

## INSTRUMENTE UND SENSOREN FÜR DIE MODALANALYSE



Strukturdynamik  
Impedanzmessung  
Modalshaker  
Eigenfrequenz  
Impulshämmer  
Resonanz  
Schwingprüfung  
Betriebsfestigkeit

Die Messung und Auswertung der Frequenzantwort einer Struktur – auch Modalanalyse genannt – ist heutzutage wesentlicher Bestandteil der Produktentwicklung und -optimierung. Die Modalanalyse dient der experimentellen Untersuchung einer Vielzahl strukturdynamischer Probleme wie Vibrations- und Geräusentwicklung sowie Ermüdung.

Entscheidende Faktoren einer Modalanalyse sind die Anregung einer Struktur an verschiedenen Punkten und die Messung der sich ergebenden Antworten. Die Anregung geschieht üblicherweise durch Modalshaker oder mittels Impulshammeranschlag, wobei die eingeleitete Kraft mit Hilfe eines piezoelektrischen Kraftsensors - entweder im Hammer integriert oder am Einleitungspunkt der Struktur montiert - gemessen wird.

Die Antwort in Form von Schwingungen wird mit piezoelektrischen Beschleunigungssensoren an unterschiedlichen Punkten der Struktur gemessen und anschließend zur Eingangsgröße in Bezug gesetzt. Hieraus lassen sich Übertragungsfunktionen ermitteln und die Schwingeeigenschaften der Struktur durch Einsatz geeigneter Softwarepakete dynamisch unter verschiedenen Betriebszuständen abbilden.

Aus den Ergebnissen lassen sich Aussagen zu Eigenfrequenzen, aber auch zu Biege- und Torsionssteifigkeit, zur Haltbarkeit und zu eventuell möglichen Materialeinsparungen oder nötigen Versteifungen der Struktur gewinnen. Auf diese Weise leistet die Modalanalyse einen wesentlichen Beitrag zur Haltbarkeit, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit vieler Produkte wie Autokarosserien, Flugzeugteile, Maschinen und Anlagen sowie Brücken und Gebäudeteile.

Die hier vorgestellten Produkte für die Modalanalyse von PCB Piezotronics, Inc. und dem Tochterunternehmen The Modal Shop, Inc. (TMS) umfassen elektrodynamische Shaker und Impulshämmer zur Strukturangereger, Sensoren zur Messung der eingeleiteten Kraft und der resultierenden Strukturantwort sowie das passende Zubehör. TMS arbeitet eng mit dem Structural Dynamics Research Laboratory der University of Cincinnati zusammen und ist weltweit renommiert im Bereich der Modal- und Akustikanalyse.

## EINLEITUNG

Einleitung	2
Mini-SmartShaker™ – der All-in-One-Schwingerreger	3
Elektrodynamische Modalshaker	4
Dual-Purpose-Shaker	5
Nutzlastkurven	6
Miniaturschaker	6
Shakerkits	7
Zubehör für Shaker	8
Instrumentierte Impulshämmer	9-10
ICP®-Vibrationssensoren	11
ICP®-Impedanzmesskopf	11
ICP®-Kraftsensoren	11

# MINI-SMARTSHAKER™ – DER ALL-IN-ONE-SCHWINGERREGER

Die kompakten elektrodynamischen Schwingerreger K2007E01 und K2004E01 der Mini-SmartShaker-Serie von TMS sind ideal für mechanische Prüfungen an Kleingeräten, elektronischen Bauelementen und Miniaturmotoren sowie für die Modalanalyse an kleinen und leichten Strukturen. Der Leistungsverstärker ist trotz der äußerst kompakten Bauweise im Gehäuse integriert, wodurch eine hohe Flexibilität im stationären wie im mobilen Einsatz gewährleistet ist. Für die Ansteuerung genügt ein einfacher Signalgenerator oder ein Kopfhörerausgang (z.B. eines Smartphones). Die Spannungsversorgung kann wahlweise über ein kleines Netzteil oder das Bordnetz eines PKWs erfolgen.

Das Modell K2004E01 generiert Kräfte von 20 N und eignet sich mit seinem Frequenzbereich bis 11 kHz besonders für hochfrequente Strukturanregungen. Für niedrigere Frequenzen bietet sich hingegen das Modell K2007E01 an mit einem größeren Hub von 13 mm und einer maximalen Kräfteinleitung von 31 N. Beide Modelle bieten einen Übersteuerungsschutz, eine robuste Aufhängung aus Kohlefaserverbundstoff und eine schwenkbare Lagerung.

Mit ihren Abmessungen von nur etwa 9 x 9 x 14 cm und ihrem Gewicht von knapp 3 kg lassen sich die Shaker bequem zusammen mit dem externen Netzteil und den Nylonstingern in dem mitgelieferten Koffer transportieren.



Modelle K2004E01 und K2007E01

## Top-Features

- Kompaktes Gehäuse mit integriertem Leistungsverstärker
- Ermüdungsfrei und langzeitstabil
- Großer Dynamikbereich
- Exzellente Linearität
- Hohe Steifigkeit und Überlastsicherheit

## Typische Einsatzbereiche

- Vibrationstests an kleinen Bauteilen oder biomedizinischen Komponenten
- Experimentelle Modalanalyse
- Forschung und Entwicklung
- Messung der mechanischen Impedanz



# ELEKTRODYNAMISCHE MODALSHAKER

Die elektrodynamischen Modalshaker von TMS regen die zu untersuchende Struktur mit Kräften von 20 bis 440 N an und sind so für viele Aufgaben im Bereich der Modalanalyse geeignet. Sie sind leicht und können mit ihrer kompakten Baugröße und der EasyTurn™-Arretierung optimal am Prüfling platziert werden. Im Betrieb werden Wechselwirkungen zwischen Schwingerregger und Teststruktur dank der leichten Bauweise minimiert.

Die Durchgangsbohrung in der Ankerplatte der größeren Shaker vereinfacht die Montage des Stingers zwischen Teststruktur und Shaker. Der Stinger wird mit Hilfe eines Spannfutters an der Ankerplatte so arretiert, dass die aus dem Shaker herausragende Länge dem Abstand zur Struktur entspricht. Ein Kürzung der Stinger entfällt daher.

## Top-Features

- Kompakte Bauform
- Einfache Handhabung dank geringer Masse und EasyTurn™-Arretierung
- Großer Hub und weiter Frequenzbereich
- Durchgangsbohrung im Anker ermöglicht flexible Montage der Stinger

## Typische Einsatzbereiche

- Modalanalyse
- NVH-Untersuchungen in der Automobilentwicklung
- Ground-Vibration-Tests in der Luft- und Raumfahrtforschung



Modell 2100E11

Modell 2060E

Modell 2025E

Modelle 2004E und 2007E

## PRODUKTÜBERSICHT MODALSHAKER

Shaker-Modell	Max. Kraft (Spitze)	Max. Frequenz	Hub (Spitze-Spitze)	Gewicht
2100E11	440 N	5.400 Hz	25 mm	15 kg
2060E	267 N	6.000 Hz	36 mm	17 kg
2025E	58 N	9.000 Hz	19 mm	16 kg
2007E*	31 N	9.000 Hz	13 mm	3 kg
SmartShaker™ K2007E01*	31 N	9.000 Hz	13 mm	3 kg
2004E*	20 N	11.000 Hz	5 mm	3 kg
SmartShaker™ K2004E01*	20 N	11.000 Hz	5 mm	3 kg

\*) Shaker ohne Durchgangsbohrung in der Ankerplatte

# DUAL-PURPOSE-SHAKER

Dual-Purpose-Shaker können einerseits zur Strukturanregung in der Modalanalyse eingesetzt werden und bieten andererseits die Möglichkeit, Prüflinge mit einem Gewicht von bis zu 4,5 kg direkt auf die Ankerplatte mit einem Durchmesser von 80 mm zu montieren und einer Dauerschwingprüfung zu unterziehen. Die Testfrequenz kann in beiden Betriebsmodi bis zu 6.500 Hz betragen. Strukturen können mit bis zu 489 N Spitze angeregt werden. Die beiden Dual-Purpose-Modelle 2110E und 2075E verfügen wie die reinen Modalshaker über eine Durchgangsbohrung mit Spannfutter zur Aufnahme des Stingers mit Einstellbarkeit der genutzten Stingerlänge.

Auch die Modelle (K)2004E und (K)2007E (siehe linke Seite) erlauben neben dem Einsatz bei Modaluntersuchungen zusätzlich die Montage von kleinen Prüflingen auf dem Shaker.

## Top-Features

- Integrierte Montageplatte
- Kompakte Bauform
- EasyTurn™-Arretierung
- Großer Hub und weiter Frequenzbereich
- Durchgangsbohrung im Anker ermöglicht flexible Montage der Stinger

## Typische Einsatzbereiche

- Bauteil- und Komponentenprüfung
- Materialprüfung
- Modalanalyse
- Betriebsfestigkeitsuntersuchung



Modell 2110E



Modell 2075E



## PRODUKTÜBERSICHT DUAL-PURPOSE-SHAKER

Shaker-Modell	Max. Kraft (Spitze)	Max. Frequenz	Hub (Spitze-Spitze)	Gewicht
2110E	489 N	6.500 Hz	25 mm	25 kg
2075E	334 N	6.500 Hz	25 mm	16 kg

# NUTZLASTKURVEN

Leistungs- bzw. Nutzlastkurven erlauben die Auswahl eines geeigneten Shakers für eine Anwendung. Sie ermöglichen das Ablesen der maximal erreichbaren Beschleunigungsamplitude des Testsystems bei bekannter Gesamtnutzlast und Frequenz.

## 1. Wie hoch ist die Nutzlast für den Test?

Die Nutzlast umfasst die Masse des Prüflings und die Masse aller Bauteile, die zur Montage des Prüflings verwendet werden.

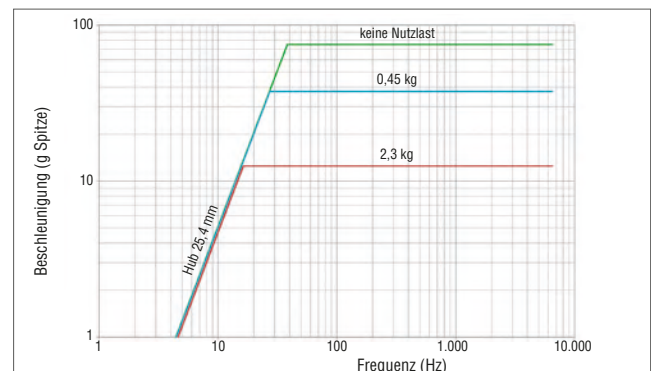
## 2. Welche Amplitude und Frequenz sind gefordert?

Überprüfen Sie die Amplituden- und Frequenzanforderungen für Ihre Anwendung. Rechnen Sie die geforderte Amplitude in Schwingbeschleunigung um, sofern Sie die Angabe als Schwinggeschwindigkeit oder Schwingweg vorliegen haben. Verwenden Sie als Einheit g Spitze für sinusförmige Signale oder g RMS für Random-Vibration-Untersuchungen. Liegt dieser Wert unterhalb des in der Nutzlastkurve abgelesenen Wertes für die geforderte Nutzlast und Frequenz, so kann der betreffende Shaker verwendet werden.

## 3. Prüfen Sie den erforderlichen Schwingweg

Prüfen Sie, ob der Hub des Shakers für den geforderten Schwingweg ausreicht. Im Nutzlastdiagramm bestimmt der Hub des Shakers den Anstiegsabschnitt der Kennlinie im niederfrequenten Bereich. Berechnen Sie für die Prüfung den Spitze-Spitze-Wert des Schwingwegs, indem Sie die Zahlenwerte (ohne Einheiten, signalisiert durch die geschweiften Klammern) der Beschleunigung  $a$  in  $g$  und der Frequenz  $f$  in Hz in die folgende Formel einsetzen:

$$d = 19,56 \text{ in} \cdot \{a\} : \{f\}^2 \text{ bzw. } d = 496,82 \text{ mm} \cdot \{a\} : \{f\}^2$$



Beispiel einer Nutzlastkurve für den Schwingerreger Modell 2075E

# MINIATURSHAKER

Der neue Miniaturshaker 2002E, der für Modaltests und eine Vielzahl von grundsätzlichen Vibrationstests entwickelt wurde, kann dank seiner kompakten Bauform und seines geringen Gewichts direkt auf die anzuregende Struktur montiert werden.



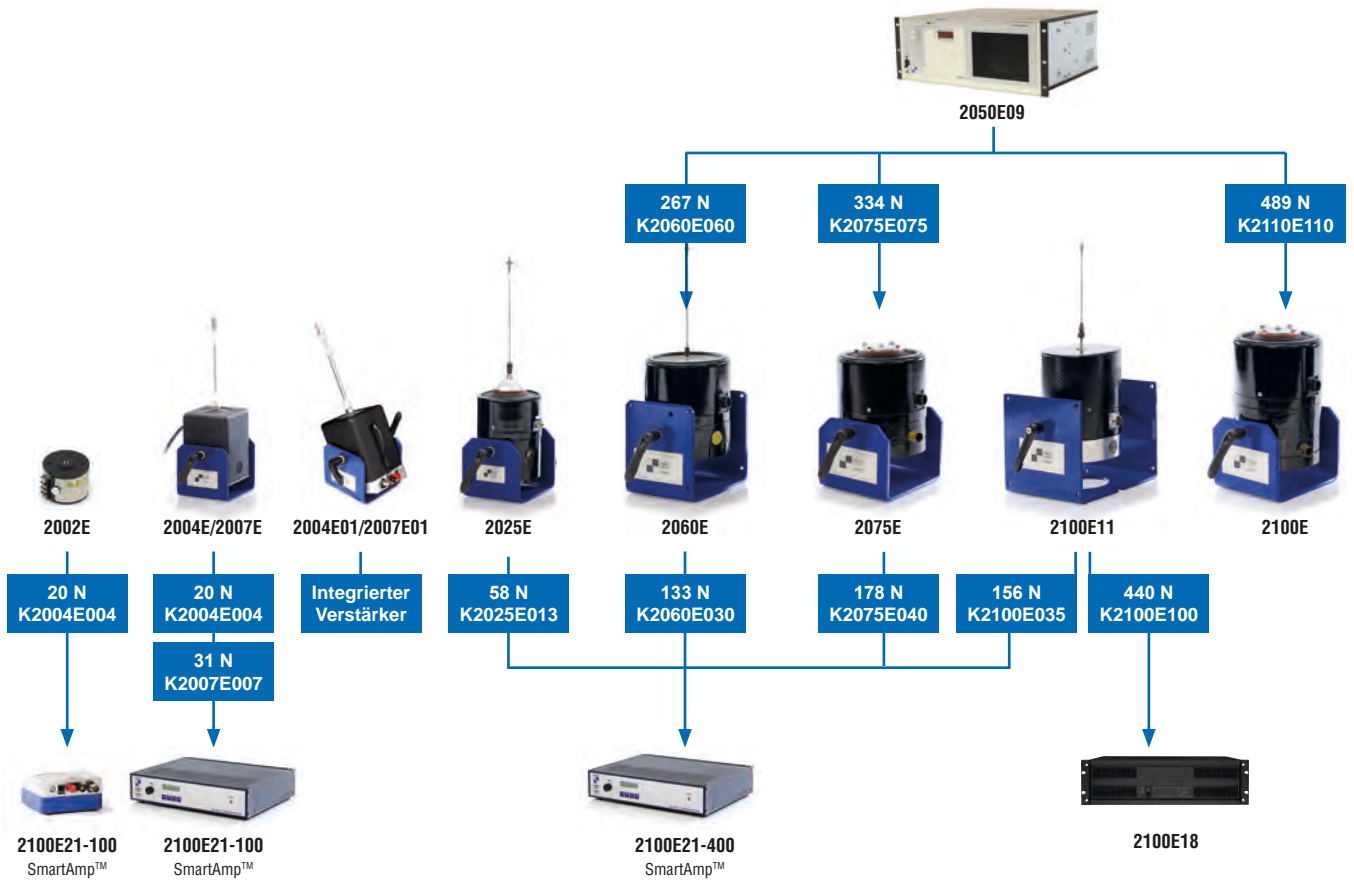
## Top-Features

- Einsatz an schwer zugänglichen Stellen möglich
- Kräfteinleitung bis 9 N (18 N mit Zusatzkühlung)
- Frequenzbereich 20 ... 3.000 Hz
- In-Line-Sicherung
- Kompatibel zu piezoelektrischen Wandlern und Shakerendstufen
- Abmessungen: 51 x 38 mm
- Gewicht: nur 250 Gramm

## Typische Einsatzbereiche

- Allgemeine Schwingungsuntersuchungen
- Experimentelle Modalanalyse
- Messung der mechanischen Impedanz

# SHAKERKITS



	Shakerkit	Max. Kraft (Spitze)	Max. Frequenz	Hub (Spitze-Spitze)	Shakermodell	Leistungsverstärker	Stingerkit
Mini	K2002E01	9 N	-	-	2002E	2000E	2000X08
	K2004E004	20 N	11.000 Hz	5 mm	2004E	2100E21-100	2110G06
	K2004E01	20 N	11.000 Hz	5 mm	2004E	Integriert	2110G06
	K2007E007	31 N	9.000 Hz	13 mm	2007E	2100E21-100	2110G06
	K2007E01	31 N	9.000 Hz	13 mm	2007E	Integriert	2110G06
Modal	K2025E013	58 N	9.000 Hz	19 mm	2025E	2100E21-400	2000X03
	K2060E030	133 N	6.000 Hz	36 mm	2060E	2100E21-400	2000X03
	K2100E035	156 N	5.400 Hz	25 mm	2100E11	2100E21-400	2100E11-001
	K2060E060*	267 N	6.000 Hz	36 mm	2060E	2050E09	2000X03
	K2100E100*	440 N	5.400 Hz	25 mm	2100E11	2100E18	2100E11-001
Dual-Purpose	K2075E040	178 N	6.500 Hz	25 mm	2075E	2100E21-400	2000X03
	K2075E075*	334 N	6.500 Hz	25 mm	2075E	2050E09	2000X03
	K2110E110*	489 N	6.500 Hz	25 mm	2110E	2050E09-FS	2000X03

# ZUBEHÖR FÜR SHAKER

## Modell 2000X03



### Stingerkit

- Im Lieferumfang der Schwingerreger 2025E, 2060E, 2075E und 2110E
- Stingertypen 2155G12 und 2150G12 sowie Spannfutter für „Through-Hole“-Montage
- Klaviersaite und Montagezubehör
- Schraubenschlüssel und 10-32-Montageadapter

## Modell 2050A



### Stativ

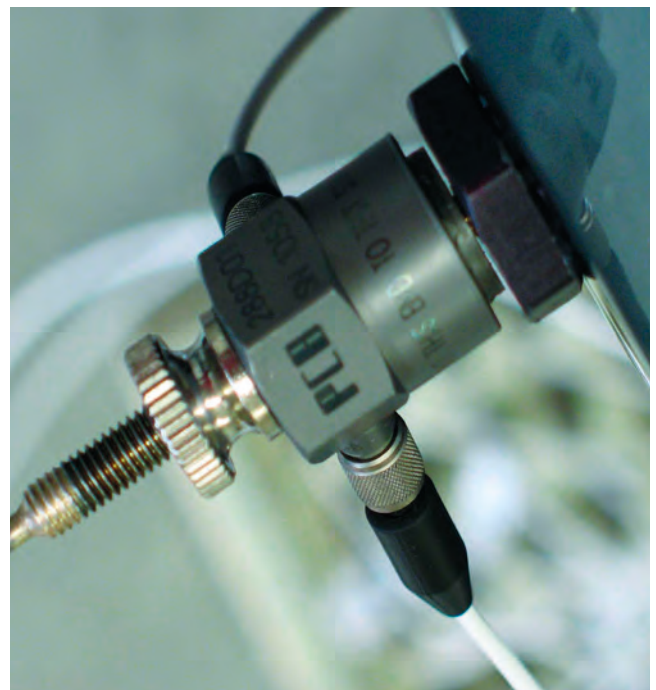
- Ermöglicht genaue Ausrichtung des Schwingerregers zum Prüfling durch Höhen- und Auslenkungsverstellung

## Modell M2000X01



### Expander für Schwingerreger 2075E und 2110E

- Durchmesser 18 cm
- Ermöglicht die sichere Montage größerer Bauteile
- 32 Bohrungen mit M5-Gewinde
- Geringes Gewicht dank Verwendung einer Magnesiumlegierung





# INSTRUMENTIERTE IMPULSHÄMMER

Neben der automatisierten Anregung einer Struktur durch einen Shaker besteht auch die Möglichkeit einer manuellen Impulsanregung unter Verwendung eines instrumentierten Hammers, dessen integrierter ICP®-Kraftsensor die Anregung dokumentiert. Ebenso wie bei einer Shakeranregung werden an der Teststruktur angebrachte Vibrationssensoren und eine Auswertesoftware verwendet, um das Übertragungsverhalten der Struktur zu bestimmen.

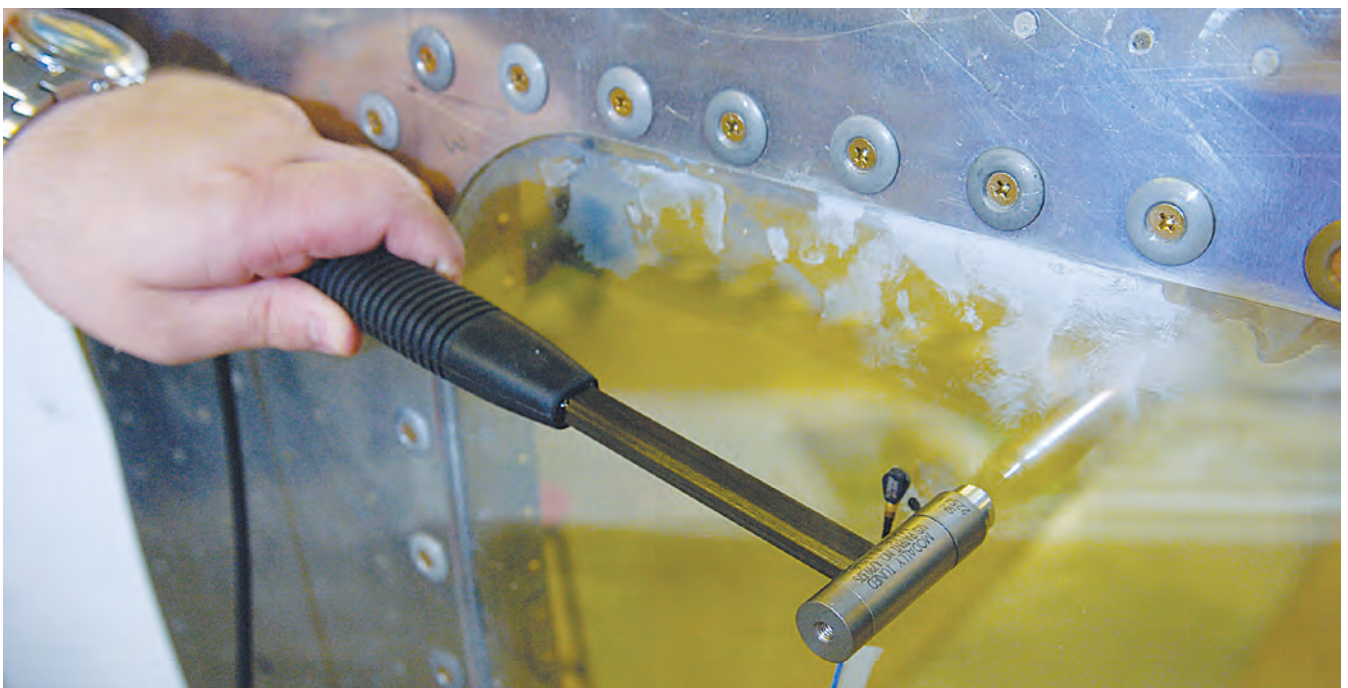
Auch Impulshämmer müssen sorgfältig unter Berücksichtigung der Messaufgabe ausgewählt werden. Je nach Beschaffenheit der zu untersuchenden Struktur bestehen unterschiedliche Anforderungen an die Größe, die Masse und den Messbereich des Impulshammers. Auswechselbare Hammerspitzen verschiedener Härtegrade gestatten es dem Anwender, den Frequenzbereich der Anregung zu beeinflussen.

## Top-Features








- „Modally Tuned®“-Design verhindert Doppelanregungen der Struktur
- Aufschlagtips unterschiedlicher Härte zur Anregung unterschiedlicher Frequenzbereiche
- Hammermasse 4,8 Gramm bis 5,4 kg
- Zusatzmassen (optional)

## Typische Einsatzbereiche

- Bauteil- und Komponentenprüfung
- Modalanalyse
- Resonanzuntersuchung



# IMPULSHÄMMER

<b>Modell 086E80</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Messbereich 222 N</li> <li>▪ Empfindlichkeit 22,5 mV/N</li> <li>▪ Resonanzfrequenz <math>\geq 100</math> kHz</li> <li>▪ Hammermasse 4,8 Gramm</li> </ul>
<b>Modelle 086C01 und 086C02</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Messbereich 444 N</li> <li>▪ Empfindlichkeit 11,2 mV/N</li> <li>▪ Resonanzfrequenz <math>\geq 22</math> kHz</li> <li>▪ Hammermasse 0,16 kg</li> </ul>
<b>Modell 086C03</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Messbereich 2.2 kN</li> <li>▪ Empfindlichkeit 2,25 mV/N</li> <li>▪ Resonanzfrequenz <math>\geq 22</math> kHz</li> <li>▪ Hammermasse 0,16 kg</li> </ul>
<b>Modell 086C04</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Messbereich 4.4 kN</li> <li>▪ Empfindlichkeit 1,1 mV/N</li> <li>▪ Resonanzfrequenz <math>\geq 22</math> kHz</li> <li>▪ Hammermasse 0,16 kg</li> </ul>
<b>Modell 086D05</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Messbereich 22,2 kN</li> <li>▪ Empfindlichkeit 0,23 mV/N</li> <li>▪ Resonanzfrequenz <math>\geq 22</math> kHz</li> <li>▪ Hammermasse 0,32 kg</li> </ul>
<b>Modell 086D20</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Messbereich 22,2 kN</li> <li>▪ Empfindlichkeit 0,23 mV/N</li> <li>▪ Resonanzfrequenz <math>\geq 12</math> kHz</li> <li>▪ Hammermasse 1,1 kg</li> </ul>
<b>Modell 086D50</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Messbereich 22,2 kN</li> <li>▪ Empfindlichkeit 0,23 mV/N</li> <li>▪ Resonanzfrequenz <math>\geq 5</math> kHz</li> <li>▪ Hammermasse 5,4 kg</li> </ul>

# VIBRATIONS- UND KRAFTSENSOREN FÜR DIE MODALANALYSE

Modelle 333B30 und 333B50 – ICP®-Modal-Vibrationssensoren	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Empfindlichkeit 100 und 1.000 mV/g</li> <li>▪ Messbereich 50 und 5 g</li> <li>▪ Frequenzbereich 0,5 ... 3.000 Hz</li> <li>▪ 10-32-Anschlussbuchse seitlich</li> </ul>
Modell 352A24/NC – ICP®-Miniatur-Vibrationssensor	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Empfindlichkeit 100 mV/g</li> <li>▪ Messbereich 50 g</li> <li>▪ Frequenzbereich 1 ... 8.000 Hz</li> <li>▪ 3-56-Anschlussbuchse seitlich</li> <li>▪ Masseisoliert</li> </ul>
Modell 339A30 – Triaxialer ICP®-Vibrationssensor	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Empfindlichkeit 10 mV/g</li> <li>▪ Messbereich 500 g</li> <li>▪ Temperaturkoeffizient &lt;math&gt;&lt;0,009\%/^{\circ}\text{C}&lt;/math&gt;</li> <li>▪ Arbeitstemperaturbereich -54 ... 163 °C</li> <li>▪ Frequenzbereich 2 ... 8.000 Hz</li> <li>▪ Mini-4-Pin-Anschlussbuchse seitlich</li> </ul>
Modell 356A15 – Triaxialer ICP®-Vibrationssensor	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Empfindlichkeit 100 mV/g</li> <li>▪ Messbereich 50 g</li> <li>▪ Frequenzbereich 2 ... 5.000 Hz</li> <li>▪ 4-Pin-Anschlussbuchse seitlich</li> </ul>
Modell 356B18 – Triaxialer ICP®-Vibrationssensor	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Empfindlichkeit 1.000 mV/g</li> <li>▪ Messbereich 5 g</li> <li>▪ Frequenzbereich 0,5 ... 3.000 Hz</li> <li>▪ 4-Pin-Anschlussbuchse seitlich</li> </ul>
Modell 288D01 – ICP®-Impedanzmesskopf	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kombination aus Kraft- und Vibrationssensor</li> <li>▪ Vibration: Messbereich 50 g, Empfindlichkeit 100 mV/g</li> <li>▪ Kraft: Messbereich 222 N, Empfindlichkeit 22 mV/N</li> <li>▪ Zwei 10-32-Anschlussbuchsen seitlich</li> </ul>
Serie 208C - ICP®-Kraftsensoren	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Messbereiche Druckkraft 0,045 ... 22,2 kN</li> <li>▪ Messbereiche Zugkraft 0,045 ... 2,22 kN</li> <li>▪ Frequenzbereich bis 36.000 Hz</li> <li>▪ 10-32-Anschlussbuchse seitlich</li> </ul>

