

Drehmomentwellenberechnung mit TEL1-PCM

Das 1-Kanal Telemetriesystem TEL1-PCM wird vorwiegend für rotierende Applikationen eingesetzt, wie z.B. zur Übertragung von Drehmomenten, Schwingungen oder Temperaturen von drehenden Wellen, Achsen, Flanschen, Rädern, Scheiben, Schaufeln, Flügeln oder Propellern. Der Telemetrie-Sender (Rotorelektronik) ist in einem kleinen und stabilen Metallgehäuse untergebracht, entweder in flacher Bauform für radiale oder runder Bauform für axiale Applikationen. Da die Rotorelektronik nur 10g wiegt, beeinflusst sie Steifigkeit, Masse und Unwucht der Welle nur unwesentlich.

Funktion

Zunächst werden DMS und Rotorelektronik auf der Welle befestigt und eine elektrische Verbindung zwischen DMS und den Lötanschlüssen der Rotorelektronik hergestellt. Die Rotorelektronik versorgt die DMS-Brücke mit einer konstanten Brückenspannung von 4V. Die Spannungsversorgung und Signalübertragung der Rotorelektronik erfolgt induktiv. Hierzu werden 10...20 Windungen CuL-Draht über eine Ferrit-Folie auf die Welle gewickelt. Die Ferrit-Folie dient zur Entmagnetisierung. Ein gegenüber der Induktionsschleife montierter Induktivkopf (Stator) übernimmt die berührungslose Energieversorgung und dient gleichzeitig zum Empfang der digitalisierten Messdaten, welche mit einer Bandbreite von 0...1200 Hz (-3dB) übertragen werden. Der Luftspalt zwischen Induktivkopf und Spule kann bis zu 2cm betragen. Der Induktivkopf wird über ein 5 Meter langes Kabel mit dem Decoder (Wiedergabe) verbunden. Dort steht das Messsignal nach D/A-Wandlung, Filterung und Verstärkung an einer BNC-Buchse als +/- 10 Volt oder als bitserielles PCM-Signal zur Verfügung.

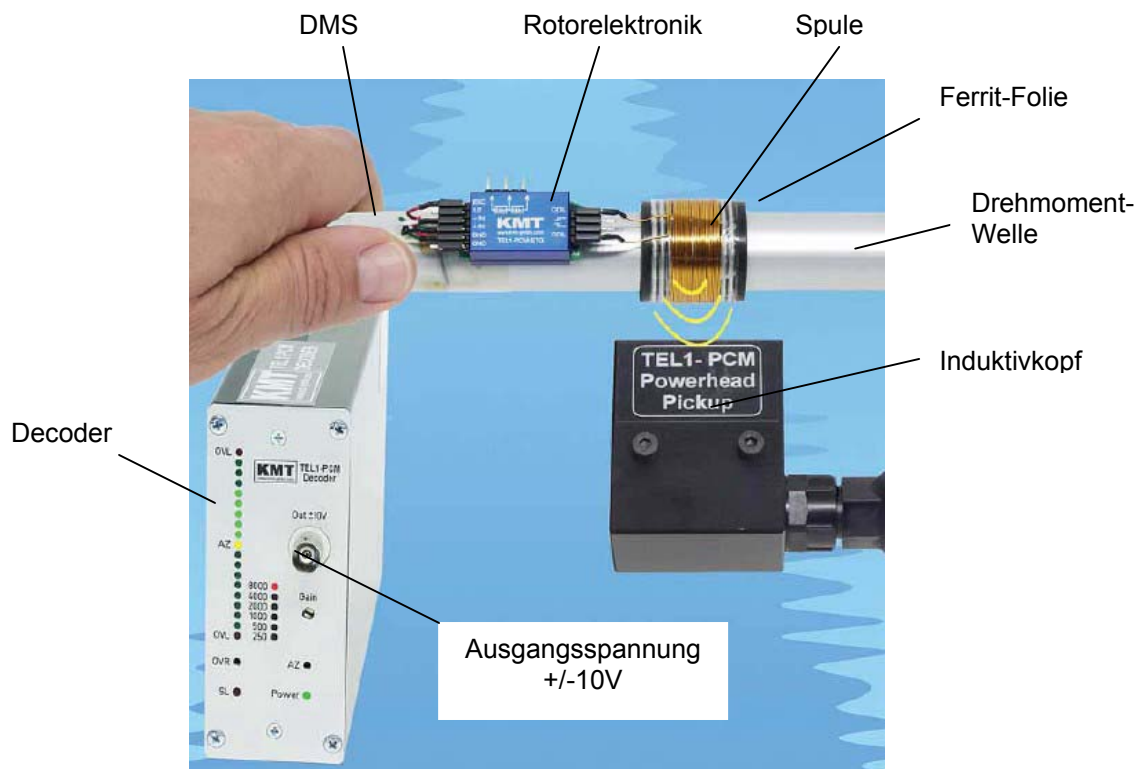


Bild 1. Installation der 1-Kanal Telemetrie TEL1-PCM für berührungslose Drehmomentmessung mit induktiver Stromversorgung für Dauerlaufversuche

Eine weitere, besondere Eigenschaft der neuen μP -gesteuerten PCM-Telemetrie, ist deren bidirektionale Arbeitsweise. Von der Wiedergabe aus kann die Spannungsverstärkung der Rotorelektronik – auch im laufenden Betrieb – im Bereich von 250 bis 8000 verändert werden und eine „Auto Zero“-Funktion ist per Tastendruck jederzeit möglich. Außerdem bietet das System eine LED-Aussteuerungsanzeige und diverse Status-Indikatoren, u. a. für einen erfolgreichen Autozero oder eventuell aufgetretene Overload- und Übertragungsfehler. Die Systemgenauigkeit beträgt $\pm 0,2\%$ und die Ausführung des Induktivkopfes entspricht der Schutzart IP65.

Einstellung der Spannungsverstärkung (Gain)

Der häufigste Einsatz der 1-Kanal Telemetrie TEL1-PCM ist an Drehmomentwellen. Die Torsion der Welle wird im Regelfall mit einer DMS-Vollbrücke erfasst. Ein Drehmoment (Nm) bewirkt eine Dehnung der Welle ($\mu\text{m}/\text{m}$) und damit eine Verstimmung der DMS-Brücke. Diese Brückenverstimmung (mV/V), bezogen auf ein definiertes max. Drehmoment, legt die Empfindlichkeit (mV/V) der DMS-Brücke fest.

Die Empfindlichkeit Torsion einer Drehmoment-Messwelle können mathematisch berechnet oder messtechnisch erfasst werden. Abhängig von der Empfindlichkeit der DMS-Brücke, wird die erforderliche Spannungsverstärkung am Decoder (Wiedergabestation) eingestellt.

Beispiel:

Beträgt die Empfindlichkeit der DMS-Brücke z.B. $2,5\text{mV}/\text{V}$ bei einem Nenn-Drehmoment von 1000Nm , dann ist die Spannungsverstärkung der Wiedergabe auf folgenden Wert einzustellen:

$$\begin{aligned}\text{Verstärkung} &= \text{Ausgangsspannung} / (\text{Empfindlichkeit} \times \text{DMS-Brückenspannung}) \\ &= 10\text{V} / (2,5\text{mV}/\text{V} \times 4\text{V}) = 1000\end{aligned}$$

mit:

DMS-Brückenspannung: 4V

Ergebnis: Bei einem max. Drehmoment von $\pm 1000\text{Nm}$ und einer Spannungsverstärkung von 1000 ergibt sich eine Ausgangsspannung von $\pm 10\text{V}$.

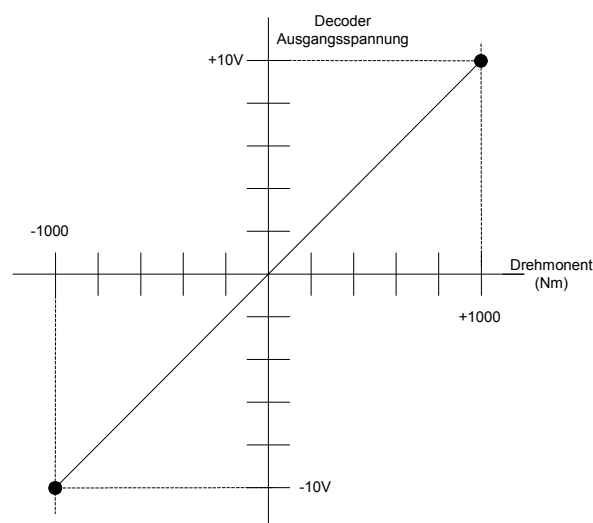


Bild 2: Verlauf von Drehmoment und Ausgangsspannung

Die Einstellung der Spannungsverstärkung erfolgt am Decoder in festen Stufen von 250, 500, 1000, 2000, 4000 und 8000. Die Größe der Verstärkung (Gain) wird so gewählt, dass bei maximalem Drehmoment (M_{TMAX}) ein maximales Ausgangssignal von z.B. +/-10V entsteht.

Empfindlichkeit	Verstärkung	Ausgangsspannung
10 mV/V	250	+/-10V
5 mV/V	500	+/-10V
2,5 mV/V	1000	+/-10V
1,25 mV/V	2000	+/-10V
0,625 mV/V	4000	+/-10V
0,3125 mV/V	8000	+/-10V

Bild 3: Empfindlichkeit, Verstärkung und daraus resultierende Decoder-Ausgangsspannung

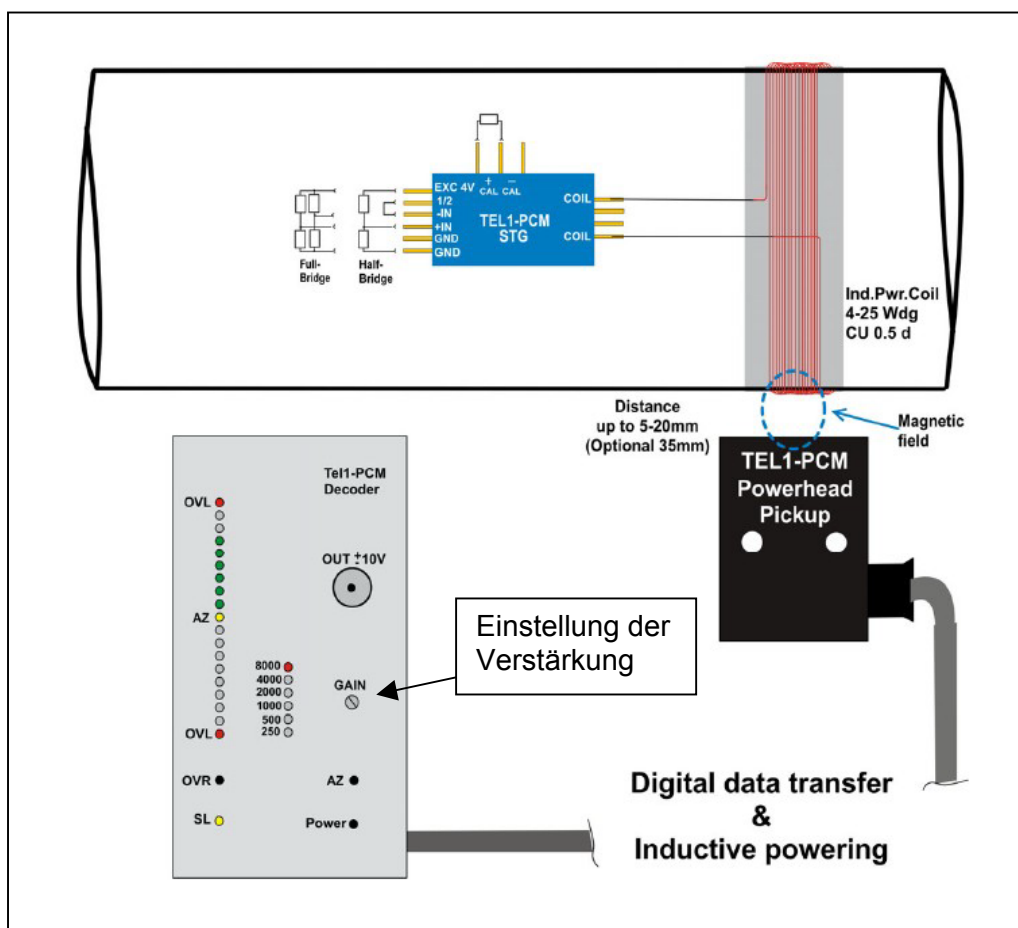


Bild 4: TEL1-PCM - Blockschaltbild der Verdrahtung für Drehmomentmessungen

Berechnung der Empfindlichkeit von Torsionsmessstellen

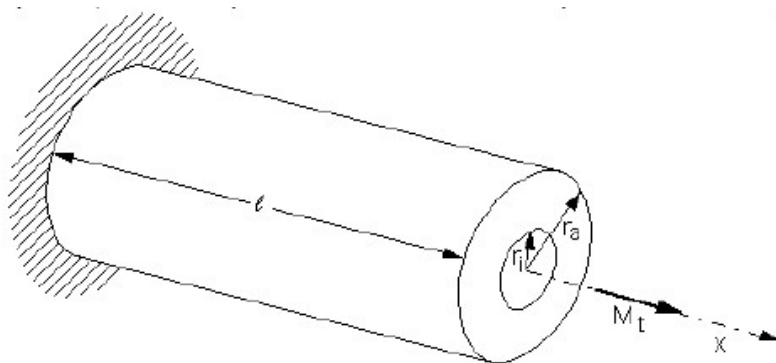


Bild 5: Schematische Darstellung eines Stabes mit angreifendem Drehmoment

Für Drehmomentmessungen sind folgende Vorbereitungen zu treffen:

- Berechnung der DMS-Empfindlichkeit S (mV/V) bei vorgegebenem Drehmoment M (Nm)
- Ermittlung der erforderlichen Spannungsverstärkung

Formeln:

Berechnung der Dehnung ($\mu\text{m/m}$):

$$\varepsilon = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{r_a}{r_a^4 - r_i^4} \cdot \frac{M_t}{G}$$

mit: $G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)}$ (konstanter Wert)

Berechnung des Drehmoments (Nm):

$$M_t = \varepsilon \cdot \pi \cdot \frac{r_a^4 - r_i^4}{r_a} \cdot G$$

Berechnung der Empfindlichkeit der DMS-Vollbrücke (mV/V):

$$S = U_A = \varepsilon \cdot k \cdot U_E$$

mit:

ε = Dehnung

M_t = max. Drehmoment

G = Schubmodul (Materialkonstante)

E = Elastizitätsmodul, E-Modul

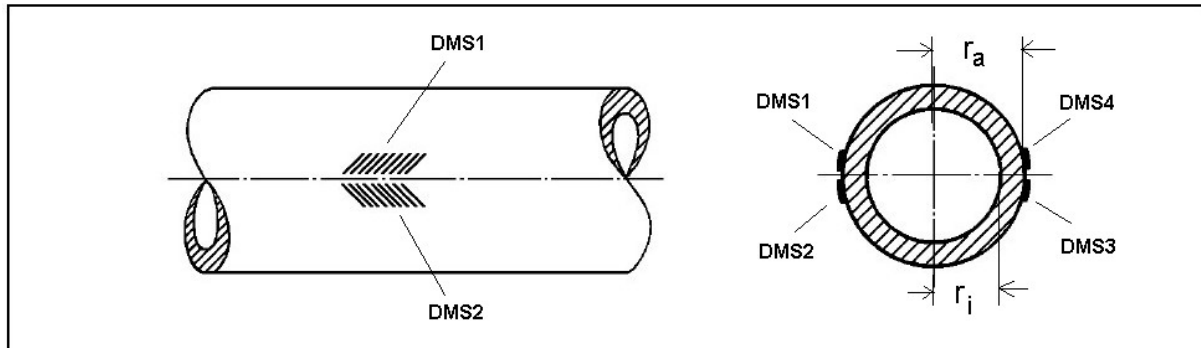
S = Empfindlichkeit der DMS-Brücke

U_A = Ausgangsspannung der DMS-Brücke, Differenzspannung

U_E = Speisespannung der DMS-Brücke

Beispiel:

Berechnung von **Dehnung** ($\mu\text{m/m}$) und **DMS-Brückenempfindlichkeit** (mV/V) einer **Hohlwelle**:



Vorgaben:

- Stahlwelle/Hohlzylinder mit $E=210\text{kN/mm}^2$
- Wellendurchmesser=30mm ($r_a=15\text{mm}$, $r_i=10\text{mm}$)
- DMS-Vollbrücke, k-Faktor=2
- wirkendes Drehmoment: **1000Nm**

Berechnung der Dehnung:

$$\rightarrow \varepsilon = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{r_a}{r_a^4 - r_i^4} \cdot \frac{M_t}{G} = \frac{1}{3,1415} \cdot \frac{15}{50626 - 10000} \cdot \frac{1000}{82,03125} = \underline{\underline{1432,8 \mu\text{m/m}}}$$

mit:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} = \frac{210}{2,56} = 82,03125 ;$$

$$\mu = 0,28$$

Berechnung der Empfindlichkeit der DMS-Vollbrücke:

$$\rightarrow S = U_A = \varepsilon \cdot k \cdot U_E = 1432,8 \cdot 10^{-6} \cdot 2 = 2865 \mu\text{V/V} = \underline{\underline{2,865 \text{mV/V}}}$$

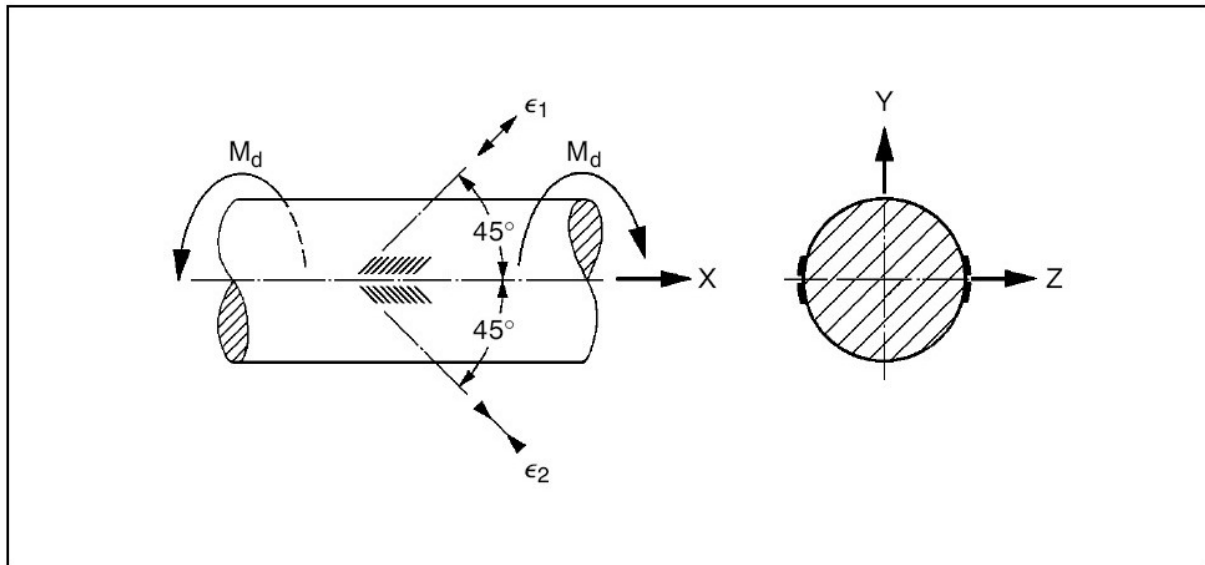
mit:

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{1}{4} \cdot k \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) = k \cdot \varepsilon ;$$

$$U_E = 1\text{V (Brückenspannung)}$$

Beispiel:

Berechnung von **Dehnung** ($\mu\text{m}/\text{m}$) und **DMS-Brückenempfindlichkeit** (mV/V) einer **Vollwelle**:



Vorgaben:

- Stahlwelle/Kreiszyylinder mit $E=210\text{kN}/\text{mm}^2$
- Wellendurchmesser=30mm ($r_a=15\text{mm}$, $r_i=0\text{mm}$)
- DMS-Vollbrücke, k-Faktor=2
- wirkendes Drehmoment: **1000Nm**

Berechnung der Dehnung:

$$\rightarrow \varepsilon = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{r_a^3} \cdot \frac{M_t}{G} = \frac{1}{3,1415} \cdot \frac{1}{3375} \cdot \frac{1000}{82,03125} = \underline{\underline{1149,7 \mu\text{m}/\text{m}}}$$

mit:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} = \frac{210}{2,56} = 82,03125$$

$$\mu = 0,28$$

Berechnung der Empfindlichkeit der DMS-Vollbrücke:

$$\rightarrow S = U_A = \varepsilon \cdot k \cdot U_E = 1149,7 \cdot 10^{-6} \cdot 2 = 2299 \mu\text{V}/\text{V} = \underline{\underline{2,299\text{mV}/\text{V}}}$$

mit:

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{1}{4} \cdot k \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) = k \cdot \varepsilon;$$

$$U_E = 1\text{V (Brückenspannung)}$$

Vereinfachte Berechnungen der Brücken-Empfindlichkeit:

Folgende vereinfachte Formeln gelten für Stahlwelle, Vollbrücke und k-Faktor 2,0

Berechnung der Empfindlichkeit bei Vollwelle:

$$S_{\text{Stahl}} = \frac{M_{t \max}}{d^3} \cdot 62,1$$

Berechnung der Empfindlichkeit bei Hohlwelle:

$$S_{\text{Stahl}} = \frac{M_{t \max} \cdot d_A}{(d_A^4 - d_I^4)} \cdot 62,1$$

mit:

- S_{Stahl} = Empfindlichkeit in mV/V
- $M_{t \max}$ = maximales Torsionsmoment in Nm
- d = Durchmesser der Welle
- d_A = Außendurchmesser der Hohlwelle
- d_I = Innendurchmesser der Hohlwelle
- k = k-Faktor, Korrekturfaktor des DMS

Beispiel:

Berechnung der DMS-Empfindlichkeit, bei einer Stahlwelle mit $d=30\text{mm}$, $E=210000\text{N/mm}^2$ und einem Drehmoment von 1000Nm :

$$\rightarrow S_{\text{Stahl}} = \frac{M_{t \max}}{d^3} \cdot 62,1 = \frac{1000}{27000} \cdot 62,1 = \underline{\underline{2,3\text{mV/V}}}$$

Berechnung des Drehmomentes einer Stahlwelle mit $d=30\text{mm}$, $E\text{-Modul}=210000\text{N/mm}^2$, bei einer Ausgangsspannung der applizierten DMS-Vollbrücke von $2,3\text{mV/V}$:

$$\rightarrow M_{t \max} = S_{\text{Stahl}} \cdot \frac{d^3}{62,1} = 2,3 \cdot \frac{27000}{62,1} = \underline{\underline{1000\text{Nm}}}$$

mit:

$U_E = 1\text{V}$ (Brückenspannung)