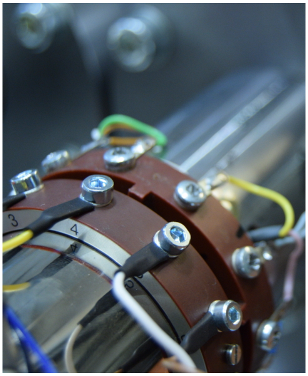
Über das Messen von Wellenbeanspruchungen mittels DMS bei begrenzter Drahtzahl



Hofmann, S.

Sollen Belastungen bzw. Beanspruchungen auf rotierenden Bauteilen gemessen werden, kann in einigen Fällen die Anzahl der zur Verfügung stehenden Messdrähte stark begrenzt sein. Dieser Artikel stellt einen Lösungsansatz vor, wie bei begrenzter Drahtzahl möglichst viele Beanspruchungsgrößen einer Welle mittels Dehnungsmessstreifen (DMS) ermittelt werden können.

If the task is to measure loads or rather stresses on rotating components, the challenge is in some cases the limited number of available measuring wires. A possible solution for measuring as many loads as possible, while using strain gauges and having to deal with a limited number of wires, is presented in this article.

Motivation

Charakteristisch für Wellen ist, dass diese durch ein Drehmoment auf Torsion beansprucht werden. Neben dieser – in der Regel – Hauptbeanspruchung sind Wellen in den meisten maschinenbaulichen Anwendungen noch durch Biegemomente, Querkräfte und Axialkräfte belastet. Die Kenntnis dieser Belastungsgrößen ist z.B. für eine Optimierung der Wellengeometrie oder Aussagen über den Betriebszustand der Maschinen erforderlich oder zumindest wünschenswert.

Diese Belastungsgrößen bzw. die daraus resultierenden Beanspruchungen können z.B. durch Dehnungsmessstreifen (DMS), welche auf der Welle selbst appliziert wurden, gemessen werden. Aus der im Allgemeinen vorhandenen Rotation der Welle ergibt sich hierbei jedoch die Problematik, die Messsignale von den drehenden Teilen zu übertragen. Neben der Nutzung von Telemetriesystemen können hierzu z.B. auch Schleifringübertrager verwendet werden. Allen Systemen ist hierbei jedoch gemein, dass die Anzahl der zur Verfügung stehenden Messkanäle bzw. Spuren begrenzt und sie relativ teuer sind.

Diesem Artikel liegt die Aufgabe zugrunde die aus den Verzahnungskräften an einer Getriebewelle wirkenden Biegemomente und Axialkräfte an jeweils 2 axialen Positionen (Messstelle I und Messstelle II) temperaturkompensiert zu messen. Ziel der Messung ist es hierbei besonders die Unterschiede zwischen den Belastungen der beiden Seiten zu ermitteln. Zur Messung dieser Belastungsgrößen steht pro Welle je ein Schleifringübertrager mit 12 Spuren zur Verfügung. Abbildung 1 verdeutlicht die Lage der Messstellen an der Getriebewelle.

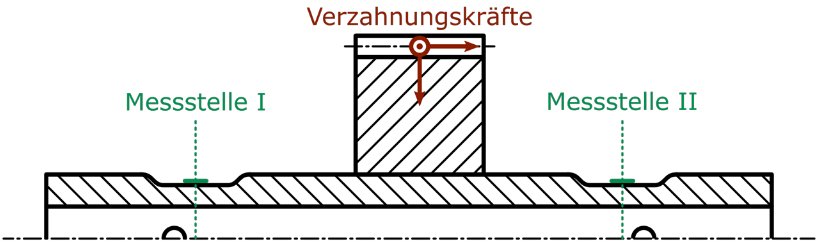


Abbildung 1: Lage der Messstellen an der Getriebewelle

Messen mit Dehnungsmessstreifen

Das eigentliche Sensorelement eines Dehnungsmessstreifens besteht aus einem feinen Widerstandsgitter. Dieses Messgitter ist in der Regel in eine Trägerfolie eingebettet und wird mit der Trägerfolie auf der Oberfläche des zu messenden Bauteils aufgeklebt. Infolge der Belastung des Messkörpers entstehen an der Messstelle Dehnungen, welche auf das Messgitter übertragen werden. Dieses ändert infolge der Dehnung des Messgitters seinen elektrischen Widerstand, was wiederum mit geeigneter Messtechnik gemessen werden kann.

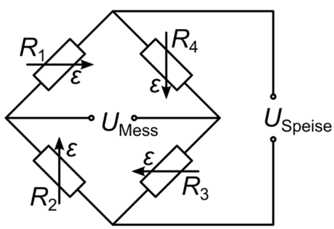


Abbildung 2: WHEATSTONEsche Brückenschaltung mit DMS-Vollbrücke

Zur Messung der, infolge der Belastungen hervorgerufenen, Widerstandsänderungen wird eine sogenannte WHEATSTONEsche Brückenschaltung verwendet, wie sie in Abbildung 2 gezeigt ist. Wie aus Abbildung 2 weiterhin ersichtlich ist, wird zum Betrieb einer solchen Brückenschaltung ein Widerstandsnetzwerk aus 4 elektrischen Widerständen (R_1 bis R_4) benötigt. Diese müssen wiederum mit einer Spannung (U_{Speise}) versorgt werden, was den Anschluss von 2 Drähten nötig macht. Ebenso muss die Spannung U_{Mess} gemessen werden, was 2 weitere Drähte nötig macht. Dies bedeutet, dass für eine Brücke mit 4 aktiven Widerständen (DMS), welche dementsprechend auch als Vollbrücke bezeichnet wird, mindestens 4 Drähte benötigt werden. Jeder dieser Drähte würde hierbei eine Spur des Schleifringübertragers belegen, sodass in diesem Fall nur mit 3 Vollbrücken oder 4 Halbbrücken gemessen werden könnte.

Für die temperatur- und biegekompensierte Messung der Axialkraft können nur Vollbrücken verwendet werden. Damit ist die Messung von sowohl Axialkraft als auch Biegemoment pro Messstelle mit Halb- bzw. Vollbrücken in diesem Fall leider nicht möglich.

Zwischen den an der Brückenschaltung anliegenden Spannungen und den Dehnungen der einzelnen Messgitter besteht der folgende Zusammenhang:

$$\frac{U_{\text{Mess}}}{U_{\text{Speise}}} = \frac{k}{4} \cdot \left(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4\right) \qquad 1$$

Der Wert *k* stellt hierbei die Dehnungsempfindlichkeit des DMS dar, ist also ein Wert dafür wie stark die Änderung des elektrischen Widerstands infolge der Dehnung des Messgitters ist.

Im Fall einer Vollbrückenschaltung können die Eigenschaften der WHEATSTONEschen Brückenschaltung, die sich aus Gleichung 1 ergeben genutzt werden, um eine Verstärkung von gewünschten Dehnungsanteilen und gleichzeitig eine Kompensation unerwünschter Dehnungsanteile zu erreichen.

Messen von Biegemomenten und Axialkräften an zwei Messstellen bei begrenzter Drahtzahl

Um mit den zur Verfügung stehenden Spuren des Schleifringübertragers alle 4 gewünschten Belastungsgrößen (jeweils Axialkraft und Biegemoment pro Messstelle) messen zu können, werden nun ausschließlich sogenannte Viertelbrücken verwendet. Bei dieser Art der Brückenschaltung ist nur 1 Widerstand des Widerstandsnetzwerks ein aktiver DMS (siehe R_1 in Abbildung 3). Die Ergänzung des Widerstandsnetzwerks zu einer vollständigen WHEATSTONEschen Brückenschaltung erfolgt verstärkerseitig, also im nicht rotierenden Teil der Messkette.

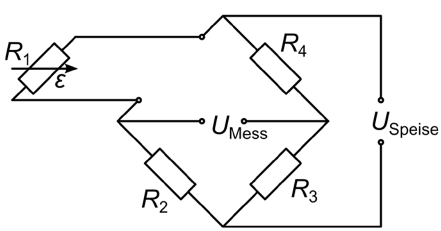


Abbildung 3: WHEATSTONEsche Brückenschaltung mit DMS-Viertelbrücke

Für eine Viertelbrücke müssen demnach nur noch 2 Spuren/Anschlüsse des Schleifringübertragers belegt werden. Dies bedeutet wiederum, dass die Signale von 6 DMS-Viertelbrücken pro Getriebewelle übertragen werden können.

Ein entscheidender Nachteil einer Viertelbrücke ist jedoch, dass diese sowohl nicht temperaturkompensiert ist als auch die jeweils aus Biegung und Axialkraft entstehenden Dehnungsanteile nicht voneinander getrennt aufnehmen kann.

Werden Bauteile einer Temperaturänderung ΔT ausgesetzt, so dehnen sie sich je nach Längenausdehnungskoeffizient des Werkstoffs α aus. Für die Temperaturdehnung ε_T besteht hierbei der folgende Zusammenhang:

$$\varepsilon_T = \alpha \cdot \Delta T \tag{2}$$

Dem Effekt der Temperaturdehnung kann über eine sogenannte Selbstkompensation der DMS entgegengewirkt werden. Hierzu sind DMS zu wählen, die vom DMS-Hersteller derart eingestellt sind, dass sie unter Temperatur dem Langenausdehnungskoeffizienten des Bauteilwerkstoffs entgegenwirken. Eine geringe Temperaturempfindlichkeit der Viertelbrücke verbleibt jedoch in der Regel, welche durch den entsprechenden Temperaturgang des DMS (in der Regel als Polynom vom Hersteller angegeben) rechnerisch bereinigt werden kann. Nach Möglichkeit ist jedoch eine Temperaturkompensation durch eine entsprechende Verschaltung oder wie in diesem Fall Verrechnung der DMS anzustreben.

Die Axialkraft F_{ax} bewirkt am Querschnitt A des Materials mit bekanntem E-Modul E eine Dehnung ε_{ax}, für welche gilt:

$$\varepsilon_{ax} = \frac{F_{ax}}{E \cdot A} \tag{3}$$

Ebenso verursacht das Biegemoment M_b am selben Querschnitt mit dem Biegewiderstandsmoment W_b eine Dehnung ε_b an der Bauteiloberfläche, für welche wiederum gilt:

$$\varepsilon_b = \frac{M_b}{E \cdot W_b} \tag{4}$$

Die DMS-Viertelbrücke misst nun folglich alle diese drei Dehnungsgrößen und gibt ein, der Summe dieser drei Dehnungen entsprechendes, Messsignal aus. Es gilt demnach:

$$\varepsilon_{1/4} = \varepsilon_{ax} + \varepsilon_b + \varepsilon_T \tag{5}$$

Um nun die Axialkräfte und Biegemomente an den Messstellen I und II messen zu können, wurde die in Abbildung 4 dargestellte Anordnung der sechs einzelnen DMS-Viertelbrücken gewählt. Jede misst an ihrer entsprechenden Position die Dehnungsanteile nach Gleichung 5. Durch geschickte Addition bzw. Subtraktion der gemessenen Dehnungen der Einzel-DMS lassen sich jedoch die folgenden Belastungen berechnen:

- Differenz der Zug/Druckbelastungen zwischen den Messstellen I und II
- Jeweils ein Biegemoment um die z-Achse an den Messstellen I und II
- Biegemoment um die y-Achse an Messstelle I
- Resultierendes Biegemoment an Messstelle I

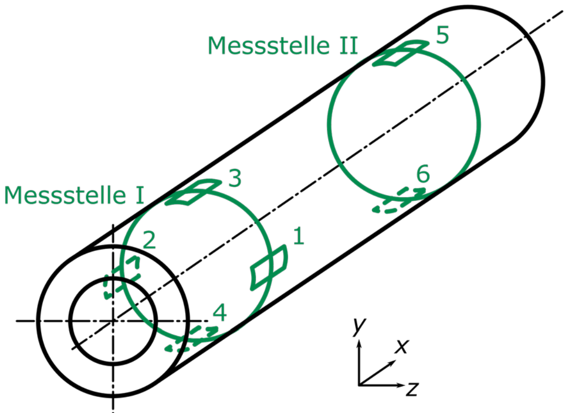


Abbildung 4: Anordnung der sechs DMS-Viertelbrücken auf der Getriebewelle relativ zueinander und auf die beiden Messstellen I und II verteilt

Bei Belastung der Getriebewelle durch ein Biegemoment (aufgeteilt in die Biegeanteile um die y-Achse und die z-Achse) entstehen zum Beispiel an den einzelnen DMS die in Tabelle 1 angegebenen Dehnungsanteile.

Tabelle 1: Dehnungsanteile infolge eines Biegemoments um die z-Achse bzw. y-Achse an den einzelnen DMS-Viertelbrücken

DMS	**Dehnungsanteil aus Biegung um y-Achse**	**Dehnungsanteil aus Biegung um z-Achse**
1	$\varepsilon_{b,y,I}$	0
2	$-\varepsilon_{b,y,I}$	0
3	0	$\varepsilon_{b,z,I}$
4	0	$-\varepsilon_{b,z,I}$
5	0	$\varepsilon_{b,z,II}$
6	0	$-\varepsilon_{b,z,II}$

Aus der Belastung durch eine Axialkraft erfährt jeder DMS an der jeweiligen Messstelle den gleichen Dehnungsanteil, sowohl in Betrag als auch in Richtung. Ebenso verhält es sich bei den scheinbaren Dehnungen infolge einer Temperaturschwankung. Für die einzelnen zu erwartenden gemessenen Dehnungen ergeben sich demnach die in Tabelle 2 aufgeführten Werte.

Tabelle 2: Zu erwartende gemessene Dehnungen an den einzelnen DMS-Viertelbrücken

DMS	Gemessene Dehnung
1	$\varepsilon_1 = \varepsilon_{\mathrm{ax,I}} + \varepsilon_{\mathrm{b,y,I}} + \varepsilon_{\mathrm{T}}$
2	$\varepsilon_2 = \varepsilon_{\mathrm{ax,I}} - \varepsilon_{\mathrm{b,y,I}} + \varepsilon_{\mathrm{T}}$
3	$\varepsilon_3 = \varepsilon_{\mathrm{ax,I}} + \varepsilon_{\mathrm{b,z,I}} + \varepsilon_{\mathrm{T}}$
4	$\varepsilon_4 = \varepsilon_{\mathrm{ax,I}} - \varepsilon_{\mathrm{b,z,I}} + \varepsilon_{\mathrm{T}}$
5	$\varepsilon_5 = \varepsilon_{\mathrm{ax,II}} + \varepsilon_{\mathrm{b,z,II}} + \varepsilon_{\mathrm{T}}$
6	$\varepsilon_6 = \varepsilon_{\mathrm{ax,II}} - \varepsilon_{\mathrm{b,z,II}} + \varepsilon_{\mathrm{T}}$

Berechnung der gesuchten Dehnungen

Aus den Dehnungen der einzelnen DMS nach Tabelle 2 können nun, die bereits genannten, gesuchten Größen berechnet werden.

Die Differenz der Zug/Druckbelastungen zwischen den Messstellen I und II kann z.B. folgendermaßen bestimmt werden:

$$\Delta\varepsilon_{\mathrm{ax}} = \varepsilon_{\mathrm{ax,I}} - \varepsilon_{\mathrm{ax,II}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\left(\varepsilon_3 + \varepsilon_4 \right) - \left(\varepsilon_5 + \varepsilon_6 \right) \right) \qquad 6$$

Zum besseren Verständnis soll das Vorgehen an dieser Stelle noch etwas genauer erläutert werden. Für die Summe aus der Dehnung von DMS 3 und DMS 4 ergibt sich z.B.:

$$\varepsilon_3 + \varepsilon_4 = \left(\varepsilon_{\mathrm{ax,I}} + \varepsilon_{\mathrm{b,z,I}} + \varepsilon_{\mathrm{T}} \right) + \left(\varepsilon_{\mathrm{ax,I}} - \varepsilon_{\mathrm{b,z,I}} + \varepsilon_{\mathrm{T}} \right) = 2 \cdot \varepsilon_{\mathrm{ax,I}} + 2 \cdot \varepsilon_{\mathrm{T}} \qquad 7$$

Es ist zu erkennen, dass sich die aus der Biegung resultierenden Dehnungsanteile bei der Addition aufheben und nur die zu bestimmende reine Axialdehnung und leider auch die parasitäre Temperaturdehnung übrig bleibt. Die Dehnungsanteile werden sogar um den Faktor 2 jeweils verstärkt.

Für die Summe der Dehnungen von DMS 5 und DMS 6 an der Messstelle II ergibt sich ein analoges Ergebnis. Unter der Annahme, dass beide Messstellen die gleiche

Temperaturänderung erfahren, verschwinden jedoch die unerwünschten Temperaturdehnungen infolge der Subtraktion in Gleichung 6.

Die Biegemomente um die z-Achse an den Messstellen I und II lassen sich über die nachfolgenden Gleichungen rechnerisch aus den gemessenen Dehnungen der DMS-Viertelbrücken bestimmen. Den nachfolgenden Gleichungen liegen ähnliche Überlegungen, wie bei der Differenz der Zug/Druckbelastungen zugrunde.

$$\varepsilon_{\mathrm{b,z,I}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\varepsilon_3 - \varepsilon_4\right) \tag{8}$$

$$\varepsilon_{\mathrm{b,z,II}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\varepsilon_5 - \varepsilon_6\right) \tag{9}$$

Durch die Subtraktion heben sich die gleichgerichteten Dehnungsanteile infolge der Axialkräfte und Temperaturdehnungen auf und es verbleibt einzig der Anteil des Biegemoments. Wiederum um den Faktor 2 verstärkt.

Analog gilt für das Biegemoment um die y-Achse an Messstelle I:

$$\varepsilon_{\mathrm{b,y,I}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\varepsilon_1 - \varepsilon_2\right) \tag{10}$$

Das resultierende Biegemoment an der Messstelle I kann über die geometrische Addition der beiden Biegeanteile um die y-Achse und z-Achse berechnet werden. Es gilt:

$$\varepsilon_{\mathrm{b,I}} = \sqrt{\varepsilon_{\mathrm{b,y,I}}{}^2 + \varepsilon_{\mathrm{b,y,II}}{}^2} \tag{11}$$

Zusammenfassung

Die Übertragung von Messsignalen von rotierenden Bauteilen ist im Allgemeinen mit hohem Aufwand und damit einhergehenden hohen Kosten verbunden. In der Regel ist die zur Verfügung stehende Anzahl von Messkanälen deutlich stärker begrenzt als bei stehenden Bauteilen.

In einigen Fällen kann jedoch die Anzahl der zur Verfügung stehenden Anschlussdrähte der limitierende Faktor sein. In dem, diesen Artikel zugrunde liegenden, Fall ist dies infolge der Verwendung eines Schleifringübertragers der Fall. Um mit der begrenzten Anzahl an Spuren (eine Spur entspricht hierbei einem Draht) möglichst viele Belastungsgrößen an einer rotierenden Getriebewelle messen zu können, werden 6 DMS-Viertelbrücken verwendet und die mit diesen gemessenen Dehnungssignale zu den gesuchten Dehnungen verrechnet.

Um die gleichen Belastungen messen zu können, würden 5 Brückenschaltungen eigentlich ausreichen. Dies wären zwei DMS-Vollbrücken für die Erfassung der

Axialkräfte und 3 DMS-Halb- oder Vollbrücken für die Erfassung der Biegungen an den Messstellen I und II. Damit wäre die Anzahl der benötigten Messkanäle in diesem Fall um einen Kanal geringer, als bei der gewählten Messanordnung mit 6 DMS-Viertelbrücken. Die Anzahl der benötigten Drähte ist jedoch mit mindestens 17 gegenüber 12 Drähten deutlich höher, da eine Vollbrücke 4 Spuren und eine Halbbrücke immer noch 3 Spuren am Schleifringübertrager belegen würde.

In diesem Fall wird demnach 1 Messkanal mehr benötigt, jedoch reduziert sich die Anzahl der benötigten Spuren am Schleifringübertrager um mindestens 5 Spuren.

Im Grunde stellt der vorgestellte Lösungsansatz eine rechnerische Nachbildung von Halbrücken dar. Im Allgemeinen sollten jedoch nach Möglichkeit reale Vollbrückenschaltungen bevorzugt werden.

Dieser Lösungsansatz wird demnächst bei anstehenden Versuchen Anwendung finden und sich bewähren müssen.