

Kompensation von Linearitätsabweichungen der Wheatstone Brücke beim Messen von großen Dehnungen mit Dehnungsmessstreifen.

Reinhard Kehrer

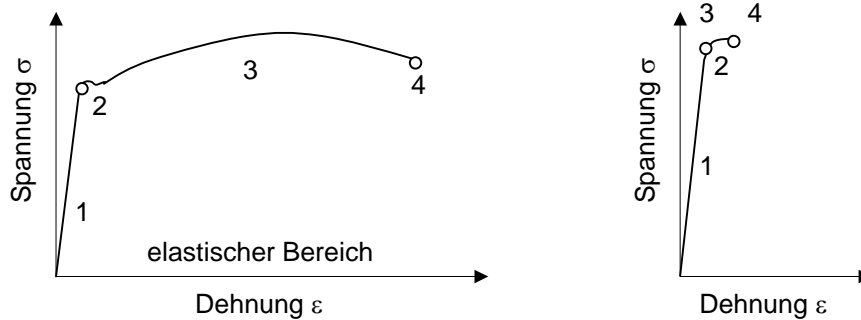
1. Basis der Dehnungsmessung

Dehnungsmessstreifen werden zum einen in Messgrößenaufnehmern für mechanische Größen, wie z. B. Kraft, Drehmoment und Druck eingesetzt, zum anderen auch für die Erfassung der Dehnung in Materialien und Bauteilen zur Bestimmung deren Eigenschaften unter Last. Hierbei unterscheidet man zwischen nicht-zerstörenden und zerstörenden bzw. deformierenden Materialuntersuchungen.

Die Hooksche Kennlinie zeigt die mechanische Spannung σ in einem Material in Abhängigkeit von der Dehnung ϵ . Diese materialspezifische Kennlinie ist die Basis für Materialuntersuchungen. Wird ein Material im sogenannten elastischen Bereich gedehnt, so besitzt es die Eigenschaften eines Federkörpers und kehrt bei Entlastung wieder in die ursprüngliche Form zurück. Wird der elastische Bereich überschritten erfolgt eine plastische Verformung bis hin zum Materialbruch. So lässt sich z. B. Stahl in bestimmten Grenzen biegen und kehrt bei Entlastung wieder in seine Ursprungsform zurück. Er besitzt einen relativ großen verformbaren (plastischen) Bereich. Glas hingegen lässt sich im kalten Zustand nur minimal elastisch und nicht plastisch verformen. Es erreicht sehr schnell die Bruchgrenze.

Folgende Abbildung zeigt ein Spannungs-/Dehnungsdiagramm für ein elastisches (linke Kurve) und sprödes (rechte Kurve) Material mit den markierten Punkten:

- 1 = elastischer Bereich
- 2 = Elastizitätsgrenze
- 3 = plastischer Bereich
- 4 = Bruch



Bei sogenannten linearelastischen Werkstoffen ist bis zur Elastizitätsgrenze (Punkt 2) die Kennlinie linear (Hooksche Gerade) und wird durch das Elastizitätsmodul E beschrieben.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = konst.$$

Die Einheit des Elastizitätsmoduls ist kN/mm^2 .

Folgende Tabelle gibt für einige Werkstoffe des Elastizitätsmoduls an:

Werkstoff	E-Modul [kN/mm^2]
Aluminium	66
Magnesium	44
Nickel	193
Nickel	193
Stahl	200
Titan	103

Im Aufnehmerbau werden Materialien wie z. B. Stahl oder Aluminium eingesetzt. Um die Lebensdauer und die Qualität eines Aufnehmers über eine sehr hohe Zahl von Lastwechseln zu gewährleisten, ist es erforderlich, das Material nur elastisch, es also nur im linearen Bereich bis max. zur Elastizitätsgrenze zu verformen. Hierbei wird der Messkörper so dimensioniert, dass bei der spezifizierten Nennlast eine Materialdehnung von ca. $1000 \mu\text{m/m}$ auftritt. Bei der Verwendung von Stahl entspricht das einer mechanischen Spannung von 200 N/mm^2 . Ein Kraftaufnehmer mit einer Nenngröße von 10 kN sollte demnach mindestens einen Querschnitt von 50 mm^2 besitzen.

In der Werkstoffprüfung wird im Gegensatz zum Aufnehmerbau das Material wesentlich weiter gedehnt. So treten in der Spannungsanalyse Dehnungen von bis zu $4000 \mu\text{m/m}$ auf. Zerstörende Untersuchungen belasten bewusst über die Elastizitätsgrenze hinaus, teilweise bis hin zum Bruch.

Entsprechend sind die auftretenden Dehnungen wesentlich größer. Die Grenze für diese Versuche stellen die DMS dar, die aber aufgrund ihres sehr geringen E-Moduls ($<5 \text{ kN/mm}^2$) sehr große Dehnungen zulassen.

Die zu erfassenden Dehnungen bei Zerreiversuchen können durchaus bei 50.000 bis 100.000 $\mu\text{m/m}$ liegen.

Dehnungsmessstreifen reagieren auf Dehnung mit einer Widerstandsänderung. Der k-Faktor beschreibt diese Reaktion:

$$k = \frac{\Delta R / R}{\varepsilon}$$

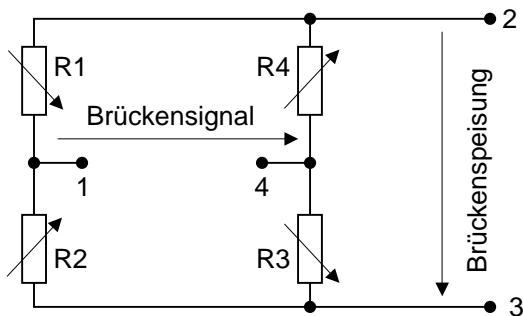
In der Praxis ist der k-Faktor im Bereich von 2 und wird vom Hersteller individuell für die Streifen angegeben. Beispiel: Bei einer Dehnung von 1000 $\mu\text{m/m}$ und einem k-Faktor von 2 ändert der DMS seinen Widerstand um 2 $\text{m}\Omega/\Omega$. Bei einem DMS mit einem Widerstand von 350 Ω entspricht das nur 0,7 Ω . Das ist eine Widerstandsänderung von nur 0,2 %.

Zusammenfassung 1:

- Im Aufnehmerbau werden nur geringe Dehnungen von ca. 1000 $\mu\text{m/m}$ genutzt, um eine hohe Lebensdauer des Aufnehmers zu erreichen.
- In der Spannungsanalyse wird der elastische Bereich relativ weit genutzt, es treten Dehnungen von ca. 4000 $\mu\text{m/m}$ auf.
- In der zerstörenden Werkstoffprüfung treten Dehnungen von bis zu 100.000 $\mu\text{m/m}$ auf.
- Die Widerstandsänderung des DMS ist im elastischen Bereich minimal.

2. Wheatstone Brücke

Um die sehr geringen Widerstandsänderungen messtechnisch nutzen zu können, ist es erforderlich, eine Schaltung zu verwenden, die lediglich die Widerstandsänderung, nicht aber den absoluten Widerstand misst. Eine solche Schaltung ist die Wheatstone Brücke.



Beispiel einer Wheatstone Brücke mit 4 aktiven DMS (R1-R4), die zur Signalverstärkung gegenseitig geschaltet sind. Über die Punkte 2 und 3 wird die passive Wheatstone Brücke mit der Spannung U_S gespeist.

Im linken Teiler wird bei positiver Dehnung das Spannungspotential an Punkt 1 zunehmen, in Teiler 2 wird es an Punkt 4 abnehmen. So steht zwischen den Punkten 1 und 4 eine Brückensignalspannung U_M an, die nur von der Speisespannung und der Widerstandsänderung, nicht jedoch von den absoluten Widerständen der DMS abhängt.

Der Kennwert einer Brücke wird in mV (Signal) pro V (Speisung) angegeben. Bei einer Speisung von 5 V und einer Brückenverstimmung von 2 mV/V ist das Brückensignal 10 mV. Die Wheatstone Brücke ist bei kleinen Dehnungen, also kleinen Widerstandsänderungen linear.

Diese Linearität ist für die kleinen Dehnungen, wie sie in Aufnehmern auftreten, ausreichend gut. In der Materialuntersuchung treten aber wie unter 1 beschrieben sehr große Dehnungen und damit große Widerstandsänderungen auf. Die Brückenschaltung zeigt dann ein nichtlineares Verhalten, was bei der Signalbeurteilung zu berücksichtigen ist.

Die Wheatstone Brücke folgt folgenden Zusammenhängen:

Spannungspotential an Punkt 1:

$$U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_S$$

Spannungspotential an Punkt 4:

$$U_4 = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot U_S$$

Die Differenz von U1 und U4 ergibt die Messspannung UM

$$UM = US \cdot \left(\frac{R1}{R1+R2} - \frac{R4}{R3+R4} \right)$$

Stellt man die Formel nach der Brückenempfindlichkeit, also nach mV/V (Signal/Speisung) um und fügt zu den Widerständen die Widerstandsänderung hinzu, erhält man folgenden Term:

$$\frac{UM}{US} = \frac{R1 + \Delta R1}{R1 + \Delta R1 + R2 + \Delta R2} - \frac{R4 + \Delta R4}{R4 + \Delta R4 + R3 + \Delta R3}$$

Diese Beziehung gilt prinzipiell und ist hier für Vollbrücken mit 4 aktiven DMS ausgelegt. Bei der Messung mit Halb- oder Viertelbrücken sind die entsprechenden Werte für $\Delta R = 0$.

Die erwartete lineare Kennlinie ist nur dann gegeben, wenn die Summe der Widerstandsänderungen Null wird. Dies ist nur bei Vollbrücken mit 4 aktiven DMS der Fall.

Bei Materialuntersuchungen wird häufig mit nur einem aktiven DMS gemessen, die Formel reduziert sich dann auf

$$\frac{UM}{US} = \frac{R1 + \Delta R1}{R1 + \Delta R1 + R2 + 0} - \frac{R4 + 0}{R4 + 0 + R3 + 0}$$

ist gleich

$$\frac{UM}{US} = \frac{\Delta R}{2(2R + \Delta R)}$$

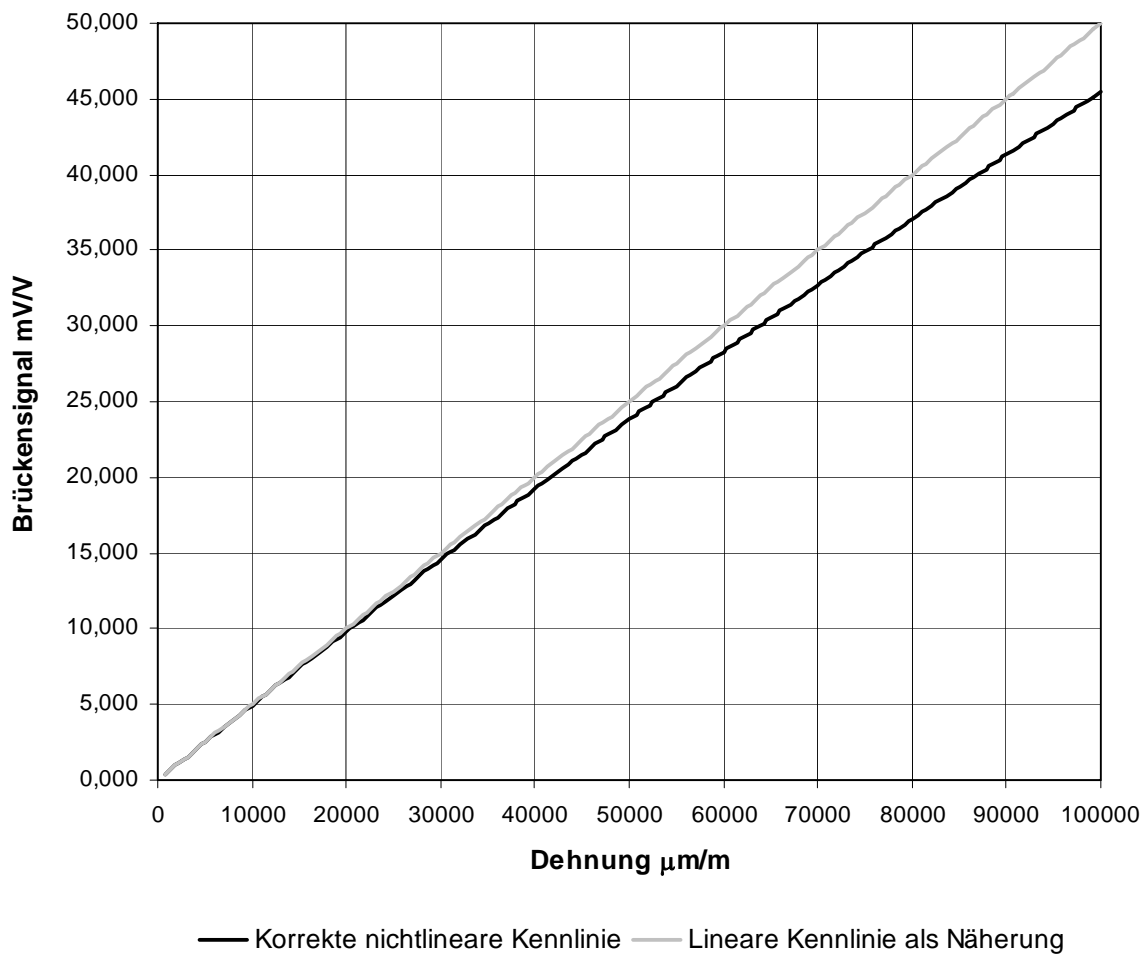
In der Praxis wird allerdings die Näherungsformel

$$\frac{UM}{US} = \frac{\Delta R}{4R}$$

verwendet, die von einem linearen Verhalten ausgeht, was bei kleinen Dehnungen auch richtig ist.

Im folgenden Bild wird die Kennlinie der Dehnungsmessung mit vereinfachter linearer Formel und mit korrekter Formel dargestellt. Um den Praxisbezug herzustellen, ist als Eingangsgröße die Dehnung, welche proportional zur Widerstandsänderung ist (k-Faktor = konstant), gewählt.

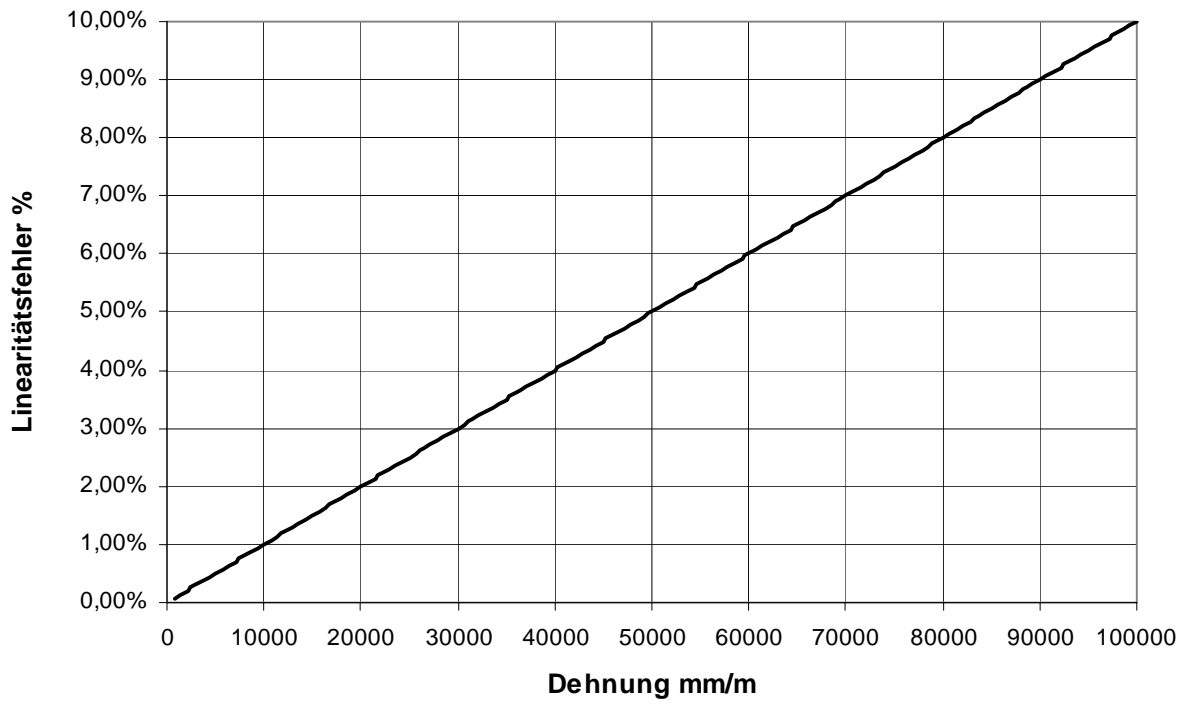
Kennlinien der Wheatston Brücke mit einem aktiven DMS



Es ist deutlich zu erkennen, dass die Wheatstone Brücke bei Verwendung von nur einem DMS bei großen Dehnungen, wie sie in der Materialprüfung auftreten, einen nicht zu vernachlässigenden Fehler aufweist:

Dehnung	Applikation	Linearitätsfehler
1000 µm/m	Aufnehmerbau	0,1 %
4000 µm/m	Spannungsanalyse	0,4 %
20000 µm/m	Materialtest	2 %
100000 µm/m	Reißversuch	10 %

**Linearitätsfehler der Wheatstone Brücke
in Abhängigkeit von der Dehnung**

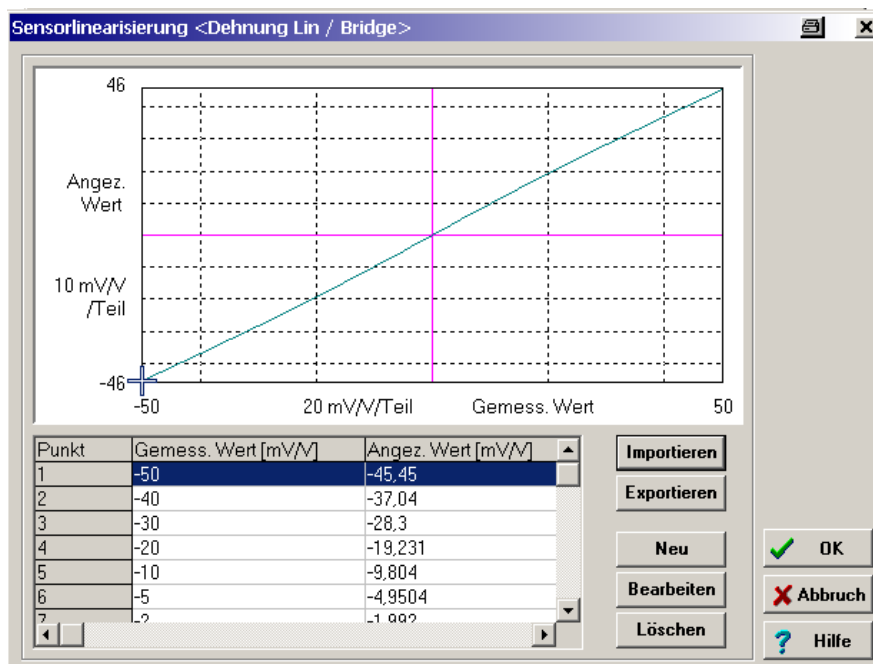


3. Lösungsmöglichkeiten

Bei den heute angebotenen Messsystemen für die Dehnungsmessung wird die in 2. beschriebene Problematik entweder nicht berücksichtigt bzw. kommuniziert oder es werden Rechenhilfen angeboten, um im nachhinein aus dem linear erfassten Wert einen korrekten Dehnungswert zu errechnen. Dies erfordert immer eine nachträgliche, also eine „offline“-Maßnahme und die entsprechende Möglichkeit, z. B. ein PC der zunächst alle gemessenen Werte speichert und diese anschließend umrechnet. Aufgrund der hohen Dynamik von Materialuntersuchungen ist eine „online“-Berechnung nicht möglich.

Das Trägerfrequenzmodul e.bloxx A6-2CF ist das einzige Messsystem, welches aufgrund der DSP-Technologie in der Lage ist, Messwerte in Echtzeit mit 5000 Werten/s zu linearisieren.

Hierzu kann eine, auf der Homepage www.gantner-instruments.com verfügbare Wertetabelle im Excelformat mit Hilfe der Konfigurationssoftware ICP 100 in das Modul e.bloxx A6-2CF geladen werden.



Mit dieser Funktionalität des Moduls e.bloxx A6-2CF ist es möglich, auch sehr große Dehnungen richtig zu messen. Die Ausgabe des Messwertes erfolgt sowohl in digitaler als auch in analoger Form bereits korrigiert. Die angezeigte Dehnung entspricht der tatsächlichen Dehnung im Material.