

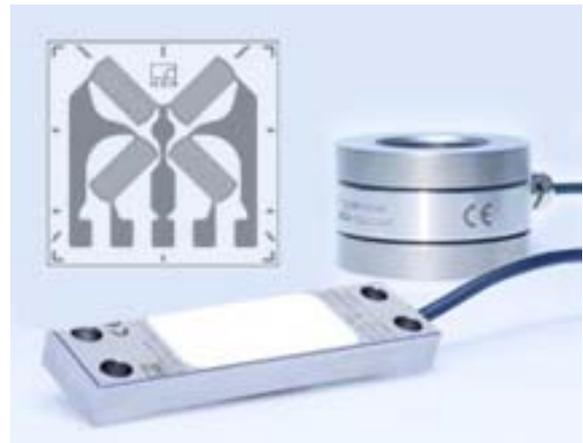


## Messen von Kräften im Kraftnebenschluss: Drei Methoden aus der Praxis

Das Messen von Kräften mit Kraftaufnehmern bietet viele Vorteile, unter anderem eine hohe Genauigkeit. Dennoch gibt es immer wieder Situationen, in denen eine Kraftmessung im Kraftnebenschluss von Vorteil ist. Für diese Fälle werden spezielle, exakt auf die Anwendung zugeschnittene Sensoren angeboten. Drei Methoden für die Messung im Kraftnebenschluss stellen wir Ihnen in diesem Beitrag vor.

Der Vorzug kalibrierter Kraftaufnehmer ist, dass die während der Kalibrierung festgestellte Kennlinie – also der Zusammenhang zwischen eingeleiteter Kraft und Ausgangssignal - auch nach der Montage am Einsatzort sehr gut reproduziert wird. Voraussetzung ist, dass der Kraftaufnehmer im Kraftfluss montiert ist und kein Kraftnebenfluss besteht. Die gesamte zu messende Kraft muss durch den Aufnehmer fließen.

Das bedeutet aber auch, dass die Eigenschaften des Kraftaufnehmers – wie z.B. Steifigkeit und dynamisches Verhalten – die Gesamtkonstruktion beeinflussen. Hinzu kommt, dass Kraftaufnehmer für hohe Kräfte sehr große Konstruktionen sind.



Eine Alternative ist die Möglichkeit, die Verformung der Konstruktion, in der Kräfte gemessen werden sollen, zu nutzen, um eine Kraftmessung durchzuführen. Hierfür stehen drei verschiedene Methoden zur Verfügung.

Diese drei Methoden sind:

- Die Installation von Dehnungsmessstreifen
- Die Verwendung von anschraubbaren Dehnungsaufnehmern, zum Teil sogar mit integrierter Elektronik
- Der Einsatz von Kraftmessringen, basierend auf Dehnungsmessstreifen- oder Piezotechnologie.

Die Tabelle zeigt die wesentlichen Vor- und Nachteile der vorgestellten Methoden:

Installation von Dehnungsmessstreifen	Verwendung von Dehnungsaufnehmern	Einsatz von Kraftmessringen
<b>Vorteile</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auch an sehr <b>filigranen Konstruktionen</b> bei <b>geringer Krafteinwirkung</b> gut geeignet, bei denen die anderen Verfahren wegen zu hohem Kraftnebenschluss ausscheiden</li> <li>• <b>Minimaler Platzbedarf</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Einfache Montage</b> durch Verschraubung auf bestehenden Strukturen, <b>schnell einsetzbar</b></li> <li>• <b>Kompensation</b> von zu unterdrückenden <b>Dehnungseinflüssen</b> bei Parallelschaltung mehrerer Sensoren</li> <li>• Versionen mit <b>integrierter Elektronik</b> direkt in der <b>Anwendung einmessbar</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ideal zum Einsatz auf <b>Bolzen</b> oder <b>Schrauben</b></li> <li>• <b>Hohe Schutzart</b></li> <li>• <b>Einbaufertig</b> geliefert</li> </ul>
<b>Nachteile</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Installationsaufwand</b> (Verkleben, Verschalten, Schutzabdeckung)</li> <li>• <b>Kalibrierung im Kraftnebenschluss</b> erforderlich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Kalibrieren im Kraftnebenschluss</b> erforderlich (reduzierter Aufwand bei Varianten mit integrierter Elektronik)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Kalibrieren im Kraftnebenschluss</b> erforderlich</li> </ul>

## Messung von Kräften an Strukturen mittels Dehnungsmessstreifen

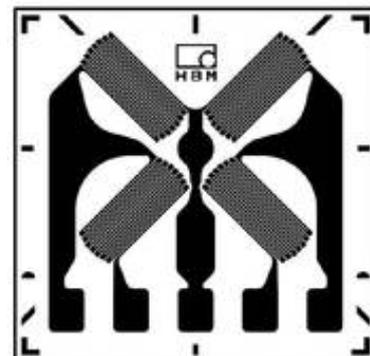
Die direkte Installation von Dehnungsmessstreifen zur Kraftmessung ist mit mehreren Vorteilen verbunden.

So üben aufgeklebte Dehnungsmessstreifen (DMS) praktisch keinen Einfluss auf die Struktur des zu messenden Objekts aus. Die Steifigkeit und auch das dynamische Verhalten der Gesamtstruktur bleiben erhalten. Besonders an feinen Konstruktionen sind die DMS im Vorteil, da sie nur sehr geringe Kräfte benötigen, um gedehnt zu werden.

Zum Einsatz kommen in dieser Installation DMS-Vollbrücken, die durch geschickte Auswahl parasitäre Einflüsse (z.B. Biegemomente oder Torsion) kompensieren oder gerade diese messen [1], [2].

Gehen wir am Werkstück von einer Zug/Druckbelastung ohne einwirkende Biegemomente aus, bieten sich Vollbrücken-DMS wie das Modell VY41 von HBM an, die unter 45 Grad installiert werden müssen.

Das Ausgangssignal einer solchen Messbrücke hängt nur vom k-Faktor der verwendeten DMS und dem Dehnungsniveau, sowie der Querdehnungszahl des Materials ab, und



*Bild 1: DMS VY41. Der DMS ist bereits als Vollbrücke vorbereitet, um den Verdrahtungsaufwand zu minimieren. Beachten Sie die Ausrichtmarkierungen unter 45 Grad, die bei Installation im vorliegenden Fall wichtig sind.*

lässt sich wie folgt berechnen:

$$\left(\frac{U}{U_0}\right) = k \cdot \varepsilon(1 + \mu)$$

Hierbei gilt:

$U/U_0$	Ausgangssignal der Messbrücke
$k$	k-Faktor der DMS
$\varepsilon$	Dehnungsniveau am DMS
$\mu$	Querdehnungszahl

Geht man von einer mechanischen Spannung von 20 MPa in einer Stahlkonstruktion aus, so ergibt sich eine Dehnung von 100  $\mu\text{m/m}$ ; mit der Formel oben lässt sich dann ein Ausgangssignal von 0,13 mV/V berechnen, wenn ein k-Faktor von 2 angenommen wird.

Diese Rechnung zeigt auch den Nachteil der aufgeklebten Dehnungsmessstreifen. Soll die Konstruktion eine gegebene Steifigkeit erreichen, ist das erreichbare Ausgangssignal sehr klein.

Zudem muss der DMS vor Ort installiert werden. Eine Schutzabdeckung ist notwendig. Die Verschaltung der Dehnungsmessstreifen muss zudem mit hoher Sorgfalt vorgenommen werden, was den Zeitaufwand bei der Installation erhöht. Details zur Installation von Dehnungsmessstreifen finden Sie in den Bedienungsanleitungen der Klebstoffe und Abdeckmittel, sowie in den Schriften und Seminaren von HBM.

Ein einfaches Mittel, das Ausgangssignal der Messbrücke zu erhöhen, ist die gezielte Schwächung des Bauteils. Dadurch wird allerdings die Steifigkeit des Objektes beeinflusst. Dies hat wiederum Auswirkungen auf das dynamische Verhalten und die Stabilität.

### Messung von Kräften mit Dehnungsaufnehmern

Dehnungsaufnehmer sind Sensoren, die auf eine bestehende Struktur montiert werden können. Diese Aufnehmer basieren auf einem Federkörper, auf dem eine DMS-Vollbrücke installiert ist.

Wie auf dem Foto zu erkennen, verfügen solche

Dehnungsaufnehmer bereits über eine Silikonabdeckung (weiße Fläche auf dem Aufnehmer), die neben einem Feuchtigkeitsschutz auch einen gewissen mechanischen Schutz bietet.

Dehnungsaufnehmer sind nach dem Prinzip eines Dehnungstransformators aufgebaut. Im Bereich der installierten Dehnungsmessstreifen ist die Dehnung größer als der Dehnungswert zwischen den beiden Verschraubungen.

Bild 3 zeigt den Federkörper eines SLB. Die Dehnung, die in den Aufnehmer eingeleitet wird, wird auf die Zone, auf der der Dehnungsmessstreifen installiert ist, konzentriert. Der Grund:



*Bild 2: Dehnungsmessstreifenbasierter Dehnungsaufnehmer SLB700*



*Bild 3: Federkörper des SLB: Deutlich zu erkennen die Dehnzone, in der der DMS installiert ist*

Hier wird eine erheblich kleinere Steifigkeit verwendet. Die Dehnungsüberhöhung lässt sich näherungsweise berechnen durch:

$$\varepsilon_{DMS} = \frac{\varepsilon_{\text{Objekt}} \cdot l_{\text{Dehnsensor}}}{l_{\text{Dehnzone}}}$$

Wobei:

$\varepsilon_{DMS}$	unter dem DMS anliegende Dehnung
$\varepsilon_{\text{Objekt}}$	Dehnung , die zwischen den Verschraubungen anliegt
$l_{\text{Dehnsensor}}$	Abstand der Verschraubungsstellen
$l_{\text{Dehnzone}}$	Länge der Schwächungszone

In dieser Betrachtung sind einige Idealisierungen enthalten.

So wird die Zone, in der die Dehnung eingeleitet wird, als dehnungsfrei angenommen. Dies trifft natürlich – streng genommen – nicht zu. Jedoch zeigt sich, dass die Empfindlichkeit des Dehnungsaufnehmers über das Längenverhältnis der Dehnzone und des Abstandes der beiden Verschraubungsstellen einstellbar ist. Im Prinzip ist somit eine sehr hohe Empfindlichkeit erreichbar, jedoch hat sich in der Praxis ein Ausgangssignal von 1,5 mV/V bei 500  $\mu\text{m/m}$  als günstig erwiesen. Somit ergibt sich eine Steigerung der Empfindlichkeit gegenüber einer DMS-Vollbrücke, wie im vorhergehenden Absatz vorgestellt um 230%.

Durch geeignete schaltungstechnische Maßnahmen ist die Wärmeausdehnung von Bauteilen kompensiert.

Es stehen auch Dehnungsaufnehmer mit integrierter Elektronik zur Verfügung, die in der Anwendung einmessbar sind, und eine besonders wirtschaftliche Messkette darstellen.

Die Sensoren ohne Elektronik weisen einen hohen Brückenwiderstand von 700  $\Omega$  auf. Somit können mehrere Dehnungsaufnehmer parallel geschaltet werden, ohne dass dem Messverstärker ein zu hoher Speisestrom abverlangt wird.

Durch diese Maßnahme lassen sich zu unterdrückende Dehnungseinflüsse kompensieren. Sollen zum Beispiel Pressenkräfte an einer Säule überwacht werden, so ist nur der Dehnungsanteil relevant, der durch die Zug-/Druckbelastung entsteht.

Nehmen wir an, dass zwei Dehnungsaufnehmer parallel geschaltet und auf gleicher Höhe gegenüberliegend auf einer Säule montiert werden. Im Falle einer Biegebelastung wird der eine Aufnehmer eine höhere Dehnung erfahren, der zweite wird um den gleichen Betrag geringer belastet. Insgesamt wird nur der Dehnungsanteil gemessen, der durch die Zug- oder Druckbelastung entsteht. Die Biegung ist kompensiert.

Die SLB-Dehnungsaufnehmer von HBM lassen sich auf Strukturen mittels 4 Schrauben M6 montieren. Dafür ist nur eine ebene, von Anstrichen oder anderen Beschichtungen befreite Fläche notwendig. Nachdem der Dehnungsaufnehmer mit dem empfohlenen Drehmoment angeschraubt wurde, empfiehlt es sich noch einen Korrosionsschutz aufzubringen, der z.B. aus dem Abdeckband ABM75 bestehen kann. Danach ist ein solcher Sensor sofort einsetzbar.

## Messung von Kräften mit Kraftmessringen

Kraftmessringe können sowohl auf Dehnungsmessstreifen- wie auch auf Piezotechnologie basieren. Gleich, welches Prinzip ausgewählt wird:

Kraftmessringe eignen sich zum Einsatz auf einem Bolzen oder einer Schraube. Deshalb ist der Innendurchmesser der Kraftmessringe den gängigen Außendurchmessern von metrischen Gewinden angepasst. In den Datenblättern des Kraftmessrings KMR sind auch Zoll-Maße vermerkt.

Der Kraftnebenschluss entsteht dadurch, dass der Bolzen oder die Schraube, auf der der Messring installiert ist als parallele Feder wirkt, und somit die Empfindlichkeit des Messsystems verringert. In diesem Fall kann von einem Wert von ungefähr 10% ausgegangen werden.

Dies hat zur Folge, dass Kraftmessringe nicht ab Werk kalibriert werden können; hier ist, wie bei den beiden oben vorgestellten Methoden, immer die Kalibrierung im Kraftnebenschluss notwendig.

Um gute Reproduzierbarkeit zu erreichen, ist es notwendig, eine Vorspannung auf den Kraftmessring wirken zu lassen. Die Größe dieser Kraft hängt von der Nennkraft des Sensors und der zu bestimmenden Kraft ab - die größten Biegemomente dürfen auf einen Kraftmessring wirken, wenn dieser zu 50% belastet ist. Idealerweise wird man versuchen, die Vorspannung so auszulegen, dass die Vorspannkraft mit der Betriebskraft addiert im Mittel bei 50% der Nennkraft des Messringes liegt. Diese Empfehlung gilt insbesondere für piezoelektrische Messringe [3].

Kraftmessringe bieten eine hohe Schutzart und werden einbaufertig geliefert, wodurch sie in dieser Hinsicht die gleichen Vorteile wie die Dehnungsaufnehmer bieten. Auch Kraftmessringe bieten eine ausreichende Empfindlichkeit, die bei den piezoelektrischen Aufnehmern sogar unabhängig von der Nennkraft ist.

Bei HBM sind im Zubehör die Scheiben zur Kräfteinleitung der DMS-basierten Aufnehmer enthalten, die für eine gleichmäßige Verteilung der Kräfte über den gesamten Umfang sorgen. Können diese Scheiben nicht verwendet werden, so muss die Oberfläche, die mit den Aufnehmern in Berührung kommt, gehärtet (43 HRC) und geschliffen sein, die Materialunebenheit soll 20 µm nicht überschreiten.



*Bild 4: Kraftmessring KMR in der kleinsten Bauform Nennkraft 20 kN*



*Bild 5: Piezoelektrische Kraftmessringe CFW, verfügbar in den Bauformen 20 bis 700 kN. Hier: 330 und 700 kN*



*Bild 6: Ein Kraftmessring misst die auf eine Verschraubung wirkenden Kräfte zur Werkzeugüberwachung.*

## Kalibrierung von Messketten im Kraftnebenschluss

Allen drei vorgestellten Verfahren ist gemein, dass die Messkette nach erfolgter Montage zu kalibrieren ist. Hierzu müssen zumindest zwei bekannte Kraftpunkte angefahren werden. Das Ausgangssignal der Sensoren wird dann den Kräften zugeordnet. Da das Verhalten der Sensoren in engen Fehlergrenzen linear ist und diese Verfahren für hochpräzise Messungen nicht in Betracht kommen, ist eine Zweipunktkalibrierung im Allgemeinen ausreichend.

Die integrierte Elektronik des Dehnungsaufnehmers verfolgt diesen Gedankengang. Zum Einmessen ist es nur erforderlich, die Nulllage anzufahren und einen Steuerimpuls an die Elektronik zu geben. Nach Anfahren der maximalen Kraft wird ein weiterer Steuerimpuls notwendig. Sodann stellt sich die Elektronik selbstständig ein. Nullsetzen ist natürlich separat möglich, ohne den Verstärkungsfaktor zu verändern.

Die Dehnung Null entspricht dabei 1 V, die maximale Dehnung wird zu 9 V gewandelt, jedoch ist der Ausgangsbereich von 0 bis 10 V eingestellt, so dass jeweils 10% Messbereich für Überlast, bzw. negative Dehnungen verfügbar sind. Die Elektronik erlaubt es auch, negative Eingangsdehnung in positive Ausgangsspannungen zu wandeln. Es stehen Stromversionen zur Verfügung, die sinngemäß arbeiten und einen Ausgangsbereich von 4...20 mA bieten.

## Messen von Kräften im Kraftnebenschluss: Das Fazit

Diese Übersicht zeigt: Wenn es Situationen gibt, in denen die Kräfte im Kraftnebenschluss gemessen werden müssen, gibt es verschiedene hilfreiche Methoden. Alle Verfahren haben gemein, dass sie das mechanische Verhalten der Gesamtkonstruktion – wenn überhaupt – nur marginal beeinflussen.

Wenn es jedoch um hohe Genauigkeiten geht, sind Kraftaufnehmer auf DMS- oder Piezotechnologie weiterhin erste Wahl. Dies aus folgenden Gründen:

- Eine Justage des Kraftaufnehmers in der Einbausituation ist nicht notwendig, da die Aufnehmer bereits mit hoher Präzision kalibriert sind. Bei der Ermittlung von Kräften im Kraftnebenschluss ist ein Einmessen direkt am Objekt immer erforderlich.
- Die Messunsicherheit von Kraftaufnehmern ist bekannt und kann über die Wahl des Kraftaufnehmer-Modells beeinflusst werden.
- Mit dem Einsatz hochwertiger Aufnehmer (z.B. mit Genauigkeitsklasse von 0,02 wie bei S9M von HBM) lassen sich sehr hohe Genauigkeiten erreichen, die mit den Messungen im Kraftnebenschluss nicht erreichbar sind.

## Literatur

[1]	Karl Hoffmann, "Eine Einführung in die Technik des messens mit Dehnungsmessstreifen", Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1989
[2]	Stephan Keil, "Beanspruchungsanalyse mit Dehnungsmessstreifen", Genius Verlag, 1995
[3]	T. Kleckers, „Piezoelektrische Kraftaufnehmer : 5 Regeln für Installation und Montage“, HBM Homepage, 2009



**Thomas Kleckers**

Product Manager  
Industrial Measurement Solutions

HBM Test and Measurement

E-Mail: [thomas.kleckers@hbm.com](mailto:thomas.kleckers@hbm.com)

**HBM Test and Measurement**

[www.hbm.com](http://www.hbm.com)  
E-Mail: [info@hbm.com](mailto:info@hbm.com)

Tel. 06151 803-0  
Fax 06151 803-9100

**measure and predict with confidence**

