

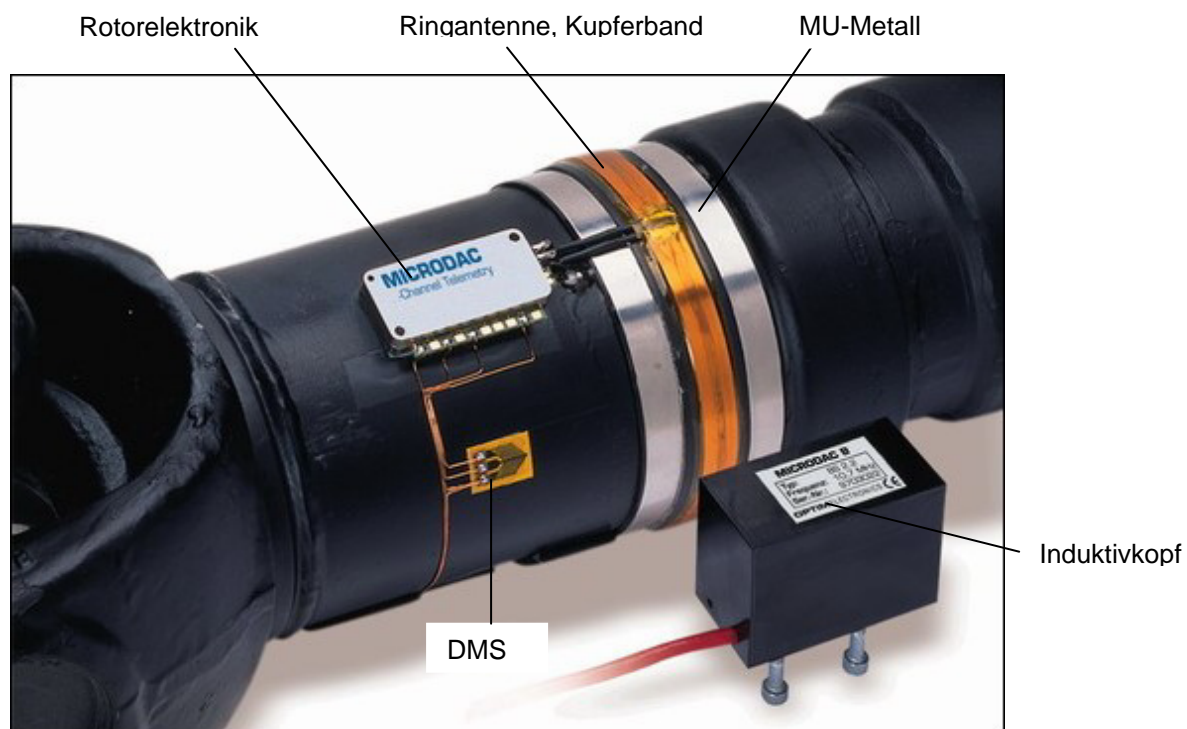
## Drehmomentmessung mit 1-Kanal Telemetrie

### 1-Kanal-Telemetriesysteme

1-Kanal Telemetriesysteme werden 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 ca. 15g wiegt, beeinflusst sie Steifigkeit, Masse und Unwucht der Welle nur unwesentlich.

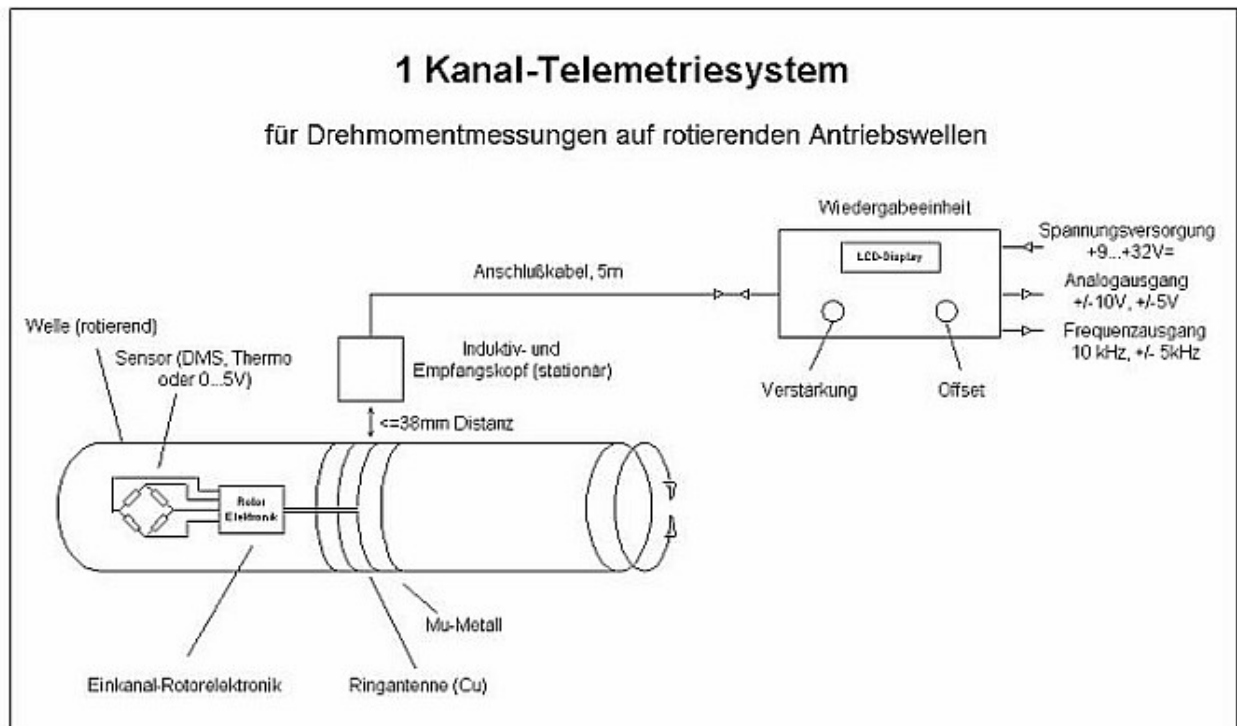
### Funktion

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 5V. Das Differenzsignal der Messbrücke (Empfindlichkeit in mV/V) wird von der Rotorelektronik spannungsverstärkt (um Faktor 200...8000), gefiltert und von einem integrierten HF-Sender als FSK-Signal in Frequenzbereich 30...40MHz über einer Ringantennen abgestrahlt. Die Auswahl der Signalverstärkung erfolgt durch Anbringen von Lötbrücken oder Widerständen ( $R_{Gain}$ ) auf der Kontakteiste der Rotorelektronik.



### Installation einer 1-Kanal Telemetrie K1 für berührungslose Drehmomentmessung auf einer Kardanwelle mit induktiver Stromversorgung der Rotorelektronik

Zum Empfang des HF-Signals dient ein Empfangskopf (Stator), der in geringem Abstand zur Ringantenne befestigt wird (Stator) und über ein Kabel mit einer Wiedergabe verbunden ist. In der Wiedergabe wird FSK-Signal demoduliert, gefiltert und steht an den Ausgangsbuchsen als normiertes  $\pm 5$  oder  $\pm 10V$ -Signal zur weiteren Signalverarbeitung zur Verfügung.



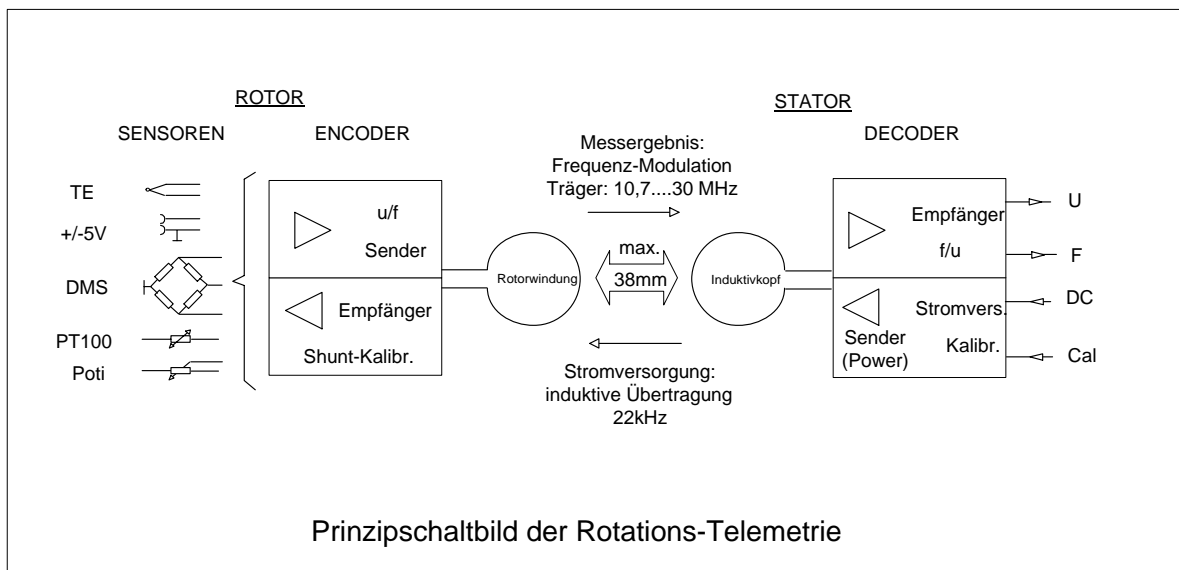
**Schematischer Aufbau einer Rotortelemetrie, zur Messung von Drehmomenten auf einer rotierenden Antriebswelle**

### *Induktive Stromversorgung*

Wird die Rotorelektronik auf der rotierenden Welle mit Hilfe einer 9-Volt-Batterie versorgt, ist der Messaufbau hiermit abgeschlossen. Die Spannungsversorgung mit Batterie oder Akku hat jedoch den Nachteil, dass die Telemetrie nur eine begrenzte Zeit von etwa 10 Stunden betriebsbereit ist. Um einen Dauerbetrieb des Systems in Maschinen, Fahrzeugen oder Prüfständen zu ermöglichen, muß die Rotorelektronik induktiv spannungsversorgt werden. Zu diesem Zweck befindet sich im Empfangskopf ein induktiver Leistungsübertrager, der ein starkes, niederfrequentes Wechselfeld erzeugt. Dieses Wechselfeld induziert transformatorisch eine Wechselspannung in der Ringantenne, welche von der Rotorelektronik gleichgerichtet und zu deren Stromversorgung dient. Mit diesem Schaltungstrick wird die Rotorelektronik ferngespeist und ist damit für den Dauerversuch geeignet. Zu beachten ist hierbei, dass der Induktivkopf nicht weiter als ca. 4 cm von der Leiterschleife montiert wird, da ansonsten die induzierte Leistung nicht mehr ausreicht und die telemetrische Übertragung abreißt. Weiterhin muss die um die Welle gelegte Ringantenne zur magnetischen Isolierung mit  $\mu$ -Metall unterlegt werden, da ansonsten das Magnetfeld des Induktivkopfes vom Ferritanteil der Welle "aufgesaugt" wird, und sich der Wirkungsgrad der induktiven Übertragung reduzieren würde.

### *Kalibration*

Zur einfachen und schnellen Funktionskontrolle des gesamten Meßsystems, kann von der Wiedergabe aus per Knopfdruck jederzeit eine drahtlose Shunt-Kalibration ausgelöst werden. Bei Auslösen der Shunt-Kalibration, wird ein Steuersignal über den Induktivkopf drahtlos zur Rotorelektronik gesendet. Dieses Signal schaltet einen auf der Rotorelektronik angebrachten Widerstand ( $R_{Cal}$ ) parallel zur Messbrücke und erzeugt dadurch ein definiertes Verstimmungssignal (Shunt-Calibration), welches als konstanter Spannungswert an der Wiedergabestation angezeigt wird.  $R_{Cal}$  wird als ein SMD-Widerstand zwischen zwei Löt pins der Rotorelektronik angebracht, wobei die Größe von  $R_{Cal}$  das Maß der Verstimmung bestimmt, z.B. 80%. Die Cal-Funktion dient der Funktionsprüfung des gesamten Meßsystems und kann jederzeit - auch während einer aktiven Messung - durchgeführt werden.



## Zur Berechnung von Drehmomenten sind folgende Vorbereitungen zu treffen

- Berechnung der DMS-Empfindlichkeit  $S$  (mV/V) bei vorgegebenem Drehmoment  $M$  (Nm)
- Ermittlung der notwendigen Signalverstärkung der Rotorelektronik und Berechnung von  $R_{Gain}$
- Festlegung der Brückenverstimmung für Kalibration und Berechnung von  $R_{Cal}$

## Berechnung der Empfindlichkeit (S) einer Torsionsmessstelle

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

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

Berechnung der Empfindlichkeit der DMS-Brücke (mV/V)

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

## Vereinfachte Berechnung der Brücken-Empfindlichkeit:

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

Berechnung der Empfindlichkeit bei Vollwelle

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

Berechnung der Empfindlichkeit bei Hohlwelle

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

Berechnung der Empfindlichkeit incl. k-Faktor

$$S = S_{\text{Stahl}} \cdot \frac{k}{2}$$

- S = Empfindlichkeit in mV/V
- S<sub>Stahl</sub> = Empfindlichkeit in mV/V
- M<sub>tmax</sub> = maximales Torsionsmoment in Nm
- d = Durchmesser der Vollwelle in mm
- d<sub>a</sub> = Außendurchmesser der Hohlwelle in mm
- d<sub>i</sub> = Innendurchmesser der Hohlwelle in mm
- k = Korrekturfaktor: 3,03 für Al, 2,05 für Ti, ca. 70 für ungefüllte Kunststoffe
- U<sub>A</sub> = Brückenausgangsspannung (Empfindlichkeit)
- U<sub>E</sub> = Brückenspeisespannung

→ **Berechnungsbeispiel:** Drehmoment M<sub>tmax</sub>=1000Nm, d=30mm, Vollwelle, Edelstahl

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

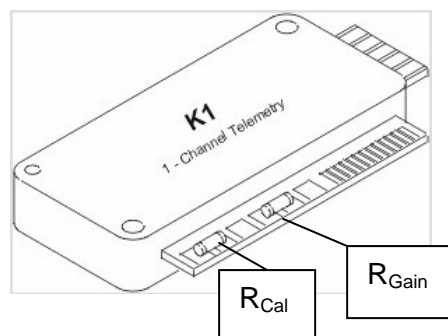
## Berechnungen von R<sub>Gain</sub> und R<sub>Cal</sub>

### Verstärkung bestimmender Widerstand R<sub>Gain</sub>

Die Rotorelektronik versorgt die Messbrücke mit einer konstanten Spannung von 5V, wodurch eine Differenzspannung von 5 V x 2,3 mV/V = 11,5 mV bei 1000 Nm Drehmoment entsteht. Diese Messspannung wird von der Rotorelektronik so weit verstärkt, dass bei einem Nenn-Drehmoment von +/-1000Nm eine Spannung von +/-10V am Ausgang der Wiedergabestation angezeigt wird. Der Widerstand **R<sub>Gain</sub>** bestimmt die Spannungsverstärkung der Rotorelektronik.

### Kalibrier-Widerstand R<sub>Cal</sub>

Zur einfachen und schnellen Funktionskontrolle des gesamten Meßsystems, kann von der Wiedergabe aus per Knopfdruck jederzeit eine drahtlose Shunt-Kalibration ausgelöst werden. Das Kalibrier-Signal schaltet einen auf der Rotorelektronik angebrachten Widerstand **R<sub>Cal</sub>** parallel zur Messbrücke und erzeugt dadurch ein definiertes Verstimmungssignal, welches als konstanter Spannungswert an der Wiedergabestation angezeigt wird.



Größengleichungen zur Ermittlung der Widerstandswerte für  $R_{Gain}$  und  $R_{Cal}$

Die Größen sind entsprechend den vorgegebenen Einheiten zu ermitteln, aber nur als Zahlenwert in die Gleichungen zu übernehmen.

$$R_{Gain} = \frac{50 \cdot S}{50 - S} \quad R_{Gain} \text{ [kOhm]}, S \text{ [mV/V]}$$

$$R_{Cal} = R_b \cdot \left( \frac{25000}{D \cdot S} - 0,5 \right) - 1 \quad R_{Cal} \text{ [kOhm]}, R_b \text{ [kOhm]}, D \text{ [%]}$$

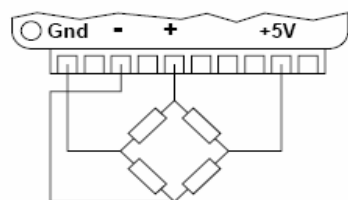
→ **Beispiel:** Empfindlichkeit  $S = 2,3 \text{ mV/V}$ , Brückenwiderstand  $R_b = 350 \text{ Ohm}$ , Verstimmung  $D = 80\%$

$$R_{Gain} = \frac{50 \cdot S}{50 - S} = \frac{50 \cdot 2,3}{50 - 2,3} = \underline{\underline{2411 \text{ Ohm}}}$$

$$R_{Cal} = R_b \cdot \left( \frac{25000}{D \cdot S} - 0,5 \right) - 1 = 0,35 \cdot \left( \frac{25000}{80 \cdot 2,3} - 0,5 \right) - 1 = \underline{\underline{46,379 \text{ kOhm}}}$$

## Schaltungsbeispiele der Rotorelektronik:

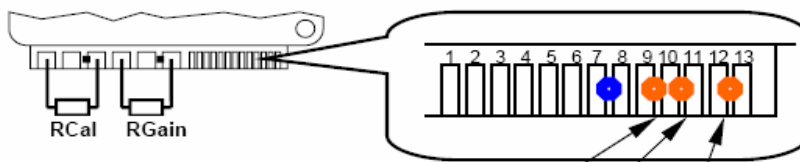
### DMS-Vollbrücke, 350 Ohm



S [mV/V]	R <sub>Gain</sub> [kOhm]	R <sub>Cal</sub> [kOhm]
0,5	0,5051	217,575
1,0	1,0204	108,200
1,5	1,5464	71,7417
2,0	2,0833	53,5125
2,5	2,6316	42,5750
3,0	3,1915	35,2833
5,0	5,5556	20,7000

Brücke mit  $R_b=350 \text{ Ohm}$ ,  
Verstimmung  $D=80\%$  des Messbereichs  
Analogausgangsbereich  $\pm 10 \text{ V}$

### Messbereich ...0,5mV/V... 50mV/V



Der Widerstand  $R_{Cal}$  wird über einen internen Kontakt, zu einem Brückenweig parallel geschaltet und bewirkt somit eine definierte **Verstimmung D** der Brücke.  
→ Die Funktion "Shunt-Kalibration" wird an der Wiedergabe mit dem Taster "Cal" ausgelöst und ist nur bei induktiver Versorgung verfügbar.

Der Widerstand  $R_{Gain}$  erlaubt die stufenlose Einstellung der **Empfindlichkeit S**.

Die Lötbrücken 9-10, 10-11 und 12-13 erlauben die Aktivierung von fest abgeglichenen Empfindlichkeitsbereichen:  
Lötbrücke 9-10 4 mV/V  
Lötbrücke 10-11 8,25 mV/V  
Lötbrücke 12-13 1 mV/V

→ Es darf maximal eine der Lötbrücken 9-10, 10-11 oder 12-13 gesetzt sein.  
→ Ist keine der 3 Lötbrücken gesetzt, so beträgt die Empfindlichkeit **50mV/V** oder wird durch den Widerstand  $R_{Gain}$  bestimmt.

Hinweis: Die ausgerechneten Widerstandswerte können in der Praxis nicht genau realisiert werden. Aus der E24-Reihe wird ein Widerstandswert ausgewählt, der dem Vorgabewert am Nächsten kommt. Mit Hilfe des Schraubpotentiometers „Gain“ an der Wiedergabestation wird die Verstärkung anschließend so nachjustiert, dass sich bei einem angelegtem Drehmoment von z.B. 1000Nm eine Ausgangsspannung von 10,00 V ergibt.

## Drehmomentwellenberechnung mit Hilfe von Kalkulationssoftware

Für die Berechnung einer Torsionsmessstelle und auch der Widerstandswerte für  $R_{Gain}$  und  $R_{Cal}$  des stehen kleine, hilfreiche Programme zur Verfügung. Versionen für K1- und F1-Rotoreinheiten sind verfügbar

### Drehmomentwellenberechnung

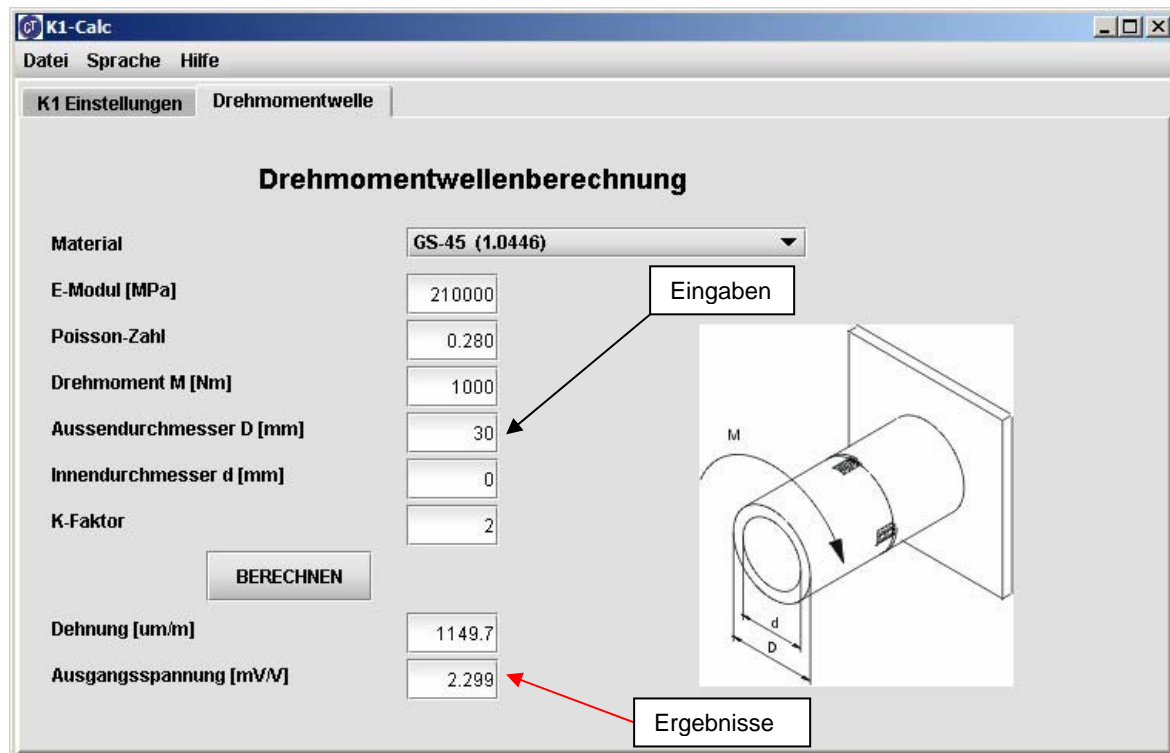
Mit Hilfe der Software „Drehmomentwellenberechnung“, kann die Dehnung ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) der Welle, bei vorgegebenem Drehmoment (Nm) und daraus resultierender Empfindlichkeit ( $\text{mV}/\text{V}$ ) der Messbrücke, berechnet werden. Das Wellenmaterial wird aus einer Material-Liste gewählt und die vorgegebenen Konstanten für „E-Modul“ und „Poissonzahl“ genutzt oder es werden Werte in die Felder manuell eingetragen. Anschließend wird das maximal zu erwartende Drehmoment (Nm), der Außen- und Innendurchmesser (mm) der Welle sowie der K-Faktor (1 oder 2) der Messbrücke eingegeben. Nach einem Klick auf „Berechnen“ werden die Dehnung der Welle und die Brückenausgangsspannung als Ergebnisse angezeigt.

#### → Beispiel:

- Material der Welle auswählen: GS-45, Stahl
- Wellendurchmesser eingeben: 30 mm, Vollwelle
- K-Faktor der Messbrücke wählen: 2 (Vollbrücke)
- max. auftretendes Drehmoment eintragen: 1000 Nm
- „Berechnen“

#### Ergebnis:

- Ausgangsspannung (Empfindlichkeit):  $2,3\text{mV} / \text{V}$
- Dehnung der Welle:  $1149,7 \mu\text{m} / \text{m}$



Drehmomentwellenberechnung	
Material	GS-45 (1.0446)
E-Modul [MPa]	210000
Poisson-Zahl	0.280
Drehmoment M [Nm]	1000
Aussendurchmesser D [mm]	30
Innendurchmesser d [mm]	0
K-Faktor	2
<b>BERECHNEN</b>	
Dehnung [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	1149.7
Ausgangsspannung [ $\text{mV}/\text{V}$ ]	2.298

Hinweis: Die ermittelte Empfindlichkeit sollte als ein Kennwert auf der Welle notiert werden.



## Berechnung von $R_{Gain}$ und $R_{Cal}$

Die Rotorelektronik versorgt die DMS-Messbrücke mit einer konstanten Spannung von 5 V, wodurch eine Differenzspannung von  $5\text{ V} \times 2,3\text{ mV/V} = 11,5\text{ mV}$  bei 1000 Nm Drehmoment entsteht. Diese Messspannung wird von der Rotorelektronik anschließend so weit verstärkt, dass bei einem Nenn-Drehmoment von  $\pm 1000\text{ Nm}$  eine Spannung von  $\pm 10\text{ V}$  am Ausgang der Wiedergabestation angezeigt wird. Der Widerstand  $R_{Gain}$  bestimmt die Spannungsverstärkung der Rotorelektronik.

Zur einfachen und schnellen Funktionskontrolle des gesamten Meßsystems, kann von der Wiedergabe aus per Knopfdruck jederzeit eine drahtlose Shunt-Kalibration ausgelöst werden. Das Kalibrier-Signal schaltet einen auf der Rotorelektronik angebrachten Widerstand  $R_{Cal}$  parallel zur Messbrücke und erzeugt dadurch ein definiertes Verstimmungssignal, welches als konstanter Spannungswert an der Wiedergabestation angezeigt wird.

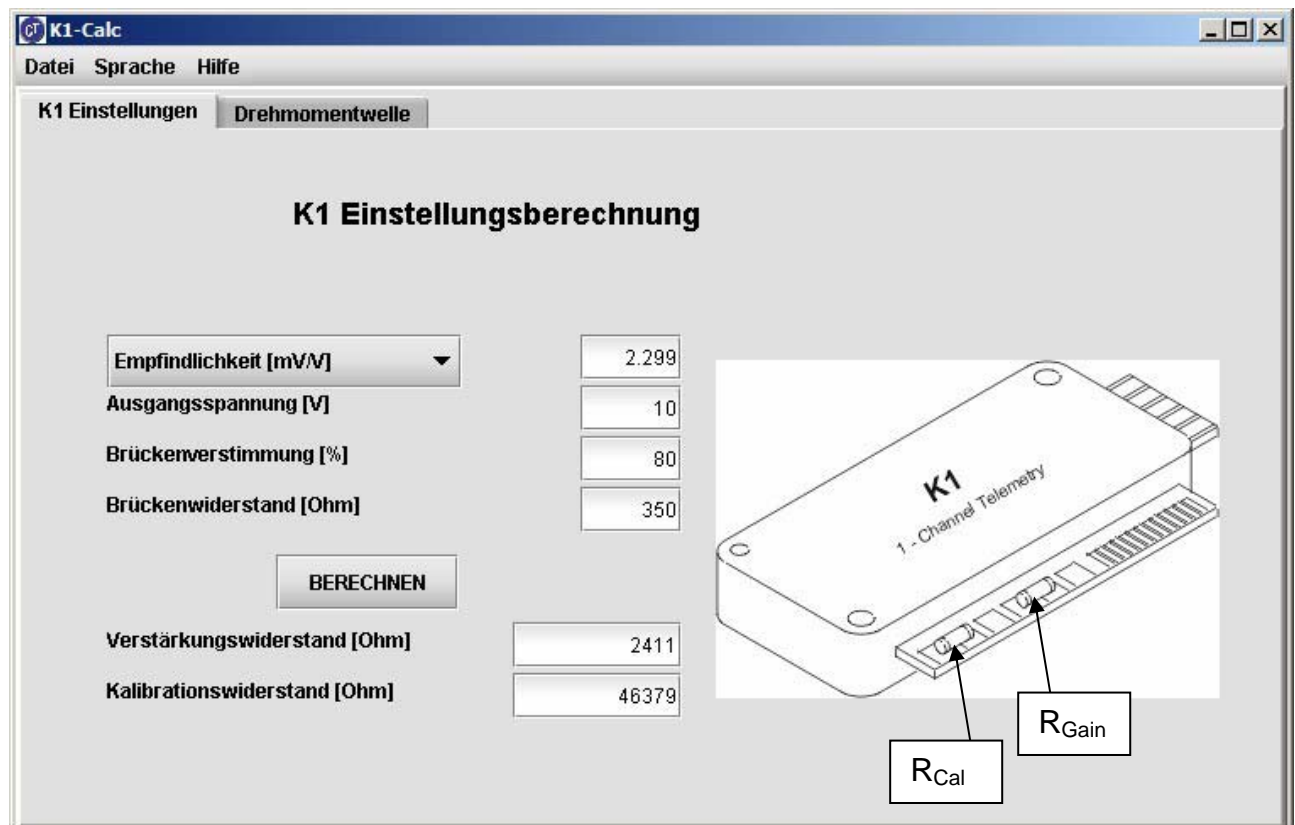
Nach Wechsel der Software auf „K1-Einstellungen“, wird der zuvor ermittelte Wert der DMS-Brücken Ausgangsspannung (Empfindlichkeit) automatisch mit übernommen.

### → Beispiel:

- Ausgangsspannung: 10V
- Brückenverstimmung: 80%
- Brückenwiderstand: 350 Ohm
- „Berechnen“

### Ergebnis:

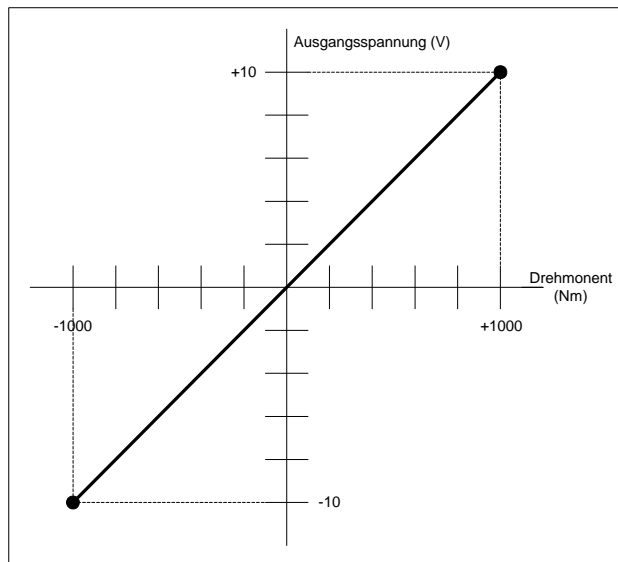
- $R_{Gain}$  Verstärkungswiderstand: 2411Ohm
- $R_{Cal}$  Kalibrationswiderstand für 80% Brücken-Verstimmung: 46,379kOhm



The screenshot shows the 'K1-Cal' software window with the 'K1 Einstellungen' tab selected. The 'Drehmomentwelle' sub-tab is active. The main heading is 'K1 Einstellungsberechnung'. The interface includes input fields for 'Empfindlichkeit [mV/V]' (2.299), 'Ausgangsspannung [V]' (10), 'Brückenverstimmung [%]' (80), and 'Brückenwiderstand [Ohm]' (350). A 'BERECHNEN' button is present. Below the inputs, the calculated values are shown: 'Verstärkungswiderstand [Ohm]' (2411) and 'Kalibrationswiderstand [Ohm]' (46379). To the right, a 3D diagram of the 'K1 1-Channel Telemetry' hardware is shown with callouts for  $R_{Cal}$  and  $R_{Gain}$  components.

Hinweis: Die in der Software ausgerechneten Widerstandswerte können in der Praxis nicht genau realisiert werden. Aus der E24-Reihe wird ein Widerstandswert ausgewählt, der dem Vorgabewert am Nächsten kommt. Mit Hilfe des Schraubpotentiometers „Gain“ an der Wiedergabestation wird die Verstärkung anschließend so nachjustiert, dass sich bei einem angelegtem Drehmoment von z.B. 1000Nm eine Ausgangsspannung von +10,00 V ergibt.

Nach dem Abgleich des Telemetriesystems ergibt sich folgende Übertragungsfunktion:



Ausgangsspannung in Abhängigkeit vom Drehmoment

