

## Messtechnik

### 1. Temperaturmessung

#### 1.1 Widerstandsthermometer

Bei der Temperaturmessung mit Widerstandsmessfühlern wird die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes von Metallen ausgenutzt.

$$R_{\vartheta} = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta \vartheta) \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} R_{\vartheta} = \text{Widerstandswert bei der Temperatur } \vartheta \\ R_0 = \text{Widerstandswert bei } \vartheta=0^{\circ}\text{C (Bezugswert)} \\ \alpha = \text{Temperaturkoeffizient } (\alpha = 3.85 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ für Platin}) \\ \Delta \vartheta = \text{Temperaturdifferenz} \end{array}$$

Werkstoffe mit einem hohen Temperaturkoeffizient und großem spezifischem Widerstand haben den Vorteil, dass sich kleine Abmessungen ergeben. Die geringe Masse des Fühlers ermöglicht dann eine hohe **Reaktionsgeschwindigkeit**.

Wenn der Temperaturkoeffizient möglichst wenig von der Temperatur abhängig ist, ergibt sich für  $R_{\vartheta}$  ein **linearer Zusammenhang** in Abhängigkeit von  $\Delta \vartheta$ . Diese Anforderungen erfüllen Platin (Pt) und Nickel (Ni) am besten.

Ihr Widerstandswert ist auch bei mehrfacher Erwärmung und Abkühlung stets gleich. Diese Messfühler weisen also eine gute **Reproduzierbarkeit** der Messwerte auf.

Eine besondere Glühbehandlung bewirkt, dass diese Eigenschaft auch über einen längeren Zeitraum erhalten bleibt, was man mit **Langzeitstabilität** bezeichnet.

Messwiderstände sollen **austauschbar** sein. Daher werden Nennwerte festgelegt. Für Nickel und Platin ist dies ein **Nennwert von  $R_0 = 100\Omega$  (oder  $1000\Omega$ ) bei einer Temperatur von  $0^{\circ}\text{C}$** . Der Nennwert wird im Kurzzeichen verwendet, z.B. **Pt-100 und Ni-100**.

Die in der Temperaturmesstechnik eingesetzten Messwiderstände haben sehr dünne Nickel- bzw. Platindrähte. Der Durchmesser liegt bei 0,05 bis 0,3 mm. Neben der linearen Wicklung wird auch die bifilare Wicklung verwendet.



Die **bifilare Wicklung** hat eine sehr geringe Induktivität, daher ist auch eine Messung an Wechselspannung möglich.

Bei **Doppelwicklungen** stehen zwei Messwiderstände zur Verfügung die unabhängig voneinander sind. Es ist daher unabhängig voneinander die Temperaturmessung für eine Anzeige und die Temperaturerfassung für eine Regelung möglich. Doppelwicklungen dienen auch zur Linearisierung und Kompensation von Messwerten. Ein Vorteil der Doppelwicklung ist auch, dass beide Messwerte unter gleichen Bedingungen ermittelt werden.

## 1.2 Temperaturmessung mit Pt100

### a) Erste einfache Ideen

Wie kann die Widerstandsänderung des Pt100 in eine Spannung oder einen Strom umgesetzt werden, so dass sie angezeigt werden kann?

Es gibt verschiedene ganz einfache Möglichkeiten, z. B. ein Ohmmeter mit umgekehrter Skala, eine Reihenschaltung von mA-Meter und Pt100 an einer Spannungsquelle (eventuell mit Trimpotentiometer zum Abgleich), ein Spannungsteiler mit Pt100 und einem zusätzlichen Widerstand.

Alle diese Möglichkeiten haben aber entscheidende Nachteile, wie die Berechnung eines Beispiels zeigt.

### Beispiel:

Zur Verfügung stehen ein Pt100, eine Spannungsquelle von 5V und ein Drehspulinstrument mit  $R_i = 1\text{k}\Omega$  und  $100\mu\text{A}$  Messbereich. Die Skala des Instruments soll eine Temperatur zwischen 0 und  $100^\circ\text{C}$  anzeigen.

### Aufgabe 1

Entwerfe die Schaltung eines Thermometers

- nach dem Strommessprinzip
- nach dem Spannungsteilerprinzip

Welche Nachteile haben diese Schaltungen?

### Fazit:

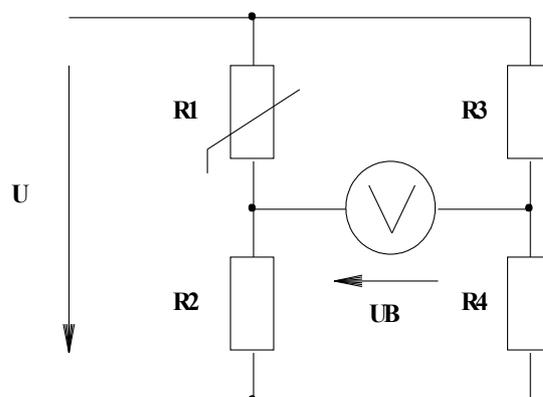
Diese einfachen Schaltungen taugen für die Praxis nicht.

Der grösste Nachteil ist der, dass nur ein kleiner Teil der Skala genutzt wird, da die Widerstandsänderung klein ist.

Um dieses Problem zu vermeiden, benutzt man in vielen Fällen eine Messbrückenschaltung.

(siehe Kapitel Messbrücken)

### b) Messbrücke mit Pt100



R1 = Messfühler Pt100

Hier wird das Spannungsteilerprinzip angewendet.

Allerdings wird die Spannung nicht nach Masse, sondern gegenüber einem zweiten Spannungsteiler gemessen. Hierdurch kann erreicht werden, dass die Mess-Spannung bei einer bestimmten Temperatur null wird.

### Aufgabe 2

Berechne die Mess-Spannung (Brückenspannung)  $U_B$  wenn  $R_2, R_3, R_4 = 100\Omega$  und  $R_1$  der Messfühler ist, für den Temperaturbereich  $0...100^\circ\text{C}$ .

Die Betriebsspannung  $U$  soll  $5\text{V}$  betragen.

Welchen Vorteil hat diese Schaltung gegenüber denen von Aufgabe 1?

Kann das Drehpulinstrument  $100\mu\text{A}/1\text{k}\Omega$  als Anzeige verwendet werden?

Bemerkungen:

- In der Praxis sollte man die Betriebsspannung  $U$  der Brücke kleiner wählen. Dann werden der Strom und damit die Verlustleistung am Messfühler kleiner. Dieser kann sonst durch Eigenerwärmung falsche Ergebnisse zeigen.
- Wenn man einen Teil von  $R_2$  als Trimpotentiometer ausführt, kann der Nullpunkt eingestellt werden.
- Wegen der relativ kleinen Brückenspannung ist oft ein Messverstärker vor der Anzeige nötig.

### Aufgabe 3

Berechne die maximal auftretende Verlustleistung des Fühlers in der Schaltung aus Aufgabe 2.

### Aufgabe 4

Ändere die Schaltung aus Aufgabe 2 so um, dass ein Voltmeter mit Messbereich  $0...10\text{V}$  als Anzeige dienen kann, entsprechend dem Messbereich  $0...100^\circ\text{C}$ .

Die Schaltung soll eine Abgleichmöglichkeit für den Nullpunkt und für den Vollausschlag haben.

Nun stellt sich die Frage, ob bei der Schaltung mit Messbrücke die Skala linear ist.

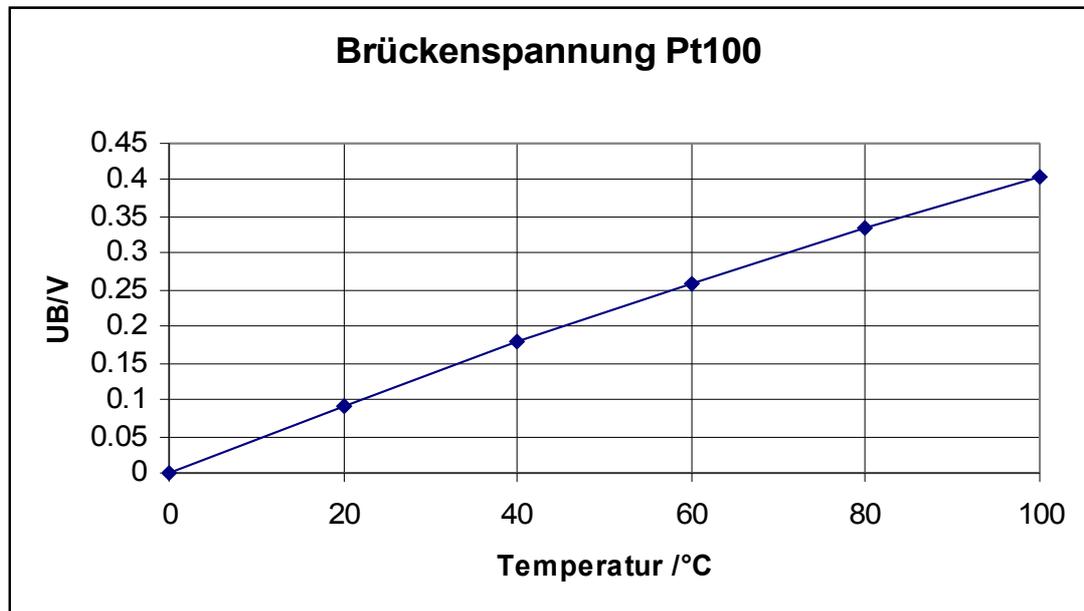
### Aufgabe 5

Stelle die Gleichung für die Brückenspannung  $U_B$  als Funktion der Temperatur in  $^\circ\text{C}$  auf. Es wird angenommen, dass die Brücke bei  $v=0^\circ\text{C}$  abgeglichen wurde, d.h. dass  $R_2 = R_3 = R_4 = R_0$ .

Ergibt sich hier ein linearer Zusammenhang?

Eine andere Methode zur Überprüfung ist es, mithilfe von Excel den Zusammenhang grafisch darzustellen.

Das Ergebnis zeigt, dass der Zusammenhang prinzipiell nichtlinear ist, allerdings mit einer geringen Abweichung vom linearen Verlauf:



Diese kleine Nichtlinearität kann man beim Anfertigen der Skala berücksichtigen, mit elektronischen Schaltungen oder durch die Verwendung eines Mikrocontrollers und Umrechnung der Messwerte mehr oder weniger korrigieren.

Sowieso ist die Pt100-Kennlinie selbst genau betrachtet nur in erster Näherung linear, so dass das Linearisierungsproblem bei genauen Messungen immer besteht.

---

Hier Einschub: Messbrücken

---

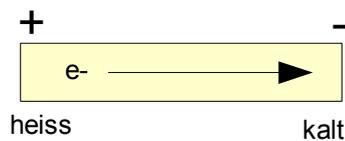
### 1.3 Thermoelemente

Ein Thermoelement besteht aus zwei Drähten aus unterschiedlichem Material die an einer Stelle miteinander verbunden sind (verschweisst oder verdreht). Erhitzt man die Verbindungsstelle, so misst man an den freien Enden eine Spannung von wenigen Millivolt.

Dieser Effekt wurde von 1821 von Thomas **Seebeck** entdeckt und nach ihm benannt.

Die Erklärung ist schwierig und in vielen Lehrbüchern falsch dargestellt. Für unser Verständnis genügt eine stark vereinfachte Version.

Wir betrachten zunächst ein Stück Metall oder Draht:

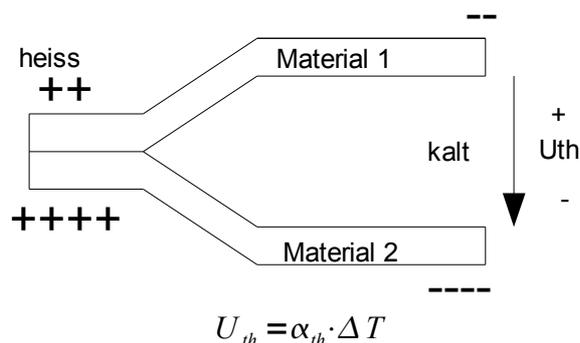


In einem Leiter haben die Elektronen am heissen Ende mehr Bewegungsenergie als am kalten Ende.

Die « heissen » Elektronen verteilen sich mehr im Leiter, während die « kalten » eher an Ort und Stelle bleiben. Dies führt zu einem Ungleichgewicht der Ladungen, also zu einer elektrischen Spannung, welche von der Temperatur**differenz** und der Art des Materials abhängt.

Diese Spannung kann nicht allein gemessen werden, denn der Anschluss geht über Drähte, die wiederum Thermospannungen bewirken, und diese würden mitgemessen werden.

Ein technisches Thermoelement besteht aus zwei Leitern aus unterschiedlichem Material. Wenn die Elektronendrift in Material 2 stärker ist, dann driften dort mehr Elektronen zum kalten Ende, und es entsteht dort eine stärkere negative Ladung. Das obere kalte Ende mit Material 1 wird also positiv in Bezug auf Material 2:



$\alpha_{th}$  ist der Thermofaktor (Seebeck-Koeffizient, Thermoempfindlichkeit) des Thermoelements. Er hängt von den beiden Materialien ab.

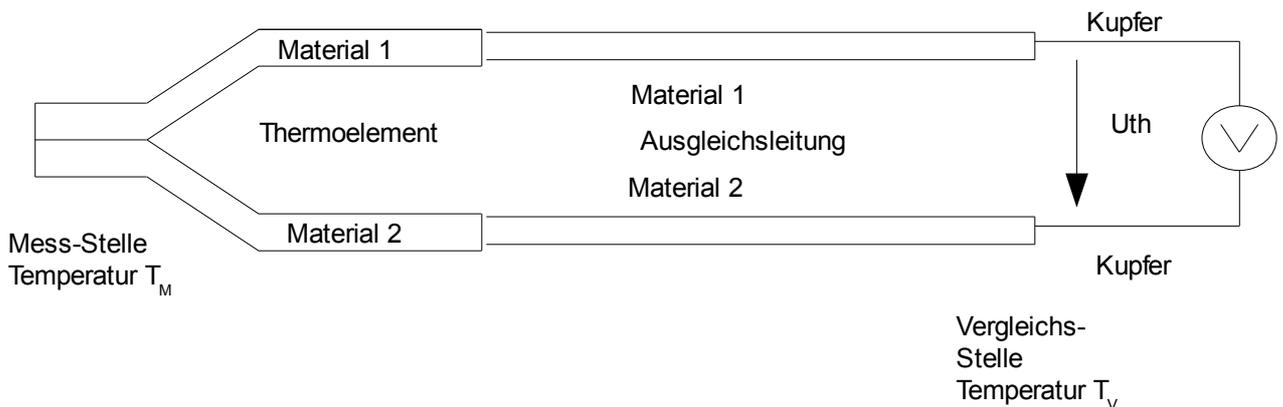
$\Delta T$  ist die Temperaturdifferenz zwischen heissem und kaltem Ende

In der Messtechnik ist das heisse Ende die **Meßstelle** mit der Temperatur  $T_M$ , das kalte Ende ist die **Vergleichsstelle** mit der Temperatur  $T_V$ .

Für eine genaue Messung muss die Vergleichstemperatur möglichst präzise eingehalten werden. Früher benutzte man hierfür z.B. schmelzendes Eis.

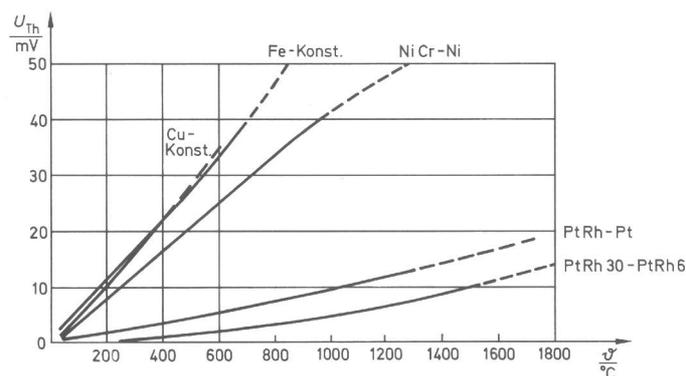
Da Thermoelemente vor allem zum Messen hoher Temperaturen eingesetzt werden, kann die Vergleichsstelle nicht gut nahe an der Meßstelle liegen.

Man verlängert das Thermoelement mit einer sogenannten **Ausgleichsleitung** bis zur Vergleichsstelle. Die Ausgleichsleitung muss aus denselben Materialien 1 und 2 bestehen wie das Thermoelement selbst. Es wirken dann Thermoelement und Ausgleichsleitung wie ein einziges verlängertes Thermoelement, und es treten keine zusätzlichen Thermospannungen auf die das Messergebnis verfälschen würden.



An der Vergleichsstelle wird der Übergang auf normalen Kupferdraht vollzogen. Wenn das Voltmeter auf einer anderen Temperatur als die Vergleichsstelle liegt, gibt es auch hier wieder Thermospannungen in beiden Drähten. Diese heben sich aber gegenseitig auf, so dass das Voltmeter nur die Thermospannung  $U_{th}$  misst.

### Kennlinien



### Thermopaare

Bezeichnung	Material	$\alpha_{th}$	Temperaturbereich	
		$[\mu V/^\circ C]$		
Typ U	Cu-CuNi		-200°C	+600°C
Typ T	Cu-CuNi		-270°C	+400°C
Typ L	Fe-CuNi		-200°C	+900°C
Typ J	Fe-CuNi	51.7	-210°C	+1200°C
Typ K	NiCr-Ni	40.44	-270°C	+1372°C
Typ S	Pt10Rh-Pt		-50°C	+1769°C

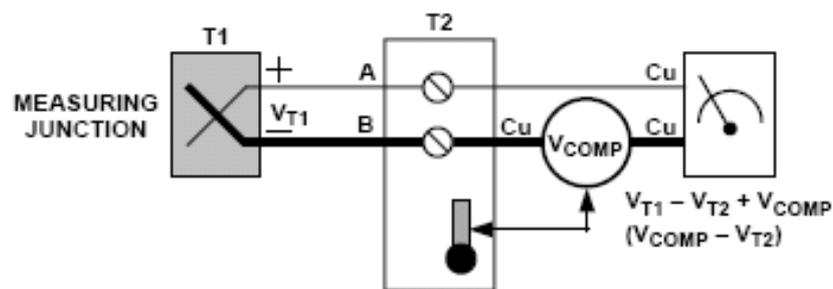
### Ausgleichsleitungen

Für die Ausgleichsleitungen werden folgende Kennfarben verwendet:

	Typ U	Typ T	Typ L	Typ J	Typ K	Typ S
<b>+ Schenkel</b>	rot	blau	rot	weiß	rot	rot
<b>- Schenkel</b>	braun	rot	blau	rot	grün	weiß
<b>Mantel</b>	braun	blau	blau	schwarz	grün	weiß

### Vergleichsstellentemperatur

Die Temperaturbestimmung mit Thermoelementen bezieht sich immer auf die Vergleichstemperatur, die an der Vergleichsstelle herrscht. In der Praxis wird diese Temperatur bei etwa 20 °C (Raumtemperatur) liegen. Früher wurde für genauere Messungen die Vergleichsstelle durch schmelzendes Eis auf 0 °C gehalten. Für eine konstante Vergleichstemperatur können Thermostate verwendet werden, üblicher sind heute jedoch die elektrischen Vergleichsstellen-Temperaturkompensationen.



Man hat für die Thermospaltung:

$$U_{th} = \alpha_{th} \cdot \Delta T \quad \text{oder} \quad U_{th} = \alpha_{th} \cdot \Delta \vartheta \quad \text{da es sich um Temperaturdifferenzen handelt.}$$

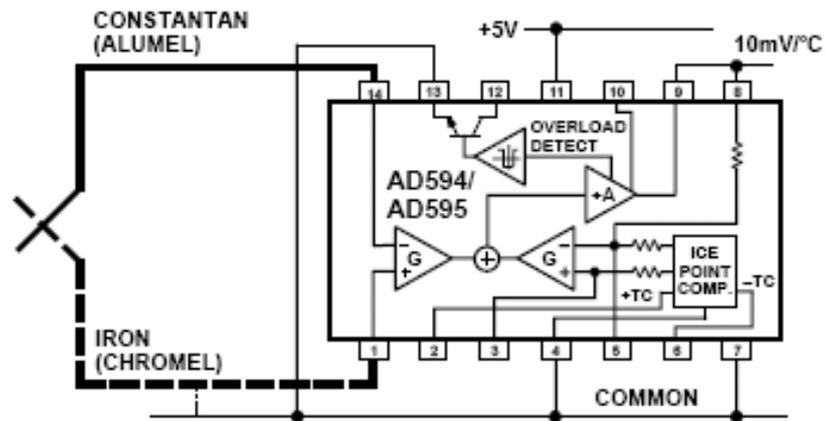
$$\rightarrow U_{th} = \alpha_{th} \cdot (\vartheta_M - \vartheta_V)$$

$$\rightarrow U_{th} = \alpha_{th} \cdot \vartheta_M - \alpha_{th} \cdot \vartheta_V$$

Statt die Temperatur der Vergleichsstelle konstant auf 0°C zu halten, kann man sie auch messen und zur Spannung des Thermoelements eine Spannung  $+\alpha_{th} \cdot \vartheta_V$  hinzuaddieren wie im obigen Bild.

Diese Methode benötigt natürlich einen zweiten Temperatursensor. Dieser braucht aber nur in einem kleinen Temperaturbereich zu arbeiten, normalerweise in der Nähe der Zimmertemperatur.

Für diese Methode gibt es fertige integrierte Schaltungen wie z.B. den AD594. Dieser bietet eine Kompensation der Vergleichsstellentemperatur.



Für genaue Messungen müssen die Werte aber noch linearisiert werden, da der Seebeck-Koeffizient nur in einem kleinen Bereich konstant ist.

### Aufgabe 6

Berechne für ein Thermoelement vom Typ K die Thermospannung bei einer Messtemperatur von 800°C und einer Vergleichstemperatur von 20°C.

Welche Verstärkung ist nötig, um ein Signal mit 8V/100°C zu erzeugen?

## 2. Messung von Kräften und Dehnungen: Dehnungsmeßstreifen (DMS)

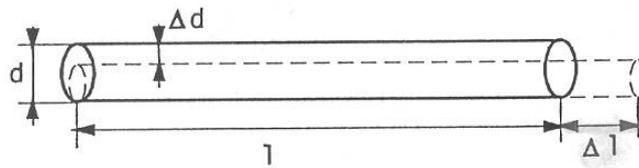
strain gauges, jauges de contrainte, jauges d'extensomètre

### Zweck:

Messung von Dehnungen und Stauchungen, Verformungen  
Kräften, Druck

### Prinzip:

Der elektrische Widerstand eines Leiters ändert sich reversibel unter dem Einfluß einer Dehnung, wenn diese gering ist (<0.5%).



Wird ein Draht gedehnt, so ändert sich sein Widerstand

- aufgrund der Längenänderung  $\Delta l$
- aufgrund der Querschnittsänderung  $\Delta A$
- aufgrund der Änderung der Kristallstruktur, welche zu einem veränderten spezifischen Widerstand  $\Delta \rho$  führt. Diese Änderung ist bei Metallen zu vernachlässigen.

Wenn die Dehnung oder Stauchung klein genug ist, bewirkt sie eine lineare Änderung des Widerstandes:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon$$

wobei  $\varepsilon$  die Dehnung ist:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

Der K-Faktor ist eine Materialkonstante.

Mit Hilfe der Differenzialrechnung lässt sich nachweisen, dass K bei Metallen ungefähr 2 beträgt, unter der Annahme dass die Dichte nicht ändert.

Halbleiter-DMS haben höhere K-Werte (100...160), so dass sie empfindlicher sind.

Um die Empfindlichkeit zu erhöhen, wird der Draht gewendelt.

Übliche Widerstandswerte sind 120, 300, 350, 600Ω.

Die Ströme betragen 10...20mA.

### Werkstoffe:

Konstantan CuNi mit  $K=2$ , sehr geringer Temperaturkoeffizient  $\alpha = \pm 50 \text{ ppm/K}$ .

CrNi

Pt, PtIr, PtW für hohe Temperaturen

Halbleiter mit hohem K, aber stark temperaturabhängig

**Befestigung:**

Die Befestigung von DMS ist sehr heikel, da diese falsch messen, wenn sie sich nicht exakt wie die Unterlage verformen. Meist wird ein (teurer) Spezialkleber auf Zweikomponentenbasis verwendet.

**Schaltungen:**

(siehe Messbrücken!)

- **Viertelbrücke, R1 = DMS**

$$U_B = \frac{U}{4} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1}, \quad \text{mit} \quad \frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon \quad \rightarrow \quad U_B = \frac{U}{4} \cdot K \cdot \varepsilon$$

Nachteil: keine Temperaturkompensation

Mit Temperaturkompensation: ein DMS (R2) wird inaktiv bei gleicher Temperatur betrieben.

- **Halbbrücke: R1, R2 sind DMS**

Da R1 und R2 gegensinnig wirken, ist eine Temperaturkompensation gegeben, wenn beide DMS die gleiche Temperatur haben.

Wegen dieser gegensinnigen Wirkung muss man dafür sorgen, dass DMS1 gedehnt und DMS2 gestaucht wird, dann ergibt sich die doppelte Brückenspannung:

$$U_B = \frac{U}{2} \cdot K \cdot \varepsilon$$

Anwendung: Biegestab als Waage



- **Diagonalbrücke: R1, R4 sind DMS**

R1 und R4 wirken gleichsinnig, die DMS müssen also beide gedehnt oder gestaucht werden. In diesem Fall ergibt sich die gleiche Brückenspannung wie bei der Halbbrücke. Wegen der gleichsinnigen Wirkung von R1 und R4 ist eine Temperaturkompensation nicht gegeben, ausser wenn R2 und R3 als passive DMS mit gleicher Temperatur ausgeführt werden.

- **Vollbrücke: alle Widerstände sind DMS**

R1 und R4 werden gedehnt,  
R2 und R3 werden gestaucht.

In diesem Fall ergibt sich die vierfache Brückenspannung gegenüber der Viertelbrücke:

$$U_B = U \cdot K \cdot \varepsilon$$

Temperaturkompensation ist gegeben, wenn alle DMS die gleiche Temperatur haben.