

# Probleme und ein Lösungsansatz zur Kraftmessung in der Mikrozerspanung

Jens P. Wulfsberg, Gregor Brudek  
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg  
Institut für Konstruktions- und Fertigungstechnik / Laboratorium Fertigungstechnik  
Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg  
jens.wulfsberg@hsu-hh.de, gregor.brudek@hsu-hh.de

## Inhalt

Einerseits gewinnt die Fertigung mittels ultrapräziser Mikrozerspanung immer mehr Einfluss im Formen- und Gehäusebau oder in der Mikrosystemtechnik, andererseits wird sie aber noch nicht ausreichend beherrscht, weil die Erkenntnisse der konventionellen Zerspannung über Einstellgrößen nicht ohne Weiteres auf die Mikrozerspannung herunterskalierbar sind.

Um aber trotzdem die optimalen Eingangsgrößen der Mikrozerspanung bestimmen zu können, ist eine genauere Untersuchung der Prozessgrößen notwendig. Eine dieser Prozesskenngrößen ist die Kraft, deren Messung während der Mikrozerspanung problematisch ist, da die heutigen Kraftmessplattformen dafür ungeeignet sind. Das liegt daran, daß die Spindeln der Mikrobearbeitungsmaschinen in sehr hohen Drehzahlbereichen (bis zu 160.000 U/min) arbeiten und so die Kraftmessplattformen im Bereich ihrer Eigenfrequenzen anregen, was zu unerwünschten und unrealistischen Amplitudenüberhöhungen führen kann. Folglich müssen neue Kraftmessvorrichtungen mit höheren Eigenfrequenzen entwickelt und auf ihre Eignung untersucht werden. Ein Lösungsansatz einer piezoelektrischen Kraftmessvorrichtung für die Mikrozerspanung wird hier näher vorgestellt und untersucht.

## Abstract

More and more the production by means of ultra precise micro cutting wins influence on mould and body making or on the micro system engineering. Nevertheless it's not yet sufficiently controlled, because the cognitions of the conventional cutting over setting parameters are not so easily down scalable on the micro cutting.

In order to be able to determine however the optimal setting parameters of the micro cutting, a more exact analysis of the process parameters is necessary. One of these process parameters is the force. Their measurement is however problematic during the micro cutting, because the today's force sensors are not qualified for that. This is due to the fact that the spindles of the micromachining center work in very high speed range up to 160.00 RPM and energize so the force sensors in the range of their natural frequencies. This can lead to undesirable and unrealistic amplitudes superelevations. Consequently new force measurements with higher natural frequencies must be developed and assayed for their suitability. A solution of a piezoelectric force measurements for the micro cutting is here detailed presented and examined.

## Einleitung

Die ultrapräzise Mikrozerspanung, vorwiegend Fräsen und Bohren von verschiedenen Mikrostrukturen, wird zur Zeit noch nicht ausreichend beherrscht, weil die Erkenntnisse der konventionellen Zerspanung über Einstellgrößen (Spindeldrehzahl, Vorschubgeschwindigkeit, Arbeitseingriff etc.) nicht ohne Weiteres auf die Mikrozerspanung herunterskalierbar sind. Um unerwünschte Größeneffekte zu vermeiden, müssen die relevanten Größen messtechnisch erfasst werden. Dafür ist einerseits die Analyse des Arbeitsergebnisses und andererseits die Erfassung der Prozesskenngrößen notwendig. Die Analyse des Arbeitsergebnisses ist heute mittels moderner Messtechniken unproblematisch, während sich die Erfassung der Prozesskenngrößen der Mikrozerspanung erst im Anfangsstadium befindet. Tabelle 1 zeigt die wichtigsten Eingangs-, Prozess- und Ausgangsgrößen im Überblick.

Einstellgrößen		Prozesskenngrößen	Arbeitsergebnis
Drehzahl	} Schnittgeschwindigkeit Vorschubgeschwindigkeit	Kräfte bzw. Momente	Maß- und Formfehler
Schnittbreite		Temperatur	Oberflächengüte
Arbeitseingriff		Leistung	Spanform
Vorschub		Energie	Randzonenbeeinflussung
Werkzeuggeometrie, -werkstoff		Verschleiß	
Werkstückwerkstoff			
Kühlschmierung			

**Tabelle1:** Wichtige Eingangs-, Prozess- und Ausgangsgrößen im Überblick

Die Kraft ist eine der wichtigsten Prozesskenngrößen, die für die Optimierung von Eingangsgrößen, Erklärung von Verschleißmechanismen, Abschätzung und Berechnung der erreichbaren Werkstückgenauigkeiten, Ermittlung der an der Spanantstehungsstelle ablaufenden Vorgänge oder sogar Auslegung bzw. Konstruktion von Werkzeugmaschinen (Gestelle, Antriebe, Führungen etc.) unverzichtbar ist. Dies gilt nicht nur für die konventionelle Zerspanung sondern ebenfalls für die Mikrozerspanung.

## Stand der Kraftmesstechnik

In der Vergangenheit wurden viele Kraftmessprinzipien und Wirkungsweisen entwickelt, die auch täglich erfolgreich angewandt werden. Das Gesamtspektrum streckt sich von induktiven und kapazitiven über magnetoelastische bis hin zum piezoelektrischen und piezoresistive Messverfahren. Zu den am meisten verbreiteten Kraftmessgeräten gehören heute piezoelektrische Kraftmessplattformen und -sensoren sowie die Dehnungsmessstreifen (DMS). [1]

Für die Kraftmessung während der konventionellen Zerspanung (z.B. Schnittkraftmessung) haben sich die piezoelektrischen Kraftmessplattformen, beispielsweise der „MiniDyn Typ 9256A2“ der Firma KISTLER Instrumente AG Winterthur aus der Schweiz durchgesetzt. Dass sich Kraftmessplattformen dieser Art auf dem Markt etabliert haben, hat viele Gründe. Sie besitzen beispielsweise hohe Eigenfrequenzen (ca. 4-5kHz) oder die Möglichkeit der Mehrkomponentenmessung. Ihr größter Vorteil ist aber die hohe mechanische Steifigkeit, wodurch sie in der Lage sind dynamische Änderungen einer mechanischen Größe, beispielsweise der Kraft, bis in die höchsten Frequenzbereiche zu erfassen. Weiter erlauben sie aber auch quasistatische Messungen bis in den Bereich von einigen mHz. [1] [2]

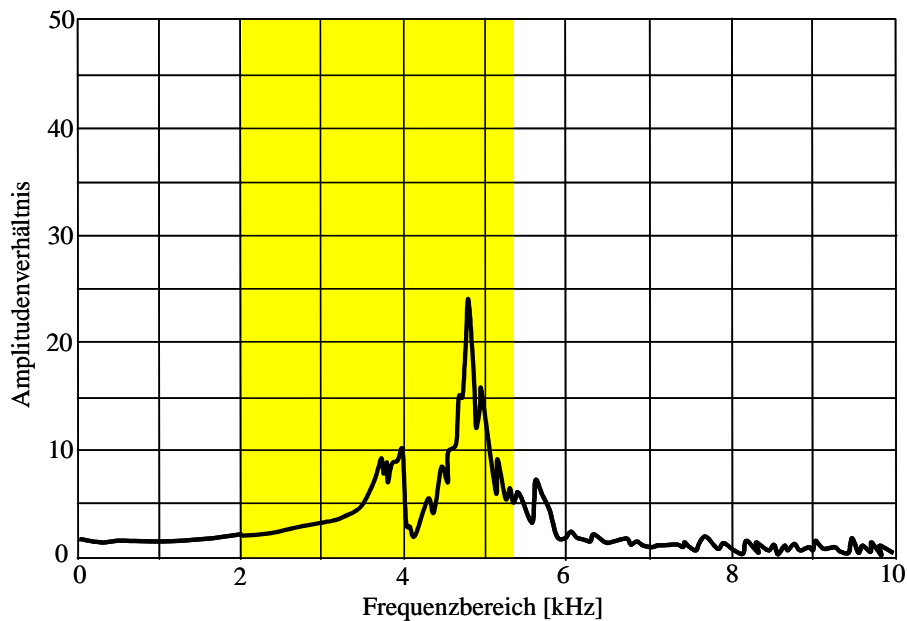
## Probleme

Auch wenn Kraftmessungen während der konventionellen Zerspanung mittels Kraftmessplattformen ohne größere Probleme durchführbar sind, sind diese für Kraftmessungen während der Mikrozerspanung in einem für die Bearbeitung wichtigen Bereich der Einstellgrößen wenig geeignet. Die für die konventionelle Zerspanung hohen Eigenfrequenzen der Kraftmessplattformen sind für die Mikrozerspanung zu niedrig. Die Spindeln der Mikrobearbeitungsmaschinen arbeiten nämlich in sehr hohen Drehzahlbereichen (bis zu 160.000 U/min) und regen so die Kraftmessplattformen im Bereich ihrer Eigenfrequenzen an, was das Auftreten von nicht gewünschten Resonanzfällen zur Folge hat. Ein zweischneidiger Fräser hat beispielsweise bei der Drehzahl  $n=140.000\text{U/min}$  eine Anregungsfrequenz von 4,67kHz, die genau im Bereich der Eigenfrequenzen der Kraftmessplattformen liegt. Tabelle 2 zeigt die Anregungsfrequenzen einer Spindel einer Mikrobearbeitungsmaschine (Drehzahlbereich: 60.000 U/min bis 160.000U/min) und deren Vielfache auf.

Drehzahl	Schneiden	Anregungs- frequenz	I Vielfache	II Vielfache	III Vielfache
U/min	-	kHz	kHz	kHz	kHz
60000	2	2,00	4,00	6,00	8,00
70000	2	2,33	4,67	7,00	9,33
80000	2	2,67	5,33	8,00	10,67
90000	2	3,00	6,00	9,00	12,00
100000	2	3,33	6,67	10,00	13,33
110000	2	3,67	7,33	11,00	14,67
120000	2	4,00	8,00	12,00	16,00
130000	2	4,33	8,67	13,00	17,33
140000	2	4,67	9,33	14,00	18,67
150000	2	5,00	10,00	15,00	20,00
160000	2	5,33	10,67	16,00	21,33

**Tabelle2:** Anregungsfrequenzen der Spindel einer Mikrobearbeitungsmaschine

Zum besseren Verständnis des Problems „Eigenfrequenzen“ wurde in Bild 1 (Frequenzdiagramm des MiniDyn Typ 9256A2 in der x-Achse [3]) der Bereich farblich (gelb) markiert, in dem eine Spindel einer Mikrobearbeitungsmaschine die Kraftmessplattform anregt. Es ist deutlich erkennbar, daß der Bereich der Eigenfrequenzen des MiniDyn sich zum größten Teil mit dem Bereich der Anregungsfrequenzen einer Spindel einer Mikrobearbeitungsmaschine überschneidet. Folglich können Kräfte in den für die Mikrozerspanung interessanten Bereich ab 100.000 U/min bzw. beim zweischneidigen Werkzeug ab 3,33 kHz nicht fehlerfrei gemessen werden.



**Bild1:** Frequenzdiagramm des MiniDyn Typ 9256A2 in der x-Achse (vgl. [3])

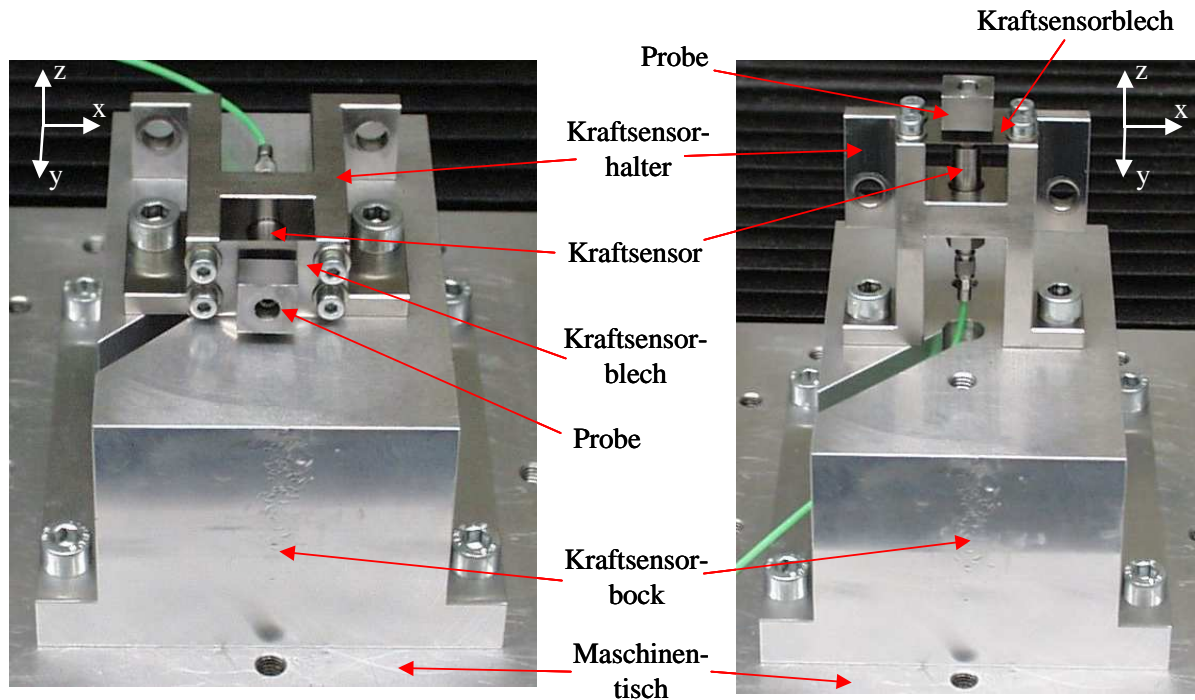
## Lösungsansatz

Um Kräfte in der Mikroerspanung messen zu können, muss die Kraftmessplattform bzw. -vorrichtung in erster Linie eine sehr hohe Eigenfrequenz haben, die im Idealfall weit über 10 kHz liegt. Da dies schwer machbar ist, sollte zuerst versucht werden, die Eigenfrequenzen in den Frequenzbereich zwischen 5,5kHz und 6kHz zu realisieren. Damit wären nämlich alle Anregungsfrequenzen niedriger und alle Vielfachen der Anregungsfrequenzen ab 100.000 U/min höher als die Eigenfrequenzen. Folglich könnten in dem für die Mikroerspanung interessanten Frequenzbereich Kräfte gemessen werden, ohne sich Gedanken über Resonanzfälle machen zu müssen. Weiter muss sich solch eine Kraftmessvorrichtung für Kraftmessungen von wenigen mN bis einigen Hundert N eignen und dabei auch schnell genug auf die raschen Kraftänderungen während der Mikroerspanung reagieren können.

Um in naher Zukunft Kraftmessungen in der Mikroerspanung durchführen zu können, wurde am LaFT (Laborium Fertigungstechnik der Helmut-Schmidt-Universität) ein erster Prototyp einer in Bild 3 dargestellten piezoelektrische Kraftmessvorrichtung entwickelt, die sich im Wesentlichen aus den axial wirkenden Quarz-Kraftsensor Typ 9203 der Firma KISTLER und deren Befestigungsvorrichtung (Kraftsensorbock, -halter und -blech) zusammen setzt. Dieser spezielle Quarz-Kraftsensor ist bereits vorgespannt, so daß seine Eigenfrequenz bei 27kHz liegt. Zudem ist er sehr gut für Messungen von Kräften von wenigen mN bis zu 500N geeignet. Seine weiteren Vorteile liegen in der hohen Empfindlichkeit von -45 pC/N und den kleinen Abmessungen (Länge: 43,3mm; max. Breite 11,9mm). [4]

Der Quarz-Kraftsensor wurde in der Kraftsensorhalter mit dem Drehmoment von 20Nm eingeschraubt. Um Kräfte in allen Richtungen messen zu können, wurde der Kraftsensorhalter so konstruiert, dass er ohne großen Aufwand (2 Schrauben) einmal liegend für Kraftmessungen in x- und y-Richtung (Bild3 links) und einmal stehend für Kraftmessungen in z-Richtung (Bild 3 rechts) mit dem Kraftsensorbock verschraubt werden kann. Der Kraftsensorbock erfüllt eigentlich nur die Aufgabe, den im Kraftsensorhalter eingeschraubten Quarz-Kraftsensor auf die nötige Arbeitshöhe zu bringen, da ein in der Spindel eingespannter Fräser oder Bohrer nicht bis zum Maschinentisch verfahren werden kann. Im Weiteren wurde dieser so kon-

struiert, dass das Anschlusskabel des Quarz-Kraftsensor ohne Abknicken aus der Kraftmessvorrichtung auslaufen kann. Radial wirkende Kräfte werden durch das membranähnliche 0,1mm dünne Kraftsensorblech aufgenommen, ohne dabei auf die axialen Kräfte Einfluss zu nehmen. Bei Kraftmessversuchen können die zu bearbeitenden Proben sofort in den M3-Gewindeanschluss des Quarz-Kraftsensor eingeschraubt, somit auch schnellstens ausgetauscht werden.



**Bild2:** Erste Prototypen

Bei der Werkstoffauswahl des Kraftsensorhalters und des Kraftsensorbocks wurde ebenfalls an die Realisierung hoher Eigenfrequenzen gedacht. Als erster Ansatz wurde die Formel zur Berechnung der Eigenfrequenz eines ungedämpften Systems nach [5] herangezogen. Daraus geht hervor, daß sich die Eigenfrequenz erhöht, wenn die Punktmasse kleiner bzw. die Federsteifigkeit größer wird.

Eigenfrequenz: 
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$
 mit k = Federsteifigkeit; m = Punktmasse

Der Kraftsensorbock hat ein viel größeres Volumen als der Kraftsensorhalter, so daß dieser aus einem eher leichteren Werkstoff, also einen Werkstoff mit einem niedrigen spezifischen Gewicht, gefertigt werden sollte. Da der Quarz-Kraftsensor nicht im Kraftsensorbock sondern im Kraftsensorhalter eingeschraubt wird, ist eine hohe Steifigkeit, somit ein hohes E-Modul des Werkstoffes, nicht von großer Bedeutung. Demnach wurde als Werkstoff des Kraftsensorbocks AlMgSi 0,5 F22 (spezifisches Gewicht = 2,70 kg/dm<sup>3</sup>; E-Modul = 70.000 N/mm<sup>2</sup>) ausgewählt.

Bei der Werkstoffauswahl des Kraftsensorhalters ist die umgekehrte Betrachtung sinnvoll. Wegen des relativ geringen Volumens ist das spezifische Gewicht des Werkstoffes nicht ganz so entscheidend, wie das wegen des eingeschraubten Quarz-Kraftsensor hohe E-Modul des Werkstoffes. Die Wahl fiel demnach auf den Werkstoff X5CrNi 1810 (spezifisches Gewicht = 7,90 kg/dm<sup>3</sup>; E-Modul = 200.000 N/mm<sup>2</sup>).

## Modalanalyse

Um die Eigenfrequenzen einer elastischen Struktur zu bestimmen, wird eine Modalanalyse mittels Impulshammer durchgeführt. Dabei erfolgt zuerst eine Krafteinleitung auf die zu analysierende Struktur mittels Impulshammer, deren Auswirkung von dem auf der Struktur angebrachten piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmer aufgenommen wird. Beide Signale werden dann verstärkt und der FFT-Analyse zugeführt, um zu einer Darstellung im Frequenzbereich zu gelangen. Dieser Darstellung kann das Eigenfrequenzverhalten der analysierten Struktur entnommen werden. [6]

Bei der Modalanalyse des Prototyps einer Kraftmessvorrichtung standen ein Frequenzhammer Model O86B04 (Frequenzbereich 0 bis 8kHz) und ein Beschleunigungsaufnehmer Model m353BI5 (Frequenzbereich 0 bis 10kHz) der Firma PCB Piezotronics zur Verfügung. Damit war die Aufzeichnung der Übertragungsfunktionen im Bereich vom 0 bis 8kHz in x-, y- und z-Richtung möglich. Um nach jedem Ausbau und Wiedereinbau der Kraftmessvorrichtung in der Mikrobearbeitungsmaschine immer den gleichen Einbauzustand vorzufinden, wurden zwei Passstifte zwischen Maschinentisch und Kraftsensorbock eingebaut und alle Befestigungsschrauben mit einem definiertem Drehmoment von 20Nm angezogen. Um Messfehler zu vermeiden, wurden für jede Achsrichtung zehn verschiedene Beschleunigungsaufnehmerpunkte gewählt und deren Übertragungsfunktionen auf Übereinstimmung untereinander verglichen. Die Krafteinleitung erfolgte an der Stelle der tatsächlichen Anregung der Kraftmessvorrichtung während der Werkstückbearbeitung beispielsweise durch einen Fräser.

Das Ergebnis der durchgeführten Modalanalyse ist in Bild 4 gezeigt. Zuerst wurde das Übertragungsverhalten des Kraftsensorbocks untersucht, um darzustellen, welche Eigenfrequenzen der kompletten Kraftmessvorrichtung diesem zu zuordnen sind. Aus der Übertragungsfunktion der x-Achse lassen sich drei Eigenfrequenzen feststellen. Die erste Eigenfrequenz liegt demnach bei 218Hz, die zweite bei 4,25kHz und die dritte bei 4,8kHz. Die Übertragungsfunktion in der y-Achse bestätigt die Eigenfrequenz bei 4,25kHz. Die Analyse der z-Achse brachte keine weiteren Erkenntnisse.

Im weiteren Verlauf der Modalanalyse wurde diese für die komplette Kraftmessvorrichtung durchgeführt, zuerst mit dem liegend eingebauten Kraftsensorhalter (vgl. Bild 3 links). Diese ergab die Eigenfrequenzen bei 218Hz, 4,15kHz, 4,3kHz und 6,3kHz. Die ersten drei dieser vier Eigenfrequenzen sind die bereits bekannten Eigenfrequenzen des Kraftsensorbocks, deren Verschiebung eine Folge der größeren Gesamtmasse (zusätzliche Massen: Quarz-Kraftsensor, Kraftsensorhalter, Kraftsensorblech, vier M3 Schrauben) ist. Die vierte ist eine bisher unbekannte Eigenfrequenz. Hier ist anzunehmen, dass es sich bei dieser um eine Eigenfrequenz der Befestigungsvorrichtung des Quarz-Kraftsensors (Kraftsensorhalter, Kraftsensorblech, vier M3 Schrauben) handelt.

Die Analyse der kompletten Kraftmessvorrichtung mit dem stehend eingespannten Kraftsensorhalter (vgl. Bild 3 rechts) zeigte die niedrigsten Eigenfrequenzen auf und zwar bei 1,8kHz, 2,25kHz, 2,45kHz und 3,1kHz. Diese im Vergleich zum liegend eingebauten Kraftsensorhalter deutlich niedrigeren Eigenfrequenzen sind Folgen von großen Steifigkeitsverlusten der kompletten Kraftmessvorrichtung, die beispielsweise auf Grund des verlagerten Massenmittelpunktes entstehen können.

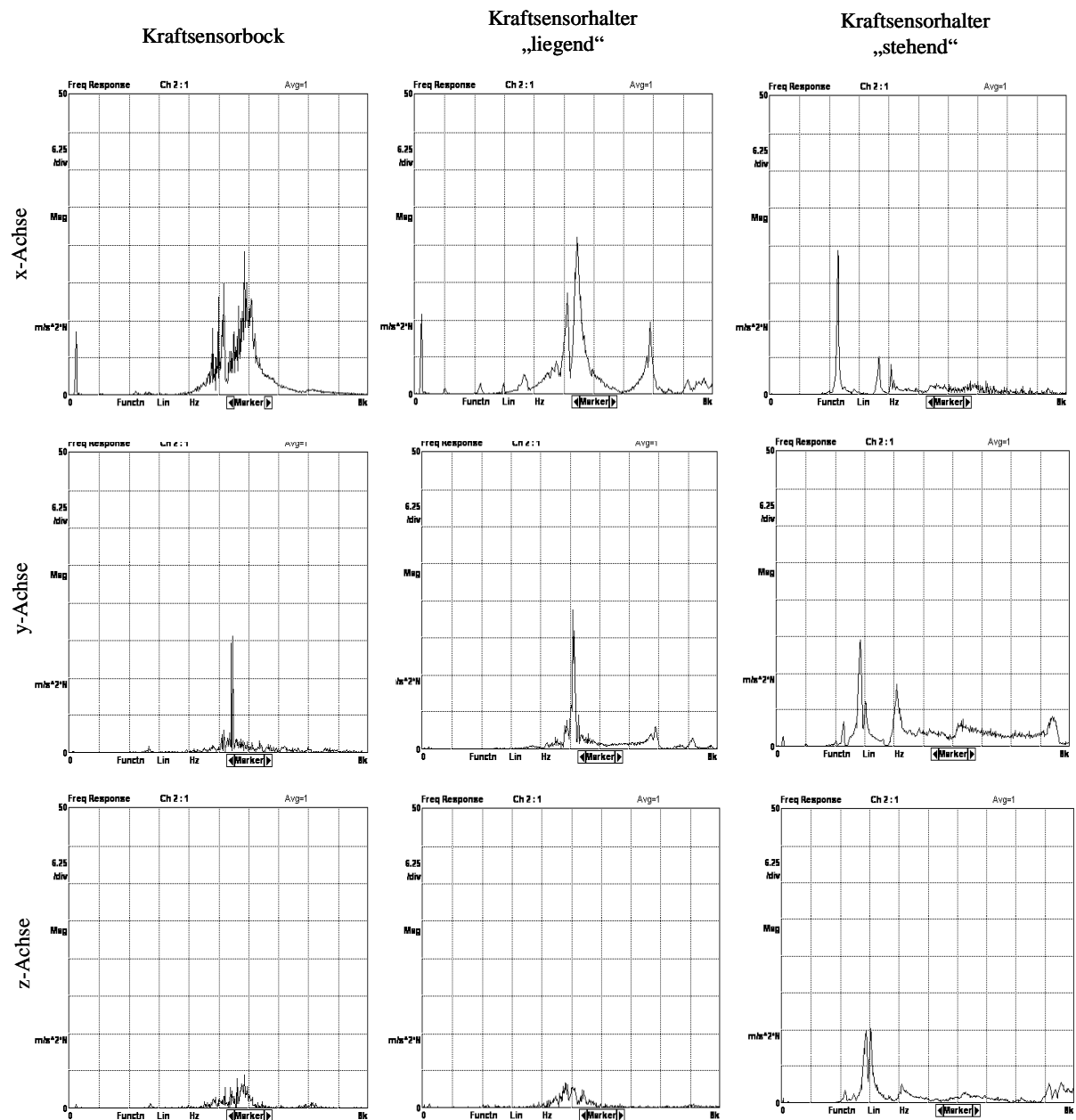
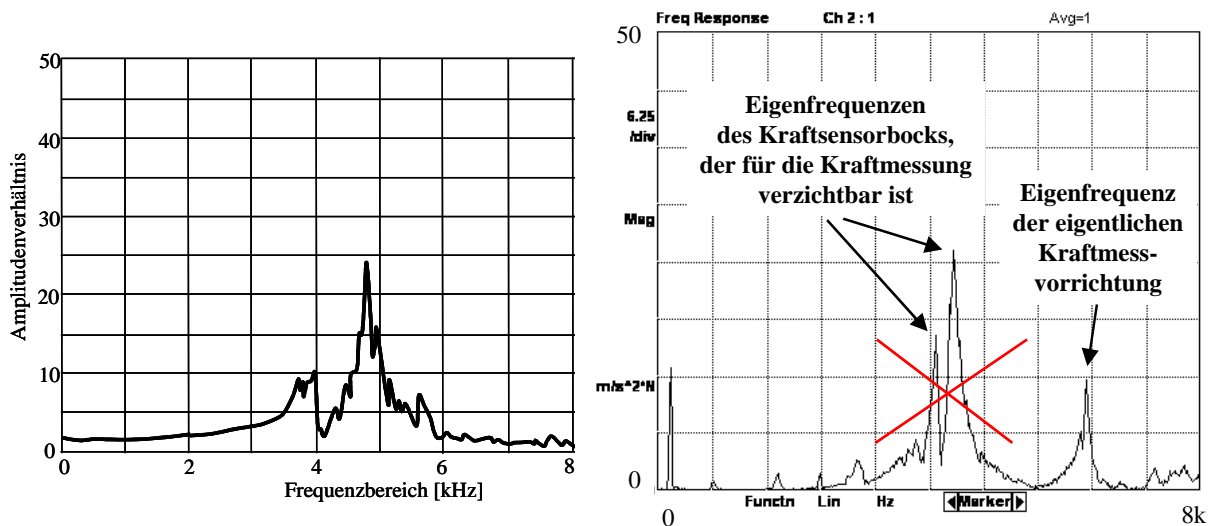


Bild 4: Übertragungsfunktionen in der x-, y- und z-Achse

## Zusammenfassung und Ausblick

Die hier vorgestellte Modalanalyse des am LaFT entwickelten Prototypen einer Kraftmessvorrichtung zeigt, daß der Lösungsansatz in die richtige Richtung geht. Wie in Bild 5 deutlich zu sehen ist, liegen beispielsweise die Eigenfrequenzen des Prototypen in der x-Achse auf Antrieb im Bereich der Eigenfrequenzen des MiniDyn Typ 9256A2 (4,15 kHz und 4,3 kHz) und höher (6,3 kHz). Bedenkt man dabei, dass die Eigenfrequenzen bei 4,15 kHz und 4,3 kHz dem Kraftsensorbock zuzuordnen sind, der eigentlich nur die Aufgabe hat den im Kraftsensorhalter eingeschraubten Quarz-Kraftsensor auf die nötige Arbeitshöhe zu bringen, kann man sagen, dass die Eigenfrequenzen der tatsächlichen Kraftmessvorrichtung (ohne Kraftsensorbock) weit über den Anregungsfrequenzen liegen und die Kraftmesseinrichtung als geeignet gesehen werden kann. Folglich muss zuerst der Kraftsensorbock, der Hauptverursacher der niedrigen Eigenfrequenzen neu ausgelegt werden oder die Spindel in der Mikrobearbeitungsmaschine herabgesetzt werden, so daß kein Kraftsensorbock mehr notwendig ist.

Durch konstruktive Maßnahmen und eine geeignete Werkstoffauswahl ist die Verschiebung der Eigenfrequenzen der Kraftmessvorrichtung in die gewünschten Bereiche möglich. Dabei kommt es darauf an, mit möglichst wenig Masse eine hohe Steifigkeit zu erreichen. Da sich im Weiteren aus einer Volumenabnahme eine Massenabnahme ergibt, müssen die Abmessungen des Kraftsensorbocks untersucht und gegebenenfalls verkleinert werden. Weiter muss ein anderer, besser geeigneter Werkstoff eingesetzt werden, der neben einem geringen spezifischen Gewicht ein hohes E-Modul aufweist. Dafür ist eine genauere Werkstoffstudie notwendig, die beispielsweise die Verwendbarkeit von keramischen Werkstoffen klärt.



**Bild 5:** Vergleich der Übertragungsfunktionen des MiniDyn Typ 9256A2 und des Prototypen einer Kraftmessvorrichtung des LaFT (liegender Kraftsensorhalter) in der x-Achse (vgl. [3])

Im Weiteren muss der Kraftsensorhalter vor allem im Hinblick auf Kraftmessungen in der z-Achse neu konstruiert werden. Der Massenmittelpunkt des dafür stehend befestigten Kraftsensorhalters muss ähnlich wie der des liegend befestigten Kraftsensorhalters näher am Kraftsensorbock liegen, um mehr Steifigkeit in der kompletten Kraftmessvorrichtung zu bekommen. Das ist natürlich schwierig, da erstens der Quarz-Kraftsensor an sich eine gewisse Höhe mit sich bringt und zweitens ein universeller Kraftsensorhalter erhalten bleiben soll, der durch schnelles Umschrauben in jeder Achse positioniert werden kann. Bei Bedarf ist die Kraftmesseinrichtung auf einzelne Bearbeitungsfälle anzupassen und ggf. vor der Kraftmessung eine Modalanalyse durchzuführen.

#### Literatur:

- [1] Bonfig, W.: Technische Druck- und Kraftmessung. Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, 1995, S. 103ff.
- [2] Bill, B.: Messen mit Kristallen: Grundlagen und Anwendungen der piezoelektrischen Messtechnik. Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech, 2002, S. 4ff.
- [3] Kistler Instrumente AG Winterthur: Betriebsanleitung MiniDyn 3-Komponenten-Dynamometer Typ 9256A2, S. 18-23.
- [4] Kistler Instrumente AG Winterthur: Datenblatt Quarz-Kraftsensor Typ 9203.
- [5] Waller, H.; Schmidt, R.: Schwingungslehre für Ingenieure – Theorie, Simulation, Anwendungen. Wissenschaftsverlag, Mannheim/Wien/Zürich, 1989, S. 38ff.
- [6] Ewins, D.J.: Modal Testing: Theorie and Practice. Wiley & Sons Inc., New York, 1995.