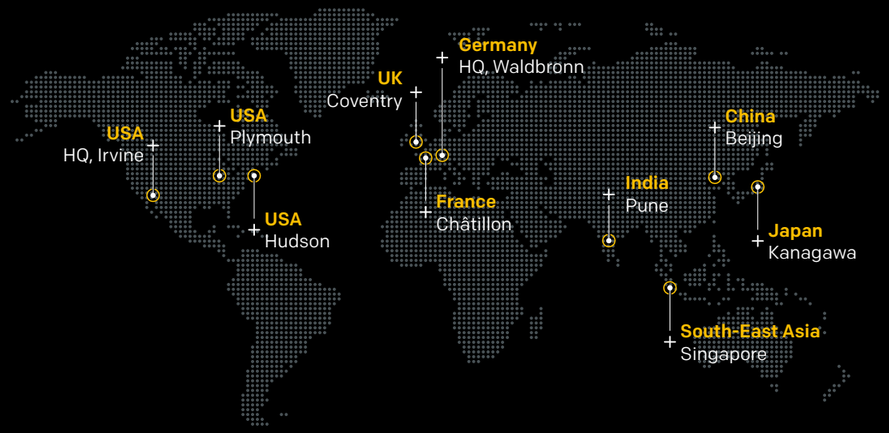


measure what matters. worldwide.

Den Ansprechpartner für Ihre Region finden Sie unter:
www.polytec.com/contact

Polytec GmbH · Germany · Polytec-Platz 1-7 · 76337 Waldbronn
52199/2025/10 - Änderungen der technischen Spezifikationen vorbehalten.

Polytec

Applikation //

Berührungslose Vibrometrie für Meso-Bauteile und Mikrostrukturen

polytec.com

1 MEMS-Mikrofon

Die Charakterisierung dynamischer Eigenschaften von Meso-Bauteilen und Mikrostrukturen stellt wegen der Abmessungen eine große Herausforderung in der Messtechnik dar. Meso-Bauteile, definiert als kleine Strukturen im mm^2-Bereich, meist eingebettet innerhalb größerer Systeme, umfassen kritische Komponenten wie:

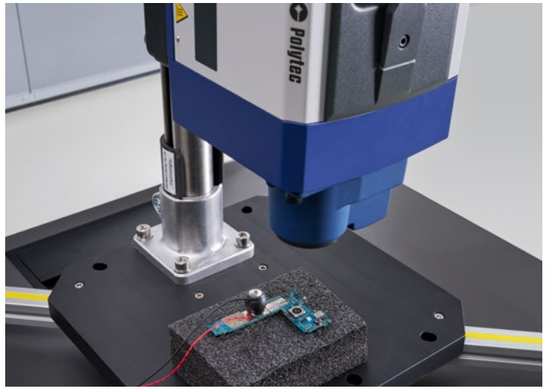
// Kameramodule in Smartphones
// Sensoren und Aktuatoren auf Leiterplatten
// Verbindungselemente wie Bonding-Drähte
// Größere MEMS- oder MOEMS-Bauelemente außerhalb des mikroskopischen Bereichs
// Biologische Strukturen wie Insekten oder Insektenteile
// Hörgeräte (extern oder implantierbar)
// Chirurgische Instrumente wie ultraschallgetriebene Spitzen und Klingen

Optiken für Meso-Anwendungen //

Scannende Laservibrometer wie das VibroScan QTec sind als universelle flächenhaft messende Vibrometer entwickelt, die in der optischen Basiskonfiguration auf Messobjekte im cm^2 ... m^2-Bereich optimiert sind. Mit geeigneten Zusatzoptiken erweitert sich der Scanbereich in den Meso- und Mikrobereich.

CLOSE-UP UNIT (KOAXIALEINHEIT)

Die PSV-A-X10 Close-up Unit ermöglicht parallaxenfreie Messungen mit LED-Ringbeleuchtung für guten Kontrast. Zusätzliche Micro-Scanlinsen reduzieren die Spotgröße und sorgen für eine gute Vergrößerung. Eine besondere Eigenschaft ist, dass sie eine nahezu parallele Strahlführung sicherstellen – ein Muss für spiegelnde Oberflächen, da durch einen schräg auftreffenden Strahl das Licht von der Sammeloptik weg reflektiert wird. Die erreichbaren Spotgrößen reichen von 8,4 µm (Neo) bis 36 µm (Xtra).



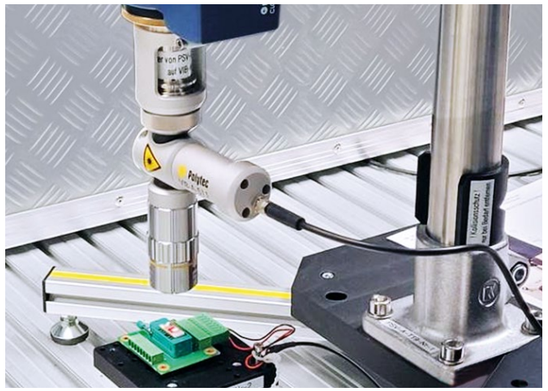
2 Messung Kameramodul mit Close-up Unit

MIKROSKOPERWEITERUNG

Für höchste räumliche Auflösung steht eine Mikroskoperweiterung zur Verfügung. Sie ergänzt die Close-up Unit, erhöht nochmals die Vergrößerung, schränkt aber Scanbereich und Messfeld ein. Sie verfügt über eine koaxiale LED-Beleuchtung für bestmögliche Bildqualität und ermöglicht die Verwendung von Mikroskopobjektiven unterschiedlicher Vergrößerung mit hoher numerischer Apertur. Die Spotgrößen liegen unter 2 µm bei 10x Vergrößerung und sind somit ideal, um kleinste Strukturen zu charakterisieren.

Spotgrößen unter

// 2 µm



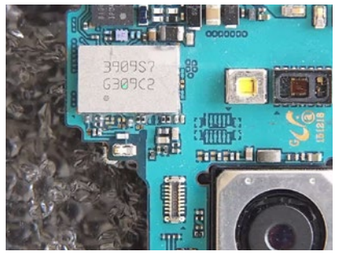
3 MEMS-Cantilever-Messung mit Mikroskoperweiterung

Technische Spezifikationen //

Parameter	Close-up Unit PSV-A-X10			Mikroskopobjektiv			
Lasertyp	Neo		Xtra	Neo		Xtra	
Vergrößerung	PSV-A-CL-Neo-125	PSV-A-CL-Neo-200	PSV-A-CL-Xtra-200	5x	10x	5x	10x
Spotgröße [µm]	8,4	13,5	36	<4	<2	<10	<5
Schärfentiefe [µm]	90	220	650	~20	~5	~50	~13
Arbeitsabstand [mm]	206	282	282	34*	34*	34*	34*
Sichtfeld Ø [mm]	21	33	33	~1,6	~0,8	~1,6	~0,8

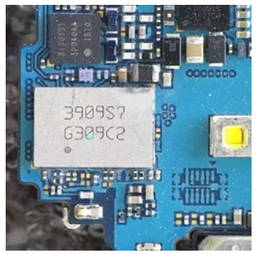
* Arbeitsabstand zum Mikroskopobjektiv

A Messobjekt ohne Zusatzoptik (optimaler Kamerazoom)



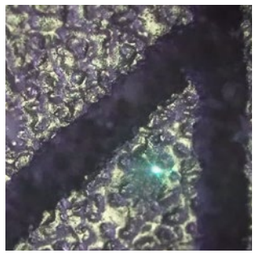
B Maximaler Kamerazoom und Nahlinse

C Close-up Unit zum Parallaxenausgleich (optimaler Kamerazoom)

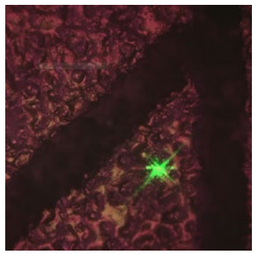


D Close-up Unit mit Micro-Scanlinse

E Close-up Unit mit 5x Mikroskopobjektiv



F Close-up Unit mit 10x Mikroskopobjektiv



G Close-up Unit mit 10x Mikroskopobjektiv, High Contrast Laser Display

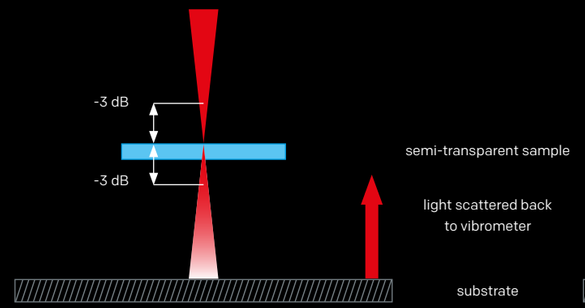
SCHÄRFENTIEFE UND SCHICHTDISKRIMINIERUNG

Die Wahl der numerischen Apertur (NA) beeinflusst direkt die Messeigenschaften:

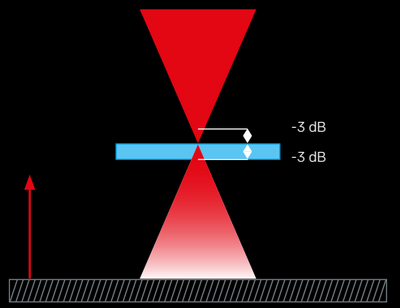
- Niedrige NA:
  Hohe Schärfentiefe, geeignet für unebene Oberflächen
- Hohe NA:
  Geringe Schärfentiefe, beste Diskriminierung von Strukturen und Substrat

Bei mehrschichtigen Proben reduzieren Rückreflexionen vom Substrat das Signal-Rausch-Verhältnis und können Amplitudenmessungen beeinflussen.

// Low NA – high depth of field



// High NA – low depth of field

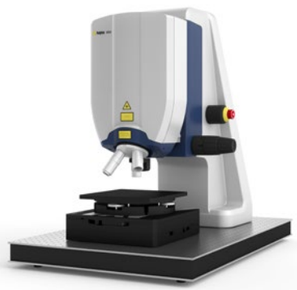


4 Zusammenhang numerische Apertur und Schärfentiefe

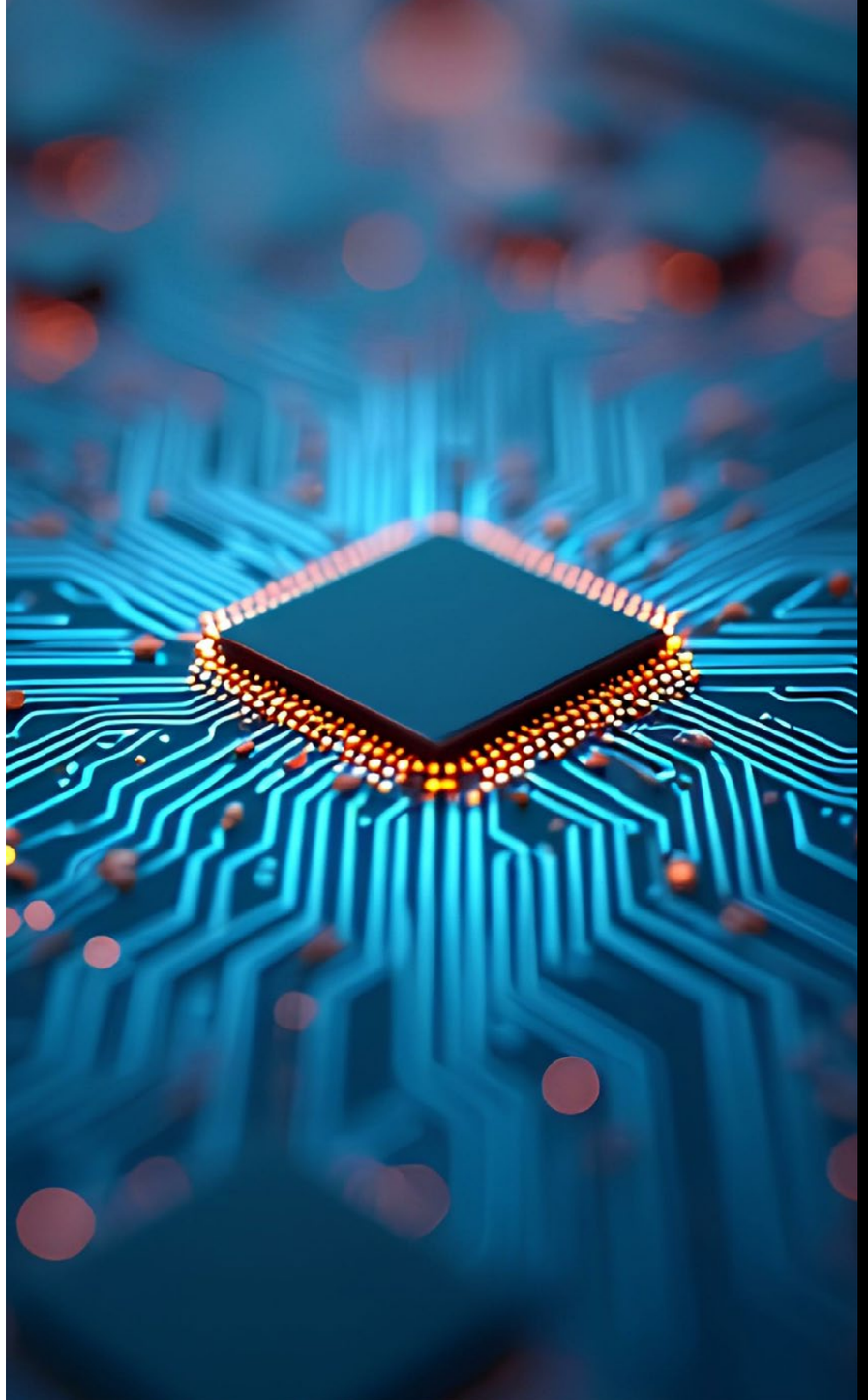
Systemvergleich: VibroScan vs. Micro System Analyzer //

Parameter	VibroScan QTec	MSA-060/MSA-600
Max. Sichtfeld	mehrere m^2	10×7 mm^2
Min. Sichtfeld Ø	~1 mm	~0,1 mm
Min. Spotgröße	<2 µm	0,8 µm
Beste räumliche Auflösung	~2 µm	~200 nm

5 VibroScan QTec Neo auf vertikalem Teststand



6 MSA-600 Micro System Analyzer

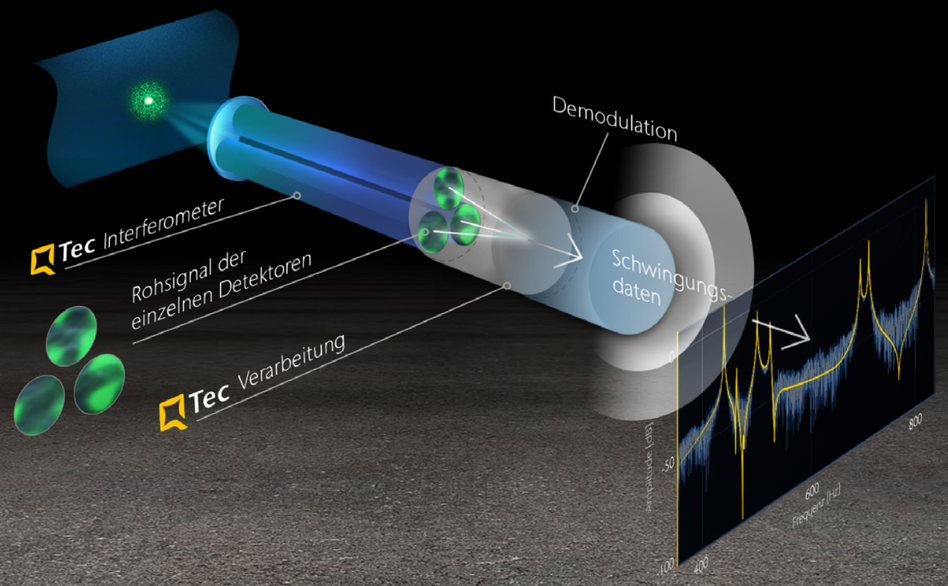


Software-Features für Meso-Anwendungen //

Kleine, oft filigrane Strukturen und hohe Vergrößerungen brauchen Unterstützung durch Software-Werkzeuge in der Bediensoftware.

Um die Messpunkte präzise zu definieren und zu messen, wird die integrierte Bildverarbeitung „High Contrast Laser Display“ eingesetzt. Es erzeugt einen „virtuellen Laserspot“, der Blendeffekte bei hochreflektierenden Oberflächen eliminiert und damit einen guten Kontrast auch auf schwierigen Oberflächen bietet. Systeme mit Pilotlaser (Xtra) verfügen über Laser-Dimmer, während der Messlaser bei Gaslasern wie dem HeNe-Laser des VibroScan QTec Neo nicht beeinflusst werden kann. Die Bildverarbeitung verlagert die Lösung in die Software.

Vorteile der berührungslosen Laser-Doppler-Vibrometrie //



Highlights //

Keine Beeinflussung des Messobjekts

\+

Hohe räumliche Auflösung

\+

Bandbreite bis 32 MHz (bis in den GHz-Bereich mit dedizierten Micro System Analyzern)

Die optisch messende Vibrometrie bietet entscheidende Vorteile. Die berührungslose Messung eliminiert Massenbeladungseffekte und mechanische Beeinflussung der Messobjekte. Dies ermöglicht die Verifikation der realen Leistung durch Messung von Amplituden, Resonanzfrequenzen und Auslenkungen ohne Beeinträchtigung der Struktur. Der mikrometergroße Lasermesspunkt erlaubt die Charakterisierung feinster Strukturdetails. Mit Close-up Units erreichen VibroScan QTec Neo Systeme Spotgrößen von 8,4 µm, während die Mikroskoperweiterung Spotgrößen bis unter 2 µm bieten. Damit einher geht eine bessere Steuerung der Schärfentiefe. Durch die Wahl der numerischen Apertur (NA) können Anwender die Schärfentiefe gezielt anpassen: niedrige NA für hohe Schärfentiefe, hohe NA für bessere Schichtdiskriminierung bei mehrschichtigen Strukturen.

Die hohe räumliche Auflösung bei scannenden Messungen ist zusammen mit der Bandbreite bis 32 MHz Voraussetzung für die Detektion hochfrequenter Ultraschallmoden.

Bis zu

// 32 MHz

Bandbreite

Anwendungsbeispiele aus der Makro-, Meso- und Mikro-Welt //

VALIDIERUNGSSTRATEGIEN

Grundlegend wichtig ist die Validierung von dynamischen Simulationsmodellen. Die flächenhafte Messung liefert neben den Resonanzfrequenzen auch die Betriebsschwingformen. In Curve-fitting-Verfahren lassen sich die modalen Parameter, besonders die Dämpfung/Q-Faktor, ermitteln. MAC-Vergleiche geben Auskunft über die Güte der Korrelation zwischen Modell und Test.

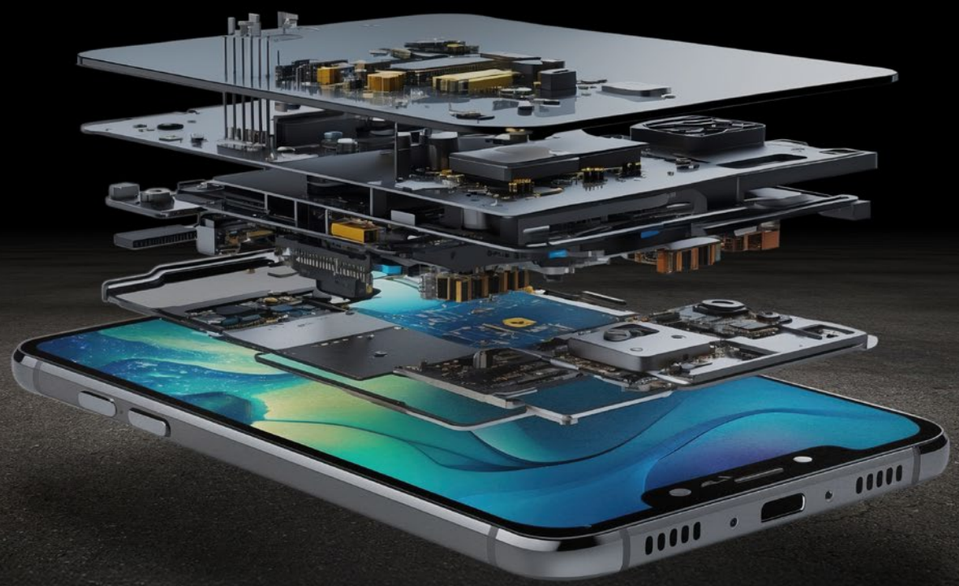
Sind Aktoren beteiligt, muss in der Regel eine Performance-Validierung unter Betriebsbedingungen ergänzt werden. So lassen sich Abweichungen frühzeitig erkennen. Dazu zählen die Messung realer Amplituden und Resonanzfrequenzen unter Betriebsbedingungen, Hub-/Auslenkungsmessungen (Displacement-Messungen) und das Prüfen der Gleichförmigkeit von Stellbewegungen durch Zeit-Weg-Kurven.

ANWENDUNGSFELDER IM ÜBERBLICK

Das Ziel ist, ein einziges Messsystem für all diese vielfältigen Aufgaben verwenden zu können. In der Akustik sind das Messaufgaben wie die Charakterisierung der Schallabstrahlung oder des Übersprechens zwischen Lautsprechern und Mikrofonen auf engem Bauraum. Elemente für haptisches Feedback erfordern entweder eine Bestimmung der Amplituden oder der Amplitudenverteilung und der Wellenausbreitung, z.B. bei haptischen Displays. Bewegungsanalysen von Aktoren und Sensoren geben Einblick in das tatsächliche Zeit-Weg-Verhalten von Stellgliedern, z. B. bei Fokusantrieben.

Consumer Electronics: Smartphone-Entwicklung im Detail //

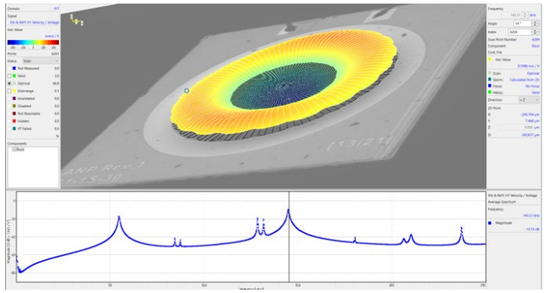
7 Smartphone-Komponenten



Die Entwicklung moderner Smartphones erfordert eine Vielzahl von Schwingungsanalysen auf verschiedenen Strukturebenen. Die hier genannten Anwendungsfelder treffen ebenso auf andere Geräte mit hoher Integrationsdichte aus der Medizin- oder Audiotechnik zu.

AKUSTISCHE OPTIMIERUNG

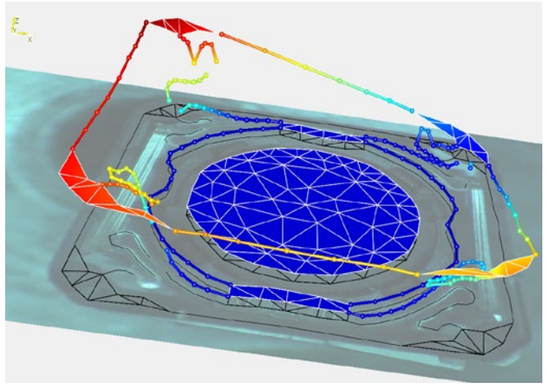
Guter Klang, ob beim Telefonieren oder Musikhören, ist ein wahrnehmbares Qualitätsmerkmal. Die Messung der akustischen Kopplung zwischen Lautsprechern und Mikrofonen sowie Kameramodulen (Übersprechen) liefert ebenso wertvolle Informationen, wie die Identifikation von elektromagnetisch induzierten Störgeräuschen (siehe „Singing Capacitor“ unten). Die Komponenten wie (MEMS)-Lautsprecher oder Cantilever-Mikrofone sind ebenso Teil der schwingungstechnischen Analyse – sowohl auf der Herstellerseite, als auch beim Integrator. Die Montage im späteren Produkt ändert das Verhalten z. T. signifikant.



8 Schwingform eines MEMS-Mikrofons. Durchmesser ca. 1 mm

BILDSTABILISIERUNG UND KAMERASYSTEME

Die präzise Auslenkung, Stabilisierung und Robustheit der Fokuseinheit der Kamera bedürfen besonderer Aufmerksamkeit. Schwingungen verschlechtern die Abbildungsleistung und können darüber hinaus noch zu Störgeräuschen beitragen. Die FEM-Validierung des Modells zusammen mit Betriebsschwingformanalysen trägt zur schnelleren Konvergenz zwischen Performance und Komfortanforderungen bei. Die geringe Baugröße insbesondere der Aufhängung verlangt einen kleinen Laserspot bei starker Vergrößerung. Die Anregung erfolgt mittels Shaker für eine modale Analyse und für Bewegungsanalyse durch den Aktor selbst.



9 Schwingform eines Smartphone-Kameramoduls

HAPTISCHE SYSTEME

Der Tastsinn reagiert sehr empfindlich auf Vibrationen, was in haptischen Feedback-Systemen nutzbar gemacht wird. Gängig sind haptische Motoren, wo Zeitsequenz-Geschwindigkeitsmessungen bei sinusförmiger Anregung (typisch 180 Hz) zur Validierung verwendet werden. Der feine Laserstrahl kommt der Kontaktfläche des Fingers so nahe, dass Messungen unter Realbedingungen zur psycho-sensorischen Forschung möglich sind.
Eine meist makroskopische Anwendung, die besonders im Automobilbereich auf dem Vormarsch ist, sind haptische Displays, die Wanderwellen zur Simulation von Tasteindrücken verwenden. Scanning Laser-Doppler-Vibrometer (SLDV) werden sowohl zur Visualisierung und Quantifizierung der Wellenausbreitung, aber auch zur späteren Qualitätssicherung in der Fertigung eingesetzt.

LEITERPLATTEN-ANALYSE: „SINGING CAPACITOR“

Ein häufiges Problem in der Smartphone-Entwicklung sind magnetostriktive Kräfte von Kondensatoren, die zu hörbaren Geräuschen führen. Die Leiterplatte wirkt dabei als „Lautsprecher“, angeregt durch den schwingenden Kondensator.

Messtechnische Herangehensweise //

1. Lokalisierung der Anregungsquellen:
   Scanning-Messungen identifizieren Schwingungshotspots auf der Leiterplatte

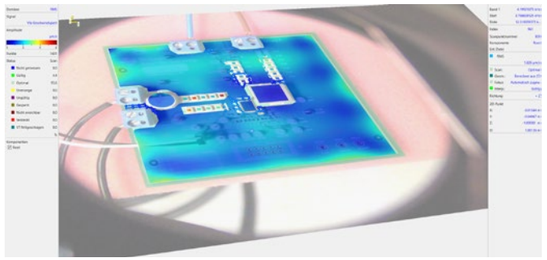
+

2. Frequenzanalyse:
   Mikrofonmessungen zeigen die scharfen Peaks der monofrequenten Kondensatorschwingungen und deren Harmonische. Dies dient als Nachweis der akustischen Abstrahlung der Leiterplatte

+

3. Strukturanalyse:
   ODS-Messungen charakterisieren sowohl die Kondensatorschwingungen als auch die Leiterplattenverformung. Daraus lassen sich konstruktive Maßnahmen zur Designverbesserung ableiten.

Diese systematische Analyse ermöglicht gezielte Designoptimierungen zur Reduzierung akustischer Emissionen.



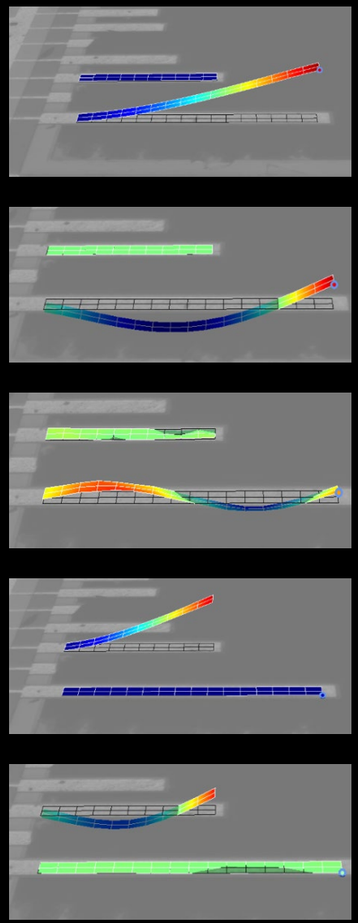
10 Anregung einer Leiterplatte durch Kondensatoren

MEMS UND MIKROMECHANIK-ANWENDUNGEN

In Kombination mit Close-up Unit und Mikroskopoptiken lassen sich auch winzige Bauteile wie MEMS-Mikrofone, Lautsprechermembranen oder Sensorelemente mit höchster Auflösung vermessen, um Schwingungen, Resonanzverhalten und Frequenzgänge sichtbar zu machen und quantitativ zu charakterisieren.

Im Audiobereich zeigt sich der Nutzen besonders deutlich: Die Biegeschwingungen von Cantilever-Mikrofonen lassen sich präzise aufnehmen, wodurch Rückschlüsse auf Empfindlichkeit und Resonanzoptimierung möglich werden. Ebenso können die Mikromembranen von Lautsprechern auf ihre akustische Effizienz untersucht werden – ein entscheidender Schritt für die Weiterentwicklung kompakter Audiosysteme.

Auch in der Sensorik ist das Laservibrometer ein unverzichtbares Werkzeug. Hier beginnt häufig der Übergang zu den explizit für die Mikrosystemtechnik entwickelten Micro System Analyzern (MSA). Oft sind aber die Strukturgrößen auch für VibroScan mit Mikroskoperweiterung zugänglich. Für Beschleunigungssensoren erlaubt es die Überprüfung des Verhaltens unter definierten Anregungen. Selbst Magnetometer, deren Störanfälligkeit durch mechanische Einflüsse untersucht werden muss, profitieren von der exakten Schwingungsanalyse. Gerade weil Inertial Measurement Units unterschiedlichste Sensorelemente kombinieren, liefert die optische Messtechnik hier einen wichtigen Beitrag zur Gesamtbewertung.



Frequency Band Definition - test

No.	Start	End	Peak	Bandwidth	Unit
1	79101.56	135595.7	104687.5	56494.14	Hz
2	241455.1	323046.9	278710.9	81591.8	Hz
3	618457	705224.6	646728.5	86767.63	Hz
4	1678565	1736865	1699512	58300.75	Hz
5	1762159	1816357	1786426	54199.13	Hz

11 MEMS-Cantilever mit Moden

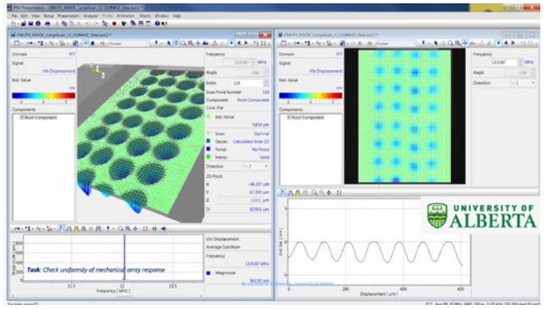
Medizinische und biologische Anwendungen //

Dieser Bereich hat wahrscheinlich die größte Bandbreite an Herausforderungen. Das betrifft Materialien, Oberflächen aber auch Messsituationen. Das Mittel der Wahl ist hier VibroScan QTec Neo mit HeNe-Laser, der neben dem kleinen Laserspot auch die Eigenschaft hat, durch Wasser, Glas und andere transparente Materialien messen zu können, was Untersuchungen in physiologischen Umgebungen ermöglicht.

ULTRASCHALL-TRANSDUCER

Für den medizinischen Ultraschall in der Diagnostik hat die Technologie der cMUT und pMUT Kosten und Baugröße deutlich reduziert. Die Integration des primary actuators in den eigentlichen Schallkopf ist eines der Beispiele, in dem Mikrostrukturen auf Meso- und Makrostrukturen treffen.

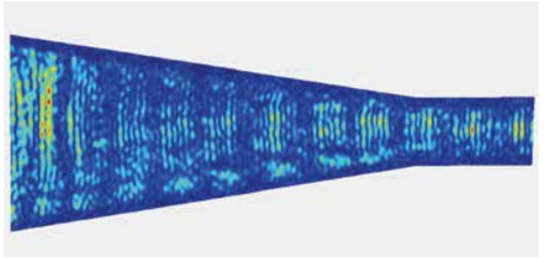
Die typische Aufgaben bei den Transducern sind:
- CMUT-Arrays: Überprüfung der Gleichmäßigkeit der mechanischen Array-Antwort bei resonanter Anregung
- PMUT-Entwicklung: Timing-Analyse und Übersprechcharakterisierung zwischen Elementen



12 CMUT Transducer: Schwingform zeigt Uniformität der Bewegung einzelner Elemente, rechts Profilschnitt

MIKROFLUIDIK

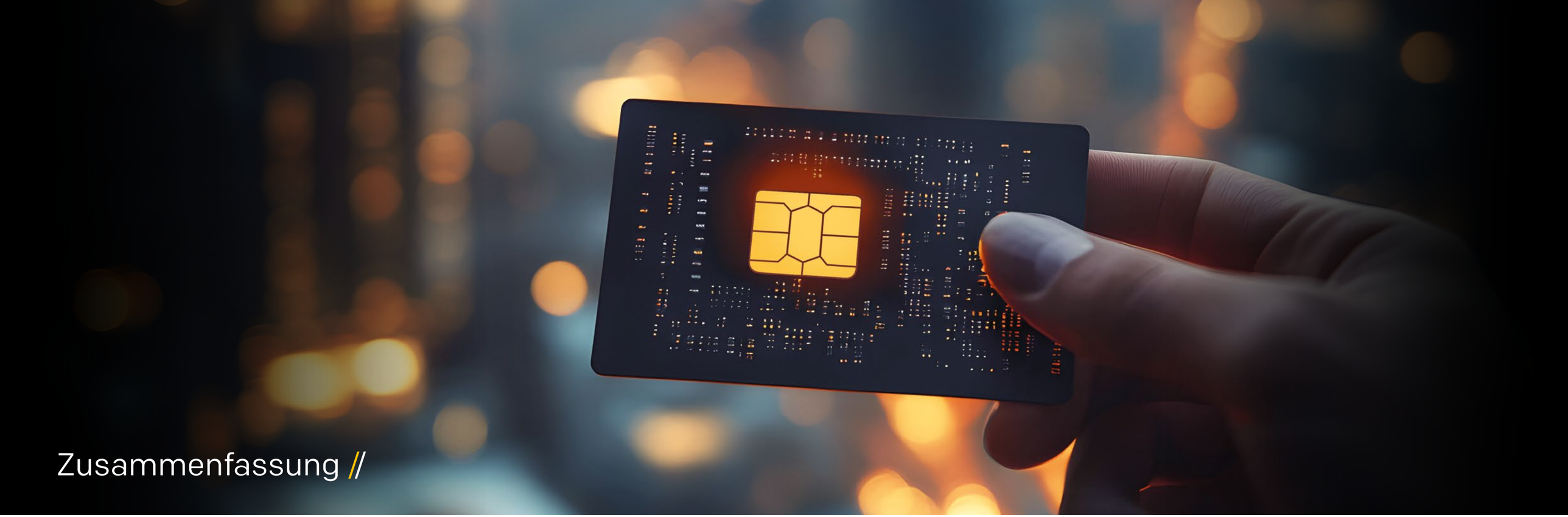
Lab-on-a-Chip ist ein Schlagwort, das ohne aktive Mikrofluidik nicht funktionieren würde. Integrierte Point-of-Care-Diagnostik-Anwendungen sind das Ziel diese Technologie. Zeit- und kostenintensive Labordiagnostik kann so auf ein Minimum reduziert werden. Mit Surface Acoustic Waves (SAW) werden Flüssigkeitsproben auf kostengünstigen Mikrochips manipuliert, separiert und transportiert. Die Strukturgrößen liegen dabei im Meso-Bereich. Ein bemerkenswertes Beispiel ist die Charakterisierung phononischer Kegel bei 9,35 MHz mit 190.000 Scanpunkten und Amplituden unter 1 nm für die Entwicklung integrierter Diagnostiksysteme.



13 Oberflächenwellen zur Tröpfchenmanipulation

MITTELOHRMECHANIK

In der Otologie sind Mesostrukturen die Regel, allerdings ebenfalls eingebettet in eine Makrostruktur, dem Schädel. Mit den Vorsatzoptiken lassen sich in-vivo die komplexen Schwingformen von Trommelfellen messen. Die Gehörknöchelchen sind für Einpunktvibrometer auch während einer mikro-chirurgischen OP zugänglich, wo sie zur Qualitätskontrolle von implantierten Hörhilfen eingesetzt werden. Für die flächenhafte Messung sind sie allerdings nur als Präparat zugänglich. Das Interesse gilt hier der Analyse der Übertragungsfunktion der Gehörknöchelchen-Kette und der Koppelung an das Innenohr.



Zusammenfassung //

Die Charakterisierung von Schwingungen und Bewegungen erfordert spezielle Optiken für unterschiedlich dimensionierte Strukturen. Sichtfeld und Schärfentiefe müssen ausbalanciert werden, um die jeweilige Aufgabe optimal zu erfüllen.

Spezielle mikroskopische Instrumente (MSA) lösen eine Größenordnung mehr Strukturdetails auf, beschränken dafür aber das Sichtfeld. VibroScan QTec Add-ons erweitern den Anwendungsbereich auf Meso- und sogar Mikrostrukturen, während spezifische Software-Features eine präzise Zielausrichtung und hohe Auflösung bei Meso-Bauteilen ermöglichen.

Die systematische Anwendung berührungsloser Laservibrometrie in der Entwicklung von Consumer Electronics, insbesondere Smartphones, demonstriert das breite Spektrum der Technologie, von der Gesamtsystemanalyse bis zur Charakterisierung einzelner MEMS-Komponenten.

Diese Applikationsnote basiert auf praktischen Erfahrungen des Application Engineering Teams und dokumentiert bewährte Messtechniken für die Untersuchung von Meso-Strukturen.