Inverse Messung von Kräften in akustisch relevanten Frequenzbereich

Backhaus, S.

In der Akustik sowie in anderen technischen Anwendungen tritt häufig das Problem auf, dass Kräfte gemessen werden müssen, der Kraftfluss aber nicht durch einen Kraftsensor unterbrochen werden darf. Der folgende Artikel stellt ein Verfahren vor, wie diese Einschränkung umgangen werden kann.

During structure borne sound measurements and other technical tasks there is often a problem to measure forces without weaking the structure by inserting a force sensor. This article shows a way to avoid such problems.

1 Problemstellung

In vielen technischen Anwendungsfällen, insbesondere im Bereich der akustischen Messtechnik kommt es häufig zu Anwendungen bei denen dynamische Kräfte gemessen werden müssen. Leider ist es bei einigen Anwendungen nicht möglich einen Kraftsensor im direkten Kraftfluss unterzubringen, da es durch dessen Anbringung zu einer Schwächung der Umgebung kommen würde.

Vor allem aus der Betriebsfestigkeit ist ein Verfahren zur indirekten Bestimmung von Kräften bekannt, die Dehnungsmessung mittels Dehnungsmesstreifen (DMS). Mit DMS lässt sich die Dehnung (ε) an der Oberfläche eines Bauteils messtechnisch bestimmen. Mit Hilfe des Elastizitätsmoduls (E) des eingesetzten Materials lassen sich anhand des Hooke´schen Gesetzes die im Bauteil auftretenden Spannungen (σ) berechnen.

$$\sigma = E\varepsilon$$

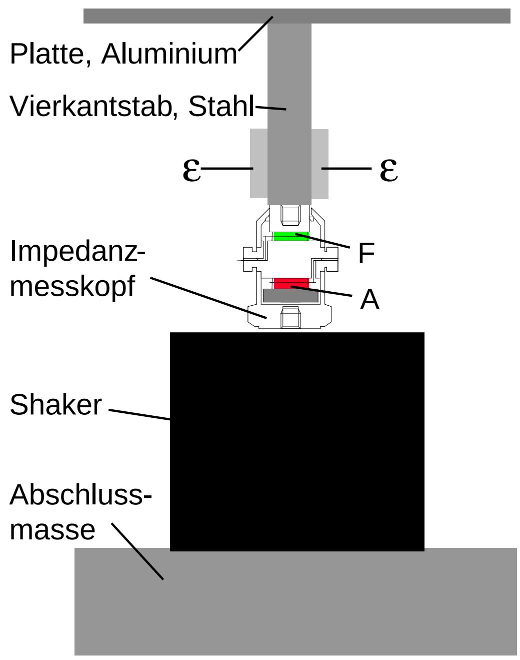
Unter Verwendung der beanspruchten Fläche (A) lässt sich daraus auf die im Bauteil herrschenden Kräfte (F) schließen.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Die in der Betriebsfestigkeit eingesetzten DMS sind allerdings nur für Schwingungen mit wenigen tausend Hertz brauchbar. Erst neuere Entwicklungen aus der Messtechnik haben Sensoren geliefert, die für Messungen im akustisch relevanten Frequenzbereich geeignet sind. Diese Dehnmesselemente beruhen auf dem in der Schwingungsmesstechnik häufig verwendeten piezoelektrischen Messprinzip, welches Schwingungsmessungen, im Fall der Dehnungssensoren, theoretisch bis zu 100 kHz zulassen.

2 Messtechnischer Versuchsaufbau

Bevor im Kraftfluss liegende Kraftsensoren durch an der Oberfläche applizierte Dehnungssensoren



ersetzt werden sollen, wurden Versuche durchgeführt, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse zu prüfen.

In **Bild 1** ist der Versuchsaufbau dargestellt.

Bild 1: Versuchsaufbau

Mittels eine elektrodynamischen Schwingerregers (Shaker) wird über einen Impedanzmesskopf, der in diesem Fall als Kraftsensor dient, ein Vierkantstab aus Stahl sowie eine Aluminiumplatte angeregt. Der Kraftsensor innerhalb des Impedanzmesskopfes dient als Referenz. Mit ε sind die Dehnungssensoren gekennzeichnet, die für die Messung links und rechts an der Oberfläche des Stahlstabes in Richtung des Kraftflusses angebracht sind. Die Aluminiumplatte dient als

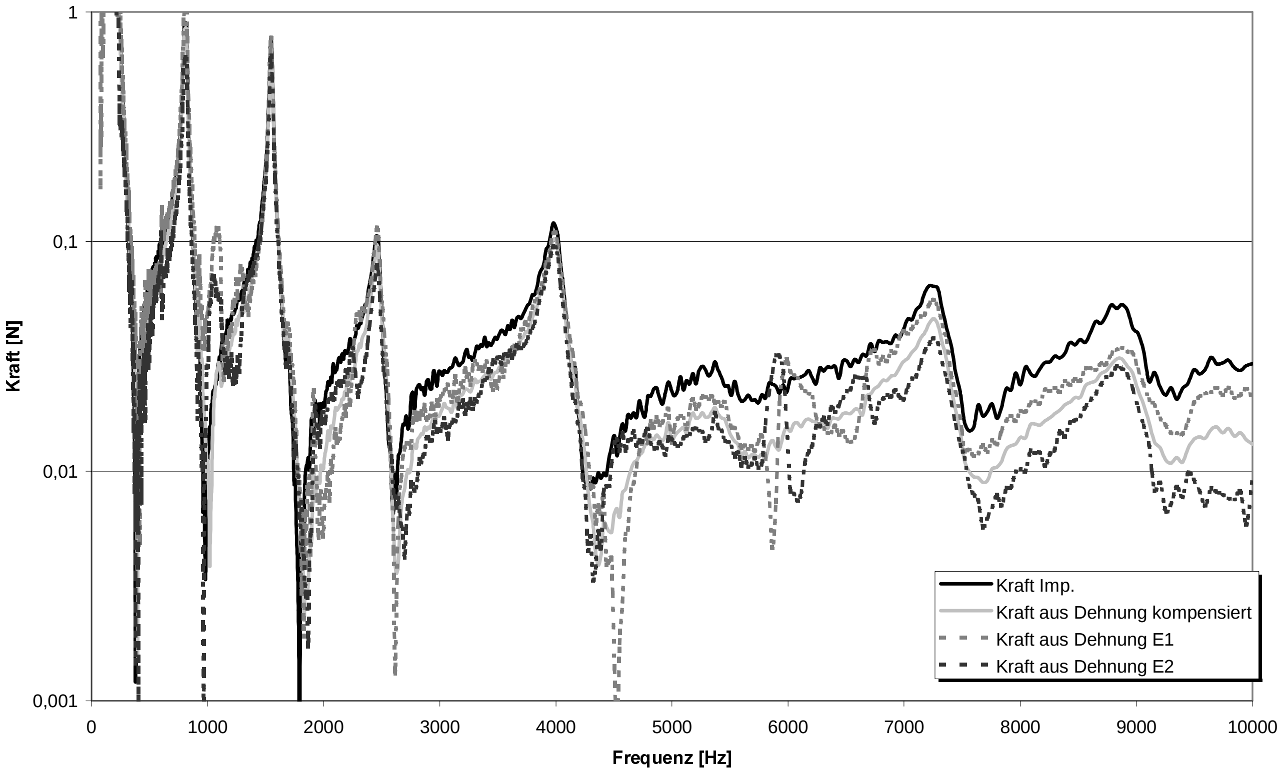


Bild 2: Spektrum der Kraft über der Frequenz

Abschlussmasse um der Anregung durch den Shaker einen Widerstand entgegen zu setzen.

Als Anregungssignal wurde ein Sinussweep zwischen 50 und 10000 Hz verwendet.

Bild 2 zeigt das Amplitudenspektrum der Kraft über der Frequenz. Dabei gilt zu beachten, das die Achse der Kraft logarithmisch aufgetragen ist. Wie in der Grafik gut zu erkennen ist, stimmen die Messwerte des Kraftsensors und die der Dehnungssensoren E 1 und E 2 bis etwa 4000 Hz gut überein. Oberhalb dieser Frequenz beginnen die Kurven auseinander zu driften. Weiterhin zeigen sich bei ca. 4500 sowie bei 6000 Hz starke Abweichungen innerhalb der Verläufe der Dehnungssensoren gegenüber der Messwerte des Kraftsensores. Diese Ausreißer sind mit Biegeeinflüssen des Stabes zu erklären, wobei ein Dehnungssensor gestaucht und ein anderer gestreckt wird. Sind beide Sensoren gegenüberliegend jeweils im gleichen Abstand von der neutralen Faser des Stabes angebracht, lässt sich dieser Einfluss durch phasenrichtige Addition der Signale im Frequenzbereich nach folgender Formel kompensieren.

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\phi_1 - \phi_2)}$$

$$\Phi = \arctan\left(\frac{A_1\sin(\phi_1) + A_2\sin(\phi_2)}{A_1\cos(\phi_1) + A_2\cos(\phi_2)}\right)$$

Dabei gibt A die Amplitude des jeweiligen Signals, Φ die Phase an.

Das nach obiger Gleichung kompensierte Signal ist, wie in **Bild 2** von Biegeeinflüssen befreit. Was bleibt, ist die Drift des Signals bei höheren Frequenzen. Diese Erscheinung ist auf die Masse- und Federeigenschaften des Stabes im Bereich der Dehnungsaufnehmer zurückzuführen und muss in weiteren Versuchen untersucht werden.

3 Zusammenfassung

Darf eine Struktur aufgrund sonst auftretender unzulässiger Schwächungen nicht so verändert werden, dass ein Kraftaufnehmer eingebaut werden kann, können Dehnungsaufnehmer an der Oberfläche der Struktur eingesetzt werden, um die inneren Kräfte zu bestimmen. Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass eventuell auftretende Biegeverformungen der Bauteile die Ergebnisse verfälschen und deshalb durch Mehrfachmessung und anschließende phasenrichtige Addition der Signale kompensiert werden müssen.

Biegeeinfluss des Stabes

4 Literatur

/1/ Beitz, W.; Küttner, K.-H. [Hrsg.]: Taschenbuch für den Maschinenbau / Dubbel, 14. Auflage, Berlin, Heidelberg, Newe York: Springer 1981