

# Kalibrierung von Dehnungsmessstreifen und DMS-basierten Sensoren

White Paper

Wer testet, erwartet, dass seine Messungen präzise sind. Also eine Übereinstimmung zwischen aufgenommener Messgröße und ausgegebenem Messwert. Um die Genauigkeit eines Messgeräts zu garantieren wird es regelmäßig kalibriert. Ohne hier auf formale Definitionen und subtilen Unterschiede zwischen „Abgleich“, „Kalibrierung“ und „Justage“ Rücksicht zu nehmen, kann unterschieden werden:

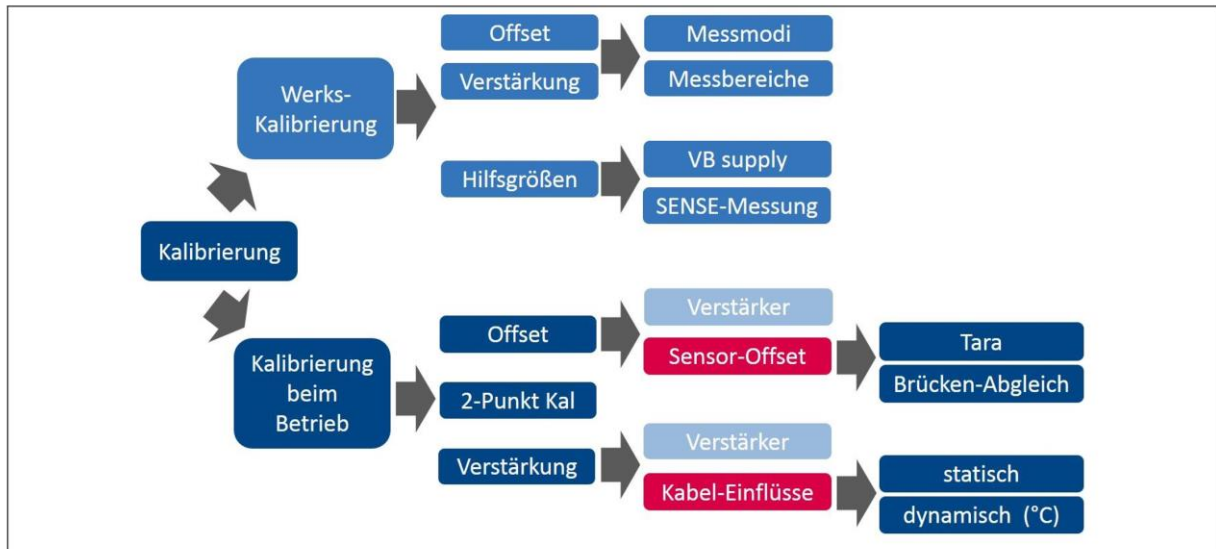


Abb.: Kalibrierung: Begriffe und Einordnung

### Offset: Tara vs. Brückenabgleich

Im Gegensatz zum Tara-Abgleich, der beim „einfachen“ Spannungsmodus verwendet wird, kann der Brückenabgleich Anfangswerte kompensieren, die grösser als der gewählte nominale Messbereich selbst sind:

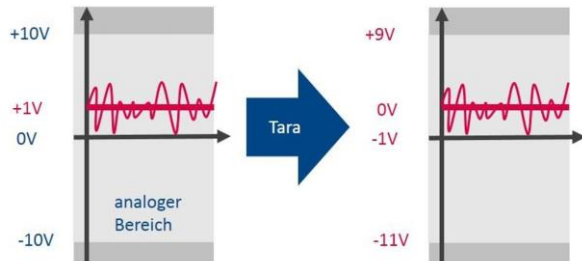
Bei Brückenschaltung führen (gegenläufige) Abweichungen der Einzelelemente von  $\pm 0.1\%$  zu  $1 \text{ mV/V}$  **Brückenoffset**.

Während Viertelbrückenergänzungen i.d.R. entsprechende Präzision erreichen, ist für **übliche DMS mit bis zu 0.3% Produktionstoleranz** zu rechnen und damit  $3 \text{ mV/V}$  Offset: leicht ein **Vielfaches des gewählten Messbereichs!**

Während Tara eine reine Umskalierung vornimmt, welche zu individuell unterschiedlichen und unsymmetrischen Messbereichen führt, wird beim Brückenabgleich ausgenutzt, dass der tatsächlich analog aussteuerbare Bereich des Verstärkers grösser ist, als der eingestellte Messbereich. Mittels analoger oder digitaler Kompensation wird dann der Nutzbereich symmetrisch um den neuen „virtuellen“ Nullpunkt verschoben.

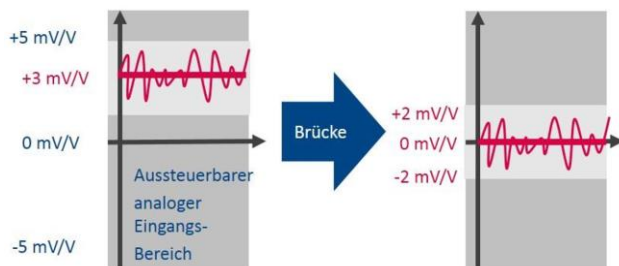
## Tara-Nullabgleich

- Reine Umskalierung
- Resultiert in individuell unsymmetrischen Messbereichen (z.B. -11V .. +9V)



## Brücken-Nullabgleich

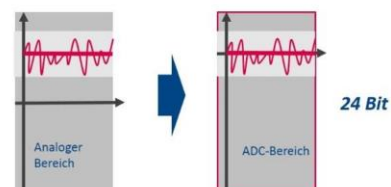
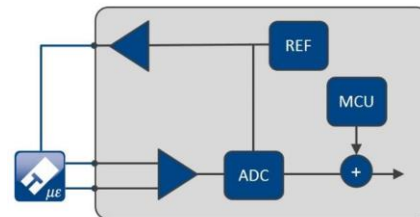
- Offset grösser als Messbereich
- Bereichsverschiebung
- Resultiert in einheitlichen symmetrischen Messbereichen (z.B. +/- 2mV/V)



Moderne digitale Konzepte (wie etwa sämtliche imc Systeme) verwenden hochauflösende und stabile 24 Bit ADC, die genug Aussteuerungsreserven besitzen, um das gesamte Offsetbehaftete Signal zu digitalisieren. Dabei bleibt immer noch ausreichend Auflösung für den eigentlich aktiv genutzten Bereich. Die Subtraktion des Offsets kann also rein digital und damit absolut drift-frei realisiert werden.

## Digitaler Brückenabgleich

- Erfordert Erfassung des gesamten Bereichs durch den ADC
- Wird ermöglicht durch moderne 24 Bit Technik
- Keine hochpräzisen DAC und Summationselemente nötig, nur stabiler ADC



## Stabilität des Nullabgleichs

Die Tatsache, dass der Brücken-Offset außerordentlich große Werte annehmen kann, bedingt im Übrigen, vielleicht unerwartet, dass die Stabilität des Offsetabgleichs mit zunehmendem Anfangs-Offset auch durch die **Verstärkungsdrift** des Systems mit bestimmt wird. Ihr unterliegt nämlich der zu kompensierende Wert!

### Beispiel:

Anfangs-Offset:

**2 mV/V @5V** entsprechend **10 mV** absolut

Verstärkungsdrift:

**10 ppm / °C**

### Äquivalente Offset-Drift:

$10 \text{ mV} * 10 \text{ ppm} / ^\circ\text{C} = \mathbf{0.1 \mu\text{V} / ^\circ\text{C}}$

Das liegt in der Größenordnung, die übliche Verstärker-Eingangsstufen als „direkte“ Offsetdrift aufweisen.

## Verstärkungsfehler durch Kabelwiderstände

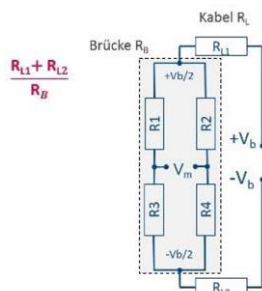
Kabelwiderstände in den Speiseleitungen verursachen eine Dämpfung der am Sensor tatsächlich wirksamen Erregung: Nach Spannungsteiler-Prinzip ist Verhältnis von Brückenimpedanz zur Summe der Kabelwiderstände maßgeblich. Diese „Verluste“ können durch zusätzliche Fühlerleitungen (SENSE) ausgeglichen werden

### Beispiel

Der dünnste gebräuchliche Kabeltyp für Messtechnik-Anwendungen ist Cu-Kabel mit  $0.14 \text{ mm}^2$  (Typ AWG26)

- $0.14 \text{ mm}^2 \Rightarrow 130 \text{ m}\Omega / \text{m}$
- 10 m Zuleitung, Hin- und Rückleiter (doppelt)
- Worst case: kleine Brückenwiderstände, z.B.  $120 \Omega$  Vollbrücke
- $2 \times 1.3 \Omega / 120 \Omega \quad \text{ca. } 2\%$

10 m  $\rightarrow$  2 % Verstärkungsfehler



## Dynamische Temperaturdrift des Kabelwiderstands

Reicht die einmalige Kompensation des statischen Verstärkungsfehlers zu Beginn der Messung bzw. nach der Installation, oder muss die Korrektur während des laufenden Messbetriebs nachgeführt werden? Bei Outdoor-Anwendungen könnten durchaus Temperaturdifferenzen von  $60^\circ\text{C}$  auftreten: z.B. zwischen Start der Messung morgens bei  $-10^\circ\text{C}$  und der Mittagshitze von  $50^\circ\text{C}$  während einer Testfahrt.

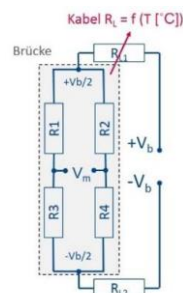
Der Temperaturkoeffizient von Kupfer führt über  $60^\circ\text{C}$  zu einer Widerstandsdrift von

- Cu:  $4000 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  („TK4000“)
- $\Delta T = 60^\circ\text{C}$  Arbeitsbereich angenommen
- $4000 \text{ ppm} \times 60^\circ\text{C} = 24 \%$
- Damit ändert sich der anfänglich abgeglichene Verstärkungsfehler von 2%

**um  $2\% \times 24\% = 0.48\%$  Verstärkungsdrift (10 m Kabel)**

Was bei noch längeren Kabeln durchaus relevant werden kann:

**4.8 % Verstärkungsdrift (100 m Kabel)**



## Temperatur-Drift der Kabel bestimmt Offset-Stabilität

Wie bereits gezeigt, kann ein großer Sensor-Offset bereits bei der minimaler Verstärkungsdrift eines sehr guten Verstärkers (Bsp.:  $10 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ) zu deutlicher effektiver Offset-Drift führen. Der gleiche Effekt ist wirksam, wenn der Anfangs-Offset einer erheblich größeren Verstärkungsdrift ausgesetzt sind, welche die Kabelwiderstände darstellen, wenn diese bei Erwärmung zunehmen.

Eine adaptive Kabelkompensation, welche auch dynamische Änderungen der Kabelwiderstände erfasst kann das vermeiden!

### Beispiel: 100m Kabel, 120 Ω DMS

Kabel-Gain  $2 \times 13 \Omega / 120 \Omega = \text{ca. } 20 \%$

Gain-Drift  $20 \% * 4000 \text{ ppm} / ^\circ\text{C} =$

**800 ppm / °C**

Brückenoffset **2 mV/V**

Resultierende

Offset-Drift  $2\text{mV/V} * 800 \text{ ppm} =$

$1.6 \mu\text{V/V} / ^\circ\text{C}$

Gesamt-Drift

(Outdoor)  $\Delta T = 60 ^\circ\text{C} * 1.6 \mu\text{V/V} / ^\circ\text{C} =$

führen beim Zusammentreffen eines maximal korrodierten mit einem perfekten Kontakt zu:

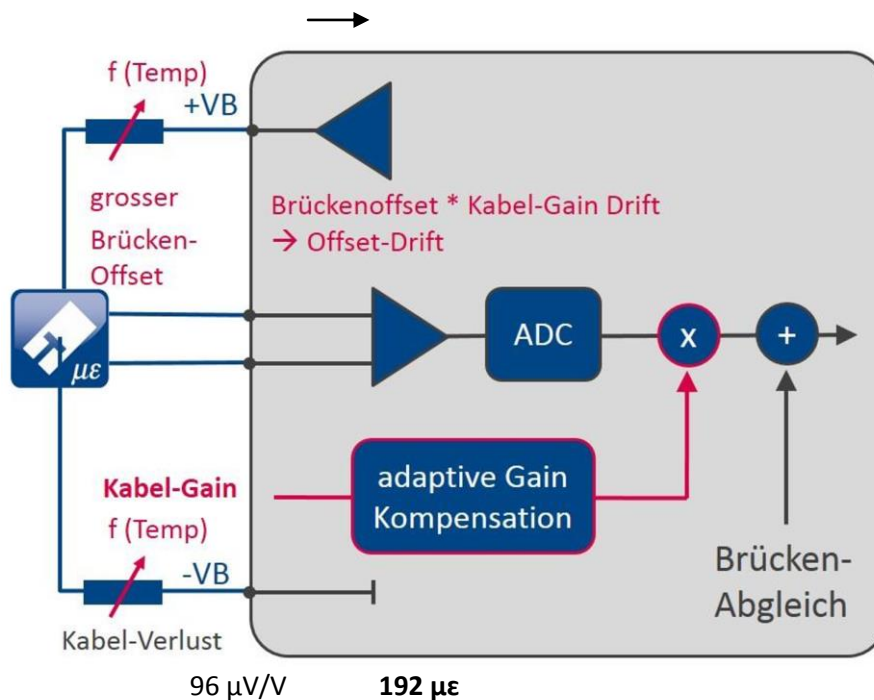
Mismatching bzw. Verstärkungsfehler:

$25 \text{ m}\Omega / 120 \Omega = 0.02 \%$

Damit gilt:

→ **eine einzige Fühlerleitung (SENSE) ist ausreichend!**

Die Kompensation erfolgt dabei bei imc-Systemen auf digitale Weise:



Der „einfache“ Kabelverlust wird mittels eines zusätzlichen Messpfades und ADCs erfasst, und rechnerisch um den doppelten Betrag kompensiert – und zwar kontinuierlich beim laufenden Betrieb!

Die dynamische Kompensation erfasst damit auch temperaturbedingte Drift von Kabelwiderständen

Zusätzlich wird auch noch die ungedämpfte

Speisung direkt an den Verstärkerklemmen VB erfasst, um selbst deren Rest-Toleranz optimal zu kompensieren.

Abb.: Adaptive und dynamische Kabel-Kompensation VERMEIDET signifikante Offset-Drift

### Kabelsymmetrie und einfache Fühlerleitung (SENSE)

Da Kabel und Litzen aus Kupfer gezogen werden, können sie als nahezu beliebig gut „gematcht“ angesehen werden! Für alle Adern eines Kabels gilt das selbst bei nennenswerter lokaler Erwärmung entlang des Kabels noch perfekt.

Auch Kontaktwiderstände von Steckverbindern stören die Symmetrie nicht wesentlich: Typische Werte von max. 25 mΩ je Kontakt

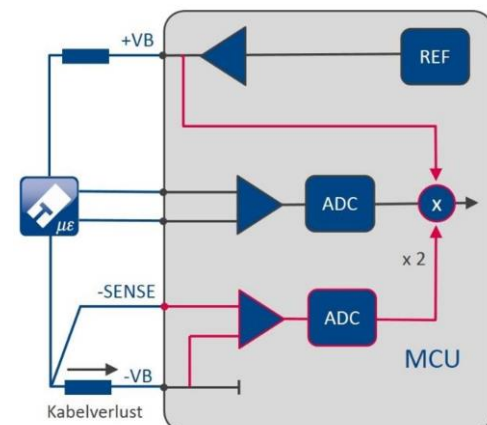


Abb.: Digitale Single-SENSE Kompensation

## Ratiometrische Brückenmessung

Auf diese Weise wird eine perfekte ratiometrische Brückenmessung erreicht. Ratiometrisch bedeutet dabei, dass der Brückensensor im Sinne von „mV/V  $\rightarrow$  mV Signal pro V Speisespannung“ stets einen Bruchteil der Speisespannung liefert. Eine gedämpfte Speisung kann also durch rein rechnerische Verstärkungskorrektur kompensiert werden. Eine tatsächliche „physische“ Nachregelung der Spannung ist dazu gar nicht nötig. Das vermeidet zusätzliche Fehlerquellen oder Stabilitätsprobleme von analogen Regelkreisen.

## Doppelte SENSE

Wann also sind dann doppelte SENSE-Leitungen überhaupt noch nötig oder sinnvoll? Neben wenig relevanten Fällen von unsymmetrischen Kabelwiderständen (s.o.) ist das insb. der Trägerfrequenz-Modus, der mit doppelter SENSE genauere symmetrische Phasenverhältnisse erreicht.

## Dynamische Störungen bei Halbbrücken-Konfiguration

Vorteilhaft kann doppelte SENSE außerdem in eher „exotischen“ Fällen sein, bei denen mit massiven Wackelkontakten oder dynamischen Störungen und Einkopplungen entlang der Speiseleitungen zu rechnen ist, und zwar bei Halbbrückenkonfiguration. Warum ist das nur bei Halbbrücke ein Thema?

Bei Verwendung von einfacher „Single-SENSE“ wird die interne Halbbrückenergänzung aus Symmetrierungs-Gründen stets an den internen +/-VB Knoten angeschlossen.

Dann wirken unsymmetrische und dynamische Störungen nur auf den externen (aktiven) Zweig der Brücke, nicht jedoch auf die interne HB-Ergänzung. Während dies immer noch unbedeutend geringen Verstärkungsfehlern entspricht, kann das aber bereits zu wahrnehmbaren Offsetfehlern bzw. Signalsprüngen führen.

Sind diese Effekte dynamischer Natur, können sie nicht durch eine (langsamere!) rechnerische Kompensation unterdrückt werden. Doppelte SENSE erlaubt dann die Speisung der internen HB-Ergänzung durch die symmetrisch rückgeführten +/-SENSE Signale - für eine perfekte dynamische (analoge) Störunterdrückung.

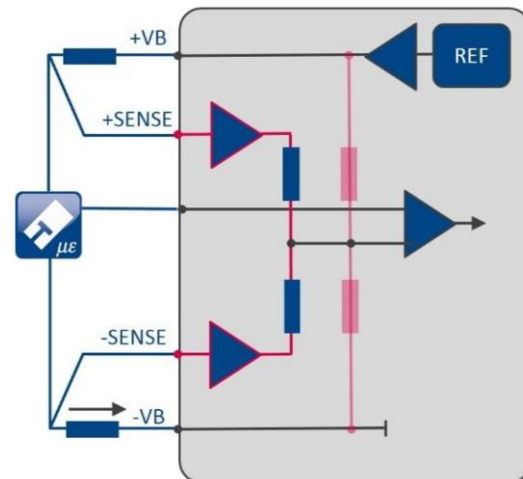


Abb.:  
Dynamische Störungen und Wackelkontakte an +/-VB

## Fazit

### SENSE bei imc Brückenverstärkern

- imc Verstärker sind grundsätzlich mit SENSE-Leitung(en) ausgerüstet.
- Über die SENSE-Leitung wird die tatsächlich wirksame Versorgungsspannung an der Brücke festgestellt.
- SENSE-Leitung kann ein- oder zweifach ausgeführt werden:
  - Versorgungskabel sind symmetrisch:  $\rightarrow$  doppelte SENSE ist normalerweise nicht notwendig.
  - **Ökonomische Single-SENSE als wichtiges Alleinstellungsmerkmal von imc-Modulen.**
  - Doppelte SENSE für TF und exotischere Fälle von dynamischen Störungen.
  - Die imc Verstärkermodule BR2-4 und UNI-4 bieten sowohl einfache als auch dop-

pelte SENSE: Die Software erkennt automatisch die aktuell verdrahtete Konfiguration.

- rechnerische Nachregelung des Verstärkungsfehlers: automatisch und im Hintergrund.
- Dynamische Kompensation während der Messung erfasst auch Temperaturdrift.

### Viertelbrückenkonfiguration

Bei Viertelbrückenkonfiguration sind sowohl die passive Halbbrückenergänzung als auch die untere Viertelbrückenergänzung im Verstärker komplettiert. Die DMS als das eigentlich aktive vierte Element wird mit zwei oder drei (längeren und Widerstandsbehafteten) Leitungen angeschlossen.

Zunächst sei der Vollständigkeit halber die „primitive“ 2-Leiter Viertelbrückenschaltung vorgestellt. Diese hat nicht wirklich praktische Bedeutung, da sie dramatische Offset- und Drift-Probleme hat, wie an folgendem Beispiel gezeigt:

#### 2-Leiter

- Beide Kabelwiderstände liegen im oberen Brückenweig.
- **Kabel-Widerstand** z.B.  $2 * 10 \text{ m}$ ,  $130 \text{ m}\Omega / \text{m} = 2.6 \Omega$
- **Verstärkungs-Fehler:**  $2.6 \Omega / 120 \Omega = 2\%$  → moderat
- **Offsetfehler:**  
 $\frac{1}{4} * RK/RB = \frac{1}{4} * 2\% \frac{1}{4} * 20 \text{ mV/V} = 5 \text{ mV/V}$  → **dramatisch!**
- **Offset-Drift:**  
mit Cu-Drift  $4000 \text{ ppm} / ^\circ\text{C} * 5 \text{ mV/V} = 20 \mu\text{V/V} / ^\circ\text{C}$  → **FATAL!!**

Das stellt buchstäblich ein „Thermometer“ dar:  $50^\circ\text{C}$  „steuern“ bereits den gesamten  $1 \text{ mV/V}$  Bereich aus!!

$$50^\circ\text{C} * 20 \mu\text{V/V} / ^\circ\text{C} = 1 \text{ mV/V C}$$

Dagegen vermeidet die fast ausschließlich verwendete 3-Leiter-Schaltung diese Offsetfehler durch die symmetrische Verteilung der beiden Kabelanteile auf oberen und unteren Brückenweig:

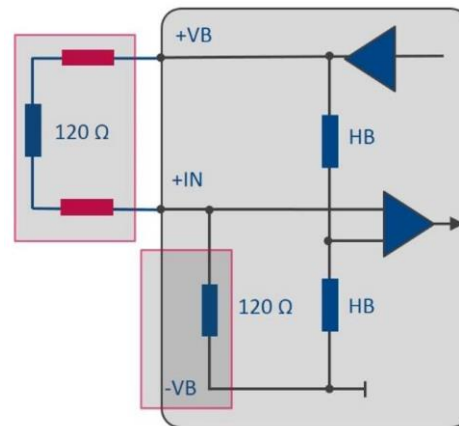


Abb.: Viertelbrücke 2-Leiter

#### 3-Leiter

- Symmetrische Verteilung der beiden Kabelwiderstände
- Offset und Temperaturdrift:
  - **kompensiert**
- Verstärkungs-Fehler: z.B. (10m Kabel)  $2.6 \Omega / 120 \Omega = 2\%$ 
  - **moderat und „zunächst“ un-kompensiert**

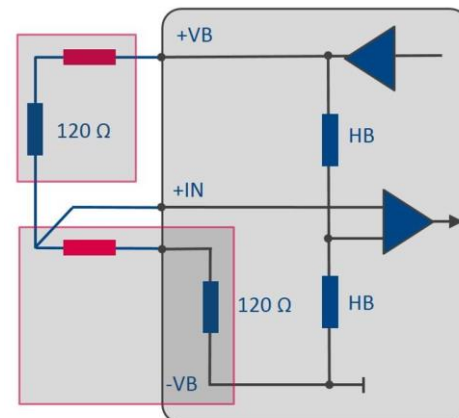


Abb.: Viertelbrücke 3-Leiter



Für „konventionelle“ Brückenverstärker bzw. einschlägige Mitbewerber gilt dabei: Der verbleibende „moderate“ Verstärkungsfehler, bestimmt durch das Verhältnis von Kabelwiderstand zu Brückenimpedanz, bleibt zunächst von der einfachen 3-Leiterschaltung nicht berücksichtigt, also unkompensiert! Er kann typischerweise korrigiert werden durch Verfahren wie die „Shunt-Kalibrierung“ und zwar insb. an der internen Viertelbrückenergänzung.

Dies ist jedoch bei imc Systemen NICHT nötig, dank einer erweiterten und dynamischen Korrektur.

### imc 3-Leiter Viertelbrückenschaltung (mit Verstärkungskorrektur)

**Während die Offsetstabilität der 3-Leiterschaltung Allgemeingut und Stand der Technik sind, bieten imc-Systeme als zusätzliches Alleinstellungsmerkmal eine volle Verstärkungskorrektur bei 3-Leiter Schaltung.**

Dazu erfasst ein separater Hilfsverstärker mit ADC den Spannungsabfall entlang des „mittleren“ Rückleiters. Da dieser die Hälfte der gesamten Speisungsdämpfung repräsentiert, wird er verdoppelt und zur rechnerischen Verstärkungskorrektur verwendet.

### Fazit

Diese dynamisch nachgeführte Kompensation macht also jegliche Shunt-Kalibrierung bei Viertelbrücke überflüssig und ist dieser sogar überlegen.

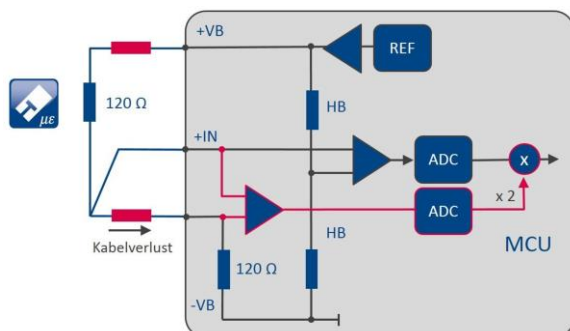


Abb.: imc 3-Leiter Viertelbrückenschaltung mit dynamischer Verstärkungskorrektur

### Shunt-Kalibrierung

Wenn nun aber, wie hier gezeigt, Verstärkungsfehler durch SENSE-Leitungen (Voll und Halbbrücke) und (speziell bei imc) selbst für die Viertelbrücke vollständig dynamisch erfasst und kompensiert werden, mithin also alle „äusseren Einflüsse“ – wozu ist dann überhaupt Shunt-Kalibrierung nötig?!

In der Tat hat die Shunt-Kalibrierung, also das Provozieren eines Sprungs von z.B. 0.5 mV/V, im Wesentlichen nur mehr den Sinn, eine Messkette qualitativ zu überprüfen, um sicherzustellen, dass nicht etwa Verdrahtungsfehler oder Kabelbrüche vorliegen.

Wollte man auf diese Weise etwa die „inneren Einflüsse“ korrigieren, also die Werkskalibrierung der Verstärkermodule prüfen oder weiter verbessern, die z.B. bei imc auf typ. 0.02 % kalibriert sind, so müssten etwa die hochohmigen Kalibrierwiderstände entsprechend präzise sein, was schnell schon durch Leckwiderstände im GΩ begrenzt wird. Man erkennt dass dies nicht nötig oder gar kontraproduktiv ist.

Damit blieben als Anwendungsfälle solche Sensorinstallationen, bei denen (z.B. aus Kostengründen) auf SENSE-Leitungen verzichtet wurde und trotzdem der Kabeleinfluss korrigiert werden soll. Wie im Folgenden gezeigt wird, sind dabei die noch gravierenderen Einflüsse der Kabelwiderstände am Messeingang zu beachten. Diese Effekte erfordern eigentlich eine separate Zuleitung für den Shunt-Widerstand – dass man sich die nicht leisten kann oder will, zeichnet aber gerade diesen Fall aus... Ein scheinbares Dilemma, das bei imc jedoch durch eine geschickte Lösung zu einem neuen Feature wird!

In welcher Form verfälschen Kabelwiderstände die Shunt-Kalibrierung?

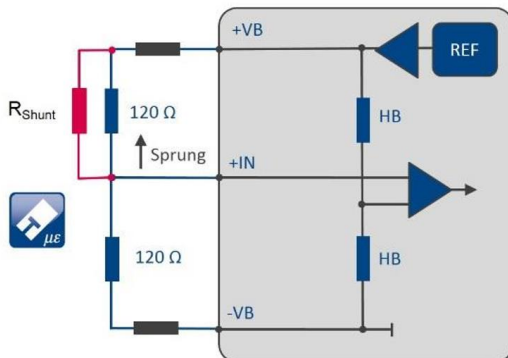


Auf verschiedene Arten:

Das Parallelschalten eines Shunts direkt an der DMS provoziert einen realen Signalsprung der **kleiner** ist als erwartet;

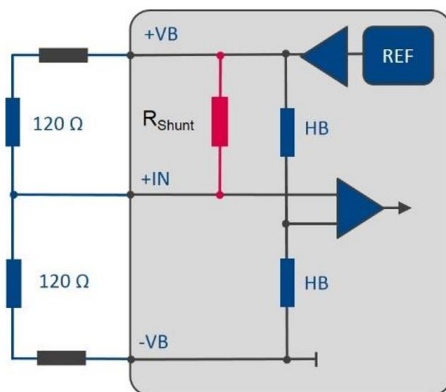
wegen der Dämpfung der Speisung am entfernten Sensor, bedingt durch die **Kabelwiderstände an +/- VB.**

Größenordnung: etwa  $R_{\text{Kabel}} / R_{\text{DMS}}$   
(Bsp.: ca. 1% bei  $1.3 \Omega / 120 \Omega$ )



Da nun aber der Shunt nicht lokal am entfernten Sensor angeschlossen ist, sondern intern im Verstärker geschaltet wird, liegt der Shunt parallel zur Summe aus DMS und Kabel.

Das Verhältnis „Brücke zu Shunt“ ist also größer als nominal. Damit wird der reale Sprung nicht etwa kleiner, sondern größer.



Eine weitere, noch größere und ebenso gegenläufige Verfälschung wird jedoch durch den **Kabelwiderstand am Messeingang +IN** verursacht.

Im Beispiel wird der  $0.5 \text{ mV/V}$  Sprung mit  $60 \text{ k}\Omega$  erreicht (analog zur Viertelbrücke: Sprung =  $1/4 * \text{Brücke/Shunt}$ )

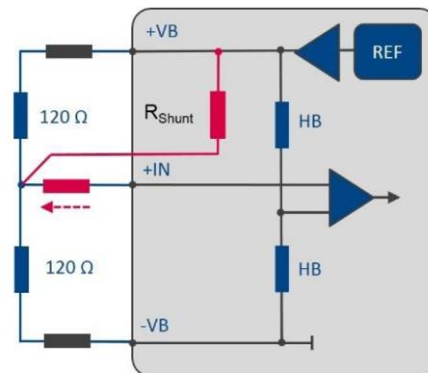
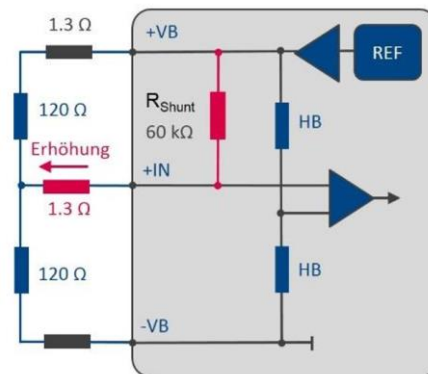
Zwar ist demgegenüber das Verhältnis Kabel/Shunt  $1.3 \Omega$  zu  $60 \text{ k}\Omega$ , also nur 22ppm.

Aber dieser Spannungsteiler wirkt mit der halben Brückenspannung:

$$VB/2 * 22\text{ppm} = 11\mu\text{V/V}$$

Also statt der erwarteten Dämpfung eine weitere Vergrößerung des erwarteten  $0.5 \text{ mV/V}$  Sprungs um ca. 2.2%

Dies ließe sich vermeiden, durch eine separate Zuleitung für den Kalibrierwiderstand. Doch diese zusätzliche Leitung steht in der Regel nicht zur Verfügung!



## Kabelkompensation ohne SENSE mittels Shunt-Kalibrierung

Fasst man diese Zusammenhänge jedoch in einem mathematischen Modell zusammen, welches (berechtigterweise) symmetrische Kabel voraussetzt, so kann man (auch ohne zusätzliche Leitung!) aus der Verfälschung des Kalibriersprungs den Kabelwiderstand und damit die nötige Verstärkungskorrektur errechnen. Diese Funktion, also eine entsprechende automatische Zweipunkt-Kalibrierung, ist ein **weiteres exklusives Feature** und Alleinstellungsmerkmal von imc Verstärkern!

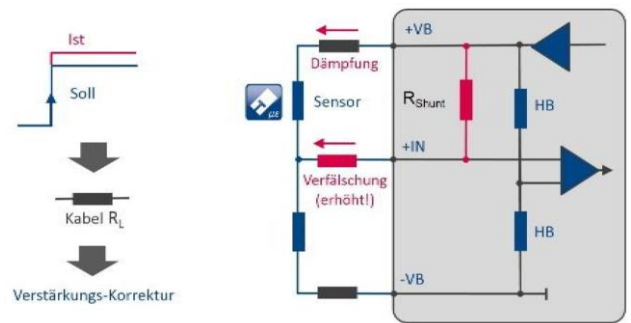


Abb. Kabelkompensation ohne SENSE, mittels Shunt-Kalibrierung

Autor: Dipl.-Ing. Martin Riedel, imc

## Weitere Informationen erhalten Sie unter:

### imc Test & Measurement GmbH

Voltastr. 5  
D-13355 Berlin

Telefon: +49 (0)30-46 7090-0  
Fax: +49 (0)30-46 31 576  
E-Mail: [hotline@imc-tm.de](mailto:hotline@imc-tm.de)  
Internet: <http://www.imc-tm.de>

Die imc Test & Measurement GmbH ist Hersteller und Lösungsanbieter von produktiven Mess- und Prüfsystemen für Forschung, Entwicklung, Service und Fertigung. Darüber hinaus konzipiert und produziert imc schlüsselfertige Elektromotorenprüfstände. Passgenaue Sensor- und Telemetriesysteme ergänzen unser Produktportfolio.

Unsere Anwender kommen aus den Bereichen Fahrzeugtechnik, Maschinenbau, Bahn, Luftfahrt und Energie. Sie nutzen die imc-Messgeräte, Softwarelösungen und Prüfstände, um Prototypen zu validieren, Produkte zu optimieren, Prozesse zu überwachen und Erkenntnisse aus Messdaten zu gewinnen. Rund um die imc Geräte steht dafür ein umfassendes Dienstleistungsspektrum zur Verfü-

gung, das von der Beratung bis zur kompletten Prüfstandsautomatisierung reicht. Auf diese Weise verfolgen wir konsequent das imc Leistungsversprechen „produktiv messen“.

National wie international unterstützen wir unsere Kunden und Anwender mit einem starken Kompetenz- und Vertriebsnetzwerk.

Wenn Sie mehr über die imc Produkte und Dienstleistungen in Ihrem Land erfahren wollen oder selbst Distributor werden möchten, finden Sie auf unserer Webseite alle Informationen zum imc Partnernetzwerk:

<http://www.imc-tm.de/partner/>



#### Nutzungshinweis:

Dieses Dokument ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Dieser Bericht darf ohne Genehmigung weder bearbeitet, abgewandelt noch in anderer Weise verändert werden. Ausdrücklich gestattet ist das Veröffentlichung und Vervielfältigen des Dokuments. Bei Veröffentlichung bitten wir darum, dass der Name des Autors, des Unternehmens und eine Verlinkung zur Homepage [www.imc-tm.de](http://www.imc-tm.de) genannt werden. Trotz inhaltlicher sorgfältiger Ausarbeitung, kann dieser Bericht Fehler enthalten. Sollten Ihnen unzutreffende Informationen auffallen, bitten wir um einen entsprechenden Hinweis an: [marketing@imc-tm.de](mailto:marketing@imc-tm.de). Eine Haftung für die Richtigkeit der Informationen wird grundsätzlich ausgeschlossen.