

# Thermodynamische Einflüsse ausschließen

## Druckkalibrierungen bei unterschiedlichen Temperaturen

Umwelteinflüsse wie Temperaturwechsel, klimatische Einflüsse und Prozessparameter begleiten Produkte während des gesamten Lebenszyklus. Sie wirken sich nicht nur auf die zugesagten Spezifikationen aus, sondern auch auf die Lebensdauer. Deshalb müssen qualitätsrelevante Tests mit unterschiedlichen Einflussparametern durchgeführt werden.

Thomas Wassiltschenko

Weil sich Umwelteinflüsse auf die gesamte Lebensdauer eines Produkts auswirken, müssen qualitätsrelevante Tests mit unterschiedlichen Einflussparametern durchgeführt werden. Bezüglich diverser Fertigungsprozesse und qualitätsrelevanter Bereiche stellen sich folgende Fragen:

- Wie ist das messtechnische Verhalten von Drucksensoren und welche Relevanz haben Druckmesswerte bei variablen Umgebungstemperaturen?
- Spielt die Temperaturkompensation eines Sensorelements eine wesentliche Rolle und ist sie ausreichend, um effektive Temperaturschwankungen während des Messprozesses abzubilden?
- Kann ich mich auf die Druckmesswerte

des Sensors unter realen Einsatzbedingungen in einem Temperaturbereich zwischen -30°C und 120°C verlassen?

Spezialisten haben einerseits das notwendige Equipment und andererseits das ebenso nötige Fachwissen, um verlässliche Kalibrierprozesse und die damit verbundenen Messwertanalysen zu gewährleisten.

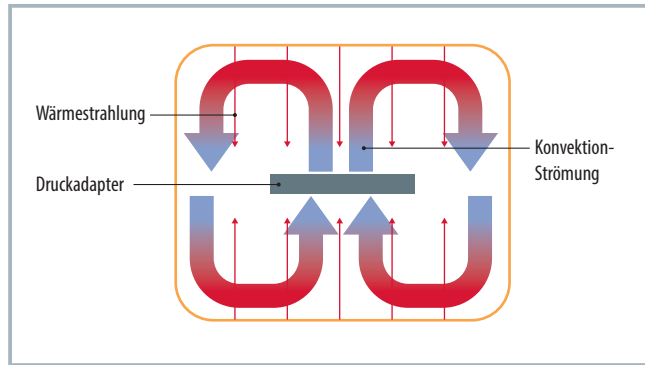
### Anwendungsgebiete

Bei industriellen Anwendungen ist der Temperatureinfluss bei Druckmessungen ein wesentlicher Bestandteil für die Genauigkeit und Relevanz von messtechnischen Aussagen. Das Anwendungsgebiet ist dabei sehr groß und vielfältig.

### Ermittlung des Kompressionsdruckes im Motorzylinder

Der Kompressionsdruck im Motorzylinder ist beim Start des Motors kalt und erwärmt sich durch den Verbrennungsprozess im Zylinder und der Bewegung des Kolbens bis zur Endtemperatur stetig. Eine präzise Druckmessung gibt dabei einen wesentlichen Aufschluss über den Verbrennungsprozess des Kraftstoffs und die Qualität des im Motorblock verarbeiteten Materials. Vor allem in der heutigen Zeit, in der verstärkt nach alternativen Antriebsmöglichkeiten geforscht wird, ist der Einsatz von Brennstoffzellen als Energiequelle immer wichtiger. Auch hier sind im reaktiven Teil einer Brennstoffzelle einerseits Temperatu- >>>

Bild 1. Prozessinnenraum mit Konvektionsströmung und Wärmestrahlung während der Aufwärmphase. Quelle: Testo Industrial Services GmbH © Hanser



ren bis zu 60°C bei Druckunterschieden zwischen Kathoden- und Anodenseite bis zu 5 bar zu erwarten, je nachdem welcher Elektrolyt verwendet wird. Die dabei notwendigen präzisen Druckmessungen sind zur eindeutigen Ermittlung des Wirkungsgrades und den sicheren Betrieb einer Brennstoffzelle essenziell.

### Betrieb von Drucksensoren in Wärmekraftwerken

Auch hier werden hohe Drücke bei hohen Temperaturen gemessen. Diese Messwerte sind ebenfalls für den Wirkungsgrad der Kraft-Wärme-Kopplung und nicht zuletzt für die Sicherheit des Kraftwerk-Betriebs überaus wichtig, wobei es sich in diesem Beispiel um Druckmessbereiche bis 300 bar bei bis zu 800°C Betriebstemperatur handelt. Für diese und weitere Anwendungsgebiete liefert die Druckkalibrierung bei unterschiedlichen Temperaturen, für die verwendeten Drucksensoren praxisbezogene Kalibrierergebnisse.

### Grundlagen: Wärmetransport und thermisches Gleichgewicht

Der Wärmetransport in Gasen wird als Konvektion bezeichnet. Dabei unterscheiden wir einerseits freie Konvektion, sofern sich Wärme durch natürliche systematische Einflüsse ausbreitet und andererseits erzwungene Konvektion, wenn der Wärmetransport durch zusätzliche, nicht natürliche Einflüsse erfolgt. In beiden Fällen erfolgt die Wärmeübertragung durch Luftströmung aufgrund des Dichtegradienten zwischen warmer und kalter Luft (warme Luft steigt auf, kältere Luft strömt nach).

Für das Kalibrieresetup werden die zu kalibrierenden Drucktransmitter in einen Klimaschrank adaptiert. Um eine Aussage zu treffen wie sich effektiv die Temperatur im Prozessraum verteilt, ist einerseits die Konvektion und andererseits die Wärmestrahlung beim Vorgang des Aufwärmens zu betrachten. Dadurch soll sichergestellt werden, dass die Drucktransmitter beim anschließenden Druck-Kalibrierablauf

homogen durchtemperiert worden sind. Das Kalibrier-Setup besteht aus:

- Klimaschrank mit einer Nennleistung von 1,5 kW
- Adapterplatte aus Edelstahl zur Adaptierung von bis zu 20 Messumformern
- Pneumatisches Druckregelsystem zur Steuerung der verschiedenen Stufen
- Testo Datenlogger zur Messung der Temperatur im Innenraum mit Pt100 Temperaturfühler
- Netzteil zur Spannungsversorgung
- Digitales Datenerfassungssystem zur Aufnahme der Output-Signale der zu kalibrierenden Drucktransmitter

Die gesamte Steuerung aber auch die Datenaufnahme und Datenauswertung erfolgt über eine eigens entwickelte Software, die für die Kalibrierung zum Einsatz kommt. Das ganze System ist sowohl mechanisch als auch digital verbunden, um die Automatisierbarkeit der Kalibrierabläufe zu gewährleisten.

Aufgrund der erzwungenen Konvektion durch Verwirbelung von Luftmassen mit Hilfe von im Prozessraum wirkender Umwälzventilatoren, wird sich kein zu erwartender linearer Verlauf der Temperaturverteilung beim Prozess des Erwärms ergeben. Der genaue Temperaturverlauf beim Erwärmungsvorgang hängt von der Wärmeleistung, der Regelleistung und nicht zuletzt der Dimension des Prozessinnenraumes ab und wird mit Hilfe von Messdaten ermittelt.

Die digitale Steuerung regelt dabei die

**QZ-online.de News**



**Nichts mehr verpassen!**

Mit unserem kostenlosen Info-Dienst:  
[www.qz-online.de/newsletter](http://www.qz-online.de/newsletter)



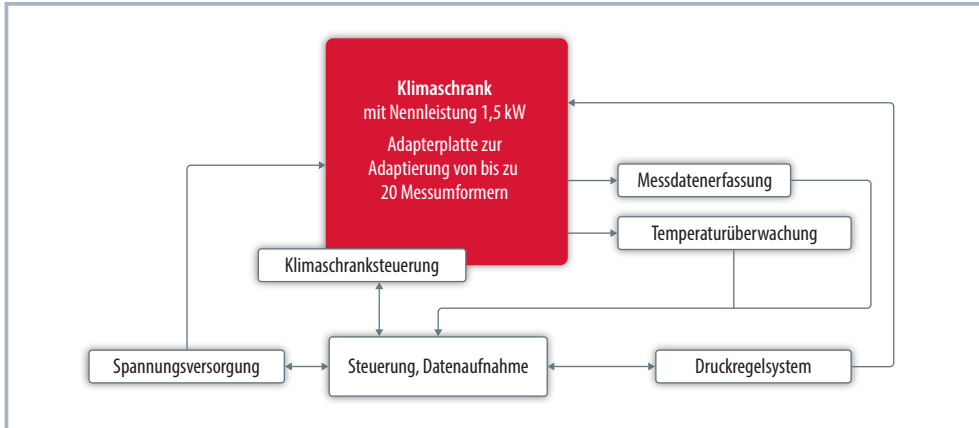


Bild 2. Schematischer Aufbau des Kalibrieretups zur Kalibrierung von Drucktransmitter im Klimaschrank.

Quelle: Testo Industrial Services GmbH © Hanser

Nennleistung des Klimaschranks sobald die Ist-Temperatur einen Bereich  $\pm 0,5$  K der Soll-Temperatur erreicht. Die damit erreichte Umgebungstemperatur wird dann für mindestens 60 Minuten gehalten, um die homogene Temperierung der zu kalibrierenden Drucktransmitter zu gewährleisten. Im Anschluss kann mit dem eigentlichen Druck-Kalibriervorgang begonnen werden.

### Der Druck-Kalibriervorgang

Der zu betrachtende Kalibrierablauf ist angelehnt an die Normkonforme Kalibrierung gemäß DIN EN ISO/IEC 17025:2018 nach Richtlinie DKD-R 6-1 2014 Ablauf C. Dabei handelt es sich um eine Vergleichsmessung bei der, die Messwerte des Drucksensors direkt mit einem genauen Referenznormal verglichen werden.

#### Vorbereitungen für den Kalibrierablauf:

- Allgemeine Kalibrierfähigkeit des Kalibriersystems überprüfen und sicherstellen.
- Diese beinhaltet eine Prüfung auf Sauberkeit

aller im Kalibriersystem vorhandenen Komponenten.

- Elektrische Funktionsfähigkeit des Sensorsignals überprüfen.
- Prüfung auf Dichtheit des Kalibriersystems durch einschließen eines definierten Volumens.

Beim Kalibrierablauf C werden mindestens fünf Vergleichsmesspunkte homogen über den gesamten Messbereich vermessen. Der Messablauf besteht aus einer aufsteigenden und einer absteigenden Messreihe, um in der Datenauswertung zusätzlich das Hysterese-Verhalten des Sensors darzustellen und auszuwerten. Die im Kalibrierablauf anzufahrenden Druckstufen werden nach Stabilisierung des Messwertes mindestens 30 Sekunden gehalten bevor sie zur Auswertung dokumentiert werden. Der Messbereichsendwert wird dann nach erneuter Wartezeit von 2 Minuten ein weiteres Mal zur Auswertung dokumentiert. Die Dokumentation der absteigenden Messreihe erfolgt analog zur aufsteigenden Messreihe.

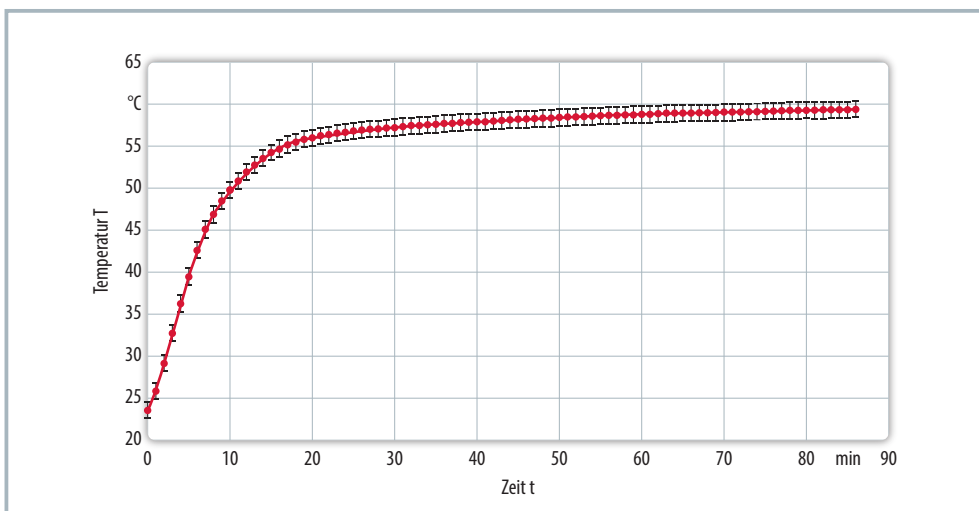


Bild 3. Realer Temperaturverlauf beim Erwärmungsprozess zwischen 23°C und 60°C. Quelle: Testo Industrial Services GmbH © Hanser

COMPACT.  
CONSISTENT.  
COMPETITIVE.

[kapp-niles.com](http://kapp-niles.com)



**KAPP NILES**

precision for motion

### Messtechnische Einflüsse und Messunsicherheit

Die Grundlage der Messunsicherheitsberechnungen bildet das „GUM“ (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement). Grundsätzlich gilt, dass die Gesamtheit der Unsicherheitseinflüsse niemals bis ins kleinste Detail gefunden, beschrieben und berücksichtigt werden kann. In dieser Hinsicht sind ebenfalls geschätzte Beiträge und sinnvolles mathematisches Aufrunden an geeigneten Stellen durchaus er- und gewünscht. Das soll sozusagen die Sicherheit bei der Bestimmung der Unsicherheit erhöhen. Die folgende Betrachtung bezieht sich auf eine statistische Herangehensweise nach Typ B bei der Bestimmung von Messunsicherheiten.

Die daraus resultierende Modellgleichung zur Ermittlung der Abweichungen bei Messumformern vom Mittelwert ist (Mit S: Eingangsgröße; X: Ausgangsgröße; P: Druck-Bezugswert; K<sub>i</sub>: Einflussfaktoren):

$$S_{Mittel} = \frac{X_{Mittel}}{P_{Normal}} \prod_i K_i$$

### Unsicherheitseinfluss des Referenzgerätes

Die Messtechnischen Einflüsse beginnen bei der Wahl eines geeigneten Referenznormals. Um die erforderlichen Kriterien von Genauigkeit und Druckregelung zu erfüllen, fällt die Wahl auf ein automatisierungsfähiges Elektro-Mechanisches Druck-

referenzgerät. Das Referenzgerät unterliegt hohen Qualitätsansprüchen und muss in geeigneter Regelmäßigkeit nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 geprüft beziehungsweise kalibriert werden.

Die Kalibrierergebnisse geben dabei einen Aufschluss über Messabweichungen im Vergleich zu den vorangegangenen Kalibrierergebnissen. Dies wird metrologisch als Langzeitstabilität beziehungsweise Drift bezeichnet.

Die wesentlichen Unsicherheitseinflüsse des Referenznormals  $U_{Ref}$  sind demnach:

- Unsicherheit der Genauigkeit des Referenznormals  $u_{refKal}$
- Unsicherheit der Stabilität der Messwertoszillation  $u_{refStab}$
- Unsicherheit der Langzeitstabilität  $u_{Ref}$

Mit Berücksichtigung der jeweiligen Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen, ergibt sich der Unsicherheitseinfluss der Referenz:

$$U_{ref} = \left(\frac{u_{refKal}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{u_{refStab}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{u_{RefDrift}}{2\sqrt{3}}\right)^2$$

### Unsicherheitseinfluss des Kalibrierverfahrens

Jedes Kalibrierverfahren birgt Unsicherheiten bedingt durch Umgebungseinflüsse, systematische und mathematische Komponenten aber auch nicht zuletzt menschliches Verhalten. Die Unterschiede zwischen aktiven- und ratiometrischen Messumformern machen sich vor allem bei der Bestimmung von Übertragungskoeffizienten bemerkbar.

Die wesentlichen Unsicherheitseinflüsse des Kalibrierverfahrens  $U_{Verf}$  sind demnach:

- Unsicherheit des Temperaturunterschiedes/Gradient  $u_{Tem}$
- Unsicherheit der Speisespannung  $u_V$
- Unsicherheit des Messsignals  $u_{Sig}$

Somit kann der Unsicherheitsbeitrag des Kalibrierverfahrens bestimmt werden:

$$U_{Verf} = \left(\frac{u_{Temp}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{u_V}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{u_{Sig}}{2\sqrt{3}}\right)^2$$

### Unsicherheitseinfluss des Kalibriergegenstandes

Da es sich bei dem genannten Kalibrierablauf C gemäß DKD-R 6-1 2014 um eine auf- und absteigende Messreihe handelt, ist der berechnete Mittelwert das zu berücksichti-

gende Vergleichskriterium gegenüber den Referenzmesswerten bei der Kalibrierbewertung.

Die wesentlichen Unsicherheitseinflüsse des Kalibriergegenstandes  $U_{KG}$  sind demnach:

- Unsicherheit der Nullpunktabweichung  $u_{NP}$
- Unsicherheit der Hysterese  $u_{Hys}$
- Unsicherheit der Stabilität des Output-Signals  $u_{stabKG}$

Mit dem Gesamt-Unsicherheitseinfluss:

$$U_{KG} = \left(\frac{u_{NP}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{u_{Hys}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{u_{stabKG}}{2\sqrt{3}}\right)^2$$

Die durch diese Einflüsse hervorgerufene Messunsicherheit kann dann gemäß „GUM“ mit  $k = 2$  bei einer Überdeckungswahrscheinlichkeit >95% pro Messpunkt berechnet werden

$$U_{Gesamt} = 2 \cdot \sqrt{U_{ref}^2 + U_{Verf}^2 + U_{KG}^2}$$

### Fazit

Um Realbedingungen im Messprozess abzubilden, ist ein nicht unerheblicher Aufwand an Messequipment und Datenauswertung nötig damit sichergestellt werden kann, dass die gewünschten Messergebnisse kein falsches Bild in einem produktiven Qualitätsprozess liefern. Temperatur und Druck sind zwei unmittelbar miteinander verbundene Messgrößen und es muss ausgeschlossen werden, dass sich beide Messgrößen in einem Messprozess-thermodynamisch negativ beeinflussen.

Aus diesem Grund kann die Kalibrierung von Drucksensoren bei unterschiedlichen Temperaturen ein unmittelbares Bild liefern, wie sich die Messwerte der Drucksensoren in einem festgelegten Temperaturintervall voneinander unterscheiden. Aufgrund der hohen Anforderungen von Kunden, Produkten und übergeordneter Richtlinien, können qualitativ hochwertige Lösungen in der Messtechnik, einen entscheidenden Vorteil zur Sicherstellung von Qualitätsprozessen, Fertigungsprozessen und Audits darstellen. ■

## INFORMATION & SERVICE

### AUTOR

Dipl. Phys. rer. nat. Thomas Wassiltschenko ist Technischer Leiter Mechanik- Druck bei Testo Industrial Services in Kirchzarten.

### QUELLE

- DKD-R 6-1 Version 03/2014, Revision 3, Kalibrierung von Druckmessgeräten, S. 17ff, S 25ff

### UNTERNEHMEN

Die Testo Industrial Services GmbH ist einer der führenden Anbieter von messtechnischen Dienstleistungen für Kalibrierung und GxP-Services in Deutschland.

### KONTAKT

Testo Industrial Services GmbH  
T +49 7661 90901-0  
www.testotis.de  
Control Halle 3, Stand 3515