

# Einfache Kalibration für keramische Meßzellen am Beispiel des ME651

*Inhalt des Artikels ist die detaillierte Beschreibung einer einfachen Schaltung zur Kalibrierung und Signalverstärkung von keramischen Druckmesszellen mittels eines geeigneten ICs und weniger diskreter Bauelemente. Ziel ist ein einbaufertiges Sensorsystem mit einem ratiometrischen Ausgangssignal und einer ausreichende Genauigkeit ohne Temperaturabgleich.*

## Sensorsystem (ME651 und AM457)

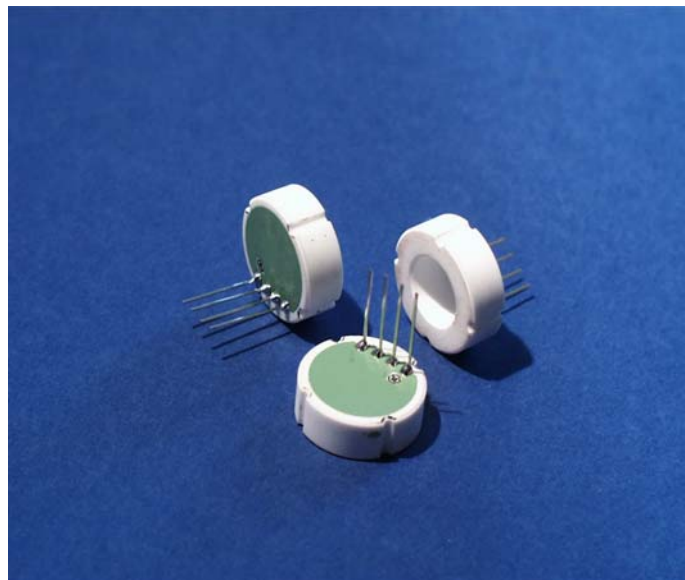
Als Meßzelle wurde in der vorliegenden Anwendungsbeschreibung keramisch-resistive Druckmeßzelle vom Typ ME651 (2bar, relativ) [1] mit einer Wheatstoneschen Brücke aus Dickschichtwiderständen verwendet (Siehe Abbildung 1). Der Brückenwiderstand ist mit 10K $\Omega$  spezifiziert und die Versorgungsspannung ist in dem Anwendungsbeispiel auf 5V festgelegt.

Zum Abgleich von Offset und Spanne (Kalibration) wurde unter Benutzung des High Precision Verstärkers AM457 der Firma Analog Microelectronics, Mainz [2] eine einfache Schaltung entwickelt (siehe Abbildung 2), die neben der Keramik-Meßzelle und dem IC AM457 aus 4 Widerständen und min. 2 Kondensatoren besteht (Siehe Datenblatt AM457 [2]).

Das IC AM457 wird als ratiometrischer Verstärker benutzt, der das Ausgangssignal des ME651 von ca. 10mVFS in ein 0,5 bis 4,5V Ausgangssignal umsetzen soll. Der Wert von 0,5V wird als Fußpunkt bezeichnet, das Full Scale Signal beträgt 4,5V.

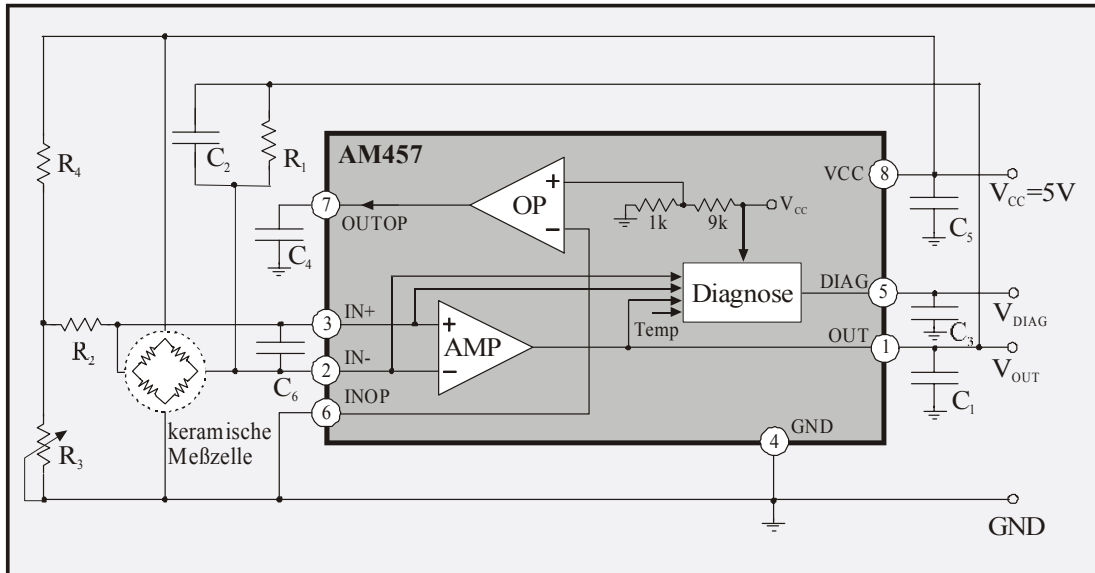
Die elektronischen Komponenten konnten auf einer runden Leiterplatte ( $\varnothing$  14mm) untergebracht werden, die an die Montagevorschriften für die keramische Meßzelle angepaßt wurde. Da der Abgleich nur auf der Leiterplatte stattfindet, kann die Leiterplatte vor der Kalibration mit Lötstiften auf die Meßzelle aufgebracht werden.

Aus den oben genannten Komponenten wurde eine kompakte Baueinheit entwickelt, die in der weiteren Beschreibung als Sensorsystem bezeichnet wird. Dieses System ist einbaufähig für ein Gehäuse, dessen Maße auf der Homepage der AMSYS zu finden sind.



**Abbildung 1: Keramische Meßzelle ME651**

# Einfache Kalibration für keramische Meßzellen am Beispiel des ME651



**Abbildung 2: Schaltung zur Signalverstärkung und Kalibration der Keramik-Meßzelle ME651 mit dem Auswerte-IC AM457**

## Dimensionierung

Die Dimensionierung der Schaltung kann mit Hilfe der Formeln (1) bis (3) erfolgen. Diese sind mittels eines Modells berechnet, dem die klassische Wheatstonesche Brückenschaltung aus vier Widerständen zugrunde liegt. Die drei einfachen Formeln ermöglichen es, die Kalibration mit wenigen Meßzellendaten durchzuführen.

Die zu benutzenden Formeln sind:

$$R_1 = R_2 = \frac{2 \cdot R_B}{5 \cdot d_{RS}} \quad (\text{k}\Omega) \quad \text{Spanneinstellung} \quad (1)$$

$$R_4 = \frac{R_1}{100} \quad (\text{k}\Omega) \quad \text{Hilfswiderstand} \quad (2)$$

$$R_3 = \frac{(-8 \cdot d_{RO} + d_{RS}) \cdot R_4}{8 \cdot d_{RO} + 9 \cdot d_{RS}} \quad (\text{k}\Omega) \quad \text{Fußpunkteinstellung} \quad (3)$$

worin für die individuellen Messzellen gilt:

$R_B$  - Brückenwiderstand in Ohm  
 $d_{RS}$  - Spanne/Versorgungsspannung in mV/V  
 $d_{RO}$  - Offset/Versorgungsspannung in mV/V



# Einfache Kalibration für keramische Meßzellen am Beispiel des ME651

Zur Berechnung der diskreten Einstellwiderstände werden Offset, Spann und der Brückenwiderstand der zu kalibrierenden Meßzelle bei Raumtemperatur und einer Versorgungsspannung von 5V ermittelt. Anschließend wird die Meßzelle mit dem AM457 zu der Schaltung erweitert, die in Abbildung 2 dargestellt ist. Die Widerstände  $R_1$  bis  $R_4$  werden gemäß der angegebenen Formel dimensioniert. Die Werte der Kondensatoren sind gemäß Tabelle 1 zu wählen.

Mit den berechneten Widerständen sind Fußpunkt  $U_{FP1}$  und Full Scale  $U_{FS1}$  für eine Meßzelle, die aus vier Brückenwiderständen besteht, eingestellt.

Name	Wert	Bemerkung
$C_1$	1nF	
$C_2$	100pF	
$C_3$	3,3nF	optional
$C_4$	1nF	optional
$C_5$	100nF	optional
$C_6$	470pF	optional

**Tabelle 1: Kapazitätswerte**

Da handelsübliche keramische Meßzellen zu den 4 Brückenwiderständen zusätzliche Widerstände aufweisen, besteht eine Diskrepanz zwischen Modell und Meßzelle, die sich darin zeigt, daß der Fußpunkt  $U_{FP1}$  und Full Scale Signal  $U_{FS1}$  noch nicht den Sollwerten entsprechen; sie sind also als Näherungswerte anzusehen.

Die erwähnte Diskrepanz wird bei der nachstehend beschriebenen Kalibration durch eine Korrektur der diskreten Einstellwiderstände berücksichtigt.

Durch Änderung des Widerstandes  $R_3$  (Poti) wird der erhaltene Fußpunkt  $U_{FP1}$  auf den Zielwert  $U_{FP2} = 0,5V$  korrigiert. Da Fußpunkt und Full-Scale Signal linear voneinander abhängig sind, ändert sich mit der Fußpunktjustierung in gleichem Maße auch das Full-Scale-Signal auf den Wert  $U_{FS2}$ . Um diesen Wert zu korrigieren, müssen die entsprechenden Spannenwiderstände  $R_1$  und  $R_2$  angepasst werden. Da es sich bei den Werten um einen linearen Zusammenhang handelt, können diese Widerstände einfach mit dem Verhältnis: Ziel(Full-Scale-)Wert  $U_{SOLL}$  zu dem erhaltenen Full-Scale-Wert  $U_{FS2}$  korrigiert werden, womit die Schaltung dann festgelegt ist.

## *Dimensionierungsbeispiel*

### **1. Bestimmung von Offset, Spanne und Brückenwiderstand der Keramik-Meßzelle**

Offset (0bar) = -0,096mV  
FS (2bar) = +11,53mV  
Spanne = +11,63mV  
 $R_B$  = +10,56k $\Omega$



# Einfache Kalibration für keramische Meßzellen am Beispiel des ME651

## 2. Berechnung von $d_{RO}$ und $d_{RS}$

$$\begin{aligned}d_{RO} &= \text{Offset}/5V &= -0,019\text{mV/V} \\d_{RS} &= \text{Spanne}/5V &= +2,33\text{mV/V}\end{aligned}$$

## 3. Dimensionierung der Widerstände $R_1$ , $R_2$ , $R_3$ und $R_4$

Dimensionierung der Spannenwiderstände  $R_1$  und  $R_2$  gemäß (Formel 1):

$$R_1 = R_2 = \frac{2 \cdot R_B}{5 \cdot d_{RS}} = 1,81\text{M}\Omega$$

Nach Formel (2) ergibt sich für den Hilfswiderstand  $R_4$ :

$$R_4 = \frac{R_1}{100} = 18,1\text{k}\Omega$$

Dimensionierung des Offsetwiderstands  $R_3$  gemäß (Formel 3):

$$R_3 = \frac{(-8 \cdot d_{RO} + d_{RS}) \cdot R_4}{8 \cdot d_{RO} + 9 \cdot d_{RS}} = 2,17\text{k}\Omega$$

Hinweis: Abweichungen des Einstellwertes vom theoretischen Wert gehen proportional in den Offsetfehler ein. Daher empfiehlt es sich den Widerstand in abgestufte Serienwiderstände aufzuteilen.

Für das Sensorsystem ergeben sich mit den realen Widerständen  $R_1 = R_2 = 1,81\text{M}\Omega$ ,  $R_3 = 2,17\text{k}\Omega$  und  $R_4 = 18,18\text{k}\Omega$  die Meßwerte:

$$\begin{aligned}P_{\text{MIN}1} (0\text{bar}) &\rightarrow U_{\text{FP}1} = 0,70\text{V} \\P_{\text{MAX}1} (2\text{bar}) &\rightarrow U_{\text{FS}1} = 4,48\text{V}\end{aligned}$$

## 4. Korrektur der Widerstände der Widerstände $R_1$ , $R_2$ , $R_3$ und $R_4$

Man erkennt, dass der Fußpunktwert  $U_{\text{FP}1}$  für  $P = 0\text{bar}$  gegenüber dem Sollwert von  $0,5\text{V}$  um ca. 40% zu hoch liegt, was auf die Diskrepanz des Modells mit der tatsächlichen Widerstandsstruktur der keramischen Messzelle zurückzuführen ist. Daher muß in dem nächsten Schritt durch Änderung des Widerstandes  $R_3$  der Fußpunktwert  $U_{\text{FP}2}$  für  $P = 0$  auf den Sollwert eingestellt werden. In dem vorliegenden Beispiel wurde der Wert  $U_{\text{FP}2} = 0,5\text{V}$  mit einem Wert  $R_{3,\text{KORR}} = 1,2\text{k}\Omega$  eingestellt.



# Einfache Kalibration für keramische Meßzellen am Beispiel des ME651

Nach dem Abgleich  $R_3$  auf  $U_{FP2} = 0,5V$  ergeben sich für  $P = 0$  und  $P = 2bar$  die folgenden Messwerte:

$$\begin{array}{ll} P_{MIN2} (0bar) & \rightarrow U_{FP2} = 0,50 V \\ P_{MAX2} (2bar) & \rightarrow U_{FS2} = 4,28 V \end{array}$$

Auf Grund der linearen Abhängigkeit von Fußpunkt und Full Scale Signal ändert sich in dem entwickelten Netzwerk  $U_{FS}$  um den gleichen Betrag wie  $U_{OFF}$ . Das bedeutet für die Produktion, dass der Wert  $P_{MAX2}$  (Druckmessung) nicht mehr gemessen werden mußte.

Da die Gleichungen in einem linearen Zusammenhang stehen, können die Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  auch linear korrigiert werden.

Berechnung des Korrekturfaktors  $X_{FS}$  für die Widerstände  $R_1$  und  $R_2$ :

$$X_{FS} = \frac{U_{FS,SOLL}}{U_{FS2}} = \frac{4,5 V}{4,28 V} = 1,05$$

Berechnung der neuen korrigierten Werte für  $R_1$  und  $R_2$ :

$$R_{1,KORR} = R_{2,KORR} = \frac{2 \cdot R_B}{5 \cdot d_{RS}} \cdot X_{FS} = 1,90M\Omega$$

Messung der neuen kalibrierten  $U_{FS,KAL}$ -Spannung mit den korrigierten Widerstandswerten  $R_{1,KORR}$  und  $R_{2,KORR}$ .

$$\begin{array}{ll} P_{MIN2} (0bar) & \rightarrow U_{FP2} = \mathbf{0,493V} \\ P_{MAX2} (2bar) & \rightarrow U_{FS,KAL} = \mathbf{4,468V} \end{array}$$

*Kalibrationsfehler:*

$$\begin{array}{ll} \text{Fußpunkt Fehler:} & 0,493V - 0,5V = -0,007V \quad \text{entspricht } 0,16\%FS \\ \text{Full Scale Fehler:} & 4,468V - 4,5V = -0,032V \quad \text{entspricht } 0,71\%FS \end{array}$$



# Einfache Kalibration für keramische Meßzellen am Beispiel des ME651

## Messungen

Das mit den korrigierten Widerständen  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  und  $R_4$  abgegliche Sensorsystem wurde bezüglich Druck und Temperatur charakterisiert. Abbildung 3 zeigt das Ausgangssignal in Abhängigkeit vom angelegten Druck bei  $T_R$  und  $V_{CC} = 5V$ .

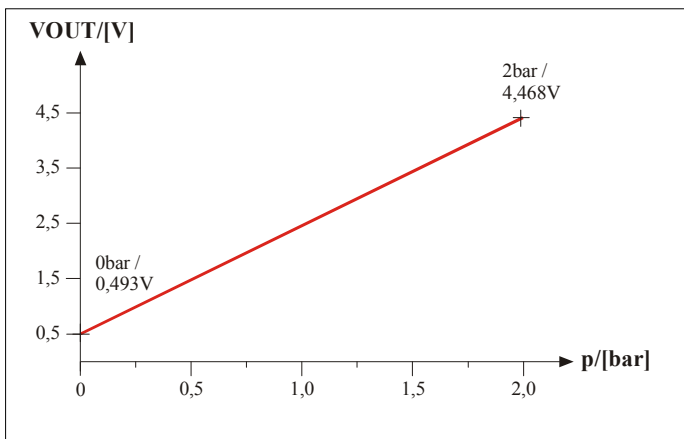


Abbildung 3: Meßkurve AM457+ME651 bei  $T=25^\circ\text{C}$

Unter Verwendung von 1ppm/K-Widerständen wurden für den industriellen Temperaturbereich der Fußpunkt und das Full Scale-Signal des Sensorsystems gemessen.

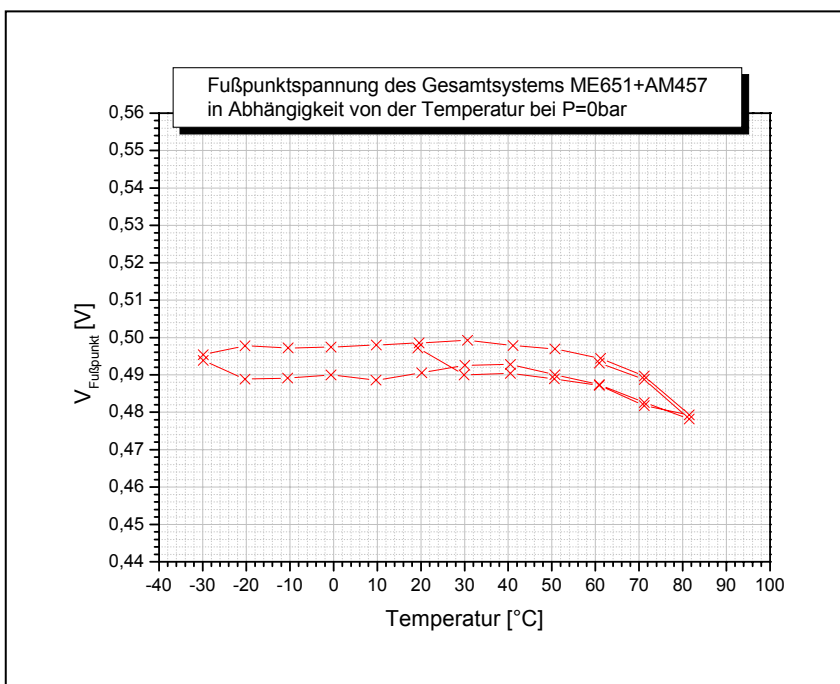
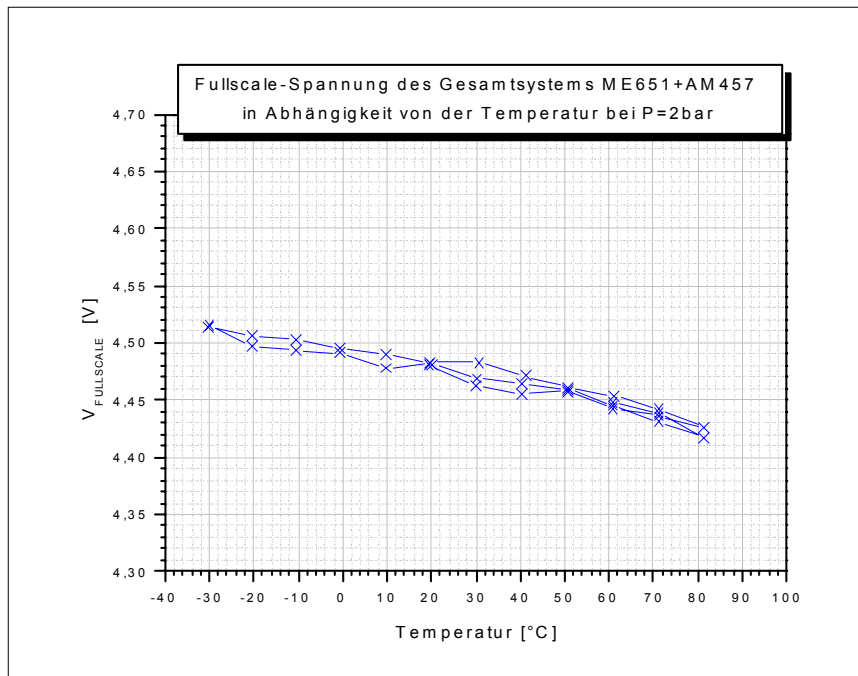


Abbildung 4: Temperaturverhalten des Fußpunktsignals am Ausgang des Systems (AM457)

# Einfache Kalibration für keramische Meßzellen am Beispiel des ME651



**Abbildung 5: Temperaturverhalten des Full Scale-Signals am Ausgang des Systems (AM457)**

Mit einer nicht selektierten Meßzelle konnte am Ausgang des Systems eine Temperaturdrift des Fußpunktes von 0,004%FS/K und eine Temperaturdrift des Full Scale Signal von 0,02%FS/K ermittelt werden.

Auf eine Kompensation des Temperaturkoeffizienten von Fußpunkt ( $TCO_S$ ) und Full Scale ( $TCS_S$ ) des Sensorsystems wurde in diesem Beispiel absichtlich verzichtet. Der Grund liegt in der Tatsache, dass ein Temperaturabgleich auf Systemebene zeitintensiv und teuer ist und dass die erreichte Genauigkeit ohne Temperaturkompensation für die meisten Anwendungen ausreichend ist.

Als Temperaturfehler gehen in die Systembetrachtung primär der TCO und der TCS der Meßzelle ein. Das IC AM457 trägt auf Grund seines hervorragenden Temperaturverhaltens nur marginal zu dem Temperaturfehler bei.

Wenn kein Temperaturabgleich notwendig ist, sollte dennoch die Temperaturdrift der Einstellwiderstände, die unmittelbar in den  $TCO_S$  und den  $TCS_S$  des Systems eingehen, berücksichtigt werden. Aus diesem Grunde empfiehlt es sich, Widerstände mit einem passenden Temperaturkoeffizienten zu benutzen.

Sollte die erreichte Temperaturgenauigkeit nicht ausreichend sein, kann der TSO und der TCS der Meßzelle vom Hersteller abgeglichen werden.



# Einfache Kalibration für keramische Meßzellen am Beispiel des ME651

## *Zusammenfassung*

An einem Beispiel wurde die Kalibration einer keramischen Meßzelle mittels des ICs AM457 und mittels Widerstandbestückung aufgezeigt. Mit einer einzigen Nachstellung konnten die notwendigen Widerstandswerte ermittelt werden.

Die vorgeschlagene Kalibration mittels diskreter Widerstände eignet sich mit ausreichender Genauigkeit für alle keramischen Meßzellen,

- die eine Kalibration mit Widerständen erlauben
- die ein Ausgangssignal von  $\pm 5\text{mVFS} \dots \pm 100\text{mV FS}$  aufweisen
- bei denen das Spannsignal größer als der Offset ist

Die Diagnosefunktionen des AM457 wurden in diesem Beispiel nicht genutzt, kann aber eingesetzt werden, ohne dass sich die gemessenen Werte ändern.

## *Literaturhinweise*

<http://www.amsys.de/>

[1] Datenblatt ME651

<http://www.analogmicro.de/>

[2] Datenblatt AM457