

# Physikalisch- Technische Bundesanstalt



---

## Richtlinie      Kalibrierung von Druckmessgeräten DKD-R 6-1

---

Ausgabe 03/2014, Revision 3

<https://doi.org/10.7795/550.20201221>



	<b>Kalibrierung von Druckmessgeräten</b> <a href="https://doi.org/10.7795/550.20201221">https://doi.org/10.7795/550.20201221</a>	DKD-R 6-1	
		Version:	03/2014
		Revision:	3
		Seite:	2 / 53

## Deutscher Kalibrierdienst (DKD)

Im DKD sind Kalibrierlaboratorien von Industrieunternehmen, Forschungsinstituten, technischen Behörden, Überwachungs- und Prüfinstitutionen seit der Gründung 1977 zusammengeschlossen. Am 03. Mai 2011 erfolgte die Neugründung des DKD als *technisches Gremium* der PTB und der akkreditierten Laboratorien.

Dieses Gremium trägt die Bezeichnung Deutscher Kalibrierdienst (DKD) und steht unter der Leitung der PTB. Die vom DKD erarbeiteten Richtlinien und Leitfäden stellen den Stand der Technik auf dem jeweiligen technischen Fachgebiet dar und stehen der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS) für die Akkreditierung von Kalibrierlaboratorien zur Verfügung.

Die akkreditierten Kalibrierlaboratorien werden von der DAkkS als Rechtsnachfolgerin des DKD akkreditiert und überwacht. Sie führen Kalibrierungen von Messgeräten und Maßverkörperungen für die bei der Akkreditierung festgelegten Messgrößen und Messbereiche durch. Die von ihnen ausgestellten Kalibrierscheine sind ein Nachweis für die Rückführung auf nationale Normale, wie sie von der Normenfamilie DIN EN ISO 9000 und der DIN EN ISO/IEC 17025 gefordert wird.

### Kontakt:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)

DKD-Geschäftsstelle

Bundesallee 100 38116 Braunschweig

Postfach 33 45 38023 Braunschweig

Telefon Sekretariat: 0531 5 92-8021

Internet: [www.dkd.eu](http://www.dkd.eu)

	<b>Kalibrierung von Druckmessgeräten</b> <a href="https://doi.org/10.7795/550.20201221">https://doi.org/10.7795/550.20201221</a>	DKD-R 6-1	
		Version:	03/2014
		Revision:	3
		Seite:	3 / 53

*Zitiervorschlag für die Quellenangabe:*

*Richtlinie DKD-R 6-1 Kalibrierung von Druckmessgeräten, Ausgabe 03/2014, Revision 3, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin.*

*DOI: 10.7795/550.20201221*

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt und unterliegt der Creative Commons Nutzerlizenz CC by-nc-nd 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>). In diesem Zusammenhang bedeutet „nicht-kommerziell“ (NC), dass das Werk nicht zum Zwecke der Einnahmenerzielung verbreitet oder öffentlich zugänglich gemacht werden darf. Eine Nutzung seiner Inhalte für die gewerbliche Verwendung in Laboratorien ist ausdrücklich erlaubt.



Autoren: Mitglieder des Fachausschusses *Druck und Vakuum* des DKD

Herausgegeben von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) für den Deutschen Kalibrierdienst (DKD) als Ergebnis der Zusammenarbeit der PTB mit dem Fachausschuss *Druck und Vakuum* des DKD.

	<b>Kalibrierung von Druckmessgeräten</b> <a href="https://doi.org/10.7795/550.20201221">https://doi.org/10.7795/550.20201221</a>	DKD-R 6-1	
		Version:	03/2014
		Revision:	3
		Seite:	4 / 53

## Vorwort

DKD-Richtlinien sind Anwendungsdokumente zu den Anforderungen der DIN EN ISO/IEC 17025. In den Richtlinien werden technische, verfahrensbedingte und organisatorische Abläufe beschrieben, die den akkreditierten Kalibrierlaboratorien als Vorbild zur Festlegung interner Verfahren und Regelungen dienen. DKD-Richtlinien können zum Bestandteil von Qualitätsmanagementhandbüchern der Kalibrierlaboratorien werden. Durch die Umsetzung der Richtlinien wird die Gleichbehandlung der zu kalibrierenden Geräte in den verschiedenen Kalibrierlaboratorien gefördert und die Kontinuität und Überprüfbarkeit der Arbeit der Kalibrierlaboratorien verbessert. Außerdem kann durch die Umsetzung der Richtlinien der Stand der Technik auf dem jeweiligen Gebiet in die Laborpraxis Eingang finden.

Die DKD-Richtlinien sollen nicht die Weiterentwicklung von Kalibrierverfahren und -abläufen behindern. Abweichungen von Richtlinien und neue Verfahren sind im Einvernehmen mit der Akkreditierungsstelle zulässig, wenn fachliche Gründe dafür sprechen.

Kalibrierungen der akkreditierten Laboratorien geben dem Anwender Sicherheit für die Verlässlichkeit von Messergebnissen, erhöhen das Vertrauen der Kunden und die Wettbewerbsfähigkeit auf dem nationalen und internationalen Markt und dienen als messtechnische Grundlage für die Mess- und Prüfmittelüberwachung im Rahmen von Qualitätssicherungsmaßnahmen.

Die vorliegende Richtlinie wurde im Rahmen des Fachausschusses *Druck und Vakuum* erstellt und vom Vorstand des DKD genehmigt.

Die Revision 3 enthält geringfügige Korrekturen in den Beispielen sowie redaktionelle Anpassungen zur Präzisierung und besseren Verständlichkeit.

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
1 Zweck und Geltungsbereich.....	7
2 Symbole und Benennungen.....	7
2.1 Variable.....	7
2.2 Indizes.....	8
2.3 Spezifikationsbezeichnungen.....	8
3 Bezugs- und Gebrauchsnormale.....	9
4 Kalibriergegenstand.....	10
5 Kalibrierfähigkeit.....	11
6 Umgebungsbedingungen.....	11
7 Kalibrierverfahren.....	12
8 Messunsicherheit.....	15
8.1 Definition VIM 2.26 [9].....	15
8.2 Vorgehensweise.....	15
8.2.1 Modell der Messung VIM 2.48 [9].....	15
8.2.2 Summe-/Differenzmodell.....	16
8.2.3 Produkt-/Quotientmodell.....	17
8.2.4 Eingangs-/Einflussgrößen.....	17
8.2.5 Mögliche Einflussgrößen, Beispiel.....	19
8.3 Kalibrierung von Federmanometern.....	20
8.3.1 Modell der Messung.....	20
8.3.2 Messunsicherheitsbilanz.....	22
8.3.3 Belastungsstufenbezogene Messunsicherheitsbilanz.....	23
8.3.4 Einwertangabe.....	23
8.4 Kalibrierung von elektrischen Druckmessgeräten.....	24
8.5 Kalibrierung von Druckaufnehmern und Druckmessumformern mit elektrischem Ausgang.....	25
8.5.1 Modell der Messung.....	25
8.5.2 Messunsicherheitsbilanz.....	27
8.5.3 Belastungsstufenbezogene Messunsicherheitsbilanz.....	28
8.5.4 Einwertangabe.....	28
8.6 Einflussgrößen des Kalibriergegenstandes für die Messunsicherheitsbilanz.....	29
8.6.1 Auflösung $r$ .....	29
8.6.1.1 Analoge Anzeigeeinrichtungen.....	29
8.6.1.2 Digitale Anzeigeeinrichtungen.....	29
8.6.1.3 Anzeigeschwankung.....	29

8.6.2	Nullpunktabweichung $f_0$ .....	29
8.6.3	Wiederholpräzision $b'$ .....	30
8.6.4	Vergleichpräzision $b$ .....	30
8.6.5	Umkehrspanne $h$ .....	30
9	Auswertung der Messergebnisse und Angaben im Kalibrierschein .....	31
9.1	Ermittlung weiterer Kenngrößen.....	32
9.1.1	Mittelwerte $\bar{x}$ .....	32
9.1.2	Abweichungsspanne $U'$ .....	32
9.1.3	Konformität .....	32
9.2	Visualisierung des Kalibrierergebnisses.....	32
9.2.1	Federmanometer, elektrisches Druckmessgerät .....	33
9.2.2	Druckmessumformer mit elektrischem Ausgang .....	35
9.3	Grenzwerte für Messunsicherheitsangaben .....	35
10	Ergänzende Regeln und Normen.....	36
Anhang A	Ermittlung der Messunsicherheit, die den Druckwerten des Kolbenmanometers unter Anwendungsbedingungen beizuordnen ist .....	39
Anhang B	Beispiel Messunsicherheitsbilanz für die Kalibrierung eines Federmanometers .	41
Anhang C	Beispiel Messunsicherheitsbilanz für die Kalibrierung eines digitalen elektrischen Druckmessgerätes .....	44
Anhang D	Beispiel Messunsicherheitsbilanz für die Kalibrierung eines Druckmessumformers mit elektrischem Ausgang .....	47
Anhang E (informativ)	Messunsicherheiten von Bezugs- und Gebrauchs- normalen .....	51
Anhang F	Rekalibrierfristen (Empfehlung) .....	52

## 1 Zweck und Geltungsbereich

Diese Richtlinie dient dazu, Mindestanforderungen an das Kalibrierverfahren und an die Messunsicherheitsabschätzung bei der Kalibrierung von Druckmessgeräten festzulegen. Sie gilt für Federmanometer, elektrische Druckmessgeräte und Druckmessumformer mit elektrischem Ausgang für Absolutdruck, Differenzdruck und Überdruck mit negativen und positiven Werten.

## 2 Symbole und Benennungen

Die Symbole werden themenbezogen, d.h. in der Regel in der Reihenfolge ihres Auftretens im Text, aufgeführt.

### 2.1 Variable

M1 ... M6	Messreihe
EW	(Kalibrierbereichs-)Endwert
$Y$	Ausgangsgröße des Modells der Messung VIM 2.51 [9]
$X$	Eingangsgröße des Modells der Messung VIM 2.50 [9]
$\delta X$	Einflussgröße VIM 2.52 [9]
$K$	Korrektionsfaktor
$x$	Bester Schätzwert der Eingangsgröße
$y$	Bester Schätzwert der Ausgangsgröße
$c$	Empfindlichkeitskoeffizient
$k$	Erweiterungsfaktor VIM 2.38 [9]
$a$	Halbweite einer Verteilung
$g_{x_i}(\xi_i)$	Wahrscheinlichkeit
$E[\dots]$	Erwartungswert
$u$	Standardmessunsicherheit VIM 2.30 [9]
$U$	Erweiterte Messunsicherheit VIM 2.35 [9]
$w$	Relative Standardmessunsicherheit VIM 2.32 [9]
$W$	Relative erweiterte Messunsicherheit
$p$	Druck
$\Delta p$	Systematische Messabweichung der Größe Druck
$\delta p$	Einflussgröße in der Dimension Druck
$S$	Übertragungskoeffizient (des Druckaufnehmers)
$\Delta S$	Systematische Abweichung des Übertragungskoeffizienten von der Einwertangabe
$U\dots$	Spannung mit verschiedenen Indizes (Abschnitte 8.2.3, 8.5.1, 8.5.2 und Anhang D)
$G$	Verstärkungsfaktor
$r$	Auflösung
$f_0$	Nullpunktabweichung
$b'$	Wiederholpräzision VIM 2.21 [9]
$b$	Vergleichpräzision VIM 2.23 [9]
$h$	Umkehrspanne

$U'$	Abweichungsspanne
$W'$	Relative Abweichungsspanne
$S'$	Steigung einer linearen Ausgleichsfunktion
$p_e$	Überdruck
$m_i$	Masse des Belastungskörpers $i$
$g$	Fallbeschleunigung
$\rho$	Dichte
$A_0$	Wirksame Querschnittsfläche des Kolben-Zylinder-Systems bei dem Druck gleich null und der Referenztemperatur $t_0$
$\lambda$	Deformationskoeffizient des Kolben-Zylinder-Systems
$\alpha$	Thermischer Längenausdehnungskoeffizient des Kolbens
$\beta$	Thermischer Längenausdehnungskoeffizient des Zylinders
$\alpha + \beta$	Thermischer Flächenausdehnungskoeffizient des Kolben-Zylinder-Systems
$t$	Temperatur des Kolben-Zylinder-Systems
$\Delta h$	Höhendifferenz der Bezugsebenen

## 2.2 Indizes

Sp	Speise-/Versorgungsspannung
$j$	Nummer des Messpunktes
$l$	Anzahl der Messreihen
$m$	Nummer der Messreihe
$n$	Anzahl der Messzyklen
a	Luft
abs	Druckart Absolutdruck bzgl. der Variablen $p$
amb	Umgebung
e	Druckart Überdruck bzgl. der Variablen $p$
Fl	Druckmedium
$m_i$	Belastungskörper/-masse $i$
Std	Standardbedingungen
korr	Korrektur (des Messwertes)

## 2.3 Spezifikationsbezeichnungen

v. E.	vom Messbereichsendwert
v. M.	vom Messwert
v. S.	von der Messspanne

	<b>Kalibrierung von Druckmessgeräten</b> <a href="https://doi.org/10.7795/550.20201221">https://doi.org/10.7795/550.20201221</a>	DKD-R 6-1	
		Version:	03/2014
		Revision:	3
		Seite:	9 / 53

### 3 Bezugs- und Gebrauchsnormale

Die Kalibrierung erfolgt durch direkten Vergleich der Messwerte des Kalibriergegenstandes mit denen des Bezugs- oder Gebrauchsnormals, das direkt oder indirekt auf ein nationales Normal rückgeführt ist.

Als Bezugsnormale werden langzeitstabile Druckmessgeräte wie z. B. Kolbenmanometer und Flüssigkeitsmanometer oder weniger langzeitstabile elektrische Druckmessgeräte verwendet (vergleiche Anhang F, S. 52). Sie werden in regelmäßigen Abständen kalibriert und mit einem Kalibrierschein versehen, in dem die erweiterte Messunsicherheit unter den Standardbedingungen (u. a. Norm- bzw. lokale Fallbeschleunigung, 20 °C, 1 bar) ausgewiesen ist. Das Bezugsnormal unterliegt der Überwachung und Dokumentation durch das Laboratorium. Bei einer Kalibrierung außerhalb der Standardbedingungen sind alle maßgeblichen Korrekturen in der Druckberechnung durchzuführen.

Als Beiträge in der Messunsicherheitsbilanz<sup>1</sup> sind die Langzeitstabilität des Bezugsnormals sowie alle relevanten Eingangs- und Einflussgrößen einzubeziehen. Dabei sind auch diejenigen Größen einzuschließen, die in die Korrekturen einfließen.

Bei anzeigenden Druckmessgeräten, die als Normal verwendet werden, ist die Auflösung bei der Berechnung der Messunsicherheit ein weiteres Mal zu berücksichtigen.

Die in dem Qualitätsmanagementhandbuch des Laboratoriums dokumentierten Gebrauchsnormale werden in einem akkreditierten Kalibrierlaboratorium kalibriert und mit einem Kalibrierschein versehen, in dem die erweiterte Messunsicherheit zum Zeitpunkt der Kalibrierung ausgewiesen ist. Das Laboratorium ist für die Überwachung seiner Gebrauchsnormale zuständig. Die Gebrauchsnormale können von der Bauart her sehr unterschiedlich sein.

#### **Empfehlung:**

Die Messunsicherheit, die den Messwerten des Bezugs- oder Gebrauchsnormals beigeordnet ist, sollte 1/3 der angestrebten Messunsicherheit<sup>2</sup>, die den Messwerten des Kalibriergegenstands voraussichtlich beigeordnet wird, nicht überschreiten.

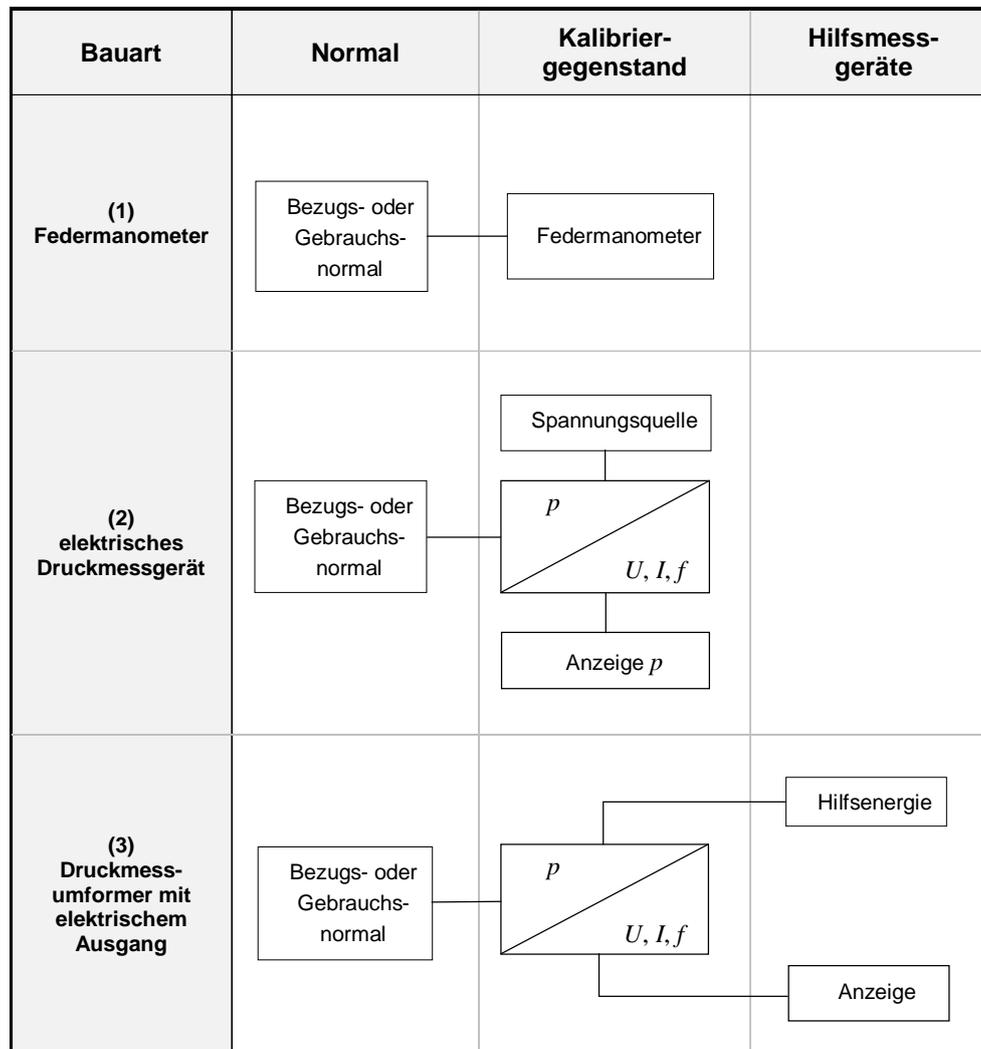
<sup>1</sup> Die Bezeichnung „Messunsicherheitsbudget“ wird weiterhin akzeptiert.

<sup>2</sup> Die angestrebte Messunsicherheit ist diejenige Messunsicherheit, die bei festgelegtem Kalibrieraufwand (Messunsicherheit der Werte des Normals, Anzahl der Messreihen, etc.) erreichbar ist. Sie kann gleich oder größer als die kleinste angebbare Messunsicherheit sein.

## 4 Kalibriergegenstand

Kalibriergegenstände sind Druckmessgeräte der in Abbildung 1 dargestellten drei Bauarten.

**Abbildung 1:** Bauarten von Druckmessgeräten



Im Gegensatz zu elektrischen Druckmessgeräten (2), bei denen nur die Bereitstellung einer Spannungs- bzw. Stromquelle erforderlich ist, müssen bei der Kalibrierung von Druckmessumformern mit elektrischem Ausgang (3) Hilfsmessgeräte des akkreditierten Laboratoriums eingesetzt werden. Diese dienen der Umwandlung des elektrischen Signals in eine ablesbare Anzeige. Die Messunsicherheit, die den Messwerten der Hilfsmessgeräte beigeordnet ist, ist in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen. Um die Rückführbarkeit zu gewährleisten, ist es erforderlich, dass die Hilfsmessgeräte kalibriert sind und eine Angabe über die den Messwerten beizuordnende Messunsicherheit vorliegt.

Bei der Auswahl der zu verwendenden Hilfsmessgeräte ist zu beachten, dass durch deren Messunsicherheitsbeiträge die angestrebte Messunsicherheit für den Kalibriergegenstand nicht signifikant beeinflusst wird.

Bei Kalibriergegenständen mit einer digitalen Schnittstelle (z. B. RS232, RS485 IEEE488 etc.) kann diese anstelle der Anzeige benutzt werden. Es ist sicherzustellen, dass die ausgelesenen Daten eindeutig interpretiert und verarbeitet werden.

	<b>Kalibrierung von Druckmessgeräten</b> <a href="https://doi.org/10.7795/550.20201221">https://doi.org/10.7795/550.20201221</a>	DKD-R 6-1	
		Version:	03/2014
		Revision:	3
		Seite:	11 / 53

## 5 Kalibrierfähigkeit

Die Bearbeitung eines Kalibrierauftrages setzt die Kalibrierfähigkeit (Eignung) des Kalibriergegenstandes voraus, d. h. der momentane Zustand des Kalibriergegenstandes sollte den allgemein anerkannten Regeln der Technik sowie den speziellen Vorgaben gemäß Herstellerdokumentation entsprechen. Die Kalibrierfähigkeit ist durch Beschaffenheits- und Funktionsprüfungen festzustellen.

Beschaffenheitsprüfungen umfassen z. B.:

- Sichtprüfung auf Beschädigungen (Zeiger, Gewinde, Dichtfläche, Druckkanal)
- Kontamination und Sauberkeit
- Sichtprüfungen hinsichtlich Beschriftung, Lesbarkeit der Anzeigen
- Prüfung, ob die zur Kalibrierung erforderlichen Unterlagen (Technische Daten, Bedienungsanleitung) vorliegen

Funktionsprüfungen umfassen z. B.:

- Dichtheit des Leitungssystems des Kalibriergegenstandes
- Elektrische Funktionsfähigkeit
- einwandfreie Funktion der Bedienelemente (z. B. Einstellbarkeit des Nullpunktes)
- Einstellelemente in definierter Stellung
- fehlerfreier Ablauf von Selbsttest- und/oder Selbstjustierungsfunktionen; ggf. sind interne Referenzwerte über Datenschnittstelle auszulesen
- Drehmomentabhängigkeit (Nullsignal) durch die Montage

### Anmerkung:

Falls zur Herstellung der Kalibrierfähigkeit Instandsetzungsmaßnahmen oder Justierungen erforderlich sind, müssen diese Arbeiten zwischen Auftraggeber und Kalibrierlaboratorium abgesprochen werden. Relevante Geräteparameter sind soweit möglich vor und nach den Justierungen zu dokumentieren.

## 6 Umgebungsbedingungen

Die Kalibrierung ist nach Temperatúrausgleich innerhalb des zulässigen Temperaturbereiches zwischen Kalibriergegenstand und Umgebung auszuführen. Eine Aufwärmzeit des Kalibriergegenstandes oder eine mögliche Erwärmung des Kalibriergegenstandes durch die Speisespannung ist zu berücksichtigen. Die Aufwärmzeit richtet sich nach eigenen Erfahrungen oder nach Herstellerangaben.

Die Kalibrierung ist bei einer stabilen Umgebungstemperatur vorzunehmen, die zu protokollieren ist. Die empfohlene Temperaturschwankung während der Kalibrierung ist maximal  $\pm 1$  K. Bei Ausschöpfung der maximalen Toleranzgrenzen ist ggf. ein zusätzlicher Messunsicherheitsbeitrag zu berücksichtigen.

Der zulässige Temperaturbereich beträgt 18 °C bis 28 °C.

### Anmerkung:

Bei Verwendung von Kolbenmanometern kann die Luftdichte einen signifikanten Einfluss auf das Kalibrierergebnis (Luftauftrieb der Masse und hydrostatischer Druck) haben und muss daher berücksichtigt werden. Dazu muss außer der Umgebungstemperatur auch der Atmosphärendruck protokolliert werden. Die relative Luftfeuchte muss entweder gemessen und protokolliert werden oder in Fällen, in denen die relative Luftfeuchte keinen signifikanten Einfluss auf die Unsicherheitsanalyse des Druckwertes darstellt, sinnvoll abgeschätzt werden (z. B. 50 % mit einer erweiterten Messunsicherheit von 50 %). Diese Angaben müssen im Kalibrierschein angegeben werden (siehe DAkkS-DKD-5 [12] und DAkkS 71 SD 0 025 [13] in Verbindung mit DIN EN ISO/IEC 17025:2018 [7] Abschn. 7.8).

	<b>Kalibrierung von Druckmessgeräten</b> <a href="https://doi.org/10.7795/550.20201221">https://doi.org/10.7795/550.20201221</a>	DKD-R 6-1	
		Version:	03/2014
		Revision:	3
		Seite:	12 / 53

## 7 Kalibrierverfahren

- Das Druckmessgerät ist möglichst als Gesamtheit (Messkette) zu kalibrieren.
- Die vorgeschriebene Einbaulage ist zu berücksichtigen.
- Die Kalibrierung ist an gleichmäßig über den Kalibrierbereich verteilten Messpunkten durchzuführen.
- Je nach angestrebter Messunsicherheit sind eine oder mehrere Messreihen nötig (siehe Tabelle 1 bzw. Abbildung 2).
- Wenn der Kalibriergegenstand nicht hinreichend in seinem Verhalten bezüglich des Einflusses des Drehmomentes bei der Montage bekannt ist, muss durch eine zusätzliche Aufspannung die Vergleichpräzision ermittelt werden. Der Wert des Drehmoments ist in diesem Falle zu dokumentieren.
- Der Höhenunterschied zwischen den Referenzhöhen des Normals und des Kalibriergegenstandes ist zu minimieren oder die Korrektur zu berechnen.

Auf Antrag können weitere Einflussgrößen (z. B. Temperatureinfluss durch weitere Messreihen bei unterschiedlichen Temperaturen) ermittelt werden.

Der Messwertvergleich zwischen Kalibriergegenstand und Bezugs- oder Gebrauchsnorm ist nach zwei Methoden durchführbar:

- Einstellung des Druckes nach Anzeige des Kalibriergegenstandes
- Einstellung des Druckes nach Anzeige des Normals

Die Vorbelastungszeit sollte am Endwert und zwischen zwei Vorbelastungen mindestens 30 Sekunden betragen. Nach Vorbelastung wird die Anzeige des Kalibriergegenstandes nach Erreichen des Beharrungszustandes auf null gestellt, wenn der Kalibriergegenstand dies erlaubt. Die Nullpunktablesung erfolgt unmittelbar danach. Für die Druckstufenänderung einer Messreihe gilt, dass die Zeit zwischen zwei aufeinander folgenden Belastungsschritten gleich sein soll, 30 Sekunden nicht unterschritten werden dürfen und die Ablesung frühestens 30 Sekunden nach Beginn des Druckwechsels erfolgen darf. Speziell bei Federmanometern ist durch leichtes Klopfen ein eventuell auftretender Reibungseinfluss des Zeigerwerkes zu minimieren. Am Kalibrierbereichsendwert ist der Messwert vor und nach der Haltezeit zu registrieren. Die Nullpunktablesung am Ende einer Messreihe erfolgt frühestens 30 Sekunden nach der vollständigen Entlastung.

Der Kalibrieraufwand in Abhängigkeit von der angestrebten Messunsicherheit (vgl. Fußnote 2 in Abschnitt 3) ist in Abbildung 2 dargestellt, die den zeitlichen Ablauf der Kalibrierung wiedergibt.

**Tabelle 1: Kalibrierabläufe**

Ablauf	angestrebte Messunsicherheit in % der Messspanne *	Mindestanzahl der Messpunkte  mit Nullpunkt auf/ab	Anzahl der Vorbelastungen	Laständerung + Beharrungszeit  **  Sekunden	Haltezeit am Messbereichsendwert  ***  Minuten	Anzahl der Messreihen	
						aufwärts	abwärts
<b>A</b>	< 0,1	9	3	> 30	2	2	2
<b>B</b>	0,1 ... 0,6	9	2	> 30	2	2	1
<b>C</b>	> 0,6	5	1	> 30	2	1	1

\* Der Bezug auf die Messspanne wurde gewählt, um die Auswahl des Ablaufes (erforderlicher Kalibrieraufwand) aus der Tabelle zu ermöglichen, da üblicherweise die Genauigkeitsangaben der Hersteller auf die Messspanne bezogen sind. Bei Messgeräten, deren Genauigkeitsangaben proportional zum Messwert oder aus zusammengesetzten Komponenten spezifiziert sind, ist Tabelle 1 unter Verwendung der Genauigkeitsangabe am Messbereichsendwert anzuwenden (bezogen auf die Messspanne).

\*\* Der Beharrungszustand (ausreichend stabile Anzeige des Normals und des Kalibriergegenstandes) ist in jedem Falle abzuwarten.

\*\*\* Für Federmanometer ist eine Haltezeit von 5 Minuten einzuhalten.

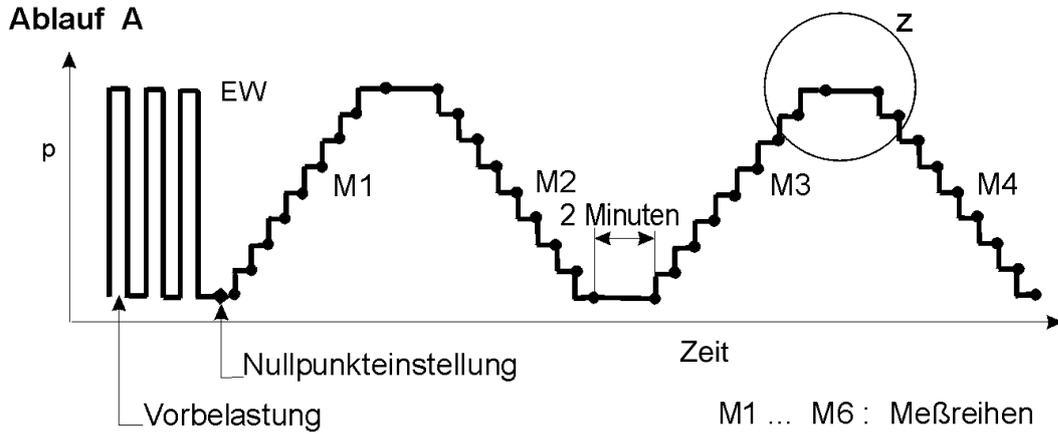
**Hinweise:**

Für die Kalibrierung von Kalibriergegenständen mit einem Messbereich von größer als 2500 bar ist grundsätzlich der Kalibrierablauf A anzuwenden. Ggf. ist mit einer zweiten Aufspannung zu kalibrieren, falls Einspanneffekte beobachtet werden.

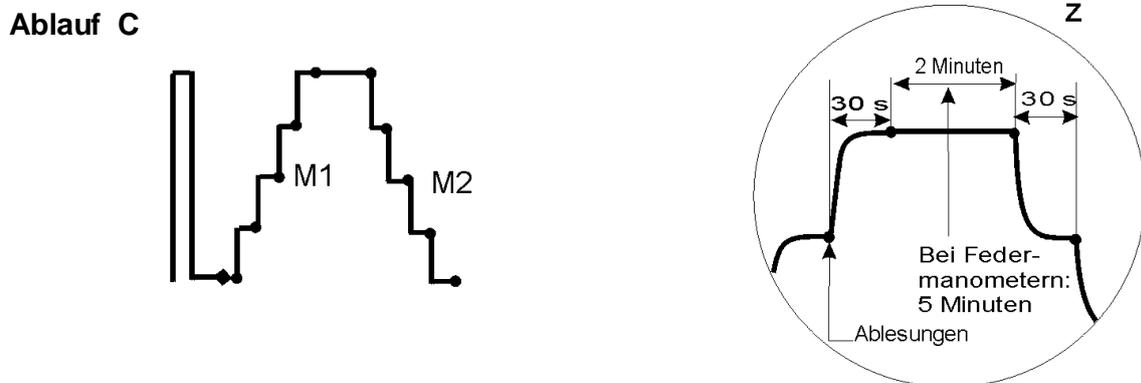
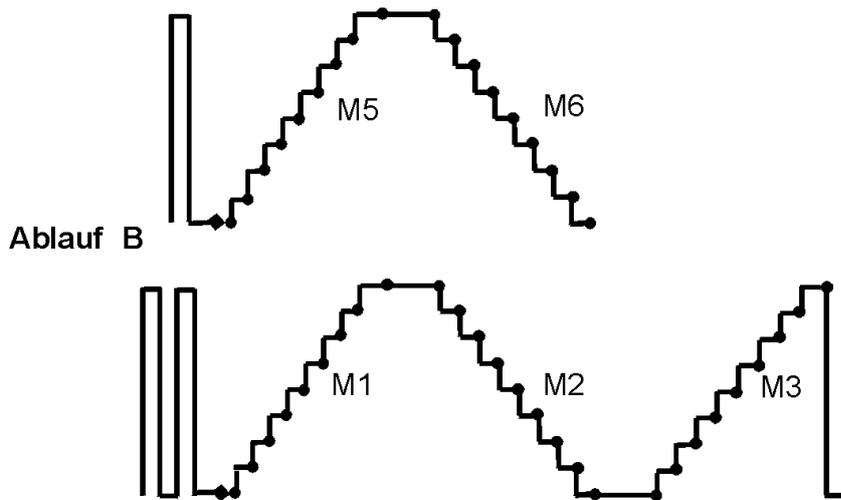
Kalibriergegenstände, die im positiven und negativen Überdruck kalibriert werden, sollten mindestens an zwei Punkten im negativen Bereich (z. B. bei -1 bar und -0,5 bar) und die restlichen Messpunkte im positiven Bereich kalibriert werden.

Sind zur Durchführung einer Kalibrierung mehrere Referenzen erforderlich, muss beim Wechsel der Referenz der Druck am Kalibriergegenstand konstant gehalten werden. Ist dies nicht praktikabel (z. B. Wechsel der Einbauposition, zweite Aufspannung) muss ein vollständiger weiterer Kalibrierablauf durchgeführt werden.

**Abbildung 2:** Visualisierung der Kalibrierabläufe



Zusätzliche Wiederholungsmessung bei 2. Aufspannung



## 8 Messunsicherheit

### 8.1 Definition VIM 2.26 [9]

Die Messunsicherheit ist ein „nichtnegativer Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die der Messgröße auf der Grundlage der benutzten Information beigeordnet ist“.

### 8.2 Vorgehensweise

#### 8.2.1 Modell der Messung VIM 2.48 [9]

Das Modell der Messung ist definiert als „mathematische Beziehung zwischen allen Größen, von denen bekannt ist, dass sie an einer Messung beteiligt sind“.

Die Bestimmung der Messunsicherheit erfolgt grundsätzlich nach dem in EA-4/02 M:2013 [18] beschriebenen Ablauf. Es werden folgende Begriffe und Berechnungsvorschriften unter der Bedingung verwendet, dass keine Korrelationen zwischen den Eingangsgrößen zu berücksichtigen sind:

Modellfunktion			$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$
<b>Standardmessunsicherheit</b>	$u(x_i)$	der Eingangs-/Einflussgröße beigeordnete Standardmessunsicherheit	
	$c_i$	Empfindlichkeitskoeffizient	$c_i \equiv \frac{\partial f}{\partial x_i}$
	$u_i(y)$	durch die Standardmessunsicherheit $u(x_i)$ der Eingangs-/Einflussgröße $x_i$ hervorgerufener Beitrag zu der der Ausgangsgröße beigeordneten Standardmessunsicherheit	$u_i(y) \equiv  c_i  \cdot u(x_i)$
	$u(y)$	der Ausgangsgröße beigeordnete Standardmessunsicherheit	$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y)$ $u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)}$
<b>Erweiterte Messunsicherheit</b>	$U(y)$	erweiterte Messunsicherheit	$U(y) = k \cdot u(y)$
	$k$	Erweiterungsfaktor	$k = 2$ <i>für eine weitgehend normalverteilte Messgröße und eine Überdeckungswahrscheinlichkeit von annähernd 95 %</i>

Werden relative Messunsicherheiten verwendet, so werden die Variablen  $u$ ,  $U$  durch die Variablen  $w$ ,  $W$  ersetzt.

Die Berechnungsvorschrift führt bei komplexen Modellen schnell zu einer nicht mehr handhabbaren analytischen Bestimmung der Empfindlichkeitskoeffizienten, so dass man zur softwaregestützten numerischen Bestimmung der Empfindlichkeitskoeffizienten übergehen wird.

Neben dieser allgemeinen Berechnungsvorschrift existieren jedoch zwei Sonderfälle, die zu Empfindlichkeitskoeffizienten  $c_i = \pm 1$  bzw. zu  $c_i x_i y^{-1} = \pm 1$  und damit zur einfachen quadratischen Addition der Unsicherheiten der Eingangs-/Einflussgrößen führen. Hiermit wird eine einfache Bestimmung der Messunsicherheit ohne Software-Unterstützung ermöglicht.

**Anmerkung:**

Auch das „einfache“ Modell muss selbstverständlich den physikalischen Vorgang der Messung/Kalibrierung korrekt wiedergeben. Ggf. müssen komplexere Zusammenhänge mit einem geeigneten Modell (kein Sonderfall) in einer weiteren Messunsicherheitsbilanz dargestellt werden (s. Anhang A Ermittlung der Messunsicherheit, die den Werten des Kolbenmanometers unter Anwendungsbedingungen beizuordnen ist).

**8.2.2 Summe-/Differenzmodell**

$$Y = X + \sum_{i=1}^N \delta X_i \quad (1)$$

$Y$  Ausgangsgröße

$X$  Eingangsgröße(n)

$\delta X_i$  Einflussgröße(n)

$E[\delta X_i] = 0$  Erwartungswert;

die Komponenten tragen nicht zur Berechnung der Ausgangsgröße bei, d. h., es werden keine Korrekturen angebracht, sie liefern jedoch einen Beitrag zur Messunsicherheit

z. B. Modell zur Bestimmung der Anzeigeabweichung:

$$\Delta p = p_{\text{Anz}} - p_{\text{Normal}} + \sum_{i=1}^N \delta p_i \quad (2)$$

Dieses Modell eignet sich besonders für Kalibriergegenstände mit eigener Anzeige in Einheiten des Druckes (z. B. Federmanometer, elektrisches Druckmessgerät). Hierbei werden die Messunsicherheiten ebenfalls in der Einheit der physikalischen Größe Druck (Pascal, Bar etc.) angegeben.

	<b>Kalibrierung von Druckmessgeräten</b> <a href="https://doi.org/10.7795/550.20201221">https://doi.org/10.7795/550.20201221</a>	DKD-R 6-1	
		Version:	03/2014
		Revision:	3
		Seite:	17 / 53

### 8.2.3 Produkt-/Quotientmodell

$$Y = X \cdot \prod_{i=1}^N K_i \quad (3)$$

$Y$  Ausgangsgröße

$X$  Eingangsgröße(n)

$K_i = \left( 1 + \frac{\delta X_i}{|X_i|} \right)$  Korrektionsfaktor(en)

$\delta X_i$  Einflussgröße(n)

$E[\delta X_i] = 0$ ;  $E[K_i] = 1$  Erwartungswerte;

die Komponenten tragen nicht zur Berechnung der Ausgangsgröße bei, d. h., es werden keine Korrekturen angebracht, sie liefern jedoch einen Beitrag zur Messunsicherheit

z. B. Modell zur Ermittlung des Übertragungskoeffizienten eines Druckaufnehmers (DMS-Aufnehmer):

$$S = \frac{X_{\text{Aus}}}{X_{\text{Ein}}} = \frac{U_{\text{Anz}} / (G \cdot U_{\text{Sp}})}{p_{\text{Normal}}} \cdot \prod_{i=1}^N K_i \quad (4)$$

Dieses Modell eignet sich besonders für Kalibriergegenstände ohne eigene Anzeige (z. B. Druckmessumformer mit elektrischem Ausgang) unter Verwendung von relativen Messunsicherheiten  $w$  der Dimension 1 (dimensionslos bzw. %).

### 8.2.4 Eingangs-/Einflussgrößen

Die den Eingangs-/Einflussgrößen beigeordneten Messunsicherheiten werden bezüglich ihrer Ermittlung in zwei Kategorien eingeteilt:

**Typ A:** Bei der Ermittlung des Wertes und der ihm beigeordneten Standardmessunsicherheit werden Analysemethoden der Statistik für Messreihen unter Wiederholbedingungen ( $l \geq 10$ , wobei die Variable  $l$  die Anzahl der Messreihen angibt) angewendet.

**Typ B:** Die Ermittlung des Wertes und der ihm beigeordneten Standardmessunsicherheit beruht auf anderen wissenschaftlichen Erkenntnissen und kann aus folgenden Informationen eingeschätzt werden:

- Daten aus vorangegangenen Messungen
- allgemeine Kenntnisse und Erfahrungen über die Eigenschaften und das Verhalten von Messinstrumenten und Materialien
- Herstellerangaben
- Kalibrierscheinen oder anderen Zertifikaten
- Referenzdaten aus Handbüchern

In vielen Fällen lässt sich für den Wert einer Größe nur die Ober- und Untergrenze  $a_+$  und  $a_-$  angeben, wobei alle Werte innerhalb der Grenzen als gleich wahrscheinlich angesehen werden können. Dieser Sachverhalt kann am besten mit einer rechteckförmigen Wahrscheinlichkeitsdichte beschrieben werden.

Mit 
$$a_+ - a_- = 2a \tag{5}$$

erhält man den Schätzwert der Eingangs-/Einflussgröße

$$x_i = \frac{1}{2} \cdot (a_+ + a_-) \tag{6}$$

und die beigeordnete Standardmessunsicherheit

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \tag{7}$$

Liegen die Werte mit größerer Wahrscheinlichkeit in der Mitte bzw. am Rand des Bereiches, dann ist die Annahme einer Dreieck- bzw. einer U-förmigen Verteilung sinnvoll.

**Tabelle 2:** Weitere Verteilungsformen Typ B

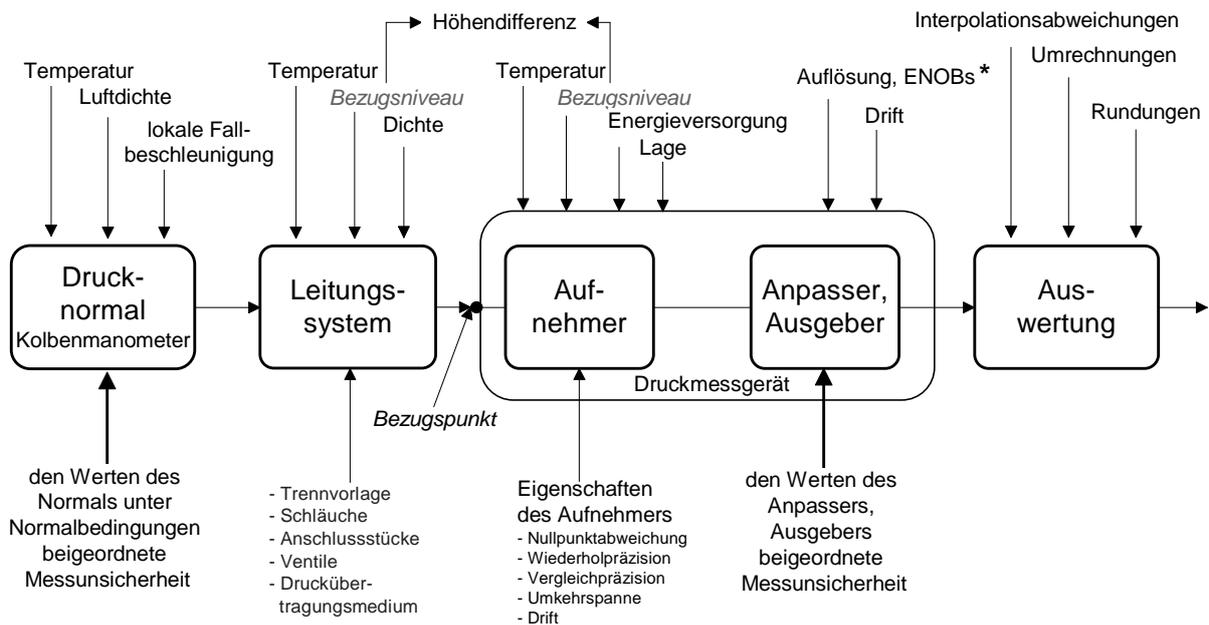
Verteilungsform	Standardmessunsicherheit
Normal	$u = \frac{U}{k}$
Dreieck	$u = \frac{a}{\sqrt{6}}$
U-förmig	$u = \frac{a}{\sqrt{2}}$
etc.	

### 8.2.5 Mögliche Einflussgrößen, Beispiel

Für die Aufstellung des Modells der Messunsicherheit wird empfohlen, die Einflussgrößen grafisch darzustellen. Beispielhaft zeigt folgende Darstellung die möglichen Einflussgrößen bei der Kalibrierung eines Druckmessgerätes mit einem Kolbenmanometer.

Die Abbildung 3 zeigt das Blockschaltbild vom Druckmessgerät Bauart (3) aus Abschnitt 4, Abbildung 1.

**Abbildung 3:** Einflussgrößen bei der Kalibrierung eines Druckmessgerätes



\* ENOB : Effective Number of Bits

(Kennwert von A/D-Wandlern, der deren tatsächliche Genauigkeit und Leistungsfähigkeit besser charakterisiert als die Auflösung.)

**Anmerkung:**

Mitunter ist es für den ersten Ansatz hilfreich, die Einflussgrößen den Blöcken

- Normal
- Verfahren
- Kalibriergegenstand

zuzuordnen.

Die Messunsicherheiten, die den Werten des Normalis, des Anpassers und Ausgebers beigeordnet sind, werden aus Kalibrierscheinen entnommen (i. Allg. normalverteilt,  $k = 2$ ). Die Langzeitstabilität ist als Messunsicherheitsbeitrag zu bewerten und ggf. zu berücksichtigen. Bei Verwendung von elektrischen Druckmessgeräten gilt dies zusätzlich für deren Auflösung und Temperaturabhängigkeit.

### 8.3 Kalibrierung von Federmanometern

#### 8.3.1 Modell der Messung

Geeignet ist z. B. ein einfaches Summe-/Differenzmodell zur Ermittlung der Messabweichung der Anzeige – getrennt für die Messwerte in Richtung zunehmenden Druckes und für die Messwerte in Richtung abnehmenden Druckes – nach den beschriebenen Kalibrierabläufen (siehe Abschnitt 7, Tabelle 1 bzw. Abbildung 2):

$$\Delta p_{\text{auf/ab}} = p_{\text{Anz,auf/ab}} - p_{\text{Normal}} + \sum_{i=1}^2 \delta p_i = p_{\text{Anz,auf/ab}} - p_{\text{Normal}} + \delta p_{\text{Nullpunkt abw.}} + \delta p_{\text{Wiederholpräz.}} \quad (8)$$

$Y = \Delta p_{\dots}$	Ausgangsgröße; Anzeigeabweichung Index ... steht für auf/ab bzw. mittel, s. Gleichung (8) und (9)	3	
$X_1 = p_{\text{Anz,}\dots}$	Anzeige des Druckmessgerätes Index ... steht für auf/ab bzw. mittel, s. Gleichung (8) und (9)	4	5
$X_2 = p_{\text{Normal}}$	Wert des Bezugsnormal <sup>6</sup>		
$X_3 = \delta p_{\text{Nullpunkt abw.}}$	Einflussgröße Nullpunktabweichung	7	
$X_4 = \delta p_{\text{Wiederholpräz.}}$	Einflussgröße Wiederholpräzision		

und für die Mittelwerte aus den Auf- und Abwärtsmesswerten:

$$\Delta p_{\text{mittel}} = p_{\text{Anz,mittel}} - p_{\text{Normal}} + \sum_{i=1}^3 \delta p_i = p_{\text{Anz,mittel}} - p_{\text{Normal}} + \delta p_{\text{Nullpunkt abw.}} + \delta p_{\text{Wiederholpräz.}} + \delta p_{\text{Umkehrspanne}} \quad (9)$$

$$p_{\text{Anz,mittel}} = \frac{p_{\text{Anz, auf}} + p_{\text{Anz, ab}}}{2} \quad (10)$$

mit zusätzlich:

$X_5 = \delta p_{\text{Umkehrspanne}}$	Einflussgröße Umkehrspanne	7	5
--	----------------------------	---	---

<sup>3</sup> Ausgangsgröße

<sup>4</sup> Eingangsgrößen

<sup>5</sup> Größen zur Ermittlung der Messunsicherheit

<sup>6</sup> Der Wert des Bezugsnormal<sup>6</sup> berücksichtigt den Einsatz des Kolbenmanometers unter Anwendungsbedingungen (Anbringen von Korrekturen). Auch die Messunsicherheitsbilanz enthält deshalb Messunsicherheitsbeiträge des Kolbenmanometers sowohl unter Standard- als auch unter Anwendungsbedingungen. Der letztere Beitrag wird in Messunsicherheitsbilanzen (s. Anhang A Ermittlung der Messunsicherheit, die den Werten des Kolbenmanometers unter Anwendungsbedingungen beizuordnen ist) für die Einflüsse der Temperatur, des thermischen Flächenausdehnungskoeffizienten, der Fallbeschleunigung, der Luftdichte und des Deformationskoeffizienten (Kolbenmanometer) bzw. für diejenigen der Dichte, der Fallbeschleunigung und der Höhendifferenz der Bezugsebenen bestimmt. Zusätzlich ist die Langzeitstabilität des Bezugsnormal<sup>6</sup> zu berücksichtigen.

<sup>7</sup> Einflussgrößen

	<b>Kalibrierung von Druckmessgeräten</b> <a href="https://doi.org/10.7795/550.20201221">https://doi.org/10.7795/550.20201221</a>	DKD-R 6-1	
		Version:	03/2014
		Revision:	3
		Seite:	21 / 53

Bei getrennter Betrachtung der Auf- und Abwärtsreihen bestimmt sich die erweiterte Messunsicherheit ( $k = 2$ ) zu:

$$U_{\text{auf/ab}} = k \cdot u_{\text{auf/ab}} \quad (11)$$

$$U_{\text{auf/ab}} = k \cdot \sqrt{u_{\text{Normal}}^2 + u_{\text{Auflösung}}^2 + u_{\text{Nullpunkt abw.}}^2 + u_{\text{Wiederholpräz.}}^2}$$

und eine sogenannte Abweichungsspanne<sup>8</sup> unter Berücksichtigung der systematischen Abweichung zu:

$$U'_{\text{auf/ab}} = U_{\text{auf/ab}} + |\Delta p_{\text{auf/ab}}| \quad (12)$$

Bei Verwendung der Mittelwerte aus Auf- und Abwärtsreihen berechnet sich die erweiterte Messunsicherheit ( $k = 2$ ) zu:

$$U_{\text{mittel}} = k \cdot \sqrt{u_{\text{auf/ab}}^2 + u_{\text{Umkehrspanne}}^2} \quad (13)$$

wobei für die Berechnung der Messunsicherheit  $u_{\text{auf/ab}}$  der größere Wert der Wiederholpräzision einzusetzen ist.

Die zugehörige Abweichungsspanne bestimmt sich zu:

$$U'_{\text{mittel}} = U_{\text{mittel}} + |\Delta p_{\text{mittel}}| \quad (14)$$

<sup>8</sup> Als Abweichungsspanne wird der maximal zu erwartende Unterschied zwischen dem gemessenen Wert und dem richtigen Wert der Messgröße bezeichnet. Die Abweichungsspanne kann zur Charakterisierung der Genauigkeit (engl. accuracy) benutzt werden.

### 8.3.2 Messunsicherheitsbilanz

Die Kenntnisse über die Eingangs-/Einflussgrößen werden vorzugsweise in einer Tabelle zusammengefasst.

**Tabelle 3:** Messunsicherheitsbilanz für die Kalibrierung eines Federmanometers

lfd. Nr.	Größe	Bester Schätzwert	Weite der Verteilung	Wahrscheinlichkeitsverteilung	Teiler	Standardmessunsicherheit	Empfindlichkeitskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Einheit <sup>9</sup>	
	$X_i$	$x_i$	$2a$	$g_{X_i}(\xi_i)$		$u(x_i)$	$c_i$	$u_i(y)$		
1	$p_{\text{Anz...}}$	$p_{i, \text{Anz...}}$	$2r$	Rechteck	$2\sqrt{3}$	$u(r) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{2r}{2}\right)^2}$	1	$u_r$	bar	
2	$p_{\text{Normal}}$	$p_{i, \text{Normal}}$		Normal		$u(\text{Normal})$	-1	$u_{\text{Normal}}$	bar	
3	$\delta p_{\text{Nullpunktav.}}$	0	$f_0$	Rechteck	$2\sqrt{3}$	$u(f_0) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{f_0}{2}\right)^2}$	1	$u_{f_0}$	bar	
4	$\delta p_{\text{Wiederholpräz.}}$	0	$b'$	Rechteck	$2\sqrt{3}$	$u(b') = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{b'}{2}\right)^2}$	1	$u_{b'}$	bar	
5	$\delta p_{\text{Umkehrspanne}}$	0	$h$	Rechteck	$2\sqrt{3}$	$u(h) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{h}{2}\right)^2}$	1	$u_h$	bar	
	$Y$	$\Delta p_{\dots}$							$u(y)$	bar

<sup>9</sup> Es wird empfohlen, die Einheit der Unsicherheitsbeiträge mitzuführen (Einheit der physikalischen Größe, Anzeigeeinheit, etc.)

### 8.3.3 Belastungsstufenbezogene Messunsicherheitsbilanz

Die Abschätzung der Messunsicherheit hat für jeden Kalibrierwert, d. h. für jede Belastungsstufe zu erfolgen. Für eine übersichtliche Darstellung wird folgende Tabelle – jeweils für die auf-, absteigenden und Mittel-Werte – empfohlen:

**Tabelle 4:** Messunsicherheitsbilanz

Druck	Messabweichung	Standardmessunsicherheit <i>u</i>			Erweiterte Messunsicherheit <i>U (k=2)</i>	Abweichungsspanne <i>U'</i>
		Beitrag 1	...	Beitrag <i>n'</i>		
bar	bar	bar			bar	bar
min.						
...						
max.						

### 8.3.4 Einwertangabe

Zusätzlich zur Angabe der Abweichungsspanne für jede Belastungsstufe kann dem Kunden die maximale Abweichungsspanne im Gültigkeitsbereich der Kalibrierung (in der Einheit des Druckes, bezogen auf den Messwert bzw. auf die Messspanne) mitgeteilt werden. Ebenso kann die Konformität bestätigt werden (s. Seite 32).

#### 8.4 Kalibrierung von elektrischen Druckmessgeräten

Das Modell der Messung und die Messunsicherheitsbilanz für die Kalibrierung eines Federmanometers können auch bei der Kalibrierung eines elektrischen Druckmessgerätes (ziffernrichtige Anzeige in Einheiten des Druckes) verwendet werden. Ggf. ist zusätzlich ein Anteil „Vergleichpräzision  $b$  bei wiederholtem Einbau“ zu berücksichtigen.

$X_6 = \delta p_{\text{Vergleichpräz.}}$	Einflussgröße Vergleichpräzision	7	5
--	----------------------------------	---	---

**Tabelle 5:** Zusätzliche Komponente bei der Ermittlung der Messunsicherheit für die Kalibrierung eines elektrischen Druckmessgerätes

lfd. Nr.	Größe	Bester Schätzwert	Weite der Verteilung	Wahrscheinlichkeitsverteilung	Teiler	Standardmessunsicherheit	Empfindlichkeitskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Einheit
	$X_i$	$x_i$	$2a$	$g_{x_i}(\xi_i)$		$u(x_i)$	$c_i$	$u_i(y)$	
6	$\delta p_{\text{Vergleichpräz.}}$	0	$b$	Rechteck	$2\sqrt{3}$	$u(b) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{b}{2}\right)^2}$	1	$u_b$	bar

Die erweiterte Messunsicherheit ( $k = 2$ ) für die Auf- bzw. Abwärtsreihen wird hier folgendermaßen ermittelt:

$$U_{\text{auf/ab}} = k \cdot u_{\text{auf/ab}} \tag{15}$$

$$U_{\text{auf/ab}} = k \cdot \sqrt{u_{\text{Normal}}^2 + u_{\text{Auflösung}}^2 + u_{\text{Nullpunkt abw.}}^2 + u_{\text{Wiederholpräz.}}^2 + u_{\text{Vergleichpräz.}}^2}$$

Die Ermittlung der zugehörigen Abweichungsspanne für die Auf- bzw. Abwärtsreihen bzw. der erweiterten Messunsicherheit und der Abweichungsspanne für den Mittelwert erfolgt analog der Verfahrensweise beim Federmanometer.

## 8.5 Kalibrierung von Druckaufnehmern und Druckmessumformern mit elektrischem Ausgang

### 8.5.1 Modell der Messung

Geeignet ist z. B. ein einfaches Produkt-/Quotientmodell zur Bestimmung des Übertragungskoeffizienten – getrennt für die Messwerte in Richtung zunehmenden Druckes und für die Messwerte in Richtung abnehmenden Druckes:

$$S_{\text{auf/ab}} = \frac{X_{\text{Aus,auf/ab}}}{X_{\text{Ein}}} = \frac{U_{\text{Anz,auf/ab}} / (G \cdot U_{\text{Sp}})}{p_{\text{Normal}}} \prod_{i=1}^3 K_i = \frac{U_{\text{Anz,auf/ab}} / (G \cdot U_{\text{Sp}})}{p_{\text{Normal}}} K_{\text{Nullpunkt abw.}} K_{\text{Wiederholpräz.}} K_{\text{Vergleichpräz.}} \quad (16)$$

$Y = S_{\dots}$	Ausgangsgröße; Übertragungskoeffizient Index ... steht für auf/ab bzw. mittel, s. Gleichung (16) und (17)	3	
$X_1 = U_{\text{Anz,}\dots}$	Anzeige des Ausgebers (Spannungsmessgerät) Index ... steht für auf/ab bzw. mittel, s. Gleichung (16) und (17)	4	5
$X_2 = G$	Übertragungskoeffizient des Anpassers (beigestellter Verstärker)		
$X_3 = U_{\text{Sp}}$	Wert der Speisespannung (Hilfsgerät)		
$X_4 = p_{\text{Normal}}$	Wert des Bezugsnormal		
$X_5 = K_{\text{Nullpunkt abw.}}$	Korrektionsfaktor bedingt durch die Einflussgröße Nullpunktabweichung	7	
$X_6 = K_{\text{Wiederholpräz.}}$	Korrektionsfaktor bedingt durch die Einflussgröße Wiederholpräzision		
$X_7 = K_{\text{Vergleichpräz.}}$	ggf. Korrektionsfaktor bedingt durch die Einflussgröße Vergleichpräzision		

Für die Mittelwerte gilt:

$$S_{\text{mittel}} = \frac{X_{\text{Aus,mittel}}}{X_{\text{Ein}}} = \frac{U_{\text{Anz,mittel}} / (G \cdot U_{\text{Sp}})}{p_{\text{Normal}}} \prod_{i=1}^4 K_i = \frac{U_{\text{Anz,mittel}} / (G \cdot U_{\text{Sp}})}{p_{\text{Normal}}} K_{\text{Nullpunkt abw.}} K_{\text{Wiederholpräz.}} K_{\text{Vergleichpräz.}} K_{\text{Umkehrspanne}} \quad (17)$$

mit zusätzlich:

$X_8 = K_{\text{Umkehrspanne}}$	Korrektionsfaktor bedingt durch die Einflussgröße Umkehrspanne	7	5
---------------------------------	--	---	---

Bei getrennter Betrachtung der Auf- und Abwärtsreihen bestimmen sich die relative erweiterte Messunsicherheit ( $k = 2$ ) zu:

$$W_{\text{auf/ab}} = k \cdot w_{\text{auf/ab}} \quad (18)$$

$$W_{\text{auf/ab}} = k \cdot \sqrt{w_{\text{Normal}}^2 + w_{\text{Ausgeber}}^2 + w_{\text{Anpasser}}^2 + w_{\text{Hilfsgerät}}^2 + w_{\text{Nullpunkt abw.}}^2 + w_{\text{Wiederholpräz.}}^2 + w_{\text{Vergleichpräz.}}^2}$$

und die zugehörigen Abweichungsspannen zu:

$$W'_{\text{auf/ab}} = W_{\text{auf/ab}} + \left| \frac{\Delta S_{\text{auf/ab}}}{S'} \right| \quad (19)$$

mit der systematischen Abweichung

$$\Delta S_{\text{auf/ab}} = S_{\text{auf/ab}} - S' \quad (20)$$

wobei  $S'$  vorzugsweise die Steigung der Ausgleichsgeraden durch sämtliche Messwerte und durch den Nullpunkt des Ausgangssignals des Druckmessumformers darstellt.

Bei Verwendung des Mittelwertes aus Auf- und Abwärtsreihen berechnet sich die relative erweiterte Messunsicherheit ( $k = 2$ ) zu:

$$W_{\text{mittel}} = k \cdot \sqrt{w_{\text{auf/ab}}^2 + w_{\text{Umkehrspanne}}^2} \quad (21)$$

wobei für die Berechnung der Messunsicherheit  $w_{\text{auf/ab}}$  der größere Wert der Wiederholpräzision einzusetzen ist.

Die zugehörige Abweichungsspanne bestimmt sich zu:

$$W'_{\text{mittel}} = W_{\text{mittel}} + \left| \frac{\Delta S_{\text{mittel}}}{S'} \right| \quad (22)$$

mit

$$\Delta S_{\text{mittel}} = S_{\text{mittel}} - S' \quad (23)$$

(für  $S'$  s. oben)

### 8.5.2 Messunsicherheitsbilanz

Die Kenntnisse über die Eingangs-/Einflussgrößen werden vorzugsweise in einer Tabelle zusammengefasst.

**Tabelle 6:** Messunsicherheitsbilanz für die Kalibrierung eines Druckmessumformers mit elektrischem Ausgang

lfd. Nr.	Größe	Bester Schätzwert	Weite der Verteilung	Wahrscheinlichkeitsverteilung	Teiler	Standardmessunsicherheit	Exponent von $X_i$	Unsicherheitsbeitrag	Einheit
	$X_i$	$x_i$	$2a$	$g_{x_i}(\xi_i)$		$w(x_i)$	$c_i x_i y^{-1}$	$w_i(y)$	
1	$U_{\text{Anz}, \dots}$	$U_{i, \text{Anz}, \dots}$		Normal		$w(\text{Ausgeber})$	1	$w_{\text{Ausgeber}}$	#
2	$G$	$G$		Normal		$w(\text{Anpasser})$	-1	$w_{\text{Anpasser}}$	#
3	$U_{\text{Sp}}$	$U_{\text{Sp}}$		Normal		$w(\text{Hilfsgerät})$	-1	$w_{\text{Hilfsgerät}}$	#
4	$P_{\text{Normal}}$	$P_{i, \text{Normal}}$		Normal		$w(\text{Normal})$	-1	$w_{\text{Normal}}$	#
5	$K_{\text{Nullpunkt abw.}}$	1	$f_0^{10}$	Rechteck	$2\sqrt{3}$	$w(f_0) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{f_0}{2}\right)^2}$	1	$w_{f_0}$	#
6	$K_{\text{Wiederholpräz.}}$	1	$b'$	Rechteck	$2\sqrt{3}$	$w(b') = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{b'}{2}\right)^2}$	1	$w_{b'}$	#
7	$K_{\text{Vergleichpräz.}}$	1	$b$	Rechteck	$2\sqrt{3}$	$w(b) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{b}{2}\right)^2}$	1	$w_b$	#
8	$K_{\text{Umkehrspanne}}$	1	$h$	Rechteck	$2\sqrt{3}$	$w(h) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{h}{2}\right)^2}$	1	$w_h$	#
	$Y$	$S \dots$						$w(y)$	#

<sup>10</sup> Die Kenngrößen  $f_0$ ,  $b'$ ,  $b$  und  $h$  sind hier relative, d. h. auf den Messwert (Anzeige) bezogene Größen, die beim Druck null nicht definiert sind.

### 8.5.3 Belastungsstufenbezogene Messunsicherheitsbilanz

Die Abschätzung der Messunsicherheit hat für jeden Kalibrierwert, d. h. für jede Belastungsstufe zu erfolgen. Für eine übersichtliche Darstellung wird folgende Tabelle – jeweils für die auf-, absteigenden und Mittel-Werte – empfohlen:

**Tabelle 7:** Messunsicherheitsbilanz

Druck	Rel. Standardmessunsicherheit			Rel. erw. Messunsicherheit $W (k=2)$
	Beitrag 1	...	Beitrag $n'$	
bar	$w$			$\#$
		#		
min.				
...				
max.				

### 8.5.4 Einwertangabe

#### Übertragungskoeffizient als Steigung einer linearen Ausgleichsfunktion

Beim Einsatz des Druckaufnehmers wird normalerweise nicht mit unterschiedlichen Übertragungskoeffizienten für die einzelnen Belastungsstufen (d. h. Kalibrierdrücke) gearbeitet, sondern mit einem einzigen Übertragungskoeffizienten für den gesamten Gültigkeitsbereich der Kalibrierung. Dies ist vorzugsweise die Steigung der Ausgleichsgeraden durch sämtliche Messwerte und durch den Nullpunkt des Ausgangssignals des Druckaufnehmers (Ausgleich ohne Absolutglied).

Bei Verwendung dieser Kenngröße des Druckaufnehmers tritt an die Stelle der Messunsicherheiten, die den einzelnen Messwerten des Übertragungskoeffizienten beigeordnet sind, eine Konformitätsaussage (vgl. 9.1.3).

Dazu sind die Spezifikationsgrenzen festzulegen. Dies kann, ausgehend von den Kalibrierergebnissen, durch Berechnung der Abweichungsspannen nach 8.5.1 erfolgen („selbstbestimmte Konformität“; Festlegung auf Grund von Herstellerangaben s. unten). Dabei sind

- die den einzelnen Messwerten des Übertragungskoeffizienten beigeordneten Messunsicherheiten und
- die Abweichungen dieser Werte von der Einwertangabe des Übertragungskoeffizienten zu berücksichtigen.

In der Regel ergeben sich Abweichungsspannen, deren Beträge mit zunehmendem Druck kleiner werden. Als Spezifikationsgrenze kann

- die größte berechnete Abweichungsspanne gewählt werden (in diesem Fall werden Spezifikationsgrenzen im Kalibrierdiagramm als Geraden parallel zur Druck-Achse dargestellt; vgl. 9.2.2, Druckmessumformer mit elektrischem Ausgangssignal, Abbildung 5, obere Teilbilder)

oder

- eine geeignete Kurve (z. B. Hyperbel oder Polynom) angegeben werden (vgl. 9.2.2, Druckmessumformer mit elektrischem Ausgangssignal, Abbildung 5, untere Teilbilder).

	<b>Kalibrierung von Druckmessgeräten</b> <a href="https://doi.org/10.7795/550.20201221">https://doi.org/10.7795/550.20201221</a>	DKD-R 6-1	
		Version:	03/2014
		Revision:	3
		Seite:	29 / 53

**Hinweis:**

Die Verwendung druckabhängiger Spezifikationsgrenzen ist nicht gängige Praxis. Sie ermöglicht jedoch bei Druckmessungen mit dem kalibrierten Gerät im oberen Teil des Messbereichs die Angabe kleinerer Messunsicherheiten.

Bei Kalibriergegenständen mit vom Hersteller abgeglichenem Nennkennwert (z. B. 2 mV/V) können die Spezifikationsgrenzen alternativ auch aus der zugeordneten Kennwerttoleranz ermittelt werden. In diesem Fall ist jedoch stets zu prüfen, ob die bei der Kalibrierung bestimmten Werte der Übertragungskoeffizienten einschließlich ihrer beigeordneten Messunsicherheiten und ihrer systematischen Abweichungen von der Einwertangabe des Kennwertes die Spezifikationsgrenzen nicht überschreiten.

## 8.6 Einflussgrößen des Kalibriergegenstandes für die Messunsicherheitsbilanz

### 8.6.1 Auflösung $r$

#### 8.6.1.1 Analoge Anzeigeeinrichtungen

Die Auflösung der Anzeigeeinrichtung ergibt sich aus dem Verhältnis der Zeigerbreite zum Mittenabstand zweier benachbarter Teilstriche (Skalenteilungswert). Als Verhältnis wird 1/2, 1/5, 1/10 empfohlen. Soll dieses Verhältnis (d. h. der schätzbare Bruchteil eines Skalenteilungswertes) 1/10 betragen, so muss der Teilstrichabstand 2,5 mm oder größer sein (vgl. auch DIN 43790).

**Anmerkung:**

Der beste Schätzwert einer analogen Anzeigeeinrichtung wird durch visuelle Interpolation ermittelt. Der kleinste schätzbare Bruchteil eines Skalenteilungswertes ist der Interpolationsanteil  $r$ , mit dem Messwerte unterschieden werden können. Der Variationsbereich für den besten Schätzwert  $x$  ergibt sich somit zu  $a_+ = x + r$  und  $a_- = x - r$  mit der Weite der Rechteckverteilung  $2a = 2 \cdot r$ .

#### 8.6.1.2 Digitale Anzeigeeinrichtungen

Die Auflösung entspricht dem Ziffernschritt, sofern bei unbelasteter Druckmessenrichtung die Anzeige um nicht mehr als ein Ziffernschritt schwankt.

**Anmerkung:**

Für die der Ermittlung des Messunsicherheitsbeitrages wird der Halbweite der Rechteckverteilung der halbe Wert der Auflösung  $a = r/2$  zugewiesen.

#### 8.6.1.3 Anzeigeschwankung

Wenn die Anzeige bei unbelasteter Druckmessenrichtung um mehr als den zuvor ermittelten Wert der Auflösung schwankt, so ist die Auflösung  $r$  mit der halben Spannweite der Schwankung – zusätzlich addiert mit einem Ziffernschritt – anzusetzen.

### 8.6.2 Nullpunktabweichung $f_0$

Der Nullpunkt (unbelastetes Druckmessgerät üblicherweise bei Atmosphärendruck) kann vor jedem Messzyklus, bestehend aus Auf- und Abwärtsmessreihe, eingestellt und muss vor und nach jedem Messzyklus aufgezeichnet werden. Die Ablesung ist bei völliger Entlastung vorzunehmen.

Bei Druckmessgeräten für Überdruck mit einem Messbereichsanfang abweichend vom Atmosphärendruck (z. B. -1 bar bis 9 bar) ist die Drift am Nullpunkt zu bestimmen.

Die Bestimmung der Nullpunktabweichung entfällt bei Absolutdruckmessgeräten, bei denen der Nullpunkt nicht im Kalibrierbereich enthalten ist, z. B. Barometer.

	<b>Kalibrierung von Druckmessgeräten</b> <a href="https://doi.org/10.7795/550.20201221">https://doi.org/10.7795/550.20201221</a>	DKD-R 6-1	
		Version:	03/2014
		Revision:	3
		Seite:	30 / 53

Die Nullpunktabweichung wird folgendermaßen berechnet:

$$f_0 = \max \left\{ |x_{2,0} - x_{1,0}|, |x_{4,0} - x_{3,0}|, |x_{6,0} - x_{5,0}| \right\} \quad (24)$$

Die Indizes nummerieren die an den Nullpunkten der Messreihen M1-M6 abgelesenen Messwerte  $x$ .

### 8.6.3 Wiederholpräzision $b'$

Die Wiederholpräzision bei unverändertem Einbau wird aus der Differenz der nullsignalbereinigten Messwerte korrespondierender Messreihen ermittelt.

$$\begin{aligned}
 b'_{\text{auf},j} &= \left| (x_{3,j} - x_{3,0}) - (x_{1,j} - x_{1,0}) \right| \\
 b'_{\text{ab},j} &= \left| (x_{4,j} - x_{3,0}) - (x_{2,j} - x_{1,0}) \right| \\
 b'_{\text{mittel},j} &= \max \{ b'_{\text{auf},j}, b'_{\text{ab},j} \}
 \end{aligned} \quad (25)$$

Der Index  $j$  nummeriert die Nominalwerte des Druckes ( $j = 0$ : Nullpunkt).

### 8.6.4 Vergleichpräzision $b$

Die Vergleichpräzision bei wiederholtem Einbau und unveränderten Bedingungen wird aus der Differenz der nullsignalbereinigten Messwerte korrespondierender Messreihen bestimmt:

$$\begin{aligned}
 b_{\text{auf},j} &= \left| (x_{5,j} - x_{5,0}) - (x_{1,j} - x_{1,0}) \right| \\
 b_{\text{ab},j} &= \left| (x_{6,j} - x_{5,0}) - (x_{2,j} - x_{1,0}) \right| \\
 b_{\text{mittel},j} &= \max \{ b_{\text{auf},j}, b_{\text{ab},j} \}
 \end{aligned} \quad (26)$$

Für den Index  $j$  s. oben.

### 8.6.5 Umkehrspanne $h$

Bei der Angabe von Mittelwerten wird die Umkehrspanne aus der Differenz der nullpunkt-bereinigten Messwerte der Aufwärts- und Abwärtsreihen wie folgt ermittelt:

$$h_{\text{mittel},j} = \frac{1}{n} \cdot \left\{ \left| (x_{2,j} - x_{1,0}) - (x_{1,j} - x_{1,0}) \right| + \left| (x_{4,j} - x_{3,0}) - (x_{3,j} - x_{3,0}) \right| + \left| (x_{6,j} - x_{5,0}) - (x_{5,j} - x_{5,0}) \right| \right\} \quad (27)$$

Für den Index  $j$  s. oben. Die Variable  $n$  stellt die Anzahl der vollständigen Messzyklen (bestehend aus einer Aufwärts- und einer Abwärtsreihe) dar.

## 9 Auswertung der Messergebnisse und Angaben im Kalibrierschein

Die Hauptbestandteile der Druckmesseinrichtung erhalten je eine Kalibriermarke; bei Messketten erhält jedes Gerät eine Kalibriermarke.

Zusätzlich zu den in DAkkS-DKD-5 [12] enthaltenen Forderungen sind im Kalibrierschein folgende Angaben aufzuführen<sup>11</sup>:

- Kalibrierverfahren (DKD-R 6-1 Ablauf A, B oder C)
- Messabweichung der Anzeige
- Druckübertragungsmittel
- Druckbezugsebene am Kalibriergegenstand
- Einbaulage des Kalibriergegenstandes bei Kalibrierung
- gewählte Einstellungen am Kalibriergegenstand

Der Kalibrierschein sollte eine Tabelle aller Messwerte enthalten, z. B.:

**Tabelle 8:** Messwerte

<b>Druck</b> in Höhe der Referenz- ebene des Kalibrier- gegen- standes  <i>p</i>	Angezeigter Wert $X_{Anz}$					
	Kalibrierablauf A				Messung bei 2. Aufspannung	
	Kalibrierablauf B					
	Kalibrierablauf C					
	M1 (auf)	M2 (ab)	M3 (auf)	M4 (ab)	M5 (auf)	M6 (ab)
bar, Pa, ...	bar, Pa, A, V, mV/V, Hz, ...					
min.	min.	min.	min.	min.	min.	min.
↓	↓	↑	↓	↑	↓	↑
max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.

Die Spalte 1 enthält die Druckmesswerte des Normals. Die Spalten 2 bis 7 enthalten die entsprechenden von den Kalibriergegenständen nach Abbildung 1 (Federmanometer, elektrisches Druckmessgerät, Druckmessumformer mit elektrischem Ausgang) in Einheiten des Druckes angezeigten bzw. in anderen physikalischen Größen (Strom, Spannung, Spannungsverhältnis, Frequenz, ...) ausgegebenen oder bereits in die Größe Druck umgerechneten Messwerte.

Die weitere Auswertung der Messwerte kann folgende Kenngrößen enthalten:

- Mittelwerte
- Nullpunktabweichung
- Wiederholpräzision
- Ggf. Vergleichpräzision
- Umkehrspanne
- Abweichungsspanne

<sup>11</sup> Diese Forderungen stehen im Einklang mit DIN EN ISO/IEC 17025: 2018 [7] Abschnitt 7.8.

	<b>Kalibrierung von Druckmessgeräten</b> <a href="https://doi.org/10.7795/550.20201221">https://doi.org/10.7795/550.20201221</a>	DKD-R 6-1	
		Version:	03/2014
		Revision:	3
		Seite:	32 / 53

- Einwertangabe
- Konformität

## 9.1 Ermittlung weiterer Kenngrößen

### 9.1.1 Mittelwerte $\bar{x}$

Die Mittelwerte  $\bar{x}_{i,j}$  mit  $i = \text{auf/ab}$ , mittel werden wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned} \bar{x}_{\text{auf},j} &= \frac{1}{l} \cdot \sum_m (x_{m,j} - x_{m,0}) && \text{für } m = 1, 3, 5 \\ \bar{x}_{\text{ab},j} &= \frac{1}{l} \cdot \sum_m (x_{m,j} - x_{(m-1),0}) && \text{für } m = 2, 4, 6 \\ \bar{x}_{\text{mittel},j} &= \frac{\bar{x}_{\text{auf},j} + \bar{x}_{\text{ab},j}}{2} \end{aligned} \quad (28)$$

wobei die Variable  $l$  die Anzahl der Messreihen angibt.

Bei Druckmessgeräten, bei denen der Nullpunkt nicht im Kalibrierbereich enthalten ist (z. B. Absolutdrücke von 800 mbar bis 1200 mbar), entfällt die Nullpunktkorrektur bei der Mittelwertberechnung.

### 9.1.2 Abweichungsspanne $U'$

Die Abweichungsspanne setzt sich additiv aus der erweiterten Messunsicherheit ( $k = 2$ ) und dem Absolutbetrag der systematischen Abweichung zusammen. Aufgrund des systematischen Anteils wird der Abweichungsspanne als Verteilungsform die Rechteckverteilung zugewiesen. Die Abweichungsspanne ist je nach Anforderung für die Mittelwerte der Auf- bzw. Abwärtsreihen und den Mittelwert zu bestimmen:

$$\text{z. B.:} \quad U' = U + |\Delta p| \quad (29)$$

Entsprechend wird die relative Abweichungsspanne  $W'$  gebildet.

$$\text{z. B.:} \quad W' = W + \left| \frac{\Delta S}{S'} \right| \quad (30)$$

#### Anmerkung:

Siehe Fußnote 8 auf S. 21.

### 9.1.3 Konformität

Liegen die Abweichungsspannen bzw. die Übertragungskoeffizienten mit beigeordneter Messunsicherheit innerhalb der angegebenen technischen Spezifikationsgrenze, kann die Konformität nach DAkkS-DKD-5 [12] bestätigt werden. Dabei ist deren Gültigkeitsbereich anzugeben. Bei der Beurteilung auf Einhaltung der geforderten Spezifikationsgrenzen ist deren Herkunft anzugeben, z. B. herstellerspezifische Angaben laut Datenblatt, Kundenforderungen u. a.

## 9.2 Visualisierung des Kalibrierergebnisses

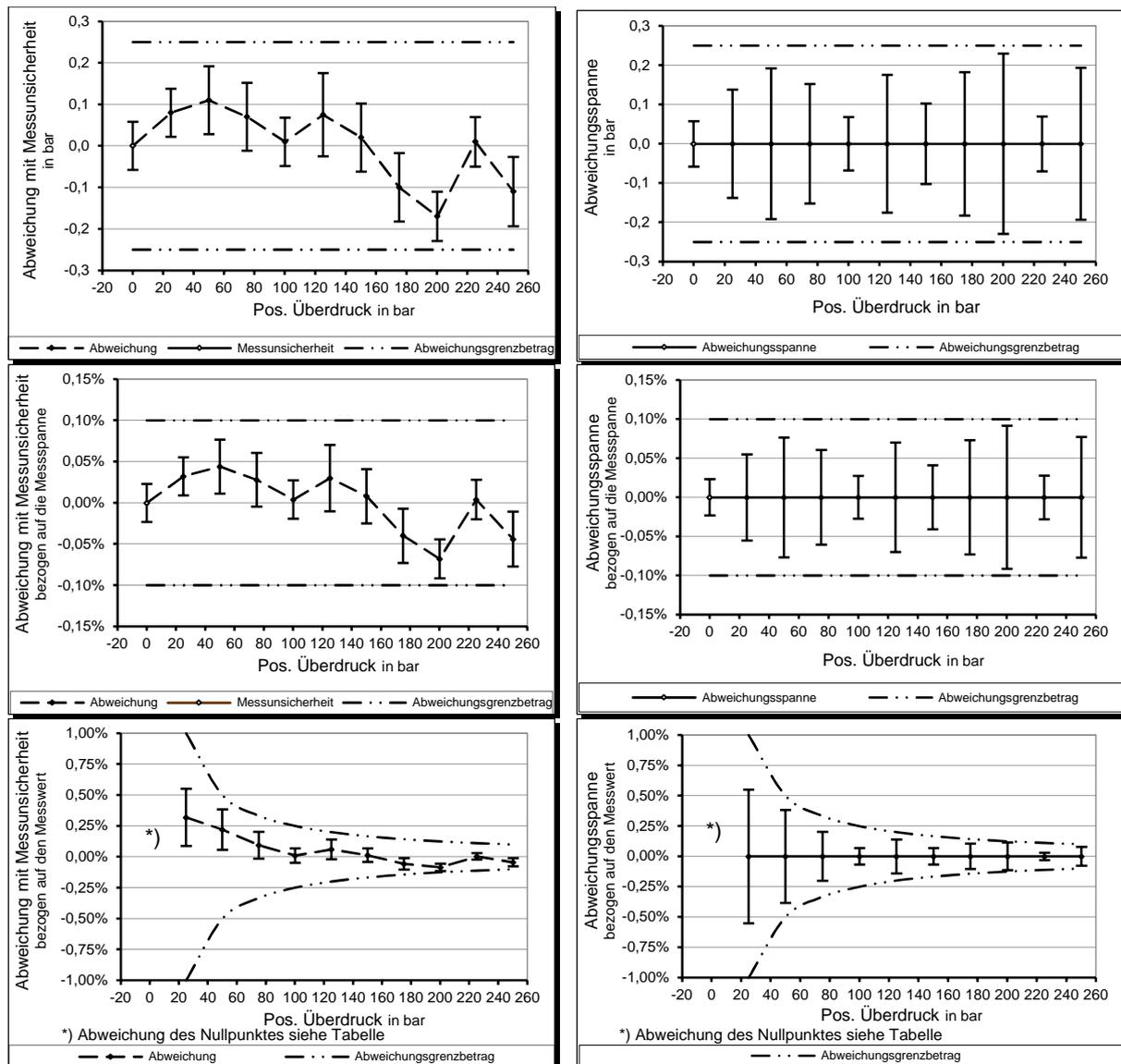
Für eine bessere Verständlichkeit und einen schnellen Überblick kann das Kalibrierergebnis auch in grafischer Form mitgeteilt werden.

### 9.2.1 Federmanometer, elektrisches Druckmessgerät

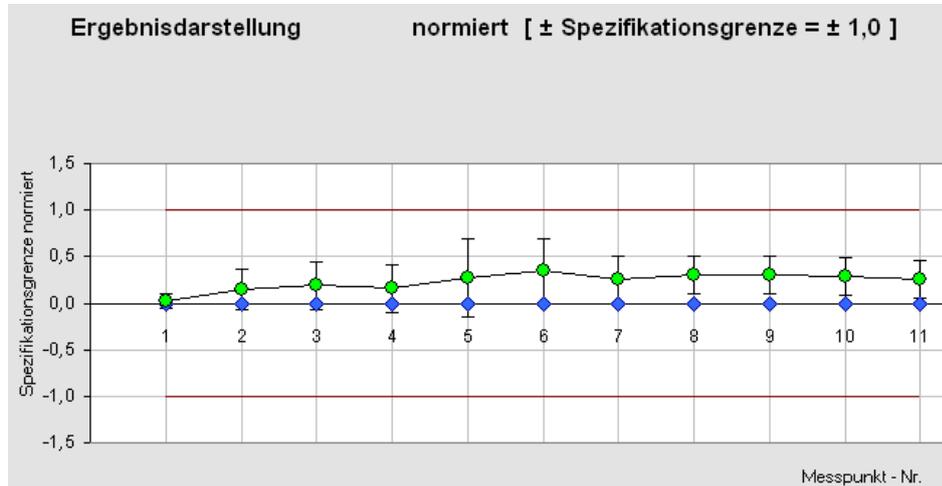
Die systematische Abweichung mit der erweiterten Messunsicherheit bzw. die sich daraus ergebende Abweichungsspanne sind im Vergleich zur Spezifikationsgrenze (d. h. Fehlergrenze) darzustellen – in der Einheit der physikalischen Größe und/oder als bezogene Größe.

Die Darstellung bezogener Kenngrößen kann dabei in der für eine Geräteart typischen Form (bezogen auf die Messspanne, bezogen auf den Messwert) erfolgen.

**Abbildung 4:** Visualisierung des Kalibrierergebnisses für ein Federmanometer bzw. ein elektrisches Druckmessgerät



Zur Unterstützung einer Konformitätsaussage können die Ergebnisse auch in normierter Form (Spezifikationsgrenze = 100 %) dargestellt werden. Die Spezifikationsgrenze kann kundenseitig vorgegeben oder vom Hersteller übernommen werden.



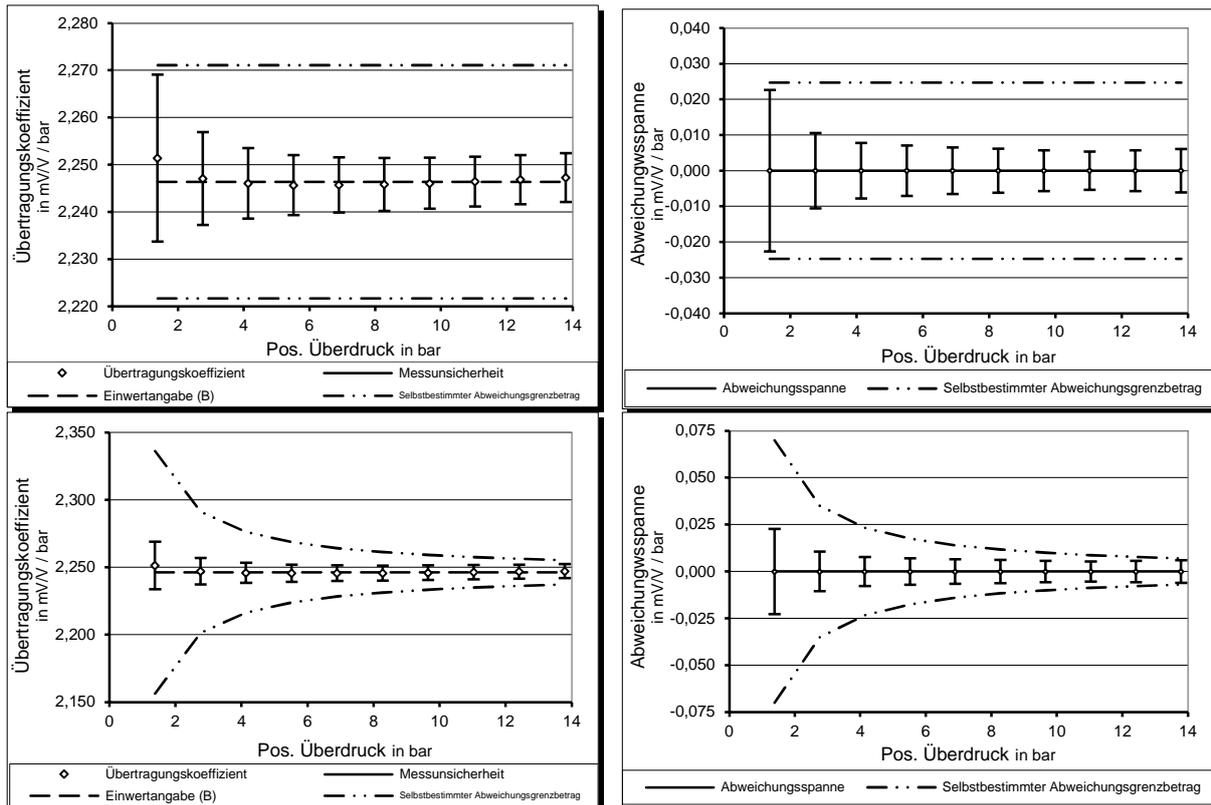
**Zeichenerklärung zum Diagramm:**

- ◆ blau = Normal (4Eck; Messwerte  $N1 \uparrow$  normiert)
- grün = Kalibriergegenstand (Kreis; Messwerte  $\mu(KG)$  normiert)
- = rot = +- Spezifikationsgrenzen (normiert auf  $\pm 1,0$ )
- ┌ schwarze = U erw. Messunsicherheit für  $k=2$  (normiert)

### 9.2.2 Druckmessumformer mit elektrischem Ausgang

Die Übertragungskoeffizienten und die beigeordneten Messunsicherheiten werden im Vergleich zu den Spezifikationsgrenzen (Fehlergrenzen nach Herstellerangabe bzw. selbstbestimmte Grenzen) dargestellt.

**Abbildung 5:** Visualisierung des Kalibrierergebnisses für einen Druckmessumformer mit elektrischem Ausgang



### 9.3 Grenzwerte für Messunsicherheitsangaben

Bei allen Kalibrierabläufen (A, B und C) werden die Messunsicherheit und die Abweichungsspanne nach Abschnitt 8 berechnet.

Unabhängig vom Ergebnis der Kalibrierung wird jedoch die Messunsicherheit

bei	Kalibrierablauf B	nicht kleiner als	0,04 %	der Messspanne
und bei	Kalibrierablauf C	nicht kleiner als	0,30 %	der Messspanne

angegeben.

Für die Angabe einer Abweichungsspanne bei einer Konformitätsaussage nach DAkkS-DKD-5 [12] darf der Wert

bei	Kalibrierablauf B	nicht kleiner als	0,06 %	der Messspanne
und bei	Kalibrierablauf C	nicht kleiner als	0,60 %	der Messspanne

angegeben werden.

Die Messunsicherheit und die Abweichungsspanne für den Kalibrierablauf A bleiben von diesen Grenzwerten unberücksichtigt. Sie werden wie tatsächlich berechnet angegeben.

	Kalibrierung von Druckmessgeräten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20201221">https://doi.org/10.7795/550.20201221</a>	DKD-R 6-1	
		Version:	03/2014
		Revision:	3
		Seite:	36 / 53

## 10 Ergänzende Regeln und Normen

Für die Kalibrierung von Druckmessgeräten sind ggf. nachstehend aufgeführten Regeln zu berücksichtigen. Eine Kalibrierung kann auch nach einzelnen Abschnitten einiger dieser Regeln vereinbart werden.

- |     |               |   |
|-----|---------------|---|
| [1] | DIN EN 837-1  | Druckmessgeräte mit Rohrfedern<br>Maße, Messtechnik, Anforderungen und Prüfung<br>Ausgabe Februar 1997  |
| [2] | DIN EN 837-3  | Druckmessgeräte mit Platten- und Kapselfedern<br>Maße, Messtechnik, Anforderungen und Prüfung<br>Ausgabe Februar 1997                             |
| [3] | DIN 16086     | Elektrische Druckmessgeräte<br>Druckaufnehmer, Druckmessumformer, Druckmessgeräte<br>Begriffe und Angaben in Datenblättern<br>Ausgabe Januar 2006 |
| [4] | DIN 43790     | Grundregeln für die Gestaltung von Strichskalen und Zeigern<br>Ausgabe Januar 1991  |
| [5] | EURAMET cg-3  | Calibration of Pressure Balances<br>Version 1.0 (03/2011)   |
| [6] | EURAMET cg-17 | Guidelines on the Calibration of Electromechanical and<br>Mechanical Manometers, EURAMET Calibration Guide No. 17<br>Version 4.0 (04/2019)        |

### Allgemein

- |      |                                  |  |
|------|----------------------------------|--|
| [7]  | DIN EN ISO/IEC<br>17025: 2018-03 | Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und<br>Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025:2017); Deutsche und<br>englische Fassung EN ISO/IEC 17025:2017.  |
| [8]  | JCGM 200:2008                    | International vocabulary of metrology – Basic and general<br>concepts and associated terms (VIM) (identisch mit ISO/IEC<br>Guide 99:2007)<br>JCGM 200:2008 Corrigendum (2010)<br><a href="https://www.bipm.org/en/publications/guides/vim.html">https://www.bipm.org/en/publications/guides/vim.html</a> |
| [9]  | VIM                              | Internationales Wörterbuch der Metrologie – Grundlegende und<br>allgemeine Begriffe und zugeordnete Benennungen (VIM) –<br>Deutsch-Englische Fassung ISO/IEC-Leitfaden 99:2007.<br>4. überarbeitete Auflage 2012, Herausgeber: DIN Deutsches Institut<br>für Normung e. V.                               |
| [10] | DIN 1319-1: 1996                 | Grundlagen der Messtechnik<br>Teil 1: Grundbegriffe  |
| [11] | DIN 1319-2: 1999                 | Grundlagen der Messtechnik<br>Teil 2: Begriffe für die Anwendung von Messgeräten   |
| [12] | DAkkS-DKD-5: 2010                | Anleitung zum Erstellen eines Kalibrierscheins<br>DAkkS, 1. Neuauflage<br>Gültig bis 30.06.2021  |
| [13] | 71 SD 0 025                      | Darstellung von Kalibrierergebnissen und die Verwendung der<br>DAkkS-Kalibriermarke, Revision 1.1, 19. September 2019  |
| [14] | ILAC-P14:01/2013                 | ILAC Policy for Uncertainty in Calibration   |

	Kalibrierung von Druckmessgeräten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20201221">https://doi.org/10.7795/550.20201221</a>	DKD-R 6-1	
		Version:	03/2014
		Revision:	3
		Seite:	37 / 53

## Messunsicherheit

- [15] JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) (identisch mit ISO/IEC Guide 98-3:2008)  
<https://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html>
- [16] JCGM 101:2008 Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" -- Propagation of distributions using a Monte Carlo method (identisch mit ISO/IEC Guide 98-3:2008/Suppl 1:2008)  
<https://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html>
- [17] JCGM 104:2009 Evaluation of measurement data – An introduction to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" and related documents (identisch mit ISO/IEC Guide 98-1:2009)  
<https://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html>
- [18] EA-4/02 M:2013 Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration – including supplement 1 and 2  
European co-operation for Accreditation  
<http://www.european-accreditation.org/publications>  
Eine deutsche Version wird von der DAkkS angeboten:  
[https://www.dakks.de/doc\\_kalibrier](https://www.dakks.de/doc_kalibrier)
- [19] DIN V ENV 13005:1999 Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen  
Beuth Verlag Berlin
- [20] DIN 1319-3:1996 Grundlagen der Messtechnik  
Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Messgröße, Messunsicherheit  
Beuth Verlag Berlin
- [21] DIN 1319-4:1999 Grundlagen der Messtechnik  
Teil 4: Auswertung von Messungen, Messunsicherheit  
Beuth Verlag Berlin

	Kalibrierung von Druckmessgeräten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20201221">https://doi.org/10.7795/550.20201221</a>	DKD-R 6-1	
		Version:	03/2014
		Revision:	3
		Seite:	38 / 53

## Literatur

- [22] Weise, K.; Wöger, W.: Messunsicherheit und Messdatenauswertung, VCH, Weinheim, 1999, ISBN 3-527-29610-7
- [23] Adunka, F.: Messunsicherheiten – Theorie und Praxis, Vulkan-Verlag, Essen 2007, ISBN 978-3-8027-2205-9
- [24] Themenschwerpunkt Messunsicherheit, Sonderdruck aus Heft 3 und Heft 4 der PTB-Mitteilungen 111 (2001)
- [25] VDI-Berichte 1805, 1867, 1947 u. Tagungsband 2008: Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen, VDI/VDE-Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik, Tagungen:  
20.-21.11.2003 und 30.11.-01.12.2004 in Oberhof/Thüringen  
14.11.-15.11.2006 und 12.-13.11.2008 in Erfurt  
VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 2003/2004/2006 und VDI Wissensforum 2008
- [26] Themenhefte Messunsicherheit: tm Technisches Messen, 2/2004 und 5/2005

## Anhang A Ermittlung der Messunsicherheit, die den Druckwerten des Kolbenmanometers unter Anwendungsbedingungen beizuordnen ist<sup>12</sup>

Die Druckwerte des Kolbenmanometers werden auf Grundlage der Angaben des aktuellen Kalibrierscheins (z. B. der PTB) ermittelt. Die beigeordnete erweiterte Messunsicherheit  $U_{\text{Normal,Std}}$  wird durch Kombination der Kalibrierscheinangabe mit dem aus der Historie abgeleiteten Langzeitverhalten bestimmt. Beim Einsatz unter Anwendungsbedingungen sind an den Werten bezüglich der relevanten Einflussgrößen Korrekturen anzubringen, denen wiederum eine Messunsicherheit beizuordnen ist.

### Modell der Messung<sup>13</sup>:

$$p_e = \frac{g \cdot \sum_i m_i \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{m_i}}\right)}{A_0 \cdot (1 + \lambda \cdot p) \cdot [1 + (\alpha + \beta) \cdot (t - t_0)]} + \Delta\rho \cdot g \cdot \Delta h \quad (31)$$

$$\Delta\rho = \rho_{Fl} - \rho_a \quad (32)$$

### Messunsicherheitsbilanz

mit den für den Druckwert des Normals wesentlichen Einflussgrößen Temperatur, thermischer Flächenausdehnungskoeffizient des Kolben-Zylinder-Systems, Fallbeschleunigung und Deformationskoeffizient. Die Empfindlichkeitskoeffizienten wurden mit den für praktische Anwendungen üblichen Näherungen und für den meist realisierten Fall  $\alpha = \beta$  berechnet.

**Tabelle A1:** Teil-Messunsicherheitsbilanz für die Korrektur der Druckwerte des Kolbenmanometers

Größe	Bester Schätzwert	Halbweite	Wahrscheinlichkeitsverteilung	Teiler	Standardmessunsicherheit	Empfindlichkeitskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Einheit
$X_i$	$x_i$	$a$	$g_{X_i}(\xi_i)$		$u(x_i)$	$c_i$	$u_i(y)$	
Temperatur	$t$	$a_t$	Rechteck	$\sqrt{3}$	$u(t) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot a_t^2}$	$c_t = -2 \cdot \alpha \cdot p$	$u_t = c_t \cdot u(t)$	bar
thermischer Flächenausdehnungskoeffizient	$\alpha + \beta$	$a_\alpha$	Rechteck	$\sqrt{3}$	$u(\alpha) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot a_\alpha^2}$	$c_\alpha = -2 \cdot (t - t_0) \cdot p$	$u_\alpha = c_\alpha \cdot u(\alpha)$	bar
Fallbeschleunigung	$g$	$a_g$	Rechteck	$\sqrt{3}$	$u(g) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot a_g^2}$	$c_g = \frac{p}{g}$	$u_g = c_g \cdot u(g)$	bar
Deformationskoeffizient	$\lambda$	$a_\lambda$	Rechteck	$\sqrt{3}$	$u(\lambda) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot a_\lambda^2}$	$c_\lambda = -p^2$	$u_\lambda = c_\lambda \cdot u(\lambda)$	bar
$Y$	$y$					$u_{\text{korrt}} = \sqrt{u_t^2 + u_\alpha^2 + u_g^2 + u_\lambda^2}$		bar

<sup>12</sup> s. Fußnote <sup>6</sup> auf S. 19

<sup>13</sup> s. auch EURAMET cg-3, Appendix C [5]

**Hinweise:**

1. In Kalibrierscheinen der PTB für Kolbenmanometer wird der Beitrag der Unsicherheit des Zahlenwertes des Deformationskoeffizienten zur Unsicherheit der Druckmessung bei der Referenztemperatur i. Allg. bereits berücksichtigt.
2. Mit portablen Messgeräten ist es möglich, die lokale Fallbeschleunigung an einem bestimmten Ort mit einer relativen Unsicherheit von wenigen ppm zu messen. Wenn ein so genauer Messwert vorliegt, kann es angesichts der meist wesentlich größeren relativen Unsicherheit des Wertes der Querschnittsfläche zulässig sein, den Unsicherheitsbeitrag der Fallbeschleunigung zu vernachlässigen.
3. Bezogen auf die im Vakuum wirkende Massenkraft  $g \cdot \Sigma m_i$  ist die Auftriebskorrektur von der Größenordnung  $1,5 \cdot 10^{-4}$ . Wetterbedingt ändert sich die Luftdichte an einem Ort in der Regel um nicht mehr als 2 % entsprechend einem relativen Beitrag zur Messunsicherheit von 3 ppm ( $3 \cdot 10^{-6}$ ). Im Verhältnis zu der üblicherweise in Kalibrierscheinen angegebenen Unsicherheit der Querschnittsfläche von 50 ppm ( $50 \cdot 10^{-6}$ ) ist dieser Beitrag vernachlässigbar und rechtfertigt i. Allg. nicht den messtechnischen Aufwand zu seiner Ermittlung (vergleiche dazu die Anmerkung in Abschnitt 6 Umgebungsbedingungen).

**Messunsicherheitsbilanz**

mit den wesentlichen Einflussgrößen bei der Bestimmung des hydrostatischen Druckes aufgrund einer Höhendifferenz

**Tabelle A2:** Teil-Messunsicherheitsbilanz mit den wesentlichen Einflussgrößen bei der Bestimmung des hydrostatischen Druckes aufgrund einer Höhendifferenz

Größe	Bester Schätzwert	Halbwerte	Wahrscheinlichkeitsverteilung	Teiler	Standardmessunsicherheit	Empfindlichkeitskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Einheit
$X_i$	$x_i$	$a$	$g_{X_i}(\xi_i)$		$u(x_i)$	$c_i$	$u_i(y)$	
Dichtedifferenz	$\Delta\rho$	$a_{\rho_{Fi}}$ $a_{\rho_a}$	Rechteck	$\sqrt{3}$	$u(\Delta\rho) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot (a_{\rho_{Fi}}^2 + a_{\rho_a}^2)}$	$c_{\Delta\rho} = g \cdot \Delta h$	$u_{\Delta\rho} = c_{\Delta\rho} \cdot u(\Delta\rho)$	bar
Fallbeschleunigung	$g$	$a_g$	Rechteck	$\sqrt{3}$	$u(g) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot a_g^2}$	$c_g = \Delta\rho \cdot \Delta h$	$u_g = c_g \cdot u(g)$	bar
Höhendifferenz	$\Delta h$	$a_{\Delta h}$	Rechteck	$\sqrt{3}$	$u(\Delta h) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot a_{\Delta h}^2}$	$c_{\Delta h} = \Delta\rho \cdot g$	$u_{\Delta h} = c_{\Delta h} \cdot u(\Delta h)$	bar
$Y$	$y$					$u_{\text{korr2}} = \sqrt{u_{\Delta\rho}^2 + u_g^2 + u_{\Delta h}^2}$		bar

Erweiterte Messunsicherheit ( $k = 2$ ) für die durch ein Kolbenmanometer dargestellten Werte unter Anwendungsbedingungen:

$$U_{\text{Normal}} = k \cdot \sqrt{u_{\text{Normal,Std}}^2 + u_{\text{korr1}}^2 + u_{\text{korr2}}^2} \tag{33}$$

Zur Verdeutlichung der in Anhang A aufgeführten Unsicherheitsbeiträge werden diese in den Beispielen der Anhänge B und C in den Unsicherheitsbilanzen einzeln berechnet.

**Hinweis:**

Neben den hier als Beispiel angeführten Korrekturen sind bei Bedarf weitere Korrekturen und damit verbundene Beiträge zur Messunsicherheit zu berücksichtigen, z. B. die Unsicherheit der Restgasdruckmessung bei Absolutdruck-Kolbenmanometern oder die Druckabhängigkeit der Dichte des Druckmediums.

	Kalibrierung von Druckmessgeräten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20201221">https://doi.org/10.7795/550.20201221</a>	DKD-R 6-1	
		Version:	03/2014
		Revision:	3
		Seite:	41 / 53

## Anhang B Beispiel Messunsicherheitsbilanz für die Kalibrierung eines Federmanometers

Kalibrieraufwand nach Kalibrierablauf C

Angabe des Mittelwertes  $\bar{p}$  mit Messabweichung  $\Delta p$  und Umkehrspanne  $h$

### Kalibriergegenstand

Überdruckmessgerät mit elastischem Messglied (Federmanometer)

Messbereich : 0 bar ... 60 bar

Genauigkeitsangabe des Herstellers : DIN KI. 1,0

Skalenteilungswert : 0,5 bar (mit Fünftelschätzung)

### Normalgerät

Kolbenmanometer

Erw. Messunsicherheit :  $1,0 \cdot 10^{-4} \cdot p$ , jedoch nicht kleiner als 0,40 mbar  
(Kalibrierscheinangabe unter Standardbedingungen  
inklusive Langzeitverhalten aus der Historie)

Zur Korrektur der vom Normalgerät dargestellten Drücke wurden folgende Daten benutzt  
(Berechnung nach Anhang A):

$t$	: 21,6 °C; $\pm 1,0$ °C <sup>14</sup>
$t_0$	: 20 °C
$\alpha + \beta$	: $22,0 \cdot 10^{-6}$ K <sup>-1</sup> ; $\pm 1,1 \cdot 10^{-6}$ K <sup>-1</sup> <sup>14</sup>
$g$	: 9,812533 m/s <sup>2</sup> ; $\pm 0,000020$ m/s <sup>2</sup> <sup>14</sup>
$\lambda$	: $2,00 \cdot 10^{-7}$ bar <sup>-1</sup> ; $\pm 0,70 \cdot 10^{-7}$ bar <sup>-1</sup> <sup>14</sup>

### Kalibrierbedingungen

Druckmedium : nachgereinigter Stickstoff

$\rho_{Fl}(20$  °C, 1 bar) : 1,15 kg/m<sup>3</sup>

$\rho_a(20$  °C, 1 bar, 35 % r.F.) : 1,19 kg/m<sup>3</sup>

$\Delta h$  : 0,0000 m;  $\pm 0,0050$  m <sup>14</sup>

$t_{amb}$  : 21,6 °C;  $\pm 1,0$  °C <sup>14</sup>

$p_{amb}$  : 990,0 mbar;  $\pm 1,0$  mbar <sup>14</sup>

<sup>14</sup> Angaben hinter dem Semikolon: halbe Weite  $a$  der Verteilung zu Ober- und Untergrenze  $a_+$  und  $a_-$  laut 8.2.4

**Tabelle B1:** Ergebnis

<b>Druck</b> in Höhe der Referenzebene des Kalibrier- gegenstandes  $p_{Normal}$	<b>Ablesung am  Kalibriergegenstand</b>  $p_{Arz}$		<b>Mittelwert</b>  $\bar{p}$  (M1+M2)/2	<b>Messab-  weichung</b>  $\Delta p$  $\bar{p} - p_{Normal}$	<b>Umkehr-  spanne</b>  $h$   M2-M1	<b>Erweiterte  Messun-  sicherheit</b> ( $k = 2$ )  $U^*$
	M1 (auf)	M2 (ab)				
bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar
0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,12
12,02	12,1	12,2	12,15	0,13	0,10	0,13
24,03	24,2	24,2	24,20	0,17	0,00	0,12
36,04	36,1	36,2	36,15	0,11	0,10	0,13
48,04	48,1	48,1	48,10	0,06	0,00	0,12
60,05	60,0	60,1	60,05	0,00	0,10	0,13

\* Die angegebenen erweiterten Messunsicherheiten entsprechen den nach Tabelle B2 berechneten Werten. Im Kalibrierschein ist allerdings aufgrund des verwendeten Kalibrierablaufs C eine erweiterte Messunsicherheit von nicht kleiner als 0,30 % der Messspanne anzugeben, d. h.  $U = 0,30 \% \cdot 60 \text{ bar} = 0,18 \text{ bar}$ .

**Tabelle B2:** Messunsicherheitsbilanz für die Belastungsstufe  $p = 60,05$  bar

Größe	Bester Schätzwert	Weite der Verteilung	Teiler	Standardmessunsicherheit	Empfindlichkeitskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Varianz
$X_i$	$x_i$	$2a$		$u(x_i)$	$c_i$	$u_i(y)$	$u_i^2(y)$
						bar	bar <sup>2</sup>
$p_{\text{Normal}}$	60,05 bar			$3,00 \cdot 10^{-3}$ bar *	-1	$3,00 \cdot 10^{-3}$	$9,02 \cdot 10^{-6}$
$t$	21,6 °C	2 K	$2\sqrt{3}$	$5,77 \cdot 10^{-1}$ K	$-1,32 \cdot 10^{-3}$ bar/K	$7,63 \cdot 10^{-4}$	$5,82 \cdot 10^{-7}$
$\alpha + \beta$	$22 \cdot 10^{-6}$ /K	$2,2 \cdot 10^{-6}$ /K	$2\sqrt{3}$	$6,35 \cdot 10^{-7}$ /K	-192 K·bar	$1,22 \cdot 10^{-4}$	$1,49 \cdot 10^{-8}$
$g$	9,812533 m/s <sup>2</sup>	0,000040 m/s <sup>2</sup>	$2\sqrt{3}$	$1,15 \cdot 10^{-5}$ m/s <sup>2</sup>	6,12 bar·s <sup>2</sup> /m	$7,07 \cdot 10^{-5}$	$4,99 \cdot 10^{-9}$
$\lambda$	$2,0 \cdot 10^{-7}$ / bar	$1,4 \cdot 10^{-7}$ / bar	$2\sqrt{3}$	$4,04 \cdot 10^{-8}$ / bar	$-3,61 \cdot 10^3$ bar <sup>2</sup>	$1,46 \cdot 10^{-4}$	$2,12 \cdot 10^{-8}$
$\Delta h$ **	0	$1,0 \cdot 10^{-2}$ m	$2\sqrt{3}$	$2,89 \cdot 10^{-3}$ m	$6,74 \cdot 10^{-3}$ bar/m	$1,94 \cdot 10^{-5}$	$3,78 \cdot 10^{-10}$
$p_{\text{Anz}}$	60,05 bar	0,20 bar	$2\sqrt{3}$	$5,77 \cdot 10^{-2}$ bar	1	$5,77 \cdot 10^{-2}$	$3,33 \cdot 10^{-3}$
$\delta p_{\text{Nullpunktav.}}$	0	0,00 bar	$2\sqrt{3}$	0	1	0	0
$\delta p_{\text{Wiederholpräz.}}$	0	0,00 bar	$2\sqrt{3}$	0	1	0	0
$\delta p_{\text{Umkehrspanne}}$	0	0,10 bar	$2\sqrt{3}$	$2,89 \cdot 10^{-2}$ bar	1	$2,89 \cdot 10^{-2}$	$8,33 \cdot 10^{-4}$
$\Delta p$	0,00 bar	Standardmessunsicherheit $u$ bzw. Varianz $u^2$				$6,46 \cdot 10^{-2}$	$\sum u_i^2 = 4,18 \cdot 10^{-3}$
$\Delta p$	0,00 bar	Erweiterte Messunsicherheit $U = k \cdot u$ ( $k = 2$ )				<b>0,13 bar</b> ***	

\* Die angegebene Standardmessunsicherheit ist hier  $u_{\text{Normal,Std}}$ . Die weiteren Messunsicherheitsbeiträge nach Anhang A sind getrennt aufgeführt.

\*\* Unter Berücksichtigung der druckabhängigen Gasdichte (Näherung)

$$\rho_{p,t} = \rho_{20^\circ\text{C}, 1\text{ bar}} \cdot \left[ \frac{p_{\text{abs}} \cdot (T + 20^\circ\text{C})}{1\text{ bar} \cdot (T + t)} \right] \quad \text{mit } T = 273,15\text{ K}$$

\*\*\* Nach Abschnitt 9.3 „Grenzwerte für Messunsicherheitsangaben“ darf bei einer Kalibrierung nach Kalibrierablauf C (Wiederhol- und Vergleichpräzision können nicht ermittelt werden) ein Wert von 0,30 % der Messspanne bei der Angabe im Kalibrierschein nicht unterschritten werden; dies entspricht einer erweiterten Messunsicherheit von  $U = 0,30\% \cdot 60\text{ bar} = 0,18\text{ bar}$ .

	<b>Kalibrierung von Druckmessgeräten</b> <a href="https://doi.org/10.7795/550.20201221">https://doi.org/10.7795/550.20201221</a>	DKD-R 6-1	
		Version:	03/2014
		Revision:	3
		Seite:	44 / 53

## Anhang C **Beispiel** **Messunsicherheitsbilanz für die Kalibrierung eines digitalen elektrischen Druckmessgerätes**

Kalibrieraufwand nach Kalibrierablauf B

Angabe des Mittelwertes  $\bar{p}$  mit Messabweichung  $\Delta p$ , Wiederholpräzision  $b'$  und Umkehrspanne  $h$

### Kalibriergegenstand

Elektrisches Absolutdruckmessgerät mit unterdrücktem Nullpunkt

Messbereich : 50 mbar ... 1550 mbar

Genauigkeitsangabe des Herstellers : 0,03 % v. M.

Auflösung : 0,001 mbar

### Normalgerät

Absolutdruck-Kolbenmanometer

Erw. Messunsicherheit :  $1,0 \cdot 10^{-4} \cdot p$ , aber nicht kleiner als 0,0050 mbar  
(Kalibrierscheinangabe unter Standardbedingungen inklusive Langzeitverhalten aus der Historie)

Zur Korrektur der vom Normalgerät dargestellten Drücke wurden folgende Daten benutzt (Berechnung nach Anhang A):

$t$	: 21,6 °C; $\pm 1,0$ °C <sup>14</sup>
$t_0$	: 20 °C
$g$	: 9,812533 m/s <sup>2</sup> ; $\pm 0,000020$ m/s <sup>2</sup> <sup>14</sup>
$\alpha + \beta$	: $22,0 \cdot 10^{-6}$ K <sup>-1</sup> ; $\pm 1,1 \cdot 10^{-6}$ K <sup>-1</sup> <sup>14</sup>
$\lambda$	: 0
$p_{\text{Normal, Restgas}}$	: (0,010 $\pm$ 0,020) mbar

### Kalibrierbedingungen

Druckmedium	: trockene Luft
$\rho_{\text{Fl}}(20$ °C, 1 bar)	: 1,19 kg/m <sup>3</sup>
$\Delta h$	: 0,0000 m; $\pm 0,0050$ m <sup>14</sup>
$t_{\text{amb}}$	: 21,6 °C; $\pm 1,0$ °C <sup>14</sup>
$p_{\text{amb}}$	: 990,0 mbar; $\pm 1,0$ mbar <sup>14</sup>

**Tabelle C1:** Ergebnis

Druck in Höhe der Referenz- ebene des Kalibrier- gegen- standes  $p_{Normal}$	Ablesung am Kalibriergegenstand			Mittelwert  $\bar{p}$  $((M1+M3)/2+M2)/2$	Messab- weichung  $\Delta p$  $\bar{p} - p_{Normal}$	Wiederhol- präzision  $b'$  $(M3-M1)$	Umkehr- spanne  $h$  $(M2-M1)$	Erw. Messun- sicher- heit $(k = 2)$  $U^*$
	M1 (auf)	$p_{Anz}$ M2 (ab)	M3 (auf)					
mbar	mbar	mbar	mbar	mbar	mbar	mbar	mbar	mbar
50,085	49,850	49,861	49,834	49,852	-0,233	0,016	0,011	0,024
130,191	129,984	130,007	129,967	129,991	-0,200	0,017	0,023	0,029
330,460	330,301	330,335	330,284	330,314	-0,146	0,017	0,034	0,045
530,731	530,616	530,654	530,600	530,631	-0,100	0,016	0,038	0,063
730,990	730,892	730,933	730,879	730,909	-0,081	0,013	0,041	0,082
931,272	931,184	931,226	931,172	931,202	-0,070	0,012	0,042	0,10
1131,138	1131,050	1131,094	1131,046	1131,071	-0,067	0,004	0,044	0,12
1331,413	1331,330	1331,359	1331,337	1331,346	-0,067	0,007	0,029	0,14
1531,673	1531,630	1531,656	1531,629	1531,643	-0,030	0,001	0,026	0,16

\* Die angegebenen erweiterten Messunsicherheiten entsprechen den nach Tabelle C2 berechneten Werten. Im Kalibrierschein ist allerdings aufgrund des verwandten Kalibrierablaufs B eine erweiterte Messunsicherheit von nicht kleiner als 0,04 % der Messspanne anzugeben, d. h.  $U = 0,04 \% \cdot 1500 \text{ mbar} = 0,60 \text{ bar}$ .

**Tabelle C2:** Messunsicherheitsbilanz für die Belastungsstufe  $p = 1531,673$  mbar

Größe	Beste Schätzwert	Weite der Verteilung	Teiler	Standardmessunsicherheit	Empfindlichkeitskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Varianz
$X_i$	$x_i$	$2a$		$u(x_i)$	$c_i$	$u_i(y)$	$u_i^2(y)$
						mbar	mbar <sup>2</sup>
$p_{\text{Normal}}$	1531,673 mbar			$7,66 \cdot 10^{-2}$ mbar*	-1	$7,66 \cdot 10^{-2}$	$5,87 \cdot 10^{-3}$
$p_{\text{Normal, Restgas}}$	0**			$1,00 \cdot 10^{-2}$ mbar	1	$1,00 \cdot 10^{-2}$	$1,00 \cdot 10^{-4}$
$t$	21,6 °C	2 K	$2\sqrt{3}$	$5,77 \cdot 10^{-1}$ K	$-3,37 \cdot 10^{-2}$ mbar/K	$1,95 \cdot 10^{-2}$	$3,78 \cdot 10^{-4}$
$\alpha + \beta$	$22,0 \cdot 10^{-6}$ K <sup>-1</sup>	$2,2 \cdot 10^{-6}$ K <sup>-1</sup>	$2\sqrt{3}$	$6,35 \cdot 10^{-7}$ /K	$-4,90 \cdot 10^3$ K·mbar	$3,11 \cdot 10^{-3}$	$9,69 \cdot 10^{-6}$
$g$	$9,812533$ m/s <sup>2</sup>	$0,000040$ m/s <sup>2</sup>	$2\sqrt{3}$	$1,15 \cdot 10^{-5}$ m/s <sup>2</sup>	156 mbar·s <sup>2</sup> /m	$1,80 \cdot 10^{-3}$	$3,25 \cdot 10^{-6}$
$\Delta h$ ***	0	$1,0 \cdot 10^{-2}$ m	$2\sqrt{3}$	$2,89 \cdot 10^{-3}$ m	$1,78 \cdot 10^{-1}$ mbar/m	$5,13 \cdot 10^{-4}$	$2,64 \cdot 10^{-7}$
$p_{\text{Anz}}$	1531,643 mbar	0,001 mbar	$2\sqrt{3}$	$2,89 \cdot 10^{-4}$ mbar	1	$2,89 \cdot 10^{-4}$	$8,33 \cdot 10^{-8}$
$\delta p_{\text{Wiederholpräz.}}$	0	0,001 mbar	$2\sqrt{3}$	$2,89 \cdot 10^{-4}$ mbar	1	$2,89 \cdot 10^{-4}$	$8,33 \cdot 10^{-8}$
$\delta p_{\text{Umkehrspanne}}$	0	0,026 mbar	$2\sqrt{3}$	$7,51 \cdot 10^{-3}$ mbar	1	$7,51 \cdot 10^{-3}$	$5,63 \cdot 10^{-5}$
$\Delta p$	-0,030 mbar	Standardmessunsicherheit $u$ bzw. Varianz $u^2$				$8,01 \cdot 10^{-2}$	$\sum u_i^2 = 6,41 \cdot 10^{-3}$
$\Delta p$	-0,030 mbar	Erweiterte Messunsicherheit $U = k \cdot u$ ( $k = 2$ )				<b>0,16 mbar ****</b>	

\* Die angegebene Standardmessunsicherheit ist hier  $u_{\text{Normal,Std}}$ . Die weiteren Messunsicherheitsbeiträge nach Anhang A sind getrennt aufgeführt.

\*\* Der Restgasdruck  $p_{\text{Normal,Restgas}}$  ist bereits in der Angabe  $p_{\text{Normal}}$  enthalten.

\*\*\* Unter Berücksichtigung der druckabhängigen Gasdichte (Näherung)

$$\rho_{p,t} = \rho_{20^\circ\text{C}, 1\text{ bar}} \cdot \left[ \frac{p_{\text{abs}} \cdot (T + 20^\circ\text{C})}{1\text{ bar} \cdot (T + t)} \right] \quad \text{mit } T = 273,15\text{ K}$$

\*\*\*\* Nach Abschnitt 9.3 „Grenzwerte für Messunsicherheitsangaben“ darf bei einer Kalibrierung nach Kalibrierablauf B ein Wert von 0,04 % der Messspanne bei der Angabe im Kalibrierschein nicht unterschritten werden; dies entspricht einer erweiterten Messunsicherheit von  $U = 0,04\% \cdot 1500\text{ mbar} = 0,60\text{ mbar}$ .

	<b>Kalibrierung von Druckmessgeräten</b> <a href="https://doi.org/10.7795/550.20201221">https://doi.org/10.7795/550.20201221</a>	DKD-R 6-1	
		Version:	03/2014
		Revision:	3
		Seite:	47 / 53

## Anhang D **Beispiel** **Messunsicherheitsbilanz für die Kalibrierung eines** **Druckmessumformers mit elektrischem Ausgang**<sup>15</sup>

Kalibrieraufwand nach Kalibrierablauf A mit zweiter Einspannung

Angabe des Mittelwertes  $\overline{A_{\text{Anz}}}$  aus Auf- und Abwärtsmessungen, der Wiederholpräzision  $b'$ , der Vergleichpräzision  $b$ , der Umkehrspanne  $h$ , des Übertragungskoeffizienten  $S$  und der Abweichung  $\Delta S$ .

### **Kalibriergegenstand**

Druckmessumformer mit elektrischem Ausgang

Messbereich : 0 bar ... 200 bar

Genauigkeitsangabe des Herstellers : 0,01 % v. E.

### **Normalgerät**

Kolbenmanometer

Erw. Messunsicherheit :  $1,0 \cdot 10^{-4} \cdot p$ , aber nicht kleiner als 1,0 mbar  
(unter Anwendungsbedingungen wie in Anhang A definiert)

### **Hilfsmessgerät**

Digitalkompensator

Anzeige in mV/V :  $A_{\text{Anz}} \equiv U_{\text{Anz}} / (G \cdot U_{\text{Sp}})$  mit  $G = 1$  und  $U(G) = 0$

Erw. Messunsicherheit  $U(A_{\text{Anz}})$  : 0,000050 mV/V  
(Kalibrierscheinangabe inklusive Langzeitverhalten aus der Historie und Auflösung der Anzeige unter Verwendung)

### **Kalibrierbedingungen**

Druckmedium : Weißöl

$\rho_{\text{Fl}}(20^\circ\text{C})$  :  $(855 \pm 40) \text{ kg/m}^3$  im Messbereich bis 200 bar

$\Delta h$  : 0,0000 m;  $\pm 0,0050 \text{ m}^{14}$

$t_{\text{amb}}$  : 20,0 °C;  $\pm 1,0 \text{ }^\circ\text{C}^{14}$

$p_{\text{amb}}$  : 990,0 mbar;  $\pm 1,0 \text{ mbar}^{14}$

<sup>15</sup> Im folgenden Beispiel wird die Messunsicherheit nach dem Produkt-/Quotientmodell gemäß Gleichung (16) mit bezogenen Werten ermittelt. Alternativ kann auch das Summe-/Differenzmodell gemäß Gleichung (8) gewählt werden, wenn die Messabweichungen des Ausgangssignals des Druckaufnehmers von den nach der Nennkennlinie berechneten Werten betrachtet werden. Dabei findet man in den Ergebnissen der Messunsicherheitsermittlungen quantitative Übereinstimmung.

**Tabelle D1:** Messdaten

Druck in Höhe der Referenz- ebene des Kalibrier- gegenstandes $p_{\text{Normal}}$	Anzeige des Digitalkompensators $A_{\text{Anz}}$					
	M1 (auf)	M2 (ab)	M3 (auf)	M4 (ab)	M5 (auf)	M6 (ab)
	mV/V	mV/V	mV/V	mV/V	mV/V	mV/V
0,000	0,00000	-0,00003	0,00000	0,00002	0,00000	-0,00002
20,010	0,20009	0,20026	0,20019	0,20033	0,20021	0,20032
40,022	0,40026	0,40063	0,40032	0,40067	0,40033	0,40064
60,033	0,60041	0,60094	0,60049	0,60097	0,60049	0,60092
80,045	0,80053	0,80118	0,80062	0,80120	0,80062	0,80110
100,056	1,00063	1,00139	1,00072	1,00135	1,00075	1,00125
120,068	1,20074	1,20149	1,20080	1,20141	1,20082	1,20132
140,079	1,40080	1,40158	1,40089	1,40150	1,40090	1,40133
160,091	1,60082	1,60157	1,60091	1,60148	1,60091	1,60126
180,102	1,80084	1,80148	1,80097	1,80135	1,80091	1,80111
200,113	2,00079	2,00100	2,00088	2,00114	2,00086	2,00087

**Tabelle D2:** Auswertung

Druck in Höhe der Referenz- ebene des Kalibrier- gegen- standes $p_{\text{Normal}}$	Ausgangs- signal Mittelwert $\overline{A_{\text{Anz}}}$ $\Sigma M_i / 6$	Nullpunkt- abweichung $f_{0,\text{rel}}$ $f_0 / \overline{A_{\text{Anz}}}$	Wiederhol- präzision $b'_{\text{rel}}$ $b'_{\text{mittel}} / \overline{A_{\text{Anz}}}$	Vergleich- präzision $b_{\text{rel}}$ $b_{\text{mittel}} / \overline{A_{\text{Anz}}}$	Umkehr- spanne $h_{\text{rel}}$ $h_{\text{mittel}} / \overline{A_{\text{Anz}}}$	Rel. erw. Mess- unsicherheit $W(p_{\text{Normal}})$ *
bar	mV/V	#	#	#	#	#
0,000	-0,00001	#	#	#	#	#
20,010	0,20023	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$7,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
40,022	0,40048	$7,5 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$8,6 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
60,033	0,60070	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$8,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
80,045	0,80088	$3,7 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$7,1 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
100,056	1,00102	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$9,0 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
120,068	1,20110	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$6,7 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
140,079	1,40117	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$6,4 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
160,091	1,60116	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
180,102	1,80111	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$7,2 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
200,113	2,00092	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$6,5 \cdot 10^{-5}$	$8,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$

\* in der Druckbezugsebene des Kalibriergegenstandes

**Tabelle D3: Ergebnis**

Druck in Höhe der Referenzebene des Kalibrier- gegenstandes $p_{\text{Normal}}$	Übertragungs- koeffizient $S$ $= \overline{A_{\text{Anz}}} / p_{\text{Normal}}$	Abweichung $\Delta S$ $= S - S'$	Rel. erw. Mess- unsicherheit $W(S)$ $= 2\sqrt{w_i^2(S)}$	Erw. Mess- unsicherheit $U(S)$ $= W(S) \cdot S$	Abweichungs- spanne $U'(S)$ $= U(S) + \Delta S$
bar	(mV/V)/bar	(mV/V)/bar	#	(mV/V)/bar	(mV/V)/bar
0,000	#	#	#	#	#
20,010	0,0100067	$5,2 \cdot 10^{-6}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$
40,022	0,0100064	$4,9 \cdot 10^{-6}$	$5,4 \cdot 10^{-4}$	$5,4 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$
60,033	0,0100062	$4,7 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$4,9 \cdot 10^{-6}$	$9,6 \cdot 10^{-6}$
80,045	0,0100053	$3,8 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	$8,2 \cdot 10^{-6}$
100,056	0,0100045	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-6}$	$7,0 \cdot 10^{-6}$
120,068	0,0100035	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$	$5,3 \cdot 10^{-6}$
140,079	0,0100027	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-6}$	$4,1 \cdot 10^{-6}$
160,091	0,0100016	$4,5 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$
180,102	0,0100005	$-1,0 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$3,1 \cdot 10^{-6}$
200,113	0,0099990	$-2,5 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$3,8 \cdot 10^{-6}$

Einwertangabe:  $S' = 0,0100015$  (mV/V)/bar

**Tabelle D4: Messunsicherheitsbilanz für die Belastungsstufe  $p = 100,056$  bar**

Größe $X_i$	Bester Schätzwert $x_i$	Weite der Verteilung $2a$	Teiler	Standard- messun- sicherheit $w(x_i)$	Exponent von $X_i$ $c_i x_i y^{-1}$	Unsic- heits- beitrag $w_i(y)$	Varianz $w_i^2(y)$
$p_{\text{Normal}}$	100,056 bar			$5,00 \cdot 10^{-5}$	-1	$5,00 \cdot 10^{-5}$	$2,50 \cdot 10^{-9}$
$A_{\text{Anz}}$	1,00102 mV/V			$2,50 \cdot 10^{-5}$	1	$2,50 \cdot 10^{-5}$	$6,24 \cdot 10^{-10}$
$K_{\text{Nullpunkt abw.}}$	1	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$2\sqrt{3}$	$8,65 \cdot 10^{-6}$	1	$8,65 \cdot 10^{-6}$	$7,50 \cdot 10^{-11}$
$K_{\text{Wiederholpräz.}}$	1	$9,0 \cdot 10^{-5}$	$2\sqrt{3}$	$2,60 \cdot 10^{-5}$	1	$2,60 \cdot 10^{-5}$	$6,75 \cdot 10^{-10}$
$K_{\text{Vergleichpräz.}}$	1	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$2\sqrt{3}$	$4,04 \cdot 10^{-5}$	1	$4,04 \cdot 10^{-5}$	$1,63 \cdot 10^{-9}$
$K_{\text{Umkehrspanne}}$	1	$6,3 \cdot 10^{-4}$	$2\sqrt{3}$	$1,82 \cdot 10^{-4}$	1	$1,82 \cdot 10^{-4}$	$3,31 \cdot 10^{-8}$
$S$	0,0100045 (mV/V)/bar	Rel. Standardmessunsicherheit $w$ bzw. Varianz $w^2$				$1,96 \cdot 10^{-4}$	$3,86 \cdot 10^{-8}$
$S$	0,0100045 (mV/V)/bar	Rel. erweiterte Messunsicherheit $W = k \cdot w$ ( $k = 2$ )				<b><math>3,9 \cdot 10^{-4}</math></b>	

Die Druckabhängigkeit der Öldichte wurde vernachlässigt.

Bei der Belastungsstufe  $p = 100,056$  bar berechnet sich die erweiterte Messunsicherheit der Bestimmung des Übertragungskoeffizienten wie folgt:

$$U(S)|_{100 \text{ bar}} = W(S) \cdot S = 3,9 \cdot 10^{-4} \cdot 0,0100045 \text{ (mV/V)/bar} = \mathbf{3,9 \cdot 10^{-6} \text{ (mV/V)/bar}}$$

Die Spezifikationsgrenze beträgt z. B.  $\pm 0,13$  % vom Übertragungskoeffizienten.

Abbildung D1: Visualisierung der Übertragungskoeffizienten

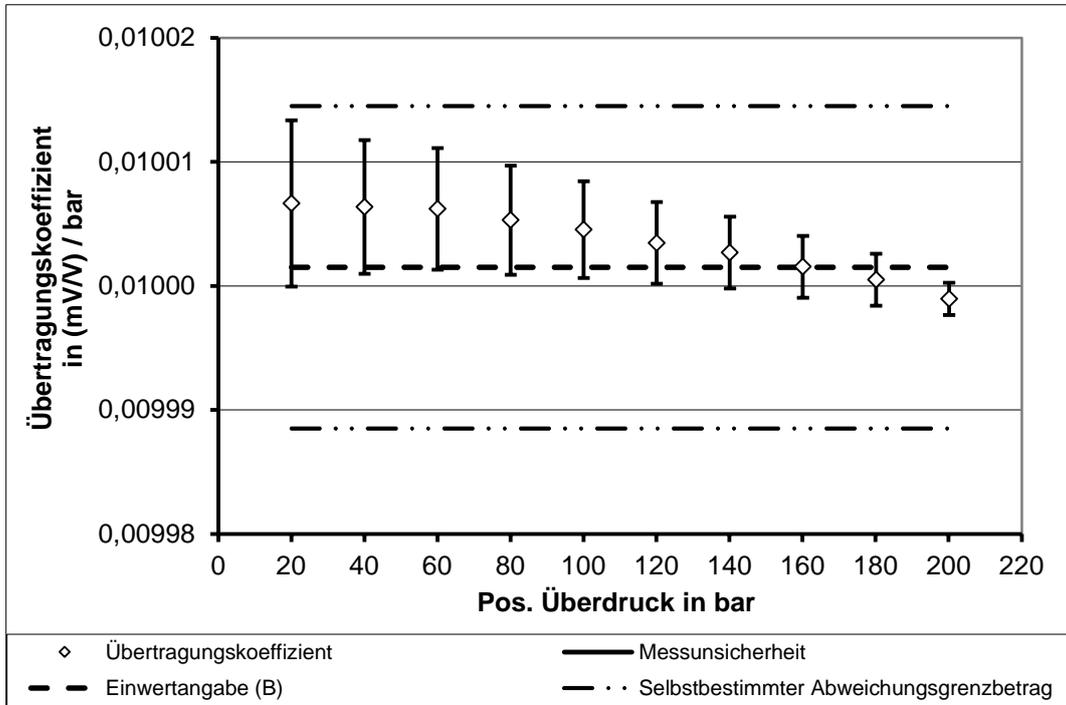
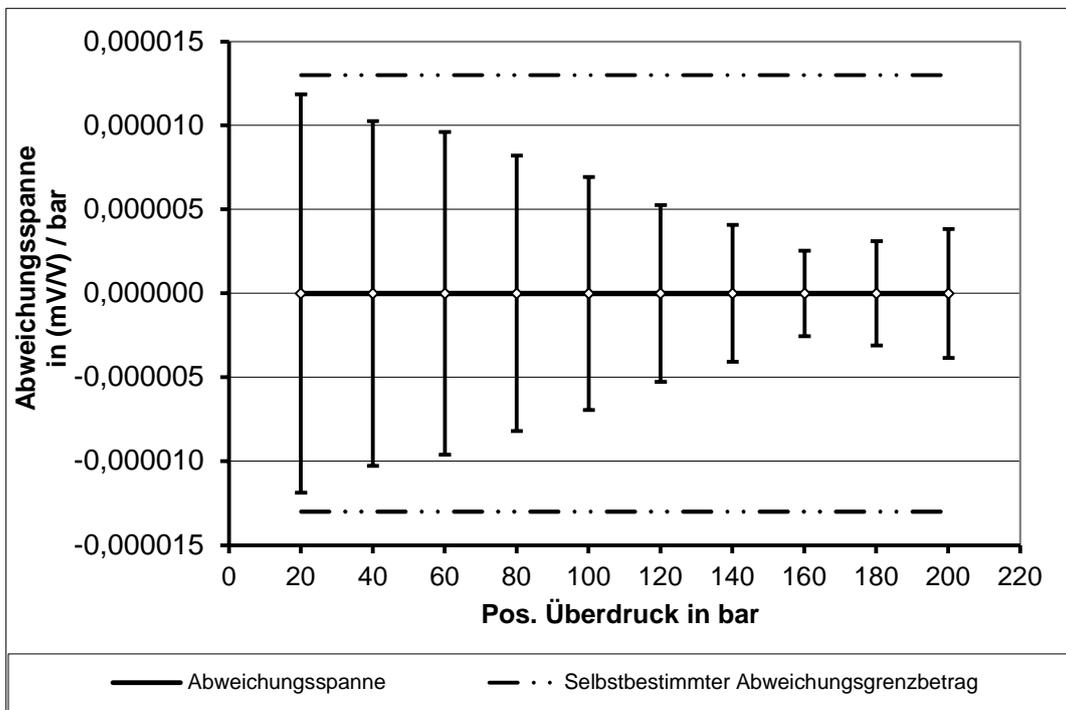


Abbildung D2: Visualisierung der Abweichungsspannen



	<b>Kalibrierung von Druckmessgeräten</b> <a href="https://doi.org/10.7795/550.20201221">https://doi.org/10.7795/550.20201221</a>	DKD-R 6-1	
		Version:	03/2014
		Revision:	3
		Seite:	51 / 53

**Anhang E (informativ) Messunsicherheiten von Bezugs- und Gebrauchsnormalen**

**Tabelle E1:** Typische Messunsicherheiten, die den Werten der Bezugsnormale beigeordnet werden können.

<b>Druckskala</b>	<b>typischer Wert der erweiterten Messunsicherheit <math>U (k = 2)</math> bezogen auf den Messwert</b>
10 <sup>-9</sup> mbar ... 10 <sup>-6</sup> mbar	10 % ... 6 %
10 <sup>-6</sup> mbar ... 10 <sup>-2</sup> mbar	4 % ... 1 %
10 <sup>-2</sup> mbar ... 10 mbar	0,5 % ... 0,3 %
10 mbar ... 50 mbar	0,03 %
50 mbar ... 1 bar	0,01 %
1 bar ... 700 bar	0,008 %
700 bar ... 2000 bar	0,012 %
2000 bar ... 10000 bar	0,07 %

**Tabelle E2:** Typische Messunsicherheiten, die den Werten der Gebrauchsnormale beigeordnet werden können.

<b>Gebrauchsnormal</b>	<b>typischer Wert der erweiterten Messunsicherheit <math>U (k = 2)</math> bezogen auf die Messspanne</b>
Schwingquarzsensoren, Quarzwendelmanometer	0,01 %
Piezoresistive Druckmessumformer	0,03 %
Dünnschicht-DMU, Dehnungsmessstreifen (DMS)	0,05 %
Kapazitive DMU, Federmanometer Kl. 0,1	0,10 %

	Kalibrierung von Druckmessgeräten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20201221">https://doi.org/10.7795/550.20201221</a>	DKD-R 6-1	
		Version:	03/2014
		Revision:	3
		Seite:	52 / 53

## Anhang F Rekalibrierfristen (Empfehlung)

Für die Festlegung und Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich. Unter üblichen Verwendungsbedingungen werden folgende Rekalibrierfristen empfohlen:

<b>Kolbenmanometer</b>	<b>5 Jahre</b>
<b>Federmanometer Klasse &gt; 0,6</b>	<b>2 Jahre</b>
<b>elektrische Druckmessgeräte &gt; 0,5 % v. S.</b>	<b>2 Jahre</b>
<b>Druckmessumformer mit elektrischem Ausgang &gt; 0,5 % v. S.</b>	<b>2 Jahre</b>
<b>Federmanometer Klasse ≤ 0,6</b>	<b>1 Jahr</b>
<b>elektrische Druckmessgeräte ≤ 0,5 % v. S.</b>	<b>1 Jahr</b>
<b>Druckmessumformer mit elektrischem Ausgang ≤ 0,5 % v. S.</b>	<b>1 Jahr</b>

Der Kalibriergegenstand ist unabhängig von diesen Fristen unter anderem dann zu rekalibrieren, wenn er einer Überlastung ausgesetzt wurde, die außerhalb seiner zulässigen Überlastgrenze lag, nachdem eine Instandsetzung des Gerätes stattgefunden hat, nach einer unsachgemäßen Handhabung, die Einfluss auf die Messunsicherheit haben kann, oder wenn sonstige Gründe dafürsprechen.



Herausgeber:

**Physikalisch-Technische Bundesanstalt**  
Deutscher Kalibrierdienst  
Bundesallee 100  
38116 Braunschweig

[www.dkd.eu](http://www.dkd.eu)  
[www.ptb.de](http://www.ptb.de)