

**KISTLER**

measure. analyze. innovate.

**Sichere, zuverlässige  
und effiziente  
Weltraum-Programme**

## **Messtechnik für die Raumfahrtindustrie**

Bewährte Lösungen für alle Einsatzzwecke  
am Boden, in der Luft und im Weltraum



### Ausrichtung auf die Welt von morgen

Kistler entwickelt Messlösungen, bestehend aus Sensoren, Elektronik, Systemen und Services. Im physikalischen Grenzbereich zwischen Emissionsminderung, Qualitätskontrolle, Mobilität und Fahrzeugsicherheit liefern wir Spitzenleistungen für eine zukunftsorientierte Welt und schaffen ideale Bedingungen für die Industrie 4.0. Damit ermöglichen wir Innovation und Wachstum für und mit unseren Kunden.



Kistler steht für Fortschritt in den Bereichen Motorüberwachung, Fahrzeugsicherheit und Fahrdynamik und liefert wertvolle Daten für die Entwicklung effizienter Fahrzeuge von morgen.



Die Kistler Messtechnik sorgt für Höchstleistungen in der Sportdiagnostik, Verkehrsdatenerfassung, Schnittkraftanalyse und in anderen Anwendungen, bei denen absolute Messgenauigkeit gefordert ist.



Kistler Systeme unterstützen alle Schritte einer vernetzten, digitalisierten Fertigung und sorgen für maximale Prozesseffizienz und Wirtschaftlichkeit in intelligenten Fabriken der nächsten Generation.

# Editorial



Manuel Blattner  
Leiter SBF Test & Measurement

Die Raumfahrtindustrie ist ein wachsender Sektor mit zunehmender Bedeutung, der für die gesamte Menschheit von Nutzen ist. Wir verlassen uns täglich auf die Weltraumtechnologie, nutzen Mobiltelefone, navigieren per GPS und verfolgen die Wettervorhersagen. Sie betrifft wichtige Bereiche wie den Klimawandel, knappe Ressourcen, Gesundheit und das Älterwerden. Ein Leben ohne Satelliten ist nicht mehr vorstellbar.

Die Raumfahrtindustrie ist ein wesentlicher Impulsgeber für wissenschaftlichen Fortschritt und Innovation und damit

auch für die Wirtschaft. Die Entwicklung und Herstellung hochwertiger Raumfahrttechnik ist äußerst schwierig. Genau hier setzt Kistler an. Als Branchenkenner sind wir bestrebt, genau die Empfindlichkeit in der Sensorik zu entwickeln, die Sie benötigen und die der Prüfplan vorschreibt. Wir bieten Ihnen auch unsere professionelle Beratung und unseren weltweiten Kundendienst an.

Dies ist unser Beitrag zur erfolgreichen Durchführung Ihrer Raumfahrtmission. Wir sind uns bewusst, dass Sie höchste Betriebssicherheit Ihrer Ausrüstung erwarten.

## Inhalt

Raumfahrttests mit Kistler – eine gute Entscheidung	4
PiezoStar und hohe Temperaturstabilität	5
Sensordlösungen für extrem hohe Temperaturen	6
Kryogene Sensordlösungen	7
Leichte Verkabelungslösungen für Schwingungsprüfungen in der Umgebungssimulation	8
Sensor- und Kabellösungen mit geringer Ausgasung	9
Kundenspezifische Kraftdynamometerlösungen	11
Innovative cloud-basierte Modullösungen zur Datenerfassung und für Transparenz über die gesamte Messkette	12
Weltraumnutzlast: Schwingungsprüfungen in der Umgebungssimulation	14
Weltraumnutzlast: Force Limited Vibration Testing (FLVT)	16
Mikrovibrations- und Jitterprüfungen	18
Mechanische Eigenschaften in thermischen Vakuumkammern	20
Hochbeschleunigte Lebensdauerprüfung (HALT) und hochbeschleunigtes Belastungsscreening (HASS)	22
Raketentriebwerkstest: den Schub bestimmen	24
Raketentriebwerkstest: statische Drucküberwachung und -messung	26
Raketentriebwerkstest: dynamische Druck- und Schwingungsmessungen	28
Kistler Service: zunehmender Erfolg, den Sie messen können	30



Kistler ist der bevorzugte Partner für Messungen im Weltraum und sorgt für sichere, reibungslose und effiziente Flüge

## Raumfahrttests mit Kistler – eine gute Entscheidung

**Zur Begeisterung für Sensoren gehört auch die kompromisslose Überzeugung, dass kleine Dinge einen großen Unterschied in der Arbeitswelt von Ingenieuren, Forschern, Messtechnikern, Studenten und Herstellern machen können. Kistler, der Pionier der piezoelektrischen Messtechnik, ist stolz auf einen so treuen und zufriedenen Kundenkreis. Das Vertrauen und die Expertise, die wir in den vergangenen 60 Jahren aufgebaut haben, gründet sich auf unser beständiges Streben nach Perfektion und danach, die Bedürfnisse unserer Kunden zu erfüllen.**

Die Raumfahrtindustrie ist eine äußerst anspruchsvolle Branche, wenn es um die Entwicklung neuer Produkte und die Qualitätskontrolle geht. Ein unkontrollierter Start kann zur Explosion eines Raketenmotors führen. Die Geräte müssen oft leicht, robust und langlebig sein. Sie werden häufig anspruchsvollen Umgebungen ausgesetzt, die durch breite und extreme Temperaturbereiche, starke Druckschwankungen und hohe Schock- und Vibrationspegel gekennzeichnet sind.

Wir arbeiten mit renommierten Luft- und Raumfahrtzentren auf der ganzen Welt zusammen. Unsere Erfahrung in der Durchführung von Luft- und Raumfahrttests ermöglicht es uns, Ihnen eine Auswahl an Kraft-, Drehmoment-, Druck- und Beschleunigungssensoren anzubieten, die auf piezoelektrischen (PE), integrierten elektronischen piezoelektrischen (IEPE), Dehnungsmessstreifen oder piezoresistiven Technologien basieren, die für Weltraumnutzlast- oder Raketentests entwickelt wurden. Die in dieser Broschüre vorgestellten Sensoren

**Unsere Lösungen liefern die genauesten Messergebnisse durch:**

- Extrem leichte Beschleunigungssensoren mit geringer Ausgasung, großem Temperaturbereich und hoher Temperaturstabilität
- Empfindlichste Eigenschaften unter kryogenen Bedingungen
- Grosse Kraftmessbereiche in drei Achsen mit hoher Eigenfrequenz und sehr geringem Übersprechen
- Innovative cloud-basierte Datenerfassungslösungen
- Kundenspezifische Kraftdynamometer
- Hohe Lagerverfügbarkeit und großes Service-Netzwerk

bieten die breiteste dreiachsige Kraftaufnahme, die höchste Empfindlichkeit zur Messung von Mikrovibrationen und die stabilste Beständigkeit bei sehr hohen Temperaturen und im kryogenen Bereich, die auf dem Markt verfügbar ist.

Kistler ist ihr Partner – als Anbieter kompletter Messketten, durch sein breites Angebot an Sensoren plus einem umfassenden Know-how in den Bereichen Signalverarbeitung, Datenerfassung und Engineering.

Wir wollen uns Ihre Anerkennung verdienen – Messtechnik von Kistler – eine gute Entscheidung.

# PiezoStar und hohe Temperaturstabilität

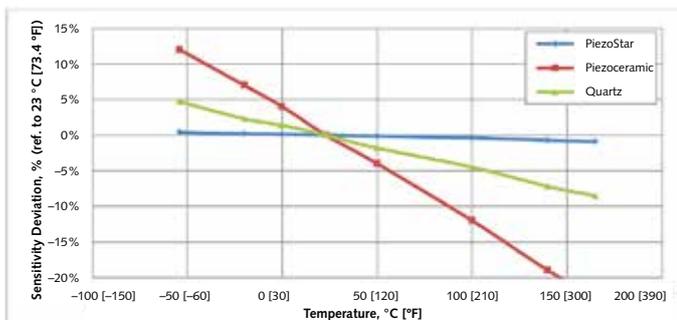
Die Markttendenzen zur Miniaturisierung und Stabilität bei Veränderungen oder höheren Betriebstemperaturen haben zu einem Bedarf an neuen Kristallarten geführt. Die von Kistler entwickelte PiezoStar-Kristallfamilie ist das Material, aus dem wir Sensoren herstellen, die bei Temperaturschwankungen nachweislich sehr geringe Änderungen der Geräteempfindlichkeit aufweisen und mit denen Druck, Kraft und Beschleunigung auch unter extremen Bedingungen gemessen werden können.

Unsere neuen Kristallverbindungen sind das Ergebnis von über zehn Jahren Zusammenarbeit und Forschung mit Universitäten auf der ganzen Welt und zeigen einzigartige Leistungen zur Verbesserung der Datenqualität bei physikalischen Messungen. Die PiezoStar-Elemente weisen eine hohe Steifigkeit auf. Dies führt zu einer hohen Eigenfrequenz der darauf aufbauenden Sensoren. Mit diesem Werkstoff können Druck-, Kraft- und Beschleunigungssensoren mit höherer Präzision und besserer Empfindlichkeit bei sehr hohen Betriebstemperaturen hergestellt werden.



PiezoStar Kristalle sind nur eine von vielen Innovationen von Kistler

Produktmerkmale	
	Einachsige, tropfenförmige PiezoStar-Beschleunigungssensoren Typ 8715B • Geringes Gewicht und hohe Temperaturbeständigkeit
	Dreiachsige Mini-PiezoStar-Beschleunigungssensoren Typ 8766A • Geringes Gewicht und hohe Temperaturbeständigkeit
	Universelle PE- und IEPE-PiezoStar-Drucksensoren Typ 601C • Hohe Empfindlichkeit und Temperaturstabilität
	Dreiachsiger Kraftaufnehmer Typ 9317 • Hohe Empfindlichkeit und hohe Steifigkeit für den Hochfrequenzbereich
	Kraftdynamometer Typ 9119AA • Sehr hohe Empfindlichkeit und hohe Steifigkeit für den Hochfrequenzbereich



Typische Empfindlichkeitsabweichung mit der Temperatur eines PiezoStar Spannungsmodus-Beschleunigungssensors im Vergleich zu einem Sensor auf Basis eines Keramik- oder Quarzsensorelements



Temperaturen von 700 °C dauerhaft für Druck- und Beschleunigungsmessungen und noch höhere Temperaturen für Kurzzeitmessungen sind durch unsere Hochtemperatur-Sensoren möglich.

## Sensordlösungen für extrem hohe Temperaturen

Die in unserem Hause entwickelten einkristallinen PiezoStar Sensorelemente sind die Grundlage für unsere überlegenen Ultrahochtemperatur-Druck- und Beschleunigungssensoren. Sie wurden bei Temperaturen von weit über 700 °C intensiven Testverfahren unterzogen. Im Gegensatz zu Sensorelementen auf Keramikbasis sind sie nicht pyroelektrisch und zeigen keinen Popcornereffekt.

Aufgrund ihrer hervorragenden Hochtemperaturbeständigkeit können die PiezoStar-Sensorelemente direkt an sehr heißen Messstellen platziert werden. Dies vereinfacht das System und liefert genauere Messungen. Masseisolierte, differenzielle Ausführungen, Robustheit gegen elektromagnetische Störungen, lange Lebensdauer und Zulassungen für den Betrieb in explosionsgefährdeten Bereichen zeichnen dieses Messsystem aus.

Produktmerkmale	
<p>Hochtemperatur-Druck- und Beschleunigungssensoren, differenzielle Ladungsverstärker und entsprechende Kabel sind die wichtigsten Elemente zur Konfiguration der erforderlichen Messkette. Unsere Komponenten sind in einer Vielzahl von Versionen erhältlich und so konzipiert, dass sie eine reibungslose Interoperabilität gewährleisten. Für die Schutzklasse Ex zertifizierte Komponenten runden das Portfolio ab.</p>	
	<p>Hochtemperatur-Drucksensor (700 °C) mit Hardline-Kabel Typ 6021A, 6023A und 6025A</p>
	<p>Hochtemperatur-Beschleunigungssensor (700 °C) mit Hardline-Kabel Typ 8211A</p>
	<p>Rauscharme Softline-Kabel Typ 1652A</p>
	<p>Differenzieller Ladungsverstärker Typ 5181A</p>

# Kryogene Sensorlösungen

Kryogene Untersuchungen im Bodentest, bei denen Weltraumtemperaturen erreicht oder unterschritten werden, spielen eine entscheidende Rolle für den zuverlässigen Betrieb von Geräten, die im Weltraum stationiert werden. Sowohl die Kraft- und Beschleunigungssensoren zur Untersuchung von Hintergrundrauschen während der Umgebungsprüfung von Nutzlasten im Weltraum als auch die Druck- und Beschleunigungssensoren, die während der Raketentests zur Optimierung von kryogenen Turbopumpen für die Handhabung von flüssigem Kraftstoff eingesetzt werden, müssen den kryogenen Anforderungen entsprechen.

## Beschleunigungssensoren

Die kryogenen, spannungsgesteuerten IEPE-Beschleunigungssensoren (piezoelektrisch mit integrierter Elektronik) von Kistler decken einen überragenden Temperaturbereich ab, der von den typischen  $-54\text{ °C}$  bis  $-196\text{ °C}$  reicht. Der Einsatz spezieller, integrierter, kryogener Schaltkreise und der PiezoStar Sensortechnologie fördern die Überlebensfähigkeit in anspruchsvollen Umgebungen, wie beispielsweise flüssigem Stickstoff oder in Gegenwart von Helium. Jeder Sensor ist hermetisch dicht und wird separat geprüft, um den thermischen Empfindlichkeitskoeffizienten bei  $-196\text{ °C}$  zu bestimmen. Damit wird ein zuverlässiger Betrieb mit genauen Messungen gewährleistet.

Wählen Sie aus einer Vielfalt von Beschleunigungssensoren aus, die sich von leichtgewichtigen Sensoren zur Minimierung von Massenbelastungseffekten bis hin zu dreiachsigen Sensorlösungen erstreckt.

## Kraftsensoren

Im Gegensatz zu DMS-Technologien weisen unsere Piezo-Kraftsensoren eine sehr hohe Temperaturstabilität mit einer Empfindlich-

keitsabweichung von 1 % auf. Der kryogene Betrieb erfordert einige Überlegungen zum Betriebskraftbereich. Dabei sind beispielsweise die Maximalwerte um 20 % bis 30 % zu reduzieren.

## Drucksensoren

Die Ladungsausgangsdrucksensoren der Typenreihe 60xC können auch bei niedrigen kryogenen Temperaturen eingesetzt werden und bieten die gleiche, sehr hohe Temperaturstabilität über den gesamten Temperaturbereich.

Produktmerkmale	
	Piezoelektrische Drucksensoren Typ 601C
	Einachsige, piezoelektrische Kraftsensoren Typ 9011A – 9071A
	Einachsige, kryogene Mini-Spannungsmodus-Beschleunigungssensoren Typ 8730
	Dreiachsiger Spannungsmodus-Beschleunigungssensor Typ 8793A250M8



Die kryogene Betriebsumgebung ist sehr anspruchsvoll: Flüssigwasserstoff- oder Flüssigheliumtemperaturen sind häufig anzutreffen.

# Leichte Verkabelungslösungen für Schwingungsprüfungen in der Umgebungssimulation

Jede auch noch so geringe Gewichtseinsparung führt zu einer geringeren Nutzlast beim Start und zu einer verbesserten Effizienz im Einsatz. Um Zeit zu sparen und um Kontaminationsrisiken zu vermeiden, verbleiben üblicherweise Kabel und Sensoren im Inneren des Satelliten, nachdem die Mikrovibrations-, Akustik-, Schock- und Vibrationstests mit dreiachsigen Beschleunigungssensoren durchgeführt wurden.

Die Miniaturbeschleunigungssensoren und -stecker von Kistler zeichnen sich durch geringes Gewicht und geringen Montageaufwand aus. Positive Kodierung und Blind-Mate-Anschlüsse unterstützen eine flexible Sensorbefestigung und gute elektrische Verbindungen.

Eine kritische Auswirkung, die man möglichst vermeiden möchte, ist der Massenlasteffekt durch Sensor und Kabel auf eine zu testende Leichtbaustruktur, da er eventuell die Resonanzmodi des zu bewertenden Objekts beeinflussen kann. Aus diesem Grund hat Kistler eine eigene 4-polige Miniatursteckverbindertechnologie für dreiachsige Beschleunigungssensoren entwickelt. Sie reduziert das Gewicht auf der Steckerseite und auch auf der Kabelseite. Bei der Verwendung von 20 Beschleunigungssensoren mit 5 m langen Kabeln könnte man beispielsweise ein Gesamtgewicht von lediglich 961 Gramm erreichen und damit eine bedeutende Gewichtseinsparung erzielen.

Produktmerkmale	
Sensor mit 4-poligem Ministecker und Kabeln	
	Sensor mit 4-poligem Ministecker und Kabeln
	Dreiachsige Mini-Spannungsmodus-Beschleunigungssensoren Typ 8763B
	4-polige Miniaturstecker-Kabel Typ 1784



Umwelt- und bodengebundene Tests der Weltraumstruktur (Quelle: ESA)

# Sensor- und Kabellösungen mit geringer Ausgasung

Die Materialausgasung bei Sensoren und Kabeln ist eine Herausforderung für alle elektronischen Geräte, die in Hochvakuum-Weltraumumgebungen eingesetzt werden. Sie kann eine Vielzahl von Anwendungen, beispielsweise Satelliten oder andere Geräte, ernsthaft beeinträchtigen.

Das freigesetzte Gas kann an Oberflächen, wie z. B. an Kameraobjektiven, kondensieren und damit die vorgesehene Anwendung der Geräte verhindern. Kistler bietet eine Reihe von ausgasungsarmen Beschleunigungssensoren in Titangehäusen

sowie Kraftmesszellen an, die alle vollständig hermetisch dicht sind. Wir können auch Lösungen für ausgasungsarme Kabel anbieten.

Alle nichtmetallischen Materialien außerhalb einer hermetisch dichten Verpackung, die für den Einsatz in einer Vakuumumgebung bestimmt ist, entsprechen den NASA-Standards mit einem TML<sup>1</sup> (Gesamtmasseverlust) kleiner oder gleich 1 % und einem CVCM<sup>1</sup> (aufgefangene flüchtige, kondensierbare Anteile) kleiner oder gleich 0,1 %.



Dreiaxiger Beschleunigungssensor mit geringer Ausgasung Typ 8763B und zugehöriges Kabel mit geringer Ausgasung Typ 1784B

Produktmerkmale	
Sensor- und Kabellösungen mit geringer Ausgasung	
	<p>Dreiaxige piezoelektrische Messzellen Typ 9017C-9077C und kompatibles Kabel mit geringer Ausgasung Typ 1698AS</p>
	<p>Dreiaxige, Mini-Spannungsmodus-Beschleunigungssensoren-Typ 8763B und kompatibles Kabel mit geringer Ausgasung Typ 1784B</p>
	<p>Piezoelektrische und IEPE-Drucksensoren Typ 601C und kompatibles Kabel mit geringer Ausgasung Typ 1631CR</p>

<sup>1</sup> TML- und CVCM-Werte werden entweder anhand der NASA-Dokumentation oder durch Testergebnisse eines externen Labors verifiziert.



Unser Entwicklungsteam wird eng mit Ihnen zusammenarbeiten, um Ihre spezifische Konfiguration sorgfältig zu analysieren und eine Sensorlösung anzubieten.

## Kundenspezifische Kraftdynamometerlösungen

Aufgrund der großen Vielfalt der Anforderungen an Größe und Genauigkeit von Prüflingen passen Standard-Dynamometer in vielen Fällen nicht. Es ist unser Anspruch, Ihnen genau das Messgerät zu liefern, das Ihren Anforderungen am besten entspricht. Unser Entwicklungsteam wird eng mit Ihnen zusammenarbeiten, um Ihre spezifische Konfiguration sorgfältig zu analysieren und eine Sensorlösung anzubieten.

Wir stellen die richtigen Fragen, auf der Grundlage unserer Erfahrungen, die wir im Laufe vieler Jahre bei der Entwicklung und Herstellung kundenspezifischer Dynamometer für Raumfahrtanwendungen erworben haben. Deshalb sind wir sehr darauf bedacht, von Anfang an die richtigen Maßnahmen durchzuführen.

### Professionelle Entwicklungs- und Fertigungsleistungen von Kistler – Ihre Vorteile:

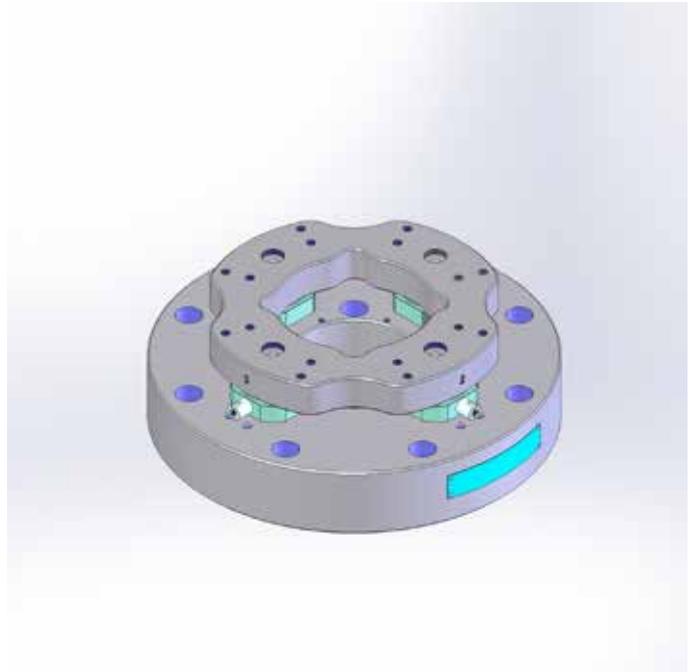
- Sorgfältige Analyse Ihrer Anforderungen
- Kontrollzeichnungen, einschließlich der Konstruktion des Dynamometers und der wichtigsten Spezifikationen
- Abnahme durch den Kunden
- Detaillierte Entwicklung und Fertigung aller Teile sowie Montage des Dynamometers
- Werksseitige Kalibrierung auf unserer einzigartigen 3-Komponenten-Referenzkraftpresse
- Lieferung des Enddynamometers, einschließlich Kalibrierzertifikat und Bode-Diagramm der Eigenfrequenz



Werkseitige Kalibrierung auf unserer einzigartigen 3-Komponenten-Referenzkraftpresse

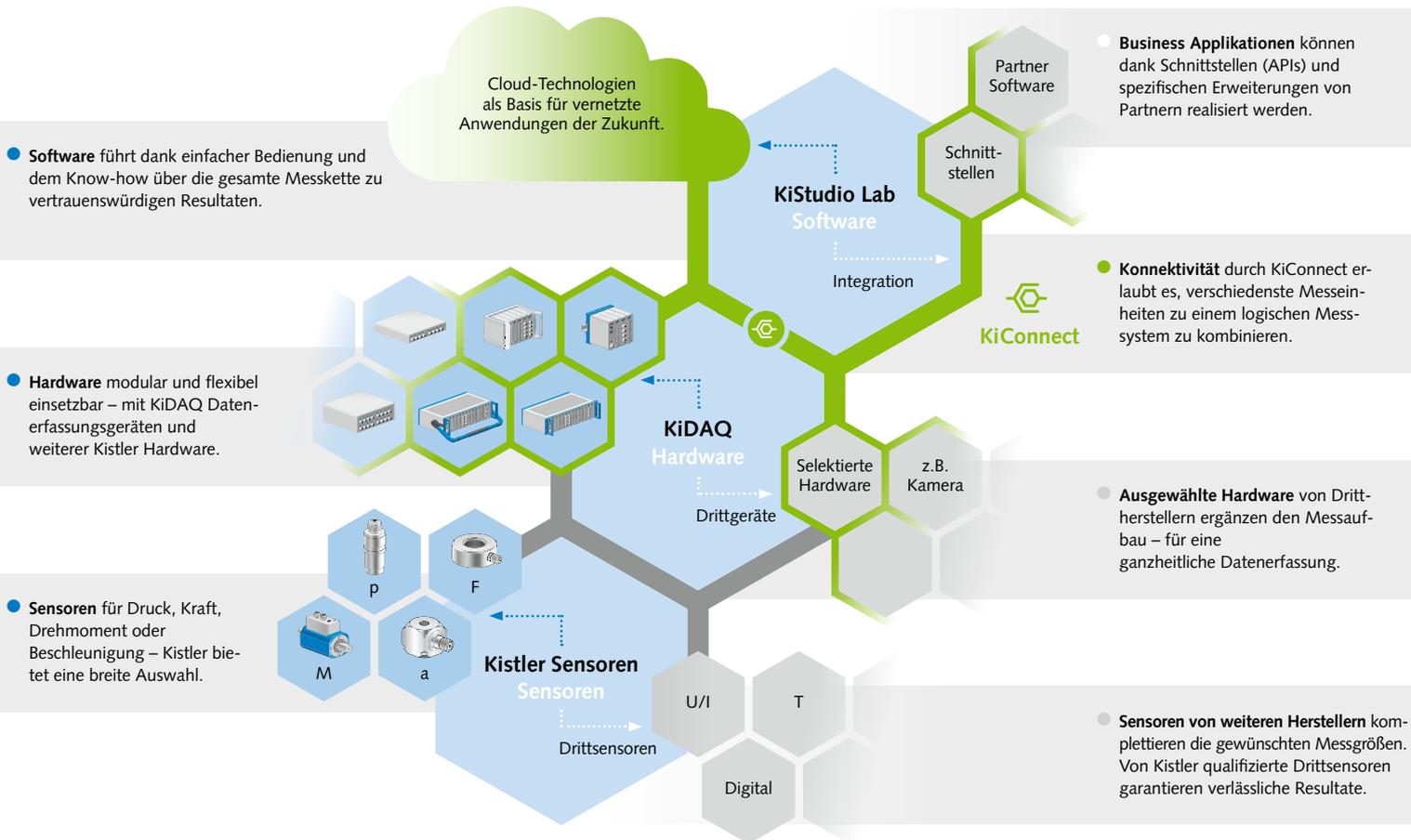
Aufgrund unserer absoluten Verpflichtung zur Qualität können wir versichern: Das Dynamometer entspricht Ihren Vorgaben und arbeitet korrekt, von Anfang an und über den gesamten Prüfplan hinweg.

- Mehrkomponententechnologie**  
 Unsere 3-Komponenten-Kraftsensoren sind das Herzstück aller kundenspezifischen Dynamometer.
- Aus einer Hand**  
 Für Sensoren, die unter extremen Betriebsbedingungen eingesetzt werden sollen, züchtet Kistler eigene Kristalle. Präzisionsmessgeräte von Kistler unterliegen einer 100 %igen Qualitätskontrolle. Alle Fertigungsschritte werden im eigenen Haus durchgeführt.
- Hochspezialisiert**  
 Unsere kundenspezifischen Hochleistungsdynamometer erfüllen Ihre Anforderungen, im Unterschied zu selbstgebaute Dynamometern.
- Professionell**  
 Langjährige Erfahrung und Kompetenz in der Entwicklung und Herstellung von Dynamometern für die Raumfahrtindustrie machen uns zu Ihrem idealen Partner. Wir sprechen Ihre Sprache und wissen genau, worum es geht.



6-Komponenten-Dynamometer. Das Dynamometer besteht aus vier Kraftsensoren vom Typ 9047C. Die Deck- und Grundplatte wurden für die spezifischen Anforderungen des Kunden entwickelt. Eine Kalibrierung mit einem spezifischen Adapter sorgt für eine Messsituation wie in der realen Anwendung. (Quelle: Bosch Bühl)

Produktmerkmale	
	Spezielles Dynamometer für die Schubmessung
	Exportierte Mikro vibrationsmessplattform für kryokühlerspezifische Dynamometer
	Kundenspezifischer Kraftaufnehmer für Force Limited Vibration Testing (FLVT)



KiDAQ-Messtechnologie im Überblick

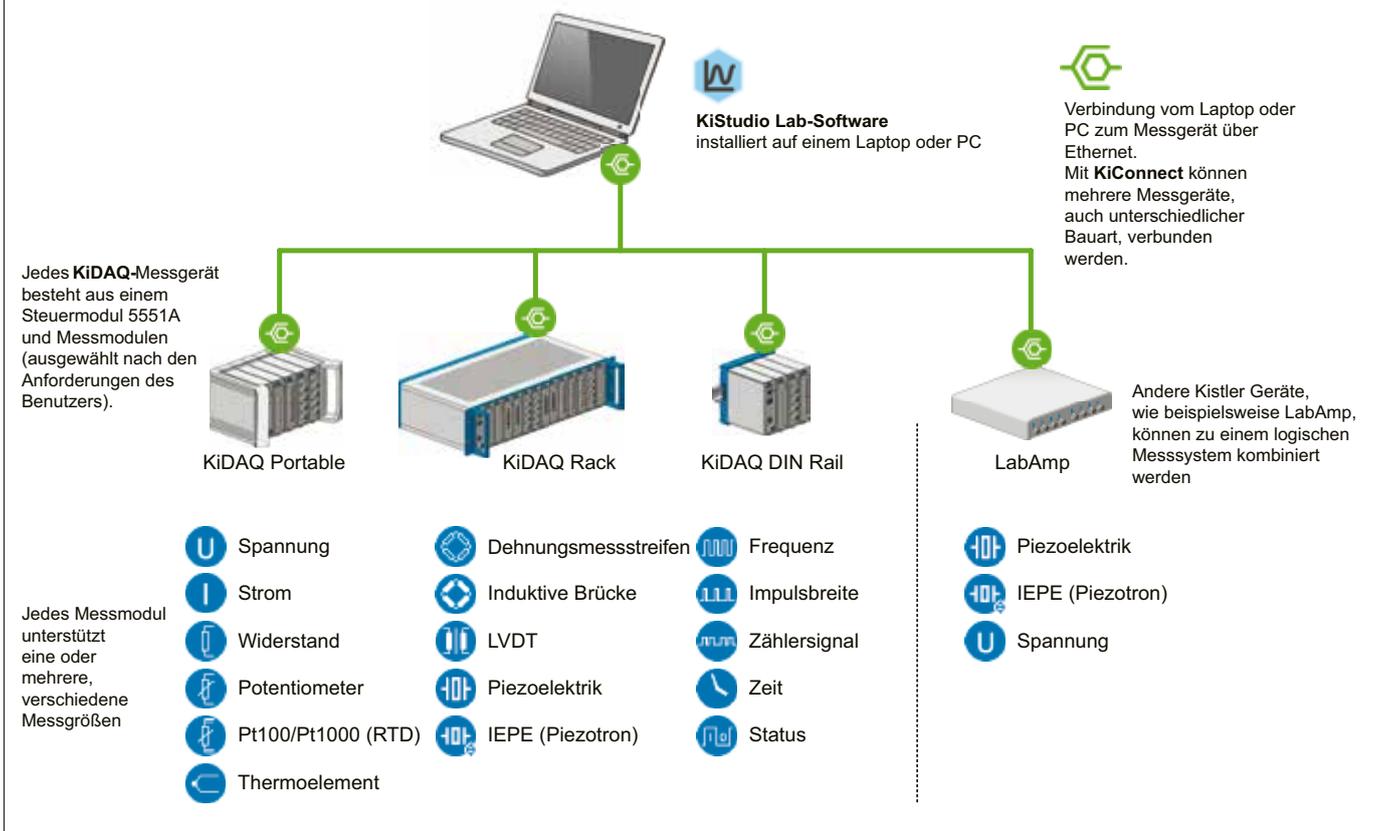
# Innovative cloud-basierte Modullösungen zur Datenerfassung und für Transparenz über die gesamte Messkette

In der Weltraumforschung und -entwicklung beginnt jede Messaufgabe meist mit einem aufwendigen und langwierigen Testaufbau. Der Grund: Der Messtechniker oder Messingenieur muss vorab die Komponenten der Messkette unterschiedlicher Hersteller miteinander verbinden und im System kombinieren. Mit KiDAQ präsentiert Kistler ein innovatives und ganzheitliches Datenerfassungssystem. Damit bieten die Messtechnikexperten alle Komponenten einer Messaufgabe aus einer Hand an.

KiConnect ist das Bindeglied im KiDAQ Datenerfassungssystem. Die intelligente Technologie erlaubt dem Anwender, Kistler Produkte und ausgewählte Drittgeräte flexibel und einfach zu einem logischen Messsetup zusammenzuschließen und präzise, zeitsynchronisierte Messungen dank Precision Time Protocol (PTP) durchzuführen.

Als führender Hersteller für piezoelektrische Messtechnik mit jahrzehntelanger Erfahrung besitzt Kistler ein großes Messtechnik- und Applikations-Know-how. Dieses Wissen erlaubt den Messtechnikexperten, zuverlässige Aussagen über die Messunsicherheit der gesamten Messkette zu geben. Mittels KiXact-Technologie teilt Kistler dieses Know-how mit seinen Anwendern und stellt eine automatische Berechnung der Messunsicherheit zur Verfügung. Mit der Kenntnis von Messunsicherheitsanteilen und deren Größenordnung kann der Anwender einzelne Anteile durch geänderte Einsatzbedingungen oder optimierte Geräteauswahl verringern und profitiert von einem Höchstmaß an Transparenz und Know-how. Die KiXact-Technologie wurde von Kistler zum Patent angemeldet.

## Produktmerkmale



Ein hochmodulares Hardware-Portfolio, das sich dank KiConnect-Technologie untereinander verbinden lässt.



Qualifikation von Satelliten: Vibrationstests gehören weltweit zu den am sorgfältigsten durchgeführten Tests

## Weltraumnutzlast: Schwingungsprüfungen in der Umgebungssimulation

Wegen der hohen Kosten werden Qualifikationstests für Satelliten unter Vibrationsbelastungen weltweit besonders sorgfältig durchgeführt. Die Nutzlast wird sowohl während der Produktentwicklung zur Optimierung der Struktur als auch während der Fertigung umfangreichen Tests unterzogen, um die Überlebensfähigkeit bei Start, Betrieb und Langzeiteinsatz zu gewährleisten.

Um die Umgebungsbedingungen zu simulieren, denen eine Weltraumnutzlast während des Raketenstarts ausgesetzt ist, werden elektrodynamische Vibrationstische eingesetzt, um realistische dynamische Belastungstests durchzuführen.

Die Nutzlast wird durch eine breite Palette von Profilen angeregt, die von Mikrovibrationen bis hin zu Anregungen mit Sinus und Rauschen oder Schock reichen. Prüfengeure analysieren gründlich die dynamischen Prozesse, die im Ausgang der Beschleunigungssensoren gemessen werden, um sie mit ihren Berechnungsmodellen zu vergleichen.



Satelliten-Umgebungsvibrationstests mit Sinus- und Rauschanregung (Quelle: NASA)

## Wichtige Technologien für die Anwendung

- Dreiaxiale Beschleunigungssensoren in Leichtbauweise**  
 Raumfahrzeugstrukturen bestehen oft aus dünnen, leichten Materialien und erfordern Beschleunigungssensoren mit geringem Gewicht. In einigen Fällen verbleiben Sensoren und Kabel beim Start im Satelliten. Die Gewichtsbelastung wird dadurch noch kritischer.
- Geringes Ausgasen**  
 Das hohe Vakuumniveau einer Weltraumumgebung ruft eine Materialausgasung hervor, bei der eingeschlossenes Gas freigesetzt wird. Dieses kann an Oberflächen, wie z. B. an Kameraobjektiven, kondensieren und damit die Funktion dieser Geräte behindern. In manchen Fällen dürfen die hermetisch dichten Sensoren und ausgasungsarmen Verkabelungslösungen von Kistler in thermischen Vakuumkammern eingesetzt werden, oder sie verbleiben beim Start im Satelliten.
- Rauscharm**  
 Die Weltraumnutzlast muss einer Vielzahl von Umweltprüfungen standhalten, von Mikrovibrationen, die eine sehr niedrige Sensoransprechschwelle erfordern, bis hin zu hohen g- oder Beschleunigungswerten, die bei der Stichprobenschwingprüfung auftreten. Mit den rauscharmen Lösungen von Kistler kann ein- und derselbe Sensor verwendet werden, um das gesamte Panel abzudecken.

Produktmerkmale	
	Dreiaxiger Mini-Spannungsmodus-Beschleunigungssensor (50 g) Typ 8763B050AB
	¼-28-Kabel mit 4-poliger Mini-Verbindung auf Standard und mit geringer Ausgasung Typ 1784M016SP
	Kabel mit geringer Ausgasung und 4-poliger Mini-Verbindung auf Kabelschwänze Typ 1784M015SP
	Kabel mit geringer Ausgasung und 4-poliger Mini-Verbindung auf 3xBNC Typ 1784BLK04SP



3-Komponenten-Kraftaufnehmer werden auf eine Grundplatte montiert, die mit dem Vibrationstisch verbunden ist. Anschließend wird ein Kräfteing an der Messzelle montiert, die zwischen einen oberen und unteren Ring gekeilt wird. Die Nutzlast wird für den FLV-Test auf den oberen Ring montiert. (Quelle: ESA).

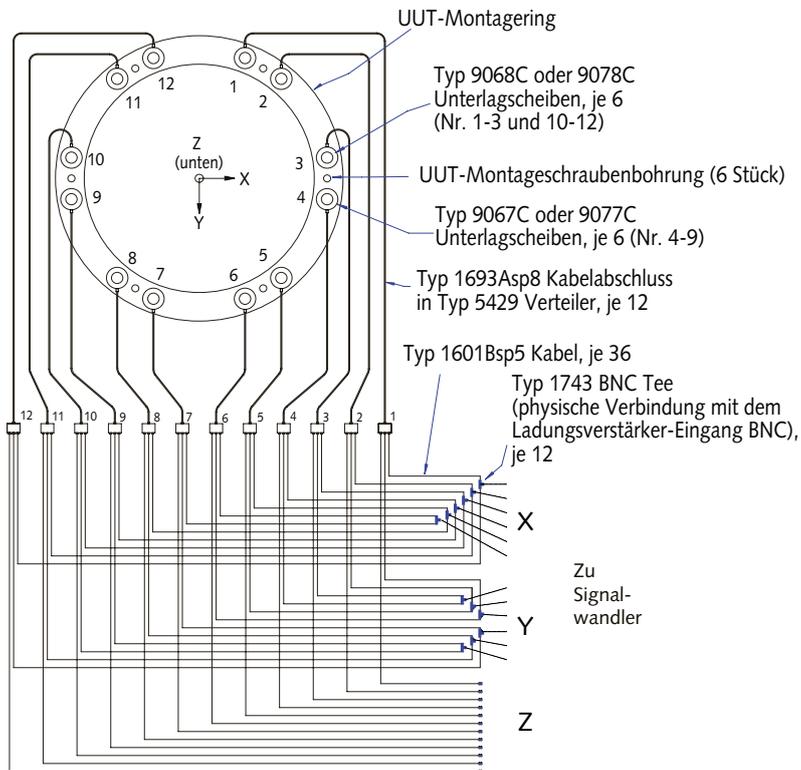
## Weltraumnutzlast: Force Limited Vibration Testing (FLVT)

**Mittels FLV-Test können reale Flugbedingungen simuliert werden, um eine Weltraumnutzlast am Boden zu testen. Durch die Messung und Begrenzung der Reaktionskräfte zwischen Nutzlast und Vibrationstisch wird eine Beschädigung des Testobjekts verhindert.**

Im realen Flug ist die Beschleunigung in den Resonanzbereichen der Nutzlast vernachlässigbar, weil die mechanische Impedanz von Strukturträger und Nutzlast ähnlich ist.

Beim Testen am Boden mittels Vibrationstisch hingegen sind die auftretenden Reaktionskräfte zwischen Testobjekt und Tisch ungleich höher. Dies ist der Fall, weil der Vibrationstisch über eine sehr viel höhere mechanische Impedanz als die Nutzlast verfügt. Eine Regelung der Frequenzanregung mittels Beschleunigungssensoren ist deshalb unzureichend.

Um übermäßiges Testen zu verhindern werden zusätzlich Kraftdynamometer von Kistler eingesetzt. Die Dynamometer setzen sich aus mehreren 3-Komponenten Kraftsensoren zusammen und werden als Ring angeordnet zwischen der zu prüfenden Nutzlast und dem Vibrationstisch installiert. So können die Reaktionskräfte zwischen Nutzlast und Vibrationstisch gemessen und begrenzt werden.



Schematische Darstellung des Krafrings für Force Limited Vibration Testing (UUT - Unit Under Test - Prüfling)

## Wichtige Technologien für die Anwendung

### • Geringes Ausgasen

Das hohe Vakuumniveau einer Weltraumumgebung ruft eine Materialausgasung hervor, bei der eingeschlossenes Gas freigesetzt wird. Dieses kann an Oberflächen, wie z. B. an Kameraobjektiven, kondensieren und damit die Funktion dieser Geräte behindern. Kraftsensoren können auch in Vakuumkammern eingesetzt werden. Kistler bietet dafür hermetisch dichte Sensoren und ausgasungsarme Kabel an.

### • Optimale Montage

Wenn keine Einschränkungen durch Platzbedarf und Frequenzganganforderungen vorliegen, wird empfohlen, Sensoren aus der Familie der vorgespannten Kraftaufnehmer einzusetzen. Diese sind bereits kalibriert und können direkt mit dem Krafring verbunden werden. Wenn der Platz begrenzt ist und die Steifigkeit des Systems für einen breiteren Frequenzgang optimiert werden muss, ist der Einsatz von Messzellensensoren zu empfehlen. Das Vorspannen wird am Krafring des Kunden vorgenommen und erfordert eine Kalibrierung vor Ort.

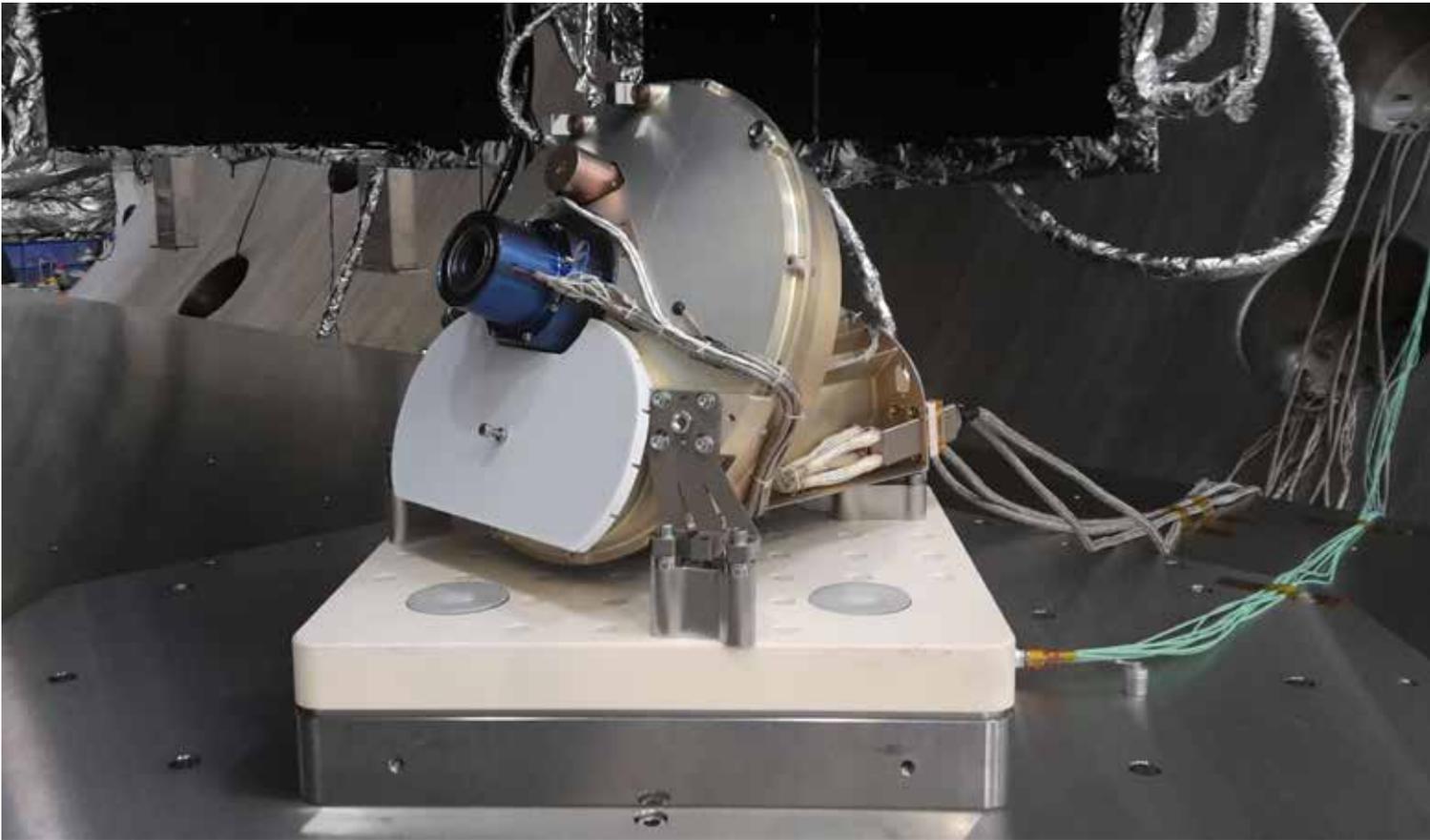
### • Geringes Übersprechen

Die resultierenden Kräfte und Momente werden aus den drei Signalen berechnet, die von jedem Sensor um den Krafring ausgesendet werden. Je geringer das Übersprechen ist, desto höher ist die Genauigkeit der Kraftmessung und der Momentenberechnung.

### • Einfaches Summieren

Ladungsausgangssensoren ermöglichen nicht nur das einfache Einbringen einer Vorlast. Es ist auch möglich, Signalpakete vorab zu summieren, indem die entsprechenden Kabel vor der Konditionierungsstufe angeschlossen werden. Moderne Ladungsverstärker ermöglichen auch ein komfortables und flexibles Summieren. Dies ermöglicht es dem Anwender, die Anzahl der benötigten Datenerfassungskanäle zu optimieren, ohne lästige Spannungssummenverfahren zu verwenden.

Produktmerkmale	
	3-Komponenten Kraftsensoren Typ 9017C–9077C
	3-Komponenten Kraftaufnehmer Typ 9317C–9377C
	Dynamischer 4-Kanal-Ladungsverstärker für Datenerfassung Typ 5165A
	Quasi-statischer 8-Kanal-Ladungsverstärker für Datenerfassung Typ 5167A



UVN CAA montiert auf dem Mikro vibrationsdynamometer Typ 9236A2 (Quelle: CSL)

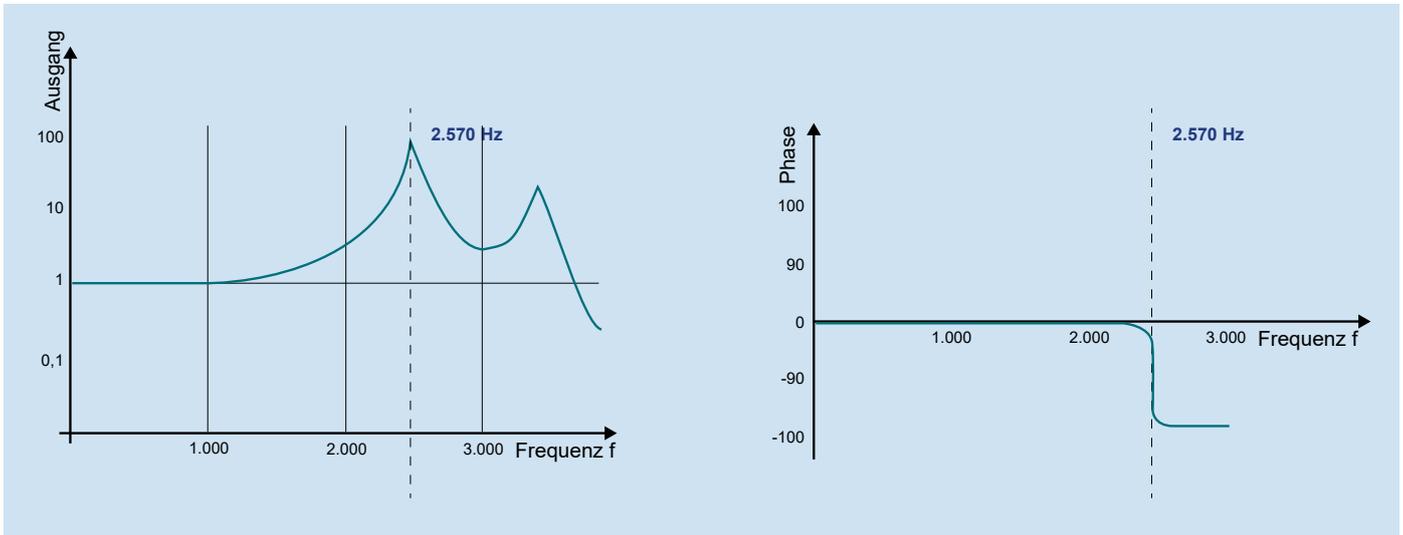
## Mikrovibrations- und Jitterprüfungen

**Satelliten-Jitter oder eine Unschärfe der Bilder, die von Mikrovibrationen stammen, stellen eine ernsthafte Quelle für Abweichungen dar, die die geometrische Genauigkeit von hochauflösenden Bildern beeinträchtigt. Studien der letzten Jahre haben ergeben, dass in der Erdobservation große Fortschritte erzielt wurden. Damit verbunden war ein dramatischer Anstieg der Notwendigkeit, Erdoberfläche und Atmosphäre mit immer größerer Präzision vermessen zu können.**

Die Qualität dieser Bilder wäre noch vor wenigen Jahren nicht vorstellbar gewesen. Das Reduzieren von Mikrovibrationen an Bord von Satelliten trägt entscheidend zu diesem Fortschritt bei. Jeder Satellit benötigt zahlreiche Antriebselemente, Positionsteuerungen, Reaktionsmotoren, Stellglieder, Kryokühler usw.

Diese Geräte bestehen aus mechanischen Komponenten, die beim Betrieb Vibrationen verursachen. Mikrovibrationen bestehen aus extrem kleinen Beschleunigungen von sehr geringer Intensität. Das Messen von Mikrovibrationen ist eine anspruchsvolle Aufgabe. Das Messen von Hochfrequenzjitter kann durch den Einsatz von piezoelektrischen Kraftsensoren, Ladungsverstärkern sowie rauscharmen Beschleunigungssensoren und Dynamometern realisiert werden.

Neueste innovative Entwicklungen mit keramischen Deckplattendynamometern ermöglichen höhere Empfindlichkeiten, einen höheren Frequenzbereich und eine Wasserkühlung, die für Reaktionsrad-Jitter- und Kryokühler-Mikrovibrationsanwendungen optimiert sind.



Amplitude, Phasengang und Eigenfrequenz in Fz-Richtung für Dynamometer mit Deckplatte aus Keramik Typ 9236A2

## Wichtige Technologien für die Anwendung

- Hochauflösende Dynamometer**  
 Piezoelektrische Kraftsensoren und Dynamometer in Kombination mit hochempfindlichen Ladungsverstärkern sind ideal, da sie eine sehr hohe Dynamik von bis 100 dB zu bieten. Damit ist es möglich, dynamische Kraftänderungen bis hinunter zu 120 dB 0,01 N und Momente bis hinunter zu  $0,08 \cdot 10^{-3}$  Nm zu messen, auch wenn das zu messende Objekt mehr als 10 kg wiegt.
- Dynamometer mit hohem Frequenzgang**  
 Optimierte Mikroviibrationsdynamometer mit hoher Steifigkeit verfügen über sehr hohe Eigenfrequenzen von mehr als 1.500 Hz, die Messungen bis zu 500 Hz ermöglichen.
- Dynamometer mit geringem Übersprechen**  
 Die resultierenden Kräfte und Momente werden aus den drei Signalen berechnet, die von jedem der vier dreiachsigen Kraftsensoren, die ein Dynamometer bilden, bereitgestellt werden. Je geringer das Übersprechen ist, desto höher ist die Genauigkeit der Kraftmessung und der Momentenberechnung.
- Leichte und rauscharme Beschleunigungssensoren**  
 Leichte Beschleunigungssensoren mit möglichst geringem Rauschen werden üblicherweise bevorzugt, wenn die Mikroviibrationspegel noch hoch genug sind. Diese Eigenschaften sind die Voraussetzung, um Massenbelastungseffekte zu vermeiden und gleichzeitig Mikroviibrationen zu erkennen.

Produktmerkmale	
	Mikroviibrationskraftmessplatte mit Deckplatte aus Keramik Typ 9236A2 (Kraft/Momente)
	6-Komponenten-Kraftaufnehmer Typ 9306A (Kraft/Momente)
	Ultra-hochempfindlicher 8-Kanal-Ladungsverstärker Typ 5080A
	Ultra-rauscharmer und leichter drei-achsiger Spannungsmodus-Beschleunigungssensor Typ 8688A5



Satelliten-Umgebungsprüfung in der thermischen Vakuumkammer

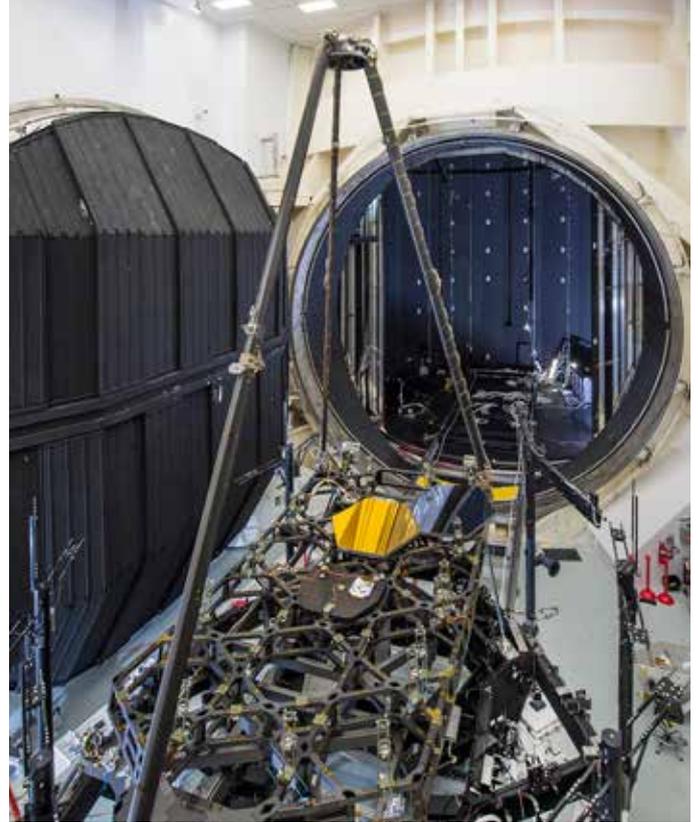
## Mechanische Eigenschaften in thermischen Vakuumkammern

Da Hochleistungsteleskope eine Stabilität im Nanometerbereich erfordern, ist die Stabilität der vollständig instrumentierten Backplanes entscheidend. Sie müssen in thermischen Vakuumkammern geprüft werden, die für die Prüfung bis hin zu kryogenen Bedingungen geeignet sind. Diese Vakuumkammern wurden entwickelt, um eine einzigartige thermische Stabilität bei Temperaturen von weniger als 26 K zu gewährleisten. Die Prüfung in der Vakuumkammer erfordert Beschleunigungssensoren und Kraftsensoren, die bei extrem niedrigen Temperaturen eingesetzt werden können.

Backplanes tragen den Primärspiegel und andere Teleskopoptiken. Diese Elemente können durch die Backplanes modifiziert werden. Das Teleskop wird dann in der Kammer isoliert. Einige Testumgebungen verfügen über ein neues, geschichtetes Helium- und Stickstoff-Kühlsystem, mit dem die Backplanes die niedrigen Temperaturen erreichen können, um die Betriebstemperaturen im Weltraum zu simulieren. Sie ermöglichen eine kryogene optische Ausrichtung und Prüfung mehrerer Hauptspiegelsegmente in einem Prozess, der als „Phasing“ bezeichnet wird. Für derartige Prüfungen werden Beschleunigungssensoren und Kraftsensoren benötigt, die für extrem niedrige Temperaturen geeignet sind.



Das James Webb Weltraumteleskop der NASA wird für die Durchführung von thermischen Vakuumtests vorbereitet (Quelle: NASA/Chris Gunn)



Das große James Webb-Pathfinder-Weltraumteleskop (Backplane-Testversion) wird in die riesige Kammer A im NASA Johnson Space Center für kryogene Tests eingeführt (Quelle: NASA/Chris Gunn)

## Wichtige Technologien für die Anwendung

- Hohe Auflösung**  
 Beschleunigungssensoren von Kistler erfassen Hintergrundvibrationen in der Größenordnung von  $\mu\text{g}$ -Vibrationen.
- Hohe Temperaturstabilität**  
 Unsere PiezoStar-basierten IEPE-Spannungsmodus-Beschleunigungssensoren sind die idealen Sensoren für präzise Vibrationsprüfungen, da sie eine sehr geringe Geräteempfindlichkeit bei Temperaturschwankungen aufweisen.
- Kryogener Einsatz möglich**  
 Ladungsausgangssensoren oder kryogene IEPE-Spannungsmodus-Beschleunigungssensoren von Kistler bieten einen hervorragenden Temperaturbereich von unter den üblichen  $-54\text{ °C}$  bis  $-196\text{ °C}$ . Sie können damit die Temperaturen, die in thermischen Vakuumkammern durch flüssiges Helium erzeugt werden, sicher überstehen.
- Geringes Ausgasen**  
 Das hohe Vakuumniveau einer Weltraumumgebung ruft eine Materialausgasung hervor, bei der eingeschlossenes Gas freigesetzt wird. Dieses kann an Oberflächen, wie z. B. an Kameraobjektiven, kondensieren und damit die Funktion dieser Geräte behindern. Hermetisch dichte Sensoren und ausgasungsarme Kabel von Kistler sind so konzipiert, dass sie alle Anforderungen optimal erfüllen.

Produktmerkmale	
	Ultra-hochempfindlicher kryogener PiezoStar Beschleunigungssensor Typ 8712B5D0CB
	Kabel mit geringer Ausgasung Typ 1761B
	IEPE-Kuppler (Versorgungsspannung $+36\text{ V}$ ), optimiert für kryogene Temperaturen Typ 5148M09



Üblicherweise werden Prüfeinheiten Kombinationen von extremen Temperatur- und Vibrationsbeanspruchungstests unterzogen.

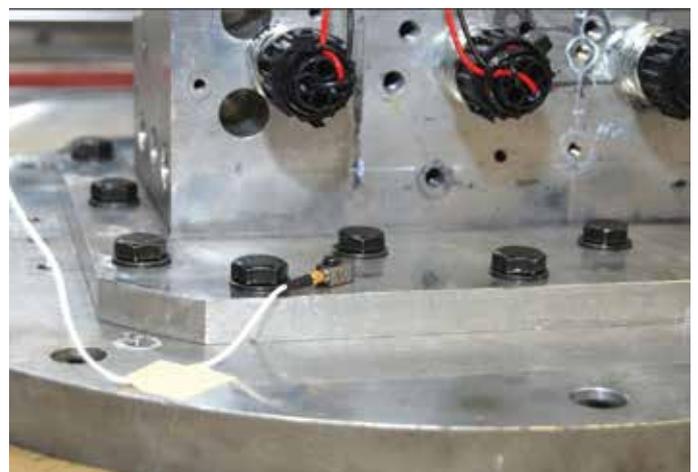
## Hochbeschleunigte Lebensdauerprüfung (HALT) und hochbeschleunigtes Belastungsscreening (HASS)

Umweltprüfungen werden durchgeführt, um die Designkriterien während der Produktentwicklung in Branchen wie der Luft- und Raumfahrt zu validieren und um sicherzustellen, dass die Zuverlässigkeitsziele erreicht werden. Das Environmental Stress Screening (ESS) ist ein Verfahren der Umweltprüfung, um den Lebenszyklus eines Produkts sicherzustellen und zu gewährleisten, dass es den Qualitäts-, Sicherheits- und anderen Normen entspricht. Diese Prüfung wird typischerweise in erster Linie bei elektronischen Komponenten angewendet. Versagen Komponenten im Screening-Verfahren, können damit latente Schwachstellen und Defekte identifiziert werden.

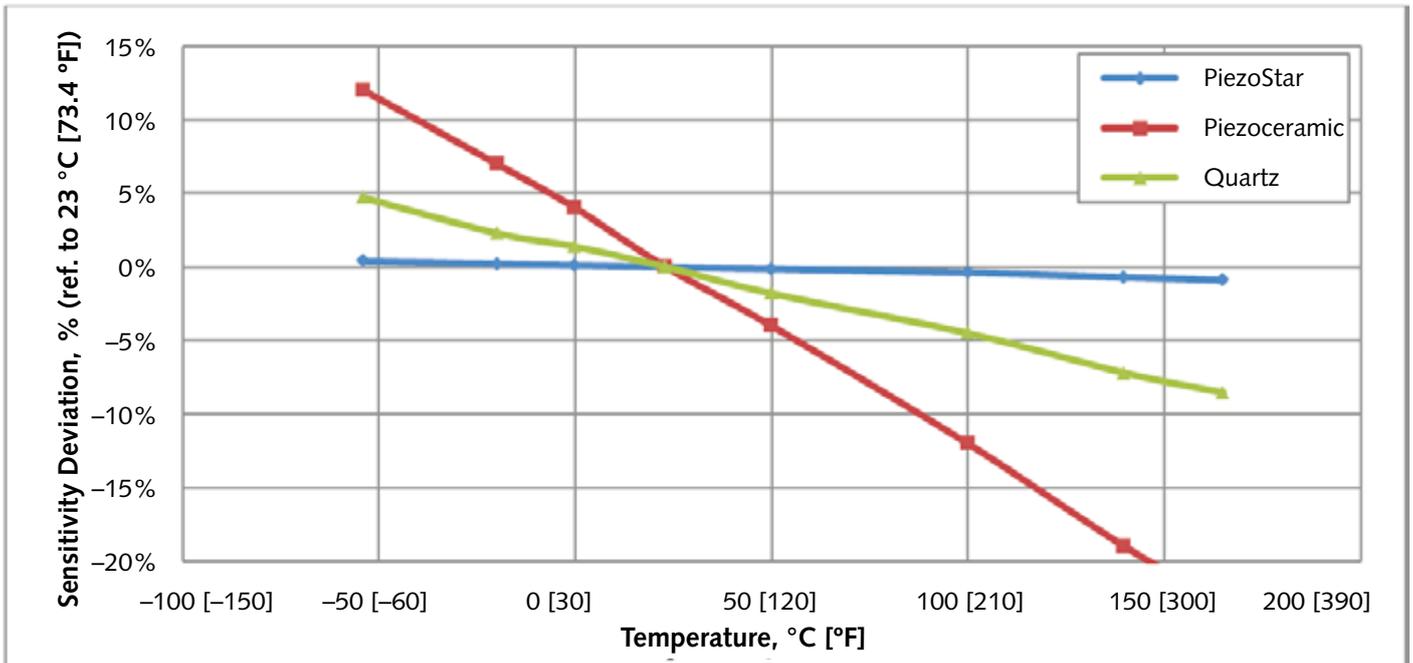
Üblicherweise werden Prüfeinheiten Kombinationen von extremen Temperatur- und Vibrationsbeanspruchungstests unterzogen. Dabei wird zwischen einer hochbeschleunigten Lebensdauerprüfung (HALT) und dem hochbeschleunigten Belastungsscreening (HASS) unterschieden.

Die hochbeschleunigte Lebensdauerprüfung (HALT) ist ein Designverifizierungsprozess, der vor der Fertigung eines Produkts durchgeführt wird, um Konstruktions- und Montagefehler zu erkennen. Mit daraus resultierenden Änderungen bei der Konstruktion oder den Montagetechniken kann sichergestellt werden, dass die Qualität des Produkts weiter verbessert wird.

Das hochbeschleunigte Belastungsscreening (HASS) ist ein Bewertungsverfahren, das bei Produktionsbaugruppen für alle Endprodukte angewendet wird, um Schwachstellen bei Komponenten und Fertigungsfehler zu identifizieren, bei denen eine höhere Wahrscheinlichkeit für einen frühen Ausfall vorliegt. Bei einem HASS-Screening werden die Komponenten Umwelteinflüssen wie Vibration, Temperatur, Feuchtigkeit und Druck ausgesetzt.



Tropfenförmiger PiezoStar Beschleunigungssensor Typ 8715B250 für hochbeschleunigte Lebensdauerprüfungen (HALT) in einer Wärmekammer, auf einen elektrodynamischen Vibrationstisch montiert.



Typische Temperaturempfindlichkeitsabweichung eines PiezoStar Spannungsmodus-Beschleunigungssensors im Vergleich zu einem Sensor auf Basis eines Keramik- oder Quarzsensorelements

## Wichtige Technologien für die Anwendung

- **Hohe Temperaturstabilität**

Die PiezoStar-basierten IEPE-Spannungsmodus-Beschleunigungssensoren von Kistler sind die idealen Sensoren für präzise Vibrationsprüfungen, da sie einen sehr geringen Temperaturkoeffizienten bei Temperaturschwankungen aufweisen. Eine numerische Kompensation zwischen Ein- und Ausgangssignal für die Temperatur nach der Prüfung ist nicht erforderlich. Dieses Problem ist bei gängigen Materialien aufgetreten, insbesondere bei Piezokeramiken wie z. B. PZT (Bleizirkonattitanat).

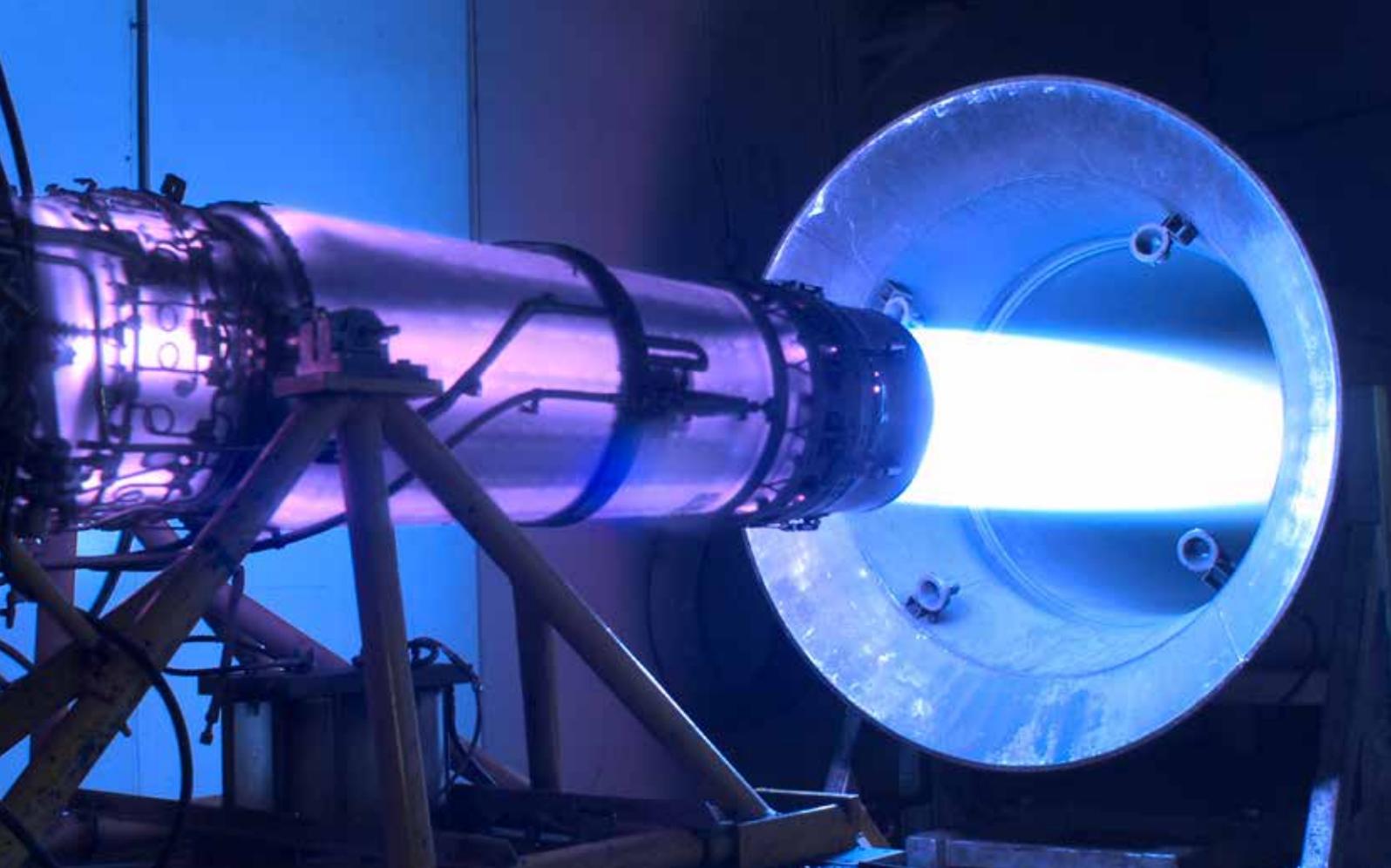
- **Geringes Gewicht**

Unsere PiezoStar-basierten Sensoren sind klein und leicht, um Massebelastungseffekte zu vermeiden, die zu einer Änderung des Verhaltens des Prüflings führen würden. Sie sind zwei- bis viermal kleiner als alle anderen kristallinen Sensoren, die üblicherweise bei wechselnden Temperaturbedingungen eingesetzt werden.

- **Leichte Montage**

Sensorlösungen von Kistler sind mit Mittellochdesign verfügbar, das eine Schraubmontage ermöglicht, wenn die Verwendung einer Standard-Abziehkleb- oder Schraublösung nicht mehr möglich ist. Darüber hinaus ermöglichen sie eine einfache Kabel- und Messachsenausrichtung. Im Allgemeinen sind diese Sensoren masseisoliert, um Probleme mit der Masseschleife zu vermeiden.

Produktmerkmale	
	Einachsige, tropfenförmige PiezoStar-Beschleunigungssensoren mit Mittelloch Typ 8715B
	Dreiachsige PiezoStar-Beschleunigungssensoren mit Mittelloch 8765A
	Dreiachsige Mini-Beschleunigungssensoren Typ 8766A500



Die Bestimmung des Triebwerkschubs ermöglicht ein klares Verständnis dafür, wie viel Schub mit einem bestimmten Düsenaufbau erzeugt werden kann.

## Raketentriebwerkstest: den Schub bestimmen

**Die Treibstoffeffizienz sowohl bei Feststofftreibstoff für Feststoffraketenmotoren als auch bei Flüssigraketenmotoren ist für die Entwickler von Raketenmotoren von großer Bedeutung. Die Bestimmung des Triebwerkschubs ermöglicht ein klares Verständnis dafür, wie viel Schub mit einem bestimmten Düsenaufbau erzeugt werden kann. Sie ermöglicht den Entwicklern, den spezifischen Impuls des Verbrennungsmaterials zu berechnen und die verschiedenen Phasen während des Betriebs eines Raketentriebwerks zu untersuchen.**

Während der Startphase muss die Zündung so schnell wie möglich erfolgen, um eine „saubere Verbrennung“ zu erreichen und um den Kraftstoffverbrauch zu begrenzen.

Während der Einbrennphase dürfen keine Vibrationen oder Pulsationen in der Schubsignatur oder in der dynamischen Drucksignatur auftreten. Pulsationen können den Wärmeübergang drastisch erhöhen und damit zum Abbrennen der Düse führen. In dieser besonderen Phase muss die Stabilität des Motors untersucht werden. Insbesondere ist auf auftretende Scherkräfte zu achten, welche reduziert werden sollten.

In der Abschaltphase muss der Schub sofort gestoppt werden. Dabei darf kein Resttreibstoff im Inneren des Raketentriebwerks verbleiben, weil dieser dort Giftstoffe erzeugen würde.

## Wichtige Technologien für die Anwendung

- **Hohe Eigenfrequenz**

Je nach Typ des Raketentriebwerks sind hochfrequente dynamische Messungen bei der Schubbestimmung von Interesse. Strukturen mit Kraftsensoren müssen eine Eigenfrequenz von mindestens 1.500 bis 3.000 Hz aufweisen.

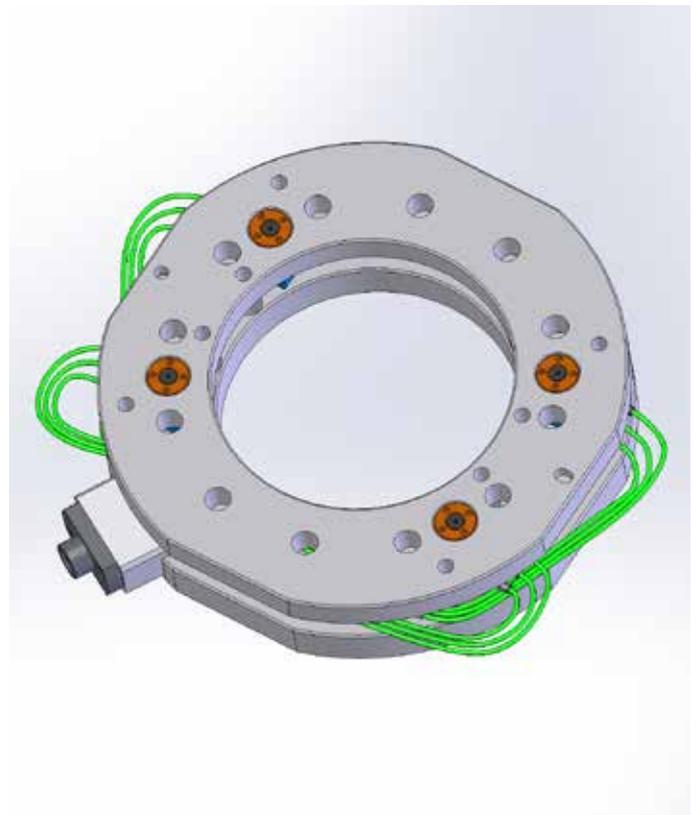
- **Messbereich**

Mit piezoelektrischen Kraftmessverfahren können sowohl quasi-statische als auch dynamische Messungen mit hoher Auflösung durchgeführt werden. Die piezoelektrische Messkette ermöglicht es, sich auf die unteren dynamischen Signale zu konzentrieren. Damit kann eine High-Fidelity-Messung der Low-Pegel-Signale, die von Schubinstabilitäten ausgehen, realisiert werden.

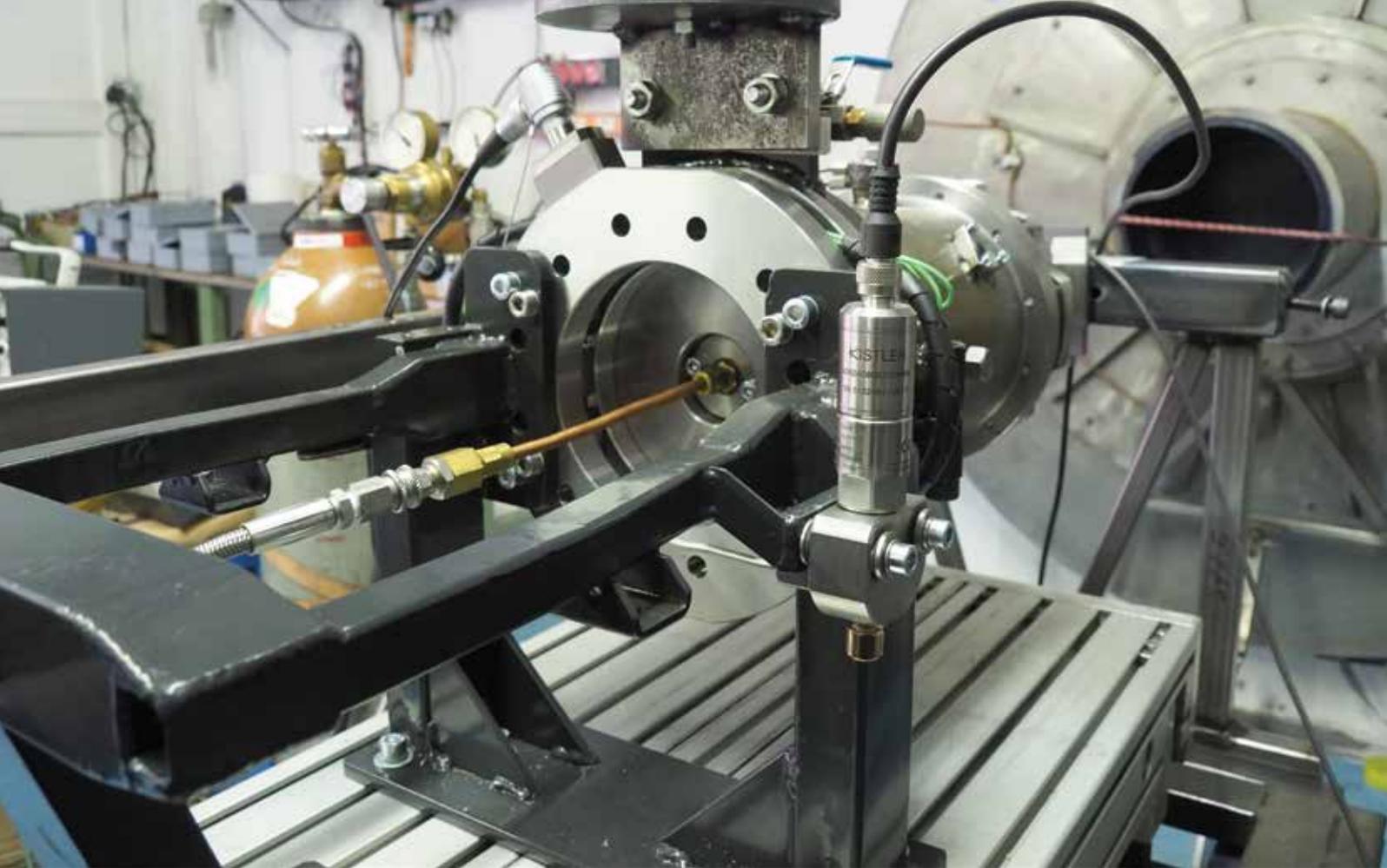
- **Anpassungsfähigkeit**

Ein- und Mehrkomponenten-Kraftsensoren von Kistler können zu Dynamometern konfiguriert werden, um spezifische Anwendungsanforderungen zu erfüllen und um die Flexibilität zu erhalten, andere Dynamometerkonstruktionen an die sich ändernden Anforderungen anzupassen.

Produktmerkmale	
	Kundenspezifisches piezoelektrisches 6-Komponenten-Dynamometer (Kraft/ Momente)
	Quasi-statischer 8-Kanal-Ladungsverstärker für Datenerfassung Typ 5167A
	Hochauflösender Labor-Ladungsverstärker für niedrige Schubwerte Typ 5080A
	Universelles und modulares Konditionierungs- und Datenerfassungssystem Baureihe KiDAQ Typ 5500



Spezieller Kraftdynamometer, der für die Raketenschubmessung auf dem Prüfstand des Swiss Propulsion Lab (SPL) entwickelt wurde



Piezo-resistiver-Drucksensor Typ 406xA zur Überwachung und Steuerung von Treibstoffdrücken (Quelle: SPL)

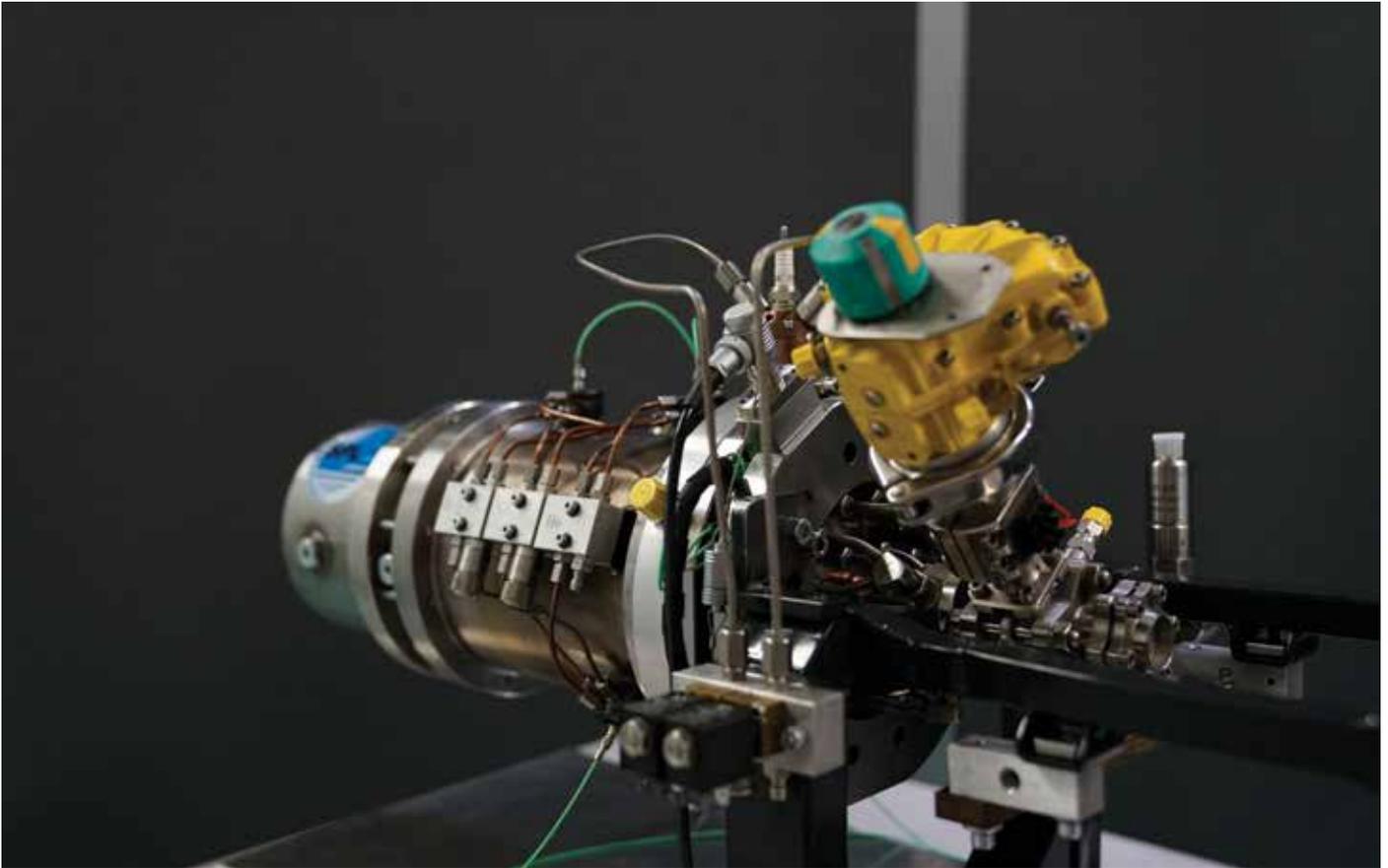
## Raketentriebwerkstest: statische Drucküberwachung und -messung

Die Überwachung des statischen Drucks gehört zu den wichtigsten Messungen, die auf einem Raketentriebwerkprüfstand durchgeführt werden. Dazu gehört die Überwachung und Steuerung des Brennstoffstroms sowie die Messung des statischen Drucks in der Brennkammer.

Die Überwachung und Steuerung des Brennstoffstroms bei Flüssigtriebwerken erfordert statische Drucksensoren. Piezo-resistive Drucksensoren ermöglichen sowohl statische als auch begrenzte dynamische Messungen. Derartige Drucksensoren verwenden ein kavitätengeätztes, mikrobearbeitetes

Silizium-Sensorelement und eignen sich für Anwendungen mit Medien, die mit silikonölgefüllten Kapseln kompatibel sind.

Für die Messung des statischen Drucks in der Brennkammer bieten sich piezo-resistive Drucksensoren mit begrenzter Temperatur an, die sowohl statische als auch begrenzte dynamische Messmöglichkeiten bieten. Diese piezo-resistiven Drucksensoren werden mit einem großen Abstand zur Brennkammer eingesetzt, um die Temperatur am Sensor zu reduzieren. Dabei reduziert üblicherweise jeder Meter Rohrleitung die Temperatur um 125 °C.



Vollinstrumentierter Raketentriebwerkprüfstand mit Kraftdynamometer zur Messung von Hochtemperaturdruck, starker Beschleunigung bei Verbrennungsinstabilitäten sowie statischem Druck zur Steuerung von Brennstoff

## Wichtige Technologien für die Anwendung

- Frequenzgang**  
 Die langfristige statische Druckmessung erfordert eine piezoresistive Technologie, die einen Eigenbetrieb von 0 Hz bis 2 kHz aufweist, im Gegensatz zu piezoelektrischen Sensoren, die nur einen quasi-statischen Betrieb zulassen.
- Explosionsschutz**  
 Abhängig von der Verwendung und Installation des Drucksensors kann ein inhärenter Schutz gegen das Zünden explosiver Umgebungen erforderlich werden.
- Langzeitstabilität**  
 Piezoresistive Drucksensoren verwenden ein ölgefülltes und kavitätengeätztes, mikrobearbeitetes Silizium-Sensorelement, das eine Langzeitstabilität von 0,1 % pro Jahr bietet.

Produktmerkmale	
	Absoluter piezoresistiver Drucktransmitter Typ 4260A
	Differenzieller piezoresistiver Drucktransmitter Typ 4264A
	Relativer piezoresistiver Drucktransmitter Typ 4262A
	Universelles und modulares Konditionierungs- und Datenerfassungssystem Baureihe KiDAQ Typ 5500



Zündung des Raketenmotors

## Raketentriebwerkstest: dynamische Druck- und Schwingungsmessungen

Ein tiefes Verständnis der Einspritzung von Brennstoffkomponenten und von Gemisch, Zündzeitpunkt und Verbrennung ist absolut erforderlich, um die zuverlässige Leistung eines Raketenmotors zu überprüfen und die Entwicklung von Antriebstechnologien voranzutreiben. Piezoelektrische Druck- und Beschleunigungssensoren von Kistler decken den extremen Bereich der Ultra-Hochtemperaturstabilität und -dynamik ab, mit dem die Herausforderungen in extremen Schubkammerumgebungen gemeistert werden können.

### Verbrennungsinstabilitäten

Neue oder modifizierte Raketentriebwerke erfordern Prüfverfahren, um nachzuweisen, dass Verbrennungsinstabilitäten nicht auftreten. Eine Verbrennungsinstabilität wird durch Druckpulsationen und akustische Resonanzen in der Brennkammer verursacht. Sie kann die Motorleistung reduzieren, Strukturschwingungen hervorrufen und zu katastrophalen Ausfällen führen, indem sie die Wärmedämmungsgrenzschicht der Düse oder anderer Motorkomponenten zerstört. Das am weitesten verbreitete Verfahren zur Erkennung von Verbrennungsinstabilitäten sind piezoelektrische Drucksensoren, die so nah wie möglich an der Druckkammer angeordnet sind, um Pfeifschwingungen zu verhindern.

### Eigenschaften der Brennstoffversorgung bei flüssigen Brennstoffen

Beim Einsatz von flüssigen Brennstoffen muss der Verteilungsmechanismus bestimmt und optimiert werden. Das Öffnen und Schließen der Ventile kann beispielsweise eine Schlagwirkung auslösen, die mit Hilfe von Drucksensoren gemessen werden kann. Krypumpen müssen ebenfalls geprüft werden. Dabei müssen spezielle kryogene Beschleunigungs- und Drucksensoren eingesetzt werden.

### Zündung

Zündsysteme können auf vielfältige Weise konzipiert werden, beispielsweise mit pyrotechnischer, elektrischer (Funke oder Draht) und chemischer Zündung. Die Zündung eines Raketenmotors erfordert höchste Präzision. Eine Zündverzögerung von wenigen Zehntelmillisekunden kann zu einem Überdruck in der Kammer aufgrund von zu viel Brennstoff führen. Ein daraus resultierender unkontrollierter Start kann die Explosion eines Raketenmotors zur Folge haben. Daher ist die Messung des dynamischen Zünddrucks für einen sicheren Raketenstart unerlässlich.

# Wichtige Technologien für die Anwendung

- Beständigkeit bei höchsten Temperaturen**  
 Hochtemperatur-Beschleunigungssensoren von Kistler können in der Nähe der Brennkammer montiert werden und sorgen für eine optimierte Messung der Verbrennungsinstabilität. Bei solchen Anwendungen können die Temperaturen bis zu 550 °C betragen. Piezoelektrische Standardsensoren mit Wasserkühlung oder Helium-Entlüftungslösungen können ebenfalls eingesetzt werden. Der Wasserstrom erzeugt jedoch Rauschen.
- Kryogene Eigenschaften**  
 Die kryogenen piezoelektrischen Beschleunigungssensoren und Drucksensoren von Kistler decken einen großen Temperaturbereich bis -196 °C ab. Bei der Bestimmung einer Versorgung mit Flüssigbrennstoff kann die Temperatur von Flüssigmethan auf bis zu -173 °C und von Flüssigsauerstoff auf bis zu -183 °C absinken.
- Hochdruckbeständigkeit bei der Zündung**  
 Im Verlauf einer Messung während der Zündphase erfassen hochdynamische Hochdruck-Sensoren hohe Druckspitzen, sowie sehr hohe und schnell ansteigende Temperaturschockereignisse, die mit einer sehr starken Sensormembranbelastung einhergehen.

Produktmerkmale	
	Hochtemperatur-Drucksensoren (700 °C) mit Hardline-Kabel Typ 6021A, 6023A und 6025A
	Hochtemperatur-Beschleunigungssensor (700 °C) mit Hardline-Kabel Typ 8209 und 8211A
	Piezoelektrische Drucksensoren Typ 60xC mit kryogenen Eigenschaften
	Einachsige kryogene Mini-Spannungsmodus-Beschleunigungssensoren Typ 8730
	Dreiachsige, kryogene Spannungsmodus-Beschleunigungssensoren Typ 8793A250M8



Bei Untersuchungen von Verbrennungsinstabilitäten werden Hochtemperatur-Sensoren Typ 6021A zur Druck- und Typ 8209A zur Beschleunigungsmessung eingesetzt



## Kistler Service: Zunehmender Erfolg, den Sie messen können

Ein guter Kundendienst ist die Grundlage einer funktionierenden, täglichen Interaktion mit dem Kunden. Kistler möchte jedoch nicht nur „gut“, sondern besser sein. Deshalb bieten wir Ihnen umfangreiche Serviceleistungen an, die genau auf Ihre Bedürfnisse zugeschnitten sind.

Der Kistler Service endet nicht mit dem Kauf von Sensoren und elektronischen Messgeräten. Gerne beraten wir Sie bei Ihrem Messproblem und helfen Ihnen bei der Auswahl der richtigen Komponenten. Unsere erfahrenen Servicetechniker unterstützen Sie vor Ort, damit Ihr neues Kistler System optimal in Ihr vorhandenes System integriert, korrekt angeschlossen und konfiguriert wird. Nach einer kurzen Einführung können Sie sofort mit Ihrer Messaufgabe beginnen.

### Kalibrierung mit lückenloser Dokumentation

Unser Kalibrierservice gibt Ihnen die Sicherheit, dass Ihre Kistler Sensoren und Systeme über die gesamte Betriebszeit voll funktionsfähig bleiben und präzise und zuverlässige Messergebnisse liefern. Jede Kalibrierung wird ausnahmslos dokumentiert. Auf Wunsch führen unsere Messtechnik-Experten die Kalibrierung auch direkt bei Ihnen vor Ort durch. Mit Kalibrierlabors in China, USA, Japan und Deutschland können wir Rekalibrierungen schnell und effizient vor Ort durchführen.

### Kundenspezifische Lösungen

Als Systemanbieter bietet Ihnen Kistler Komplettlösungen, die Ihre Messaufgaben optimal erfüllen. Gerne entwerfen unsere Spezialisten gemeinsam mit Ihnen eine neue, maßgeschneiderte Lösung – für noch mehr Leistung in Ihrem Anwendungsbereich.

### Kistler Service

- Unterstützung bei der Definition Ihrer Messaufgabe und bei der Auswahl der Komponenten
- Inbetriebnahme
- Gerätekalibrierung
- Reparaturen
- Schulungen
- Kundenspezifische Lösungen



- Sales Center
- ▲ Tech Center
- Production Center

## Weltweit im Einsatz für unsere Kunden

Mit einem weltweiten Vertriebs- und Servicenetzwerk ist Kistler überall in der Nähe der Kunden. Rund 2000 Mitarbeitende an 61 Standorten widmen sich der Entwicklung neuer Messlösungen und bieten individuelle anwendungsspezifische Unterstützung vor Ort.

**KISTLER**  
measure. analyze. innovate.

Take the lead – right from the start

**Biomechanics**  
Force measurement solutions for motion analysis, sport performance diagnosis, rehabilitation and ergonomics

[www.kistler.com](http://www.kistler.com)

**KISTLER**  
measure. analyze. innovate.

Safe braking thanks to efficient maintenance

**Brake force measurement in the rail transport sector**  
Sensors and accessories for periodic brake force testing

[www.kistler.com](http://www.kistler.com)

**KISTLER**  
measure. analyze. innovate.

Flexible to create and easy to integrate

**Weigh In Motion**  
Measuring equipment for axle loads, axle data collection, enforcement and toll collection applications

[www.kistler.com](http://www.kistler.com)

**KISTLER**  
measure. analyze. innovate.

Measuring equipment for demanding T&M applications

**Test & Measurement**  
Sensors and signal conditioning centres

[www.kistler.com](http://www.kistler.com)

**KISTLER**  
measure. analyze. innovate.

Develop and operate gas turbines more efficiently

**Gas turbine monitoring**  
Measuring combustion dynamics improves turbomachinery performance

[www.kistler.com](http://www.kistler.com)

**KISTLER**  
measure. analyze. innovate.

Analyzing and commanding sophisticated machining processes

**Cutting force measurement**  
Force measuring systems for machining

[www.kistler.com](http://www.kistler.com)

Find out more about our applications:  
[www.kistler.com/applications](http://www.kistler.com/applications)

**Kistler Group**  
Eulachstrasse 22  
8408 Winterthur  
Switzerland  
Tel. +41 52 224 11 11

Kistler Group products are protected by various intellectual property rights. For more details, visit [www.kistler.com](http://www.kistler.com). The Kistler Group includes Kistler Holding AG and all its subsidiaries in Europe, Asia, the Americas and Australia.

Find your local contact at [www.kistler.com](http://www.kistler.com)

**KISTLER**  
measure. analyze. innovate.