messkopf (Bilder 2, 3) des UHF-120 befindet sich ein heterodynes Mach-Zehnder-Interferometer. Durch Interferenz des Doppler-verschobenen Messstrahls mit einem Referenzstrahl resultiert im Interferometer ein Schwebesignal. Unter Schwebung versteht man die Interferenz zweier kohärenter Wellen mit ähnlicher Frequenz. Bewegt sich das Messobjekt nicht einfach linear, sondern schwingt hin und her, wird ein frequenz- bzw. phasenmoduliertes Signal erzeugt, das alle Informationen über die Schwingung des Messobjektes enthält. Dieses Signal wird durch ein kommerzielles Oszilloskop mit einer Abtastrate von bis zu 40 GigaSamples/Sekunde abgetastet und digitalisiert. Die digitalisierten Daten werden anschließend via Ethernet an den PC übertragen und dort durch die Polytec-Software demoduliert und ausgewertet.

Im UHF-120 Gesamtsystem (Bild 3) ist neben dem Messkopf (1), dem Messrechner (3) und dem Oszilloskop (2) auch ein Controller (4) als Schnittstelle zwischen dem Messrechner und dem Messkopf enthalten. Für den Fall, dass mit dem UHF-120 eine scannende (flächige) Messung durchgeführt werden soll, wird das Gesamtsystem einfach durch eine motorisierte X/Y-Positioniereinheit erweitert.

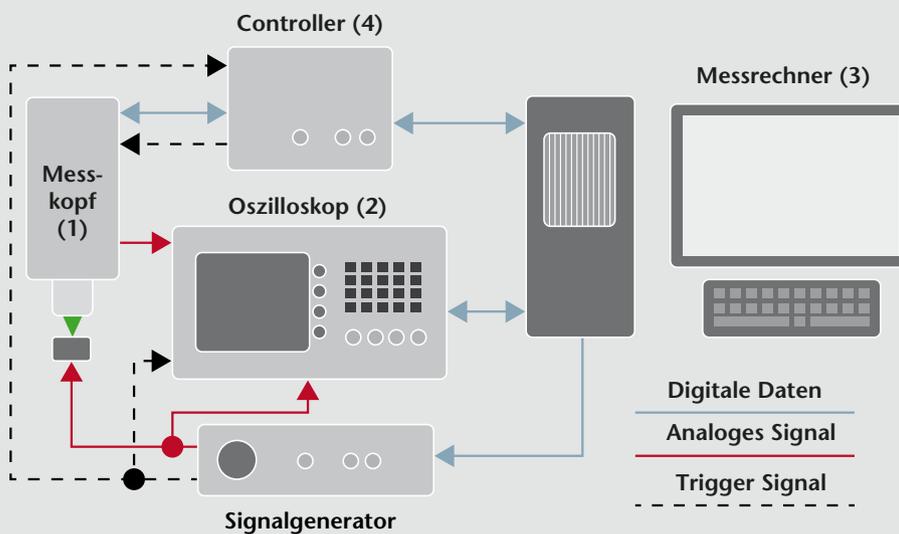
1  
Typische  
Frequenzbereiche  
hochfrequenter  
Komponenten

Anwendung	Frequenzbereich
F-MEMS	1 MHz - $>3$ GHz
SAW-Filter	10 MHz - $>60$ GHz
NEMS	50 MHz - $>1$ GHz
HF-Ultraschalltransducer	1 MHz - $>1$ GHz

**2**  
 UHF-120 mit  
 Messkopf (1) und  
 Controller (4)



**3**  
 Signalfluss  
 des UHF-120  
 Gesamtsystems



## Vermessung von Ultraschallsensoren

Die zu vermessenden beiden Ausführungen von Ultraschallsensoren wurden vom Fraunhofer Institut für Biomedizinische Technik (IBMT, St. Ingbert) entwickelt und dienen in der Medizin zur abdominalen Bildgebung, zur zellulären Bildgebung und zur Oberflächenvermessung. Ziel ist es, durch eine Messung der Out-of-Plane-Schwingung der Bauteile die dreidimensionale Schallfeldausbreitung im Raum zu bestimmen.

### Funktionsprinzip der Ultraschallsensoren

Beide Typen von Ultraschallsensoren fungieren sowohl als Sender als auch als Empfänger von Ultraschallwellen (Ultraschall-Transducer). Je nach Funktion und Wirkungsweise der beiden Arrays befinden sich dabei entweder eine dünne Membran (100 MHz-Array) oder eine Anpassschicht (5 MHz) über einem Piezo-Array. Durch Anlegen einer Spannung an ein definiertes Feld des Piezo-Arrays kann sowohl die Amplitude als auch die Phase der Auslenkung jedes Piezo-Feldes variiert werden. Die durch den Piezo-Effekt hervorgerufene Kristallschwingung (Out-of-Plane) wird auf die darüber liegende dünne Membran bzw. Anpassschicht übertragen. Die zum Schwingen angeregte Membran oder Anpassschicht erzeugt dann eine Ultraschallwelle, die durch unterschiedliches Ansteuern der Piezo-Felder in ihrer Form und Frequenz verändert werden kann. Durch die Wahl der korrekten Amplitude und Phase jedes Array-Punktes kann beispielsweise bei dem niederfrequenten Sensor eine fokussierte Ultraschallwelle mit variablen Fokuspunkt erzeugt werden.

### Messung an Sensor 1 („niederfrequenter Ultraschallsensor“)

Dieser Sensor wird für die abdominale Bildgebung eingesetzt. Das Bauteil hat eine Fläche von ca.  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  und weist eine Schwingfrequenz von 5 MHz auf. Bei der Messung des niederfrequenten Sensors wurde ein 5x-Objektiv verwendet. Das von der Kamera aufgenommene Gesichtsfeld beträgt beim 5x-Objektiv  $1,42 \times 1,1 \text{ mm}^2$ . Um den Sensor auf der gesamten Fläche von etwa  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  zu charakterisieren, wurden insgesamt 30 Einzelfelder ( $5 \times 6$ ) nacheinander scannend vermessen. In jedem einzelnen Messfeld wurden mit der Software 234 Messpunkte im Live- Videobild definiert. Beim Scan wurde von jedem Messpunkt die Amplitude und Phase über eine Zeitspanne von  $20 \mu\text{s}$  aufgezeichnet. Der Beginn jeder einzelnen Messung wurde über ein Triggersignal realisiert. Dieses Triggersignal diente gleichzeitig als Phasenbezug.

Die so aufgezeichneten Daten der einzelnen Scansfelder konnten anschließend mit der Polytec-Software zusammengefügt und animiert werden. In den folgenden 8 Bildern (Bild 4 bis 11) ist ein Auszug aus der Animation des Schwingungsverlaufes dargestellt. Die Gesamtschwingzeit beträgt ungefähr  $5 \mu\text{s}$  und hat eine maximale Amplitude von  $\pm 40 \text{ nm}$  (peak to peak). Bild 12 zeigt den Amplituden-Zeit-Verlauf eines ausgewählten Messpunktes.

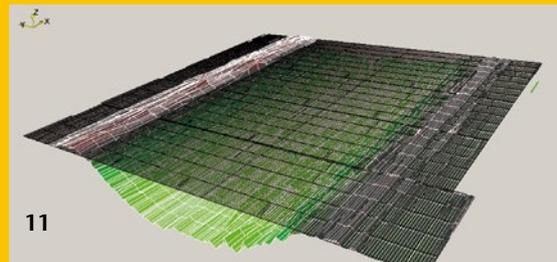
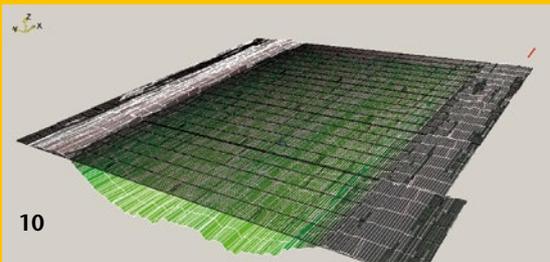
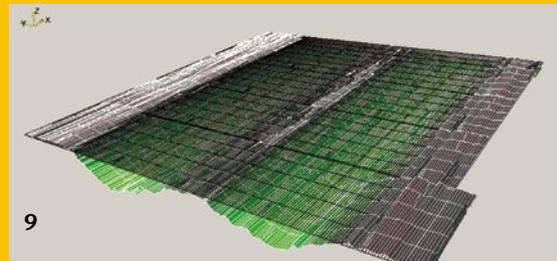
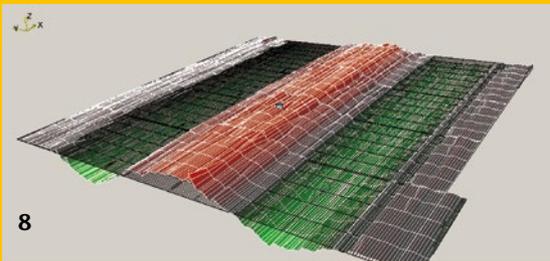
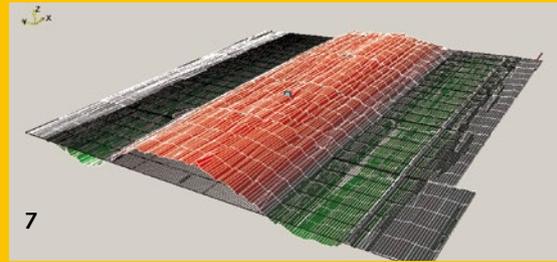
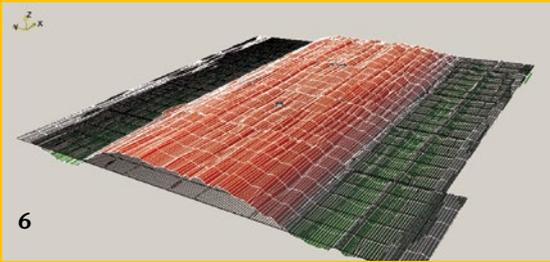
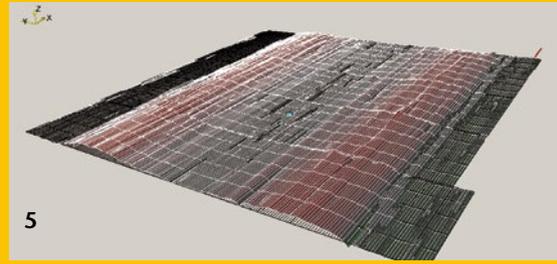
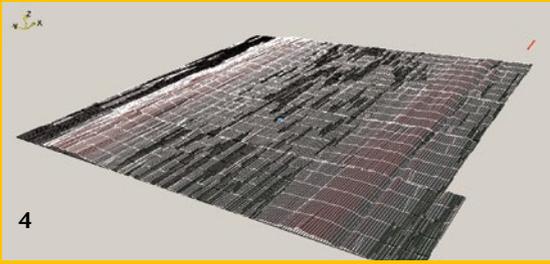
Anhand der Bilder wird deutlich, dass es mit einer geregelten Anregung eines Piezo-Arrays und einer darüber liegenden dünnen Anpassschicht möglich ist, Ultraschallwellen bestimmter Formen zu erzeugen.

Schaut man sich den Schwingungsverlauf der ersten 4 Einzelbilder an, erkennt man, dass zunächst die Randbereiche und später die mittleren Bereiche der Membran zum Schwingen angeregt werden. Demzufolge startet der äußere Teil der Ultraschallwelle früher als der mittlere. Als Resultat erhält man, wie erwünscht, eine Art Kugelwelle, die nach einem bestimmten Abstand in einen Fokuspunkt läuft.

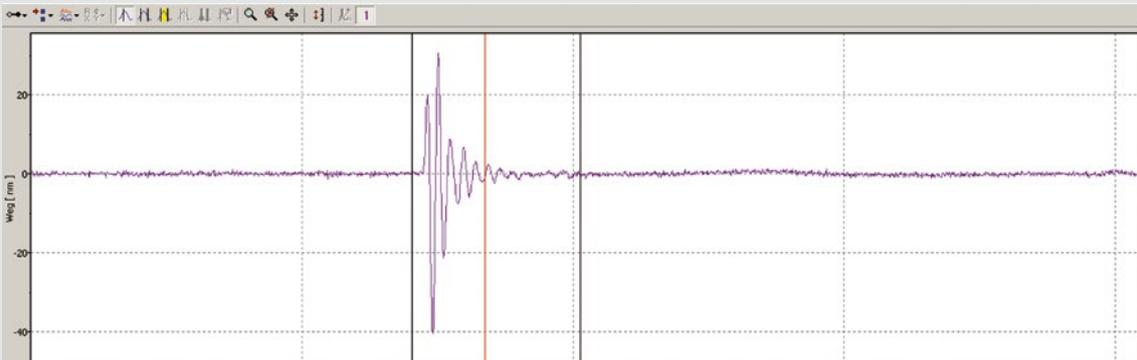
### Auswertung der Messdaten

Bereits bei den ersten Animationen der Messdaten mit der Polytec-Software konnte das Entwicklungsteam des IBMT feststellen, dass das prinzipielle Schwingverhalten der Membran mit den vorhandenen Simulationen übereinstimmte. Durch eine detaillierte Auswertung der Messdaten konnte zudem noch das bestehende Schwingungsmodell weiter verbessert und korrigiert werden. Bei der Auswertung der Messdaten musste beachtet werden, dass bei der Messung die Membran nicht wie real im Wasser, sondern in Luft betrieben wurde und somit die Dämpfung durch das Wasser wegfällt. Mit dem neu überarbeiteten Simulationsmodell ist es dem IBMT jetzt möglich, die Schwingung der Membran und somit auch die dreidimensionale Ausbreitung der resultierenden Ultraschallwelle zu simulieren. Anders als bei der konventionellen Messung des dreidimensionalen Schallfeldes kann jetzt in einem zeitlich deutlich verkürzten Ablauf die Funktion des Bauteiles beurteilt werden.

**4-11**  
Schwingverhalten  
des niederfre-  
quenten Ultra-  
schallsensors



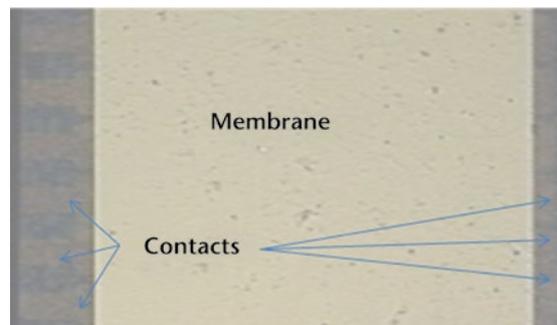
**12**  
Amplituden-  
Zeit-Verlauf eines  
ausgewählten  
Messpunktes



# Mit dem UHF-120 Vibrometer kann das Schwingverhalten hochfrequent schwingender Systeme relativ einfach und mit großer Präzision bestimmt werden.

## Messung an Sensor 2 („hochfrequenter Ultraschallsensor“)

Dieser Sensortyp wird für die zelluläre Bildgebung und Oberflächenvermessung eingesetzt. Er hat eine Fläche von  $0,8 \times 2,4 \text{ mm}^2$  und weist eine Schwingfrequenz von 105 MHz auf. Auch bei der Messung des hochfrequenten Ultraschallsensors mussten unter Verwendung des 10x-Objektivs insgesamt 3 Einzelfelder nacheinander scannend vermessen werden. In jedem Feld wurden über die Software im Live-Videobild des Mikroskops 405 Messpunkte definiert. Anders als bei der Messung des niederfrequenten Sensors wurde dieser mit einer 1 mm dicken Wasserschicht versehen, über der sich zusätzlich noch ein dünnes Deckglas befand. Dadurch wurde eine realitätsnahe Messung des Transducers erreicht. Im Gegensatz zum niederfrequenten Sensor, bei dem durch die Schwingung der Membran eine fokussierte Ultraschallwelle erzeugt wird, kann mit dem hochfrequenten Sensor nur eine gleichzeitige Anregung der Elemente erfolgen und so eine Art Scan durchgeführt werden. In Abhängigkeit davon, welche Kontakte (Bild 13) man beim Sensor ansteuert, werden unterschiedliche Bereiche der Membran zum Schwingen angeregt. So können beispielsweise bei einer „scannenden Ultraschallmessung“ nacheinander verschiedene Bereiche der Membran phasengleich zum Schwingen gebracht und somit ebene Schallwellen an unterschiedlichen Positionen ausgesendet werden. Die so erzeugten Schallwellen werden am Messobjekt reflektiert und anschließend vom Ultraschallsensor wieder detektiert.



**13**  
Mikroskop-  
aufnahme des  
hochfrequenten  
Ultraschallsensors  
mit 1 mm dicker  
Wasserschicht  
und Deckglas

Folgenden 9 Bilder (Bild 14 - 22) zeigen das Ergebnis nach Anregung von vier Piezo-Feldern im mittleren Bereich des Ultraschall-Transducers. Es ist zu erkennen, dass eine flächige Schwingungen der Membran über einen scharf begrenzten Bereich durch das Pizoarray erzeugt wird. Der Einschwingvorgang der mit etwa 105 MHz schwingenden Membran beträgt ca.  $0,5 \mu\text{s}$ . Die maximale Amplitude der Membran entspricht, wie in Bild 14 zu sehen, etwas über  $150 \text{ pm}$ . Anhand der Schwingform der Membran ist klar zu erkennen, dass infolge der starken Dämpfung durch die Wasserschicht nur der Bereich der Membran in Schwingung gerät, der auch unmittelbar durch die darunterliegenden Piezos angeregt wird. Zudem ist zu sehen, dass eine fast ebene und zugleich räumlich-scharf begrenzte Schallwelle durch die Membran erzeugt wird.

<sup>1</sup> Bei der Auswertung der Ergebnisse des hochfrequenten Sensors musste darauf geachtet werden, dass sich der Sensor im Bezugssystem Wasser bewegt. Der optische Weg, das heißt der Weg, den das Licht zurück legt, berechnet sich aus dem geometrischen Weg multipliziert mit der Brechzahl. Wasser hat mit einer Brechzahl von  $n = 1,33$  eine große Brechzahl als Luft ( $n = 1$ ). Somit ist auch der optische Weg des Lichtes im Wasser um den Faktor 1,33 größer. Das Vibrometer misst also einen Weg, der um den Faktor 1,33 zu groß ist. Um den korrekten Amplitudenwert zu erhalten, muss man also alle Messergebnisse durch 1,33 dividieren, was jedoch ohne großen Aufwand in der PSV-Software mit Hilfe des Signalprozessors bewerkstelligt werden kann.

### Auswertung der Messdaten durch das IBMT

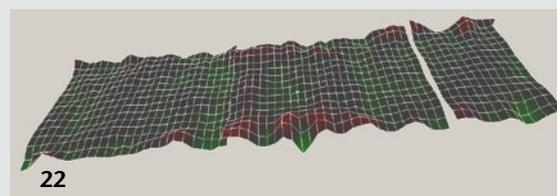
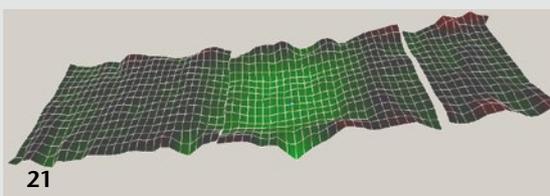
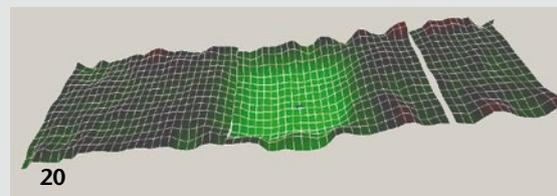
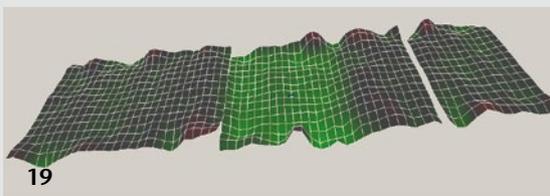
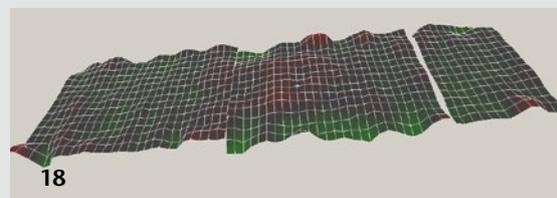
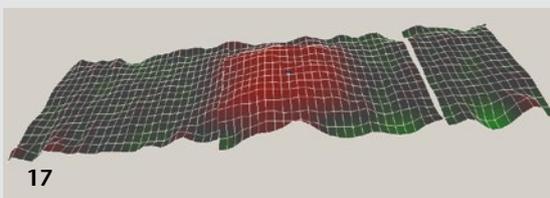
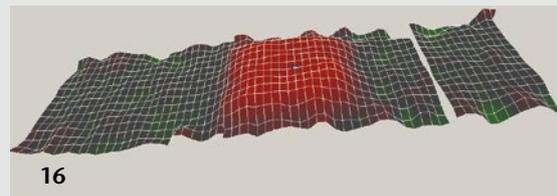
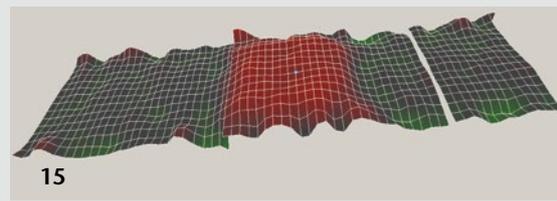
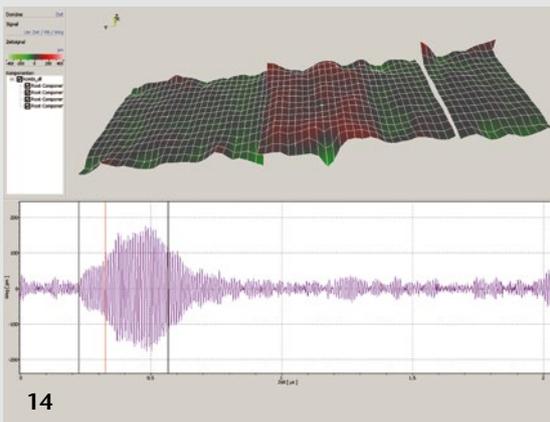
Anhand der im Wasser<sup>1</sup> gemessenen Out-of-Plane-Schwingung war es dem IBMT erneut möglich, über ein Modell das erzeugte Schallfeld räumlich zu simulieren. Die Messung im Wasser diente somit als realistische Grundlage für das simulierte Schallfeld.

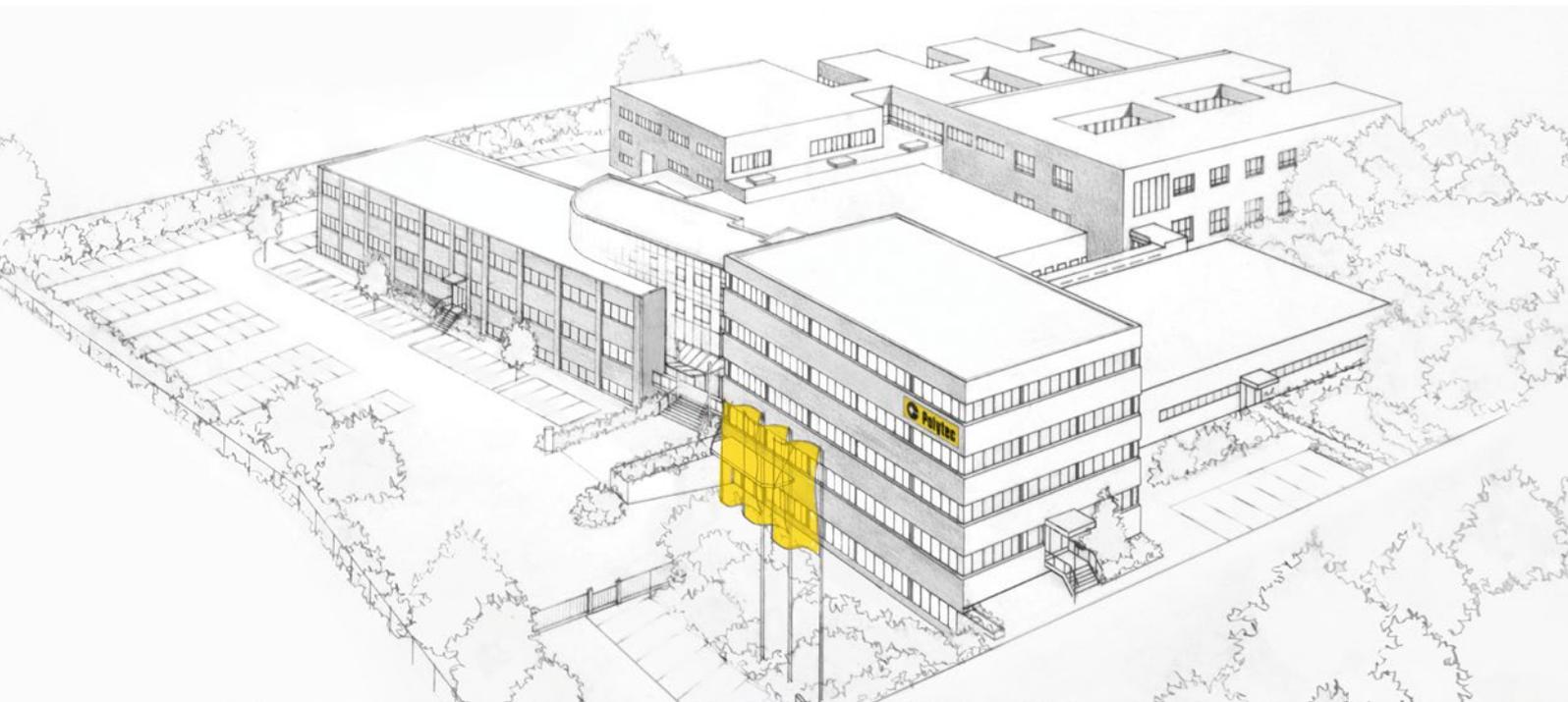
### Fazit

Mit dem UHF-120 Vibrometer kann das Schwingverhalten hochfrequent schwingender Systeme relativ einfach und mit großer Präzision bestimmt werden. Neben der hohen Genauigkeit des Messverfahrens ist auch der geringe zeitliche Aufwand der Messung ein bedeutender Vorteil des UHF-120, der gerade im Entwicklungsprozess ausschlaggebend sein kann. Beim IBMT konnte der

zeitliche Aufwand zur Bestimmung des Ultraschallfeldes durch die flächenhafte Vermessung der Transducer deutlich verringert werden. Anders als bei der Messung des dreidimensionalen Schallfeldes mit einem im Raum angebrachten Schallsensor kann nun einfach durch eine bzw. mehrere scannende Messungen und nachfolgende Simulation das resultierende Schallfeld bestimmt werden.

14 - 22  
Schwingverhalten des hochfrequenten Ultraschallsensors





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

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



**Polytec, Inc. (USA)**  
 North American  
 Headquarters  
 16400 Bake Parkway  
 Suites 150 & 200  
 Irvine, CA 92618  
 Tel. +1 949 943-3033  
 info@polytec.com

**Central Office**  
 1046 Baker Road  
 Dexter, MI 48130  
 Tel. +1 734 253-9428

**East Coast Office**  
 1 Cabot Road  
 Suites 101 & 102  
 Hudson, MA 01749  
 Tel. +1 508 417-1040



**Polytec Ltd.  
 (Great Britain)**  
 Lambda House  
 Batford Mill  
 Harpenden, Herts AL5 5BZ  
 Tel. +44 1582 711670  
 info@polytec-ltd.co.uk

**Polytec France S.A.S.**  
 Technosud II  
 Bâtiment A  
 99, Rue Pierre Semard  
 92320 Châtillon  
 Tel. +33 1 496569-00  
 info@polytec.fr



**Polytec Japan**  
 Arena Tower, 13th floor  
 3-1-9, Shinyokohama  
 Kohoku-ku, Yokohama-shi  
 Kanagawa 222-0033  
 Tel. +81 45 478-6980  
 info@polytec.co.jp

**Polytec South-East Asia  
 Pte Ltd**  
 Blk 4010 Ang Mo Kio Ave 10  
 #06-06 TechPlace 1  
 Singapore 569626  
 Tel. +65 64510886  
 info@polytec-sea.com



**Polytec China Ltd.**  
 Room 1026, Hanwei Plaza  
 No. 7 Guanghua Road  
 Chaoyang District  
 100004 Beijing  
 Tel. +86 10 65682591  
 info-cn@polytec.com